

文章编号: 1006-4710(2011)02-0156-04

模切机主切机构运动精度可靠度的求解

王西珍¹, 李言¹, 成刚虎², 史利花³

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安理工大学 印刷包装工程学院, 陕西 西安 710048; 3. 河南新机集团有限责任公司, 河南 新乡 453003)

摘要: 基于可靠性指标的几何原理及改进粒子群算法, 提出了一种求解模切机主切机构运动精度可靠度的新方法。该方法避免了对主切机构运动误差均值及标准差的求解, 同时避免了功能函数一阶或一阶以上的偏导数的计算。实例结果表明, 该方法对主切机构运动精度可靠性分析是精确、实用和有效的。

关键词: 模切机主切机构; 改进粒子群算法; 运动精度可靠性

中图分类号: TH112.1 **文献标志码:** A

The Solution of the Kinematic Accuracy Reliability of Mould-Cut Main Mechanism

WANG Xizhen¹, LI Yan¹, CHENG Ganghu², SHI Lihua³

(1. Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Faculty of Printing and Packaging Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

3. He'nan Xinji Group Co Ltd, Xinxiang 453003, China)

Abstract: Based on the geometrical theory of the reliability index and the improved PSO, a new kinematics accuracy reliability method of the mould-cut main mechanism is presented. The proposed method avoids the solution for the mean value and the standard deviation of kinematics error of Main-cut mechanism, and for the first order or more partial derivatives of the performance function. Simulations results on kinematics accuracy reliability of mechanism demonstrate that the proposed method is accurate, practical and effective.

Key words: mould-cut main mechanism; improved PSO; kinematics accuracy reliability

随着科学技术的突飞猛进, 机械产品正在向着高速、重载、轻型、精密的方向迅速发展。高质量、高性能的产品对动态精度提出了越来越高的要求, 机构运动精度可靠性的研究越来越受到重视。机构在规定的条件下, 在规定的时间内, 精确、及时、协调地完成规定机械动作(运动)的能力, 用概率表示就是机构运动精度可靠度^[1]。与一般可靠度定义的区别是机构运动精度可靠度着重解决了运动可靠性研究中的准确性问题, 强调机构动作在几何空间中运动的精确度, 在时间域内的准确性, 以及构件间的协调性、同步性, 本质上就是一种运动的功

能要求。

在以往的可靠性研究中, 较重视结构可靠性, 机构运动精度可靠性的研究较为零散, 主要使用的方法有 Taylor 展开法^[2]、Monte-Carlo 模拟法^[3]、函数替代法^[4]和概率密度演化法^[5]等。其中利用 Taylor 展开法求解机构运动误差进而求解可靠度较为常见, 但该方法一般需要计算功能函数的一阶或一阶以上的偏导数, 故较难适用于高维和高度非线性问题; Monte-Carlo 模拟法在小概率问题中计算量过大; 函数替代法难以进行全局的函数近似; 对于概率密度演化法, 若选取的差分格式不当, 则会造成错误

收稿日期: 2011-01-16

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划研究基金资助项目(2010JK706)。

作者简介: 王西珍(1980-), 女, 山西河津人, 博士生, 研究方向为机械动力学特性及性能优化。E-mail: lyl2517@yahoo.com.cn。李言(1960-), 男, 陕西彬县人, 教授, 博导, 研究方向为机电测控技术、先进制造及精密加工技术。E-mail: ly-jyxy@xaut.edu.cn。成刚虎(1962-), 男, 博士, 教授, 研究方向为印刷系统工程。E-mail: chenggao@xaut.edu.cn。

的计算结果。

全自动平压平模切机是印刷工业中重要的印后加工设备。主切机构是全自动平压平模切机的模切核心部分,其工作精度的高低直接影响输出产品的质量。

据此,本文提出了一种应用粒子群算法对模切机主切机构运动精度可靠度进行求解的方法。该方法避免了对主切机构运动误差均值及标准差的求解及运动精度可靠度求解中偏导数的计算,为模切机主切机构运动精度可靠性的研究提供了一条简捷的途径。

1 改进的粒子群算法

受鸟群运动的启发, Eberhart 和 Kennedy^[6] 于 1995 年提出了粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, 简称 PSO), 这是一种基于群体的演化算法, 源于对鸟群捕食的行为研究。算法借助粒子个体间的信息传递, 能较好地协调粒子个体和群体运动之间的关系, 有利于提高算法在复杂空间中的寻优效率。与其它进化算法相比, 粒子群算法具有概念简单、参数设置简单、收敛速度快的优点, 但随着迭代次数的增加, 各粒子变得越来越相似, 存在易陷入局部最优的问题。

在粒子群算法的可调整参数中, 惯性权重是最重要的参数, 可以用来控制算法的开发和探索能力, 对于所有的优化对象, 惯性权重 ω 都是由大到小地变化。其实, 不同的优化对象有不同的特点, 不同的搜索阶段也需要不同的惯性权重, 需要惯性权重 ω 按优化对象自己的特点随算法迭代而进行某种线性或者非线性减小, 特别是复杂函数优化时, 即每个优化对象有自己相适应惯性权重下降曲线。基于此, 本文应用文献^[8] 提出的一种改进粒子群算法 (TSW-PSO) 对模切机主切机构运动精度可靠度进行求解。

在此算法中, 不需预先给定惯性权重的值或范围, 惯性权重曲线根据种群位置变化自动更新修正, 减少了搜索过程中人为因素的影响。

2 模切机主切机构运动精度可靠度的求解

2.1 机构运动精度可靠度指标的几何原理

对机械产品进行运动精度可靠性设计分析时, 根据规定的设计性能, 建立相对应的状态函数 $g(X)$ 。状态函数可用代表基本随机因素的 n 个随机变量 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 的函数表示。随机变量 $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ 称为基本随机变量, Z 称为规定功能的状态函数^[9]。

$$Z = g(X) = g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (1)$$

极限状态方程 $g(X) = 0$ 是坐标系 $ox_1x_2 \dots x_n$ 中一个 n 维曲面, 称为极限状态曲面。根据 Hasofer 和 Lind 对可靠度指标 β 的定义^[9]: 标准正态空间内坐标原点到极限状态曲面的最短距离, 并将最短距离在极限状态曲面对应的点 $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ 定义为设计验算点。

2.2 机构运动精度可靠度求解数学模型

由上节可知, 可靠度指标的计算可以转化为求解验算点的极值问题, 故机构运动精度可靠度求解数学模型可表示为:

$$\begin{cases} \text{Min} & f(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \hat{x}_i^2} \\ \text{s. t.} & x_i \geq 0, \quad \hat{x}_i = \frac{x_i - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \\ & X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \in \Omega \\ & \Omega = \{\hat{x} \mid g(\hat{x}) = 0\} \end{cases} \quad (2)$$

式中, μ_{x_i} 、 σ_{x_i} 分别为 x_i 的均值和标准差, $g(\hat{x}) = 0$ 为标准正态随机变量 \hat{x}_i 的极限状态方程。

2.3 模切机主切机构运动精度可靠度计算步骤

模切机主切机构主要包括曲柄连杆和双肘杆机构、导向滑块及上平台 (静平台) 和下平台 (动平台), 其运动原理如图 1 所示。其中: $l_{OA} = l_{OB}$ 为曲柄半径; $l_{AC} = l_{BD}$ 为连杆长度; $l_{EC} = l_{FD}$ 为下肘杆长度; $l_{CG} = l_{DH}$ 为上肘杆长度; K 为导向滑块。

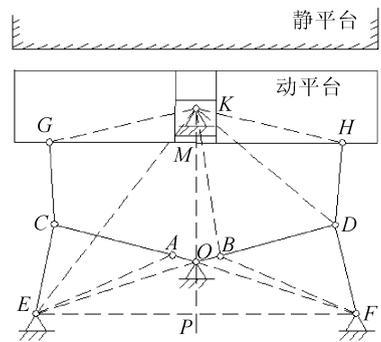


图1 模切机主切机构

Fig.1 Mould-cut main mechanism

基于 TSWPSO 的模切机主切机构运动精度可靠度计算方法的具体步骤如下。

1) 计算主切机构运动精度

模切机主切机构关键点 H 的实际输出位移可表示为:

$$y_H = y_H^* + \Delta y \quad (3)$$

式中, y_H 表示关键点 H 的实际输出位移, y_H^* 表示关键点 H 的理想输出位移, Δy 表示关键点 H 的运动误差值即运动精度。

根据式(3)及图1所示的各杆件运动关系,可得关键点H的运动精度(假设输入转角为理想值):

$$\begin{cases} \Delta y = y_H - y_H^* \\ y_H^* = l_{OP} + (l_{OB} + l_{BD}) \sin A_{OB} + l_{DH} \sin A_{DH} \\ y_H = l_{OP} + (l_{OB} + \Delta l_{OB} + l_{BD} + \Delta l_{BD}) \sin A_{OB} + \\ (l_{DH} + \Delta l_{DH}) \sin(A_{DH} + \Delta A_{DH}) \end{cases} \quad (4)$$

式中^[10]:

$$\Delta A_{DH} = \frac{1}{-l_{DH} \sin(A_{DH} + A_{KH})} [-\Delta l_{FD} \cos(A_{FD} + A_{KH}) + l_{FD} (\Delta A_{FD}) \sin(A_{FD} + A_{KH}) + \Delta l_{KH} - \Delta l_{DH} \cos(A_{DH} + A_{KH})]$$

其中^[10]:

$$\Delta A_{FD} = \frac{1}{-l_{FD} \sin(A_{FD} - A_{BD})} [\Delta l_{OB} \cos(A_{OB} - A_{BD}) + \Delta l_{BD} - \Delta l_{FD} \cos(A_{FD} - A_{BD})] \quad (5)$$

2) 确定主切机构运动精度极限状态方程

根据状态函数和极限状态方程定义,模切机主切机构运动精度极限状态方程可表示为(参见图1):

$$\begin{aligned} Z = g(X) = g(\delta, l_{OB}, l_{BD}, l_{DH}, l_{FD}) = \\ \delta - \Delta y = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中 Δy 表示运动精度, δ 表示允许极限误差。

3) 利用TSWPSO对式(2)进行优化求解

由于机构构件的尺寸误差 Δx_i 是相互独立的正态分布变量^[1],若机构基本参量 x_i 的上、下极限偏差分别为 ES_i 、 EI_i ,则其均值为 $\mu_i = (ES_i + EI_i)/2$,根据 3σ 原则,误差的标准差为 $\sigma_i = (ES_i - EI_i)/6$ 。故可直接按公式(2)对其进行标准化计算,即:

$$\begin{cases} \hat{\delta} = \frac{\delta - \mu_\delta}{\sigma_\delta} \\ \hat{l}_{OB} = \frac{l_{OB} - \mu_{l_{OB}}}{\sigma_{l_{OB}}}, \quad \hat{l}_{BD} = \frac{l_{BD} - \mu_{l_{BD}}}{\sigma_{l_{BD}}} \\ \hat{l}_{DH} = \frac{l_{DH} - \mu_{l_{DH}}}{\sigma_{l_{DH}}}, \quad \hat{l}_{FD} = \frac{l_{FD} - \mu_{l_{FD}}}{\sigma_{l_{FD}}} \end{cases} \quad (7)$$

表1 模切机主切机构典型角度的可靠度指标及运动精度可靠度

Tab.1 the kinematics reliability index and accuracy reliability of mould-cut main mechanism

曲柄转角 $\alpha/(^\circ)$	可靠度指标 β	运动精度可靠度 R	曲柄转角 $\alpha/(^\circ)$	可靠度指标 β	运动精度可靠度 R
30	2.604 587	0.995 401	210	2.532 528	0.994 338
60	2.588 716	0.995 183	240	2.539 944	0.994 456
90	2.551 722	0.994 640	270	2.544 760	0.994 532
120	2.520 742	0.994 145	300	2.575 629	0.994 997
150	2.504 450	0.993 868	330	2.596 778	0.995 295
180	2.519 763	0.994 128	360	2.628 446	0.995 711

对于非正态随机变量,可按概率等效原则计算验算点处当量正态随机变量的均值和方差。

将式(7)中的 δ 、 l_{OB} 、 l_{BD} 、 l_{DH} 、 l_{FD} 解出,即:

$$\begin{cases} \delta = \mu_\delta + \hat{\delta} \sigma_\delta \\ l_{OB} = \mu_{l_{OB}} + \hat{l}_{OB} \sigma_{l_{OB}}, \quad l_{BD} = \mu_{l_{BD}} + \hat{l}_{BD} \sigma_{l_{BD}} \\ l_{DH} = \mu_{l_{DH}} + \hat{l}_{DH} \sigma_{l_{DH}}, \quad l_{FD} = \mu_{l_{FD}} + \hat{l}_{FD} \sigma_{l_{FD}} \end{cases} \quad (8)$$

式中, μ 和 σ 分别代表均值和标准差。

将式(8)代入式(6),得:

$$\begin{aligned} Z = g(\delta, l_{OB}, l_{BD}, l_{DH}, l_{FD}) = \\ g(\mu_\delta + \hat{\delta} \sigma_\delta, \mu_{l_{OB}} + \hat{l}_{OB} \sigma_{l_{OB}}, \mu_{l_{BD}} + \hat{l}_{BD} \sigma_{l_{BD}}, \\ \mu_{l_{DH}} + \hat{l}_{DH} \sigma_{l_{DH}}, \mu_{l_{FD}} + \hat{l}_{FD} \sigma_{l_{FD}}) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

分别将式(4)和式(9)代入式(2),并利用TSWPSO算法进行优化求解,即可得到可靠度指标。

4) 计算模切机主切机构运动精度可靠度

将上述可靠度指标求解结果代入公式(10),即可求得主切机构运动精度可靠度。

$$R = \Phi(\beta) \quad (10)$$

式中, $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

3 应用实例

本文以某型模切机主切机构为例,利用TSWPSO对其进行运动精度可靠度计算。主要参数列示如下:

$$l_{OB} = 45 \pm 0.046 \text{ mm}$$

$$l_{BD} = 212 \pm 0.046 \text{ mm}$$

$$l_{FD} = 150 \pm 0.046 \text{ mm}$$

$$l_{DH} = 135 \pm 0.046 \text{ mm}$$

极限位置误差均值为 $\mu_\delta = 0.44 \text{ mm}$, $\delta = 0.1/3 \text{ mm}$ 。

根据式(2)、式(4)及式(9),并利用TSWPSO算法进行优化求解,即可得到可靠度指标及其相应可靠度。典型角度的计算结果如表1所示。经对比,本文计算结果与解析算法^[10]所得仿真数据变化规律基本一致。

4 结 论

本文基于可靠度指标的几何原理,在改进的粒子群算法(TSWPSO)基础上,提出一种求解模切机主切机构运动精度可靠度的新方法。经实例验证,该方法对主切机构运动精度可靠度的求解是实用有效的。该方法避免了对主切机构运动误差均值及标准差的求解及运动精度可靠度求解中偏导数的计算,简化了计算,为复杂机构运动精度可靠度的求解提供了新的解决方法,该方法也可应用于结构可靠度的求解。

参考文献:

- [1] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]//IEEE Int Conf on Neural Networks. Perth, 1995: 1942-1948.
- [2] 孙志礼,陈良玉. 实用机械可靠性设计理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [3] 张义民,黄贤振,贺向东,等. 任意分布参数平面连杆机构运动精度可靠性优化设计[J]. 工程设计学报, 2007, 14(4): 274-277.
Zhang Yimin, Huang Xianzhen, He Xiangdong, et al. Optimization design for kinematics accuracy reliability of planar linkage machine with arbitrary distribution parameters [J]. Journal of Engineering Design, 2007, 14(4): 274-277.
- [4] 杜小平. 机构的运动误差分析与可靠性计算[J]. 机械, 1995, 22(4): 16-18.
- [5] 吕震宙,岳珠峰,张文博. 弹性连杆机构广义刚度可靠性分析的数值模拟法[J]. 计算力学学报, 2004, 21(1): 62-66.
Lü Zhenzhou, Yue Zhufeng, Zhang Wenbo. Numerical simulation method for random-fuzzy reliability analysis of elastic linkage mechanism stiffness[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2004, 21(1): 62-66.
- [6] 崔利杰,吕震宙,王奇. 概率密度演化方法在机构运动精度可靠性中的应用研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(5): 690-694.
Cui Lijie, Lü Zhenzhou, Wang Qi. A study of the mechanism kinematic accuracy reliability by probability density evolution method [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(5): 690-694.
- [7] 雷开友. 粒子群算法及其应用研究[D]. 重庆:西南大学, 2006.
Lei kaiyou. Research on Particle Swarm Optimization and Its Application [D]. Chongqing: Southwest University, 2006.
- [8] Wang Xizhen, Li Yan, Cheng Ganghu. Particle swarm optimization with team spirit inertia weight[C]//International conference on Electrical Engineering and Automatic Control. Yiwu, China, 2010: 171-174.
- [9] 张建国,苏多,刘英卫. 机械产品可靠性分析与优化[M]. 北京:电子工业出版社, 2008.
- [10] 成刚虎,王西珍. 全自动平压平模切机肘杆机构运动精度可靠性分析[J]. 中国机械工程, 2007, 18(15): 1786-1789.
Cheng Ganghu, Wang Xizhen. Reliability analysis for kinematics accuracy on elbow-bar mechanism of automatic die cutting machine [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(15): 1786-1789.

(责任编辑 王卫勋)