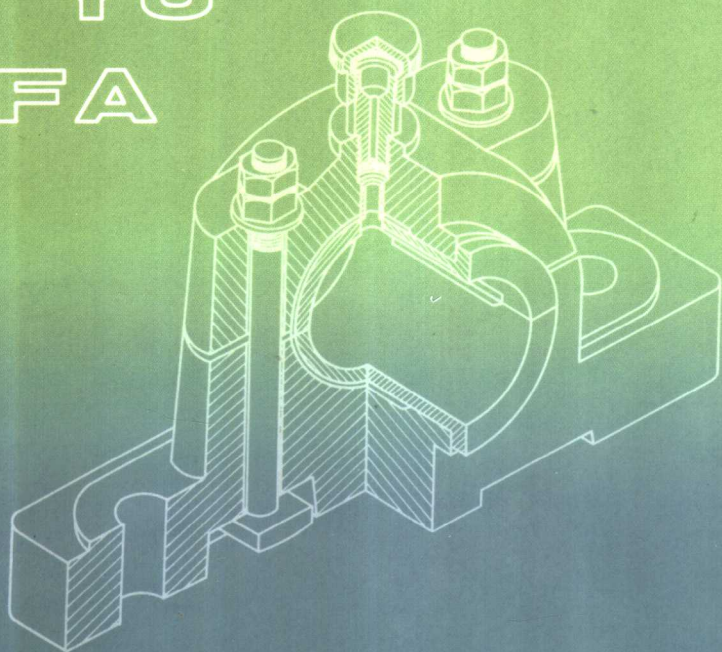


董玉德 著

离线参数化理论与方法

LIXIAN
CANSHUHUA
LILUN YU
FANGFA



中国科学技术大学出版社

3
0

离线参数化理论与方法

董玉德 著

(安徽省自然科学基金资助)

中国科学技术大学出版社

中国·合肥

内 容 简 介

本书对离线参数化的基本理论与方法作了较为系统的论述。全书共分7章,内容包括绪论、参数化基本问题、图元约束模型、尺寸关联约束识别、约束求解、图元参数化及其应用。书中介绍的很多算法都是作者近几年发表的研究成果。

本书适合于从事计算机、机械、电子等行业的广大软件开发人员,以及高等院校高年级本科生、研究生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

离线参数化理论与方法/董玉德著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2004.5
ISBN 7-312-01679-0

I. 离… II. 董… III. 工程制图—识图法 IV. TB23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 025806 号

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026) [Http://www.press.ustc.edu.cn](http://www.press.ustc.edu.cn)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:720mm×1000mm/16 印张:12.75 字数:330 千

2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月第 1 次印刷

印数:1—2000

ISBN 7-312-01679-0/TB·10

定价:19.00 元

前 言

本书系统地研究了离线参数化理论与方法,提出了基于约束关系自组织参数化设计模型,探索了图形理解过程中的连通图重建、几何约束识别、尺寸约束识别和约束关系自组织方法,研究了面向图形结构单元的约束关系自组织过程,并讨论了原型系统的开发。

首先讨论了参数化设计的特点及其发展过程,然后分析了现有编程参数化、在线交互参数化、离线参数化方法各自的优缺点以及不同参数化方法中存在的问题。讨论了离线参数化中图形理解和自组织设计的基本问题,提出应用于参数化设计的无向图和有向图基本概念,以及和参数化设计相关的图的要素,给出了基于约束关系自组织参数化模型的表示和约束分类,并且详细讨论了结构约束和工程约束中的各项子约束问题以及约束的各种自组织特性。在分析一般工程图的特点后,通过对一般图搜索算法的改进,提出一种连通图重建和图素间的几何约束识别的自组织方法,通过约束识别,使原先互不相关的各元素对象建立起拓扑约束关系,完成了对图形的离线式自动识别和理解。在本书的第四部分重点讨论了尺寸之间的关联约束识别问题,提出了尺寸链和尺寸环的自组织模型,并利用该模型分别研究了尺寸链与尺寸环中尺寸之间约束关系的自组织算法。在完成了对图形几何约束和尺寸关联约束识别后,在第五部分中研究了有向约束图的结构及约束图到有向约束图的转化方法,有向约束图的建立进一步明确了图中每个实体的求解次序。通过指定不同隐式约束的优先级状态,探讨了欠约束图求解时约束关系的自组织方法。在本书的最后提出了面向图形结构单元的变量关联自组织参数化原理与方法,以及参数化方法的应用。

本书的研究得到了安徽省自然科学基金的资助。在本书出版之际,作者要感谢浙江大学谭建荣教授、合肥工业大学赵韩教授多年来在学术上给予的帮助。

作为一本介绍参数化技术的学术专著,作者力图向读者介绍离线参数化中的几个关键技术,书中的绝大部分内容是作者这几年研究工作的体会。由于作者水平有限,部分内容还有待于进一步的深入研究,缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评与指正。

作者

2004年4月

目 录

前言	(I)
第 1 章 绪论	(1)
1.1 引 言	(1)
1.2 参数化设计的研究现状分析	(3)
1.2.1 参数化设计的特点	(3)
1.2.2 参数化设计的发展过程	(4)
1.2.3 国内外主要著名 CAD 系统中参数化技术	(8)
1.2.4 程序参数化	(10)
1.2.5 在线交互参数化	(11)
1.2.6 基于自组织方式的离线参数化	(19)
1.3 本文的研究背景、内容及意义	(21)
1.3.1 本文的研究背景	(21)
1.3.2 本文的主要研究内容	(23)
1.3.3 本书的研究特色	(24)
1.4 本章小结	(25)
第 2 章 离线参数化的基本问题	(26)
2.1 引言	(26)
2.2 离线式图形理解和参数化中的自组织	(27)
2.2.1 离线式图形理解	(27)
2.2.2 参数化中的自组织	(27)
2.3 基于约束关系自组织参数化模型中有关图的知识	(28)
2.3.1 无向图与有向图	(28)
2.3.2 有向图中的元素	(29)
2.3.3 有向图的连通性	(30)
2.3.4 有向图中的元素的方向性	(31)
2.3.5 有向图中的元素间的几何拓扑关系	(31)
2.3.6 有向约束网	(32)

2.4 基于约束关系自组织参数化模型的表示	(32)
2.4.1 自组织参数化模型的信息构成	(32)
2.4.2 自组织参数化模型的表达	(33)
2.5 基于约束关系自组织参数化模型中约束分类	(34)
2.5.1 结构约束	(34)
2.5.2 工程约束	(37)
2.6 约束的自组织特性	(42)
2.6.1 约束的可变性与不变性	(42)
2.6.2 约束的可识别性与不可识别性	(42)
2.6.3 约束的显式性与隐含性	(43)
2.6.4 约束的多态性	(44)
2.6.5 约束的有效性	(44)
2.6.6 约束的多样与归一性	(45)
2.6.7 约束的有序性	(45)
2.6.8 约束的优先级	(46)
2.6.9 尺寸约束的可传递性	(46)
2.7 离线式图形理解与约束关系自组织方法的主要原理	(47)
2.8 本章小结	(48)
第3章 图元的约束模型与约束搜索	(49)
3.1 引言	(49)
3.2 连通图与有向约束网的类型	(50)
3.2.1 识别和理解的层次及其局限	(50)
3.2.2 有向约束网的类型	(51)
3.3 基于约束关系图元的自组织模型	(52)
3.3.1 顶点数据类	(53)
3.3.2 图元的关联信息	(53)
3.3.3 图元的投影信息	(54)
3.3.4 直线、圆弧和圆	(54)
3.3.5 尺寸数据类	(58)
3.3.6 剖面线数据类	(60)
3.4 几何约束关系的自组织识别核心算法	(61)
3.4.1 识别的前期准备—数据模型转换	(61)
3.4.2 图块在视图中的划分	(63)
3.4.3 图搜索整个过程	(65)

3.4.4 单一连通图自组织搜索过程	(66)
3.4.6 投影约束的识别	(70)
3.4.7 剖面线约束的识别	(74)
3.5 本章小结	(77)
第4章 尺寸关联约束的识别	(78)
4.1 引言	(78)
4.2 尺寸关联的工程约束	(79)
4.2.1 尺寸链标注类型	(79)
4.2.2 尺寸链求解的相关研究	(80)
4.2.3 尺寸链和尺寸环的自组织约束模型	(80)
4.3 尺寸链和尺寸环的离线式建立	(84)
4.3.1 尺寸链的自组织建立算法	(84)
4.3.2 尺寸环的自组织建立算法	(86)
4.4 基于尺寸环的关联尺寸求解	(90)
4.4.1 尺寸环求解原理	(90)
4.4.2 尺寸环求解自组织算法	(90)
4.5 本章小结	(93)
第5章 约束求解与重构	(94)
5.1 引言	(94)
5.2 约束完备性的判定	(95)
5.2.1 基本术语	(95)
5.2.2 约束关系的自组织规则	(98)
5.2.3 几何元素集约束完备性	(98)
5.3 有向约束图及约束求解的自组织方法	(99)
5.3.1 有向约束图的定义	(99)
5.3.2 有向约束图的结构	(100)
5.3.3 约束求解的自组织方法	(100)
5.3.4 约束求解的自组织过程示例	(103)
5.3.5 图形重建的自组织方法	(107)
5.4 几何约束二义性及其约束关系自组织方法	(108)
5.4.1 问题的提出	(108)
5.4.2 参数化中的多解问题	(108)
5.4.3 图元关联约束方法图	(110)

5.4.4 几何约束二义性求解的自组织算法举例	(112)
5.5 欠约束图求解的自组织方法	(116)
5.5.1 欠约束求解的算法原理	(116)
5.5.2 欠约束图中约束关系的自组织求解算法	(119)
5.6 本章小结	(123)
第6章 图形单元参数化	(125)
6.1 引言	(125)
6.2 图形结构单元的参数化描述	(126)
6.3 面向图形结构单元的自组织参数化原理	(126)
6.3.1 图形结构单元间的继承关系	(127)
6.3.2 图形结构单元的自律约束与自组织规则	(128)
6.3.3 图形结构单元之间的关联约束与自组织规则	(128)
6.3.4 尺寸对图形结构单元的约束	(129)
6.4 零件间的双向关联	(130)
6.5 面向图形结构单元关联参数化的自组织算法	(131)
6.5.1 图形结构单元的自组织参数化	(132)
6.5.2 零件内图形结构单元的自组织参数化	(133)
6.5.3 零件间图形结构单元的自组织参数化	(136)
6.6 结构变异自组织参数化设计方法	(139)
6.6.1 问题的提出	(139)
6.6.2 图元自组织阵列法	(140)
6.6.3 插入和删除自组织法	(140)
6.6.4 单元自组织置换法	(146)
6.7 本章小结	(148)
第7章 离线参数化技术的应用	(149)
7.1 引言	(149)
7.2 面向对象自组织参数化模型的建立	(150)
7.2.1 约束模型的抽象和确定	(151)
7.2.2 约束模型的封装和分层	(151)
7.2.3 约束模型的装配	(153)
7.3 离线式图形理解和自组织参数化	(153)
7.3.1 数据模型	(153)
7.3.2 工作流程	(153)

7.4 面向图形结构单元的自组织参数化设计	(157)
7.4.1 参数化图形结构单元库	(158)
7.4.2 同一零件中不同图形结构单元的自组织关联	(160)
7.4.3 不同零件中图形结构单元的自组织关联	(164)
7.5 常用件参数化图形库的设计	(166)
7.5.1 图形编程中设计过程的引入与处理	(166)
7.5.2 尺寸和表双向驱动原理和方法	(168)
7.5.3 参数化图形库设计中关键问题的研究	(172)
7.6 本章小结	(179)
 后记	 (180)
参考文献	(182)
作者发表的重要论文	(194)

第1章 绪论

【本章摘要】 本章回顾了参数化设计的特点和发展过程。论述了编程参数化、在线交互参数化、离线参数化方法各自的优缺点以及不同参数化方法中存在的问题。根据对现有参数化方法的分析,提出了面向离线参数化的图形理解和自组织理论及方法,最后,给出了本书的研究背景、内容和意义。

1.1 引言

社会的需要与市场竞争是科学技术发展的根本动力。瞬息万变的市场与以计算机技术为核心的信息革命迫使制造业在产品设计方式、制造模式及相关技术方面进行变革。由于当代消费的多样化、个性化特点,未来市场对产品的需要将是大批量、规模化、标准化与小批量、多规格、个性化共存,特别是个性化产品的需求将会与日剧增,为了适应这种变化,产品设计方法将在信息技术的支持下以新的面貌出现在人们面前。

产品的设计过程是一个不断完善和反复修改的过程,即使对已定型的产品,也需要形成系列,以针对不同用户的特点提供各种规格型号的产品。因此,机械产品设计绝大多数是一种改进型设计,即在原有设计的基础上进行局部修改。现有工程图纸是长期以来人类智慧和劳动成果的结晶,对交互输入的工程图或其它方式生成的工程图进行再设计,对提高产品设计质量、缩短产品设计周期具有不可估量的意义。

产品信息建模是计算机辅助设计的核心技术,建模方法的灵活性与高效性直接关系到 CAD 系统的应用和发展。产品信息模型的表示关系到系统的功能、系统所采用的算法、数据结构、用户界面乃至系统结构。为了更好适应新的产品设计方式和制造模式,人们相继提出了多种产品建模方法,例如,产品信息的几何建模、特征建模、集成建模、智能建模和生物型建模^[213],建模方法的不断发展集中表现为产品设计与制造的智能化、柔性化和一体化程度的不断提高。

参数化设计作为产品建模的一个重要手段在系列化产品设计中得到较好的应用。在计算机辅助设计技术应用的早期,由于 CAD 系统都是用固定的尺寸值定义几何元素,设计者只有对产品的形状、大小、各种属性有了完整的构思后,才能用计

算机生成和输出图形,在其几何模型数据库只有图素的几何信息,各图素之间没有约束关系,系统缺乏对非图形信息如设计知识、设计约束、功能条件等的表达和处理能力,修改设计变得相当困难^{【211,231】}。而参数化模型不仅记录了必要的几何信息,还保留了图形的拓扑结构,以及各种设计知识、设计约束等信息,对结构相同而尺寸不同的产品,就可用同一参数化模型描述其几何形状,当产品因某些定形定位参数发生变化而导致产品的局部形状的更改时,系统能维护原有的设计意图,在满足原有约束关系不变的条件下,自动生成新的图形,实现参数化设计。

人工智能技术和 CAD 技术的广泛结合,特别是人工智能中的专家系统技术、实例推理技术、约束满足技术、面向对象技术在 CAD 中的应用,推动了参数化设计技术的发展。根据交互程度的不同和智能化水平的层次,有三种参数化方式,即编程参数化、在线交互参数化和离线参数化方法^{【229】}。在编程参数化中,产品中的各种约束关系是由设计者来构思,计算机只是一种实现工具,而在在线交互参数化方法中,约束关系的建立是设计者通过交互方式与计算机共同完成,到离线参数化时,约束关系的识别、分析等绝大部分任务是由计算机来执行。从这些变化可以看出人在设计过程中的参与程度在减少,而计算机在参数化过程中所起的作用越来越显著。随着约束推理、定性推理、模糊推理等最新人工智能技术的发展,工程数据库技术、网络和通讯技术、并行设计技术等被广泛应用,新的参数化思想和方法必将不断被提出并加以应用,参数化设计中的智能化和一体化程度将得到进一步的提高。

然而,纵观大多数商用 CAD 系统中的参数化技术,一个共同特征是参数化过程中的约束关系都是在作图过程中用交互、文件等其它在线方式给予定义的^{【229】}。由于不同 CAD 系统中约束的定义、约束的建立和约束求解原理及实现方法的不同,这样,在对其它参数化 CAD 系统生成的工程图或非参数化 CAD 系统生成的非参数化工程图进行参数化时,约束关系要重新加入到图形中,这一过程不仅繁琐,而且降低了参数化效率。因此,从本质上来看都不是离线参数化方法。

工程图形是用来对产品的构造、尺寸参数及技术要求等信息进行描述的技术性文件,是产品信息的主要载体。由于工程图形要反映的是真实世界中的一个具体的工程设计,图中的每个元素都不是互相孤立,而是按照一定的关系组织在一起,相同视图与不同视图中的图形元素之间都存在一定的约束关系。约束信息反映工程图内在的约束关系和工程设计知识,通常尺寸等工程约束信息要占图形信息的一半以上,甚至更多。对图形的参数化就是利用已知的几何和约束信息,根据修改后的尺寸等变量,通过约束求解,生成新的实例图。如果所有的约束关系在图形的参数化过程中要重新输入,这个过程显然是十分不方便的。由于工程图形中的部分约束信息,如几何约束、拓扑约束、尺寸约束等,都是以显式或隐式方式蕴含在图形中,并随图形的存在而存在,因此,我们有理由避开重加约束这一繁琐的过

程,通过离线方式提取工程图内在的约束信息,并用约束的变化来驱动图形的变化。

本节通过对现有参数化方法的分析,针对离线参数化的难点,提出一种面向离线参数化的图形理解和自组织理论与方法。通过对图形的识别、理解和推理,建立面向多约束的参数化模型,利用该约束模型对图形进行离线参数化。面向离线参数化的图形理解和自组织理论与方法对增强 CAD 系统中参数化通用性和兼容性、提高 CAD 技术对产品设计的支撑能力和产品建模的自动化水平具有重要的理论和现实意义。

1.2 参数化设计的研究现状分析

早期的 CAD 系统是先绘制出图形,然后通过人机交互进行尺寸标注,但尺寸对图形中的几何元素不具有约束关系。这种设计方法只存储了设计的最后结果,而将设计的过程信息丢失。缺点主要表现在^[1,113]:(1)不支持草图设计;(2)不能支持全部设计过程,而一个机械产品的整个设计过程包括功能设计、概念设计、初步设计和详细设计等不同阶段;(3)缺乏对产品内部不同组件的关系的表示,不同的组件之间无明显的约束关系,不支持并行设计;(4)信息表达不完整,产品的设计过程可看作产品数据的逐步求精的过程,在不同的设计阶段表现出不同的设计属性,另一方面,这些数据信息又表现出多样性;(5)不能进行变动和系列化设计,而绝大多数的设计都是属于改进型的设计。参数化设计正是针对这些不足应运而生的。

1.2.1 参数化设计的特点

参数化设计将产品的定义、功能、特性、形状等属性通过约束表示出来。设计过程是构思设计要求、提出产品功能、给出相应的结构和几何约束,最后形成设计对象,而不同的设计过程又是不断循环,直到满足设计结果为止^[139,140]。基于约束的参数化产品设计过程如图 1-1 所示,产品的整个设计过程就是约束规定、约束变换求解以及约束评估的约束求精过程。

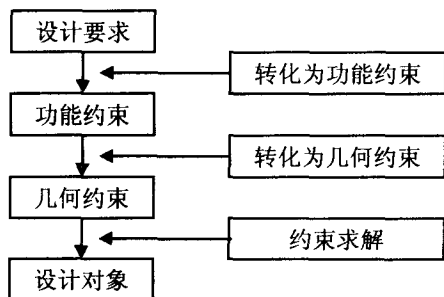


图 1-1 基于约束的参数化产品设计过程^[204]

从约束的观点看,产品各个阶段的工作可看成约束的转化与求解。在设计初期,产品的需求说明通常可通过一系列的功能约束来表示,在概念设计阶段,功能约束被转化为一系列的建立在产品基本设计概念及元素之上的约束。最后在详细设计阶段,这些约束被转化为更细的约束,通过约束满足求解最终获得完整的无二义性的产品设计。参数化方法与早期的基于数值的表示方法相比有很大的不同,主要表现在以下几个方面^[204]:

- 为并行设计提供共享数据源

并行设计作为产品设计的一个重要手段,尤其对复杂的机械类产品来说显得尤为重要,而基于约束的参数化设计是用约束来驱动对象的,约束又可分解为不同的数据信息,并且可把这些信息集成到公共数据库中。这样,不同的设计者在不同的地点、不同的时间就可以共享这些数据库。

- 人机分工得到进一步优化

基于约束的参数化设计将很大部分工作留给计算机去完成,在这里计算机及其相应的软件系统已不再仅仅是一种工具,而是和专家一样具有一定的智能,并能以最大程度参与设计活动的管理及产品数据的维护,减少了设计人员不必要的工作,这种分工趋势必然使设计活动中人的活动越来越少。另一方面,基于约束的参数化描述方法更加自然,更接近设计人员的设计思维。

- 模型与方法相分离,设计自动化程度得到进一步提高

基于约束的参数化设计将数据模型和求解方法分离,使用约束变量来驱动对象模型,重点在于表述设计的是什么东西而不在于如何设计,其中的绝大部分工作都由计算机来完成,而设计者将主要精力放到创造性的设计工作中,设计自动化程度得到了进一步的提高。

1.2.2 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

这一阶段以 Sutherland 为代表,他在 Sketchpad(1963)系统^[90]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 年代后—80 年代初的开创时期

提出一些参数化设计的基本思想和理论,并逐渐形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和完善了这一方法为标志。

RC 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^[46]。

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^[18]。

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、线性距离、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^[1]。

● 80 年代中期—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。

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^[93]。

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^[94]。

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^[9]。

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^[107]。

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,并且试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^[96]。

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^[104]。

Yaacov Hel-Or(1994)提出一种利用 Kalman 滤波器的松弛参数化方法^[98],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。

西班牙 Catalunya 工业大学 Lluís Solano(1994)提出一种基于约束的构造过程的参数化设计方法,它不仅可以支持多维设计(1D/2D/3D),而且还可以支持变拓扑结构设计^[97],同时给出了模型的定义语言、系统的结构和模型的内部表示。

● 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。

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^[100]。

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^[99],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,利用相应的算法对与该特征对应的机器约束进行校验。

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^[101],目的是改善推理过程,节省推理时间。

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^[23]。

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^[17]。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。

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^[108]。

Jae Yeol Lee^[4]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。

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^[133]给出一种约束图匹配方法,约束分解是基于并非所有的几何变量 $X_i(i=1,2,\dots,n)$ 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将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 条边采用增广路径法,其算法耗时为 $O(n \cdot e)$ 。采用自上而下的分层驱动策略。

武汉汽车工业大学刘武民^[152]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。

浙江大学董金祥教授,葛建新博士^[123,204]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。

华中理工大学薛鸿源^[118]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。

华中理工大学钱小平^[114]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。

浙江大学沈剑^[119]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。

山东大学孟祥旭教授^[131]采用扩展的有向超图结构(Extended directed hyper-graph)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。

华中理工大学兰箭^[121]给出基于图形数据图的参数化方法,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。

清华大学张国伟等^[177]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。

浙江大学谭建荣教授等^[128,229]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式参数化方法,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。

1.2.3 国内外主要著名 CAD 系统中参数化技术

到目前为止,世界各大 CAD 公司相继推出自己的参数化 CAD 系统或在原有系统上增加参数化功能。一些著名的商用公司开发的产品,基本代表该项技术发展的主流,所提供的模块基本覆盖了整个机械产品的设计过程,如美国参数化技术公司 PTC 的机械设计自动化软件 Pro/Engineer,UG 公司的 Solid Edge, SolidWorks 公司的 SolidWorks,美国 CV(Computer Vision)公司的 DPD, Autodesk 公司的 AutoCAD Designer,德国西门子利多富公司的 SIGGRAPH-DESIGN,俄罗斯 TOP SYSTEM 公司的 T-FLEXCAD 等,国产化的有自主版权的主要有华中理工大学的开目 CAD、清华大学和高华计算机公司共同开发的集成智能化机械 CAD 系统 GH-InteCAD、中科院北京软件工程研制中心开发的 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。为了找出同国外的差距,更进一步明确我们的研究和发展方向,现对国内外著名 CAD 系统中的参数化技术作一简要的概述^[140,166,222]:

1. Pro/Engineer

- 使用新一代行为建模技术,实现全智能化设计,任意捕捉设计参数和目标,确定零件的可移动空间和空间要求、表面和物体属性信息,及其对设计结果的评估;