

机械加工
工艺
师手册

单行本

主编 杨叔子
常务副主编 李斌 张福润

数控加工



机械加工工艺师手册
· 单行本

数 控 加 工

主 编 杨叔子
常务副主编 李 斌 张福润
副 主 编 常治斌 鲍剑斌 汤漾平
 赵晓芬 柯 群 杨曙年 严晓光



机 械 工 业 出 版 社

本手册汇集了机械制造技术各个主要方面的内容,较全面地反映了现代先进制造技术的新进展,具有内容简明,叙述通俗,便于使用的特点,是一部具有很高使用价值的机械加工工艺师手册。

本手册为修订版。内容分为8篇,包括机械加工工艺基础、金属切削机床及工艺装备基础、切削加工、数控加工、特种加工、加工过程自动化、检测和机械装配等。

本手册可供广大从事机械制造的工程技术人员以及工科院校机械类专业的师生使用及参考。

本单行本主要包括数控加工系统,数据加工工艺基础,数控加工工具系统、刀具及夹具,数控加工机床的选型,数控机床的调试及验收,数控机床操作及编程,典型的数控加工机床等内容。

图书在版编目(CIP)数据

数控加工/杨叔子主编. —北京:机械工业出版社,2012.4

(机械加工工艺师手册:单行本)

ISBN 978-7-111-38031-3

I. ①数… II. ①杨… III. ①数控机床-加工-技术手册

IV. ①TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第067671号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李万宇 责任编辑:李万宇 申伟

版式设计:霍永明 责任校对:任秀丽 姚培新

封面设计:姚毅 责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2012年5月第1版第1次印刷

169mm×239mm·14.5印张·354千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-38031-3

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务 策划编辑:(010)88379732

社服务中心:(010)88361066 网络服务

销售一部:(010)68326294 门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

《机械加工工艺师手册》单行本

出版说明

《机械加工工艺师手册》第2版分为8篇51章，汇集了机械加工工艺各个方面的内容。第2版的出版和第1版相距9年，修订时在内容编排及体系结构上作了较大调整，充分反映了现代制造技术的新进展、采用了最新国家标准，适应我国机械加工工艺师技术水平的发展和工作要求。

《机械加工工艺师手册》第2版注重实用性、先进性、系统性，以工艺为基础，以工艺方法为主线，工艺数据和工艺方法紧密结合，具有“内容丰富实用、结构合理便查、技术先进翔实、标准全新适用”的突出特色，是机械加工工艺师必备的案头工具书。

《机械加工工艺师手册》第2版自2011年出版以来，受到了包括企业、科研院所，以及高校等专业读者的广泛欢迎。从读者的反馈来看，手册能为读者提供可靠数据、实用技术和先进资料，帮助读者解决工作中遇到的各种工艺问题。

在手册第2版的使用过程中，一些读者提出了手册较厚、使用不方便的问题，为此，我们针对手册的形式进行了调研，结果表明，单行本的模式得到了许多读者、作者的肯定和期待。为了满足机械加工工艺人员对某个专题工艺技术的需求，更加方便工艺人员查用，我们决定编辑出版《机械加工工艺师手册》有关篇的单行本。

从工艺工作的实际出发，考虑到一些工艺人员从事相对更具体、更独立的专业工艺工作，《机械加工工艺师手册》单行本包括：《金属切削机床及工艺装备基础》、《切削加工》、《数控加工》、《特种加工》、《机械装配》等，读者可根据需要灵活选购。

机械工业出版社

《机械加工工艺师手册》第2版前言

《机械加工工艺师手册》第1版于2001年出版至今已9年有余，按照机械工业出版社的意见，我们对第1版进行了修订。

本手册此次再版，秉承了第1版“简明、实用、先进”的原则。与第1版相比较，本次修订时重点作了如下几项工作：

1. 内容编排及体系结构上作了较大调整

为了方便读者使用，本手册修订时，将第1版第2篇 金属切削机床的部分内容、第3篇 机床夹具与刀具的部分内容，以及第4篇 切削加工合并成为一篇，并对每一种加工技术，都按照工艺方法—加工机床—切削刀具的顺序撰写。这样做不仅在内容及体系结构上更为合理，减少了许多不必要的重复，还有利于读者查阅。

为了适应数字制造技术的快速发展，将第1版分散在各篇的相关内容集中在一起，作为第4篇 数控加工编撰出，并增加了数控系统，数控加工机床的选型，数控机床的安装、调试及验收，以及数控机床维护维修等重要内容。

2. 充分反映现代制造技术的新进展

制造业信息化是世界制造业发展的大趋势。用信息化带动工业化，促进传统制造业结构调整和优化升级，是我国机械制造业应对经济全球化，提高整体素质和国际竞争力的迫切需要和必然选择。为反映制造业信息化的巨大成就，在第1篇中，我们新编写了第6章 信息技术在机械制造中的应用概述，简要介绍了制造业信息化技术的五个主要发展方向，即管理数字化、设计数字化、企业数字化、生产过程数字化以及制造装备数字化的主要内容与进展。

发展高速切削技术等新的切削技术，促进制造工艺的发展，是现代制造技术面临的新任务。目前，高速切削技术已广泛应于汽车制造、模具加工等领域，对提高产品加工质量、加工效率、降低加工成本效果十分显著。因此，我们在第3篇中新撰写了第13章 高速切削加工，较详细地介绍了高速切削技术的特点、机理及应用，高速加工机床的特征，高速切削用刀具材料及刀具结构，以及高速切削的安全性等诸方面内容，以满足读者在高速切削应用上的需求。

为了适应微电子技术的迅速发展和再制造技术愈来愈广泛的应用，我们在第5篇中增写了第8章 微细加工和第9章 表面工程技术等内容，较深入地介绍了光刻加工技术、光刻—电铸—模铸复合成形技术、微细电火花加工、封接技术、分子装配技术，以及表面化学热处理、表面热喷涂技术、热喷焊技术、堆焊技术、表面电镀技术和表面镀膜技术等的应用。

此外，我们还对若干章节内容进行了修改、补充，甚至重写。

3. 采用了最新国家标准

为适应制造业和制造技术的快速发展，并与国际接轨，推动中国制造业走出国门，近年来，有关部门相继对我国的许多国家标准和行业标准作了重大修改。本次手册修

订时，我们注意采用了这些新修订的国家标准，很好地适应这种形势的变化。

在手册编写出版过程中我们得到了机械工业出版社的大力支持，得到了华中科技大学机械学院及华中科技大学文华学院的大力支持，在此谨表诚挚谢意。我们更要衷心感谢李万宇副编审为手册的修订出版所付出的辛勤劳动！

由于编者水平有限，手册中一定存在许多不尽如人意的地方，甚至谬误。“嘤其鸣矣，求其友声。”我们殷切希望同行专家和广大读者不吝赐教！

中国科学院 院士 杨叔子
华中科技大学 教授

2010年9月19日

《机械加工工艺师手册》第1版前言

鉴古知今，放眼人类历史，应该说，材料、能源、信息与制造是人类文明的四大支柱。

制造业是所有与制造有关的行业的总称，它是国民经济的支柱产业之一。制造技术是使原材料变成产品的技术，是国民经济与社会得以发展，也是制造业本身赖以生存的关键基础技术。没有制造业、没有制造技术的进步，就没有生产资料、生活资料、科技手段、军事装备等一切，也就没有它们的进步。统计资料表明，在美国，68%的财富来源于制造业，日本国民总产值的49%是由制造业提供的，中国的制造业在工业总产值中也占有40%的比例。可以说，没有发达的制造业就不可能有国家的真正繁荣和富强，而没有机械制造业，也就没有制造业。经济的竞争归根到底是制造技术与制造能力的竞争。改革开放20年来，我国机械制造业充分利用国内外两方面的技术资源，有计划地推进企业的技术改造，引导企业走依靠科技进步的道路，使制造技术、产品质量和水平及经济效益发生了显著变化，为繁荣国内市场，扩大出口创汇，推动国民经济发展作出了很大贡献。

为适应机械制造技术发展的需要，为进一步提高我国机械制造技术水平、加强我国机电产品在国际市场上的竞争能力尽一份绵薄之力，我们在机械工业出版社的大力支持下，编写出版了这本手册。

本手册汇集了机械制造技术各个方面的主要内容，具体包括机械加工工艺基础、金属切削机床、机床夹具与刀具、切削加工、特种加工、加工过程自动化、检测和装配等。全手册共8篇60章。

本手册的特点是以工艺为基础，以工艺方法为主线，工艺数据和工艺方法紧密结合；既论述大批大量生产中加工和装配的质量、效率及成本问题，也介绍多品种、小批量生产的工艺特点，强调生产的柔性化、集成化和可快速重组的观念；简明、实用，注意反映现代制造技术的新进展；采用最新国家标准。

本手册由中国科学院院士杨叔子教授任主编，张福润、常治斌、汤漾平、鲍剑斌、柯群、何兆太、杨曙年、严晓光任副主编。参加各篇(章)编审的人员及分工如下：

- 第1篇 编写人 张福润
 审稿人 宾鸿赞
- 第2篇 编写人 常治斌、林军、黎新、毛履国
 审稿人 钟华珍
- 第3篇 编写人 汤漾平、李小平、叶仲新
 审稿人 张福润、钟华珍
- 第4篇 编写人 鲍剑斌、熊良山、张华书、张福润、汤漾平
 审稿人 黄奇葵、张福润、王延忠
- 第5篇 编写人 何兆太、王青云

- 审稿人 宾鸿赞、孙洪道
第6篇 编写人 柯 群 王建军 王伯藤
审稿人 孙洪道
第7篇 编写人 杨曙年
审稿人 宾鸿赞、张福润
第8篇 编写人 严晓光
审稿人 张福润

由于编审人员较多，编者水平有限，手册中难免有不妥之处，我们热忱期望读者提出批评和建议，以期有助于编者水平的提高与手册质量的改进。

谨以此手册，献给新的世纪。

《机械加工工艺师手册》编写组

2000年11月18日

目 录

《机械加工工艺师手册》单行本出版说明

《机械加工工艺师手册》第2版前言

《机械加工工艺师手册》第1版前言

第4篇 数控加工

第1章 数控加工的基本概念 及数控加工系统

1.1 数控加工是促进现代制造业

发展的高新技术 4-3

1.1.1 数控加工技术是先进制造的
基础技术 4-3

1.1.2 数控加工的基本概念 4-3

1.1.3 先进制造对数控加工
技术的要求 4-5

1.1.4 数控加工的适应范围 4-6

1.2 数控加工系统的组成 4-7

1.2.1 计算机数控装置(CNC) 4-7

1.2.2 进给伺服系统 4-11

1.2.3 主轴系统 4-12

1.2.4 机床 4-13

1.3 数控加工系统的功能 4-15

1.4 数控加工系统的种类 4-16

1.4.1 按被控对象运动轨迹分类 4-16

1.4.2 按进给伺服系统类型分类 4-18

1.4.3 按数控系统功能水平分类 4-18

1.4.4 按数控系统体系结构分类 4-18

第2章 数控加工工艺基础

2.1 数控加工工艺的特点 4-20

2.1.1 数控机床加工特点 4-20

2.1.2 数控加工工艺特点 4-20

2.2 数控加工工艺设计的

基本内容 4-21

2.2.1 选择适合数控加工的零件 4-21

2.2.2 确定零件数控加工的内容 4-22

2.2.3 数控加工的工艺性分析 4-22

2.2.4 数控加工阶段及
工序的划分 4-23

2.2.5 加工余量的确定 4-24

2.2.6 加工方法的选择及加工路线的
确定 4-25

2.2.7 工件的定位、装夹与夹具的
选择 4-28

2.2.8 刀具的选择 4-28

2.2.9 对刀点与换刀点的确定 4-30

2.2.10 切削用量的选择 4-30

2.2.11 加工程序的编制、校验和
首件试切 4-32

2.2.12 工艺文件的填写与归档 4-33

2.3 典型零件的数控加工工艺 4-34

2.3.1 轴类零件 4-34

2.3.2 平面槽形零件 4-36

第3章 数控加工工具系统、 刀具及夹具

3.1 数控加工工具系统 4-39

3.1.1 镗铣类整体式工具系统 4-39

3.1.2 镗铣类模块式工具系统 4-41

3.1.3 常规7:24锥柄工具系统 4-43

3.1.4 改进型7:24锥柄工具系统 4-49

3.1.5 1:10锥柄工具系统 4-51

3.1.6 HSK工具系统 4-51

3.1.7 数控车削工具系统 4-53

3.2 数控加工刀具及选用原则 4-62

3.2.1 数控加工刀具的分类 4-62

3.2.2 数控加工刀具的特点 4-63

3.2.3 数控加工刀具的选用原则 4-63

3.3 数控车削加工刀具	4-65	预留确定	4-95
3.3.1 数控车削刀具的分类	4-65	4.4 数控加工经济效益分析	4-96
3.3.2 机夹可转位车刀的结构	4-65	4.4.1 数控机床的工艺能力系数	4-96
3.3.3 数控车削刀具的材料	4-69	4.4.2 单机数控加工的工艺成本	4-96
3.3.4 机夹可转位刀具的特点	4-69	4.4.3 数控加工经济效益分析	4-100
3.4 数控铣削加工刀具	4-70	第5章 数控机床的调试及验收	
3.4.1 可转位铣刀	4-70	5.1 数控机床的安装及调试	4-102
3.4.2 硬质合金可转位面铣刀	4-70	5.1.1 数控机床初就位和组装	4-102
3.4.3 数控铣削加工刀具的材料	4-71	5.1.2 数控系统电气连接及 电源检查	4-104
3.4.4 数控铣削加工刀具的 相关标准	4-71	5.1.3 系统参数调试及设定	4-107
3.5 数控钻削加工刀具	4-71	5.1.4 数控机床几何精度调整及 试运行	4-114
3.5.1 数控加工用钻头的综合 技术要求	4-72	5.2 数控机床的验收	4-119
3.5.2 可转位浅孔钻	4-74	5.2.1 开箱检验及外观检查	4-119
3.5.3 装配式硬质合金扁钻	4-77	5.2.2 数控机床性能及功能的 验证	4-119
3.6 数控镗削加工刀具	4-78	5.2.3 数控机床精度的验收	4-121
3.6.1 数控镗削加工刀具的分类	4-78	第6章 数控机床操作及编程	
3.6.2 数控镗削刀具的材料	4-79	6.1 数控操作基础	4-130
3.6.3 新型镗削刀具的结构及 特点	4-80	6.1.1 概述	4-130
3.7 数控加工的夹具	4-81	6.1.2 基本操作	4-130
3.7.1 数控加工夹具的特点	4-81	6.1.3 手动操作	4-130
3.7.2 组合夹具	4-82	6.1.4 加工参数设置	4-131
3.7.3 通用夹具	4-85	6.1.5 程序的输入与文件的管理	4-131
3.7.4 专用夹具	4-86	6.1.6 运行控制	4-131
第4章 数控加工机床的选型			
4.1 选型依据	4-89	6.1.7 网络与通信	4-131
4.1.1 加工对象的分析	4-89	6.1.8 显示	4-131
4.1.2 多品种中小批量生产时的 选型	4-91	6.1.9 典型机床操作步骤	4-131
4.1.3 大批量生产时的选型	4-92	6.2 手动编程	4-134
4.2 选型的基本原则	4-92	6.2.1 概述	4-134
4.2.1 主参数的确定	4-92	6.2.2 坐标系	4-134
4.2.2 数控机床的精度指标	4-93	6.2.3 准备功能	4-136
4.2.3 数控机床的噪声和刚度	4-94	6.2.4 进给功能	4-146
4.2.4 数控机床的外观和色彩	4-94	6.2.5 插补功能	4-148
4.3 数控机床功能的选择	4-94	6.2.6 辅助功能	4-149
4.3.1 坐标轴的选择	4-94	6.2.7 程序结构	4-151
4.3.2 数控系统功能的选择	4-94	6.2.8 固定循环功能	4-151
4.3.3 辅助功能的选择和功能		6.2.9 宏程序	4-153
		6.2.10 刀具补偿功能	4-155

第4篇 数控加工

主编 李 斌(华中科技大学)

编写人

- 第1章 李斌
- 第2章 刘焕牢(湛江海洋大学)
- 第3章 谭波(华中科技大学)
- 第4章 田红亮(华中科技大学)
- 第5章 毛新勇(华中科技大学)
- 第6章 刘红奇(华中科技大学)
- 第7章 齐朝旭(华中科技大学)
- 第8章 李曦(华中科技大学)

第1章 数控加工的基本概念及数控加工系统

1.1 数控加工是促进现代制造业发展的高技术

1.1.1 数控加工技术是先进制造的基础技术

制造业是国民经济和社会发展的物质基础,是经济高速增长的发动机,产业结构优化升级的推动力。制造业的发展,依赖于先进的制造装备,其性能和水平的高低,直接影响着制造的效率、质量和效益。随着经济和技术的高速发展,经济建设和国防建设所需要的大、特、精、小等装备必须应用新的方法进行加工。数控机床的产生和发展,使得数控加工技术成为装备制造的核心关键技术。高效、精密的加工技术能够保证各种装备技术性能指标大幅度提高,在功能、水平、质量、品种、使用效果和价格等方面能更好地满足需求,现代的CAD/CAM, FMS(柔性制造系统)和CIMS(计算机集成制造系统)、敏捷制造和智能制造等,都是建立在数控加工技术之上。制造工业发展历程已经充分说明,现代数控加工技术已成为制造业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础技术。这是因为:

(1) 数控加工有利于提高生产效率 数控机床上可以优化切削用量,有效节省加工工时;还具有多工作台、多主轴,复合加工、自动变速、自动换刀和其他辅助操作自动化等功能,使辅助时间大为缩短,生产效率比普通机床高3~4倍,对大型、复杂型面零件的加工,其生产效率则可提高十几倍甚至几十倍。

(2) 数控加工有利于提高产品质量 数控机床本身的精度较高,加上利用软件进行精度补偿,使机床保持较高精度的稳定运行,同时机床是根据预先编制程序自动进行加工,可以避免人为的误差,使加工质量稳定,因此,不但加工精度高,而且质量稳定。

(3) 数控加工有利于产品的升级 数控机床是按照被加工零件的数字化程序进行自动加工的,当被加工零件形状、参数改变时,只要改变程序,不必更换凸轮、靠模、样板或钻镗模等专

用工艺装备,缩短生产周期,产品的升级、换代快,提高市场反应速度。

(4) 数控加工有利于提高经济效益 数控机床,特别是自动换刀的数控机床,在一次装夹的情况下,几乎可以完成零件的全部加工。现代的数控复合机床,一机多用,可以代替数台数控机床,大大减少工序之间的运输、测量和装夹等辅助时间,节省机床的占地面积,带来高的经济效益。

1.1.2 数控加工的基本概念

1. 基本术语

现代的机械加工所需要的装备已经广泛采用数控设备。为了便于讨论,下面给出几个概念的定义。

数字控制(Numerical Control, NC)是一种借助数字、字符或其他符号对某一工作过程(如加工、测量、装配等)进行可编程控制的自动化方法。

数控技术(Numerical Control Technology)是采用数字控制的方法对某一工作过程实现自动控制的技术。

数字控制系统(Numerical Control System)是实现数控技术相关功能的软硬件模块的有机集成系统。数字控制是相对模拟控制而言,数字控制系统中的信息是数字量,模拟控制系统中的信息是模拟量,数字控制系统是数控技术的载体。其特点是可用不同的字长表示不同精度的信息,可进行算术运算,也可以进行复杂的信息处理;可进行逻辑运算,还可以用软件来改变信息处理的方式或过程,因而具有柔性。数字控制系统已经广泛应用于机床、自动生产线、机器人、火炮、雷达跟踪系统等自动化设备。

进入20世纪90年代,由于微电子技术的迅速发展,数控系统以计算机硬件、软件资源为核心,故称为计算机数控系统(Computer Numerical Control, CNC)。

数字设备。如果一台设备(机床、锻压机、绘图机、工业机器人等),实现其自动工作过程的

命令是以数字形式来描述,则称为数字设备。数字设备是当前设备制造的方向。数字设备,特别是数控机床,是集光、机、电、液的高技术加工装备,价格较高,维护维修难度大,加工中的编程、调整又相对复杂,因此要求有一定数控技术基础的技能型人才来操作和维修。

数控机床(Numerical Control Machine Tools)是采用数字控制技术对机床的加工过程进行自动

控制的一类机床,是数字设备的一种,由于它在加工领域的数量大,种类繁多,因而应特别重视。

2. 数控加工与传统加工

如图 4.1-1 所示,在普通机床上进行零件加工时,操作者按照工序卡的要求,在加工过程中操作机床,不断改变刀具与工件的相对运动轨迹(位置和速度等)和加工参数等,进行切削加工,从而得到所需要的合格零件。

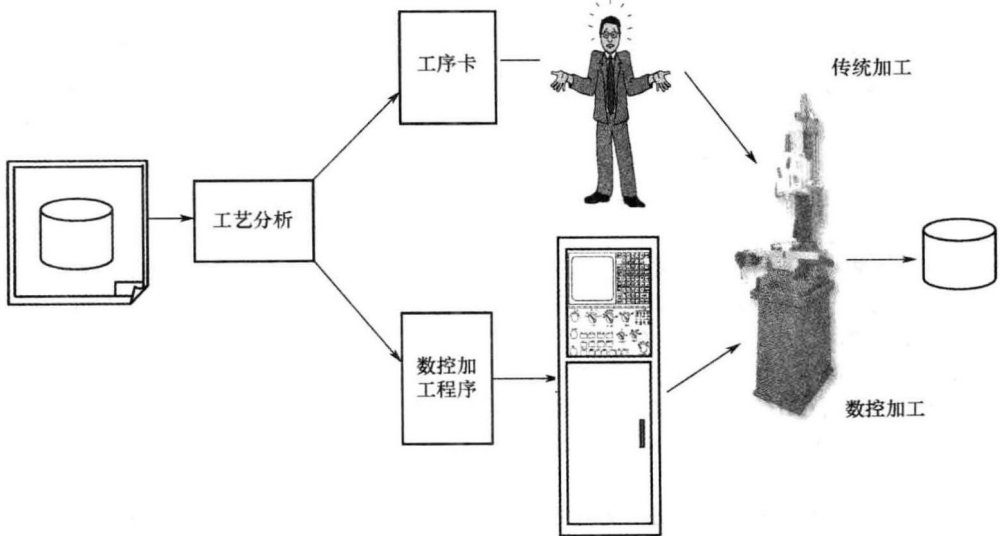


图 4.1-1 传统加工与数控加工过程的比较

在数控机床上,传统加工过程中的绝大部分的人工操作均被数控系统的自动控制所取代,其工作过程为:首先将刀具与工件的相对运动轨迹、加工过程中主轴速度和进给速度的变换、切削液的开关、工件和刀具的交换等几何信息和工艺信息数字化,通过计算机按规定的代码和格式编写成加工程序。然后将该程序送入数控系统,数控系统按照程序的要求,进行相应的运算、处理,发出控制命令,使各坐标轴、主轴以及辅助动作相互协调,实现刀具与工件的相对运动,自动完成零件的加工。

3. 数控加工过程信息的处理和流动

图 4.1-2 表示数控加工过程信息的处理和流动过程,它表示由零件加工程序表达的加工信息(几何信息和工艺信息),变换成各进给轴的位移指令、主轴转速指令和辅助动作指令,控制机床的加工轨迹和逻辑动作,是一个信息数据处

理、转换和流动的过程。首先对零件加工程序进行解释(译码),以程序段为单位转换成刀补处理程序所要求的数据结构(格式),该数据结构用来描述一个程序段解释后的数据信息,它主要包括: X、Y、Z 等坐标值;进给速度;主轴转速;G 代码;M 代码;刀具号;子程序处理和循环调用处理等数据或标志的存放顺序和格式。由于用户零件加工程序通常是按零件轮廓编制的,而数控机床在加工过程中控制的是刀具中心轨迹,因此在加工前必须将零件轮廓变换成刀具中心的轨迹进行刀补处理。然后是以系统规定的插补周期 Δt 定时运行,它将由各种线形(直线、圆弧等)组成的零件轮廓,按程序给定的进给速度 F ,实时计算出各个进给轴在 Δt 内位移指令 $(\Delta X_i, \Delta Y_i, \dots)$,并送给进给伺服系统,实现成形运动。同时逻辑控制器 PLC (Programmable Logic Controller)以 CNC 内部和机床各行程开关、

传感器、按钮、继电器等开关量信号状态为条件，并按预先规定的逻辑顺序对诸如主轴的起

停、换向，刀具的更换，工件的夹紧、松开，液压、冷却、润滑系统的运行等进行控制。

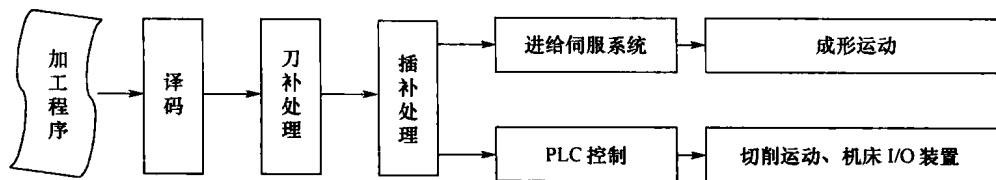


图 4.1-2 数控加工中信息处理、流动过程

1.1.3 先进制造对数控加工技术的要求

进入 21 世纪，制造业呈现出一些新的特征：产品绿色化，所提供的产品必须在全寿命周期资源消耗低、无污染或少污染，以及可回收、可重用；参数极端化，产品向高效、高参数、大型化或微型化、成套化的方向发展；生产过程自动化，并向信息化、柔性化的方向发展；需求个性化，用户对装备需求的多样化、分散化和个性化，未来的市场将更趋于动态多变；产业集群化，同类企业或相关企业在一个地区有机地高度聚集，形成集群化的竞争优势；业务服务化，服务在价值链中的比重上升，制造业不仅要为用户提供有形的装备，还要提供越来越好的服务。为满足新的要求，对加工技术有了更高的要求。

1. 提高运行速度，缩短加工时间

实现高效的高速加工已成为现代加工技术的重要发展趋势。运行高速化是指：使进给率、主轴转速、刀具交换速度、托盘交换速度实现高速化，并且具有高加（减）速率。目前的水平是机床主轴转速从以前的 8000 ~ 12000r/min 提高到 100000r/min，并向 200000r/min 逼近；在进给速度方面，当分辨率为 $1\mu\text{m}$ 时，最大快速移动速度可达 240m/min。在最高进给速度下可获得复杂型面的精确加工，在加工长度为 1mm 的小线段时，最大进给速度达 30m/min，并且具有 1.5g（1.5 倍重力加速度，下同）的加减速率。

高速加工不仅是指设备，而是机床、刀具、夹具和数控系统以及编程技术的集成。机床的高速化需要新的数控系统、高速电主轴和高速伺服进给驱动，以及机床结构的优化和轻量化。在提高速度的同时要求提高运动部件起动的加速度，由过去一般机床的 0.5g 提高到 1.5g ~ 2g，最高可达 15g。直线电动机在机床上开始使用，主轴上大量采用内装式主轴电动机。

2. 加工高精度

近 50 年内，加工精度平均每 8 年提高 1 倍，普通加工由 0.3mm 提升至 0.003mm，精密加工由 $3\mu\text{m}$ 提升至 $0.03\mu\text{m}$ ，超精密加工则由 $0.3\mu\text{m}$ 提升至 $0.003\mu\text{m}$ 。目前的轮廓控制和定位精度已经达到了纳米量级。

为提高加工精度，机床不仅要具有很高的几何精度，还必须具有很高的运动轨迹精度，对数控机床精度的要求已经不局限于静态的几何精度、运动精度、热变形和振动的监测和补偿越来越多地获得重视，数控机床的定位精度已由一般的 0.01 ~ 0.02mm 提高到 0.008mm 左右，亚微米级机床达到 0.0005mm 左右，如加工中心的定位误差为 $\pm 0.4\mu\text{m}$ ，重复定位精度为 $\pm 0.3\mu\text{m}$ 。纳米级机床达到 0.005 ~ $0.01\mu\text{m}$ ，最小分辨率为 1nm 的数控系统和机床也已问世。除提高机械设备的制造精度和装配精度外，还可通过减少数控系统的误差和采用补偿技术来达到。在减少 CNC 系统控制误差方面，通常采用提高数控系统的分辨率，以微小程序段实现连续进给，使 CNC 控制单位精细化。提高位置检测精度以及位置伺服系统精度可采用前馈控制与非线性控制等方法。在采用补偿技术方面，除采用齿隙补偿、丝杠螺距误差补偿和刀具误差补偿等技术外，近年来对设备的热变形误差补偿和空间误差的综合补偿技术的研究已成为世界范围的研究热点。研究表明，综合误差补偿技术的应用可将加工误差减少 60% ~ 80%。

3. 加工复合化

加工复合化是指工件在一台设备上一次装夹后，通过自动换刀等各种措施，来完成多工序和多表面的加工，从而打破了传统的工序界限和分开加工的工艺规程。复合化包括工序复合（如车、铣、镗、钻、攻螺纹等）、不同工艺复合（集车、

铣、滚齿、磨、淬火等不同工艺的复合加工机床可对大直径、短长度回转体类零件进行复合加工)、切削与非切削工序复合(如铣削与激光淬火装置的复合、冲压与激光切割的复合、金属烧结与镜面切削的复合、加工与清洗融于一台机床上的复合等)。复合加工不仅提高了工艺的有效性,而且由于零件在整个加工过程中只有一次装夹,大大缩短了生产过程链,工序间的加工余量大为减少,既能减少装卸时间,省去工件搬运时间,提高每台机床的能力,减少半成品库存量,又能保证和提高形位精度,打破了传统工序界限和分开加工的工艺规程。工件越复杂,它相对传统工序分散的生产方法的优势就越明显。由于过程链的缩短和设备数量的减少,车间占地面积和维护费用也随之减少,从而降低了固定资产的总投资和生产成本。

4. 加工过程智能化

随着人工智能技术的不断发展,数控加工技术智能化程度不断提高,具体体现在以下几个方面:

(1) 加工过程自适应控制技术 通过监测加工过程中的刀具磨损、破损、切削力、主轴功率等信息并将其反馈,利用传统的或现代的算法进行调节运算,实时修调加工参数或加工指令,使设备处于最佳运行状态,以提高加工精度、降低工件表面粗糙度以及提高设备运行的安全性。Mitsubishi Electric 公司用于数控电火花成形机床的“Miracle FuZZY”自适应控制器,即利用基于模糊逻辑的自适应控制技术,自动控制和优化加工参数;日本牧野公司在电火花数控系统 MAKINO-MCE20 中,用专家系统代替操作人员进行加工过程监控,从而降低了对操作者具备专门技能的要求。

(2) 加工参数的智能优化与选择 将加工专家或技工的经验、切削加工的一般规律与特殊规律,按人工智能中知识表达的方式建立知识库存入计算机中,以加工工艺参数数据库为支撑,建立专家系统,并通过它提供经过优化的切削参数,使加工系统始终处于最优和最经济的工作状态,从而达到提高编程效率和加工工艺技术水平,缩短生产准备时间的目的。目前,已开发出带自学习功能的神经网络电火花加工专家系统。日本大隈公司的 7000 系列数控系统带有人工智

能式自动编程功能。

(3) 故障自诊断功能 故障诊断专家系统是诊断装置发展的最新动向,其为数控设备提供了一个包括二次监测、故障诊断、安全保障和经济策略等方面在内的智能诊断及维护决策信息集成系统。采用智能混合技术,可在故障诊断中实现以下功能:故障分类、信号提取与特征提取、故障诊断专家系统、维护管理。

5. 加工过程网络化

随着信息技术和数字计算机技术的发展,尤其是计算机网络的发展,世界正在经历着一场深刻的“革命”。在以网络化、数字化为基本特征的时代,网络化、数字化以及新的制造理念深刻地影响 21 世纪的制造模式和制造观念。现代加工技术,必须适应新制造模式和观念的变化,必须满足网络环境下制造系统集成的要求。具有网络功能加工技术,可以满足诸如加工过程远程故障诊断、远程状态监控、远程加工信息共享、远程操作(危险环境的加工)和远程培训等要求。

1.1.4 数控加工的适应范围

随着技术的发展,数控机床的功能、性能不断增加和提高,数控加工的应用范围也不断扩大,但是在目前还不能完全取代普通机床。根据数控加工的特点及国内外大量应用实践,数控加工一般可按适应程度将零件分为下列三类。

1. 最适宜应用数控加工的零件

形状复杂,用数学模型描述的复杂曲线或曲面轮廓零件,且加工精度要求高;具有难测量、难控制进给、难控制尺寸的不开敞内腔的壳体或盒形零件;必须在一次装夹中完成铣、镗、铹、铰或攻螺纹等多工序的零件,此几类零件在普通机床上无法加工或虽然能加工但需要大量工时,且很难保证产品质量,更难保证产品的均一性,而用数控加工可以满足要求。

2. 较适宜应用数控加工的零件

在普通机床上加工时极易受人为因素(如情绪波动、体力强弱、技术水平高低等)干扰,且零件价值高,一旦质量失控便造成重大经济损失的零件;在普通机床上加工时必须制造复杂专用工艺装备的零件;需要多次更改设计后才能定型的零件;在普通机床上加工需要作长时间调整的零