

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.05.008

# 叶片机器人砂带磨抛的轨迹规划研究<sup>\*</sup>

张海洋<sup>1</sup>, 杨文玉<sup>1\*</sup>, 张家军<sup>2</sup>, 陈巍<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 无锡透平叶片有限公司, 江苏 无锡 214174)

**摘要:** 为了提高叶片磨削的加工质量和效率, 将机器人和砂带磨削技术相结合, 并应用到叶片加工领域中, 介绍了该系统的特点和 workflow。比较了多种加工轨迹生成技术, 确定采用等弦高误差法和等残留高度法, 作为机器人磨削加工中步长和行距的计算方法。针对上述两种方法在叶片加工中存在的缺陷, 对其做出了相应的改进; 为了对改进后的算法进行评价, 进行了手工磨抛和机器人磨抛两种加工方式的对比试验。研究结果表明, 在粗糙度和表面一致性方面机器人加工明显优于手工加工, 试验验证了机器人加工的可靠性和算法的有效性。

**关键词:** 叶片; 机器人; 砂带磨削; 轨迹规划

中图分类号: TH161; TG586

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)05-0578-05

## Trajectory planning for robotic belt grinding of turbine blade

ZHANG Hai-yang<sup>1</sup>, YANG Wen-yu<sup>1</sup>, ZHANG Jia-jun<sup>2</sup>, CHEN Wei<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Wuxi Turbine Blade Co. Ltd., Wuxi 214174, China)

**Abstract:** In order to improve the quality and efficiency of blade grinding, the robot and belt grinding technologies were applied to blade machining, and the characteristics and working process of the system were introduced. Through the comparison of multi-axial machining trajectory generation technologies, equal chord deviation fitting method and equal scallop height method were adopted to plan the robot trajectory. Because of their shortcomings in blade grinding, these two methods were improved. In order to evaluate the improved methods and compare effects of manual and robotic processing, a test was carried out. The experimental results show that, the blade machined by robot has much better surface quality than that by hand. The relevant experiment validates the effectiveness of robotic machining and the improved methods.

**Key words:** turbine blade; robot; belt grinding; trajectory planning

## 0 引 言

叶片类复杂曲面零件作为汽轮机、航空发动机、水轮机能源转换装置的重大关键结构件, 对整机工作性能具有决定性的作用, 其几何精度和表面质量直接影响能源动力设备的工作效率。但这类零件恶劣的工作条件, 诸如应力和温度的频繁剧烈变化, 以及腐蚀和磨损等方面的问题对叶片材料及制造质量和效率提出了非常苛刻的要求。

当前, 叶片的磨削加工方式主要有手工磨削、专用

机床磨削和数控机床磨削 3 种。其中, 人工磨削效率低、劳动强度大、成品率低, 而且磨削质量的一致性难以得到保证。而专用机床通用性差, 只适合特定型号叶片的大批量生成; 数控机床则存在成本高、灵活性差等缺点。近年来, 随着机器人技术的发展和劳动力成本的上涨, 机器人在磨削加工中逐渐得到重视。与传统加工方式相比, 机器人系统不仅具有灵活性好、通用性强、易于拓展等优点, 而且其成本也远远低于专用机床和数控机床。

多轴加工轨迹生成方法主要包括: 等参数线

收稿日期: 2013-11-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)资助项目(2009CB724306)

作者简介: 张海洋(1987-), 男, 河南周口人, 主要从事机器人技术方面的研究。E-mail: zhyang\_101@163.com

通信联系人: 杨文玉, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: mewyang@mail.hust.edu.cn

法<sup>[1]</sup>、截平面法<sup>[2-3]</sup>、多面体法<sup>[4]</sup>、等残留高度法<sup>[5]</sup>、等距偏置法<sup>[6]</sup>等。Kuhlenkotter 等人<sup>[7]</sup>对接触轮和工件之间的局部弹性接触建立了有限元模型,把曲面的局部曲率作为几何边界条件,对工件的切深进行预测研究。Radzevich<sup>[8]</sup>提出了最短工具路径时间的概念,以积分形式给出了一种最优刀具路径生成的解法。石璟和张秋菊<sup>[9]</sup>考虑了3种不同形状的接触轮的曲率特征,提出以无干涉原则、有效空间原则和切宽最大原则来进行第六轴控制。黄智等<sup>[10]</sup>建立了基于砂带磨削原理的自由曲面六坐标联动磨削与抛光系统,对汽轮机叶片表面进行了六轴联动砂带磨削抛光试验验证。齐立哲等<sup>[11]</sup>根据作业精度的概念,推导了机器人砂带磨削过程位姿误差模型,用该方法校准的机器人系统能够满足复杂型面工件的砂带修型磨削要求。黄秀文等<sup>[12]</sup>提出了一种空间刀具半径补偿算法,采用该算法后数控机床加工的叶片质量得到了较大改善。

在机器人磨抛加工中,最重要的是要保证接触轮与工件曲面局部贴合,因此曲面曲率是磨抛路径生成的主要考虑因素之一。

为了获得较高的磨削精度,同时避免目标点密度大、效率低等问题,本研究借鉴多轴数控加工中的等弦高误差法和等残留高度法,根据型面的曲率特点对磨削轨迹进行规划。基于不同的叶片加工精度要求,可以设置不同的弦高误差值和残留高度值,从而灵活地兼顾加工精度和加工效率。

## 1 机器人砂带磨削系统及工作流程

机器人磨削系统示意图如图1所示。该系统由机器人、扫描仪、磨削机和计算机等部分组成。

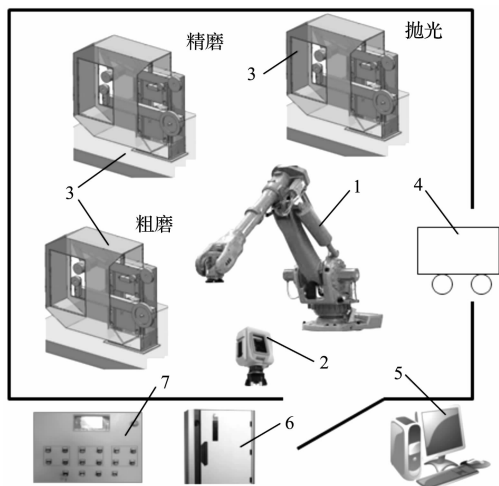


图1 机器人叶片磨抛系统示意图

1—机器人;2—激光扫描仪;3—砂带磨削机;4—送料小车;5—计算机;6—机器人控制柜;7—磨削机控制柜

针对某种型号的叶片,在加工前首先需要根据叶片的三维模型进行离线编程,得到磨削需要的轨迹。在加工时机器人首先从送料小车上夹取叶片,然后通过激光扫描仪得到装夹后叶片的实际点云。通过计算扫描得到的点云与理论模型点云之间的差异,即可以得到叶片的装夹误差,并对其进行补偿,得到叶片的实际加工轨迹信息。机器人夹取叶片利用更新过的轨迹信息,在3台砂带磨削机上依次进行粗磨、精磨和抛光。最后把加工好的叶片放回到送料小车上,再夹取下一片要磨削的叶片继续加工。

## 2 叶片加工轨迹生成

生成叶片型面加工轨迹的算法流程如图2所示。首先确定用于生成路径的曲线,一般选取叶片型面的边缘作为生成第一条路径的曲线。为了避免干涉,本研究在确定曲线位置后需要对曲线进行修剪,在曲线两端分别减去砂轮宽度一半的长度,作为生成目标点的有效范围。本研究取有效范围内的曲线起点作为该路径上的第一个目标点,然后采用等弦高误差法依次计算随后的目标点,直至生成的点超出有效范围。最后,舍弃超出有效范围的目标点,并把有效曲线范围的终点设为最后一个目标点,以避免在路径结尾处由于接触轮提前退出导致该部分加工不到的情况。然后根据当前路径上的目标点采用等残留高度法计算各点对应的行距值,并取其中的最小值确定下一条路径所在曲线的位置,如果该曲线在型面上,则继续生成轨迹;如果超出型面的范围,则结束计算。

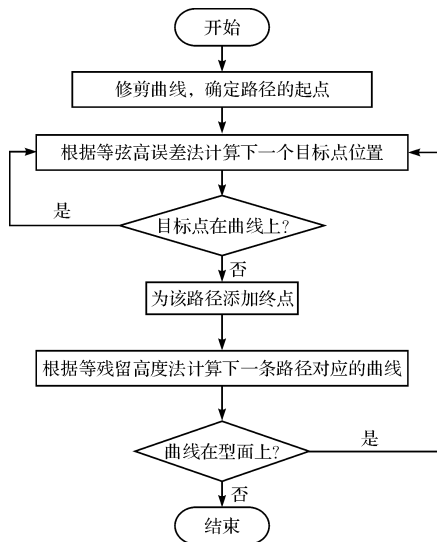


图2 轨迹生成算法流程图

### 2.1 步长的计算

在加工轨迹上取得目标点的过程实质上就是对加工轨迹的离散化过程,用一系列直线段逼近空间曲线。

这一过程将不可避免地产生逼近误差,因此为了保证叶片的加工精度,对目标点的离散精度控制尤为重要。加工步长对曲面加工的轮廓精度有很大影响<sup>[3]</sup>,步长太大则加工轮廓精度低,表面质量差;步长太小则严重影响加工效率。而等弦高误差步长法则很好地兼顾了这两个问题,它使相邻目标点连线的弦高误差为固定值,根据叶片表面的曲率变化得到不同的步长。从而可以大大减少目标点的数量,提高加工效率。

走刀步长计算如图 3 所示。

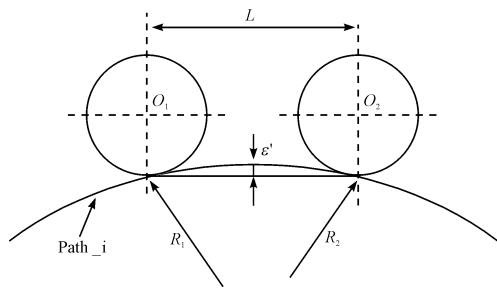


图 3 走刀步长计算

$L$ —加工步长; $\varepsilon$ —实际加工误差; $R_1, R_2$ —路径上两个目标点处沿进给方向的曲率半径

图 3 中, $R_1, R_2$  两点处的曲率半径理论上是不相等的,但是由于实际加工中步长较小,两者的差别不大,为了简化计算一般假设这两点的曲率半径相等,即取  $R = R_1 = R_2$ 。另外, $\varepsilon$  为允许的加工误差,依据几何关系及  $\varepsilon \leq \varepsilon'$  有:

$$\frac{1}{8R}L^2 \leq \varepsilon \quad (1)$$

即加工步长  $L$  的估算公式为:

$$L \leq \sqrt{8\varepsilon R} \quad (2)$$

### 2.2 行距的计算

加工行距与残留高度密切相关,行距过大则表面残留高度增大,导致表面产生波纹、加工精度降低;行距过小则将增加磨削次数,导致效率下降。为兼顾曲面加工效率和加工精度,需对磨削行距做出合理的规划。等残留高度法是根据曲面的局部曲率特征,动态地生成每一条加工轨迹,所以其能够使得规划路径的残留高度取得最大允许值,从而降低磨削次数提高加工效率。在残留高度和磨削接触轮一定的情况下,行距由曲面的局部形状决定。

凸面和凹面残留高度示意图如图 4 所示,根据图示的几何关系,对凸面可以得到如下关系式:

$$\left[ (R+r) \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - (R+h) \right]^2 + \left[ (R+r) \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]^2 = r^2 \quad (3)$$

化简得:

$$L \approx 2 \sqrt{2rh} \sqrt{\frac{R}{R+r}} \quad (4)$$

同理,可以得到凹面的行距计算公式为:

$$L \approx 2 \sqrt{2rh} \sqrt{\frac{R}{R-r}} \quad (5)$$

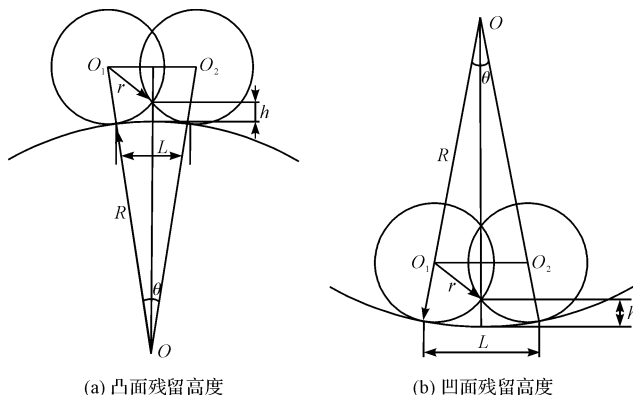


图 4 凸面和凹面残留高度示意图

$R$ —叶片两相邻目标点之间的有效曲率半径; $\theta$ —两相邻目标点之间的夹角; $r$ —接触轮半径; $h$ —残留高度; $L$ —磨削行距

### 2.3 算法的优化

在上述步长和行距的计算中,前提是假设相邻两目标点处的曲率基本相同,用当前点的曲率代替两点之间的整段弧长的曲率,根据当前点的曲率计算步长和行距。但是如果两点的曲率相差比较大,尤其是当前点的曲率明显小于下一点的曲率时,很容易会出现生成的轨迹过疏,而不能满足加工要求的情况。按照上述步长计算方法得到的加工轨迹如图 5(a)所示。可以发现在某些区域会出现目标点不够密集、步长过大的情况,这将会明显降低叶片表面的加工质量,所以需要对该算法进行优化。

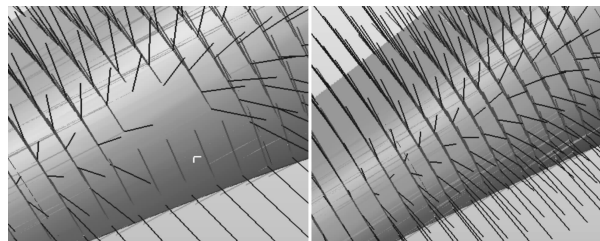


图 5 算法优化前和算法优化后

之所以出现上述问题,是因为当前目标点处的曲率明显小于整段弧长的曲率,因此不能够再用当前点的曲率代替整段弧长的曲率。否则由式(2)计算得到的步长将会过大,导致弦高误差超出允许值。对算法的优化是:首先用当前点  $P_i$  的曲率值  $\rho_i$  计算得到点  $P_{i+1}$ ,同时计算该点处的曲率  $\rho_{i+1}$ ;然后比较两个曲率值的大小,取其中的较大值作为计算用值。则式(2)中  $R$  的取值为:

$$R = \begin{cases} 1/\rho_i, \rho_i \geq \rho_{i+1} \\ 1/\rho_{i+1}, \rho_i < \rho_{i+1} \end{cases} \quad (6)$$

即当  $\rho_i \geq \rho_{i+1}$  时,下一个目标点  $P_{i+1}$  与  $P'_{i+1}$  是同一个点;当  $\rho_i < \rho_{i+1}$  时,需要根据曲率  $\rho_{i+1}$  重新计算下一目标点  $P_{i+1}$  的位置。根据优化后的算法计算得到的同一区域的轨迹情况如图 5(b) 所示。从图 5(b) 中可以发现轨迹点明显加密。在行距的算法中同样存在由于两个目标点处的曲率相差较大,导致行距计算结果不能满足要求的情况,因此需要对行距的算法作相同的改进。

### 3 实验验证

为了验证该算法的有效性,本研究利用改进后的算法对叶片进行轨迹规划,并进行加工实验,加工后的效果对比如图 6 所示。

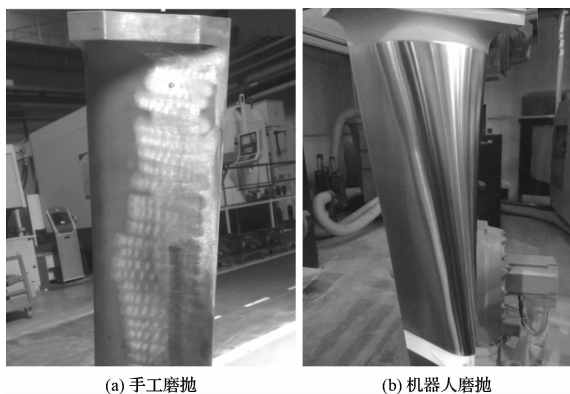


图6 手工磨抛和机器人磨抛

该试验中采用了 ABB 的机器人,型号为 IRB6650S-125/3.5,其末端负载能力为 125 kg,工作范围为 3.5 m,重复定位精度为 0.11 mm。试验中粗磨和精磨使用的是陶瓷砂带,磨粒目数分别是 120 目和 240 目,抛光带采用尼龙带,两接触轮的线速度分别为 5.6 m/s 和 18.3 m/s。

粗糙度测量位置示意图如图 7 所示。

本研究分别测量手工磨抛和机器人磨抛后叶片在图 7 所示位置处的表面粗糙度,其结果如表 1、表 2 所示。

两种加工方式测得的 16 组粗糙度 ( $Ra$ ) 的平均值和标准差分别为 0.593  $\mu\text{m}$  和 0.132  $\mu\text{m}$ 、0.275  $\mu\text{m}$  和 0.036  $\mu\text{m}$ ,数据表明,机器人磨抛在光洁度和一致性方面都明显好于手工磨抛。而且,比较  $U$ 、 $V$  两个不同方向的测量结果可以发现,机器人磨抛在两个方向的粗糙度值和标准差也都很小,说明加工效果很好。因此,机器人磨抛不仅在同一条路径上具有良好的表面一致性,

而且在不同路径之间一致性仍然很好。试验结果验证了机器人磨抛的可靠性以及算法的有效性。

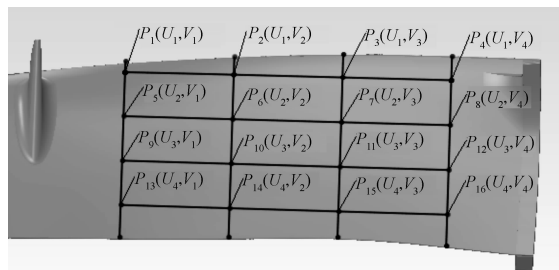


图7 粗糙度测量位置示意图

表1 手工磨抛粗糙度测量结果 ( $Ra/\mu\text{m}$ )

	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	平均值	标准差
$U_1$	0.762	0.722	0.382	0.495	0.590	0.182
$U_2$	0.423	0.413	0.602	0.481	0.480	0.087
$U_3$	0.643	0.508	0.640	0.627	0.605	0.065
$U_4$	0.647	0.603	0.687	0.846	0.696	0.106
平均值	0.619	0.562	0.578	0.612	0.593	
标准差	0.142	0.132	0.135	0.169		0.132

表2 机器人磨抛粗糙度测量结果 ( $Ra/\mu\text{m}$ )

	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	平均值	标准差
$U_1$	0.237	0.247	0.314	0.274	0.268	0.034
$U_2$	0.272	0.271	0.330	0.213	0.272	0.048
$U_3$	0.274	0.290	0.291	0.263	0.280	0.013
$U_4$	0.270	0.229	0.267	0.350	0.279	0.051
平均值	0.263	0.259	0.301	0.275	0.275	
标准差	0.018	0.027	0.027	0.057		0.036

### 4 结束语

针对叶片型面的特点,本研究对等弦高误差法和等残留高度法作出了改进,并分别作为加工轨迹的步长和行距的计算方法,规划了机器人的磨抛轨迹并对叶片进行加工试验。对机器人磨抛和手工磨抛的叶片表面质量分别进行了测量,其结果显示叶片表面粗糙度  $Ra$  的平均值从手工加工的 0.593  $\mu\text{m}$  下降到了机器人的 0.275  $\mu\text{m}$ ;而且测量数据的标准差也从 0.132  $\mu\text{m}$  降低到了 0.036  $\mu\text{m}$ 。

试验结果表明,与手工磨抛相比机器人磨抛的叶片表面粗糙度值更小,质量的一致性更好。同时,机器人加工后的叶片在  $U$ 、 $V$  两个方向上的  $Ra$  值都能够保持很小的平均值和标准差,说明机器人加工不仅能够同一条加工路径上保持很好的加工质量,而且在不同路径之间同样能够保持良好的加工效果。

(下转第 586 页)

本文引用格式:

张海洋,杨文玉,张家军,等. 叶片机器人砂带磨抛的轨迹规划研究[J]. 机电工程,2014,31(5):578-581,586.

ZHANG Hai-yang, YANG Wen-yu, ZHANG Jia-jun, et al. Trajectory planning for robotic belt grinding of turbine blade[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(5):578-581,586.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

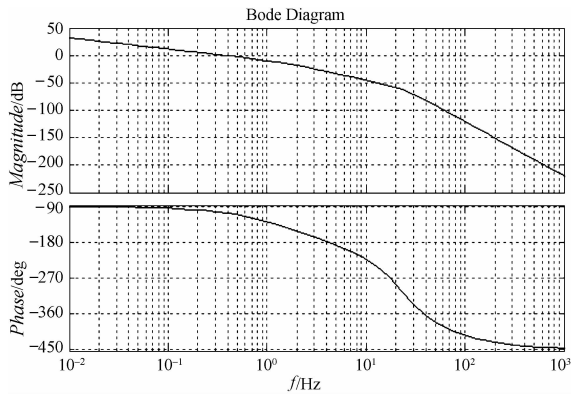


图 5 校正后系统的开环 Bode 图

仿真结果表明,所设计的系统能较好满足设计要求。

通过对上述系统采用降阶近似方法进行分析和设计的过程可知,对于类似高阶位置伺服系统,为了简化其控制系统设计,可以分析系统零、极点分布,对于在其时间响应中暂次要作用的非主导极点进行简化,从而得到了近似低阶系统,并在此基础上进行了控制系统的设计。上述方法为同类型控制系统的设计提供了有益参考。

#### 参考文献 (References) :

[1] 杜 鑫. 基于 LMI 技术的线性系统模型降阶与静态输出

[编辑:张 翔]

#### 本文引用格式:

肖国林,邓智勇,唐国元,等. 大型回转装置电液位置伺服系统的降阶设计方法[J]. 机电工程,2014,31(5):582-586.

XIAO Guo-lin, DENG Zhi-yong, TANG Guo-yuan, et al. Reduced order design method for electro hydraulic position servo system of a rotational equipments of large scale[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(5):582-586.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn

(上接第 581 页)

#### 参考文献 (References) :

[1] LONEY G, OZSOY T. NC Machining of Free Form Surfaces [J]. **Computer-Aided Design**, 1987, 19(2):85-90.

[2] DING S, MANNAN M, POO A, et al. Adaptive iso-planar tool path generation for machining of free-form surfaces[J]. **Computer-Aided Design**, 2003, 35(2):141-153.

[3] PARK H, KIM K, LEE S C. A method for approximate NURBS curve compatibility based on multiple curve refitting [J]. **Computer-Aided Design**, 2000, 32(4):237-252.

[4] MORISHIGE K, TAKEUCHI Y, KASE K. Tool path generation using C-space for 5-axis control machining[J]. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, 1999, 121(1):144-149.

[5] SURESH K, YANG D C H. Constant scallop-height machining of free-form surfaces [J]. **ASME Journal of Engineering for Industry**, 1994, 116(2):253-259.

[6] PERSSON H. NC machining of arbitrary shaped pockets [J]. **Computer-Aided Design**, 1978, 10(3):169-174.

反馈控制器设计[D]. 沈阳:东北大学信息科学与工程学院,2009.

[2] 王 佩,刘永强. 无刷双馈风力发电机模型降阶研究:第 I 部分—无刷双馈风力发电机多时间尺度模型[J]. **控制理论与应用**, 2008, 25(1):135-138.

[3] TAN S, HE L. **Advanced Model Order Reduction Techniques in VLSI Design** [M]. Cambridge University Press, 2007.

[4] FREITAS F D, ROMMES J, MARTINS N. Gramian-based reduction method applied to large sparse power system descriptor models [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2008, 23(3):1258-1270.

[5] 王 欣,史忠科. 模型降阶  $H_{\infty}$  方法在阵风干扰着陆控制中的应用[J]. **飞行力学**, 2000, 12(4):35-37.

[6] 黄樟灿,陈思多. 非最小相位系统传递函数的演化模型降阶[J]. **系统工程与电子技术**, 2000, 22(12):60-62.

[7] 高 翔,朱 芸,梁 栋. 电液伺服系统的建模与仿真研究[J]. **海军工程学院学报**, 1999(4):87-90.

[8] 王占林. **近代电气液压伺服控制** [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.

[9] 易孟林,曹树平,刘银水. **电液控制技术** [M]. 武汉:华中科技大学出版社,2010.

[10] 杨叔子,杨克冲. **机械工程控制基础** [M]. 武汉:华中科技大学出版社,2005.

[编辑:张 翔]

[7] REN X, KUHLKOTTER B. Realtime simulation and visualization of robotic belt grinding processes [J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2008(35):1090-1099.

[8] RADZEVICH S P. A closed form solution to the problem of optimal toolpath generation for sculptured surface machining on multi-axis NC machine [J]. **Mathematical and Computer Modelling**, 2006, 43(34):222-243.

[9] 石 璟,张秋菊. 六轴联动叶片砂带抛磨中接触轮姿态的确定[J]. **机械科学与技术**, 2010, 29(2):196-200.

[10] 黄 智,黄 云,张明德. 自由曲面六轴联动砂带磨削机床试验[J]. **重庆大学学报**, 2009, 31(6):598-602.

[11] 齐立哲,甘中学,负 超,等. 机器人砂带磨削系统作业精度分析与误差补偿[J]. **机器人**, 2010, 32(6):787-792.

[12] 黄秀文,高伟强,章 晶,等. 五轴数控空间刀具半径补偿的实现[J]. **机电工程技术**, 2012, 41(10):108-112.

[13] 姚博世,谭晓庆,贺文辉. 砂轮离心力对磨削精度的影响 [J]. **机电技术**, 2011(5):36-38.

[编辑:张 翔]