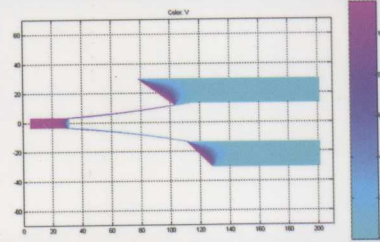
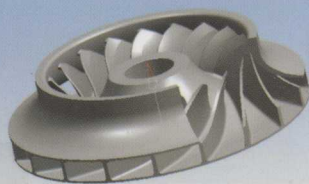


New Nontraditional Machining
Techniques of Integral
Components in Aircraft Engine

航空发动机整体构件 特种加工新技术

徐家文 赵建社 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

航空发动机整体构件 特种加工新技术

New Nontraditional Machining Techniques of
Integral Components in Aircraft Engine

徐家文 赵建社 朱永伟 等著
干为民 郑建新 康 敏

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机整体构件特种加工新技术 / 徐家文等
著. —北京:国防工业出版社, 2011. 6

ISBN 978-7-118-07518-2

I. ①航... II. ①徐... III. ①航空发动机 - 构件 - 特种加工 - 新技术 IV. ①V23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 099683 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 19¼ 字数 332 千字
2011 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 86.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工

委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员	王 峰			
副主任委员	宋家树	蔡 镛	程洪彬	
秘 书 长	程洪彬			
副 秘 书 长	邢海鹰	贺 明		
委 员	于景元	才鸿年	马伟明	王小谟
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	邬江兴
	刘世参	芮筱亭	李言荣	李德仁
	李德毅	杨 伟	肖志力	吴有生
	吴宏鑫	何新贵	张信威	陈良惠
	陈冀胜	周一宇	赵万生	赵凤起
	崔尔杰	韩祖南	傅惠民	魏炳波

前 言

整体构件已经成为高性能航空、航天发动机、乃至先进机械产品中的革新设计部件,而由于其难加工,它又成为世界顶级制造技术难题之一;随着整体构件越来越多地应用,研究整体构件新加工技术,已成为世界先进制造技术领域中的热点课题。目前,整体构件的加工方法有十来种,其中,数控铣削、精密铸造是常用方法,已经得到广泛应用并将继续发挥积极作用。而由于材料(包括工程陶瓷)难加工,结构更复杂,对有些整体构件,数控铣削、精密铸造则不能加工,或很难加工,或成本太高。为解决这些问题,必须寻求新加工方法,以补充数控切削、精密铸造之不足。正是为此目的,作者在国家自然科学基金、国防预先研究等项目资助下,开展了相关技术的创新研究。所获得资助的研究项目包括:国家自然科学基金《柔性电解加工的研究》(5880296,1989—1990)、航空科学基金《数控创成电解成型规律的研究》(92G52093,1992—1994)、“八五”航空科技预研《展成法电解加工技术研究》、“九五”国防科技预研《数控展成电解工艺研究》、“十五”总装先进制造技术预先研究《复合电加工—整体构件上复杂型面电加工技术》、“十五”航空支撑技术预先研究《异型曲面电解加工技术研究》、“十一五”总装先进制造技术预先研究《高效精密电加工技术》、“十一五”国防科技工业技术基础科研计划项目《数控电解工艺技术的推广应用研究》,以及江苏省自然科学基金《数控展成超声磨削成形加工的基础研究》(BK2001048)等,还包括航空发动机、航天发动机研究所、生产厂、先进涡轮机械生产厂等近10个单位委托的、在研制和生产中所遇到的、难加工整体结构件的工艺攻关项目。早期研究目标以解决新型航空、航天产品中的整体叶轮加工难题为主,以后又逐渐扩展到攻克那些更难加工的、以径向扩压器、三元流闭式整体叶轮为代表的闭式整体构件的整体制造难题。研究内容广泛,涉及机械工程、先进制造、自动控制、计算机应用、流体力学、电物理、电化学等多学科交叉。经过长期研究,已经成功实现了电解、电火花、电解磨削与数控技术、数字化制造技术等多项技术的集成创新,综合发挥各自的特点,相互间扬长避短,相得益彰,由此而综合达到优质、高效、低成本、快速响应的加工效果。

所创新的关键技术立足国内条件,具有自主知识产权,已经授权5项国家发

明专利,1项实用新型专利,还有2项发明专利正在审批过程;“总体技术处于国内领先、达到国际先进水平”(引自鉴定意见);技术已日趋成熟,已经在新机研制及小批量生产中成功应用,解决了国外保密、国内又无法加工的某些整体构件制造难题,为我国高性能航空、航天发动机和先进涡轮机械产品的研制和生产提供了强有力的制造技术支持,“对于促进我国新型武器装备的研制和生产具有重要意义”(引自鉴定意见)。研究成果《数控展成电解工艺》获国防科技进步二等奖、中国高校技术发明二等奖,《整体构件组合电加工技术》获国防科技进步二等奖。

基于项目研究及应用成果,在作者已发表的研究论文、技术总结的基础上,撰写了本专著《航空发动机整体构件特种加工新技术》。撰写过程,力求展现技术新颖、先进、实用的特点;力求从理论与实践的结合上说明问题;力求深入浅出,既有一定的学术深度,更注意反映工艺技术的实践性和完整性;还考虑到一定的前瞻性。书中介绍的加工实例均为典型整体构件,工艺数据都经过实际零件加工或试件加工验证,不仅对同类构件、而且对具有类似几何结构(型腔、型面)的其他整体构件的设计制造,也具有重要参考价值,对研究开发同类加工新技术将会有所启迪。

全书共分6章,第1章阐述整体构件设计制造的重要意义,就整体构件的结构特点、加工难点、制造技术进行综合论述;第2章以整体叶轮叶片型面加工为代表,论述了数控展成电解加工的总体技术方案、加工设备及关键技术;第3章以整体叶轮叶片型面精密加工为目标,介绍了在数控展成电解加工技术及设备基础上所开发的数控电解磨削技术,包括工艺规律、设备改造、关键技术;第4章以优质、高效、低成本、快速响应地实现闭式整体构件的整体制造为目标,阐述了组合电加工技术路线、工艺特点、关键技术,并列举了典型构件加工实例;第5章从技术发展、技术前瞻的角度,以解决工程陶瓷型面加工难题为目标,比较全面、系统地介绍了数控展成、蠕动进给、超声磨削新技术,虽然该技术还只处于试验研究阶段,但研究结果显示了其诱人的应用前景;第6章提出了整体构件特种加工技术的发展趋势,以与读者商榷。

本专著撰写工作由进行相关内容研究、对创新相关技术起关键作用的博士研究生和他们的指导教师徐家文共同完成,其中第1章、第6章由博士导师徐家文教授撰写;第2章由宋永伟博士、教授撰写,其中2.7节由康敏博士、教授撰写;第3章由干为民博士、教授撰写,第4章由赵建社博士、副教授撰写,其中王福元副教授、葛媛媛副教授也撰写了部分内容;第5章由郑建新博士、副教授撰稿;全书由徐家文教授统稿、定稿。

为本书撰写提供有价值的资料、且为项目研究做出重要贡献的人员还有魏

斌博士(现美国 GE 公司研究员),周宇博士(现美国纽约州立大学石溪分校助理教授),张永俊博士、教授,胡平旺博士、研究员,钱密博士、副教授,丁仕燕博士、副教授,吴建民博士,吴锐博士,刘辰博士等。

在完成本书稿之际,深切感谢前南京航空学院院长、特种加工研究室前主任、全国电加工学会第二届理事长余承业教授,从最早项目提出到研究全过程,都给予极大的关心和指导。同时,还特别感谢云乃彰教授,作为研究项目第二负责人,在项目研究中协助指导和培养研究生,对技术创新做出突出贡献;还有杨雪樱高级工程师、刘延禄研究员在早期也为项目研究和协助指导研究生做了大量工作;而严德荣技师、陈建宁技师、方忠东技师、朱罗金技师,作为工艺试验和试制加工的一线主力,为完成全部工艺试验和零件试制加工起了重要作用;在此一并表示谢意。

撰写本专著,既为了将项目组 30 余年来的研究和应用成果进行系统总结、提高并介绍给读者;更希望得到同行专家、一线科技人员和生产工人的批评指正和建议;希望能够对整体构件特种加工技术更高水平、更广范围的发展和应用有所促进。如果本书能够起到抛砖引玉的作用,能够对读者有所启迪,有所借鉴,作者对所付出的心血和劳动,将倍感欣慰。

本书写作由作者在繁忙的教学科研工作之余完成,再加之受作者专业和写作水平、以及对现代科学技术理解水平的限制,书中错误、缺点、不足之处在所难免,恳切希望得到读者的批评指正。

作 者

2011 年 2 月 22 日

于南京航空航天大学

目 录

第1章 整体构件加工技术概述	1
1.1 整体构件设计对于提高武器装备性能的重要作用	2
1.1.1 整体构件设计提高航空航天发动机整体性能	2
1.1.2 小型整体构件对提高武器装备的整体性能和轻量化、小型化的 重要意义	3
1.2 整体构件结构特点及加工工艺	4
1.2.1 整体构件的结构特点及分类	4
1.2.2 整体构件加工工艺分析	6
1.3 整体构件加工技术	7
1.3.1 精密铸造	7
1.3.2 多轴数控铣削	8
1.3.3 焊接	9
1.3.4 数控电火花加工	12
1.3.5 电解加工	13
第2章 整体叶轮数控展成电解加工	18
2.1 电解加工	18
2.1.1 电解加工原理与特点	18
2.1.2 电解加工的应用	20
2.2 整体叶轮的电解加工方法	21
2.2.1 整体叶轮结构特点与加工难点	21
2.2.2 整体叶轮的电解加工方法	22
2.2.3 数控展成电解加工技术	24
2.3 数控展成电解加工成形规律	27
2.3.1 展成电解加工运动分析及简化	27
2.3.2 展成电解加工成形规律的基本分析	29
2.3.3 叶间通道数控展成电解加工间隙变化的微分方程	29
2.3.4 计算结果的试验验证	31

2.4	整体叶轮数控展成电解加工运动及编程	34
2.4.1	展成运动方案	34
2.4.2	叶片型面数据处理	38
2.4.3	展成运动轨迹计算	44
2.4.4	多轴联动的运动参数计算	45
2.4.5	基于 C++ 语言的计算机辅助数控编程	47
2.5	整体叶轮数控展成电解加工设备	49
2.5.1	五轴数控展成电解加工机床及多轴联动数控系统	49
2.5.2	工装夹具设计	50
2.5.3	阴极设计制造	56
2.5.4	误差分析	59
2.6	整体叶轮叶间通道数控展成电解加工	64
2.6.1	整体导风轮叶间槽数控展成电解加工	64
2.6.2	整体涡轮数控展成电解试验加工	66
2.7	整体叶轮叶片型面数控展成电解精加工	69
2.7.1	加工方案	69
2.7.2	直线刃边阴极展成加工平面的工艺规律	69
2.7.3	叶片型面精加工	72
第3章	整体叶轮数控展成电解磨削	74
3.1	数控展成电解磨削机理	74
3.1.1	电解磨削	74
3.1.2	电解磨削表面的整平机理	75
3.1.3	型面数控展成电解磨削的技术方案	78
3.1.4	型面数控展成电解磨削工艺规律	79
3.2	叶片型面数控展成电解磨削运动及数控编程	83
3.2.1	叶片型面分类及展成运动设计	83
3.2.2	运动轨迹计算及数控编程	91
3.3	整体叶轮叶片型面数控展成电解磨削加工	97
3.3.1	叶片型面数控展成电解磨削设备	97
3.3.2	叶片型面数控展成电解磨削工艺参数	100
3.3.3	叶片型面数控展成电解磨削工艺规律	100
3.3.4	整体叶轮叶片型面数控展成电解磨削加工	104
3.3.5	叶片型面数控展成电解磨削误差分析	106

第4章 闭式整体构件组合电加工	111
4.1 闭式整体构件结构特点及加工方法	111
4.1.1 几何结构特点及分类	111
4.1.2 加工工艺难点	112
4.1.3 加工方法简介	113
4.2 闭式整体构件组合电加工总体方案	116
4.2.1 组合电加工技术特点	116
4.2.2 加工工艺流程	116
4.2.3 数字化制造技术的应用	117
4.2.4 若干关键技术	118
4.3 异形型腔数控电解加工	122
4.3.1 异形型腔数控电解加工模型的建立及求解的思路	122
4.3.2 异形型腔数控电解加工的数学物理模型	122
4.3.3 GH4169 材料电解加工特性	128
4.4 异形型腔数控电火花加工	136
4.4.1 异形型腔数控电火花加工工艺	136
4.4.2 影响数控电火花加工精度的主要因素	139
4.4.3 数控电火花加工表面质量	139
4.4.4 基于通用精密电火花成形加工机床的工艺参数选择	141
4.4.5 电极及其加工运动轨迹设计	142
4.4.6 GH4169 材料电火花加工特性试验研究	145
4.5 闭式整体构件组合电加工数字化制造技术	149
4.5.1 组合电加工过程数字化技术运用总体方案	149
4.5.2 闭式整体构件组合电加工 CAD/CAE/CAM 技术平台	149
4.5.3 闭式整体构件建模与数据处理	156
4.5.4 加工运动轨迹计算与数控编程	163
4.5.5 数控电加工过程的几何仿真	165
4.5.6 异形型腔数控电解加工成形过程仿真	170
4.5.7 工装夹具的数字化设计	182
4.5.8 数字化测量与误差分析	183
4.6 典型闭式整体构件组合电加工实例	186
4.6.1 整体扩压器组合电加工	187
4.6.2 带冠整体叶轮组合电加工	196
4.6.3 三元流闭式叶轮组合电加工	207

第5章 数控展成蠕动进给超声磨削陶瓷叶轮	218
5.1 工程陶瓷型面加工概述	218
5.2 蠕动进给超声磨削机理	223
5.2.1 陶瓷材料延性域磨削加工机理	223
5.2.2 蠕动进给超声磨削陶瓷材料的静载荷理论模型	227
5.2.3 陶瓷材料蠕动进给超声磨削过程的理论分析	232
5.3 陶瓷材料蠕动进给超声磨削工艺规律	236
5.3.1 磨削参数对加工表面粗糙度和材料去除率的影响	238
5.3.2 振动方向对加工表面粗糙度和材料去除率的影响	242
5.3.3 复合进给对加工表面粗糙度和材料去除率的影响	243
5.3.4 磨削速度对加工质量的影响	244
5.4 数控展成蠕动进给超声磨削设备	246
5.4.1 电动机变频调速控制系统	247
5.4.2 磨轮驱动系统	250
5.4.3 超声振动系统	252
5.4.4 超声变幅杆计算机辅助设计	255
5.5 数控展成蠕动进给超声磨削试验加工陶瓷叶轮	263
5.5.1 圆弧曲面的数控展成蠕动进给超声磨削试验加工	263
5.5.2 扭曲直纹面的数控展成蠕动进给超声磨削试验加工	268
第6章 整体构件特种加工技术发展趋势	272
6.1 向更加稳定、更加优质、更加高效的加工目标发展	272
6.2 基于加工原理拓展创新加工技术	274
6.2.1 改进特种加工性能的新技术措施	274
6.2.2 复合特种加工	277
6.3 基于技术集成创新加工技术	277
6.3.1 组合加工	277
6.3.2 合理应用数字化制造技术	278
6.3.3 充分应用计算机技术	279
6.4 研制高精度、高可靠性的加工设备	279
6.5 扩大推广应用,在应用中发展提高	280
参考文献	282

Contents

Chapter 1 Overview on Machining Techniques of Integral Components	1
1.1 Design of Integral Component Playing an Important Role in improving the Performance of Weapons	2
1.1.1 Design of Integral Component improving the Engine Performance of Aviation and Aerospace	2
1.1.2 Design of the Small Integral Component Making the Weapon Lightening and Handy, as well its whole Performance Better and Better	3
1.2 The Structural Particularity and Machining Technology of Integral Components	4
1.2.1 The Structural Particularity and Classification of Integral Components	4
1.2.2 Analyzing the machining Technology of Integral Components	6
1.3 The Machining Techniques of Integral Components	7
1.3.1 Precision Casting	7
1.3.2 Multi – Axes Numerically Controlled Milling	8
1.3.3 Welding	9
1.3.4 Numerically Controlled Electric Discharge Machining (NC – EDM)	12
1.3.5 Electrochemical Machining (ECM)	13
Chapter 2 Numerically Controlled Contour Evolution Electrochemical Machining of Integral Impeller	18
2.1 Electrochemical Machining	18
2.1.1 Principle and Characteristics of ECM	18
2.1.2 Applications of ECM	20
2.2 ECM Methods of Integral Impeller	21
2.2.1 The Structural Particularity of Integral Impeller and its Machining Difficulty	21

2.2.2	The ECM Methods of Integral Impeller	22
2.2.3	The Numerically Controlled Contour Evolution Electrochemical Machining (NC – CEECM)	24
2.3	Shaping Laws of NC – CEECM	27
2.3.1	Analysis and Assumption on the Feed Motion of NC – CEECM	27
2.3.2	Basic Analysis of Shaping Laws on NC – CEECM	29
2.3.3	Differential Equations on NC – CEECM Gap in the Process of Machining Passage between the two Adjacent Blades of Impeller	29
2.3.4	Experimentally Verification of the Calculated Results	31
2.4	Feed Moving and Programming on NC – CEECM of Integral Impeller	34
2.4.1	Scheme of Contour Evolution Motion	34
2.4.2	Data Processing of Blade Surface	38
2.4.3	Calculating the Trace of Contour Evolution Feed Moving	44
2.4.4	Calculating the Moving Parameters of Multi – axes Cooperative Feed	45
2.4.5	Computer Aided Programming Based on the C ++ Language	47
2.5	The Machining Equipment of NC – CEECM of Integral Impeller	49
2.5.1	The Five – Axes NC – CEECM Machine – Tool and the Relative Multi – axes NC System	49
2.5.2	Designing of the Processing Equipment and the Fixture	50
2.5.3	Designing and Making of the Cathodes	56
2.5.4	Error Analyzing	59
2.6	NC – CEECM of Passage between the two Adjacent Blades of Impeller	64
2.6.1	NC – CEECM of Passage between the two Adjacent Blades of Compressor Impeller	64
2.6.2	Experimentally NC – CEECM of Passage between the two Adjacent Blades of Turbine Impeller	66
2.7	Precision NC – CEECM of Blade Surface of Impeller	69
2.7.1	Machining Scheme	69
2.7.2	Shaping Laws of Precision NC – CEECM of Plane Surface by the Cathode with Straight Machining Edge	69
2.7.3	Precision NC – CEECM of Blade Surface of Impeller	72

Chapter 3	NC Contour Evolution Electrochemical Grinding of Integral impeller	74
3.1	Mechanism of NC Contour Evolution Electrochemical Grinding(NC – CEECG)	74
3.1.1	Electrochemical Grinding (ECG)	74
3.1.2	Mechanism of ECG the Plane Surface	75
3.1.3	Technological parameters of NC – CEECG of Blade Surface	78
3.1.4	Technological Laws of NC – CEECG of Curved Surface	79
3.2	Feed Moving and Programming of NC – CEECG of Blade Surface	83
3.2.1	Classification of Blade Surface and Design of Contour Evolution Motion	83
3.2.2	Calculating and Programming of NC – CEECG Moving Trace	91
3.3	NC – CEECG of Blade Surface of Integral Impeller	97
3.3.1	Equipment	97
3.3.2	Technology Parameters	100
3.3.3	Technology Laws	100
3.3.4	Experimentally NC – CEECG of Blade Surface of Integral Impeller	104
3.3.5	Error Analysis	106
Chapter 4	Combined Electrical Machining Technique of Closed Integral Component	111
4.1	Structural Particularity and Machining Methods	111
4.1.1	Structural Particularity and Classification	111
4.1.2	Machining Difficulties	112
4.1.3	Introduction of Machining Methods	113
4.2	Overall Scheme of Combined Electrical Machining Technique of Closed Integral Component	116
4.2.1	Technical Specialty of Combined Electrical Machining Technique	116
4.2.2	Technological Process	116
4.2.3	Application of Digitized Manufacturing Technique	117
4.2.4	Some Key Techniques	118
4.3	NC – ECM Technique of Irregular Cavity	122

4.3.1	The Scheme of Modeling and its Solution on NC – ECM of Irregular Cavity	122
4.3.2	Mathematical – Physical Model of NC – ECM of Irregular Cavity	122
4.3.3	ECM Characteristics of GH4169 Material	128
4.4	NC – Electrical Discharge Machining (NC – EDM)	
	Technique of Irregular Cavity	136
4.4.1	NC – EDM Technology of Irregular Cavity	136
4.4.2	Main Factors Effected on NC – EDM Accuracy	139
4.4.3	Surface Integrality of NC – EDM	139
4.4.4	Optimizing the Technological Parameters Based on General NC – EDM Machine Tool	141
4.4.5	Design of the Electrode and its Moving Trace	142
4.4.6	Research on EDM Characteristics of GH4169 Material	145
4.5	Digitized Manufacturing of Combined Electrical Machining Technique	149
4.5.1	Overall Scheme of Digitized Manufacturing of Combined Electrical Machining Technique	149
4.5.2	CAD/CAE/CAM Technology Platform of Combined Electrical Machining Technique of Closed Integral Component	149
4.5.3	Modeling and Data Processing of Closed Integral Component	156
4.5.4	Calculating the Moving Trace and NC Programming	163
4.5.5	Geometry Simulation of NC Electrical Machining Process	165
4.5.6	Processing Simulation of NC – ECM of Irregular Cavity	170
4.5.7	Digitalized Design of Auxiliary Apparatus	182
4.5.8	Digitalized Measurement and Error Analysis	183
4.6	Application Examples of Combined Electrical Machining Process of Some Typical Closed Integral Components	186
4.6.1	The Combined Electrical Machining Process of Integral Supercharger	187
4.6.2	The Combined Electrical Machining Process of Cowling Integral Impeller	196
4.6.3	The Combined Electrical Machining Process of 3 – D Flow Closed Integral Impeller	207