

CAPP系统 设计理论及应用

王世杰 周 健 著



NEUPRESS

东北大学出版社

CAPP 系统设计理论及应用

王世杰 周健 著



东北大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

CAPP 系统设计理论及应用/王世杰,周健著. —沈阳:东北大学出版社,1999.2

ISBN 7-81054-382-2

I. C… II. ①王… ②周… III. 机械设计;计算机辅助设计 IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 03793 号

内 容 简 介

本书系统地介绍了基于知识的 CAPP 系统设计理论、实现方法及其应用。全书共分九章,包括 CAPP 系统设计理论与技术的发展概述、基于知识的 CAPP 基础理论、工艺决策的本质特征、CAPP 系统设计中的数据处理技术、基于知识的工艺决策模型的研究、机床选择方法研究、加工过程参数集总优化选择模型研究、CAPP 系统的组织与控制模型的研究等内容。

本书可供从事机械设计、制造、管理、计算机应用的广大科技工作者,高等院校机械设计及制造、自动化专业、管理工程和工业工程专业的广大师生参考,也可作为同类专业研究生和高年级本、专科生的选修课教材。

©东北大学出版社出版

(沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号 邮政编码 110006)

沈阳市新城子印刷厂印刷

东北大学出版社发行

开本:850×1168 1/32 毫米 字数:160 千字

印张:6

印数:1—1000 册

1999 年 2 月第 1 版

1999 年 2 月第 1 次印刷

责任编辑:刘 莹

责任校对:冯 伟

封面设计:唐敏智

责任出版:秦 力

定价:12.00 元

前 言

计算机辅助过程设计(Computer Aided Process Planning, CAPP)是现代设计方法的重要内容之一。它是
以人工智能的研究成果为基础,以计算机为工具,以机械
制造业为应用对象,涉及数学、机械、管理、计算机等科学
技术的一门新兴子学科。它在充分考虑影响机械制造业
的各种因素的前提下,进行快速寻优决策,以确定制造过
程中所需的各个参量。将此项技术应用到机械设计中,可
以大大缩短产品的设计周期,提高产品质量,降低生产成
本,最终达到提高企业在市场中竞争力的目的。因此,
CAPP 是一种具有重要经济意义和巨大应用潜力的先进
设计技术。

本书以作者八年来的研究成果为基础,同时也吸收
了国内外同行近期在该领域内的研究成果,系统地论述
了基于知识的 CAPP 系统设计理论和应用,从基础理论、
具体算法一直到应用实例,形成一条线,旨在帮助读者学
以致用,学会如何将基于知识的理论应用到智能化工艺
决策中。

作者希望本书的出版能在推动我国 CAPP 技术的应
用与发展方面起到一定的作用。

本书的内容得到了辽宁省自然科学基金的资助。本
书的出版还包含了刘国中、李康举、赵丽环、张剑、陈鉴、
李五常等同志的辛勤劳动,李康举同志除了参加程序的

全过程调试工作,还参加了部分章节的撰写和整理工作,赵丽环、李五常等同志为课题的研究工作提供了现场第一手资料,并始终为软件的现场实测调试者。另外。本书的成稿打印得到了陈锋、朴学哲、陈文廷先生的鼎力相助,在此一并致谢。

作者要特别感谢北京科技大学丁予展教授、陈先霖院士、涂序彦教授,清华大学韦文林教授,北京航空航天大学任仲贵教授,中国农机研究院邓达华研究员,中国科学院计算所林宗楷研究员,北京化工大学程源教授,沈阳重型机器厂吴新泉高级工程师等,感谢他们在本书的成稿过程中给予的热情帮助和提出的一些可贵的指导性意见。

作者由衷欢迎读者对本书提出批评和建议。

编 者

1998年7月

目 录

1 CAPP 系统设计理论与技术发展概述	1
1.1 CAPP 产生的背景与发展的历史回顾	1
1.2 CAPP 产生的必然性及意义	5
1.3 国内外 CAPP 系统设计理论与技术的研究概况评述	7
1.4 CAPP 系统设计基础理论的发展概况	15
2 基于知识的 CAPP 基础理论方法研究	22
2.1 引言	22
2.2 CAPP 系统中知识集总表示模型的确定	22
2.3 CAPP 系统中的基本推理技术与冲突消解策略	30
2.4 CAPP 系统中知识获取的一般方法及其等价互换模型	36
3 工艺决策知识的本质特征	44
3.1 工艺决策知识的组成与分类	44
3.2 树状结构的工艺知识表示模型及其拓广	47
3.3 工艺决策知识的层次规划	50
3.4 对工艺决策知识不确定性与不完全性的认识	55
3.5 在 CAPP 系统设计中不确定与不完全性知识的运用	58
4 CAPP 系统中的数据处理技术	64
4.1 基本概念	64
4.2 算法的描述与设计准则	67
4.3 多条件并行控制数据交换模型	69
4.4 二维数据表的最优存储模式与维护管理	84

4.5	数据集群的分组构造及快速检索策略	89
5	基于知识的工艺过程决策模型研究	95
5.1	引言	95
5.2	回转体零件的工艺过程决策模型	97
5.3	基于产品特征的零件分类编码体系及其在非回转体零件 CAPP 中的应用	108
5.4	工艺过程决策中的数流控制模型	112
6	CAPP 系统中机床选择方法研究	116
6.1	引言	116
6.2	机床选择的影响因素分析	116
6.3	机床选择规则集的建立	121
6.4	机床优化选择模型的构造	129
6.5	机床选择模块的内外联信道	135
7	工时定额制定与加工过程参数集总优化选择模型	138
7.1	引言	138
7.2	切削工时的广义计算模型	139
7.3	加工过程参数优化选择模型	144
7.4	切削总量的分解与切削量的选择	149
8	CAPP 系统的组织与控制模型	155
8.1	引言	155
8.2	CAPP 系统的组织结构模型	156
8.3	CAPP 系统的运作控制模型	160
8.4	SZCAPP 系统的应用	167
9	全文总结	171
9.1	主要工作	171
9.2	对进一步工作的展望	173
9.3	所做工作的社会经济效益	174
	参考文献	176

1 CAPP 系统设计与技术发展概述

1.1 CAPP 产生的背景与发展的历史回顾

1.1.1 CAPP 产生的背景

制造是人类生息繁衍过程中的一种重要活动,它为人类生活提供各种必需品。它通过各种方法、手段和能量的作用,使物质的状态按照人们的意志发生变化。制造改变着人类的生存环境,制造改变着整个世界。

机械制造业是制造业中的一个主要范畴,它为其他制造业之基础,农业、石油、化工、矿山、电力、交通运输……无一能够离开机械制造业而得以发展。作为一个国家来说,机械制造业的状况是衡量国家生产力发展水平的重要标志,它在保证产品质量、缩短生产周期、降低生产成本和提高经济效益方面起着关键作用,所以,加速机械制造业的发展是摆在我们面前迫切而艰巨的任务。

在科技高速发展、市场竞争日趋激烈的今天,对机械制造业的发展提出了更高更新的要求,其中以生产的柔性 with 快速响应性为主要特征,这就使得机械制造业与“自动化”产生了密切的关联,两者交织在一起共同发展的结果加之近几十年来计算机技术的迅猛发展,很自然地导致了 CAD/CAM 技术的产生。

而作为连接 CAD/CAM 的桥梁,计算机辅助过程设计 CAPP (Computer Aided Process Planning)是其稍后不久便产生并得以迅速发展的。CAPP 是产品设计、生产管理、调度乃至定货、销售等各项制造活动的中枢纽带,是制造信息的集散地。该环节的反

信息是企业高效、高速发展的命脉。正是由于这个原因,美国计算机辅助制造组织 CAM-I(Computer Aided Manufacturing—International) 决定在数控研究之外的第一个开发项目就是计算机辅助工艺过程设计。事实上,在这项活动中一直扮演领导与组织角色的则是 CIRP 组织,即国际生产工程研究会(International Institute for Production Engineering Research)^[1,2]。

1.1.2 历史回顾

早在 1966 年 CIRP 在法国巴黎召开的学术年会上, R Weill 教授就倡导建立一个工作组,从事“依靠计算机进行加工条件优化”问题的研究,该工作组被看做是现今 CAPP 国际研究组织的鼻祖^[3],起初他们主要致力于各种生产条件的优化算法研究,建立各种加工参数优化数学模型,同时致力于在成组技术哲理引导下的“工艺设计计算机化”工作,并认为成组技术的应用思想不仅局限于几何意义上,而且还应扩展到设计、生产管理与调度等领域。这一个时期最具有典型意义的研究成果就是 CAM-I 于 1976 年推出的 CAM-I's Automated Process Planning 系统^[4,5]。该系统所依赖的基本原理就是所谓的变异法(Variant Approach),它标志着计算机辅助工艺设计系统的诞生,它的内在机制就是基本的信息查询方法。

到了 1985 年,“计算机化工艺过程设计”已成为工作组的核心研究课题,这时,在 I Ham 教授的提议下,在次年于以色列召开的 CIRP 学术年会上,正式确认了 CAPP 这一标准术语及其内含与外延。在这之前的 1985 年 1 月,曾在巴黎举办了一次 CAPP 专题研讨会,当时有来自 8 个国家的 15 名代表参加,1987 年在美国 Pennsylvania 大学召开的 CIRP 关于生产系统的学术研讨会上,大部分研究内容都是有关 CAPP 的^[6]。1988 年于日本东京召开的 CIRP 学术年会上,重点强调了人工智能技术在 CAPP 开发中的应用^[7],在 1989 年德国的 Hannover 举办了 CAPP 讲习班,

其间大约有 50 名参加者递交了 12 篇论文^[8]。1990 年在荷兰 Twente 召开的 CIRP 学术研讨会也主要探讨 CAPP 问题, 会上有 106 名参加者呈交了 34 篇论文, 并有 7 位企业界代表出席会议^[9]。之后, R Weill 和 G Halevi 组织了一次对 CAPP 研究目标的调查, 并于 1992 年在丹麦 Copenhagen(哥本哈根)举行的 CIRP 关于生产系统的专题研讨会上公布了调查结果^[10], 其中最引人注目的一个结论就是“CAPP 的开发研究不能脱离生产管理而独立运行”, 在这次会议上, 许多论文探讨了关于并行工程(Concurrent Engineering)环境下 CAPP 与其他计算机辅助系统的集成问题, 且此次会议上, H Elmaraghy 和 W Elmaraghy 两位教授特别强调了要在 CAPP 与生产管理之间建立密切联系^[11]。I Ham 教授在 1993 年提交的另一份调查报告中明确指出, 要把扩大 CAPP 的应用范围, 加强其与产品设计、生产控制等活动的集成作为重要任务去完成^[12]。

从上面统计分析中可以清楚地看到, CAPP 从诞生发展至今, 经历了由小到大、日臻完善的过程, 并且也是今天科技工作者的研究热点。人们现在已开始站在不同角度、以不同理论方法、深入到不同学科去开展对 CAPP 的研究, 研究 CAPP 的算法、CAPP 的建模、CAPP 系统的开发工具, 将逐渐形成一套完整的理论体系和技术方法。

1.1.3 我国开展 CAPP 研究的进程综述

我国 CAPP 系统的开发研究应该说是随着成组技术(Group Technology)的研究和推广而发展起来的。这项工作始于 60 年代, 但由于历史原因, 该项工作被迫中断了 10 年。从 1979 年开始, GT 的研究工作才被重新重视起来, 同时, 我国少数高等院校开始 CAPP 系统的研究准备工作, 积累翻译国外资料。南京航空航天大学、西安交通大学、东南大学等院校聘请国外知名学者来华讲学中, 系统介绍了 CAPP 的原理及系统开发方法, 从而揭开了我

国 CAPP 系统研究开发的序幕。从 1982 年上海同济大学公布了 TOJICAPP 系统至 1986 年在青岛召开的第三届 GT 学术年会,可以称做是我国 CAPP 发展的初级阶段,这段时间内,CAPP 的研究尚处于学习和探索阶段,开发出的系统在水平和应用范围上都有很大的局限性;从 1985 年至 1990 年,可谓我国 CAPP 的发展阶段,我国自动化领域 863 专家委员会明确地将 CAPP 系统的开发列为重点研究课题之一^[13],有些 CAPP 系统的开发理论与技术的研究工作还得到国家自然科学基金的支持^[14~17];1990 年 5 月在武汉召开的第四届 GT 学术年会和 1992 年 12 月在深圳召开的全国第二届 CIMS 学术会议上发表的许多文章,全面反映了 5 年来我国 CAPP 系统开发理论与技术的研究成果,在这一时期出现的基于 GT 的派生式 CAPP 系统和基于 ES 的创成式 CAPP 系统,都真正贯彻了“顶天立地,沿途下蛋”的总的指导思想,即在高水平设计理论指导下,立足于生产实际的需求,边开发边应用,在此期间,我国还成功地举办了一些相关领域著名的国际会议,如第九届国际计算机辅助生产工程学术会议(The 9th International CAPE Conference, NANJING, 1993)^[18],这标志着我国 CAPP 的发展水平正逐渐与国际水平接轨,我国 CAPP 的研究进入了成熟期与攻坚阶段,我们已经比较清楚地意识到 CAPP 研究中存在的关键问题,在 CIMS 主题项目的引导推动下,将精力集中于这些关键技术的研究,如 CAPP 系统知识体系的构造问题,CAD/CAPP/CAM 集成系统的产品数据模型和数据交换规范问题以及如何引进大系统优化思想和人工智能理论开发新一代 CAPP 系统等问题,这些都在近几年的学术会议和各类专业杂志刊登的文章中得以全面反映。

1.2 CAPP 产生的必然性及意义^[19]

1.2.1 手工方式设计的弊端

由于机械制造业在产品品种的多样性、制造过程的离散性、生产环境的复杂性、系统状态的模糊性和大量事件的随机性等方面显得特别突出,因此导致工艺设计非常复杂。一件好的工艺设计必须以设计人员长期积累的丰富生产实践经验为基础,创造性地运用知识与推理决策才能完成。长期以来,工艺设计以手工方式进行,随着科学技术的进步和市场竞争的加剧,对产品更新换代的周期要求越来越短,从而要求制造系统具有良好的适应性——柔性与快速响应性,手工方式设计逐渐暴露出一些弊端:

① 手工方式设计效率低。

② 手工方式设计不可避免的随意性与现代生产严格科学性要求相去甚远。同一零件不同工艺人员编制工艺,其方案可能不同;同一工艺人员在不同时期为相同零件编制工艺,其结果也可能有差别,这就难以保证工艺方案优化,以致给生产过程增加不必要的复杂性。

③ 工艺设计过程应是统筹产品的技术要求、企业经济效益和社会效益的整体优化过程,它涉及面广、处理信息量大、数据计算复杂,还有大量文字表格等方面的工作,因而一般只有在大批量生产的情况下才能详细设计工艺。对于占机械制造业 70% 以上的多品种、小批量生产的企业,由于设计效率低,不得不采取简化、粗略的方式,这就必然削弱工艺规程对生产过程的指导作用,从而影响制造过程的合理性、工艺参数的科学性、工艺定额的正确性等,进而影响企业的技术经济效益。

④ 一名合格的工艺设计人员应具有广博的知识和丰富的生产实践经验,才能设计出比较合理的工艺过程指导文件,并正确

处理工艺过程执行中出现的各种实际问题,而造就这样的工艺设计人员需要几十年的理论与技术实践,但受自然规律的支配,这些成熟的工艺人员不久就要退出工作岗位,知识和经验将随之带走,年轻的工艺人员又要从头摸索,积累知识与经验,这就迫使人们寻求新的方式设计工艺,以加速工艺设计经验的积累、继承与发展。

⑤ 工艺设计工作中包含大量重复和繁琐的资料检索与文字性工作。手工设计工艺会束缚大量的工艺人员,妨碍他们从事开拓性、创造性的工艺技术工作。

1.2.2 作用和意义

由于以上原因,加之计算机技术的支持,使得 CAPP 技术的产生成为必然。这门技术也将成为工艺设计的重要方向,它除了可以解决上述问题外,对机械制造业来说,还有更深一层的作用和意义:

① CAPP 是连接 CAD 与 CAM 的桥梁,是实现 CIMS 的关键。随着计算机技术在机械制造业中的应用,CAD 和 CAM 技术的成熟与发展对机械制造业的产品设计和产品生产产生了巨大的推动作用,若工艺设计仍维持手工方式进行,那么 CAD 和 CAM 将成为“独立岛”,发展受阻,效益发挥受限。机械制造过程是一种系统工程,作为离散型的机械制造业的发展方向,就是要在产品设计、工艺设计和产品制造过程中全面应用计算机辅助技术,使之成为一体化制造系统(CIMS——Computer Integrated Manufacturing System),CAPP 是从 CAD 到 CAM 之间不可逾越的阶段,它包含生产技术准备等一整套工作的计算机辅助,涉及大量的信息处理与决策,是 CIMS 工程中一个十分关键的环节。

② CAPP 是实现企业科学化管理的重要手段。计算机快速而准确的计算和严格的逻辑判断功能,对于企业中生产信息的加工和管理、生产过程方案的选择与优化、合理的参数制定、合理的定

额确定等均具有积极意义,进而对工艺质量与效率的提高,工艺管理的改革,工艺设计经验的积累、继承与发展具有巨大推动作用。

③ CAPP 对于推动工艺设计方法学的发展意义重大。工艺设计方法学是研究工艺设计的规律和方法的一门学科,它研究工艺设计人员如何统筹产品的技术特征、企业的经济特征和社会的某些特定需求,从一定的科学技术现状和企业具体生产条件出发,设计出合理的工艺。虽然在工艺路线的拟定、工艺方案的优化、工艺方法的选择、工艺装备的选择、加工参数的制定与工艺定额的制定等方面取得了一定的进展,但从方法学角度看,许多现代科学理论的研究成果,诸如数学规划、运筹学、系统论、知识工程、人工智能等由于在工艺手工设计过程中难以得到应用,影响了工艺设计方法学理论的建立与发展,故而将计算机技术应用于工艺学领域将是工艺学理论发展的一个重要里程碑。

1.3 国内外 CAPP 系统设计理论与技术的研究概况评述

1.3.1 目前 CAPP 系统设计与应用中存在的问题

1990 年以前,CAPP 的研究工作仅仅局限于工艺设计自身领域,属于地地道道的“独立岛”。尽管开发出来的各种 CAPP 系统确实带来了一定的经济效益,但是被工业企业完全接受的过程仍是十分艰苦漫长的,目前仍有 85% 的工艺设计工作由手工进行,其根本原因可以通过下面的分析来说明^[3]:

① 系统运行时人机交互过程繁冗,时间长,准备工作量大,久而久之,工艺设计人员会对此产生厌倦感,特别是有经验的老工程技术人员。

② 大多数 CAPP 系统属于“黑箱子”(Black Box)型,其内部

的启发式推理规则或算法对用户来说是不可知的,也是不可变的。这样的系统产生的结论难以令用户信服;另外,这样的系统也很难适应不断变化着的生产环境,而用户则更喜欢具有高度的柔性,适合各种产品和各种生产环境要求的 CAPP 系统。

③ 大多数 CAPP 系统都注重于对先前手工编制工艺过程的模仿和自动化,强调综合作用而轻视分析过程。

④ 先前的 CAPP 系统应用局限在一定范围内给出局域解,与生产过程中的其他活动脱离,它们对诸如工序安排、生产调度、工作载荷分配、机床、工装选择、材料选择、质量控制、销售等问题不提供界面。

⑤ 一个好的 CAPP 系统应具有大众化的知识获取手段,为用户提供先进的工具,使其对知识库和数据库中的内容能够按自己的意图方便地进行增删、修改、查询等操作。

⑥ 缺乏系统优化机制, CAPP 系统没有能够从根本上起到它应起的作用。

⑦ CAPP 与 CAD, CAM, CAQ(计算机辅助质量管理), MIS 等系统之间没有流畅的信息通道,没有系统的全面的信息代码,没有先进的模式识别办法,这对生产系统的有效集成产生了极大障碍。

鉴于以上存在的问题,国内外专家学者都在致力于探索新的更有效的途径加以解决。根据国际生产工程学会 CAPP 专题研究会资料和国内外近十年来各专业学术会议与专业学术刊物上发表的文章,可以归纳成几个方面来综合论述 CAPP 研究的状况及未来研究方向。

1.3.2 CAD 与 CAPP 的集成

CAD 与 CAPP 的集成是指两者之间的信息共享。对共享的含义有两种解释:一是指 CAD 所生成的信息能够自动传递给 CAPP,为 CAPP 系统所识别,并足以支持 CAPP 系统完成其整

个运作过程,以实现其各个功能指标;另一种释义是指 CAD 与 CAPP 两者能同时从一个公共信息源中获得足够的有效信息。实现共享的关键要素是 CAD 建模技术、数据处理技术、模式识别技术、信息传递技术等。CAD 与 CAPP 的集成可以从根本上解决 1.3.1 节中的问题①,但是这一目标的实现非指日可待,需要经过有关专家学者长时间的艰苦努力。

美国宾州法尼亚大学 Ham 教授提出的研究目标是在半创成(Semi-generative)和创成式(generative)CAPP 系统中有效地运用成组技术;在概念设计阶段采用功能设计/结构设计/物理设计的模式;采用先进的人工智能技术,如机器学习、人工神经网络、几何推理等技术;提供一个集成的 CAD 环境,可以识别出零件的几何形状、技术特征和其他产品信息,以满足与 CAPP 集成的需要^{[20][21]}。

宾州大学现阶段正在研究的两项有关课题是:

① 提供与 CAPP 集成的 CAD 环境。为保证与 CAPP 集成, CAD 提供零件的几何形状、技术特征与其他产品信息,这些特征在零件的设计阶段就提供,现在和将来的开发工作都是基于这些特征进行的,根据这些特征,可以动态地生成零件加工的工艺规程。

② 研究 CAPP 规范化模型,目的是使创成式 CAPP 系统能针对不同的工业企业环境达到规范化。要建立这样一个通用的外壳,其首要任务是具有 CAPP 的规范化模型,目前成组技术与 CAPP 集成的规范化模型已研制成功,这将成为今后研究 CAPP 外壳的基础。

宾州大学未来的研究方向是继续从事 GT 与 CAPP 外壳的开发研究工作,并将其作为 CAPP 的规范化模型,同时研究基于概念设计的多层次逻辑结构,在今后的研究工作中还将引入再学习的概念,开发创成式 CAPP 系统。

比利时的 Brussel 教授领导的研究小组研制了一个 CAD 程

序包,在零件的设计阶段,将工艺决策信息包含在几何数据内,在补充必要的数据库后,CAD/CAPP系统就能够用计算机自动生成零件的工艺规程,对基础的轴类零件和箱体类零件来说,这项工作已取得初步成果。

加拿大的 McMaster 大学 FMS 中心的研究目标是提供有效的 CAD 环境,在完成设计目标的同时,获取有关的工艺设计知识与数据,在此基础上开发创成式 CAPP 系统;同时研究通用的专业领域知识表达方法,将 CAPP 与产品设计、车间调度计划集成起来,他们针对此目标已完成的工作有:

① 开发基于特征的智能化产品设计与制造系统,该系统可以获取功能参数、几何参数、拓扑关系以及 CAPP 系统运作时所必需的工艺数据。

② 研制出创成式的装配工艺设计系统。可以生成优化的装配方案,且避免了搜索图表时的组合爆炸现象,采用分解处理的方法设计装配工艺。

③ 开发出半创成式工艺设计系统环境,能用可变的选择方法,生成具有柔性的工艺方案。

④ 同德国斯图加特大学合作的将 CAPP 与生产调度计划集成在一起的研究项目也取得进展,可以提供更为灵活的 CAPP 系统。

上述所有模块均能与 IPDM 系统集成,并可以连接不同部分供用户使用,IPDM 系统的发展方向是能在 IPDM 生成的产品描述文件和各种工艺设计模块间自动传递信息,同时继续研究通用的工艺设计方法,并将其扩大,应用到其他领域。

对于集成这个问题,我国也有大批专家学者投入了很大精力进行研究^[22~33],他们的工作集中在以下几个方面:

① 从 CAD 的建模与识别入手去研究 CAD 与 CAPP 的集成。原来的 CAD 绘图方式是平面二维线框造型法,这种造型法只反映了零件的几何特征,虽然用 IGES 数据交换标准可将其中的