

英国 Delcam (中国) 有限公司正式授权培训教材



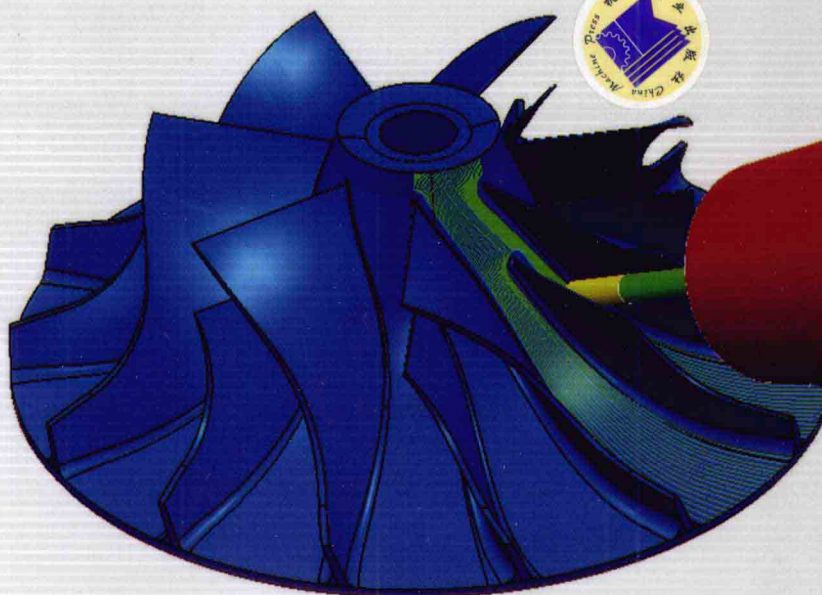
Power MILL

多轴数控加工编程实用教程

○ 朱克忆 编著
○ 杨旭静 主审



 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

PowerMILL 多轴数控加工 编程实用教程

朱克忆 编著
杨旭静 主审



机械工业出版社

门户网站: <http://www.cmpbook.com>

教材网: <http://www.cmpedu.com>

美国大陆国际网

机械工业出版社 (010) 88391066

发行部: (010) 8839294

发行部二: (010) 8839249

发行部三部: (010) 8839821

本书是 PowerMILL 软件的进阶学习教材, 主要涉及四轴加工、五轴加工的数控编程及其后置处理。第 1 章对多轴加工进行了概要地论述, 包括多轴加工的定义、功能和应用, 多轴机床的分类、结构及其特点, 并介绍了 PowerMILL 软件的特点和在多轴数控加工编程方面的策略。第 2 章着眼于四轴加工编程, 包括 3+1 轴加工和四轴联动加工编程。第 3 章讲述定位五轴加工编程的方法, 包括用户坐标系的创建与编辑、定位五轴加工实例等。第 4 章介绍了 PowerMILL 刀轴指向控制的方法, 详细讨论了 PowerMILL 软件提供的朝向点等九种刀轴指向控制方法。第 5 章介绍了 PowerMILL 投影精加工策略, 包括点投影、直线投影、曲线投影、曲面投影等策略及应用于五轴编程的方法和实例。第 6 章介绍了 SWARF 精加工策略和线框 SWARF 精加工策略。第 7 章介绍了刀轴指向的编辑、刀轴界限和自动碰撞避让等内容。第 8 章列举了一些典型的五轴加工应用实例。第 9 章介绍了 PowerMILL 多轴加工后置处理程序。

本书内容编排遵循于零件加工过程中的工艺顺序, 同时也遵循于 PowerMILL 软件的学习流程, 在讲解软件各策略时, 总是先用加工过程中遇到的问题来引出该策略, 然后进行解释, 最后列举一个或多个典型的例子来说明。

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、工科院院所从事数控加工的工程技术人员参考。

为方便读者学习, 本书附带了一张光盘, 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。

图书在版编目 (CIP) 数据

PowerMILL 多轴数控加工编程实用教程 / 朱克忆编著. —北京: 机械工业出版社, 2010.1

ISBN 978-7-111-28870-1

I. P... II. 朱... III. 数控机床: 铣床—金属切削—程序设计—应用软件, PowerMILL—教材
IV. TG547

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 227506 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: 庞 晖

责任印制: 洪汉军

三河市国英印务有限公司印刷

2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·18.5 印张·452 千字

0001—4000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-28870-1

ISBN 978-7-89451-339-7 (光盘)

定价: 39.00 元 (含 1CD)

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

社服务中心: (010) 88361066

销售一部: (010) 68326294

销售二部: (010) 88379649

读者服务部: (010) 68993821

网络服务

门户网: <http://www.cmpbook.com>

教材网: <http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

前 言

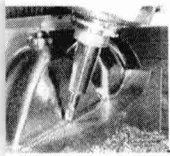
本书是 PowerMILL 软件应用的进阶教程,所介绍的对象是多轴加工数控编程。要求读者对三轴加工数控编程已经有一定程度的掌握。另外要指出的是,本书的出发点是带多轴加工数控编程的初学者入门,与有经验的五轴加工数控程序员共同探讨和交流。

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,作为教材的编著者,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教材内容。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教材。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到的。

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作了大量的思考。

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宽容和支持，感谢 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。

湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室 朱克忆

2010年1月

E-Mail: 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作改动,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,而有些机床刚性要较差一些,因此,即便是加工同一个产品,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作者所用的参数,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,作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

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	1
1.2 多轴数控加工的功能和特点	3
1.3 多轴数控加工的应用	6
1.4 多轴数控加工机床及编程软件、数控系统介绍	11
1.5 PowerMILL 软件与多轴数控加工编程	15
第 2 章 PowerMILL 四轴数控加工编程	23
2.1 PowerMILL 四轴数控加工概述	23
2.2 3+1 轴加工编程	24
2.3 四轴联动加工编程	32
第 3 章 PowerMILL 定位五轴加工编程	45
3.1 定位五轴加工概述	45
3.2 用户坐标系的创建与编辑	47
3.3 定位五轴加工实例	50
第 4 章 PowerMILL 刀轴指向控制	97
4.1 刀轴指向控制概述	97
4.2 前倾/侧倾	98
4.3 朝向点	106
4.4 自点	112
4.5 朝向直线	116
4.6 自直线	119
4.7 朝向曲线	122
4.8 自曲线	127
4.9 固定方向	132
4.10 自动	135
第 5 章 PowerMILL 投影精加工策略	137
5.1 点投影精加工策略	138



5.2	直线投影精加工策略	144
5.3	曲线投影精加工策略	155
5.4	平面投影精加工策略	161
5.5	曲面投影精加工策略	166
5.6	曲面投影精加工中有关参考曲面的注意点	176
第 6 章	SWARF 精加工策略	182
6.1	SWARF 精加工策略详解	183
6.2	SWARF 精加工策略的应用	190
6.3	线框 SWARF 精加工策略详解及其应用	199
第 7 章	刀轴指向编辑与五轴加工仿真	204
7.1	编辑刀轴指向	204
7.2	刀轴限界与五轴机床加工仿真	216
7.3	自动碰撞避让	223
7.4	刀轴指向光顺	230
第 8 章	五轴编程的应用实例	234
8.1	五轴刻线加工	234
8.2	五轴钻孔加工	237
8.3	五轴轮廓切割	243
8.4	使用平头铣刀进行侧壁五轴铣削	245
8.5	单个叶片精加工	249
8.6	整体叶轮加工	255
第 9 章	PowerMILL 多轴加工后置处理程序	264
9.1	后置处理程序	264
9.2	订制机床选项文件	268
附录	PowerMILL 实用命令一览	284
	参考文献	285

第1章

多轴数控加工概述

在现代制造业中,精密机械加工日趋普遍。实现精密加工的高档数控机床、模具处于制造产业链的最前端,而模具产品质量的高低在很大程度上又受制于数控设备。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自由度。因此,刀具与工件之间的相对位置关系较简单,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都能加工出来,而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加工需要外,零件侧向还有结构特征要加工时,三轴机床由于没有旋转运动自由度,刀具不能相对工件(或工件不能相对刀具)作旋转运动,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,但这样使零件加工周期延长,加工质量大大降低。

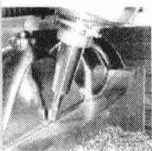
根据机械原理的知识,不受约束的刀具(或工件)在空间具有六个自由度。换句话说,在理想情况下,不考虑具体机床结构时,刀具是可以切削到工件的任何位置的。但现实是,在金属切削过程中,工件与刀具之间会产生巨大的切削力和摩擦力,为了防止工件的位置移动,必须将工件夹紧(如打压板),使之固定在工作台上。此时,在理论上,装在机床主轴上的刀具与装在机床工作台上的工件之间存在五个自由度,即沿X、Y、Z轴的三个直线移动和分别绕X、Y轴(或者X、Z轴、Y、Z轴)的两个旋转运动。因此只要机床能实现上述五个自由度,即可加工出工件上除了安装在工作台上的面之外的其余全部结构。

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动轴的机床上,实现三根以上轴运动的一种加工方式,这些运动轴可以是全部联动的,也可以是部分轴联动的。

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JB/T 3051—1999《数控机床 坐标和运动方向的命名》(此机械行业标准与ISO841:1974标准等效)的规定,标准的坐标系统,是一个右手直角笛卡儿坐标系统,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。

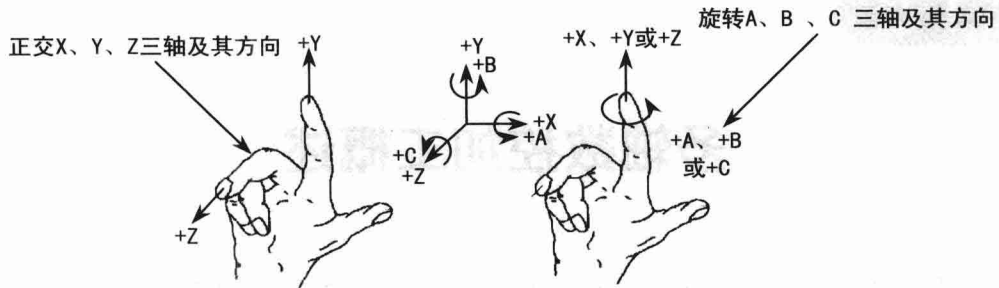


图 1-1 机床坐标名称及方向定义

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，它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 轴作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。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、B 和 C 的第二组旋转运动，则指定为 D 或 E 轴。

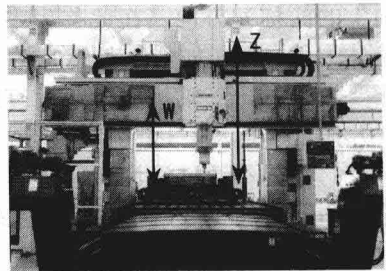


图 1-2 带附加轴的机床实例

2. 多轴数控加工的分类

根据多轴机床运动轴配置形式的不同，可以将多轴数控加工分为以下几种：

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。四轴加工能完成如图 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。它是指在四轴机床上，实现三根运动轴同时联合运动，另一根运动轴间歇运动的一种加工形式。图 1-4 所示方形零件可以通过四轴加工来完成。

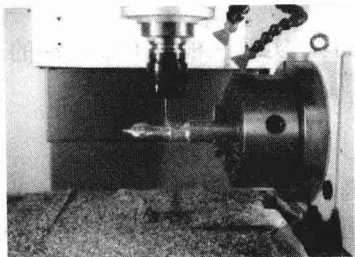


图 1-3 四轴加工及产品

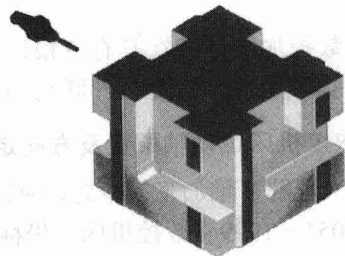
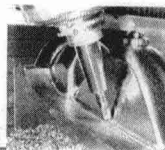


图 1-4 3+1 轴加工及产品



3) 五轴联动加工：也叫连续五轴加工。它是指在五轴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。

4) 五轴定轴加工：也叫定位五轴加工，可分为 3+2 轴加工和 4+1 轴加工。

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）固定在某角度的加工。3+2 轴加工是五轴加工中最常用的加工方式，能完成大部分侧面结构的加工。另外，五面体加工机床实现的就是一种简单的 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。

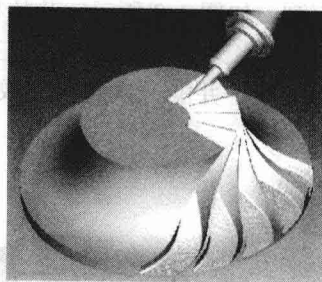


图 1-5 五轴联动加工整体叶轮

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，另一根运动轴作间歇运动的一种加工形式。图 1-7 所示是五轴机床将刀轴置成水平状态对锥体进行精加工的实例。

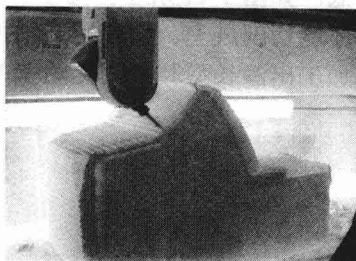


图 1-6 3+2 轴加工模型

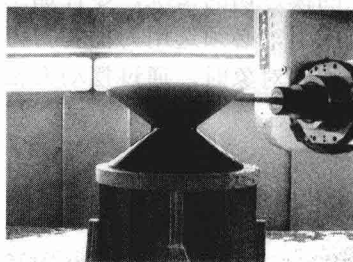


图 1-7 4+1 轴加工锥形零件

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机床的全部功能的同时，解决了三轴机床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（如图 1-9 所示），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的情况（即加

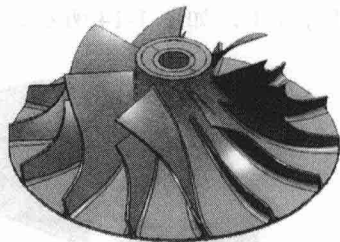


图 1-8 汽轮机整体叶片零件

工不到,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,则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,并能一次装夹完成全部加工。

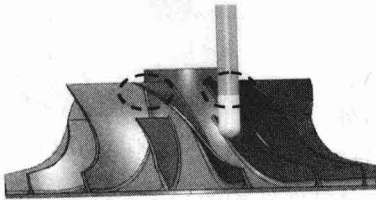


图 1-9 整体叶轮零件与刀具

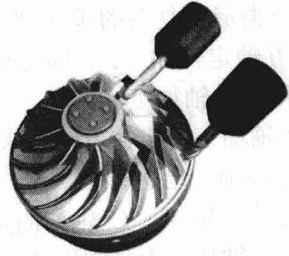


图 1-10 整体叶轮零件五轴联动加工

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,使用的刀具悬出机床主轴越长,刀轴的偏摆量越大,容易导致凸模欠切、凹模过切的情况,零件加工质量就会显著降低。如图 1-11 所示,对于台阶零件,在三轴机床上,必须选用刀柄和刀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。

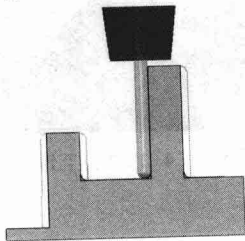


图 1-11 使用长刀具加工零件

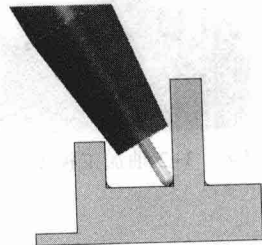


图 1-12 使用短刀具加工零件

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型特征,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,而是有凹凸不平的结构特征,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。

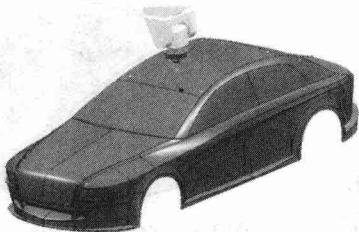


图 1-13 三轴正向加工车模

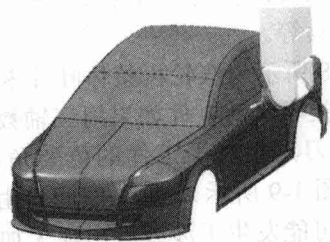
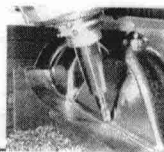


图 1-14 五轴加工整体车模



4. 可以提高空间自由曲面的加工精度和加工质量

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型的，不仅切削效率低，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线上的情况（即所谓的“静点切削”）。如图 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。

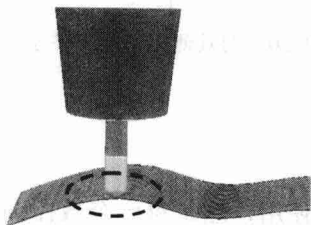


图 1-15 球头铣刀静点切削（轴测图）

在这个位置切削时，刀具是用切削线速度为0的点来切削的

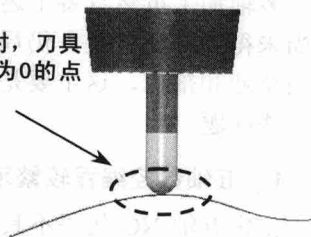


图 1-16 球头铣刀静点切削（向视图）

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型的螺旋立铣刀来代替点接触成型的球头铣刀进行型面的铣削加工，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。

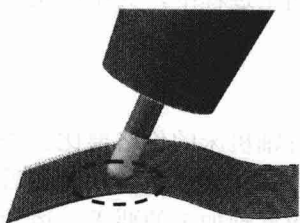


图 1-17 刀具非静点切削（轴测图）

倾斜刀轴后，刀具是用具有一定切削线速度的点来切削的

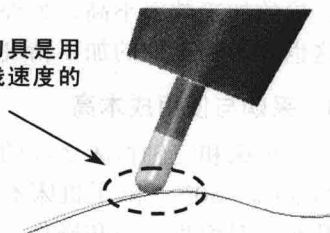


图 1-18 刀具非静点切削（向视图）

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表面的侧面铣削加工方面。如图 1-19 所示，对于圆锥台零件，使用五轴机床切削时，可以使用圆柱立铣刀代替球头铣刀。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球端立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。

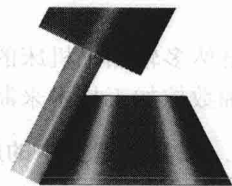
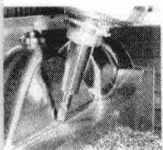


图 1-19 五轴加工圆锥台

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。

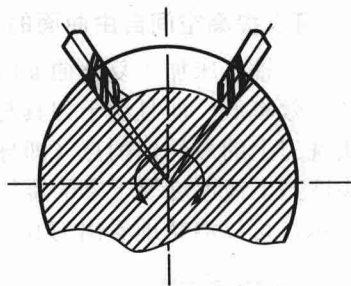


图 1-20 刀具侧刃切削工件示意图

1. 五轴数控编程较繁琐，操作要复杂一些

首先五轴 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 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上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，为了编制加工侧面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，其实际进给率要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，其刚性比三轴加工低，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

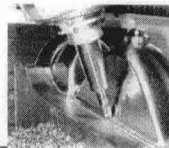
五轴机床和三轴机床之间的价格差距较大。大体上，五轴机床的价格要比三轴机床的高出约 30%~50%。除了机床本身的投资之外，还必须对 CAD/CAM 系统软件和后处理器进行升级，对编程人员和操作人员进行专门培训，才能适应五轴加工的要求。运动坐标数目的增加，常导致机床故障率的提高，需要更多的维护成本。

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筋板加工、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

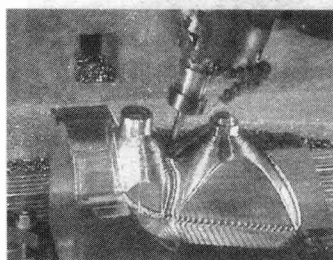


图 1-22 某型车灯凸模加工

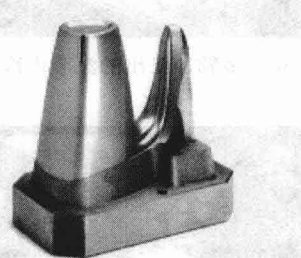


图 1-23 深长侧壁凸模零件

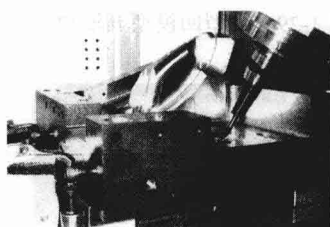


图 1-24 凹模零件加工

2. 应用于整体模型的加工

在新产品开发初期，要求短时间内把样品制作出来，评价其外观及结构的合理性，以利于及时进行修改。模型加工讲求速度与效率这一突出特点，使得大部分制造商会预先用较容易加工的非金属材料如树脂（代木）、泡沫等材料进行轻切削，加工出该型产品来。模型加工与模具加工不同，如飞机模型、轮船模型、汽车模型的加工，它制作的是产品原型而不是凸凹模具，使用五轴加工机床来加工产品，会避免耗费许多工时来对工件进行翻面及定位，从而提高样品加工效率。图 1-25~图 1-34 所示是一些典型模型样品应用五轴加工的实例。



图 1-25 某型整体车模加工

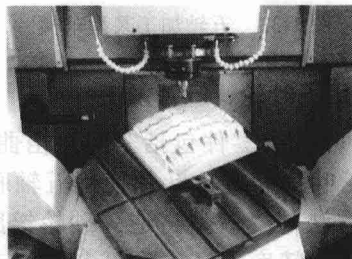


图 1-26 轮胎（部分）加工

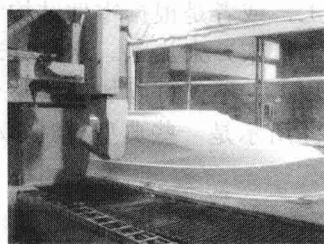


图 1-27 船模加工

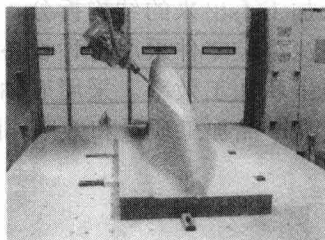


图 1-28 凸模型加工

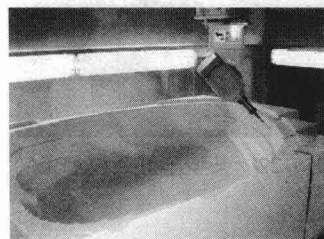


图 1-29 大型凹模型五轴加工

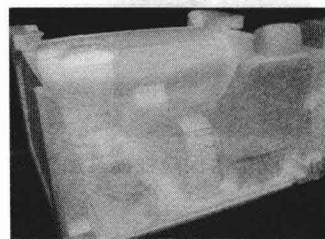


图 1-30 多轴加工出的汽车内饰模型

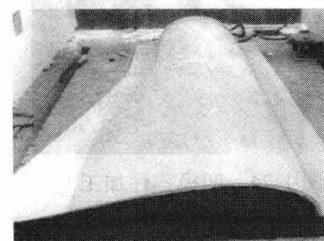


图 1-31 五轴加工某型叶片凸模

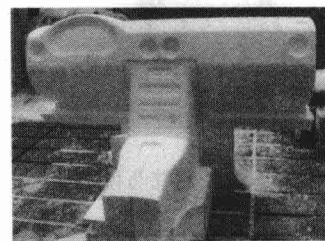


图 1-32 五轴加工的轿车仪表台模型

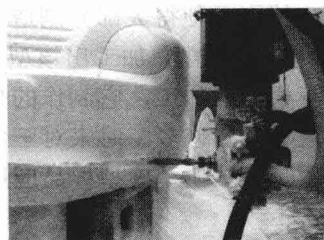


图 1-33 五轴加工某型车模

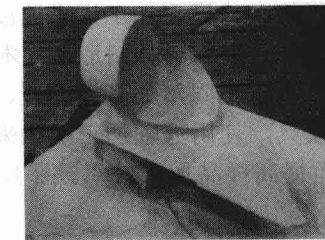


图 1-34 五轴加工出的后视镜座

3. 应用于叶轮、叶片加工

叶轮、叶片类零件包括空间自由曲面,要求加工过程中刀轴指向能跟随曲面作变化。因此,涡轮叶片和螺旋叶片使用五轴联动加工是毋庸置疑的。在大中型机组中,长期以来采用的方法是“砂型铸造—砂轮铲磨立体样板检测”,这种制造技术生产效率非常低下、产品制造精度不高。采用多轴加工技术,可以高效、精确、完整地加工出叶轮、叶片零件。图 1-35~图 1-38 所示是一些典型叶片、叶轮零件应用五轴加工的实例。

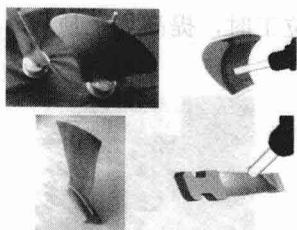


图 1-35 小型叶片零件加工

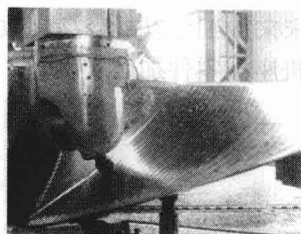


图 1-36 螺旋桨五轴加工

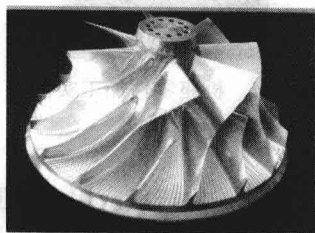


图 1-37 整体叶轮加工

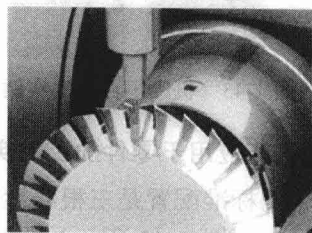


图 1-38 大叶轮加工

4. 航空、航天器零部件加工

由于功能和结构的要求，很多航空和航天器类零件是框架类零件，这些零件的毛坯件一般是锻件，零（部）件在结构上具有三维表面特征，有较多的薄壁加强筋结构，在三轴机床上无法加工出来。图 1-39、图 1-40 所示是一些框架类零件应用五轴加工的实例。

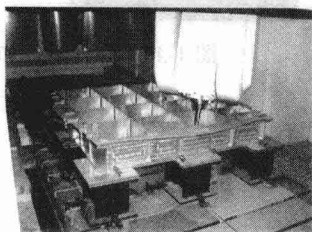


图 1-39 五轴加工薄壁框

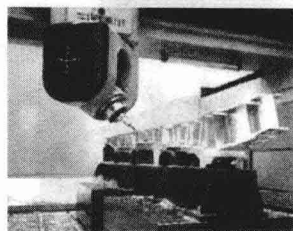


图 1-40 航空器零件五轴加工

5. 气缸、机座类零件加工

发动机气缸具有复杂的内部结构，一些气缸孔还具有弯曲弧度，无法使用三轴加工方式来进行精加工。因此，气缸孔的加工方式一般使用五轴机床来进行切削。图 1-41、图 1-42 所示是气缸孔加工实例。

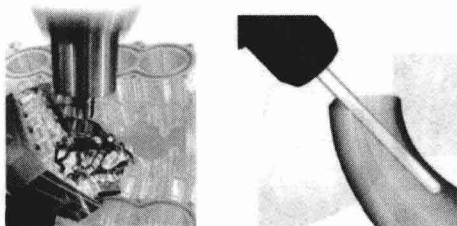


图 1-41 发动机气缸孔加工一



图 1-42 发动机气缸孔加工二

与气缸零件相类似，机座类零件往往也是具有复杂内部结构以及侧孔、槽等特征的，