

哈尔滨理工大学
制造科学与技术系列专著



插铣加工技术及其应用

翟元盛 王宇 王波 著



科学出版社

哈尔滨理工大学制造科学与技术系列专著

插铣加工技术及其应用

翟元盛 王 宇 王 波 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

冲击式水轮机转轮水斗的整体式加工具有很好的发展前景。本书根据转轮水斗的结构特征和加工质量要求,研究了插铣加工技术在水斗加工中的应用。主要内容包括插铣刀具及刀柄设计、插铣加工过程力学模型、插铣加工过程动力学模型、插铣加工稳定性研究和分析、考虑刀具偏心时插铣的稳定性、插铣加工水斗过程的仿真和数控加工技术,以及提高插铣效率的方法。

本书可供从事机械加工和插铣加工技术研究的科技人员使用和参考,也可作为高等院校机械制造相关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

插铣加工技术及其应用 / 翟元盛, 王宇, 王波著. —北京: 科学出版社, 2018.8

(哈尔滨理工大学制造科学与技术系列专著)

ISBN 978-7-03-056625-6

I. ①插… II. ①翟… ②王… ③王… III. ①转轮-水斗式水轮机-加工 IV. ①TK735

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第035292号

责任编辑: 裴 育 赵晓廷 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 蓝 正

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年8月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018年8月第一次印刷 印张: 10 1/2

字数: 212 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

随着经济的高速增长,在电力需求的拉动下,水轮机制造行业进入快速发展时期。水轮机是充分利用清洁能源实现节能减排、减少环境污染的重要设备。我国水轮机的发展,无论在整体结构设计、数控加工制造方面,还是在转轮实体的性能方面,同发达国家相比都存在一定的差距。因此,需要通过采用先进的加工工艺、新型的转轮制造方案以及性能优质的数控加工设备,来促进我国水轮机制造领域的发展。

插铣作为一种高效铣削加工方式,在制造行业中正在逐步扩大应用。插铣加工技术可以快速去除零件表面的加工余量,并且可用于特殊难加工材料和复杂曲面较多的零部件的加工,尤其在航空航天等领域得到了广泛的应用。国外一些企业在转轮水斗加工方面已经完成了由分体式到整体式加工方式的转变。针对转轮水斗整体数控加工技术,创建属于我国特有自主知识产权的加工工艺核心技术,能够有效促进企业、社会的经济效益和技术水平的提高以及我国水电工业的进一步发展。

本书共8章,第1章介绍插铣加工的基本原理和关键技术的研究现状;第2章介绍插铣刀具及刀柄的设计、刀具参数化建模和刀具的模态分析;第3章对插铣加工过程进行力学分析,建立插铣瞬时铣削力模型,并进行仿真和模型验证,通过铣削力模型更深入地研究切削机理,为动力学模型、动态加工误差等提供理论支持;第4章建立插铣加工过程动力学模型,在插铣过程中当某些切削条件导致加工系统振动剧烈时,静态铣削力建模和仿真很难准确地反映铣削状态,因此有必要研究插铣加工系统的动态特性;第5章根据再生颤振理论,应用半离散时域法对插铣稳定性进行预测;第6章对刀具偏心时插铣加工过程误差进行分析,研究主轴转速、径向切削深度、刀齿数对表面位置误差的影响规律;第7章结合转轮水斗的数控加工,研究转轮水斗的建模、数控编程及加工工艺;第8章介绍插铣加工中铣削参数的优选以提高铣削效率。

本书由哈尔滨理工大学机械动力工程学院翟元盛、王宇和哈尔滨电机厂有限责任公司王波撰写。本书的研究工作得到国家自然科学基金“狭长勺型结构件高效插铣加工稳定性预测与刀具设计”(51375127)、黑龙江省自然科学基金“水轮机转轮高效插铣加工稳定性的研究”(E201439)和“插铣加工时刀具几何结构参数

与铣削性能关系的研究”(E2015060)的资助。马殿林、王宝涛、康学洋、高海宁、宋宏李、郑登辉等研究生在项目研究过程中做了大量工作,在此表示感谢。本书出版过程中参考了大量国内外文献,在此向原文献作者表示感谢。

鉴于插铣加工技术涉及知识面宽,以及作者学识限制,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章	插铣加工基本原理及其研究现状	1
1.1	插铣加工的基本原理	1
1.2	插铣加工关键技术的研究现状	2
1.2.1	插铣刀具的研究现状	2
1.2.2	插铣力学的研究现状	3
1.2.3	铣削稳定性边界判别算法的研究现状	4
1.2.4	刀路轨迹规划的研究现状	6
1.2.5	插铣加工在转轮水斗整体数控加工技术中的应用现状	7
1.3	插铣加工的主要研究内容	9
第 2 章	插铣刀具及刀柄设计	11
2.1	基于 UG 平台的参数化设计	11
2.1.1	刀尖前角设定	12
2.1.2	主偏角设置	13
2.2	插铣刀具参数化设计过程	13
2.2.1	Menuscript 菜单设计	13
2.2.2	UIStyler 对话框设计	13
2.2.3	使用 VC++ 建立应用程序框架	14
2.2.4	使用 UG/Open GRIP 编写插铣刀具参数化设计程序	15
2.2.5	插铣刀具建模过程	16
2.3	插铣刀具性能的有限元分析	17
2.3.1	主偏角对插铣刀具的静力分析	17
2.3.2	刀尖前角对插铣刀具的静力分析	18
2.3.3	插铣刀具的模态分析	20
2.4	抑振刀柄设计理论研究	20
2.4.1	抑振刀柄设计原理	20
2.4.2	刀柄结构动力学模型	21
2.5	不同内孔直径刀柄插铣刀具分析	25
2.5.1	不同内孔直径刀柄插铣刀具的静力分析	25

2.5.2	频响分析的介绍和方法	26
2.5.3	刀柄内孔直径对刀尖频率响应的影响	26
2.5.4	抑振刀柄试验测试验证	28
2.6	本章小结	30
第3章	插铣加工过程力学模型	32
3.1	插铣瞬时铣削力建模	33
3.2	插铣铣削力系数辨识	39
3.2.1	Cr13 不锈钢插铣铣削力系数模型	39
3.2.2	Cr13 不锈钢插铣铣削力系数辨识试验	40
3.3	插铣铣削力仿真	43
3.4	本章小结	48
第4章	插铣加工过程动力学模型	49
4.1	插铣加工过程动力学建模	50
4.2	插铣瞬时切削厚度模型	51
4.2.1	刀具轴向振动对切削厚度的影响	52
4.2.2	刀具径向振动对切削厚度的影响	53
4.3	大长径比插铣加工系统的模态试验	54
4.3.1	试验模态分析	54
4.3.2	插铣加工系统模态试验	54
4.4	插铣加工过程动力学时域仿真	56
4.5	本章小结	61
第5章	插铣加工稳定性研究	62
5.1	半离散时域法	62
5.2	Cr13 不锈钢插铣加工稳定性分析	66
5.3	插铣刀具动态特性对加工稳定性的影响	67
5.3.1	插铣系统刚度对加工稳定性的影响	68
5.3.2	插铣系统固有频率对加工稳定性的影响	69
5.3.3	插铣系统阻尼比对加工稳定性的影响	69
5.4	Cr13 不锈钢插铣加工过程稳定性试验	70
5.5	颤振过程的分析方法	73
5.5.1	最大李雅普诺夫指数	73
5.5.2	Poincare 映射和相平面图	74
5.6	Cr13 不锈钢插铣加工试验	75
5.7	基于李雅普诺夫指数的插铣加工过程稳定性预测	78
5.8	本章小结	80

第 6 章	刀具偏心时插铣加工过程误差分析	81
6.1	插铣刀具偏心跳动模型	81
6.1.1	偏心参数识别模型的建立	82
6.1.2	铣刀偏心尺寸估算方法	83
6.2	基于偏心插铣过程的刀具稳定性分析	84
6.3	插铣加工刀具参数对稳定性的影响	86
6.3.1	插铣刀具齿数对稳定性的影响	87
6.3.2	螺旋角对稳定性的影响	87
6.4	插铣过程稳定性试验验证	88
6.5	表面位置误差形成	90
6.6	表面位置误差的影响因素	91
6.6.1	主轴转速对表面位置误差的影响规律	91
6.6.2	径向切削深度对表面位置误差的影响规律	92
6.6.3	刀齿数对表面位置误差的影响规律	93
6.7	插铣加工过程误差试验验证	94
6.8	本章小结	97
第 7 章	插铣刀具在转轮水斗中的应用	99
7.1	转轮水斗的几何建模	99
7.1.1	曲线曲面的基本原理	99
7.1.2	基于 UG 的转轮水斗三维建模	102
7.1.3	水斗的建模	103
7.2	插铣加工转轮水斗的数控编程技术	107
7.2.1	转轮水斗特点和加工难点	107
7.2.2	数控机床的选择	109
7.2.3	转轮水斗整体数控加工工艺研究	111
7.2.4	基于 UG 的数控编程技术	117
7.2.5	转轮水斗整体数控加工刀具轨迹的生成	118
7.3	转轮水斗数控加工仿真与试验	131
7.3.1	转轮水斗数控加工仿真	131
7.3.2	转轮水斗试件加工试验	139
7.4	本章小结	141
第 8 章	转轮水斗内表面插铣刀路轨迹规划	143
8.1	转轮水斗内表面粗加工分析	143
8.1.1	三轴代替五轴数控机床加工	143

8.1.2	预钻孔	144
8.1.3	刀路轨迹规划策略	145
8.1.4	转轮水斗内表面数控插铣编程及仿真	149
8.2	插铣加工时间计算及切削参数优化	151
8.2.1	直线型加减速控制法和 S 型加减速控制法	151
8.2.2	插铣加工时间	153
8.2.3	插铣切削参数优化	155
8.3	本章小结	158
参考文献		159

第 1 章 插铣加工基本原理及其研究现状

1.1 插铣加工的基本原理

当今时代，加工制造技术在航空航天、水电能源、模具制造等行业中占有重要地位，也直接反映出我国的加工制造水平，其中飞机发动机使用的整体叶轮(图 1-1)、水力发电中冲击式水轮机的水斗(图 1-2)等零件具有构造复杂、材料去除量大、表面质量要求高等特点。目前，新型材料(如钛合金等难切削材料)的发明和使用，带来了加工困难和加工效率降低等问题。这些难加工材料的产品往往采用整体结构(如水轮机水斗)，虽然可使零件的数量大大减少，工件重量明显降低，并且无须连接而使结构更加稳定，使用寿命和安全性能都显著提高，但也会导致加工效率进一步降低。以往普遍应用的立铣、球头刀铣削工艺已跟不上生产周期的需要，高效稳定的工艺研究已刻不容缓。插铣作为一种新兴的高效加工方法，在我国加工制造业中占有重要地位，尤其被航空航天、水电能源以及模具制造等行业所认可和广泛应用。

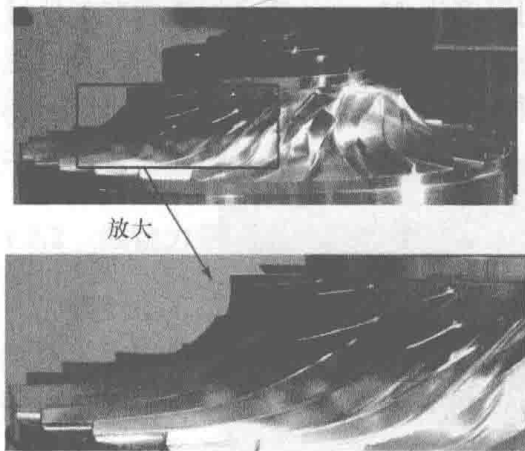


图 1-1 整体叶轮



图 1-2 水轮机水斗

插铣加工的原理是插铣刀具沿机床主轴做进给运动，其底刃通过旋转切除工件材料，该切削方式类似于钻削和铣削的综合作用。插铣轴向进给的特点使得刀具受到的径向力较小，刀具振动较小，切削过程较稳定。插铣作为一种新型的加工工艺，广泛地应用于金属加工领域，并且其优点也在实际生产中得到

证明。相比于普通铣削工艺,采用插铣工艺可以提高两倍以上生产效率;对于加工难切削材料的曲面、大型异构件、整体叶轮叶盘、开槽以及对刀具悬伸量要求较高的加工环境,插铣工艺的材料去除率远高于普通铣削工艺,且具有工件变形小、刀具所受径向力小、悬伸量可以较大等优势。

插铣加工是刀具沿着 Z 轴做进给运动,利用切削刃同时进行钻铣切削,能在 Z 方向短时间内去除大量金属,并且在一次进给结束后,再沿着径向移动一定步距,以便下一次插铣时去除大量金属。插铣加工中每齿去除材料的几何形状由多种因素共同影响,其中最主要的决定因素是刀具的切削角度以及进给速度与切削速度的比值。

1.2 插铣加工关键技术的研究现状

1.2.1 插铣刀具的研究现状

目前,有许多厂商致力于插铣刀具的开发设计研究,特别是山高(SECO)、英格索尔、伊斯卡等各大刀具生产商纷纷推出了自己的刀具产品。这些厂商有比较成熟的插铣刀具设计开发系统,并以插铣切削理论和生产实践为基础,通过对刀具的参数化设计,能够在短时间内开发出高性能的插铣刀具。例如,图 1-3 所示的山高公司开发的型号为 R217/220.79-12A 的用于粗加工的插铣刀具,其推荐每齿进给量为 $0.10\sim 0.25\text{mm/z}$,最大径向切削深度为 11mm ,适合加工所有工件材料,切削速度可达 1000m/min 。伊斯卡公司 2010 年秋季开发的 TANG PLUNGE 蝴蝶插铣刀具,型号为 HTP LNHT 0604,直径范围分别有 16mm 、 20mm 、 25mm ,



图 1-3 SECO 插铣刀具

其中 16mm 规格立装夹持刀片,用于铣刀顶端。刀槽具有高耐用性,切削表现出色。插铣刀具带有内冷却孔,可有效冷却切削区域,有助于排屑。

国内刀具厂商对插铣刀具开发技术的研究起步相对较晚,虽然对插铣机理有一定的研究,但很难形成具有说服力的插铣刀具产品,并且一般设计的插铣刀具主要由经验进行定性设计,缺乏理论和参数设计,这样研发时间比较长,直接导致其生产刀具的切削性能、加工质量、刀具寿命和经济性满足不了市场的需要。

插铣最初由国外专家提出,人们发现这种加工方式可以快速去除金属,随之插铣刀具也越来越受到国内外研究人员的重视,但是其刀具结构设计、切削参数优化等工作依然有诸多问题,目前插铣刀具技术研究主要存在以下问题。

(1) 整体大环境下,国内外研发的插铣刀具相对其他铣削刀具还是偏少,而且种类单一,随着插铣在切削加工领域的日趋普及,插铣刀具已经远远满足不了当前客户的需要,并且没有针对某些特定工件材料进行特殊设计。

(2) 刀具厂商在刀具设计时,大多没有采取参数化设计,没有建立刀具数据库系统,这样不便于管理,浪费人力物力,效率低下,设计周期长。建立刀具数据库系统是刀具厂商数据信息化的基本要求,也是其扩大发展的必由之路。

(3) 对刀具结构本身的基本原理研究较少,在某些特定插铣环境下,刀具结构参数的改变对切削性能的影响需要进一步研究。

(4) 在插铣过程中,如何控制切削力和切削温度来减少刀具磨损,确定较好的工艺参数仍然很难实现。

(5) 在插铣悬伸量很大的场合,对刀具本身的材料有一定的刚性要求,在插铣过程中,扭矩不能忽略,它能产生一定的偏移,发生颤振现象。颤振的危害在于破坏被加工零件的表面质量,使刀具磨损严重,甚至严重时无法切削。

1.2.2 插铣力学的研究现状

插铣加工技术具有效率高、可以快速去除零件表面大余量的优点,并且可用于特殊难加工材料和复杂曲面较多的零部件的加工,在许多领域的加工中,尤其是航空航天等领域得到了广泛应用。

图 1-4 和图 1-5 分别为整体叶盘与水轮机水斗的插铣加工实例。插铣作为一种新提出的高效铣削加工方式,正在制造行业中逐步扩大应用,并且在实践加工中也体现出其独特的优势,但插铣加工技术的局限在于其提出的时间相对较短,对其切削加工机理等方面的研究还不够完善。目前对插铣加工技术的研究工作主要体现在插铣的工艺优化和插铣动力学研究两个方面。

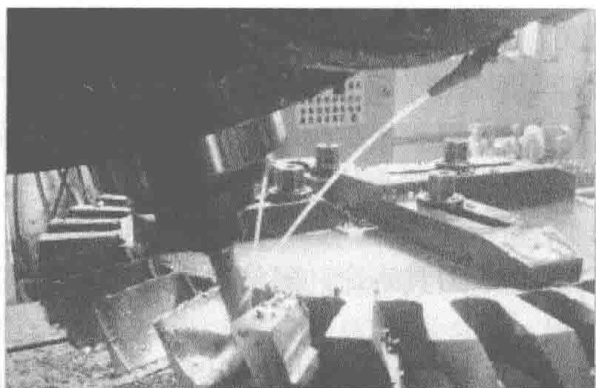


图 1-4 整体叶盘插铣加工



图 1-5 水轮机水斗插铣加工

在插铣铣削机理方面,国内外很多学者都针对插铣力学特性进行了相关的研究。Wakaoka 等以刀具几何参数和运动特性为出发点,针对工件外壁进行了断续插铣的研究;Li 等在不考虑加工系统的运动结构前提下,探寻针对复杂曲面的插铣加工方法,且实现了插铣铣削力的预测;Ko 等假设插铣加工为柔性或刚性系统,分别对两种工件系统进行研究,分析了加工过程中插铣力和插铣振动。任军学、韩雄等通过对 TC11 钛合金插铣加工参数的优化,经过试验研究,建立了插铣加工中切削力及其温度的经验公式。崔立强等通过分析铣削参数对插铣加工过程中铣削力的影响,完成了对插铣铣削力的预测;杨振朝通过试验分析了插铣加工过程中铣削力对铣削参数的绝对灵敏度和相对灵敏度,综合得出铣削参数对铣削力的影响规律。天津大学秦旭达研究了钛合金插铣加工过程中的动力学情况,建立了针对钛合金材料插铣加工的铣削力模型,并在此基础之上,进行了温度场和插铣刀具磨损机理等方面的研究。刘献礼等针对高速插铣加工过程,综合考虑了高温和高应力相互之间的耦合作用,进行了插铣加工过程的有限元仿真分析,得出铣削力、温度以及变形区域应力应变的整体分布情况。

1.2.3 铣削稳定性边界判别算法的研究现状

颤振的概念在 1907 年被 Taylor 提出,一百多年来一直受到各国学者的重视。Hahn 在 1954 年提出了再生颤振的理论,提出了两次走刀产生的振纹因相位角不同而引起切削力不同,进而引发再生颤振。

切削稳定域的判别方法是在 Merchant 首次对切削过程深入研究后才逐步发展起来的。时域数值法是应用最早的切削稳定域判别方法,大部分时域分析模型可以用来解决确定切削过程的稳定边界性问题。Tlustý 通过考虑刀具-工件之间的非线性关系,建立了相应的时域模型并得到了时域稳定性叶瓣图。Smith 和 Tlustý 通过时域仿真阐述了常数峰值(peak-to-peak)力存在的动态切削的限制。Davies 等运

用一种离散映射法,得到小径向切削深度时的倍周期分岔。Campomanes 和 Altintas 提出了一种新的判断是否颤振的方法,该方法是比较动态切削厚度和最大静态切削厚度的比值与设定的某一个值之间的大小。李忠群和刘强建立了铣削切削稳定性的时域仿真,该时域仿真运用了 Runge-Kutta 法。Ko 等运用时域分析方法对插铣过程进行了分析,对插铣过程中的动力学以及稳定性进行了研究,并且通过两个点进行了验证,说明了时域模型的准确性。Altintas 等分析了插铣过程中的动力学和稳定性,基于插铣过程中的时域仿真模型,充分考虑刀具的切削误差和时间变量参数对切削过程的影响,预测了切削过程中切削力、扭矩、振动,并且建立颤振稳定性图。Ahmed Dam 分别考虑工件是刚性件和柔性件,建立在两种情况下插铣的时域仿真模型,有效地预测了插铣过程中的切削力、扭矩、系统振动等。数值方法能够综合考虑影响切削过程中的线性因素和非线性因素,所以一般获得的计算精度较高,但是相应的计算量很大且不能很好地说明各个参数之间的关系。

Altintas 等在 Minis 研究基础上建立了预测切削稳定域的频域法,该方法能够利用傅里叶法快速分析切削力系数的周期性,周期系数取零阶(平均值)的方法为零阶系数平均法(ZOA 法),周期系数取多阶的方法为多频域法,他们对两种方法进行了对比分析。颤振稳定性解析算法——ZOA 法是迄今为止最为快捷、有效且应用最为广泛的颤振稳定性求解方法,但该方法也存在显著的不足之处,其无法对小径向切削深度下的附加稳定区域进行预测,随着切削厚度/刀具直径的减小,稳定性预测会在局部出现较大的偏差。产生这种现象的原因是:该算法在计算动态切削系数时,在刀齿周期中没有考虑高阶项的影响而进行了零阶平均;而在小径向切削深度时,高阶项对切削系数的影响非常大,因为这种径向切削深度通常情况下被看成周期脉冲的激励,这样就使得小径向切削深度要比较大切削深度的稳定性求法复杂得多,并且也无法对双周期进行预测。

数值法考虑的因素多(线性非线性因素)、计算较大,所以效率比较低,Bayly 等在 Davies 等研究的基础上,利用时间有限元的方式,建立了半解析方法。该方法是将切入段进行离散化处理,这样做能够相当准确地预测在小径向切削深度时的稳定性边界,但是该方法实用性不强且计算效率较低。

2002 年,Insperger 等提出了较为严谨的半离散法。由于首次提出的半离散法(SDM)存在局限性,所以在 2004 年 Insperger 等对该方法进行了改进,并提供了相应的计算程序。半离散法在计算时较为严谨,因此得到了广泛的应用,并且被多次进行了改进。但是,半离散法并不是适用于任何场合,依然具有局限性,根本原因是考虑时滞的微分动力学方程,在求解时不能得到真正意义上的解。半离散法通过离散时滞项和系数项,运用离散化的常微分方程来近似代替原来的方程

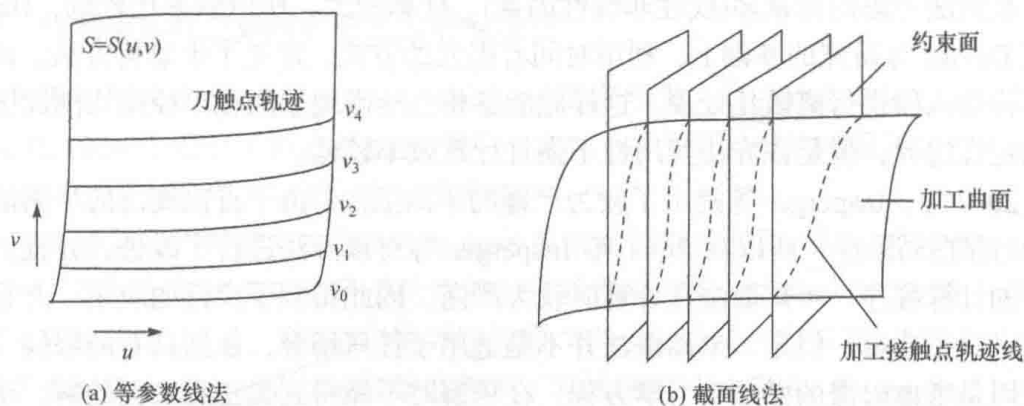
且保证所得的误差具有收敛性。在半离散法中,计算精度与离散数呈正比关系,而计算效率正好相反,并且计算效率也与网格划分密度有关呈反比关系。近几年,丁汉等突破了微分方程差分的思想,提出了计算稳定域的新方法——全离散法,这种方法相对于 SDM 在计算效率以及精度上有了相应的提高。

1.2.4 刀路轨迹规划的研究现状

在插铣的工艺优化方面,郭连水等针对插铣的加工特征以及涡轮叶盘的难加工性质,提出用插铣加工方法对其进行开粗加工,有效减小了零件的加工变形,提高了零件加工质量。任军学等对 TC11 钛合金进行插铣工艺参数的优化,通过试验分析得出了工艺参数对铣削力和切削温度的影响规律,并且对插铣加工整体叶轮的走刀路线进行了优化研究。孙晶等对复杂曲面插铣技术进行研究,综合提出了一种新型走刀路线的生成算法,成功地研究出如何生成无干涉的走刀路线,实现了复杂曲面高效率开粗加工。梁全等研究了直纹面叶轮叶片五坐标数控插铣加工技术,自主开发了整体叶轮五坐标插铣加工专用计算机辅助制造软件,并对该软件生成的刀具轨迹进行了仿真和实际加工验证。

规划刀具运动轨迹是数控加工的基础和关键,刀路轨迹的好坏直接影响工件的加工效率。据统计,有 20%~30% 的数控加工时间是浪费在重复走刀上,这些都是由刀路轨迹规划不合理造成的。近年来,国内外学者对刀路轨迹做了大量研究,主要方法有等参数线法、截面线法、多面体法、等残留高度法,如图 1-6 所示。

等参数线法是固定一个参数,然后规律地变化另一个参数来规划刀路轨迹,坐标系间对应关系的非线性,导致了刀路轨迹生成不均匀,比较适用于加工参数线变化均匀的曲面。对于组合的复杂曲面,等参数线法往往效率不高,质量不好,因此很难生成符合曲面精度要求的刀路轨迹。



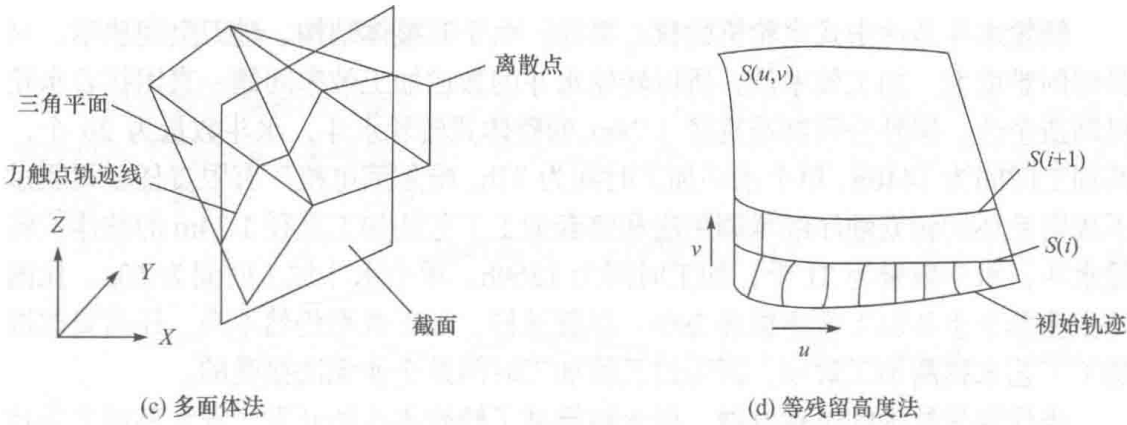


图 1-6 刀具轨迹规划方法

截面线法是采用一组等距平行平面或一组曲面与被加工表面求交，求得的交线即刀路轨迹。一般情况下，曲面间求交比较困难，所以一般选用平面或回转曲面作为截平面。刀具轨迹分布均匀，其加工质量和效率要高于等参数线法，所以截面线法适合于曲面。

1.2.5 插铣加工在转轮水斗整体数控加工技术中的应用现状

转轮水斗整体数控加工技术代表冲击式转轮制造的主流发展方向，受到了人们的广泛重视。在数控加工转轮技术出现初期，由于尺寸限制，水斗不能一次成型，必须经历分铸和微焊两个过程，即数控加工和焊接组合，如图 1-7 所示。这种结构虽然降低了数控加工的难度，但必须留有较大的微焊余量二次数控加工，且焊接部分的应力控制很困难。随着数控技术的发展，水轮机转轮实现了整体数控加工，如图 1-8 所示。这种方法不但提高了水斗型线的准确性，而且能够解决断斗问题。目前，锻造毛坯或铸造毛坯整体数控加工已成为冲击式转轮制造发展的主流方向。

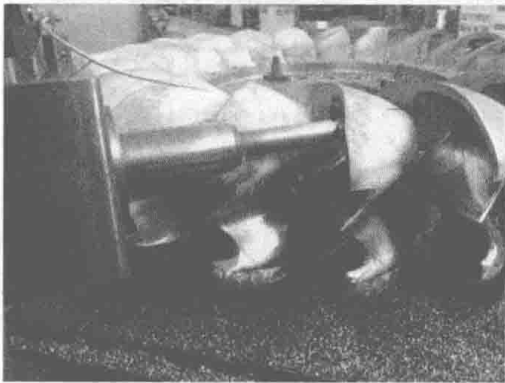


图 1-7 数控加工和焊接组合



图 1-8 整体数控加工

转轮水斗是冲击式水轮机的核心零件,由于其整体结构、进刀空间狭窄、材料切削难度大、加工效率低,所以转轮水斗的数控加工效率问题一直困扰着水轮机制造企业。国外公司制造直径 1.74m 的整体式转轮水斗,水斗数量为 20 个,其加工时间为 1440h,单个水斗加工时间为 72h。哈尔滨电机厂有限责任公司通过不规则毛坯的频繁顺序继承调用法和整套加工工艺法加工直径 1.74m 的整体式转轮水斗,水斗数量为 21 个,加工时间为 1260h,单个水斗加工时间为 60h,比国外企业单个水斗加工效率提高 20%。尽管这样,加工效率仍然不高,还需要改进加工工艺来提高加工效率,因为过长的加工时间是企业无法接受的。

当代科学技术的迅猛发展,极大地推动了转轮水斗的开发、设计和制造等技术。国外一些企业在转轮水斗加工方面已经完成了由分体式到整体式加工方式的转变。

1. 数字化设计手段

一直以来,由于水轮机的应用特性,人们一直对其整体设计及加工有着较高的标准要求,包括水轮机的工作效率。随着社会科技的发展,水轮机模型的建立也由传统的手工设计转化为智能的三维设计形式。国外一些先进企业,通过软件系统的编程优化,已经可以获得转轮水力型线模型的整体优化。

帕金森和里斯伯格等将水流模拟与有限元分析的方法相结合,开拓了新型设计方法,降低其制造过程中的成本,提高了加工效率。

2. 数控加工设备

针对转轮水斗整体数控加工技术的研究,国外创新研究出转轮加工专用的附带数控转台的五轴数控加工机床,可提高转轮的精度和零件的使用寿命,给企业带来了巨大的经济效益。这种机床可以容纳多个刀具,通过对各工序需要刀具的提取来实现对拥有多个复杂曲面转轮水斗的铣削加工;也可以很大程度地提高零件的加工质量,降低废品率,且对刀具及夹具的要求相对简单,因此减少加工刀具和夹具的数量,相对降低了对零件加工的成本。

3. CAD/CAM 软件

针对转轮水斗的结构特性,国外采用先进的数控加工软件系统,使用计算机软件模拟仿真水斗的整个加工过程,包括工艺规划、夹具设计、程序编译、质量检测等,针对零件加工所使用的机床对软件进行二次开发,更加精确、高效地实现了转轮水斗的整体数控编程及加工仿真。