

一种三自由度精密定位系统研究*

尚江坤, 杜兆才

(中国航空制造技术研究院数字化制造技术航空科技重点实验室, 北京 100024)

[摘要] 为了满足航空制造领域中零部件精密装配系统对精密定位的需求, 开发了一种基于柔顺机构的三自由度精密定位系统, 具有两个移动及一个转动共 3 个自由度; 采用 3 个封装压电陶瓷致动器驱动, 封装压电陶瓷内置应变传感器以实现压电陶瓷驱动器的闭环精确控制; 使用 3 个激光位移传感器测量实际位姿。提出一种基于激光位移传感器的测量和运动学标定方法, 试验结果表明 X 方向正弦轨迹误差为 5.4%, Y 方向正弦轨迹误差为 8.18%。

关键词: 3 自由度; 精密定位; 运动学标定; 压电陶瓷; 柔顺机构

Study on a 3-DOF Precision Positioning System

SHANG Jiangkun, DU Zhaocai

(Key Laboratory of Digital Manufacture Technology Aeronautical Scientific Technology,
AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] This paper presents a 3-DOF precision positioning system in order to meet the demands of precision positioning for parts in aviation field. The system is driven by three packing piezoelectric actuators and guided by flexure hinges. Strain sensors are adapted to realize close loop control for the piezoelectric actuators. Three laser displacement sensors are employed to measure the position and orientation of the target. Moreover, a kinematics calibration method based on laser displacement sensors is proposed. At last, the precision positioning system is verified by the experiment that the max errors along X and Y are 5.4% and 8.18%, respectively.

Keywords: 3-DOF; Precision positioning; Kinematics calibration; Piezoelectric actuators; Flexible mechanism

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.22.077

在国防工业、微电子工程、航空航天等领域, 零部件的装配精度直接影响到设备的可靠性与稳定性。以激光陀螺为例, 在装配过程中需要精确调整棱镜及光电管的位置, 要求用于装配的设备能够实现微米级甚至更高的定位精度。

精密定位技术作为零件精密装配系统的关键技术, 其定位精度直接决定了装配系统的装配精度。因此, 针对紧凑装配空间的精密定位技术的研究已经成为精密装配系统的瓶颈之一。

目前, 精密装配系统的精密定位平台普遍采用导轨式定位平台^[1-2]; 而滑动导轨的运动件和支撑件之间存在的摩擦力导致运动精度较低, 同时存在磨损影响其寿命^[3]; 滚动导轨的传动方式减小摩擦的同时会降低系统的稳定性^[4]; 气浮导轨克服了摩擦和磨损的缺点, 但是成本昂贵^[5]。为此有学者利用音圈电机作为驱动器, 基

于柔顺机构设计微动机构以实现精确定位, 然而音圈电机体积较大, 导致精密定位平台结构不够紧凑^[6-7]。因此, 压电陶瓷作为一种新型驱动器被越来越多地应用于精密定位平台。天津大学李晓辰^[8]基于柔性铰链和压电陶瓷设计了一种两自由度的精密定位系统。该系统在设计上实现了解耦, 无需进行复杂的运动学标定, 试验表明其具有良好的定位精度。然而, 其控制方法复杂, 工程实现较为困难。赵玮等^[9]提出了一种六自由度的串并联精密定位系统, 该系统采用电容式测微仪与计算机视觉结合的运动学标定方法和变速积分 PI 控制算法, 实现了高精度操作, 但是计算机视觉系统成本高昂。田延岭等^[10]提出了一种用于纳米磨削的三自由度精密定位系统, 通过建立系统正、逆解运动学模型, 得出了传感器测量值与压电陶瓷驱动点的实际位移输出值之间的关系, 并通过试验验证了系统的性能。然而该系统通过电容式传感器检测压电陶瓷致动器的位移, 安装集成难度大。

本文构建了一种三自由度精密定位系统, 能够实现

* 基金项目: 航空科学基金项目(2015ZE25014、2015ZE25002); 国防基础科研计划项目(JCKY2016205B005)。

沿 X 和 Y 方向的平移运动和绕 Z 轴的转动,提出了一种基于激光位移传感器的测量和运动学参数标定方法。基于文中提出的标定方法,对系统进行了运动学参数标定试验;利用封装有应变传感器的压电陶瓷驱动器实现闭环控制,达到三自由度精密定位平台的精确控制。最后针对该系统进行了定位精度试验。

1 三自由度精密定位平台

三自由度精密定位平台结构如图 1 所示,平台的机构构型为 3-RRR 型平面并联机构,如图 2 所示。

该机构共有 3 个运动支链,每个支链有 3 个转动副,因此,该机构共有 3 个自由度:沿 X 和 Y 方向的移动、绕 Z 轴的转动,定位平台外径 130mm,厚 12.5mm,材料为 7050 铝合金。

2 定位系统整体方案设计

基于三自由度精密定位平台对定位系统整体方案进行了设计,如图 3 所示。该系统包括工控机、压电陶

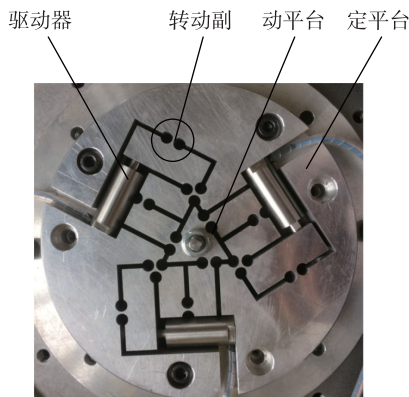


图1 三自由度精密定位平台
Fig.1 3-DOF precision positioning stage

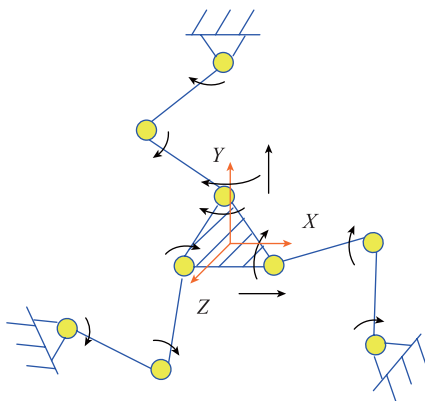


图2 平台机构构型
Fig.2 Mechanism configuration of the stage

瓷控制器、激光位移传感器、压电陶瓷驱动器(内封装有应变传感器)、三自由度精密定位平台。工作时由工控机向压电陶瓷控制器发送指令,压电陶瓷控制器输出电压信号,使压电陶瓷驱动器伸长,进而驱动三自由度精密定位平台,同时应变传感器检测压电陶瓷的伸长量反馈给压电陶瓷控制器,控制器通过调整电压,控制压电陶瓷驱动器的位移量,激光位移传感器检测三自由度精密定位平台上靶标的位移数据,再与工控机通信将数据传输至工控机。

3 精密定位平台的运动学标定

三自由度精密定位平台除了沿 X 轴和 Y 轴的移动之外,还有绕 Z 轴的转动,平台的运动由 3 个压电陶瓷驱动器并行驱动来实现。因此需要根据系统的运动学特性确定系统输入输出之间的关系。为了对精密定位系统进行标定,提出了一种基于激光位移传感器的标定方法,并对系统进行了标定试验。

输出点处的运动量 X 与各压电陶瓷驱动器输出位移量 L 之间的关系表示为:

$$X=JL \tag{1}$$

式中:

$$X = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \theta \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} \Delta L_1 \\ \Delta L_2 \\ \Delta L_3 \end{bmatrix}.$$

其中, Δx 、 Δy 、 θ 分别表示输出点沿基坐标系 OXY 的 X 轴、 Y 轴的平移量和绕 Z 轴的转动量; ΔL_1 、 ΔL_2 、 ΔL_3 分别表示压电陶瓷驱动器的伸缩量; J 为精密定位平台的雅克比矩阵。

由式(1)可以看出,机构的运动输出关系是由雅克比矩阵 J 决定的,其准确性直接影响到系统的运动精度,而机构的几何尺寸和初始位置又决定了柔性定位平台的雅克比矩阵,在实际中由于加工误差与装配误差的存在,由几何尺寸和初始位置计算出的雅克比矩阵必然是不准确的,因此必须通过试验对雅克比矩阵 J 进行标定。

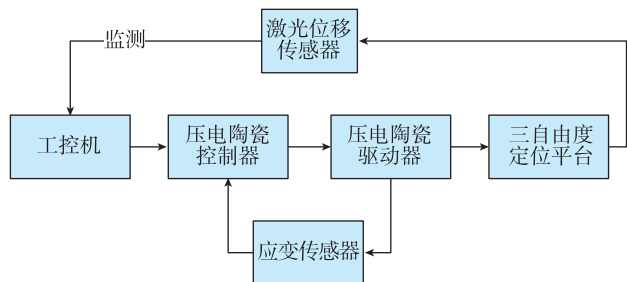


图3 定位系统整体方案
Fig.3 Overall scheme of the positioning stage

在标定过程中,对 L 的测量通过控制系统采集封装在压电陶瓷内的应变片输出而得到,而运动输出点输出 X 中的各个参数借助激光位移传感器不能直接测得,需要通过位移传感器测得的位移量进行换算获得。3 个位移传感器的测量值与定位平台位移量的关系如图 4 所示, O 点为平台靶标中心,同时也是定位平台中心,以点 O 为原点建立参考坐标系 OXY ,靶标顶点分别为 A 、 B 、 C 、 D ,平台运动后标靶的位置如图 4 中虚线所示,同样以几何中心为原点建立动坐标系 $O'X'Y'$,顶点位置为 A' 、 B' 、 C' 、 D' , $AD=2b$, $AB=2a$ 。

假设平移 $(\Delta x, \Delta y)$ 转动角度 θ ,则根据坐标转换矩阵, A' 、 B' 在坐标系 OXY 中坐标如下:

$$A': \quad x_{A'} = a \cos \theta - b \sin \theta + \Delta x \quad (2)$$

$$y_{A'} = a \sin \theta + b \cos \theta + \Delta y \quad (3)$$

$$B': \quad x_{B'} = -a \cos \theta - b \sin \theta + \Delta x \quad (4)$$

$$y_{B'} = -a \sin \theta + b \cos \theta + \Delta y \quad (5)$$

则直线 $A'B'$ 方程为:

$$y = x \tan \theta + b \cos \theta + b \sin \theta \tan \theta + \Delta y - \Delta x \tan \theta \quad (6)$$

同理,可得

直线 $C'D'$:

$$y = x \tan \theta - b \cos \theta - b \sin \theta \tan \theta + \Delta y - \Delta x \tan \theta \quad (7)$$

直线 $A'D'$:

$$y = -x / \tan \theta + a \cos \theta / \tan \theta + \Delta x / \tan \theta + a \sin \theta + \Delta y \quad (8)$$

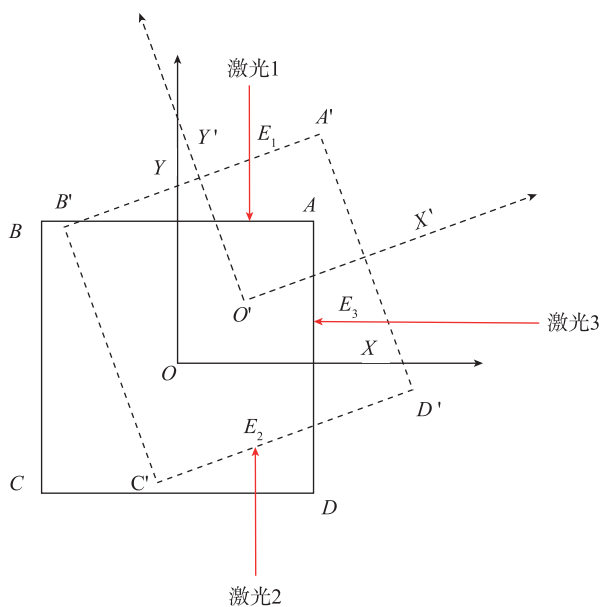


图4 标定示意图
Fig.4 Calibration schematic diagram

激光读数分别为 Δy_1 、 Δy_2 、 Δx_1 ,激光点在原靶标上位置为 (x_1, b) 、 $(x_2, -b)$ 和 (a, y_3) ,则靶标运动后各激光点位置分别为 $E_1(x_1, b - \Delta y_1)$ 、 $E_2(x_2, -b + \Delta y_2)$ 、 $E_3(a - \Delta x_1, y_3)$ 。

将坐标代入直线方程,忽略高阶项,解方程组可得:

$$\Delta x = \frac{y_3 \Delta y_1 + y_3 \Delta y_2}{x_2 - x_1} - \Delta x_1 \quad (9)$$

$$\Delta y = (x_2 \Delta y_1 + x_1 \Delta y_2) / (x_1 - x_2) \quad (10)$$

$$\theta = -(\Delta y_1 + \Delta y_2) / (x_1 - x_2) \quad (11)$$

为了标定雅克比矩阵 J ,需要测得各驱动器的伸缩量 L ,以及相应的运动输出点 O 处的运动参量 X ,至少需要 3 组数据才能计算出 J 的实际值。在标定结果计算中,共测得 30 组有效数据求平均值以消除偶然误差的影响。最终标定结果为:

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} -4.2079 & 0.6100 & -31.5255 \\ -0.9174 & -0.1160 & -19.5949 \\ -4.2974 & 2.54 & -34.2381 \end{bmatrix} \quad (12)$$

驱动器最大行程为 $17\mu\text{m}$,实际工作中设置驱动器最大行程 $15\mu\text{m}$ 以防止驱动器损坏,根据式(1)可得定位平台的工作空间如图 5 所示。

4 试验研究

4.1 试验系统搭建

为了对定位系统的各项指标进行检测,在三自由度精密定位平台样机的基础上搭建了三自由度定位系统的试验系统,如图 6 所示。试验系统的组成包括三自由度精密定位平台、气浮隔振平台、激光位移传感器、压电陶瓷驱动器、压电陶瓷控制器、工控机。其中压电陶瓷驱动器最大行程为 $17\mu\text{m}$,激光位移传感器为 Solartron Metrology 公司的 orbit LTH 非接触式传感器,分辨率可达 $0.0076\mu\text{m}$,试验系统的控制原理如图 7 所示。

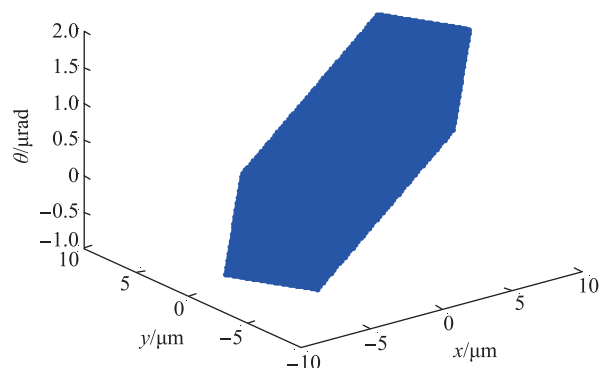


图5 工作空间
Fig.5 Workspace of the stage

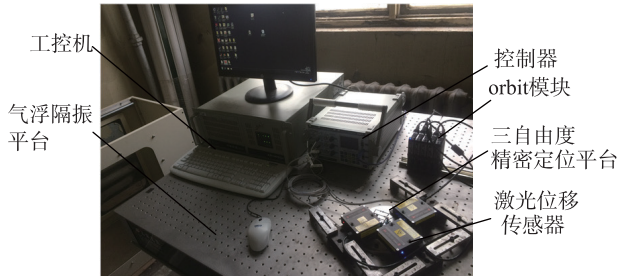


图6 试验系统组成

Fig.6 Setup of experiment system

4.2 试验结果

为了验证标定结果及系统性能,对系统分别进行了 X 方向和 Y 方向的正弦轨迹试验。

X 方向输入信号为: $x=1.5\sin(4\pi t)+2$

Y 方向输入信号为: $y=-2.5\sin(4\pi t)-2.5$

X 方向正弦轨迹试验结果如图 8 所示,最大误差为 $0.189\mu\text{m}$, Y 方向最大耦合位移 $0.353\mu\text{m}$ 。Y 方向正弦轨迹试验结果如图 9 所示,最大误差为 $0.409\mu\text{m}$, X 方向最大耦合位移 $0.311\mu\text{m}$ 。

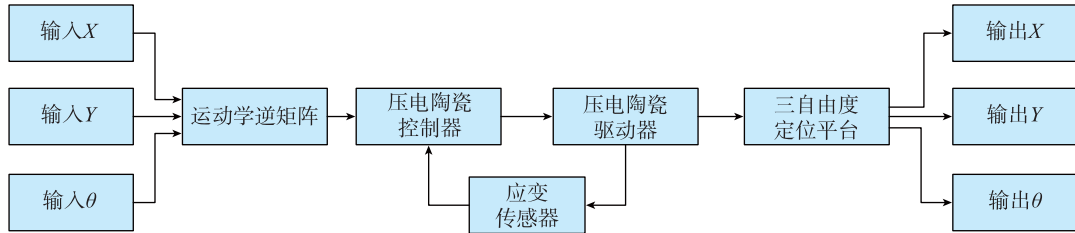


图7 控制原理图

Fig.7 Schematic diagram of the control system

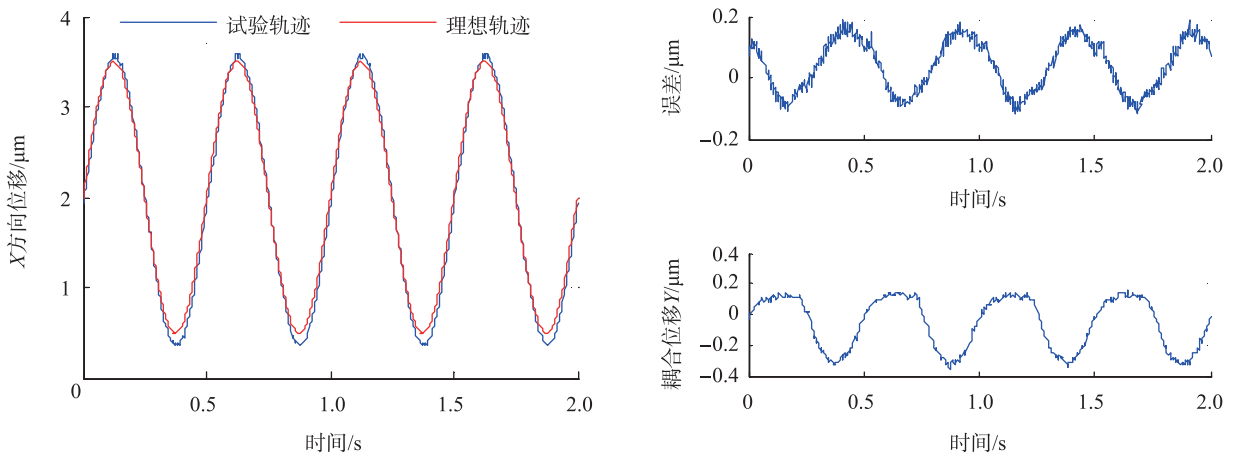


图8 X向正弦轨迹试验

Fig.8 Result of X sinusoidal trajectory experiment

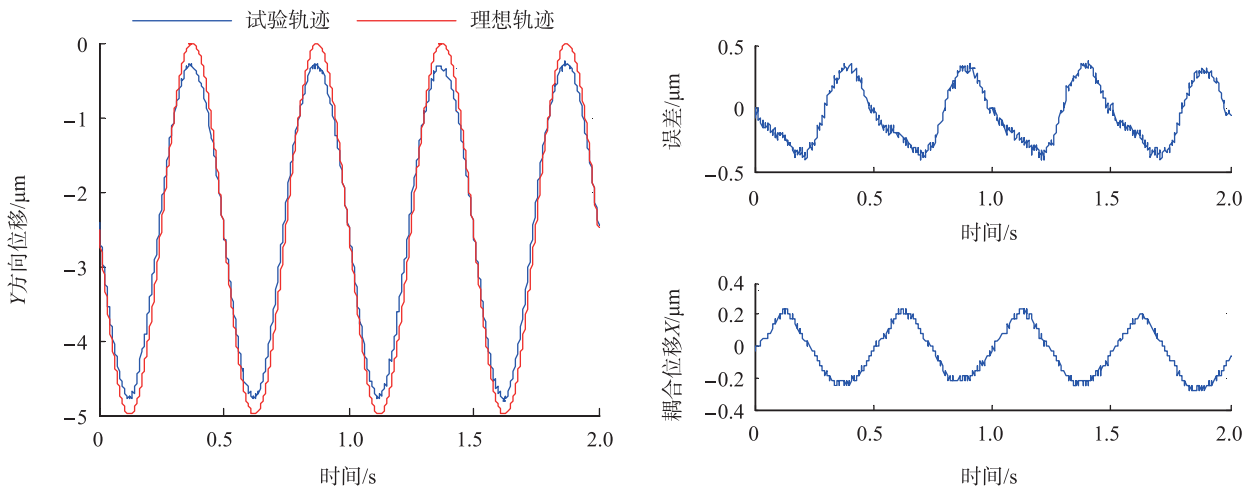


图9 Y向正弦轨迹试验

Fig.9 Result of Y sinusoidal trajectory experiment

5 结论

(1) 针对三自由度精密定位系统,提出了基于激光位移传感器的测量和运动学参数标定方法,并对系统进行了标定试验。

(2) 利用封装有应变传感器的压电致动器实现了系统的半闭环控制,并对系统的定位精度、耦合性能进行了测试,试验结果表明 X 方向正弦轨迹误差为5.4%。 Y 方向正弦轨迹误差为8.18%。

参考文献

- [1] 罗怡,王东辉,王晓东,等.多零件轴孔精密过盈装配[J].哈尔滨工业大学学报,2013,45(2):111-116.
- LUO Yi, WANG Donghui, WANG Xiaodong, et al. Multi-peg-hole precision assembly based on interference fit[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(2): 111-116.
- [2] LEE S K, YOO J H, YANG M S. Effect of thermal deformation on machine tool guide motion[J]. Tribology International, 2003, 36(1): 41-47.
- [3] 杨庆国.高速精密气浮定位平台设计方法[D].天津:天津大学,2007.
- YANG Qingguo. Design method of a high-speed and high-precision air-supported positioning[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [4] CHEN J S, CHEN K C, LAI Z C, et al. Friction characterization and compensation of a linear-motor rolling-guide stage[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(9): 905-915.
- [5] ZHANG C, LIU Q. Design and control of air bearing precision positioning stage driven by linear motors[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 34(2): 224-228.
- [6] SHANG J, TIAN Y, LI Z, et al. A novel voice coil motor-driven compliant micropositioning stage based on flexure mechanism[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(9): 957-978.
- [7] XU Q. Design and development of a compact flexure-based XY, precision positioning system with centimeter range[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(2): 893-903.
- [8] 李晓辰.微定位系统设计与控制方法研究[D].天津:天津大学,2014.
- LI Xiaochen. The mechanical design and control methodology of a 2-DOF precision positioning platform[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [9] 赵玮,于靖军,毕树生,等.串并联微操作机器人系统的研究[J].北京航空航天大学学报,2001,27(6):623-627.
- ZHAO Wei, YU Jingjun, BI Shusheng, et al. Experimental system of serial-parallel micromanipulator[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 2001, 27(6): 623-627.
- [10] 田延岭,张大卫,闫兵.三自由度纳米磨削微定位平台的运动学特性[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2006,39(7):777-782.
- TIAN Yanling, ZHANG Dawei, YAN Bing. Kinematic characteristics of a 3-DOF micropositioning table for precision grinding[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2006, 39(7): 777-782.

通讯作者:尚江坤,硕士、助理工程师,研究方向为飞机数字化装配技术、智能控制与精密装配技术,E-mail:jiangkun2020@163.com。

(责编 铃兰)

(上接第76页)

系统研究与开发[J].机械制造与自动化,2017,46(4):36-39.

GAO Xiang, ZHOU Laishui, ZHAO Xisong, et al. Research and development of rapid design system of mortise broaches for aero-engine[J]. Machine Building & Automation, 2017, 46(4): 36-39.

[9] 高翔.航空发动机涡轮盘榫槽拉刀快速设计系统研究与开发[D].南京:南京航空航天大学,2016.

GAO Xiang. Research and development on mortise broaches rapid design system of aero-engine turbine disk[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

[10] 黄瑞,张树生,白晓亮.可制造性驱动的三维CAD模型相交制造特征识别方法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2013,25(7):1089-1098.

HUANG Rui, ZHANG Shusheng, BAI Xiaoliang. Manufacturability driven interacting machining feature recognition algorithms for 3D CAD models[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2013, 25(7): 1089-1098.

[11] 范海涛,张树生,陶俊,等.工艺语义驱动的铣削类零件加工特征识别技术[J].计算机集成制造系统,2012,18(2):306-313.

FAN Haitao, ZHANG Shusheng, TAO Jun, et al. Feature recognition for milling parts driven by process semantic[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(2): 306-313.

[12] 张超.基于SolidWorks平台的轴类零件参数化设计[J].智能制造,2007(11):43-44.

ZHANG Chao. Parametric design of shaft parts based on SolidWorks platform[J]. Digital Manufacturing Industry, 2007(11): 43-44.

[13] 潘万彬,高曙明,陈翔.参数化模型的局部自动适应重用方法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2016,28(2):314-327.

PAN Wanbin, GAO Shuming, CHEN Xiang. An automatic adaptation reuse method for the subparts of parametric solid models[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2016, 28(2): 314-327.

[14] 张乐林,祝锡晶,叶林征.基于UG二次开发的参数化建模方法[J].计算机系统应用,2016,25(1):146-149.

ZHANG Lelin, ZHU Xijing, YE Linzheng. Method of parametric modeling based on UG secondary development[J]. Computer Systems & Applications, 2016, 25(1): 146-149.

[15] 梅小宁,杨树兴.基于UG二次开发的参数化建模方法在优化设计中的应用[J].科技导报,2010,28(3):29-32.

MEI Xiaoning, YANG Shuxing. Applications of parametric modeling method based on secondary development of UG in optimization[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(3): 29-32.

通讯作者:周来水,博士、教授,研究方向为数字化设计制造技术,E-mail:zlsme@nuaa.edu.cn。

(责编 铃兰)