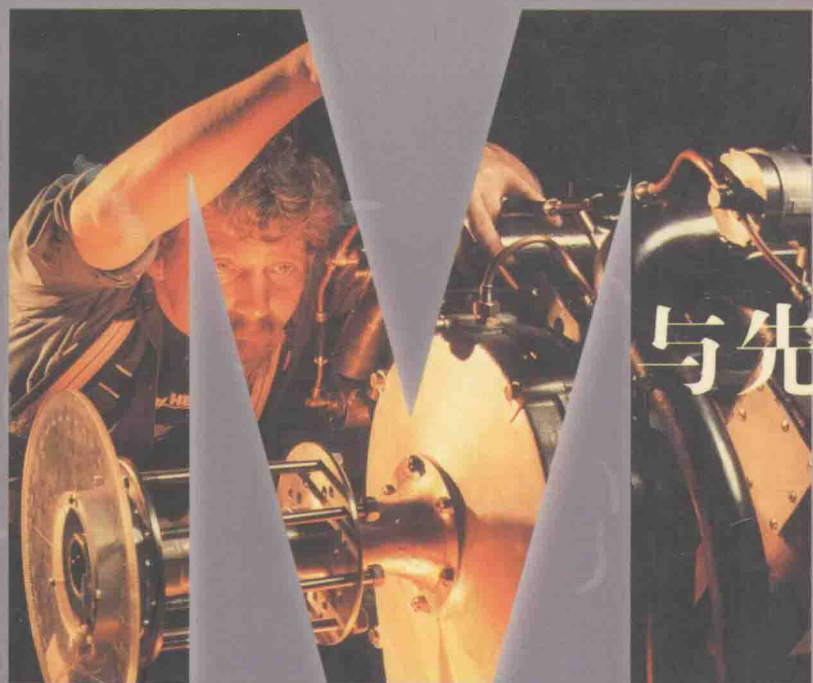


第四次江苏科技论坛

机械装备制造分论坛



现代企业  
与先进制造技术

Machinery  
Equipment

江苏省科学技术协会  
江苏省机械工程学会

2003年10月·南京

# 第四次江苏科技论坛机械装备制造分论坛

## 第四次江苏科技论坛机械装备制造分论坛

主办单位:江苏省科学技术协会

承办单位:江苏省机械工程学会

协办单位:南京理工大学

江苏太湖锅炉股份有限公司

金思维信息技术有限公司

### 组织委员会

顾问:许汉文

主任:吴昌瑞

副主任:陆道君 刘海青

委员:江建春 顾卫星 马小平

学术委员会

主任:易红

副主任:李小宁 沈世德

委员:林萍华 段雄 汤文成 朱荻 王贵成

康乃真 周骥平 章跃 戴勇 姜左

### 专题报告

1. 机器人技术的发展及其在制造业中的应用(蔡鹤皋 哈尔滨工业大学教授、博导,中国工程院院士);

2. 装备制造业的现代化与信息化(张曙 同济大学教授、博导,上海科技功臣);

3. 工业工程与企业管理创新(齐二石 天津大学管理学院院长、教授、博导);

4. 企业信息化实务(刘海青 金思维信息技术有限公司总裁、研究员,江苏省制造业信息化专家组成员);

5. 精密微细加工技术(朱荻 南京航空航天大学机电学院院长、教授、博导,长江学者特聘教授);

6. 企业竞争力与信息化(汤文成 东南大学教授、博导,江苏省制造业信息化专家组成员)。

# 前 言

先进制造技术已成为在国际竞争中能否取得成功的关键技术,是衡量一个国家综合国力的重要标志。在我国加入世贸组织后的 21 世纪,制造业面临着重大挑战和机遇,加快用先进制造技术改造和武装传统产业,提升行业整体实力已成为当务之急。

近年来我省机械装备制造业得到了长足的发展。在先进制造技术研究领域,具有较强的研究实力和应用基础,取得了令人瞩目的成就。为了交流应用先进制造技术的成功经验,探讨如何更好更快地在行业实施先进制造技术,加速行业的技术升级,提高国际竞争力,由江苏省机械工程学会承办的第四次江苏科技论坛机械装备制造分论坛于金秋十月在南京举行。本届论坛是一次层次高、规模大、影响深的盛会,得到了众多单位和论文作者的响应,经专家评审有 98 篇论文收集在论文集中。论文内容涉及先进制造技术、制造业信息化技术、制造系统与管理、现代设计理论和技术、制造自动化及机电一体化技术等方面,论文集中反映了全省机械行业研究应用和推广先进制造技术的现状和取得的最新成就,这是广大科技工作者智慧的结晶。

我们相信,通过这次高层论坛,必将进一步加强相互间的交流与合作,促进我省先进制造技术的研究和应用,对建设我省“国际性制造业基地”将产生积极的推动作用。

论文集由南京理工大学机械工程学院负责编辑,他们付出了辛勤的劳动,在此深表谢意。由于编辑时间仓促,文集中错误疏漏之处难免,敬请批评指正。

二〇〇三年十月

## 目 录

## 先进制造技术

电解加工直纹型面叶片的误差分析及处理.....	朱永伟 徐家文	1
面向自顶向下设计的装配模型研究.....	张帆 张友良	8
切削方向毛刺/亏缺的形成及其形态转换.....	陈镇宇 王贵成 朱云明	12
Ag-Cu-Ti 钎焊 CBN 砂轮的试验研究.....	黄志骏 卢金斌 傅玉灿等	17
逆向工程中 NURBS 曲面重构技术及实现 .....	彭伟 李东波 许晓兰	21
微体光刻成型法探讨.....	朱丽 侯丽雅 章维一	29
多孔金属结合剂超硬磨料砂轮制造技术新发展.....	吴琦 徐鸿钧	33
薄壁件加工变形因素综合分析.....	王志刚 何宁 武凯等	37
革命性的焊接新方法——搅拌摩擦焊 (FSW) .....	严铿 蒋成禹 李敬勇等	42
三种活塞环镀层的摩擦磨损实验研究.....	靳广虎 吴映雪 于敏等	47
逆向工程中的一种曲面插值算法.....	黄阳 李东波 许晓兰等	50
WEDM 中上下异型体轨迹合成的等同步线性化.....	翟洪军 汪炜 安鲁陵等	54
铣削 GH 4169 合金铣削力研究.....	刘钢 何宁 满忠雷等	57
绿色制造中切削冷却方法的研究.....	任家隆 邹家生	62
虚拟装配中面向轴承预紧的尺寸公差设计与分析.....	黄娟 顾寄南	67
先进制造技术促进企业发展.....	陈洪凯	72
热轧穿孔裂纹形成因素的分析.....	朱安莉 王贵成 王志等	76
基于 Voronoi 图的型腔加工刀具轨迹生成算法.....	程志远 陈文亮 翟建军	81
基于图像的产品数据获取技术.....	花萌 陈炳发 陆晓	85
BP 神经网络辅助板料拉深成形工艺设计研究.....	陈明和 谢兰生 王春良等	90
陶瓷磨削加工的研究及其发展.....	许琰 王贵成	95
浅析延长冲压模具使用寿命的机理.....	张卫国	99

## 制造业信息化技术

基于 STEP 和 XML 的网络化制造系统信息共享的研究 .....	仇晓黎 易红 吴锡英	101
基于 C/S 和 B/S 混合结构信息系统的设计及实现.....	杨友兵 汤文成	107
基于 B/S 结构的生产调度系统实现技术研究.....	蒋凌燕 楼佩煌	112
基于 Web 的协同 CAD/CAM 关键技术研究.....	齐宝利 周来水 庄海军等	117
网络化制造环境中的 CAPP 系统.....	汪惠芬 张友良	121

机械加工工艺过程特征及其在 CAPP 中的应用.....	周一丹 廖萍	127
型材拉弯回弹有限元分析.....	谢兰生 陈明和 翟建军等	131
S 形飞机蒙皮拉形成形的有限元仿真.....	袁鸿 李靖谊	135
UG/CAM 中切削参数的应用研究.....	李嘉骏 文亮 翟建军	140
线切割编程软件中 DXF 格式转换接口技术研究.....	刘海亮 安鲁陵	142
模型关联线切割轨迹生成算法研究.....	王东辉 安鲁陵	146
面向装配工艺规划与仿真的装配工具库的建立与应用.....	侯永涛 顾寄南	150
CAD 图纸成批导入 PDM 系统技术研究.....	尤静	155
Excel 与 Oracle 之间的数据转换的方法.....	罗小妮 陈文亮 翟建军	160
SmarTeam 在蓝深制泵中的应用.....	陈斌	163
并行设计技术在显微医疗设备企业产品开发中的应用.....	卢道华 吴洪涛	167
面向中小型机床企业的信息化工程总体设计.....	陆云祥 汤文成 杨友兵等	170
实施制造业信息化工程, 走新型工业化道路.....	周金花 潘松麟	176
企业信息化系统安全模型研究.....	陈恳 杨建青 张朝晖	180
ISO9000 与管理信息化.....	杨红梅 曹伏宁 黄文清	185
应用 ASP 模式推动中小企业信息化.....	邵正兵	189

## 制造系统与管理

面向敏捷制造的产品配置管理.....	汤文成 易红 幸研等	193
一种基于智能节点的分布式监测网络优化方法.....	陆宝春 张卫 徐永新	198
活体蛇的驱动部位摩擦性能的实验研究.....	张昊 李明孜 靳广虎等	203
基于 XML 面向工艺设计的制造资源模型的研究.....	倪中华 易红 汤文成等	209
一种结合粗糙集和结构树的故障诊断方法研究.....	彭强 张晓阳 孙宇	214
一种使用正交函数的非线性系统建模方法.....	孙冬梅 李永新 卜雄洙	219
面向对象的 Petri 网可视化建模与仿真工具的设计与实现.....	黄勇 张友良 汪惠芬	225
基于虚拟现实的自动加工过程实验仿真系统的平台设计.....	祝恒云 严潮红 梁春等	230
故障诊断中多传感器信息的模糊融合方法.....	张晓阳 彭强 孙宇	234
粗糙聚氨酯表面的微接触状态对粘着力及摩擦力的影响.....	于敏 戴振东	237
材料粘着—摩擦性能综合实验台.....	张昊 杨松祥 许巧游等	241
面向拆卸的装配序列规划算法的实现.....	曹磊 王栓虎 龚光容	245
Web Service 安全性技术研究.....	潘锐 王政时 鞠玉涛	250
基于 PLC 的移动机器人运动控制的实现.....	刘权 殷爱华	257
与用户深层交互的电子商务模式.....	袁昌松 王伟	262
实施制造业可持续发展战略的思考.....	裴宏杰 张春晔 王贵成	266
以技术创新为手段, 把常州建设成为国内最大的工程机械制造基地.....	孔凡宏 杨志波	272
刍谈制造业的“中心幅射式”发展.....	王生元	278

重视企业关键制造技术, 提高工艺及装备水平, 适应市场新要求.....	唐镇寰	282
高职教育中产教结合的研究.....	戴勇	284

## 制造自动化及机电一体化技术

甲壳虫脚爪微结构、在粗糙表面上的驱动力及其仿生研究 .....	戴振东 Stanislav N.Gorb Uli Schwarz	289
一种轻型越野汽车操纵稳定性的仿真分析.....	王良模 尹浩 吴明等	296
FMS 刀具贮备管理研究.....	丁武学 龚光容	299
神农螻蛄鞘翅锁定机构及其仿生研究.....	张亚锋 戴振东 谢兰生	305
新型二次调节静液传动车辆的专家 PID 控制研究.....	韩文 常思勤	312
功率分流式车用自动无级变速器的建模与仿真.....	魏英俊 常思勤	316
排气回收速度控制系统的数学模型及动特性分析.....	石运序 李小宁	323
基于气动肌肉的机器人手臂抓取技术研究.....	卫玉芬 李小宁	328
浅谈出口新加坡平车的可靠性设计.....	程畅	332
气缸爬行现象影响因素及其动力学模型描述.....	黄俊 李小宁	338
发动机关键零部件设计制造一体化系统工程实践.....	姜继春 龚光容	343
气动自动货架控制技术的研究.....	田威 李小宁 路建萍	349
多功能气动教学实验台的研制.....	路建萍 李小宁	354
活塞环内外圆加工设备现状和新型数控车床方案研究.....	王隆太 李开顺 吴雪映等	357
柔性制造系统中 OPN 模型的建立.....	刘全胜 戴勇 龙波	361
现场总线技术在电动执行机构中的应用.....	谭爱红 许常武	365
浅谈黄磷罐式集装箱的研制.....	程畅 吕柏平	369
空间交会对接技术的认识与探讨.....	张亚锋 谢兰生 戴振东	374
电动执行机构设计过程中蜗轮蜗杆硬度匹配探讨.....	谭爱红 许常武	378
半导体制冷装置的试验研究.....	李新龙 何宁 李亮等	382
Westinghouse P4a 制动机在新加坡平车上的应用.....	程畅 徐克禹	387
固型燃料机的研制.....	任家隆 邹家生	392

## 现代设计理论和技术

数字化产品设计模型的研究.....	陆晓 陈炳发 花萌	395
基于 Pro/E 的制动器复杂零部件自动设计.....	吴永海 徐诚 李洁	400
高速转子动平衡精度的修正.....	王树林 王贵成 沈春根等	405
BP 网络的车削加工毛刺的形成及其预报中的应用.....	朱云明 王贵成 陈镇宇	409
梯度聚晶金刚石复合材料的开发.....	贾志宏 王贵成 刘菊东	413

---

粉末冶金 Al-Fe 复合材料组织、力学性能及耐磨行为 .....	王宏宇 刘桂林 吉平平	417
主轴无轴承电机的本体结构设计与系统仿真分析 .....	曾励 赵红兵 王新琴	422
65Mn 钢磨削淬硬后的组织与性能 .....	刘菊东 王贵成 贾志宏	431
UG 软件在电话机模具设计与制造中的应用 .....	于敏建	434
基于使用者偏好意象的产品造型法则建构研究 .....	徐江 张锡	437
基于行为建模的曲轴优化设计 .....	朱昱 黄明宇 倪红军	444
对汽车转向器变厚齿扇齿的齿根圆角 与早期失效的研究 .....	张枫念 何鹤立 陈晓勇	447
油石对轴承超精质量影响初探 .....	冯锦法	452



# 电解加工直纹型面叶片的误差分析及处理\*

朱永伟<sup>1,2</sup> 徐家文<sup>1</sup>

(1 扬州大学机械工程学院, 江苏扬州, 225009,  
2 南京航空航天大学机电学院, 江苏南京, 210016)

**摘要** 分析了整体叶轮直纹型面叶片展成式电解加工误差产生的主要因素, 并提出了减小这些加工误差的措施及展成式电解加工综合性误差处理方法, 通过试验及实际加工, 已可稳定加工出工序合格零件, 部分加工件已在航空发动机中装机使用。

**关键词** 叶片, 直纹型面, 电解加工, 误差分析, 误差处理

## 1 引言

整体结构叶轮(如图 1)的应用可使航空发动机推重比、工作效率、寿命及可靠性大大提高, 因此在各类新型发动机及大推力火箭发动机中得到愈来愈多的应用, 但由于其几何结构复杂、材料难切削, 其叶片型面的加工一直为制造业中的难点<sup>[1-3]</sup>。用多轴联动合成加工轨迹的展成式电解加工方式具有加工质量高、柔性好及生产效率高等优点, 能有效解决这类零件的加工难题, 是一项有应用前景的特种加工新技术<sup>[2]</sup>。

整体叶轮的叶片型面一般难以数学描述, 而通常以离散型值点列表方式表达, 叶片型面沿法向给出允差, 加工后要保证型面上各点与理论型面间距小于允差。

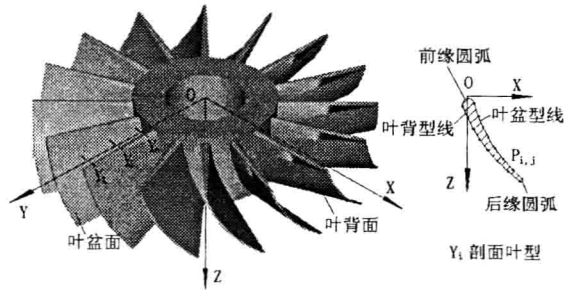


图 1 整体叶轮 Fig.1 integral impeller

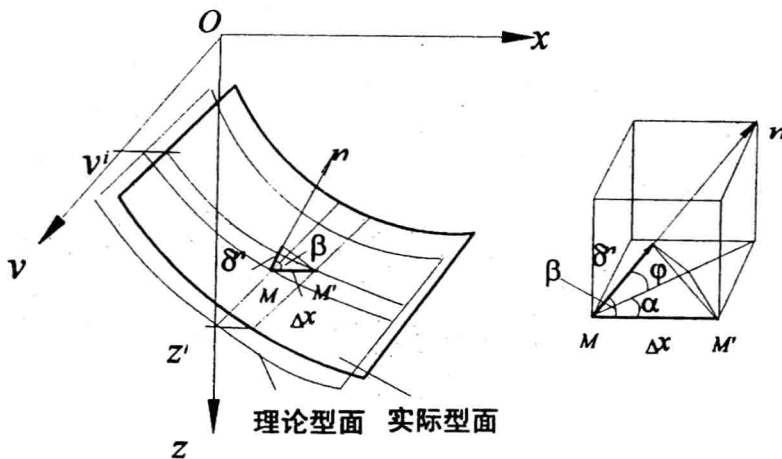


图 2 误差几何表示 Fig.2 error geometry description

\* 基金项目: 江苏省高校自然科学基金项目(02KJB460009)及 2002 江苏省博士后基金资助 E-mail: yzyzw@yzcn.net

叶片型面加工后用三坐标机测量时，在  $z$  截面内沿  $y$  方向采集  $x$  坐标值，如图 2，设实际型面上  $M$  点对应理论型面上  $M$  点的  $x$  坐标偏差为  $\Delta x$ ，则转化在型面法向  $\vec{n}$  的加工误差应满足条件：

$$\delta_n = \Delta x \cdot \cos \beta = \Delta x \cdot \cos \alpha \cdot \cos \varphi \leq \delta_e \quad (1)$$

式中  $\delta_e$  为型面法允差， $\beta$  为型面  $M$  点法向  $\vec{n}$  与  $x$  轴正向夹角， $\alpha$  为法向  $\vec{n}$  在  $xoy$  面内投影与  $x$  轴夹角， $\varphi$  为法向  $\vec{n}$  与  $xoy$  平面之间夹角， $\beta$ 、 $\alpha$ 、 $\varphi$  可由叶轮型面几何条件求解。

本文旨在分析叶片型面展成加工各环节误差，寻求减小误差并可满足加工精度要求的工艺措施。

## 2 数学处理误差

整体叶轮有相当部分可用直纹曲面拟合，用“直线刃”阴极加工。直纹叶片型面的数学处理首先要对离散数据点进行直线拟合，然后再进行 B 样条曲面拟合、插值加密及编程计算<sup>2-4</sup>。

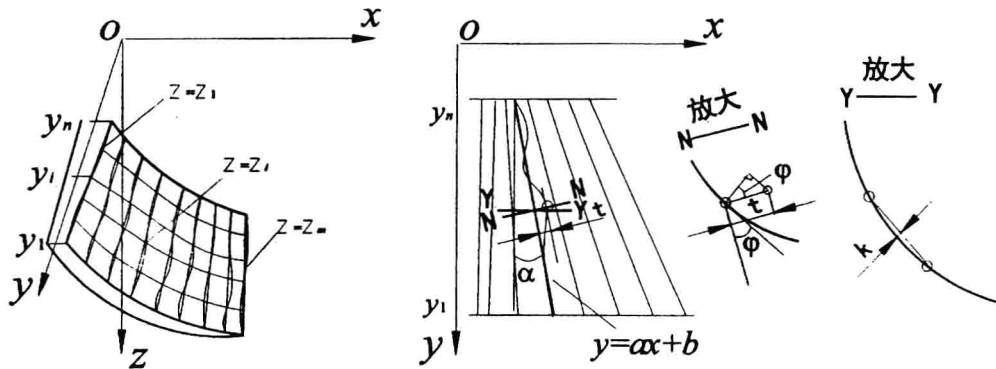


图 3 数学处理误差图解 Fig.3 diagram for mathematic disposing error

如图 3，型面某  $z$  截面有  $n$  个点，设对应这些点的拟合直线方程： $y = ax + b$ ，在每一个数据点  $(x_i, y_i, z_i)$  处，函数值  $y = f(x_i) = ax_i + b$  与原数据值  $y_i$  之间有偏差，即： $R_i = f(x_i) - y_i$ ， $i = 1, 2, \dots, n$ ，

$$\text{则 } \sum_{i=1}^n R_i^2 = \sum_{i=1}^n (f(x_i) - y_i)^2 = (ax_1 + b - y_1)^2 + (ax_2 + b - y_2)^2 + \dots + (ax_n + b - y_n)^2. \quad \text{令 } F(a, b) = \sum_{i=1}^n R_i^2,$$

要保证  $F(a, b)$  取最小值，要满足条件： $\frac{\partial F}{\partial a} = 0$ ， $\frac{\partial F}{\partial b} = 0$ ，从而可得：

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \end{array} \right. \quad (2)$$

则在  $z$  截面内, 点  $(x_i, y_i, z_i)$  的拟合误差:

$$t_i = \frac{|ax_i + b - y_i|}{\sqrt{1+a^2}}, \quad (3)$$

加工轨迹在两个控制点之间是以直线代替曲线, 这会造成加工误差  $k$ , 通过型面拟合加密可减小误差  $k$ , 可控制到  $k < 0.0001\text{mm}$ ; 至于直线拟合后续的 B 曲面拟合, 其特点可保证不产生新的处理误差。由于  $t, k$  分属于型面上不同点, 且  $t \gg k$ , 因此数学处理环节转化在型面法向的误差

$$\delta_D = (t_i \cdot \cos \varphi_i)_{\max}, \quad (4)$$

式中  $\varphi_i$  为在垂直拟合直线的平面内 (图示 N-N 剖面), 型线法向与  $x$  轴正向夹角。 $\delta_D$  应取所有  $z$  截面中的最大值, 是加工原理性系统误差, 不能消除, 如误差较大, 难以保证加工精度时, 须改变加工方式, 用曲线电极或者小球头电极加工<sup>[1, 2]</sup>, 以减小数学处理环节误差。

### 3 成形运动轨迹误差

展成轨迹误差由两部分合成, 一是机床各轴的运动误差及反向间隙, 另一个是各轴之间不同步误差, 实际加工用电解机床采用组合式五轴联动数控系统, 各轴由单独数控单元驱动, 依靠虚拟轴 (又称基准轴) 映射关系来实现各轴进给同步 (此技术获国家发明专利, 专利号: ZL96116810.2)。组合数控单元时, 以筛选晶振的方式, 保证各轴数控单元性能尽可能地一致, 经检定在虚轴计数 1000 范围内, 各轴之间最大不同步误差小于 4 个脉冲当量<sup>[2]</sup>。因此各轴进给运动误差的最大值为

$$\begin{pmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \\ \delta_t \\ \delta_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta_x & \Delta'_x & f_x \\ \Delta_y & \Delta'_y & f_y \\ \Delta_z & \Delta'_z & f_z \\ \Delta_t & \Delta'_t & f_t \\ \Delta_w & \Delta'_w & f_w \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \frac{4}{1000} \cdot n \cdot \theta \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中  $n$  是各虚轴同步计数值,  $\theta$  为实轴与虚轴计数比值,  $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, \Delta_t, \Delta_w$  为各轴运动误差,  $\Delta'_x, \Delta'_y, \Delta'_z, \Delta'_t, \Delta'_w$  为各轴的反向间隙,  $f_x, f_y, f_z, f_t, f_w$  为各轴的进给脉冲当量。

参考图 3, 型面上各点因多轴联动造成的轨迹误差在法向的最大值为:

$$\delta_i = \left( \delta_x \quad \delta_y \quad \delta_z \quad \frac{\pi}{180} \cdot \delta_t \quad \frac{\pi}{180} \cdot \delta_w \right) \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha \cdot \cos \varphi \\ \text{tg} \alpha \cdot \cos \varphi \\ \sin \varphi \\ L \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \\ R \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中  $R, L$  分别为型面上某点到轮心和阴极摆轴中心的长度,  $\alpha, \varphi$  意义上同。用上式对某型发动机导风轮的叶片型面进行成形运动误差计算, 已知机床参数:

各轴运动误差:  $\Delta_x = \Delta_y = \Delta_z = 0.005\text{mm}, \Delta_t = \Delta_w = 0.002^\circ$ ;

反向间隙:  $\Delta'_x = \Delta'_y = \Delta'_z = 0.01 \text{ mm}$ ,  $\Delta'_i = \Delta'_w = 0.003^\circ$ ;

脉冲当量:

$f_x = f_y = 0.001 \text{ 毫米/脉冲}$ ,  $f_z = 0.0005 \text{ 毫米/脉冲}$ ,  $f_i = 0.004 \text{ 度/脉冲}$ ,  $f_w = 0.00216 \text{ 度/脉冲}$ .

利用上述参数, 再结合型面几何特征编程对型面上各点的轨迹误差进行计算, 可得最大误差:

$\delta_M = (\delta_i)_{\max} \leq 0.082 \text{ mm}$ 。此项误差是各轴运动误差合成的最大值, 实际上各轴最大误差极少同时出现

在型面同一点上, 且“+”, “-”方向是不定的, 所以合成总误差应远小于 $\delta_M$ 。

减小成形轨迹误差的措施主要是消除机床反向间隙, 当某轴有换向运动时, 在程序中都进行反向间隙补偿; 编程尽可能采用较小的虚轴同步计数值, 即采用较小的实、虚轴计数比值 $\theta$ 。采取措施后, 在机床上利用标准样件检测多轴合成的轨迹误差, 在加工全程内 $\delta_M \leq 0.02 \text{ mm}$ , 比较中型叶轮叶片型面电解加工 $\pm 0.15 \text{ mm}$ 的精度要求(小型叶轮为 $\pm 0.08 \text{ mm}$ ), 已可满足。

#### 4 对刀误差

设阴极对刀时相对工件在 $x$ ,  $y$ ,  $z$ 方向上的偏移量为:  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ , 绕 $x$ ,  $y$ ,  $z$ 轴的偏转角为:  $\Delta A$ ,  $\Delta B$ ,  $\Delta C$ , 这些误差可简化为阴极上某点在 $xoy$ 平面内沿刃边法向的误差为 $\Delta_n$ 及沿 $z$ 方向的误差 $\Delta_z$ , 如图4, 其中:  $\Delta_n = \Delta x \cdot \cos \alpha + \Delta y \cdot \sin \alpha + r \cdot (1 - \cos \Delta B) + L \cdot \sin \Delta C \cdot \cos \alpha$ ,  $\Delta_z = \Delta z + L \cdot \sin \Delta A + r \cdot \sin \Delta B$ , 故因对刀误差造成型面的法向误差:

$$\delta_i = (\Delta_n \cdot \cos \varphi + \Delta_z \cdot \sin \varphi)_{\max} \quad (7)$$

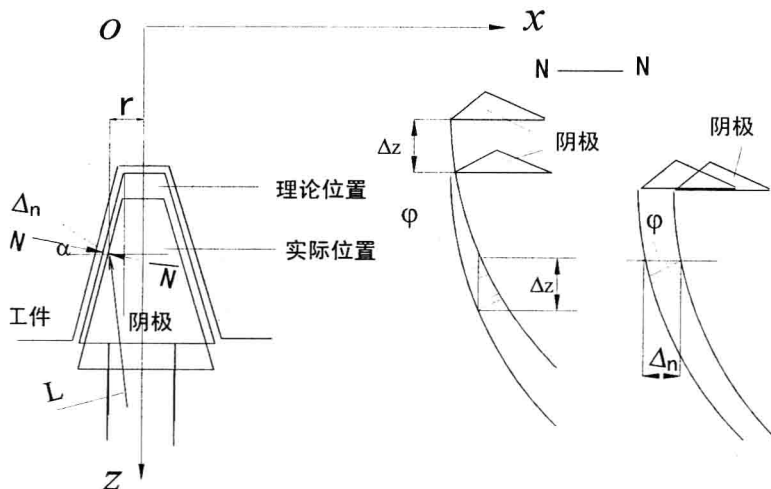


图4 对刀误差 Fig.4 cathode position error

对刀误差中:  $\Delta x$ ,  $\Delta C$ ,  $\Delta z$ ,  $\Delta A$ 对精度影响较显著,  $\Delta y$ ,  $\Delta B$ 影响较小。减小夹具制造误差,

合理设计、精确制造及校准对刀装置，仔细对刀可减小此项误差，直至略去。

### 5 加工间隙变动误差

展成电解加工中阴极相对工件的运动轨迹为空间曲线，进给速度及加工间隙均处于动态过渡过程中<sup>[5]</sup>。如图 5，运动轨迹计算及阴极设计所用的侧面间隙  $\Delta$  通常是依据底面平衡间隙  $\Delta_b$  及阴极圆角半径大小来确定，通常近似取  $\Delta = f\Delta_b$ ， $f$  为根据阴极圆角参数选取的常数。

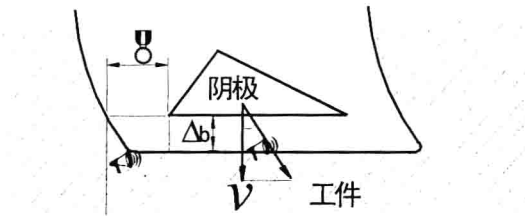


图 5 加工间隙误差 Fig.5 machining gap error

$$\text{因 } \Delta_b = \eta \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \frac{U_R}{v}, \text{ 则 } d\Delta_b = d(\eta\omega) \cdot \frac{\sigma \cdot U_R}{v} + d(\sigma) \cdot \frac{\eta \cdot \omega \cdot U_R}{v} + d(U_R) \cdot \frac{\eta \cdot \omega \cdot \sigma}{v} - d(v) \cdot \frac{\eta \cdot \omega \cdot U_R}{v^2},$$

式中： $U_R$ —欧姆压降， $\sigma$ —电导率， $\eta$ —电流效率， $\omega$ —体积电化学当量， $v$ —阴极沿 Z 向进给速度，由此可求得因加工间隙变动造成的型面法向误差  $\delta_\Delta$ ：

$$\delta_\Delta = (f \cdot d\Delta_b) \cdot \cos\varphi = f \cdot \Delta_b \cdot \left( \frac{d(\eta\omega)}{\eta\omega} + \frac{d\sigma}{\sigma} + \frac{dU_R}{U_R} - \frac{dv}{v} \right) \cdot \cos\varphi \quad (8)$$

由上式，减少因加工间隙变动造成的型面误差  $\delta_\Delta$ ，可以采取以下措施：

- 1) 稳定电解加工参数： $U_R$ ， $\sigma$ ， $\eta$ ，而  $\omega$  为常量。
- 2) 展成电解的速度变化是由型面扭曲特点决定的，如加工前先根据曲面特征及加工参数进行侧面加工间隙计算 5，再由型面及各处的侧面间隙推算展成轨迹，加工时保证预设参数的稳定，可补偿速度变化对加工间隙的影响。
- 3) 用小间隙加工：采用较小的  $U_R$ ， $\sigma$  及较大的进给速度  $v$ ，采用非线性低浓度复合电解液可减小间隙及其变动量，阻止杂散腐蚀作用，必要时采用脉冲电源。

### 6 运动轨迹的修正

各项加工误差的极值在型面上的分布一般是不重合的，方向也是不定的，因此不能用各项误差极值求和的方法分析总加工误差，而应该根据零件型面几何参数、机床已测定的参数及电解加工参数，通过编程计算分析加工型面上各点总加工误差：

$$\therefore \delta^i = \delta_D^i + \delta_M^i + \delta_i^i + \delta_\Delta^i$$

$$\therefore \delta_{\max} = (\delta^i)_{\max} = (\delta_D^i + \delta_M^i + \delta_i^i + \delta_\Delta^i)_{\max} \leq \delta_e \quad (9)$$

由于加工型面及展成轨迹复杂,电解加工还存在一定杂散腐蚀作用,虽采取措施减小了各环节误差,叶片型面加工后实测总误差仍较大,实用中很难通过理论设计一次加工达到精度要求。要进行精度控制并达到优化,最直接、有效的方法是对加工型面进行实时检测,将结果实时处理后反馈给进给自动控制系统,用调节加工参数及进给轨迹来对加工误差进行实时补偿。但电解加工间隙中电场、流场复杂多变,加工间隙的实时检测有很大的难度,这在目前还是一个待解决的难题<sup>[5]</sup>。

实用中采取严格保证各加工参数的稳定,根据加工后型面的实测结果对加工轨迹进行离线补偿处理,然后在相同电解参数条件下重新加工,减小误差的效果明显,此方法能可靠达到加工要求。

这种轨迹补偿处理分两种情况:

1). 在同一  $z = z_i$  截面内沿  $y$  向各点误差大小与方向基本一致,而不同  $z = z_i$  截面沿  $y$  向的误差值不同。这是由于曲面旋转、扭曲程度不大,在同一  $z$  截面内各点的展成加工速度变化微小,因而其间隙基本一致(典型情况是加工直槽、柱面,此时沿  $y$  向误差值相同),在不同深度方向的展成速度通常是变动的,且加工电压、电解液温度及压力等也可能随时间变化,造成不同  $z = z_i$  截面沿  $y$  向的误差值不同,如图6所示。在可满足加工精度条件下,展成运动轨迹可只在图示  $xoy$  平面内进行  $x$  轴单轴补偿处理,  $x$  轴各分段程序中的进给补偿量分别为:

$$\Delta x_1 = \Delta_1 \cdot \cos \alpha_1$$

$$\Delta x_2 = \Delta_2 \cdot \cos \alpha_2 - \Delta_1$$

.....

$$\Delta x_i = \Delta_i \cdot \cos \alpha_i - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta x_j, \quad i = 1 \sim m \quad \text{为沿 } z \text{ 轴截面} \quad (10)$$

式中  $\Delta_i$  为测量及数据处理后得到的  $z = z_i$  截面  $x$  坐标误差,用式(10)计算的结果,利用 NCECM<sup>4</sup> 计算机辅助编程软件对  $x$  轴程序进行修改,然后在相同条件下再次电解加工,可消除此类误差。

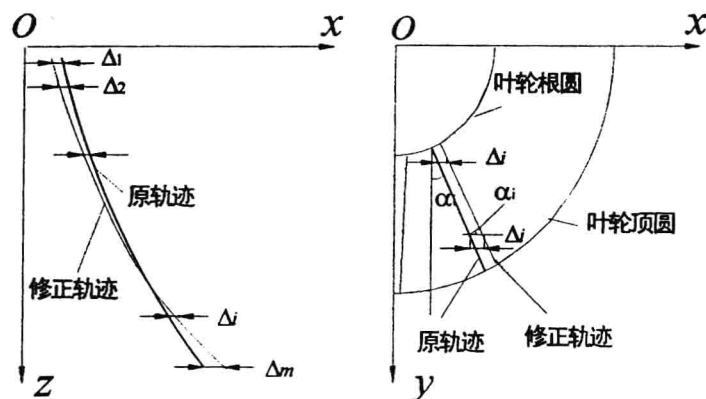


图6 单轴补偿

Fig.6 single axle compensation

2). 在同一  $z$  截面及不同  $z$  截面上沿  $y$  方向的  $x$  坐标偏差值都不一致,这除了第一种情况的原因外,还由于型面的旋转、扭曲严重,造成叶片与阴极沿  $y$  方向的相对速度变化显著,使同一截面内阴极上各



# 面向自顶向下设计的装配模型研究\*

张帆\*\* 张友良

(南京理工大学机械工程学院 CIMS 研究所, 南京, 210094)

**摘要** 装配模型是支持数字化产品设计和制造的重要基础。设计人员通过装配建模表达产品的功能形状和设计师的设计意图。本文针对自顶向下设计模式对装配模型的特殊要求, 提出一种面向自顶向下设计的装配模型, 支持产品设计全过程周期中的多种设计活动。给出了模型的维护方法, 为自顶向下的装配提供了安全的数据支持。该模型为产品装配的自顶向下设计提供了良好的模型基础。

**关键词** 装配模型, 自顶向下设计

## 1 引言

现代工业制造中, 装配工作平均约占整个产品深产工作量的 45%, 产品装配结构的好坏直接关系到产品的可装配性、装配生产效率和可维修性、可回收性, 装配建模已成为产品设计和制造的重要内容。通过装配建模, 设计人员建立起产品的结构框架, 表达产品的功能形状构成和设计师的设计意图。现有 CAD 软件的产品装配建模大多以零件几何建模为基础, 在零件详细几何模型的基础上搭建装配模型。装配建模包括如下步骤: 首先建立基于特征的零件的详细几何模型; 然后通过对零件几何模型的空间累积或者建立零件间的几何约束, 确定单个零件在最终装配结果中的空间位置, 从而构建出产品装配的几何模型。这种从零件几何模型得到装配模型的方法称为自底向上的装配建模方法。

然而实际的设计过程中, 设计人员通常采用的设计模式是自顶向下设计模式。它开始于概念设计, 经过详细设计、结构设计, 最终得到产品的装配结构。一开始零件的几何模型并不确定, 随着设计的深入, 产品结构的细化, 逐步建立起清晰的产品装配模型和零件几何模型。因此有必要建立相应的装配建模方法以适应自顶向下的设计模式。本文在分析自顶向下设计中的装配建模特点的基础上, 重点提出了解决装配模型描述方法和相应的建模操作处理方法。

## 2 自顶向下设计对装配模型的要求

不同于自底向上的设计, 自顶向下设计模式更加注重装配模型在设计过程中的信息组织和应用。产品的功能实现直接由构成产品的零件通过装配共同作用完成; 产品的装配组织结构直接影响着设计过程中各阶段设计活动的进行。因此自顶向下的装配对装配建模技术提出了更高的要求:

1) 支持产品的功能表达 在自顶向下的设计过程中, 由于产品功能直接决定了产品的装配结构实现。因此在装配建模过程中, 功能信息式装配组织结构的基础条件, 装配模型应提供和人类专家设计思维过程相一致的建模工具, 帮助设计者完成从产品的功能要求项产品结构的设计工作。

2) 支持产品的层次结构表达 自顶向下的产品装配建模过程是一种逐步求精的求解过程。随着产

\* 总装备部“十五”语言项目资助(41318.1.1.2)

\*\* 张帆(1975—), 男, 机械工程学院博士研究生。研究方向为数字化制造、虚拟制造和先进集成制造技术等。张友良(1941—), 男, 上海人, 教授、博士生导师, 主要研究制造系统体系结构、CIMS、并行工程、虚拟制造、网络化制造等。联系电话: 025-4315615。



品功能的分解和产品设计活动的进行, 产品零部件的组成结构逐步确定, 零部件几何形状、材料、装配关系等各种信息逐步具体化。系统应在产品装配模型中提供各种信息的抽象层次表达方法, 以支持设计的逐步推进, 方便设计活动的完成。

3) 支持产品生命周期中多种设计活动 面向并行工程的产品装配建模环境应能支持与装配有关的多种设计活动的集成与装配模型有关的设计活动。不同的设计活动需要模型中不同的信息支持, 系统应能在装配模型的基础上提取支持各种设计活动的信息, 并在设计过程中维护模型的信息安全。

### 3 面向自顶向下设计的装配模型

根据上述需求, 我们产品装配模型划分成三个层次, 即功能信息、结构信息、属性、约束信息。数学形式表达为:

$$A = (F, S, AT)$$

其中 F 表示功能信息, S 表示结构信息, AT 表示属性和约束信息。这样的层次结构时的模型能够表达功能分解、结构组成, 并支持整个自订下辖的设计过程。并通过模型层次间的映射关系保证在设计过程中, 功能信息、产品层次结构信息和零部件详细属性信息之间的相对独立性, 维护信息的一致性与安全。

#### 1) 功能信息

功能信息描述产品的功能需求和子功能信息, 功能信息包括: 功能需求、功能属性和功能参数等内容, 可以表达为:

$$F = (Fd, Fa, Fp)$$

其中 Fd 表示功能需求, Fa 表示功能属性, Fp 表示功能参数。

#### 2) 结构信息

产品零部件之间具有一种层次性的关系。装配体可以分解成若干子装配体或零件, 子装配体又可以进一步分解成若干子装配体或零件, 由此构成一种与产品功能分解相对应的层次性。结构信息就是用来描述产品零部件间的这种层次结构。在这种结构中产品表达为:

$$S = \{x \mid x \in SA \cup SP\}$$

其中 SA 表示构成产品装配体的子装配的集合, SP 表示构成产品装配体的零件的集合。

$$SA = \{x \mid x \in SA_1 \cup SP_1\}$$

其中  $SA_1$  表示构成子装配体的子装配的集合,  $SP_1$  表示构成子装配体的零件的集合。这样就构成了产品结构层的产品装配树层次结构。装配树层次结构不仅表达了零部件间的组成结构, 而且也反映了零部件间的一种装配顺序关系, 可以用作装配序列规划的约束条件。

#### 3) 属性信息

属性信息是零部件自身几何特征、材料特征和装配特征等信息集合。属性包含两部分: 一部分是只与某一零部件个体相关的特性属性, 这种信息为零部件自身特有, 如几何特征和材料特征等; 另一部分是与零部件装配相关的装配属性, 这类信息与零个或多个零部件相关; 而且这种装配属性的实现最终总是体现在某两个零件上, 并在构成某个装配或子装配的下一级零部件中被引用。因此属性信息可以表达为:

$$AT = \{x \mid x \in AT_p \cup AT_a\}$$

其中  $AT_p$  表示零部件特性属性的集合,  $AT_a$  表示零部件装配属性的集合。

$$AT_a = (s_1, s_2, p_1, p_2, C_{AT})$$

其中  $s_1, s_2 \in S$ , 表示构成某个装配或子装配是引用到该装配属性的两个零部件;  $p_1, p_2 \in SP$ , 表示在产品结构中最终实现该装配属性的两个零件;  $C_{AT}$  表示该装配属性的具体内容。

约束是一类特殊的属性信息, 他表达零件属性之间的所具有的相互关系, 如尺寸的取值范围, 零部