



国家出版基金资助项目·“十二五”国家重点图书
航天科学与工程专著系列

DIGITAL ASSEMBLY TECHNOLOGY FOR MECHATRONICS PRODUCTS

机电产品数字化装配技术

● 付宜利 孙建勋 代勇 封海波 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金资助项目 · “十二五”国家重点图书
航天科学与工程专著系列

DIGITAL ASSEMBLY TECHNOLOGY FOR MECHATRONICS PRODUCTS

机电产品数字化装配技术

● 付宜利 孙建勋 代勇 封海波 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书共7章,分别为机电产品数字化装配技术概述、机电产品数字化装配建模、机电产品数字化装配序列评价、机电产品数字化装配序列规划、机电产品装配路径规划、机电产品管线自动敷设规划、装配规划分析系统和管线敷设设计系统。

本书适合先进制造、虚拟制造、装配自动化等相关领域的研究人员、工程技术人员、教师、研究生、高年级本科生作为产品数字装配技术研究学习用书。

图书在版编目(CIP)数据

机电产品数字化装配技术/付宜利等著.

—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2012.12

ISBN 978-7-5603-3405-9

I. ①机… II. ①付… III. ①机电设
备-装配(机械)-数字化 IV. ①TM05-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 283289 号

责任编辑 田 秋 范业婷

封面设计 高永利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 14.5 字数 297 千字

版 次 2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-3405-9

定 价 68.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

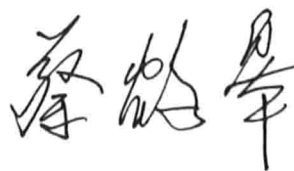
序

数字化技术和制造技术相融合,以虚拟现实、计算机网络、快速原型、数据库和多媒体等技术为支撑,根据用户的需求,对机电产品信息、工艺信息和资源信息进行分析、规划和重组,可实现机电产品设计和功能的仿真以及原型制造,进而快速生产出满足用户要求的机电产品。因此,机电产品制造领域的数字化是制造技术、计算机技术、网络技术与管理科学的交叉、融合、发展与应用的结果,也是制造企业、制造系统与生产过程、生产系统不断实现数字化的必然趋势。机电产品数字化装配技术作为机电产品虚拟设计与制造技术中的重要内容,一直以来受到了广泛的关注与研究。

作为国内较早研究机电产品数字化装配技术的单位之一,哈尔滨工业大学付宜利教授(著者)所在的课题组与航天院所合作,于20世纪90年代初开始相关研究工作,对于机电产品数字化装配中的装配建模,装配序列规划,装配评价,装配路径规划以及装配体内管线自动敷设设计等关键技术进行了较为深入的理论分析和实例验证研究。近年来该课题组取得了一系列的研究成果,得到该领域专家的广泛认可。

该书是著者在机电产品数字化装配技术领域研究的总结和提炼。著者从机电产品数字化装配的5个关键技术出发,详细地研究了数字化装配建模,装配序列规划,装配评价模型,装配路径规划和装配体内管线自动敷设等相关技术,提出了一系列原创方法、算法。每一章中的关键技术都展现了著者研究思路不断深入的过程。

该书对机电产品数字化装配技术方法和技术的详细介绍便于从事先进制造、虚拟制造、装配自动化等相关领域的教师与科研人员参考借鉴。该书的出版必将推动机电产品数字化装配技术在我国机电制造业的发展和应用。



2012年10月

于哈尔滨工业大学

前 言

目前,作为我国国民经济的支柱产业,制造业是我国经济增长的主导部门和经济转型的基础;作为经济社会发展的重要依托,制造业带动了一批相关产业的发展,同时促进了一系列高新技术的提升。

随着科学技术的发展,全球市场竞争日趋激烈,装配技术作为制造业领域中核心技术之一,得到不断的发展。装配技术从最初的人工装配开始,经历了众多的变化。在人工装配工作中,由于人的智能和经验的参与,使得装配活动具有柔性,且成本相对低廉,但是需要装配操作人员具有必要的素质,人员成为影响装配质量和效率的关键因素。但是这种装配方式难以保证装配质量的一致性和稳定性,而且难以胜任装配体结构复杂、环境恶劣等情况下的装配工作。在以人工为主的装配方式之后,出现了自动化装配,其类型按装配对象是否可变换,是否在一定范围内可调,可以分为刚性自动装配和柔性自动装配。如果产品是大批量生产类型,需选择刚性自动化装配,如果是单件小批量生产类型,要选择柔性自动化装配。以刚性自动化装配机、装配线为代表的自动装配方式多以机械结构或者利用逻辑电路等设备控制装配动作,实现装配任务的自动化。这类装配系统本身的成本高,设计和加工周期长,产品换代时需要改造系统的机械结构、电路等硬件,适合批量大、产品更新频率低的生产企业。在这种情况下,以自动化装配中心、流水线和装配机器人为代表的柔性装配系统应运而生。目前,装配技术与数字化技术、人工智能技术相结合,形成了数字化装配这一自动化装配技术的新领域。

作为较早研究数字化装配技术的单位之一,哈尔滨工业大学付宜利教授所在课题组于20世纪90年代开始展开相关研究,指导多名研究生在该领域从事研究工作,在机电产品数字化装配建模、机电产品数字化装配序列评价、机电产品数字化装配序列规划、机电产品数字化装配路径规划和机电产品管线自动敷设规划等方面取得了一系列的研究成果。本书内容是课题组多年研究成果的总结。

本书在“2011 国家出版基金项目”支持下,在总结课题组多年理论研究与工程实践的基础上,以机电产品数字化装配技术为中心,叙述了数字化装配技术研究过程中涉及的相关方法,内容涵盖了装配建模、装配序列规划、装配路径规划、装配评价、管线自动敷设、装配自动化软件开发等技术。本书希望能够为有志于开展数字化装配技术研究的学生、教师与工程技术人员提供有益的参考。

本书主要有以下特点:

1. 技术全面,内容充实

本书所讲述的内容基于机电产品装配实例,详细介绍了数字装配技术各个方面的知识;同时结合实例介绍了数字装配技术进行装配自动化程序开发的相关知识。

2. 分析深入,步骤清晰

本书注意把握各个知识点的原理和基本研究方法,总结方案实现的思路和步骤,将理论与实践相结合。

3. 结合应用,注重实践

本书结合实例详细介绍了数字化装配规范化分析系统和三维管线敷设系统的实现过程,拓展读者视野,提高读者的实际应用能力。

本书共分为7章。各章的主要内容如下。

第1章:介绍了机电产品数字化装配技术研究的对象、技术范围、主要技术路线、主要研究方法。

第2章:阐述了机电产品数字化装配建模技术,分析了建模的对象和要求,介绍了建模技术的发展过程和主要研究方法,并结合机电产品实例对建模步骤、数据结构、建模方法进行了详细介绍。

第3章:阐述了机电产品数字化装配评价技术,分析了装配评价技术的主要研究对象、方法和成果,并结合科研实例对装配评价的研究方法、步骤进行了详细介绍。

第4章:阐述了机电产品数字化装配序列规划技术,分析了装配序列规划技术的主要研究方法和成果经验,并结合机电产品序列规划实例对序列规划技术涉及的割集方法、数据处理、研究步骤进行了详细介绍。

第5章:阐述了机电产品数字化装配路径规划技术,分析了装配路径规划技术的主要研究方法和成果经验,并结合机电产品路径规划实例对路径规划技术涉及的路径寻优方法、研究步骤进行了详细介绍。

第6章:阐述了机电产品管线自动敷设规划技术,分析了如何应用路径规划技术进行机电产品内部管线自动敷设研究,对管线自动敷设规划技术涉及的数据预处理方法、优化方法、研究步骤进行了详细介绍。

第7章:结合二次开发实例,介绍了基于 Unigraphics NX 环境,利用 UG/Open 结合 C++,在 VC6.0 开发工具环境下应用优化方法实现装配规划分析系统和三维管线自动敷设系统。

付宜利、孙建勋、代勇和封海波撰写本书,其中第1章由付宜利、孙建勋撰写,第2~4章由付宜利、代勇、封海波撰写,第5~7章由付宜利、封海波、孙建勋撰写。本书内容是著

者所在课题组的集体研究成果的结晶,吸收了本人指导的博士研究生代勇、封海波、谢龙、李荣、田立中、储林波等以及硕士研究生的研究成果。卢泽生教授、任秉银教授审校了全书。在此对他们的辛勤劳动表示感谢!

感谢中国航天科工集团公司第三研究院在课题组进行数字化装配技术研究过程中给予的资助!

由于数字化装配技术还在不断的发展,同时也因作者知识水平的局限,书中难免出现错误或不当之处,诚挚欢迎读者批评指正。

付宜利

2012 年 11 月

于哈尔滨工业大学

目 录

第 1 章 机电产品数字化装配技术概述	1
1.1 机电产品数字化装配技术研究的目的与意义	1
1.2 数字化装配技术的研究现状	2
1.3 组合优化算法的发展	14
第 2 章 机电产品数字化装配建模	16
2.1 装配关系表达	16
2.2 基于有向图的装配模型	19
2.3 基于优先关系图的装配模型	29
2.4 基于知识 Petri 网的装配模型	44
第 3 章 机电产品数字化装配序列评价	63
3.1 装配序列评价的主要内容	64
3.2 装配空间可行性验证	65
3.3 装配工具操作空间可行性验证	65
3.4 装配人体操作空间检验	69
3.5 装配路径检验	70
3.6 装配代价评价	72
第 4 章 机电产品数字化装配序列规划	75
4.1 有向图割集分解装配序列规划	75
4.2 基于有向装配连接图的选择性序列规划	84
4.3 基于 MMAS * 算法的线性装配序列规划	94
4.4 面向多人装配的序列规划	115
第 5 章 机电产品装配路径规划	130
5.1 基于动态坐标的 A* 搜索装配路径规划	130
5.2 基于遗传算法的装配路径规划	139
第 6 章 机电产品管线自动敷设规划	156
6.1 管线自动敷设评价方法	156
6.2 基于混沌过程预处理模型	159
6.3 基于 M-PSO 算法单管线自动敷设方法	179

第7章 机电产品数字化装配实例系统·····	196
7.1 装配规划分析子系统言·····	196
7.2 管线敷设设计系统·····	199
附录·····	205
附录1 紧固件处理流程图·····	205
附录2 装配重定位的计算流程·····	206
参考文献·····	207
术语索引·····	221

第 1 章 机电产品数字化装配技术概述

1.1 机电产品数字化装配技术研究的目的与意义

随着科学技术的发展,全球市场竞争日趋激烈。对于制造业而言,成本和生产效率对企业的生存能力以及竞争力都有着极大的影响。一方面,无论其产品的批量、生产周期如何,生产成本的降低意味着企业在市场竞争力和占有率等方面都将占据优势。另一方面,高效率的新品研发能力可以为企业在市场竞争中获得战略性的优势。为此,一系列先进的理论、技术以及新思想、新模式,在制造业中获得了飞速的发展和广泛的应用,如工业机器人(Robot),机床数字控制(NC),计算机数字控制(CNC),计算机辅助设计(CAD),计算机辅助制造(CAM),敏捷制造(AM),柔性制造系统(FMS),计算机集成制造系统(CIMS)等^[1-4]。

对于机械制造业等行业,装配是其产品生命周期的一个重要环节,是实现产品功能的主要过程^[5-6]。装配技术的发展从最初的人工装配开始,经历了众多的变化。在人工装配工作中,由于人的智能和经验的参与,使得装配活动极具柔性,且成本相对低廉,但是需要装配操作人员具有必要的素质,人员成为影响装配质量和效率的关键因素。这种装配方式难以保证工作的一致性和稳定性,而且难以胜任大型装配体、环境恶劣等情况下的装配工作^[7]。在以人工为主装配的方式的出现之后,又出现了以刚性自动化装配机、装配线为代表的自动装配的方式。这种方式多以机械结构或者利用逻辑电路等设备控制装配动作,实现装配任务的自动化。这类装配系统本身的成本高,设计和加工周期长,产品换代时需要改造系统的机械结构、电路等硬件,适合批量大、产品更新频率低的生产企业。目前,市场逐渐向需求方倾斜,企业需要围绕不断变化的市场需求进行产品的设计与生产。批量、周期不固定,产品品种更换频繁是这种生产模式的特点^[8]。在这种情况下,以自动化装配中心(流水线)和装配机器人为代表的柔性装配系统应运而生。如果不考虑自动供料系统等辅助系统的影响,柔性装配系统的任务调整几乎不需要硬件改动,主要依靠控制软件的更新就可以完成装配任务的调整^[9,10]。

除了快速灵活的装配设备以外,合理的装配规划是加快新产品上市周期、降低产品的装配难度以及提高装配效率的另一条重要途径。

相对于装配环节,设计环节是产品开发过程中至关重要的一环,而且处于产品生命周

期的较早阶段,它决定了产品总成本的大约 70%^[11]。设计阶段决定了产品如何加工,如何装配,甚至决定了产品将来在市场竞争中的地位。另一方面,装配是制造过程中的后置关键工序,产品的装配性能是影响生产效率的一个关键因素。如果出现了关于装配的设计错误,导致产品不可装配或者难以装配,则需要修改产品的设计、重新加工样机并再次试装配,这个过程将耗费大量的人力、物力和时间,降低样机的研发效率、增大研发成本以及延长新产品的定型周期。而如果在设计阶段考虑了产品的可装配性以及经济性等因素,就可以大大提高产品的生产效率并降低生产成本。在产品开发过程中对可装配性问题考虑得越早,所获取的质量、成本和时间效益就越明显。为了完善装配过程、减少装配设计错误,出现了与装配相关的多种理论和设计思想,如面向装配的设计(Design for Assembly, DFA)^[12]、计算机辅助装配规划(Computer Aided Assembly Planning, CAAP)^[13]以及利用虚拟现实(Virtual Reality, VR)^[14,15]、增强现实(Augmented Reality, AR)^[16,17]进行装配规划、装配验证等。

1.2 数字化装配技术的研究现状

通常,在装配体中包含的零件数量较多的情况下,装配设计人员多是依靠装配图纸或相关软件生成的三维实体图通过经验来进行装配设计,显然其可靠性较差、效率很低。而数字化装配技术,是以信息化、计算机为辅助工具解决该问题的重要途径。数字化装配技术涉及以下关键问题:

①装配建模。这一步就是从装配体的 CAD 模型中提取出有用的信息以及装配设计人员需要的一些信息等。如零件之间的几何位置关系、零件之间的连接关系等,构造出能够反映装配中零件间关系的模型^[18]。

②装配序列的评价,包括可行性评价和优化性评价。其中可行性评价包括工具的可操作性、装配运动空间无干涉性、装配体稳定性等;而优化性评价包括工具更换次数最少、重复定位次数较少等,主要目的是尽量减少装配过程的时间消耗等。

③序列生成,用来产生装配序列。在这些评价的基础上对生成的序列进行选择,挑出最优的可行序列,并施行进一步的装配工艺规划、装配线配置。显然,装配序列规划很大程度上决定了装配环节的效率 and 成本,是装配规划中十分重要的一环。

④装配路径规划问题,即忽略装配工具,考虑装配零件从装配起点(传送带等工件运输设备)到装配目标点(产品中最终位置)的空间平移装配运动在障碍约束条件下的路径问题。路径规划一般要考虑运动学约束,包括路径约束和障碍约束两部分。

⑤管线敷设规划问题,即在复杂机电产品装配体内部,针对管线敷设、运行的具体约束条件,进行管线敷设优化设计。

1.2.1 装配模型

装配序列规划的起点是装配模型。通常情况下,装配规划系统基于现有 CAD 系统,构建属于系统自己的模型。其目的一方面是为了减少在规划过程中频繁对 CAD 数据进行查询,提高系统运行效率;另一方面是为了增加、完善规划系统必须的数据。在装配模型的基础上进行问题描述以及装配序列规划。装配模型的不同,会导致不同的序列规划算法。装配模型主要包含两方面内容,即几何信息和非几何信息。文献[19]给出了6种表达几何信息的方法。目前几何信息的表达已在商用的 CAD 系统中广泛应用。由于非几何信息包含的内容比较广泛,所以目前没有统一的方法^[20]。在装配规划领域里,关注的非几何信息主要包括:零部件之间的层次关系;零部件之间的装配关系(主要指零部件间的位置关系、连接关系、配合关系、运动约束关系、紧固关系和紧固类型等);不同层次装配关系中设计参数的约束和继承关系等。

零件之间的装配关系的表达方式主要有以下几种^[21,22]:连接图方法、高级编程语言描述方法、紧固件方法等。常见的是连接图方法和高级编程语言描述方法。

连接图方法(Connection Graph)是由 Bourjault 提出的。它将一个装配体之间的几何连接关系利用无向图表达,图中的节点表示零件,连接节点线段(边)表示零件间的几何连接关系。连接图方法的优点是直观,描述简单,因此获得了广泛的应用。随后 Vagin 和 Jentsch 对连接图进行了改进,增加了紧固关系和紧固类型的表达。文献[23]提出了基于有向装配连接图的方法,利用有向边描述零件之间由于配合关系得出的优先关系,而零件的安装顺序必须符合这种优先关系。有向装配连接图很大程度上缩小了装配序列的求解范围。

高级编程语言(High-level Programming Language, HPL)描述法是在研究机器人高级语言时提出的,其目标是自动产生完成装配所必需的机器人动作。著名的 HPL 有 AUTO-PASS, PART, AL 和 LAMA。英国 Edinburgh 大学 Ambler 和 Popplestone 对 PART 语言^[24]进行了研究。但 PART 语言不能完整描述装配体的几何信息,只给出零件间空间位置的关系。Taylor^[25]引进包含零件空间几何描述的特征图,进一步发展了装配模型的描述, Taylor 的目的是求解装配零件的路径,而非装配顺序,因而,其模型忽视了零件间的配合信息。20 世纪 80 年代,IBM 公司进行了关于 AUTOPASS 语言的研究^[26],AUTOPASS 基于树状图结构表示装配模型,每个节点表示零件或子装配,节点的属性中包含零部件的几何信息和空间位置,边是有向的并加以标记,代表节点间的各种关系。

在零件之间的相互关系中,运动约束关系将影响到装配的可行性。为此,Dini G 等人提出了一个基于矩阵的产品装配模型用于装配顺序规划,该模型定义了3个矩阵:干涉矩阵、接触矩阵和连接矩阵。该模型描述了在 $+x$ 、 $+y$ 、 $+z$ 、 $-x$ 、 $-y$ 、 $-z$ 6个方向上,零件之间的接触、连接以及空间阻碍关系。该模型可以用来近似地判断装配序列的运动空间可行性,

被很多学者在装配序列规划研究中用于运动可行性的判断^[27,28]。

综上所述,装配模型可大致分为原始 CAD 模型、关系模型、层次模型三类^[20]。

1. 原始 CAD 模型

目前大多数 CAD 系统所采用的模型,即依据零件的局部坐标来表达它们的空间位置关系,可用于装配体的图形显示,但对于进一步应用,缺乏足够的信息支持。一般需要根据原始 CAD 模型进行信息扩充,加入更多规划系统所需的数据,同时减少同 CAD 软件之间的信息交互。在必要的时候仍需调用 CAD 软件的功能对原始 CAD 模型进行查询处理,比如进行装配过程仿真。一般装配规划系统将原始 CAD 模型作为装配模型的基础。

2. 关系模型

关系模型表达装配体中零件之间的关系。零件之间的关系可以从原始 CAD 模型中进行查询、运动仿真、干涉检查等方式来得到,也可以由人工输入、基于知识的推导等方式得出,用连接图、有向装配图、关系矩阵等进行描述。以连接图为例,图的节点表示构成产品的零部件,图的连接边表示零部件之间的关系,所有几何信息和非几何信息都存储于图的节点和连接边中。在大多数的关系模型中,一条边表示相关联的两个零部件间的所有关系;在另外一些装配模型中,一个关系对应一条边。

3. 层次模型

层次模型表达零件之间的层次关系。通常情况下,装配体可以根据其功能或装配关系划分为若干子装配,而子装配又由下一级子装配或多个零件组成,因而零件之间存在着层次关系。通常由装配树来进行表示,树的节点表示零部件,连接边表示零部件之间的从属、聚合以及继承等关系^[30],因大部分产品都可按功能划分为子装配,因而层次模型更有利于描述产品的功能,比关系模型更适合于装配应用。一个层次模型往往不能完整地描述产品,从不同的角度可以将产品分成不同的层次模型。对同一产品,面向不同应用的层次模型也存在差异。

装配模型随着装配规划系统对问题的描述以及求解方式的不同而相应改变,但其作用都是为装配序列规划系统提供必要的、完整的、可利用的信息。

1.2.2 装配序列规划

装配序列规划就是设计一个装配顺序,在经济优化的前提下,把分离的零件装配在一起,形成目标产品。反之,也是对目标产品的离散过程^[31]。装配序列规划是装配规划众多研究内容中的关键,关系到装配系统配置、装配作业调度和装配工具、夹具的设计等,在一些文献中,常将装配序列规划简称为装配规划^[32]。

装配序列规划方法的研究始于 20 世纪 80 年代初期,到了 80 年代后期才引起广泛重视。目前,装配序列规划的研究方法可分为正向方法和逆向方法。正向方法是从零件出

发,研究各个零件装配成产品的顺序。逆向方法是在假设组成装配体的零部件都为刚体,拆卸过程不存在破坏性等不可逆操作前提下,以产品为出发点进行拆卸判断,最后以拆卸顺序逆生成装配序列。因为逆向方法用到的装配模型的信息比正向方法多,所以逆向方法可能遇到的组合爆炸问题规模要比正向方法小得多,因而是常用的方法^[33]。

装配序列类型可分为线性与非线性、单调与非单调装配序列,如图 1.1 所示。

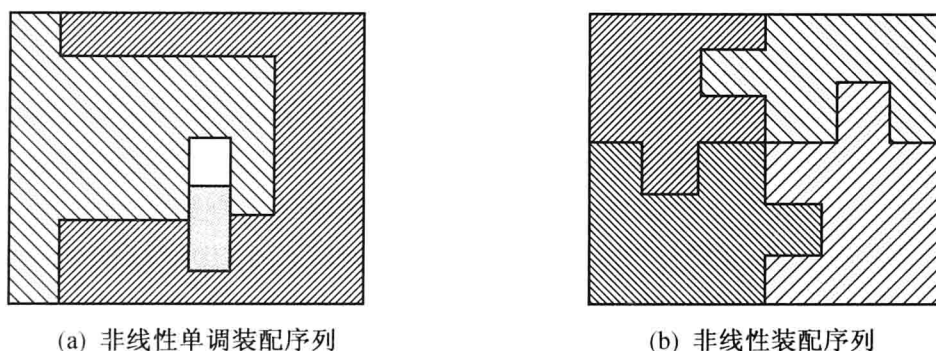


图 1.1 装配序列的分类

线性装配序列是指每次装配操作都是对单个零件的装配。非线性装配序列是指在产品的装配操作中存在多于两个零件的同时装配操作,即考虑子装配的装配序列。单调装配序列规划是指两子装配(或零件)之间的所有装配关系都在一次作业中建立,该装配关系在随后的装配过程中不再变动。出于装配效率和经济考虑,实际生产和研究中的研究对象大多为非线性单调装配序列规划。

在 20 世纪 80 年代初,Bourjault^[13]提出了优先关系集方法。这种方法的关键在于产生优先关系集,用关联图模型描述零件之间的装配关系,通过人机交互的方法产生优先关系集,即提出一系列不少于 $2n^2$ (n 为产品中零件数目) 个 Yes-No 问题,根据规划者的回答结果推导装配关联图连接关系之间的优先关系集,最后依据这些优先关系集生成该产品的合理装配顺序,即采用从零件到产品的正向推理方式。De Fazio 和 Whitney^[34]在此基础上改变提问方式,用装配状态网络描述装配顺序,并把问题数量由大于 $2n^2$ 个减少到 $2n$ 个。这种方法对规划者要求较高,提问方式过多依靠规划者,是一种优先关系集产生的初级方法。Wolter^[35]在 SUN 3/60 工作站上判断产品零件在坐标轴方向上的可拆卸性产生优先关系集,再按一定的判断标准选取满足优先关系集的最佳序列。Delchambre^[31]通过对产品连接图的不同分解情况进行可行性判断,产生优先关系集,具有对规划者依赖性小,易于自动实现的优点。文献[36]对产品的几何匹配图(CMG)进行割集分解产生优先关系集。优先约束集是装配序列的隐式表示,具有存储量小以及推理方便的优点。其最大的缺点是当零件数量较多时,需要用户回答大量的问题。

另外一类装配序列的生成方法是直接分解法,一般从产品出发,根据产品中零件的几何拓扑、机械约束等信息直接推导将产品分解成零件的不同情况和不同顺序组合,以产生

可行装配序列。1989 年 Mello 和 Sandson 提出了割集法,并证明了与/或图描述装配序列的完备性^[37,38]。割集法基于装配信息,利用图论中的割集概念对产品的装配模型进行分解,用与/或图表达装配顺序,并对每个割集进行可行性判断。割集法相当于对所有具有装配关系的零件及其之间的所有组合进行枚举分解,获得所有可能的子装配和可行的装配顺序。该方法利用人工经验较少,可产生完全的可行装配顺序。其缺陷是计算量较大,效率低,计算复杂度为 $\Omega(2^m)$ (m 为产品中零件间的装配关联数),受组合爆炸问题影响,进行装配序列规划的产品零件数目受到较大限制,一般小于 20^[39]。Wilson Latombe 等人在分析装配关系的基础上,用方向阻碍图求解分解零件和推导可行装配顺序的与/或图^[40,41],这种方法由于对装配关系的主动利用,因而受组合爆炸影响要小于割集分解方法,能规划的产品零件数目得以较大提高。但是,随着产品规模的增大,直接分解法所需的时间、结果序列的数量都将呈指数上升,此类方法仍然难以处理规模较大的装配体。

此外运用专家系统进行装配顺序规划的研究也开展得较早,而且还在进一步研究。比较典型的有: Huang、Lee^[42,43] 和 Tönshoff^[44] 等人利用启发规则生成装配顺序; Heemskerk^[45] 等人利用成组技术生成装配顺序; Chang、Wee 和周西苓等^[46,47] 使用专家系统进行装配序列规划的方法。张越等^[48] 讨论了机器人装配时零部件装配/拆卸知识库的建立,何箐^[49] 在 SUN 3/60 工作站上用 COMMON LISP 实现了基于装配工艺知识库的装配序列规划方法。但如何建立完备的装配工艺知识库和专家系统是个关键问题,这一类方法目前基本上只适用于特定结构的产品,如回转类组件、轴类产品或单自由度产品,具有较大的局限性。

装配序列规划一般可分为两步:可行装配序列的产生和优化装配序列的产生。可行装配序列是指满足几何约束、机械约束等“硬”约束条件下产生的装配顺序^[50]。优化装配序列是指结合部分经验等“软”约束条件,考虑和满足各种装配因素下,装配成本最低、装配效率最高的装配顺序。

在数目庞大的可行装配序列产生后,传统的产生优化装配序列的方法分为两类:穷举法和启发式方法。

穷举法是对所有的可行的装配序列,根据一定的评价标准逐一判断并选出最优装配序列,如 Mello 和 Sanderson^[51], De Fazio 和 Whitney^[34], Baldwin^[52] 等,这种方法通用性强,但计算复杂度很高,如 Mello 和 Sanderson 提出的基于 AND/OR 图搜索的装配序列生成算法的计算复杂度为 $O(2^N)$, 其中 N 为产品中的零件数。

启发式方法是采用一定的启发式信息产生有限可行的装配序列,如 Delchambre^[53], Huang 和 Lee^[18] 等的研究。启发式方法中 A* 算法最常用^[54,55],但由于搜索空间大,制约因素多,使得搜索速度十分缓慢。文献[56]先通过回答提问方式产生优先约束关系集,再利用 Hopfield 神经网络求解满足优先约束关系集的最佳产品装配序列,该方法能够规划的产品零件数量有限。文献[57~59]利用知识 Petri 网为装配建模的工具获取在环境

变化时的最佳装配序列,提高了装配序列规划的智能和适应性。

随着计算机技术的发展,仿生学、计算数学、物理学的交互发展,人们从自然界的很多机理中受到启发,提出了许多用以解决复杂优化问题的新方法^[60-62],如遗传算法^[63]、模拟退火算法^[64]等。它们的出现为解决 NP 困难问题提供了一条新的途径。有的学者借鉴了这些算法解决其他组合优化问题的思路,将它们应用到装配序列规划之中。

Lazzerini, Marcelloni 等将遗传算法用于装配序列规划^[65],以装配序列所需工具更换次数最少、重定位次数最少以及相似装配操作连续执行作为优化目标,将这些规划目标同装配序列一同编入染色体,然后利用交叉、变异等算子让种群进行随机进化,根据适应值进行优胜劣汰,求取近似最优的装配序列。国内东北大学的丁慧敏、李蓓智、周亚琴^[66],重庆大学的廖小云、陈湘凤^[67]也分别对遗传算法进行了研究,并用于装配序列规划。Hong 和 Cho 等利用模拟退火算法进行了装配序列规划的研究^[68],他们以满足装配优先关系、满足装配连通性作为约束条件,以稳定性、最小重定位次数作为优化目标。约束条件和优化目标都被计入能量方程,以一个随机产生的装配序列开始,随机挑选两个零件进行交换作为算法的邻域搜索策略,利用 Boltzmann 分布决定随机搜索结果的取舍。利用这些通用优化算法进行装配序列规划的优点是应用灵活、适应性强,而且适于解决零件数量较多的装配体的序列规划。只要确定了装配序列的可行性要求以及优化目标,并构建出适应函数(或者能量函数)^[69],即可应用这些算法进行序列规划。这类方法存在的问题在于,很难将所有的装配序列可行性要求与优化要求明确地用函数描述出来,所以遗传算法和模拟退火算法对于某种产品可能无法得到合适的解序列。因此,这些算法需要在规划过程中适当地引入人工指导。

1.2.3 装配序列评价

综上所述,无论是人工输入法、割集分解法还是利用通用算法的装配序列规划算法,装配规划系统在给出最终结果之前,都要得到很多不同的装配序列(中间结果)。如何在这些序列中选择一个符合装配工艺以及其他各种约束条件的合理方案,关键在于能够对装配序列的品质进行评判,从而给装配序列的取舍以及优化提供参考意见^[70]。

本书将装配序列的评价分为两大类,即可行性评价(Feasibility Evaluation)和优化评价(Optimization Evaluation)。其中可行性评价又称为可行性要求(Feasibility Requirement),是装配序列必须满足的一类要求,如果违反了这类约束,产品将无法实现其安装过程。子装配的可行性包括几何可行性、机械可行性和技术可行性。几何可行性(Geometrical Feasibility)要求每个零件在装配过程中都存在无干涉的插入空间(路径),这也是在可行性要求中被关注最多的一种可行性要求;机械可行性(Mechanical Feasibility)是指能否建立起零部件之间的装配关系,如装配工具、机械手等能否进入到装配位置,是否具有足够的操作空间等;技术可行性(Technical Feasibility)是指由于非几何因素造成的可行性约

束,例如贵重、易碎的零件应尽量规划在最后安装等。与前两类要求不同,这一类可行性要求不必一定给予满足。

优化评价又称为优化性要求,主要是针对装配序列实现的成本、效率进行优化,典型的优化目标是减少装配过程的耗时^[71]。一般优化性要求包括以下内容^[72]:

①最小装配时间:即按照装配序列完成产品安装所需的时间最少,这是对装配效率的优化要求,由于涉及的因素很多,一般被分解为其他和时间相关的约束。

②最少工具更换次数:对于自动生产线,柔性装配中心、机器人更换装配工具、夹具都需要消耗一定的时间,所以减少工具的更换次数,意味着提高产品的装配效率。

③最少重定位次数:产品的重定位往往比更换工具更为耗时,所以减少重定位也是研究中经常考虑的装配优化约束。

④并行操作数量最大化:增加并行的装配操作也是提高装配效率的一条重要途径。

⑤装配插入操作最容易:文献中一般使用零件可插入方向(沿坐标轴)的多少或者可插入角度空间的大小来判断这种难易程度。

在进行装配规划时,不同的产品特点、企业设备等实际情况对装配可行性要求与优化要求也不同,例如在导弹等舱体式装配中,利用沿坐标轴的可行插入方向判断装配过程,可能任何装配序列都是无效的,因为舱内零件的安装往往不是直线插入,而是需要经过一定的路径(曲线)才能进入舱体。这样往往会把有可行路径的装配设计(或者装配序列)评价为错误的设计(或者无效的装配序列)。零件安装路径规划是装配规划的另一个主要研究内容。一方面,零件安装路径规划是实现零件运动规划、装配机器人动作规划的一个重要途径^[73-75];另一方面,它可以进一步地判断装配序列的可行性。

1.2.4 装配路径规划

路径规划是运动规划的主要研究内容之一。从功能上讲,路径规划是为了避障及满足作业需要而进行的以安全性为主要指标的路径设置。

路径规划的主要研究内容按环境状态可分为静态结构化环境下的路径规划、动态已知环境下的路径规划和动态不确定环境下的路径规划;按获得环境信息的方式可分为基于模型的路径规划和基于传感器的路径规划^[76,77]。路径规划也是一个导航问题,可分为3个层次,即环境的映像及建模、路径选择、路径跟踪及避碰。路径规划在机器人学中研究较多,装配路径规划因装配工作的特点,与机器人路径规划既有联系又有区别,有其特殊性和复杂性,二者的不同表现在于:由于组成产品的零件间空间接触关系的紧凑性和精确性,对空间路径规划的精确性要求也较高;由于零件及接触关系的多样性,对空间路径规划的效率要求也较高;由于产品的确定性,多为静态结构化环境下的路径规划^[78]。

路径规划一般要考虑运动学约束,包括路径约束和障碍约束两部分。路径约束来源于某种作业操作的要求,如焊接作业要求沿直线或曲线运动等。障碍约束是在运动空间