

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.10.003

数控机床传动机构精度可靠性优化研究^{*}

徐 琦, 罗路平^{*}, 夏 力

(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:针对数控机床误差溯源不充分导致精度低、可靠性差等问题,对数控机床误差建模、精度可靠性分析、精度优化设计等方面进行了研究。基于多体系统理论建立了数控机床空间几何误差模型,分别对数控机床各方向传动机构进行了结构分析,建立了多层映射误差传递模型;基于数控机床传动机构精度可靠性函数,应用一次二阶矩法对含混合不确定性的数控机床传动机构开展了精度可靠性分析;以可靠性分析结果作为精度性能判断标准,结合灵敏度分析结果,建立了以制造成本最低为优化目标、满足精度要求为约束的精度分配优化模型,并利用遗传算法和蒙特卡洛法进行了数控机床传动机构的精度分配优化。研究表明:经过精度分配优化后,某数控机床传动机构精度可靠性由 96.89% 提高到 99.87%,制造成本降低 34.74%。

关键词:数控机床;多层映射模型;精度可靠性分析;精度可靠性优化

中图分类号:TH115;TH161

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)10-1030-07

Optimization of precision reliability for the transmission mechanism of NC machine

XU Qi, LUO Lu-ping, XIA Li

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

Abstract: Aiming at the problems of low precision, poor reliability caused by inadequate error tracing of the transmission mechanism of NC machine, the error modeling, precision reliability analysis and precision reliability of NC machine were researched. The space geometric error model of NC machine was established based on the multi-body system theory, through structure tracing of the transmission mechanism, the multi-layer mapping error transfer model of transmission mechanism was established. Based on the precision reliability function of the transmission mechanism of NC machine, the precision reliability analysis of mixed uncertain of the transmission mechanism of NC machine was carried out via the first order two order moment method (FOSM). The reliability analysis result which was used as the standard of precision performance judgment, combined with the results of sensitivity analysis, the optimization model of precision distribution was established, which takes the lowest manufacturing cost as the optimization goal and satisfies the requirement of precision as the constraint. The genetic algorithm and Monte Carlo method were used to optimize the precision distribution of the transmission mechanism of NC machine. The results indicate that, after precision distribution optimization, the precision of transmission mechanism of NC machine is optimized from 96.89% to 99.87%, and the manufacturing cost is reduced by 34.74%.

Key words: NC machine; multi-layer mapping mode; precision reliability analysis; precision reliability optimization

0 引 言

数控机床为先进制造行业的基础装备,其加工精度及可靠性决定了我国机床制造业的水平。数控机床

实际加工过程中,存在许多类型各异、产生原因复杂的不确定性误差,常常导致数控机床精度低、可靠性差等问题。常见机床误差主要分为几何误差、热误差、切削力误差、运动误差、夹具误差、伺服误差等。其中,当温

收稿日期:2018-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51475425);浙江省自然科学基金青年基金项目(LQ18E050014)

作者简介:徐 琦(1993-),女,浙江绍兴人,硕士研究生,主要从事数控机床精度可靠性分析方面的研究。E-mail:xuqi0420@163.com

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

度变化较稳定时,几何误差是最重要的误差因素之一,约占总误差的 40%^[1-2],因此在机床研制过程中,优化几何误差能有效提高机床精度可靠性。

近年来,数控机床精度可靠性优化受到了国内学者的广泛关注,如郑财、黄贤振等^[3]基于多系统理论建立的数控机床空间几何误差模型,运用改进的一次二阶矩法和蒙特卡洛法,进行了三轴数控机床空间加工精度可靠性计算;李翠玲^[4]、贾丹丹^[5]等基于多系统理论,建立了数控机床的误差模型,结合随机输入误差,进行了机构运动精度可靠性计算;田文杰^[6]、刘恩^[7]等利用激光干涉仪基于九线法检测,通过几何误差辨识模型,对数控机床运动轴几何误差进行了溯源,为机床精度优化提供了理论指导;韩飞飞^[8]借助球杆仪对平面综合误差进行圆检验,分析了工件坐标系下综合误差分量与球杆仪半径变化之间的关系,获得了圆偏差产生的各项因素及所占比例,通过机床硬件调整、修理、更换,快速提高机床的精度性能。

综上所述,目前学者们大多是基于建立的数控机床空间误差模型及仪器测量的方式,确定较简单的数控机床的几何误差值,并未根据数控机床传动机构的结构,进行几何误差的深层溯源确定。

本文以某数控机床传动机构为研究对象,在机床空间误差建模的基础上,根据影响因素误差多层映射模型,得到 X、Y、Z 轴 3 个方向上的传动机构主要零部件参数与机床空间几何误差的传递模型;利用一次二阶矩法进行混合几何误差精度可靠度分析,结合可靠度灵敏度分析,实施数控机床传动机构精度可靠性优化,确定机床传动机构几何误差的精度参数。

1 某数控机床几何误差建模

1.1 基于多系统理论的数控机床几何误差建模

某数控机床为三轴伺服直联控制半闭环立式加工中心。三轴均为钢球滚动直线导轨,采用高精度高强度的内循环双螺母预压大导程滚珠丝杠,且主轴通过同步带驱动伺服电机,其机构简图如图 1 所示。

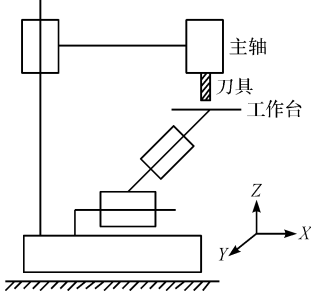


图 1 某数控机床机构简图

以数控机床床身为参考体进行标定的拓扑结构图如图 2 所示。

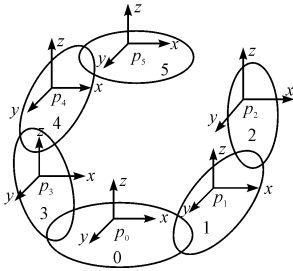


图 2 拓扑结构图

0—床身;1—X 向滑台;2—Y 向工作台;3—Z 向导轨;4—主轴;5—刀具

结构包括床身—工作台运动链和床身—刀具运动链,在此基础上建立基于多系统理论的数控机床几何误差模型^[9]。

数控机床的几何误差主要为移动轴在运动中存在 6 项误差,包括 3 个线性误差 $\delta_m(n)$ 和 3 个转动误差 $\varepsilon_m(n)$,分别表示沿 n 轴方向运动的导轨副在 m 轴方向上的直线误差和绕 m 轴的转角误差,导轨 X 轴方向的 6 项误差,以及不同导轨之间存在垂直度误差 S_{xy} 、 S_{yz} 和 $S_{zx}^{[10]}$,共 21 项几何误差。

导轨 X 轴方向的 6 项误差如图 3 所示。

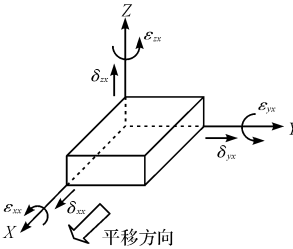


图 3 导轨 X 轴方向的 6 项误差

由位姿变化矩阵传递法则可知^[11],点 K_i 在相邻低序体 G 坐标系中的位置坐标可以表示为:

$$P_G^{K_i} = T_{SG} \times T_{KS} \times P_{K_i}$$
 (1)

式中: T_{SG} —高序体 S 与相邻低序体 G 之间的位姿变换矩阵; T_{KS} —高序体 K 与相邻低序体 S 之间的位姿变换矩阵; P_{K_i} —点 K_i 在体 K 坐标系中的位置坐标。

因此,数控机床移动轴在经过微小移动和转动后,位姿误差变换矩阵和垂直度误差变换矩阵分别为:

$$T(n) = \begin{pmatrix} 1 & -\delta_z(n) & \delta_y(n) & \Delta x(n) \\ \delta_z(n) & 1 & -\delta_x(n) & \Delta y(n) \\ -\delta_y(n) & \delta_x(n) & 1 & \Delta z(n) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_{xy} = \begin{pmatrix} 1 & -S_{xy} & 0 & 0 \\ S_{xy} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} R_{yz} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -S_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ R_{zx} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & S_{zx} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_{zx} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ —变换过程中沿 X, Y, Z 轴的微小移动量。

根据几何误差变化方法,相邻序体间实际(有误差)运动的变换矩阵可表示为:

$$T_{ij} = T_{ijp} \Delta T_{ijp} T_{ijs} \Delta T_{ijs} \quad (6)$$

式中: T_{ijp} —序体相对静止的理想位置变换矩阵; ΔT_{ijp} —序体相对静止的实际位置变换矩阵; T_{ijs} —序体相对运动的理想位置变换矩阵; ΔT_{ijs} —序体相对运动的实际位置变换矩阵。

故数控机床的各序体之间的空间位置误差转换矩阵可以表示为: $T_{01} = R_{yz} T(x), T_{12} = R_{xy} T(y), T_{03} = R_{zx} T(z), T_{34} = I_{4 \times 4}, T_{45} = I_{4 \times 4}$ 。

设刀具上的成型点在刀具坐标系中的齐次坐标为 $P_i = (p_{ix}, p_{iy}, p_{iz}, 1)^T$, 在工件坐标系内理论位置变化曲线为 $P_w = (p_{wx}, p_{wy}, p_{wz}, 1)^T$, 因此数控机床空间位置误差可表示如下:

$$E = T_{01} T_{12} P_w - T_{03} T_{34} T_{45} P_i = (E_x, E_y, E_z, 1)^T \quad (7)$$

式中: E_x, E_y, E_z —数控机床 X, Y 和 Z 轴 3 个方向位置误差。

1.2 数控机床传动机构几何误差建模

本研究根据数控机床误差传递结构,建立能直观反映数控机床零部件与数控机床末端位姿精度耦合和递进影响关系的影响因素多层映射模型图,如图 4 所示。

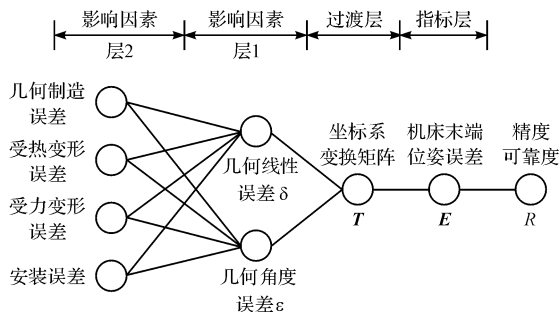


图 4 数控机床传动机构精度可靠性影响因素多层映射模型

本研究根据该模型图确定数控机床传动机构主要零部件参数与数控机床空间几何误差项的传递关系,建立更为具体、精确的数控机床传动机构的空间几何误差传递模型,为精度可靠性优化打下基础。

针对影响因素层 1 和 2,将数控机床传动机构简化为控制电机—齿轮减速机构—滚珠丝杠—工作台/刀具,数控机床传动机构结构示意图如图 5 所示。

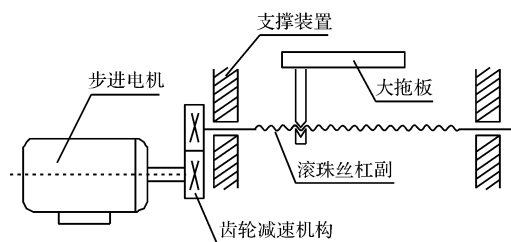


图 5 数控机床传动机构结构示意图

由图可知:滚珠丝杠的几何误差将最直接影响工作台或者刀具的几何误差。为了适当简化分析模型,本研究通过对 X, Y, Z 轴 3 个方向上的滚珠丝杠副进行具体分析,确定滚珠丝杠几何误差与数控机床 21 项几何误差的对应关系。

以 X 轴朝向的滚珠丝杠为例进行分析,根据国家标准和现有研究可得如下公式:

$$\delta_x(x) = \Delta x_p + \Delta l_{\frac{b}{t}, pt} + \Delta l_{K_T} + \Delta l_t + \Delta x_b \quad (8)$$

$$\delta_z(x) = \Delta x_a \quad (9)$$

$$\varepsilon_x(x) = \Delta \theta = \prod_{i=1}^n \Delta \theta_i \quad (10)$$

$$\varepsilon_y(x) = \arctan \frac{\delta_z(x)_{\max} - \delta_z(x)_{\min}}{L_x} \quad (11)$$

$$\varepsilon_z(x) = \arctan \frac{\delta_y(x)_{\max} - \delta_y(x)_{\min}}{L_x} \quad (12)$$

式中: Δx_p —行程误差^[12],为某一固定值,属于系统制造误差, μm ; $\Delta l_{\frac{b}{t}, pt}$ —在对称预载荷作用下,滚珠与滚道接触点处的轴向弹性接触变形量^[13], μm ; $\Delta l_{b/t, pt} = (F_p/ki)^{2/3}$, 其中: F_{pt} —滚珠螺母和滚珠丝杠的对称预载荷, k —滚珠丝杠副一圈受载滚道的刚度特性系数, i —承载滚珠的圈数,属于受力变形误差; Δl_{K_T} —丝杠扭矩变形引起的轴向变形^[14], $\Delta l_{K_T} = M/K_T \times (P_h/2\pi) \times 10^3 = \theta \times (P_h/2\pi) \times 10^3$, μm (其中: M —滚珠丝杠螺母处摩擦扭矩载荷, K_T —丝杠扭转刚度, θ —扭转角,属于受力变形误差); Δl_t —丝杠热变形误差^[15], $\Delta l_t = T_t \times (t_2 - t_1) \times L \pm (FL/AE)$, μm (其中: T_t —工件线膨胀系数; A —轴向力作用面积; E —弹性模量;属于受热变形误差); Δx_a —由安装误差引起的径向变形^[16],属于系统误差且为某一固定值,属于安装误差, μm ; Δx_b —由安装误差引起的轴向变形,属于系统误差且为某一固定值,属于安装误差, μm ; $\Delta \theta_i$ —电机、减速机构等各自精度, $\Delta \theta_i = 360^\circ/f$ (其中: f —脉冲频率,弧秒; L_x — X 轴传动机构的滚珠丝杠长度, mm)。

已知数控机床传动机构的滚珠丝杠几何参数如表 1 所示。

表 1 滚珠丝杠几何参数

几何参数	数值	几何参数	数值
公差等级	4 级	小径/mm	33
导程/mm	10	公称直径/mm	40
额定动载荷/N	30 000	刚度特性系数	1
线膨胀系数	1.2×10^6	温升/(℃)	3 ~ 5
承载圈数	3	滚珠丝杠长度/mm	650
减速器精度/(°)	0.05	电机脉冲数/ppr	4 000

根据式(8 ~ 12) 中各误差参数计算公式可得数控机床 X 轴误差参数分布情况,如表 2 所示。

表 2 误差参数分布(直线误差:μm,角度误差:弧秒)

变量	分布	参数	变量	分布	参数
Δx_p	正态	$N(7,0.5)$	$\Delta l_{b/t,\mu}$	区间	$[-50,50]$
Δl_{KT}	定值	0	Δl_t	区间	$[2.1,3.9]$
Δx_a	正态	$N(29,0.5)$	Δx_b	正态	$N(5,0.5)$
$\Delta \theta_i$	区间	$[-16.2,16.2]$			

将表 2 中各误差参数代入式(8 ~ 12),确定数控机床 X 轴传动机构的几何误差分布情况,同理可得数控机床 Y 轴和 Z 轴传动机构的几何误差及对应的垂直度误差。

数控机床传动机构 21 项几何误差参数及编号如表 3 所示。

表 3 数控机床传动机构 21 项几何误差参数及编号
(直线误差:μm,角度误差:弧秒)

误差编号	误差参数	分布参数
1	$\delta_x(x)$	$[-35.8,65.9]$
2	$\delta_y(x)$	$N(29,0.5)$
3	$\delta_z(x)$	$N(29,0.5)$
4	$\varepsilon_x(x)$	$[-16.2,16.2]$
5	$\varepsilon_y(x)$	$N(18.4,0.3)$
6	$\varepsilon_z(x)$	$N(18.4,0.3)$
7	$\delta_x(y)$	$N(29,0.5)$
8	$\delta_y(y)$	$[-36.7,64.4]$
9	$\delta_z(y)$	$N(29,0.5)$
10	$\varepsilon_x(y)$	$N(29,0.5)$
11	$\varepsilon_y(y)$	$[-16.2,16.2]$
12	$\varepsilon_z(y)$	$N(29.9,0.5)$
13	$\delta_x(z)$	$N(29,0.5)$
14	$\delta_y(z)$	$N(29,0.5)$
15	$\delta_z(z)$	$[-35.4,65.0]$
16	$\varepsilon_x(z)$	$N(23.9,0.4)$
17	$\varepsilon_y(z)$	$N(23.9,0.4)$
18	$\varepsilon_z(z)$	$[-16.2,16.2]$
19	S_{xy}	$N(5.8,0.3)$
20	S_{yz}	$N(3.0,0.3)$
21	S_{zx}	$N(2.7,0.3)$

将表 3 数值代入公式(7) 可得到数控机床在 X、Y、Z 轴 3 个方向的总误差 E_x 、 E_y 和 E_z 。

2 数控机床传动机构精度可靠性分析

2.1 传动机构几何误差精度极限状态函数

设 I 为数控机床传动机构的最大几何误差,则数控机床传动机构几何误差精度可靠性极限状态函数为:

$$G = |I^* - E_i^*(X,Y)| \tag{13}$$

式中: * — 误差方向(“+” — 沿运动方向;“−” — 沿运动反方向),同方向误差值进行判断; $i = x,y,z$; X — 随机变量向量; Y — 区间变量向量。

由式(7) 可知:当数控机床位置坐标 x,y,z ,刀具成型点坐标 P_t 和 P_w 已知时,极限状态函数 G 中变量为:

$$X = (\delta_y(x),\delta_z(x),\varepsilon_y(x),\varepsilon_z(x),\delta_x(y),\delta_z(y),\varepsilon_x(y),\varepsilon_z(y),\delta_x(z),\delta_y(z),\varepsilon_x(z),\varepsilon_y(z),S_{xy},S_{yz},S_{zx})$$
$$Y = (\delta_x(x),\varepsilon_x(x),\delta_y(y),\varepsilon_y(y),\delta_z(z),\varepsilon_z(z))$$

2.2 基于一次二阶矩的混合几何误差精度可靠性计算

数控机床传动机构精度性能可以通过极限状态函数值是否大于 0 来决定,当 $G < 0$ 时,系统失效,故失效概率可表示为:

$$p_f = \Pr\{|I^* - E_i^*(X,Y)| < 0\} \tag{14}$$

式中: $\Pr\{\cdot\}$ — 概率。

可靠度可表示为:

$$R = \Pr\{I^- < E_i(X,Y) < I^+\} = 1 - p_f \tag{15}$$

由于区间变量 Y 的存在,数控机床传动机构的误差 E_i 在空间中是由两个极限边界面组成的极限状态带,根据条件概率公式,可得失效概率的最大值和最小值:

$$Pr_{f,\max} = \Pr\{[E_i(X,Y)]_{\max} - I^- < 0\} + \Pr\{I^+ - [E_i^+(X,Y)]_{\min} < 0\} - 1$$
$$Pr_{f,\min} = \Pr\{[E_i(X,Y)]_{\min} - I^- < 0\} + \Pr\{I^+ - [E_i^+(X,Y)]_{\max} < 0\} - 1 \tag{16}$$

根据一次二阶矩法,失效概率的最值计算公式又可以采用文献[17] 的方法进行计算,即:

$$p_f = \Phi(\pm \sqrt{(u^*)^T u^*}) \tag{17}$$

式中: u^* — 最大概率点。

某数控机床传动机构在经过伺服系统控制状态下的精度要求:X、Y、Z 轴定位精度为 0.1 mm,以此为条件,可求得该数控机床传动机构精度可靠度,如表 4 所示。

表 4 数控机床传动机构精度可靠度

传动轴	可靠度	
	$R_{\min}$	$R_{\max}$
X 轴	0.950 0	0.972 9
Y 轴	0.983 0	0.952 1
Z 轴	0.973 3	0.982 0

由表可知:数控机床传动机构在不同移动方向上的精度可靠性均值为 96.89%,最小值为 95.21%,精度可靠性较低,需要对各误差进行合理控制。

3 精度可靠性灵敏度分析及优化

3.1 精度可靠性灵敏度分析

由于所有误差的分布类型、分布参数都将对可靠性的灵敏程度产生影响,本研究通过可靠性灵敏度分析确定各误差的分布参数灵敏度程度。

本文主要通过数控机床传动机构在 X、Y、Z 轴 3 个方向上的总误差 E_i 对各个误差 $\Delta e_j = \{\delta_k, \varepsilon_l, S_m\}$ 求偏导,得到数控机床传动机构各几何误差的灵敏度^[18]:

$$s_j = \left| \frac{\partial(\Delta E_i)}{\Delta e_j} \right| (j = 1, 2, \dots, 21) \tag{18}$$

对灵敏度进行归一化处理,得到对应灵敏度系数:

$$S_j = \frac{|s_j|}{\sum |s_j|} (j = 1, 2, \dots, 21) \tag{19}$$

由式(7,18 ~ 19),可求得 21 项几何误差的灵敏度系数,如图(6 ~ 8) 所示。

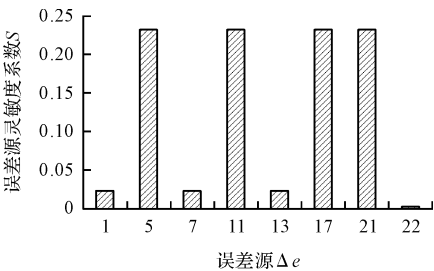


图 6 X 轴方向误差源灵敏度系数

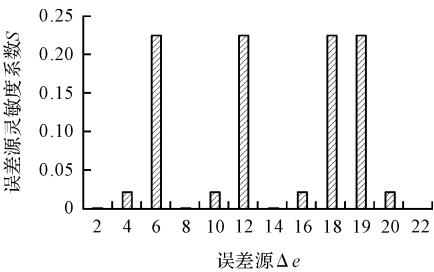


图 7 Y 轴方向误差源灵敏度系数

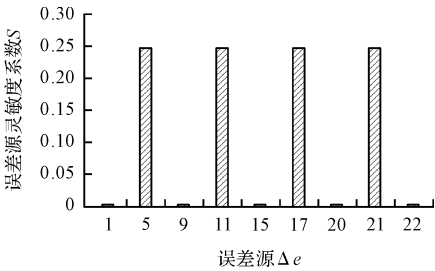


图 8 Z 轴方向误差源灵敏度系数

由图(6 ~ 8) 可以看出:X 轴和 Z 轴方向上, $\varepsilon_y(x)$ 、 $\varepsilon_y(y)$ 、 $\varepsilon_y(z)$ 、 S_{zx} 的灵敏度较高,Y 轴方向上, $\varepsilon_z(x)$ 、 $\varepsilon_z(y)$ 、 $\varepsilon_z(z)$ 、 S_{xy} 的灵敏度较高。

误差源编号如表 3 所示。并将灵敏度系数较小的误差源合并,编号为 22。

3.2 精度可靠性优化

基于可靠性灵敏度分析结果,本研究对数控机床传动机构 21 项几何误差的精度分配进行优化设计。

3.2.1 精度优化模型

本研究以制造成本最小化为优化目标,建立数控机床传动机构几何误差的精度分配的优化模型^[19]:

$$\text{Min Cost}(x) = \sum_{i=1}^n k_i (\lambda_i x_i)^{\alpha_i} (i = 1, 2, \dots, 21) \tag{20}$$

式中: x_i —各项几何误差值; k_i —各变量的成本权重系数。

在设计制造阶段,不能精确给出数值,因此笔者对其进行定性估计,本研究以 3 个方向上最大灵敏度为成本系数,进行归一化处理,得到相应的成本权重系数^[20-22]; λ_i —线位移和角位移量纲同一化系数,线位移量纲为 $\lambda_i = 1$,角位移量纲为 $\lambda_i = 57.2$ ^[23]; α_i —公差特征指数,取 $\alpha_i = 2$ 。

设计变量即为各项几何误差项,可表示为:

$$x = (\delta_x(x), \delta_y(x), \delta_z(x), \varepsilon_x(x), \varepsilon_y(x), \varepsilon_z(x), \delta_x(y), \delta_y(y), \delta_z(y), \varepsilon_x(y), \varepsilon_y(y), \varepsilon_z(y), \delta_x(z), \delta_y(z), \delta_z(z), \varepsilon_x(z), \varepsilon_y(z), \varepsilon_z(z), S_{xy}, S_{yz}, S_{zx})$$

根据数控机床传动机构精度要求,X、Y、Z 轴传动方向上的误差约束条件可表示为:

$$\begin{cases} E_x < [E_x] = 0.1 \text{ mm} \\ E_y < [E_y] = 0.1 \text{ mm} \\ E_z < [E_z] = 0.1 \text{ mm} \end{cases} \tag{21}$$

根据各项误差源的分布情况,单个误差源的约束条件可表示为:

$$x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max} \tag{22}$$

3.2.2 精度可靠性优化结果对比

数控机床传动机构几何误差分配优化的目的是在

满足约束条件下寻找制造成本的最优解。本研究基于 Matlab 编程,采用遗传算法进行误差分配优化,配置参数:初始种群数为 200,随机均匀分布,按 0-1 二进制杂交,杂交概率为 0.8,双向迁移,运行 100 代停止,运行求解;采用蒙特卡洛抽样法求解每组精度分配值的精度可靠性。

分配优化结果如表 5 所示。

表 5 数控机床传动机构 21 项几何误差分配优化结果
(直线误差:μm,角度误差:弧秒)

误差编号	误差参数	分布参数
1	$\delta_x(x)$	43.5
2	$\delta_y(x)$	28.0
3	$\delta_z(x)$	27.9
4	$\varepsilon_x(x)$	-15.3
5	$\varepsilon_y(x)$	19.3
6	$\varepsilon_z(x)$	19.2
7	$\delta_x(y)$	28.0
8	$\delta_y(y)$	22.6
9	$\delta_z(y)$	28.2
10	$\varepsilon_x(y)$	30.3
11	$\varepsilon_y(y)$	-16.2
12	$\varepsilon_z(y)$	30.3
13	$\delta_x(z)$	28.0
14	$\delta_y(z)$	28.5
15	$\delta_z(z)$	29.9
16	$\varepsilon_x(z)$	25.2
17	$\varepsilon_y(z)$	24.1
18	$\varepsilon_z(z)$	-16.2
19	S_{xy}	6.7
20	S_{yz}	3.9
21	S_{zx}	3.6

精度优化结果如表 6 所示。

表 6 数控机床传动机构精度优化结果

	优化前	优化后
X 轴可靠度	0.961 5	0.998 9
Y 轴可靠度	0.967 5	0.998 5
Z 轴可靠度	0.967 7	0.998 7
总成本	286 674	187 070

对比表(3,5)可知:各误差变量取值与初始误差均值存在偏离值,且灵敏度系数较大的误差偏离值相对更大,而灵敏度系数较小的误差偏离值相对较小。在满足精度要求的前提下,合理选择较大的误差参数,能更大程度地降低制造成本。

由表 6 可知:优化后,数控机床传动机构的精度可靠度平均值为 99.87%,最小为 99.85%,精度可靠度得到提高,成本从优化前的 286 674 降低到 187 070,降低 34.74%。由此可见,该方法能在满足精度可靠性的条件下有效地降低了制造成本,为设计制造过程中零部件精度选择提供了依据。

4 结束语

针对数控机床误差溯源不充分导致精度低、可靠性差等问题,本研究对数控机床误差建模、精度可靠性分析、精度优化设计等方面进行了研究,具体为:

(1)建立了数控机床几何误差模型,根据误差传递结构,建立了数控机床传动机构的几何误差传递模型和影响因素多层映射模型图,为数控机床传动机构精度可靠性分析和优化打下基础;

(2)结合数控机床传动机构精度可靠度影响因素的不确定性,运用基于一次二阶矩的混合几何误差精度可靠度分析方法,求解 X、Y、Z 轴 3 个运动方向的精度可靠性,以可靠度分析结果作为优化设计指标,全面地反映了几何误差对数控机床传动机构精度性能的影响;

(3)通过可靠性灵敏度分析,具体量化各误差变量对数控机床传动机构精度可靠度的影响程度,通过机床传动机构精度分配优化,使数控机床传动机构的精度可靠性达到 99.87%,成本降低 34.74%,为数控机床传动机构的精度设计、参数选型提供了更为针对、高效、合理的理论依据。

参考文献(References):

[1] 肖慧孝,姚晓栋,冯文龙,等.大型数控机床导轨直线度误差测量与实时补偿[J].机械科学与技术,2015,34(1):90.

[2] 王移风,汪琛琛,曹衍龙,等.数控机床几何误差的辨识研究[J].机械设计与制造,2014(2):136-139.

[3] 郑财,黄贤振,胡明伟.三轴数控机床加工精度可靠性及灵敏度分析[J].制造技术与机床,2017(1):54-59.

[4] 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.

[5] 贾丹丹.五轴数控机床运动精度可靠性分析与仿真[D].沈阳:东北大学机械工程与自动化学院,2011.

(下转第 1047 页)

本文引用格式: