

学科门类：工 学  
中图分类号：TP391

单位代码：10287  
密 级：公 开

博 士 学 位 论 文

# 参数化设计理论的研究

博士生姓名 戴 春 来  
一级学科 航空宇航科学与技术  
学科、专业 飞 行 器 设 计  
研究方向 计算机辅助设计  
指导教师 丁 运 亮 教授

南 京 航 空 航 天 大 学

二 〇 〇 二 年 六 月

学科类别：工学  
中图分类号：TP391

单位代码：10287  
密 级：公开

## 博士学位论文

# 参数化设计理论的研究

博士生姓名 戴春来  
一级学科 航空宇航科学与技术  
学科、专业 飞行器设计  
研究方向 计算机辅助设计  
指导教师 丁运亮 教授

南京航空航天大学

二〇〇二年六月

**A Dissertation for Doctor Degree**

**Research of parametric design  
theory**

**By Dai chunlai**

**Under the Supervision of**

**Prof. Ding Yunliang**

**Nanjing University of Aeronautics &  
Astronautics**

**June, 2002**

## 摘 要

参数化设计技术是计算机辅助设计领域的一个重要研究内容,采用这种设计方法,可以快速有效地进行产品开发,因此有必要对参数化设计的理论做进一步研究。目前,参数化设计领域还有不少值得完善的方面,本文提出了一些新的参数化设计方法和理论,并用程序实现了本文提出的方法,表明这些方法是有效的。

本文提出了新的优化设计方法,给出的例子表明所提出的新的优化设计方法是有效的。在实际设计的过程中,欠约束问题是经常遇到的,对每一种类型欠约束问题的求解,本文归纳出了对应的求解方法,可以在程序中加以应用。

本文提出了基于匹配度计算的约束分解方法,采用这种方法,可以使约束分解的过程变得很简单,并可用于多自由度和多约束度变量的结构矩阵的分解。

针对几何约束求解的特点,本文提出了部分变量迭代求解算法,这样,在循环约束计算的时候,可以大大降低同时迭代变量的个数,增加了计算过程的稳定性。

针对上面提出的一些理论,本文用程序进行了实现,例子表明这些方法是有效地。

本文提出了基于变形曲线能量的概念,进行曲线相似变形的的方法。这种方法有很多的用途,可以用于工业造型设计,也可以用于曲线的参数化变形。

关键词: 参数化设计 稀疏矩阵分解 循环约束求解 曲线变形 变形能 匹配度  
部分变量迭代法

## Abstract

Parametric design is an important aspect of CAD field, with this method, the product can be designed quickly and efficiently, so, it is necessary to do some research of the theory of parametric design. There are many aspects in CAD that need to be enhanced, this paper presents some new methods and theories, which were realized with programming language. The result of the programme shows these methods are efficient.

This paper presents new optimum design method in CAD, the examples in this paper show this method is efficient. During design procedure, under-constrained problem is met usually, for each type of under-constrained problem, this paper generalizes associated solution method which can be used in CAD programming.

This paper presents a new method of sparse matrix decompose which is based on the concept of matched degree, this method can make the process much simple and can be used in the decomposition of the construct matrix with multiple-freedom variables and constraints.

This paper presents partial-variable iteration method to solve recurrent-constraints. During the process of calculation the number of the iterated variables is decreased, which increases the stability of the process of calculation.

This paper presents the method of curve deform which is based on the concept of the energy of deform curve. The method has many uses, such as the design of industry shaping and the parametric deform of spline-curve.

Keywords: parametric design, sparse matrix decomposition, concurrent-constraint solve, curve deform, deform energy, matched-degree, partial variable iterating method.

## 目 录

中文摘要	i
英文摘要	ii
1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 CAD 领域几个重要的研究方向	1
1.2.1 基于特征的产品信息建模技术	1
1.2.2 CAD 的智能化技术	2
1.2.3 CAD 的参数化技术	3
1.3 参数化设计的发展过程	4
1.4 主要的参数化软件介绍	8
1.5 本文的任务	11
2 二维参数化技术的研究	13
2.1 一些常用的术语	13
2.2 参数化设计系统的分类	15
2.3 程序参数化方法	17
2.4 交互式参数化方法	19
2.4.1 构造式系统	19
2.4.2 陈述式约束系统	23
2.4.3 混合式约束系统求解	29
2.4.4 对象式系统	30
2.5 离线式参数化设计系统	30
2.6 小结	32
3 优化法求解几何约束	33
3.1 优化方法在几何约束求解中的应用	33

3.1.1	优化方法的提出	3
3.1.2	用于循环约束求解时的计算实例	3
3.1.3	过约束和欠约束时的情况	3
3.1.4	讨论	3
3.2	新的优化函数的提出	3
3.2.1	方法的提出	3
3.2.2	对欠约束问题的求解	3
3.2.3	对过约束问题的求解	4
3.2.4	欠约束问题的另一种求解法	4
3.3	在程序中实现欠约束的求解	4
3.3.1	点的求解	4
3.3.2	直线的求解	4
3.3.3	圆的求解	4
3.3.4	当圆的半径未知时圆的求解	4
3.4	小结	4
4	约束分解及循环约束求解的研究	4
4.1	稀疏矩阵分解的基本概念	4
4.2	匹配度法分解几何约束	5
4.2.1	匹配度分解算法	5
4.3	按照优先度进行稀疏矩阵的匹配	5
4.3.1	按照优先度进行稀疏矩阵的匹配	5
4.3.2	例子	5
4.4	多自由度变量与多约束度约束的匹配度分解法	6
4.5	几何耦合结构的求解	6
4.5.1	重写规则法 (rewriting rules)	6
4.5.2	部分变量迭代法	6
4.6	小结	7
5	参数化程序的设计	7
5.1	基本数据结构定义	7
5.2	图形元素的输入	7
5.3	约束的分解和计算	8
5.4	算例	8
5.5	小结	8
6	曲线的相似变形及其应用	8
6.1	自由曲面和曲线的变形研究	8

6.1.1 曲线的相似变形理论	87
6.2 多截面形状要求的广义旋转曲面	90
6.2.1 引言	91
6.2.2 广义旋转曲面的定义	92
6.2.3 例子	92
6.3 自由曲线在变量化设计中的应用	93
6.3.1 前言	93
6.3.2 自由曲线的相似变形	93
6.3.3 约束的类型及求解	94
6.3.4 曲线的尺寸驱动问题	97
6.3.5 几个例子的求解	97
6.4 小结	100
7 结论与展望	101
参考文献	103
作者发表的论文	109
致 谢	110



# 第一章 绪论

## 1.1 引言

计算机辅助设计是随着计算机及其外围设备发展,而迅速形成的一种新兴的现代设计方法。它的发展与应用已经为提高设计质量和效率,提高产品的市场生存和竞争能力,发挥了十分明显的作用。1987年,我国组织实施的高科技发展计划的15个主题项目之一是计算集成制造系统(CIMS),而CAD是CIMS的一个重要子系统。电子技术和计算机技术的发展,带来众多类型,性能良好的计算机辅助设计硬件设备的问世。各种图形处理装置不仅已形成了产品,而且已成为CAD的一般配置,使CAD技术迅速向工程技术中各个领域的广度和深度渗透。目前,计算机辅助设计方法已成为工程技术人员进行创造性设计活动中不可缺少的手段<sup>[1]</sup>。

现代的计算机技术已经渗透到工业产品设计的每一阶段,这使得传统的设计方法发生巨大的变化,计算机辅助设计CAD将计算机高速而精确的运算功能、大容量存储和处理数据的能力,灵活的图形及文字处理功能与工程技术人员的创造性思维能力及分析判断能力结合起来,形成了人们对话的交互式设计系统<sup>[2]</sup>。从而大大地改善了设计质量,加快了设计绘图过程,缩短了设计周期,并使人们从繁重的绘图工作中解放出来,可更多地从事创造性的研究工作。CAD技术是随着电子技术和计算机技术的发展而逐步发展起来的,它具有工程及产品的分析计算、几何建模、仿真与试验、绘制图形、工程数据库的管理、生成设计文件等功能。经过三十多年的努力,CAD技术的广泛应用已经引起了一场工程设计领域中的技术革命,特别是近二十年来,由于计算机硬件性能的不断提高,CAD技术有了大规模的发展。目前CAD技术已经应用于许多行业,如机械、汽车、飞机、船舶、电子、轻工、建筑、化工、纺织及服装等<sup>[3]</sup>。CAD技术标志着机器的智能化和脑力劳动的自动化,回顾历史,二百年前的工业革命所产生的机器代替了人的体力,创造了现代的工业生产和物质文明。今天,我们正面临着新的历史性转折—信息革命,并将迎来一场新的产业革命和社会进步,因此各国政府在制定新技术发展规划时都对CAD技术及计算机集成制造系统(CIMS)予以极大的重视,并加强对它们的研究工作。

## 1.2 CAD领域几个重要的研究方向

### 1.2.1 基于特征的产品信息建模技术

传统的几何造型技术一直是机械CAD中的主要研究领域,该技术中比较成熟的

有线框造型、曲面造型和实体造型<sup>[4]</sup>。虽然这三种几何造型技术提供了物理对象在数学上的精确描述,并在图形显示、物性计算等方面得到了很好的应用,但它们所建立的模型只产生层次较低的几何信息,如点、线、面和基本体素,而没有高层次的信息,如尺寸、公差、材料特性及装配要求,因此在这种纯几何造型数据库的基础上难以实现零件分类编码的自动生成,不能满足生产各阶段自动化的要求,更难以实现 CAD/CAPP/CAM 的集成以及产品的并行设计,那么,如何解决这些问题呢?进入八十年代中期,国际上开始研究基于特征的设计,而建立基于特征的产品信息模型则是行之有效的方法,特征是一个高层次的设计概念,内部包含了设计人员的设计意图及与后继工作有关的各种信息<sup>[5]</sup>。对于具体的机械产品而言,特征是一组与产品描述相关的信息集合,产品特征信息模型包括管理特征模型、形状特征模型和技术特征模型。而形状特征模型又包括几何结构模型、精度特征模型、材料特征模型和装配特征模型。总之,产品信息建模技术突破了传统的几何造型技术,解决了 CAD/CAPP/CAM 中产品信息定义的不完备性,成为机械 CAD 的主要研究领域之一<sup>[6]</sup>。设计人员在产品开发的早期就要介入而且参与每一个环节,在计算机网络的协同下实现信息资源的共享与交换。

敏捷制造是继 CIMS 之后将要发展的一种新的生产组织模式,这是由发达国家提出的一种新的制造企业战略。它是指各公司、企业在相互信任的基础上,基于需要合作解决问题并分享所从事项目全部合作者的相互信息和资源而形成的“虚拟公司”,其生存期直到市场需求结束。敏捷制造的特点是持续变化性、快速反应性及高质量标准。美国专家预测,21 世纪初将采用敏捷制造模式,其生产效率较 CIMS 会有 3 倍增长。敏捷制造的应用范围有自行车、空气压缩机、工业工程、电脑业。现有的一些公司在电脑芯片制造中的合作,便是基于对敏捷制造的认识而做出的决策<sup>[7]</sup>。

未来制造技术的展望随着科学技术的不断发展和计算机技术在制造技术中的广泛应用,预期下世纪的制造技术将走向柔性化、自动化、集成化和智能化。我国是一个制造业大国,但制约我国制造技术发展的因素很多。因此,在改革开放的今天,我国的制造业更应该借助于国际先进的技术,洋为中用,少走弯路,从而不断提高企业适应市场经济的能力和科学决策能力、增强企业活力,推动制造技术的发展。

## 1.2.2 CAD 的智能化技术

传统的 CAD 系统主要是提供方便的设计工具和手段来辅助设计,缺乏分析问题和解决问题的能力,适用于解决算法型或确定型的任务问题。近几年来,为了克服传统 CAD 的不足,人们将人工智能和专家系统技术应用于 CAD 系统,进行了智能 CAD 系统的研究<sup>[8, 9, 10, 11]</sup>。众所周知,机械产品设计不但涉及到一系列的计算公式、许多的设计标准和规范以及制图技术,而且还要用到许多非数值的经验性知识,如开始的

概念设计和产品的初步设计则要求设计专家凭借知识和经验来思考、推理和判断；而设计过程是一个从“设计-评价-再设计直到产生最优设计结果的反复过程，这就更需要设计专家具有一定的知识性经验，从而驱使着专家系统和 CAD 进行结合。很显然，概念设计是整个设计过程中最重要的一个阶段，这一阶段是设计创造性最为集中的部分，这一部分与问题的表达和理解的正确与否，所提方案的优劣以及评价和决策的适当与否等有关，它决定了最终设计的特色、水平和效益。由于概念设计的重要性，一些学者提出了基于决策的概念设计过程模型，并且用超文本做了技术实现。与过去的设计方法学模型相比，决策模型并不规定设计过程应该怎样，设计师自始至终控制着设计的流程，具有更大的灵活性；与形式化模型相比，决策模型并不被动地模拟设计过程，而是抽取关键的语义和联系，用以描述和支持设计过程，与传统的 CAD 方法相比，它不仅记录设计的结果，更强调记录和表达设计的过程。总之，智能化是机械 CAD 中极具有前途的研究领域。

### 1.2.3 CAD 的参数化技术

静态的几何造型系统不能适应产品开发的动态过程。产品设计要经历概念设计，草图设计，详细设计等多个过程，在这些过程中，产品造型要被反复地修改。采用这样的几何造型系统就会引起大量的重复劳动，不利于设计过程的迅速进行。一般来说，经常被修改的是一些尺寸，而几何元素间的拓扑关系很少被改动，参数化设计方法为解决这样的问题提供一个很好的途径<sup>[12, 13, 14, 15]</sup>。

参数化设计是指通过改动图形某一部分或某几部分的尺寸，自动完成对图形中相关部分的改动，从而实现尺寸对图形的驱动，其中进行驱动所需的几何信息和拓扑信息由计算机自动提取。参数化设计极大地改善了图形的修改手段，提高了设计的柔性，在概念设计、动态设计、实体造型、装配、公差分析与综合、机构仿真、优化设计等领域发挥着越来越大的作用，体现出很高的应用价值，能否实现参数化目前已成为评价 CAD 系统优劣的重要技术指标。

参数化技术是指设计对象的结构形状比较定型，可以用一组参数来约定尺寸的关系。多数与设计对象的控制尺寸有显然的对应，设计结果的修改受到尺寸驱动，所以也称为参数化尺寸驱动，参数化设计技术以其强有力的草图设计、尺寸驱动修改图形的功能，成为初始设计、产品建模、修改系列化设计、多方案比较和动态设计的有效手段。参数化技术的研究工作可追溯到 Sutherland 早期的 Sketchpad 系统，当时已经提出并利用了基于几何约束进行设计与修改的思想。近几年参数化技术已有不少种方法，如变动几何法、几何推理法及参数化操作法等。变动几何法将几何约束转变为一组以特征点为变元的非线性方程组，通过数值法解非线性方程组确定出几何细节，该方法必须用户输入充分且一致的几何约束才能求出约束方程的解，对不一致的约束

模型则难以进行有效的判别与处理，也难以有效地将局部变动限制在局部范围求解；几何推理法是建立在专家系统的基础上，采用谓词表示几何约束，通过推理机导出几何细节，这种方法可以检查约束模型的有效性，并具有局部修改功能，但存在着推理速度慢、系统庞大等问题；参数化操作法采用参数化操作表示与处理几何约束，并通过与参数化操作对应的几何计算程序逐步确定出精确几何模型，该方法简单、实用，但难以表示与处理复杂的几何约束。工程设计人员利用参数化技术，可以大大提高只有几何尺寸发生变化的零件的设计效率，避免繁琐的重复性工作。因此，参数化技术已成为机械 CAD 中重要的研究内容。

目前，参数化技术发展很快，一旦工程设计能以参数化方式进行，设计人员就可以不再关心设计的具体过程，从而集中主要精力去创意，同时计算机与具体设计的信息交换也变得更加简化，电脑得以在更高层次上模拟人脑工作。广义参数化是对事物的本质性认识，而通常人们所说的参数化技术实际上是一种约束模型，这种模型包括图形的几何约束和拓扑关系约束。实现这些约束可通过解约束方程组或通过几何推理，当前大多数参数化设计系统并没有很好地解决这一问题，对复杂的图形便无法正确完成尺寸驱动，为了解决该问题，可以进一步从两个方面进行研究。一方面是将约束转化为一组多元方程，采用数学的方法进行研究。我们可以把设计对象分解为一些简单实体，这些实体具有三种基本信息，即形状信息、定位信息和属性信息，而所有这些基本信息都可由数学定义的变量表示。如果我们能找到一些变量，并对其赋予一定的工程意义或工艺意义，这些变量就成为所谓的参数，通过改变这些参数，就可以得到不同的设计结果。对于方程组的研究，两个最基本的问题是解的存在性和唯一性。总之，应该将数学上的某些重要成果引入参数化技术中来；另一方面可以考虑把面向对象的思想与参数化技术中的约束模型的建立及推理求解结合起来，克服一般尺寸驱动系统的不足，从而能够准确和完整地描述复杂图形的几何信息，快速完成推理求解。

本文对计算机辅助设计中的参数化技术做了一定的研究，提出了基于约束匹配度的约束分解方法，基于局部变量迭代的循环约束求解法，基于位移最小方法的欠约束的求解法，基于位移能量最小方法的自由曲线参数变形法，并编制了参数化设计程序，对本文提出的方法进行了验证，说明本文提出的方法是可行的。

### 1.3 参数化设计的发展过程

根据参数化设计方法在不同时期的主要特点，我们可以将参数化的研究分为以下几个阶段：

60-70 年代中的萌芽期<sup>[16]</sup>

这一阶段以 Sutherland 为代表，他在 Sketchpad(1963)系统中提出利用约束作为辅助手段进行零件的生成，但没有用约束定义和修改几何模型，对模型的修改只是

一个单向过程，一旦模型生成后约束不能反过来限制模型。

70年代末-80年代初的开创时期<sup>[17]</sup>

提出一些参数化设计的基本思想和理论，并逐渐成了不同的参数化方法。以 Hillyard 提出变量几何和几何约束思想，并由 Gossard 及其研究小组进一步发展完善了这一方法为标志。

R. C. Hillyard(1978)等把尺寸和公差视为特征点间约束，通过尺寸和视图指定零部件的形状，利用给定的尺寸方案来判定零件图是欠约束、过约束还是约束完备的<sup>[18]</sup>。

美国麻省理工学院计算机辅助实验室 D. C. Gossard(1981)教授提出变量几何的概念，几何约束是通过在绘图命令中引入约束信息来取得，并给出利用多维线性方程组进行变量几何法求解的基本原理和方法<sup>[19]</sup>。

美国的 Robert Light 和 David Gossard(1982)提出变量几何法修改实体，将尺寸约束等式化分为水平距离、垂直距离、点线距离和角度尺寸等多种类型，利用一柔性过程来定义和修改几何模型，尺寸变量决定几何模型的形状和大小，通过修改尺寸变量来修改模型，并将该方法应用于草图和系列化零件的设计<sup>[17]</sup>。

80年代中期至90年代初的发展时期

这一时期的一个重要特征是将 AI 技术引入参数化设计中，人们分别将几何推理、神经网络等人工智能方法应用到设计中去，同时，将参数化技术应用到实体造型形成特征造型技术，以 B. Aldefeld、Suzuki、A. Verroust 提出的基于专家系统方法为主要代表<sup>[20, 21, 22, 23]</sup>。

B. Aldefeld(1988)提出一种基于符号操作和推理机处理一般几何模型的方法，二维几何模型被表示成一系列几何元素集和定义约束计划的原子规则集，他将约束分为结构约束与公制约束，并用一阶谓词表示这些约束，通过构造计划、规则库与推理机进行求解<sup>[21]</sup>。

Koichi Kondo(1990)将约束与对模型的操作联系起来，几何关系是由对模型的操作顺序确定的，能够根据尺寸的变化对模型进行修改。基于这种构造过程的几何造型系统 PIGMOD 可应用于线框、曲面和实体模型<sup>[16]</sup>。

日本东京大学 Suzuki(1990)用规则来表示二维尺寸约束，用约束传播等技术进行模型参数化，给出了几何模型和约束的逻辑框架，以及几何推理机制<sup>[24]</sup>。

美国 Syracuse 大学 U Roy 和普度大学 C R Liu(1991)将变量技术和实体造型技术相结合并成功应用于尺寸与公差表示、公差分析与合成、公差控制以及尺寸与公差在 CAM 中的应用<sup>[25]</sup>。

A. Verroust(1992)等提出基于专家系统来处理约束等式，将所有约束分为角度约束与距离约束，通过构造规则、三角形规则、平行规则将求解模型分为简单模型、似解模型与不解模型，并且度图寻找给定尺寸约束的几何元素的计算序列，同时给出了处理设计的一系列规则集<sup>[26]</sup>。

英国里兹大学 S. Alasdair 等(1993)使用计算代数方法来求解几何约束问题,给出了约束定义语法和约束求解机理,并且讨论了应用该方法的优点和缺点<sup>[27]</sup>。

Yaacov Hel-Or(1994)提出一种利用 Kalman 滤波器的松弛参数化方法,用户在定义产品模型的自由度之间的关系时,使用的约束是具有一定弹性的约束,即可定义具有某一确定度的约束。为了实现这一具有弹性约束的松弛参数化方法,使用概率约束这一概念,把参数化建模当作一随机过程,约束的不确定度用有合适分布的随机变量的协方差表示,然后把模型及自由度表示成一概率方程组,用 Kalman 滤波器来求解,最后把与 DOF 相关的协方差矩阵作为选择解的准则,从多种解中选取特定解<sup>[28]</sup>。

90 年代中期至今

基于知识的参数化理论逐渐完善,参数化方法在实践中得到广泛应用。这一阶段以 Jae Yeol Lee 提出的利用图表示的基于知识的几何推理法和 Xiao-Shan Gao 提出的约束传播法为主要代表<sup>[29, 30, 31]</sup>。

美国普度大学的 William Bouma(1995)等利用图减少代数方法,根据作图过程,将几何元素分组,按照一定的作图序列将图形元素分成几个簇,该构造方法能部分处理约束循环问题<sup>[32]</sup>。

美国衣阿华大学的 Chang Xue Feng 和 Andrew Kusia(1995)提出基于约束的零件设计,利用面向对象的建模方法将机器约束进行抽象、分类、表示和校验,给出了机器约束的检查机理,并将机器约束融入到零件的特征设计中,特征被表示成对象,机器约束被表示成产品规则或产品对象,当一个特征被选中时,利用相应的算法与该特征对应的机器约束进行校验<sup>[33]</sup>。

韩国 Pohang 大学 Jae Yeol Lee(1996)提出利用图表示基于知识的几何推理方法,将完备的约束设计模型和几何规则表示成图,从设计图选择出适当的子图以得到新的事实,并在规则图中搜索子规则图去匹配模型中的子图,目的是改善推理过程,节省推理时间<sup>[30]</sup>。

德国计算机集成研究所 R. Anderl(1996)总结了约束建模的理论基础和应用中的优缺点,并探讨了基于约束的草图设计和约束求解的关键问题<sup>[34]</sup>。

西班牙 Catalunya 大学 R. Joan-Arinyo(1997)等提出一个基于规则的几何约束求解器,应用对象为 2 维几何体。求解过程分为两个阶段,第一阶段为建立构造步骤序列,第二阶段则是根据当前尺寸值和构造步骤生成几何对象的实例。该方法实质上是一种基于图和规则的构造过程方法,原型系统通过 Prolog 语言实现,分析器采用前向推理,而构造器则是一个简单的函数语言解释器<sup>[35]</sup>。

中科院系统所 Xiao-Shan Gao 和美国 Wichita 国立大学 Shang-Ching Chou(1998)在求解几何约束求解系统中提出一种全局传播法和代码计算法,该方法对局部传播方法进行扩展,全局传播法在确定一个几何元素对象的位置时是从几何元素集中的已知元素推理而来的,推理过程中不仅使用了显式约束,而且有约束信息中的隐含约束,并且能判定一几何对象是过约束还是欠约束<sup>[31]</sup>。

Jae Yeol Lee 给出一种基于自由度分析(degree of freedom analysis)的约束分析与求解方法,构造与约束分析同步进行,求解算法稳定,并且已运用于机构的运动模拟<sup>[30]</sup>。

国内近年来对参数化的研究也显示出较高的热情,相继开发出一些具有较高技术水平的商品化软件,在几何约束的表示和求解方面,提出了各种新方法和思路:

华中理工大学陈立平给出一种约束图匹配方法,约束分解是基于并所有的几何变量  $X_i (i=1, 2, \dots, n)$  总是显示在某个约束中,也即一般约束系统是松散耦合系统,结构矩阵具有较强稀疏性,利用矩阵归约理论可对大规模约束集合进行分解,采用图的匹配法,对于  $n$  个基点和  $e$  条边采用增广路径算法,其算法耗时为  $O(n, e)$ ,采用自上而下的分层驱动策略<sup>[36]</sup>。

武汉汽车工业大学刘武民提出一种搜索置换法,利用 AutoLISP 的图形访问和逻辑运算功能,逐一搜索尺寸标注、隐性定义和欠定义,通过产生新旧特征值来传递尺寸标注所携带的几何信息和原图的拓扑信息,当图形更新时,逐一搜索处理各图素,以旧特征值为关键字从特征值对的集合中检索出新的特征值,置换旧值后得到新的实体数据表,进而更新实体图象<sup>[37]</sup>。

浙江大学董金祥教授,葛建新博士提出变参绘图系统中一种约束求解新方法,采用该方法,不但可以通过分解和排序来提高求解速度,而且可以通过快速指出约束不足和约束过载来提高灵活性和可靠性<sup>[38]</sup>。

华中理工大学薛鸿源提出了约束网络表示二维图形,通过构造二维图形的拓扑关系图和尺寸关系图,叠加生成约束网络,通过约束网络分解,将其转化为二叉树,可以找到一条求解路径,最终以多叉树的形式表达<sup>[39]</sup>。

华中理工大学钱小平提出了一种用约束关系和工程关系来驱动几何模型的方法,用分解排序约束方程组方法进行约束一致性判别,并将约束方程组细化为各子方程组的集合,然后对约束方程组进行两个层次求解,一是利用规则求解,可大大加速求解过程。二是利用 Newton-Raphsn 方法求解一般非线性方程组,同时充分利用原图信息来解决多解问题和初值问题<sup>[40]</sup>。

浙江大学沈剑给出基于变分几何方法利用多元非线性方程组来描述一组约束,采用数值方法迭代求解,能较好解决复杂约束关系,将图纸上的元素分为结构图元和轮廓图元,轮廓图元完整地表达了设计对象的外形与轮廓,是设计的最终目的,而结构图元是轮廓图元存在的基础,它构成了整个设计对象的骨架<sup>[41]</sup>。

山东大学孟祥旭教授采用扩展的有向超图结构(Extended directed hypergraph)建立了支持尺寸约束、几何约束和拓扑结构约束的参数化图形表示模型,利用交互构造的图形对象的依赖关系建立参数化图形约束关系的求解次序,在超图中采用有向边依次连接图形对象构成求解次序,由于图形构造的每一步都保证约束的一致性,因此不会出现过约束或欠约束的情况。同时,针对约束耦合程度高的循环约束情况,采用约束关系自定义机制和约束模型的递归求解机制,支持变结构参数化模型<sup>[42]</sup>。

华中理工大学兰箭给出基于图形数据图参数化方法,描述了图形数据的表示方法和图的搜索策略,利用实体的定义信息求得实体的拓扑信息,而拓扑信息和尺寸信息共同决定了图形的轮廓特征和尺寸大小,由拓扑约束和尺寸约束来描述图形。通过对无向图进行遍历,从而把无向图变为有向图,使约束具有传播性,对图的遍历采用一种适度深度优先搜索策略<sup>[43]</sup>。

清华大学张国伟等提出了一种基于自由度分析的约束传播算法,求解二维参数化设计中所建立的几何约束模型。用约束图表示几何元素及它们之间的约束关系,用规则图来表示求解推理的过程,采用了基于规则的推理与数值计算相结合,基于自由度分析的约束求解策略<sup>[44]</sup>。

浙江大学谭建荣教授等针对现有在线参数化方法的不足提出模型建立和求解相分离的离线参数化方法,基本思路是根据工程制图规则和尺寸与图形的本质联系,自动建立起尺寸与图形的约束关系,并探讨了工程图约束信息自组织原理和方法<sup>[45]</sup>。

## 1.4 主要的参数化软件介绍

国外的主要参数化设计软件有 PTC 公司的 Pro-E, UG 公司的 UG16, IBM 公司和法国达索公司的 CATIA, SolidWorks 公司的 SolidWorks, 美国 Computer Version 公司的 CADD5, AutoDesk 公司的 MDT, 德国西门子利多富公司的 SIGGRAPH-DESIGN, 俄罗斯 TOP SYSTEM 公司的 T-FLEXCAD。国产的软件主要有华中理工大学的开目 CAD、清华大学和高华公司共同开发的集成智能化 CAD 系统 GH-InteCAD、中科院北京软件研究所的 PICAD、浙江大学开发的 ZDDS、深圳乔纳森科技有限公司开发的中国 CAD 等。对主要的参数化软件本文做些简单介绍。

1. 美国参数科技公司的 Pro/Engineer 是一套机械设计自动化软件。它能将整个设计至生产制造过程集成在一起,在 1995 年的销售市场中占约 17% 的份额。Pro/E 软件的长处及独特的地方表现在两个方面:一是它的参数化特征化定义实体造型的功能,从而给工程师们提供设计上的简易和灵活性;另一方面是其独特的数据结构提供在工程上的完全相关性,即在产品开发过程中任何一个地方的更改都会得到其他相关地方的相应自动修改。Pro/E 共有 40 个模块提供给用户选择,这些模块可让用户自行选择它的模块配置以适合其应用上的需要。Pro/E 软件的另一特点是硬件独立性,它可以在包括 DEC、HP、SUN 和 SGI 等几十种不同的工作站上运行。Pro/Engineer 通过记录设计历史来捕捉设计意图,设计历史的操作顺序可以被修改,虽然 Pro/Engineer 不支持布尔以及其它的局部操作,但它提供了其它一些很好的特点,其中之一就是全局设计参数的引入。全局设计参数定义了基本的设计要求和特性。由于很多其它参数可能定义为与这些全局参数相关,所以可以用它们来实现整体的设计修改,Pro/Engineer 的参数化特征造型功能贯穿于整个产品,它为所有类型的模型提供了参数化的方式,



特征、曲面、曲线以及线框模型等。所有几何元素都必须被完全约束，不支持欠约束绘图、工程分析、数控编程、布线设计、钣金件设计等领域；它还提供双向数据关联的能力，这样设计的修改能自动地更新到出图、分析、制造以及其它 CAD/CAM 领域，系统完全是三维的，并支持装配体中各零件之间的约束<sup>[46]</sup>。

2. CATIA 软件，是 IBM 公司和达索(Dassault Systems)公司共同推出的新一代工业先进水平的 CAD、CAE、CAM 软件。该软件是由法国著名飞机制造公司达索公司设计开发，得到 IBM 全球支持并由 IBM 在世界各地销售。两公司于 1993 年 10 月 12 日推出了 CATIA 版本 4，1996 年 3 月 5 日又发布了 CATIA 版本 4.1.6。CATIA 软件具有先进的开放性、集成性、灵活性，其先进的技术特点也十分明显，如：参数化及变量化建模、基于特征的设计、精确实体造型、丰富的曲面功能、透明的有限元分析及自动进行前后处理、高超的机加工能力等等。CATIA 软件主要包括适应需求的五套解决方案(Solution)，分别是：机械设计方案、曲面设计及造型方案、制造方案、分析及模拟方案、设备及系统工程方案。CATIA 软件可运行在 IBM 的 RISC 6000 工作站及大型机上，其版本 4.1.6 已与 HP、SGI 等多种平台兼容，并能运行在多种操作系统。CATIA 在各领域得到广泛应用，尤其是在航空和汽车工业中的应用。最典型的用户当属波音飞机公司和美国克莱斯勒汽车公司。波音 777 飞机就是依赖于 CATIA 软件而成为第一架 100% 的数字化设计的飞机。我国也有部分飞机制造公司和汽车制造公司购买了该软件(如上海桑塔纳、广东三星汽车公司等)。CATIA 动态草图器可作为一个工具在用户快速草绘 2D 轮廓图并将其作为 3D 设计的一部分使用。用户可以直接操作共面实体几何并且编辑形状、改变自由度或修改相关约束。动态草绘器在 2D 窗口中不断地分析几何以检查约束冲突。通过对轮廓几何约束的自动记忆，该产品可以捕捉到设计意图<sup>[47]</sup>。

3. CV 的 CADD5 美国 Computer Version 公司(简称 CV 公司)创立于 1969 年，总部设在美国麻省贝德福德市，是一家专门从事 CAD/CAM/CAE 软件开发、生产和销售的专业公司。CV 公司自成立以来，拥有众多的优秀 CAD/CAM 软件，在世界范围内的 CAD/CAM/CAE 软件市场上一直处于比较领先的地位。CADD5 是 CV 公司于 1991 年正式推出的主导 CAD、CAM、CAE 软件，产品包括机械设计、分析、加工、土木、建筑、化工管道及机电一体化设计等领域，提供参数化造型、全套工程分析、NURBS 曲面、并行装配、工程详图、五轴数据等强大功能，还具有统一数据库，图形化界面菜单。CADD5 支持全部 UNIX 工作平台，包括 SUN、DEC、SGI 和 IBM 系列。CV 公司较早就进入了中国大陆市场，目前已有数百家国内用户单位在使用 CV 公司的软件产品，遍布全国各地。如：长沙鼓风机厂、合肥荣事达电气有限公司、上海大众汽车制造公司等<sup>[48]</sup>。

4. Autodesk 的 AutoCAD 美国 Autodesk 公司是目前世界上 CAD/CAM/CAE GIS 工业的最大软件供应商，1994 年的营业额达 4 亿多美元，生产经营的产品包括 AutoCAD、3DStudio(三维模型和动画软件)、AutoCAD Designer 与 AutoSurf(机构设