

几何造型的研究与发展

西安电子科技大学 张建华 叶尚辉

【提要】 本文在分析计算机几何造型的历史进程的基础上,分析了计算机辅助几何造型的各种技术的特点,进而阐明了几何造型的发展方向。

关键词 造型 CAD CAM 特征 非流形

1 引言

计算机辅助几何造型是用计算机及其图形系统描述物体的形状,模拟物体动态处理过程的技术。因为产品的计算机几何模型是产品的计算机显示,计算机工程分析、计算机辅助加工的基础,因此三维几何造型技术是当代 CAD、CAM 系统的核心,造型方法的研究是早期 CAD/CAM 的重点。

产品的形体在计算机内的表示方式常用线框模型、表面模型和实体模型三种。线框模型是最早采用的在三维弦图基础上发展起来的,它是表面模型和实体模型的基础。由于线框模型仅用顶点和边两种基本元素来构造物体的几何模型,因而它具有思想简单,处理方便的特点,但是它的描述能力有限,不能表示产品的全部几何信息。表面模型是将线框模型中的棱线包圆部分定义成面,从而使线框模型成为表面模型,采用了表面模型以后,形体的边界就全部可以加以定义了,但形体的实心部分在边界的哪一侧是不明显的。因此上述两种模型都是非完整的几何模型。要处理完整的三维形体,最终必须用实体模型,它与表面模型的不同之处在于它确定了表面的哪一侧存在的实体。

在工程技术界,通常把蓝图比作工程师的语言。实体造型技术在工程中的应用使这一说法受到挑战。三维几何实体造型技术的应用将免去工程设计人员用二维投影视图描述三维实体的繁复过程,可从直接在屏幕上设计得到产品的三维模型。这将导致设计方法的突破,一旦建立了实体模型,设计人员可在计算机上很方便地进行后续环节的设计工作,比如:部件的模拟装配、总体布置、运动模拟、干涉检查及数据加工编程。它为 CIMS 和并行工程思想指导下,实现整个生产环节采用统一的产品信息模型奠定了基础。

2 实体造型

实体造型技术的思想是在 60 年代后期开始萌发的。从 70 年代以来,许多学者纷纷投入到这方面的探索性研究,同时也开发出了一些实体造型的原型系统,比如:英国剑桥大学的 BUILD 系统,美国罗切斯特大学的 PADL 系统,清华的 GEMS 系统,北航的 DANDA 等。经过十几年的努力和多种技术途径的实践验证,这一思想终于成熟起来,形成了功能强大,使用方便的实用软件,并且代表了当代 CAD 技术的发展主流。

总体上说,表示实体模型的方法大致有六类:单元分解法;空间枚举法;射线表示法;半空间表示法;构造实体几何法;CSG 法;边界表示法,在这些表示方法中,CSG 法和边界表示法是当前机械 CAD 系统中通常采用的方法。因为它们能正确地表示机械零件的实体模型而未经近似处理,所以得到了广泛的认同。CSG 法通过一些基本体素,运用交、并、差等布尔操作以二叉树的形式来表示几何形体。Brep 法是通过顶点、棱边、面、面环等描述物体边界的基本元素来表示物体。由于 CSG 树不唯一,而是三维实体的面、边、点的信息未作显示存贮,它们的拓扑关系没进行显示表达,因而不便于输出及交互处理,而 B-rep 法则详细记录了形体的点、边、面、

环的几何与拓扑信息便于图形的输出和交互处理。但输入较为复杂。由于上述两种方法可以互补优劣,因而在实际应用中常将两者结合起来使用。

早期的实体造型系统一般分为多面体结构,即实体表面大多数用小平面近似表示,数据结构采用 Baumgart 的翼边结构。实体构造采用半空间,欧拉操作,CSG,Borep,八叉树等法生成。这些系统到了 80 年代,有人提出了正则集和正则集合运算的理论。由 R. B. Tilove 定义了正则几何体,正则集合理论的提出解决了几何体体素进行交、并、差运算时产生的维数不一致的退化结果问题,比如悬边,悬面等。所谓正则集,通俗直观的理解就是具有良好边界的曲(≤)面体,严格地说是三维空间中有界、封闭、正则,半解析的区域。要保证集合运算所得的结果是正则几何体,必须进行正则集合运算,它们的实体可分为四步:①求交:求解形体 A 和 B 的交线。②分类:把 A(B)的边界及其与 B(A)的交线相对于 B(A),按 in、out、on 三种关系进行分类,它是解决点的包含性,集合运算,形体间干涉确定的基本方法。③选择:根据布尔算子的运算类型:交、并、差。从分类结果中选取属于新形体的几何元素。④拓扑重建:收集属于新形体的边界,建立点、边、环、面层次的拓扑关系,最终得到新形体。

虽然布尔运算为正则集合提供了一套行之有效的算法,但是布尔运算的可靠性问题仍在研究之中,在实践中布尔运算会遇到很多问题,在较为复杂的情况常常是偏差太大而得不到正确的结果,甚至计算失败。这在一些造型系统中是一个较为普遍的问题。

布尔运算产生偏差甚至失败的主要原因在于数值计算的误差,其中包括误差的传递。如何提高布尔运算的可靠性是当前实体造型中研究的一个重要课题。许多学者对该问题进行了研究,提出了一些较为有效的方法:合理分配误差;造型是分类进行的,把集中统一的精度要求考虑各步的具体情况进行设置。另外从整体相关的角度出发利用形体整体一致性信息,采用推理判断来保证结果的正确性,在布尔运算之前用推理的方法保证形体的一致性,从而确定那些用数值计算方法确定的集合成员分类。

布尔运算的另一问题就是如何提高效率,一般的时间复杂度与其所含边数成平方关系,人们研究了相交的局部性与空间连续性,把集合运算限制在较小的计算空间,但效果不太理想,同时如何扩大布尔运算的覆盖域也是目前的研究方向。

3 曲面造型

曲面造型是 CAD 和计算机图形学中最活跃、最关键的学科分支之一。目前实体造型系统能处理的物体表面有平面,圆柱面、圆锥面、球面等。对圆锥、球、圆柱等曲面体的处理方法之一就是采用平面与面体来近似表示的,对这些曲面体通过给定的特征系数(如中心、半径等)的方法定义,然后由体素的特征参数求出其近似平面多面体上的各个面的方程,边界线及顶点座标。这种处理有以下特点:体素与复杂体的离散化表示完全一致,因而集合运算结果可以保留,便于对复合体的调用,计算相对简单,但数据量大,误差不易找到。当精度要求较高时,求交分类较为困难。另外用代数方程直接表示各二次曲面。并通过求解低价代数方程组来确定曲面的交线。这种处理方法存储量小,运算速度快,但形体覆盖域小,而对一般具有自由曲面的物体,如汽车、飞机等外形的设计,一般实体造型系统无能为力,要借助于曲面造型系统。

曲面造型是通过数学方法描述和设计曲面形状,从而使形体能在计算机内部表示出来,根据数学方法的不同,曲面造型有两类主要方法,一类是早期使用较多的多面体网格法,另一类是目前最流行的自由曲面法。多边形网络运算法稳定,简单,但当描述曲面时,不但网格的数量

大,误差大而且计算误差不易控制,设计处理也不太方便。采用自由曲面法,就可以克服这些缺点。用少得多的曲面片来精确地表示各种形状复杂的表面。自由曲面法至近二十年发展得较快,相继出现了 COONS 法,BEZIER 法和 B 样条法,三种方法各具特色,COONS 法可利用四条任意边界调配成一块光滑曲面,但由于要用到一些非直观的数学量,不利于曲面设计,BEZIER 方法是一种以逼近为基础的构造曲面的方法与 COONS 法相比具有几何直观性,B 样条法是 BEZIER 方法的拓广,但在设计曲面时 I-XBEZIER 法更灵活,随着 B 样条法的发展,出现了 NURBS(Non-Uniform Rational B-spline)方法。NURBS 能精确地表示包括圆锥曲面在内的各种几何体,从而使曲面造型系统,在描述各种曲面时,在数学上有了统一的可能。NURBS 法已成为现代各曲面造型系统的数学基础。

同时随着曲面造型和实体造型的共同发展,人们自然会寄希望于曲面造型与实体造型的集成。一种方法是在实体造型系统中增加自由曲面功能,另一种方法是将系统内部的几何模型统一采用系数曲面的表示方法,NURBS 为这一方法提供了可能。但这一问题有待进一步研究。

4 特征造型

实体造型与曲面造型只能为我们提供产品的几何信息,但是随着 CAD/CAPP/CAM 集成系统的发展,这些模型的不足渐渐地体现出来:

- 它们不能提供完整的产品信息,比如实体模型仅提供产品的几何信息,但不能显式地标注尺寸,不提供公差,表面粗糙度,材料性能和加工要求等重要的产品信息。
- 存储信息不具备产级的工程意义,比如:Brep 实体模型仅存贮面、边及点的几何信息和有关的拓扑信息。而 CSG 模型则只存贮基本几何体和布尔运算的二叉树。
- 不能提供一个灵活而富有创造性的设计环境,利用实体造型构造好的产品几何模型后,要对它进行设计修改很不方便,而产品的设计是一个反复修改,逐步求精的过程。

显然现有的实体模型与产品模型还有较大距离,为了克服上述不足,麻省理工学院的教授 Gossard 在 1978 年指导的学士论文首次提出了特征的概念。经过几年的酝酿,特征的技术的研究便展开。出现了特征模型和基于特征的设计思想。设计一个机械产品的目的是为了能制造出一个执行某些功能的部件。各种功能就体现在部件的构造特征上(如孔、槽、凸台、内腔、腹板等)。这些特征决定了部件的最终形状、尺寸和材料。因此特征包含着机械产品的设计、分析和加工等工程信息。这些特征信息是工程技术人员所熟悉的,他们可以直接利用这些信息进行产品的设计、分析和加工、而无须关心组成物体的几何细节:点、线和面的信息。所以基于特征的设计为整个设计制造中的各个环节提供了统一的产品信息模型,为 CAD/CAM 的真正集成及组织并行工程提供了可能。

从设计分析和制造的角度来看,特征可以分为设计特征、分析特征、工艺特征和加工特征。从机械产品的总体角度出发,形状特征又可分为通用特征和应用特征两大类,实现特征设计有两种基本方法:其一,特征识别与提取。首先进行产品的几何设计,然后从几何模型上识别或提取特征。它有人机交互和自动识别两种方式。其二,基于特征的设计,在产品的设计过程中,提供了一套预先定义好的特征。然后基于这些特征进行建模设计。

尽管特征识别/提取技术实现起来困难较大,但是由于产品的设计、分析、制造特征往往不一一对应,这需要进行特征识别和特征转换技术。因而,目前国际上不少研究人员正致力于研究基于特征的设计和特征识别两种技术集成在一起的 CAD 系统。

5 几何造型的发展与展望

几何造型现在主要是用来处理三维机械零件模型的表示、设计、分析和可视化等方面的问题,而且已开始集成到商品化的 CAD 系统中,已开始实现人们盼望已久的愿望,即为提高机械设计制造效率提供了一种有效的手段,但是几何造型特别是三维几何造型还处于探索与发展阶段,它的发展也要依靠其他科学的研究成果,如拓扑学、微分几何、布尔代数、场论和图论以及计算几何等。

在几何造型方法中,人们从早期的线框造型开始,逐渐发展了实体造型、曲面造型、特征造型几种有效的造型方法。在以前的表面模型中,人们引用了代数拓扑中流形的概念。近几年,非流形几何造型(Non-manifold Geometric Modeling)和偏微分造型成为 CAD 几何造型方法的热点。非流形几何模型的描述采用了代数拓扑中复形的概念,可以将线框模型,曲面模型,实体模型统一在一个单一模型中,因此在“体”的描述中,允许孤立点、悬边和悬面的存在,此模型描述方法与过程设计相适应,是未来智能 CAD 系统的支持几何模型。偏微分几何模型则是偏微分方程来描述边、面。这种模型描述方法与物体计算机模型的工程应用相适应,很适合于进行工程分析。

在几何实体造型的发展中,除了早期开发的较为成熟的多面体结构模型外,曲面实体模型,体元模型,模糊体模型也逐渐发展起来。在曲面实体模型中,虽然参数曲面片对构造自由曲面能力很强,但在曲面片之间的求交计算过于复杂,造成拼合算法有很大难度,做到系统可靠不易。体元模型的发展是由应用领域要求对弯形体,非均匀体进行描述而产生的“材料模型”,它在科学可视化研究中有其独到之处。模糊体模型中将模糊体看作质点系和流体系,它们不是静止的(比如云、烟、火),而是随着新质点的不断产生和运动及老质点的不断消亡,将引起质点系或流质系边界的不确定及内部质点分布的不均匀。流体系也一样。边界不明确的变态体——模糊体是模糊造型的研究对象。

尽管几何造型,特别是三维几何造型尚处于成长、发展时期,一些技术问题仍然有待于研究,基于特征的设计还处于探索阶段。但是几何造型有着广阔而辉煌的应用前景。在机械设计、建筑桥梁设计、工业造型、电影动画、广告中已经取得了巨大的效益及成功,绝迹了的恐龙在《侏罗纪公园》的出现,波音 777 无纸飞机的诞生就是一有力的佐证。特别近来虚拟现实和科学可视化研究的兴起,更加迫切地要求发展几何造型技术,相信几何造型在不久的将来会有更大的发展和更广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Braid I C. Designing with Volumes. CAD Group. Universing of Cambridge. Feb. 1973.
- [2] Baumgart B G. Geometric Modeling for Computer Vision Stanford University. 1974.
- [3] 秦颂. 计算机三维造型与成像技术的研究及应用. 清华大学博士论文. 1988 年 12 月.
- [4] Shah JJ and Mathew A. Experiment investigation of the STEP form-feature information model. CAD 1991. 23(4).
- [5] Choi Byoung K. Sunface modeling for CAD/CAM. Ilseviw 1991.
- [6] Arbab F. Set models and Boolean operations for Solids and assemblies. IEEE CG&A. Nov. 1990.
- [7] 孙家个. 唐泽圣. 三维几何造型系统-GEMS 计算机学报. 1990(4)
- [8] Rossignas J. Beyond solid moedeling. CAD. 1991, 23(1).