

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.10.008

环形移动装置的精度分析与优化研究*

魏 凯, 罗路平*

(浙江工业大学 浙江省特种装备制造与先进加工技术重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对环形焊缝自动焊接装置中移动装置存在的低精度、高成本等问题,将精度可靠性的评价方法应用到移动装置的精度分析与优化中。基于多体系统理论建立了移动装置的误差模型,采用蒙特卡洛法对移动装置的运动误差进行了精度分析。以精度分析中误差敏感度的分析结果为基础,建立了以移动装置制造成本最低为优化目标、以满足精度可靠性设计要求为性能约束的移动装置精度分配优化模型,利用多岛遗传算法与蒙特卡洛法相结合对移动装置的误差源进行了精度分配优化设计。研究表明,移动装置经过优化后,精度可靠性达到设计要求,且与经验设计相比,制造成本降低 19.1%,为环形移动装置的加工制造提供了依据。

关键词:精度可靠性;蒙特卡洛法;精度分析;精度分配优化

中图分类号:TH115;TH161

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)10-1198-05

Precision analysis and optimization of circumferential moving device

WEI Kai, LUO Lu-ping

(Key Laboratory of E&M (Ministry of Education), Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the low precision and high cost of the moving device of automatic welding device for circumferential weld, precision reliability index was used in precision analysis and optimization. An error model of moving device was established through utilize of the multi-body system theory, and the motion error was simulated by using Monte-Carlo method. With the minimum manufacture cost of moving device set to be design object and the precision reliability set to be performance constraint, an optimization model for distribution of the error parameters for the moving device was established based on the simulation of the error sensibility. Then, the optimization was carried out by combining the multi-island genetic algorithm with Monte Carlo method. The results indicate that the precision reliability of moving device satisfies the design requirement and the cost decreases by 19.1% compares with experience design after optimization. Therefore, this optimization can provide basis for the manufacture of the circumferential moving device.

Key words: precision reliability; Monte-Carlo method; precision analysis; optimization in precision distribution

0 引 言

环形焊缝的自动焊接一般采用环形移动装置作为执行机构,移动装置的运动精度很大程度上决定了焊接质量的一致性。运动精度可以通过精度设计的方式来改善或提高,因此,在设计阶段,综合分析移动装置的运动精度,并合理分配移动装置主要部件的精度参数十分必要。

近年来,许多学者对机构的精度分析与优化进行了相关研究。在精度分析方面,贺甲等^[1]基于多体系统理论,建立四自由度直角坐标机械手的运动误差模型,将所有误差取最大值对 RFID 封装设备的精度进行了分析。赵帼娟等^[2]将实验测得的各误差源的数据代入到所建立的误差模型中,获得了四轴抛光装置位置误差和方向误差的分布规律。王禹林等^[3]基于误差分析,建立以定位精度要求为约束条件、以成本为

收稿日期:2016-04-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51475425)

作者简介:魏 凯(1990-),男,湖北仙桃人,主要从事智能制造装备技术方面的研究. E-mail: weikai121_zj@126.com

通信联系人:罗路平,女,博士,讲师. E-mail: luping@zjut.edu.cn

目标的螺杆转子磨床精度分配优化模型,通过调整精度权数实现不同应用需求的目标优化;康方等^[4]将角位移误差和垂直度误差用线位移误差近似表示,以分配后机床整体精度小于预定精度为约束建立公差成本优化模型,对机床零部件进行了精度分配优化。上述文献都是在极限误差条件下求得机构运动误差的最大值,然后进行分析与优化设计,忽略了误差源的随机性;所有误差源均为极值的概率非常低^[5-7],将最大误差作为设计指标,会使得机构在绝大多数情况下存在精度过剩的情况,导致制造成本过高。

针对上述问题,本研究以精度可靠性为精度性能指标,利用多体系统理论建立移动装置的运动误差模型,采用蒙特卡洛法对移动装置进行精度分析,结合误差敏感度分析结果,通过集成 Isight 与 Matlab 对移动装置的误差源进行精度分配优化,实现满足精度可靠性、降低制造成本的目的。

1 环形移动装置的误差模型

1.1 环形移动装置的拓扑结构

环形移动装置结构图如图 1 所示。

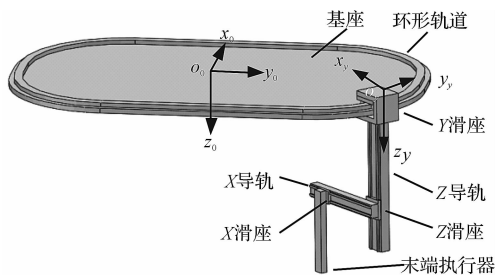


图 1 环形移动装置结构图

环形移动装置为三自由度机构,可实现沿 X、Z 直线导轨的直线运动和沿环形轨道的环形运动,其中环形轨道由直线导轨与圆弧导轨组成。移动装置在环形轨道的直线段运行时,3 个方向运动都为滑座与导轨的直线运动形式,可用多体系统描述其运动关系;在环形轨道的圆弧段运行时,Y 滑座的 x 轴,y 轴是时刻变化的,其中 x 轴指向圆弧的圆心,y 轴为滑座运动的切线方向,对于任意一微小时刻,Y 滑座沿环形导轨的运动仍然可以看作为直线运动,因此,整个移动装置同样可以用多体系统描述其运动关系。

拓扑结构是多体系统误差建模的基础,移动装置的拓扑结构如图 2 所示。惯性坐标系 R 设在地面上,基座与地面固定,不考虑工装误差的情况下,可看作 B4 体与 B5 体固定。

1.2 误差源分析

本研究在只考虑移动装置几何误差的情况下,对于直线导轨,以环形轨道直线段上的滑座运动为例,几何误差如图 3 所示。

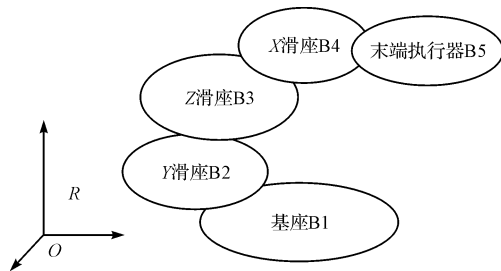


图 2 拓扑结构图

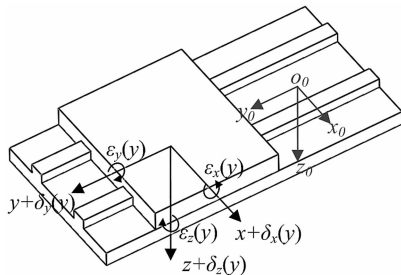


图 3 直线段导轨的几何误差

由于存在滑座与导轨的装配误差、导轨的尺寸误差、控制电机转动误差、丝杆螺母之间的回程间隙等问题,滑座在运动中的误差包括位移误差、绕 3 个轴的转角误差和沿直线导轨运动方向的定位误差^[8]。

对于圆弧导轨,以环形轨道圆弧段上的滑座运动为例,几何误差如图 4 所示。由于各种误差因素影响,滑座在运动中的误差包括位移误差、绕 3 个轴的转角误差和沿圆弧导轨运动方向的定位误差。

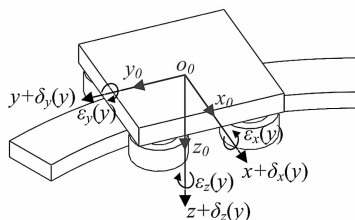


图 4 圆弧段导轨的几何误差

各误差都是微小变量,对于每一段导轨(直线导轨、圆弧导轨),滑座在其上运动时,产生的误差都可以近似用 2 项位移误差、3 项转角误差和 1 项定位误差表示。此外,各导轨间还存在垂直度误差 ε_{xy} 、 ε_{yz} 、 ε_{zx} 。因此,移动装置的几何误差共有 21 项。

1.3 基于多体系统理论的误差建模

参照文献[9]的误差变换方法,在有误差条件下,相邻体的变换矩阵为:

$$T_{jk, \text{actual}} = T_{jkp} \Delta T_{jkp} T_{jks} \Delta T_{jks} \quad (1)$$

式中: T_{jkp} — 理想姿态变换矩阵, ΔT_{jkp} — 姿态误差变换矩阵, T_{jks} — 理想位移变换矩阵, ΔT_{jks} — 位移误差变换矩阵。

理想条件下(无误差),相邻体的变换矩阵为:

$$T_{jk, \text{ideal}} = T_{jkp} T_{jks} \quad (2)$$

假设不存在误差, B4 体与 B1 体之间的理想变换

矩阵为:

$$T_{14,ideal} = T_{12p} T_{12s} T_{23p} T_{23s} T_{34p} T_{34s} \quad (3)$$

在有误差条件下, B4 体与 B1 体之间的实际变换矩阵为:

$$T_{14,actual} = T_{12} T_{23} T_{34} = \Delta T_{12p} T_{12s} \Delta T_{12s} \Delta T_{23p} T_{23s} \Delta T_{23s} \Delta T_{34p} T_{34s} \Delta T_{34s} \quad (4)$$

假定移动装置末端执行器在 B4 体坐标系下的位置为 $t = [0, 0, L]^T$, 则移动装置末端执行器在惯性坐标系的理想位置为:

$$\begin{bmatrix} T_{ideal} \\ 1 \end{bmatrix} = [T_{14,ideal}] \begin{bmatrix} \{t\} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

移动装置末端执行器在惯性坐标系的实际位置为:

$$\begin{bmatrix} T_{actual} \\ 1 \end{bmatrix} = [T_{14,actual}] \begin{bmatrix} \{t\} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据式(1 ~ 6) 可得, 移动装置的运动误差为:

$$\Delta E = T_{actual} - T_{ideal} \quad (7)$$

2 环形移动装置的精度分析

2.1 运动精度可靠性模型

机构运动精度的可靠度是指机构实际运动的误差 ΔE 落在机构允许最大误差 I 范围内的概率^[10-11]。根据状态函数的定义, 机构运动精度的极限状态函数 $g(x)$ 可表示为:

$$g(x) = I - |\Delta E| = I - \sqrt{\Delta E_x^2 + \Delta E_y^2 + \Delta E_z^2} \quad (8)$$

式中: x —机构的各误差源(误差变量), $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$; n —误差源的个数; $\Delta E_x, \Delta E_y, \Delta E_z$ —误差分量; $|\Delta E|$ —误差 ΔE 的模。

机构精度的可靠度可表示为:

$$P = P(g(x) > 0) = \int_{\Omega_f} f(x) dx \quad (9)$$

式中: P —精度的可靠度, $f(x)$ —误差变量的联合密度函数, Ω_f —精度的可靠域。

2.2 精度可靠度求解的蒙特卡洛法

蒙特卡洛法对于求解非线性、多变量系统的可靠度有较好的优势^[12]。蒙特卡洛法求解精度可靠度是依据各误差变量的分布规律, 随机抽样产生 N 组误差变量的样本 $x_k = (x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn}) (k = 1, 2, \dots, N)$; 将样本 x_k 代入极限状态函数 $g(x)$, 统计结果数组中大于 0 的个数, 记作 M ; 根据 $P = M/N$ 求解精度可靠度。根据大数定律, N 越大, 模拟结果越逼近理论值, 一般取 $N = 10^6$ 。

2.3 基于蒙特卡罗法的精度分析

以所设计的某环形移动装置为例, 各导轨运动行程: X 导轨为 $0 \sim 100$ mm, Z 导轨为 $0 \sim 150$ mm, Y 环形导轨的 $1/4$ 行程为 $0 \sim 410$ mm, 设计要求: 移动装置执行末端位置误差小于 0.5 mm 的可靠度 P 不低于

99.7%。经验设计选用的某公司滑动导轨及电机定位的精度等级如表 1 所示。

表 1 滑动导轨与电机定位精度等级

精度等级	普通	高级	精密	超精密
电机定位误差/mm	0.019	0.013	0.006	0.003
滑座位移误差/mm	0.021	0.015	0.007	0.005
滑座转角误差/($\times 10^{-4}$ rad)	7.11	5.0	2.34	1.67
导轨倾角误差/($\times 10^{-4}$ rad)	6.9	4.9	2.2	1.6

按照传统经验设计, X, Z 导轨及 Y 环形导轨的零部件都选择高级精度。假定各误差变量相互独立, 且都呈零均值正态分布。

本研究根据误差源的分布规律, 采用蒙特卡洛法模拟 10^6 次误差进行仿真, 分别得到末端执行器的误差矢量 $\Delta E = (\Delta E^1, \Delta E^2, \Delta E^3 \dots, \Delta E^{1000000})$, 由 ΔE 可以得到 $\Delta E_x, \Delta E_y, \Delta E_z, |\Delta E|$ 的概率密度图如图 5 所示。

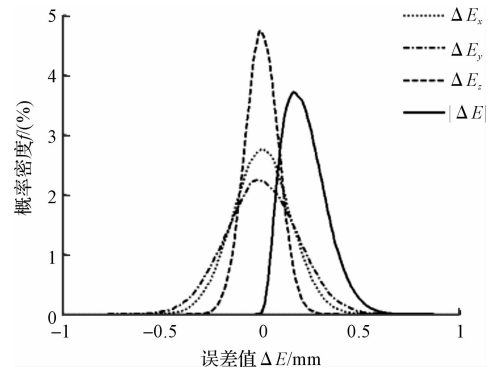


图 5 各方向误差的概率密度

各误差的统计数据及精度可靠度如表 2 所示。

表 2 误差统计与精度可靠度

位置	标准差/mm	最大值/mm	精度可靠度/(%)
X 方向误差	0.159	0.704	99.7
Y 方向误差	0.181	0.765	99.1
Z 方向误差	0.091 3	0.402	100
总误差 $ \Delta E $	----	0.796	97.5

综合图 5、表 2 可得, 移动装置在 X, Y, Z 3 个方向的误差 $\Delta E_x, \Delta E_y, \Delta E_z$ 都大致呈正态分布, 总误差 $|\Delta E|$ 根据 $|\Delta E| = \sqrt{\Delta E_x^2 + \Delta E_y^2 + \Delta E_z^2}$ 求得, 不呈正态分布。总误差最大误差达到 0.796 mm, 已超过 0.5 mm, 精度可靠度只有 97.5% , 未达到精度可靠性要求。因此, 需要对总误差进行合理控制。

2.4 误差敏感度分析

通过将移动装置的总误差 $|\Delta E|$ 对各个误差源 $\Delta e_i = \{\delta_j, \theta_k, \varepsilon_m\}$ 求偏导, 可得到移动装置的误差敏感度^[13]:

$$s_i = \left| \frac{\partial |\Delta E|}{\partial \Delta e_i} \right| (i = 1, 2, \dots, 21) \quad (10)$$

为了更好地辨识和分析关键性误差源, 笔者将各

误差源的敏感度进行归一化处理,得出敏感度系数:

$$S_i = \frac{|s_i|}{\sum |s_i|} (i = 1, 2, \dots, 21) \quad (11)$$

式中: S_i — Δe_i 对应的敏感度系数。

本研究对各项误差源的敏感度进行分析,结果如图 6 所示。

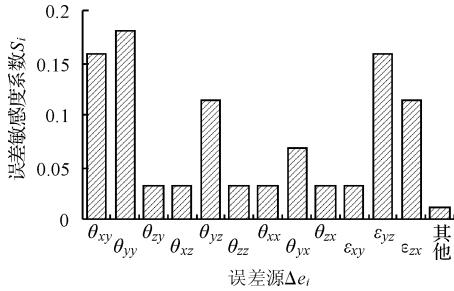


图 6 总误差敏感度

由图 6 可知,对 $|\Delta E|$ 影响较大的误差变量有 12 项,它们的敏感度系数之和为 0.989,其中环形轨道的 Y 滑座与导轨的转角误差对 $|\Delta E|$ 影响最大,导轨 YZ、导轨 XZ 的垂直度误差对 $|\Delta E|$ 影响次之,各位移误差以及电机定位误差对 $|\Delta E|$ 影响相对较小。

3 环形移动装置的精度优化

基于误差敏感度的分析结果,本研究对精度分配进行优化设计。

3.1 优化模型

3.1.1 优化目标

以降低制造成本为目标,建立移动装置精度分配优化模型^[14]:

$$\text{Min Cost}(x) = \sum_{i=1}^n k_i (\lambda_i x_i)^{\alpha_i} (i = 1, 2, \dots, 21) \quad (12)$$

式中: x —各项误差源的误差值(半公差带的宽度), $x = \{x_i\}$; α_i —公差特征指数,取 $\alpha_i = 2$; k_i —各设计变量的成本权重系数,在设计阶段,常常还不能定出制造成本的精确数值,但是可以定性估计,本研究以敏感度系数为成本权重系数^[15-16]; λ_i —将转角误差纲量同一化为线误差纲量的系数^[17]。

根据经验,当 x_i 为线误差变量时 $\lambda_i = 1$,当 x_i 为转角误差变量时 $\lambda_i = 57.2$,后面仿真过程将验证此法的合理性。

3.1.2 设计变量

$$x = \{x_i\} = \{\delta_{xy}, \delta_{yy}, \delta_{zy}, \delta_{xz}, \delta_{yz}, \delta_{zz}, \delta_{xx}, \delta_{yx}, \delta_{zx}, \theta_{xy}, \theta_{yy}, \theta_{zy}, \theta_{xz}, \theta_{yz}, \theta_{zz}, \theta_{xx}, \theta_{yx}, \theta_{zx}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{zx}\}。$$

3.1.3 约束条件

移动装置的精度可靠度不低于 99.7%,即性能约束为:

$$P(|\Delta E| \leq [\Delta E]) \geq 99.7\% \quad (13)$$

对单个误差源的取值,根据极限思想并结合导轨精度等级情况,以超精密精度等级的半公差带带宽 ($x_{i-\min}$) 为下限,以精度设计要求的最大值为上限:

$$x_{i-\min} \leq x_i \leq [\Delta E] \quad (14)$$

3.2 基于蒙特卡罗法的精度优化

移动装置精度分配优化的目的是在满足精度可靠性约束的条件下寻找制造成本的最优解。考虑到优化过程中计算量大,需多次迭代,本研究采用 Isight 集成 Matlab 的方法,调用 Matlab 进行蒙特卡洛抽样仿真求解每组分配解的精度可靠度,调用 Isight 计算器模块求解精度分配成本,采用多岛遗传算法进行精度分配优化,配置参数:初始种群数为 40,岛数 20,交叉率为 1,变异率为 0.01。优化流程如图 7 所示。

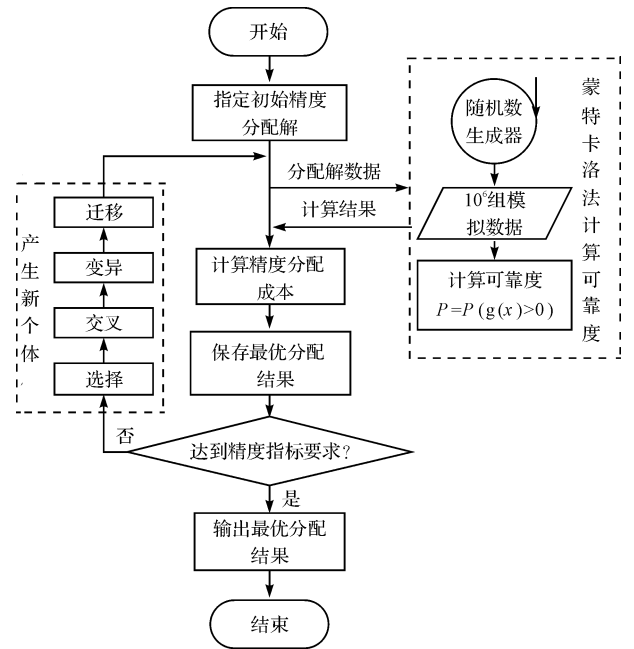


图 7 基于蒙特卡罗法的精度分配优化流程

3.3 精度优化结果对比

精度分配优化结果如表(3~5)所示。由此可知,21 项误差源中,有 13 项误差变量取值得到不同程度放大,说明按照经验的精度分配偏于保守;精度优化后,总体上,敏感度系数较大的误差变量得到不同程度的控制,敏感度系数较小的误差因素被适当的放大,符合精度分配的思想。

本研究将优化前、后的精度分配值带入到误差模型以及成本模型得出优化前、后的结果对比。移动装置精度优化结果如表 6 所示。优化前后总误差 $|\Delta E|$ 的概率密度如图 8 所示。

由表 6、图 8 可知,优化后,移动装置的精度可靠度达到了 99.71% 以上,满足了设计指标要求;与传统的经验设计相比,成本由优化设计前的 2 065.1 降低到 1 670.6,降低了 19.1%。由此可见,该方法在满足精度可靠度的条件下有效地降低了制造成本。

表 3 位移误差分配优化结果

	δ_{xy}	δ_{yy}	δ_{zy}	δ_{xz}	δ_{yz}	δ_{zz}	δ_{xx}	δ_{yx}	δ_{zx}
经验值/mm	0.015	0.015	0.013	0.015	0.015	0.013	0.015	0.015	0.013
优化值/mm	0.018	0.019	0.018	0.028	0.018	0.032	0.013	0.021	0.018

表 4 转角误差分配优化结果

	θ_{xy}	θ_{yy}	θ_{zy}	θ_{xz}	θ_{yz}	θ_{zz}	θ_{xx}	θ_{yx}	θ_{zx}
经验值/($\times 10^{-4}$ rad)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
优化值/($\times 10^{-4}$ rad)	4.62	4.12	5.98	5.84	4.84	5.99	3.74	4.77	6.99

表 5 垂直度误差分配优化结果

	ε_{xy}	ε_{yz}	ε_{zx}
经验值/($\times 10^{-4}$ rad)	4.9	4.9	4.9
优化值/($\times 10^{-4}$ rad)	5.89	4.67	4.61

表 6 移动装置精度优化结果

	最大误差/mm	精度可靠度 P/(%)	成本 Cost
优化前	0.796	97.5	2 065.1
优化后	0.773	99.71	1 670.6

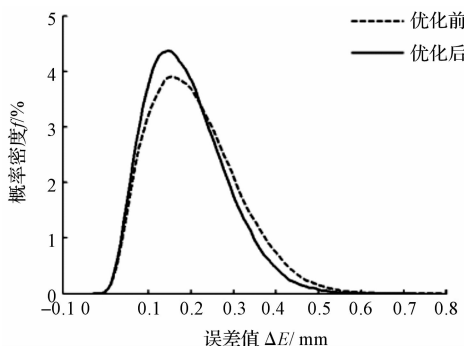


图 8 优化前后总误差|ΔE|的概率密度

4 结束语

本研究基于精度可靠性的误差评价方法,对环形移动装置的精度进行了分析与优化。结论如下:

(1)通过移动装置的精度分析结果可以看出,采用传统经验设计的移动装置精度可靠度不能达到设计要求;

(2)通过移动装置的精度分配优化结果可以看出,传统的精度设计偏于保守,优化后,移动装置的精度可靠度达到 99.71% 以上,满足了设计指标要求;与经验设计相比,成本降低了 19.1%,移动装置的经济性能和工作性能都得到了有效提高。

参考文献 (References):

[1] 贺 甲,田学光,张德龙,等.基于休斯顿方法的机械手误差建模与分析[J].工程设计学报,2010,17(6):439-443.
 [2] 赵帼娟,张 雷,卢 磊,等.四轴抛光平台综合误差建模及分析[J].吉林大学学报,2014,44(6):1676-1683.

[3] 王禹林,陶丽佳,孙文钊,等.基于多系统理论的螺杆转子磨床精度分析与优化[J].南京理工大学学报,2012,36(6):1015-1020.
 [4] 康 方,范晋伟.数控机床制造精度的优化分配方法[J].机械科学与技术,2008,27(5):588-591.
 [5] 吴健荣,王立权,王才东,等.机器人精度设计的方法研究[J].哈尔滨工程大学学报,2010,31(10):1367-1372.
 [6] 余杰先,吴 朋,曾 奇.一种新的并联机器人精度标定算法[J].机电工程技术,2014,43(4):14-17.
 [7] 黄 松,胡晓兵,周 飞,等.关节机器人定位精度影响因素分析[J].机械,2014,41(4):70-74.
 [8] 李 晨,方 强,李江雄.基于三坐标定位器的大部件调姿机构误差分析[J].机电工程,2010,27(3):6-17.
 [9] 田学光,吴梦晗,孙丽娜,等.基于 Huston 多系统理论的转台定位误差建模分析[J].机械设计与研究,2013,29(4):118-125.
 [10] 秦大同,谢里阳.现代机械设计手册(第6卷)[M].北京:化学工业出版社,2011.
 [11] 余治民,刘子建,艾彦迪,等.大型数控龙门导轨磨床几何误差建模与基于可靠性理论的精度分配[J].机械工程学报.2013,49(17):142-151.
 [12] 吕震宙.结构机构可靠度及可靠性灵敏度分析[M].北京:科学出版社,2009.
 [13] 蔡伟林.多自由度倒装键合机构设计与误差补偿[D].武汉:华中科技大学机械科学与工程学院,2013.
 [14] HSIEH K L. The study of cost-tolerance model by incorporating process capability index into product lifecycle cost [J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**,2006,28(5):638-642.
 [15] 邱 彪.倒装芯片键合机精度优化设计方法研究[D].桂林:桂林电子科技大学机电工程学院,2014.
 [16] JI S, LI X, MA Y, et al. Optimal tolerance allocation based on fuzzy comprehensive evaluation and genetic algorithm [J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**,2000,16(7):461-468.
 [17] 赵 强,阎绍泽.基于敏感度的运动模拟台精度综合[J].中国机械工程,2006,17(5):478-481.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

魏 凯,罗路平.环形移动装置的精度分析与优化研究[J].机电工程,2016,33(10):1198-1202.

WEI Kai, LUO Lu-ping. Precision analysis and optimization of circumferential moving device[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(10):1198-1202.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>