

数控机床铣削加工

直接编程技术

孙德茂 著



第2版

N4 G01 G12 RC180 HA1	(P4) 工件在刀具右侧
N5 G02 I0 J0 R21.5	(P5)
N6 G01	(P6)
N7 G02 I-97.5 J0 R10	(P7)
N8 G01 RC0 HA1	(P8)
N9 G03 R16.5	(P9)
N10 G02 I-37.770 J13.166 R16 HA2	(P10)
N11 G03 R20	(P11)
N12 G02 I0 J-10 R31.5	(P12)
N13 G03 I51.5 J-6 RB80	(P13)
N14 G00 Z300 M05 M02	



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

数控机床铣削加工直接编程技术

第2版

孙德茂 著



机械工业出版社

本书对数控机床铣削加工的直接编程技术进行了详细介绍,概述了数控编程的相关标准和工艺处理;翔实地介绍了 ISO 代码的编程指令和用户宏程序功能;全面地介绍了数控指令的加工应用和用户宏程序功能的编程实例,其中不少是来自实际生产中使用的加工程序;此外还简要地介绍了编程引导 0i 和 5 轴加工。

书中内容同样适用于钻削、镗削、磨削等刀具旋转的切削加工。

本书以数控功能与加工实际紧密结合,内容翔实全面,有的还给出了算法,并有多处作者的独立见解和研究成果,是一本实用性较强的数控技术用书。可供从事数控铣削等加工的编程员和操作人员、数控技术工作的工程技术人员使用,也可供高等技术院校相关专业师生使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

数控机床铣削加工直接编程技术/孙德茂著. —2 版. —北京:机械工业出版社, 2013. 8

ISBN 978-7-111-43989-9

I. ①数… II. ①孙… III. ①数控机床—铣床—程序设计 IV. ①TG547

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 214917 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: 张秀恩 责任编辑: 张秀恩

版式设计: 霍永明 责任校对: 刘怡丹

封面设计: 陈 沛 责任印制: 李 洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2014 年 1 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 22.25 印张 · 551 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-43989-9

定价: 55.00 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

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

第2版前言

本书第1版于2004年7月出版，连续印刷4次，达18000册，受到了广大读者的欢迎。

本书第1版写成于2003年8月26日，到第2版脱稿2013年2月23日，将近十年。这十年来，数控系统的基本编程功能并没有大的变化，但增加了不少新功能。因此在再版时，原书6章的内容，除作部分修改外，增加了圆柱插补、先行控制和AI先行控制高速切削功能，以及简易同步控制等内容；删除了用户宏程序功能A、车削数控系统改造成单轴外圆磨削系统的宏程序编程（在“车削”和“磨削”两书中都有介绍）和数控系统编程能力的现状与展望等内容；在编程应用中增加了五面加工和用角度头的斜面及斜孔加工的编程等内容。

新增加第7章编程引导0i，介绍了编制程序的创建和工艺、G代码、M代码帮助，固定加工循环操作和数据设定，轮廓编程的操作、数据设定和计算。

新增加第8章5轴加工，介绍了5轴加工的机床构成，3维圆弧插补、平滑插补、纳米平滑加工、NURBS插补等插补功能，AI轮廓控制I和II，刀具轴向刀具长度补偿，5轴加工用刀具中心点控制，倾斜加工指令，倾斜旋转轴控制和5轴加工用刀具半径补偿等内容。

本书力求保持原书的内容翔实、举例切合实际的风格。

书中的疏漏和错误之处，敬请读者指正。

作 者

2013年2月23日

第1版前言

随着现代制造技术的发展和数控机床的日渐普及，对数控机床的编程和操作方面的人才需求在大幅度增加，本书力图从数控系统的功能和数控机床的应用两个方面来满足使用者的需求。

书中对数控铣削加工讲述的内容，也适用于钻削加工、镗削加工、磨削加工等刀具旋转的切削加工。

全书共分6章。第1章编程基础，概述了数控编程的相关标准及工艺处理，准确地介绍了相关知识。第2章基本编程指令，翔实地介绍了编程的基本指令，部分指令介绍了系统的算法。第3章简化编程和补偿功能，翔实地介绍了固定循环，轮廓直接编程（GAP、PGP、GTL），刀具补偿功能，比例缩放，坐标旋转功能和刀具补偿测量功能，对刀具半径补偿功能提供了算法。第4章ISO代码指令编程应用，从孔加工、轮廓加工、平面加工到曲面加工，全面地介绍了指令应用实例，对初学者讲述了程序的编写方法，提出了对程序的评价标准和优化，程序运行中安全问题和防范措施，其中有大量作者多年的实践经验。第5章用户宏程序功能，翔实全面地介绍了用户宏功能A、B，外部输出指令，中断型用户宏程序和跳跃工件测量功能。第6章用户宏程序功能的编程应用，全面介绍了宏程序在功能开发方面的应用，如固定循环、孔位计算、挖腔宏指令、几何轮廓直接编程（GDP）功能、非圆曲线轮廓加工、组合解析曲面加工、数控系统开发和测量功能等诸多方面的实例，有的可以直接使用，有不少是作者多年的研究成果公诸于世。

后记，数控系统编程能力的现状与展望，综述了目前数控系统的功能现状，以及发展趋势，使读者对数控系统有个宏观的了解。

本书第1章到第4章，可供数控编程的初学者及普通使用者使用。第5章及第6章，可供普通使用者提高及工程技术人员使用。

书中的疏漏和错误之处，敬请读者指正。

作 者

2003年8月26日

目 录

第2版前言

第1版前言

第1章 编程基础 1

1.1 数控机床的组成及工作原理 1

1.1.1 数控机床的组成 1

1.1.2 数控机床的工作原理 1

1.2 零件加工程序的编制方法 2

1.2.1 概述 2

1.2.2 直接编程 3

1.2.3 CAM 辅助编程 3

1.2.4 直接编程与辅助编程的比较 4

1.3 坐标系及坐标方向 4

1.3.1 标准坐标系 4

1.3.2 坐标轴及方向的确定 5

1.3.3 电气坐标系 6

1.3.4 机床坐标系 6

1.3.5 工件坐标系 6

1.4 程序编制的工艺处理 7

1.4.1 确定机床和数控系统 7

1.4.2 工件的安装与夹具的确定 7

1.4.3 编程原点的设定 7

1.4.4 刀具的确定 8

1.4.5 确定走刀路线和工步顺序 9

1.4.6 换刀点及对刀点的确定 10

1.5 编写数控加工技术文件 10

1.6 编写零件加工程序 11

第2章 基本编程指令 13

2.1 概述 13

2.2 准备功能 (G 功能) 14

2.3 插补功能 15

2.3.1 插补原理 15

2.3.2 定位 (G00) 16

2.3.3 单方向定位 (G60) 17

2.3.4 直线插补 (G01)

(含直线插补算法) 17

2.3.5 圆弧插补 (G02、G03)

(含圆弧插补算法) 20

2.3.6 螺旋线插补 (G02、G03) 27

2.3.7 圆柱插补 (G07.1) 28

2.3.8 等螺距螺纹切削 (G33) 30

2.4 进给功能 31

2.4.1 快速进给速度 31

2.4.2 切削进给速度 (G94、G95) ... 31

2.4.3 切削进给的速度控制 (G09、G61、G64、G63、G62) 33

2.4.4 暂停 (G04) 35

2.4.5 自动加减速 36

2.5 自动返回参考点 36

2.5.1 自动返回参考点 (G28) 36

2.5.2 从参考点自动返回 (G29) 37

2.5.3 自动返回参考点校验 (G27) ... 38

2.5.4 自动返回第二、三、四参考点 (G30) 38

2.6 坐标系 38

2.6.1 机床坐标系 (G53) 39

2.6.2 工件坐标系 39

2.6.3 局部坐标系 (G52) 45

2.6.4 坐标平面选择 (G17、G18、G19) 46

2.7 坐标尺寸指令 47

2.7.1 绝对值指令 (G90) 和增量值指令 (G91) 47

2.7.2 极坐标系指令 (G15、G16) 47

2.7.3 英制/米制转换 (G20、G21) ... 49

2.7.4 标准型小数点输入/计算器型小数点输入 49

2.8 主轴速度功能 (S 功能) 50

2.8.1 用代码指定主轴速度 51

2.8.2 直接指定主轴速度 51

2.9 刀具功能 (T 功能)	51	3.6.2 刀具长度自动测量 (G37)	101
2.9.1 刀具选择功能	51	3.6.3 刀具偏置补偿 (G45 ~ G48)	102
2.9.2 刀具寿命管理	52	3.6.4 刀具半径补偿 C (G40 ~ G42)	106
2.10 辅助功能 (M 功能、B 功能)	57	3.6.5 刀具半径补偿 C 详述 (含刀具 半径补偿偏置矢量的计算) ...	109
2.10.1 辅助功能 (M 功能)	57	3.6.6 刀具补偿值、补偿号和用程序 输入补偿值 (G10)	136
2.10.2 第二辅助功能 (B 功能)	60	3.7 比例缩放功能 (G50、G51)	137
2.11 程序的结构	61	3.7.1 比例缩放功能	137
2.11.1 概述	61	3.7.2 镜像加工	139
2.11.2 程序区以外的程序组成部分 ...	62	3.8 可编程镜像 (G50.1、G51.1)	140
2.11.3 程序部分的构成	63	3.9 坐标系旋转功能 (G68、G69)	141
2.11.4 子程序 (M98、M99)	66	3.9.1 坐标系旋转功能	141
第3章 简化编程和补偿功能	69	3.9.2 坐标系旋转功能与其他功能 的关系	143
3.1 固定循环	69	3.10 高速切削功能	145
3.1.1 概述	69	3.10.1 先行控制 (G08)	145
3.1.2 取消固定循环 (G80)	73	3.10.2 AI 先行控制	145
3.1.3 钻孔加工循环 (G81、G82、 G73、G83)	73	3.10.3 AI 轮廓控制	148
3.1.4 攻螺纹循环 (G74、G84)	76	3.11 简易同步控制	149
3.1.5 镗孔循环 (G85、G89、G86、 G88、G76、G87)	78	3.12 可编程参数输入 (G10)	150
3.1.6 指定固定循环时的注意事项	80	第4章 ISO 代码指令编程应用	152
3.1.7 固定循环功能应用举例	81	4.1 零件加工程序的编写	152
3.1.8 外部操作功能 (G81)	83	4.2 孔加工程序的编程	157
3.2 任意角度倒角与倒圆	83	4.2.1 用孔加工刀具加工孔	157
3.3 ECS 的 GAP 几何轮廓自动编程	85	4.2.2 用铣刀铣孔	163
3.3.1 几何元素的定义	85	4.2.3 螺纹的切削 (铣削) 加工	165
3.3.2 目标点的判别	86	4.2.4 孔加工中典型孔位的编程	166
3.3.3 程序段数据	87	4.3 轮廓加工编程	167
3.3.4 GAP 编程举例	89	4.3.1 轮廓加工的编程	167
3.4 NUM 的 PGP 几何轮廓自动编程	91	4.3.2 环形封闭轮廓的编程	169
3.4.1 几何元素的描述	91	4.3.3 旋转重复图形轮廓的编程	170
3.4.2 特征点的判别	91	4.3.4 平移图形轮廓的编程	172
3.4.3 程序段格式	92	4.3.5 镜像加工编程	175
3.4.4 程序段数据	92	4.3.6 多件加工程序的编制	176
3.4.5 倒棱与过渡圆弧编程举例	94	4.3.7 带回转轴轮廓的编程	177
3.4.6 PGP 编程举例	94	4.3.8 非圆曲线轮廓的编程	177
3.5 A_B 的 GTL 几何轮廓自动编程	96	4.3.9 列表曲线轮廓的编程	178
3.5.1 一般规定	96	4.4 平面加工程序的编制	179
3.5.2 几何元素定义	96	4.4.1 无界平面加工程序的编制	179
3.5.3 GTL 编程举例	97	4.4.2 挖腔程序的编制	179
3.6 刀具补偿功能	98		
3.6.1 刀具长度补偿 (G43、G44、 G49)	98		

4.4.3 不规则形状挖腔程序的编制	181	6.4 铣孔宏程序的编程	251
4.4.4 带孤岛的挖腔程序的编制	181	6.5 规则形状挖腔宏程序的编程	252
4.5 五面加工	182	6.5.1 圆孔挖腔宏程序的编制	252
4.6 斜面或斜孔的加工	183	6.5.2 矩形腔挖腔宏程序的编制	255
4.7 曲面加工程序的编制	183	6.6 几何轮廓直接编程 (GDP) 功能的编程	260
4.8 零件加工程序的评价和优化	184	6.6.1 几何轮廓的分析	261
4.8.1 零件加工程序的评价	184	6.6.2 软件中使用的符号和含义	263
4.8.2 用 CAM 编制的零件加工程序的优化	185	6.6.3 数据的输入	263
4.9 零件加工程序运行中的安全问题	186	6.6.4 数据区的初始化处理	264
4.9.1 程序数据的设置方法	186	6.6.5 数据的转储和识别	264
4.9.2 安全换刀子程序	188	6.6.6 直线数据的输入与转储	265
4.9.3 存储式行程检查的应用	189	6.6.7 圆弧数据的输入与转储	265
第5章 用户宏程序功能	191	6.6.8 数据的还原、分类与整理	266
5.1 用户宏程序功能 B	192	6.6.9 直线—直线 (含等边倒角、过渡圆弧) 的宏功能编程	269
5.1.1 变量	192	6.6.10 直线—圆弧 (含等边倒角、过渡圆弧) 的宏功能编程	271
5.1.2 系统变量	194	6.6.11 圆弧—直线 (含等边倒角、过渡圆弧) 的宏功能编程	275
5.1.3 运算指令	205	6.6.12 圆弧—圆弧 (含等边倒角、过渡圆弧和切线) 的宏功能编程	280
5.1.4 控制指令	209	6.6.13 软件运行测试	285
5.1.5 宏程序调用	214	6.6.14 编程举例	286
5.1.6 用户宏程序语句和 NC 语句	224	6.7 非圆曲线轮廓的宏程序编程	288
5.1.7 用户宏程序的存储	227	6.7.1 平面非圆曲线轮廓的宏程序编程	288
5.1.8 用户宏程序使用限制	227	6.7.2 柱面曲线轮廓的宏程序编程	289
5.1.9 外部输出指令	228	6.7.3 空间曲线轮廓的宏程序编程	294
5.1.10 中断型用户宏程序	231	6.8 组合解析曲面加工的宏程序编程	295
5.2 格式数据输入功能	236	6.9 用宏程序功能编制零件测量数据的处理程序	303
5.2.1 显示格式名菜单	236	6.10 计算机在数控编程中的应用	308
5.2.2 格式数据显示	238	第7章 编程引导 0i	309
5.2.3 格式数据输入功能使用的子程序, 宏指令及代码	240	7.1 概述	309
5.3 跳跃功能	241	7.2 编制程序	309
5.3.1 跳跃功能 (G31)	241	7.2.1 启动	309
5.3.2 转矩极限跳跃 (G31 P99/P98)	243	7.2.2 创建新的零件加工程序	309
第6章 用户宏程序功能的编程应用	245	7.2.3 工艺帮助	310
6.1 用户宏程序编程的一般方法	245	7.2.4 G 代码帮助	310
6.2 可变切深深孔加工固定循环功能的编程	246	7.2.5 M 代码帮助	311
6.3 典型孔位计算宏程序的编程	248	7.3 固定加工循环	311
6.3.1 圆弧均布孔位计算宏程序的编程	248	7.3.1 操作	312
6.3.2 矩阵均布孔位计算宏程序的编程	249		

7.3.2 各固定循环的数据	312	8.3.2 平滑插补 (G05.1Q2)	325
7.4 轮廓编程	315	8.3.3 纳米平滑加工	326
7.4.1 轮廓编程的操作	315	8.3.4 NuRBS 插补 (G06.2)	328
7.4.2 轮廓图形数据详述	317	8.4 AI 轮廓控制 I 和 AI	
7.4.3 轮廓计算详述	317	轮廓控制 II (G05.1)	330
7.4.4 辅助计算详述	320	8.5 刀具轴向刀具长度补偿	
7.4.5 其他	322	(G43.1)	331
第8章 5轴加工编程	324	8.6 5轴加工用刀具中心点	
8.1 概述	324	控制 (TCP)	334
8.2 5轴加工的机床构成	324	8.7 倾斜面加工指令	342
8.3 插补功能	324	8.8 倾斜旋转轴控制	344
8.3.1 三维圆弧插补		8.9 5轴加工用刀具半径补偿	344
(G02.4/G03.4)	324		

第1章 编程基础

1.1 数控机床的组成及工作原理

1.1.1 数控机床的组成

数控机床是由数控系统和机床本体两大部分组成的。

数控系统主要由数控装置（包括内置 PLC）、进给伺服系统、主轴伺服系统等部分组成。进给伺服系统又由进给驱动单元和进给电动机组成。主轴伺服系统由主轴驱动单元和主轴电动机组成。数控系统按是否有位置检测装置，可分为开环控制和闭环控制。

机床本体由机床机械部件、强电、液压、气动、润滑系统等组成。

数控系统一般由数控系统生产厂制造、机床制造厂将其连到机床上。数控系统控制机床的切削运动和顺序逻辑动作。控制机床的顺序逻辑动作是数控系统通过 PLC（可编程序机床逻辑控制器）或称 PMC（可编程序机床控制器）（多为内置），经机床制造厂编制机床的顺序逻辑控制程序，使之能执行顺序逻辑动作。另外，机床制造厂还需设置机床的固有参数，使通用的数控系统个性化，实现数控系统与机床的有机结合。

数控系统控制机床对工件的切削运动和特定的顺序动作，是数控系统运行由机床用户编制的零件加工程序实现的。所以，零件加工程序也是数控机床不可缺少的重要组成部分。如果零件加工程序编不出来，机床便无法工作。

铣削和镗削加工的数控机床，包括数控铣床、数控镗床和铣镗加工中心机床（简称加工中心）等。

钻削加工的数控机床包括数控钻床、数控铣钻床和钻削加工中心等。

磨削加工的数控机床包括数控平面磨床、数控坐标磨床等。

数控机床的组成决定了它们同属工序集中机床，都具备铣削、钻孔、攻螺纹和镗孔功能。

FANUC Oi 系统的组成框图见图 1-1。

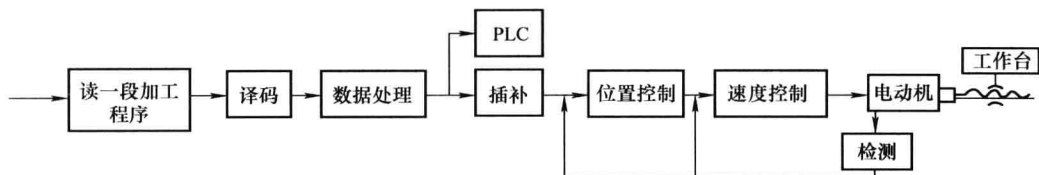
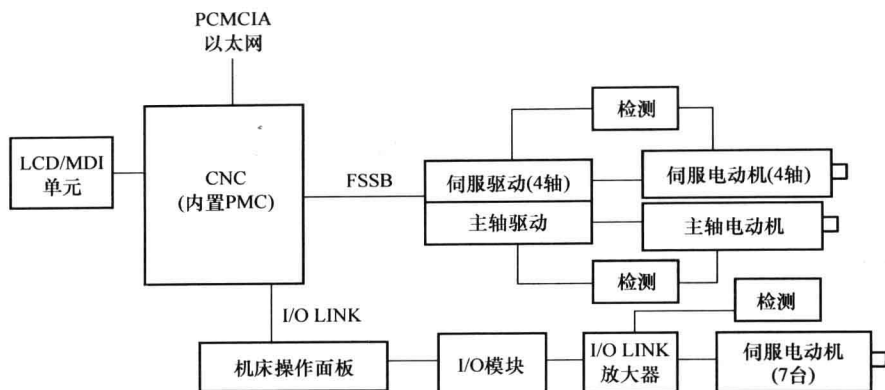
1.1.2 数控机床的工作原理

数控系统运行零件加工程序，以实现数控机床对零件的加工。

首先，数控系统将零件加工程序逐段译码，数据处理。数据处理又包括刀心轨迹计算和进给速度处理两部分。

系统将经过数据处理后的程序数据分成两部分。一部分是机床的顺序逻辑动作，这些数据送往 PLC，经处理后，控制机床的顺序动作。送往 PLC 的数据包括：

（1）辅助控制功能（M 功能） 控制主轴旋转和停止，冷却液的开和关，工作台的交换，刀具的交换，以及机床的其他开关动作。



须按照数控机床的规定进行编程。

按照图样及工艺编制零件加工程序，有直接编程和用 CAM 辅助编程两种。本书以 FANUC 0iM 为例，介绍铣削加工的直接编程技术。因各系统的功能差别较大，机床更是性能各异，在实际编程时，要以机床的说明书为准。

1.2.2 直接编程

直接编程是指程序员用数控机床提供的指令直接编写出零件加工程序及相关技术文件^①。由于直接编程能充分发挥数控系统的功能及编程员的工艺和加工经验；不必再用其他编程设备，随着数控系统编程功能的不断增强，直接编程有着广阔的应用前景。

直接编程按其数据输入及处理方式，可分为三类：

第1类，用 ISO（国际标准化组织）代码编程。一个代码代表一个意义或刀具的一步运动，或代表一组意义或一组运动。按其性质，可分为基本代码编程和简化编程。简化分为两方面，一方面简化是一个指令代表几步甚至几十步的运动，如固定循环、宏指令等。另一方面简化是简化数值点的计算。如任意角度的倒角、倒圆的自动计算，美国 A-B 公司的 GTL 编程，意大利 ECS 公司的 GAP 编程，法国 NUM 的 PGP 编程，都是系统自动计算几何元素的基点。另外，由于数控系统开发了样条插补（NURBS）功能，可以直接处理离散点。又开发了空间圆弧插补功能，有的还可加工曲面，使直接编程能力不断提高。

第2类，用户宏程序编程。系统提供了变量、数据计算、程序控制等功能，用户用这些功能去编程，完成一个功能或一组功能的加工。用户宏程序功能使平面非圆曲线、柱面曲线、空间解析曲线及曲面的编程变得简捷。用户宏程序还可以编制其他功能，如测量功能、控制功能等。

第3类，会话编程，它用图形进行数据输入或用对话型 C 语言编程，数据经系统内部处理后，生成 ISO 代码加工程序，如编程引导 0i。

1.2.3 CAM 辅助编程

CAM 又称计算机辅助制造，它能够生成零件加工程序，但编程机要求的数据仍需程序员编入。零件源程序是编程机经前置处理、后置处理，生成的零件加工程序。由于它的强大的数据处理功能，被广泛地应用在自由曲面的三轴至五轴的数控编程中。但由于它的位置处理功能相对较低，生成的程序较长，影响了它的应用效果。由于数控系统功能的提高，现已基本具备 CAM 辅助编程中的平面（2D）编程功能。

CAM 辅助编程就其源程序的生成方法，可分为：

（1）APT 语言编程 用 APT 语言对工件、刀具的几何形状及刀具相对工件的运动进行描述，产生刀位文件，再经后置处理，生成数控加工程序。

（2）图形输入编程 以图形交互方式生成工件的几何形状及刀具相对工件的运动，再生成数控加工程序。

（3）CAD/CAM 编程系统 通过计算机辅助设计（简称 CAD）建立的几何模型为基础，再以计算机辅助制造（简称 CAM）为手段，生成数控加工程序。

① 原称手工编程和自动编程。实际上，随着数控系统功能的提高和计算机的普及，手工编程的几个步骤，例如数值计算、编写加工程序单、制作穿孔纸带等，基本上不用手工进行了，而且，早已实现了无纸带加工。因此，按对象区分为直接编程和辅助编程。直接编程，即直接对数控机床编程。而辅助编程用计算机辅助编程。——作者注。

1.2.4 直接编程与辅助编程的比较

直接编程和辅助编程的加工程序的生成过程比较如图 1-3 所示。

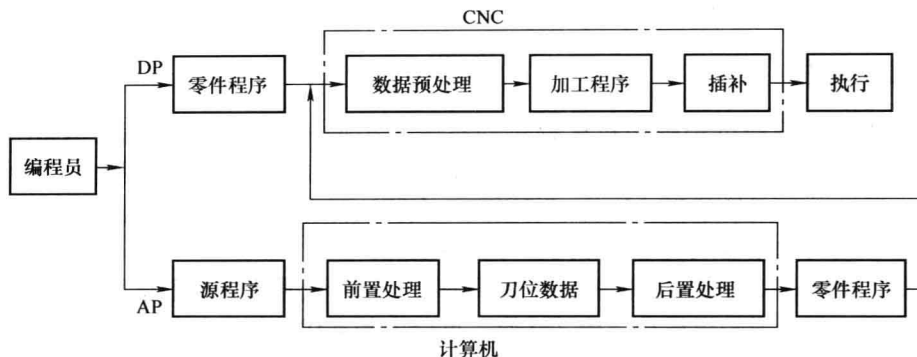


图 1-3 直接编程和辅助编程的加工程序的生成过程比较

直接编程，程序员要编制 CNC 能识别和处理的零件程序，并把它存入 CNC 中。当系统执行该程序时，要对零件程序进行数据预处理。根据零件程序指令的不同，执行的处理也不同。如对要计算的基点进行计算，对宏指令进行还原，对用户宏程序进行处理，如果按轮廓编程，要进行刀心轨迹计算，最后变成可执行的加工程序，经插补处理后执行。

辅助编程，程序员要编制计算机能识别和处理的源程序，并把它存入计算机中。当编程机处理该程序时，经前置处理得到刀位数据（文件），经后置处理得到零件程序并存储。再将其转存到 CNC 中或直接加工。当 CNC 执行该程序时，也要将其转换成可执行的加工程序，经插补处理后执行。因此，辅助编程编写的是源程序，处理成零件程序。如果辅助编程的后置处理软件可以处理所有的 CNC 的零件程序指令，那么，直接编程的零件程序与辅助编程的零件程序将是一致的。

由此可见，不管是直接编程还是辅助编程，所编的程序都不是 CNC 可执行的加工程序（插补的程序）。这个加工程序，CNC 是不存储的，而是实时处理实时执行的。

1.3 坐标系及坐标方向

以数字量描述坐标，需要建立坐标系。数控机床用户、数控机床制造厂及数控系统生产厂家要统一，则必须有一个统一的坐标系标准。

1.3.1 标准坐标系

国际标准化组织（ISO）对数控机床的坐标和方向制订了统一的标准（ISO 841:2001），我国也等同采用了这个标准，制定了 GB/T 19660—2006 机床数值控制坐标和运动命名。

标准规定标准坐标系为右手直角笛卡儿坐标系^①。规定基本的直线运动坐标轴用 X、Y、

① 并联机床（又称六条腿机床）并未按标准坐标系设计。——作者注。

Z 表示, 围绕 X 、 Y 、 Z 轴旋转的圆周进给坐标轴分别用 A 、 B 、 C 表示。规定空间直角坐标系 X 、 Y 、 Z 三者的关系及其方向由右手定则判定, 拇指、食指、中指分别表示 X 、 Y 、 Z 轴及其方向, A 、 B 、 C 的正方向分别用右手螺旋法则判定, 即拇指分别代表 X 、 Y 、 Z 的正向, 则其余 4 指握拳代表回转轴正向。工件固定、刀具移动时采用上面规定的法则; 如果工件移动、刀具固定时, 正方向反向, 则加 “'” 表示, $+X$ 、 $+Y$ 、 $+Z$ 变为 $+X'$ 、 $+Y'$ 、 $+Z'$, 如图 1-4 所示。

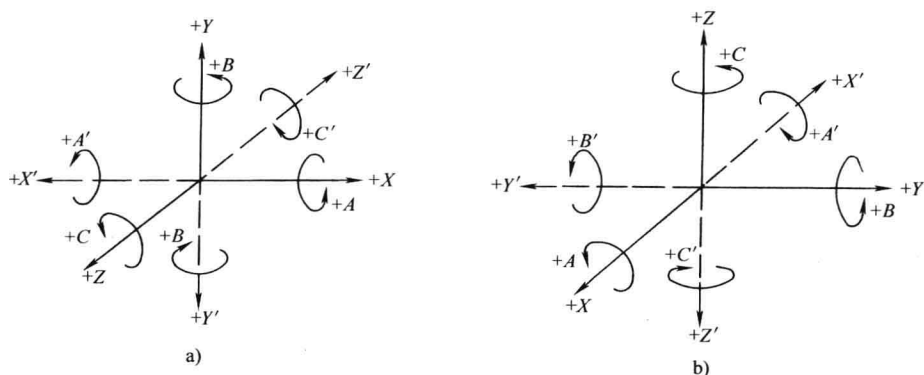


图 1-4 右手直角笛卡儿坐标系

a) Z 轴为卧式时 b) Z 轴为立式时

这样规定之后, 程序员在编程时不必考虑具体的机床是工件固定, 还是工件移动的情况, 永远假定工件不动, 刀具移动来决定机床坐标的正方向。

1.3.2 坐标轴及方向的确定

标准规定: 机床某部件运动的正方向, 是增大工件和刀具之间距离的方向。

(1) Z 轴 Z 轴是由传递切削力的主轴决定的。对于铣、钻、镗等机床, 主轴带动刀具旋转, 与主轴平行的坐标轴即为 Z 轴。在钻、镗加工中, 钻入和镗入工件的方向为 Z 轴的负方向, 而退出的方向则为正方向。

(2) X 轴 X 轴一般是水平的, 与工件装夹基面平行。对于刀具旋转的机床, 如铣床、镗床、钻床等, 如 Z 轴是垂直的, 当面朝刀具主轴向立柱看时, X 轴的正方向指向右。如 Z 轴是水平的, 当从主轴向工件方向看时, X 轴的正方向指向右。

(3) Y 轴 Y 轴垂直于 X 、 Z 轴, 根据 X 和 Z 轴的正向, 按右手直角笛卡儿坐标系判断。

(4) 回转运动 A 、 B 、 C 轴 表示其轴线相应地平行于 X 、 Y 、 Z 坐标的回转运动。

(5) 附加坐标轴 如果在 X 、 Y 、 Z 主要轴之外, 还有平行于它们的直线运动坐标轴, 可分别指定为 U 、 V 、 W 。如还有第三组运动, 则分别指定为 P 、 Q 、 R 。回转坐标轴在 A 、 B 、 C 之外, 还可指定 D 、 E 轴。

(6) 主轴旋转运动方向 主轴的顺时针旋转方向 (正转) 是按照右旋螺纹旋入工件的方向。

1.3.3 电气坐标系

电气坐标系是与机床坐标系平行的坐标系，是数控系统在处理编程数据时的坐标系。在数控系统中坐标轴所用的位置检测元件确定之后，检测元件的零点即是电气坐标系的原点。

1.3.4 机床坐标系

机床坐标系是由机床坐标轴组成的坐标系。它是在电气坐标原点的基础上，沿电气坐标轴偏移一个距离。这个偏移距离，由机床制造者调试后将其设置在参数中。如果数控系统采用相对位置检测元件时，在机床通电后，需做手动返回参考点操作（通过参考点在机床坐标系中的坐标位置，确定机床零点在电气坐标系的位置，以建立机床坐标系）。机床参考点是机床上的一个固定点，由它来设置机床零点。它还是机床补偿功能和行程软限位基准点，机床使用者不要随意更动。

机床坐标系在编程时是以刀具基准点来体现的。在机床坐标轴返回到参考点时，机床在参考点上，如果参考点与机床零点重合，则刀具基准点与机床零点重合，此时机床坐标系坐标轴的显示值为0，又称回零。如果参考点不与机床零点重合，则显示参考点在机床坐标系的坐标值（铣削加工的机床，基准点在主轴中心线上， X 、 Y 轴的基准点在主轴中心上。 Z 轴的基准点，可以在主轴端，也可以在基准刀具的刀位点上，还可以在最长刀具的刀位点上，由机床使用者确定，如图1-5所示。编程员和操作者必须约定其中的一种，它将影响工件坐标系零点偏移值和刀具长度偏移值）。

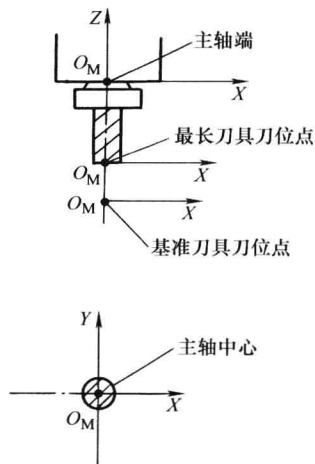


图 1-5 基准点在机床上的位置

1.3.5 工件坐标系

工件坐标系是与标准坐标系平行的，以机床坐标系为基准平移而形成的。工件坐标原点，又称加工原点，与编程原点重合。这个偏移量由机床操作者调试后，设置在工件坐标系设定指令中或坐标偏移存储器中。编程员在工件坐标系内编程，编程时，不必考虑工件在机床中的实际位置。

工件坐标系的建立，是设定工件坐标系原点与机床坐标原点的距离关系。实际上，是设定工件坐标系原点与机床在机床零点上时的基准点之间的距离，如图1-6所示。

加工程序指令的坐标值是刀具刀位点在工件坐标系中的坐标值，编程时假定刀位点和刀具基准点是重合的。编程员在编程时，坐标值可以用绝对值，也可以用相对值。

绝对坐标值指令时，刀具（或机床）运动轨迹是以工件坐标原点给出的。

相对坐标值指令时，刀具（或机床）运动轨迹是相对于前一个位置计算的，又称增量坐标值。

切削是以刀位点来进行的，刀位点与基准点的位置之差用刀具长度补偿来修正。

工件坐标系在编程时，工件可以平移、旋转、缩放和镜像，以方便编程。程序执行时，再逆向变换到机床坐标系执行加工。

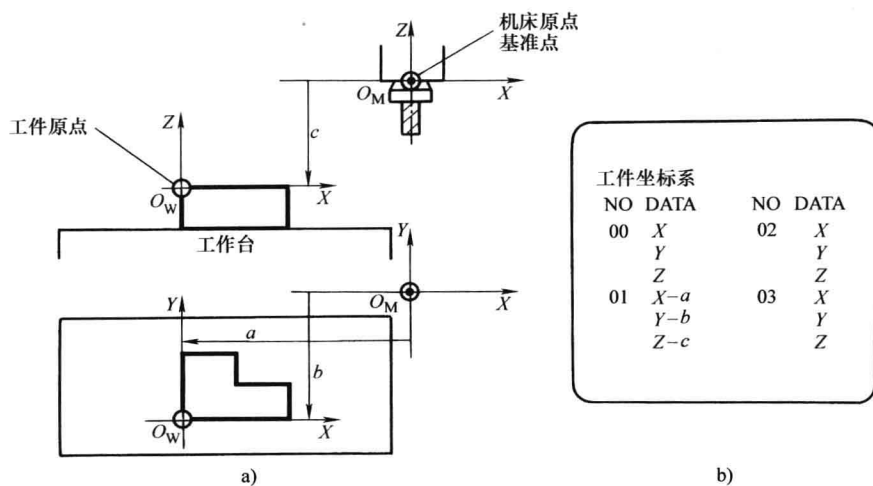


图 1-6 工件坐标偏移值的设置

a) 工件坐标 b) 设定画面

1.4 程序编制的工艺处理

1.4.1 确定机床和数控系统

根据被加工零件的尺寸和技术要求,考虑各项技术经济指标,合理地选择机床。当有多台机床可供选择时,要根据被加工零件的形状、编程的方便性,选择具有相应功能数控系统的机床。当然,在满足要求的情况下,尽量选用轴数少的数控机床,以降低加工成本。对于盘类、板类的零件,可选用立式机床;复杂曲面、模具的零件,切削时间长,所用刀具数量少,可选用数控铣床;箱体、阀体、壳体等零件可选用卧式机床或五面加工机床;为保证曲面的光整,可选用五轴的机床。当零件数量大、所用刀具多,可优先选用有刀库和自动换刀的加工中心机床。

1.4.2 工件的安装与夹具的确定

在数控机床上工件定位安装的基本原则与普通机床相同,在确定定位基准与夹紧方案时,还应注意:

- 1) 力求设计基准、工艺基准与程序原点统一。
- 2) 尽量减少装夹次数,尽可能做到一次定位装夹后能完成全部加工。
- 3) 避免采用占机人工调整方案。

若夹具的使用可以降低对机床的要求,并能降低机床的运行成本,仍应考虑使用夹具,夹具尽量用组合夹具。

1.4.3 编程原点的设定

编程原点是程序员在编制加工程序时设置的基准,亦是零件加工时的工件坐标原点。编

程原点应力求与设计基准和工艺基准相一致,使编程中的数值计算简单。但为了数控加工的安全,编程原点最好设在工件之外,至少应在工件顶面。在实际工作时,万一误操作出现指令值为零或接近零时,如果零点设在工作台面或夹具基面,刀具将穿透工件。

1.4.4 刀具的确定

一般数控机床主轴的转速比普通机床主轴转速高1~2倍或更高,并能在大切削用量情况下实现长时间无人自动加工,所以,数控机床使用的刀具必须具有较高强度和耐用度。

根据被加工面的形状,尽量选用通用刀具,以降低成本。对曲面,可选用球头刀。但有时为简化编程和提高表面加工质量,也可选用专用刀具。

铣削加工机床用的刀具,一般由三部分组成:与机床主轴孔相配的刀具柄部(简称刀柄),连接刀柄与刀具的装夹部分(简称连接件)和各种刀具(刀具)。

(1) 刀柄 刀柄由锥柄和拉钉两部分组成。锥柄的锥度为7:24,这种锥柄不自锁,换刀比较方便,与直柄刀柄相比,有较高的定心精度和较高的刚度。由于加工中心在加工过程中换刀频繁,要求锥柄有较高的制造精度,以保证较高的换刀精度。刀柄的锥柄结构及机械手抓拿结构已经标准化,GB/T 10944.1.2—2006 自动换刀机床用7:24圆锥刀具柄部40、45和50号柄作了统一规定。固定在锥柄尾部,与主轴内的拉紧机构相连的拉钉也已标准化,GB/T 10945.1.2—2006 自动换刀用7:24圆锥刀具柄部40、45和50号柄用拉钉也作了统一规定。标准中拉钉分为A型和B型两种,依据机床主轴拉紧机构的结构和尺寸,由机床制造厂确定。对于刀柄,尽管ISO和各国都有标准规定,但各机床厂的刀柄基本上并不通用,这在使用中要注意。为保证锥柄与主轴孔的定心精度,各机床之间的刀柄尽量不混用。

(2) 连接件 中间连接件与刀柄相连,用来装夹刀具。由于结构型式和尺寸各异,因此种类繁多。已经标准化、系列化和通用化的装夹机构系列产品称为工具系统。

镗铣类工具系统可分为整体式结构(TSG)和模块化结构(TMG)两大类。

整体式结构的镗铣类工具系统中,将工具的锥柄与夹持刀具的连接部分连成一体。这种结构可靠性高,但品种、规格较多。国内已有多家生产该系统的产品。

模块式结构的镗铣类工具系统是把工具的锥柄部分和连接部分分开,制成各种系列化的模块,然后经过不同规格的中间模块组装而成。这种工具系统组合灵活,但成本高。国外公司有这种产品。

(3) 刀具 根据工艺要求选择相应的刀具。

在编程文件的刀具表中,要指明刀柄、中间连接件的型号和规格,以及所用刀具的规格和尺寸,以便工具准备部门准备。

数控机床上的刀具长度,即刀具偏置补偿值,是指从刀位点到基准点的向量。根据基准点选择的位置不同,有绝对长度和相对长度。刀具的绝对长度,即刀具的几何长度,包括刀柄(从安装基面算起)、中间连接件及刀具的总和。这个长度可用对刀仪或对刀装置测出,也可在机床上测出。刀具的相对长度是该刀具与基准刀具的长度差,有时用最长刀具作基准刀具,这时,最长刀具长度为零。相对长度表示不直观,但较安全。

几种刀具的刀位点和绝对长度补偿量如图1-7所示。

当基准点选在主轴头时,B的坐标值大于P的值,由P向B的矢量值LZ为正值。因