

Intelligent CAPP System for System Integration

# 面向系统集成的 智能CAPP系统

● 王忠宾 著

08

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

# 面向系统集成的智能 CAPP 系统

王忠宾 著

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

系统集成是现代集成制造的核心,本书对现代集成制造系统中的系统集成以及系统集成的内涵、本质和体系结构进行了分析;在系统集成理论的指导下,提出了面向系统集成的智能 CAPP 系统的体系结构,阐述了基于多代理系统的智能 CAPP 系统的功能,并对其工作机理和冲突消解机制进行了研究;详细介绍了神经网络、遗传算法在智能 CAPP 系统工艺路线优化决策中的应用。

本书可作为高等学校机械工程及其自动化、控制理论及控制工程、智能信息处理等相关专业的高年级本科生和研究生的教材,也可供机械工程、人工智能、自动控制等领域的相关研究人员和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

面向系统集成的智能 CAPP 系统/王忠宾著. —徐州:中国矿业大学出版社,2009. 10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0478 - 3

I. 面… II. 王… III. 机械制造工艺—计算机辅助设计  
IV. TH162

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 180166 号

书 名 面向系统集成的智能 CAPP 系统

著 者 王忠宾

责任编辑 杨传良

责任校对 何晓惠 孙 景

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

营销热线 (0516) 83885307 83884995

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

经 销 新华书店

开 本 850×1168 1/32 印张 6.875 字数 179 千字

版次印次 2009 年 10 月第 1 版 2009 年 10 月第 1 次印刷

定 价 18.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

## 前 言

工艺过程设计是产品设计和产品制造的桥梁,它不仅是制造企业生产技术准备工作的依据,而且是企业实施系统集成不可缺少的关键技术。CAPP 技术从 20 世纪 60 年代诞生以来,其研究与开发工作一直受到人们的重视。目前,CAPP 系统已经经历了检索变异式、创成式的发展阶段,并产生了许多系统。检索变异式 CAPP 系统在生成工艺计划的过程中没有考虑生产条件、生产批量等因素的动态变化,难以生成满足车间条件的工艺计划。创成式 CAPP 系统能够根据领域知识和推理规则确定加工方法,选择加工机床、刀具、夹具以及工艺路线。但由于工艺过程设计问题的复杂性,目前企业实际应用中还没有工艺决策完全自动化的 CAPP 系统。此外,CAPP 系统必须结合企业的实际情况,而每个企业的具体情况是不相同的,同时每个企业的生产资源、生产环境和产品结构也是动态变化的,这就造成了 CAPP 系统的通用性和重用性水平较低。

随着现代集成制造(CIM)、并行工程(CE)、敏捷制造(AM)等先进制造模式的发展,企业对 CAPP 系统的需求愈益迫切,要求也越来越高。CAPP 的智能化、集成化、柔性化和并行化是先进制造模式下的需求,也是 CAPP 现在和将来的研究热点。为了满足先进制造模式的需求和发展,必须在系统集成理论指导下实现 CAD/CAPP/CAM/PPC/ERP 等系统的信息集成、功能集成和过程集成,以提高 CAPP 系统的动态适应性,产生满足车间生产条件的工艺计划。另外,为了使 CAPP 系统具有良好的通用性,必须采用计算机和人工智能等技术提高其柔性和可扩展性。

本书在对系统集成理论研究的基础上,对面向系统集成的 CAPP 系统应具有的功能进行了总结,分析了存在的问题及 CAPP 系统未来的发展方向,提出了一种基于多代理的、面向系统集成的智能 CAPP 系统体系结构,并对智能 CAPP 系统中各 Agent 的结构、功能以及相互之间的通讯机制进行了研究;对多代理系统的协调机制、冲突消解策略进行了研究,分析了基于多代理的智能 CAPP 系统在生成工艺计划过程中产生的冲突,提出了智能 CAPP 系统基于知识的冲突消解策略以及冲突消解模型;通过对 CAPP/PPC 集成原理的分析,提出了一种 CAPP/PPC 的并行集成模型,深入研究了智能 CAPP 系统各代理基于车间状态生成动态工艺计划的过程,并通过 BP 神经网络、遗传算法等加以实现,利用实例对智能 CAPP 系统的动态工艺生成过程进行了详细说明;介绍了产品可制造性评价的研究现状,研究了面向并行工程的 CAD/CAPP 的集成机理以及集成方法,提出了基于特征的 CAD/CAPP 的并行集成模型,对基于特征的分层递阶式可制造性评价过程以及基于模糊集理论的产品可制造性综合评价方法进行了研究。

在本书的形成和完善过程中,作者在清华大学博士后期间的合作导师陈禹六教授以及系统集成研究所的李清副教授在系统集成理论方面提供了指导。另外,参考和引用了国内外有关学者的论著。在此,对他们表示衷心感谢!在本书的写作和出版过程中,得到了中国矿业大学出版社的大力支持。同时,感谢妻子和家人对我的关心和支持。

由于作者水平有限,书中难免存在错误、遗漏和不妥之处,殷切希望各位同行、专家和读者批评指正。

作 者

2009 年 6 月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 CAPP 系统的国内外研究现状 .....	1
1.2 典型的 CAPP 系统工艺决策方法 .....	4
1.3 典型的 CAPP 系统体系结构 .....	10
1.4 CAPP 系统的发展方向 .....	21
<b>第 2 章 系统集成</b> .....	25
2.1 制造业面临的挑战 .....	25
2.2 从计算机集成制造系统到现代集成制造系统 .....	27
2.3 系统集成的内涵 .....	33
2.4 系统集成概念的发展 .....	34
2.5 系统集成的层次 .....	36
2.6 系统集成的体系结构 .....	38
2.7 过程视图和功能视图 .....	50
2.8 面向系统集成的 CAPP 系统 .....	55
<b>第 3 章 面向系统集成的智能 CAPP 系统的结构</b> .....	61
3.1 人工智能技术在 CAPP 系统中的应用 .....	61
3.2 面向对象技术在 CAPP 系统中的应用 .....	65
3.3 Multi-Agent 系统及其组织结构 .....	73
3.4 面向对象方法和面向 Agent 方法之间的关系 .....	76
3.5 基于面向对象的 CAPP 系统分析和设计 .....	78
3.6 基于 UML 的智能 CAPP 系统分析和设计 .....	83

3.7	智能 CAPP 系统的代理划分 .....	89
3.8	基于 Multi-Agent 的智能 CAPP 系统的特点 .....	91
3.9	智能 CAPP 系统的结构 .....	93
<b>第 4 章</b>	<b>智能 CAPP 系统的冲突协调机制 .....</b>	<b>108</b>
4.1	Multi-Agent 系统的协调机制 .....	108
4.2	Multi-Agent 系统的协商冲突消解策略 .....	112
4.3	智能 CAPP 系统工艺决策过程中产生的冲突 .....	114
4.4	运行时冲突消解与系统设计时冲突消解 .....	115
4.5	智能 CAPP 系统基于知识的冲突消解策略 .....	116
<b>第 5 章</b>	<b>智能 CAPP 系统与生产计划和控制系统的 并行集成 .....</b>	<b>129</b>
5.1	CAPP 系统和 PPC 系统的集成 .....	129
5.2	智能 CAPP 系统和 PPC 并行集成 .....	133
5.3	智能 CAPP 系统中工艺计划的定义 .....	140
5.4	工艺计划信息分类 .....	142
5.5	静态工艺计划信息的产生 .....	142
5.6	基于 BP 网络的动态工艺计划信息的产生 .....	147
5.7	基于遗传算法的加工方法排序 .....	161
<b>第 6 章</b>	<b>基于特征的产品可制造性评价 .....</b>	<b>171</b>
6.1	产品可制造性评价的研究现状 .....	172
6.2	面向并行工程的 CAD/CAPP 集成模型 .....	173
6.3	CAD/CAPP 集成的主要方法 .....	174
6.4	基于特征的 CAD/CAPP 集成 .....	176
6.5	产品可制造性评价 .....	188
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>203</b>

# 第1章 绪 论

## 1.1 CAPP 系统的国内外研究现状

计算机辅助工艺过程设计 (Computer Aided Process Planning, CAPP) 是生产技术准备工作的第一步,也是连接 CAD (Computer Aided Design) 与 CAM (Computer Aided Manufacturing) 的桥梁<sup>[1-2]</sup>,是制造企业实施现代集成制造系统 (Contemporary Integrated Manufacturing System, CIMS) 不可缺少的关键技术。CAPP 是其他生产准备工作的依据和原始资料,是产品制造的法规性文件。传统的手工编制工艺过程设计方法存在许多不足之处,主要表现在以下几个方面:

① 需要经验丰富的工艺设计人员。工艺过程的好坏完全取决于工艺设计人员的经验,根据车间生产状况制订合理的工艺计划需要经验丰富的工艺设计人员,而一个合格的工艺设计人员至少需要 10 年以上的现场工作经验。

② 工艺计划的一致性差。由于工艺过程的设计严重依赖于工艺设计人员的经验,对于同一个零件,不同的工艺设计人员可能会给出不同的工艺路线,不便于生产管理。

③ 大量的重复劳动。在没有实施 CAPP 的企业,对于不同批次的相似零件,甚至相同零件,需要重新制订工艺计划,造成大量的重复劳动。

为了实现工艺过程设计的标准化和自动化,使工艺设计人员从繁琐的重复工作中解放出来,集中精力提高工艺水平和产品质量,国内外学者对 CAPP 技术进行了大量研究。CAPP 技术从 20 世纪



60 年代末诞生以来,其研究与开发工作一直受到人们重视,并得到快速发展。目前 CAPP 的发展已经经历了检索变异式、创成式的发展阶段,并产生了许多系统,例如国外一些比较著名的 CAPP 系统:美国计算机辅助制造国际组织(Computer Aided Manufacturing-International, CAM-I)推出的 CAM-IS、美国普度大学的 APPAS 和 TIPPS、柏林工业大学的 CAPSYD、英国曼彻斯特大学的 AUTOCAP 等<sup>[3-4]</sup>。从 20 世纪 80 年代初期,我国也开始研究和开发 CAPP 系统,例如上海交通大学的 SIP、北京航空航天大学 BHCAPP 等。目前在国内得到一定程度应用的 CAPP 系统包括华中科技大学的开目 CAPP、浙江大学的 GS-CAPP、清华大学的 TH-CAPP 等。经过近 50 年的发展,CAPP 在生产原理、系统结构、决策方法等方面,已经取得了很大的进展。近几年,国内外对 CAPP 系统的研究主要集中在工艺决策的自动化,包括自动工艺决策的建模分析、工序及工步排序研究等方面<sup>[5]</sup>。但是,由于 CAPP 系统涉及问题的复杂性和对应用环境的依赖性,以及对决策自动化的目标定得过高,使得所开发的 CAPP 系统的通用性和实用性很差,在 CAPP 应用领域形成了“高级的不实用,实用的不高级”的状况。迄今为止,国内外在 CAPP 技术研究和系统开发上投入了大量资金和力量,已开发出数量众多的 CAPP 系统。但所开发的 CAPP 系统大多数仍然停留在理论探索的原型系统阶段,能够实际应用的系统较少,能够全面支持集成的 CAPP 系统尚未出现,这与其在现代制造领域的重要作用很不相称<sup>[6]</sup>。下面从功能、开发方法和体系结构方面阐述 CAPP 系统的研究现状。

(1) 随着现代集成制造(CIM)、并行工程(Concurrent Engineering, CE)、敏捷制造(Agile Manufacturing, AM)等制造业自动化的发展,企业对 CAPP 系统的需求日益迫切,要求也越来越高,CAPP 的智能化、集成化、柔性化和并行化是现代制造模式下的需求,也是 CAPP 现在和将来的研究热点。目前,国内外在

这几方面的研究概况如下:

① 智能化。当前的研究主要集中在各种各样的 CAPP 专家系统上,包括推理机的构成和机理、知识库的构造、工序及工步的自动生成和排序等。专家系统在知识获取、推理方法、求解空间等方面还存在一些问题,目前正在广泛研究的神经网络、模糊理论和遗传算法等技术为 CAPP 系统的进一步智能化提供了理论基础<sup>[7~8]</sup>。

② 集成化。近几年 CAPP 系统集成的研究主要集中在 CAD/CAPP/CAM 的研究上。随着制造技术和自动化程度的不断提高,集成的内涵也随之发生变化。目前的研究包括 CAPP 与 CAD、CAM、产品数据管理(Product Data Management, PDM)、企业资源计划(Enterprise Resource Planning, ERP)、生产计划与控制(Product Plan and Control, PPC)等系统的集成,但真正实用的系统极少。

③ 柔性化。为了适应车间制造环境的变化,需研究和开发非线性工艺规划系统,生成多个工艺规程,从而给车间调度提供更大的柔性。目前,这方面的研究主要局限在原型系统开发和理论研究上。

④ 并行化。随着并行工程思想在企业中的应用,CAPP 的研究方向也发生了明显变化,由注重 CAPP 系统的智能化转向 CAPP 系统的并行化。例如,在产品的设计阶段,要求 CAPP 系统能够对产品的可制造性进行评价,实现设计过程和制造过程的并行;在产品制造阶段,要求 CAPP 系统能够根据车间状态,产生适应车间能力的优化工艺。并行化是 CAPP 系统在集成化基础上的进一步发展,充分体现了并行工程(CE)的思想。并行 CAPP 作为实现并行工程目标的重要支持工具,国内外对其研究还处于探索阶段,主要局限在原型系统开发和理论研究上<sup>[9~10]</sup>。

(2) 目前,CAPP 系统的通用性和重用性水平较低,是影响

CAPP 系统推广应用的主要因素<sup>[11~13]</sup>。为了解决这一问题,人们在 CAPP 系统的开发方法、体系结构等方面也做了大量研究。目前,国内外在 CAPP 系统开发方法、体系结构方面的研究概况如下:

① 多元化 CAPP 系统。从实际需要和系统易于实现出发,在该系统中采用检索变异式、创成式以及“基于实例”的混合设计策略。生产中的实际问题往往非常复杂,构造 CAPP 系统的每种方法各有其适用条件和优缺点,单一的方法不能满足千变万化的生产要求,所以多元化的设计思想有其合理之处;但是对混合设计策略的切换以及不同策略下知识库和数据库设计方法的研究距离实际应用还有很大差距<sup>[14]</sup>。

② CAPP 开发工具和平台。由于 CAPP 系统的特殊性,它必须结合企业的实际情况,而每个企业的具体情况是不相同的,同时每个企业的生产资源、生产环境和产品结构也是动态变化的。目前,开发出企业通用的 CAPP 系统是不可能的。这类系统的开发思想是根据工艺过程设计原理,抽取 CAPP 系统的实现机制,提取其共性,为用户提供一种 CAPP 系统设计开发环境及有关的功能构件,用户可以通过较为简单的二次开发,方便地生成具有针对性的 CAPP 系统。目前,CAPP 工具系统的功能构件还很有限,限制了系统的应用范围。开发基于一定软件开发规范(例如 COM/DCOM、CORBA)、针对性强的功能构件,并完善和扩充工艺知识库和工艺数据库,使之更具有实用性的开发平台特征,是此类系统的发展方向。

## 1.2 典型的 CAPP 系统工艺决策方法

### 1.2.1 检索变异式 CAPP 系统

检索变异式 CAPP 系统的工作基础是成组技术(Group Technology,GT)。GT 是一门生产技术科学,它利用零件的结构

以及工艺相似性,将多种零件分类成组,每个零件组的所有零件形成一个复合零件,该零件包含了同组内所有零件的形状特征和工艺属性,复合零件的工艺路线称为典型工艺路线。检索变异式CAPP系统的工作原理是在检索典型工艺路线的基础上,进行适当修改,使得产生的工艺路线满足新零件的需求。检索变异式CAPP系统的工作原理如图 1-1 所示。

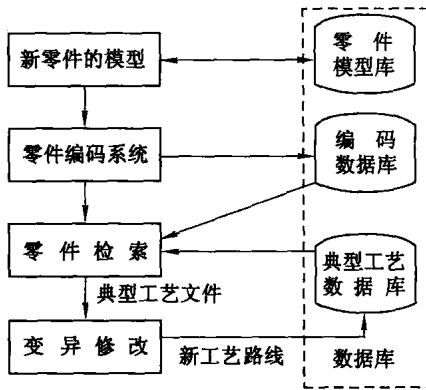


图 1-1 检索变异式 CAPP 系统工作原理图

检索变异式 CAPP 系统主要包括零件编码模块、零件检索模块和工艺编辑模块。各模块的功能如下：

(1) 零件编码模块

该模块主要完成零件的分类编码,基于成组技术利用编码系统对零件的属性进行描述和识别。零件分类编码系统可以采用不同的结构形式,包括整体式、分段式和子系统式,码位之间的结构可以采用树状结构、链式结构以及二者的混合结构。具体采用何种结构和何种编码系统,应根据企业的实际需求确定,最好选用现有的比较成熟的系统,比如德国的 Optitz 系统、荷兰的 Miclass 系统、瑞士的 Sulzer 系统、日本的 KK 系统以及我国的 JLBM-1 系统

等。但如果现有系统不能完全适合本企业产品零件的要求,可以对系统进行修改或补充。比如,在实施某企业的 CIMS 应用工程项目中,根据企业的需求采用了三段柔性结构的分类编码,并且采用顺序码作为二级代码,如图 1-2 所示。

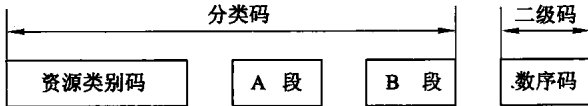


图 1-2 某企业分类码的结构

在定义零件编码结构的过程中,要注意以下几点:

① 唯一性。尽管编码对象有不同的名称、不同的描述,但必须保证一个编码对象仅被赋予一个代码,即一个代码只反映一个编码对象。

② 实用性。编码体系应当符合企业的特点(如企业规模、产品特点、生产类型等),既充分考虑企业今后发展对信息编码的需求,又兼顾企业现状。

③ 统一的编码结构。编码体系由一个标识码和若干个不同分类角度的分类码构成。统一的编码结构包含两方面含义:任何对象的标识码在其整个生命周期内保持不变;所有分类码具有相同的编码结构。

④ 可扩展性。编码系统应具有良好的开放性,以便根据企业的发展需求进行扩充。

⑤ 标准化。充分考虑企业与外部环境的接轨而尽可能与相关国家、行业标准相吻合。

⑥ 稳定性。编码时应充分考虑其变化的可能性,尽可能保持编码系统的相对稳定性。

⑦ 可识别性。代码应尽可能反映分类编码对象的特点,以便

于人们记忆、了解和使用。

### (2) 零件检索模块

当有新零件产生时,根据零件的几何形状以及工艺属性,利用零件编码模块对其编码,并通过编码数据库对新零件进行分组和检索,即可以得到新零件所属零件组的典型工艺路线。某企业的零件检索模块的运行如图 1-3 所示。

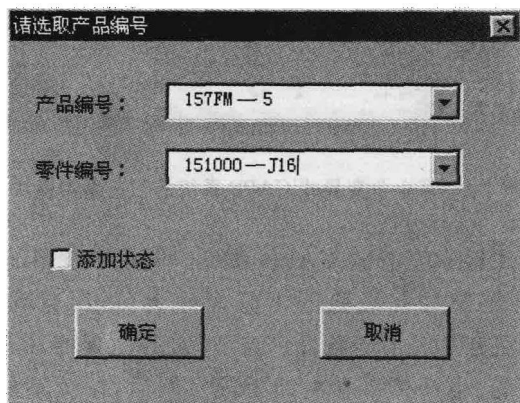


图 1-3 某企业的零件检索模块

### (3) 工艺编辑模块

被检索出的典型工艺路线有可能不满足新零件的加工要求,工艺设计人员可以通过人机交互方式,对典型工艺路线进行编辑和修改,使其满足新零件的加工要求,产生新的工艺路线,传输到车间并存储到典型工艺路线数据库。某企业检索变异式 CAPP 系统的工艺编辑模块如图 1-4 所示。

检索变异式 CAPP 系统不仅可以减轻工艺设计人员编制工艺路线的工作,而且相似零件的工艺过程可达到一定程度的一致性,便于制订生产计划。因此,目前国内外实际应用的工艺计划系



图 1-4 某企业变异式 CAPP 系统的工艺编辑模块

统大部分属于检索变异式 CAPP 系统。但检索变异式 CAPP 系统的使用仍需要具有经验的工艺设计人员,况且检索变异式 CAPP 系统没有考虑生产条件、生产批量等因素的动态变化。在生产批量改变、生产技术和生产手段发展后,系统不易修改。因此,检索变异式 CAPP 系统主要适用于零件种类、批量和生产技术相对稳定的制造企业。

### 1.2.2 创成式 CAPP 系统

创成式 CAPP 系统是一种自动产生零件工艺路线的决策方法,它能够自动地提取零件特征,并能够根据推理规则确定加工方法,选择加工机床、刀具、夹具以及工艺路线优化决策。创成式 CAPP 系统实际上是一种人工智能系统,但由于工艺过程设计问题的复杂性,目前在企业的实际应用中,还没有工艺决策完全自动化的 CAPP 系统,一些自动化程度较高的 CAPP 系统的某些工艺决策仍需一定程度的人工干预。创成式 CAPP 系统一直是研究的热点和难点,它的工作原理如图 1-5 所示。

创成式 CAPP 系统各模块的功能如下:

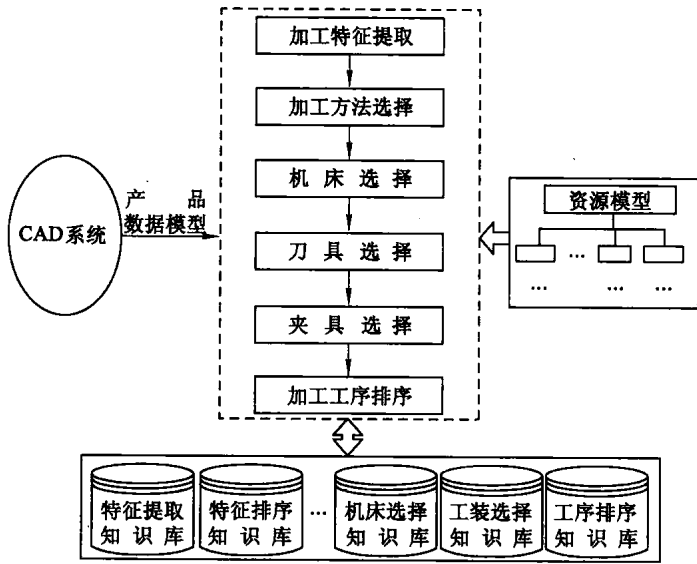


图 1-5 创成式 CAPP 系统的工作原理图

① 加工特征提取。将利用 CAD 建立的零件特征模型通过 CAD/CAPP 之间的接口或者第三方数据库输入到 CAPP 系统，实现零件特征的提取。

② 加工方法选择。通过加工方法选择知识库为对应的特征选择加工方法。

③ 机床选择。基于机床选择知识库，选择对应加工特征和加工方法的机床。

④ 刀具选择。基于工装选择知识库，选择对应加工特征、加工方法和加工机床的刀具。

⑤ 夹具选择。基于工装选择知识库，选择对应加工特征、加工方法和加工机床的夹具。

⑥ 加工工序排序。在特征排序约束、加工资源约束等条件



下,实现加工特征的排序。在加工成本最低、加工时间最短以及加工路径最短等优化目标函数下,实现加工工序以及工艺路线的排序决策。

在创成式 CAPP 系统中,工艺路线的自动决策是核心,各种工艺决策逻辑的模型化和算法化是创成式 CAPP 系统开发的核心工作。常用的决策方法包括决策表(Decision Table)和决策树(Decision Tree)<sup>[15~16]</sup>。决策表和决策树是描述在规定条件下条件与结果相关联的方法,即用来表示“IF... Then... Else...”的决策关系。决策表是表达各种事物间联系的一种表格。在决策表中用双线将表划分为 4 个区域。条件被放在表的上部,动作则被放在表的下部。左上区是条件说明,列出各种可能的条件;右上区为满足条件的各种组合,用 T 表示满足所在行的条件;左下区是决策说明,列出各种可能的决策行动;右下区为各列所对应的决策行动,用×表示所采取的决策动作。决策树由节点和分支构成,节点有根节点、中间节点和终节点之分。根节点表示决策行为的出发点,终节点列出应采取的行动。中间节点有一个前节点和一个以上的后节点,表示一次测试或判断,由中间节点处可引出新的分支。分支连接两个节点,分支上方给出向某一种状态转换的可能性或者条件(确定性条件)。若条件满足,则继续沿分支前进;若条件不满足,则回到出发节点并转向另一分支。决策表和决策树的人工智能表述方法在很多人工智能书籍上都可以看到,这里不再赘述。

### 1.3 典型的 CAPP 系统体系结构

CAPP 系统在产生工艺计划的过程中,严重依赖企业的产品结构、加工资源、加工技术,不同的制造企业需要不同的 CAPP 系统,导致 CAPP 系统的通用性和重用性水平较低。为了解决这一问题,国内外学者在 CAPP 系统的开发方法、体系结构等方面也