



国家出版基金资助项目

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

数字制造科学与技术前沿研究丛书

复杂曲面零件 五轴数控加工理论与技术

Theory and Technique for
Five-axis NC Machining of Complex Surface Part

毕庆贞 丁 汉 王宇晗 著



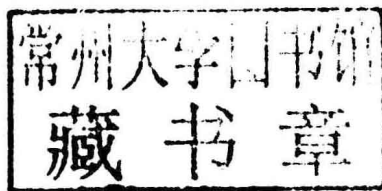
国家出版基金资助项目

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

数字制造科学与技术前沿研究丛书

复杂曲面零件五轴数控 加工理论与技术

毕庆贞 丁 汉 王宇晗 著



武汉理工大学出版社

· 武汉 ·

内 容 提 要

本书从五轴数控加工基本原理出发,在五轴加工后置处理、五轴数控系统转角光顺及速度规划、复杂曲面五轴加工轨迹规划、五轴机床运动轴几何误差检测与补偿、原位测量与智能控制等方面提出了新的算法与模型,并针对各项研究成果,给出了应用实例加以验证;并结合设计-加工-测量一体化制造技术在工业界的实际需求,分析了五轴数控加工的发展趋势。

本书形式上由浅入深,内容深入浅出,可供从事五轴数控加工、五轴数控系统开发、在线测量等领域研究的科研人员和工程技术人员阅读,也可作为机械制造相关专业研究生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

复杂曲面零件五轴数控加工理论与技术/毕庆贞,丁汉,王宇晗著. —武汉:武汉理工大学出版社,2016.12

(数字制造科学与技术前沿研究丛书)

ISBN 978-7-5629-5380-7

I. ①复… II. ①毕… ②丁… ③王… III. ①曲面—数控机床—加工 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 298860 号

项目负责人:田 高 王兆国

责任编辑:汪浪涛

责任校对:梁雪姣

封面设计:兴和设计

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市洪山区珞狮路 122 号 邮编:430070)

<http://www.wutp.com.cn>

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:武汉中远印务有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:17.75

字 数:454 千字

版 次:2016 年 12 月第 1 版

印 次:2016 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1—1500 册

定 价:66.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有,盗版必究 ·

数字制造科学与技术前沿研究丛书 编审委员会

顾问：闻邦椿 徐滨士 熊有伦 赵淳生

高金吉 郭东明 雷源忠

主任委员：周祖德 丁汉

副主任委员：黎明 严新平 孔祥东 陈新

王国彪 董仕节

执行副主任委员：田高

委员（按姓氏笔画排列）：

David He	Y. Norman Zhou	丁华锋	马辉	王德石
毛宽民	冯定	华林	关治洪	刘泉
刘强	李仁发	李学军	肖汉斌	陈德军
张霖	范大鹏	胡业发	郝建平	陶飞
郭顺生	蒋国璋	韩清凯	谭跃刚	蔡敢为

秘书：王汉熙

总责任编辑：王兆国

总 序

当前,中国制造 2025 和德国工业 4.0 以信息技术与制造技术深度融合为核心,以数字化、网络化、智能化为主线,将互联网+与先进制造业结合,正在兴起全球新一轮数字化制造的浪潮。发达国家特别是美、德、英、日等制造技术领先的国家,面对近年来制造业竞争力的下降,最近大力倡导“再工业化、再制造化”的战略,明确提出智能机器人、人工智能、3D 打印、数字孪生是实现数字化制造的关键技术,并希望通过这几大数字化制造技术的突破,打造数字化设计与制造的高地,巩固和提升制造业的主导权。近年来,随着我国制造业信息化的推广和深入,数字车间、数字企业和数字化服务等数字技术已成为企业技术进步的重要标志,同时也是提高企业核心竞争力的重要手段。由此可见,在知识经济时代的今天,随着第三次工业革命的深入开展,数字化制造作为新的制造技术和制造模式,同时作为第三次工业革命的一个重要标志性内容,已成为推动 21 世纪制造业向前发展的强大动力,数字化制造的相关技术已逐步融入制造产品的全生命周期,成为制造业产品全生命周期中不可缺少的驱动因素。

数字制造科学与技术是以数字制造系统的基本理论和关键技术为主要研究内容,以信息科学和系统工程科学的方法论为主要研究方法,以制造系统的优化运行为主要研究目标的一门科学。它是一门新兴的交叉学科,是在数字科学与技术、网络信息技术及其他(如自动化技术、新材料科学、管理科学和系统科学等)与制造科学与技术不断融合、发展和广泛交叉应用的基础上诞生的,也是制造企业、制造系统和制造过程不断实现数字化的必然结果。其研究内容涉及产品需求、产品设计与仿真、产品生产过程优化、产品生产装备的运行控制、产品质量管理、产品销售与维护、产品全生命周期的信息化与服务化等各个环节的数字化分析、设计与规划、运行与管理,以及整个产品全生命周期所依托的运行环境数字化实现。数字化制造的研究已经从一种技术性研究演变成为包含基础理论和系统技术的系统科学研究。

作为一门新兴学科,其科学问题与关键技术包括:制造产品的数字化描述与创新设计,加工对象的物体形位空间和旋量空间的数字表示,几何计算和几何推理、加工过程多物理场的交互作用规律及其数字表示,几何约束、物理约束和产品性能约束的相容性及混合约束问题求解,制造系统中的模糊信息、不确定信息、不完整信息以及经验与技能的形式化和数字化表示,异构制造环境下的信息融合、信息集成和信息共享,制造装备与过程

的数字化智能控制、制造能力与制造全生命周期的服务优化等。本系列丛书试图从数字制造的基本理论和关键技术、数字制造计算几何学、数字制造信息学、数字制造机械动力学、数字制造可靠性基础、数字制造智能控制理论、数字制造误差理论与数据处理、数字制造资源智能管控等多个视角构成数字制造科学的完整学科体系。在此基础上,根据数字化制造技术的特点,从不同的角度介绍数字化制造的广泛应用和学术成果,包括产品数字化协同设计、机械系统数字化建模与分析、机械装置数字监测与诊断、动力学建模与应用、基于数字样机的维修技术与方法、磁悬浮转子机电耦合动力学、汽车信息物理融合系统、动力学与振动的数值模拟、压电换能器设计原理、复杂多环耦合机构构型综合及应用、大数据时代的产品智能配置理论与方法等。

围绕上述内容,以丁汉院士为代表的一批我国制造领域的教授、专家为此系列丛书的初步形成,提供了他们宝贵的经验和知识,付出了他们辛勤的劳动成果,在此谨表示衷心的感谢!

《数字制造科学与技术前沿研究丛书》的出版得到了湖北省学术著作出版专项资金项目的资助。对于该丛书,经与闻邦椿、徐滨士、熊有伦、赵淳生、高金吉、郭东明和雷源忠等我国制造领域资深专家及编委会讨论,拟将其分为基础篇、技术篇和应用篇3个部分。上述专家和编委会成员对该系列丛书提出了许多宝贵意见,在此一并表示由衷的感谢!

数字制造科学与技术是一个内涵十分丰富、内容非常广泛的领域,而且还在不断地深化和发展之中,因此本丛书对数字制造科学的阐述只是一个初步的探索。可以预见,随着数字制造理论和方法的不断充实和发展,尤其是随着数字制造科学与技术制造企业的广泛推广和应用,本系列丛书的内容将会得到不断的充实和完善。

《数字制造科学与技术前沿研究丛书》编审委员会

前 言

复杂曲面零件在国防、能源等领域有着广泛应用,因其具有结构复杂、精度要求高等特点,属于典型难加工零件。本书以五轴数控设备与工艺技术为基础,从影响复杂曲面零件加工的误差源出发,将五轴数控加工相关理论与技术应用到复杂曲面零件的加工,形成了复杂曲面零件五轴数控加工-测量一体化的先进制造技术与理论。

全书共分为7章,第1章介绍了典型复杂曲面零件和五轴数控机床的结构与特点,分析了复杂曲面五轴数控加工中包含的基本问题;第2章为五轴数控加工运动学与后置处理,对五轴数控机床运动链、加工系统进行了详细的定义与说明,解决了后置处理中包括运动学变化等在内的主要问题,描述了开发的通用五轴后置处理软件;第3章为复杂曲面加工轨迹规划,提出了复杂曲面五轴侧铣、五轴插铣、型腔螺旋铣等刀具路径规划算法,同时针对曲率光滑、机床转角光滑和点铣避障分别建立了刀具路径优化模型;第4章为五轴数控系统中的局部光滑及速度规划,研究了三轴小线段刀具路径的转接光滑,以及工件坐标系和机床坐标系下五轴转接光滑;第5章为五轴数控机床几何精度检验与几何误差补偿,提出了五轴机床 RTCP 运动精度测试与改进方法和基于试件加工、接触式测头的五轴机床精度检验方法,并利用运动学变换的微分运动特性,提出机床几何误差补偿方法;第6章为原位测量与智能控制,开发了面向壁板的壁厚原位测量仪器,提出了面向五轴侧铣加工变形精度的原位测量与补偿方法、考虑迟滞补偿的搅拌摩擦焊加工过程力控制方法和面向镜像铣削加工变形的实时检测与控制策略;第7章为复杂曲面五轴加工的发展趋势,介绍了飞机蒙皮五轴协同与实时测控的柔性加工,以及叶轮叶片的设计-制造一体化新理论与新方法。

感谢国家自然科学基金项目(U1537209、51475302、51005155、50875171)、国家863重点项目(2009AA04Z150)、国家973项目(2011CB706804、2005CB724100)、上海市科技攻关项目(13111101000)等多年来对相关研究工作的支持和帮助!

本书对从事先进制造技术与系统、CAD/CAM、数字制造、精密测量和机床控制等领域的研究人员和专业技术人员具有参考价值,也可作为高等院校相关专业的研究生教材或参考书。由于时间关系和作者知识体系所限,书中难免会有各种纰漏和疏忽,敬请读者批评指正。今后我们会继续努力并不断充实本书内容,希望通过本书与同行学者及对五轴数控加工技术有兴趣的人员进行交流,起到抛砖引玉的作用。

编 者

2016年9月

目 录

1 绪论	1
1.1 典型复杂曲面零件	1
1.2 五轴数控机床简介	3
1.3 五轴数控加工的优势	5
1.4 复杂曲面五轴数控加工的基本问题	7
1.5 本书的内容编排	7
参考文献	8
2 五轴数控加工运动学与后置处理	9
2.1 五轴数控机床运动学模型的应用	9
2.2 五轴数控机床运动学变换	15
2.3 五轴机床微分运动	32
2.4 基于机床运动学变换的后置处理	39
2.5 后置处理软件开发案例	54
参考文献	64
3 复杂曲面加工轨迹规划	66
3.1 面向五轴侧铣加工的曲面直纹化	66
3.2 复杂曲面五轴侧铣加工路径规划	81
3.3 基于计算机模拟的五轴插铣刀具路径优化方法	90
3.4 型腔高速螺旋铣削加工	104
3.5 曲率光滑刀具路径优化	112
3.6 机床旋转角光滑的侧铣加工路径优化	118
3.7 复杂零件点铣加工的避障与刀轴方向优化	124
3.8 整体壁板五轴数控加工螺旋铣规划编程软件	132
3.9 曲面传动件的五轴联动加工应用	139
参考文献	146
4 五轴数控系统中的局部光顺及速度规划	149
4.1 五轴数控系统的关键问题及技术	149
4.2 三轴小线段刀具路径的转接光顺	150
4.3 机床坐标系下五轴刀具路径转接光顺	153

4.4	工件坐标系下五轴刀具路径转接光顺	160
	参考文献	172
5	五轴数控机床几何精度检验与几何误差补偿	174
5.1	五轴数控机床几何精度检验与几何误差补偿的基本问题	174
5.2	五轴数控机床 RTCP 运动精度测试与改进	176
5.3	基于试件加工的五轴数控机床精度检验	187
5.4	五轴数控机床旋转轴几何误差的原位检测	194
5.5	数控程序中的五轴数控机床几何误差补偿	200
	参考文献	208
6	原位测量与智能控制	211
6.1	五轴加工原位测量与精度控制	211
6.2	壁厚原位测量仪器的开发与应用	214
6.3	加工变形精度的原位测量与补偿	230
6.4	加工过程的实时检测与控制	239
6.5	加工变形的实时检测与控制:测量方案、补偿策略	247
6.6	镜像铣案例	258
	参考文献	262
7	复杂曲面五轴加工的发展趋势	266
7.1	多五轴协同与实时测控	266
7.2	设计-制造一体化	272
	参考文献	274

1 绪 论

复杂曲面零件作为数字化制造的主要研究对象之一,在航空、航天、能源和国防等领域有着广泛的应用,这些零件的制造水平代表着国家制造业的核心竞争力。五轴数控铣削加工技术具有高可达性和高加工精度等优势,成为这些复杂曲面零件的常用加工方式,于是复杂零件五轴加工中刀具路径规划、后置处理、加工误差检测与补偿、测量与控制等成为数字化制造的关键问题。

1.1 典型复杂曲面零件

复杂曲面零件应用广泛,包括航空航天发动机轮盘类零件、燃气轮机叶片、飞机和火箭结构件等,这些零件往往具有形状和结构复杂、质量要求高等难点,成为研究五轴数控加工的典型对象。

1. 轮盘类零件

轮盘类零件作为帮助发动机完成对气体的压缩和膨胀的关键部件,以最高的效率产生强大的动力来推动飞机前进的工作(图 1.1)。典型的轮盘类零件主要包括整体叶盘类零件和叶片类零件。整体叶盘类零件是将叶片和叶盘做成整体,相对于传统的叶片类零件,省去连接的榫头和榫槽,简化零件结构,同时减轻了零件的重量。自 20 世纪 80 年代中期,西方发达国家在新型航空发动机设计中采用整体叶盘结构作为最新的结构和气动布局形式,它代表了第四代、第五代高推重比航空发动机技术的发展方向,已成为高推重比发动机的必选结构。美国通用电气和普惠公司、英国罗罗公司等均采用五轴数控加工技术研制了整体叶盘,并且广泛应用于新一代发动机中。

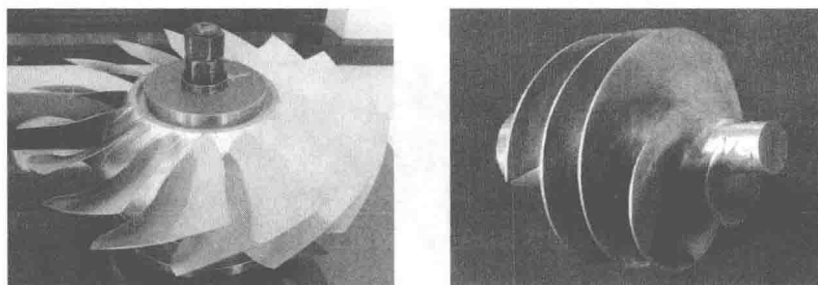


图 1.1 航空发动机整体叶轮和航天发动机诱导轮

整体叶盘类零件叶展长、叶片薄且扭曲度大、叶片间的通道深且窄、开敞性差,零件材料多为钛合金、高温合金等难加工材料,导致零件加工制造困难。叶片叶身型面主要由叶盆,叶背,前缘和尾缘构成。叶片是一种特殊的零件,它数量多、形状复杂、要求高、加工难度大,而且是

故障多发的零件,一直以来是各发动机厂生产的关键部件。叶片类零件结构形状复杂,是典型的薄壁复杂曲面零件。

总体来说,这些轮盘类零件具有结构复杂,弱刚性和薄壁等加工特征,而且材料强度高,导致加工易变形,加工难度大,需要采用精度较高的多轴数控机床加工,保证零件的尺寸精度、形位公差和表面完整性。

2. 航空结构件

随着大型运输飞机等对运载能力需求的不断提高,航空结构件的研制思路也发生了很大的变化。除了传统的螺栓连接和铆接的组合件,大型整体结构件也被越来越广泛地投入到实际应用中。这些航空整体结构件由整块大型毛坯直接加工而成,具有复杂的槽腔、筋条、凸台和减轻孔等特征,在刚度、抗疲劳强度以及各种失稳临界值等方面均比铆接结构胜出一筹,如图 1.2 所示。整体结构件的广泛应用对飞机制造产生了深远影响^[1,2],大大减少了机体的零件数量,提高了其制造质量,同时减少了飞机装配工作量。对于整体结构件而言,由于其具有尺寸大、材料去除率大、结构复杂、刚性差等特点,加工成型后会产生弯曲、扭曲、弯扭组合等加工变形,这成为该类零件加工的关键技术难点。

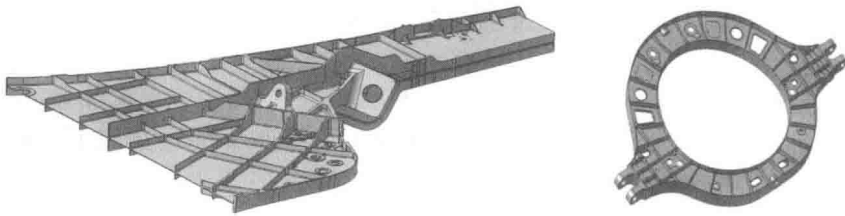


图 1.2 整体式飞机结构件

3. 火箭贮箱壁板

大型薄壁构件是构成火箭燃料贮箱的主要零件,它由铝合金薄板焊接而成,包括前底、筒段、后底三个结构部分。为了保证贮箱的刚度和火箭减重要求,贮箱壁板内壁设计成壁厚均匀的网格结构(图 1.3)。随着新一代大型运载火箭设计要求的提高,为保证火箭的可靠性,减轻结构重量,提高有效载荷,对壁板网格尺寸精度和减小筋条根部的圆弧过渡尺寸提出了更严格的要求。这类零件由于尺寸大、形状复杂、结构刚度低、加工精度要求高,导致可加工性差。而且由于最终加工曲面无法用其原始设计模型表述,必须根据零件的在机几何实测数据,重新生成精加工目标曲面,才能满足零件的制造要求。



图 1.3 火箭贮箱筒段壁板展开图

1.2 五轴数控机床简介

传统的自由曲面主要在三轴机床上利用球头铣刀完成材料去除。五轴数控机床在三个平动轴的基础上增加了两个转动轴,不仅可以使刀具相对于工件的位置任意可控,而且刀具轴线相对于工件的方向也在一定的范围内任意可控。随着多轴数控技术的发展,五轴数控加工是实现大型与异型复杂零件高效、高质的重要手段。

根据 ISO 的规定,在描述数控机床的运动时,采用右手直角坐标系;其中平行于主轴的坐标轴定义为 z 轴,绕 x 、 y 、 z 轴的旋转坐标分别为 A 、 B 、 C 。各坐标轴的运动可由工作台,也可以由刀具的运动来实现,但方向均以刀具相对于工件的运动方向来定义。通常五轴联动是指 x 、 y 、 z 三个平动轴加 A 、 B 、 C 中任意两个旋转轴。相对于常见的三轴(x 、 y 、 z 三个自由度)加工而言,五轴加工是指加工几何形状比较复杂的零件时,需要刀具能够在五个自由度上进行定位。五轴加工所采用的机床通常称为五轴机床或五轴加工中心。

如图 1.4 所示为包含 A 轴和 C 轴的双转台结构五轴数控机床。设置在床身上的工作台可以围绕 X 轴回转,定义为 A 轴, A 轴一般工作范围为 $+30^{\circ}$ 至 -120° 。工作台的中间还设有绕 Z 轴旋转的回转台,定义为 C 轴, C 轴一般能进行 360° 回转。这样通过控制 A 轴与 C 轴的旋转角度,可以对固定在工作台上的工件进行除了底面之外的其余五个面的立式主轴加工。 A 轴和 C 轴运动的最小分度值一般为 0.001° ,这样又可以将工件细分成任意角度,加工出倾斜面、倾斜孔等。当 A 轴和 C 轴与 X 、 Y 、 Z 三个直线轴实现联动,就可加工出复杂的空间曲面,这种设置方式的优点是主轴的结构比较简单,主轴刚性非常好,制造成本比较低。但受其结构影响,一般工作台不能设计太大,承重也较小,特别是当 A 轴角度大于等于 90° 时,会对 A 轴带来很大的承载力矩,且刀具与转台易发生干涉。

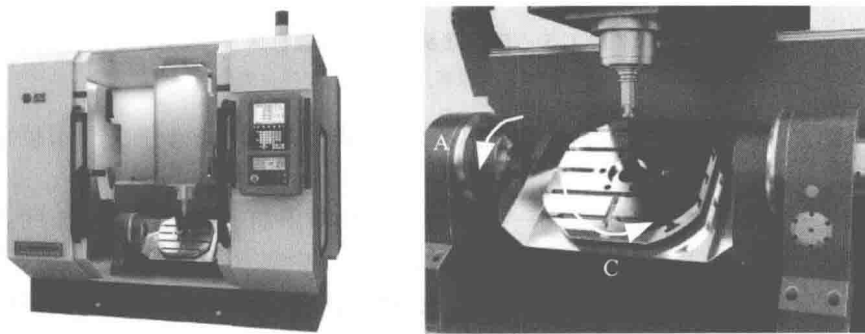


图 1.4 双转台结构五轴机床

双转台五轴机床在工件加工时需要工作台带动工件在两个旋转方向运动。其对工件尺寸有所限制,只适合加工小型零件,例如小型航空整体涡轮、汽车涡轮增压器叶轮以及小型精密模具等,很少应用于龙门铣床等大中型规格产品。由于机床尺寸相对较小,结构相对简单,所以价格较为低廉,是制造业中应用数量最多的五轴联动数控机床。

① 承载能力。由于工作台参与两个回转运动,结构环节多,因此承载能力大大降低^[3]。

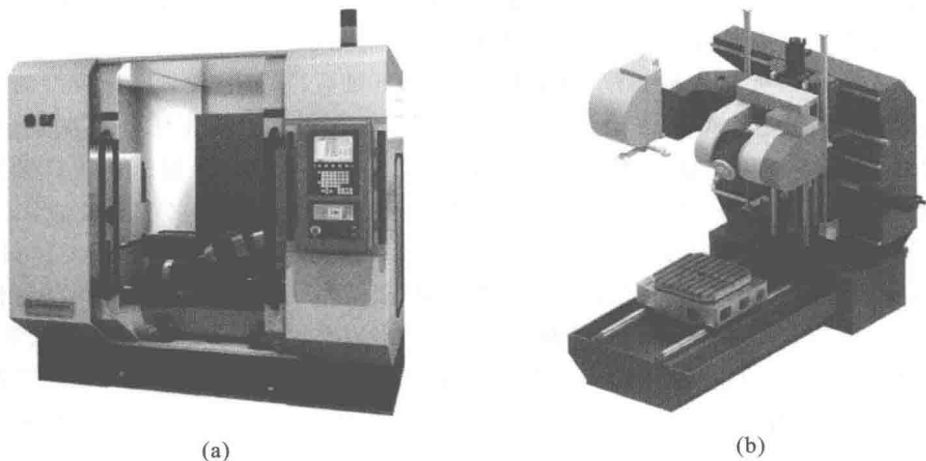
② 加工范围。由于工作台参与两个回转运动,工作台规格较小,回转角度较小,因此加工范围小,加工空间小,适用于加工中小规格零件。

③ 机构复杂性。两个回转运动机构复合在一起,所以结构较为复杂,但整体机构空间还是相对较大,且不含主轴机构,所以机构复杂性相对较小。

④ 运动灵活性。由于工作台和所加工零件参与两个回转运动,而工作台和所加工零件在整机中属于较大部件,因此运动灵活性小。

⑤ 机构刚性。虽然两个回转运动机构复合在一起,结构较为复杂,但整体机构空间较大,易于采用高刚性结构和零件,所以机构刚性相对较高。

图 1.5 所示为转台摆头式结构。由于摆头与转台可以分别是 A 轴、B 轴或 C 轴,所以转台摆头结构的五轴联动机床可以有各种不同的组合,以适应不同的加工对象。该类机床的价格居中,随机器规格大小、精度和性能的不同相差很大。图 1.5(a) 是 A 转台 B 摆头结构机床,这种结构的机床适用于叶片类零件加工,图 1.5(b) 是 B 摆头 C 转台结构机床,这种类型结构的机床适用于发动机壳体和大型叶盘类零件的加工。



(a)

(b)

图 1.5 转台摆头式结构五轴机床

(a)A 转台 B 摆头类机床;(b)B 摆头 C 转台类机床

① 承载能力。工作台参与一个回转运动,因此承载能力相对于双摆头机床较小,而相对于双转台机床较大。

② 加工范围。由于工作台参与了一个回转运动,相对限制了加工范围和空间,因此加工范围和空间一般比双摆头机床小,比双转台机床大,可加工中等规格零件。

③ 机构复杂性。由于两个回转运动机构没有复合在一起,所以结构相对最简单。

④ 运动灵活性。很显然,运动灵活性介于前述两种机床之间。

⑤ 机构刚性。由于两个回转运动机构没有复合在一起,可采用高刚性结构和零件,一般来说,机构刚性相对最高。

图 1.6 所示为双摆头结构五轴数控机床,两个旋转轴安装在龙门架上,受其本身结构的限制,摆头的尺寸相对较大。不过依靠龙门结构的优势,工作台具有较大的承载能力和尺寸,加工范围和加工空间大,适合加工大中型零件。不过,双摆头机构、龙门结构复杂,使得机构刚性较差。图 1.6 所示为 BC 双摆头结构数控机床,旋转轴 B 轴和 C 轴的回转带动刀具运动,使得刀具姿态变化相对灵活。

由于双摆头结构的原因,摆头自身的尺寸不容易做小,一般在 400 ~ 500mm 左右。此外,

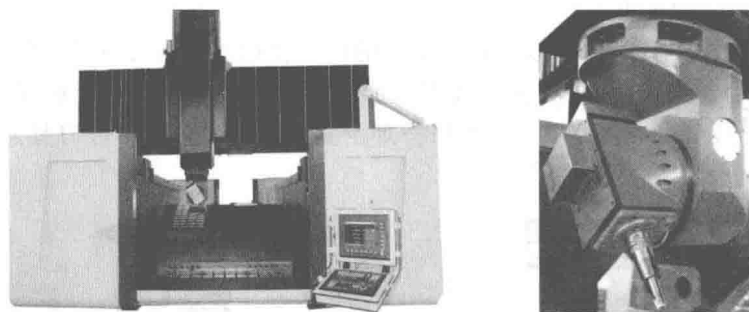


图 1.6 双摆头结构五轴机床

考虑机床行程范围的需要,双摆头结构的五轴联动机床的加工范围不宜太小,一般为龙门式或动梁龙门式,龙门的宽度一般在 2000 ~ 3000mm 以上。

① 承载能力。由于工作台不参与回转运动,工作台可以按较大规格设置,结构环节少,因此承载能力大。

② 加工范围。由于是摆头执行两个回转运动,回转部件体积相对较小,工作台可以较大,因此加工范围大,加工空间大,可加工中、大规格的零件。

③ 机构复杂性。由于两个回转运动机构和主传动机构复合在一起,且整体机构空间小,所以结构复杂。

④ 运动灵活性。由于是摆头执行两个回转运动,因此刀具运动相对灵活。

⑤ 机构刚性。由于两个回转运动机构复合在一起,传动与结合环节多,且整体机构空间小,所以机构刚性较差。

1.3 五轴数控加工的优势

传统的三轴数控加工通过控制刀具平动来完成零件的加工,五轴数控机床是由三轴机床增加两个旋转自由度构成,利用这两个旋转轴,五轴数控机床可以使刀具处于机床工作空间内的任意方向。五轴数控加工的优势主要通过控制刀具方向来实现,体现在以下四点:^[4]

(1) 提高刀具可达性

通过改变刀具方向可以提高刀具可达性,实现叶轮、叶片和螺旋桨等复杂曲面零件的数控加工。如图 1.7 所示,通过一次装夹就可以加工出复杂的零件,减少重新装夹时间,降低夹具成本。



图 1.7 调整刀轴方向避免干涉

(2) 缩短刀具悬伸长度

通过选择合理的刀具方向可以在避开干涉的同时使用更短的刀具,提高铣削系统的刚度,改善数控加工中的动态特性,提高加工效率和加工质量;如在加工叶轮根部等曲率较大的区域时,只能用刚度较低的小半径刀具,选择合理的刀轴方向,可以缩短刀具悬伸量,如图 1.8 所示。

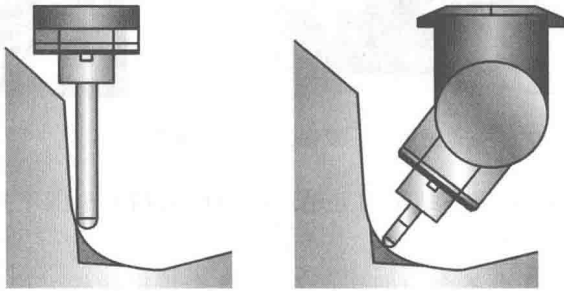


图 1.8 调整刀轴方向缩短刀具长度

(3) 可用高效加工刀具

通过调整刀轴方向能够更好地匹配刀具与工件曲面,增加有效切宽,实现零件的高效加工,可以用简单的刀具高效加工复杂曲面零件,如可以用侧刃铣刀加工直纹面的工件(图 1.9),也可用平底铣刀或环形铣刀加工曲面工件。

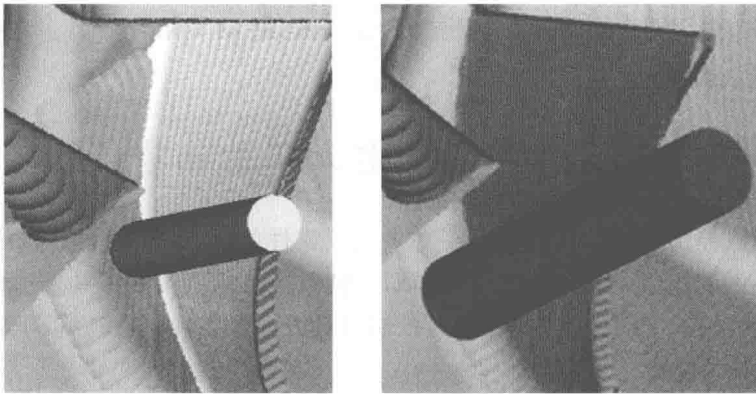


图 1.9 线接触取代点接触加工

(4) 控制刀具参与切削的区域

通过调整刀具方向可以使球头铣刀用合理的刀刃区域参与切削,降低切削力和刀具磨损,提高加工表面质量,如在用球头铣刀加工时,可以通过调整刀轴方向避免切削能力差的刀尖点参与切削(图 1.10),此外还可以控制切削区域,减小切削力,减少刀具磨损,提高加工表面质量。

由于以上优势,五轴数控机床能够高效加工复杂曲面零件,特别是叶轮、叶片和螺旋桨等关键零件,对国家的军事、航空航天、船舶运输、精密医疗设备等有举足轻重的影响力,成为一个国家制造业发展水平的重要标志。

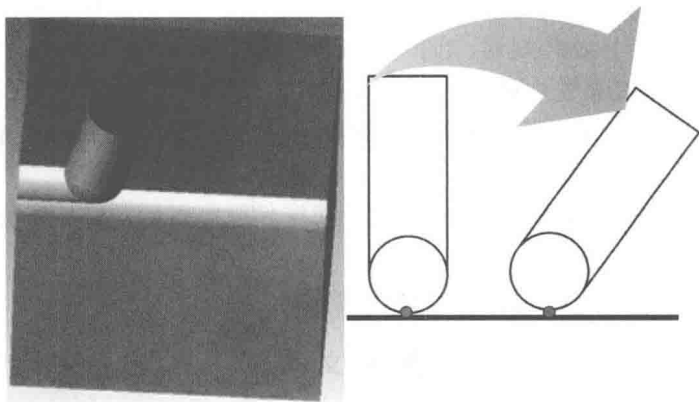


图 1.10 调整刀轴方向,避免刀尖点参与切削

1.4 复杂曲面五轴数控加工的基本问题

复杂曲面零件五轴数控加工的研究重点在于曲面的加工成形原理、零件外形对制造工具的几何约束以及加工曲面与设计曲面的比较。其基本问题包括:

(1) 在被加工零件的加工曲面确定后,首先需要根据加工曲面和不同结构类型的五轴数控机床的特点,选择合适的加工机床。

(2) 在避免干涉的同时,调整刀具位置和姿态以减小刀具包络面与工件曲面之间的偏差。计算刀具包络面与工件曲面之间的偏差是个非常关键的问题,它直接关系到刀位计算的精度。由于操作上的难度及复杂性,多数文献采用了近似的简化处理,将刀位规划转化为单个刀位下刀具曲面与工件曲面间的优化逼近问题,其给出的各种刀位优化模型并不能真实反映实际加工过程,并且现有的方法仅仅适合某种曲面或某种刀具的刀位计算,在通用性、可操作性、稳定性和加工精度方面还有许多需要改进的地方^[5]。

(3) 数控机床的加工精度是衡量数控机床工作性能的重要指标,研究如何便捷、快速、精确地获得机床空间几何误差,对机床实施误差补偿,提高加工精度具有重要意义。

(4) 结合机床空间几何误差模型,研究机床空间几何误差补偿策略,减少机床误差对零件加工精度的影响。

(5) 薄壁零件在加工中极易发生变形、失稳和振动,需要根据零件几何形状的在机实测数据,修改刀具加工轨迹和加工参数,使得加工后的零件满足制造需求。

1.5 本书的内容编排

本书后面的内容安排如下:

第 2 章介绍五轴数控加工中最基础的部分——后置处理。介绍了不同结构类型的机床的运动学模型,以及后置处理算法。

第 3~6 章是本书的核心内容,主要介绍了作者所提出的复杂曲面零件加工和测量补偿的新原理和新方法。

第3章介绍复杂曲面零件数控加工的刀具路径规划方法,包括五轴侧铣路径规划、粗加工插铣路径规划、型腔螺旋铣路径规划、无干涉点铣加工的路径规划等。

第4章介绍五轴数控系统中的小线段局部光滑及速度规划方法。

第5章介绍五轴数控机床精度检验与补偿方法,包括机床几何误差测量方法和误差补偿方法。

第6章介绍原位测量与智能控制方法,包括薄壁件壁厚测量方法与补偿方法、大型薄壁件镜像铣方法。

第7章介绍复杂曲面五轴数控加工的发展趋势。

参 考 文 献

- [1] 查治中,杨彭基,等. 数控技术在飞机制造中的应用[M]. 北京:国防工业出版社,1992.
- [2] 顾诵芬. 航空航天科学技术(航空卷)[M]. 济南:山东教育出版社,1998.
- [3] 张政泼,覃学东. 五轴联动机床的结构性能分析与设计探讨[J]. 装备制造技术,2009(10): 5-7.
- [4] 毕庆贞. 面向五轴高效铣削加工的刀具可行空间 GPU 计算与刀具方向整体优化[D]. 上海:上海交通大学,2009.
- [5] 丁汉,朱利民. 复杂曲面数字化制造的几何学理论和方法[M]. 北京:科学出版社,2011.