

贴标机供标机构运动精度可靠性分析

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2021.06.004

李兵华¹ 贺 兵¹
龙赛琼² 汤迎红¹
米承继¹

1. 湖南工业大学
机械工程学院
湖南 株洲 412007
2. 广州海关技术中心
广东 广州 510623

摘 要:应用运动精确度理论和可靠性理论,对贴标机的关键装置供标机构运动精度进行可靠性分析。根据平面机构的几何约束方程,采用矩阵法推导平面机构运动精度误差表达式,建立贴标机供标机构——连杆滑块机构运动位移精度和速度精度失效的极限状态方程,并构建该机构运动精度位移和速度可靠性模型。在考虑杆长加工误差的情况下,通过 Matlab 计算程序实现了贴标机供标机构的运动精度可靠度计算,迅速准确地得到机构位移可靠度和速度可靠度,并用 Monte-Carlo 法进行验证。结果表明:与 Monte-Carlo 法相比,本文方法的相对误差均小于 0.5%。本文方法实用、有效。

关键词:供标机构;位移可靠度;速度可靠度;运动精度

中图分类号:TH122

文献标志码:A

文章编号:1674-7100(2021)06-0027-07

引文格式:李兵华,贺 兵,龙赛琼,等.贴标机供标机构运动精度可靠性分析[J].包装学报,2021,13(6):27-33.

0 引言

贴标机是包装生产线上的重要设备,其技术含量较高、结构较复杂。随着贴标机向高速度、高精度的方向不断发展,机构运动精度成为了影响贴标质量的关键因素,愈来愈受到人们的重视。制造、安装中的误差,以及运动副间隙和弹性变形等因素的不确定性,造成了机构实际运动输出与理想输出之间的差异,即机构运动误差。当运动误差较大时,贴标质量无法达到要求。因此,对贴标机机构进行运动精度可靠性分析是十分必要的。

目前,关于机构可靠性已有一定研究。Wang J. G. 等^[1]用混合降维法进行了考虑运动副间隙的机械运动精度可靠性分析;Kim J. 等^[2]对考虑尺寸误差和间隙开环机构的定位和定向运动进行可靠性分析;

Huang X. Z. 等^[3]对汽车齿轮齿条式转向器进行运动精度可靠性分析;Zhang J. F. 等^[4]探讨了再现函数机构可靠度;郝振国等^[5]对爬楼轮椅后腿机构进行运动精度可靠性分析;聂飞飞等^[6]对高速经编机槽针机构进行运动精度可靠性优化;张义民等^[7-8]对牛头刨床机构运动精度进行可靠性分析;郭惠昕等^[9]研究了杆长制造误差和运动副间隙对平面连杆机构运动精度的影响;左传等^[10]基于解析法对 RSSR 机构进行运动精度及可靠性分析;袁英才等^[11]研究了运动副间隙对轮转机刀式折页机构动态性能的影响;魏永祥等^[12]研究了随机参数弹性连杆机构在平稳随机激励下的动力响应;于霖冲、王慧、庞欢等^[13-15]提出建立仿真模型对运动机构可靠性进行仿真分析。然而研究工作多集中于位移可靠性问题上,极少涉及速度可靠性。本研究考虑构件的加工误差,以贴标机供标机构为例,

收稿日期:2021-09-16

基金项目:湖南省教育厅科学研究基金资助项目(20C0631);湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ6075)

作者简介:李兵华(1972-),男,湖北武汉人,湖南工业大学副教授,主要从事包装机械设计研究,

E-mail:43320041@qq.com

通信作者:贺 兵(1976-),女,湖南汨罗人,湖南工业大学副教授,主要从事包装机械设计研究,

E-mail:345460759@qq.com

– 28 –

μ_L 很小, 因此采用误差函数 $G(V, L)$ 在均值 μ_L 处的线性近似代替误差函数 $G(V, L)$, 这样也具有足够的精度。将误差函数 $G(V, L)$ 在均值 μ_L 处进行一阶泰勒展开, 得到:

$$G(V, L) \approx \hat{G}(V, L) = G(V, \mu_L) + \sum_{i=1}^5 \frac{\partial G(V, L)}{\partial L_i} \Big|_{\mu_L} (L_i - \mu_i), \quad (7)$$

式中 $\frac{\partial G(V, L)}{\partial L_i} \Big|_{\mu_L}$ 是机构的一阶影响系数, 可由直线线性化推导。

为简化式 (7), 作变换 $L_i = \mu_i + \sigma_i H_i$, 且 $H_i \sim N(0, 1)$ 。于是, 线性函数 $\hat{G}(V, L)$ 可写为

$$\hat{G}(V, L) = B_0(V) + \sum_{i=1}^5 B_i(V) H_i, \quad (8)$$

式中: $B_0(V) = G(V, \mu_L)$; $B_i(V) = \frac{\partial G(V, L)}{\partial L_i} \Big|_{\mu_L} \times \sigma_i$ 。

由式 (8) 可以看出, 机构的运动误差由结构误差 $B_0(V)$ 和随机误差 $\sum_{i=1}^5 B_i(V) H_i$ 两部分组成。由于误差函数 $\hat{G}(V, L)$ 是 H_i 的线性函数, 因此 $\hat{G}(V, L)$ 服从正态分布。 $\hat{G}(V, L)$ 的均值和标准差可分别表示为:

$$\mu_G(V) = B_0(V), \quad (9)$$

$$\sigma_G(V) = \left[\sum_{i=1}^5 B_i^2(V) \right]^{0.5}. \quad (10)$$

2.2 供标机构位移可靠度分析

根据式 (2) (3) 可建立连杆滑块机构输入与输出关系的均值模型, 即

$$F = \begin{bmatrix} x_M - l_4 - l_3 \cos \theta_1 + l_5 \cos(\theta_2 + \delta) \\ y_M - l_3 \sin \theta_1 - l_5 \sin(\theta_2 + \delta) \\ (l_1 - l_3) \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 - l_4 \\ (l_1 - l_3) \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} = \mathbf{0}. \quad (11)$$

雅可比矩阵为:

$$\frac{\partial F}{\partial U} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -l_3 \sin(\theta_2 + \delta) \\ 0 & 1 & 0 & -l_3 \cos(\theta_2 + \delta) \\ 0 & 0 & \cos \theta_2 & -l_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & \sin \theta_2 & l_2 \cos \theta_2 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial F}{\partial L} = \begin{bmatrix} 0 & -\cos \theta_1 & -1 & \cos(\theta_2 + \delta) & -l_5 \sin(\theta_2 + \delta) \\ 0 & -\sin \theta_1 & 0 & -\sin(\theta_2 + \delta) & -l_5 \cos(\theta_2 + \delta) \\ \cos \theta_1 & -\cos \theta_1 & -1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial F}{\partial V} = \begin{bmatrix} l_3 \sin \theta_1 \\ -l_3 \cos \theta_1 \\ -(l_1 - l_3) \sin \theta_1 \\ (l_1 - l_3) \cos \theta_1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

连杆滑块机构的运动输出位移随机误差矢量为 $\Delta U = [\Delta x_M, \Delta y_M, \Delta l_2, \Delta \theta]^T$ 。

为了保证供标机构具有较高的传标精度, 必须使首张标签上每一点的运动误差保持在允许范围内。由于供标机构采用确定的连杆滑块机构, 故此处不讨论结构误差, 只讨论首张标签的中点 (即图 1 M 点) 的运动误差, 即

$$|\Delta u_i + B_{i0}(V)| \leq \varepsilon_i, \quad i=1, 2, \quad (15)$$

式中: Δu_i 是输出位移随机误差, $\Delta u_1 = \Delta x_M$, $\Delta u_2 = \Delta y_M$; ε_i 是允许输出位移误差, ε_1 是 X 方向允许位移误差, ε_2 是 Y 方向允许位移误差; $B_{i0}(V)$ 是输出位移结构误差。

关于供标机构位移精度可靠性问题, X 方向位移精度可靠度的计算方法与 Y 方向的一样。 X 方向位移精度可靠度的计算方法是: 先计算满足下限 $-\varepsilon_1 \leq \Delta x_M + B_{10}(V)$ 的可靠度 R_{sl} 和满足上限 $\Delta x_M + B_{10}(V) \leq \varepsilon_1$ 的可靠度 R_{su} , 然后求出供标机构的可靠度:

$$R_s = R_{sl} + R_{su} - 1. \quad (16)$$

此节仅讨论位移精度满足上限 $\Delta x_M + B_{10}(V) \leq \varepsilon_1$ 时的可靠性问题。输出分量 x_M 的可靠度定义为

$$R_{su} = \int_{g(\xi, r) > 0} f(Z) dZ, \quad (17)$$

式中: $f(Z)$ 是机构运动输出 X 方向位移误差允许值 ξ ($\xi = \varepsilon_1$) 和输出 X 方向位移误差 r ($r = \Delta x_M + B_{10}(V)$) 的联合概率密度函数;

$g(\xi, r)$ 为状态函数, 可以表示机构的两种状态, 即

$$\begin{cases} g(\xi, r) \leq 0, & \text{失效状态,} \\ g(\xi, r) > 0, & \text{安全状态.} \end{cases} \quad (18)$$

其中 $g(\xi, r) = 0$ 是极限状态方程, 表示临界失效面。

根据状态函数的定义, 供标机构 X 方向的位移精度极限状态函数可以表示为

$$g(\xi, r) = \xi - r. \quad (19)$$

可见, 机构运动输出误差的 X 方向位移允许值 ξ 与输出 X 方向位移误差 r 是相互独立的随机变量。采用

一次二阶矩法求解可靠度具有足够的精度。

状态函数的前二阶矩公式如下：

一阶矩

$$\mu_g = E[g(\xi, r)] = \mu_\xi - \mu_r, \quad (20)$$

式中 $u_r = B_{10}(\mathbf{V})$;

二阶矩

$$\sigma_g^2 = \text{Var}[g(\xi, r)] = \sigma_\xi^2 + \sigma_r^2. \quad (21)$$

X 方向输出位移误差 Δx_M 的方差为

$$\text{Var}(\Delta x_M) = \mathbf{J}_1 \times \text{Var}(\mathbf{X}) \times \mathbf{J}_1', \quad (22)$$

式中： \mathbf{J}_1 是供标机构灵敏度矩阵 $\mathbf{J}^{[8]}$ 的第 1 行向量； $\text{Var}(\Delta x_M)$ 、 $\text{Var}(\mathbf{X})$ 分别是输出变量 Δx_M 和基本随机向量 \mathbf{X} 的方差。

可靠性指标定义为

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{E[g(\mathbf{X})]}{\sqrt{\text{Var}[g(\mathbf{X})]}}. \quad (23)$$

从几何意义来看， β 是 n 维正则化空间中坐标原

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{L}} \right) = \begin{bmatrix} 0 & \sin \theta_1 \omega_1 & 0 & -\omega_2 \sin(\theta_2 + \delta) & -l_5 \omega_2 \cos(\theta_2 + \delta) \\ 0 & -\cos \theta_1 \omega_1 & 0 & -\omega_2 \cos(\theta_2 + \delta) & l_5 \omega_2 \sin(\theta_2 + \delta) \\ -\omega_1 \sin \theta_1 & \omega_1 \sin \theta_1 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_1 \cos \theta_1 & -\omega_1 \cos \theta_1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (26)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}} \right) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -l_5 \omega_2 \cos(\theta_2 + \delta) \\ 0 & 0 & 0 & l_5 \omega_2 \sin(\theta_2 + \delta) \\ 0 & 0 & -\omega_2 \sin \theta_2 & -l_2 \omega_2 \cos \theta_2 - \dot{l}_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & \omega_2 \cos \theta_2 & -l_2 \omega_2 \sin \theta_2 + \dot{l}_2 \cos \theta_2 \end{bmatrix}, \quad (27)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{V}} \right) = \begin{bmatrix} l_3 \omega_1 \cos \theta_1 \\ l_3 \omega_1 \sin \theta_1 \\ -(l_1 - l_3) \omega_1 \cos \theta_1 \\ -(l_1 - l_3) \omega_1 \sin \theta_1 \end{bmatrix}. \quad (28)$$

供标机构的运动输出速度误差矢量为随机误差。为了保证供标机构具有较高的供标精度，其 X 方向输出速度误差和 Y 方向输出速度误差需保持在允许范围内，其中误差包括结构误差和随机误差。故此节只讨论 X 方向速度可靠度的计算方法，同理可得 Y 方向速度可靠度。

$$|\Delta v_{Mx} + D_{10}(\mathbf{V})| \leq \tau_1, \quad (29)$$

式中： Δv_{Mx} 是 M 点的 X 方向速度随机误差； $D_{10}(\mathbf{V})$ 是 M 点的 X 方向速度结构误差； τ_1 是允许 X 方向输出速度误差允许值。

点到临界失效面 $g(\xi, r)=0$ 的最短距离。当基本随机向量服从正态分布时，供标机构 X 方向的位移可靠度为

$$R_{su} = \Phi(\beta), \quad (24)$$

式中 Φ 是标准正态分布函数。

用相同的方法可以求得运动精度满足下限的可靠度 R_{sl} 。

2.3 供标机构速度可靠度分析

以供标机构 M 点速度 (v_{Mx}, v_{My}) 、 BC 杆杆长变化速度 \dot{l}_2 和输出角速度 ω_2 为研究对象。

将式 (11) 对时间连续微分，得到输出向量速度：

$$\dot{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} v_{Mx} + l_3 \sin \theta_1 \omega_1 - l_5 \sin(\theta_2 + \delta) \omega_2 \\ v_{My} - l_3 \cos \theta_1 \omega_1 - l_5 \cos(\theta_2 + \delta) \omega_2 \\ -(l_1 - l_3) \sin \theta_1 \omega_1 - l_2 \sin \theta_2 \omega_2 + \dot{l}_2 \cos \theta_2 \\ (l_1 - l_3) \cos \theta_1 \omega_1 + l_2 \cos \theta_2 \omega_2 + \dot{l}_2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} = \mathbf{0}. \quad (25)$$

雅可比矩阵为：

供标机构 X 方向的速度精度可靠性问题分两部分进行讨论，即满足下限 $-\tau_1 \leq \Delta v_{Mx} + D_{10}(\mathbf{V})$ 的可靠度 R_{vl} 和满足上限 $\Delta v_{Mx} + D_{10}(\mathbf{V}) \leq \tau_1$ 的可靠度 R_{vu} 。机构可靠度为

$$R_v = R_{vl} + R_{vu} - 1. \quad (30)$$

此节仅讨论速度精度满足下限 $-\tau_1 \leq \Delta v_{Mx} + D_{10}(\mathbf{V})$ 时的可靠性问题。 X 方向输出速度分量 v_{Mx} 的可靠度定义为

$$R_{vl} = \int_{g(\tau, \gamma) > 0} f(\mathbf{Y}) d\mathbf{Y}, \quad (31)$$

式中： $f(\mathbf{Y})$ 是机构运动输出速度误差允许值 τ_1 和输出速度误差 γ ($\gamma = \Delta v_{Mx} + D_{10}(\mathbf{V})$) 的联合概率密度函数； $g(\tau, \gamma)$ 为状态函数，可以表示机构的两种状态，即

$$\begin{cases} g(\tau, \gamma) \leq 0, & \text{失效状态,} \\ g(\tau, \gamma) > 0, & \text{安全状态,} \end{cases} \quad (32)$$

其中， $g(\tau, \gamma)=0$ 为极限状态方程，表示临界失效面。

根据状态函数的定义，供标机构的速度精度极限状态函数可以表示为

$$g(\tau, \gamma) = \tau - \gamma. \quad (33)$$

可见, 机构运动输出速度误差允许值 τ 与输出速度误差 γ 是相互独立的随机变量。

状态函数的前二阶矩表示如下:

一阶矩

$$\mu_g = E[g(\tau, \gamma)] = \mu_\tau - \mu_\gamma; \quad (34)$$

二阶矩

$$\sigma_g^2 = \text{Var}[g(\tau, \gamma)] = \sigma_\tau^2 + \sigma_\gamma^2. \quad (35)$$

X 方向运动输出速度误差 Δv_{Mx} 的方差为

$$\text{Var}(\Delta v_{Mx}) = A_1 \times \text{Var}(X) \times A_1', \quad (36)$$

式中: A_1 是敏度矩阵 $A^{[7]}$ 的第 1 行向量; $\text{Var}(\Delta v_{Mx})$ 是输出速度变量 Δv_{Mx} 的方差。

可靠性指标为

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{E[g(X)]}{\sqrt{\text{Var}[g(X)]}}. \quad (37)$$

从几何意义来看, β 是 n 维正则化空间中坐标原点到临界失效面 $g(\tau, \gamma) = 0$ 的最短距离。基本随机参数向量服从正态分布时, 供标机构 X 方向的速度可靠度为

$$R_{vl} = \Phi(\beta). \quad (38)$$

同理可得运动精度满足上限 $\Delta v_{Mx} + D_{10}(V) \leq \tau_1$ 的可靠度 R_{vu} 。

3 数值计算与分析

已知供标机构各构件的几何尺寸均值如下: 曲柄 AB 长度 l_1 为 150 mm, 曲柄 DC 长度 l_3 为 80 mm, 支架 AD 长度 l_4 为 180 mm, 支臂角度 δ 为 0° , 支臂 MC 长度 l_5 为 281 mm。曲柄做匀速旋转 (角加速度均值为 0 rad/s^2), 角速度 ω_1 为 0.5236 rad/s 。构件的几何尺寸服从正态分布规律, 加工精度为 IT7 级。要求供标机构 M 点圆弧轨迹工作段 X 、 Y 方向位移精度误差允许值的分布为 $\varepsilon_i \sim N(0.1, 0.04^2)$, X 、 Y 方向速度精度误差允许值的分布为 $\tau_i \sim N(0.1, 0.04^2)$ 。曲柄 AB 工作段角度 θ_1 为 $168^\circ \sim 192^\circ$ 。

蒙特卡洛法 (Monte-Carlo) 是利用随机抽样进行可靠度计算的一种可靠性分析设计方法, 其优点是计算可靠性相对比较精确, 可以用于其他可靠性分析设计方法计算精度的检验, 其缺点是计算量大, 计算效率低^[17-19]。故本研究以式 (11)~(24) 为依据, 用 Matlab 编制计算程序, 计算 M 点输出位移可靠度, 同时用 Monte-Carlo 对计算结果进行检验。计算程序

流程如图 3 所示。

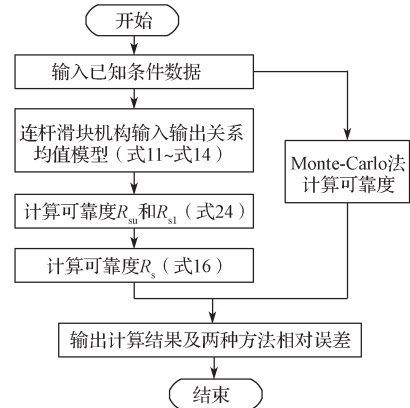


图 3 Matlab 计算程序流程

Fig. 3 Matlab calculation program flow

图 4~5 分别为 M 点在工作区间内 X 、 Y 方向的位移可靠度, 图中实线表示本文方法求得的可可靠度, 虚线表示 Monte-Carlo 法求得的结果。两种方法的具体计算结果如表 1 所示。由图 4、图 5 和表 1 可知, 本文方法相对于 Monte-Carlo 法, 相对误差小于 0.4%。

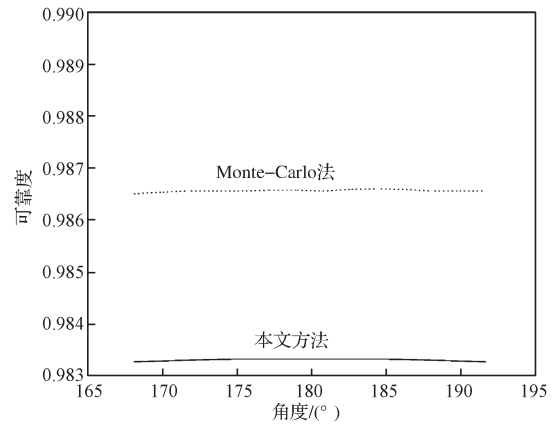


图 4 X 方向位移可靠度

Fig. 4 X -direction displacement reliability

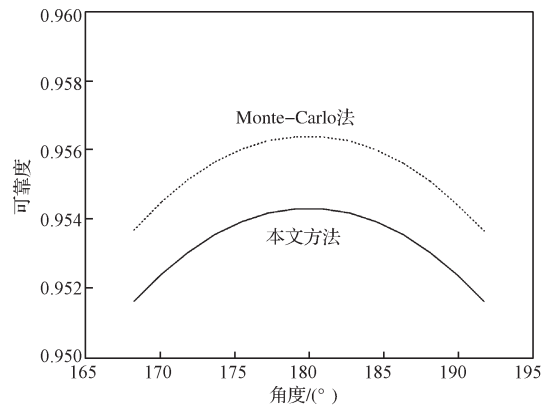


图 5 Y 方向位移可靠度

Fig. 5 Y -direction displacement reliability

表1 位移可靠度

Table 1 Displacement reliability

算 法	X方向		Y方向	
	最小值	最大值	最小值	最大值
本文方法	0.983 2	0.983 4	0.951 8	0.954 1
Monte-Carlo 法	0.986 5	0.986 7	0.953 8	0.956 2
相对误差 /%	-0.335	-0.334	-0.210	-0.220

以式(25)~(38)为依据,用 Matlab 编制计算程序,计算 M 点输出速度可靠度。图 6~7 分别为 M 点在工作区间内 X 、 Y 方向的速度可靠度,图中实线表示本文方法求得的可可靠度,虚线表示 Monte-Carlo 法求得的结果。两种方法的具体计算结果如表 2 所示。由图 6~7 和表 2 可知,本文方法相对于 Monte-Carlo 法的相对误差小于 0.5%。

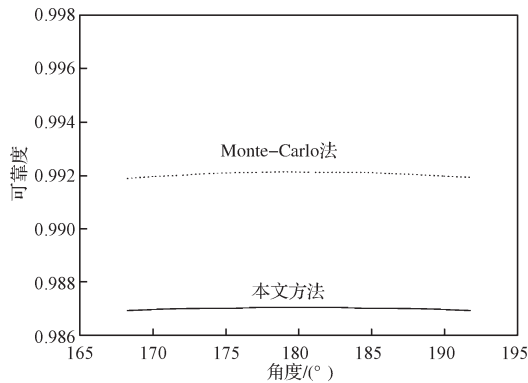
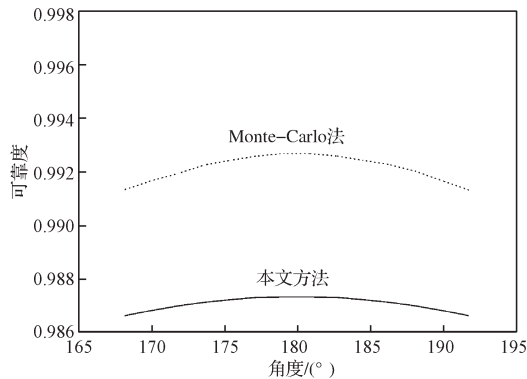
图6 X 方向速度可靠度Fig. 6 X -direction speed reliability图7 Y 方向速度可靠度Fig. 7 Y -direction speed reliability

表2 速度可靠度

Table 2 Speed reliability

算 法	X方向		Y方向	
	最小值	最大值	最小值	最大值
本文方法	0.987 1	0.987 4	0.986 5	0.987 6
Monte-Carlo 法	0.991 9	0.992 1	0.991 4	0.992 2
相对误差 /%	-0.484	-0.474	-0.494	-0.464

4 结论

1) 本研究采用矩阵法推导了供标机构连杆滑块机构的运动输出位移误差和速度误差表达式。

2) 建立了连杆滑块机构位移和速度可靠度计算公式,并用 Matlab 编制了计算程序。

3) 以贴标机供标机构为例,利用计算程序得到了其位移可靠度和速度可靠度。与 Monte-Carlo 法相比,用本文方法所得结果的相对误差均小于 0.5%。本文方法求出的结果可以满足一定的精度,证明了该方法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] WANG J G, ZHANG J F, DU X P. Hybrid Dimension Reduction for Mechanism Reliability Analysis with Random Joint Clearances[J]. Mechanism and Machine Theory, 2011, 46(10): 1396-1410.
- [2] KIM J, SONG W J, KANG B S. Stochastic Approach to Kinematic Reliability of Open-Loop Mechanism with Dimensional Tolerance[J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34(5): 1225-1237.
- [3] HUANG X Z, ZHANG Y M. Reliability Sensitivity Analysis for Rack-and-Pinion Steering Linkages[J]. Journal of Mechanical Design, 2010, 132(7): 1-6.
- [4] ZHANG J F, DU X P. Time-Dependent Reliability Analysis for Function Generator Mechanisms[J]. Journal of Mechanical Design, 2011, 133(3): 031005.
- [5] 郝振国, 曹东兴, 王 强. 爬楼轮椅后腿机构的运动精度可靠性分析[J]. 机械工程师, 2020(6): 22-25, 28.
HAO Zhenguo, CAO Dongxing, WANG Qiang. Motion Accuracy Reliability Analysis on the Rear Leg Mechanism in a Stair Climbing Wheelchair[J]. Mechanical Engineer, 2020(6): 22-25, 28.
- [6] 聂飞飞, 周金宇, 曹清林. 高速经编机槽针机构运动精度可靠性优化[J]. 机械设计与制造, 2019(12): 40-44.
NIE Feifei, ZHOU Jinyu, CAO Qinglin. The Optimization of Kinematics Accuracy Reliability on Needle Mechanism of High-Speed Warp Knitting Machine[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(12): 40-44.
- [7] 张义民, 黄贤振, 张旭方, 等. 不完全概率信息牛头刨床机构运动精度的可靠性优化设计[J]. 中国机械工

- 程, 2008, 19(19): 2355-2358.
- ZHANG Yimin, HUANG Xianzhen, ZHANG Xufang, et al. Optimization Design for Kinematic Accuracy Reliability of Shaping Mechanism Under Incomplete Probability Information[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(19): 2355-2358.
- [8] 张义民, 黄贤振, 贺向东. 不完全概率信息牛头刨床机构运动精度可靠性稳健设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 105-110.
- ZHANG Yimin, HUANG Xianzhen, HE Xiangdong. Reliability-Based Robust Design for Kinematic Accuracy of the Shaper Mechanism Under Incomplete Probability Information[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 105-110.
- [9] 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.
- [10] 左 传, 陈晓航. 基于解析法的 RSSR 机构运动精度及可靠性分析[J]. 机械研究与应用, 2016, 29(4): 60-63.
- ZUO Chuan, CHEN Xiaohang. Kinematic Accuracy and Reliability Analysis of RSSR Mechanism Based on Analytic Method[J]. Mechanical Research & Application, 2016, 29(4): 60-63.
- [11] 袁英才, 刘义伦, 王仪明. 含运动副间隙的轮转机刀式折页机构的动态响应特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(4): 972-976.
- YUAN Yingcai, LIU Yilun, WANG Yiming. Nonlinear Dynamic Response of Offset Press's Fold Mechanism with Clearances [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(4): 972-976.
- [12] 魏永祥, 陈建军, 马洪波, 等. 随机参数弹性连杆在平稳随机激励下的动力可靠性分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(2): 36-43.
- WEI Yongxiang, CHEN Jianjun, MA Hongbo, et al. Dynamic Reliability Analysis of Elastic Linkage Mechanism with Stochastic Parameters Under Stationary Random Excitation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(2): 36-43.
- [13] 于霖冲, 白广忱, 焦俊婷, 等. 空间站展开机构虚拟样机仿真及可靠性分析[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(1): 78-80.
- YU Linchong, BAI Guangchen, JIAO Juntong, et al. Virtual Prototype Simulation and Reliability Analysis of Space Station Expand Mechanism[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(1): 78-80.
- [14] 王 慧, 喻天翔, 雷鸣敏, 等. 运动机构可靠性仿真试验系统体系结构研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(22): 191-198.
- WANG Hui, YU Tianxiang, LEI Mingmin, et al. Research on the Architecture of Simulative Experiment System for Mechanism Motion Reliability Analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(22): 191-198.
- [15] 庞 欢, 喻天翔, 王 慧, 等. 典型缝翼机构虚拟仿真及运动卡滞可靠性分析[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(7): 1652-1655.
- PANG Huan, YU Tianxiang, WANG Hui, et al. Virtual Simulation and Movement Seizure Reliability Analysis of Typical Slat Mechanism[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(7): 1652-1655.
- [16] 康迎新, 帅词俊, 贺 兵. 基于 Matlab/Simulink 的送标机构运动仿真分析[J]. 包装学报, 2010, 2(2): 40-42.
- KANG Yingxin, SHUAI Cijun, HE Bing. Kinematics Simulation of Label Delivering Mechanism Based on Matlab/Simulink[J]. Packaging Journal, 2010, 2(2): 40-42.
- [17] 卢 强, 张友良. 用蒙特卡洛法进行 6 腿并联机床精度综合[J]. 中国机械工程, 2002, 13(6): 464-467.
- LU Qiang, ZHANG Youliang. Accuracy Synthesis of a Hexapod Machine Tool Based on Monte-Carlo Method[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(6): 464-467.
- [18] 吴炳晖, 裴建军, 宫 娜. 基于蒙特卡洛法的结构可靠度预计[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(6): 68-70.
- WU Binghui, XI Jianjun, GONG Na. Structural Reliability Prediction Based on Monte Carlo Method[J]. Machine Building & Automation, 2015, 44(6): 68-70.
- [19] 操凤萍, 樊啟要. 基于自适应蒙特卡洛算法的实时定位研究[J]. 计算机工程, 2018, 44(9): 28-32.
- CAO Fengping, FAN Qiyao. Research on Real-Time Positioning Based on Adaptive Monte Carlo Algorithm[J]. Computer Engineering, 2018, 44(9): 28-32.
- (责任编辑: 邓 彬)
- (下转第 80 页)

Fabrication of a Freezing-Tolerant and Stretchable Composite Organohydrogel for Flexible Strain Sensors

XIE Zhihui, MA Zhenping, XIA Zhike, QUAN Yongpeng, WANG Shengji, CHEN Zhuo, JING Xin

(College of Packaging and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Focusing on the problem that most conductive hydrogels based flexible sensors easily get failed in the low-temperature environment, an anti-freezing and stretchable polydopamine-reduced graphene oxide/sodium alginate/polyacrylamide (PDA-rGO/SA/PAM) composite organohydrogel was developed via solvent replacement strategy. The experimental results show that the composite organohydrogel have outstanding anti-freezing property, good mechanical property, and excellent sensing property. In addition, the assembled organohydrogel flexible strain sensor can detect multiple human motions, such as finger bending, wrist bending, facial micro-expression, etc., and has played its role in promoting the development of wearable flexible electronics in the future.

Keywords: flexible strain sensor; organohydrogel; freezing-tolerant; stretchability

(上接第 33 页)

Reliability Analysis of Kinematic Accuracy of Label Delivery Mechanism of Labeling Machine

LI Binghua¹, HE Bing¹, LONG Saiqiong², TANG Yinghong¹, MI Chengji¹

(1. College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Guangzhou Customs Technology Center, Guangzhou 510623, China)

Abstract: Applying the theory of kinematic accuracy and reliability, the research on reliability analysis of kinematic accuracy of label delivery mechanism, the key device of labeling machine, is carried out. Based on the geometric constraint equation of planar mechanism, the matrix method is used to derive the error expression of kinematic accuracy of plane mechanism, and the limit state equation for the failure of motion displacement accuracy and speed accuracy of label delivery mechanism (the linkage slider mechanism) of labeling machine is established, with the model of displacement and speed reliability of kinematics accuracy constructed. Taking the machining error of the rod length into account, the reliability calculation of kinematic accuracy of the mechanism for labeling machine is realized by MATLAB computer program, the reliability of displacement and speed is obtained quickly and accurately, and verified by Monte Carlo method. The results show that the relative errors of this method are less than 0.5% compared with Monte Carlo method and this method is practical and effective.

Keywords: label delivery mechanism; displacement reliability; speed reliability; kinematic accuracy