



中航工业首席专家
技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目
中航工业科技与信息化部组织编写

杜保瑞 编著

飞机结构件 智能编程与加工

SMART NC PROGRAMMING
AND MACHINING OF AIRCRAFT
STRUCTURAL PARTS

航空工业出版社

中航工业首席专家技术丛书

“十二五”国家重点图书规划项目

飞机结构件智能 编程与加工

杜宝瑞 编著

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书重点介绍了智能数控编程与加工方面的内容,全书共分7章,第1章从宏观上对智能编程与加工进行了简要描述;第2章详细阐述了飞机结构件数控加工工艺及规划技术,这一部分是进行结构件数控加工的工艺基础;第3、第4章分别介绍了智能编程的关键技术与智能编程系统,这一部分主要介绍了结构件智能编程的理论与技术基础以及相关系统;第5章介绍了虚拟加工仿真技术;第6、第7章重点介绍了飞机结构件智能制造的相关知识,其中第6章重点介绍了智能机床与智能加工;第7章主要介绍了智能生产线以及智能车间等相关内容。

本书主要读者对象是以从事飞机结构件数控加工的工程师为主体,也适用于高等院校的高年级本科生及研究生,以及掌握了一定的数控编程知识的读者。

图书在版编目(CIP)数据

飞机结构件智能编程与加工/杜宝瑞编著. --北京:
航空工业出版社,2017.12

(中航工业首席专家技术丛书)

ISBN 978-7-5165-1404-7

I. ①飞… II. ①杜… III. ①飞机构件—程序设计
IV. ①V222

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第295336号

飞机结构件智能编程与加工

Feiji Jiegoujian Zhineng Biancheng yu Jiagong

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话:010-84936597 010-84936343

北京世汉凌云印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2017年12月第1版

2017年12月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:20.25

字数:514千字

印数:1—2000

定价:120.00元

总 序

航空工业被誉为“现代工业之花”，是国家战略性高技术产业，同时也是技术密集、知识密集、人才密集的行业。中国是世界航空产业格局中的后来者，而中航工业作为支撑中国航空工业发展的核心力量，履行国家使命，必须大力推进自主创新，必须在科技创新和知识创新上有所作为。

从2009年开始，中航工业按照航空技术体系，在科研一线技术人才中陆续遴选出近百位集团公司级“首席技术专家”。此举既是集团公司对这些技术人才技术水平和能力的肯定，也意味着集团公司赋予了他们更大的责任和使命。我们希望这些技术专家在今后的工作中，要继续发挥科研技术带头人的作用，更加注重学习和创新，不断攀登航空科技新的高峰；要坚持潜心科研，踏实工作，不断推动航空科技进步；要带队伍、育人才，打造高水平的科研队伍，努力培养更多的高层次专业技术人才，为中航工业的发展做出更大的贡献。

21世纪企业的成功，越来越依赖于企业所拥有知识的质量，利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势和持续竞争优势，这对企业来说始终是一个挑战。正因如此，“知识管理”在航空工业等高科技产业领域得以快速推广和应用。依照这个思路，将首席技术专家们所积淀和升华出来的显性或隐性知识纳入知识管理体系，是进一步发挥其人才效益的重要方式，也是快速提升中航工业自主创新能力的重要途径。

知识管理理论的核心要义，就是把知识作为一种重要资产来进行管理，正如知识管理的创始人斯威比所说：“知识资本是企业的一种以相对无限的知识为基础的无形资产，是企业核心竞争能力的源泉。”如果专家们把其掌握的各类显性或隐性知识，用书面文字的形式呈现出来，就相当于构建了一个公共资料库，提供了一个交流平台，可以让更多的人从中受益——这就是出版这套“中航工业首席专家技术丛书”的初衷。

集团公司的这近百位“首席技术专家”，基本覆盖了航空工业的所有专业。每位专家撰写一部专著，集合起来，就相当于一个航空工业的“四库全书”，很有意义。在此，我要特别感谢这些专家们，他们在繁重的科研生产任务中，不辞辛劳地撰写出了自己的专著，无私地将自己的宝贵经验呈现给大家，担当起了传承技术、传承历史的责任。

相信这套丛书的出版，会使更多的航空科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力中航工业的自主创新，对我国航空工业的科技进步产生积极影响。

The image shows a handwritten signature in black ink, which reads '林右鸣' (Lin Youming). The characters are written in a fluid, cursive style.

中国航空工业集团公司董事长

前 言

智能制造为高端装备的快速研制提供了一条重要技术途径。智能制造是在数字化、信息化、网络化、自动化的基础上，融入人工智能技术，以赛博物理系统（CPS）为支撑，以人、机和资源的深度融合为核心，高度自动化和柔性化的制造模式。智能制造包括智能制造技术与智能制造系统。智能制造技术是以系统信息自主采集、分析与决策，制造装备精准执行，组织自学习和流程自优化为特征的智能加工与装配，以及面向智能加工与装配的设计、服务与管理等专门技术。

智能制造系统是指应用智能制造技术、达成全面或部分智能化的制造过程或组织，按其规模与功能可分为智能制造装备、智能生产线、智能车间、智能工厂（企业）、智能企业联盟等层级。

根据作者 20 余年在数控加工领域的研究来看，目前，飞机结构件数控加工相比于钣金、装配等专业而言，其数字化、网络化、自动化等技术应用水平程度较高，在数控加工与编程领域进行智能制造的研究与实践具有较为成熟的条件。随着时间的推移，编程技术经历了手工编程、交互式编程、自动编程以及智能编程等阶段。

本书结合作者工作经历，重点介绍了智能数控编程与加工方面的内容，使从事飞机结构件数控加工的相关人员对智能数控编程有一个全面了解，并提供一些实用技能。本书主要的阅读对象以从事飞机结构件数控加工的工程师为主体，也适用于大学高年级学生或研究生，即掌握了一定的数控编程知识的读者。

本书共分 7 章，第 1 章为从宏观上对智能编程与加工进行了简要描述；第 2 章详细阐述了飞机结构件数控加工工艺及规划技术，这一部分是飞机结构件数控加工的工艺基础；第 3、第 4 章分别介绍了智能编程的关键技术与智能编程系统；第 5 章介绍了虚拟加工仿真技术；第 6、第 7 章重点介绍了飞机结构件智能制造的相关知识，其中第 6 章重点介绍了智能机床与智能加工，第 7 章主要介绍了智能生产线以及智能车间等相关内容。

尽管我们衷心希望给读者奉献一本飞机结构件智能数控编程方面的高质量佳作，但由于作者水平有限，书中难免存在不足、疏漏甚至谬误，恳请广大读者给予批评指正。

杜宝瑞

2017 年 9 月

目 录

第1章 概述	(1)
1.1 数控编程技术发展概述	(1)
1.1.1 发展历史、现状及问题	(1)
1.1.2 发展趋势	(4)
1.2 智能制造发展现状	(5)
1.2.1 国外现状	(5)
1.2.2 国内现状	(8)
1.3 智能编程技术	(9)
1.3.1 自动特征识别技术	(10)
1.3.2 工艺决策技术	(13)
1.3.3 NC 刀轨自动生成技术	(18)
1.3.4 加工操作选取与排序技术	(23)
1.4 智能加工技术	(25)
1.4.1 智能加工装备	(25)
1.4.2 智能车间技术	(28)
第2章 飞机结构件数控加工工艺及规划技术	(31)
2.1 飞机结构件	(31)
2.1.1 结构件功能	(31)
2.1.2 结构件分类	(31)
2.1.3 结构特点	(32)
2.1.4 工艺特点	(32)
2.1.5 工艺特征	(32)
2.2 结构件数控加工工艺	(34)
2.2.1 结构件制造总体工艺流程	(34)
2.2.2 壁板类结构件典型工艺	(34)
第3章 智能编程关键技术	(37)
3.1 智能编程模式	(37)
3.2 智能编程关键技术	(37)
3.2.1 自动特征识别技术	(38)
3.2.2 基于几何特性的刀具自动选取方法	(53)
3.2.3 工艺方案快速生成技术	(64)
3.2.4 工艺过程驱动的加工单元自动构造理论	(75)
3.2.5 数控程序优化排序技术	(93)

第4章 智能编程系统	(110)
4.1 智能数控编程系统设计	(110)
4.1.1 总体结构	(110)
4.1.2 运行流程	(110)
4.1.3 对象模型	(113)
4.2 系统开发	(115)
4.2.1 CATIA 开发平台	(115)
4.2.2 CAA 平台开发	(122)
4.2.3 智能编程系统及工具	(133)
4.3 系统应用	(153)
4.3.1 智能编程应用	(153)
4.3.2 快速编程应用	(157)
第5章 加工仿真技术	(167)
5.1 加工仿真技术的内涵	(167)
5.1.1 技术内涵	(167)
5.1.2 发展历程及国内外现状	(169)
5.1.3 发展重点	(178)
5.2 数控加工工艺仿真	(180)
5.2.1 几何仿真实论基础	(180)
5.2.2 动力学仿真实论基础	(182)
5.2.3 工程应用实例	(186)
5.3 数控加工过程仿真	(204)
5.3.1 理论基础	(204)
5.3.2 工程应用实例	(205)
第6章 智能加工技术	(207)
6.1 智能机床	(207)
6.1.1 概念与特征	(207)
6.1.2 智能化技术体系结构	(209)
6.2 智能数控系统	(210)
6.2.1 开放式数控系统软硬件技术平台	(210)
6.2.2 大数据采集、传输与存储技术平台	(216)
6.2.3 云计算/云服务平台	(220)
6.3 智能元器件	(224)
6.3.1 智能识别元件	(225)
6.3.2 智能传感器	(226)
6.4 工艺知识库	(231)
6.4.1 工艺知识的获取	(232)
6.4.2 工艺知识的建模	(233)
6.4.3 工艺智能决策	(235)

6.4.4	工艺智能决策平台	(236)
6.5	智能加工应用技术	(238)
6.5.1	恒切削功率自适应控制	(238)
6.5.2	加工振动智能抑制	(239)
6.6	智能机床案例分析	(242)
6.6.1	Mikron NG-50 机床	(243)
6.6.2	Mazak 智能机床	(245)
6.6.3	THM6363A 精密卧式加工中心	(248)
第7章	智能制造与智能加工车间	(251)
7.1	智能制造	(251)
7.1.1	概念	(251)
7.1.2	原理	(251)
7.1.3	特征	(252)
7.1.4	相关概念	(252)
7.2	智能制造技术体系架构	(253)
7.2.1	智能制造技术总体架构	(253)
7.2.2	面向智能制造的产品定义技术	(254)
7.2.3	智能加工与装配技术	(257)
7.2.4	面向智能制造的服务技术	(259)
7.2.5	面向智能制造的管理技术	(260)
7.2.6	智能制造公共技术	(261)
7.2.7	智能制造应用系统技术	(265)
7.2.8	智能制造技术成熟度评价	(266)
7.3	智能制造系统架构	(267)
7.3.1	智能制造系统层级模型	(267)
7.3.2	智能制造系统水平评价	(279)
7.4	智能加工车间体系架构	(280)
7.4.1	车间网基础络环境建设	(280)
7.4.2	车间网络化硬件配置	(283)
7.4.3	车间网络化软件结构	(283)
7.5	基于海量数据的工艺优化技术	(285)
7.5.1	面向智能加工的零件模型定义	(285)
7.5.2	基于海量数据的动态实时工艺优化	(298)
7.6	中央管控与智能调度技术	(300)
7.6.1	车间中央管控与智能调度	(300)
7.6.2	生产线集成控制系统	(301)
7.7	智能仓储与物流技术	(302)
参考文献		(303)

第1章 概述

1.1 数控编程技术发展概述

数控编程是从零件图样到获得数控加工程序的全过程，主要包括：①零件分析及工艺方案制定：分析零件图样，并根据加工要求进行合理的工艺设计，以确定加工方案，包括选择合适的机床、刀具、夹具，确定合理的走刀路线及切削用量等；②刀位轨迹（简称刀轨）计算：根据零件图样及加工方案要求，计算各加工阶段刀具相对工件的运动轨迹或机床运动轨迹；③程序编制及检验：根据不同数控系统的程序格式，编制对应的零件加工程序，然后对其进行验证和修改，直到获取合格的加工程序。

1.1.1 发展历史、现状及问题

自从美国帕森公司（Parsons Co.）和麻省理工学院（MIT）合作，于1952年研制成第一台三坐标数控铣床以来，数控编程技术经历了60多年的发展，主要经历了4个阶段：手工编程，APT高级语言编程，基于图形的交互式编程和基于特征的智能编程。

（1）第一阶段：手工编程

手工编程是指手工计算或借助计算机计算出编程所需的数据后，针对指定的数控系统所规定的指令代码，编制加工程序单，完成控制介质的制作。在数控技术发展的初级阶段，主要依靠个人经验手工完成零件图样分析、加工工艺规划、刀轨计算、加工程序单编制及校验等工作。这种编程方式可用于外形简单（如轴类零件）或计算量不大的零件程序编制，简单易行。但存在较多问题：

①要求高。程编人员必须具备丰富的专业知识和经验，包括：工艺经验，刀轨计算数学知识，熟悉各种数控系统的数控指令代码等。

②效率低。由于采用的是面向机床指令的抽象“机器语言”，并且需手动计算刀位轨迹，导致手工编程所耗工时巨大且效率极低。

③难度大。对形状复杂的零件，手工编程难度大甚至根本无法实现。

④易出错。主要依靠人工检查刀轨的正确性，缺乏快速而直观的校验工具，程序的准确性难以保证。

（2）第二阶段：APT高级语言自动编程

20世纪50年代中期，MIT推出了一种专门用于机械零件数控程序编制的语言，称为自动编程工具（Automatically Programmed Tool，APT），是一种对工件、刀具几何形状及刀具运动等定义时所用的接近英语的高级符号语言。用APT语言编制的加工程序由多条语句构成，每条语句由字符、数字、专用字、标识符、专业符号、运算符及表达式等基本元素按照一定的规则组成，包含几何定义语句、刀具运动语句及后置处理语句等。把采用APT语言编制的加工程序输入到计算机，经过计算机APT数控编程系统编译生成刀位文

件, 然后进行后置处理, 生成数控系统所能接受的数控程序的过程, 称为 APT 语言自动编程。经过近 20 年的发展, 形成了诸如 APT II、APT III、APT IV、APT - AC (Advanced Contouring) 和 APT - /SS 等先进版。此外, 世界各工业国家参照 APT 语言系统的思想, 开发了各具特色的 APT 编程系统, 如德国的 EXAPT, 法国的 IFAPT, 日本的 FAPT 和 HAPT, 意大利的 MODAPT, 我国的 HZAPT、EAPT、SAPT 等。这种编程方式具有程序简练、走刀控制灵活等优点, 并使数控加工编程从面向机床指令的“汇编语言”级, 上升到面向几何元素的加工。相对于手工编程, 工艺员的编程难度得到大大降低, 并且编程效率也得到较大提高, 但仍然存在以下不足:

①语言定义能力不足。采用语言定义零件的几何形状, 难以描述复杂的几何形状。

②编程难度依然较大。针对复杂零件, 编程难度大甚至根本无法实现。

③直观性差。缺少对零件形状、刀轨的直观图形显示和有效的刀轨验证手段。

(3) 第三阶段: 基于图形的交互式自动编程

为解决 APT 语言编程存在的问题, 1972 年, 美国洛克希德飞机公司开发出设计、绘图和数控编程一体化的自动编程系统, 标志着数控编程进入图形交互式自动编程时代。1978 年, 法国达索公司推出集 3 维设计、分析和数控编程功能于一体的集成系统 CATIA; 1983 年, 美国 Unigraphics Solutions 公司研制出 UG 系统。随后, CAD/CAM 自动编程系统如雨后春笋般发展, 如 Pro/Engineering、英国 Pathtrace 工程系统公司开发的 EdgeCAM 系统等。我国的自动编程系统发展较晚, 但也取得了不少成果, 如北京航空航天大学 PANDA、CAXA, 原中国航空工业总公司联合开发的 3C、CIGMA 系统, 华中科技大学的 InteCAM, 南京航空航天大学的超人 (SuPerMan) 等 CAD/CAM 系统。采用 CAD/CAM 系统进行交互式编程的一般过程为: 首先, 采用 CAD 系统在计算机中建立零件的 2 维或 3 维几何模型。其次, 人工分析零件几何模型并根据加工经验, 确定加工方案, 选取相应的加工资源、走刀方式及加工参数等信息, 完成加工操作生成及刀轨计算。最后, 进行加工过程仿真与修改, 并通过前后置处理程序生成 NC 程序。相对于 APT 编程, 图形式的交互编程可进行零件 3 维建模、加工操作选取与刀轨计算、加工仿真及后置处理, 大大降低了编程复杂度, 提高了编程效率和质量。目前, 国内航空制造企业的数控编程大多处于这个阶段, 但仍存在诸多问题:

①缺乏加工方案自动规划。程序员主要依赖于自身的工艺经验进行编程, 而不同层次的程序员编程水平不一样, 导致编程质量难以保证。问题的关键是缺乏零件加工工艺方案的自动规划, 包括刀具、机床、夹具的选取, 工序工步的安排, 加工走刀路线安排, 切削用量的选取等。

②缺乏具有工程语义的特征信息传递与参数提取。CAD 系统只有设计特征以及底层的几何与拓扑信息, 缺乏具有工程语义的加工特征信息。因此, 在 CAM 系统中, 需要富有经验的程序员通过交互方式进行加工特征相关几何信息的选取与设定。对于大型复杂飞机结构件来说, 编程交互量巨大, 效率低。

③缺乏加工参数的传递与自动设置。CAM 系统在进行刀轨计算时, 需要人工交互设定大量的加工工艺参数, 如加工进退刀、刀具参数及加工策略参数等, 对于大型复杂零件来说, 交互编程周期长, 如飞机大型壁板的编程时间可达 15 ~ 30 天。

④数据统一性、关联性差。系统各模块之间的产品数据不统一，各模块相对独立，例如，3 维动态仿真只记录和显示刀具的干涉，而不显示其发生干涉的对象模型、导致这种干涉的刀轨段以及与之相关的加工参数。

(4) 第四阶段：基于特征的自动编程

自从“特征”的概念被提出以后，特征技术已经被大家所广泛接受，但特征究竟如何准确定义，目前学术界一致认为不同的应用领域对特征有不同的定义。对于机械加工领域，加工特征可以定义为机械零件上具有特定结构形状和特定工艺属性的几何外形域，它能够被确定的加工方法加工成形。对数控加工编程而言，加工特征是组成零件的功能要素，它具有一定的工程语义，符合工程技术人员的操作习惯；其次，针对特征的加工使数控编程人员不再对那些底层的几何信息进行操作，而转变为直接对特征进行数控编程，可以大大提高编程效率；再者，加工特征是 CAPP 中工艺规划的基础，并可作为具体的加工对象传递到 CAM 系统实现 NC 代码的自动生成。因此基于特征的自动编程技术可以解决基于图形的交互式编程问题，近年来一直是数控自动编程技术领域的研究热点，目前国内众多研究人员已经取得了一定的成果。R. B. Karadkar 等在 1996 年研究并开发了包含基于特征的 2.5 轴零件工艺规划设计系统，实现 2.5 轴零件工艺的自动规划，为后续的 CAM 自动化编程提供基础。为了弥补商品化 CAD/CAM 系统在工艺规划方面及系统集成方面的弱点，Huikang K. Miao 等在 IDEAS 平台进行二次开发实现了基于加工特征的工艺规划，有效地实现了 CAD/CAPP/CAM 的集成，但是该系统也只适用于 2.5 轴零件。为提高编程系统的自动化程度，Millan K. Yeung 将人工智能引入到编程系统中，通过加工特征的自动识别及刀具的优化选取，开发了智能工艺规划系统，并且系统的柔性化、简单化便于新知识、新工艺的扩展。另外，为解决由于现代机械产品复杂程度的逐步增加而导致工艺编程过程繁琐、复杂等问题，Ulrich Berger 等将基于知识的加工特征作为工艺过程的基本元素，以减少工艺时间为目标，采用图的方式描述及优化工艺过程，并在 CATIA 上进行实现。在国内，也有很多大学和研究机构进行了基于特征的自动编程系统研究与开发，如西北工业大学的乔良等提出了基于特征和知识库技术的 CAM 系统框架，对制造特征进行了定义及分类，并对制造资源知识库进行了设计。李艳聪等提出基于特征的加工过程自动化的实现方法，并在 Pro/E 上进行二次开发，实现了 CAPP 与 CAD/CAM 的有效连接。顾晓峰实现了 2.5 轴加工零件的局部特征识别，并开发了基于特征的 FreeCAM 原型系统。浙江大学的黄国祥提出了加工特征与加工操作的映射方法，并结合 UG 的加工模块开发了基于加工特征的 NC 代码自动生成系统。此外，为提高航空产品的数控编程效率和质量，北京航空航天大学、南京航空航天大学等高校在飞机结构件的快速数控编程方面也做了大量的研究与开发，目前已经取得较大进展，但要达到大范围的实用化、商品化尚需时日。除了学术界的关注之外，也有一些商品化的 CAM 软件已经实现了基于特征的自动编程，如表 1-1 所示，英国 Delcam 公司的 FeatureCAM 系统，美国 DP Technology 公司的 ESPRIT 智能数控编程系统，这两个系统均基于特征及知识、使用自动特征识别技术的全功能软件。特征和知识库技术的使用，使得零件加工编程更方便、更简单，极大地缩短了加工编程时间。但目前该类系统还需要较多的人工交互操作，并且不适用复杂零件。

表 1-1 商业 CAM 系统自动编程功能分析

序号	CAM 系统	铣削	基于特征的自动编程	
			所属模块	特点
1	CATIA	2~5 轴	无	具有简单特征的识别功能
2	UG	2~5 轴	NX7 FBM	面/孔/槽腔的自动加工
3	Delcam	2~5 轴	FeatureCAM	简单槽腔/凸台/孔/曲面的自动加工
			PowerMill AutoCAM	
4	MasterCAM	2~5 轴	FBM	简单槽腔的自动加工
5	ESPRIT	2~5 轴	SolidMill	简单槽腔/凸台/孔的自动加工

综上，目前基于特征的自动编程技术还存在以下难点及问题：

①复杂产品特征识别在稳定性、完整性、准确性等方面难以保证。目前针对不同领域机械产品的加工特征有不同的定义，大量的研究成果仅停留在 2.5 轴零件加工特征的识别，而对复杂产品（如飞机复杂结构件、涡轮叶片等）的相交特征、复杂曲面特征的识别仍存在较多问题，进而导致识别的稳定性、完整性、准确性均难以保证。

②工艺排序复杂、不符合实际工艺过程。现有的工艺排序方法大多是在加工特征识别后，根据特征选取加工操作、加工序列及加工资源（包括机床、刀具、夹具等），然后以时间最少、成本最低等为目标进行组合优化，这种方式导致排序是一个组合爆炸问题，排序时间长、效率低，且结果难以与实际工艺过程相吻合。

③工艺规划未形成模板化。现有自动数控编程系统的工艺规划大多是工艺排序后的结果，未形成模板化以提高工艺规划的效率。

④零件的加工未基于整体模型的切削过程。目前，对特征的加工是在选定加工序列的基础上选取特征的几何元素进行独立加工，而未在残留模型的计算和分析基础上安排整体零件模型的加工，容易导致过切、干涉等现象，对编程质量和加工安全性产生严重影响。此外，需人工反复仿真与修改，重复工作量大。

1.1.2 发展趋势

为解决上述问题，实现真正意义上的智能数控编程，结合当前新技术发展态势，提出数控编程技术的发展趋势。

①从整体上构造零件的统一特征表达模型。基于加工特征定义与分类构造零件的统一表达模型，该模型能反映出加工特征之间的空间位置关系，如父子关系、邻接关系、包含关系等，便于后续工艺规划、加工操作的排序以及刀位轨迹的生成。

②基于知识的编程方式。基于知识的编程（Knowledge Based Programming, KBP）与 CAD/CAM 系统的融合已成为自动数控编程系统的重要发展方向。在未来的自动编程过程中，系统将更加依赖于后台的工艺知识库进行知识推理，实现按照专家的经验 and 知识进行程序的编制，以保证程序的质量、提高编程的效率，进而使生成的数控程序更加符合实际加工要求。

③面向整体模型切削过程的智能加工。面向整体模型切削过程的智能加工应具有以下特

点：a. 具有模型对比、残余模型分析与判断功能。b. 防过切、防碰撞：提高操作的安全性，更符合高速加工的工艺要求。c. 残留区域自动计算与实时补加工：可实时进行残留模型与实际零件的对比，识别出刀轨的拐角处、曲面的凹陷处、狭窄的沟槽间等因刀具直径较大切削不到而残留下的未加工区域，然后用合适的刀具和加工方法对这些区域进行补加工。

④工艺的模板化。模板（Template）技术是指将经过加工验证认为是正确有效的一组过程和参数存储起来。工艺的模板化将产品的典型工艺方案作为模板存储在模板库中，当要实现相似产品的加工过程时，调用该模板即可直接或通过修改少量参数得到相应的工艺方案。对工艺进行模板化并进行有效管理可加快工艺方案的自动规划效率，提高工艺方案质量。

⑤关联性编程。目前，CAD系统大多具有参数化设计功能，改变特征参数即可驱动特征及零件的自动更新。未来，当CAD模型或设计特征产生更新，CAM系统及时捕捉到更新信息并由计算机实现设计特征与加工特征的关联更新，工艺路线、刀轨的重新计算与修改，最终完成参数化的关联性编程，这种方式将极大地减少程序员的工作量。

⑥智能化、网络化的云编程。数字化产品发展的目标是实现智能化、自动化，用计算机模拟人的思维，最终减少人的劳动量。目前，众多人工智能技术被引入到编程系统中，但只是局部应用，未实现真正的智能化，相信未来会有更深入的发展。此外，对于大型复杂零件，自动编程计算量大、时间长，要求的内存容量大，使得微机难以满足要求。而基于网络的云计算可以将计算分布在不同的网络终端，从而实现高效的云编程。

1.2 智能制造发展现状

1.2.1 国外现状

自20世纪80年代末智能制造的概念出现后，其工程化应用长期处于停滞和沉寂的状态，近年来，数字化、网络化、信息化、自动化和人工智能技术的不断发展，催生了智能制造技术的快速发展。为了保持制造业的发展活力和整体竞争力，以美、日和欧洲为主的发达工业国家和地区纷纷将视线转向智能制造，并将其列入国家级计划着力发展。其中，美国着眼于未来的军事需求，对武器装备的智能制造格外重视；欧盟在航宇和防务的智能制造领域也持续开展跨国合作。

美国是率先提出并支持智能制造的国家，不仅积极参与了1995年启动的国际“智能制造系统”（IMS）计划，还资助设立了“智能制造领导力联盟”（SMLC）计划，推动智能制造在美国的发展。2006年，国家科学基金（NSF）提出智能制造的核心——信息物理系统（CPS）的概念。近年来，为重塑制造业的全球竞争优势，美国启动了制造业振兴战略，其核心内容是推进智能制造。美国国防部也积极推动智能制造的实施，启动了一系列计划和项目，对武器装备研制生产中的智能制造进行研究与实践。2010年，国防部“制造技术（ManTech）计划”增加了“先进制造企业”投资科目，汇集了全数字化打通、制造网络连接、智能制造规划与执行等有关智能制造领域的研究方向。2014年，国防部牵头成立了“数字化制造和设计创新机构”（DMDII），其使命之一是在智能制造方面引领创新，将研究成果转化到武器装备研制生产中。此外，世界最大的多元工业集团通用电气也提出了“工业互联网”概念，倡导将人、数据和机器连接起来，形成开放而全

全球化的工业网络。

日本是最早提出建立国际性智能制造研究合作计划的国家，并且提出了世界上首个、也是历时最久的智能制造国际研发计划“智能制造系统”（IMS）计划。近年来，在日本提出的“第四个科学与技术计划（2011—2015）”和日本“科技战略路线图”中，明确提出发展智能制造技术，以及面向人口变化的下一代机器人技术、可视化技术和 IT 系统与生产技术的集成、先进测量与分析技术等。

欧盟是发展智能制造最积极的地区，不仅参与和主导国际“智能制造系统”（IMS）计划，并且设立了多个跨国发展计划，持续投入资金进行相关研究。2007 年，欧盟第七个“框架计划”（FP7）提出利用智能制造实现制造模式的新革命；2010 年，第八个“框架计划”（FP8），即“地平线 2020”，继续对智能制造的研究与应用予以支持，其中包括投资 11.5 亿欧元的“未来工厂”计划。在欧盟对智能制造的推动上，德国扮演着重要的角色，2013 年德国政府正式发布了“德国工业 4.0”计划，其描绘的“工业 4.0”愿景已成为欧洲未来智能制造的总体发展构想；该计划已从“德国高技术 2020 战略行动计划”中获得投资，启动了包括“赛博物理生产系统”（CPSS）在内的若干项目。

在发展过程中，美、日、欧等有着不同的特点，但均十分重视基础科技研究，有组织地开展软硬件相结合的开发活动，吸引中小企业广泛参与，并建立政府与产学研用相结合的联盟。目前，政府和企业普遍将智能制造选定为未来制造的发展方向，对智能制造的支持力度空前，工业部门已具备智能制造的相应基础，智能制造技术应用势头良好。在智能制造领域所取得的最新成就主要体现在以下两个方面：

第一，智能制造的基础研究和不断技术不断丰富，数字化、网络化、信息化、自动化、人工智能技术等不断获得支撑智能制造的新成果，依托大数据、物联网、实时多尺度建模仿真等新技术的智能制造技术平台相继推出。

第二，智能制造的工业基础持续加强，智能元器件和制造装备得到新的发展和广泛应用，产生了一批智能制造装备和工业机器人的知名供应商，以及一批研发高端智能软件的机构，并拥有了众多有意愿和有条件实施智能制造的大小企业。

近年来，世界各工业先进国家制订了多项智能制造的发展战略与规划，代表着先进制造技术的发展趋势，引领着世界智能制造的发展潮流，相关情况参见表 1-2。

表 1-2 智能制造相关的发展战略与专项规划

国家和地区	机构	时间	名称	相关内容
美、欧、日、韩等	各国政府	1995	智能制造系统计划	全面展望 21 世纪制造技术发展趋势，先行开发下一代制造技术，致力于全球制造信息技术的体系化、标准化
		2010	智能制造系统 2020 路线图	制定了行动路线图，以及 5 个关键领域主题（KAT）：可持续的制造、产品与服务；高效制造；关键技术；标准化；创新、技能发展与教育
美国	美国国防部	2005	下一代制造技术计划	确定了 6 个领域，包括基于模型的企业、智能系统、企业级集成和知识应用等智能制造领域
		2010	制造技术计划—先进制造企业	投资项目汇集了全数字化打通、制造网络连接、智能制造规划与执行等有关智能制造研究方向

表 1-2 (续)

国家和地区	机构	时间	名称	相关内容
美国	国防部	2010	自适应运载器制造项目	开发包含赛博物理建模语言在内的宏语言工具以及制造反馈语言概念、搭建面向赛博物理系统的协同开源开放平台,使大型复杂系统在设计和制造的部分环节实现智能化
	智能制造领导力联盟	2009	智能加工制造路线图	路线图共包括 5 条最终汇聚为智能加工制造的路线,分别是“从数据到知识”“从知识到运行模型”“从运行模型到关键工厂资产”“从企业应用到从全球应用”“从人员、知识和模型到组合的关键绩效指标 (KPI)”
		2011	智能制造企业行动计划	理想的智能制造企业应该包含制造的方方面面,并且能够全生命周期地虚拟跟踪资本资产、工艺和资源,最终得到的将是柔性、敏捷和创新的制造环境,绩效和效率都是最优化的,业务和制造都是高效协同运行的
	先进制造国家项目办公室	2011	先进制造伙伴关系计划	在新一代机器人等方面,通过政府、高校及企业合作来强化美国制造
	国家科技委员会	2012	美国先进制造业国家战略规划	通过加强研究和实验 (R&E)、税收减免、扩大和优化政府投资、建设“智能”制造技术平台,加快智能制造的技术创新
	通用电气公司	2012	工业互联网	工业互联网将通过智能机床、先进分析方法以及人的连接,深度融合数字世界与机器世界,深刻改变全球工业
	国家标准与技术研究院工程实验室	2013	智能制造系列项目	通过先进测量科学为下一代制造提供使能技术,实现智能制造,项目研究重点是加速前沿智能技术在美国先进制造领域的开发、应用与集成
	国防部、航空航天局、能源部等	2014	数字化制造和设计创新机构	使命之一是引领智能制造方面的创新,并结合“自适应运载器制造”项目,将研究成果转化到武器装备研制中
		2014	智能制造创新机构	认为智能制造新技术可以极大地提升制造的能效,节约成本并节约国家能源。通过制造、数字化、高效技术等新技术的结合,美国制造商可以实时控制工厂和企业的能源消耗,提升生产率并节省能源成本
	欧洲	欧盟委员会	2007	第七个框架计划
2009			未来工厂计划	支持先进生产技术的研发、开发与创新,未来工厂 2020 路线图提出了 6 个研究与创新的优先领域,分别是先进制造工艺,自适应和智能制造系统,数字化、虚拟和资源高效利用的工厂,合作与移动的企业,以人为本的制造,聚焦用户的制造
2010			欧盟 2020 战略	实现智能化经济增长,在知识和创新基础上发展经济,重点发展信息、节能、新能源和以智能为代表的先进制造业
2013			第八个框架计划	继续资助未来工厂计划,以及嵌入式计算机系统计划和电子组件和系统计划

表 1-2 (续)

国家和地区	机构	时间	名称	相关内容
德国	人工智能研究中心	2005	智能工厂技术计划	支持创新自动化技术的开发、应用与传播,并为科学与工业利用提供基地
	国家科学与工程院	2009	信息物理融合系统综合研究议程	为德国形成新的技术革命制定综合研究议程,确认了2025年前的4个重大研究领域:能源、移动性、健康和工业
	联邦教育与研究部	2010	高技术2020战略	提出一系列促进制造业发展的创新政策,聚焦了气候/能源、健康/饮食、移动性、安全和通信5个优先领域,战略行动计划形成了十大未来计划投资方向
		2013	工业4.0	十大未来计划之一,提出基于信息物理融合系统的智能化,将使人类步入以智能制造为主导的第四次工业革命
		2013	智能服务	十大未来计划之一,目的是发展基于网络的智能商业服务

透过上述战略与专项规划,智能制造正按如下趋势加快发展。

(1) 赛博物理系统将成为智能制造最重要的基础。

在赛博物理系统中,人、机器、产品等实现实时连通和有效交流,构成一个高度灵活的制造模式。智能制造以此为基础,通过产品全生命周期内的人机深度交互、信息系统与物理系统的融合,实现资源、信息、物体以及人之间的紧密联系,创建了产品制造过程的智能环境。

(2) 信息技术的新发展将成为智能制造新的技术支撑。

大数据、物联网、云平台与云服务、多尺度建模仿真、实时信息感知与检测等将为智能制造提供越来越广阔的网络平台和感知手段,支持智能制造所需的泛在信息获取与处理能力。

(3) 新的智能技术将有力支持智能制造的发展。

以人工智能技术为核心,吸纳计算智能、群体智能和社会智能等各类智能技术的新成果,与制造技术紧密结合,将不断扩展智能制造的技术内涵与领域。

(4) 数字化的深入应用仍是智能制造的重要基础条件。

与智能制造相关的各项基础技术中,与智能制造关联度最高的是数字化技术,必须持续发展,提升数字化技术应用的广度和深度。

(5) 智能制造技术呈现出新的发展动向。

未来智能制造必将遵循“数据—信息—知识—智慧”的途径持续发展,智能制造系统中最核心的智能过程都将由软件密集型嵌入式系统来实现。

1.2.2 国内现状

我国正处于工业化和信息化融合的历史阶段,其目标是加快推进数字化等与制造技术的深度融合,推动制造过程和生产模式的变革,走出一条新型工业化的道路。

传统工业生产要素包括设备、技术、产品、工艺、管理和协作,信息技术要素包括计算机与软件、网络与通信、建模、控制等技术。两者相结合所产生的现代工业生产要素,