

工学博士学位论文

基于雕塑实体的几何造型核心  
关键技术的研究与实现

作者：唐敏

导师：何志均教授 董金祥教授

专业：计算机应用

系别：浙江大学计算机系

一九九九年八月

Research and Implementation of Key Technology  
in Geometric Kernel Based on Sculptured Model

By

Min Tang

A Dissertation Submitted to

The Graduated School of Zhejiang University

in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Doctor of Engineering

Dissertation Supervisor :

Professor Zhijun He and Professor Jinxiang Dong

Department of Computer Science

Zhejiang University

August, 1999

## 摘要

对于参数化特征造型系统的几何核心的研究，一直是构造成功计算机辅助设计（CAD）系统的关键技术。关于这方面的研究涉及到计算机辅助几何设计（CAGD）、实体造型、曲面造型、特征造型、分布式计算等内容，本文详细讨论了在 GS-CAD 系统中基于雕塑实体模型的几何核心的一些关键算法。

本文成功地将遗传算法与跟踪法结合而提出了一种新的曲面求交算法。该算法通过将遗传算法与局部搜索策略相结合来提高演化效率，并充分利用了遗传算法的全局搜索能力和内在并行性，以及跟踪法的局部快速收敛性，使系统可以进行稳定可靠的交线计算，并得到正确的交线拓扑结构。在此算法的基础上，本文又采用了遗传算法与模拟退火算法结合的方法对算法进行了扩充，设计了一种基于退火遗传算法的曲面求交算法。新算法不仅可以处理非退化情况下的曲面求交，并且对于常规算法中难以克服的拓扑连接错误、多分支奇异点、局部区域重叠等情况都可以正确的进行处理。文中给出了详细的算法实例分析。

本文给出了一个雕塑实体布尔操作的实现算法。在保证效率和精确性的同时确保鲁棒性是算法的目标。雕塑实体模型通过裁剪曲面片和半边数据结构来表达几何和拓扑信息。结合前面提出的基于遗传算法的曲面求交算法，本文采用了层次求交和交线跟踪的方法，来保证曲面片分割和区域分类的一致性，从而克服了实践中常见的退化情况。在该算法的基础上，本文也给出了扩展到非正则模型的布尔操作算法。

为了在某些限时操作中得到实时交互的速度，在上面的雕塑实体布尔操作的基础上，本文进一步提出了一个雕塑实体模型布尔操作的分布式并行算法。本文在算法的各个阶段抽取并行性，并针对原串行算法中的拓扑相关性，在相关性和并行性间采取了折衷的策略，将其划分为并行任务，对于不同的并行任务采用了不同的任务均衡手段，并使算法的具有较强的容错性。实验结果显示该算法获得了理想的加速比，对于复杂雕塑实体的造型操作平均可在 3-4 秒完成，可以满足实时交互的需要。

为了实时计算雕塑实体的重量、体积、重心等几何物性，本文给出了一个分布式的雕塑实体物性计算算法。按照上面提出的分布式算法的模式，本文将物性计算任务并行化，使得造型系统的计算性能大幅提高。

在前面两个并行算法的基础上，本文对于造型系统中并行计算的模式提出了

新的扩展,提出了一种基于多 Agent 的协作模型,并在原型系统中实现了这种协作模型,对于上面提到的操作的计算任务进行了并行处理。

作为一个参数化特征造型系统的几何核心,上面的算法都已经在 Windows/NT 平台上的特征造型系统 GS-CAD 中实现,并已经通过了大量的造型实例的测试。在 GS-CAD 系统中,为了增强造型系统的表达能力,采用了统一表示,实现了线框、曲面、实体模型的统一表示和操作。GS-CAD 系统作为一个成熟的商品化 CAD 软件,分为核心层、工具层、通用应用层和专用应用层,各功能模块都已经得到了实现。

**关键词:** 遗传算法, 退火算法, 雕塑实体, 曲面求交, 布尔操作, 分布式处理, 物性计算, 负载均衡, 多Agent, 统一模型, 特征造型

## Abstract

Research on geometric kernel of the feature-based parametric modeling system is one of the most important technologies for building a successful CAD system. The area is related with some other fields such as CAGD, solid modeling, surface modeling, feature based modeling, distributed computation, etc. Some algorithms used in the kernel of GS-CAD is discussed in detail here.

A new algorithm for surface intersection is presented in this paper. We integrate genetic algorithm and marching method in the new algorithm to solve the surface intersection problem. By combining genetic algorithm with local searching method the efficiency of evolution is greatly improved. By fully utilizing the global searching ability and instinct attribute for parallel computation of genetic algorithm and the local rapid convergency of marching method, the algorithm can compute the intersection robustly and generate the topology of intersection curves correctly. Based on the new algorithm, we use a hybrid algorithm of genetic algorithm and simulated anneal algorithm to improve it. The algorithm can handle degenerate conditions of surface intersection, and the situations such as incorrect topology connection, singular point with multi-branches, local overlapped area, which are difficult to handle by conventional methods. Detail experimental data of some frequently arisen conditions in practices are presented in the paper.

We also present an algorithm for Boolean operation of sculptured models. Accuracy, efficiency and robustness is the main considerations. The solid model is represented with trimmed parametric patches and half-edge data structure. Based on the surface intersection algorithm above, hierarchy intersection is applied for unified classification, and for tracing the intersection curve to overcome degenerate cases that occur frequently in practice. We also extend it to Boolean operations for non-manifold models.

To fulfill the demand of some time-critical operations, we presented a distributed algorithm for Boolean operations of sculptured solids. The algorithm exploits the parallelism at all stages, and makes a good compromise with the relevancy of the topological entities. Different load-balancing strategy is used according to different

distribute tasks. A good degree of parallel computation can be obtained from the experimental data. The algorithm is able to interactively evaluate the boundaries of Boolean operations of complex sculptured solid in average 3-4 seconds.

To accelerate the mass property computation of sculptured solids, we presented a distributed algorithm for it. The algorithm exploits parallelism at all stages. And a dynamic load-balancing strategy is used. The algorithm have been implemented in a heterogeneous LAN which is composed of 10 PentiumII/350 PCs and 5 SGI O2 workstations. A good degree of parallel computation can be obtained from the experimental data. The algorithm is able to interactively evaluate mass properties of complex sculptured solid in average 1 seconds.

To improve the computation efficiency of a computer pack, we present an architecture for distributed system based on multi-Agent model as an extension of the two distributed algorithm mentioned above. The new architecture has been used in our system, and applied in many complex operations.

As the geometric kernel of a feature based parametric modeling system, all algorithms presented in this thesis have been implemented and tested in GS-CAD, a feature based parametric modeling system built on Windows/NT platform. To enhance the modeling ability of GS-CAD, we employ an uniformed representation of wire-frame model, surface model, solid model, and feature model. As a successful commercial CAD software, GS-CAD is composed of kernel layer, toolkit layer, general application layer, and special application layer. All function modules of GS-CAD have been implemented.

**Keywords:** Genetic Algorithm, Simulated Anneal Algorithm, Sculptured Solid, Surface Intersection, Boolean Operation, Distributed Computation, Mass Property, Load Balancing, Multi-agent, Uniformed Representation, Feature Based Modeling

# 目录

第一章 序言 .....	1
第一节 CAD发展回顾 .....	1
1、 CAD技术的概况 .....	1
2、 CAD技术的发展过程 .....	2
第二节 雕塑实体造型的研究现状 .....	8
第三节 论文主要工作 .....	11
第四节 章节组织 .....	12
第二章 雕塑实体表示与背景简介 .....	15
第一节 引言 .....	15
第二节 雕塑实体模型表示 .....	16
第三节 雕塑实体的基本拓扑构造算子 .....	17
1、 记号和约定 .....	18
2、 骨架算子: MVFS和KVFS .....	18
3、 局部操作: MEV、KEV、MEF和KEF .....	18
4、 总体操作: KFMRH和MFKRH .....	20
第四节 交线表示 .....	21
第五节 雕塑实体布尔操作算法概述 .....	22
第六节 遗传算法简介 .....	24
1、 引言 .....	24
2、 遗传算法的特点 .....	26
第三章 基于遗传算法的曲面求交 .....	29

第一节 引言.....	29
第二节 基于遗传算法的曲面求交.....	30
1、 输入条件.....	33
2、 输出结果.....	33
3、 编码表示.....	33
4、 初始化工作.....	33
5、 适应性度量.....	34
6、 选择策略.....	34
7、 控制参数选取.....	35
8、 演化算子设计.....	35
9、 算法终止条件.....	36
第三节 杂交算子.....	36
第四节 局部跟踪策略.....	37
第五节 理论基础和算法收敛性.....	38
第六节 基于遗传算法和模拟退火的混合算法的曲面求交.....	39
1、 模拟退火算法概述.....	39
2、 遗传算法和模拟退火的混合算法.....	41
3、 基于退火遗传算法的曲面求交.....	42
第七节 退化情况处理.....	43
第八节 实例分析.....	45
1、 曲面和平面求交.....	45
2、 曲面求交I——多分支开环.....	46
3、 曲面求交II——存在内环.....	48
4、 退化情况I——多分支奇异点.....	49
5、 退化情况II——曲面局部重叠.....	51
第九节 结论.....	52
<b>第四章 雕塑实体的布尔操作算法.....</b>	<b>53</b>

第一节 引言.....	53
第二节 相交检测.....	54
第三节 层次求交.....	55
第四节 交线跟踪分割.....	56
第五节 多边形三角化算法.....	58
第六节 裁剪曲面求交.....	59
第七节 区域分类和退化情况处理.....	60
第八节 算法实现.....	61
第九节 非正则模型推广.....	61
第十节 结论.....	65
<b>第五章 分布式雕塑实体布尔操作.....</b>	<b>67</b>
第一节 引言.....	67
第二节 算法概述.....	68
第三节 并行处理技术.....	72
1、 拓扑相关性.....	72
2、 任务均衡策略.....	74
3、 算法容错性.....	75
第四节 系统实现.....	76
第五节 实验数据与结论.....	76
1、 实验分析.....	76
2、 结论.....	79
<b>第六章 雕塑实体分布式物性计算.....</b>	<b>81</b>

第一节 引言.....	81
第二节 模型表示.....	81
第三节 算法概述.....	82
1、 面积计算.....	82
2、 整体性质计算.....	83
3、 并行算法.....	85
第四节 任务均衡策略.....	86
第五节 系统实现.....	87
第六节 实验数据与结论.....	87
1、 实验数据.....	87
2、 结论.....	87
第七节 多机集群模式.....	88
<b>第七章 统一表示下的特征造型系统.....</b>	<b>91</b>
第一节 引言.....	91
第二节 GSCAD的技术目标.....	92
第三节 线框、曲面、实体、特征模型的统一表示.....	97
第四节 系统体系结构和组成.....	99
第五节 自顶向下的设计过程的实现.....	107
第六节 系统的可集成性的实现.....	109
第七节 结论.....	110
<b>第八章 结论和未来工作.....</b>	<b>111</b>
第一节 论文的总结.....	111

第二节 今后展望.....	112
参考文献 .....	115
附录 在读期间所发表论文与科研情况 .....	129
致谢.....	131

# 第一章 序言

## 第一节 CAD 发展回顾

### 1、CAD 技术的概况

计算机辅助设计（CAD）技术是作为一门应用学科而产生和发展起来的，是计算机应用的一大分支，其作用是帮助设计人员进行工程或产品设计。CAD 技术产生于 50 年代，现已达到实用并趋于成熟。

关于 CAD 的确切定义，科学家与工程师们众说不一。美国 MIT 伺服机构实验室的 D.T.Ross 提出：“CAD 系统的目的，是把设计者与计算机结合为一个问题求解组，使较之各自单独工作时，更有效地达到解决问题的目的。”

1972 年 10 月，IFIP（国际信息处理联合会）在荷兰召开了“关于 CAD 原理的工作会议”。在会议上，一致通过了 CAD 的标准定义：“CAD 是一种技术，其中人与机器结合为一个问题求解组，紧密配合各自所长，从而使其工作优于每一方，并为应用多学科的方法的综合性协作提供可能。”

由于 CAD 技术将计算机高速而准确的计算能力、大容量存储和处理数据的能力与人的逻辑判断、综合分析能力以及创造性思维结合起来，从而产生了巨大的威力，应用范围极广，经济效益显著；二十多年来，得到了突飞猛进的发展。目前，在发达国家已经形成了关于计算机辅助技术的研究、开发、制造、销售以及咨询服务的新产业。

在美国，率先应用 CAD/CAM 技术的是飞机制造、汽车制造等大型企业。目前，这类企业无一例外地全部应用了这一技术。大规模集成电路的出现，使 CAD 成为这一领域中不可缺少的设计手段。此外，大约 50% 的机械行业、30% 的建筑设计事务所也应用了 CAD 技术。在法国，汽车、服装、建筑等行业也都应用了 CAD 技术。据美国的统计数据，采用 CAD 技术后，大规模集成电路的设计效率平均提高 18 倍；机械产品的设计效率平均提高 5 倍；建筑设计的效率提高 3 倍；编辑出版的效率提高 4.4 倍。发达国家的经验表明，采用 CAD/CAM 技术可以显著地缩短设计周期，提高设计质量，减少错误，降低成本，提高劳动生产率。

在我国，CAD 技术的研究是从七十年代初期开始的，当时，主要的研究内

容是计算机辅助几何设计和计算机辅助绘图，主要应用于船体放样。进入八十年代后，这一领域得到了较快的发展，特别是近几年，涌现了许多拥有自主知识产权的 CAD 系统软件。但是，总的说来，我国 CAD 技术的应用还处于起步阶段，和发达国家相比仍有较大的差距。

信息产业近年来作为新兴的高新技术产业正在国内迅速崛起，特别是软件产业已经成为社会生产力的新要素，其中尤以 CAD 软件产业为代表。当前从中央到地方政府已将大力发展软件产业作为 21 世纪的重点发展方向，其中“CAD 应用工程”已被列为国家“九五”科技发展的“重中之重”。“CAD 发展年”、“1550 工程”、CIMS 重大关键技术与目标产品发展等 CAD 有关的活动方兴未艾，充分说明了 CAD 技术发展的重要性和 CAD 应用推广的迫切性。

据统计全国目前仅制造行业就有 30 多万家企业，按照宋健同志提出的 2000 年甩图板工程，企业首先必须使用 CAD 绘图软件来达到使用计算机绘制工程图纸的目的。而目前应用这一 CAD 技术完全甩掉图板或部分甩掉图板的企业仅占其中的 15%左右，其中机械行业管理骨干企业的 CAD 普及率也只有 30%，随着 CAD 技术的普及，以三维造型系统替代二维绘图软件是不可避免的趋势，因此其市场潜力巨大。同时，大量的乡镇企业、私营企业发展迅速，例如江、浙一带。目前这些企业的经济效益普遍较好，随着对 CAD 技术的认识的逐步提高，为加强企业的竞争力，这些企业对 CAD 技术的应用也日益迫切，从而形成了又一个巨大市场。

## 2、CAD 技术的发展过程

CAD 技术起步于 50 年代后期。60 年代，随着计算机软硬件技术的发展，在计算机屏幕上绘图变为可行，CAD 开始迅速发展。人们希望借助此技术来摆脱烦琐、费时、精度低的传统手工绘图。此时 CAD 技术的出发点是用传统的三视图方法来表达零件，以图纸为媒介进行技术交流，这就是二维计算机绘图技术。在 CAD 软件发展初期，CAD 的含义仅仅是 Computer Aided Drawing(or Drafting)而非现在我们经常讨论的 CAD(Computer Aided Design)的全部内容。CAD 技术以二维绘图为主要目标的算法一直持续到 70 年代末期，以后作为 CAD 技术的一个分支而相对独立、平稳地发展。早期应用较为广泛的是 CADAM 软件，近十年来占据绘图市场主导地位的是 Autodesk 公司的 AutoCAD 软件。在今天中国的 CAD 用户特别是初期用户中，二维软件仍然占有相当大的比重。

- 第一次 CAD 技术革命——“贵族化”的曲面造型系统

60年代出现的三维CAD系统只是极为简单的线框式系统。这种初期的线框造型系统只能表达基本的几何信息，不能有效表达几何数据间的拓扑关系。由于缺乏形体的表面信息，CAE及CAM均无法实现。

进入70年代，正值飞机和汽车工业的蓬勃发展时期。此间飞机和汽车制造中遇到大量的自由曲面问题，当时只能采用多截面视图、特征纬线的方式来近似表达所设计的自由曲面。由于三视图方法表达的不完整性，经常发生设计完成后，制造出来的样品与设计者所想象的有很大差异甚至完全不同的情况。设计者对自己设计的曲面形状能否满足要求也无法保证，所以还经常按比例制作油泥模型，作为设计评审或方案比较的依据。既慢且繁的制作过程大大拖延了产品研发时间，要求更新设计手段的呼声越来越高。

此时法国人提出了贝赛尔算法，使人们用计算机处理曲线及曲面问题变得可行，同时也使得法国达索飞机制造公司的开发者们，能在二维绘图系统CADAM的基础上，开发出以表面模型为特点的自由曲面建模方法，推出了三维曲面造型系统CATIA。它的出现，标志着计算机辅助设计技术从单纯模仿工程图纸的三视图模式中解放出来，首次实现以计算机完整描述产品零件的主要信息，同时也使得CAM技术的开发有了现实的基础。曲面造型系统CATIA为人类带来了第一次CAD技术革命，改变了以往只能借助油泥模型来近似表达曲面的落后的工作方式。

此时的CAD技术价格极其昂贵，而且软件商品化程度低，开发者本身就是CAD用户，彼此之间技术保密。只有少数几家受到国家财政支持的军火商，在70年代冷战时期才有条件独立开发或依托某厂商发展CAD技术。例如：

CADDM——由美国洛克希德(Lockheed)公司支持

CALMA——由美国通用电气(GE)公司支持

CV——由美国波音(Boeing)公司支持

I-DEAS——由美国国家航空及宇航局(NASA)支持

UG——由美国麦道(MD)公司开发

CATIA——由法国达索(Dassault)公司开发

这是的CAD技术主要应用在军用工业。但受此项技术的吸引，一些民用主干工业，如汽车业巨人也开始摸索开发一些曲面系统为自己服务，如：

SURF——大众汽车公司

PAGS——福特汽车公司

EUCLID——雷诺汽车公司

另外还有丰田、通用汽车公司等也开发了自己的 CAD 系统。由于无军方支持，开发经费及经验不足，其开发出来的软件商品化程度较军方支持的系统要低，功能覆盖面和软件水平亦相差较大。

曲面造型系统带来的技术革新，使汽车开发手段比旧的模式有了质的飞跃，新车型开发速度大幅度提高，许多车型的开发周期由原来的六年缩短到只需约三年。汽车工业开始大量采用 CAD 技术。80 年代初，几乎全世界所有的汽车工业和航天工业都购买过相当数量的 CATIA，其结果是 CATIA 跃居制造业 CAD 软件榜首，并且保持了许多年。最近几年，从造型理论上来说，CATIA 并没有突破性的进展，其技术本身已相对落后。达索公司公布的 1996 年营业额只有 2.68 亿美元，这并不足以使其稳居世界排名第二的位置。但其庞大用户群的巨大惯性以及由 IBM 提供的约 3 亿美元的强有力系统继承支持，使得它依然排在 CAD 行业前列。

- 第二次 CAD 技术革命——生不逢时的实体造型技术

80 年代初，CAD 系统价格依然令一般企业望而却步，这使得 CAD 技术无法拥有更广阔的市场。为使自己的产品更具特色，在有限的市场中获得更大的市场份额，以 CV、SDRC、UG 为代表的系统开始朝各自的发展方向前进。70 年代末到 80 年代初，由于计算机技术的大跨步前进，CAE、CAM 技术也开始有了较大发展。SDRC 公司在当时星球大战计划的背景下，由美国宇航局支持及合作，开发出了许多专用分析模块，用以降低巨大的太空实验费用，同时在 CAD 技术方面也进行了许多开拓；UG 则着重在曲面技术的基础上发展 CAM 技术，用以满足麦道飞机零部件的加工需求；CV 和 CALMA 则将主要精力都放在 CAD 市场份额的争夺上。

有了表面模型，CAM 的问题可以基本解决。但由于表面模型技术只能表达形体的表面信息，难以准确表达零件的其它特性，如质量、重心、惯性矩等，对 CAE 十分不利，最大的问题在于分析的前处理特别困难。基于对于 CAD/CAE 一体化技术发展的探索，SDRC 公司于 1979 年发布了世界上第一个完全基于实体造型技术的大型 CAD/CAE 软件——I-DEAS。由于实体造型技术能够精确表达零件的全部属性，在理论上有助于统一 CAD、CAE、CAM 的模型表示，给设计带来了惊人的方便性。它代表着未来 CAD 技术的发展方向。基于这样的共识，

各软件纷纷仿效，一时间实体造型技术呼声满天下。可以说，实体造型技术的普及应用标志着 CAD 发展史上的第二次技术革命。

但是新技术的发展往往是曲折和不平衡的。实体造型技术既带来了算法的改进和未来发展的希望，也带来了数据计算量的极度膨胀。在当时的硬件条件下，实体造型的计算及显示速度很慢，在实际应用中做设计显得比较勉强。由于以实体模型为前提的 CAE 本来就属于较高层次技术，普及面较窄，反映还不强烈；另外，在算法和系统效率的矛盾面前，许多赞成实体造型技术的公司并没有下大力量去开发它，而是转去攻克相对容易实现的表面模型技术。各公司的技术取向再度分道扬镳，实体造型技术因此没能迅速在整个行业全面推广开。推动了此次技术革命的 SDRC 公司与幸运之神擦肩而过，失去了一次大飞跃的机会。在以后的十年里，随着硬件性能的提高，实体造型技术又逐渐为众多 CAD 系统所采用。

在这段矛盾碰撞、技术起伏跌宕时期，CV 公司最先在曲面算法上取得突破，计算速度提高较大。由于 CV 提出了继承各种软件，为企业提供全方位解决方案的思路，并采取了将软件的运行平台向价格较低的小型机转移等有利措施，一跃成为 CAD 领域的领导者，市场份额上升到第一位，兼并了 CALMA 公司，实力迅速膨胀。

### ● 第三次 CAD 技术革命——一鸣惊人的参数化技术

正当 CV 公司业绩蒸蒸日上以及实体造型技术逐渐普及之时，CAD 技术的研究又有了重大进展。如果说在此之前的造型技术都属于无约束自由造型的话，进入 80 年代中期，CV 公司内部以高级副总裁为首的一批人提出了一种比无约束自由造型更新颖、更好的算法——参数化实体造型方法。从算法上来说，这是一种很好的设想。它主要具有以下特点：基于特征、全尺寸约束、全数据相关、尺寸驱动设计修改。

当时的参数化技术方案还处于一种发展的初级阶段，很多技术难点有待于攻克。是否马上投资发展这项技术呢？CV 内部展开了激烈的争论。由于参数化技术核心算法与以往的系统有本质差别，若采用参数化技术，必须将全部软件重新改写，投资及开发工作量必然很大。当时 CAD 技术主要应用在航空和汽车工业，这些工业中自由曲面的需求量非常大，参数化技术还不能提供解决自由曲面的有效工具（如实体曲面问题等），更何况当时 CV 的软件在市场上几乎呈供不应求之势，于是，CV 公司内部否决了参数化技术方案。

策划参数化技术的这些人在新思想无法实现时集体离开了 CV 公司,另成立了一个参数技术公司 (Parametric Technology Corp. PTC),开始研制命名为 Pro/ENGINEER 的参数化软件。早期的 Pro/ENGINEER 软件性能很低,只能完成简单的工作,但由于第一次实现了尺寸驱动零件设计修改,使人们看到了它今后将给设计者带来的方便性。

80 年代末,计算机技术迅猛发展,硬件成本大幅度下降,CAD 技术的硬件平台成本从二十几万美圆一下子降到只需几万美圆,一个更广阔的 CAD 市场完全展开,很多中小型企业也开始有能力使用 CAD 技术。由于他们设计的工作量并不大,零件形状也不复杂,更重要的是他们无钱投资大型高档软件,因此他们很自然地把目光投向了中低档的 Pro/ENGINEER 软件。了解 CAD 市场的人都知道,它的分布几乎呈金字塔型。在高端的三维系统与低端的二维绘图软件之间事实上存在一个非常大的中档市场。PTC 在起家之初即瞄准这个充满潜力的市场,在“旧时王谢堂前燕”尚未来得及“飞入寻常百姓家”之时,迎合众多中小企业上 CAD 的需求,一举进入这块市场,获得了巨大的成功。进入 90 年代,参数化技术变得比较成熟起来,充分体现出其在许多通用件、零部件设计上存在的简便易行的优势。踌躇满志的 PTC 先行挤占低端的 AutoCAD 市场,致使在几乎所有的 CAD 公司营业额都呈上升趋势的情况下,Autodesk 公司营业额却增长缓慢,市场排名连续下挫;继而 PTC 又试图进入高端 CAD 市场,与 CATIA、SDRC、CV、UG 等群雄在汽车及飞机制造业市场逐鹿。目前,PTC 在 CAD 市场份额排名上已名列前茅。可以认为,参数化技术应用主导了 CAD 发展史上的第三次技术革命。

#### ● 第四次 CAD 技术革命——更上一层楼的变量化技术

参数化技术的成功应用,使它在 90 年代前后几乎成为 CAD 业界的标准,许多软件厂商纷纷起步追赶。但是技术理论上的认可并不意味着实践上的可行性。由于 CATIA、CV、UG、EUCLID 都是原来的非参数化模型基础上开发或集成了许多其它应用软件,包括 CAM、PIPING 和 CAE 接口等,在 CAD 方面也做了许多应用模块开发;重新开发一套完全参数化的造型软件系统困难很大,因为这样做意味着必须将软件全部重新改写,何况他们在参数化技术上并没有完全解决好所有问题。因此他们采用的参数化系统基本上都是在原有模型技术的基础上进行局部、小块的修改。考虑到这种“参数化”的不完整性以及需要很长的过渡时期,CV、CATIA、UG 在推出自己的参数化技术以后,均宣传自己是采用复合建模技术,并强调复合建模技术的优越性。

这种把线框模型、曲面模型及实体模型叠加在一起的复合建模技术，并非完全基于实体，只是“主模型”技术的“雏形”，难以全面应用参数化技术。由于参数化技术和非参数化技术内核本质不同，用参数化技术造型后进入非参数化系统还要进行内部转换，才能被系统接受，而大量的转换极易导致数据丢失或其它不利条件。这样的系统由于其在参数化技术上和非参数化技术上均不具备优势，系统整体竞争力自然不高，只能依靠某些实用性模块上的特殊能力来增强竞争力。可是 30 年的 CAD 软件技术发展也给了我们这样一点启示：决定软件先进性及生命力的主要因素是软件基础技术，而非特定的应用技术。

1990 年以前 SDRC 公司已经摸索了几年参数化技术，当时也面临同样的抉择：要么它同样采用逐步修改方式，继续将其 I-DEAS 软件“参数化”下去，这样做风险小但必然导致产品的综合竞争力不高；要么就是全部改写。但是否一定要走参数化这“华山一条路”呢？积数年对参数化技术的研究经验以及对工程设计过程的深刻理解，SDRC 的开发人员发现了参数化技术尚有许多不足之处。首先，“全尺寸约束”这一硬性规定就干扰和制约着设计者创造力及想象力的发挥。全尺寸约束，即设计者在设计初期及全过程中，必须将形状和尺寸联合起来考虑，并且通过尺寸约束来控制形状，通过尺寸的改变来驱动形状的改变，一切以尺寸（即所谓的“参数”）为出发点。一旦所设计的零件形状过于复杂，面对满屏幕的尺寸，如何改变这些尺寸以达到所需要的形状就很不直观；再者，如在设计中关键形体的拓扑关系发生改变，失去了某些约束特征也会造成系统数据混乱。事实上，全约束是对设计者的一种硬性规定。

“一定要全约束吗？”“一定要以尺寸为设计的先决条件吗？”“欠约束能否将设计正确进行下去？”沿着这个思路，在对现有各种造型技术进行了充分的分析和比较以后，一个更新颖大胆的设想产生了。他们以参数化技术为蓝本，提出了一种比参数化技术更为先进的实体造型技术——变量化技术，作为今后的开发方向。SDRC 的决策者们权衡利弊，同意了这个方案，决定在公司效益正好之时，抓住机遇，从根本上解决问题，免留后患。于是，从 1990 到 1993 年，历经三年时间，投资一亿多美元，将软件全部重新改写，于 1993 年推出全新体系结构的 I-DEAS Master Series 软件。在早期出现的大型 CAD 软件中，这是唯一一家在 90 年代将软件彻底重写的厂家。

众所周知，已知全参数的方程组去顺序求解比较容易。但在欠约束的情况下，方程联立求解的数学处理和软件实现的难度是可想而知的。SDRC 攻克了这些难题，并就此形成了一整套独特的变量化造型理论及软件开发方法。在 I-DEAS

Master Series(以下简称 I-DEAS MS)软件系列中, 变量化的理念是按如下步骤一步步实现的:

I-DEAS MS 1: 用主模型技术统一数据表达, 变量化勾画草图;

I-DEAS MS 2: 变量化截面整形;

I-DEAS MS 3: 变量化方程;

I-DEAS MS 4: 变量化扫掠(曲面);

I-DEAS MS 5: 变量化三维特征, VGX;

I-DEAS MS 6: 变量化装配, PMI 等。

变量化技术既保持了参数化技术的原有优点, 同时又克服了它的许多不足之处。它的成功应用为 CAD 技术的发展提高了更大的空间和机遇。SDRC 这几年业务的快速增长, 证明了它走的这条当时看起来充满风险的研发道路是绝对正确的。事实上, I-DEAS MS1 发布时, SDRC 市场排名仅位居第九。而自那以后, SDRC 每年都要超越一、两位它的同行, 截止到去年, SDRC 的市场排名已上升至第三位。无疑, 变量化技术成就了 SDRC, 也驱动了 CAD 发展的第四次技术革命。

## 第二节 雕塑实体造型的研究现状

在现有的 CAD 系统中, 为了生成能够表达符合美学设计要求的雕塑曲面, 造型核心大都采用了将雕塑曲面和实体拓扑信息紧密结合的雕塑实体模型。

雕塑实体模型的精确求交算法是任何优秀 CAD 系统的几何核心不可或缺的部分。采用裁剪曲面进行几何描述的雕塑实体模型相对于早期 CAD 系统采用的多面体模型来说, 具有数据精确、简练的优点, 但也对操纵算法提出了更高的要求。Hoffman[Hof89]指出: “求取和表示参数曲面的交的困难阻碍了基于参数曲面片的实体造型系统的发展”。

最近几年大量的文献[Wil85, SN91, RR92, RV92, Hoh92, KM94, HMPY97, GK97]集中于讨论进行曲面求交计算, 主要方法可分为解析法、网格计算法、跟踪法、隐函数法、以及分割法。隐函数法只对支持隐式曲面表示的 CAD 系统适用, 剩下的方法可广泛用于曲面的求交, 但都存在难以解决的公差设置问题[GK97]。

本文讨论两个广义参数曲面交线的计算。当然本文的算法也可以很容易地扩

展到代数曲面和隐式曲面，设两个参数曲面分别为：

$$f(u, v) = (f_1(u, v), f_2(u, v), f_3(u, v))$$

$$g(r, s) = (g_1(r, s), g_2(r, s), g_3(r, s))$$

曲面求交过程对应于求解下面 4 个变量的 3 个联立方程：

$$\begin{cases} f_1(u, v) = g_1(r, s) \\ f_2(u, v) = g_2(r, s) \\ f_3(u, v) = g_3(r, s) \end{cases}$$

并加上限制条件： $u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$ ， $v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$ ， $r_{\min} \leq r \leq r_{\max}$ ， $s_{\min} \leq s \leq s_{\max}$ ，通常可以变换到单位参数区间，即  $u, v \in [0, 1]^2$ ， $r, s \in [0, 1]^2$ 。

解析法具有精确、高效等优点，但它仅仅适用于具有解析表达式的曲面之间求交。对于 CAD 系统中用来表示自由型曲面的有理参数曲面，如 Bezier 曲面，B-样条曲面的求交问题，则无能为力。理论上，可以将有理参数曲面转换为隐式代数表示，再应用解析法求交，但由于曲面交线的次数将高达  $4m^2n^2$  次（假设两张  $m \times n$  次参数曲面求交），从而使得解析法仅仅使用于平面和二次曲面求交。

网格算法将曲面求交问题转化为每个求交曲面多个等参数曲线之间的相交，再连接交点得到交线。网格算法最大的缺点是容易漏掉解：一些小环和孤立点，在实际中的应用很少，一般和跟踪法结合，用来求曲线分支的开始点。

分割法采用分治法处理曲面求交。求交过程是纯几何的，一般情况下可靠性高。存在的问题是难以提高求交精度，曲面分割过程中数值计算的误差积累将抵消增加分割层次的效果；当小平面的片彼此平行时，曲面可能漏交。因为 CAD 系统的精度要求很高，纯分割法很少单独使用。

跟踪法的基本思想是，当已知交线上的一点后，利用相交曲面的局部几何特性，推算下一邻近交点的近似值，并用牛顿迭代法精化。依此反复进行，直至到达曲面的边界或交线上的奇点。跟踪法是不完整的，需要预先给出每条曲线分支的开始点。开始点往往应用网格算法或分割法得到，但这些方法都不能保证得到所有的曲线分支。直到可以检测出交线环的环检测算法出现，从而使环检测算法与跟踪法的结合成为目前曲面求交的热点。尽管如此，它并不能保证交线的拓扑结构能正确得到，这依赖于曲线跟踪的方案。在这些方案中，跟踪过程从一系列初始点开始，按照一定的步长进行下一个交点的搜索，由于无法预知下一交点，系统必须采用启发式的步长设置方法避免分支跳跃、乱序

跟踪等问题。

跟踪算法由三个主要模块组成：搜寻（起点）、跟踪、排序。搜寻阶段提供跟踪的起点，必须找出交线的所有分支，并避免引起重复的跟踪过程。通常的方法包括速矢图[SM88]、子分法[BK90, Mul91]和代数法[AY97, GK97]。跟踪阶段从初始点跟踪计算出交线分支上的一系列交点。常用的跟踪方法有沿切矢方向[.Mor85,BK90]、沿圆路径[Ast88, WA99]、沿抛物线路径[Sto92]等等。排序阶段将跟踪求出的交点按正确的交线拓扑排列，如果跟踪时交点是按序求出，则排序过程很简单。

目前，环检测算法已成为曲面求交领域的一个热点[Hoh92, KM94]，它可保证交线的所有分支都被找出，从而成为曲线跟踪法的一个强有力的辅助工具。但是，尽管如此，它并不能保证交线的拓扑结构能正确得到，这依赖于曲线跟踪的方案。在这些方案中，跟踪过程从一系列初始点开始，按照一定的步长进行下一个交点的搜索，由于无法预知下一交点，系统必须采用启发式的步长设置方法，避免图 1 中所示的分支跳跃（从某分支的  $P_1$ 、 $P_2$  点跳跃到另一分支的  $P_3$ 、 $P_4$  点）、乱序跟踪（跟踪次序为  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$ 、 $P_6$ 、 $P_7$ ，与实际拓扑不符）等问题。

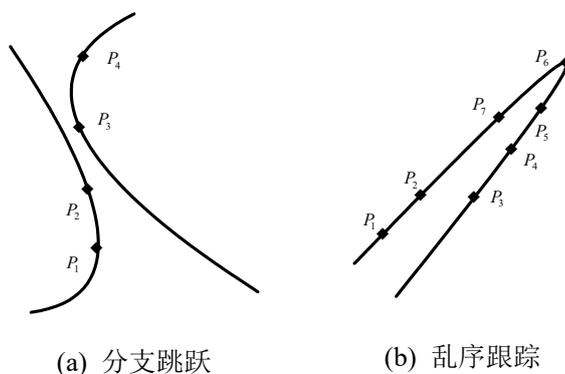


图 1 曲线跟踪法中步长不当而引发的错误情况

Krishnan[KGMM97]讨论了关于雕塑实体布尔操作研究的最新成果，在其系统中通过一个面邻接图来表达实体的拓扑信息，曲面求交采用了与环检测算法结合的曲线跟踪法，尽管[KGMM97]中采用了新的环检测算法[KM94]，但仍无法保证正确的交线拓扑结构。作者曾对其原型系统 Boole1.1 进行过详细测试，发现其稳定性存在着严重问题，在很多情况下会由于不正确的交线拓扑结构而导致操作失败。

### 第三节 论文主要工作

本文提出了一种曲面求交的新算法。本文成功地将遗传算法与跟踪法结合而设计了一种新的基于遗传算法的曲面求交算法。通过将遗传算法与局部搜索策略相结合来提高演化效率，并充分利用了遗传算法的全局搜索能力和内在并行性，以及跟踪法的局部快速收敛性，系统可以进行稳定可靠的交线计算，并得到正确的交线拓扑结构。在原算法的基础上，本文又采用了遗传算法与模拟退火算法结合的方法对算法进行了扩充，设计了一种基于退火遗传算法的曲面求交算法。新算法不仅可以处理非退化情况下的曲面求交，并且对于常规算法中难以克服的拓扑连接错误、多分支奇异点、局部区域重叠等情况都可以正确的进行处理，并在论文中给出了详细的算法实例分析。

本文给出了一个雕塑实体布尔操作的算法，在保证效率和精确性的同时确保鲁棒性是算法的目标。雕塑实体模型通过裁剪曲面片和半边数据结构来表达几何和拓扑信息。结合前面提出的基于遗传算法的曲面求交算法，本文采用了层次求交和交线跟踪的方法，来保证曲面片分割和区域分类的一致性，从而克服了实践中常见的退化情况。在该算法的基础上，本文也给出了扩展到非正则模型的布尔操作算法。

为了在某些限时操作下得到实时交互的速度，在上面的雕塑实体布尔操作的基础上，本文进一步提出了一个雕塑实体模型布尔操作的分布式并行算法。本文在算法的各个阶段抽取并行性，并针对原串行算法中的拓扑相关性，在相关性和并行性间采取了折衷的策略，将其划分为并行任务，对于不同的并行任务采用了不同的任务均衡手段，并使算法的具有较强的容错性。实验结果显示该算法获得了理想的加速比，对于复杂雕塑实体的造型操作平均可在 3-4 秒完成，可以满足实时交互的需要。

为了实时计算雕塑实体的重量、体积、重心等几何物性，本文给出了一个分布式的雕塑实体物性计算算法。按照上面提出的分布式算法的模式，本文将物性计算任务并行化，使得造型系统的计算性能大幅提高。

在前面两个并行算法的基础上，本文对于造型系统中并行计算的模式提出了新的扩展，提出了一种基于多 Agent 的协作模型，并在原型系统中实现了这种协作模型，对于上面提到的操作进行了计算任务的并行处理。

作为一个参数化特征造型系统的几何核心，上面的算法都已经在基于 NT 平台的特征造型系统 GS-CAD 中实现，并已经通过了大量的造型实例的测试。在

GS-CAD 系统中,为了增强造型系统的表达能力,本文采用了统一表示,实现了线框、曲面、实体模型的统一表示和操作。GS-CAD 系统作为一个成熟的商品化 CAD 软件,分为核心层、工具层、通用应用层和专用应用层,各功能模块都已经得到了实现。

## 第四节 章节组织

论文中以下各章如下组织:

第二章讨论了雕塑实体模型的表示方法,和对其进行拓扑操作的手段;给出了雕塑曲面交线的表示方法;概述了雕塑实体布尔操作的算法,并对布尔操作算法的各个步骤进行了解释;还给出了遗传算法的背景知识简介。

第三章提出了一种曲面求交的新算法。本文成功地将遗传算法与跟踪法结合应用于曲面求交算法中,并通过将遗传算法与局部搜索策略相结合来提高演化效率。由于充分利用了遗传算法的全局搜索能力和内在并行性,以及跟踪法的局部快速收敛性,系统可以进行稳定可靠的交线计算,并得到正确的交线拓扑结构。本文给出了算法的理论基础,并证明了算法的收敛性。在该算法的基础上,本文又提出了一种基于遗传算法和模拟退火算法的曲面求交方法,并对于曲面求交中的退化情况进行了分析和处理。本章最后是一些曲面求交实例的详细分析。

第四章在第三章提出的曲面求交新算法的基础上,给出了雕塑实体布尔操作的算法结构,主要讨论了提高鲁棒性的层次求交和交线跟踪的方法,来保证曲面片分割和区域分类的一致性,从而克服实践中常见的退化情况。该章详细讨论了其它支撑子算法:相交检测、层次求交、交线跟踪分割、裁剪曲面求交等算法的细节。该雕塑实体布尔操作算法也可以方便地扩展到非流形模型的布尔操作,在该章最后给出了算法对于非正则模型的推广,并给出了算法在雕塑实体造型系统 GS-CAD 中的实现,以及一些造型实例。

为了在某些限时操作下得到实时交互的速度,第五章提出了一个雕塑实体模型布尔操作的分布式并行算法。本文在第四章提出的雕塑实体布尔操作算法的各个阶段抽取并行性,并针对原串行算法的拓扑相关性,在相关性和并行性间采取了折中的策略,对于不同的并行任务采用了不同的任务均衡手段来获取最大并行性。在算法的设计中,本文特别强调了算法容错性,使得算法在部分物理处理机出现失败时仍能运行。该算法已经在由 10 台 PentiumII/350 微机和 5 台 SGI O2 工作站组成的异构型局域网上得到实现。实验结果显示该算法获

得了理想的加速比，对于复杂雕塑实体的造型操作平均可在 3-4 秒完成，可以满足实时交互的需要。

对于计算量较大的雕塑实体几何物性分析，第六章在第五章工作的基础上，对于几何物性计算的公式进行了分析，从中抽取出并行性，提出并实现了一个雕塑实体模型物性计算的分布式并行算法。算法在保证精确性的同时，充分发挥了并行性，大幅提高了系统的计算效率，并使算法具有较强的容错性。最后，对第五章和第六章中采取的 Supervisor-Worker-Collector 分布式模型进行了分析，提出了一种基于多 Agent 模式的分布式模型，并在 GS-CAD 系统中实现，使得异构型局域网上的多处理机可以以集群的方式解决用于布尔操作、几何物性计算、特征重建、特征识别等一系列大计算量的操作。

第七章给出了基于统一模型参数化特征造型系统 GS-CAD 的系统体系结构，特征模型、曲面模型、实体模型、线框模型的统一表示，自顶向下的设计过程的实现和系统的可集成性的实现等算法细节。

第八章对本文的工作进行了总结，并分析了存在的问题和需要进一步研究的内容。



## 第二章 雕塑实体表示与背景简介

### 第一节 引言

随着计算机辅助几何设计(CAGD)技术的不断深入,一方面单纯的曲面造型系统已经成熟,可以生成符合特定形状、连续性条件的曲面片,这种模型称为雕塑模型;另一方面,大多数实体造型系统的几何处理范围仍局限于多面体模型和二次曲面(球面、圆柱面等)。在几何造型算法和实体造型技术的集成方面,用样条曲面和它们的布尔操作来表达实体是研究的热点之一[Wil85, Hof89, RR92, RV92]。主要的瓶颈在于雕塑模型的鲁棒、高效和精确的布尔操作。Hoffman[Hof89]指出:“求取和表示参数曲面的交的困难阻碍了基于参数曲面片的实体造型系统的发展”。一条折衷的路线是用多面体模型逼近曲面,再利用已有的算法操纵多面体,但这不仅会导致数据冗大,而且使算法效率低下和不精确。

目前大量的文献[Hoh92, KM94, HMPX97, GK97]集中于讨论在几何上进行参数曲面求交计算,但保证布尔操作生成拓扑正确的实体仍是一个难点,Krishnan[KGMM97]讨论了关于雕塑实体布尔操作研究的最新成果,在其系统中通过一个面邻接图来表达实体的拓扑信息,然后根据参加布尔操作的两个实体的面邻接图生成结果实体的面邻接图,但根据其技术文档,仍只能解决平面片重叠的情况,对于曲面重叠的情况,也不能正确处理。

本文详细讨论了我们在实现雕塑实体布尔操作中,为达到鲁棒、高效和精确的目标而采用的一些技术。本文中的实体模型采用参数裁剪曲面片表示,也可以推广到代数曲面。为了得到精确的几何结果,曲面求交算法的选择是关键。曲面求交的算法主要分为解析法、子分法、步进法和区间分析法,它们在实践中都存在着难以克服的公差设置问题。我们提出了一种基于遗传算法的曲面求交算法,来克服目前常规求交算法中存在的一系列问题,详细的论述见第三章。另外,我们还采用了层次求交和交线跟踪的方法,来保证曲面片分割和区域分类的一致性,从而克服雕塑实体布尔操作中常见的退化情况,详细的论述见第四章。

在本章中,我们在第二节中讨论了雕塑实体模型的表示方法,和对其进行拓扑操作的手段,第三节中讨论了雕塑曲面交线的表示方法,第四节给出了雕塑实体布尔操作的算法概述,对于布尔操作算法的各个步骤进行了解释;由于

下一章将讨论基于遗传算法的曲面求交算法，第五节中给出了遗传算法的背景知识简介。

## 第二节 雕塑实体模型表示

雕塑实体模型的拓扑结构表达为半边数据结构[MT83]，它是雕塑实体几何信息放置的框架。图 1 中给出了雕塑实体模型，每个实体在拓扑上由面、边、顶点组成，面包含一个或多个环，环由半边构成，每条边分为一对方向相反的半边。几何信息由分别附加在面、边、顶点上的裁剪曲面、空间曲线、空间点信息组成。

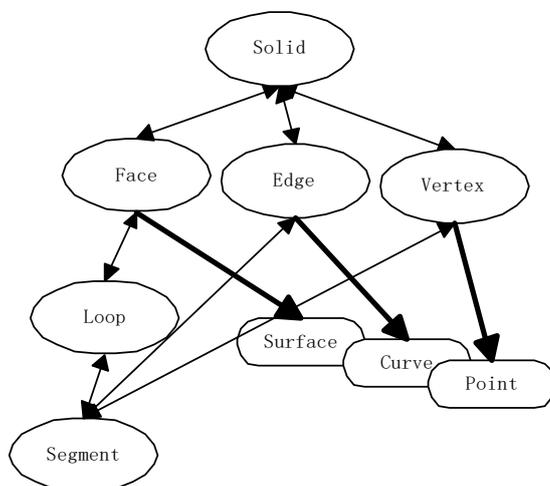


图 1 雕塑实体模型

实体模型中的面的几何信息为一张参数裁剪曲面，边的几何信息为一条  $R^3$  上的空间样条，这是为了克服两个邻接面定义在曲面参数域上的边界曲线由于误差产生裂纹，顶点的几何信息为  $R^3$  上的一个位置矢量。

为了精确表达雕塑曲面，每个体的面的几何信息通过一组参数裁剪曲面片定义，我们用张量积有理 Bezier 曲面  $F(s,t)$  表示每个曲面片[Far93]:

$$F(s,t) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{ij} V_{ij} B_i^m(s) B_j^n(t)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{ij} B_i^m(s) B_j^n(t)} \quad (0 \leq s \leq 1, 0 \leq t \leq 1)$$

其中  $V_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$  为曲面片的控制顶点， $B_i^m(s) = \binom{m}{i} s^i (1-s)^{m-i}$  为 Bernstein 多项式。 $F(s, t)$  可看成从参数空间  $(s, t)$  平面到三维空间  $R^3$  的一个映射。如图 2，裁剪曲面通过原参数空间和其上的裁剪曲线定义，裁剪曲线一般是高阶曲线，不能精确参数化，我们用参数域上的分段线性链来近似表示，得到的裁剪区域为曲面参数域上的多边形，为了表示紧凑，在一定误差范围内用样条近似高阶交线  $(c_1(u, v), c_2(u, v))$ ，这样裁剪区域就通过曲面参数域上的一组样条  $(c_1(t), c_2(t))$  定义。

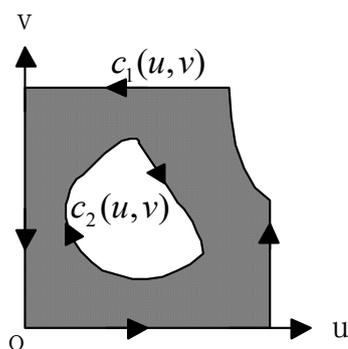


图 2 参数空间上的裁剪曲面

### 第三节 雕塑实体的基本拓扑构造算子

我们采用一组欧拉操作来操纵雕塑实体模型的拓扑结构[MT83]:

骨架操作——MVFS, KVFS,

局部操作——MEV, KEV, MEF, KEF, KEMR, MEKR

全局操作——KFMLH, MFKLH

通过确保每个操作对于实体拓扑修改的合法性来保证整个实体的拓扑合法性，即满足欧拉公式：

$$v - e + f = 2(s - h) + r$$

其中  $v, e, f, s, h, r$  分别表示一个体中顶点、边、面、体、孔和内环的个数。

拓扑算子——欧拉算子，仅需三种基本类型的操作运算：

1. 一个产生骨架平面模型的“原型”体素（“prototype primitive”）的操作。
2. 细分一个小面的边序列或一个顶点的边序列的两种局部拓扑运算。
3. 进行两个多边形（从不同的模型，或从一个模型）连接求和的一种总体拓扑运算。

## 1、 记号和约定

欧拉算子最初由 Baumgart 在翼边数据结构范围中引入[Baumgart 74, 75]。沿用过去的约定，通常用含有一定意义的助记名来表示算子，以下给出使用的名字的关键字：

M—make	V—vertex	K—kill	E—edge
H—hole	R—ring	S—split	F—face
J—join	S—solid		

## 2、 骨架算子：MVFS 和 KVFS

理论上借助于局部和总体拓扑操作，所有平面模型均可从一个单一的骨架平面模型中产生，即单一的骨架体素是足够的。

算子 MVFS 起到这种作用。它建立一个仅有一个 Face，和一个孤立 Vertex 的数据结构。其效果如图 3 所示。

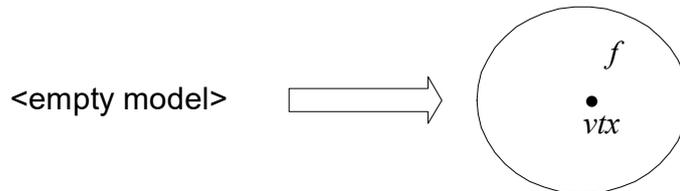


图 3 骨架算子 MVFS

## 3、 局部操作：MEV、KEV、MEF 和 KEF

局部操作指作用于一个边界模型局部拓扑特性上的算子。

MEV、KEV：MEV、KEV 以及以下的 MEF、KEF 严格与平面模型的多边形和顶点的分裂运算相对应。因此 MEV 将一顶点的边环通过将一顶点分裂为二，划分为两个环，并用一条新边连接起来，如图 4 所示。其最终结果是在数据结构中加入一顶点和一条边。

考虑将不带边的一个顶点分为用一条边相连的两个顶点组成的结果，MEV

可推广到“孤立”顶点（即由MVFS建立的出现在空环中的顶点）。我们也包括图 4 (c)中所描述的情形，其中建立一新顶点，用一条新边将其与旧顶点连接。

逆算子KEV可以回退图 4三种情况中的任何一种。即给定连接两个不同顶点的一条边，KEV可移去这条边，将这两顶点重叠成一个，并合并其边环。

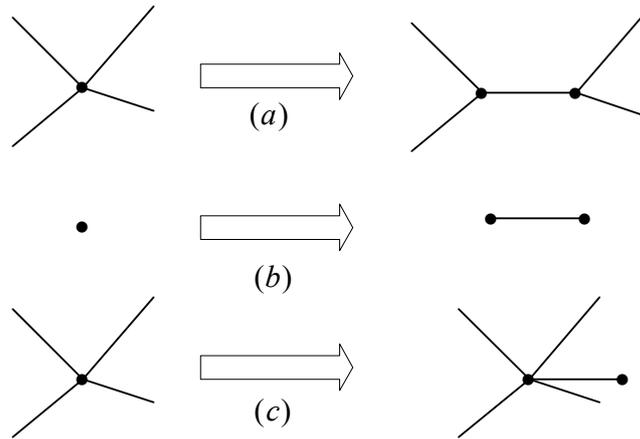


图 4 算子 MEV

MEF、KEF：算子 MEF 通过用一条新边连接两顶点来划分一个环。其最后效果是将一条新边和新面加入数据结构中。

除了图 5(a)的一般情况外，我们也可以用类似于MEV的方法将MEF的应用推广到空环。因此划分一个“孤立”顶点的结果是由分离两个面的一条“圆形(circular)”边组成。注意这样的一条边的始末顶点相等；作为更一般的情况，如图 5 (c)所示，用MEF将一顶点和自身“连接”总是可能的。

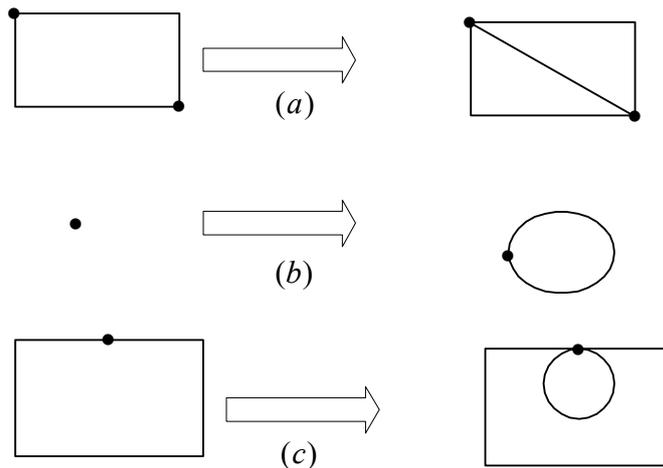


图 5 算子 MEF

另外，在每种情形下逆算子  $\text{KEF}$  可以回退  $\text{MEF}$  的作用。即给定一条邻近于两个不同面的边， $\text{KEF}$  能够将该边移去，并将这两个面合二为一，合成后的面的边界环是合并两个原始边界的结果。

$\text{KEMR}$ ,  $\text{MEKR}$ : 算子  $\text{MEV}$  和  $\text{MEF}$  的意义可以从平面模型理论直接推断，它们是十分基本的。为了充分利用空环，引入一个算子专门对空环进行剪裁是十分有用的。

算子  $\text{KEMR}$  通过移去在其中出现两次的一条边将一环分为两个新环，如图 6 所示。 $\text{KEMR}$  将一个面的连接边界曲线分成两个边界曲线，且具有在数据结构中移去一条边，加入一个内环的效果。其中也包括一个或两个最后环为空的一些特殊情况。通过用一条新边连接每个环的一顶点，逆算子  $\text{MEKR}$  就能将一个面的两个环合并。

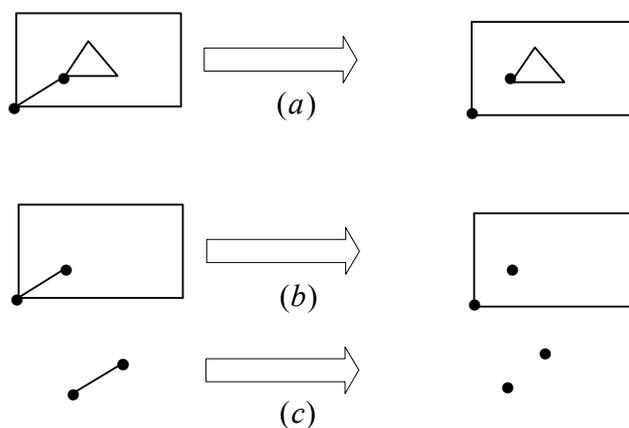


图 6 算子  $\text{KEMR}$

#### 4、 总体操作: $\text{KFMRH}$ 和 $\text{MFKRH}$

算子  $\text{KFMRH}$ : 给定两个面 ( $f_1$ 、 $f_2$ )，它采用将  $f_2$  的边界环转换为  $f_1$  的一个内环的方法把两个面连接成一个面。因此其最后效果是移去一个面 ( $f_2$ ) 并加入一个环。注意到  $\text{KFMRH}$  对其参数面(argument faces)的边和顶点的局部排列没有影响，它是一种全局操作，如图 7 所示。

$\text{KFMRH}$  实际上是一个误称，因为该算子并不一定要建立一个孔。实际上，仅当两个参数面属于同一个壳时  $\text{KFMRH}$  才建立一个孔。当用于属于两个不同壳的面时，其效果是将它们组合成一个壳。

另外，逆算子  $\text{MFKRH}$  起着倒转  $\text{KFMRH}$  的作用，它将一个面的内环修改成一个新面的边界环。

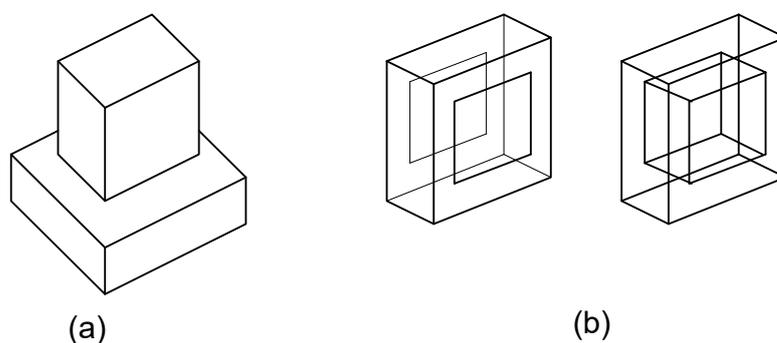


图 7 算子 KFMHR

#### 第四节 交线表示

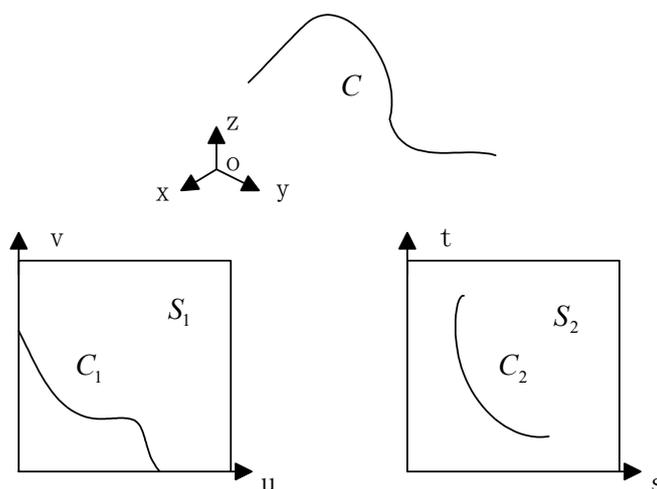


图 8 空间交线的表示

在造型过程中，系统对雕塑实体布尔操作产生的曲面交线精度要求很高，为此我们同时采用了两种交线表示方法，如图 8 所示，两张分别定义在  $u, v$  和  $s, t$  参数域上的参数曲面  $S_1$ 、 $S_2$ ，其交线对应于三维空间  $oxyz$  坐标系中的空间曲线  $C$ ，我们在记录曲线  $C$  的同时，也记录了它在  $u, v$  和  $s, t$  参数域上的二维曲线  $C_1$ 、 $C_2$ 。

由于在曲面求交过程中跟踪得到的交线为曲面参数域上的一系列点列，若以折线段的形式进行记录，数据量很大，并且不利于后续处理。我们采用了参数域上的三次样条来近似交线段，如图 9 所示，上例中  $u, v$  参数域上的二维折线段曲线  $C_1'$  用分段三次样条  $C_1$  近似表示。这样做有两个好处，首先使得所有的曲

线段能够以统一的形式进行表示，从而简化了处理程序；其次，使得对该曲线的访问（求值、限界等）能够以较高的效率进行。

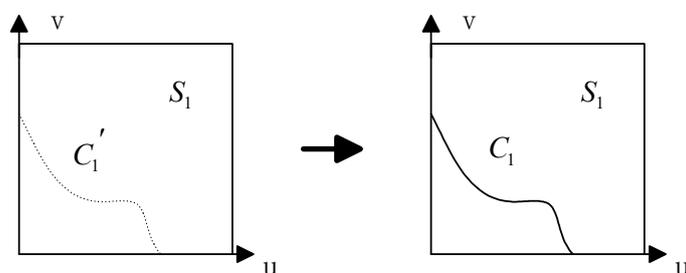


图 9 交线插值表示

## 第五节 雕塑实体布尔操作算法概述

在本文中提到的布尔操作，除非特别指明，都是正则的布尔操作（regularized Boolean operations）。所谓正则布尔操作于其对应的集合论上的布尔操作的差别为其操作结果是参与操作的两个实体内部（数学上为定义实体的空间区域除去边界的部分）的闭包，因此除去了低维的悬挂部分（见图 10）。如果用  $Int(A)$  表示实体  $A$  的内部， $op$  表示布尔操作算子，我们定义  $op^*$  为正则布尔操作算子

$$Aop^*B = cl((Int(A))op(Int(b)))$$

这里  $cl(A)$  表示  $A$  的闭包（产生边界）。

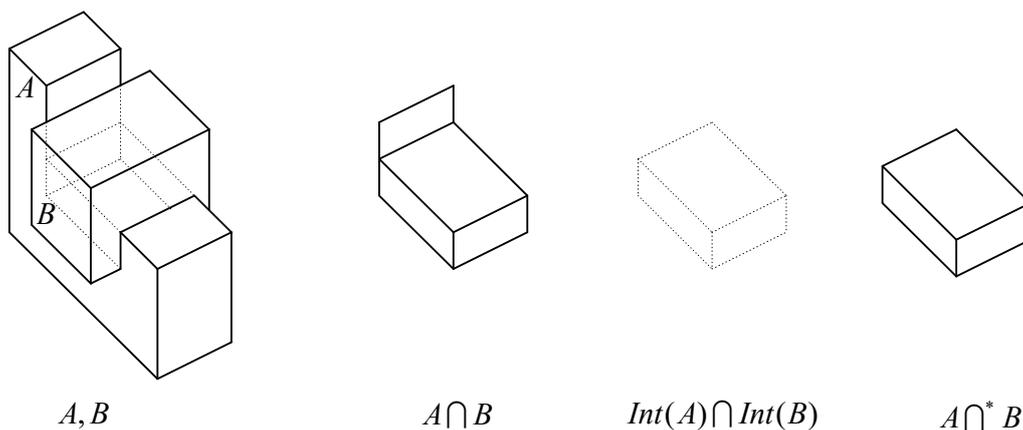


图 10 正则布尔操作实例

雕塑实体布尔操作算法大体分为三个阶段：求交检测、曲面片求交和分割、区域分类和生成雕塑实体。

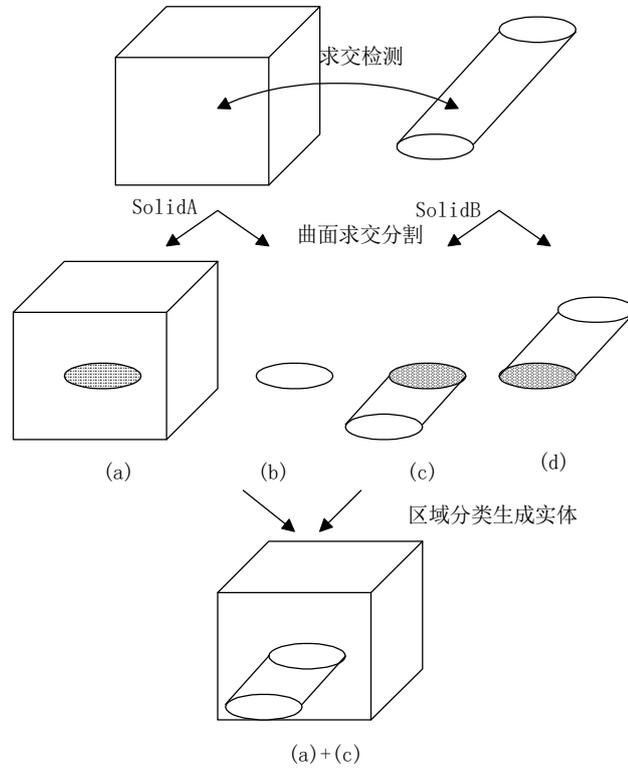


图 11 圆柱和方块的并操作的过程

1. 求交检测：首先对于两个输入实体的几何元素顶点、边、面，采用包围盒测试，线性规划法，去掉不相交的情况，记录可能相交的元素对。
2. 曲面片求交和分割：对于求交检测后的记录的可能相交的元素对，按照顶点、边、面的层次关系进行几何求交，即按 *Vertex-Vertex*, *Vertex-Edge*, *Vertex-Face*, *Edge-Edge*, *Edge-Face*, *Face-Face* 的次序，来确保拓扑分割的一致性。为了提高求交速度和稳定性，根据面面相交情况进行分析，沿已求得的交线走向进行跟踪求交。在求交过程中，适当插入新顶点、边，并分割曲面片产生新曲面片，得到的交线按照次序记录在交线链中。
3. 区域分类和生成实体：由于参加布尔操作的两个实体封闭紧凑，上一步得到的交线链必然是实体边界上的一系列闭环，它们把实体划分为独立的边界部件。区域分类判别每个边界部件相对于另一个实体边界的 *in-out* 关系，然后根据布尔操作类型选择适当的边界部件沿着交线环进

行边界粘合，生成结果实体。

以图 11 中圆柱和方块进行并操作为例，首先进行求交检测，找出可能相交的 SolidA 中的前平面和 SolidB 中的圆柱面，然后进行曲面求交和分割，将 SolidA, SolidB 分别划分为两个部分(a), (b), (c), (d)，再进行区域分类，将 SolidA 中不属于 SolidB 的部分(a)，和 SolidB 中不属于 SolidA 的部分(c)找出，沿交线粘合形成结果实体。

对于曲面求交算法、层次求交、交线跟踪等雕塑实体布尔操作的算法细节，我们将在第三章和第四章详细论述。

## 第六节 遗传算法简介

### 1、 引言

当前科学技术正进入多科学相互交叉、相互渗透、相互影响的时代。这一点在计算机科学领域表现得尤为突出。一方面，计算机科学的迅猛发展，从根本上改变人类的生活、学习和工作的方式，使人类文明进入了一个崭新的时期；另一方面，随着人类生存空间的扩大和认识世界改造世界范围的拓宽，人们又对计算机科学提出了新的要求与期望。而所有的期望之中，对计算机的计算速度和具有智能的要求也许是最迫切和最基本的。

很多实际应用问题不仅涉及到大量的计算而且需要实时响应，这对计算机的速度提出了强有力的挑战。由于提高单机速度受其物理极限的限制，解决这一问题的根本途径便是并行化。虽然目前并行机已较为普遍，但因为缺乏有效的并行算法，以致于使用并行机难以获得较高的加速比。

制造具有智能的机器一直是人类的梦想。直到 1956 年人工智能技术的出现，人们已为此作出了巨大的努力。近年来，随着人工智能应用领域的不断拓广，传统的基于符号处理机制的人工智能方法在知识表达、处理模式信息及解决组合爆炸等方面所碰到的问题已变得越来越突出，这些困难甚至使得某些学者对人工智能提出了强烈批评，对人工智能的可能性提出了质疑。

基于上述原因，寻找一种适应大规模并行且具有某些智能特征如自组织、自适应、自学习等的算法已成为有关学科的一个研究目标。而近些年来，一些新的研究方向如神经网络、细胞自动机和演化计算等，由于它们都是模拟某一自然现象或过程而发展起来的，并且具有适于高度并行与自组织、自适应、自学习等特征，因而引起了人们的极大兴趣。这些新方法通过“拟物”与“仿生”

以使问题得到解决，它们也许能为解决某些复杂问题提供新的契机。

大自然是我们解决各种问题时获得灵感的源泉。几百年来，将生物界所提供的答案应用于实际问题求解已被证明是一个成功的方法，并且已形成一个专门的科学分支——仿生学（bionics）。我们知道，自然界所提供的答案是经过漫长的自适应过程——演化过程而获得的结果。除了演化过程的最终结果，我们也可以利用这一过程本身去解决一些较为复杂的问题。这样，我们不必非常明确地描述问题的全部特征，只需要根据自然法则来产生新的更好解。

演化计算正是基于这种思想而发展起来的一种通用的问题求解方法。它采用简单的编码技术来表示各种复杂的结构，并通过对一组编码表示进行简单的遗传操作和优胜劣汰的自然选择来指导学习和确定搜索的方向。由于它采用种群（即一组表示）的方式组织搜索，这使得它可以同时搜索解空间内的多个区域。而且用种群组织搜索的方式使得遗传算法特别适合大规模并行。在赋予遗传算法自组织、自适应、自学习等特征的同时，优胜劣汰的自然选择和简单的遗传操作使演化计算具有不受其搜索空间限制性条件（如可微、连续、单峰等）的约束及不需要其它辅助信息（如导数）的特点。这些崭新的特点使得遗传算法不仅能获得较高的效率而且具有简单、易于操作和通用的特性，而这些特性正是演化计算越来越受到人们青睐的主要原因之一。

演化计算在 20 世纪六七十年代并未受到普遍的重视。其主要原因一是因为当时这些方法本身还不够成熟；二是由于这些方法需要较大的计算量，而当时的计算机还不够普及而且速度也跟不上要求，这样便限制了它们的应用；三是当时基于符号处理的人工智能方法正处于其顶峰状态，使得人们难以认识到其它方法的有效性及其适应性。到了 80 年代，人们越来越清楚地意识到传统人工智能方法的局限性，并且由于计算机速度的提高以及并行计算机的普及，已使得演化计算对机器速度的要求已不再是制约其发展的因素。更由于它的不断发展及其在一些应用领域内取得的成功，演化计算已表现出良好的应用前景。据德国 Dortmund 大学 1993 年末的一份研究报告报道，根据不完全统计遗传算法已在 16 个大领域 250 多个小领域中获得了应用。

由于演化计算在机器学习、过程控制、经济预测、工程优化等领域取得的成功，已引起了包括数学、物理学、化学、生物学、计算机科学、社会科学、经济学及工程应用等领域科学家们的极大兴趣。自 80 年代中期以来，世界上许多国家都掀起了演化计算的研究热潮。目前，有数种以演化计算为主题的国际会议在世界各地定期召开。国际互联网上也有多种相关的 mailing list，USENET

上还有专门的新闻组 `comp.ai.genetic`。而由于演化计算应用范围之广泛，从一些杂志及国际会议论文集中都比较容易看到有关演化计算应用方面的文章。现在已出版两种专门关于演化计算的新杂志：“Evolutionary Computation”（由 MIT Press 出版，1993 年创刊）和“IEEE Transactions on Evolutionary Computation”（IEEE 汇刊，1997 年创刊），而且一些国际性期刊也竞相出版以演化计算为主题的专刊。甚至新一轮日本计算机发展规划——RWC 计划（Real World Computing Program）也把演化计算作为它的主要支撑技术之一，以进行信息的集成，学习及组织等。

另外，某些学者研究了演化计算的自现行为（emergent behavior）后声称，演化计算将与混沌理论和分形几何一道成为人们研究非线性现象和复杂系统的新的三大方法，并将与神经网络一道成为人们研究认知过程的重要工具。

## 2、 遗传算法的特点

与传统的优化算法相比，遗传算法主要有以下几个不同之处：

- 遗传算法不是直接作用在参变量集上，而是利用参变量集的某种编码；
- 遗传算法不是从单个点，而是从一个点的群体开始搜索；
- 遗传算法利用适应值信息，无须导数或其它辅助信息；
- 遗传算法利用概率转移规则，而非确定性规则。

遗传算法的优越性主要表现在：首先，它在搜索过程中不容易陷入局部最优，即使在所定义的适应函数是不连续的、非规则的或有噪声的情况下，它也能以很大的概率找到整体最优解；其次，由于它固有的并行性，遗传算法非常适用于大规模并行计算机。

### (1) 全局优化

对于工程和科学中的许多实际问题，找到一个最优解的唯一可靠的方法是穷举法，即搜索问题的整个参变量空间。然而在许多情况下，由于参变量空间太大，以致在限定的时间内只可能搜索其中极小的一部分，这样就存在一个问题：怎样组织搜索，才可能有效地确定近似最优解？

一个常用的算法是爬山法：从某一随机点出发，在选定的方向上进行微小的变动，若得到更优的解，则在这个方向上继续进行迭代，否则，就转到相反的方向。然而，复杂的问题在搜索空间中会出现许多峰值点，随着参变量空间

维数的增大，其拓扑结构也可能更加复杂，这是不用说寻找正确的峰值点，即使确定上山的方向也会变得越来越困难。

遗传算法象撒网一样，在参变量空间中进行搜索，由串组成的群体在遗传算子的作用下，同时对空间中不同的区域进行采样计算，从而构成一个不断进化的群体序列。

遗传算法的一个突出能力就是能把注意力集中到搜索空间中期望值最高的部分，这是遗传算法中杂交算子作用的直接结果。杂交过程是模拟生物界中的有性繁殖，它是遗传算法中最重要的部分，很多遗传算法研究者都认为，如果从一个遗传算法中去掉杂交算子，则结果将不再是一个遗传算法，而对变异算子则不这样看待。事实上，利用杂交算子是遗传算法区别于其它所有优化算法的根本所在。某些优化算法，例如演化规划，它也是模拟生物演化过程，与遗传算法相比，仅仅是算法中少了杂交算子。

为了避免陷入局部最优，在遗传算法中还引入了变异，一方面可以在当前解附近找到更好的解，另一方面还可以保持群体的多样性，确保群体能够继续进化。

对群体进行简单的复制、杂交和变异作用是遗传算法的精髓。为了寻找最优解，传统方法是用启发式策略，在单个猜测解的领域探寻，即使算法中允许偶然地跳到解空间中更远的部分，这些启发式算法也往往趋向于陷入局部最优。通过保持在解空间不同区域中多个点的搜索，遗传算法能以很大的概率找到全局最优解。

## (2) 本质并行性

遗传算法的本质并行性表现在两个方面：

- 演化计算的内在并行性 (inherent parallelism)，即遗传算法本身非常适合大规模并行。最简单的并行方式是让几百甚至数千台计算机各自进行独立种群的演化计算，运行过程中甚至不进行任何通信（独立的种群之间若有少量的通信一般会带来更好的结果），等到运算结束时才通信比较，选取最佳个体，这种并行处理方式对并行系统结构也没有什麼限制和要求。可以说，演化计算适合在目前所有的并行机或分布式系统上进行并行处理，而且对其并行效率没有太大的影响。
- 演化计算的内含并行性 (implicit parallelism)，由于演化计算采用种群的方式组织搜索，从而它可以同时搜索解空间内的多个区域，并相互交

流信息，这种搜索方式使得它虽然每次只执行与种群规模  $N$  成比例的计算，而实质上已进行了大约  $O(N^3)$  次有效搜索[Go189]。这使得演化计算能以较少的计算获得较大的收益。

## 第三章 基于遗传算法的曲面求交

### 第一节 引言

曲面求交算法是几何造型系统的核心模块，也是任何实用 CAD 系统必须面对的难点之一。传统上，曲面求交算法主要有解析法、网格算法、跟踪法、以及分割法。

解析法具有精确、高效等优点，但它仅仅适用于具有解析表达式的曲面之间求交。对于 CAD 系统中用来表示自由型曲面的有理参数曲面，如 Bezier 曲面，B-样条曲面等的求交问题，则无能为力。理论上，可以将有理参数曲面转换为隐式代数表示，再应用解析法求交，但由于曲面交线的次数将高达  $4m^2n^2$  次（假设两张  $m \times n$  次参数曲面求交），从而使得解析法仅仅使用于平面和二次曲面求交。

网格算法将曲面求交问题转化为每个求交曲面多个等参数曲线之间的相交，再连接交点得到交线。网格算法最大的缺点是容易漏掉解：一些小环和孤立点，在实际中的很少单独应用，一般和跟踪法结合，用来求曲线分支的开始点。

分割法采用分治法处理曲面求交。求交过程是纯几何的，一般情况下可靠性高。存在的问题是难以提高求交精度，曲面分割过程中数值计算的误差积累将抵消增加分割层次的效果；当小平面片彼此平行时，曲面可能漏交。因为 CAD 系统的精度要求很高，纯分割法很少单独使用。

跟踪法的基本思想是，当已知交线上的一点后，利用相交曲面的局部几何特性，推算下一邻近交点的近似值，并用牛顿迭代法精化。依此反复进行，直至到达曲面的边界或交线上的奇点。跟踪法是不完整的，需要预先给出每条曲线分支的开始点。开始点往往应用网格算法或分割法得到，但这些方法都不能保证得到所有的曲线分支，直到可以检测出交线环的环检测算法出现，从而使得环检测算法与跟踪法的结合成为目前曲面求交的热点。尽管如此，它并不能保证交线的拓扑结构能正确得到，这依赖于曲线跟踪的方案。在这些方案中，跟踪过程从一系列初始点开始，按照一定的步长进行下一个交点的搜索，由于无法预知下一交点，系统必须采用启发式的步长设置方法避免分支跳跃、乱序跟踪等问题。

目前，遗传算法已经成为人工智能领域的热点，在机器学习、工程优化、任务调度、图象处理等领域得到了成功的应用。

应用遗传算法包括以下步骤[GD88]:

1. 挑选某个问题的潜在解空间;
2. 决定在该空间中的“适应度”判别方法;
3. 定义在该空间中适当的遗传操作，例如杂交、变异等。

算法本身包含了在潜在解空间中的迭代演化过程，从每代中挑选出适当的个体，并用它们结合遗传操作产生出下一代的新个体。在选择过程中的技巧是：为了直观的模拟自然界生物进化过程中自然选择的过程，必须采取手段来保证，总体上，“适应度”最高的个体被选择来繁殖下一代。

遗传算法的具有良好的全局搜索能力，可以快速地将解空间中的全体解搜索出，而不会陷入局部最优解的快速下降陷阱。并且利用它的内在并行性，可以方便的进行分布式计算，加快求解速度。

针对于遗传算法的上述特点，我们进行了将遗传算法运用到曲面求交算法中的研究，在这方面的研究目前我们尚没有找到已发表文献。

单纯的遗传算法在效率上受到限制，通过将遗传算法与局部搜索策略相结合以利用启发式信息及与领域相关的知识是近年来提高演化效率的主要策略之一[MS91,VAS92]。

由于几何造型领域的曲面求交操作不仅要求算法稳定可靠、还要求精确高效，而已有的交线跟踪法在已知初始交点，且非奇异的情况下，具有精确高效的特点，因此，我们将遗传算法的全局搜索能力和交线跟踪法的局部快速收敛性结合起来，设计了下面的曲面求交新算法。

下面各节如下组织：第二节，给出基于遗传算法的曲面求交算法，第三节，讨论了遗传算子中杂交算子的设计，第四节，曲面求交的局部跟踪策略，第五节，证明了算法的收敛性，第六节，基于遗传算法和模拟退火的混合算法的曲面求交，第七节，曲面求交过程中退化情况的处理，第八节，实例分析，第九节，结论和下一步的工作。

## 第二节 基于遗传算法的曲面求交

讨论计算两个广义参数曲面的交线，当然我们的算法也可以很容易的扩展到代数曲面和隐式曲面，设两个参数曲面分别为：

$$f(u, v) = (f_1(u, v), f_2(u, v), f_3(u, v))$$

$$g(r, s) = (g_1(r, s), g_2(r, s), g_3(r, s))$$

曲面求交过程对应于求解下面 4 个变量的 3 个联立方程：

$$\begin{cases} f_1(u, v) = g_1(r, s) \\ f_2(u, v) = g_2(r, s) \\ f_3(u, v) = g_3(r, s) \end{cases}$$

并加上限制条件： $u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$ ， $v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$ ， $r_{\min} \leq r \leq r_{\max}$ ， $s_{\min} \leq s \leq s_{\max}$ ，通常可以变换到单位参数区间，即  $u, v \in [0, 1]^2$ ， $r, s \in [0, 1]^2$ 。

跟踪算法有三个主要模块组成：搜寻（起点）、跟踪、排序。搜寻阶段提供跟踪的起点，必须找出交线的所有分支，并避免引起重复的跟踪过程。通常的方法包括速矢图[SM88]、子分法[BK90, Mul91]、代数法[AY97, GK97]。跟踪阶段从初始点跟踪计算出交线分支上的一系列交点。常用的跟踪方法有沿切矢方向[*Mor85, BK90*]、沿圆路径[*Ast88, WA99*]、沿抛物线路径[*Sto92*]等等。排序阶段将跟踪求出的交点按正确的交线拓扑排列，如果跟踪时交点是按序求出，则排序过程很简单。

下面，我们给出遗传算法和跟踪算法的结合算法。

不同的编码方案、选择策略和演化算子相结合构成了不同的遗传算法，但遗传算法的基本结构可描述如下[潘正君 97]：

1. 随机产生一个由确定长度的特征串组成的初始群体；
2. 对串群体迭代地执行下面的步(i)和步(ii)，直到满足停止准则：
  - (i) 计算群体中每个个体的适应值；
  - (ii) 应用复制、杂交和变异算子产生下一代群体。
3. 把在任一代中出现的最好的个体串指定为遗传算法的执行结果。这个结果可以表示问题的一个解（或近似解）。

基本的遗传算法框图见图 1，其中变量 GEN 是当前代数， $p_r$  为复制概率， $p_c$  为杂交概率， $p_m$  为变异概率。

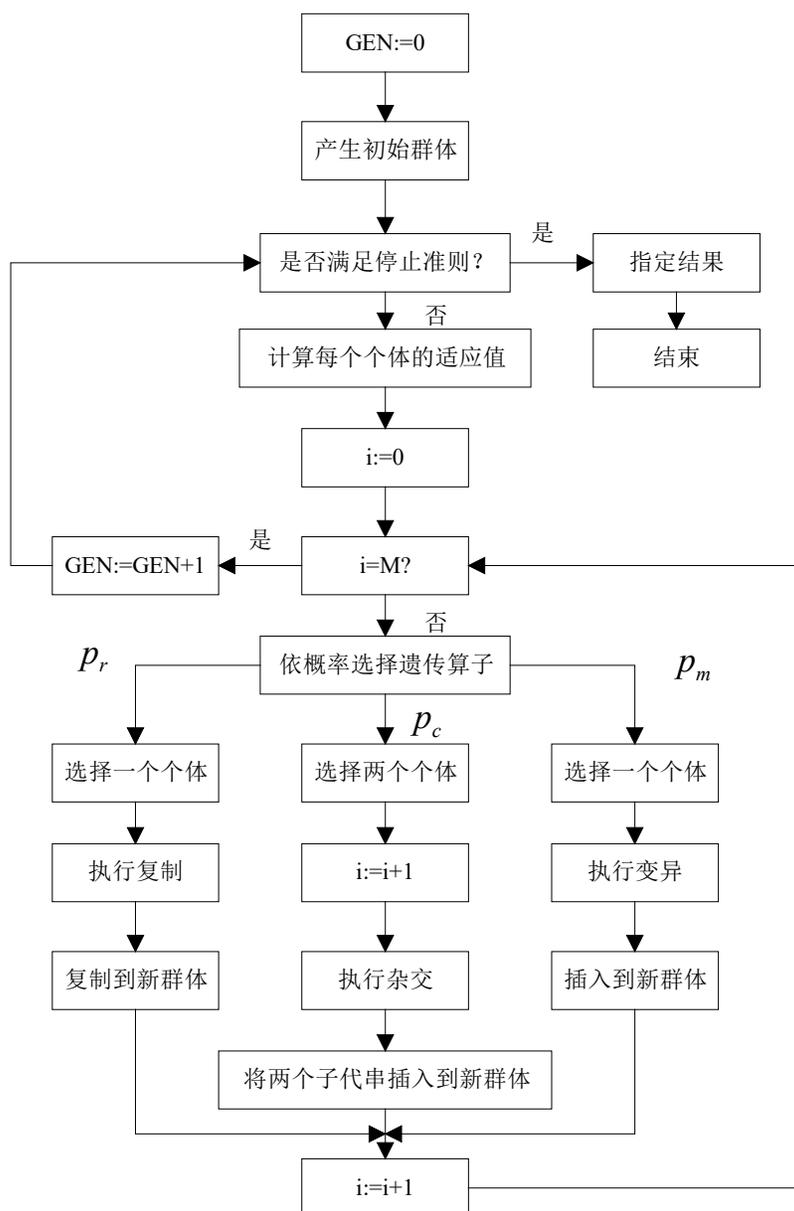


图 1 基本遗传算法的框图

遗传算法的基本结构：

{

    随机初始化种群  $P(0) = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  ,  $t = 0$  ;

    计算  $P(0)$  中个体的适应值;

    while(不满足终止条件)do

{  
     分别按概率  $p_r$  (复制概率),  $p_c$  (杂交概率),  $p_m$  (变异概率)  
     对  $P(t)$  执行相应的遗传算子形成新的种群  $P(t+1)$ ;  
     计算  $P(t+1)$  中个体的适应值,  $t = t+1$ ;  
 }  
 }

下面, 我们就遗传算法的各个要素对曲面求交算法进行细化。

### 1、 输入条件

两个参数曲面片  $f, g : [0,1]^2 \rightarrow R^3$ , 及其偏导  $D_i f_j, D_i g_j$  ( $1 \leq i \leq 2, 1 \leq j \leq 3$ )  
 初始网格宽度  $h_0 = (1/3)^{l_0}$ , 最小网格宽度  $h_1 = (1/3)^{l_1}$ , 其中  $l_0, l_1 \in N, l_0 < l_1,$   
 $l_0 \leq 3$ , 两个正常数  $c, \varepsilon$ 。

### 2、 输出结果

参数曲面片  $f, g : [0,1]^2 \rightarrow R^3$  的交线链  $C$  (由一系列初始交点和单位化切矢  
 采用交线跟踪算法得到) 或无交点的信息。

### 3、 编码表示

由于对于曲面交线计算精度的要求, 我们采用了下面的四元组编码来表示染  
 色体信息。

对每个个体, 任何  $x \in G_0, \phi \in \{f, g\}$  计算编码值:

$$\phi(x), \|\phi(x)\|_1, \|D\phi(x)\|_1, n_\phi(x) = (D_1\phi(x) \times D_2\phi(x)) / \|(D_1\phi(x) \times D_2\phi(x))\|_2$$

并定义适应值变量  $Pob(x, \phi) \in [0,1]$ , 设置初始值为 0。

种群数据存入  $L_0$  中, 为提高操作效率, 我们规定对每个  $(x, \phi) \in L_0$ , 按  $\|\phi(x)\|_1$   
 值排序存放。

### 4、 初始化工作

初始化当前种群  $L = L_0$ , 当前网格宽度  $h = h_0$ , 结果交线链  $C = \Phi$ , 并计算  
 $M = \max \{\|D\phi(x)\|_1 : (x, \phi) \in L_0\}$ 。

为了加速算法, 可以首先进行曲线/曲面求交, 用任一曲面的边界曲线分别  
 与另一曲面求交, 产生初始交点存入  $L_0$  中。

## 5、 适应性度量

适应值变量  $Pob(x, \phi) \in [0,1]$ ，表示适应百分度，0 为不适应，1 为 100%适应。

## 6、 选择策略

### 1、 重复测试

若交点在已计算出的交线上，若  $\phi(x)$  到已计算出的交线的距离小于  $\varepsilon$ ，设置  $Pob(x, \phi) = 0$ ，否则进行下一步选择。

### 2、 计算适应值。

$\forall (x, \phi) \in L \quad \forall (y, \tilde{\phi}) \in L$  其中  $\phi \neq \tilde{\phi}$  且  $\left| \|\phi(x)\|_1 - \|\tilde{\phi}(y)\|_1 \right| \leq chM$

If  $\left| \|\phi(x)\|_1 - \|\tilde{\phi}(y)\|_1 \right| < chM$

If  $\left| \|\phi(x)\|_1 - \|\tilde{\phi}(y)\|_1 \right| < chM \sin \alpha$ , 其中  $\alpha = \arccos \langle n_\phi(x), n_{\tilde{\phi}}(y) \rangle$

Then  $Pob(x, \phi) = Pob(y, \tilde{\phi}) = 1$

计算出  $\|f(\tilde{x}_0) - g(\tilde{y}_0)\|_1$  最小的最优点对  $(\tilde{x}_0, f), (\tilde{y}_0, g) \in L$ ，  
如果  $\tilde{x}_0, \tilde{y}_0$  存在进行下面的交线局部跟踪步骤。

**局部跟踪步骤：** 如果  $\tilde{x}_0, \tilde{y}_0$  已知，以它们为初始点执行局部交线跟踪算法，将得到的交线分支  $C_i$  加入到交线链  $C$  中，对所有  $(x, \phi) \in L$  中  $\phi(x)$  到已到交线分支  $C_i$  的距离小于  $\varepsilon$  的个体设置  $Pob(x, \phi) = 0$ 。

否则，参加演化算子，若上面进行局部交线跟踪失败，也参加演化算子。

Else

设置  $Pob(x, \phi) = 0$

Else

设置  $Pob(x, \phi) = 0$

3、 若  $Pob(x, \phi) = 0$ ，从  $L$  中删去  $(x, \phi)$ 。

通过上面的选择策略，我们首先将与已知交线过分靠近的个体删去，对于满

足方程  $\|\phi(x)\|_1 - \|\tilde{\phi}(y)\|_1 < chM \sin \alpha$  的个体，判别是否满足作为初始点执行局部交线，若满足，则进行局部跟踪算法，并产生交线分支  $C_i$  加入到交线链  $C$  中，对所有  $(x, \phi) \in L$  中  $\phi(x)$  到已到交线分支  $C_i$  的距离小于  $\varepsilon$  的个体设置  $Pob(x, \phi) = 0$ ，若不满足，或局部跟踪失败，则参与演化算子，生成下一代。

## 7、 控制参数选取

通过网格宽度  $h = h_0$  来控制解空间，初始网格宽度  $h_0 = (1/3)^{h_0}$  过大，则有可能漏过小交线环，而当取  $h_1 = 0$ ，并不用交线跟踪算法时，解集收敛到交线。

## 8、 演化算子设计

对于通过选择函数的个体，采用转盘式选择，按一定比例，分别采用如下的演化算子：

### 1、繁殖算子（reproduction operation）：

在下一代种群中将自身删去，并加入新个体  $((x_1 + kh/3, x_2 + lh/3), \phi)$ ， $k, l \in \{-1, 0, 1\}$ ， $k \neq 0$  或  $l \neq 0$ ，并置新个体  $Pob(x, \phi) = 0$ 。

繁殖算子的实质是在父代已经很接近交线时，通过将父代附近进行细化，产生新个体。

### 2、杂交算子（crossover operation）：

对于两个离交线较远的父代个体，我们采用下一节将给出的杂交算子来产生新个体，并置新个体  $Pob(x, \phi) = 0$ 。

杂交算子的实质是在利用两个接近交线的父代，通过分析曲面的局部曲率情况，生成新个体。

### 3、变异算子（mutation operation）：

为了使算法可以快速的找到一些交线段，我们按照适当的比例加入变异算子，增加算法的随机性，在每代新个体种，加入一定数量（我们采用的为 0.03%）的新个体  $(x, \phi)$ ，满足  $\phi(x)$  到已到交线分支  $C_i$  的距离大于  $\varepsilon$ ，即不在已求出任何交线分支上，并置新个体  $Pob(x, \phi) = 0$

在完成上面的演化算子后，置  $M = \max \{\|D\phi(x)\|_1 : (x, \phi) \in L\}$ ， $h = h/3$

## 9、 算法终止条件

当前种群  $L$  为空或当前网格宽度小于最小网格宽度  $h < h_1$  时，算法终止。

当前种群  $L$  为空表示交线已经计算完，或曲面不相交。

网格宽度  $h$  用来控制迭代次数，并度量计算精度。

## 第三节 杂交算子

遗传杂交算子（有性重组）可以产生新的个体，从而检测搜索空间中的新的点。杂交算子每次产生新的子代，它们一般与其父代的编码不同，但继承了两个父代体的遗传物质。

对于参与杂交算子的两个给定点，它们满足停留在交点附近。杂交算子就是要通过决定它们在曲面参数域上的参数变化量，来在新个体中加入（可能）离交线更近的子代，但同时它应满足计算量小（使算法效率高），并带有随机性（能够产生各种带有父代基因的新个体）的特点。为解决这个问题，可以引入一个辅助平面，计算相交曲线的切平面与它的交点，作为参数变化量的一个近似值。

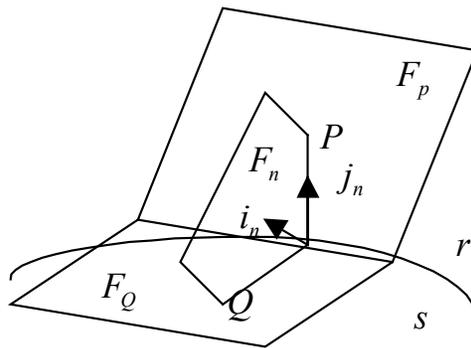


图 2 三面求交

给定不同曲面上的两点  $P$ 、 $Q$ ，定义  $P$  点处的切平面为  $F_p$ ， $Q$  点处切平面为  $F_q$ 。定义平面  $F_n$  经过  $P$ ，并与  $F_p$ 、 $F_q$  都垂直，在  $F_n$  上定义单位向量  $i_n, j_n$ ， $i_n$  为  $F_p$  的单位法向量， $j_n$  为  $F_n$  与  $F_p$  交线的方向，于是  $F_n$  的法向量  $k_n = i_n \times j_n$ ，（如图 2）这些方向满足以下的关系，当  $P$ 、 $Q$  表示为  $r(s,t)$ ， $s(u,v)$  时：

$$\begin{aligned}(s(u, v) + \delta u \cdot s_u + \delta v \cdot s_v) \cdot i_n &= h \\ (r(s, t) + \delta s \cdot r_s + \delta t \cdot r_t) \cdot j_n &= (s(u, v) + \delta u \cdot s_u + \delta v \cdot s_v) \cdot j_n \\ (r(s, t) + \delta s \cdot r_s + \delta t \cdot r_t) \cdot k_n &= (s(u, v) + \delta u \cdot s_u + \delta v \cdot s_v) \cdot k_n = h_n\end{aligned}$$

这里  $h$ 、 $h_n$  为从原点到平面  $F_p$ 、 $F_n$  的距离。求解这些方程，三面的交点由参数增量  $\delta t$ ， $\delta s$ ， $\delta u$ ， $\delta v$  决定。更新参数可生成新的子代个体  $P$ ， $Q$ ，即  $r(s + \delta s, t + \delta t)$ ， $s(u + \delta u, v + \delta v)$ 。

## 第四节 局部跟踪策略

由于已经得到了一系列初始交点和单位化切矢，跟踪求交过程可以顺利的进行。跟踪策略关系到正确的交线拓扑连接方案，是曲面求交算法的要点之一。目前常用的算法都考虑了对交线跟踪采用依赖于交线曲率的自适应步长调节方法[BK90, Sto92]，常用的跟踪方法有沿切矢方向[Mor85, BK90]、沿圆路径[Ast88, WA99]、沿抛物线路径[Sto92]等等。我们参考了跟踪算法的最新文献[WA99]，采用了一个简单有效的沿接触圆路径进行跟踪的策略。即对于给定的两个相邻交点  $P$ 、 $Q$ ，以及它们的切矢  $\vec{u}$ 、 $\vec{v}$ ，可按如下步骤构造  $Q$  点处的近似接触圆，如图 3：

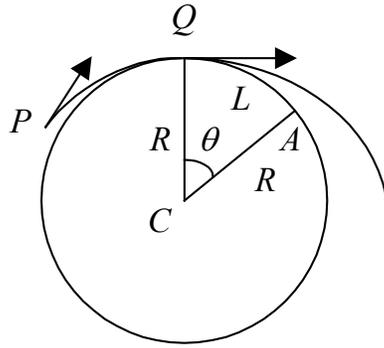


图 3 沿接触圆轨迹跟踪

圆心 ( $C$ )：三个平面的交：包含点  $P$ ，法矢为  $\vec{u}$  的平面、包含点  $Q$ ，法矢为  $\vec{v}$  的平面、包含点  $Q$ ，法矢为  $\vec{u} \times \vec{v}$  的平面。

半径 ( $R$ )： $C$  与  $Q$  的距离。

由近似接触圆可计算出跟踪步长，假定我们的步长根据交线曲率自动调整，交线的下一个近似交点  $A$  可将  $Q$  延伸  $L$  的距离得到。

## 第五节 理论基础和算法收敛性

下面给出我们算法的理论基础，并证明算法的收敛性。

设两张曲面  $F$ ， $G$  分别为  $F = f(D)$ ， $G = g(D)$ ，这里  $f$ ， $g$  都是二次连续可导， $f, g: D \rightarrow R^3$ 。不失一般性，可设  $D$  为单位参数域  $[0,1] \times [0,1]$ ，则有下面的引理[Mul91]。

**引理：** 设  $n \in N$ ， $h = 1/n$ ， $G_0$  为网格点集，满足

$$G_0 = \{(ih, jh) \in D : 0 \leq i, j \leq n\}$$

设  $x^*, y^* \in D$  有  $f(x^*) = g(y^*)$ ，则一定存在一对  $x_0, y_0 \in G_0$ ，满足

$$\|f(x_0) - g(y_0)\|_1 \leq 2hK$$

这里

$$K = \max\left\{ \max_{x \in \text{conv}\{x_0, x^*\}} \|Df(x)\|_1, \max_{y \in \text{conv}\{y_0, y^*\}} \|Dg(y)\|_1 \right\}$$

且

$$\|A\|_1 = \max_{1 \leq j \leq 2} \sum_{i=1}^3 |a_{ij}|, \text{ 对于 } A \in R^{3 \times 2}.$$

**证明：** 给定  $x^*, y^* \in D$  显然存在网格点  $x_0, y_0 \in G_0$  满足：

$$\max\{\|x_0 - x^*\|_1, \|y_0 - y^*\|_1\} \leq h$$

应用 Taylor 公式，有：

$$f(x_0) = f(x^*) + Df(\tilde{x})(x_0 - x^*), \quad \tilde{x} \in \text{conv}\{x_0, x^*\}$$

$$g(y_0) = g(y^*) + Dg(\tilde{y})(y_0 - y^*), \quad \tilde{y} \in \text{conv}\{y_0, y^*\}$$

两式相减后取模达到了上面的结论。

有了这个引理，我们就可以理解在选择策略中适应值的计算方法，下面给出算法收敛性的证明。

我们记第  $n$  次循环迭代中的当前种群  $L$  为  $L_n$ ，且点集  $P_n = \{\phi(x) : (x, \phi) \in L_n\}$ ，当没有采用交线跟踪策略，且不考虑杂交算子和变异算子，而只是采用繁殖算子将一系列初始交点和单位化切矢进行记录时，算法的收敛性可由下面的引理证明[Mul91]：

**引理:** 记  $f, g$  交点集合为  $C$ , 且  $h_1 = 0$ , 则上面的算法在没有采用交线跟踪得到交线分支并删去初始交点且不考虑杂交算子和变异算子时, 其结果或者是经有限次迭代后终止, 或者是产生一系列点集  $(P_n)_{n \in N}$ , 满足  $\lim_{n \rightarrow \infty} (\max_{p \in P_n} \min_{x \in C} \|p - x\|_1) = 0$ . (\*)

**证明:** 显然算法当  $C = \Phi$  时终止, 现在假定  $C \neq \Phi$ , 对照 (\*), 假定存在着  $\varepsilon > 0$ ,  $p_n \in P_n$  ( $n \in N$ ) 满足:

$$\min_{x \in C} \|p_n - x\|_1 \geq \varepsilon, \text{ 对所有的 } n \in N$$

不失一般性 (否则我们考虑  $p_n$  的子序列), 我们假定:

- (1)  $p_n = \phi(x_n)$ ,  $x_n \in D$ ,  $\phi \in \{f, g\}$ , 与  $n$  无关;
- (2) 存在着  $x^* = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ ,  $p^* = \lim_{n \rightarrow \infty} p_n$ .

显然有:

$$\min_{x \in C} \|p^* - x\|_1 \geq \varepsilon \quad (**)$$

选择  $\tilde{\phi} \in \{f, g\}$  使得  $\{\phi, \tilde{\phi}\} = \{f, g\}$ .

由于遗传算法的繁殖算子存在序列  $(y_n)_{n \in N}$  满足  $(y_n, \tilde{\phi}) \in L_n$  且  $\lim_{n \rightarrow \infty} \|\phi(x_n) - \tilde{\phi}(y_n)\|_1 = 0$ . 于是  $\lim_{n \rightarrow \infty} \tilde{\phi}(y_n) = p^*$

由于  $D$  紧凑,  $(y_n)$  有累积点  $y^*$ , 因此

$$p^* = \phi(x^*) = \tilde{\phi}(y^*) \in C$$

该式与 (\*\*) 矛盾。

## 第六节 基于遗传算法和模拟退火的混合算法的曲面求交

### 1、 模拟退火算法概述

模拟退火算法是今年来特别引人注目的一种适用于解大型组合优化问题的技术, 算法的核心在于模拟热力学中液体的冻结与结晶或金属溶液的冷却与退火过程。

在高温状态下, 液体的分子彼此之间可以自由移动。如果液体徐徐冷却, 它的分子就会丧失由于温度而引起的流动性。这时原子就会自己排列起来而形

成一种纯晶体，它们依次地朝各个方向排列成几十亿倍于单个原子大小的距离，这个纯晶体状态就是该系统的最小能量状态。有趣的是：对一个徐徐冷却的系统，当这些原子在逐渐失去活力的同时，它们自己就同时地排列而形成一种纯晶体，使这个系统的能量达到其最小值。

这里我们特别强调在这个物理系统的冷却过程中，这些原子是“同时地”把它们自己排列成一种纯晶体的。如果一种金属熔液是被快速冷却或泼水使其冷却的，则它不能达到纯晶体状态，而是变成一种多晶体或非晶体状态，系统处在这种状态时具有较高的能量。

模拟退火算法就是模拟上述物理系统徐徐退火过程的一种通用随机搜索技术，人们可用马尔柯夫链的遍历理论来给它以数学上的描述。在搜索最优解的过程中，模拟退火算法除了可以接受优化解外，还用了一个随机接受准则（Metropolis 准则）有限度地接受恶化解，并且接受恶化解的概率慢慢趋向于 0，这使得算法有可能从局部最优中跳出，尽可能找到全局最优解，并保证了算法的收敛。

下面是用模拟退火算法求取全局优化问题的大致流程：

Procedure Simulated\_Annealing

```
{
  Initialize(c, x);
  termination_criterion = FALSE;
  while termination_criterion == FALSE {
    for i=1 to L do {
      generate y from x;
      if  $f(y) - f(x) \leq 0$  then
        x = y;
      else if  $\exp[-(f(y) - f(x))/c] > \text{random}[0,1]$  then
        x = y;
    }
    lower c;
  }
}
```

其中 L 为马尔柯夫链的长度，c 为控制参数，并随着迭代次数的增加变化，使得接受恶化解的概率慢慢趋向于 0。

## 2、 遗传算法和模拟退火的混合算法

为了避免落入局部最优，模拟退火算法采用 Metropolis 接受准则，最终渐进收敛于全局最优解。然而，在每一个冷却步，为使状态达到平衡分布将是一个非常耗时的过程。特别地，模拟退火算法对构形空间中已经试探的区域所知不多，并且难以判断哪些区域有更多的机会找到最优解。

为了指导搜索过程，模拟退火算法应当从过去搜索的结果中得到关于整个搜索空间的一些信息，这可以通过采用演化策略来实现。基于群体和选择的思想，下面给出了一种退火遗传算法来求解连续变量的多峰函数，不是象模拟退火算法那样采取单点迭代，退火遗传算法是通过变异和选择不断改善一个解的群体。

求函数  $f(x)$  最小值的退火遗传算法可以陈述如下：算法首先从一个包含  $N$  个点的初始群体出发，在每个控制参数  $c$  下，群体中每个点都产生  $L$  个新解，这些新解根据 Metropolis 准则被接受或舍弃；经过一个冷却步后，群体由原来的规模增加到至多包含  $N \cdot (L+1)$  个点，按照与这些点的适应值成比例的概率从中选择  $N$  个点作为生存集；如果最好的点不在生存集中，则从生存集  $N$  个点中随机地舍弃一个点，然后把最好的点加入其中；算法再在一个降低的控制参数下重复以上过程，整个算法可以描述为：

Procedure Annealing\_Evolution

```
{
  k = 0;
  Initialize(c, P(k));
  Evaluate P(k);
  termination_criterion = FALSE;
  while termination_criterion == FALSE {
    k = k+1;
    Select P(k) from P(k-1);
    for i=1 to L do {
      for j=1 to N do {
        generate  $y_j$  from  $x_i$ ;
        if  $f(y_j) - f(x_i) \leq 0$  then
           $x_i = y_j$ ;
        else if  $\exp[-(f(y_j) - f(x_i))/c] > \text{random}[0,1]$  then
```

```

        x_i = y_j;
    }
}
lower c;
Evaluate P(k)
}
}

```

### 3、 基于退火遗传算法的曲面求交

基于退火遗传算法的曲面求交算法与第二节提到的基于遗传算法的曲面求交算法，大体结构相同，主要修改了选择策略部分：

#### 1、 重复测试

若交点在已计算出的交线上，若  $\phi(x)$  到已计算出的交线的距离小于  $\varepsilon$ ，设置  $Pob(x, \phi) = 0$ ，否则进行下一步选择。

#### 2、 采用 Boltzmann 选择方法，计算适应值。

Boltzmann 选择实际上是一种适应值调节策略[MT93]。它使用函数  $\delta(f_i) = \exp(f_i / T)$  将适应值进行变换 (Scaling) 以改变原始的选择压力。这里  $T$  是一个控制参数， $T$  取较大值时选择具有较小的选择压力，通过这个变化后再进行对父体的选择。

$$\forall (x, \phi) \in L \quad \forall (y, \tilde{\phi}) \in L \quad \text{其中 } \phi \neq \tilde{\phi} \quad \text{且 } \left| \|\phi(x)\|_1 - \|\tilde{\phi}(y)\|_1 \right| \leq chM$$

$$\text{If } \left| \|\phi(x)\|_1 - \|\tilde{\phi}(y)\|_1 \right| < chM$$

$$\text{If } \left| \|\phi(x)\|_1 - \|\tilde{\phi}(y)\|_1 \right| < chM \sin \alpha, \text{ 其中 } \alpha = \arccos \langle n_\phi(x), n_{\tilde{\phi}}(y) \rangle$$

$$\text{Then } Pob(x, \phi) = Pob(y, \tilde{\phi}) = 1$$

计算出  $\|f(\tilde{x}_0) - g(\tilde{y}_0)\|_1$  最小的最优点对  $(\tilde{x}_0, f), (\tilde{y}_0, g) \in L$ ，  
如果  $\tilde{x}_0, \tilde{y}_0$  存在进行下面的交线局部跟踪步骤。

**局部跟踪步骤：** 如果  $\tilde{x}_0, \tilde{y}_0$  已知，以它们为初始点执行局部交线跟踪算法，将得到的交线分支  $C_i$  加入到交线链  $C$  中，对所有  $(x, \phi) \in L$  中  $\phi(x)$  到已到交线分支  $C_i$  的距离小于  $\varepsilon$  的个体设置  $Pob(x, \phi) = 0$ 。

$$\text{Else } P_{ob}(x, \phi) = P_{ob}(y, \tilde{\phi}) = \exp\left[-\left(\|\phi(x)\|_1 - \|\tilde{\phi}(y)\|_1 - chM \sin \alpha\right) / T(chM - chM \sin \alpha)\right]$$

其中  $T = kh$ ，与网格宽度相关，作为 Boltzmann 选择的控制参数。

Else

$$\text{置 } P_{ob}(x, \phi) = P_{ob}(y, \tilde{\phi}) = 0。$$

3、若  $P_{ob}(x, \phi) = 0$ ，从  $L$  中删去  $(x, \phi)$ 。

若  $P_{ob}(x, \phi) = 1$ ，或  $P_{ob}(x, \phi) < 1$ ，但满足  $P_{ob}(x, \phi) > rand(seed)$  的个体，参加演化算子，若上面进行局部交线跟踪失败，也参加演化算子。

新算法的实质是对  $P_{ob}(x, \phi) < 1$  的个体采用了剩余随机抽样的方法进一步进行挑选，通过不断修改控制参数  $T$ ，来保证算法以越来越小的概率有限度地接受恶化解，并且接受恶化解的概率慢慢趋向于 0，即仅保留  $P_{ob}(x, \phi) > rand(seed)$  的个体参与下面的演化算子，其中  $rand(seed)$  为返回值在  $[0,1]$  区间的随机函数， $seed$  为随机种子。

## 第七节 退化情况处理

对于给定的起点，我们运用沿接触圆路径的策略进行跟踪。一个跟踪的过程见图 4，对于得到的近似点运用牛顿迭代法使之收敛到曲线上的精确点。

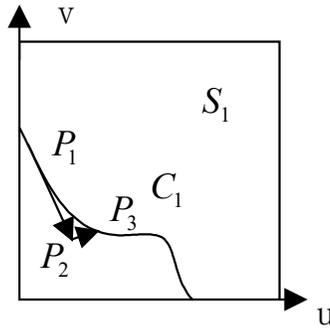


图 4 一步跟踪过程 ( $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3$ )

跟踪过程中常见的错误有[FF92][Syn92]:

- 逆序收敛到曲线
- 分支跳跃

- 不能处理奇异点和多分支情况

由于牛顿迭代方法引起的逆序收敛的问题详细可见文献[FF92]。对于求解双三次曲面交线时的高次方程组时，牛顿方法的收敛性很难预测。当两个交线分支相距较近时，则有可能出现分支跳跃的情况。目前大多数算法的解决方法是选取很小和保守的跟踪步长。但这并不能保证算法的正确性，并且，使得算法效率低下。目前，没有有效的方法对高次曲面交线上的奇异点的进行处理。

我们对于上述问题的解决方法是：

1. 类似于文献[BK90]采用的非均匀子分过程，我们在求交算法中采用了非均匀的网格宽度选择方案，网格宽度  $h$  由当前曲面区域的曲率来控制，曲率越大的区域网格划分越细，在该区域的种群个体采样机会越大。
2. 对于奇异点和多分支情况的情况，我们不直接采用跟踪法得到交线拓扑，因为目前的方法肯定会失败。若跟踪过程中遇到奇异点，则结束该交线分支，而不是试图跳过它。通过跟踪奇异点处的所有分支情况，并对于检测到的奇异点（该点处两曲面的法矢共线），我们逐步细化网格宽度  $h$ ，使之收敛到误差控制范围内，这时再对得到的交点、交线结果进行拓扑分析和连接。（见图 5，对多分支奇异交点  $P$ ，先求出各交线分支，再对其邻域分析，连接出正确交线拓扑）

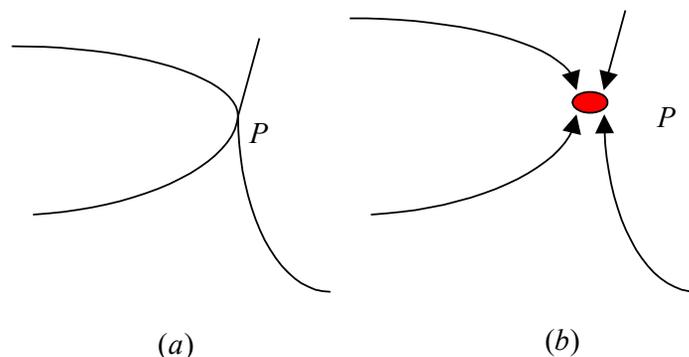


图 5 对多分支奇异交点  $P$  的处理

由于采用了以上的改进方案，我们对于大多数曲面求交的退化情况都能正确的进行处理。在下面的实例分析中，我们给出了对于平面和曲面求交时一个存在 4 个奇异点和多分支的情况进行处理的实例（见图 7(b)）、两曲面求交时多分支奇异点的实例（见图 10）、两曲面求交时曲面局部重叠的实例（图 11），具体的分析见下节。

## 第八节 实例分析

我们已经在基于 Windows/NT 平台的原型系统 TigerSurf 中用 C 语言上实现了该算法。该曲面求交算法是一个雕塑实体布尔操作算法的一部分(见第四章)。下面是在原型系统 TigerSurf 中进行曲面求交算法测试的一些实例。

### 1、 曲面和平面求交

给定一张双三次 Bezier 曲面 A, 共  $4 \times 4$ , 16 个控制顶点如下:

{0, 0, 0}, {1, 0, -3}, {2, 0, 3}, {3, 0, 0}  
 {0, 1, 3}, {1, 1, 1}, {2, 1, 1}, {3, 1, -3}  
 {0, 2, -3}, {1, 2, 1}, {2, 2, 1}, {3, 2, 3}  
 {0, 3, 0}, {1, 3, 3}, {2, 3, -3}, {3, 3, 0}

考虑它与平面  $Z = d$  求交的情况。

图 6 显示了当  $Z$  分别等于  $-0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.425, 0.48, 0.5, 0.6, 0$  时曲面与平面交线情况, 图中左边为曲面的真实感图, 右边为不同交线分支的轨迹, 每次求交过程在一台 Pentium(200HZ/64M)的 PC 机上运行时间平均为 0.03ms。在图 7 中, (a) 情况为当  $Z = 0.45$  时, 利用本文算法计算出的交线, 交线有五个分支, 其中一个为内环。(b) 情况为当  $Z = 0.43826$  时, 交线呈井字形, 存在 4 个多分支奇异点的情况, 我们的算法稳定地进行了处理, 给出了正确的交线拓扑结构。

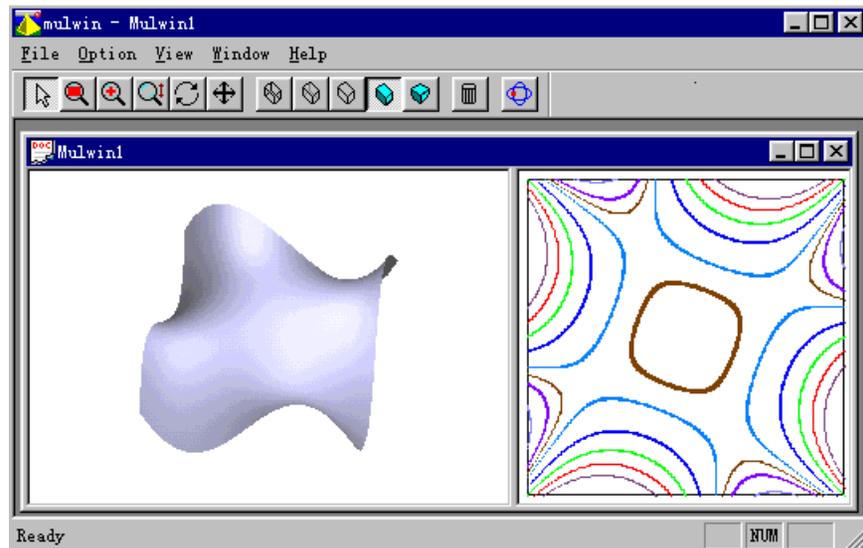


图 6  $Z = -0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.425, 0.48, 0.5, 0.6, 0$  时交线情况

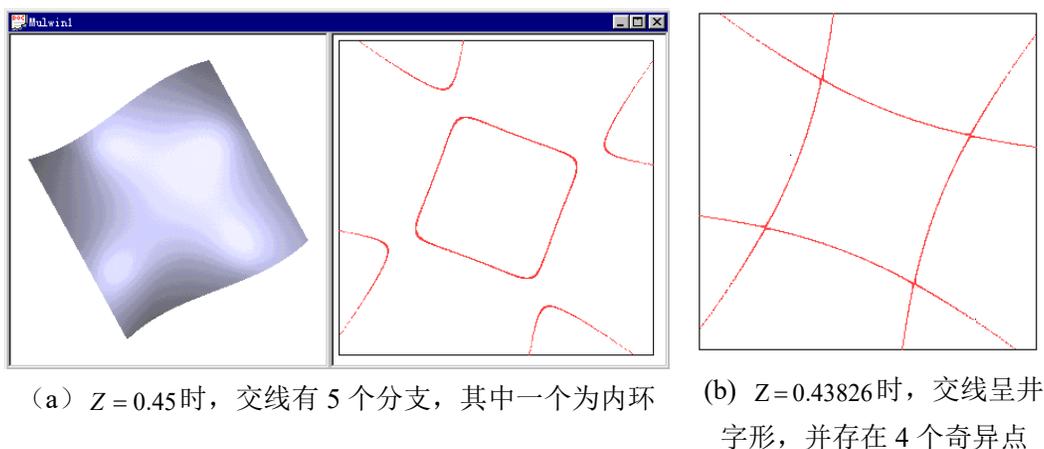


图 7 两个求交情况分析

## 2、 曲面求交I——多分支开环

下面分析两张双三次 Bezier 曲面求交的实例。

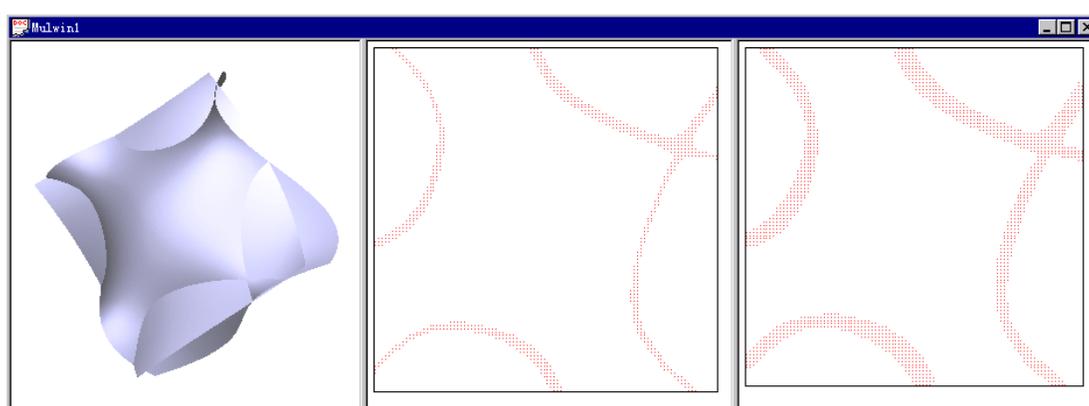
其中一张双三次 Bezier 曲面 B 的  $4 \times 4$  共 16 个控制顶点如下：

$\{0, 0, 0\}, \{1, 0, -3\}, \{2, 0, 3\}, \{3, 0, 0\}$   
 $\{0, 1, 3\}, \{1, 1, 2\}, \{2, 1, 2\}, \{3, 1, -3\}$   
 $\{0, 2, -3\}, \{1, 2, 2\}, \{2, 2, 2\}, \{3, 2, 3\}$   
 $\{0, 3, 0\}, \{1, 3, 3\}, \{2, 3, -3\}, \{3, 3, 0\}$

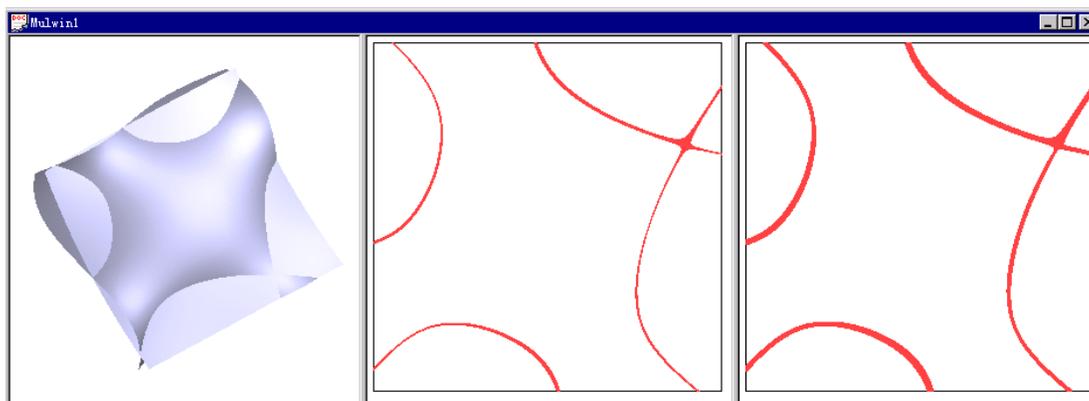
另一张双三次 Bezier 曲面 C，  $4 \times 4$  共 16 个控制顶点如下：

$\{0, 0, 0.5\}, \{1, 0, 0.2\}, \{2, 0, 0.3\}, \{3, 0, 0.5\}$   
 $\{0, 1, 0\}, \{1, 1, 1\}, \{2, 1, 1\}, \{3, 1, 0\}$   
 $\{0, 2, 0\}, \{1, 2, 1\}, \{2, 2, 1\}, \{3, 2, 0\}$   
 $\{0, 3, 0.8\}, \{1, 3, 0.6\}, \{2, 3, 0.8\}, \{3, 3, 0.6\}$

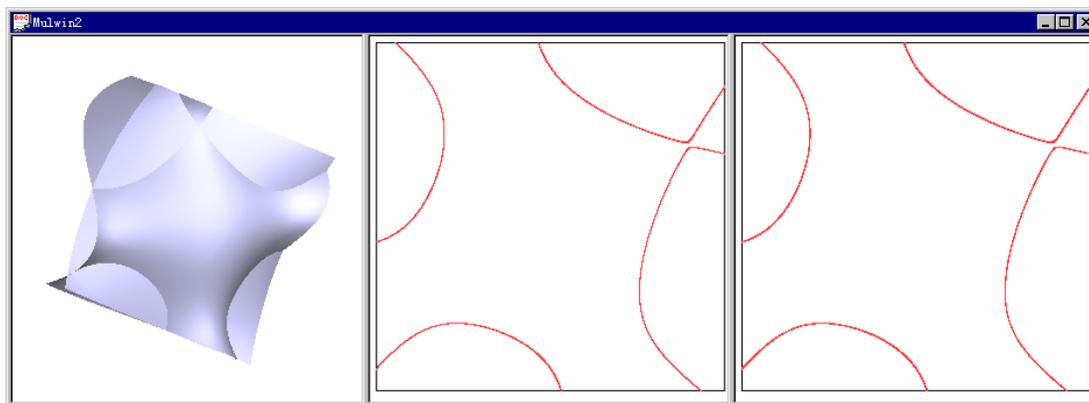
曲面 B 和曲面 C 的交线为 4 个参数域上的开环，图 8 中 (a) 为初始情况， $h_0 = 1/n$ ， $n = 100$  时，通过选择策略的第一代群体的情况，(b) 为从第一代群体经过遗传算子产生的第二代情况，此时  $h_1 = h_0/3$ ，(c) 从第二代个体经过局部跟踪产生出的交线分支。



(a) 初始情况,  $h_0 = 1/n$ ,  $n = 100$



(b) 第二代情况,  $h_1 = h_0/3$



(c) 从第二代个体局部跟踪出的交线分支

图 8 两张曲面 B、C 求交的情况

### 3、 曲面求交II——存在内环

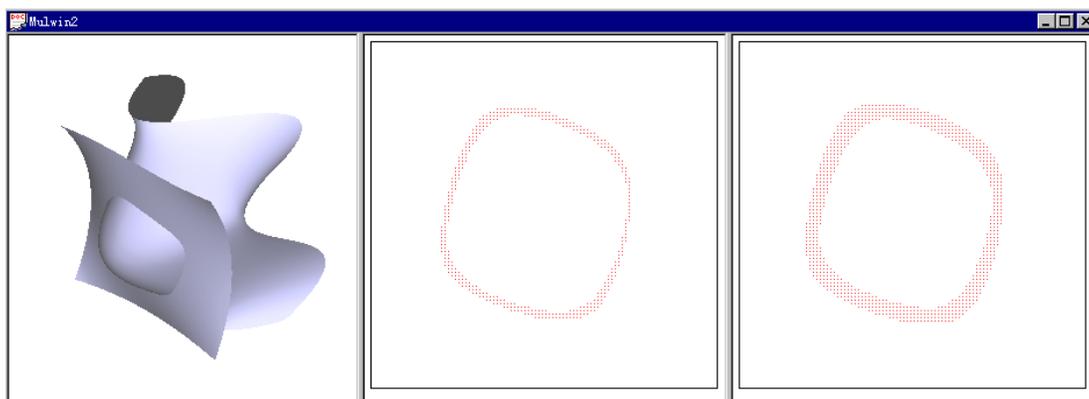
其中一张双三次 Bezier 曲面 D 的  $4 \times 4$  共 16 个控制顶点如下：

{0, 0, 0}, {1, 0, -3}, {2, 0, 3}, {3, 0, 0}  
 {0, 1, 3}, {1, 1, 4}, {2, 1, 4}, {3, 1, -3}  
 {0, 2, -3}, {1, 2, 4}, {2, 2, 4}, {3, 2, 3}  
 {0, 3, 0}, {1, 3, 3}, {2, 3, -3}, {3, 3, 0}

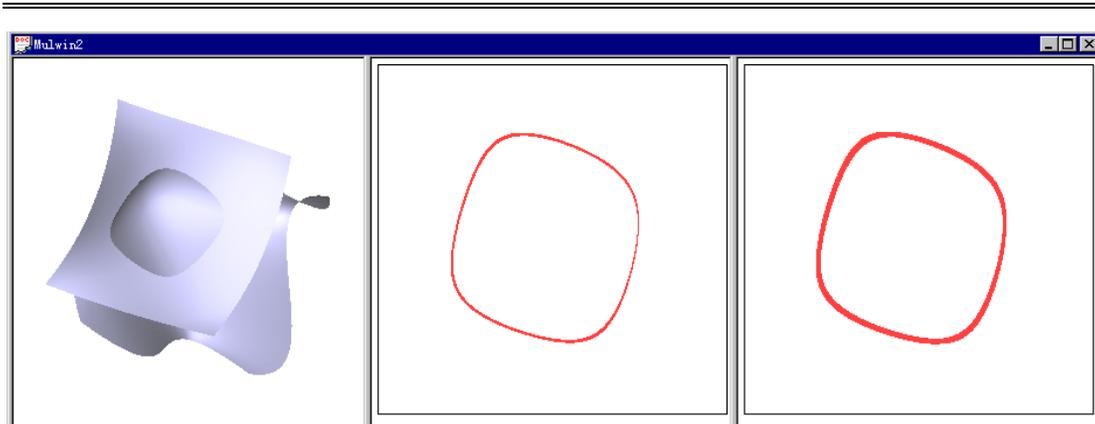
另一张双三次 Bezier 曲面 E,  $4 \times 4$  共 16 个控制顶点如下：

{0, 0, 1.5}, {1, 0, 1.2}, {2, 0, 1.3}, {3, 0, 1.5}  
 {0, 1, 1}, {1, 1, 2}, {2, 1, 2}, {3, 1, 1}  
 {0, 2, 1}, {1, 2, 2}, {2, 2, 2}, {3, 2, 1}  
 {0, 3, 1.8}, {1, 3, 1.6}, {2, 3, 1.8}, {3, 3, 1.6}

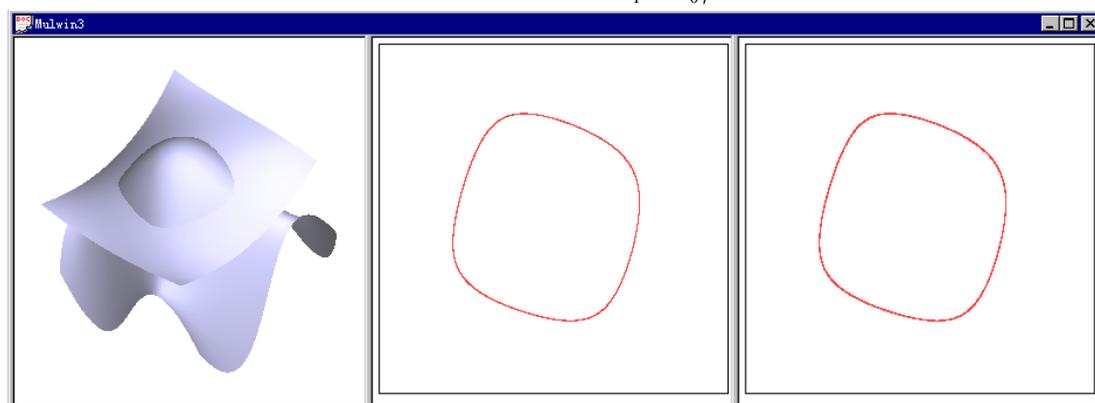
曲面 D 和曲面 E 求交得到的交线为参数域上的一个内环。图 9 中 (a) 为初始情况,  $h_0 = 1/n$ ,  $n = 100$  时, 通过选择策略的第一代群体的情况, (b) 为从第一代群体经过遗传算子产生的第二代情况, 此时  $h_1 = h_0/3$ , (c) 从第二代个体经过局部跟踪产生出的交线分支。



(a) 初始情况,  $h_0 = 1/n$ ,  $n = 100$



(b) 第二代情况,  $h_1 = h_0/3$



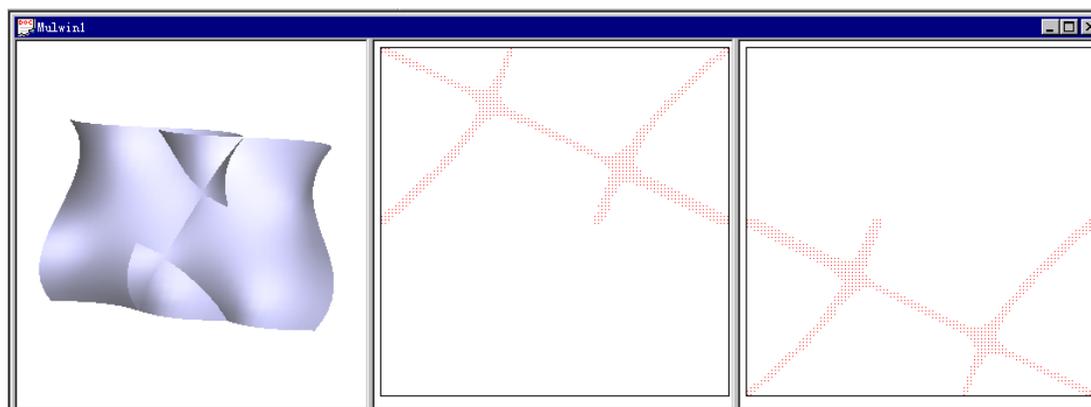
(c) 从第二代个体局部跟踪出的交线环

图 9 两张曲面 D、E 求交的情况

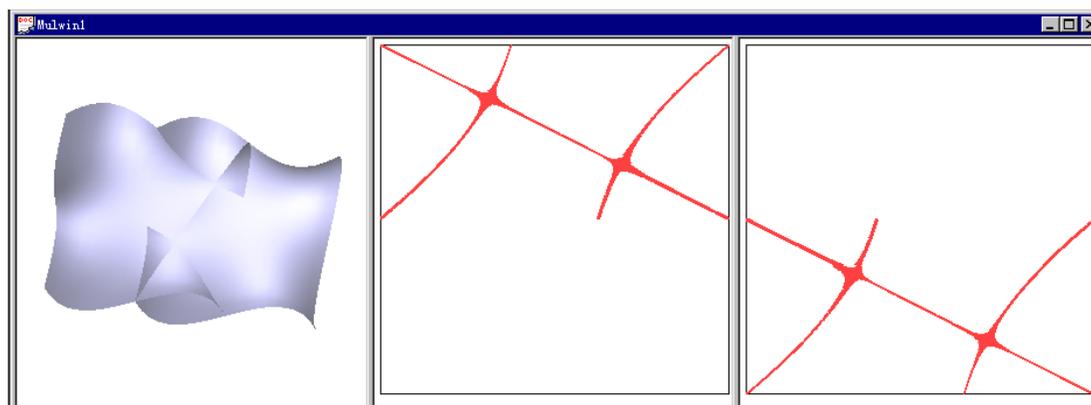
#### 4、退化情况I——多分支奇异点

在图 10 中为两张参数曲面求交的情况，第一张曲面 A 仍为上面图 7 中的双三次 Bezier 曲面 A，第二张曲面 F 为曲面 A 沿  $\{1, 0, 0\}$  方向的平移 1.5 个单位得到。很明显，曲面交线在两张曲面的参数域上都存在着两个多分支的奇异点，我们计算出在两个曲面参数域上的交线轨迹分别见图 10 (c) 中右边的两副图，左边为两张曲面的真实感图。

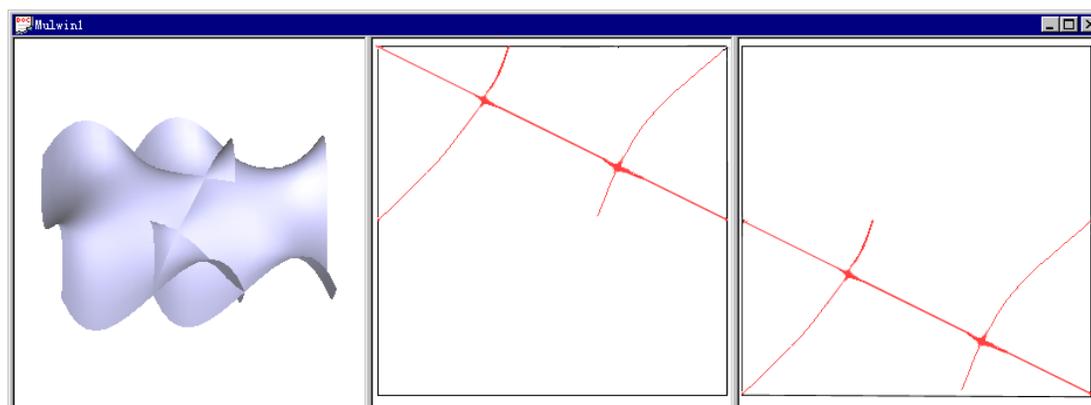
图 10 (a) 为初始情况， $h_0 = 1/n$ ， $n = 100$  时，通过选择策略的第一代群体的情况，图 10 (b) 为从第一代群体经过遗传算子产生的第二代情况，此时  $h_1 = h_0/3$ ，图 10 (c) 为从第二代个体经过局部跟踪产生出的交线分支，并处理了奇异点后得到的交线。



(a) 初始情况,  $h_0 = 1/n$ ,  $n = 100$



(b) 第二代情况,  $h_1 = h_0/3$

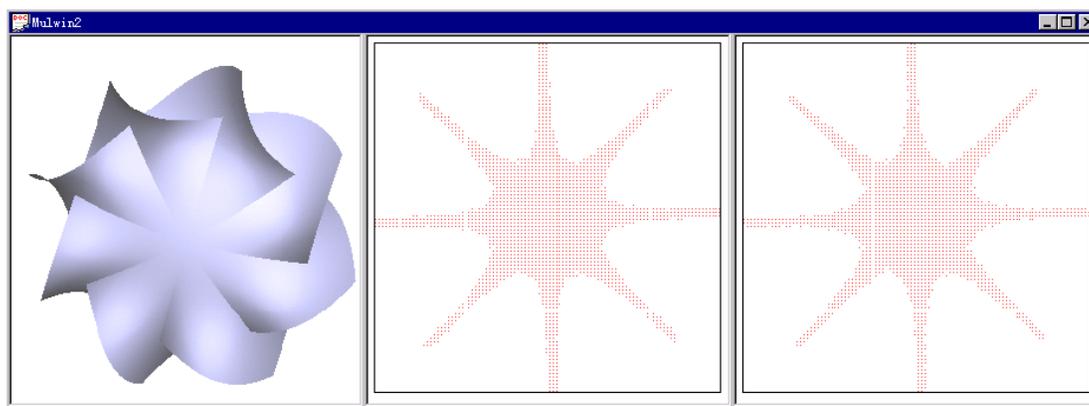


(c) 从第二代个体局部跟踪出的交线分支

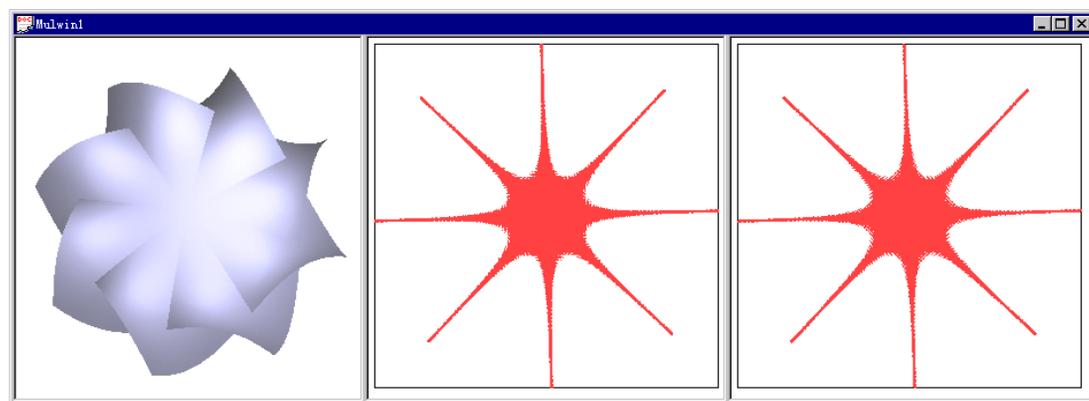
图 10 两张曲面 A、F 求交的情况

## 5、退化情况II——曲面局部重叠

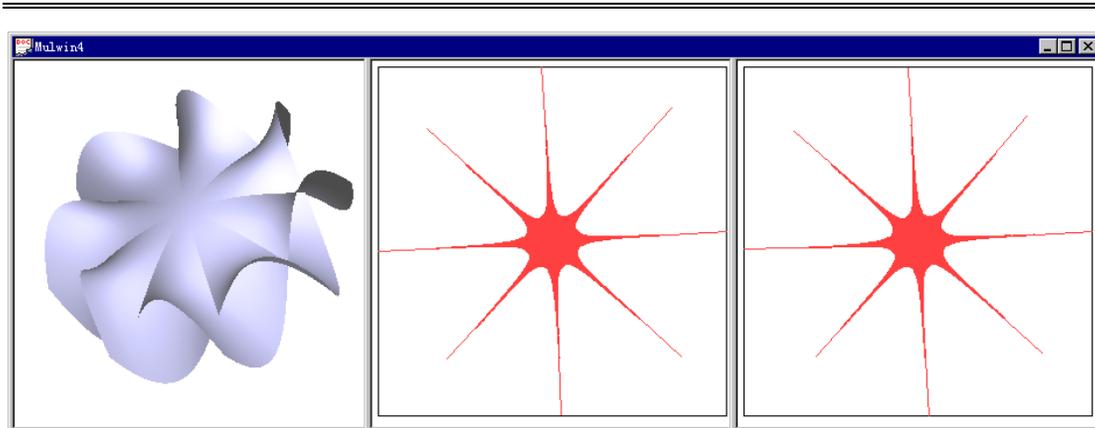
在图 11 中为两张参数曲面求交的情况，第一张曲面 A 仍为上面图 7 中的双三次 Bezier 曲面 A，第二张曲面 G 为曲面 A 以过点  $\{1.5, 1.5, 0\}$ ，方向为  $\{0, 0, 1\}$  的轴旋转  $\frac{\pi}{4}$  角度得到。很明显，在两张曲面的都存在着一个局部重叠区域，我们计算出在两个曲面参数域上的交线轨迹分别见图 11 (c) 中右边的两副图，左边为两张曲面的真实感图。图 11 (a) 为初始情况， $h_0 = 1/n$ ， $n=100$  时，通过选择策略的第一代群体的情况，图 11 (b) 为从第一代群体经过遗传算子产生的第二代情况，此时  $h_1 = h_0/3$ ，图 11 (c) 为从第二代个体经过局部跟踪产生的交线分支，并处理了奇异点后得到的交线情况。



(a) 初始情况， $h_0 = 1/n$ ， $n = 100$



(b) 第二代情况， $h_1 = h_0/3$



(c) 从第二代个体局部跟踪出的交线分支

图 11 给定曲面 A 与自旋转  $\frac{\pi}{4}$  角度后曲面 G 求交情况分析

需要指出的是，尽管上面五个例子中的曲面都是双三次 Bezier 曲面，但是我们的基于遗传算法的曲面求交算法本身对于曲面类型并无特殊要求，任何类型的曲面均适用。

## 第九节 结论

本章提出了一种将遗传算法运用到几何造型领域中曲面求交算法的一种新方法，通过将遗传算法与常规的曲面跟踪算法有效的结合在一起，将与领域知识相关的局部搜索策略运用于单纯的遗传算法来提高演化效率，充分利用了遗传算法的全局搜索能力和交线跟踪法的局部快速收敛性，得到了一种稳定可靠、精确高效的实用算法。本算法尚未运用分布式处理进一步优化执行效率，由于遗传算法的内在并行性，显然算法速度还可以提高，另外，对于遗传算法在几何造型领域的运用，这只是一个方面，对于其它几何操作、干涉检查等方向，仍然大有可为。

## 第四章 雕塑实体的布尔操作算法

### 第一节 引言

雕塑实体布尔操作算法大体分为三个阶段：求交检测、层次求交和分割、区域分类和生成体，算法流程如图 1所示。

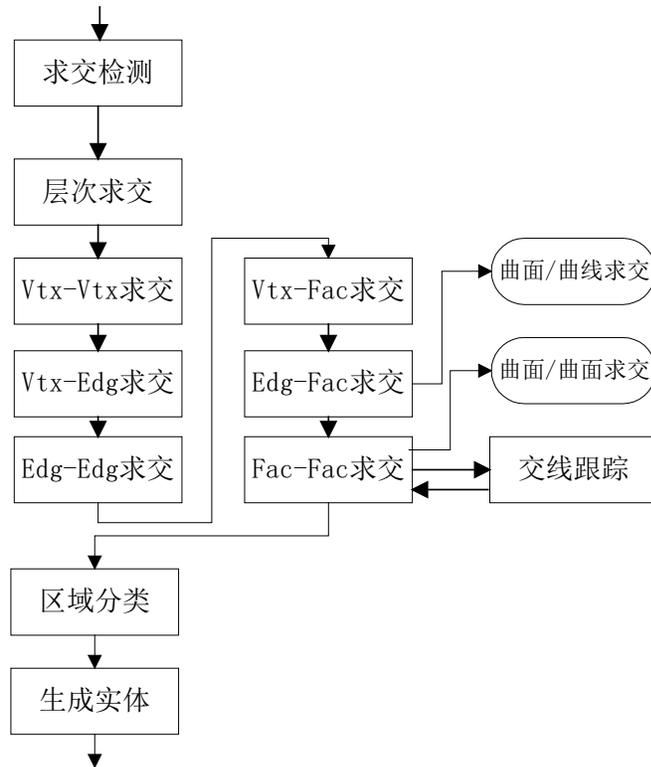


图 1 雕塑实体布尔操作的流程图

1. 求交检测：首先对于两个输入体的几何元素顶点、边、面，采用包围盒测试，线性规划法，去掉不相交的情况，记录可能相交的元素对。计算每个曲面片的包围盒，若某对包围盒不相交，则相对应的曲面片必不相交（有理 Bezier 曲面片的凸包性[Far93]）。冗余面对可通过包围盒的简单排序而去掉。其次，采用如下线性规划方法寻找：如果两个曲面片之间存在一个分离面，则曲面片不相交。由此，可去除包围盒之间存在分离面的面对。我们使用了 Seidel 的线性规划算法[Sei90]。在对实体实施了上两步操作后，只余下了少数有较大相交可能的面对。

2. 层次求交和分割: 对于求交检测后记录的可能相交的元素对, 按照顶点、边、面的层次关系进行几何求交, 即按 Vertex-Vertex, Vertex-Edge, Vertex-Face, Edge-Edge, Edge-Face, Face-Face 的次序, 来确保拓扑分割的一致性。为了提高求交速度和稳定性, 根据面面相交情况进行分析, 沿已求得的交线走向进行跟踪求交。在求交过程中, 适当插入新顶点、边, 并分割曲面片产生新曲面片, 得到的交线按照次序记录在交线链中。在进行 Edge-Face 求交、Face-Face 求交的过程中, 就采用了曲线/曲面求交和曲面/曲面求交算法。
3. 区域分类和生成体: 由于参加布尔操作的两个体封闭紧凑, 上一步得到的交线链必然是体边界上的一系列闭环, 它们把体划分为独立的边界部件。区域分类判别每个边界部件相对于另一个体边界的 in-out 关系, 然后根据布尔操作类型选择适当的边界部件沿着交线环进行边界粘合, 生成结果体。构成每个组分的所有曲面片相对另一个体都具有相同的内/外特性。因此对于每个组分, 计算其中任意一点的内/外特性即可。若一个体是闭合且不自交, 则可根据经过该点的一射线与实体的交点数来判断, 若交点个数为奇数, 则点在体内, 否则点在体外。为得到交点个数, 对另一个体的每个曲面片都必须进行线面求交计算。为避免这个耗时计算对另一个体的每个曲面片的重复, 我们使用了各组分之间的相连信息 (在上一步中求得), 从而每个实体只须操作一次。类似求相交面对, 我们使用包围盒计算和线性规划来加速这个操作。

本章下面各节分别讨论上面提到的相交检测、层次求交、交线跟踪分割、裁剪曲面求交等算法细节。在论文最后给出了算法对于非正则模型的推广, 并给出了算法在一个基于雕塑实体几何核心的参数化特征造型系统 GS-CAD 中的实现, 和一些造型实例。

## 第二节 相交检测

每个曲面片都有自己的包围盒, 由 Bezier 曲面的凸包性[Far93], 控制顶点的凸包完全包含了整张曲面, 因此通过包围盒测试可以过滤掉大部分不可能相交的情况, 然后运用线性规划来剪裁, 该线性规划问题表达为: 如果在两个曲面片有一个分离平面, 则它们不相交。因此, 如果在两个控制点集存在一个分割面, 则曲面片对不相交。我们实现了 Seidel[Sei90]的线性规划算法。通过这两种方法, 我们记录下少数可能相交的面对。

### 第三节 层次求交

在雕塑实体中，高维元素的边界通过低维元素来定义。因此在求交过程中，应先完成低维元素间的求交分割，然后再完成高维元素间的求交，这个过程称为层次求交。例如一个面与另一个面求交的结果依赖于它与定义该面的边、顶点相交的结果，另外低维的每条边会参与其两个高维邻面与其它表面求交，如果重复计算它与其它面的交点不仅费时，还可能引起分割的不一致性，参见右图 2：曲面  $S_1, S_2$  分别与  $S_0$  求交，边界空间曲线  $C_0$  两次与  $S_0$  求交，因误差引起交点  $P_0 \neq P_1$ ，引起曲线  $C_0$  被  $S_0$  分割不一致。

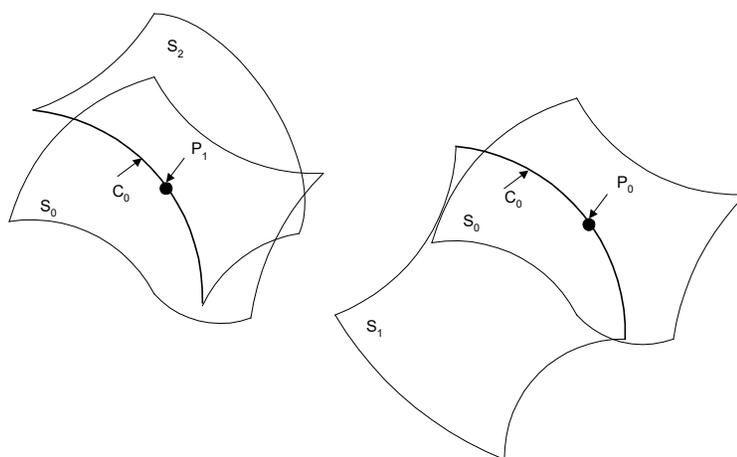


图 2  $S_1, S_2$  分别与  $S_0$  求交，因误差引起交点  $P_0 \neq P_1$ ，曲线  $C_0$  被  $S_0$  分割不一致

因此，我们采用了层次求交的算法，将求交按照 Vertex-Vertex 求交、Vertex-Edge 求交、Edge-Edge 求交和 Vertex-Face 求交、Edge-Face 求交、Face-Face 求交的次序进行。下面分别分析这些情况：

- Vertex-Vertex 求交：检测顶点是否重合，若重合则从后继 Vertex-Vertex, Vertex-Edge 和 Vertex-Face 求交中删除。
- Vertex-Edge 求交：判断顶点到曲线的距离，若在误差范围内，则将插入新顶点将边分裂，原顶点和新顶点标为重合，并不再参加后继求交，而两条新边参加后继求交。
- Edge-Edge 求交：若两条边曲线在误差范围内交于某点，将两条边分裂，并将两个新顶点标为重合，并不再参加后继求交，而新产生的边参加后继求交。
- Vertex-Face 求交：若顶点在误差范围内落在曲面上，在面上产生一个单

点内环，并将原顶点和新顶点标为重合。

- **Edge-Face 求交**：由于边的端点已经进行了 **Vertex-Face** 求交，重合顶点数为 0,1,2 若为 2，仍需进一步进行曲线和曲面重合测试，若重合，插入新边并将面分割。
- **Face-Face 求交**：进行参数曲面片求交，在已插入的单点内环间和已插入边根据交线插入新边将面进行分割。

## 第四节 交线跟踪分割

在第三章曲面求交算法求出了 **Face-Face** 相交的曲面交线的基础上，我们采用了交线跟踪分割技术来求出交线链。

求交的过程可以看成找出所有曲面片的交线段，可以进行穷举式的两两求交，但考虑到几何求交中的计算误差可能带来后继连接失败，从而导致生成拓扑非法的实体，我们采用了交线跟踪的方法。在曲面的参数域上考虑交线的情况，可分为以下几种情况（如图 3 所示）：

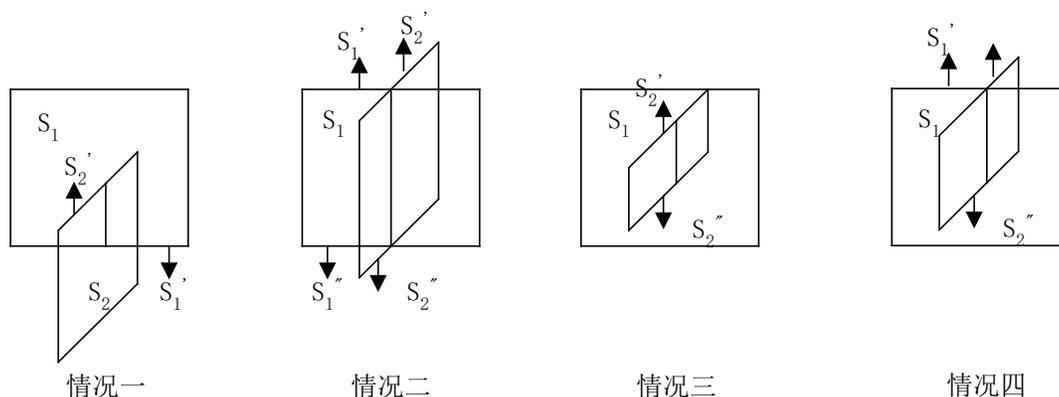


图 3 跟踪情况

- 情况一：下次加入求交面对为  $(S_1, S_2')$ 、 $(S_2, S_1')$
- 情况二：下次加入求交面对为  $(S_1', S_2')$ 、 $(S_1'', S_2'')$
- 情况三：下次加入求交面对为  $(S_1, S_2')$ 、 $(S_1, S_2'')$
- 情况四：下次加入求交面对为  $(S_1', S_2')$ 、 $(S_1, S_2'')$

在实际求交情况下，预测可能并不符合实际情况，算法在最坏情况下退化为穷举法。

跟踪分割具体算法如下（伪代码见图 4）：

1. 设  $(f_i, f_j)$  为经过相交检测后，仍有可能相交的面对， $f_j \subset S_B, f_i \subset S_A$ ，从候选面对缓冲池中取出  $(f_i, f_j)$ ；
2. 如果  $(f_i, f_j)$  的交线集  $C_{ij} \neq \Phi$ ，继续，否则跳转 6；
3. 如果  $C_{ij}$  封闭，将  $C_{ij}$  加入交线链缓冲池中，跳转 6，否则，继续；
4. 如果  $C_{ij}$  可与不封闭交线链缓冲池中某段相连产生  $C'_{ij}$ ，则继续，否则将  $C_{ij}$  加入不封闭交线链缓冲池中，跳转 6；
5. 如果  $C'_{ij}$  封闭，则将  $C'_{ij}$  加入交线链缓冲池中，继续，否则将  $C'_{ij}$  加入不封闭交线链缓冲池中，继续；
6. 根据  $f_i, f_j$  的拓扑信息，进行交线跟踪，更新候选面对缓冲池，继续；
7. 如果候选面对缓冲池非空，从候选面对缓冲池取出  $(f_i, f_j)$ ，跳转 2，否则返回，求交结果在交线链缓冲池中。

Tracing\_And\_Intersecting ()

```

{
  // (f_i, f_j) 为经过相交检测后，仍有可能相交的面对， f_j \subset S_B, f_i \subset S_A
  fetch (f_i, f_j) from FacePairPool
  while (1) {
    if (f_i, f_j) intersection curvs C_{ij} \neq \Phi {
      if IsClosed(C_{ij})
        Keep C_{ij} in IntersectionLoopPool
      else
        if C_{ij} can link with others in
          UncompleteLoopPool into C'_{ij} then
          if IsClosed(C'_{ij}) then
            Keep C'_{ij} in IntersectionLoopPool
          else
            Keep C'_{ij} in UncompleteLoopPool
        else
          Keep C_{ij} in UncompleteLoopPool
    }
    Tracing according to f_i, f_j's topological information
    Fetch next pair(s) from FacePairPool then add to IntersectionTracePool
    If !Empty(IntersectionTracePool) {

```

```

    Fetch ( $f_i, f_j$ ) from IntersectionTracePool
    continue;
  } else
    if !Empty(FacePairPool)
      Fetch ( $f_i, f_j$ ) from FacePairPool
      continue;
    else
      return; // All result in InersectionLoopPool
  }
}

```

图 4 跟踪分割的伪代码

## 第五节 多边形三角化算法

Seidel 在文献[Sei91]中给出了一个二维  $n$  条线段进行梯形分解的增量随机算法。该算法的期望复杂度为  $O(n \log^* n)$ ，该算法可以被用于多边形三角化，并且同时可产生一个可以在  $O(\log n)$  时间内回答点定位查询的结构。

该算法由以下三步组成，见图 5：

1. 多边形的梯形化：设  $S$  为一个多边形中非水平、非自交的线段集。我们采用一个随机算法来完成在  $X-Y$  平面上  $S$  线段集的梯形分解。随机取  $S$  中的一个线段序列  $s_1, s_2, \dots, s_n$ ，每次加入一条线段来进行增量构造梯形。这使得多边形分解为一系列梯形区域（如果梯形的水平线段长度为 0，则退化为三角形）梯形的个数与线段数成线性关系。Seidel 证明了如果  $s_1, s_2, \dots, s_n$  的排列机会均等，则梯形化的期望复杂度为  $O(n \log^* n)$ 。
2. 分解梯形为单调多边形：单调多边形是指多边形的边界由两个  $Y$  向单调的链组成。那些由梯形分解出的多边形通过检查是否原多边形的两个顶点在水平线的同侧来进行进一步分解。这步同样为线性时间。
3. 单调多边形三角化：通过采用一个简单的贪心算法重复的切掉多边形的凸角 [FM84]，一个单调多边形可以在线性时间内三角化。因此所有的单调多边形可在  $O(n)$  时间内三角化。

在我们的布尔操作算法中，我们用简单多边形表示曲面片的裁剪区域。在进行区域分类时的光线投射和裁剪区域求交时，我们要进行点在裁剪区域的内外判别。我们采用了文献[NM95] 中的快速实现来处理。

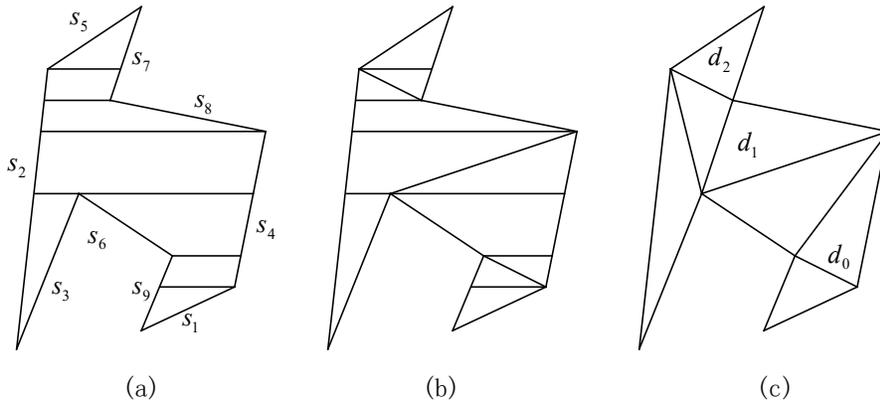


图 5 Seidel 的多边形三角化算法

## 第六节 裁剪曲面求交

在第三章中，我们给出了两张参数曲面的求交算法，得到的是在两张参数曲面参数域上的交线链，根据前面对参数裁剪曲面的定义，裁剪曲面的有效部分有一系列参数域上的样条围成，为了得到曲面求交后，参数裁剪曲面被分割后仍有效的区域，我们必须在参数域上用交线进行分割。

参见图 6，在 (a) 中的裁剪曲面参数域上，用第三章的曲面求交算法得到的交线用虚线表示，裁剪曲面的有效部分的边界用实线表示，我们为了降低算法复杂度，采用了二维的求交计算，得到了 (b) 中的分割情况，阴影部分为求交分割后的有效部分。

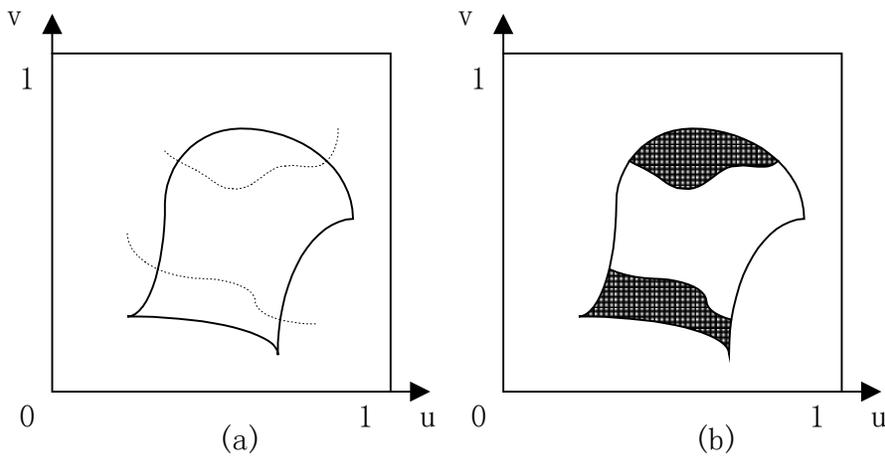


图 6 裁剪曲面求交

## 第七节 区域分类和退化情况处理

求交过程的结果是得到交线环和被分割开的边界部件，我们需要对于每个边界部件进行分类测试，再根据特定的布尔操作类型决定该边界部件是否属于新实体，规则如下：

$$\begin{aligned} A \cup B &= A_{out}B \otimes B_{out}A \otimes A_{on}B^+ \\ A \cap B &= A_{in}B \otimes B_{in}A \otimes A_{on}B^+ \\ A - B &= A_{out}B \otimes (B_{in}A)^{-1} \otimes A_{on}B^- \end{aligned}$$

为了实现简便将 on 用 out 或 in 来代替，替代规则如下：

$OP$	$A_{on}B^+$	$A_{on}B^-$
$\cup$	$A_{out}B$	
$\cap$	$A_{in}B$	
$-$		$A_{out}B$

于是得到：

$$\begin{aligned} A \cup B &= A_{out}B \otimes B_{out}A \\ A \cap B &= A_{in}B \otimes B_{in}A \\ A - B &= A_{out}B \otimes (B_{in}A)^{-1} \end{aligned}$$

A, B 为参加布尔操作的两个实体。

对边界部件进行分类测试的过程称为区域分类。由于实体封闭紧凑，如果边界部件上的一个顶点在另一个实体外部，则整个边界部件在另一个实体外部，反之亦然。

判断一个顶点在一个实体内是一个很费时的操作，通过计算从该点出发的一条射线与实体交点的个数，如果奇数个则点在内部，否则在外部，这涉及到曲线/曲面求交，其复杂度对于曲面的次数很敏感。事实上由实体的拓扑信息，我们可以得到边界部件间的邻接关系，对于每个实体只需要计算一次内外测试就可以完成其区域分类。由于实体边界连续，从一个边界部件跨过交线环到达邻接边界部件时，其相对于另一个实体的内外关系取反。通过确定一个边界部件的分类属性，然后通过交线环扩散到实体的所有边界部件。

退化情况是所有实用系统必须面对的问题，在大多数系统中，退化情况会导致失败或退出，退化情况可分为奇异点、接触边、面重合三种情况[CB89]，由于采用了层次求交和跟踪分割，我们的实现能较好的处理前两种情况，以及当两个曲面片重合区域被曲线边界界限时，这已经能够较好满足实践的需要。

## 第八节 算法实现

我们已经在台 SGI O2 工作站平台上用 C 语言实现了该算法, 本研究是对参数化特征造型系统 GSCAD 的造型核心的增强, 原系统采用的是多面体模型, 但考虑到应用领域对于高精度数控加工、外形美学设计的要求, 我们引入了雕塑实体模型, 而布尔操作是一个重要的造型手段。

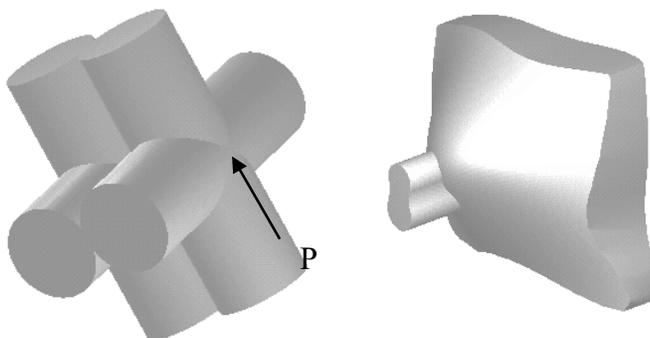


图 7 四个垂直圆柱并操作 图 8 两个自由实体并操作

下面是两个实例, 图 7 为鲁棒性测试, 在四个圆柱体中, 上下两排圆柱表面外切, 并且两个垂直圆柱在交点 P 有公共切向量, 三次布尔操作在 SGI O2 上运行时间为分别为 0.02s, 0.07s, 0.12s, 显然形状复杂使得布尔操作速度下降, 图 8 是两个由自由曲面形成的雕塑实体的并操作, 运行时间为 0.46s。这已经可以满足交互设计的需要。在最坏情况下, 两个实体的所有曲面片都相交时, 算法的复杂度为  $O(mn)$ ,  $m, n$  分别为两个实体中的曲面片数。在造型实践中, 通过大量的雕塑实体的布尔操作随机测试, 算法的平均复杂度为  $O(k)$ ,  $k$  为实际相交的曲面片对数。布尔操作的实现代码仍可以进一步优化, 通过使算法并行化, 应该可以使效率进一步提高, 这是我们在第五章讨论的内容。

## 第九节 非正则模型推广

随着特征造型技术的飞速发展, 对于几何造型系统核心的要求也进一步提高。只支持单一实体模型的造型核心在以下几个方面受到了挑战[Wil85, Hof89, Mas93, Str90]:

1. 由于缺乏曲面模型, 无法精确地表达和操作符合特定形状、连续性条件的雕塑曲面片;
2. 针对于不同的应用, 形状特征应可以表达为任意维数: 例如体特征、面特征和线框特征等;

3. 几何形状应可以以线框、曲面和实体的形式存在，因为在各个独立的设计阶段，并不总需要完整的实体模型；
4. 基于精确实体模型的鲁棒、高效和精确的布尔操作是目前提高造型能力的瓶颈。

为了将线框、曲面和实体的表示和操作置于统一的体系结构下，我们采用了非正则精确模型来表示几何模型。

在非正则模型中，模型表示满足[GCF91]:

- 一个顶点表示为 0 维元素，对应于  $R^1$  中的一个位置矢量；
- 一条边表示为一个连通的、开放有界的 1 维元素，对应于参数域上的一条样条，并不包含端点；
- 一个面表示为一个连通的、开放有界的 2 维元素，对应于参数域上的一个剪裁区域，并不包含边界顶点和边；
- 一个体表示为一个连通的、开放有界的 3 维元素，根据其边界面的法向量对应于  $R^3$  上的一个空间区域，并不包含边界上的顶点、边和面；

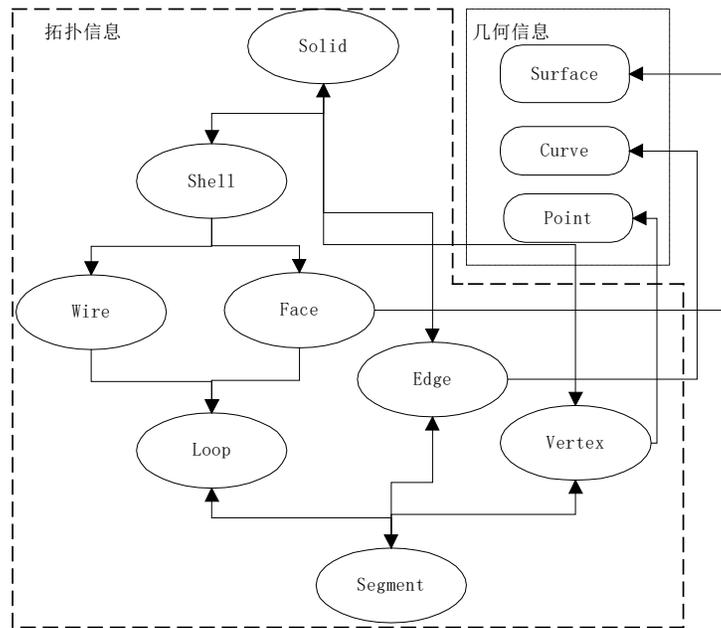


图 9 非正则精确模型的数据表示

图 9 中给出了非正则精确模型的数据结构，图中右上角为几何信息，左部为拓扑信息，在图中线框、曲面和实体模型统一于体(Solid)的结构下。每个模型

在拓扑上由体、壳、线框、面、边、顶点、半边组成，面包含一个或多个环，环由半边构成，每条边分为一对方向相反的半边。几何信息由分别附加在面、边、顶点上的裁剪曲面、空间曲线、空间点信息组成。

体模型中的面的几何信息为一张参数裁剪曲面，边的几何信息为一条  $R^3$  上的空间样条，这是为了克服两个邻接面定义在曲面参数域上的边界曲线由于误差产生裂纹。顶点的几何信息为  $R^3$  上的一个位置矢量。

为了精确表达雕塑曲面，每个体的面的几何信息通过一组参数裁剪曲面片定义，我们用张量积有理 Bezier 曲面  $F(s,t)$  表示每个曲面片：

$$F(s,t) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{ij} V_{ij} B_i^m(s) B_j^n(t)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{ij} B_i^m(s) B_j^n(t)}$$

$$(0 \leq s \leq 1, 0 \leq t \leq 1)$$

其中  $V_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$  为曲面片的控制顶点， $B_i^m(s) = \binom{m}{i} s^i (1-s)^{m-i}$  为 Bernstein 多项式。 $F(s,t)$  可看成从参数空间  $(s,t)$  平面到三维空间  $R^3$  的一个映射。裁剪曲面通过原参数空间和其上的裁剪曲线定义，裁剪曲线一般是高阶曲线，不能精确参数化，我们用参数域上的分段线性链来近似表示，得到的裁剪区域为曲面参数域上的多边形，为了表示紧凑，在一定误差范围内用样条近似高阶交线，这样裁剪区域就通过曲面参数域上的一组样条定义。

在几何元素求交时，我们采用了层次求交的方法。原因有两个，一是由非正则模型中的拓扑层次结构决定的；另一方面是因为高维元素的边界通过低维元素来定义，从而避免了分别求交时由于计算误差引起的裂纹，和拓扑生成的不一致性。对于曲面求交的退化情况，例如部分重叠，可以通过侧面边界曲面交线来找出结果，而不是直接对重叠曲面求交，从而提高了系统的可靠性。另一个关键技术是交线跟踪，在几何求交的过程中，利用模型的拓扑信息，找出相邻最有可能相交几何元素对，并记录跟踪交线分支，从而易于克服布尔操作中由于交线不封闭而引起区域分类失败的情况。

我们在参数化特征造型系统 GS-CAD98 的造型实例为例，在下面图 10 的实例中，对于左边叶轮，用 13 个辅助面求其截面，每次做截面都进行了一次实体模型与曲面模型（该处为平面）的布尔操作。右下为 13 个截面的重叠图，右上为其中的一个截面，图 11 为一个减速机装配件（不完整）的半剖切图，图

12为基座线框模型与平面相交的截交线。

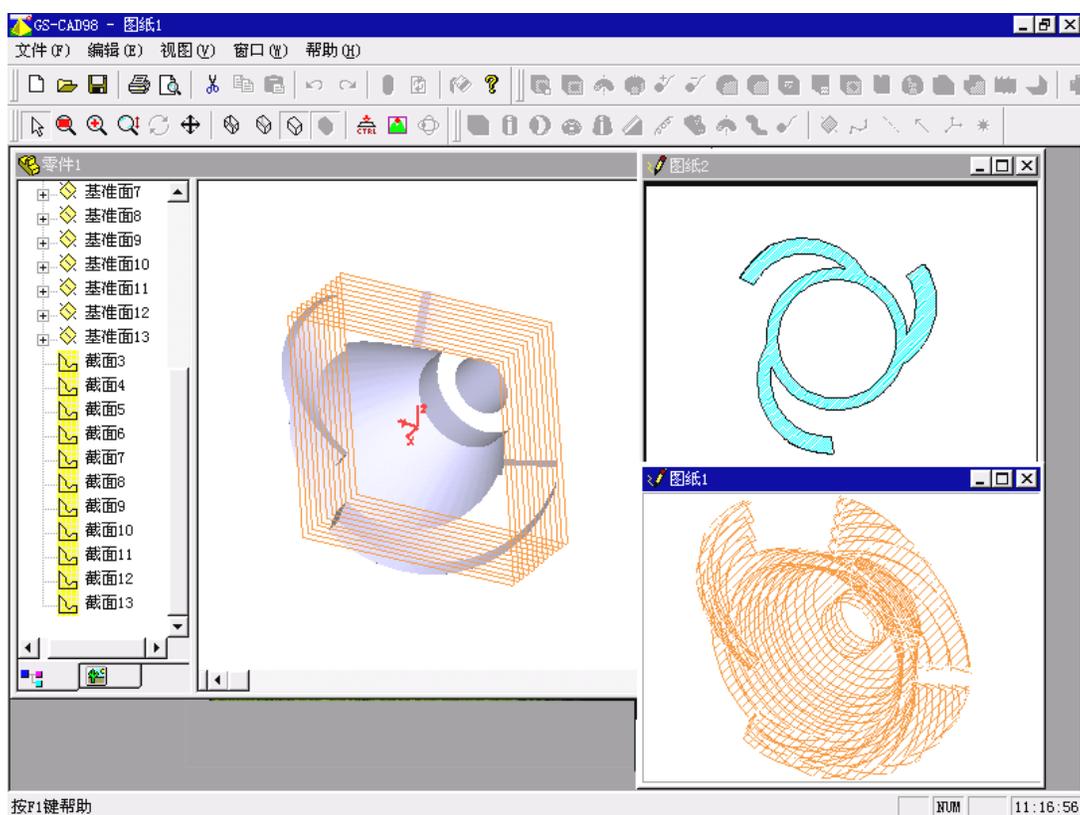


图 10 叶轮截面实例

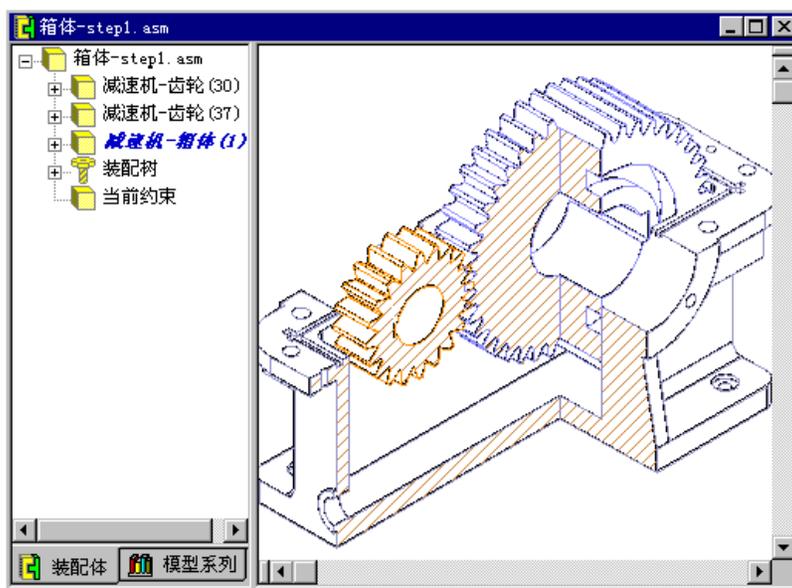


图 11 减速机装配件（不完整）剖切图

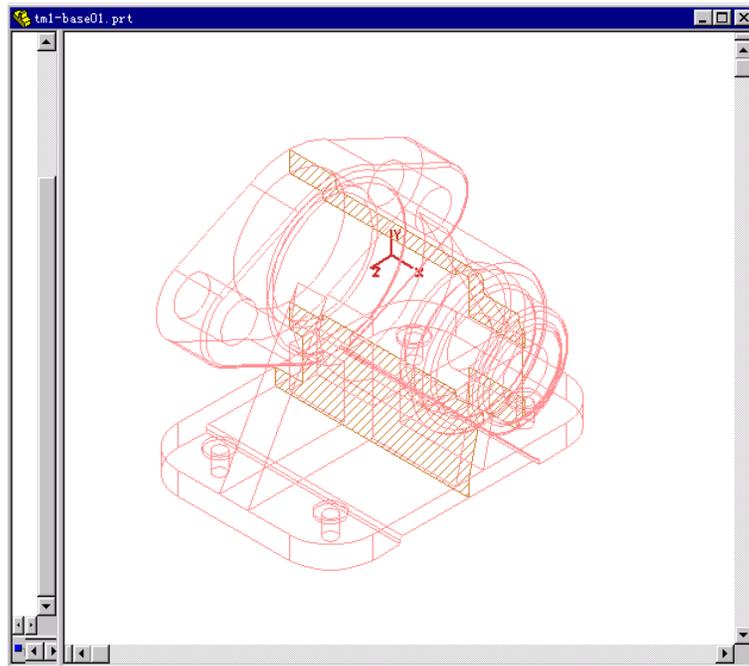


图 12 基座线框截面实例

## 第十节 结论

本章给出了一个完成的雕塑实体布尔操作的算法结构，主要讨论了提高鲁棒性的层次求交和交线跟踪的方法，来保证曲面片分割和区域分类的一致性，从而克服实践中常见的退化情况，并可以方便地扩展到非流形模型的布尔操作，通过在参数化特征造型系统 GS-CAD 中的大量造型测试，本算法达到了精确、稳定的设计目标。



## 第五章 分布式雕塑实体布尔操作

### 第一节 引言

在一些虚拟制造系统中，允许用户在虚拟环境中用布尔操作对产品模型进行实时操作，这对于系统的计算性能提出了更高的要求。在进行产品造型时，实时的交互式设计是用户的迫切要求。鲁棒精确的雕塑实体的布尔操作一直是造型系统的效率瓶颈[Hof89]。一方面，单机的硬件性能难以满足需要，而另一方面，它常常存在于一个多机的局域网环境中（如图 1），网络中的其它机器可能正处于闲置状态。因此，采用分布式并行算法是加快布尔操作的一个有效

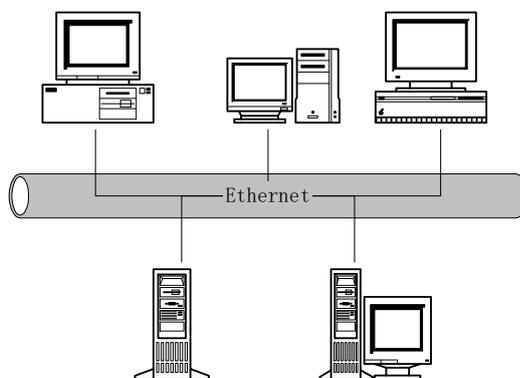


图 1 多机网络环境

方法。

采用分布式系统有许多潜在的优点，主要是：

1. 能提高系统的可用性。当系统中的某些机器出现故障时可以采取有可能降低性能的方法使系统不停止工作；
2. 能提高系统的坚固性；
3. 高灵活性，便于扩充或修改；
4. 高性能，这主要通过并行处理来得到。一个分布式系统，不但有并行处理能力，而且采用分布式控制，可以避免各类“瓶颈”与同步等待，所以有潜在的高性能；
5. 低价格性能比。由于超大规模电路技术的飞速发展，单个芯片的功能越来越强，而价格却越来越低，因此用这种芯片或微型机（或工作站）来

组成分布式系统，其价格/性能比往往比单机系统低。

对于布尔操作的研究，国外主要用于大型 CSG 模型到 B-rep 模型的边界求取[RV85, Man88, Hof89, RR92]。目前对于雕塑实体布尔操作的研究主要集中于计算 Bspline 曲面或 Bezier 曲面对应的求交问题[SN91, Hoh92, KM94, HMPY97]。Mantyla 在文献[MR86]中提到了用 HutDesign 系统进行交互式实体造型的问题。并行的布尔操作算法在文献中很少提及。

最新的工作是 Krishnan[KGMM97] 在一台四 CPU 共享主存的 SGI 工作站上实现了交互式的 CSG 模型到 B-rep 模型转换的系统。他的算法针对多 CPU 共享主存的硬件体系结构，由于受硬件价格条件的限制，一般计算机的 CPU 个数很难达到很多，而算法对于实体模型的拓扑相关性未能充分利用，并且在鲁棒性方面仍存在问题。

我们的主要工作是实现了一个基于异构多机型的局域网的分布式雕塑实体布尔操作的并行算法。主要算法是在第四章串行算法的基础上提取各阶段的并行性，针对原算法的拓扑相关性，采用折衷策略，并对于不同的并行任务采用不同的负载均衡手段，将任务分布到不同的处理器上，以获得实时计算效果。对于常见的网络出错情况，算法也进行了相应的处理，确保任务的最终完成。

以下各节如下组织：第二节，讨论了系统中雕塑实体模型的数据表示，第三节，布尔操作算法的总体结构，第四节，拓扑相关性与并行性的折中策略，并行算法的负载均衡策略以及出错处理，第五节，一些系统实现的细节问题，第六节，给出了一组实例零件的实验数据分析和结论。

## 第二节 算法概述

我们的分布式系统采用了 Supervisor-Worker-Collector 模型，如图 2，其中 Supervisor 负责任务划分分配和处理机状态控制，Worker 完成子任务的计算工作，计算结果由 Collector 统一收集。

Supervisor-Worker-Collector 模型是广泛使用的 Client-Server 模型的一种改进模型，与后者相比，该模型具有以下优点：

1. 具有更大的灵活性；
2. 除了支持任务级并行系统的实现外，还支持算法级并行系统的实现；
3. 坚固性好，并且容易使负载平衡。

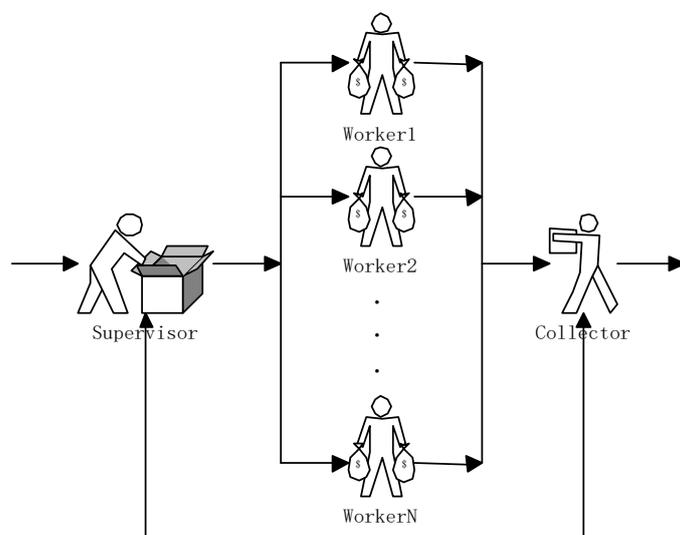


图 2 分布式系统结构模型

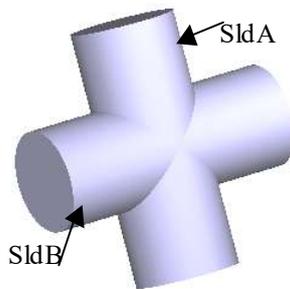
整个算法大体分为三个阶段：求交检测、曲面片求交和分割、区域分类和生成体[KGMM97]。

1. 求交检测：首先对于两个输入体的几何元素顶点、边、面，采用包围盒测试，线性规划法，去掉不相交的情况，记录可能相交的元素对。计算每个曲面片的包围盒。因为每个曲面片的包围盒可独立计算，这一步可并行执行。若某对包围盒不相交，则相对应的曲面片必不相交（有理 Bezier 曲面片的凸包性[Far93]）。冗余面对可通过包围盒的简单排序而去掉。其次，采用如下线性规划方法寻找：如果两个曲面片之间存在一个分离面，则曲面片不相交。由此，可去除包围盒之间存在分离面的面对。我们使用了 Seidel 的线性规划算法[Sei90]。对实体实施了上两步操作后，只余下了少数有较大相交可能的面对。
2. 曲面片求交和分割：对于求交检测后的记录的可能相交的元素对，按照顶点、边、面的层次关系进行几何求交，即按 Vertex-Vertex, Vertex-Edge, Vertex-Face, Edge-Edge, Edge-Face, Face-Face 的次序，来确保拓扑分割的一致性。为了提高求交速度和稳定性，根据面面相交情况进行分析，沿已求得的交线走向进行跟踪求交。在求交过程中，适当插入新顶点、边，并分割曲面片产生新曲面片，得到的交线按照次序记录在交线链中。由于每个面对的求交运算彼此独立，这步操作可并行执行。对于参数曲面求交，本系统采用了第三章中的算法。对于交线中的开环，它必然与曲面边界有一个交点，结合层次求交技术，这个交点由 Edge-Face 求交

中曲线和曲面求交得到，我们用它作为曲面求交的初始迭代点。

3. 区域分类和生成体：由于参加布尔操作的两个体封闭紧凑，上一步得到的交线链必然是体边界上的一系列闭环，它们把体划分为独立的边界部件。区域分类判别每个边界部件相对于另一个体边界的 **in-out** 关系，然后根据布尔操作类型选择适当的边界部件沿着交线环进行边界粘合，生成结果体。构成每个组分的所有曲面片相对另一个体都具有相同的内/外特性。因此对于每个组分，计算其中任意一点的内/外特性即可。若一个体是闭合且不自交，则可根据经过该点的一射线与实体的交点数来判断，若交点个数为奇数，则点在体内，否则点在体外。为得到交点个数，对另一个体的每个曲面片都必须进行线面求交计算。为避免这个耗时计算对另一个体的每个曲面片的重复，我们使用了各组分之间的相连信息（在上一步中求得），从而每个实体只须操作一次。曲面片的基于光线投射的组分分类，可并行执行。类似求相交面对，我们使用包围盒计算和线性规划来加速运算。

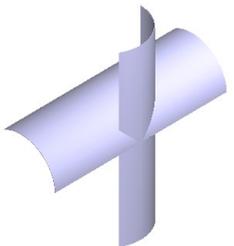
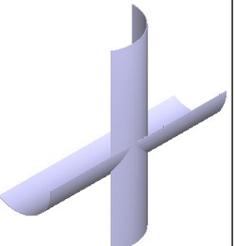
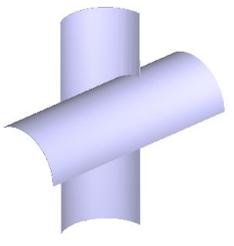
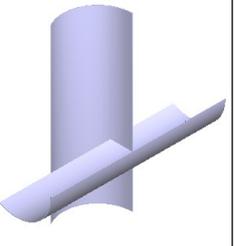
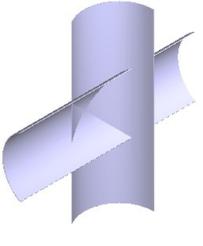
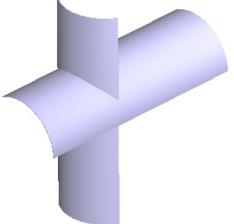
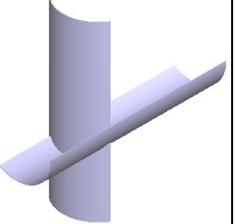
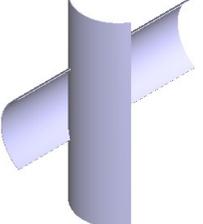
图 3以两个轴向垂直的圆柱的并操作为例，演示了在三个处理器上运行的并行算法的流程。



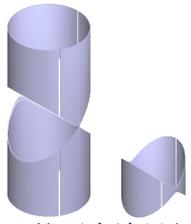
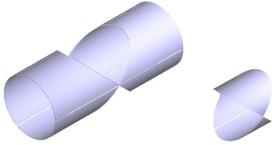
两个轴向垂直的圆柱的并操作

第一步：求交检测

第二步：曲面片求交和分割

处理器 1			
处理器 2			
处理器 3			

第三步：区域分类和生成体

 <p>S1dA 的两个边界部件</p>	 <p>S1dB 的两个边界部件</p>
---	--

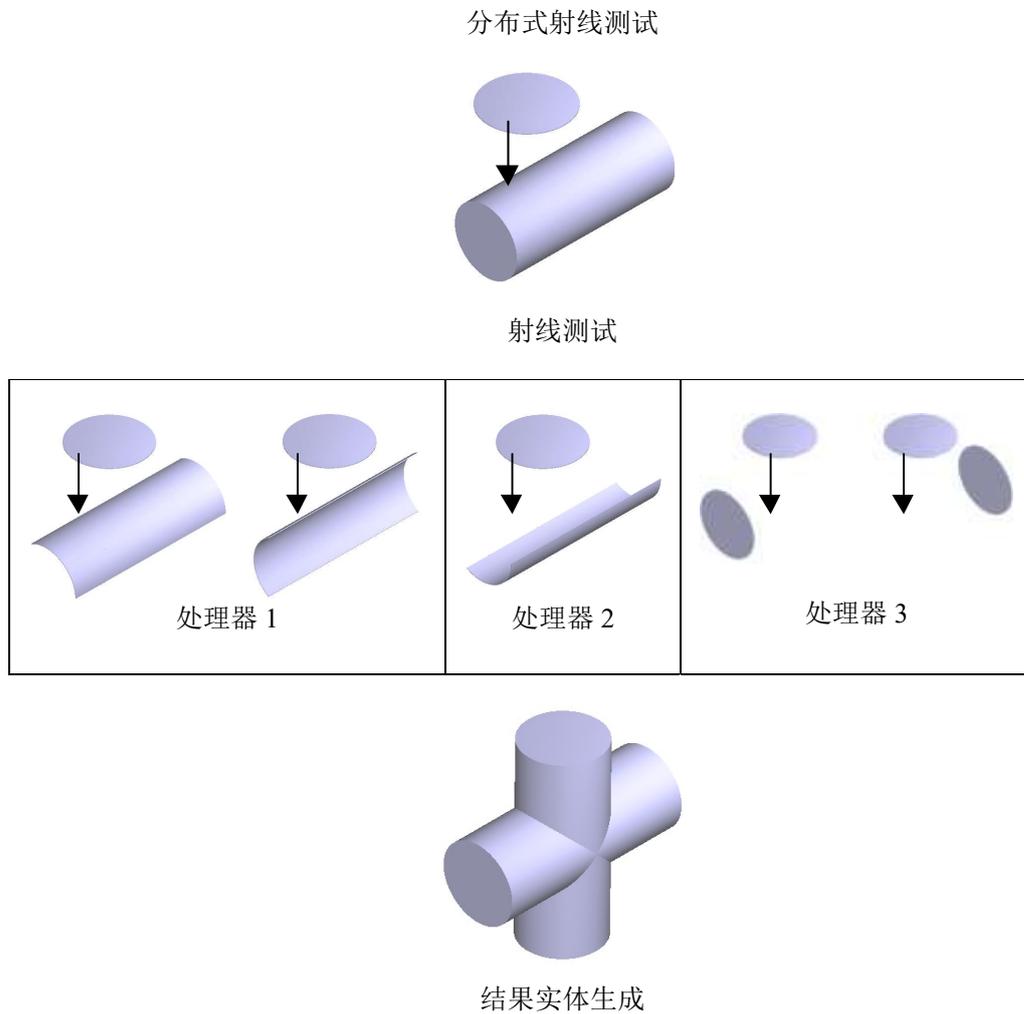


图 3 分布式 Boolean 操作实例

### 第三节 并行处理技术

#### 1、 拓扑相关性

在串行算法中，我们利用了拓扑层次结构，来进行层次求交。在实体中，高维元素的边界通过低维元素来定义。因此在求交过程中，应先完成低维元素间的求交分割，然后再完成高维元素间的求交，这个过程称为层次求交。例如一个面与另一个面求交的结果依赖于它与定义该面的边、顶点相交的结果，另外低维的每条边会参与其两个高维邻面与其它表面求交，如果重复计算它与其它面的交点不仅费时，还可能引起分割的不一致性，参见图 4：曲面  $S_1, S_2$  分别与  $S_0$  求交，边界空间曲线  $C_0$  两次与  $S_0$  求交，因误差引起交点  $P_0 \neq P_1$ ，引起曲线  $C_0$

被  $S_0$  分割不一致。因此，我们采用了层次求交的算法，将求交按照 Vertex-Vertex 求交、Vertex-Edge 求交、Edge-Edge 求交和 Vertex-Face 求交、Edge-Face 求交、Face-Face 求交的次序进行。

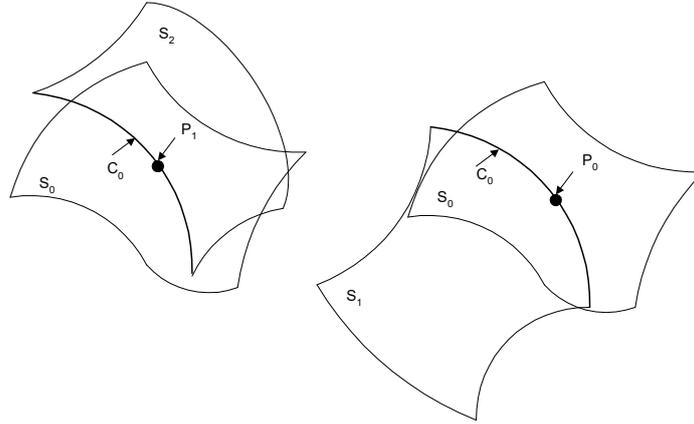


图 4  $S_1, S_2$  分别与  $S_0$  求交，因误差引起交点  $P_0 \neq P_1$ ，曲线  $C_0$  被  $S_0$  分割不一致

另外，我们还利用拓扑连续性采用了交线跟踪分割技术来求出交线链。求交的过程可以看成找出所有曲面片的交线段，可以进行穷举式的两两求交，但考虑到几何求交中的计算误差可能带来后继连接失败，从而导致生成拓扑非法的体，我们采用了交线跟踪的方法。在曲面的参数域上考虑交线的情况，如图 5 可分为以下几种情况：

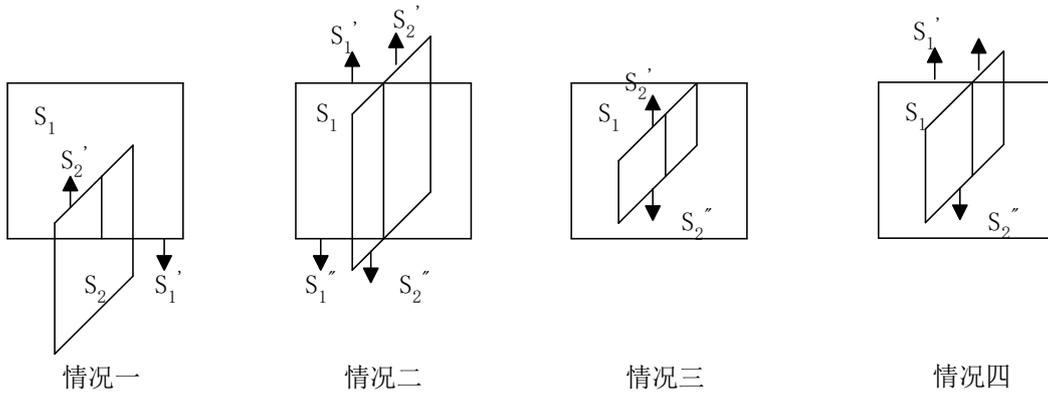


图 5 交线跟踪情况

- 情况一：下次加入求交面对为  $(S_1, S_2')$ 、 $(S_2, S_1')$
- 情况二：下次加入求交面对为  $(S_1', S_2')$ 、 $(S_1'', S_2'')$
- 情况三：下次加入求交面对为  $(S_1, S_2')$ 、 $(S_1, S_2'')$

- 情况四：下次加入求交面对为  $(S'_1, S'_2)$ 、 $(S_1, S_2)$

在区域划分阶段的射线求交算法中，我们也利用了拓扑连续性。

由于利用了拓扑层次结构，在并行算法中，我们也按 Vertex-Vertex 求交、Vertex-Edge 求交、Edge-Edge 求交和 Vertex-Face 求交、Edge-Face 求交、Face-Face 求交的次序来分配任务。同样，对于拓扑连续性，我们针对交线跟踪的情况，动态生成求交子任务，分配到各处理机。

## 2、 任务均衡策略

当一个算法需要在多个处理机上并行运行时，便产生了均衡负载的问题。并行算法的运行时间由各台处理机工作时间的最大值决定。显然，最高效的算法中，任务应平均分配至各个处理机。由于没有各种并行算法的通用解法，均衡负载的问题长期以来一直受到关注。不同解法的效率因应用特性的变化而不同。因此，需要一种新的基于问题特性的分析方法以选择最有效的均衡负载技术。以下是我们可采用的三种方法[KGMM97]:

- 静态均衡负载：采用将给定  $n$  个任务分为  $p$ （处理器个数）组，对每个处理器分配一组任务的方法。每个问题组的规模是预先可计算并且在运行过程中不变的。当满足任务的耗费时间预先可确定，任务数在执行中不变的条件时，此算法最优。
- 全局队列：许多算法中，对每个任务预测执行时间是不可能的。例如，求两个面交线的计算随着曲线组成数，长度（由须分析的点数决定）的变化而变化。这种方案中，当一个处理器从队列取任务时，队列被锁住，以保证互斥访问。尽管附加的置锁操作削弱了平衡负载带来的优势，此类方法仍是最优的。
- 动态均衡负载：此方法中，每个处理器都有一个局部队列。任务的最初分配类似静态均衡负载。然而由于分配的局部最优性，某些处理器将优先完成任务。此时，空者将分担忙者的任务，于是平衡负载被动态的实现。如果能保证任何时间忙处理器最多只被一个空处理器访问，则不须置锁。同时要求每个任务只被处理一次，且没有任务遗漏。

在我们的算法中，对于几何元素的包围盒计算时，由于包围盒的计算相互独立，且计算量大致相等，可静态的实现均衡负载。对于几何元素的层次求交，交线跟踪，以及区域划分阶段的射线求交时，由于存在拓扑相关性，我们采用

了全局队列的方式来并发进行。

### 3、 算法容错性

在设计算法时，我们考虑到了分布式系统的特征，使得算法在部分物理处理机出现失败时仍能运行，即具有容错性。

在算法运行的局域网中，部分物理处理机出现失败的主要原因有[潘志庚 97]:

- 其它用户所在的处理机重新启动
- 其它用户 kill 外部进程
- 其它用户关机

为了确保当某一 Worker 失败时，系统能再恢复其计算任务，保证计算结果的完整性和正确性，我们采用了以下机制：

1. Supervisor 对发送给 Worker 的每个子任务赋一唯一标识号。
2. Supervisor 维持一子任务 Cache，用来保存当前 Worker 正在处理的子任务。
3. 定时对子任务 Cache 进行扫描，如果某个子任务在 Cache 中的时间超过一给定值，那么就可以认定该子任务的处理机已失败，把该子任务再加入到全局任务中。
4. 当 Worker 回送到子任务的结果时，必须附上相应子任务的唯一标识号，从而由 Supervisor 把已完成的子任务从子任务 Cache 中删除。

下面是实现算法的伪代码：

```
Supervisor 端： {
  Intialize;
  done = FALSE;
  do {
    if sys_test(hostname, 30) > 0 {
      sys_receive(ANY_PROCESSOR, 30 &result, sizeof(result));
      if in_cache(result, id) {
        assign(I, result);
        delete_cache(result, id)
```

```
    }
    put_worker_into_queue;
}
if subproblems_available {
    get_worker_from_queue;
    sub_problem = allocate(global_problem);
    store_cache(sub_problem, newid);
    sys_send(result, processor, 30, &subproblem, sizeof(subproblem));
} else {
    done = TRUE;
}
} while (!done);
use_the_result;
finalize;
}
```

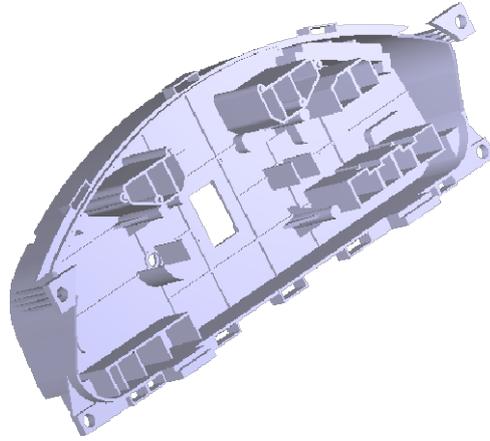
## 第四节 系统实现

我们已经在由 10 台 PentiumII/350 微机和 5 台 SGI O2 工作站组成的异构型局域网上实现了该算法。该算法是对 GS-CAD 系统中造型核心的雕塑实体布尔操作的改进。GS-CAD 是浙江大学人工智能所开发的一个基于 NT 平台的参数化特征造型系统。底层网络通讯部分采用 Socket 编程，代码用 C/C++ 实现。微机的操作系统可采用 WindowsNT/Windows95，或 Linux，工作站的操作系统为 Unix。

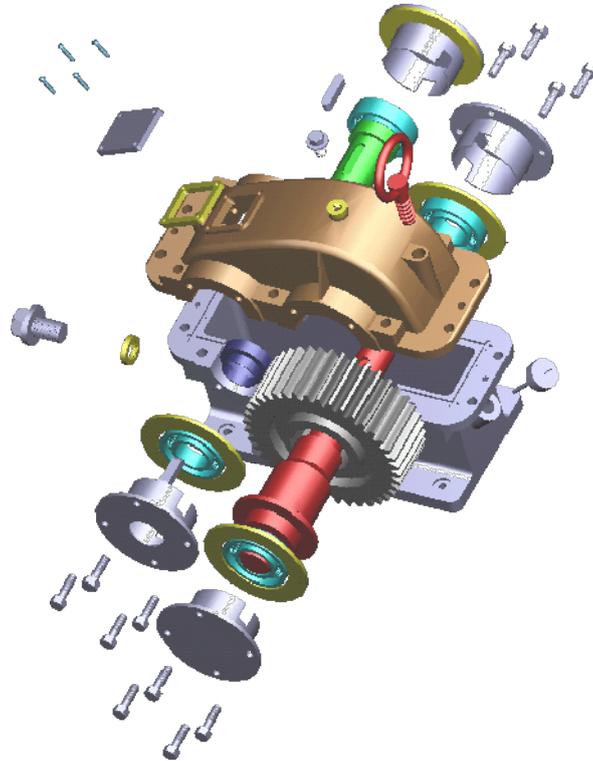
## 第五节 实验数据与结论

### 1、 实验分析

图 6 为两个造型实例，例 a 为一个仪表盘由 143 次布尔操作生成。例 b 为一个变速箱，由 42 个较简单的子部件组成，总共经过 212 次布尔操作生成。



(a) 仪表盘



(b) 变速箱

图 6 两个造型实例

下面描述算法在不同的处理机下的实施效率。通过采用不同个数的处理机，我们得到下面统计表表 1。

加速比和效率按下述定义：

加速比=主从模式下实际执行时间/n 个主体协作的实际执行时间

效率=加速比/n

通过观察统计数据，当增加处理机个数时，算法加速比提高较大，随着处理机个数的不断加大，效率始终保持在 95%以上，可获得近似线性的加速比。

任务	处理机个数	运行时间(s)	加速比	效率%	任务	处理机个数	运行时间(s)	加速比	效率%
零件 A	1	34.66	1	100	零件 B	1	32.92	1	100
	2	17.38	1.99	99.17		2	16.52	1.99	99.64
	3	11.66	2.97	99.09		3	11.05	2.98	99.31
	4	8.76	3.96	98.92		4	8.32	3.96	98.92
	5	7.06	4.91	98.19		5	6.70	4.91	98.27
	6	5.90	5.87	97.91		6	5.61	5.87	97.80
	7	5.10	6.80	97.09		7	4.85	6.79	96.97
	8	4.46	7.76	97.02		8	4.25	7.75	96.82
	9	3.98	8.71	96.76		9	3.80	8.66	96.26
	10	3.61	9.60	96.01		10	3.42	9.63	95.97

表 1 造型实例效率统计表

零件名	个数	Boolean 次数	耗时(ms)
螺钉(5)	4	0	0
垫圈(9)	1	0	0
垫圈(19)	1	0	0
垫片(7)	1	4	220
通气塞(10)	1	3	330
箱盖(3)	1	40	5650
盖板(6)	1	4	110
吊环螺钉(4)	1	2	220
螺塞(18)	1	3	160
油面指示杆(17)	1	0	0
螺栓(8)	12	2	110
轴 2	1	2	170
键	2	0	0

齿轮(37)	1	22	1040
轴承(25)	3	18	4730
调整垫片(23)	3	0	0
闷盖(31)	2	9	220
齿轮(30)	1	44	4010
轴 1	1	2	100
箱体(1)	1	47	4620
通盖(24)	1	10	340
定距环(28)	1	0	0
总计	42	212	32920

表 2 变速箱的子部件造型耗时列表

表 2给出了例 b 变速箱的子部件列表和每个子部件造型所需的布尔操作次数和所耗的 CPU 时间。

## 2、 结论

我们提出并实现了一个分布式的雕塑实体模型布尔操作的并行算法。我们对原有的串行算法进行了改进，对原算法的各个阶段抽取并行性，在保证稳定性和精确性的同时，充分发挥了并行性，并使算法的具有较强的容错性。实验结果显示该算法获得了理想的加速比，对于复杂雕塑实体的造型操作平均可在 3-4 秒完成，可以满足实时交互设计的需要。



## 第六章 雕塑实体分布式物性计算

### 第一节 引言

在产品设计中往往需要实时计算雕塑实体的结构重量、空间体积、重心位置以及剖面惯性矩等，这对于系统的计算性能提出了更高的要求。钣金零件的成型和复合材料结构件的铺层设计都需要计算曲面的表面积和毛料展开。产品装配图的零件明细表中要求提供零件净重和原材料消耗量。CAD 系统中的物性计算就是为了这些目的提供形体的体积、重量、表面积、重心和转动惯量等数据。一方面，单机的硬件性能难以满足需要，而另一方面，它常常存在于一个多机的局域网环境中，网络中的其它机器可能正处于闲置状态。因此，采用分布式并行算法是提高物性计算效率的一个有效方法。

我们的主要工作是实现了一个基于异构多机的局域网的雕塑实体物性计算的分布式算法。主要算法是在原串行算法的基础上提取各阶段的并行性，并采用了动态负载均衡手段，将任务分布到不同的处理器上，以获得实时计算效果。对于常见的网络出错情况，算法也进行了相应的处理，确保任务的最终完成。

### 第二节 模型表示

实体模型的拓扑结构表达为半边数据结构，它是雕塑实体几何信息放置的框架。图 1 中给出了雕塑实体模型，每个实体在拓扑上由面、边、顶点组成，面包含一个或多个环，环由半边构成，每条边分为一对方向相反的半边。几何信息由分别附加在面、边、顶点上的裁剪曲面、空间曲线、空间点信息组成。

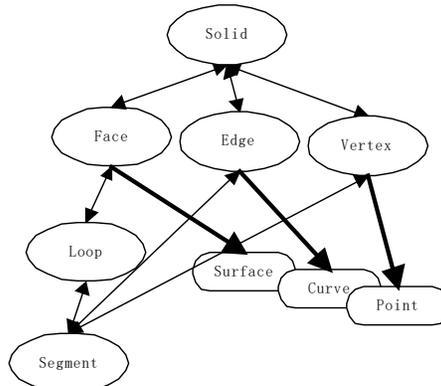


图 1 雕塑实体模型

体模型中的面的几何信息为一张参数裁剪曲面，边的几何信息为一条  $R^3$  上的空间样条，这是为了克服两个邻接面定义在曲面参数域上的边界曲线由于误差产生裂纹，顶点的几何信息为  $R^3$  上的一个位置矢量。

为了精确表达雕塑曲面，每个体的面的几何信息通过一组参数裁剪曲面片定义，我们用张量积有理 Bezier 曲面  $F(s,t)$  表示每个曲面片：

$$F(s,t) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{ij} V_{ij} B_i^m(s) B_j^n(t)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{ij} B_i^m(s) B_j^n(t)}$$

$$(0 \leq s \leq 1, 0 \leq t \leq 1)$$

其中  $V_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$  为曲面片的控制顶点， $B_i^m(s) = \binom{m}{i} s^i (1-s)^{m-i}$  为 Bernstein 多项式。 $F(s,t)$  可看成从参数空间  $(s,t)$  平面到三维空间  $R^3$  的一个映射。如图 2，裁剪曲面通过原参数空间和其上的裁剪曲线定义，裁剪曲线一般是高阶曲线，不能精确参数化，我们用参数域上的分段线性链来近似表示，得到的裁剪区域为曲面参数域上的多边形，为了表示紧凑，在一定误差范围内用样条近似高阶交线  $(c_1(u,v), c_2(u,v))$ ，这样裁剪区域就通过曲面参数域上的一组样条  $(c_1(t), c_2(t))$  定义。

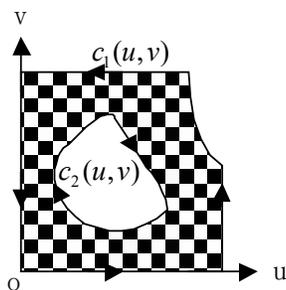


图 2 参数空间上的裁剪曲面

### 第三节 算法概述

#### 1、 面积计算

对于曲面片的面积可用数值积分的方法得到，对于由方程  $z = f(x,y), (x,y) \in D$  定义的曲面  $S$ ，其面积  $|S|$  为：

$$|S| = \iint_D \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} dx dy$$

当曲面  $S$  以参数  $(u, v)$  形式给出时, 即  $x = f(u, v), y = g(u, v), z = h(u, v)$ , 其中  $f, g, h$  对于  $u, v$  连续可导, 定义:

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{vmatrix} = \frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)}$$

则面积  $|S|$  为:

$$|S| = \iint_B \sqrt{\left(\frac{\partial(y, z)}{\partial(u, v)}\right)^2 + \left(\frac{\partial(z, x)}{\partial(u, v)}\right)^2 + \left(\frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)}\right)^2} du dv$$

## 2、 整体性质计算

整体性质可以表达为曲面积分或体积分。散度定理（高斯定理）允许我们把体积分转化为面积分。简化式为:

$$I = \iiint_R \nabla \cdot \phi d\tau = \iint_S \phi \cdot n d\sigma$$

式中  $\nabla$  表示算子  $(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})$ ,  $n$  是曲面单位法矢, 其正向取为从物体内部指向外部的方向。

如果计算的整体性质是

$$\psi = \iiint_R F(x, y, z) d\tau$$

式中  $d\tau = dx dy dz$ , 则  $\phi$  必须满足

$$\nabla \cdot \phi = F$$

$\phi$  不是唯一的, 例如  $I$  为绕  $z$  轴的转动惯量时,  $\phi = \frac{\rho}{3}(y^3 e_y + z^3 e_z)$  或  $\phi = \rho(yz^2 e_y + zy^2 e_z)$  (证明参看微积分教程)。

$\phi = \frac{\rho}{3}(x e_x + y e_y + z e_z)$	$I$ 为体积
$\phi = \frac{\rho}{2M} x^2 e_x$	$I$ 为重心 $x$ 坐标

$\phi = \frac{\rho}{3}(y^3 e_y + z^3 e_z)$	I 为绕 z 轴的转动惯量
--	---------------

$e_x, e_y, e_z$  为单位矢量

因此，计算简化为求曲面的积分值

$$\psi = \iint_S G(x, y, z) d\sigma$$

雕塑实体的边界由多个裁剪曲面的有效区域定义。由此把上个方程改写为

$$\psi = \sum_{i=1}^n \iint_{S_i} G(x, y, z) d\sigma = \sum_{i=1}^n \psi_i$$

然后，把  $\psi_i$  用参变量  $(u, w)$  表示为

$$\psi_i = \iint_{S_i} G[x(u, w), y(u, w), z(u, w)] |J| du dv$$

或简写为

$$\psi_i = \iint_{S_i} H(u, w) du dv$$

在上面方程中， $|J|$  为雅可比行列式

$$|J| = \frac{\partial P(u, w)}{\partial u} \times \frac{\partial P(u, w)}{\partial w}$$

或简写上式为

$$|J| = |P_{uw}'' \times P_{uw}''|$$

通常裁剪区域是不规则的，故作积分计算相当困难。因此，可用格林公式把曲面积分变为曲线积分，于是得

$$\iint_{S_i} \left[ \left( \frac{\partial \alpha}{\partial u} \right) - \left( \frac{\partial \beta}{\partial w} \right) \right] du dw = \oint_{r_i} (\beta du + \alpha dw) \quad (*)$$

此处  $\alpha = \alpha(u, w), \beta = \beta(u, w)$ 。图 2 中的有效区由两条闭曲线  $C_1(t)$  与  $C_2(t)$  围成。与在散度中描述的相似， $\alpha$  与  $\beta$  是

$$\left( \frac{\partial \alpha}{\partial u} \right) - \left( \frac{\partial \beta}{\partial w} \right) = H(u, w) \quad (**)$$

能够与物体的几何关系无关地给定  $F(x, y, z)$ ， $\phi$  可以用观察法确定，通常，函数  $H(u, w)$  是代数复形，不容易求值，因此， $\alpha$  与  $\beta$  的值须通过近似计算求出。

若假设曲面  $S_i$  比较光滑， $H$  也是光滑的，并具有良好性态，则可以用多项式近似计算  $H$  值

$$H(u, w) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} u^{i-1} w^{j-1}$$

满足方程(\*\*)的  $\alpha$  与  $\beta$  不是唯一的，因此不失一般性，可以假定  $\beta(u, w) = 0$ ，在这种情况下

$$\alpha(u, w) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m i^{-1} \alpha_{ij} u^i w^{j-1}$$

现在改写方程 (\*) 得

$$\psi_i = \oint \alpha_i(u, w) dw$$

或

$$\psi_i = \sum_{l=1}^L \int_0^1 \alpha_i(u_l(t), w_l(t)) \left( \frac{dw_l}{dt} \right) dt \quad (***)$$

式中  $L$  是定义  $S_i$  有效区的闭曲线数或环数。

若闭曲线  $C_l(t)$  是多项式，就可以精确地求出方程 (\*\*\*) 的值，因为被积函数能简化为  $t$  的多项式。但多项式的次数可能变得很大。如果曲面是双三次多项式，曲线是三次的，则所得  $t$  的多项式为 24 次的。

### 3、 并行算法

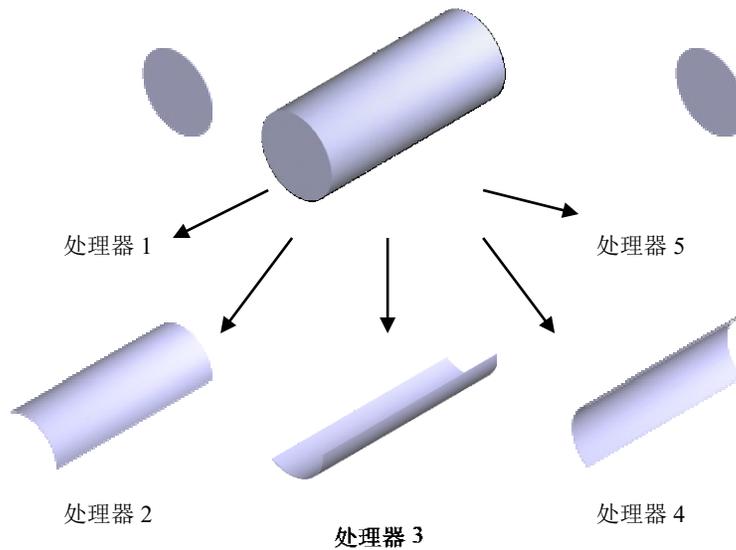


图 3 圆柱体的并行物性计算

通过以上分析，物性计算中的积分计算对于每个裁剪曲面片彼此独立，对于每个裁剪曲线环彼此独立，因此具有很好的并行性，我们可以将每个曲面片的计算分布到多个处理器上并行完成。以图 3 中圆柱为例，可以将任务分为五部分，分别由不同的处理器完成。

## 第四节 任务均衡策略

我们采用了 Supervisor-Worker-Collector 模型，如图 4，其中 Supervisor 负责任务划分分配和处理机状态控制，Worker 完成子任务的计算工作，计算结果由 Collector 统一收集。

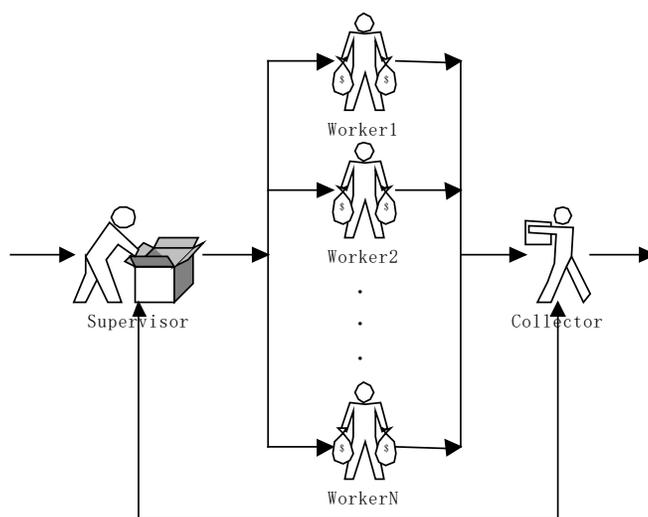


图 4 分布式系统结构模型

当一个算法需要在多个处理机上并行运行时，便产生了均衡负载的问题。并行算法的运行时间由各台处理机工作时间的最大值决定。显然，最高效的算法中，任务应平均分配至各个处理机。

在物性计算算法中，由于每个参数曲面片的复杂程度不同，对每个子任务预测执行时间是不可能的。因此我们采用了全局队列的方式来进行动态任务分配。在这种方案中，由 Supervisor 维护了一个全局任务队列，当每个 Worker 为空闲时，向 Supervisor 申请子任务。当一个处理器从队列取任务时，队列被锁住，以保证互斥访问。尽管附加的置锁操作削弱了平衡负载带来的优势，此类方法仍是最优的。

## 第五节 系统实现

我们已经在由 10 台 PentiumII/350 微机和 5 台 SGI O2 工作站组成的异构型局域网上实现了该算法。该算法是对 GS-CAD98 系统中造型核心的雕塑实体布尔操作的改进。GS-CAD98 是浙江大学人工智能所开发的一个基于 NT 平台的参数化特征造型系统。底层网络通讯部分采用 Socket 编程，代码用 C/C++ 实现。微机的操作系统可采用 WindowsNT/Windows95，或 Linux，工作站的操作系统为 Unix。

## 第六节 实验数据与结论

### 1、 实验数据

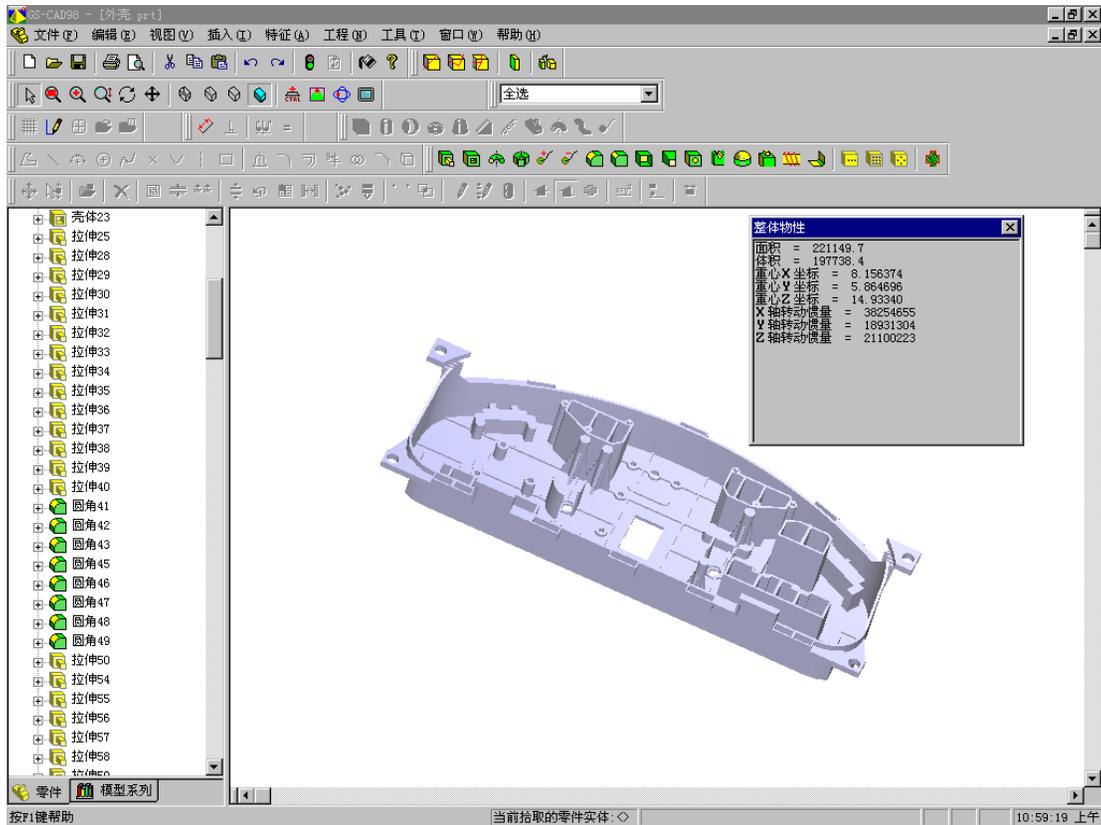


图 5 仪表盘的几何物性计算

在图 5 中，给出了在 GS-CAD 系统中一个仪表盘零件的的几何物性计算操作，在中央窗口的左上角显示出了计算出的几何数据数据，对比原串行算法，所花费的时间大幅度降低。

## 2、 结论

我们提出并实现了一个分布式的雕塑实体模型物性计算的并行算法。算法在保证精确性的同时，充分发挥了并行性。实验结果显示该算法获得了理想的加速比，对于复杂雕塑实体的每次物性计算操作平均可在 1 秒完成，可以满足实时交互的需要。

### 第七节 多机集群模式

在第五章雕塑实体布尔操作的分布式算法中，和本章的算法中我们都采用了 Supervisor-Worker-Collector 模型，其本质是 Client-Server 模式的一种变型。对于普通的计算任务，这种体系结构已经可以很好的完成。但我们越来越感到它存在一定的局限性，最突出表现在处理机间的不平等，其中 Supervisor 占有特别重要的地位，这和实践的情况存在矛盾。我们希望任何一台处理机都可以将自身难以完成的计算工作分布给其它空闲的处理机，而任一空闲的处理机都会接受其它处理机提出的分享请求。

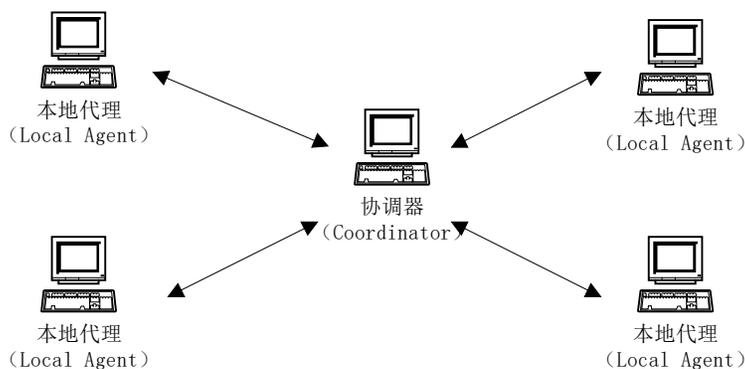


图 6 基于多 Agent 的协作模型

因此，我们采用了如图 6所示的基于多 Agent 的协作模型，在每个处理器上都有一个本地代理（Local Agent）进程运行，多个本地代理在一个协调器（Coordinator）的协调下协同工作。协调器（Coordinator）监控每个处理器的负载状况（由本地代理提供），实行负载分流，使得每个处理器的负载大致均匀。这种体系结构不仅可用于雕塑实体的布尔操作算法，在我们的原型系统中，我们称之为“虎群（TigerPack）”，我们已将它用于几何物性计算、特征重建、特征识别等一系列大计算量的操作。

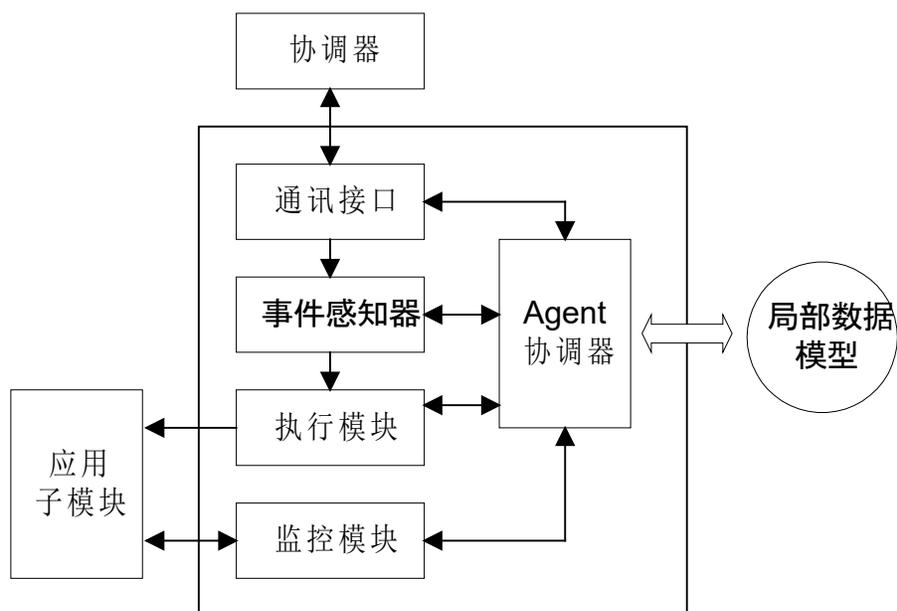


图 7 本地代理的结构模型

在图 7 中，给出了本地代理的结构模型，每个本地代理通过协调器得到所处理问题的局部数据模型，它只对局部数据模型进行操作。本地代理不仅是进行计算，它也可以提供对用户操作的反应，例如：对于同一个装配件，一个用户 A 可以对其中的某个部件进行修改，而同时另一个用户 B 正在进行装配操作，用户 A 对部件的修改会实时引起用户 B 观察的装配件上。



## 第七章 统一表示下的特征造型系统

### 第一节 引言

八十年代末出现的以 Pro/Engineer 为代表的参数化特征造型系统成了新一代 CAD 系统的象征,被认为是 CAD 发展史上一次质的飞跃。它以实体模型为基础,提供用户特征设计手段,以参数驱动模型,允许设计者自由修改这些参数,大大简化了产品的造型过程,并且极大地方便了系列产品的设计过程。

如今大部分 CAD 系统如 Pro/Engineer, I-DEAS, SolidWorks, CADD5, CATIA 等都采用实体、曲面混合模型作为产品的几何模型,并在此基础上建立了特征模型,从而使得系统具有较强的造型能力及模型表达能力。用户可对特征进行插入、删除、修改、拷贝等各种操作,通过改变特征参数可方便地修改产品形状。

以 I-DEAS 为代表的超变量化几何 VGX (Variational Geometry eXtended) 技术是当今 CAD 技术发展中另一个重要分支,它充分利用了形状约束和尺寸约束分开处理、无须全约束的灵活性,让设计者可以针对零件上的任意特征直接以拖动方式非常直观地、实时地进行图示化编辑修改,最直接地体现了设计者的创作意图。国际著名咨询公司的 D.H.Brown 评价 VGX 为“将直接几何描述和历史树这两种目前最好的造型技术创造性地结合起来”。

现有的一些 CAD 系统也提供了公差描述及与其他公差分析软件连接的接口,如 CATIA 与 Valisys 的结合, Mechanical Advantage 与 Cognition 的结合等。有的系统如 I-DEAS 具备动力学动态仿真功能,并且提供与专业有限元分析软件连接的接口,支持基于特征的有限元分析方法;另外如 Pro/Engineer 的 Pro/Develop, CADD5 的 CV-DORS 等被用于支持用户的二次开发;一般的商用系统都能支持诸如 STEP、IGES、DXF、SET、VDAFS 等多种数据交换标准。

但目前的商用 CAD 系统在特征处理方面只局限于几何意义上的形状特征,不具有对依附于形状特征之上的工程信息如公差、特征功能描述等进行处理的能力。CAD 系统与 CAPP 系统缺少足够的连接是目前 CAD 系统普遍存在的另一个不足,这主要是因为设计特征与制造特征之间存在明显的差异,而这种差异的消除又不是一件简单的工作,这就导致了 CAD 系统与 CAPP 系统之间出现断层。其实,上述问题只是断层的一个方面,在 CAD 系统与 CAPP 系统连接时,

还存在着断层的另一个方面，那就是 CAD 缺少来自 CAPP 的有关可制造性问题上的信息反馈。其次，这些系统较难支持自顶向下的设计方法，从而导致了实际的设计过程与基于 CAD 系统的设计过程之间的差异。还有，系统对约束的处理往往只限于对几何约束的处理，而无法处理工程约束。另外目前的 CAD 系统仍很难提供合适的三维公差表示、分析及综合功能。

基于知识的 CAD 系统如 ICAD 一样存在着诸如效率低下、交互性能差、使用者必须具备必要的编程经验等方面的不足。另外，ICAD 系统在处理约束问题时，只能处理单向规则（约束），从而当这些约束的描述顺序改变时，将导致约束求解失败。

在分析 CAD 技术的当前发展重点时，并行工程对于 CAD 的发展来说具有重要性和紧迫性。对于 CAD/CAM 技术来说，并行工程要求更好地运用集成产品信息模型，加强各个 CAX 系统间的集成度；运用变量化和参数化设计方法使产品模型便于修改，有更大的灵活性；在系统结构中加强设计变量的关联，使得 CAX 系统一个环节的修改可以带动所有其他相关环节的相应自动修改；数控加工编程中，为了提高加工效率而建议修改零件局部结构时，这一修改同样能自动传递到所有其他技术文档；同时还要加强仿真功能的建设，及早准确了解产品设计方案的性能和投产效果。但是，要开展上述技术的研究与应用，开发一个具有复杂造型能力的产品造型系统是根本。

CAD 技术的发展和水平已越来越成为衡量一个国家科技现代化和工业现代化水平的重要标志之一，它推动了几乎一切领域的设计革命。然而，就三维造型系统而言，目前被广泛采用的依然是国外的软件，国内只有浙江大学、清华大学等少数几家单位开展自主知识产权的产品造型系统的研制和开发。从维护本民族的软件产业角度出发，自行开发三维产品造型系统已成为一项刻不容缓的任务。由于在实际的设计中，存在国家标准的不同、行业的差异等，所以 CAD 产品与其他软件产品相比，有其特殊性，它不太可能出现象 WINDOWS 垄断个人电脑操作系统的局面，这也正是我们的机会。

## 第二节 GSCAD 的技术目标

GSCAD 的主要目标就是建立线框、曲面、实体和特征统一于一体的产品造型系统，使各模型有机结合起来，相互协调，以充分发挥各模型的优越性。通过采用一体化的线框、曲面、实体和特征模型，以高层次的特征建模统领底层

的几何拓扑模型，以充分发挥各自的优越性。系统支持自顶向下的工程设计方式，提供参数化草图设计、特征设计、曲面设计、装配设计和图纸设计等多种设计手段。系统具有的通用性：设计不局限于某个专门领域，特征定义机制具有充分的柔性，以允许设计者根据自己的需要在不同的层次上，以不同的方式对特征进行定义，并提供基于 Internet/Intranet 的零件库特征库共享。系统满足开放性：能与各种不同的应用软件进行（如 CAPP、CAM、PDM）集成，并提供充分灵活的接口，最大限度地降低与其它系统集成所需的工作量；系统提供强大的外形设计和真实感绘制功能，以满足工业设计的要求。系统具有二次开发的功能。

系统分为草图设计、零件设计、图纸设计、装配设计、曲面设计、通用功能、数据交换接口等功能模块，各功能模块主要目标如下：

### 1. 变量化的草图设计

- 支持点、直线、圆（圆弧）、椭圆、样条曲线等基本图元的生成。
- 支持基本图元的圆角、剪切、等距等编辑。
- 参数化设计，具有动态导航功能，支持几何元素（包括样条曲线等高级几何元素）之间的约束，自动捕捉设计者的设计意图。

### 2. 基于参数化特征建模的零件设计

特征除了包含的形状特征如孔、槽、筋之外，还包含非几何的信息，如公差、材料、制造过程和相关的成本，以及有关定位及其相关的信息等等。模块包括以下几方面的内容：

- 形状特征

实现面向工程应用的标准特征（如槽、孔、圆角、壳体等）、通用草图特征（由草图或一般曲线通过平扫、旋转扫描或者是多截面的路径扫描而形成的形体）和区域特征的生成。

- 基准

实现基准面，基准轴，基准点，基准曲线，基准坐标系等的定位和生成。

- 非形状特征

实现对质量特性、截面、形位公差、表面粗糙度、密度、单位、材料等

特性的定义。

- 特征编辑

实现特征拷贝、特征镜像、特征联动、特征组合、特征复合、特征重定义、特征隐藏、特征重排序及特征插入、特征修改、特征删除等操作，各特征的管理采用特征树的形式。

- 用户自定义特征

实现用户自定义特征。自定义特征可以是草图特征，也可以是标准特征及草图特征的复合。它可以被指定为标准特征，并用于任何设计，包括自定义特征库的建立、维护、浏览，拆分及多个库的合并，自定义特征的表驱动等等。

- 曲面与实体的混合操作

曲面可直接参与实体的特征操作，包括：利用曲面切除实体；给曲面指定某一厚度生成实体；包含曲面的实体之间的布尔运算。要求做到操作稳定、可靠。

- 非形状特征如精度特征、材料特征的管理。

- 模型参数化功能

实现全局参数的定义、参数关系定义（允许非线性方程及不等式方程），达到三维参数化设计功能。

- 标准件库的建立与管理，提供基于Internet/Intranet的零件库特征库共享。

- 支持无限级的UNDO/REDO功能。

### 3. 面向复杂外形设计的曲面造型

曲面设计提供各类曲线曲面的生成方法和操作方法，包括：

- 曲线

二次曲线、各种样条曲线的生成及其操作。

- 曲面

平面，二次曲面，旋转面，直纹面，非均匀有理B样条曲面等各种曲面的生成和表示。

- 曲面的生成和操作

实现如下的曲面生成方法：多轮廓、多脊线扫成曲面生成，有边界约束的曲面的生成，等距面的生成，曲面的补洞等。实现如下的曲面操作：曲面的平移、旋转、镜象，曲面的过渡、拼接、裁剪等等。

- 各类曲面间的求交

做到针对不同的曲面采用不同的算法，能精确求交的求出精确的交线表示，不能精确求交的在给定的精度范围内对交线进行拟合，并准确地获得全部交线数目和拓扑关系。

#### 4. 面向设计群体的装配设计

提供一个有效的面向设计群体的装配设计环境，支持参数化自动装配功能，并与其它模型如零件模型、图纸模型全关联，能容易地完成大型结构、复杂零件的装配和子装配。包括：

- 支持Top-Down和Bottom-Up两种装配方式。
- 支持装配环境中的特征设计（包括装配特征）。
- 按照反映装配意图的配合条件如耦合、对齐、插入、相切等自动进行装配。
- 自动生成装配爆炸图，并提供爆炸图的交互生成方式。
- 装配树浏览
- 零部件导航用来在几何体被调用之前浏览产品结构，及查询零部件的被引用情况
- 产生包括部件系列，材料清单，装配质量特性及构件变化方面的信息
- 在装配件中零件或子装配的替换
- 对装配件进行干涉和最小距离的分析，计算干涉的体积和曲线
- 装配过程管理，方便定义装配、拆卸、重装配等各种步骤，过程的动态重演，并能自动生成各装配步骤的BOM表。

#### 5. 实用化的图纸设计

实现三维模型和二维工程图纸的联动，主要包含以下功能：

- 视图管理，对于建立在三维模型基础上的图纸可通过投影自动生成各种视图。
- 支持草图设计过程，参数间可建立各种方程关系，并可与其它模型的参数进行关联。
- 提供所有标准的绘图功能，如剪裁，拷贝，镜象，阵列，倒圆，倒角以及剖面线等。
- 绘图标准，支持完全符合国标的几何尺寸标注、形位公差标准及粗糙度标准，提供各种标准公差符号。
- 支持无限级的UNDO/REDO功能。
- 支持多种输出文件，如IGES、DXF、DWG等。

#### 6. 多种形式的交换接口

系统提供多种数据交换接口，实现与其它 CAD 软件及 COSMOS 等分析软件的数据交换。数据交换支持如下格式：

- STEP文件
- IGES文件
- DXF文件
- 系统自身的包含参数化特征信息的中性文件以及GIF、TIFF等格式的图象文件。

系统为用户的二次开发提供二种编程接口：即参数化编程宏语言及C++编程开发包。

#### 7. 灵活方便的二次开发接口

系统为用户的二次开发提供二种编程接口：即参数化编程宏语言及 C++编程开发包。

#### 8. 有效支持与产品数据管理系统（PDM）的集成

系统提供开放的数据接口、面向多种标准的产品数据文件能方便地与产品数据管理系统（PDM）的集成；支持 OLE2 技术，可以与任何支持 OLE2 技术的 PDM 产品或 Windows 应用进行无缝集成。

#### 9. 丰富的通用功能

- 零部件的物性计算：面积、体积、重心、质量、转动惯量、力矩等；
- 几何测量工具：距离、长度、夹角、扭矢、法矢、曲率等。
- 提供多种显示模式：线框模式、自动消除隐藏线模式，精确模式及小面快速显示模式，透视模式；
- 提供真实感显示，根据不同的设计要求提供两种真实感绘制方法：一是支持实时拖动的真实感显示；另一种提供高质量的渲染效果，包括：阴影、纹理、透明等。
- 支持多视图模式，用户可自定义观察视图，提供多种视图操作手段，如视图的缩放，拖动，旋转等。
- 基于超文本结构的电子文档处理工具，支持各种电子数据报表及图文结合的电子文档的生成。用于：用标准零件分类表建立零件族、建立表驱动的用户自定义特征、材料表（BOM）的制定、各种修改报告的制定等等。

### 第三节 线框、曲面、实体、特征模型的统一表示

在 GS-CAD 系统中，零件模型采用逻辑分层，低层的几何模型采用先进的实体、曲面及线框的混合模型，以支持实体，曲面，线框的一体化设计，并为显示、交互拾取几何元素、物性计算、干涉检查等提供几何信息；上层为参数化特征模型，建立在几何模型上的参数化特征模型具有参数全关联性 & 特征的充分柔性，从较高层次捕获用户设计意图，提供在几何拓扑之上的高层次形体操作手段，实现用户历史记录与维护，为设计人员提供方便的设计手段，并为设计特征到加工特征的转换提供基础。这两种模型相互协调、相互补充，在设计各个阶段发挥各自的作用。

零件的一体化模型如图 1 所示，实体模型采用半边数据结构，零件的拓扑信息与几何信息分开存放，拓扑信息由 solid、shell、face、loop、wire、segment、edge 和 vertex 等结构组成。实体模型中的 face、loop 与线框模型中的 wire 公用下层的半边结构 segment，拓扑面 face 则有指针指向几何曲面 surface，拓扑边 edge 则有指针指向几何曲线 curve，拓扑顶点 vertex 则有指针指向空间几何点 point，拓扑半边 segment 则有指针指向定义参数化走向的几何曲线 pcurve，从而做到实体、线框、曲面的统一表示。特征操作对零件的边界表示模型的影响则通过基于特征的零部件模型向零件的边界表示模型传递。

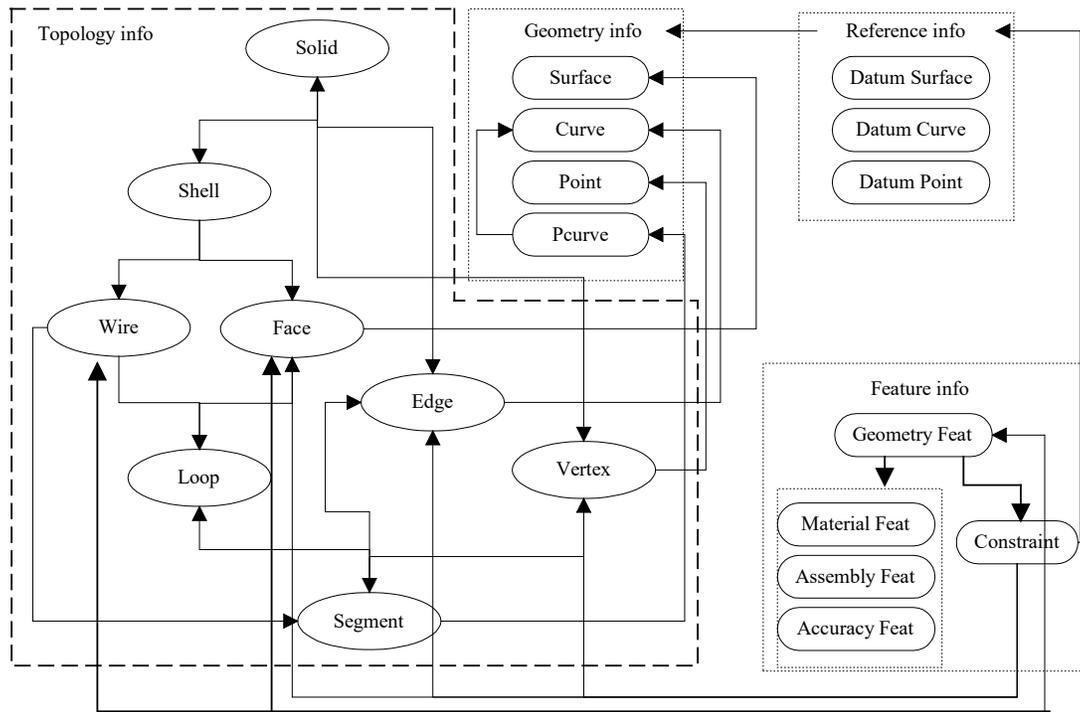


图 1 零件的一体化模型

零件的特征模型主要由形状特征、约束、非形状特征组成，形状特征可分为基本形状特征、组合形状特征和复合形状特征。

基本形状特征分是设计特征在形状方面的抽象，它由以下三类组成：

- 增量形状特征：操作后使原部件的体积增大，可分为轮廓的拉伸和连接，并可继续细分下去。
- 减量形状特征：操作后使原部件的体积减小，可分为挤压、通道和内穴，并可继续细分下去。
- 过渡形状特征：包括边过渡和顶点过渡，每种过渡根据方式不同可分为倒角和圆角。

组合形状特征指同一形状特征按某种排列规则多次出现在同一形体上，包括线性组合、阵列组合和环状组合。

复合特征是由多个基本形状特征构成的复杂特征，如：阶梯孔、相交的槽等。

形状特征由上述的形状类型和相应的几何参数组成，特征操作时根据形状类型和相应的几何参数作用于零件边界表示中的面和线框，使边界表示模型与基于特征的零部件模型保持一致。

约束指特征元素必须满足的关系，分为几何约束和非几何约束。几何约束指对特征在几何上约束，它可以指向实体中的面、边、点，也可以指向参考面、参考线和参考点。非几何约束指功能、特征应用场合等方面的约束。

非形状特征主要为 CAPP、CAM、CAE 及真实感绘制提供所需的数据，包括材料特征、表面光洁度特征、表面热处理特征和公差特征，其基本内容如下：

- 材料特征：说明零部件的材料组成。
- 表面光洁度特征：规定零件加工表面的光洁度要求。
- 表面热处理特征：规定零件有关热处理要求。
- 公差特征：规定加工基准以及相关的所允许的误差。

系统中的特征除上述主要内容外，每一特征操作都有唯一的 ID，根据这一特征操作的形状特征产生的零件边界表示模型中的面、边、点等拓扑结构根据 ID 号获得非形状特征的信息，用于绘制和分析。

## 第四节 系统体系结构和组成

逻辑上系统分为核心层、工具层、通用应用层和专用应用层四层结构。

这四个层次是单向依赖的，即高层次依赖于低层次（如图 2 所示），其中核心层提供了系统最底层的功能，工具层提供应用所需的设计分析及系统再开发的功能，通用应用层提供某一领域较通用的能运行应用软件，专用层则针对某一领域中特定应用的应用软件，基本内容如下：

### 1. 核心层

包含系统有关几何造型、分析计算、问题求解等最基本的功能，是实现系统的基础，内容包括：

- 基本数学软件包：包含多项式方程、超越方程、线性方程组、非线性方程组的求解、基于自由度分析的几何约束求解器、向量和矩阵运算功能。
- 几何元素的表示和基本生成方法：包含基本几何元素（点、曲线、曲面）的表示及其生成方法（基本曲线的生成、曲线的插值，基本曲面的生成、曲面的 sweeping, skinning, 边界约束的曲面等生成方法）。
- 几何元素间的操作：几何变换，曲线、曲面的求交、过渡、光顺。

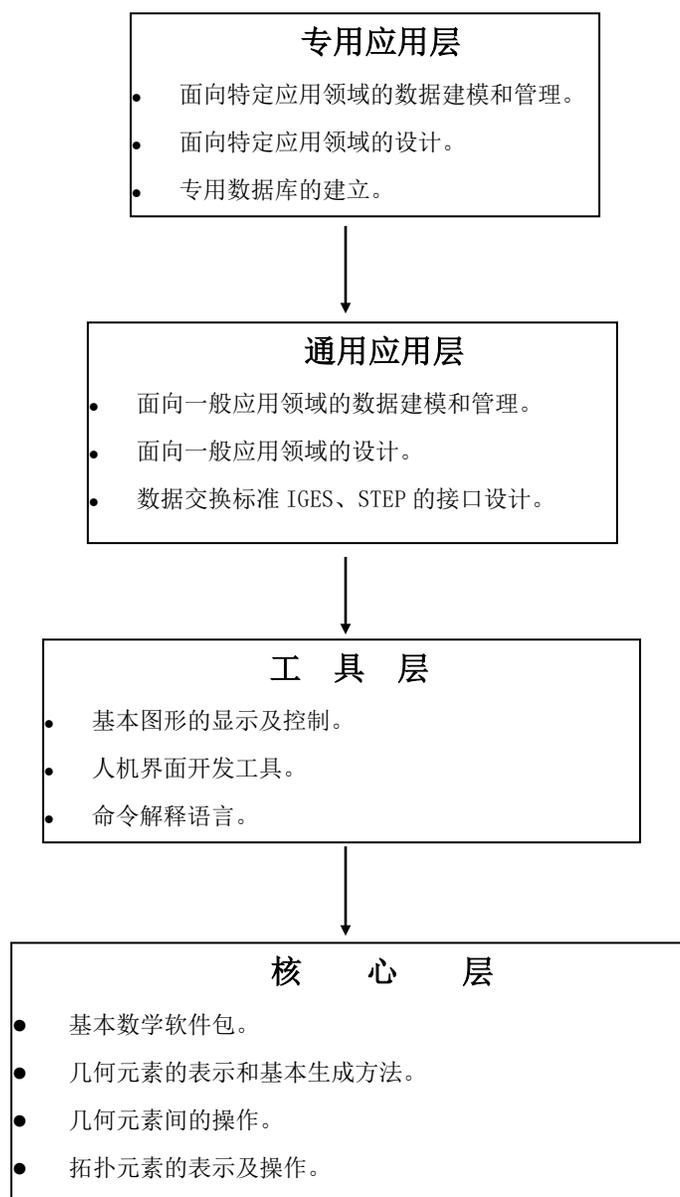


图 2 GS-CAD 系统逻辑结构

- **拓扑元素的表示及操作：**包括基本拓扑元素（顶点、边、环、线框、面、体等）的定义及相关操作（欧拉运算，邻接基本拓扑元素的访问等）。
- **基本实体构造与修改：**包括实体的集合操作（交、并、差）及基本体

素生成（长方体、圆柱等基本体素以及轮廓拉伸等），实体的局部操作（圆角、倒角、过渡等）。

- 基于约束的参数化设计及求解：包括约束关系的建立、元素求解次序计算、约束传播等。
- 形状特征的表示及操作：包括基于形状特征的实体表示及构造，设计特征和制造特征之间的转换，特征的唯一性命名和持续性命名等。

## 2. 工具层

包含可运行 CAD 系统所需的一些外部工具，基本内容如下：

- 基本图形的显示及控制：包括基本几何元素的各种方式的显示、图形控制（显示方式、视区、视线、投影方式、裁剪窗口、光源等）。
- 人机界面开发工具：包括菜单、图符的自动生成及管理、命令解释、对话控制等。
- 专家系统开发工具：提供基于规则或谓词的专家系统开发工具以及减少开发有关推理、决策问题求解等方面的工作强度。
- 命令解释语言：提供高层次的系统功能调用的手段。
- 数据库接口和数据交换接口。

## 3. 通用应用层

是一个面向一般应用领域，建立在核心层和工具层之上的具有一般设计功能的可运行 CAD 软件系统。它包括以下内容：

- 面向一般应用领域的数据库建模和管理：包括数据模型的建立（如公差模型、工艺特征模型等）和管理（创建、修改、删除、查询等）。
- 面向一般应用领域的设计过程的控制：包括人机对话控制、设计进程和次序控制等。
- 数据交换标准 IGES、STEP 的接口设计。

## 4. 专用应用层

是针对某一特定领域而开发的能更好地支持实际用户设计的应用系统。包括：

- 面向特定应用领域的数据库建模和管理。

- 面向特定应用领域的设计过程的控制。
- 专用数据库及知识库的建立。

整个系统主要包括用户界面、通用产品设计、二次开发接口、基于 Internet/Intranet 的资源共享管理及数据交换接口等多个组成部分。

用户界面主要负责整个系统的人机交互控制及显示管理，它完全符合 Windows 界面的风格，在设计用户界面时充分考虑到简化操作过程，减少操作步骤，提高效率，增加系统的用户操作友好性。系统能及时对用户的操作过程进行智能导航，最大限度地避免因用户误操作引起的建模失败。另外系统以联机文档形式为用户提供在线帮助，使初学者可快速掌握使用技巧。

通用产品设计是整个系统的核心部分，它包括产品零部件、装配件、工程图以及曲面设计四个主要模块，这四者之间既具有功能上的独立性，又相互紧密联系，对于一个产品的设计来说零部件设计是基础。草图设计是辅助零部件设计和工程图纸设计的模块，提供他们所需要的二维轮廓。特征设计是零部件设计的一个支持模块，数学包、几何推理、约束求解是产品设计的低层模块，完成产品设计的最低层操作。曲面设计主要负责对具有复杂外形特性的产品进行数据建模，它可被用于工业设计，同时它又与实体建模层相关，可通过曲面与实体的布尔求交参与实体造型的操作。设计历史管理以最简洁的设计树的形式表示整个操作过程，设计历史树能够与模型数据动态实时关联，可以实现产品快速原型生成，对数据模型进行评价。产品设计并且能够对设计所产生的各种结果进行管理，产品数据管理支持数据库与文件两种方式，数据库可采用面向对象的工程数据库 OSCAR 或商用关系型数据库 Oracle、DB2、Sybase 等。

二次开发接口为用户开发专用应用系统提供 PPL 及 C/C++ 两种编程接口。系统提供一套 API 接口给二次开发者，这些 API 接口覆盖了产品设计的各个层次，提供了产品设计所需的各种功能。二次开发者利用这些接口可以按照自己的意图完成特殊的操作，设计特定的产品，从而开发出符合特定要求的专用 CAD 系统。例如在 GS-CAD2000 之上可以开发出管道设计系统、钣金设计、模具设计的专用 CAD 系统。

数据交换接口负责系统产品数据与外部系统(包括 CAPP、CAM 及其他 CAD 产品等)的数据交换工作，包括数据交换接口、NC 接口和 CAE 接口。GS-CAD 系统设计出来的产品可以以中性文件格式保存，例如 STEP、IGES 等格式，因此系统可以实现与已有的 CAD 系统交换文件，能够读入其他支持 STEP、IGES

格式的 CAD 系统设计出来的产品，而且系统设计出来的产品也能够用于这些 CAD 系统。

随着 WWW 技术的发展，局部范围内的设计合作已经扩展到了全世界范围，GS-CAD2000 系统的设计顺应了这种要求，能够支持基于 Internet/Intranet 的资源共享，利用网络技术可以使在不同地点的设计者访问公共零部件库和特征库，并且可以支持并行设计、异地设计。

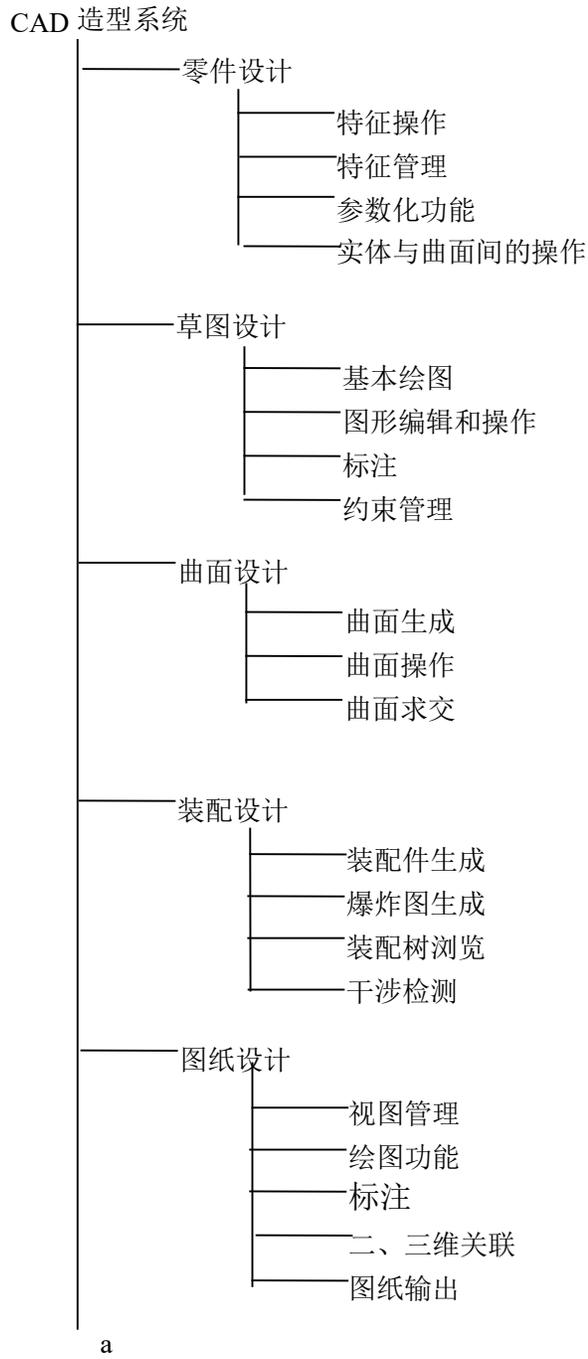
功能上系统由装配设计、零件设计、草图设计、曲面设计、图纸设计、通用功能和二次开发接口等功能模块组成，各模块主要结构见图 3。

各功能模块简要说明：

1. 零件设计——由特征操作、特征管理、参数化功能和曲面与实体间操作组成。

- 特征操作包括特征的创建、拷贝、删除、组合、镜相、及自定义特征等方面。创建的特征包括长方体、柱体、拉伸体等体素特征和槽、孔、圆角、倒角等附加形状特征以及公差、表面光洁度等非形状信息。特征镜像指生成单个或多个形状特征的镜相拷贝。特征组合指对单个基本特征按照组合规则重复拷贝该基本特征，建立生成的特征与原基本特征间的联动关系，通过组合，当修改基特征的有关尺寸时，将自动影响到组合中的其它元素。
- 特征管理处理特征创建的次序、特征间的相互依赖关系等，并提供用户特征查询的功能，用户可以查询特征的各种信息，包括特征的尺寸、特征间的相互依赖及引用关系、特征的形状属性、特征类型等各种信息。
- 曲面与实体间操作完成实体对曲面的裁剪或曲面对实体的裁剪，使采用曲面设计模块生成的曲面融入零件模型中。

2. 草图设计——二维草图设计主要用于三维特征的二维轮廓线设计，具有完全参数化、界面友好、操作简洁的特点，支持逐步细化的设计过程，通过构造平面允许用户在任意空间中进行草图设计。包括绘图、标注、约束管理等子功能模块。



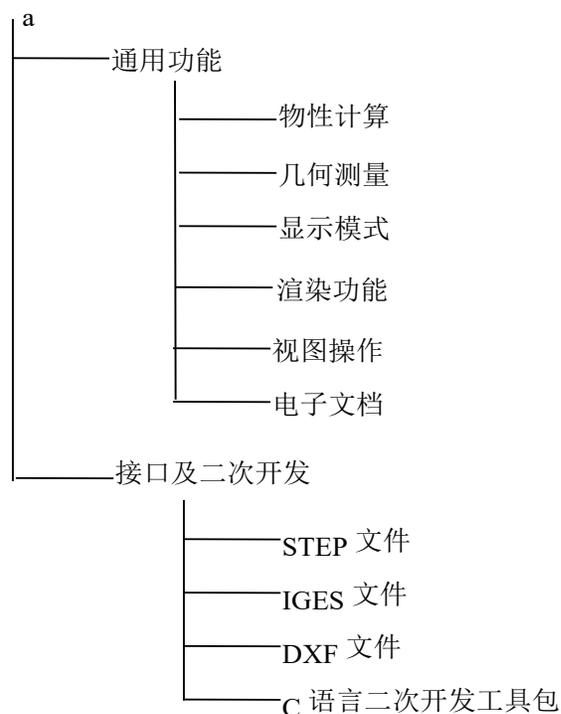


图 3 系统的功能模块

- 绘图除具有标准绘图功能，包括折线、二次曲线、样条等曲线的生成外，具有完全参数化功能，能对用户各种操作进行智能地动态导航，自动捕捉设计者的设计意图。
  - 图形编辑和操作包括镜象、圆角、裁剪等编辑功能。
  - 标注可根据不同图元在图元间加入各种类型的标注，如直线类标注、角度类标注、半径（直径）类标注等，当用户修改某个标注的值，系统将维护原图的其他约束与标注值，并满足最新的改动。
  - 约束管理含增加约束、约束浏览、约束删除等功能。图元间的约束关系除相切、同心、共线、平行、垂直等常见约束外，设计人员可以对标注取名，并给出用户自定义方程以达到某些功能约束的目的，系统能根据约束关系对图形进行重建。
3. 曲面设计——包括曲面的各种生成方法、曲面间的各种操作和曲面求交。
- 曲面生成指各种基本曲面的生成及曲面的 sweeping、skinning 等曲面

的生成方法。

- 曲面操作包括曲面间的圆角、光滑拼接，曲面补洞、自由变形等操作。
- 曲面求交针对各种类型的曲面的求交方法。

4. 装配设计——按用户指定关系装配各零件，完成装配体的设计，能支持自顶向下的设计方法，提供一个的面向设计群体的装配设计环境。包括装配生成、装配树浏览、爆炸图生成、干涉检查等子功能模块。

- 装配生成指根据约束生成并显示装配体。对于自底向上的设计来说，可以采用诸如耦合、对齐、同轴等形式来描述形体几何元素之间的约束关系；对于自顶向下的设计来说，则可以对非形体配合约束进行描述，如公差约束，机构运动约束等。
- 装配树浏览提供用户浏览装配体的产品结构、查导零部件的被引用情况等功能。
- 爆炸图生成完成装配爆炸图。
- 干涉检查检测装配件间的干涉情况，计算干涉体积和区域并显示检测结果。

5. 图纸设计——将三维模型投影成用户定义的视图，提供绘图、标注等功能，生成符合国标的工程图纸，并实现三维模型与投影图的相关联动。

- 视图管理包括初始视图的生成、删除和视图的详细设计，能定义多个绘图视图和图表，具有动态视图功能，视图布置自动缩放、调整，对于建立在三维模型基础上的图纸可通过投影自动生成各种视图，每个视图可以有单独的比例。
- 绘图具有草图设计中的所有绘图功能标注与注释。
- 标注根据不同图元在图元间加入各种类型的标注，如直线类标注、角度类标注、半径（直径）类标注等尺寸标注及公差、公差符号、粗糙度标注、汉字、与注释等非尺寸标注。
- 图纸描述根据输入的图幅、图纸标题栏、明细表栏等格式建立图纸的模板。

6. 通用功能——物性计算、显示模式、电子文档等在零件设计、图纸设计等各模块中经常用到的功能。

- 物性分析指零件面积、重量、重心、周长、形心、弧长、惯性矩等的计算。
  - 几何测量指对几何元素间（如点点间、点线间）的距离的计算。
  - 显示模式包括线框、消隐、真实感等多种模式的显示方法。
  - 渲染功能指零件的真实感绘制，包括透明、纹理映射、材质等效果。
  - 视图操作指图形的旋转、放大、缩小等功能。
  - 电子文档支持各种电子数据报表及图文结合的电子文档的生成。该工具在系统中被用于标准零件分类表建立零件族、建立表驱动的用户自定义特征、BOM 的制定、各种修改报告的制定等等。
7. 数据交换接口及二次开发接口
- 数据交换接口：系统提供多种数据交换接口，包括：STEP 格式、IGES 格式、DXF 格式的数据交换文件及 GIF、TIFF 等图象文件的输出和读入，使系统能方便地与其它 CAD 系统进行数据交换。
  - 二次开发接口：系统为用户的二次开发提供二种编程接口：即参数化编程宏语言及 C++编程开发包。

## 第五节 自顶向下的设计过程的实现

系统支持自顶向下的设计，设计人员可首先根据设计要求进入装配设计，定义装配体的各零部件构成，对装配体中的各零部件和曲面提出相应的设计要求，然后进入零件设计或曲面设计模块对零部件和曲面进行详细的设计，当然，设计人员也可直接进入零件设计或曲面设计模块进行零部件或曲面的设计，然后进行装配。这要求装配设计模块可以处理自顶向下的设计和自底向上两种方式，为此约束的表示统一采用符号表示的方法，约束的对象可以是已完成的零部件中的几何元素，也可以是来自约束约束模板的虚拟对象以便处理不完整模型。表示采用树结构形式，在系统中，基于符号的约束树结构表示（称为虚拟表示）与最终详细装配设计中约束树表示（称为实例表示）是完全一致的，不存在表示形式的转换。当用户采用自底向上的设计方法时，则直接建立实例表示；装配设计过程如图 4所示。

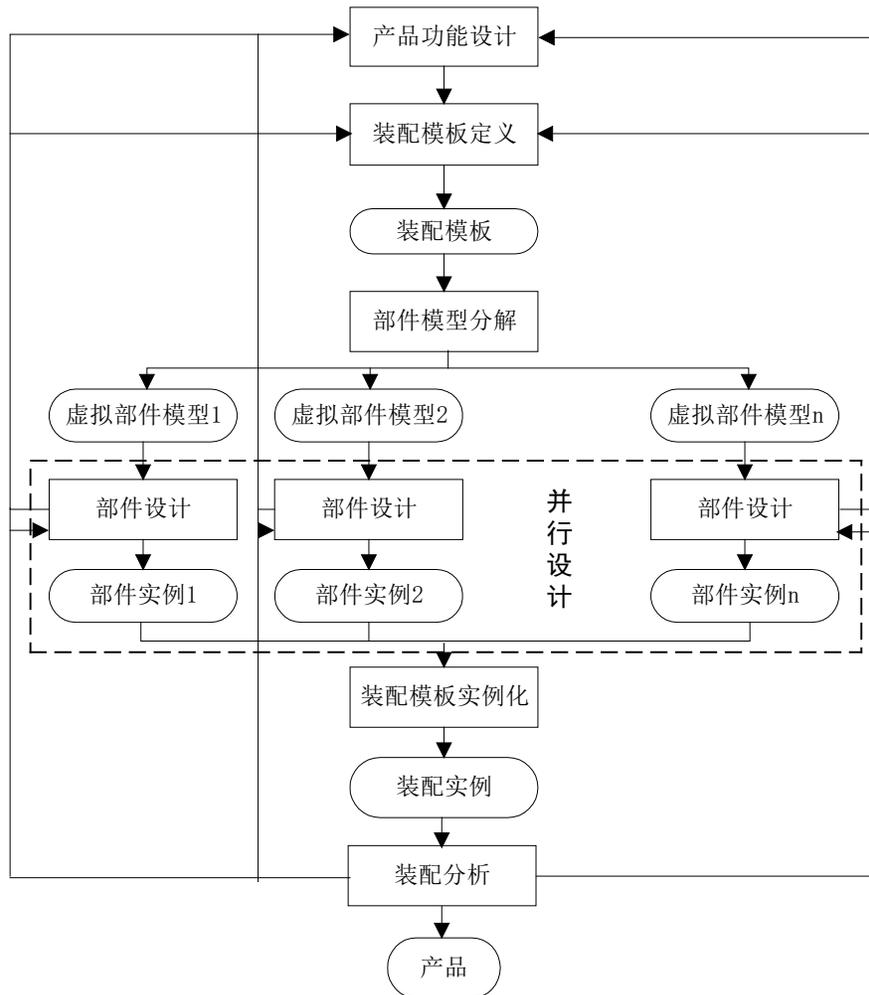


图 4 装配设计模式

装配模板规定了其组成部件的功能、特征组成和尺寸性能，并且定义了它们之间的装配约束关系，然后通过部件模型的分解和指派，产生虚拟部件模型。每个部件设计都以虚拟部件模型为基础，进行详细设计，这其实是个虚拟部件模型实例化的过程，为虚拟符号和实际元素之间建立关联。在完成部件的详细设计后，需要对装配模板进行实例化，由于装配设计师已在模板定义阶段定义了各部件之间的配合关系及公差条件，系统可自动根据符号与元素之间的关联生成装配实例。

基于并行设计的装配技术提供一个的面向设计群体的装配设计环境，部件设计作为详细设计依赖于产品开发初期的功能设计和装配设计。利用这种方法，使得设计群体中每个成员的设计从产品设计的开始就被有效地控制在最终产品

可装配的范围之内；同时允许部件设计向前期的功能设计和装配设计反馈意见和建议。

## 第六节 系统的可集成性的实现

系统的可集成性是 CAD 能否发挥最大效益的重要因素。要满足系统的可集成性，在系统的总体方案设计时必须考虑 CAD 系统与 CAPP、CAM、CAE 及 PDM 系统的连接，目前本公司正在进行计算机辅助工艺设计系统 GS-CAPP、计算机辅助制造系统 GS-CAM 和产品数据管理系统 GS-PDM 的商品化工作。本系统与 GS-CAPP、GS-CAM、GS-PDM 之间将通过数据共享和系统调用实现无缝连接，以与 CAPP 的连接为例，系统主要通过特征转换和识别实现连接。

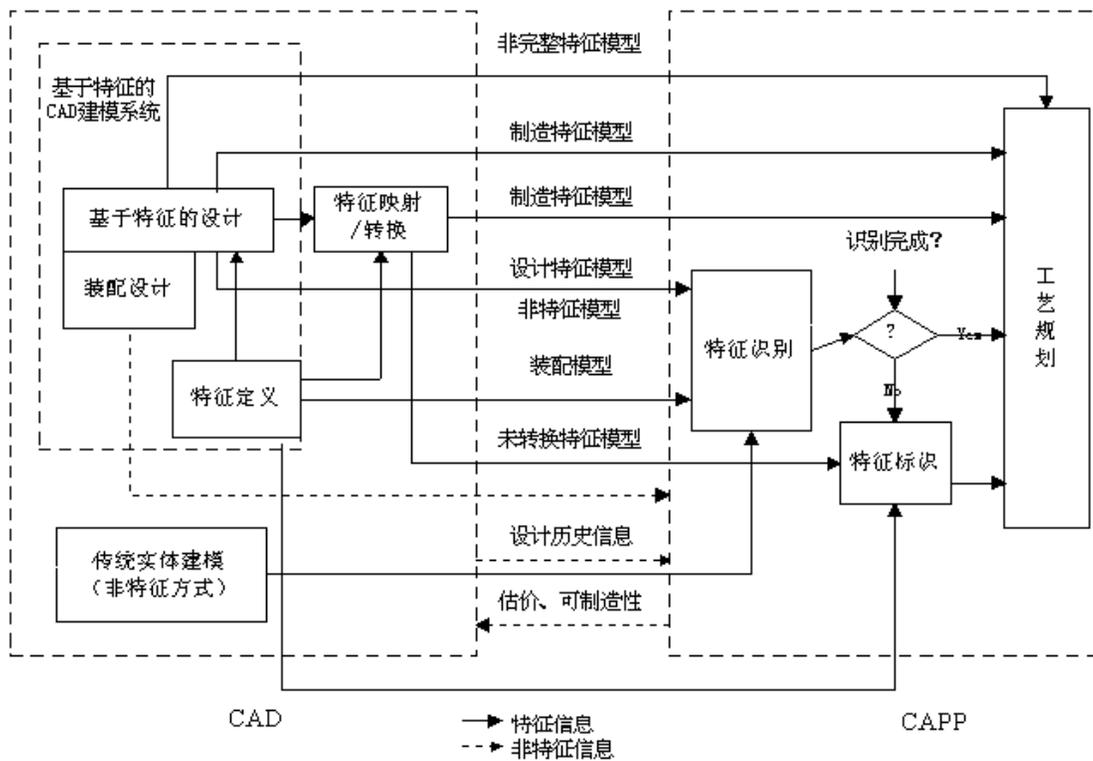


图 5 GS-CAD 与 CAPP 的特征接口

图 5 是与 CAPP 的特征接口示意图。特征定义和特征的映射转换都是构成 CAD 系统与 CAPP 系统有机结合的重要组成部分，我们并没有将特征的映射转换模块也作为设计系统的必要组成，这主要从以下几点考虑：

- (1) 由于各领域特征的不可穷举性，故基于特征的设计系统只能提供有限的

设计特征，为了提高系统的适用性，系统应当为各领域的设计师提供用户自定义特征的机制；

- (2) 不同 CAD 系统之间的设计特征定义和表示往往是相似的，而目前更是因为特征标准的形成，使得这种相似性趋于统一，同样情况也出现在 CAPP/CAM 系统之间的制造特征方面的定义和表示。所以，特征映射转换本身可以作为一个独立的系统存在。

工艺师在进行规划设计时，为了拥有尽可能大的自由度，他（她）们有时希望得到的是产品的局部草图，而不愿始终在一张完整的部件图上进行规划设计。基于这点考虑，我们允许 CAD 系统为 CAPP 系统提供不完全的特征模型，即设计过程中的中间结果，另外也包括用户自定义的抽象特征信息。

由于并不是所有的设计特征与制造特征都存在差异，并且设计师可以通过特征定义功能来定义某领域中的制造特征，因此 CAD 系统也可产生制造特征模型。

在特征映射自动转换过程中，很难保证转换的结果具有百分之百准确，所以为确保转换结果的可靠性，将那些难于转换或转换出现歧异的部分交由特征标识模块来处理，该模块的功能主要是让用户交互式地识别标识部件中的制造特征。同样地，在特征自动识别过程中，有时也需要用户的交互参与。上述的设计思想是基于当前特征的识别与转换技术并不完善的事实。

与工程分析系统之间则将通过 IGES 格式的文件向工程分析系统传递零件的拓扑几何信息。

## 第七节 结论

在 GS-CAD 系统中，为了增强造型系统的表达能力，我们采用了统一表示，实现了线框、曲面、实体模型的统一表示和操作。GS-CAD 系统作为一个成熟的商品化 CAD 软件，分为核心层、工具层、通用应用层和专用应用层，各功能模块都已经得到了实现。

## 第八章 结论和未来工作

### 第一节 论文的总结

本文紧紧围绕 GS-CAD 系统的研制,在几个方面进行了研究与实现:基于遗传算法的曲面求交算法、基于退火遗传算法的曲面求交算法、雕塑实体布尔操作、分布式的雕塑实体模型布尔操作的并行算法、雕塑实体物性计算的分布式算法、多 Agent 的协作模型、基于统一模型表示的参数化特征造型。

- 本文提出了一种曲面求交的新算法。本文成功地将遗传算法与跟踪法结合而设计了一种新的基于遗传算法的曲面求交算法。通过将遗传算法与局部搜索策略相结合来提高演化效率,并充分利用了遗传算法的全局搜索能力和内在并行性,以及跟踪法的局部快速收敛性,系统可以进行稳定可靠的交线计算,并得到正确的交线拓扑结构。在原算法的基础上,本文又采用了遗传算法与模拟退火算法结合的方法对算法进行了扩充,设计了一种基于退火遗传算法的曲面求交算法。新算法不仅可以处理非退化情况下的曲面求交,并且对于常规算法中难以克服的拓扑连接错误、多分支奇异点、局部区域重叠等情况都可以正确的进行处理,并在论文中给出了详细的算法实例分析。
- 本文给出了一个雕塑实体布尔操作的实现算法,在保证效率和精确性的同时确保鲁棒性是算法的目标。雕塑实体模型通过裁剪曲面片和半边数据结构来表达几何和拓扑信息。结合前面提出的基于遗传算法的曲面求交算法,本文采用了层次求交和交线跟踪的方法,来保证曲面片分割和区域分类的一致性,从而克服了实践中常见的退化情况。在该算法的基础上,本文也给出了扩展到非正则模型的布尔操作算法。
- 为了在某些限时操作下得到实时交互的速度,在上面的雕塑实体布尔操作的基础上,本文进一步提出了一个雕塑实体模型布尔操作的分布式并行算法。本文在算法的各个阶段抽取并行性,并针对原串行算法中的拓扑相关性,在相关性和并行性间采取了折中的策略,将其划分为并行任务,对于不同的并行任务采用了不同的任务均衡手段,并使算法的具有较强的容错性。实验结果显示该算法获得了理想的加速比,对于复杂雕塑实体的造型操作平均可在 3-4 秒完成,可以满足实时交互的需要。

- 为了实时计算雕塑实体的重量、体积、重心等几何物性，本文给出了一个分布式雕塑实体物性计算算法。在上面提出的分布式算法的模式下，本文将物性计算任务并行化，使得造型系统的计算性能大幅提高。
- 在前面两个并行算法的基础上，本文对于造型系统中并行计算的模式提出了新的扩展，提出了一种基于多 Agent 的协作模型，并在原型系统中实现了这种协作模型，对于上面提到的操作进行了计算任务的并行处理。
- 作为一个参数化特征造型系统的几何核心，上面的算法都已经在基于 Windows/NT 平台的特征造型系统 GS-CAD 中实现，并已经通过了大量的造型实例的测试。在 GS-CAD 系统中，为了增强造型系统的表达能力，本文采用了统一表示，实现了线框、曲面、实体模型的统一表示和操作。GS-CAD 系统作为一个成熟的商品化 CAD 软件，分为核心层、工具层、通用应用层和专用应用层，各功能模块都已经得到了实现。

GS-CAD 系统的前身是工作站版的 ZD-MCADII 系统，该项目从 1992 年竞争中标到 1997 年最终顺利通过产品验收，共经历了五个年头，其中在 1995 年举行的全国第二届自主知识产权 CAD 软件评比中荣获三维组最高奖，在 1996 年的产品鉴定中，本系统被鉴定为国际先进水平，这是对我们辛勤劳动的最好回报。在以后的两年里，我们一直致力于将它完善为一个基于微机平台的商品化国产 CAD 软件，作者有幸从一开始就参与了该系统的开发研制工作，作为系统开发主要负责人之一深深体会到强烈的团队精神是我们取得成功的关键，尤其是开发大型系统，这正如导师何志均教授和董金祥教授所倡导的：“系统的集成关键是人的集成，良好协作的团队精神是成功的首要因素”。个人的作用始终是有限的，只有当他与周围的集体融为一体时，才能发挥他最大的作用，这是作者在经历这五个春秋之后的一点心得体会。本文是对这七年工作的总结，也是进行下一阶段研究的新的开始。

## 第二节 今后展望

GS-CAD 系统的目标是成为一个真正实用化的商品化软件，但事实上真正从一个产品的角度来看，无论从技术上，还是从它的功能上，还有相当的工作需要完成，把今后的研究和开发重点放在以下几个方面，笔者认为将是有益的：

- 基于遗传算法的曲面求交的加速和并行算法

在基于遗传算法的曲面求交算法中，为提高算法效率，算法中的局部跟踪

策略，以及杂交算子可以针对于不同类型的曲面采取相应的算法。

另外，遗传算法本身的内在并行性可以成为加速算法的一个捷径。

- 基于多 Agent 的协作模型

将基于多 Agent 的协作模型作为特征操作、特征识别等费时操作并行化算法的构筑框架，使得整个 GS-CAD 系统成为一个真正的分布式 CAD 系统。

- 基于雕塑实体的过渡（Blending）算法

在工程设计中，过渡操作是最常用的操作之一，而这也是造型系统必须面对的难点。

- 欠约束几何问题的快速精确求解算法

设计过程是一个逐步细化、逐步求精的过程，对于欠约束的二维、三维几何模型，如何能够快速精确求解仍是实现一个实用系统的关键。

CAD 的研究涉及相当广泛的领域，也具有极为美好的前景，本人始终将能从事对 CAD 的研究引以为自豪。中国的 CAD 行业正日益面临挑战，作者希望并且相信将会有更多的研究者加入到这一行列，来振兴本民族的 CAD 产业。



## 参考文献

- [Arn87] P.R. Arner, Another look at surface/surface intersection, PhD thesis, University of Utah, Salt Lake City, 1987.
- [Ast88] Asteasu, C., Intersection of arbitrary surfaces, *Computer Aided Design*, 20, 533-538, 1988.
- [AY97] Abdel-Malek, K. and Yeh, H. J, Determining intersection curves between surfaces of two solids, *Computer Aided Design*, 28, 539-549, 1997.
- [Aya88] D. Ayala, Boolean operations between solid and surface, *Computer Aided Design*, 20(8), 452-465, October 1988.
- [Bau75] B. Baumgart, A polyhedron representation for computer vision, *National Computer Conference, AFIPS Conf. Proc.*, 589-596, 1975.
- [BFJP87] R. Barnhill, G. Farin, M. Jordan, and B. Piper, Surface/surface intersection, *Computer Aided Geometric Design*, 4(3):3-16, 1987.
- [BGW88] C. Bajaj, T. Garrity, and J. Warren, On the applications of multi-equational resultants, *Technical Report, TR88-83*, Rice University, Houston, Texas, November, 1988.
- [BHHL88] C.L. Bajaj, C.M. Hoffmann, J.E.H. Hopcroft, and R.E. Lynch, Tracing surface intersections, *Computer Aided Geometric Design*, 5:285-307, 1988.
- [BK90] Barnhill, R.E. and Kersey, S.N., A marching method for parametric surface/surface Intersection. *Computer Aided Geometric Design*, 7, 257-280, 1990.
- [BMP94] M. Benuouamer, D. Michelucci, and B. Peroche, Error-free boundary evaluation based on a lazy rational arithmetic: a detail implementaion, *Computer Aided Design*, 26(6), 1994.
- [Bra79] I. C. Braid, Notes on a geometric modeler, *Technical Report, CAD Group Document 101*, Computer Laboratory, University of Cambridge, June 1979.
- [BS93] H. Burge and R. Schaback, A parallel multistage method for surface/surface

- intersection, *Computer Aided Geometric Design*, 10, 277-291, 1993.
- [Cam85] S.A. Cameron, A study of the clash detection problem in robotics, *IEEE Conference on Robotics and Automation*, 488-493, 1985.
- [Cas87] M.S. Casale, Free-form solid modeling with trimmed surface patches, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 33-43, January, 1987.
- [CB89] M.S. Casale and J.E. Bobrow, A set operation algorithm for sculptured solids modeled with trimmed patches, *Computer Aided Geometric Design*, 6:235-247, 1989.
- [CBA94] L.C. Chang, W.W. Bein, E. Angel, Surface intersection using parallelism, *Computer Aided Geometric Design*, 11, 39-69, 1994.
- [Cha87] K. Chan, Solid modeling of parts with quadric and free-form surfaces, PhD thesis, University of Hong Kong, 1987.
- [Che89] K.P. Cheng, Using plane vector fields to obtain all the intersection curves of two general surfaces, In *Theory and Practice of Geometric Modeling*, pages 187-204, 1989.
- [CK83] H. Chiyokura and F. Kimura, Design of solids with free-form surfaces, *Computer Graphics*, 17:289-298, 1983.
- [CO86] J.J. Chen and T.M. Ozsoy, An intersection algorithm for  $C^2$  parametric surfaces, In *Knowledge Engineering and Computer Modeling*, 69-77, 1986.
- [CO88] J.J. Chen and T.M. Ozsoy, Predictor-corrector type of intersection algorithm for  $C^2$  parametric surfaces, *Computer Aided Design*, 20(6), 347-352, July, 1988.
- [Cox89] H.S.M. Coxeter, *Introduction to Geometry*, Wiley, Inc., 2<sup>nd</sup> ed., 1989.
- [CS85] M.S. Casale and E.L. Stanton, An overview of analytic solid modeling, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 5:45-56, February, 1985.
- [Dok85] T. Dokken, Finding intersections of B-Spline represented geometries using recursive subdivision techniques, *Computer Aided Geometric Design*, 2:189-195, 1985.
- [DSY89] T. Dokken, V. Skytt, and A.M. Ytrehus, Recursive subdivision and iteration

- in intersections and related problems, In *Mathematical Methods in Computer Aided Geometric Design*, 207-214, Academic Press, 1989.
- [EC90] G. Elber and E. Cohen, Hidden curve removal for free form surfaces, *Computer Graphics*, 24(4):95-104, 1990.
- [EC94] G. Elber and E. Cohen, Exact computation of gauss maps and visibility sets for free-form surfaces, Technical report CIS#9419, Computer Science Department, Technion, 1994.
- [Far93] G. Farin. *Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design: A Practical Guide*. Academic Press Inc., 1993.
- [FBZ93] S. Fang, B. Bruderlin, and X. Zhu, Robustness in solid modeling: a tolerance based intuitionistic approach, *Computer Aided Design*, 25(9), 567-576, 1993.
- [FF92] D.A. Field and R. Field, A new family of curves for industrial applications. Technical report GMR-7571, General Motors Research Laboratories, 1992.
- [FH85] R.T. Farouki and J.K. Hinds, A hierarchy of geometric forms, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 5, 51-78, May, 1985.
- [FM84] A. Fournier, D. Y. Montuno, Triangulating simple polygons and equivalent problems, *ACM Trans. Graph.*, 3, 153~174, 1984.
- [For95] S. Fortune, Polyhedral modeling with exact arithmetic, *Proceedings of ACM Solid Modeling*, 225-234, 1995.
- [Fu90] Qingxiang Fu, The intersection of a bicubic Bezier patch and a plane, *Computer Aided Geometric Design*, 1990, 7, 475-488.
- [GCF91] E.L. Gursoz, Y. Choi and B.P. Friedrich. Boolean set operations on non-manifold boundary representation objects. *Computer Aided Design*, 1991, 23(1):33~39.
- [GD88] Goldberg, David. *Genetic Algorithms for Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley NY, 1988.
- [Gei83] A. Geisow, *Surface Interrogations*, PhD thesis, School of Computing Studies and Accountancy, University of East Anglia, 1983.
- [GK97] T.A. Granine, F. W. Klein IV, A new approach to the surface intersection

- problem, *Computer Aided Geometric Design*, 1997, 14:111-134.
- [Gol89] Goldberg D. E., *Genetic Algorithms and Walsh Functions:Part I, a gentle introduction*, *Complex Systems*, 3, 129~152, 1989.
- [HEFS85] E.G. Houghton, R.F. Emmett, J.D. Factor, and C.L. Sabharwal, *Implementation of a divide-and-conquer method for intersection of parametric surfaces*, *Computer Aided Geometric Design*, 2, 173-183, 1985.
- [HHK89] C. Hoffmann, J. Hopcroft, and M. Karasick, *Robust set operations on polyhedral solids*, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 9(6), 50-59,1989.
- [Hil82] R.C. Hillyard, *The build group of solid modellers*, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2, 43-52, 1982.
- [HMPY96a] Chun-Yi Hu, N. M. Patrikalakis, and Xiuzi Ye, *Robust interval solid modeling part I: representations*, *Computer Aided Design*, 28(10), 807-817, 1996.
- [HMPY96b] Chun-Yi Hu, N. M. Patrikalakis, and Xiuzi Ye, *Robust interval solid modeling part II:boundary evaluation*, *Computer Aided Design*, 28(10), 819-830, 1996.
- [HMPY97] Chun-Yi Hu, Takashi Maekawa, Nicholas M Patrikalakis, and Xiuzi Ye. *Robust interval algorithm for surface intersections*. *Computer Aided Design*, 1997, 29(9):617~627.
- [Hof89] C.M. Hoffmann. *Geometric and Solid Modeling*. Morgan Kaufmann, San Mateo, California, 1989.
- [Hof90] C.M. Hoffmann, *A dimensionality paradigm for surface interrogations*, *Computer Aided Geometric Design*, 7, 517-532, 1990.
- [Hoh91] M.E. Hohmeyer, *A surface intersection algorithm based on loop detection*, *International Journal of Computational Geometry and Applications*, 1(4), 473-490, 1991, Special issue on Solid Modeling.
- [Hoh92] M.E. Hohmeyer. *Robust and Efficient Intersection for Solid Modeling : [dissertation]*. Computer Science Division, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley, 1992.

- [Jac95] D. Jackson, Boundary representation modeling with local tolerances, Proceedings of ACM Solid Modeling, 247-253, 1995.
- [Jar84] G.E.M. Jared, Synthesis of volume modeling and sculptured surfaces in build, CAD84, Computers in Design Engineering Conference Proceedings, 481-495, 1984.
- [Kaj82] J. Kajiya, Ray tracing parametric patches, Computer Graphics, 16(3), 245-254, 1982.
- [Kal82] Y.E. Kalay, Modeling polyhedral solids bounded by multi-curved parametric surfaces, ACM IEEE Nineteenth Design Automation Conference Proceedings, 501-507, 1982.
- [KGI84] F. Kimura and Geomap-III, Designing solids with free-form surfaces, IEEE Computer Graphics and Applications, 4, 58-72, 1984.
- [KGMM97] S. Krishnan, M. Gopi, D. Manocha, M. Mine. Interactive Boundary Computation of Boolean Combinations of Sculptured Solids. EUROGRAPHICS'97, 1997, 16(3):67~78.
- [Kim90] Deok-Soo Kim, Cones on Bezier Curves and Surfaces, PhD thesis, University of Michigan, Ann Arbor, 1990.
- [KKM97] J. Keyser, S. Krishnan, and D. Manocha, Efficient and accurate b-rep generation of low degree sculptured solids using exact arithmetic, In ACM/SIGGRAPH Symposium on Solid Modeling, 42-55, 1997.
- [KKMN95] S. Kumar, S. Krishnan, D. Manocha, and A. Narkhede, Representation and display of complex CSG models, Technical Report TR95-019, Department of Computer Science, University of North Carolina, 1995.
- [KM83] P.A. Koparkar and S.P. Mudur, A new class of algorithms for the processing of parametric curves, Computer Aided Design, 15(1), 41-45, 1983.
- [KM94] S.Krishnan and D.Manocha. An efficient surface intersection algorithm based on the lower dimensional formulation. Technical Report TR94-064, Department of Computer Science, University of North Carolina, 1994.
- [KM97] S. Krishnan and D. Manocha, An efficient surface intersection algorithm based on the lower dimensional formulation, ACM Transactions on Graphics,

16(1), 74-106, 1997.

- [KNM94] S. Krishnan, A. Narkhed, and D. Manocha, Representation and computation of Boolean combinations of sculptured models, Technical Report, Department of Computer Science, University of North Carolina, 1994.
- [Kop91] P. Koparkar, Surface intersection by switching from recursive subdivision to iterative refinement, *The Visual Computer*, 8, 47-63, 1991.
- [KP90] G.A. Kriezis, N.M. Patrikalakis, Rational polynomial surface intersections, Technical Report 90-9, MIT Ocean Engineering Design Laboratory, June 1990.
- [KP91] G.A. Kriezis, N.M. Patrikalakis, Rational polynomial surface intersections, *Advances in Design Automation*, Vol. 2, 43-52, 1991.
- [KPP90] G.A. Kriezis, P.V. Prakash, and N.M. Patrikalakis, Method for intersecting algebraic surfaces with rational polynomial patches, *Computer Aided Design*, 22(10), 645-654, 1990.
- [KPW92] G.A. Kriezis, N.M. Patrikalakis, and F.E. Wolter, Topological and differential equation methods for surface intersections, *Computer Aided Design*, 24(1), 41-55, 1992.
- [Kri90] G.A. Kriezis, Algorithms for Rational Spline Surface Intersections, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, Boston, 1990.
- [Kri97] S. Krishnan, Efficient and accurate boundary evaluation algorithms for Boolean combinations of sculptured solids, PhD dissertation, Computer Science Division, University of North Carolina, 1997.
- [KS88] S. Katz and T.W. Sederberg, Genus of the intersection curve of two rational surface patches, *Computer Aided Geometric Design*, 5, 1988.
- [Las86] D. Lasser, Intersection of parametric surfaces in the Bernstein-bezier representation, *Computer Aided Design*, 18(4), 186-192, 1986.
- [LM88] T. Lyche and K. Mørken, A data-reduction strategy for splines with applications to the approximation of functions and data, *IMA Journal of Numerical Analysis*, 8(2), 185-208, April 1988.

- [LR80] J.M. Lane and R.F. Riesenfeld, A theoretical development for the computer generation and display of piecewise polynomial surfaces, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2(1), 150-159, 1980.
- [LR82] Y.T Lee and A.A.G. Requicha, Algorithms for computing the volume and other integral properties of solid objects, *Communication of the ACM*, 25(9), 639-641, Sep.1982.
- [LT95] A. Limaïem and F. Trochu, Geometric algorithms for the intersection of curves and surface, 19(3), 391-403, 1995.
- [Man86] M. Mantyla, Boolean operations of 2-manifolds through vertex neighborhood classification, *ACM Transactions on Graphics*, 5, 1-29, 1986.
- [Man88] M. Mantyla. *An Introduction to Solid Modeling*. Computer Science Press, Rockville, Maryland, 1988.
- [Man92] D. Manocha, *Algebraic and Numeric Techniques for Modeling and Robotics*, PhD thesis, Computer Science Division, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley, May 1992.
- [Mas93] H. Masuda. Topological operators and Boolean operations for complex-based nonmanifold geometric models. *Computer Aided Design*, 1993, 25(2):119~129.
- [MC91] D. Manocha and J.F. Canny, A new approach for surface intersection, *International Journal of Computational Geometry and Applications*, 1(4), 491-516, 1991, Special issue on Solid Modeling.
- [MC93] D. Manocha and J.F. Canny, Multipolynomial resultant algorithms, *Journal of Symbolic Computation*, 15(2), 99-122, 1993.
- [MD94] D. Manocha and J. Demmel, Algorithms for intersecting parametric and algebraic curves I: simple intersections, *ACM Transactions on Graphics*, 13(1), 73-100, 1994.
- [Mea84] D. J. Meagher, The solids engine: a processor for interactive solid modeling, In *Proceedings of Nicograph*, 1984.
- [Men92] J. Menon, Constructive shell representations for free-form surface and solids,

- PhD thesis, Department of Computer Science, Cornell University, 1992.
- [ML95] Y. Ma and R.C. Luo, Topological method for loop detection of surface intersection problems, *Computer Aided Design*, 27(11), 811-820, 1995.
- [ML98] Y. Ma and Y.S. Lee, Detection of loops and singularities of surface intersections, *Computer Aided Design*, 30(14), 1059-1067, 1998.
- [MM89] R.P. Markot and R.L. Magedson, Solutions of tangential surface and curve intersections, 21(7), 421-427, 1989.
- [MM90] R.P. Markot and R.L. Magedson, Procedural method for evaluating the intersection curves of two parametric surface, *Computer Aided Design*, 23(6), 395-410, 1990.
- [Mor85] Mortenson, M.E., *Geometric Modeling*, Wiley, Inc., 2<sup>nd</sup> ed., 1985.
- [MP93] T. Maekawa and N.M. Patrikalakis, Computation of singularities and intersections of offsets of planar curves, *Computer Aided Geometric Design*, 10, 1993.
- [MR86] M. Mantyla and M. Ranta. Interactive solid modeling in HutDesign. In *Proceedings of Computer Graphics*, Tokyo, 1986.
- [MS91] Muhlenbein H., Schomisch M., Born J., The Parallel Genetic Algorithm as Function Optimizer. *Parallel Computing*, 17, 619-623, 1991.
- [MT83] M. Mantyla, M. Tamminen. Localized set operations for solid modeling. *Computer Graphics*, 1983, 17(3):279~288.
- [MT93] Maza M D L and Tidor B. An Analysis of Selection Procedures with Particular Attention Paid to Proportional and Boltzmann Selection. In [337], 124-131, 1993.
- [Mul90] G. Mullenheim, Convergence of a surface/surface intersection algorithm, *Computer Aided Geometric Design*, 7, 415-423, 1990.
- [Mul91] G. Mullenheim., On determining start points for a surface/surface intersection algorithm, *Computer Aided Geometric Design*, 8, 401-408, 1991.
- [MY96] K.A. Malek and H.J. Yeh, Determining intersection curves between surfaces of two solids, *Computer Aided Design*, 26(6/7), 539-549, 1996.

- [Nat90] B.K. Natarajan, On computing the intersection of B-Spline, In ACM Symposium on Computational Geometry, 157-167, 1990.
- [NM95] A. Narkhede, D. Monocha, Fast polygon triangulation based on seidel's algorithm, In A. Paeth, editor, Graphics Gems V, 394~397, Academic Press, 1995.
- [NSK90] T. Nishita, T.W. Sederberg, and M. Kakimoto, Ray tracing trimmed rational surface patches, Computer Graphics, 24(4), 337-345, 1990.
- [OKK73] N. Okino, Y. Kakazu, and H. Kubo, TIPS-1: Technical Information Processing System for Computer Aided Design and Manufacturing, Computer Languages for Numerical Control, J. Hatvany, ed., North Holland, Amsterdam, 1973.
- [Pat93] N.M. Patrikalakis, Surface-to-surface intersections, IEEE Computer Graphics and Applications, 13(1), 89-95, 1993.
- [Pie89] L. Piegl, Geometric method of intersecting natural quadrics represented in trimmed surface form, Computer Aided Design, 21(4), 201-212, 1989.
- [Pra86] M.J. Pratt, Surface/surface intersection problems, In J.A. Gregory, editor, The Mathematics of Surfaces II, 117-142, Oxford, 1986, Clarendon Press.
- [Pre86] A. Preusser, Computing area filling contours for surfaces defined by piecewise polynomials, Computer Aided Geometric Design, 3, 267-279, 1986.
- [RMS92] J.R. Rossignac, A. Megahed, and B.D. Schneider, Interactive inspection of solids: cross-sections and interferences, In Proceedings of ACM Siggraph, 353-360, 1992.
- [RR87] J. R. Rossignac and A.A.G. Requicha, Piecewise-circular curves for geometric modeling, IBM Journal of Research and Development, 31(3), 296-313, 1987.
- [RR92] A.A.G. Requicha and J.R. Rossignac. Solid modeling and beyond. IEEE Computer Graphics and Applications, September 1992, 31~44.
- [RV82] A.A.G. Requicha and H.B. Voelcker, Solid Modeling: A historical summary and contemporary assessment, IEEE Computer Graphics and Applications,

2(2), 9-24, March 1982.

- [RV85] A.A.G. Requicha and H.B. Voelcker. Boolean Operations in Solid Modeling: Boundary Evaluation and Merging Algorithms. *Proceeding of the IEEE*, 73(1), 1985.
- [RV89] J. Rossignac and H.B. Voelcher, Active zones in csg for accelerating boundary evaluation, redundancy elimination, interference detection, and shading algorithm, *ACM Transactions on Graphics*, 8(1), 51-87, 1989.
- [RV92] A.A.G. Requicha and H.B. Voelcker. Solid modeling: A historical summary and contemporary assessment. *IEEE Computer Graphics and Applications*, March 1992, 2(2): 9~24.
- [Sar83] R.F. Sarraga, Algebraic methods for intersection, *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 22, 222-238, 1983.
- [Sat91] T. Satoh, Boolean operations on sets using surface data, In *Proceedings of Symposium on Solid Modeling Foundations and CAD/CAM Applications*, 119-127, 1991.
- [SCK89] T.W. Sederberg, H.N. Christiansen and S. Kataz, An improved test for closed loops in surface intersections, *Computer Aided Design*, 21(8), 505-508, 1989.
- [Sed83] T.W. Sederberg, *Implicit and Parametric Curves and Surfaces*, PhD thesis, Purdue University, 1983.
- [Sed89] T.W. Sederberg, Algorithms for algebraic curve intersection, *Computer Aided Design*, 21(9), 547-555, 1989.
- [Seg90] M. Segal, Using tolerances to guarantee valid polyhedral modeling results, In *Proceedings of ACM Siggraph*, 105-114, 1990.
- [Sei90] R. Seidel. Linear programming and convex hulls made easy. In *Proc. 6th Ann. ACM Conf. on Computational Geometry*, Berkeley, California, 1990, 211~215.
- [Sei91] R. Seidel, A simple and fast randomized algorithm for computing trapezoidal decompositions and for triangulating polygons, *Computational Geometry Theory and Applications*, 1(1), 51-64, 1991.

- [SI89] K. Sugihara and M. Iri, A solid modeling system free form topological inconsistencies, *J. Inf. Proc., Inf. Soc. of Japan*, 12(4), 380-393, 1989.
- [SJ91] C.K. Shene and J.K. Johnstone, On the planar intersection of natural quadrics, In *Proceedings of the Symposium on Solid Modeling Foundations and CAD/CAM Applications*, 233-242, 1991.
- [SKW85] P. Sinha, E. Klassen, and K.K. Wang, Exploiting topological and geometric properties for selective subdivision, In *ACM Symposium on Computational Geometry*, 39-45, 1985.
- [SM88] T.W. Sederberg, and R.J. Meyers, Loop detection in surface patch intersections, *Computer Aided Geometric Design*, 5, 161-171, 1988.
- [SN90] T.W. Sederberg and T. Nishita, Curve intersection using bezier clipping, *Computer Aided Design*, 22, 538-549, 1990.
- [SN91] T.W. Sederberg and T.Nishita. Geometric hermit approximation of surface patch intersection curves. *Computer Aided Geometric Design*, 1991, 8:97~114.
- [Sno90] J.S. Snoeyink, Intersecting trimmed quadric surface patches: a geometric method using parametric functions, 1990.
- [Sny92] J.Snyder. Interval arithmetic for computer graphics. In *Proceedings of ACM Siggraph*, pages 121-130, 1992.
- [SP86] T.W. Sederberg and S.R. Parry, Comparison of three curve intersection algorithms, *Computer Aided Design*, 18(1), 58-63, 1986.
- [Sto92] Stoyanov, Tz.E., Marching along surface/surface intersection curves with an adaptative step length, *Computer Aided Geometric Design*, 9, 485-489, 1992.
- [Str90] I. Stroud. Modelling with degenerate objects. *Computer Aided Design*, 1990, 22(6):344~351.
- [Sug89] K. Sugihara, On finite-precision representations of geometric objects, *Journal of Computer and System Sciences*, 39, 236-247, 1989.
- [Taw91] M.S. Tawfik, An efficient algorithm for csg to b-rep conversion, In *Proceedings of Symposium on Solid Modeling Foundations and CAD/CAM*

- Applications, 99-108, 1991.
- [TS80] H.G. Timmer and J.M. Stern, Computation of global geometric properties of solid objects, *Computer Aided Design*, 11(6), Nov.1980.
- [VAS92] Verhoeven M G A, Aarts E H L, Sluis, Parallel Local Search and the Traveling Salesman Problem. In [340], 543-552, 1992.
- [Voe74] H.B. Voelker, An introduction to PADL: Characteristics, status and rationale, Technical Report, Research Memo No, 22, University of Rochester, Production Automation Project, 1974.
- [Voe78] H.B. Voelker, The PADL-1.0/2 system for defining and displaying solid objects, *Computer Graphics*, 12(3), July 1978.
- [Voe91] H.B. Voelker, Keynote speech, Symposium on solid modeling foundations and CAD/CAM applications, Jun 1991.
- [VP84] T. Varady and M.J. Pratt, Design techniques for the definition of solid objects with free-form geometry, *Computer Aided Geometric Design*, 1(3), 207-225, 1984.
- [WA99] S.T. Wu, L.N. Andrade., Marching along a regular surface/surface intersection with circular steps, *Computer Aided Geometric Design*, 16, 249-268, 1999.
- [Wei85] Kenin J. Weiler. Edge-based data structures for solid modeling in curved-surface environments. *IEEE Computer Graphics and Applications*, January, 1985, 5(1):21~40.
- [Wei86] Kevin J. Weiler, Topological structures for solid modeling, PhD thesis, Computer and Systems Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, 1986.
- [Wes80] M. Wesley, A geometric modeling system for automated mechanical assembly, *IBM Journal of Research and Development* 24, 64-74, 1980.
- [ZS93] A. Zundel and T. Sederberg, Using pyramidal surfaces to detect and isolate surface/surface intersections, In *SIAM Conference on Geometric Design*, Tempe, AZ, 1993.
- [董金祥93] 董金祥, 杨小虎, 产品数据表达与交换标准STEP极其应用, 机械出

版社, 1993。

[葛建新93] 葛建新, 新一代造型系统的研究与实现, 博士论文, 浙江大学, 1993。

[葛建新94] 葛建新, 董金祥, 何志均, 基于交线存储的快速实体边界生成算法, 计算机辅助设计与图形学学报, 1994(4)。

[李海龙96a] 李海龙, 董金祥, 何志均, 葛建新, 基于全局模型的产品特征造型系统, 计算机学报, Vol.19, No.8, 1996, pp.600-608。

[李海龙96b] 李海龙, 董金祥, 葛建新, ZD-MCADII: 一个基于特征的造型系统, 计算机辅助设计与图形学学报, Vol.8, No.6, 1996, pp.446-451。

[李海龙97] 李海龙, 董金祥, 葛建新, 何志均, 基于约束的装配体技术, 计算机辅助设计与图形学学报, Vol.9, No.3, 1997年6月, pp.249-255。

[李海龙99] 李海龙, 集成环境中的产品设计系统的研究与实现, 博士论文, 浙江大学, 1993。

[潘志庚97] 潘志庚, 分布式并行图形处理技术及其应用, 人民邮电出版社, 1997。

[潘正君 97] 潘正君, 康立山, 陈毓屏, 演化计算, 清华大学出版社, 广西科学技术出版社, 1997。

[唐敏 97a] 唐敏, 董金祥, 雕塑实体的精确求交算法, GS-CAD 系统技术报告, 浙江大学计算机系 CIMS 课题组, 1999。

[唐敏 97b] 唐敏, 董金祥, 基于遗传算法的曲面求交, GS-CAD 系统技术报告, 浙江大学计算机系 CIMS 课题组, 1999。

[唐敏 98] 唐敏, 董金祥, 雕塑实体物性计算的分布式算法, GS-CAD 系统技术报告, 浙江大学计算机系 CIMS 课题组, 1999。

[唐敏 99a] 唐敏, 董金祥, 何志均, 一个雕塑实体的布尔操作算法, 计算机辅助设计和图形学学报, 已收录, 1999。

[唐敏 99b] 唐敏, 董金祥, 李海龙, 何志均, 非正则精确模型的布尔操作, 软件学报, 已收录, 1999。

[唐敏 99c] 唐敏, 董金祥, 分布式雕塑实体布尔操作, 计算机研究与发展, 已收录, 1999。

[唐敏 99d] Min Tang, Jinxiang Dong, Robust Boolean Operation for an Uniformed

Representation of Wire-frame, Solid and Surface Models, CAD/CG'99, Shang Hai, accepted, 1999.

[唐敏 99e] Min Tang, Jianxing Ge, Jinxiang Dong, Ling Yu, Feature-based Hierarchy Spatial Index for Geometry Objects, CAD/CG'99, Shang Hai, accepted, 1999.

[唐荣锡 93] 唐荣锡, 机械产品建模技术的应用与发展, 航空制造工程, 第十二期, 1993 年 12 月, pp.3-5。

[唐荣锡 94] 唐荣锡, CAD/CAM 技术, 北京航空航天大学出版社, 1994。

[徐灏 91] 徐灏等, 机械设计手册, 机械工业出版社, 1991。

[王勇 97] 王勇, CAD 系统中装配体造型的研究和实现, 硕士论文, 浙江大学, 1997 年。

## 附录 在读期间所发表论文与科研情况

### 发表论文:

1. 唐敏, 董金祥, 李海龙, 何志均, 非流型精确模型的布尔操作, 软件学报, 已录用, 1999。
2. 唐敏, 董金祥, 何志均, 一个雕塑实体的布尔操作算法, 计算机辅助设计与图形学学报, 已录用, 1999。
3. 唐敏, 董金祥, 分布式雕塑实体布尔操作, 计算机研究与发展, 已收录, 1999。
4. Min Tang, Jinxiang Dong, Robust Boolean Operation for an Uniformed Representation of Wire-frame, Solid and Surface Models, CAD/CG'99, Shang Hai, accepted, 1999.
5. Min Tang, Jianxing Ge, Jinxiang Dong, Ling Yu, Feature-based Hierarchy Spatial Index for Geometry Objects, CAD/CG'99, Shang Hai, accepted, 1999.
6. Hailong Li, Jinxiang Dong, Min Tang, Zhijun He, A schema of developing feature based modeling systems, International Conference on Intelligent Manufacturing, Wuhan, China, SPIE, June, 1995, pp.76-80
7. 李海龙, 董金祥, 唐敏, 具有欠约束求解能力的图结构求解方法, 计算机研究与发展, Vol.34, 增刊, 1997年10月, pp.220-224。
8. Hailong Li, Jinxiang Dong, Min Tang, A Product Modeling System Supporting Feature-Based, Parametric Design, International Conference on Manufacturing Automation (ICMA '97), Hong Kong, April, 1997,
9. 唐敏, 董金祥, 面向对象的 Motif 类库--OML, 计算机工程增刊, 1996。
10. 孙泉, 唐敏, 轮廓线到实体拉伸算法的实现, 计算机学会年会论文, 1995。
11. 唐敏, 董金祥, 一个基于特征的薄板造型系统——ZD-SHEET, CIMS'98, 1998。

### 科研情况:

作为主要负责人研制开发了参数化特征产品设计系统 GS-CAD, 本课题为国家八五重点攻关项目“基于产品模型的 CAD/CAPP/CAM 集成系统”的子项目。本人从 1992 年项目竞争中标就开始直接参与了本系统的研究, 1996 年产品鉴定

通过，鉴定为“系统的整体功能达到了国际先进水平，并在国际上领先实现了以 OODB 为核心，基于 STEP 全局产品数据模型基础上实现 CAD、CAPP、CAM 的信息集成”，1997 年 6 月最终顺利通过产品验收。GS-CAD 在 1995 年举行的全国第二届自主版权 CAD 软件评比中荣获三维组最高奖。

## 致谢

我首先要感谢导师何志均教授，何老师对科学事业的献身精神、渊博的知识、严谨的治学态度和诲人不倦的品德给我留下了极其深刻的印象，正是何老师的谆谆教导和热情培养才使我圆满完成了博士期间的学习与科研任务，我最衷心地感谢何老师为我付出的心血。

我尤其要感谢浙江大学人工智能所副所长董金祥教授，是他引导我走上了 CAD 的最新研究领域，在科研和生活上给予了本人详尽的指导和无微不至的关怀，他的鼓励和支持使我坚定了在 CAD 领域内深入探索的决心和勇气，他所倡导的和谐团队精神让我们深深感受到了集体大家庭的温暖。

同时我要感谢 CAD 课题组的全体成员，是他们的忘我工作和热情配合激励了我，从他们身上我学到了很多，他们是：葛建新，童若峰、李海龙，王勇，谭孟恩，沈剑、何清法，高屹，韩凌，乌航，周琼、文烨、童一颖、曾震宇、宋晓峰、刘德志、倪东明等，尤其是葛建新副教授，是他带着我们开始最初的创业。童若峰副教授与我的进行的讨论，使我受益非浅。还要感谢曾在 CIMS 课题组一起奋斗过的其他成员：陈德人教授、孔繁胜教授、吴刚博士、杨小虎副教授、李善平副教授、寿宇澄副教授、周波博士、马利庄教授、孙建伶副教授、曹尚稳副教授、杨莉副教授、孙守迁副教授、吴朝晖副教授等。

在浙大的学习过程中，我还得到了汪益民总支书记、毛根生老师等的关心和帮助，在此向您们表示衷心的感谢。

浙江大天公司的吕菁、陈伟曙，为我的论文工作提供了提供了很多资料，在此一并表达真诚的谢意。大天公司的吴云娥阿姨，CIMS 机房孟阿姨的劳动为我们维护了一个完善的研究环境，这对于的论文工作顺利完成是十分重要的。

忠心感谢航天工业总公司 710 研究所 CAD/CAM 中心的湛潜研究员、绍南南高工等为系统的开发所提供的无私帮助和热情指导。

感谢我最忠实的朋友：方军予、高飞、郁巍、朱铭焯、董轶、王一鸥等，是他们让我的生活有了欢笑，他们的豁达和真挚我将永远铭刻在心。

感谢我的博士生同学：何伟、毛卫强、王寻羽、李向阳、铁治欣、张琼、李莹、刘乃若、林东豪、严国平等，与他们的探讨给了我很大的帮助和启发。

最后我要深深感谢在各方面给予我无私奉献和关怀的父母、兄长，当我遭受厄运，处于低谷时，是他们的照料使我重新找回了健康和自信。

一九九九年九月 于浙大求是园