

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.07.007

取件机械臂定位精度的可靠性优化研究

劳可名¹, 曾庆锋²

(1. 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;

2. 浙江省机械工业联合会, 浙江 杭州 310009)

摘要:针对取件机械臂存在的绝对定位精度低、成本高等问题,采用基于定位精度可靠度的评价方法对机械臂进行了可靠性优化设计。使用多体系统理论建立了机械臂的静态误差模型,基于蒙特卡罗法对其定位精度进行了分析,并得出了机械臂末端总的误差敏感度。采用响应面法建立了机械臂动态误差的近似模型,并得出了其输出量表达式,考虑工程实际中动态误差与静态误差的耦合,将动态误差等效为机械臂的末端形变,建立了动静耦合误差模型。以定位精度可靠度为约束,成本与体积最小为目标,静态误差源与结构参数为设计变量,建立了定位精度的优化模型,利用 NCGA-II 算法结合蒙特卡罗法对设计变量进行了优化设计。研究表明,优化使定位精度可靠度满足实际要求,成本与体积分别降低了 15% 与 7.6%,为机械臂的设计制造提供了依据。

关键词:可靠性优化;绝对定位精度;蒙特卡罗法;动态误差;静态误差

中图分类号:TH115;TH161

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)07-0725-05

Reliability optimization of location precision of extraction manipulator

LAO Ke-ming¹, ZENG Qing-feng²

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

2. Zhejiang Machinery Industry Federation, Hangzhou 310009, China)

Abstract: Aiming at the problem of absolute location precision deficiency and high cost of the extraction manipulator, reliability optimization design about the manipulator was made based on the evaluating method for the reliability of the location precision. The static error model of the manipulator was set up with the application of multi-body system theory, location precision was analyzed based on the Monte-Carlo method and total error sensitivity of the end of the manipulator was calculated. An approximate dynamic error model of the manipulator was set up with the adoption of response surface method, and the output quantity expression was gained. Dynamic and static coupling error model was also set up through seeing the dynamic error as the deformation of the manipulator end, and with the consideration of coupling between the dynamic and static error in the practical project. Location precision optimization model was established with the location precision reliability as the constraints, minimum cost and volume as the goal, as well as the static error sources and structural parameters as the design variable; and the design variable was optimized with the NCGA-II combining with the Monte-Carlo method. The results indicate that actual requirement on the location precision is satisfied through the optimization; cost and volume are lowered by 15% and 7.6% respectively, which all provide the basis for the design and manufacture of the manipulator.

Key words: reliability optimization; absolute location precision; monte-carlo method; dynamic error; static error

0 引言

自动化装配设备中,为满足工件多角度定位要求,一般采用五自由度取件机械臂作为上下料工位的执行机构,其定位精度很大程度上决定了设备装配质量的一致性。机械臂的定位精度受静态误差和动态误差的综合影响^[1]。为使机械臂能满足实际需求的同时体

积与成本达到最优,在设计阶段对其进行可靠性优化研究十分必要。

近年来,很多学者研究了机构的设计尺寸、结构形式及各种误差对其精度的影响,通过分析优化得到了最佳的尺寸与误差值,为取件机械臂精度优化提供了依据。刘俊等人^[2]以机械手为研究对象,从动力学的角度对其进行了分析,并以此为基础对其结构进行了

收稿日期:2017-01-11

作者简介:劳可名(1989-),男,浙江余姚人,主要从事智能制造装备技术方面的研究。E-mail:1851965299@qq.com

改进。李翠玲等^[3]将可靠性的方法应用到五轴机床运动精度的分析与优化当中,建立了机床可靠性计算模型,对机床的运动精度进行了分析。吴健荣等^[4]在分析了机器人误差概率的基础上,将概率精度作为其位置精度的指标,提出了以概率精度为指标的机器人精度设计方法。顾井峰等^[5]对任意空间四连杆机构的运动输出进行了求解,在此基础上建立了机构可靠性优化模型,并分析了其运动精度可靠度。邱彪等^[6]以多体系统理论为基础,通过分析总体精度与部分精度的关系,建立了倒装芯片键合机的误差模型。

上述文献仅通过单独优化与分析机构的结构参数或静态误差使其定位精度满足要求,未考虑工程实际中动态误差与静态误差的耦合,定位精度往往无法达到最优。因此,本研究综合考虑动态误差与静态误差对定位精度的影响,以取件机械臂体积与成本最小为目标,以定位精度可靠度为约束条件,同时对结构参数与静态误差源进行设计。

1 取件机械臂的静态误差建模

取件机械臂结构图如图 1 所示。

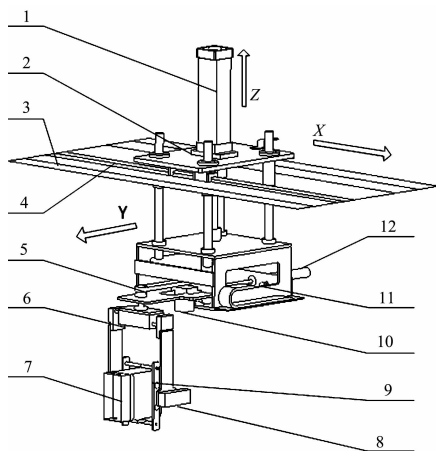


图 1 取件机械臂结构图

- 1—Z 轴气缸;2—X 轴滑台;3—基座;4—X 向滑轨;
5—Y 轴滑台;6—大口机械夹;7—工件;8—摆动气缸;
9—吸盘架;10—电机;11—Z 轴滑台;12—Y 轴气缸

该取件机械臂有 3 个移动副与两个转动副。 X 轴滑台与 Z 轴滑台分别沿 X 轴与 Z 轴运动; Y 轴滑台与 Y 轴气缸都安装在 Z 轴滑台内, Y 轴滑台沿 Y 轴运动; Y 轴滑台装有电机,采用同步带带动大口机械夹,并使其绕 Z 轴转动;摆动气缸安装于大口机械夹的夹爪上,驱动吸盘架作绕 X 轴的转动,吸盘架上的吸盘则吸住工件使其固定。

1.1 取件机械臂的拓扑结构

多个刚体或柔体通过移动副、旋转副与铰接副等连接而成的具有一定运动关系的机械系统称为多体系统^[7]。由上文的分析可知,取件机械臂为典型的多体

系统,故可以用多体系统理论对其进行误差分析。

拓扑结构高度概括了多体系统本质,是研究多体系统的基础^[8],取件机械臂的拓扑结构如图 2 所示。



图 2 拓扑结构图

本研究将大地设为惯性坐标系 R ,基座 $B1$ 与地面设为固连。

1.2 取件机械臂的变换矩阵

取件机械臂由 3 个直线移动机构与 2 个回转机构组成。由于存在几何误差^[9],实际上每个运动机构都存在 6 项运动误差,即三项线误差与三项转角误差,为了更准确地分析精度,还应考虑个运动体间的 8 个垂直度误差^[10],故总共有 38 项误差。沿 X 轴运动与绕 Z 轴转动的运动误差分别如图 3、图 4 所示。

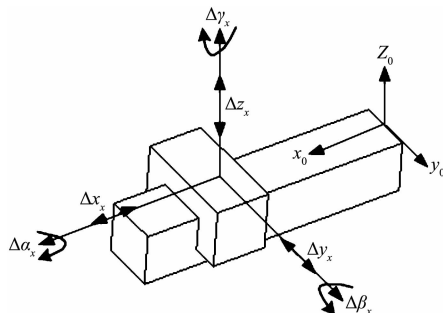


图 3 沿 X 轴运动的运动误差

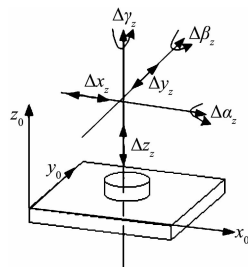


图 4 绕 Z 轴转动的运动误差

本研究使用李轩^[11]的方法变换误差矩阵,理想状态下 $B6$ 体与 $B1$ 体之间的理想变换矩为:

$$T_{16,ideal} = T_{12p} T_{12S} T_{23P} T_{23S} T_{34P} T_{34S} T_{45P} T_{45S} T_{56P} T_{56S} \quad (1)$$

在实际状态下, $B6$ 体与 $B1$ 体之间的实际变换矩阵为:

$$T_{16,actual} = T_{12S} \Delta T_{12S} T_{23S} \Delta T_{23S} T_{23P} \Delta T_{23P} T_{34S} \Delta T_{34S} T_{34P} \Delta T_{34P} T_{45S} \Delta T_{45S} T_{45P} \Delta T_{45P} T_{56S} \Delta T_{56S} T_{56P} \Delta T_{56P} \quad (2)$$

式(1~2)中: T_{ijp} , ΔT_{ijp} —理想状态下与实际状态下的

位置变换矩阵; $T_{ijs}, \Delta T_{ijs}$ —理想状态下与实际状态下的位移变换矩阵; i, j —两个相邻体。

假定理想状态下吸盘架在 B6 体坐标系下的位置矩阵为 $R = (0, Y_1, Z_1, 1)^T$, 得出其在惯性坐标系的理想位置为:

$$P_1 = T_{16, ideal} R \quad (3)$$

吸盘架在惯性坐标系的实际位置为:

$$P_2 = T_{16, actual} R \quad (4)$$

根据式(1 ~ 4)可得机械臂的总静态误差为:

$$\Delta E_1 = (\Delta E_{1x}, \Delta E_{1y}, \Delta E_{1z}, 0)^T = P_2 - P_1 \quad (5)$$

式中: $\Delta E_{1x}, \Delta E_{1y}, \Delta E_{1z}$ — ΔE_1 在 X、Y、Z 轴方向上的分量。

2 取件机械臂定位精度分析

2.1 求解定位精度可靠度的蒙特卡洛法

蒙特卡洛法在机器人误差分析领域被证明是一种非常有效的方法^[12]。其分析步骤为:①依据各误差源服从的分布规律进行抽样,得到各误差源抽样值 $\Delta x_{li} = (\Delta x_{i1}, \Delta x_{i2}, \dots, \Delta x_{in})$;②将 Δx_{li} 代入式(5)得到误差样本值 ΔE_i ;③进行 N 次重复抽样,得到误差样本值 $\Delta E_{li} = (\Delta E_{i1}, \Delta E_{i2}, \dots, \Delta E_{iN})$,接着通过统计分析得到误差的均值 $\mu_{\Delta E1}$ 与方差 $\sigma_{\Delta E1}^2$ 。

2.2 定位精度可靠度模型

机构的定位精度可靠度指的是机构在一定条件下精确定位的能力^[13]。令 $[\Delta E_1]$ 为允许误差, $|\Delta E_1|$ 为实际误差,则定位精度状态函数 $g(x)$ 如下式所示:

$$g(x) = [\Delta E_1] - |\Delta E_1| \quad (6)$$

由于取件机械臂在定位时对 3 个方向的精度都有要求,这里将 $|\Delta E_1|$ 设为^[14] $\sqrt{\Delta E_{1x}^2 + \Delta E_{1y}^2 + \Delta E_{1z}^2}$ 。

将各误差变量设为正态分布,则定位精度可靠度公式可以表示为^[15]:

$$P = P(g(x) > 0) = \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_g} \exp\left[-\frac{(x - \mu_g)^2}{2\sigma_g^2}\right] dz \quad (7)$$

式中: σ_g, μ_g —误差源联合概率密度的标准差与均值。

在计算时只需将 Δx_{li} 代入 $g(x)$, 然后统计 $g(x) > 0$ 的个数记为 L , 则 $P = L/N$ 。

2.3 定位精度可靠度分析

在取件机械臂中,各运动构件的行程设置如下:X 轴滑台为 0 ~ 500 mm, Y 轴与 Z 轴滑台为 0 ~ 100 mm, 大口机械夹为 0 ~ 180°, 吸盘架为 0 ~ 90° ~ 180°。气缸定位块安装误差、电机定位误差、滑轨摆角误差与垂直度误差分别设为 0.08 mm、0.02 mm、 4×10^{-4} rad 与 0.6×10^{-4} rad^[16]。这里将设计要求定为机械臂执行末端的定位误差小于 0.6 mm 的可靠度大于 0.99, 即:

$$P(|\Delta E_1| < [\Delta E_1]) \geq 0.99 \quad (8)$$

假定各误差变量服从呈零均值的正态分布且相互独

立,采用蒙特卡洛法在 Matlab 中对误差模拟 10^5 次,得到 $\Delta E_{1x}, \Delta E_{1y}, \Delta E_{1z}$ 与 $|\Delta E_1|$ 的概率密度,如图 5 所示。

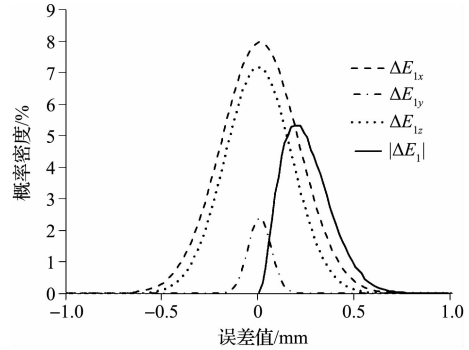


图5 各误差概率密度

由图 5 可得,机械臂在 X、Y、Z 3 个方向上的误差呈正态分布,但总误差呈正态分布。

分析结果如表 1 所示。

表1 静态误差仿真结果

误差项	标准差/mm	最大值/mm	可靠度
X 向误差	0.199	0.884	0.994
Y 向误差	0.06	0.263	1
Z 向误差	0.179 6	0.809	0.997
总误差 $ \Delta E_1 $	—	0.905	0.965

由表 1 可得,总误差最大值为 0.905 mm,可靠度为 0.965。可知其并未达到要求,需要对其进行优化。

2.4 取件机械臂误差敏感度分析

求解取件机械臂误差敏感度公式为^[17]:

$$s_i = \frac{\partial(|\Delta E_1|)}{\partial e_i} (i = 1, 2, \dots, 38) \quad (9)$$

式(9)表示总误差 $|\Delta E_1|$ 对各误差源 e_i 求偏导,

其中, $|\Delta E_1| = \sqrt{\Delta E_{1x}^2 + \Delta E_{1y}^2 + \Delta E_{1z}^2}$ 。

为了更好地分析各误差源,本研究使用式(10)对 S_i 进行归一化处理,得到误差敏感度系数 K_i ,结果如图 6 所示。

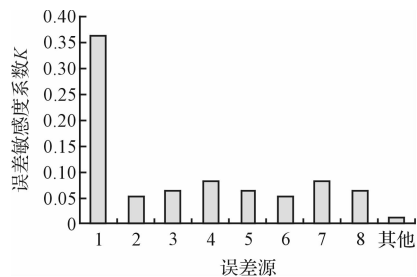


图6 机械臂末端总误差敏感度

X 轴坐标 1 至 8 依次为 $\Delta\alpha_x, \Delta\beta_x, \Delta\gamma_x, \Delta\alpha_z, \Delta\gamma_z, \Delta\beta_z, \Delta\alpha_y, \Delta\gamma_y$ 。由图 6 可知,总共有 8 项误差对 $|\Delta E_1|$ 的影响较大,其中 X 导轨绕 X 轴的转角误差对 $|\Delta E_1|$ 的影响最大,其他的误差影响则相对较小:

$$K_i = \frac{|s_i|}{\sum |s_i|} \quad (10)$$

3 取件机械臂定位精度的优化

从上文的结果中可以看出,在单独考虑静态误差的情况下,取件机械臂的定位精度不能满足要求。由于静态误差与动态误差共同影响了定位精度,故本研究在优化时需要将动态误差的因素考虑进去。

3.1 动态误差设计变量

这里的动态误差是指机械臂在运动过程中受到重力及外力作用而产生的形变,因此需要通过设计结构参数来进行优化。取件机械臂的结构简图如图 7 所示。

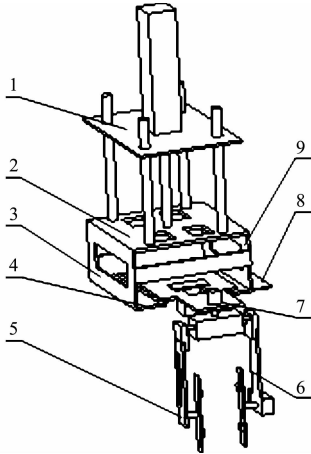


图 7 取件机械臂结构简图

1—X 轴滑台;2—Z 轴滑台上固定板;3(9)—Z 轴滑台连接板;4(8)—Z 轴滑台下固定板;5(6)—机械夹固定板;7—Y 轴滑台

为了让机械臂结构更加紧凑,本研究将下图各板的长度与宽度都设计得尽量小,而将各板的厚度作为设计变量。变量为 $x_2 = \{a, b, c, e, f, h\}$, 分别对应图中的 1、2、3(9)、4(8)、5(6)、7。由于 3 和 9、4 和 8、5 和 6 为对称布置,故设为同一个变量。

3.2 建立动态误差与静态误差耦合模型

3.2.1 动态误差模型

本研究采用响应面法对动态误差建立近似模型,采用拉丁超立方设计法进行采样,样本点为 300 个,独立随机选取 31 个误差样本进行分析,从而得出了体积 V , 总动态误差 $|\Delta E_2|$, 动态误差的各个分量 ΔE_{2x} , ΔE_{2y} , ΔE_{2z} 的表达式,即动态误差模型:

$$y_k = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_M x_M + \beta_{M+1} x_1^2 + \dots + \beta_{2M} x_{2M}^2 + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (11)$$

式中: y_k —各输出量,即 V 、 $|\Delta E_2|$ 、 ΔE_{2x} 、 ΔE_{2y} 、 ΔE_{2z} ; M —变量个数; β_i —系数; x_j —各设计变量,即 a 、 b 、 c 、 e 、 f 、 h 。

由于单独设计结构参数会导致机构的质量(体积)过大,在设计动态误差时需要控制体积,故将体积 V 作为设计目标。

体积的数学模型误差如表 2 所示。

表 2 体积的数学模型误差

目标	平均误差	最大误差	均方根误差	拟合优度
V	$5.57E-7$	$1.9E-6$	$6.8E-7$	1

总动态误差的数学模型误差如表 3 所示。

表 3 总动态误差的数学模型误差

目标	平均误差	最大误差	均方根误差	拟合优度
$ \Delta E_1 $	0.02	0.044	0.025	0.99

由表 2、表 3 可得,两输出量的平均误差小于 0.02,拟合优度大于 0.99,故近似模型符合要求。

3.2.2 动态误差与静态误差的耦合模型

由于机械臂各构件具有一定刚度,故静态误差与动态误差可以进行线性叠加^[18-19],定位误差如下式所示:

$$|\Delta E| = \left[\frac{(\Delta E_{1x} + \Delta E_{2x})^2 + (\Delta E_{1y} + \Delta E_{2y})^2 + (\Delta E_{1z} + \Delta E_{2z})^2}{2} \right]^{-2} \quad (12)$$

式中: ΔE_{1i} 、 ΔE_{2i} —静态误差与动态误差在各个方向的分量,下标 $i = x, y, z$ 。

3.3 定位精度优化设计

优化模型如下式所示:

$$\begin{cases} \text{find } x_1 = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}) (n = 38) \\ \text{find } x_2 = (a, b, c, e, f, h) \\ \text{Min } V \\ \text{Min } \cos t(x_{1i}) = \sum_{i=1}^n k_i (\lambda_i x_{1i})^{-\alpha_i} (n = 38) \\ \text{s. t. } P(|\Delta E| \leq 0.6) \geq 0.99 \\ x_{1i}^{\min} \leq x_{1i} \leq [\Delta E_1] \\ x_{2\min} \leq x_2 \leq x_{2\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: x_1 、 x_2 —静态误差源与结构参数的集合, $x_1 = \{\Delta x_x, \Delta y_x, \Delta z_x, \Delta \alpha_x, \Delta \beta_x, \Delta \gamma_x, \Delta x_y, \Delta y_y, \Delta z_y, \Delta \alpha_y, \Delta \beta_y, \Delta \gamma_y, \Delta x_z, \Delta y_z, \Delta z_z, \Delta \alpha_z, \Delta \beta_z, \Delta \gamma_z, \Delta x_c, \Delta y_c, \Delta z_c, \Delta \alpha_c, \Delta \beta_c, \Delta \gamma_c, \Delta x_d, \Delta y_d, \Delta z_d, \Delta \alpha_d, \Delta \beta_d, \Delta \gamma_d, \Delta \beta_{xz}, \Delta \alpha_{zy}, \Delta \alpha_{cy}, \Delta \beta_{dz}, \Delta \gamma_{xy}, \Delta \beta_{xc}, \Delta \gamma_{dy}, \Delta \beta_{dc}\}$; 目标为体积与成本最小。成本公式^[20]中: k_i —各设计变量的权重系数,本研究将敏感度系数设为权重系数^[21]; λ_i —转角误差量纲转化为线误差量纲系数^[22],当 x_i 为线误差时, λ_i 为 1,当 x_i 为转角误差时, λ_i 为 57.2; 约束为定位误差小于 0.6 mm 的可靠度大于 0.99; 对于单个静态误差值 x_{1i} 的取值范围,以经验设计值为下限 $x_{1i}^{\min}$,以设计要求的精度最大值为上限为 $[\Delta E_1]$; $x_{2\min}$ 、 $x_{2\max}$ —结构参数取值的上、下限。

本研究采用 Isight 集成 Matlab 的方法,首先在 Matlab 模块中使用蒙特卡洛仿真求解定位精度可靠度,随后在计算器模块中求解成本、体积与动态误差,最后在优化模块中使用 NCGA-II 算法对精度进行优化。

部分优化结果如表(4~8)所示。

由表(4~6)可知,总体上敏感度高的误差源得到了控制,敏感度低的得到了适当的放大,符合误差敏

感度分析。由表8可知,动态误差与静态误差都得到了控制,可靠度由0.901提高至0.99,达到了要求,成本降低了15%,体积降低了7.6%,工作与经济性都得到了较好的提高。

表4 线误差设计优化结果

	Δx_x	Δx_y	Δz_y
初始值/mm	0.023	0.022	0.026
优化值/mm	0.075	0.052	0.027

表5 转角误差设计优化结果

	$\Delta \alpha_x$	$\Delta \beta_x$	$\Delta \gamma_y$
初始值/ $\times 10^{-4}$	1.45	3.9	3
优化值/ $\times 10^{-4}$	1.3	1.6	4.5

表6 垂直度误差设计优化结果

	$\Delta \beta_{xz}$	$\Delta \alpha_{cy}$	$\Delta \gamma_{dy}$
初始值/ $\times 10^{-4}$	1	0.9	2
优化值/ $\times 10^{-4}$	1.2	0.8	2.3

表7 结构参数设计优化结果

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>h</i>
初始值/mm	8.7	12.6	15	13.4	5	5.8
优化值/mm	6	12.3	8.4	12.4	5	10.9

表8 定位精度优化结果

	$ \Delta E_2 $	$ \Delta E_1 $	$ \Delta E $	体积/ mm^3	成本
	最大值/mm	可靠度	可靠度		
优化前	0.48	0.965	0.901	1.39×10^7	2.19×10^4
优化后	0.46	0.998	0.99	1.31×10^7	1.86×10^4

4 结束语

本研究针对取件机械臂存在的绝对定位精度低、成本高等问题,采用基于定位精度可靠度的评价方法对机械臂进行了可靠性优化设计。本研究在采用蒙特卡洛法对取件机械臂定位精度进行可靠性分析、得到其定位精度不能满足要求的分析结果的基础上,考虑动态误差与静态误差的耦合,确定了动静态误差的耦合模型,并基于此建立了定位精度的优化模型,通过对结构参数与静态误差源进行设计使其定位精度得到了优化。

仿真结果表明,若仅单独考虑静态误差,机械臂的定位精度可靠度为0.965,未达到0.99的要求;对结构参数和静态误差源进行优化设计后,动态误差最大值降低了4.2%,静态误差的精度可靠度上升了3.4%,机械臂定位精度可靠度提高到0.99,成本与体积分别降低了15%与7.6%,机械臂的工作性能和经济性都得到了提高。

参考文献(References):

[1] 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.

[2] 刘俊,高乐,范永威.搬砖机械手的动力分析及结构优化[J].制造业自动化,2011,33(8):10-12,20.

[3] 李翠玲,王耿华,杨强,等.五轴机床机构运动精度的可靠性分析[J].机械设计与制造,2013(1):201-202,206.

[4] 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.

[5] 顾井峰,冯蕴雯,冯元生.任意空间四连杆机构运动精度及其可靠性分析[J].机械科学与技术,2012,31(5):814-817.

[6] 邱彪,黄美发,宫文峰,等.用于精度设计的倒装芯片键合机几何误差建模[J].机床与液压,2014,42(13):118-122.

[7] 刘以倩,孟庆杰.龙门式多轴联动机床的几何误差建模[J].机械设计,2012,29(8):64-68.

[8] 贺甲,田学光,张德龙,等.基于休斯敦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.

[9] 张曙,张炳生,卫美红.机床静态精度设计与测量[J].制造技术与机床,2012(3):5-8.

[10] 韩飞飞,赵继,张雷,等.数控机床几何精度综合解析与试验研究[J].机械工程学报,2012,48(21):141-147.

[11] 李轩.基于多体系统运动学理论的三坐标数控机床加工误差研究[D].济南:山东大学机械工程学院,2009.

[12] 李欣悦.主从异构手术机器人运动误差分析[D].天津:天津大学机械工程学院,2007.

[13] 陈胜军,贾方.曲柄滑块机构运动精度的概率分析与计算[J].机械设计与制造,2013(7):203-206.

[14] 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.

[15] 杨成福.冲压设备自动送料系统运动精度可靠性评价技术研究[D].南京:南京理工大学机械工程学院,2013.

[16] 上银科技.线性滑轨与滚珠螺杆技术手册[M].台湾:上银科技股份有限公司,2014.

[17] 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.

[18] 焦国太,冯永和,王锋,等.多因素影响下的机器人综合位姿误差分析方法[J].应用基础与工程科学学报,2004,12(4):435-442.

[19] 李洪超,张伟中,李寅翔,等.固定电机驱动的平面关节型机器人无参数运动学标定[J].轻工机械,2015,33(6):55-58.

[20] 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.

[21] 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.

[22] 赵强,阎绍泽.基于敏感度的运动模拟台误差综合[J].中国机械工程,2006,17(5):478-48

[编辑:张豪]

本文引用格式:

劳可名,曾庆锋.取件机械臂定位精度的可靠性优化研究[J].机电工程,2017,34(7):725-729.