

# 柴油机主运动机构运动精度可靠性算法

王西珍<sup>1</sup>, 李言<sup>1</sup>, 成刚虎<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学机仪学院, 西安 710048; 2. 西安理工大学印包学院, 西安 710048)

**摘要:** 从机构运动精度可靠指标的几何意义出发, 结合改进粒子群算法参数设置简单、收敛速度快, 精度高的特点, 提出了一种求解柴油机主运动机构运动精度可靠性的算法。该算法避免了传统算法中繁琐的偏导数求解, 有效降低了计算量。经实例验证, 该算法简便实用, 满足计算精度要求, 为机构运动精度可靠性的求解提供了一种新的有效便捷的途径。

**关键词:** 柴油机, 主运动机构, 改进粒子群算法, 惯性权重, 运动精度可靠性

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.04.032

中图分类号: TH112.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-04-0184-06

王西珍, 李言, 成刚虎. 柴油机主运动机构运动精度可靠性算法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 184-189.

Wang Xizhen, Li Yan, Cheng Ganghu, et al. Calculation method for kinematical accuracy reliability of main drive mechanism of diesel engine [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 184-189. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

随着机械向高精密化、高自动化的方向发展,在机械可靠性的研究中,结构可靠性的研究已不能满足尖端科学的要求,而机构运动精度可靠性的研究越来越受到重视。通常,结构可靠性主要是考虑机械结构的强度以及由于载荷的影响使之疲劳、磨损、断裂等引起的失效;而机构运动可靠性则是以机构精确度理论和运动误差分析为基础,在满足强度和刚度的可靠性要求基础之上,主要考虑机构在动作过程中由于运动学而引起的故障。机构运动精度可靠性是指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<sup>[1]</sup>。与一般可靠度定义的区别是机构运动精度可靠性着重解决运动可靠性中在给定运动条件下的准确性问题,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<sup>[2]</sup>, Monte-Carlo 模拟法<sup>[3]</sup>, 函数替代法<sup>[4]</sup>和概率密度演化法<sup>[5]</sup>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 模拟法需要有足够多的模拟次数才有一定的计算精度,故其计算量过大;函数替代法则难以进行全局的函数近似;概率密度演化法则利用差分方法进行概率密度演化,程序较为复杂,选取不当的差分格式甚至会造成错误的计算结

果。因此,寻求快速有效,精度较高,便于操作的机构运动精度可靠性的计算方法,依然是可靠性理论研究中值得关注的问题。本文根据运动精度可靠性指标的几何原理,结合改进粒子群算法参数设置简单、收敛速度快,精度高的特点,提出了一种求解柴油机主运动机构运动精度可靠性的一种算法,并对 4102B 型柴油机主运动机构运动精度进行了分析计算验证。

## 1 改进粒子群算法

粒子群优化算法 (PSO, particle swarm optimization) 是 Eberhart 和 Kennedy<sup>[6]</sup>于 1995 年开发的一种模拟群体智能行为的优化算法,源于对鸟群捕食的行为研究。粒子群算法在解决一些问题上与其他进化算法相比具有概念简单、参数设置简单、收敛速度快的优点<sup>[7]</sup>,但随着迭代代数的增加,各粒子变得越来越相似,存在易陷入局部最优的问题。

假设群体搜索空间为  $D$  维,粒子总数为  $n$ 。其中第  $i$  个粒子的空间位置表示为  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ , 所经历的最优位置为  $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ , 每个粒子的飞行速度为  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 。群体中所有粒子经历过最优位置为  $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ 。对每一代,其第  $d$  维 ( $1 \leq d \leq D$ ) 根据如下方程进化:

$$v_{id}^{k+1} = \omega \times v_{id}^k + c_1 \times r_1 \times (p_{id} - x_{id}^k) + c_2 \times r_2 \times (p_{gd} - x_{id}^k) \quad (1)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (2)$$

式中,  $k$  是当前迭代次数;  $\omega$  为惯性权重; 学习因子  $c_1, c_2$  是非负常数;  $r_1, r_2$  为随机数;  $v_{id}^k$  表示粒子  $i$  第  $k$  次迭代中飞行速度的第  $d$  维分量;  $x_{id}^k$  表示粒子  $i$  第  $k$  次迭代中飞行位置的第  $d$  维分量;  $p_{id}$  表示粒子  $i$  最优位置  $p_i$  的第  $d$  维分量;  $p_{gd}$  表示群体最优位置  $p_g$  的第  $d$  维分量; 在式(1)

收稿日期: 2010-08-06 修订日期: 2010-11-16

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。西安 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 710048。Email: lgdx2517@163.com

中,第2项表明粒子个体的认知能力,来源于粒子自身的经验和思考;第3项表明社会认知能力,表明粒子间的信息共享和相互作用。

在粒子群算法的可调整参数中,惯性权重 $\omega$ 是最重要的参数,用来控制算法的开发和探索能力。较大的 $\omega$ 值有利于跳出局部最优,进行全局寻优,而较小的 $\omega$ 值有利于局部寻优,加速算法收敛,故对所有的优化对象, $\omega$ 都应随算法迭代由大到小地变化。但不同的优化对象有其不同的特点,惯性权重 $\omega$ 应按照优化对象的特点随算法迭代进行某种线性或者非线性减小,即每个优化对象都应有与其相适应的惯性权重下降曲线。如文献<sup>[8]</sup>提出的具有自适应随机惯性权重的PSO算法(WPSO)。该算法采用(0,1)均匀分布的随机惯性权重且惯性权重随全局最优值变化而变化,实现了进化过程中惯性权重的自适应。但由于该算法需根据全局最优值是否发生变化来确定 $\omega$ 随机取值的范围,而如何设置 $\omega$ 随机取值范围成为制约该算法计算精度及收敛速度的瓶颈;文献<sup>[9]</sup>提出的具有团队协作精神的惯性权重策略PSO算法。该算法将PSO算法种群分成多个子群,使用算法参数去通力协作在多条惯性权重下降曲线中寻找一条与优化对象相适应的惯性权重下降曲线,实现了搜索过程中惯性权重与优化对象特点的相适应。但该算法仅给出了算法参数(惯性权重曲线)选择的一般思路,在种群的大小、维数,优化对象复杂程度等因素的影响下,算法参数的选择将直接影响收敛速度及收敛精度。在众多惯性权重曲线中如何选择适合优化对象的算法参数将成为该算法面临的又一难题。基于上述研究,作者提出一种改进粒子群算法<sup>[10]</sup>(TSWPSO)。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。

### 1.1 惯性权重曲线的产生

本文采用 Sugeno 模糊补算子函数<sup>[9,11]</sup>产生一组由大到小变化的下降曲线:

$$y = C_{\lambda}(x) = (1-x)/(1+\lambda x) \quad (3)$$

其中 $\lambda$ 是大于-1的常数, $x$ 取值范围[0,1],取不同 $\lambda$ 值即可得到不同曲线。

若求函数最小值则令式(3)中 $x = F_k^{best} / F_{k-1}^{best}$ ,  $F_k^{best}$ 表示第 $k$ 次迭代全局最小值,  $F_{k-1}^{best}$ 表示第 $k-1$ 次迭代全局最小值;若求函数最大值则令式(3)中 $x = F_{k-1}^{best} / F_k^{best}$ ,  $F_k^{best}$ 表示第 $k$ 次迭代全局最大值,  $F_{k-1}^{best}$ 表示第 $k-1$ 次迭代全局最大值。在算法运行初期,粒子进化速度快, $x$ 一般比较小,趋向于0;当算法接近收敛时, $x$ 较大,趋向于1。

式(1)中 $\lambda$ 的选取按式(4)自动选取:

$$\lambda = (1-2m) / m^2 \quad (4)$$

其中 $m \in (0,1)$ 。

由此惯性权重曲线全部产生。

### 1.2 算法设计

TSWPSO算法的具体步骤描述如下:

step1: 初始化粒子群,随机产生 $N$ 个粒子 $x(i,j)$ ,取值范围 $[a,b]$ 。每个粒子的个体极值 $p_i$ 设为其初始位置,全局极值 $p_g$ 为其中最优化。

step2: 将上述 $N$ 个粒子分成 $h$ 个子群。

step3: 给定最大循环次数 MaxDT。

step4: 根据式(3)和式(4)计算得到 $h$ 条惯性权重曲线。

step5: 对所有子群分别按PSO算法分别运行,各子群惯性权重曲线均不同。

step6: 上述计算每计算 $t$ 次,比较 $h$ 个子群独立的全局极值的大小,把有最差全局极值的子群的所有粒子全部删除,对其重新初始化,并且最差次数加1,即 $bad = bad+1$  ( $bad$ 初值为0)。当某一子群的最差次数 $bad > Q$ 时( $Q$ 提前设定,为常数),把具有最优全局极值的子群的惯性权重曲线附给这一子群,即此子群的惯性权重曲线被删掉,并将其最差次数清零。

Step7: 判断算法收敛准则是否满足或循环次数是否到了,如果满足则算法运行结束,输出相关结果;否则根据式(1)和式(2)更新每个粒子的速度与当前位置,执行step5。

### 1.3 算法有效性的测试

为了研究算法的性能,测试算法的有效性,应用本文算法(TSWPSO)对3个经典的非线性函数进行测试,并与惯性权重固定不变的标准粒子群算法(SPSO)、惯性权重线性递减的粒子群算法(LDIW)<sup>[12]</sup>、随机惯性权重粒子群算法(RIWPSO)<sup>[13]</sup>和自适应随机惯性权重粒子群算法(WPSO)<sup>[8]</sup>进行比较。3个优化函数如表1所示。

表1 测试函数

Table 1 Testing functions

简称	函数名称	维数	取值范围	最优值
$f_1$	Sphere	30	(-100,100)	0
$f_2$	Griewank	30	(-600,600)	0
$f_3$	Shaffer's sf6	30	(-100,100)	0

为了方便比较各个算法的性能,各算法的粒子群规模为 $n=90$ ,最大进化代数 $\max DT=1\ 000$ , $c_1=c_2=2$ ,维数 $D=30$ 。LDIW的惯性权重因子 $\omega$ 采用线性递减的方式从0.95减少到0.4。RIWPSO和WPSO的惯性权重因子的最大值 $\omega_{\max}=0.95$ ,最小值 $\omega_{\min}=0.4$ 。

为了进一步比较算法的性能和减少偶然性的影响,在相同迭代次数的条件下,各算法对每个函数的测试均运行20次,然后取平均值。SPSO,LDIW,RIWPSO,WPSO和TSWPSO算法的寻优结果(包括找到的最优值和平均最优值)比较如表2所示(表中试验结果均精确到小数点后5位)。

从表1的仿真结果可以看出:TSWPSO算法相比其他4种算法性能有显著改进。对于测试函数 $f_1$ 和 $f_3$ ,TSWPSO算法都获得了全局最优值。由图1~3可知,本文提出TSWPSO算法收敛曲线的下降速度比其他4种算法要快得多,目标函数值也下降到更低的水平。

表2 与其他4种算法的优化结果比较

函数	算法	最优值	平均最优值
$f_1$	SPSO	1.63993e+003	2.92195e+003
	LDIW	10.02410	34.99470
	RIWPSO	5.20960	77.67157
	WPSO	3.63447	21.32780
	TSWPSO	0	0.59372
$f_2$	SPSO	18.85612	22.69313
	LDIW	4.72045	6.96667
	RIWPSO	3.50981	6.82899
	WPSO	2.62859	5.80466
	TSWPSO	5.69126e-006	3.09975
$f_3$	SPSO	0.00859	0.00972
	LDIW	0	0.00243
	RIWPSO	0	0.00194
	WPSO	0	0.00534
	TSWPSO	0	4.85795 e-004

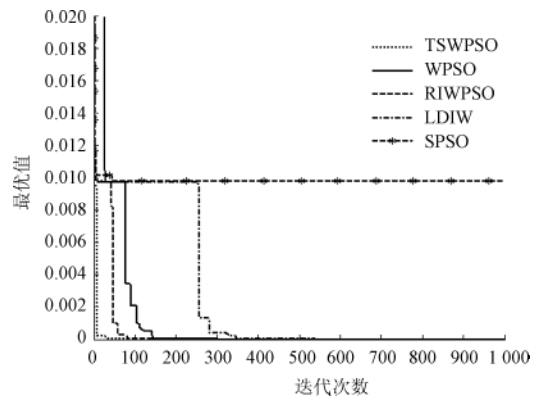


图3 Shaffer'sf6 函数的寻优曲线  
Fig.3 Optimization curves of Shaffer'sf6

### 2 机构运动精度可靠度计算的几何原理

在运动精度可靠性分析中，设由  $n$  个相互独立正态随机变量  $X_1, X_2, \dots, X_n$  组成的极限状态方程为：

$$Z = g(X) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (5)$$

引入标准化的随机变量：

$$y_i = \frac{x_i - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \quad (6)$$

式中， $\mu_{x_i}, \sigma_{x_i}$  分别为  $x_i$  的均值和标准差。将  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  空间的极限状态方程变换到  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$  空间，即将式（6）中的  $x_i$  解出即：

$$x_i = \mu_{x_i} + \sigma_{x_i} y_i \quad (7)$$

将式（7）代入式（5），则式（5）可相应的表示为：

$$Z' = g'(Y) = g'(y_1, y_2, \dots, y_n) = 0 \quad (8)$$

根据 Hasofer 和 Lind 对可靠指标  $\beta$  的定义<sup>[14]</sup>：标准正态空间内坐标原点到极限状态面的最短距离。所以在标准化正态空间中，可靠指标  $\beta$  的求解可以转化为如下等式约束条件下的极值问题：

$$\beta = \min \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (9)$$

等式约束条件：

$$g'(y_1, y_2, \dots, y_n) = 0 \quad (10)$$

机构的基本随机参数向量  $X$  一般服从正态分布<sup>[3]</sup>，所以求出  $\beta$  后即可求出机构的运动精度可靠度：

$$R = \Phi(\beta) \quad (11)$$

式中， $\Phi(\beta)$  为标准正态分布函数。

### 3 柴油机主运动机构运动精度可靠度的求解

下面以 4102B 型<sup>[15]</sup>柴油机主运动机构的运动精度可靠度求解为例，说明改进的粒子群算法 TSWPSO 在柴油机主运动机构运动精度可靠度中的求解方法。4102B 型柴油机主运动机构如图 4 所示。

图 4 中， $r$  为曲柄半径，表示曲柄销中心与曲轴旋转

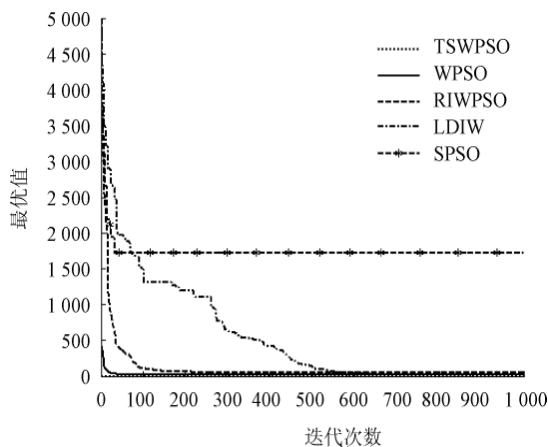


图1 Sphere 函数的寻优曲线  
Fig.1 Optimization curves of Sphere

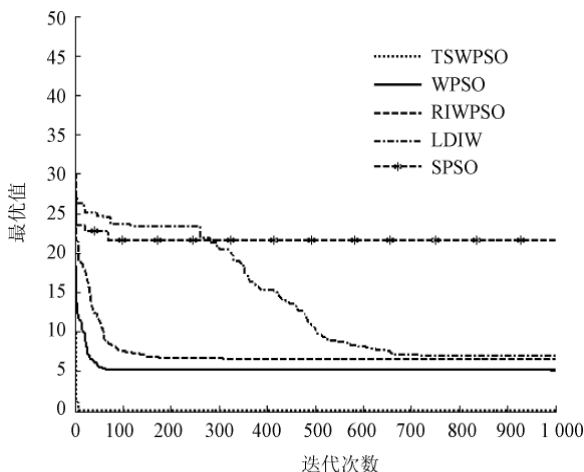


图2 Griewank 函数的寻优曲线  
Fig.2 Optimization curves of Griewank

中心的距离,  $r=59$  mm;  $l$  为连杆长度, 表示连杆大、小头孔中心的距离  $l=192$  mm;  $\alpha$  为曲柄转角, 表示曲轴偏离气缸中心线的角度,  $0 \leq \alpha \leq 360$ 。机构结构件几何尺寸的标准差可以根据公差标准确定, 一般情况下公差尺寸为其名义尺寸的 0.0015 倍, 若取此公差尺寸的  $3\sigma$  水平, 则其基本设计参数的变异系数为 0.005<sup>[16]</sup>; 允许极限误差特征值  $(\mu_\delta, \sigma_\delta)=(0.50, 0.05)$ 。

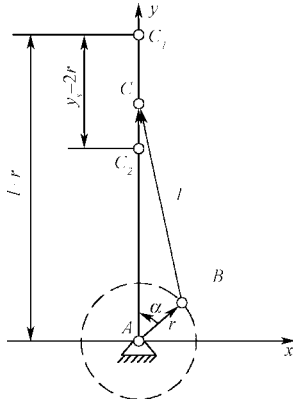


图 4 4102B 型柴油机主运动机构  
Fig.4 Main drive mechanism of 4102B diesel engine

### 3.1 计算步骤

1) 确定设计变量及取值范围。

柴油机曲柄连杆机构主要是确定 3 个结构参数, 即曲柄半径  $r$ , 连杆长度  $l$  和允许极限误差  $\delta$ , 因此设计变量为:

$$X = (x_1, x_2, x_3) = (r, l, \delta) \quad (12)$$

其中, 机构构件的尺寸误差  $\Delta x_i$  服从正态分布。(这已为工程实际所证实且为中心极限定理所证明), 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  $\mu_i=(ES_i+EI_i)/2$ , 由  $3\sigma$  原则误差的标准差为  $\sigma_i=(ES_i+EI_i)/6$ 。

2) 计算运动精度。

据图 4 中所示的运动矢量关系可得相应的理想输出位移  $y^*$  为 (其中 \* 表示各设计变量理想值。假设输入转角为理想值, 各变量相互独立并服从正态分布):

$$\begin{aligned} y^* &= f(r^*, l^*, \alpha) = r^* \cos \alpha + l^* \sqrt{1 - \left(\frac{r^*}{l^*}\right)^2 \sin^2 \alpha} \\ &= r^* \cos \alpha + \sqrt{(l^*)^2 - (r^*)^2 \sin^2 \alpha} \end{aligned} \quad (13)$$

其实际输出位移可表示为:

$$y = y^* + \Delta y \quad (14)$$

故运动精度:

$$\begin{aligned} \Delta y &= y - y^* = f(r^* + \Delta r, l^* + \Delta l, \alpha) - f(r^*, l^*, \alpha) \\ &= (r^* + \Delta r) \cos \alpha + \sqrt{(l^* + \Delta l)^2 - (r^* + \Delta r)^2 \sin^2 \alpha} - \\ &\quad \left( r^* \cos \alpha + \sqrt{(l^*)^2 - (r^*)^2 \sin^2 \alpha} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

3) 确定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, 柴油机主运动机构运动精度极限状态方程可表示为:

$$Z = g(X) = g(x_1, x_2, x_3) = \delta - \Delta y = 0 \quad (16)$$

式中,  $\Delta y$  表示运动精度,  $\delta$  表示允许极限误差。

4) 确定约束方程

由于机构构件的尺寸误差  $\Delta x_i$  服从正态分布, 故可直接按公式 (5) 对其进行标准化计算:

按公式 (2) 对设计变量标准化:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\delta} &= \frac{\delta - \mu_\delta}{\sigma_\delta} \\ \hat{l} &= \frac{l - \mu_l}{\sigma_l} \\ \hat{r} &= \frac{r - \mu_r}{\sigma_r} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中,  $\mu_\delta, \sigma_\delta$  分别为允许极限误差的均值和标准差;  $\mu_l, \sigma_l$  分别为连杆  $l$  的均值和标准差;  $\mu_r, \sigma_r$  分别为曲柄  $r$  的均值和标准差。均为已知量。

将式 (17) 中的  $\delta, l, r$  解出即:

$$\left. \begin{aligned} \delta &= \mu_\delta + \hat{\delta} \sigma_\delta \\ l &= \mu_l + \hat{l} \sigma_l \\ r &= \mu_r + \hat{r} \sigma_r \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

对于非正态随机变量, 可按概率等效原则<sup>[17]</sup>计算验算点处当量正态随机变量的均值和方差。

将式 (18) 代入式 (16), 得到约束方程:

$$Z' = g'(Y) = g'(y_1, y_2, y_3) = g'(\hat{\delta}, \hat{l}, \hat{r}) \quad (19)$$

### 3.2 利用 TSWPSO 算法求解柴油机主运动机构运动精度可靠度。

由设计变量, 目标函数, 约束方程建立柴油机主运动机构运动精度可靠性数学模型:

$$\left\{ \begin{aligned} R &= \Phi(\beta) \\ \beta &= \min f(x) = \min \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2} \\ y_i &= \frac{x_i - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}}, x_i \geq, (i = 1, 2, 3) \\ \text{s.t. } X &= \{x_1, x_2, x_3\} \in \Omega \\ \Omega &= \{y \mid g'(Y) = 0\} \end{aligned} \right. \quad (20)$$

利用 TSWPSO 算法对式 (20) 进行优化求解, 求解结果如表 3 所示。当  $\alpha=180^\circ$  时, 4102B 型柴油机主运动机构的运动精度可靠性具有最小值  $R=0.99100402848810$ , 与解析算法<sup>[11]</sup>计算的可靠度  $R=0.99099729655183$  基本一致。

表 3 4102B 型柴油机主运动机构部分角度可靠性指标及运动精度可靠度

Table 3 Kinematics accuracy reliability index and reliability of the main drive mechanism of 4102B

曲柄转角 $\alpha/(\circ)$	可靠性指标 $\beta$	运动精度可靠度 $R$	曲柄转角 $\alpha/(\circ)$	可靠性指标 $\beta$	运动精度可靠度 $R$
30	2.69123260422538	0.99644057295664	210	2.46596820339213	0.99316782682881
60	3.48092639249170	0.99975015860503	240	2.74983955178694	0.99701877739716
90	3.42906854432036	0.99969717172616	270	3.38487007255575	0.99964394023338
120	2.6555721050594	0.99604112490737	300	3.54586011091129	0.99980433305586
150	2.44003352553294	0.99265705053574	330	2.68895803325640	0.99641622852538
180	2.36578389670257	0.99100402848810	360	2.39408616389984	0.99166908295459

## 4 结 论

本文基于可靠性指标的几何原理,结合改进粒子群算法(TSWPSO),提出一种求解柴油机主运动机构运动精度可靠性的一种算法,得出了如下主要结论:

1) TSWPSO 算法计算简单,操作简便,收敛速度快,计算精度高。应用于求解机构运动精度可靠度物理意义明确,并且避免了偏导数的求解,特别适合于求偏导数和偏导数不存在的机构运动精度可靠性的求解,同时也可以将其应用于结构可靠度的求解;

2) 对 4102B 型柴油机主运动机构的运动精度可靠度分析表明,该方法简便实用,求解误差在 6.8e-004 (%) 内,可以满足计算精度要求。

### [参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 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. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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.
- [4] 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. (in Chinese with English abstract)
- [5] 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. (in Chinese with English abstract)
- [6] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]// IEEE Int Conf on Neural Networks, Perth, Australia. 1995: 1942-1948.
- [7] 刘建华,樊晓平,瞿志华. 一种基于相似度的新型粒子群算法[J]. 控制与决策, 2007, 22(10): 1155-1159.  
Liu Jianhua, Fan Xiaoping, Qu Zhihua. A new particle swarm optimization algorithm based on similarity[J]. Control and Decision. 2007, 22(10): 1155-1159. (in Chinese with English abstract)
- [8] 延丽平,曾建潮. 具有自适应随机惯性权重的 PSO 算法[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(4): 4677-4679.  
Yan Liping, Zeng Jianchao. Particle swarm optimization with self-adaptive stochastic inertia weight[J]. Computer Engineering and Design. 2006, 27(4): 4677-4679. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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. (in Chinese with English abstract)
- [10] Wang Xizhen, Li Yan, Cheng Ganghu. Particle swarm optimization with team spirit inertia weight[C]//International conference on Electrical Engineering and Automatic Control. 2010: 171-174.
- [11] Sugeno M. Fuzzy measures and fuzzy integers: a survey[C]//Fuzzy Automation and Decision Processes, Amsterdam, North Holland. 1977: 89-102.
- [12] Shi Y, Eberhart R. A modified particle swarm optimization[C]//Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, Piscataway, NJ. 1998: 69-73.
- [13] Zhang L P, Yu H J, Hu S X. A new approach to improve particle swarm optimization[C]//Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, Chicago, USA. 2003: 134-139.
- [14] 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.
- [15] 王学显. 4102B 型柴油机曲柄连杆机构运动学和动力学分析及其仿真[D]. 大连: 大连交通大学, 2007.  
Wang Xuexian. The Kinematics and Dynamics Analysis and Simulation for Crank Link Mechanism in 4102B Diesel Engine[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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 of Agricultural Machinery,

2008, 39(7): 139—143. (in Chinese with English abstract)

[17] 谢里阳, 王正, 周金宇, 等. 机械可靠性基本理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

## Calculation method for kinematical accuracy reliability of main drive mechanism of diesel engine

Wang Xizhen<sup>1</sup>, Li Yan<sup>1</sup>, Cheng Ganghu<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** According to the geometrical meaning of the kinematics accuracy reliability index, a method for kinematical accuracy reliability of main drive mechanism of diesel engine was presented by means of the combination of the improved PSO which has a lot of advantages such as less parameters, swift convergence rate and higher precision. The proposed method avoided the complicated partial derivatives in traditional method, and the computation was effectively reduced. It was shown by instances that the method was simple, practical and satisfied the requirements of calculated precision, thus a new valid method was provided for the solution of kinematical accuracy reliability of mechanism.

**Key words:** diesel engine, main drive mechanism, improved PSO, inertia weight, kinematical accuracy reliability