

文章编号:0253-9993(2013)03-0505-07

基于 NSGA-II 算法任意分布参数刨链啮合运动精度 可靠性稳健设计

张 强^{1,2,3}, 付云飞¹

(1. 辽宁工程技术大学 机械工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116023; 3. 中国煤矿机械装备有限责任公司, 北京 100011)

摘 要:将可靠性优化设计理论、可靠性灵敏度技术和稳健设计方法相结合, 讨论了具有任意分布参数的刨链刨链与链轮运动精度可靠性稳健设计问题, 提出了可靠性稳健设计的数值计算方法, 在基本随机参数的前四阶矩已知的情况下, 采用 NSGA-II 算法编制计算机程序实现刨链啮合运动精度可靠性稳健优化设计, 基于所建立的刨链啮合运动模型, 给出运动机构的稳健优化设计实例, 验证该方法能够准确得到刨链啮合运动机构的设计信息。

关键词:刨链; 运动精度; 可靠性稳健优化; 灵敏度; NSGA-II 算法

中图分类号:TD421.6 **文献标志码:**A

Reliability-based robust design for kinematic accuracy of the plow plane chain mesh with arbitrary distribution parameters base on NSGA-II algorithm

ZHANG Qiang^{1,2,3}, FU Yun-fei¹

(1. College of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 3. China National Coal Mining Equipment Co., Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: By combining the reliability-based optimization design theory, the reliability sensitivity technique and the robust design method, the reliability-based robust design for the kinematic accuracy of the plow chain with arbitrary distribution parameters was discussed extensively. Subsequently, a numerical method for reliability-based robust design was proposed. Under the condition that the first four moments of basic random parameters are available, NSGA-II algorithm computer programs based on this model can be used to complete the reliability-based robust design for kinematic accuracy of plow chain accurately and quickly. Based on the proposed models, an example shows that the proposed method is practical and effective.

Key words: plow chain; kinematic accuracy; reliability-based robust optimization; sensitivity; NSGA-II algorithm

在传统的机构分析和设计过程中, 研究者经常采用确定的研究模型, 然而机构构件在加工过程、装配过程中难免产生误差, 机构在使用过程中, 还会出现热变形、装配误差、啮合受力不均衡等客观因素影响, 因此, 在实际使用时候, 理论上可行的结构, 往往结构尺寸的偏差, 很难达到设计要求, 在设计结构时, 设法减轻它们对加工精度对可靠性的影响却是相对容易, 也就是对结构加工精度可靠性稳健设计, 把结构精度

可靠度和可靠性灵敏度加入到目标函数之中, 使设计所得结构在具有高精度的同时具有较高的加工精度可靠性和稳健性。东北大学的张义民、黄贤根、贺向东等^[1-3]将可靠性设计理论、可靠性灵敏度技术和稳健设计方法相结合, 讨论平面连杆机构运动精度可靠性稳健问题, 提出了数值计算方法。长沙大学郭惠昕等^[4-7], 考虑杆的制造误差和运动间隙的影响, 提出平面连杆机构稳健设计方法。华东交通大学程贤福

收稿日期: 2012-07-09 责任编辑: 许书阁

基金项目: 辽宁省高等学校优秀人才支持计划资助项目(2008RC23); 辽宁省教育厅科研计划资助项目(L2011068); 工业装备结构分析国家重点实验室开放基金资助项目(GZ1107)

作者简介: 张 强(1980—), 男, 辽宁岫岩人, 副教授, 博士后。Tel: 0418-3350517, E-mail: lgdix042@126.com

等^[8-10]采用独立公差和信息公差等稳健设计关系,建立公差设计与文件设计的数学模型。湖南科技大学岳文辉等^[11-13]提出基于系统性能稳健偏差的文件设计优化方法。上海交通大学郑丞等^[14-17]结合合作博弈理论和装配产生公差稳健理论,提出一种 NASH 仲裁均衡的公差稳健设计方法。日本学者田口光一博士提出稳健设计方法,并很快在汽车行业得到了广泛应用,取得了良好的效果,随后欧美等国家掀起了研究稳健设计的热潮^[18-21]。本文综合考虑加工精度、可靠性以及可靠性稳健要求,结合可靠性优化设计、可靠性灵敏度设计和稳健设计理论,采用随机摄动法、Edgeworth 级数方法,以工程中刨煤机刨链与链轮啮合运动为例,提出一种结构配合加工精度可靠性稳健设计的数值计算方法^[22-24]。

1 刨链的运动精度模型

设刨链的输入、输出关系可由一组独立的运动方程描述 $F(\mathbf{U}, \mathbf{V}, \mathbf{L}) = 0$, 其中, F 为独立运动方程组; \mathbf{U} 为机构输出参数向量; \mathbf{V} 为机构输入参数向量; \mathbf{L} 为机构结构件参数向量。

采用矩阵法对机构运动精度分析得出:

$$\frac{\partial F}{\partial \mathbf{U}^T} \Delta \mathbf{U} + \frac{\partial F}{\partial \mathbf{V}^T} \Delta \mathbf{V} + \frac{\partial F}{\partial \mathbf{L}^T} \Delta \mathbf{L} = 0$$

$$\Delta \mathbf{U} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial \mathbf{U}^T} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial \mathbf{V}^T} \Delta \mathbf{V} + \frac{\partial F}{\partial \mathbf{L}^T} \Delta \mathbf{L} \end{bmatrix}$$

$$\Delta \mathbf{U} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{Y}$$

式中, \mathbf{A} 为灵敏系数矩阵; $\Delta \mathbf{Y}$ 为基本设计参数误差向量。

2 可靠性稳健设计

要计算可靠度或失效概率,需要知道概率密度函数或联合概率密度函数。但是由于缺少足够的试验数据,很难精确地确定设计参数的分布规律,即使是近似地指定概率分布,在大多数情况下也很难进行积分计算而获得可靠度或失效概率,而数值积分往往是不实用的。对于无法确定分布概型的情况,但有足够的资料来确定设计参数的前四阶矩(即均值、方差和协方差、三阶矩、四阶矩)时,作为可供选择的实用方法,可采用摄动法求得可靠性指标,然后应用四阶矩技术和 Edgeworth 级数及相应的经验修正公式^[22-24]把未知的状态函数的概率分布展开成标准的正态分布表达式,进而可以确定机械结构件的可靠度。根据 Edgeworth 级数方法,可以把服从任意分布的标准化了的随机参数的概率分布函数近似地展开成标准正态分布函数,即

$$F(y) = \Phi(y) - \Psi(y) \left[\frac{1}{6} \frac{\theta_g}{\sigma_g^3} H_2(y) + \frac{1}{24} \times \left(\frac{\eta_g}{\sigma_g^4} - 3 \right) H_3(y) + \frac{1}{72} \left(\frac{\theta_g}{\sigma_g^3} \right)^2 H_5(y) + \dots \right]$$

$H_j(y)$ 为 j 阶 Hermite 多项式,其递推关系为

$$\begin{cases} H_{j+1}(y) = yH_j(y) - jH_{j-1}(y) \\ H_0(y) = 1, H_1(y) = y \end{cases}$$

Edgeworth 级数可以任意精确地逼近随机参数的真实分布,通常取级数的前四项即可得到较好的近似。但是由于只取了级数的前四项,有时所模拟的近似分布函数与真实分布函数的偏差会使可靠度出现 $R > 1$ 的情况。计算实践表明,当有 $R > 1$ 情况出现时,采用下述经验修正公式要比使用 Edgeworth 级数所获得的计算结果更接近于 Monte Carlo 数值模拟结果;当没有 $R > 1$ 情况出现时,Edgeworth 级数可以获得足够精确的解。

$$R^*(\beta) = R(\beta) - \frac{R(\beta) - \Phi(\beta)}{\{1 + [R(\beta) - \Phi(\beta)]\beta\}^\beta}$$

可以看出,在推导过程中放松了对随机参数的分布概型的限制,使之更接近于工程实际。

当设计要求为 $P\{g(X) \geq 0\} \geq R_0$ 时,有 $R = P\{g(X) \geq 0\} \geq R_0$, 这里 R_0 是给定约束应满足的概率值,可靠度 R 由前述的 Edgeworth 级数或经验修正公式获得。概率优化设计模型就可以近似地转化如下的确定型模型来求解,即

$$\begin{aligned} \min f(X) &= E\{f(X)\} = f(\bar{X}) \\ R &\geq R_0 \\ q_i(X) &\geq 0, (i = 1, \dots, l) \\ h_j(X) &= 0, (j = 1, \dots, m) \end{aligned}$$

则结构稳定可靠性稳健设计问题可转为如下数学模型,即

$$\begin{aligned} \min f(X) &= \sum_{k=1}^n w_k f_k(\bar{X}) \\ R - R_0 &\geq 0, q_i(\bar{X}) \geq 0 \quad (i = 1, \dots, l) \end{aligned}$$

式中, w_k 为分目标 $f_k(\bar{X})$ 的加权因子, $w_k \geq 0$, 其值决定于各目标函数的数量级及重要程度,本文采用加权组合法来确定加权因子,取 $f_1(\bar{X})$ 为刨链的质量, $f_2(\bar{X})$ 为结构的稳定可靠度对设计参数向量 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 均值的灵敏度的平方和然后开方; R_0 为给定应满足要求的可靠度; $q_i(\bar{X})$ 为不等式约束。

3 刨链可靠性稳健优化设计

在绝对坐标系下,链轮在任意时刻的运动可以链

轮中心三维坐标系 O_0 在绝对坐标系 $Oxyz$ 的 x, y, z 轴的移动 u_0, v_0, w_0 和链轮在绝对坐标系下的方向角 $\varphi_0, \theta_0, \psi_0$ 确定。

$$\mathbf{q}_0 = \{u_0, v_0, w_0, \varphi_0, \theta_0, \psi_0\}^T = \{s_0, \Phi_0\}^T$$

链条缠绕链轮转动,绕 z 轴转动 ψ 角度,在 x, y 轴不转动,因此在动坐标系下的链轮的角速度矢量为

$$\boldsymbol{\omega}_0 = A_\psi \mathbf{e}_{x_0} + A_\theta \mathbf{e}_{y_0} + \psi' \mathbf{e}_{z_0}$$

式中, $\mathbf{e}_{x_0}, \mathbf{e}_{y_0}, \mathbf{e}_{z_0}$ 分别为沿着坐标轴 x_0, y_0, z_0 的单位矢量。

$$A_\psi = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\omega}_0 = \begin{bmatrix} \omega_{0x} \\ \omega_{0y} \\ \omega_{0z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \sin \psi + \sin \psi \\ -\sin \psi \cos \psi + \cos \psi \\ \psi' \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \psi \sin \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi \cos \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \psi' \\ 1 \end{bmatrix}$$

链环 j 的坐标中心 O_h^j 沿着绝对坐标系 $Oxyz$ 的 x, y, z 轴的移动 u_h^j, v_h^j, w_h^j 和链环在绝对坐标系下的方向角 $\varphi_h^j, \theta_h^j, \psi_h^j$ 确定。其运动坐标为 $\mathbf{q}_h^j = \{u_h^j, v_h^j, w_h^j, \varphi_h^j, \theta_h^j, \psi_h^j\}^T = \{s_h^j, \Phi_h^j\}^T, j = 1, 2, \dots, Z, Z$ 为与链轮啮合的链环的数量。

由图1可以得出链轮、链环的位置矢量关系为

$$\mathbf{s}_h^j = \mathbf{s}_0 + \mathbf{A}_h \mathbf{s}_{oh}^j$$

式中, $\mathbf{s}_0 = \{u_0, v_0, w_0\}^T, \mathbf{s}_h^j = \{u_h^j, v_h^j, w_h^j\}^T$ 为链轮、链环在绝对坐标系下 $Oxyz$ 的位置矢量; $\mathbf{s}_{oh}^j = \{u_{oh}^j, v_{oh}^j, w_{oh}^j\}^T$ 为链环几何中心在链轮坐标系下的相对位置矢量; \mathbf{A}_h 为绝对坐标系到链轮坐标系的方向变化矩阵。

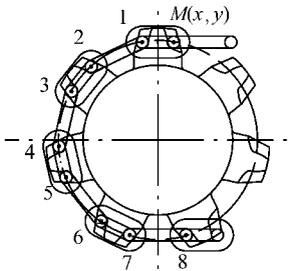


图1 创链与链轮啮合

Fig. 1 Plan chain and sprocket meshing

如图1所示创链运动机构,以创链中点的位置坐标 $M(x, y)$ 和输出角度 $\varphi_0, \theta_0, \psi_0$ 为研究对象,则输出向量可表示为 $\mathbf{U} = [x, y, \varphi_0, \theta_0, \psi_0]$, 输入运动参数为 $\mathbf{V} = \boldsymbol{\omega}_0$, 结构参数(设计参数)向量为 $\mathbf{L} = [t, l, r]^T$ 。

采用右手定则,角度的拟时针方向为正,且矢量

角度总是在其根部而非头部度量,可建立创链运行机构输入与输出关系的均值模型:

$$F = \begin{cases} x - \cos(\varphi_0 + \omega_0^i) \frac{r + \frac{t}{2}}{\sin \varphi_0} \\ y - \sin(\varphi_0 + \omega_0^i) \frac{r + \frac{t}{2}}{\sin \varphi_0} \\ \varphi_0 - \omega_0^i \\ \theta_0 - \omega_0^i + \frac{\pi}{4} \end{cases}$$

由该均值模型即可求出有关雅克比矩阵,对创链运行机构进行精度可靠性稳健设计,得出设计变量的几何尺寸。

4 数值算例

用可靠性稳健设计方法设计如图1所示的链轮与创链运动机构,使点 M 的轨迹经过表1中的8点,已知啮合运动机构角速度 $\dot{\alpha}_1 = 10 \text{ rad/s}$,创链及链轮的加工误差一般服从正态分布,而创链结合尺寸为创链加工尺寸与链轮加工尺寸差值的绝对值,即创链的结合尺寸服从正态分布规律;链轮旋转加速度服从正态分析,创链绕链轮旋转加速度服从任意分布,啮合旋转角加速度为链轮旋转加速度与创链绕链轮旋转加速度差值的绝对值,即啮合旋转角加速度服从任意分布,其前四阶矩为

$$\ddot{\alpha}_1 = 0 \text{ rad/s}^2, 6.4000 \times 10^{-3} \text{ rad}^2/\text{s}^4, -1.232 \times 10^{-3} \text{ rad}^3/\text{s}^6, 5.9797 \times 10^{-4} \text{ rad}^4/\text{s}^8$$

点 M 的坐标 (x, y) 运动精度误差的允许值为 $\delta_1 = 0.001 \text{ mm}, \delta_2 = 0.0005 \text{ mm}$ 。要求设计机构在整个啮合过程中 M 点的输出坐标的可靠度为 $R \geq 0.999$;点轨迹精确地经过1和8点两个位置。

表1 点 M 的理想轨迹

Table 1 Prospective locus of point M

序号	$\alpha_1 / (^\circ)$	X^* / mm	Y^* / mm
1	10	-22.660	142.206
2	25	-95.077	107.073
3	40	-123.634	72.127
4	55	-142.045	-8.568
5	70	-133.229	-52.019
6	85	-87.674	-108.253
7	100	-40.917	-138.064
8	115	41.636	-136.345

4.1 设计变量

啮合运动机构几何尺寸的标准差根据公差标准

确定,一般情况公差尺寸为名义尺寸的 0.001 5 倍,这里取公差尺寸的 3σ 水平,则变差系数 $c=0.000 5$,因此刨链的几何尺寸的均值为基本设计变量。

4.2 建立目标函数

以点 M 轨迹偏差最小为设计目标,则

$$f_1(x) = \sum_1^8 [(x_M^i - x_M^{*(i)})^2 + (y_M^i - y_M^{*(i)})^2]$$

式中, (x_M^i, y_M^i) 和 $(x_M^{*(i)}, y_M^{*(i)})$ 分别为点 M 实际经过位置的坐标以及理想情况下应经过位置的坐标。

以机构在各位置处的运动精度可靠度满足设计要求为设计目标,则

$$f_2(x) = (\min R_x^{(i)} - R_{x0})^2 + (\min R_y^{(i)} - R_{y0})^2$$

式中, $R_x^{(i)}, R_y^{(i)}$ 为在 i 位置处点 M 轨迹在 x, y 轴方向的运动精度可靠度; R_{x0}, R_{y0} 为点 M 轨迹在 x, y 轴方向的所求的可靠度。

以特定位置处啮合运动精度可靠度对基本设计变量均值的灵敏度最小为设计目标,则

$$f_3(x) = \sum_{i=1,8} \sum_{j=1}^6 \left[\left(\frac{\partial R_{xL}^{(i)}}{\partial X_j} \right)^2 + \left(\frac{\partial R_{xU}^{(i)}}{\partial X_j} \right)^2 + \left(\frac{\partial R_{yL}^{(i)}}{\partial X_j} \right)^2 + \left(\frac{\partial R_{yU}^{(i)}}{\partial X_j} \right)^2 \right]$$

式中, $\frac{\partial R_{xL}^{(i)}}{\partial X_j}, \frac{\partial R_{yL}^{(i)}}{\partial X_j}$ 表示在 i 位置处点 M 轨迹满足下限 $\Delta x \leq \delta_1$ 和 $\Delta x \leq \delta_2$ 时,运动精度可靠度对设计参数均值的灵敏度; $\frac{\partial R_{xU}^{(i)}}{\partial X_j}, \frac{\partial R_{yU}^{(i)}}{\partial X_j}$ 表示在点 M 轨迹在满足上限 $\Delta x \geq -\delta_1$ 和 $\Delta x \geq -\delta_2$ 时,运动精度可靠度对设计参数均值的灵敏度。

4.3 建立约束条件

$$x - \cos(\varphi_0 + \omega_0^i) \frac{r + \frac{t}{2}}{\sin \varphi_0} \leq 0$$

$$y - \sin(\varphi_0 + \omega_0^i) \frac{r + \frac{t}{2}}{\sin \varphi_0} \leq 0$$

$$\varphi_0 - \omega_0^i \leq 0$$

$$\theta_0 - \omega_0^i + \frac{\pi}{4} \leq 0$$

点 M 轨迹要精确经过 1, 8 两个位置,则

$$\{ x_M^1 = -22.660$$

$$y_M^1 = 142.206$$

$$x_M^8 = 41.636$$

$$y_M^8 = -136.345$$

4.4 优化求解

由设计变量、目标函数和约束条件建立优化设计

模型,并采用 NSGA-II 主程序算法(非支配排序算法的多目标进化算法,采用的精英保留策略是通过保留父代的全部个体完成,这样不仅增加了算法的计算复杂度,同时,由于其父代是经过锦标赛选择后得到的,有可能真正的最优解没有被选择到,从而降低算法的收敛性)编制计算机程序求解,NSGA-II 主程序算法是将随机初始化一个父代种群 P_0 ,并将所有个体按非支配关系排序且指定一个适度值,然后采用选择、交叉、变异算子产生下一代种群 Q_0 ,大小为 N ,其流程图如图 2 所示。

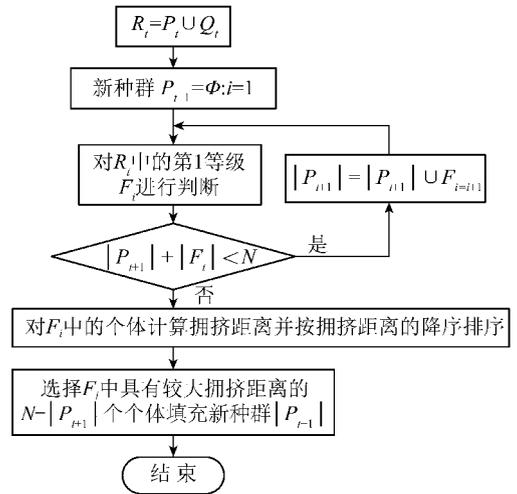


图 2 NSGA-II 流程

Fig. 2 NSGA-II flow diagram

首先将第 t 代产生的新种群 Q_t 与父代种群 P_t 合并组成 R_t ,种群大小为 $2N$,然后 R_t 进行非支配排序,产生一系列非支配集 F_i 并计算排挤度。由于子代和父代个体都包含在 R_t 中,则经过非支配排序以后的非支配集 F_1 中包含的个体是 R_t 中最好的,先将 F_1 放入新的父代种群 P_{t+1} 中,如果 F_1 的大小小于 N ,对 F_2 中的个体进行排挤度排序,取前 $N - |P_{t+1}|$ 个个体,使 P_{t+1} 个体数量达到 N 。然后通过遗传算子(选择、交叉、变异)产生新的子代种群 Q_{t+1} 。

使用 NSGA-II 主程序算法,对某型号刨煤机刨链进行优化计算,设置 NSGA-II 算法的控制参数为:种群大小为 600,交叉概率为 0.85,变异概率为 0.15,最大进化代数为 100 代,经过 100 次迭代获得 Pareto 最优解集,得到点 M 的轨迹及其运动精度可靠度(表 2)。

4.5 实验测试分析

实验在大型工矿装备辽宁省重点实验室刨煤机的试验台上进行(图 3),根据链轮的应力分布分析在齿根过渡圆角处敷设应变传感器,并将测试装置直接安装于被测链轮齿根测试点附近,使传感器和检测装置与被测链轮一起运动(在链轮伸出轴端加装集流

表 2 点 M 的轨迹及其运动精度可靠度

Table 2 Kinematic accuracy reliability and locus of point M

序号	$a_1/(^\circ)$	X/mm	Y/mm	R_x	R_y
1	10	-22.660	142.206	0.999 918 958 8	0.999 965 188 0
2	25	-95.077	107.073	0.999 954 990 4	0.999 953 584 3
3	40	-123.634	72.127	0.999 977 086 4	0.999 932 714 6
4	55	-142.045	-8.568	0.999 984 995 2	0.999 930 293 4
5	70	-133.229	-52.019	0.999 987 866 3	0.999 954 667 5
6	85	-87.674	-108.253	0.999 980 804 3	0.999 973 848 9
7	100	-40.917	-138.064	0.999 937 553 8	0.999 997 034 5
8	115	41.636	-136.345	0.999 968 533 6	0.999 991 160 2

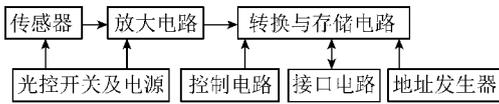


图 3 实验流程

Fig. 3 The test flow diagram

环,避免链轮运转测试过程中应变片引出线会被拉断,无法测试到应变信号)。装置具有数据自动存储功能,无需任何其它设备,也没有外部引线,即可完成测试工作。在进行测试时,先让被测链轮进入正常工作状态,然后用光控开关控制检测装置开始工作,将链轮处的应力变化记录下来。测试结束后,取下装置,由计算机通过接口读出装置记录的数据,经过处理,即可得到啮合应力变化。

采用啮合应力最大点测试方法分析链条与链轮的啮合点情况,图 4 中 R1, R2 为工作片; R3, R4 为补偿片。链轮齿根圆角 1 和 2 分别产生正应变和负应

变,形成 R1 为电桥正桥臂, R2 为电桥负桥臂。R3, R4 粘贴在与链轮材料相同的悬臂梁上,悬臂梁用环氧树脂粘贴在链轮不产生应变的部位,使 R3, R4 不产生应变只起温度补偿作用。采用该方法测试得 M 点运动位置的应力变化数据(一般认为应力最大的点为链条与链轮啮合点),得到啮合等效应力分布点(表 3)。并得到理论与实际测试(图 5)的啮合点对比曲线如图 6 所示。

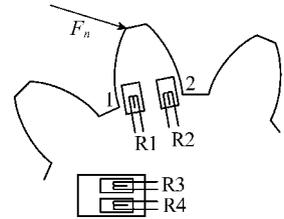


图 4 应变片布置示意

Fig. 4 Strain gauge sketch

表 3 啮合等效应力分布点 M 的轨迹

Table 3 Engagement stress locus of point M

序号	$a_1/(^\circ)$	X'/mm	Y'/mm	X-X' /mm	Y-Y' /mm	S /mm
1	10	-22.659 6	142.205 8	0.000 4	0.000 2	0.000 447
2	25	-95.076 9	107.072 8	0.000 2	0.000 2	0.000 282
3	40	-123.634 5	72.127 3	0.000 5	0.000 3	0.000 583
4	55	-142.045 9	-8.568 9	0.000 9	0.000 9	0.001 772
5	70	-133.230 5	-52.020 8	0.001 5	0.001 8	0.002 343
6	85	-87.675 8	-108.254 2	0.001 8	0.001 2	0.002 163
7	100	-40.918 1	-138.065 0	0.001 1	0.001 0	0.001 486
8	115	41.636 5	-136.345 3	0.000 5	0.000 3	0.000 583

5 结 论

(1)以刨链与链轮啮合点轨迹偏差最小、运动精度可靠度最高、啮合运动精度可靠度对基本设计变量均值的灵敏度最小为设计目标,采用 NSGA-II 主程序算法,提出一种能够很好解决具有任意分布参数的

刨链啮合运动机构精度可靠性稳健设计方法。

(2)实验与仿真结果表明:M 点的运行精度得到提高,在 x 方向上运动可靠度最大为 0.999 980 804 3,在 y 方向上运动可靠度最大为 0.999 997 034 5;实测的啮合点位置与理论点的最大位置误差为 0.002 163,刨链与链轮啮合点与理论分析点基本一致,这就验证



图5 啮合点 M 运动轨迹测试试验

Fig. 5 The motion M accuracy test

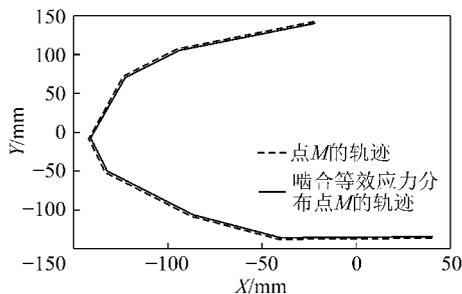


图6 啮合点的对比曲线

Fig. 6 Meshing point contrast curves

刨链啮合运动机构精度可靠性稳健设计方法是可行的。

参考文献:

- [1] 张义民,黄贤振,贺向东.任意分布参数平面连杆机构运动精度可靠性稳健设计[J].农业机械学报,2008,39(7):139-143.
Zhang Yimin, Huang Xianzhen, He Xiangdong. Reliability-based robust design for kinematic accuracy of the planar linkage mechanism with arbitrary distribution parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7):139-143.
- [2] 康晓敏,李贵轩,郝志勇.以极小化单位能耗为目标优化刨削深度[J].煤矿机械,2004(9):42-44.
Kang Xiaomin, Li Guixuan, Hao Zhiyong. To minimize energy consumption as the goal to optimize planing depth[J]. Coal Mining Machinery, 2004(9):42-44.
- [3] 康晓敏,李贵轩,郝志勇.以输送机货载断面面积均匀化为目标优化刨削深度[J].矿山机械,2005,33(2):14-16.
Kang Xiaomin, Li Guixuan, Hao Zhiyong. To set off the conveyor cargo area even as the objective to optimize planing depth[J]. Mining Machinery, 2005, 33(2):14-16.
- [4] 郭惠昕,岳文辉.含间隙平面连杆机构运动精度的稳健优化设计[J].机械工程学报,2012,48(3):75-81.
Guo Huixin, Yue Wenhui. Design optimization of planar linkage mechanism with joint clearance for improving the robustness of kinematic accuracy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(3):75-81.
- [5] 郭惠昕,张龙庭.混合离散变量优化设计的复合遗传算法[J].机械设计,2005,22(3):9-11.
Guo Huixin, Zhang Longting. Compound genetic algorithm on optimization design of hybrid discrete variables[J]. Chinese Journal of Machine Design, 2005, 22(3):9-11.

- [6] 张蕾,张文明,申焱华.考虑间隙影响的汽车转向机构稳健优化设计[J].农业机械学报,2007,38(1):30-32.
Zhang Lei, Zhang Wenming, Shen Yanhua. Robust optimization on steering mechanism of truck with clearances[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1):30-32.
- [7] Lee S J, Gilmore B J. The determination of the probabilistic properties of velocities and accelerations in kinematic chains with uncertainty[J]. Journal of Mechanical Design, 1991, 113(1):84-90.
- [8] 程贤福,肖人彬.基于公理设计的优化设计方法与应用[J].农业机械学报,2007,38(3):117-121.
Cheng Xianfu, Xiao Renbin. Optimization method based on axiomatic design and its application[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(3):117-121.
- [9] 谭晓兰,韩建友,陈立周.考虑运动副间隙影响的函数发生机构的稳健优化设计[J].北京科技大学学报,2004,26(4):416-419.
Tan Xiaolan, Han Jianyou, Chen Lizhou. Robust design of function generating mechanisms considering kinematic pair clearance[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2004, 26(4):416-419.
- [10] 林建龙,罗智文,张力.电脑刺绣机针杆机构位置精度分析[J].纺织学报,2010,31(7):131-134.
Lin Jianlong, Luo Zhiwen, Zhang Li. Position accuracy analysis on needle bar mechanism of computerized embroidery machine[J]. Journal of Textile Research, 2010, 31(7):131-134.
- [11] 刘德顺,岳文辉,杜小平.系统性能稳健偏差与多点稳健设计优化[J].机械工程学报,2006,42(10):1-9.
Liu Deshun, Yue Wenhui, Du Xiaoping. Robust performance variation for robust design optimization with multiple optimal points[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(10):1-9.
- [12] 李晓豁,刘霞,焦丽.不同工况下滑行式刨煤机的动态仿真研究[J].煤炭学报,2010,35(7):1202-1207.
Li Xiaohuo, Liu Xia, Jiao Li. Dynamic simulation of sliding coal plow under different working conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7):1202-1207.
- [13] 康晓敏,李贵轩.随机动载荷作用下刨煤机刨链疲劳寿命预测[J].煤炭学报,2010,35(3):503-509.
Kang Xiaomin, Li Guixuan. Prediction of fatigue life of coal plow chain under stochastic dynamic load[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3):503-509.
- [14] 郑丞,金隼,来新民.基于合作博弈的公差稳健设计方法[J].上海交通大学学报,2011,45(11):1587-1592.
Zheng Cheng, Jin Sun, Lai Xinmin. Robust tolerance design method based on cooperative game[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(11):1587-1592.
- [15] 康晓敏,李贵轩.单自由度刨煤机动力学模型的建立与仿真研究[J].振动与冲击,2009,28(2):191-195.
Kang Xiaomin, Li Guixuan. Single degree of freedom dynamic model of coal plough and its simulation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(2):191-195.
- [16] 郑丞,金隼,来新民,等.基于非合作博弈的公差分配优化研究[J].机械工程学报,2009,45(10):159-165.
Zheng Cheng, Jin Sun, Lai Xinmin, et al. Tolerance allocation opti-

- mization based on no n-cooperative game analysis [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10): 159-165.
- [17] 谢能刚,方浩,包家汉,等. 博弈决策分析在补偿滑轮组变幅机构多目标设计中的应用[J]. 机械强度, 2005, 27(2): 202-206.
- Xie Nenggang, Fang Hao, Bao Jiahua, et al. Game analysis of multi objective design on luff mechanism of compensative sheave block [J]. Journal of Mechanical Strength, 2005, 27(2): 202-206.
- [18] Annamdas K K, Rao S S. Multi objective optimization of engineering systems using game theory and particle swarm optimization[J]. Engineering Optimization, 2009, 41(8): 737-752.
- [19] Hsu Chia wei, Hu Allen h, Chiou Cherngying, et al. Using the FDM and ANP to construct a sustainability balanced scorecard for the semiconductor industry [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38: 12891-12899.
- [20] Huang Xiaomao, Ye Chunsheng, Mo Jianhua, et al. Slice data based support generation algorithm for fused deposition modeling[J]. Tsinghua Science and Technology, 2009, 14(S1): 223-228.
- [21] Zhang Jianfeng, Peng Anhua. Decision-making of slicing scheme in fused deposition modeling process based on analytical hierarchical process[J]. Trans-actions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 27(2): 125-130.
- [22] 张义民,刘巧伶,闻邦椿. 不完全概率信息的车辆常用弹簧的可靠性灵敏度设计[J]. 中国工程科学, 2004, 6(1): 74-78.
- Zhang Yimin, Liu Qiaoling, Wen Bangchun. Incomplete probability information of the sensitivity of the reliability of vehicles commonly used spring design[J]. Chinese Engineering Science, 2004, 6(1): 74-78.
- [23] 张义民,贺向东,刘巧伶. 不完全概率信息的螺旋管簧的可靠性优化设计[J]. 应用科学学报, 2004, 22(3): 347-350.
- Zhang Yimin, He Xiangdong, Liu Qiaoling. Incomplete probability information to optimize the reliability of the coil spring design[J]. Applied Sciences, 2004, 22(3): 347-350.
- [24] 张强,付云飞,宋秋爽,等. 基于人工鱼群算法刨煤机比能耗最低参数优化[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2012, 37(2): 241-247.
- Zhang Qiang, Fu Yunfei, Song Qiushuang, et al. Parameter optimization of lowest energy consumption for plow based on artificial fish school algorithm [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2012, 37(2): 241-247.