

文章编号: 1673-9469 (2019) 03-0095-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.03.018

基于 S 试件的 AC 双转台五轴数控机床加工 精度检测联合仿真

赫巍巍^{1, 2}, 关立文³, 李大奇¹

(1. 东北石油大学 机械科学与工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 吉林大学 机械与航空航天工程学院,
吉林 长春 130022; 3. 清华大学 机械工程系, 北京 100084)

摘要: 为了深入研究高档数控机床的加工精度检测机理, 利用 Adams 和 Matlab/Simulink 软件平台对 AC 双转台五轴联动数控机床加工 S 试件的运动过程进行联合仿真。首先搭建了机床的机械系统和控制系统模型, 然后将整机机械模型的 6 个输入变量和 12 个输出变量通过 Adams/Control 模块分别与 Simulink 建立的控制模型进行对接, 完成系统输入、输出的设置, 从而实现整机机电耦合的联合仿真。仿真结果表明五轴机床在加工 S 试件过程中各个轴的运动都呈非线性变化, 与工程实际经验相符。

关键词: S 试件; Adams; AC 双转台五轴联动数控机床; Simulink; 机电耦合

中图分类号: TH61

文献标识码: A

Co-simulation for Machining Accuracy Detection of Five-axis CNC Machine with AC Dual Rotary Table Based on the S-shaped Test Piece

HE Weiwei^{1, 2}, GUAN Liwen³, LI Daqi¹

(1.School of Mechanical Sci.and Eng., Northeast Petroleum Univ., Heilongjiang Daqing 163318, China;
2.School of Mechanical and Aerospace Eng., Jilin Univ., Jilin Changchun 130022, China;
3.Dept.of Mechanical Eng., Tsinghua Univ., Beijing 100084, China ;)

Abstract: In order to deeply study the mechanism of machining accuracy detection for high-grade CNC machine tools, in this paper, Adams and Matlab/Simulink software was used to simulate the movement of S-shaped test piece produced by five-axis CNC machine with AC dual rotary table. Firstly, the mechanical system and control system model of the machine tool were built. Then the 6 input variables and 12 output variables of the mechanical model were docked with the control model established by Simulink through Adams/Control module respectively, and the settings of input and output in the system were completed, and the co-simulation of electromechanical coupling was realized. The simulation results show that the motion of each axis for the five-axis machine tool presents a non-linear change in the machining S-shaped test piece process, which is consistent with the actual engineering experience.

Key words: S-shaped test piece; Adams; five-axis CNC machine with AC dual rotary table; Simulink; electromechanical coupling

随着智能制造业的不断发展, 五轴数控机床被广泛地应用在汽车与航空航天等具有复杂零部件的加工领域^[1]。所以, 高档数控机床的加工精度检测

与提升成为众多学者研究的课题。常用的高档数控机床精度检测方法分为直接法和间接法^[2]。直接法是使用专业仪器直接对机床本身进行精度测量, 比

收稿日期: 2019-04-03

基金项目: 东北石油大学引导性创新基金资助项目 (2017YDL-03); 国家科技重大专项 (2014ZX04014-031)

作者简介: 赫巍巍 (1988-), 女, 黑龙江大庆人, 博士生, 讲师, 从事先进装备制造及其控制方面的研究。

如球杆仪^[3]、激光跟踪仪^[4]、激光干涉仪^[5]等,该方法适用于机床的静态精度检测或低速运行中的部分动态精度检测。间接法是使用机床直接加工标准检测试件的方法,通过检测加工后的试件表面精度来反映机床的加工精度,该方法适用于机床高速加工中对机床动态加工精度的检测,相对于直接法其实用性更强、检测效果更好。常用的加工检测试件有德国 NCG 试件^[6]、西班牙试件^[7]、四角锥台试件^[8]、NAS979 试件^[9]和 S 试件^[10]。前两种试件结构复杂、建模过程繁琐,因此在实际检测中应用较少。而在加工实验中,通过加工四角锥台试件和 NAS979 试件合格的机床在加工 S 试件的时候却出现试件表面质量超差的现象,工程上证明 S 试件检测高档数控机床加工精度的能力要明显优于其他试件。

为了从理论上揭示 S 试件检测机床加工精度强于其他传统试件的机理,本文利用 Adams 强大的机械系统动态仿真能力并联合 Matlab/Simulink 可视化、易操作的功能特点,建立了 AC 双转台五轴联动数控机床整机的机电耦合模型,并对 S 试件进行了加工仿真实验,该研究对于推动高档数控机床综合性评价领域的发展有重要意义。

1 S 试件简介

S 试件是成都飞机工业集团有限公司依据实际工程经验提出的一种用于五轴联动数控机床综合性检测的标准检测试件^[11]。该试件与传统标准检测试件相比,其检测机床动态误差的能力较强^[12]。S 试件主要由两个 S 曲面构成,即图 1 中的非可展直纹面 A 和非可展直纹面 B,而 S 曲面又分别由两条准均匀有理 B 样条曲线构造而成。如图 2 所示,对于非可展直纹面而言,上下边界曲线 $C_1(u)$ 、 $C_2(u)$ 的主要法向量 $N_1(u_0)$ 、 $N_2(u_0)$ 并不重合,因此产生

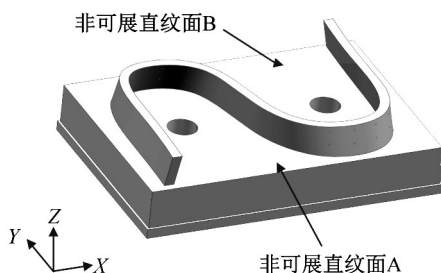


图 1 S 检测试件

Fig.1 The S-shaped test piece

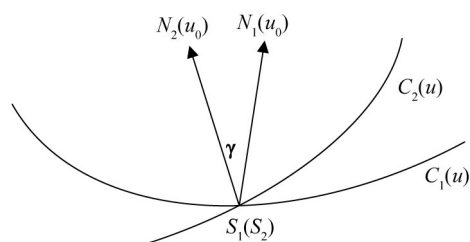


图 2 扭曲角示意图

Fig.2 Schematic of the twist angle

了扭曲角 γ 。S 试件的上下两条边界曲线曲率大小和方向也是其区别于其他检测试件的主要特征,设 $x=\alpha(u)$, $y=\beta(u)$, 则曲率 K 为:

$$K = \frac{|\alpha'(u)\beta''(u) - \alpha''(u)\beta'(u)|}{(\alpha'^2(u) + \beta'^2(u))^{3/2}} \quad (1)$$

式中 $\alpha(u)$ 和 $\beta(u)$ 分别表示 S 试件直纹面的上下准线任意点在 x 和 y 方向上的三次 B 样条曲线。由公式 (1) 可知, S 试件的曲率是不均匀变化的,这会导致在机床加工过程中切削力的不均匀变化,对五轴数控机床的动态加工性能提出了更高的要求。

2 AC 双转台五轴联动数控机床机电耦合仿真模型

2.1 机械系统模型

由于在 Adams 软件中进行 AC 双转台五轴联动数控机床的三维模型建立比较复杂费时,所以本文使用 Solidworks 软件建立机床整机各零部件的几何模型,装配好后再将建立的三维模型导入 Adams 软件中来完成整机的机械系统仿真建模。

AC 双转台五轴联动数控机床的机械模型主要由七个部分组成,即床身、X 轴、Y 轴、Z 轴、A 轴、C 轴、主轴,其中, X、Y、Z 为平动轴, A、C 为转动轴。根据机床零部件的实际尺寸,用 Solidworks 建立的机床整机三维简化模型如图 3 所示。将该模型导入 Adams 中添加材料属性、位置、约束,创建驱动并继续添加摩擦、阻尼、间隙、干涉等,然后定义输入输出变量,其结果如图 4 所示。

2.2 控制系统模型

简单的控制模型可以通过 Adams 自带的功能模块进行建立,但是建立五轴机床这种由复杂零部件组成的机构控制模型比较难以操作,所以本文借助 Matlab/Simulink 来实现机床控制系统的建模,然后将控制系统的输出作为 Adams 的输入量进行整机的

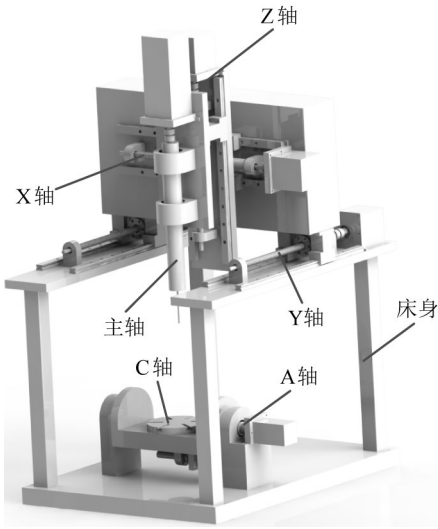


图3 AC 双转台五轴联动数控机床 Solidworks 模型
Fig.3 The model of five-axis CNC machine with AC

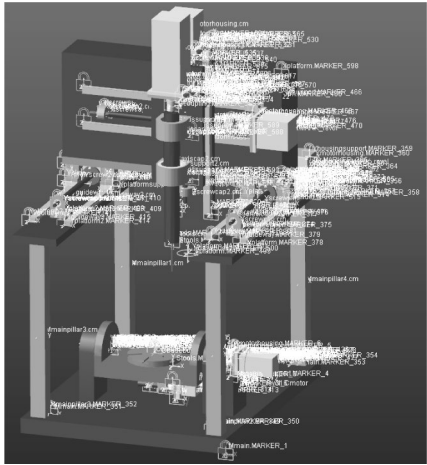


图4 Adams 中搭建的整机模型
Fig.4 The whole machine model built in Adams dual rotary table
联合仿真。

机床使用的电机多为永磁同步交流电机 (PMSM)^[13], 然而 PMSM 的建模存在一个解耦的过程, 并且控制参数的整定较为不便。考虑到直流电机与交流电机的基本控制结构都是 PID 控制, 加上在 PMSM 控制参数调节的时候就提出过参考二阶系统的调节方式, 而直流电机在不考虑控制的情况下,

就是一个典型的二阶系统。因此将交流电机的电流环合理地等效为直流电机的电流环, 其物理模型如图 5 所示。模型图中的符号含义如表 1 所示。
根据基尔霍夫定律和电磁感应定律可得:

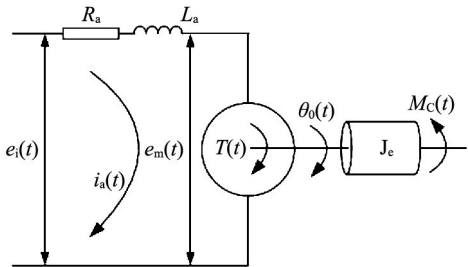


图 5 电机模型
Fig.5 The model of motor

$$e_i(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + K_e \frac{d\theta_0(t)}{dt} \quad (2)$$

根据牛顿第二定律建立力矩平衡方程可得:

$$T(t) - M_c(t) - D_m \frac{d\theta_0(t)}{dt} J_e \frac{d^2\theta_0(t)}{dt^2} \quad (3)$$

经过拉氏变换, 加入电流环、速度环和位置环可以建立电动机的控制模型, 如图 6 所示。电机控制模型对应有两个输入, 即输入电压和负载力矩, 输出为电机转角。

电机的 Simulink 模型如图 7 所示。

表 1 电机模型图中的符号含义
Tab.1 Meaning of symbols in model of motor

参数符号	物理意义
$e_i(t)$	电机电枢的输入电压
L_a	电枢电感
R_a	电枢电阻
$e_m(t)$	电机旋转时产生的反电动势
$i_a(t)$	流过绕组的电流
$T(t)$	电机的输出转矩
$\theta_0(t)$	电机的输出转角
J_e	电机轴的转动惯量
$M_c(t)$	负载转矩

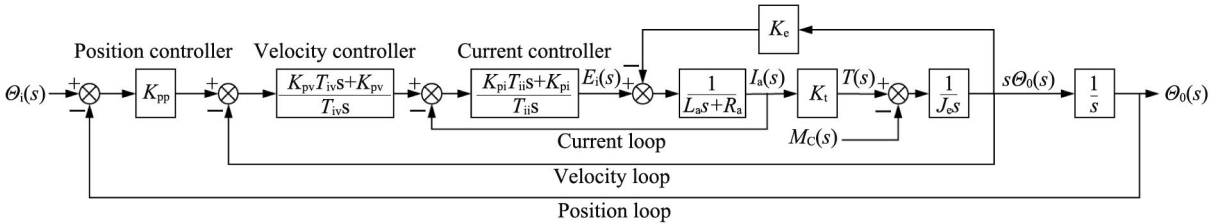


图 6 电机的控制模型
Fig.6 Control model of motor

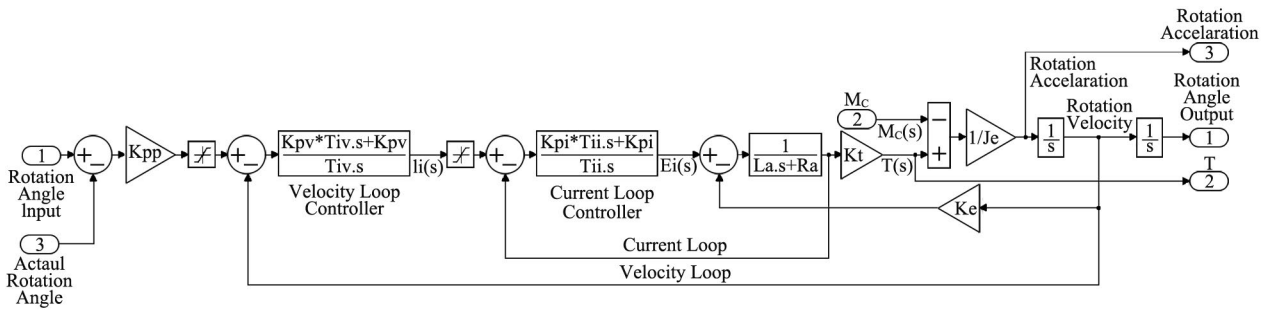


图7 电机的 Simulink 模型

Fig.7 Simulink model of motor

2.3 机电耦合仿真模型

整机机电耦合仿真模型的建立流程如图8所示。将 Adams 建立的整机机械模型的6个输入变量和12个输出变量通过 Adams/Control 模块分别与 Simulink 建立的控制模型进行对接,完成系统输入、输出的设置来实现整机机电耦合的联合仿真。最终的联合仿真模型如图9所示。

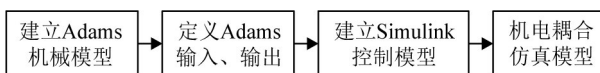


图8 机电耦合仿真模型建立流程

Fig.8 Establishment flow of electromechanical coupling simulation model

3 S 试件加工仿真分析

在仿真分析前,需要定义控制模型的输入量,通过 Simulink 建立的控制模型对 Adams 机械模型进行控制,并实时将 Adams 模型的反馈量反馈到 Simulink 模型中,进行实时地交互仿真。机电耦合模型中的输入均为刀具刀尖点的位移,以本文研究的 S 试件为例,可以通过 S 试件的加工 G 代码来获取。使用建立的机电耦合仿真模型对 S 试件进行加工仿真实验,各个轴的仿真结果如图10所示。结果显示, X 轴随着加工仿真时间的增长其位移从 0 增加到了 258 mm; Y 轴在加工仿真过程中依此在 200 mm 和 48 mm 处达到最大位移和最小位移值;

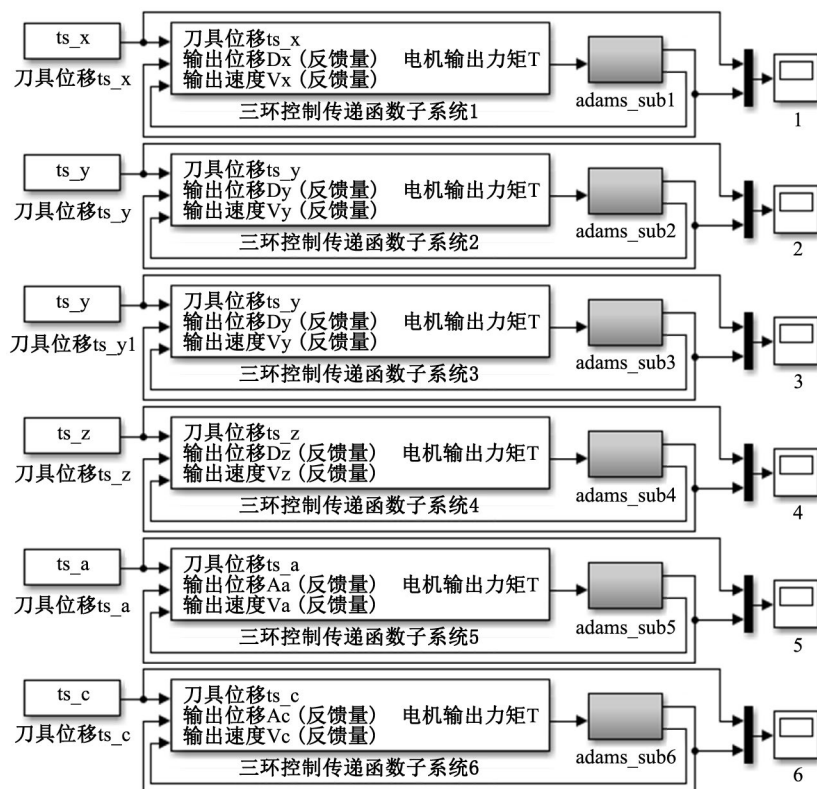


图9 机电耦合仿真模型

Fig.9 Simulink model of electromechanical coupling

Z轴在加工仿真中位移波动较小,基本在0~2 mm间轻微波动,并且在790~810 s中轴位移为0; A轴分别在200、580、690、1 006、1 140 s处进行了转动轴的换向; C轴分别在600 s和998 s处发生了剧烈的换向。上述的仿真数据表明,在五轴联动加工S试件的过程中, X和Y轴的行程变化较大,而Z轴的行程范围较小; A轴和C轴出现了多次换向导致其运动发生了剧烈的变化,而每个轴的运动都呈非线性变化,因此证明了并非所有轴在加工过程中都具有恒定的速度。此外每个轴都会多次的反转方向,这将会导致更大的跟踪误差产生,从而给机床的动态误差带来影响。这一仿真结果与工程实际经验中五轴机床在加工S试件时所反映出的加工状态相吻合^[14-15],验证了该仿真模型的准确性。

4 结论

通过Adams和Matlab/Simulink软件搭建了AC双转台五轴联动数控机床的机电耦合模型,仿真结果与工程实验中的结果一致,验证了模型的有效性。该联合仿真模型可以用于预测机床各个轴在加工中的运动状态,从而为高档数控机床的加工精度检测机理研究提供理论依据,对于被加工零件表面质量的提升有重要意义。

参考文献:

- [1]JHA B K, KUMAR A. Analysis of geometric errors associated with five-axis machining centre in improving the quality of cam profile[J]. International Journal of

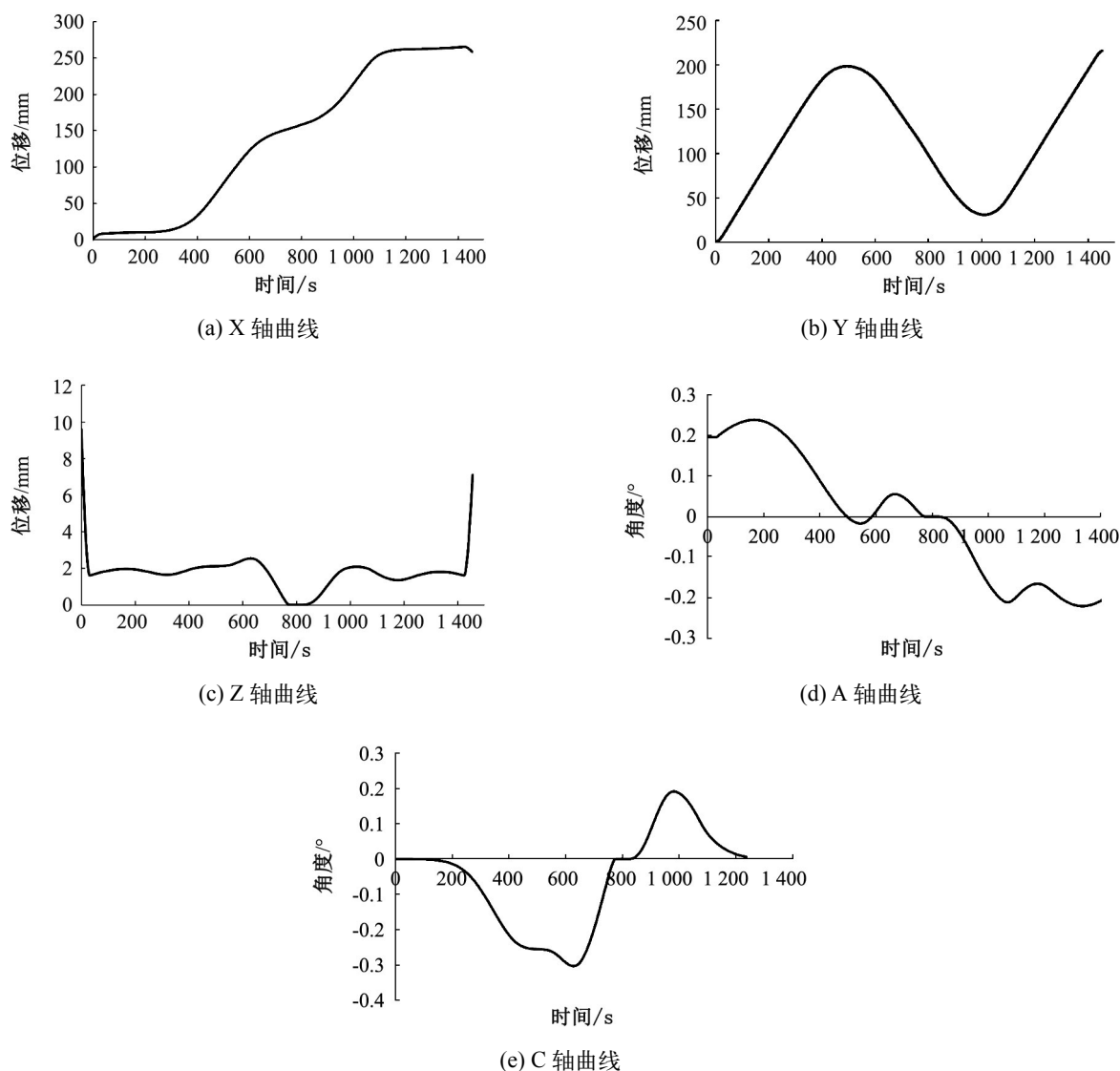


图10 S试件加工仿真结果

Fig.10 Simulation results of S-shaped test piece machining

- Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(6): 629-636.
- [2] GUAN L, MO J, FU M, et al. An improved positioning method for flank milling of S-shaped test piece[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(3): 1-16.
- [3] 刘志松, 王永青, 刘 阔. 基于球杆仪的立式加工中心圆度的测试与分析 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018, 531(5): 104-107.
- [4] IBARAKI S, SATO G, TAKEUCHI K. 'Open-loop' tracking interferometer for machine tool volumetric error measurement—Two-dimensional case[J]. Precision Engineering, 2014, 38(3): 666-672.
- [5] PAN F Y, LI M, YIN J. Error Identification for 3-Axis Machine Tool Based on Laser Interferometer[J]. Advanced Materials Research, 2012, 490-495: 309-314.
- [6] NC-Gesellschaft e.V. NCG 2007 nc_mik-rozerpanen[S].
- [7] 杜 丽, 张 信, 王 伟, 等. “S” 形试件的五轴数控机床综合动态精度检测特性研究 [J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(4): 629-635.
- [8] TSUTSUMI M, YUMIZA D, UTSUMI K. Evaluation of synchronous motion in five-axis machining centers with a tilting rotary table[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, 2007, 1(1): 24-35.
- [9] NAS979. Uniform cutting test-NAS series, metal cutting equipment[R]. Washington, USA: NASA, 1969.
- [10] CUI Y W, SONG Z Y. S-shape detection test piece and a detection method for detection the precision of the numerical control milling machine[P]. US, 8061052B2, 2011.11.22.
- [11] MOU W P, SONG Z Y, GUO Z P, et al. A Machining Test to Reflect Dynamic Machining Accuracy of Five-Axis Machine Tools[J]. Advanced Materials Research, 2012, 622-623: 414-419.
- [12] WANG W, JIANG Z, LI Q, et al. A new test part to identify performance of five-axis machine tool-Part II validation of S part[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(5-8): 739-756.
- [13] QIU G, LUO X, WANG P, et al. Design and simulation of PID controller based on PMSM servo system[J]. Journal of Chongqing University, 2008, 3: 831-847.
- [14] WANG W, JIANG Z, TAO W, et al. A new test part to identify performance of five-axis machine tool—part I: geometrical and kinematic characteristics of S part[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(5-8): 729-738.
- [15] WANG W, JIANG Z, LI Q, et al. A new test part to identify performance of five-axis machine tool-Part II validation of S part[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79: 739-756.

(责任编辑 李新)