

数控铣床/加工中心

经典编程36例 (精华版)

郑钦礼 曾海波 赵汶 编著

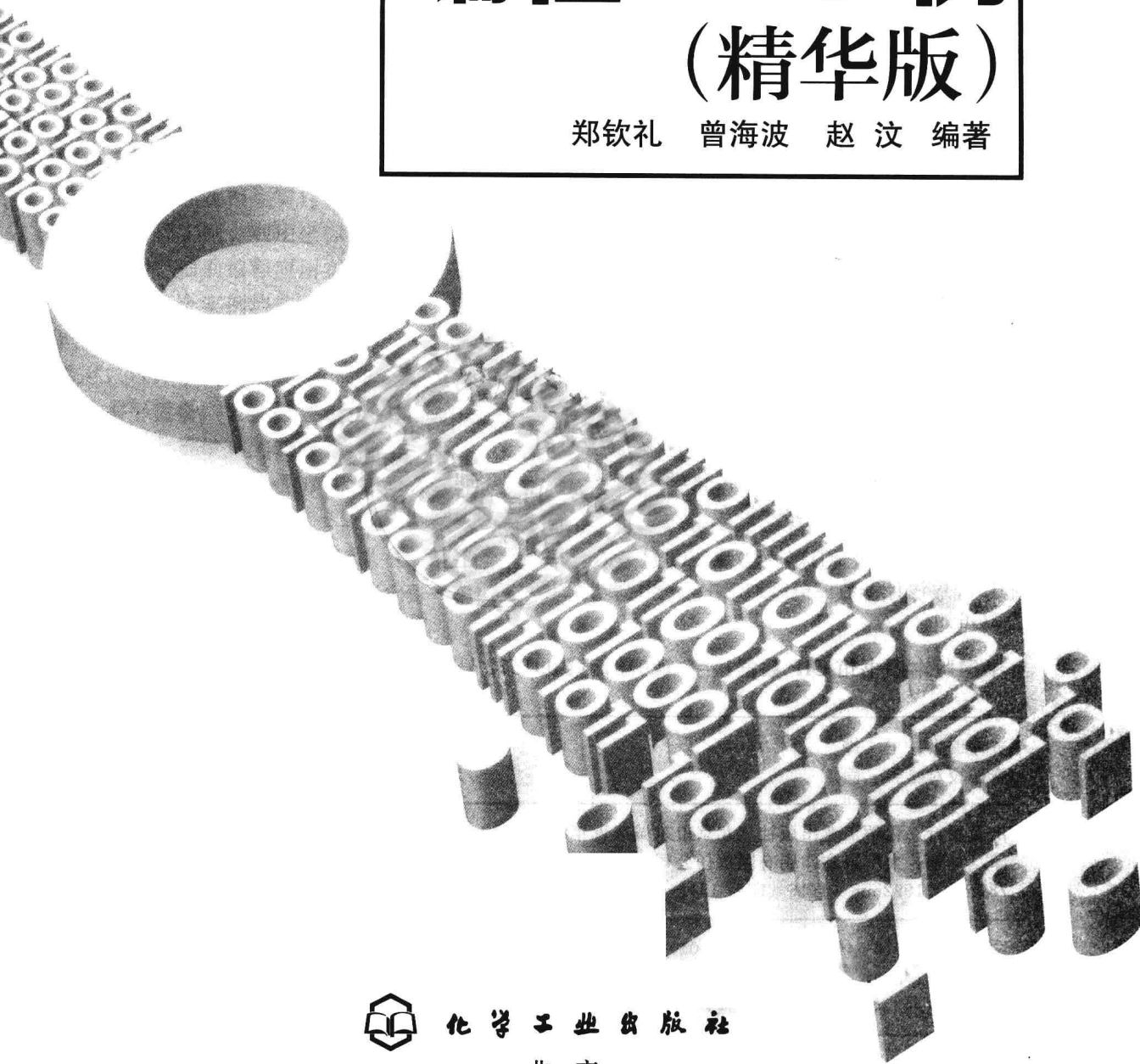


化学工业出版社

数控铣床/加工中心

经典编程 36 例 (精华版)

郑钦礼 曾海波 赵 汶 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

数控铣床/加工中心经典编程 36 例 (精华版)/郑钦礼, 曾海波, 赵汶编著. —北京: 化学工业出版社, 2013. 9
ISBN 978-7-122-17230-3

I. ①数… II. ①郑…②曾…③赵… III. ①数控机床-
铣床-程序设计②数控机床加工中心-程序设计 IV. ①TG547
②TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 091572 号

责任编辑: 王 烨
责任校对: 吴 静

文字编辑: 陈 喆
装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张 15¼ 字数 376 千字 2013 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究

前言

数控铣床与加工中心编程是数控加工的重要技术，所需技能要求比较高，初学者上手难度较大。而目前市场上的同类书中，讲解工艺、操作和指令用法的内容较多，针对各个系统、各项技术应用编程涉及得较少。为了弥补这种不足，本书围绕实际工程背景，以FANUC、SIEMENS、华中三大常用系统为写作平台来讲解。实例典型丰富、深度和广度均有涉及，可以给读者提供良好的学习参考。

全书共2章。第1章讲解数控铣床与加工中心加工工艺，读者通过学习，可以对数控铣床与加工中心加工工艺有所了解和熟悉，为下一步编程学习打好基础。第2章详细介绍了36个FANUC Oi系统数控铣床和加工中心编程实例，实例中还给出了编程指令的应用技巧。为便于读者类比学习，每个实例后还给出了SIEMENS 802D和华中HNC-21M系统下的程序。实例类型广泛，按照零件类型和编程技术种类划分，具体包括：平面及外轮廓类零件编程实例、型腔及槽类零件编程实例、孔类零件编程实例、利用子程序编程实例、利用比例缩放功能编程实例、利用坐标系旋转功能编程实例、利用镜像功能编程实例、利用极坐标功能编程实例、辅助编程应用实例、利用宏程序编程实例、综合运用编程实例。

全书每个实例均按照基础知识、工艺分析、刀具设置、程序及注释的形式讲解，基础知识讲解到位，编程技术先进常用，实例全部来自于一线实践，实用性和指导性强，读者通过学习，可以系统掌握数控铣床与加工中心编程的各种方法与技巧，快速学以致用。

本书适合广大数控技工初、中级读者使用，也可作为高职高专院校相关专业学生以及社会相关培训班学员的教材。

本书由郑钦礼、曾海波、赵汶编著。涂志标、马龙梅、孙红亮、杨学围、邓力、王乐、张秋冬、涂志涛、闫延超、赵程、赵辉、贺红霞、史丽萍、郭小琴、袁丽娟、刘汝芳、夏劲松、刘媛媛、赵普磊、李晓磊、董延等为本书的编写提供了很大帮助，在此一并表示感谢！

由于时间有限，书中难免会有一些不足之处，欢迎广大读者及业内人士批评指正。

编著者

目 录

第 1 章 数控铣床和加工中心加工工艺	1
1.1 数控铣床加工工艺分析	1
1.1.1 数控铣床加工工艺特点及主要内容	1
1.1.2 数控铣床加工零件的工艺性分析	1
1.1.3 数控铣床加工工艺路线的拟定	5
1.1.4 数控铣削加工工序设计	14
1.2 加工中心加工工艺分析	19
1.2.1 加工中心的工艺特点	19
1.2.2 加工中心的工艺路线设计	20
1.2.3 加工中心的工步设计	21
1.2.4 工件的定位与装夹	21
1.2.5 加工中心刀具系统	24
1.2.6 加工方法的选择	24
1.2.7 加工路线和切削用量的确定	25
1.2.8 加工中心工艺规程的制定	29
第 2 章 FANUC 0i 系统数控铣床/加工中心编程实例	38
2.1 平面及外轮廓类零件的编程实例	38
2.1.1 实例 1——大平面类零件的编程和加工	38
2.1.2 实例 2——外轮廓的编程和加工	43
2.1.3 实例 3——平面外形综合零件在加工中心上的编程和加工	47
2.2 型腔及槽类零件编程实例	53
2.2.1 实例 4——键槽的编程和加工	53
2.2.2 实例 5——平面内型腔零件的编程和加工	56
2.2.3 实例 6——带岛屿类型腔零件在加工中心上的编程和加工	60
2.3 孔类零件编程实例	64
2.3.1 实例 7——通孔类零件的编程和加工	64
2.3.2 实例 8——深孔类零件的编程和加工	67
2.3.3 实例 9——镗孔类零件的编程和加工	72
2.3.4 实例 10——背镗孔类零件的编程和加工	77
2.3.5 实例 11——螺纹孔类零件的编程和加工	82
2.4 利用子程序编程实例	88
2.4.1 实例 12——子程序在同一平面内多个相同轮廓中的应用	88
2.4.2 实例 13——子程序在 Z 向分层切削中的应用	91
2.4.3 实例 14——多重子程序调用在加工中心上的应用	96

2.5	利用比例缩放功能编程实例	99
2.5.1	实例 15——沿所有轴等比例缩放类零件的编程和加工	100
2.5.2	实例 16——沿各轴不等比例缩放类零件的编程和加工	103
2.6	利用坐标系旋转功能编程实例	109
2.6.1	实例 17——围绕工件坐标系原点旋转类零件的编程和加工	109
2.6.2	实例 18——围绕固定点旋转类零件的编程和加工	114
2.6.3	实例 19——坐标系旋转在复杂零件中的编程和加工	120
2.7	利用镜像功能编程实例	128
2.7.1	实例 20——镜像功能在平面类零件中的编程和加工	128
2.7.2	实例 21——镜像功能在复杂零件中的编程和加工	133
2.8	利用极坐标功能编程实例	139
2.8.1	实例 22——极坐标加工多边形类零件的编程和加工	139
2.8.2	实例 23——极坐标功能在绝对坐标编程时的应用	143
2.8.3	实例 24——极坐标功能在相对坐标编程时的应用	149
2.8.4	实例 25——极坐标系和直角坐标系的混合使用	152
2.9	辅助编程应用实例	157
2.9.1	实例 26——外轮廓类零件在加工中心上的编程和加工	158
2.9.2	实例 27——型腔类零件在加工中心上的编程和加工	162
2.9.3	实例 28——曲面类零件在加工中心上的编程和加工	166
2.10	利用宏程序编程实例	168
2.10.1	实例 29——B 类宏程序在平面类零件加工中的应用	168
2.10.2	实例 30——B 类宏程序在简单斜面中的应用	173
2.10.3	实例 31——B 类宏程序在倒 R 角中的应用	181
2.10.4	实例 32——B 类宏程序在球面类零件中的应用	189
2.10.5	实例 33——B 类宏程序在加工中心上加工复杂零件	196
2.11	综合运用编程实例	199
2.11.1	实例 34——G17、G18、G19 平面内零件的编程	199
2.11.2	实例 35——混合编程和加工	205
2.11.3	实例 36——复杂配合类零件在加工中心上的编程和加工	212

参考文献	235
-------------------	-----

第 1 章 数控铣床和加工中心加工工艺

学习数控铣床与加工中心编程，必须了解其详细的加工工艺。本章将对数控铣床加工工艺进行系统介绍，主要内容包括加工原理、工艺性分析、工艺路线拟订以及加工工序设计。

1.1 数控铣床加工工艺分析

1.1.1 数控铣床加工工艺特点及主要内容

(1) 数控铣床加工工艺的特点

工艺规程是工人在加工时的指导性文件。由于普通铣床受控于操作工人，因此，在普通铣床上用的工艺规程实际上只是一个工艺过程卡，铣床的切削用量、走刀路线、工序的工步等往往都是由操作工人自行选定的。数控铣床加工的程序是数控铣床的指令性文件。数控铣床受控于程序指令，加工的全过程都是按程序指令自动进行的。因此，数控铣床加工程序与普通铣床工艺规程有较大差别，涉及的内容也较广。数控铣床加工程序不仅包括零件的工艺过程，而且包括切削用量、走刀路线、刀具尺寸以及铣床的运动过程。因此，要求编程人员对数控铣床的性能、特点、运动方式、刀具系统、切削规范以及工件的装夹方法都应非常熟悉。工艺方案的好坏不仅会影响铣床效率的发挥，而且将直接影响到零件的加工质量。

(2) 数控加工工艺的主要内容

- ① 选择适合在数控铣床上加工的零件，确定工序内容。
- ② 分析被加工零件的图样，明确加工内容及技术要求。
- ③ 确定零件的加工方案，指定数控铣削加工工艺路线，如划分工序、安排加工顺序、处理与非数控加工工序的衔接等。
- ④ 加工工序的设计，如选取零件的定位基准、夹具方案的确定、工步划分、刀具选择和确定切削用量等。
- ⑤ 数控铣削加工程序的调整，如选取对刀点和换刀点、确定刀具补偿及确定加工路线等。

1.1.2 数控铣床加工零件的工艺性分析

在选择并决定数控铣床加工零件及其加工内容后，应对零件的数控铣床加工工艺性进行全面、认真、仔细的分析，主要内容包括产品的零件图样分析、零件结构工艺性分析与零件毛坯的工艺性分析等。

(1) 零件图工艺分析

首先应熟悉零件在产品中的作用、位置、装配关系和工作条件，搞清楚各项技术要求对零件装配质量和使用性能的影响，找出主要的和关键的技术要求，然后对零件图样进行分析。

针对数控铣削加工的特点，下面列举出一些经常遇到的工艺性问题作为对零件图进行工艺性分析的要点来加以分析与考虑。

- ① 图样尺寸的标注方法是否方便编程；构成工件轮廓图形的各种几何元素的条件是否

充要；各几何元素的相互关系（如相切、相交、垂直和平行等）是否明确；有无引起矛盾的多余尺寸或影响工序安排的封闭尺寸等。

② 零件尺寸所要求的加工精度、尺寸公差是否都可以得到保证，不要以为数控机床加工精度高而放弃这种分析。特别要注意过薄的腹板与缘板的厚度公差，数控铣削也是一样，因为加工时产生的切削拉力及薄板的弹性退让，极易产生切削面的振动，使薄板厚度尺寸公差难以保证，其表面粗糙度也将恶化或变坏。根据实践经验，当面积较大的薄板厚度小于3mm时，就应充分重视这一问题。

③ 内槽及缘板之间的内转接圆弧是否过小。

④ 零件铣削面的槽底圆角或腹板与缘板相交处的圆角半径 r 是否太大。

⑤ 零件图中各加工面的凹圆弧（ R 与 r ）是否过于零乱，是否可以统一，因为在数控铣床上多换一次刀，要增加不少新问题，如增加铣刀规格、计划停车次数和对刀次数等，不但给编程带来许多麻烦，增加生产准备时间而降低生产效率，而且也会因频繁换刀增加了工件加工面上的接刀阶差而降低了表面质量。所以，在一个零件上的这种凹圆弧半径在数值上的一致性对数控铣削的工艺性显得相当重要。一般来说，即使不能寻求完全统一，也要力求将数值相近的圆弧半径分组靠拢，达到局部统一，以尽量减少铣刀规格与换刀次数。

⑥ 零件上有无统一基准，以保证两次装夹加工后其相对位置的正确性。有些工件需要在铣完一面后再重新安装铣削另一面。由于数控铣削时不能使用通用铣床加工时常用的试削方法来接刀，往往会因为工件的重新安装而接不好刀（即与上道工序加工的面接不齐或造成本来要求一致的两对应面上的轮廓错位）。为了避免上述问题的产生，减小两次装夹误差，最好采用统一基准定位，因此零件上最好有合适的孔作为定位基准孔。如果零件上没有基准孔，也可以专门设置工艺孔作为定位基准（如毛坯上增加工艺凸耳或在后续工序要铣去的余量上设基准孔）。如实在无法制出基准孔，起码也要用经过精加工的面作为统一基准。如果连这也办不到，则最好只加工其中一个最复杂的面，另一面放弃数控铣削而改由通用铣床加工。

⑦ 分析零件的形状及原料的热处理状态，会不会在加工过程中变形，哪些部位最容易变形。因为数控铣削最忌讳工件在加工时变形，这种变形不但无法保证加工的质量，而且经常造成加工不能继续进行下去，“中途而废”，这时就应当考虑采取一些必要的工艺措施进行预防，如对钢件进行调质处理，对铸铝件进行退火处理，对不能用热处理方法解决的，也可考虑粗、精加工及对称去余量等常规方法。此外，还要分析加工后的变形问题，采取什么工艺措施来解决。

（2）零件的结构工艺性分析

零件的结构工艺性是指所设计的零件在满足使用要求的前提下制造的可行性和经济性。良好的结构工艺性，可以使零件加工容易，节省工时和材料。而较差的零件结构工艺性，会使加工困难，浪费工时和材料，有时甚至无法加工。因此，零件各加工部位的结构工艺性应符合数控加工的特点。

① 零件的内腔和外表最好采用统一的几何类型和尺寸，这样可以减少刀具规格和换刀次数，使编程方便，提高生产效率。

② 内槽圆角的大小决定着刀具直径的大小，所以内槽圆角半径不应太小。对于图 1-1 所示零件，其结构工艺性的好坏与被加工轮廓的高低、转角圆弧半径的大小等因素有关。图

1-1 (b) 与图 1-1 (a) 相比, 转角圆弧半径大, 可以采用较大直径的立铣刀来加工; 加工平面时, 进给次数也相应减少, 表面加工质量也会好一些, 因而工艺性较好。通常 $R < 0.2H$ 时, 可以判定零件该部位的工艺性不好。

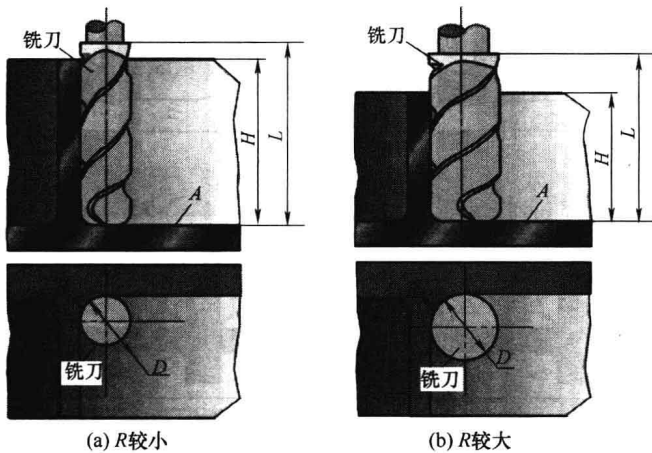


图 1-1 内槽结构工艺性对比

③ 零件铣槽底平面时, 槽底圆角半径 r 不要过大。如图 1-2 所示, 铣刀端面刃与铣削平面的最大接触直径 $d = D - 2r$ (D 为铣刀直径), 当 D 一定时, r 越大, 铣刀端面刃铣削平面的面积越小, 加工平面的能力就越差, 效率就低, 工艺性也就越差。当 r 大到一定程度时, 甚至必须用球头铣刀加工, 这是应该尽量避免的。

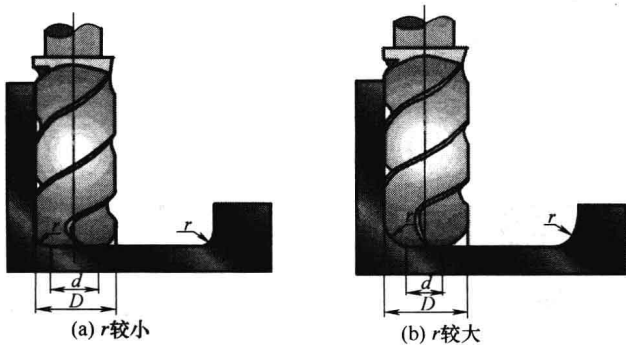


图 1-2 零件槽底平面圆弧对铣削工艺的影响

④ 应采用统一的基准定位。在数控加工中若没有统一的定位基准, 则会因工件的二次装夹而造成加工后两个面上的轮廓位置及尺寸不协调现象。另外, 零件上最好有合适的孔作为定位基准孔。若无法制出工艺孔, 最起码也要用精加工表面作为统一基准, 以减少二次装夹的误差。

此外, 还应分析零件所要求的加工精度、尺寸公差等是否可以得到保证, 有没有引起矛盾的多余尺寸或影响加工安排的封闭尺寸等。有关的铣削件的结构工艺实例见表 1-1。

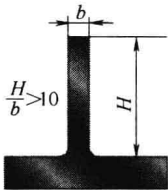
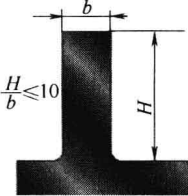
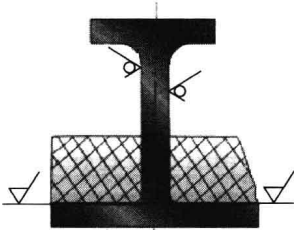
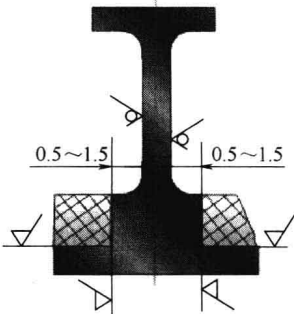
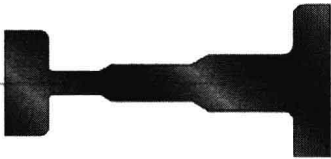
(3) 零件毛坯的工艺性分析

零件在进行数控铣削加工时, 由于加工过程的自动化, 使余量的大小、如何装夹等问题在设计毛坯时就要仔细考虑好; 否则, 如果毛坯不适合数控铣削, 加工将很难进行下去。根据经验, 下列几方面应作为毛坯工艺性分析的要点。

表 1-1 改进零件结构提高工艺性实例

提高工艺性方法	结 构		结 果
	改 进 前	改 进 后	
改进内壁形状			可采用较高刚性刀具
统一圆弧尺寸			减少刀具数和 更换刀具次数, 减少辅助时间
选择合适的圆弧半径 R 和 r			提高生产效率
用两面对称结构			减少编程时间, 简化编程
合理改进 凸台分布			减少加工劳 动量
改进结构形状			减少加工劳动量

续表

提高工艺性方法	结 构		结 果
	改 进 前	改 进 后	
改进尺寸比例	 $\frac{H}{b} > 10$	 $\frac{H}{b} \leq 10$	可用较高刚度 刀具加工, 提高 生产率
在加工和不加工 表面间加入过渡		 0.5~1.5	减少加工劳 动量
改进零件 几何形状			斜面筋代替阶 梯筋, 节约材料

- ① 毛坯应有充分、稳定的加工余量 毛坯主要指锻件、铸件。因模锻时的欠压量与允许的错模量会造成余量的多少不等；铸造时也会因砂型误差、收缩量及金属液体的流动性差不能充满型腔等造成余量的不等。此外，锻造、铸造后，毛坯的挠曲与扭曲变形量的不同也会造成加工余量不充分、不稳定。因此，除板料外，不论是锻件、铸件还是型材，只要准备采用数控铣削加工，其加工面均有较充分的余量。经验表明，数控铣削中最难保证的是加工面与非加工面之间的尺寸，这一点应该引起特别重视，在这种情况下，如果已确定或准备采用数控铣削加工，就应事先对毛坯的设计进行必要的更改或在设计时就加以充分考虑，即在零件图样注明的非加工面处也增加适当的余量。
- ② 分析毛坯的装夹适应性 主要考虑毛坯在加工时定位和夹紧的可靠性与方便性，以便在一次安装中加工出较多表面。对不便于装夹的毛坯，可考虑在毛坯上另外增加装夹余量或工艺凸台、工艺凸耳等辅助基准。
- ③ 分析毛坯的变形、余量大小及均匀性 分析毛坯加工中与加工后的变形程度，主要是考虑在加工时要不要分层切削，分几层切削。也要分析加工中与加工后的变形程度，考虑是否应采取预防性措施与补救措施。如对于热轧中厚铝板，经淬火后很容易在加工中与加工后变形，这时最好采用经预拉伸处理的淬火板坯。

1.1.3 数控铣床加工工艺路线的拟定

铣削加工工艺路线的拟定是制定工艺规程的重要内容之一，其主要内容包括：选择各加工表面的加工方法、划分加工阶段、划分工序以及安排工序的先后顺序等。设计者应根据从

生产实践中总结出来的一些综合性工艺原则, 结合本厂的实际生产条件, 提出几种方案, 通过对比分析, 从中选择最佳方案。

(1) 加工方法的选择

对于数控铣床, 应重点考虑几个方面: 能保证零件的加工精度和表面粗糙度的要求; 使走刀路线最短, 既可简化程序段, 又可减少刀具空行程时间, 提高加工效率; 应使数值计算简单, 程序段数量少, 以减少编程工作量。

① 内孔表面加工方法的选择 在数控铣床上加工内孔表面, 加工方法主要有钻孔、扩孔、铰孔、镗孔和攻螺纹等, 应根据被加工孔的加工要求、尺寸、具体生产条件、批量的大小及毛坯上有无预制孔等情况合理选用。

a. 加工精度为 IT9 级的孔, 当孔径小于 10mm 时, 可采用钻-铰方案; 当孔径小于 30mm 时, 可采用钻-扩方案; 当孔径大于 30mm 时, 可采用钻-镗方案。工件材料为淬火钢以外的各种金属。

b. 加工精度为 IT8 级的孔, 当孔径小于 20mm 时, 可采用钻-铰方案; 当孔径大于 20mm 时, 可采用钻-扩-铰方案, 此方案适用于除淬火钢以外的各种金属, 但孔径应在 20~80mm, 此外, 也可采用最终工序为精镗的方案。

c. 精加工精度为 IT7 级的孔, 当孔径小于 12mm 时, 可采用钻-粗铰-精铰方案; 当孔径在 12~60mm 范围时, 可采用钻-扩-粗铰-精铰方案。当毛坯上已铸出或锻出孔时, 可采用粗镗-半精镗-精镗方案。最终工序为铰孔适用于未淬火钢、铸铁和有色金属。

d. 精加工精度为 IT6 级的孔, 最终工序可采用精细镗, 工件材料为非淬火钢。

② 平面加工方法的选择 在数控铣床上加工平面主要采用端铣刀和立铣刀加工。粗铣的尺寸精度和表面粗糙度一般可达 IT11~IT13, $Ra6.3 \sim 25\mu m$; 精铣的尺寸精度和表面粗糙度一般可达 IT8~IT10, $Ra1.6 \sim 6.3\mu m$ 。需要注意的是: 当零件表面粗糙度要求较高时, 应采用顺铣方式。

③ 平面轮廓加工方法的选择 平面轮廓多由直线和圆弧或各种曲线构成, 通常采用三坐标数控铣床进行两轴半坐标加工。如图 1-3 所示为由直线和圆弧构成的零件平面轮廓 ABCD, 采用半径为 R 的立铣刀沿周向加工, 图中的虚线为刀具中心的运动轨迹。为保证加工面光滑, 刀具沿 AB 切入, 沿 DA 切出。

④ 固定斜角平面加工方法的选择 固定斜角平面是与水平成一固定夹角的斜面, 常用的加工方法如下。

a. 当零件尺寸不大时, 可用斜垫板垫平后加工; 如果机床主轴可以摆角, 则可以摆成适当的定角, 用不同的刀具来加工, 如图 1-4 所示。当零件尺寸很大, 斜面斜度又较小时, 常用行切法加工, 但加工后, 会在加工面上留下残留面积, 需要用钳修方法加以清除, 用三坐标数控立铣刀加工飞机整体壁板零件时常用此方法。当然, 加工斜面的最佳方法是采用五坐标数控铣床, 主轴摆角后加工, 可以不留残留面积。

b. 对于图 1-4 所示的正圆台和斜盘表面, 一般可用专用的角度成形铣刀加工, 其效果比采用五坐标数控铣床摆角加工好。

⑤ 变斜角面加工方法的选择

a. 对曲率变化较小的变斜角面, 选用 X、Y、Z 和 A 四坐标联动的数控铣床, 采用立铣刀(但当零件斜角过大, 超过机床主轴摆角范围时, 可用角度成形铣刀加以弥补)以插补方式摆角加工, 如图 1-5 (a) 所示。加工时, 为保证刀具与零件型面在全长上始终贴合, 刀具

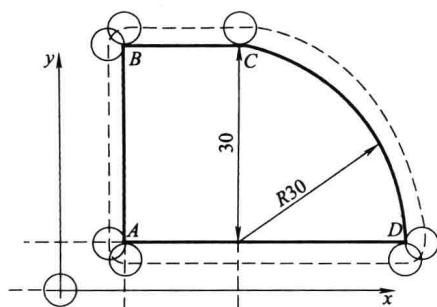


图 1-3 平面轮廓铣削

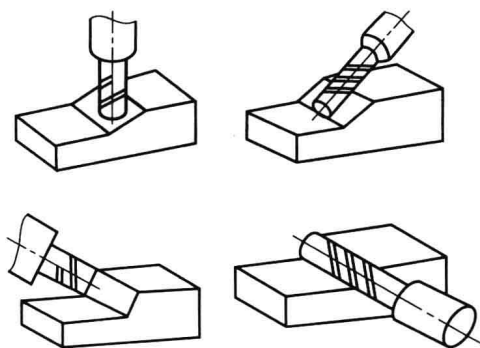


图 1-4 主轴摆角加工固定斜面

绕 A 轴摆角度 A。

b. 对曲率变化较大的变斜角面，用四坐标联动加工难以满足加工要求，最好用 X、Y、Z、A 和 B（或 C 转轴）的五坐标联动数控铣床，以圆弧插补方式摆角加工，如图 1-5（b）所示。图中夹角 A 和 B 分别是零件斜面母线与 Z 轴夹角 α 在 ZOY 平面上和 XOY 平面上的分夹角。

c. 采用三坐标数控铣床两坐标联动，利用球头铣刀和鼓形铣刀，以直线或圆弧插补方式进行分层铣削加工，加工后的残留面积用钳修方法清除，图 1-6 所示是用鼓形铣刀铣削变斜角面的情形。由于鼓形铣刀的鼓径可以做得比球头铣刀的球径大，所以加工后的残留面积高度小，加工效果比球头刀好。

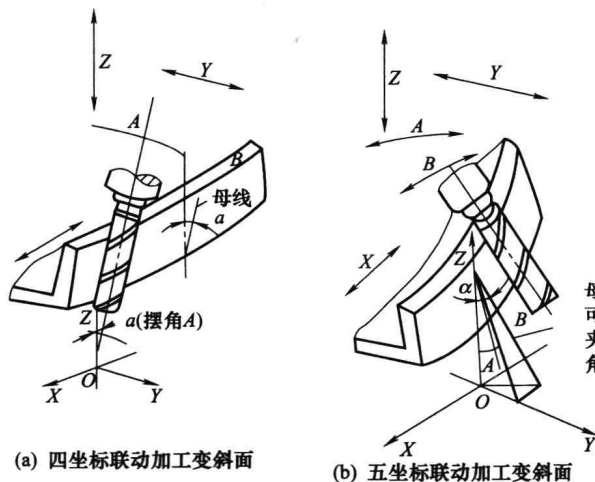


图 1-5 变斜角面加工方法

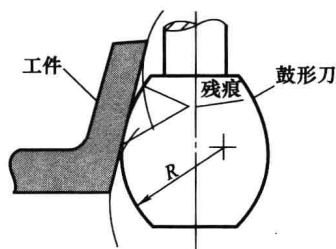


图 1-6 用鼓形铣刀铣削变斜角面

⑥ 曲面轮廓加工方法的选择 立体曲面的加工应根据曲面形状、刀具形状及精度要求采用不同的铣削加工方法，如两轴半、三轴、四轴及五轴等联动加工。

a. 对曲率变化不大和精度要求不高的曲面的粗加工，常用两轴半坐标的行切法加工，即 X、Y、Z 三轴中任意两轴做联动插补，第三轴做单独的周期进给。如图 1-7 所示，将 x 向分成若干段，球头铣刀沿 YOZ 面所截的曲线进行铣削，每一段加工完后进给 Δx ，再加工另一相邻曲线，如此依次切削即可加工出整个曲面。在行切法中，要根据轮廓表面粗糙度的要求及刀头不干涉相邻表面的原则选取 Δx 。球头铣刀的刀头半径应选得大一些，有利于散

热, 但刀头半径应小于内凹曲面的最小曲率半径。

两轴半坐标加工曲面的刀心轨迹 O_1O_2 和切削点轨迹如图 1-8 所示。图中 $ABCD$ 为被加工曲面, P_{xz} 为平行于 XZ 坐标平面的一个行切面, 刀心轨迹为 O_1O_2 曲面 $ABCD$ 的等距面 $IJKL$ 与行切面 P_{xz} 的交线, 显然 O_1O_2 是一条平面曲线。由于曲面的曲率变化, 改变了球头刀与曲面切削点的位置, 使切削点的连线成为一条空间曲线, 从而在曲面上形成扭曲的残留沟纹。

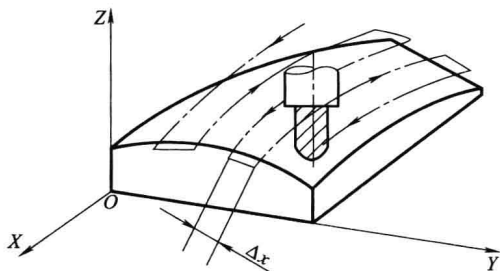


图 1-7 两轴半坐标行切法加工曲面

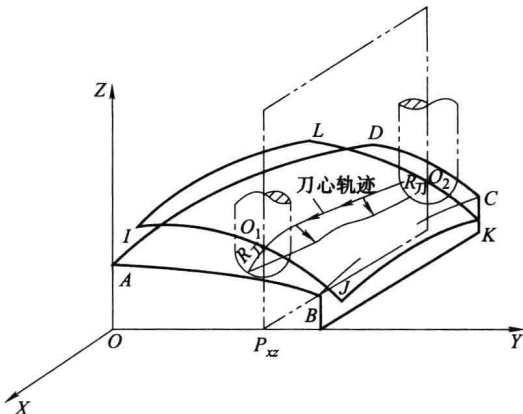


图 1-8 两轴半坐标行切法加工的切削点轨迹

b. 对曲率变化较大和精度要求较高的曲面的精加工, 常用 X 、 Y 、 Z 三坐标联动插补的行切法加工。如图 1-9 所示, P_{xz} 平面为平行于坐标平面的一个行切面, 它与曲面的交线为 ab 。由于是三坐标联动, 球头刀与曲面的切削点始终处在平面曲线 ab 上, 可获得较规则的残留沟纹。但这时的刀心轨迹 O_1O_2 不在 P_{xz} 平面上, 而是一条空间曲线。

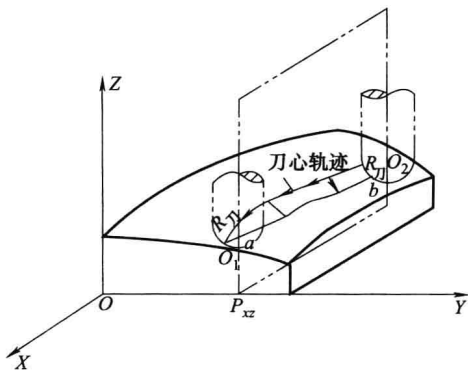


图 1-9 三轴联动行切法加工的切削点轨迹

c. 对像叶轮、螺旋桨这样的工件, 因其叶片形状复杂, 刀具容易与相邻表面干涉, 常用五坐标联动加工, 其加工原理如图 1-10 所示。半径为 R_i 的圆柱面与叶面的交线 AB 为螺旋线的一部分, 螺旋角为 Ψ_i , 叶片的径向型线 (轴向割线) EF 的倾角 α 为后倾角, 螺旋线 AB 用极坐标加工方法, 并且以折线段逼近。逼近段 mn 是由 C 坐标旋转 $\Delta\theta$ 与 Z 坐标位移 Δz 的合成。当 AB 加工完后, 刀具径向位移 Δx (改变 R_i), 再加工相邻的另一条叶形线, 依次加工即可形成, 整个叶面的曲率半径较大, 所以常采用立铣刀加工, 以提高生产率, 简化程序。为保证铣刀端面始终与曲面贴合, 铣刀还应作由坐标 A 和坐标 B 形成的 θ_1 和 α_1 的

摆动运动。在摆角的同时,还应做直角坐标的附加运动,以保证铣刀端面中心始终位于编程值所规定的位置上,所以需要五坐标加工。这样加工的编程计算相当复杂,一般采用自动编程。

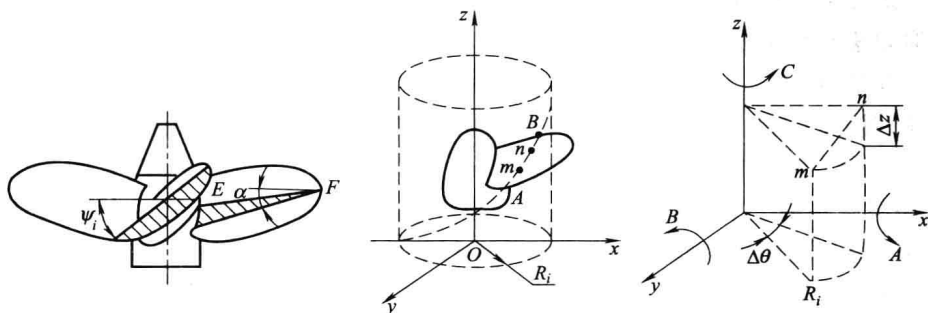


图 1-10 曲面的五坐标联动加工

(2) 加工阶段的划分

当零件的加工质量要求较高时,往往不可能用一道工序来满足其要求,而要用几道工序逐步达到要求的加工质量。为保证加工质量和合理地使用设备、人力,零件的加工过程通常按工序性质不同,可分为粗加工、半精加工、精加工和光整加工 4 个阶段。

① 粗加工阶段 其任务是切除毛坯上大部分多余的金属,使毛坯在形状和尺寸上接近零件成品,因此,主要目标是提高生产率。

② 半精加工阶段 其任务是使主要表面达到一定的精度,留有一定的精加工余量,为主要的精加工(如精车、精磨)做好准备,并可完成一些次要表面的加工,如扩孔、攻螺纹、铣键槽等。

③ 精加工阶段 其任务是保证各主要表面达到规定的尺寸精度和表面粗糙度要求,主要目标是全面保证加工质量。

④ 光整加工阶段 对零件上精度和表面粗糙度要求很高(IT6 级以上,表面粗糙度为 $Ra0.2\mu m$ 以下)的表面,需进行光整加工,其主要目标是提高尺寸精度,减小表面粗糙度,一般不用来提高位置精度。

划分加工阶段的目的如下。

① 保证加工质量 工件粗加工时,切除的金属层较厚,切削力和夹紧力都比较大,切削温度也比较高,将会引起较大的变形。如果不划分加工阶段,粗、精加工混在一起,就无法避免上述原因引起的加工误差。按加工阶段加工,粗加工造成的加工误差通过半精加工和精加工来纠正,从而保证零件的加工质量。

② 合理使用设备 粗加工工作量大,切削用量大,可采用功率大、刚度好、效率高而精度低的机床。精加工切削力小,对机床破坏小,采用高精度机床。这样发挥了设备的各自特点,既提高生产效率,又能延长精密设备的使用寿命。

③ 便于及时发现毛坯缺陷 对毛坯的各种缺陷,如铸件的气孔、夹砂和余量不足等,在粗加工后即可发现,便于及时修补或决定报废,以免继续加工下去,造成浪费。

④ 便于安排热处理工序 如粗加工后,一般要安排去应力热处理,以消除内应力。精加工前要安排淬火等最终热处理,其变形可以通过精加工予以消除。

加工阶段的划分也不应绝对化,应根据零件的质量要求、结构特点和生产纲领灵活掌

握。当加工质量要求不高、工件刚性好、毛坯精度高、加工余量小、生产纲领不大时，可不必划分加工阶段。对刚性好的重型工件，由于装夹及运输很费时，也常在一次装夹下完成全部粗、精加工。对于不划分加工阶段的工件，为减少粗加工中产生的各种变形对加工质量的影响，在粗加工后，松开夹紧机构，停留一段时间，让工件充分变形，然后再用较小的夹紧力重新夹紧，进行精加工。

(3) 工序的划分

① 工序划分的原因 工序的划分可以采用两种不同的原则，即工序集中原则和工序分散原则。

a. 工序集中原则。工序集中原则是指每道工序包括尽可能多的加工内容，从而使工序的总数减少。采用工序集中原则的优点是：有利于采用高效的专用设备和数控机床，提高生产效率；减少工序数目，缩短工艺路线，简化生产计划和生产组织工作；减少机床数量、操作工人数和占地面积；减少工件装夹次数，不仅保证了加工表面间的相互位置精度，而且减少了夹具数量和装夹工件的辅助时间。但专用设备和工艺装备投资大，调整维修比较麻烦，生产准备周期较长，不利于转产。

b. 工序分散原则。工序分散就是将工件的加工分散在较多的工序内，进行每道工序的加工内容很少。采用工序分散原则的优点是：加工设备和工艺装备结构简单，调整和维修方便，操作简单，转产容易；有利于选择合理的切削用量，减少机动时间。但工艺路线较长，所需设备及工人人数多，占地面积大。

② 工序划分方法 工序划分主要考虑生产纲领、所用设备及零件本身的结构和技术要求等。大批量生产时，若使用多轴、多刀的高效加工中心，可按工序集中原则组织生产；若在由组合机床组成的自动线上加工，工序一般按分散原则划分。随着现代数控技术的发展，特别是加工中心的应用，工艺路线的安排更多地趋向工序集中。单件小批生产时，通常采用工序集中原则。成批生产时，可按工序集中原则划分，也可按工序分散原则划分，应视具体情况而定。对于结构尺寸和重量都很大的重型零件，采用工序集中原则，以减少装夹次数和运输量。对于刚性差、精度高的零件，应按工序分散原则划分工序。

在数控铣床上加工的零件，一般按工序集中原则划分工序，划分方法如下。

a. 按所用刀具划分。以同一把刀具完成的那一部分工艺过程为一道工序，这种方法适用于工件的待加工表面较多，机床连续工作时间过长，加工程序的编制和检查难度较大等情况。加工中心常用这种方法划分。

b. 按安装次数划分。以一次安装完成的那一部分工艺过程为一道工序。这种方法适用于工件的加工内容不多的工件，加工完成后就能达到待检验状态。

c. 按粗、精加工划分。即精加工中完成的那一部分工艺过程为一道工序，粗加工中完成的那一部分工艺过程为一道工序。这种划分方法适用于加工后变形较大，需粗、精加工分开的零件，如毛坯为铸件、焊接件或锻件。

d. 按加工部位划分。即以完成相同型面的那一部分工艺过程为一道工序，对于加工表面多而复杂的零件，可按其结构特点（如内形、外形、曲面和平面等）划分多道工序。

(4) 加工顺序的安排

在选定加工方法、划分工序后，工艺路线拟定的主要内容就是合理安排这些加工方法和加工工序的顺序。零件的加工工序通常包括切削加工工序、热处理工序和辅助工序（包括表面处理、清洗和检验等），这些工序的顺序直接影响到零件的加工质量、生产效率和加工成

本。因此,在设计工艺路线时,应合理安排好切削加工、热处理和辅助工序的顺序,并解决好工序间的衔接问题。

① 切削加工工序的安排 切削加工工序通常按下列原则安排顺序。

a. 基面先行原则。用作精基准的表面应优先加工出来,因为定位基准的表面越精确,装夹误差就越小。例如轴类零件加工时,总是先加工中心孔,再以中心孔为基准加工外圆表面和端面。又如箱体类零件总是先加工定位用的平面和两个定位孔,再以平面和定位孔为精基准加工孔系和其他平面。

b. 先粗后精原则。各个表面的加工顺序按照粗加工-半精加工-精加工-光整加工依次进行,逐步提高表面的加工精度和减小表面粗糙度。

c. 先主后次原则。零件的主要工作表面、装配基面应先加工,从而能及早发现毛坯中主要表面可能出现的缺陷。次要表面可穿插进行,放在主要加工表面加工到一定程度后、最终精加工之前进行。

d. 先面后孔原则。对箱体类、支架类零件,平面轮廓尺寸较大,一般先加工平面,再加工孔和其他尺寸。这样安排加工顺序,一方面用加工过的平面定位,稳定可靠;另一方面在加工过的平面上加工孔,比较容易,并能提高孔的加工精度,特别是钻孔,孔的轴线不易偏斜。

② 热处理工序的安排 为提高材料的力学性能,改善材料的切削性能、加工性能和消除工件的内应力,在工艺过程中要适当安排一些热处理工序。热处理工序在工艺路线中的安排主要取决于零件的材料和热处理的目的。

a. 预备热处理。预备热处理的目的是改善材料的切削性能,消除毛坯制造时的残余应力,改善组织。其工序位置多在机械加工之前,常用的有退火、正火等。

b. 消除残余应力热处理。由于毛坯在制造和机械加工过程中产生的内应力会引起工件变形,影响加工质量,因此,要安排消除应力热处理。消除残余应力热处理最好安排在粗加工之后、精加工之前,对精度要求不高的零件,一般将消除残余应力的人工时效和退火安排在毛坯进入机加工车间之前进行。对精度要求较高的复杂铸件,在机加工过程中通常安排两次时效处理:铸造-粗加工-时效-半精加工-时效-精加工。对高精度零件,如精密丝杠、精密主轴等,应安排多次消除应力热处理,甚至采用冰冷处理以稳定尺寸。

c. 最终热处理。最终热处理的目的是提高零件的强度、表面硬度和耐磨性,常安排在精加工工序(磨削加工)之前。常用的有淬火、渗碳、渗氮和碳氮共渗等。

③ 辅助工序的安排 辅助工序主要包括:检验、清洗、去毛刺、去磁、倒棱边、涂防锈油和平衡等。其中检验工序是主要的辅助工序,是保证产品质量的主要措施之一,一般安排在:粗加工全部结束后精加工之前、重要工序之后、工件在不同车间之间转移前后和工件全部加工结束后。

④ 数控加工工序与普通工序的衔接 数控工序前后一般都穿插有其他普通工序,衔接不好就容易产生矛盾,因此要解决好数控工序与非数控工序之间的衔接问题,最好的办法是建立相互状态要求,例如:要不要为后道工序留加工余量、留多少;定位面与孔的精度要求及形位公差等。其目的是达到相互能满足加工需要,且质量目标与技术要求明确,交接验收有依据。关于手续问题,如果是在同一个车间,可由编程人员与主管该零件的工艺员协商确定,在制定工序工艺文件中互审会签,共同负责;如果不是在同一个车间,则应用交接状态进行规定。