

英国Delcam(中国)有限公司正式授权培训教材  
数控加工技能竞赛参考教材

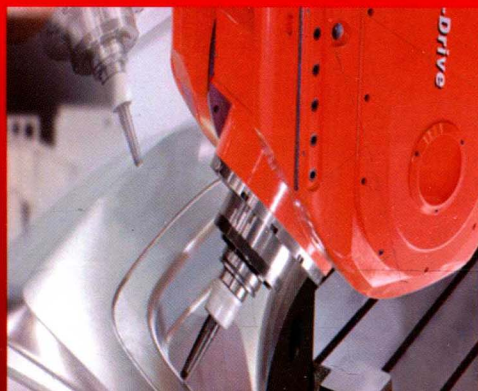
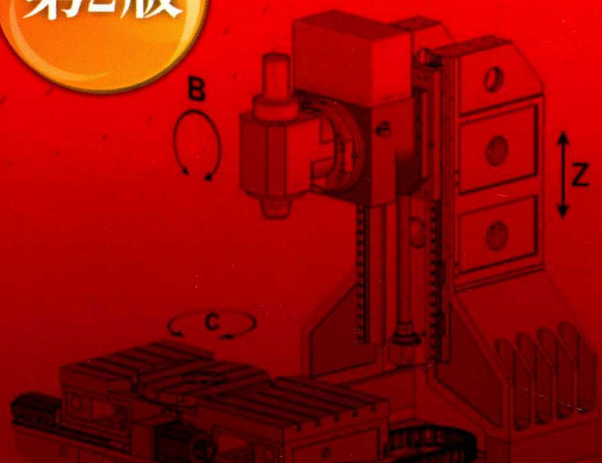


# PowerMILL

## 多轴数控加工编程 实用教程

朱克忆 彭劲枝 © 编著

第2版



- ◎ 基于五轴加工工艺的编程讲解，突出工艺核心
- ◎ 对实例的刀具路径进行优化，贴近加工实战
- ◎ 加工实例与工艺系统结合起来分析，身临其境
- ◎ 渐进式讲解刀具路径优化方法
- ◎ 更详尽的刀轴编辑与优化说明和举例
- ◎ 更详尽的后处理文件订制



附赠学习光盘

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



英国 Delcam (中国) 有限公司正式授权培训教材

数控加工技能竞赛参考教材

# PowerMILL 多轴数控加工 编程实用教程 第2版

朱克忆 彭劲枝 编著



机械工业出版社

本书是 PowerMILL 的进阶学习教材, 主要涉及四轴、五轴加工的数控编程及其后置处理, 共 11 章。第 1 章为多轴数控加工概述。第 2 章概述了多轴数控加工编程工艺。第 3 章介绍四轴加工编程。第 4 章讲述五轴定位加工编程方法。第 5 章介绍 PowerMILL 刀轴指向控制方法。第 6 章介绍 PowerMILL 投影精加工策略及应用于五轴加工的方法和实例。第 7 章介绍 PowerMILL 常用五轴联动加工编程策略。第 8 章介绍刀轴指向的编辑、五轴机床加工仿真、刀轴界限和自动碰撞避让等内容。第 9 章介绍应用 PowerMILL 计算典型工步五轴加工刀路的实例。第 10 章列举了典型五轴加工应用综合实例。第 11 章详细阐述了订制机床选项文件的方法与实例。为方便读者学习, 本书附赠一张光盘, 包含了书中所有的练习源文件、完成的项目文件以及视频教学资料。

本书可作为大中专院校、技工学校和各类型培训班师生的教材使用, 也可供机械加工企业、工科科研院所从事数控加工的工程技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

PowerMILL 多轴数控加工编程实用教程 / 朱克忆, 彭劲枝编著. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2015. 3

ISBN 978-7-111-49849-0

I. ①P… II. ①朱… ②彭… III. ①数控机床—铣床—金属切削—程序设计—教材  
IV. ①TG547

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 067250 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: 周国萍 责任编辑: 周国萍

责任校对: 张晓蓉 封面设计: 路恩中

责任印制: 刘 岚

北京玥实印刷有限公司印刷

2015 年 6 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 27 印张 · 651 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-49849-0

ISBN 978-7-89405-712-9 (光盘)

定价: 69.00 元 (含 1DVD)

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

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-88379203

策划编辑: 010-88379733

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

## 第 2 版前言

本书第 1 版自 2010 年出版以来，获得了广大读者的喜爱与支持，同时热心的读者也对本书的改进提出了很好的建议。另一方面，随着数控加工自动编程软件多轴加工功能的完善和发展、编著者加工经验的积累以及对零（部）件数控加工技术认识的加深，对第 1 版的内容进行了以下修订。

一是对第 1 版的内容进行了优选，对关键的内容进行了加强。比如说编程的核心是工艺，所以专门增加了多轴编程工艺的介绍。另外对每节的编程小例子也进行了优选，使之更具有代表性，更能充分地说明编程软件的功能。

二是为了使读者对零件多轴加工编程的完整过程有初步的掌握，第 2 版增加了综合运用多轴加工方式的实例。实例对多轴加工方式下粗加工、精加工以及清角等工步的操作步骤做了详尽的说明。读者学习完后，可有效地对前面章节所述较零散的编程功能进行“串联”，从而可以全局地掌握多轴加工编程。

三是归纳总结了多轴加工编程过程中的一些经验和注意点。任何工程软件的使用都有若干技巧，掌握这些技巧后，可以高效地发挥工程软件在项目实践中的作用，提升工作效率。

本书第 2 版更加注重结合加工实例讲解，有利于读者快速掌握多轴数控加工编程的方法与技巧，尤其是对于学习时间有限的在职读者，通过学习本书可以高效优质地掌握 PowerMILL 多轴数控加工编程方法。

本书在修订过程中遇到许多困难，要特别感谢学院、实验室领导以及我的家人对我的理解和支持，感谢英国 Delcam（中国）有限公司翟万略、陈家伟等工程师给予的大力支持。

由于编著者水平有限，书中难免存在一些错误和不妥之处，恳请各位读者发现问题后告诉编著者，以便改正。

朱克忆

2015 年 5 月

电子邮箱：keyizhu@163.com

# 第1版前言

本书是 PowerMILL 软件应用的进阶教程，所介绍的对象是多轴加工数控编程。要求读者对三轴加工数控编程有一定程度的掌握。另外要指出的是，本书的出发点是带多轴加工数控编程的初学者入门，与有经验的五轴加工数控程序员共同探讨和交流。

本书特别强调加工工艺思路的培养和训练。编著者认为，加工工艺思路是应主要掌握的内容，自动编程软件毕竟是一种依赖人使用的工具，用得好与不好，完全由编程人员的工艺水平来决定。因此，本书每一章的内容里都会涉及加工工艺方面的内容。另一个值得一提的方面是，作为本书的编著者，对于方法论与呆板的、纯粹的软件教材这两种风格，该取哪一种？本书力求告诉读者的是方法，而不仅仅是所述软件的某个功能怎么用。

本书在编写过程中，特别注意按读者的学习思路来编排内容。作者长期在学校工作，既是学生，要不断地学习新的内容，又主要从事教学、培训、加工工作。对于好教材的体会是，要多从读者的角度来考虑问题、讲解问题，而不能以编著者的思路为主线来编写。特别是工具类教材，其目的是要让读者快速地掌握工具，发挥在生产上，因此，更要以读者为主体，对于学习过程中可能遇到的障碍给予提示、帮助解决。所以，本书在讲述每一个例子时，首先告诉读者会遇到什么问题，解决方案有哪些，哪种方案是最经济、最高效、加工质量最好的，写出实际运用的切身感受与体会，这是作为教材（尤其是主要面向自学者的教材）应关注的极为重要的一面。教材不同于说明书或操作手册，这些资料只是对软件或机床功能的一个解释和说明，而没有站在使用者这个角度来思考问题。因此，在编著本书的过程中，一直十分注意结合与联系工作实际。工作目的是什么，操作流程是怎样的，如何着手，会遇到什么问题，又要注意哪些问题，软件的、机床的以及操作者的相关注意事项都是教材要涉及的。

CAM 软件有大量的自学读者，这部分读者对象往往不具备脱产学习的条件，在没有指导老师的情况下，一本编排讲究的书就成了最合适的老师和学习材料。为满足自学的要求，本书的内容编排在如何让读者更容易读懂、更容易接受新知识方面做了大量的思考。

在编写本书的过程中，编著者不停地思考这样一个问题：怎样使操作类的教材增添更多经典理论、成熟经验以及一些技术原理。因为编著者在工作过程中发现，没有理论指导的操作是盲目的，有很大的局限性。一旦加工环境改变，没有理论基础作为指导，就很难适应新的环境，对新出现的问题就会束手无策。而在这方面要做得完整的话，实在不是件容易的事。不管怎样，编著者在尝试这种编写方式，希望能给读者带来一些好的阅读收获。

本书在编写过程中遇到许多困难，要特别感谢学院、实验室领导以及我的家人对我的理解和支持，感谢英国 Delcam（中国）有限公司翟万略、汤崇勇、张启翼等工程师给予的大力支持。



由于编著者水平有限，书中难免存在一些错误和不妥之处，恳请各位读者在发现问题后告诉编著者，以便改正。

朱克忆

2010年

电子邮箱: [keyizhu@163.com](mailto:keyizhu@163.com)



# 关于本书叙述及使用过程中的一些约定

1) PowerMILL 软件中的表格具有参数众多、集中度高的特点, 在设置参数时, 并不是每个参数都需做改动, 因此, 本书将有改动的参数用虚线椭圆框将它们标示出来, 以便读者清楚要设置哪些参数, 从而提高阅读效率。另外, 有些参数设置时是有先后顺序要求的, 书中用顺序号①、②、③、…来标注说明。

2) 关于切削用量的设置, 要特别郑重地说明: 不同的机床、刀具、夹具等组成的工具系统的刚性是不一样的, 有些机床刚性好, 而有些机床刚性差一些, 因此, 即使是加工同一个产品, 不同的加工工厂所给定的切削用量以及编程参数都有可能不一样。本书的一部分加工实例中设置的切削用量是编著者所用的参数, 还有一部分加工实例中设置的切削用量和编程参数则是从刀具路径(也称“刀路”)计算速度更快这个角度出发来考虑的, 例如精加工刀具路径计算公差设为 0.1, 行距设为 2。在此, 要特别提示读者, 在实际编程过程中, 一定要根据自身所处的实际加工条件来设置切削用量和编程参数。

3) 在本书中, 有一部分对话框(或表格)的截图是不完整的, 其中不需要更改参数的部分没有包括进来, 这主要是为了节省版面。

4) 在本书的例子中, 大部分下切方式设置为“无”, 这是为了更清楚地看到刀具路径的分布情况。而在实际加工中, 初次下切方式以及后续的下切方式极为重要, 根据所用刀具和工件材料的不同, 一般会将下切方式设置为各种“斜向”方式, 请读者务必注意这一点。

5) 就编写五轴加工程序而言, 给刀具添加实际的刀具夹持相当有必要, 同时也极为重要。因为, 相对于三轴刀具路径, 五轴刀具路径更要考虑刀具夹持与工件、工作台、夹具发生碰撞的可能。因此, 在本书的练习中, 对刀具都添加了夹持, 编著者建议读者将所用刀具夹持制作成数据库, 以方便调用。

# 目 录

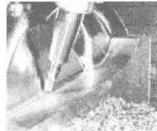
第 2 版前言

第 1 版前言

关于本书叙述及使用过程中的一些约定

第 1 章 多轴数控加工概述 .....	1
1.1 多轴数控加工的基本概念 .....	2
1.2 多轴数控加工的功能和特点 .....	4
1.3 多轴数控加工的应用 .....	7
1.4 多轴数控加工机床及编程软件、数控系统介绍 .....	11
1.4.1 多轴数控机床的种类、结构配置、特点及其用途 .....	11
1.4.2 多轴加工与 CAM 软件、数控系统的关系 .....	17
1.5 PowerMILL 软件与多轴数控加工编程 .....	18
1.5.1 PowerMILL2012 界面 .....	18
1.5.2 PowerMILL 软件在多轴编程方面的功能与特点 .....	19
1.5.3 PowerMILL 软件多轴编程策略概述 .....	21
第 2 章 多轴数控加工编程工艺 .....	25
2.1 多轴数控加工编程工艺基础 .....	25
2.2 多轴加工刀具路径质量的衡量标准 .....	27
2.3 典型零件多轴数控加工编程工艺 .....	29
2.3.1 多轴孔加工工艺例子 .....	29
2.3.2 侧型腔加工工艺例子 .....	29
2.3.3 深型腔清角加工工艺例子 .....	30
2.3.4 锥台侧面加工工艺例子 .....	31
第 3 章 PowerMILL 四轴数控加工编程 .....	32
3.1 PowerMILL 四轴数控加工编程概述 .....	32
3.2 3+1 轴加工编程 .....	33
3.3 四轴加工专用编程策略及实例 .....	42
第 4 章 PowerMILL 五轴定位加工编程 .....	66
4.1 五轴定位加工概述 .....	67
4.2 用户坐标系的创建与编辑 .....	68
4.2.1 PowerMILL 软件中各坐标系的概念 .....	68
4.2.2 创建与编辑用户坐标系 .....	69
4.3 五轴定位加工实例 .....	72





<b>第5章 PowerMILL 刀轴指向控制</b> .....	143
5.1 刀轴指向控制概述 .....	143
5.2 前倾/侧倾 .....	144
5.3 朝向点 .....	150
5.4 自点 .....	156
5.5 朝向直线 .....	160
5.6 自直线 .....	164
5.7 朝向曲线 .....	169
5.8 自曲线 .....	175
5.9 固定方向 .....	182
5.10 自动 .....	186
<b>第6章 PowerMILL 投影精加工策略</b> .....	188
6.1 点投影精加工策略 .....	189
6.2 直线投影精加工策略 .....	196
6.3 曲线投影精加工策略 .....	210
6.4 平面投影精加工策略 .....	216
6.5 曲面投影精加工策略 .....	222
<b>第7章 PowerMILL 常用五轴联动加工编程策略</b> .....	240
7.1 SWARF 精加工策略及其应用 .....	240
7.2 线框 SWARF 精加工策略及其应用 .....	259
7.3 曲面精加工策略及其应用 .....	264
7.3.1 曲面精加工策略详解 .....	265
7.3.2 曲面精加工应用实例 .....	266
7.4 参数螺旋精加工策略及其应用 .....	276
7.5 流线精加工策略及其应用 .....	281
<b>第8章 刀轴指向编辑与五轴机床加工仿真</b> .....	287
8.1 编辑刀轴指向 .....	287
8.2 刀轴限界与五轴机床加工校验 .....	294
8.3 自动碰撞避让 .....	304
8.4 刀轴运动光顺与稳定 .....	315
8.5 刀轴指向定位 .....	326
<b>第9章 典型工步五轴联动加工编程</b> .....	332
9.1 五轴联动清角加工编程 .....	332
9.2 五轴联动刻线加工编程 .....	336
9.3 五轴钻孔加工编程 .....	340
9.4 五轴轮廓切割编程 .....	347
9.5 三轴刀路转换为五轴刀路 .....	351



9.6 五轴联动管道加工编程.....	356
9.7 五轴联动整体叶轮加工编程.....	362
<b>第 10 章 PowerMILL 五轴加工叶片零件编程综合实例 .....</b>	<b>374</b>
10.1 计算刀具路径前的准备工作 .....	374
10.2 详细操作步骤 .....	375
<b>第 11 章 PowerMILL 多轴加工后置处理程序 .....</b>	<b>386</b>
11.1 后置处理程序.....	386
11.1.1 后置处理程序的输入数据 .....	386
11.1.2 后置处理程序结构和 workflow .....	388
11.1.3 PowerMILL 后置处理程序 .....	389
11.2 机床选项文件.....	390
11.2.1 机床选项文件的构成 .....	390
11.2.2 机床选项文件详解 .....	392
11.3 订制三轴加工机床选项文件 .....	403
11.4 订制多轴加工机床选项文件 .....	406
11.4.1 四轴加工机床选项文件订制 .....	406
11.4.2 五轴加工机床选项文件订制 .....	410
<b>附录 A PowerMILL 实用命令一览 .....</b>	<b>414</b>
<b>附录 B 提高多轴加工刀路安全性的措施 .....</b>	<b>415</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>419</b>

## 多轴数控加工概述

### 本章知识点

- ◇ 多轴数控加工领域内的基本概念
- ◇ 多轴数控加工的特点、应用领域
- ◇ 多轴数控加工的方式分类及应用
- ◇ 多轴加工软件及典型多轴加工机床的认识
- ◇ PowerMILL2012 数控加工自动编程软件介绍
- ◇ PowerMILL2012 多轴数控加工编程策略

在现代制造业中，精密机械加工的应用范围日趋普遍，精密模具的成型零件以及精密仪器设备的结构零件加工是精密机加工的典型应用领域之一。实现精密机加工的高档数控机床处于制造产业链的最前端，模具零件、精密结构件质量的高低在很大程度上受制于数控加工设备。在激烈的市场竞争中，制造业要求更短的生产周期、更高的加工质量以及更快的产品改型加工适应能力和更低的制造成本。要满足这些条件，越来越多的制造企业采用了高端的数控加工机床——四轴加工机床和五轴加工机床。

我们知道，三轴机床只有三根正交的运动轴（通常定义为  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三轴），只能实现三个方向的直线移动。因此，刀具与工件之间的相对位置关系比较简单，对于立式机床，刀具轴线保持铅垂状态；对于卧式机床，刀具轴线则保持水平状态。因此，沿刀轴（“刀具轴”的简称）方向（在此称为零件正向）视角能观察到的结构特征都能加工出来。但是一旦遇到整体零件加工（如加工整体叶轮），即当零件除了正向有结构特征需要加工外，零件侧向还有结构特征要加工时，三轴机床的刀轴由于没有旋转运动，刀具不能相对工件（或工件不能相对刀具）做旋转运动，因此该结构就不能加工出来。以往，在没有多轴机床可以利用的情况下，我们不得不通过设计多套夹具，进行多次安装、定位、夹紧，将可以在多轴机床上完成的整体一次加工分解为多次的三轴加工来完成侧面结构铣削，其显著缺陷是使零件加工周期延长，加工精度降低，制造成本上升。

根据机械原理的知识，不受约束的刀具（或工件）在空间具有六个自由度。换句话说，在理想情况下，不考虑具体机床结构时，刀具是可以切削到工件的任何位置的。但现实是，在金属切削过程中，工件与刀具之间会产生巨大的切削力和摩擦力，为了防止工件的位置移动，必须将工件夹紧（如打压板），使之固定在工作台上。因此，在工件安装面的法向空间内，不考虑刀具相对于工件的运动，此时，通过一次装夹全部加工完工件上除了安装在工作台上的面及特征之外的其余全部结构，刀具相对于工件具有五个自由度即可，即沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的三个直线移动和分别绕  $X$ 、 $Y$  轴（或  $X$ 、 $Z$  轴，或  $Y$ 、 $Z$  轴）的两个旋转运动。

## 1.1 多轴数控加工的基本概念

多轴数控加工是指在具有三根以上联合运动轴的机床上，实现三根以上轴运动进行切削的一种加工方式，这些运动轴可以是全部联动的，也可以是一部分运动轴联动而另一部分轴固定在某个空间位置的。

为便于理解多轴数控加工的概念，下面进一步阐述数控机床运动轴的基本概念。

### 1. 数控机床运动轴配置及方向定义

要深入理解多轴加工的概念，应该首先了解数控机床运动轴配置及名称的相关规定。根据 GB/T 19660—2005《工业自动化系统子集成 机床数值控制坐标系和运动命名》的规定，数控机床坐标系采用右手笛卡儿坐标系，如图 1-1 所示，基本坐标轴为  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三根直线轴，对应每一根直线轴的旋转轴分别用  $A$ 、 $B$  和  $C$  轴来表示。

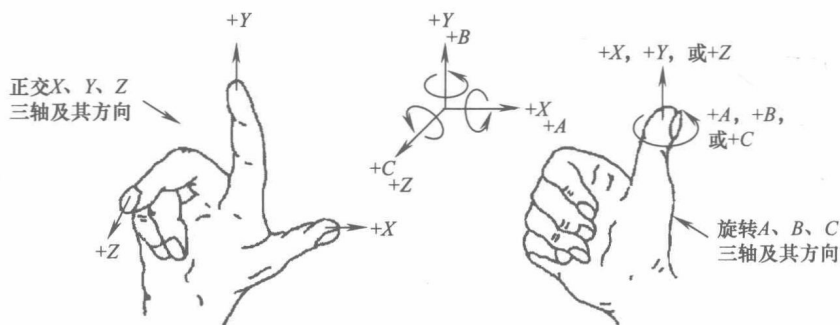


图 1-1 机床坐标名称及方向定义

一般规定， $Z$  轴为平行于传递切削动力的机床主轴的坐标轴， $Z$  轴的正方向是增大工件与刀具距离的方向； $X$  轴作为水平的、平行于工件装夹平面的轴，平行于主要的切削方向，且以此为正方向； $Y$  轴的运动则根据  $X$  轴和  $Z$  轴按右手法则确定。

如图 1-1 所示，绕  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  轴做旋转运动的旋转轴分别被命名为  $A$ 、 $B$  和  $C$  轴。 $A$ 、 $B$  和  $C$  轴的正方向相应地表示在  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  坐标轴正方向上，按照右手螺旋前进方向确定。

根据需要，机床可能还具有除  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  三个直线轴， $A$ 、 $B$  和  $C$  三个旋转轴以外的附加轴。对于直线运动，把平行于  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  轴以外的第二组直线轴，分别指定为  $U$ 、 $V$  和  $W$  轴，实例如图 1-2 所示， $Z$  轴方向，滑枕可以上下移动（ $Z$  向），同时横梁还可以上下移动（ $U$  向）。如果还有第三组直线轴，分别指定为  $P$ 、 $Q$  和  $R$  轴。对于旋转轴，如果机床具备第一组旋转运动  $A$ 、 $B$  和  $C$  的同时，还有平行于  $A$  和  $B$  的第二组旋转运动，则指定为  $D$  轴或  $E$  轴。

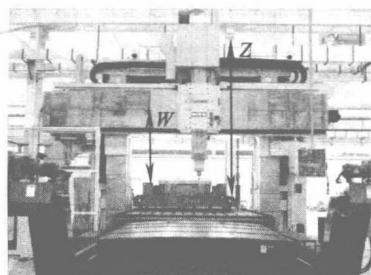


图 1-2 带附加轴的机床实例

### 2. 多轴数控加工的方式分类

根据多轴机床运动轴配置形式的不同，多轴加工机



床可以使用不同的加工方式进行切削。归纳起来,可以将多轴数控加工分为以下几种方式:

1) 四轴联动加工:它是指在四轴机床(比较常见的机床运动轴配置是 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $A$ 四轴)上进行四根运动轴同时联合运动的一种加工形式。四轴加工能完成图1-3所示的零件以及类似零件的加工。

2) 3+1轴加工:也可以说是四轴定位加工。通常是指在四轴机床上,实现三根运动轴同时联合运动,另一根运动轴固定在某一位置的一种加工形式。图1-4所示方形零件可以通过四轴加工来完成。

3) 五轴联动加工:也叫连续五轴加工。它是指在五轴联动机床上进行五根运动轴同时联合运动的切削加工形式。五轴联动加工能加工出诸如发动机整体叶轮、整体车模一类形状复杂的零部件,如图1-5所示。

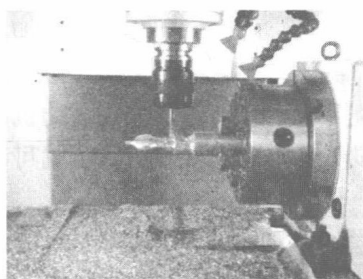


图 1-3 四轴加工及产品

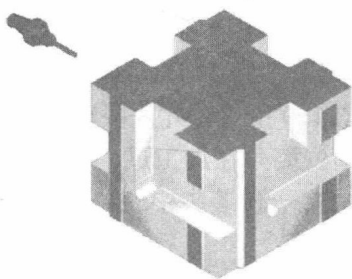


图 1-4 3+1 轴加工及产品

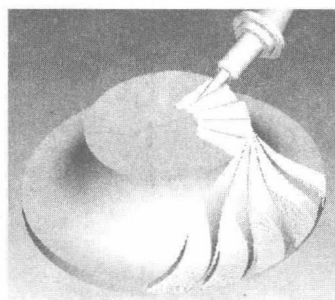


图 1-5 五轴联动加工整体叶轮

4) 五轴定轴加工:也叫定位五轴加工或五轴定位加工,可分为3+2轴加工和4+1轴加工两种方式。

3+2轴加工是指在五轴机床(比如 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $A$ 、 $C$ 五根运动轴)上进行 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 三轴联合运动,另外两根旋转轴(如 $A$ 、 $C$ 轴)固定在某一角度位置的加工方式。3+2轴加工是五轴加工中最常采用的加工方式,使用这一加工方式能完成零部件大部分侧面结构的加工。另外,市面上所谓的“五面体加工机床”,这类五轴机床实现的就是3+2轴加工方式。图1-6所示是五轴机床倾斜刀轴进行3+2轴加工的实例。

4+1轴加工是指在五轴机床上,实现四根运动轴同时联合运动,另一根运动轴固定在某一空间位置的一种加工方式。图1-7所示是五轴机床保持刀轴为水平状态对倒锥体进行精加工的实例,它实现的就是4+1轴加工。

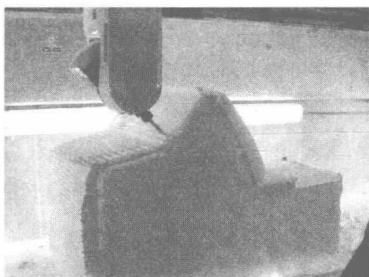


图 1-6 3+2 轴加工模型

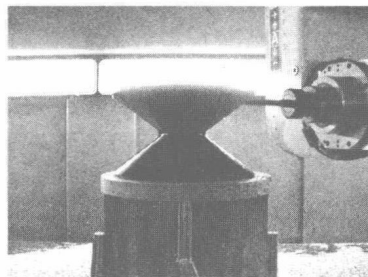


图 1-7 4+1 轴加工锥形零件

## 1.2 多轴数控加工的功能和特点

由于刀具相对于工件（或工件相对于刀具）能形成各种角度位置关系，所以多轴数控加工机床在具备三轴数控机床的全部功能的同时，解决了三轴数控加工不能完成的如下难题。

### 1. 加工复杂自由曲面

可以加工一般三轴数控机床所不能加工或很难一次装夹完成加工的连续、平滑的自由曲面，如航空发动机和汽轮机的叶片，舰艇用的螺旋推进器，以及许多具有特殊曲面和复杂型腔、孔位的壳体和模具等。

图 1-8 所示为汽轮机整体叶片零件。

这一类零部件如果用三轴数控机床加工，那么由于其刀具相对于工件的位姿角在加工过程中不能变（图 1-9），加工空间自由曲面时，刀具和工件就有可能发生干涉或者出现欠加工（即型面加工不到位，如图 1-9 所示，叶片根部刀具就切不进去）。而用五轴联动机床加工时，由于刀具相对于工件的位姿角在加工过程中可随时调整，如图 1-10 所示，就可以避免刀具与工件间的干涉，并能在一次装夹中完整地加工出全部型面及其他特征。

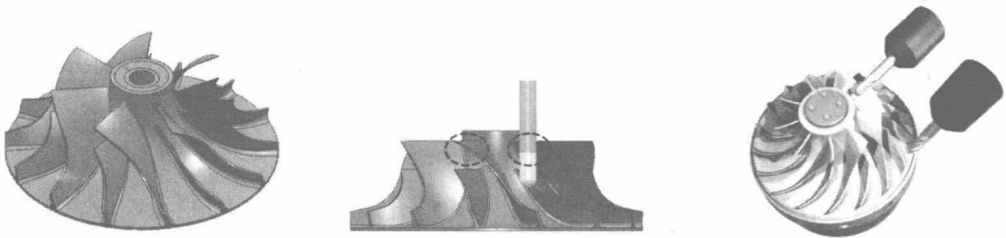


图 1-8 汽轮机整体叶片零件 图 1-9 整体叶轮零件与刀轴 图 1-10 整体叶轮零件五轴联动加工

### 2. 使用更短的刀具加工深长型腔零件和高陡峭壁的凸模零件

在零件加工过程中，使用的刀具悬伸出机床主轴越长，刀轴的旋转偏摆量增大的趋势明显，容易导致凸模欠切、凹模过切，零件加工精度就会显著降低。如图 1-11 所示，对于此带深长侧壁零件，在三轴机床上，必须选用刀柄和切削刃都足够长的刀具才能切削成型。而使用五轴加工机床能在加工相同对象时，通过摆动刀轴避开刀柄与侧壁碰撞，从而实现使用短刀具加工出深长型腔或高陡峭壁的表面，如图 1-12 所示。

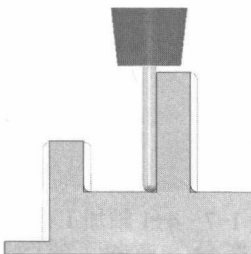


图 1-11 使用长刀具加工零件

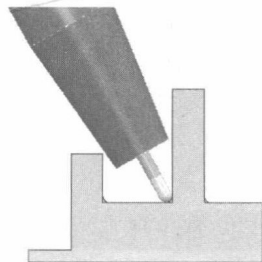


图 1-12 使用短刀具加工零件





### 3. 加工大型模型、模具零件的必需技术

在加工诸如 1:1 整体车模、1:1 风力发电机叶片（分段）等大型零部件时，由于模型侧壁往往较深且带有成形特征，必须使用五轴机床才能加工出产品。如图 1-13 所示，整体车模的高度一般都超过 1m，并且车模侧围不是简单的平面，而是有凹凸不平的成形曲面特征。因此，在一次装夹中，使用三轴机床是不能完整加工出来的，而必须使用五轴机床通过调整刀具与工件的角度位置进行加工，如图 1-14 所示。

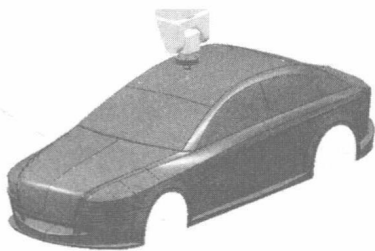


图 1-13 三轴正向加工车模

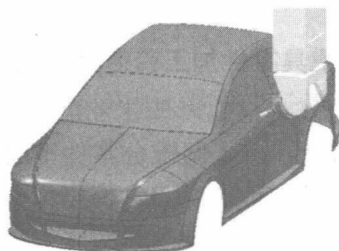


图 1-14 五轴加工整体车模

### 4. 可以提高加工空间自由曲面的尺寸精度和表面质量

使用三轴机床加工复杂曲面时，通常采用球头铣刀。而球头铣刀是以点接触成形的，不仅切削效率低下，而且由于刀具与工件间的位姿角在加工过程中不能改变，一般很难保证用球头铣刀上的最佳切削点（即球头上线速度最高点）进行切削，反而经常出现切削点落在球头铣刀上线速度等于零的旋转轴尖点上的情况（即所谓的“静点切削”）。图 1-15 和图 1-16 所示可以清楚地看出刀具与工件表面的接触点位置。

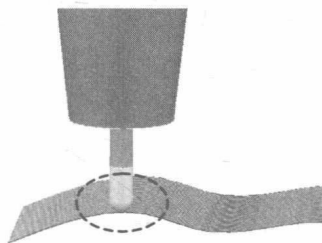


图 1-15 球头铣刀静点切削（轴测图）

在这个位置切削时，  
刀具是线速度为0的  
点来切削的

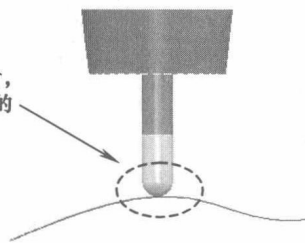


图 1-16 球头铣刀静点切削（向视图）

静点切削不仅造成切削效率低下，加工表面质量严重恶化，而且往往需要采用手动修补，因此也就可能丧失加工精度。而采用五轴机床加工，由于刀具与工件间的位姿角随时可调，如图 1-17 和图 1-18 所示，不仅可以避免这种情况的发生，而且还可以时时充分利用刀具的最佳切削点来进行切削，甚至可以用线接触成形的螺旋立铣刀来代替点接触成形的球头铣刀进行三维自由曲面的铣削加工，从而获得更高的切削速度、侧吃刀量，也就获得了更高的切削效率和更好的加工表面质量。

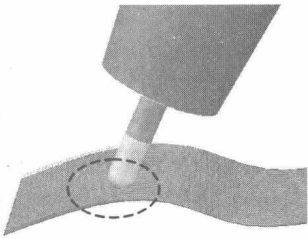


图 1-17 刀具非静点切削（轴测图）

倾斜刀轴后，刀具是用具有一定切削线速度的点来切削的

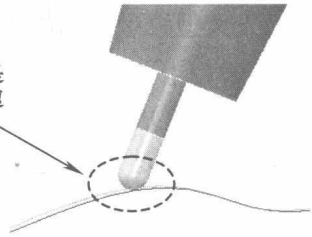


图 1-18 刀具非静点切削（向视图）

## 5. 为模具零件加工带来更快的加工效率

这一功能突出地表现在带角度的侧面铣削加工方面。如图 1-19 所示，对于圆锥台零件锥面的加工，使用五轴机床切削时，通过动态地改变刀轴位姿角，可以使用圆柱立铣刀的侧刃来加工，从而代替使用球头铣刀来加工。一方面大大地提高了加工效率；另一方面，这种工艺也可以消除由于球头铣刀加工所造成的肋骨状纹路，达到较为理想的表面质量，减少因清理表面而增加的人工铣削和手工作业量。

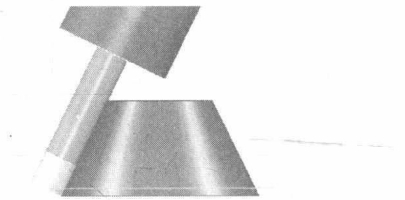


图 1-19 五轴加工圆锥台

## 6. 提高刀具寿命

五轴加工通过改变刀具切削工作部位来延长刀具的使用寿命。虽然使用高速加工机床可以获得快速的切削效率，并缩短工时，但刀具磨损往往只发生在刀尖，使得刀具的有效寿命缩短。使用五轴加工机床进行加工时，刀具除了刀尖切削外，更多时候是使用刀具侧刃来切削，如图 1-20 所示，所以刀具利用率提高了很多，也因此提高了刀具的整体寿命。

多轴加工虽然具备上述优势，但到目前为止，却尚未得到广泛普及，仍局限于一些资金和技术雄厚的企业和部门，这主要是因为多轴加工还存在以下一些问题。

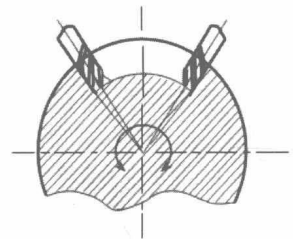


图 1-20 刀具侧刃切削工件示意图

### 1. 五轴数控编程较繁琐，操作要复杂一些

首先，五轴加工程序（NC 代码）不具备通用性，只能针对特定机床使用，这是每一个数控编程人员都感触颇深的问题。三轴机床只有直线坐标轴，而五轴机床结构形式多样，旋转轴可以是  $A$ 、 $C$  轴组合， $B$ 、 $C$  轴组合或  $A$ 、 $B$  轴组合，同一段 NC 代码可以在不同的三轴数控机床中获得同样的加工效果，但某一种五轴机床的 NC 代码却不能适用于其他类型的五轴机床。其次，为了编制零件侧面的倒勾结构的五轴加工程序，往往要从不同的视角来建立编程条件（如创建坐标系、设置安全高度等）或者采用一些较抽象的编程策略，增加了编程的工作量。

### 2. 五轴加工效率以及刚性有待提高

五轴联动加工时，由于要完成五个坐标同时运动，其实际进给率往往远远低于设定的进给率，导致加工效率不高。另外，同时运动的五个坐标在加工过程中，机床刚性比三轴



加工时要低，这也会影响工件的加工精度和加工表面质量。

### 3. 采购与使用成本高

五轴机床和三轴机床之间的价格差距较大。大体上，五轴机床的价格要比三轴机床的高出约 30%~50%。除了机床本身的投资之外，还必须对 CAD/CAM 系统软件和后处理选项文件进行升级，对编程人员和操作人员进行专门培训，才能适应五轴加工的要求。运动坐标数目的增加，常导致机床故障率的提高，需要更多的维护成本。

## 1.3 多轴数控加工的应用

虽然多轴加工机床的普及应用还有一些局限因素，但在下面一些加工领域，已经普遍应用了多轴数控加工技术来制造产品。

### 1. 模具制造业中的应用

模具制造中的五轴加工应用主要包括肋板加工、刨角、深孔或芯部加工等，同样槽加工、倒角、陡壁和五轴钻削加工也充分发挥了五轴加工的优势。我们知道，模具加工常见的困难是过深的模具型腔、过高的模具型芯及很小的内 R 角。此时常见的解决方案是使用延长杆，降低切削量及转速来进行加工。此外，在传统上，还会用到的方法包括：将三轴机床加工不出来的结构拆分，将零件分块加工，或者是根据零件结构设计专用夹具，再者对深型腔零件采用特种设备（如电火花加工机床）来加工。这些处理方法均会影响加工质量和加工效率。采用五轴机床倾斜刀轴加工，不仅可以加工出整体零件来，更能显著提高产品加工质量和效率。图 1-21~图 1-24 所示是一些典型模具零件应用五轴加工的实例。



图 1-21 汽车前保险杠模具加工

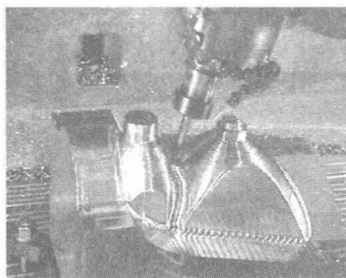


图 1-22 某型车灯凸模加工

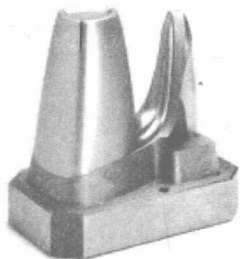


图 1-23 深长侧壁凸模零件

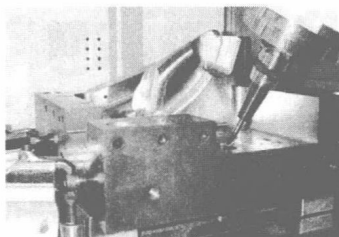


图 1-24 凹模零件加工