

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.02.002

基于遗传算法的机器零件圆柱度误差评定方法研究*

陈 强¹, 张馨丹¹, 孙连政¹, 陶学恒^{1,2*}

(1. 大连工业大学 辽宁省海洋食品加工技术装备重点实验室, 辽宁 大连 116034;

2. 国家海洋食品工程技术研究中心, 辽宁 大连 116034)

摘要:为解决机器零件圆柱度误差在线评定过程复杂和精度较低的问题,将遗传算法应用于圆柱度误差在线评定方法的研究中。根据测量装置的工作原理,建立了圆柱度误差评定的数学模型,并对其进行了简化;采用实数编码和引入迁移算子的遗传算法对最小区域圆柱度误差进行了评定,通过设计圆柱度误差在线检测装置,利用 Matlab 和 VC 混合编程的方式,完成了圆柱度误差评定系统的构建,最后采用实验数据对系统性能进行了测试。研究结果表明,所构建的误差评定系统能够简化误差评定过程,并可满足机器零件精度检验的要求。

关键词:圆柱度;误差评定;数学模型;遗传算法;系统构建

中图分类号:TH115;TH73

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)02-0134-06

Construction and application of cylindrical error evaluation method for machine parts based on genetic algorithm

CHEN Qiang¹, ZHANG Xin-dan¹, SUN Lian-zheng¹, TAO Xue-heng^{1,2}

(1. Liaoning Seafood Processing Technology and Equipment Key Lab, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China; 2. National Engineering Research Center of Seafood, Dalian 116034, China)

Abstract: In order to solve the problems of complex and low accuracy of the on-line evaluation for machine parts, the genetic algorithm was investigated. According to the working principle of the measuring device, the mathematical model of the cylindrical error evaluation was established and simplified. The minimum regional error was evaluated, by using the genetic algorithm of real number encoding and transfer operator. The construction of the system was accomplished by the on-line detection device and mixed program of Matlab and VC, and the performance of the system was tested by the experimental data. The research results show that the error evaluation system can simplify the processing and meet the accuracy requirement of parts detection.

Key words: cylindricity; error evaluation; mathematical model; genetic algorithm; system construct

0 引 言

圆柱度误差主要用来评价回转类零件的精度,准确的圆柱度误差不仅可以检验零件的合格状况,还可以提高机械产品的加工质量。在实际检测过程中,常用的圆柱度误差评定方法主要有最小二乘法和最小区

域法。其中,最小二乘法由于其成熟的理论、确定的数学公式以及容易在计算机上实现的优点,应用最为普遍。但是该评定方法在求圆柱理想轴线时,截面上所有测量点的坐标均参与运算,从而导致计算出的误差值较大。最小区域法是唯一符合国家标准中关于圆柱度误差定义的评价方法,当误差评定结果存在争议时,

收稿日期:2015-10-21

基金项目:国家海洋食品工程技术研究中心资助项目(2012FU125X03)

作者简介:陈 强(1991-),男,山西忻州人,硕士研究生,主要从事机械装配过程中检测技术的研究。E-mail:1403923827@qq.com

通信联系人:陶学恒,男,工学博士,教授。E-mail: xhtao@dlpu.edu.cn

以最小区域法的结果作为裁定依据^[1]。

目前,关于最小区域法评定圆柱度误差尚无统一的标准,Murthy提出了将圆柱轮廓上的测量值投影到平面上,然后用求平面度的方法来求圆柱度误差;Carr提出了用线性规划的方法来求解圆柱度误差;侯宇用“最小面积”准则建立了圆柱度误差的数学模型,并用有效集法进行求解,以上算法都是通过将最小区域转换为其它方法来评定圆柱度误差,不易在计算机上实现。温秀兰^[2]提出了用改进的遗传算法来评定圆柱度误差,但在算法控制中只有种群规模,而没有确定交叉、变异等参数;贝广霞^[3]提出了基于遗传算法的圆柱度误差评定方法,但是没有考虑到种群间的迁移对解的影响,以上算法在遗传操作中均存在不足。采用最小区域法评定圆柱度误差,即为寻找两个能够完全包容被测零件实际轮廓的同轴圆柱面,并且使其半径差值最小,因此需要构造合适的目标函数进行优化求解。

本研究对圆柱度误差评定的数学模型进行简化,采用实数编码和引入迁移算子的遗传算法,对目标函数进行优化求解,利用混合编程的方式实现圆柱度误差评定系统的构建,最后采用实验数据对误差评定系统的性能进行测试。

1 圆柱度误差评定数学模型的建立

圆柱度误差评定过程就是拟合轴线不断逼近理想轴线的过程。当轴线逼近的位置和方向不同时,半径的差值也不同,沿着半径差值减小的方向找到的最小值即为圆柱度误差,最小值对应的轴线即为圆柱的理想轴线。

1.1 圆柱度误差的测量装置及工作原理

圆柱度误差测量装置主要由丝杆、连接杆、电机、测杆、测试棒和测头(接触式针型结构)组成,该装置原理示意图如图1所示。测头分3层布置在测试棒上^[4],测试棒的旋转运动由电机实现,上、下运动是通过丝杆将旋转运动转换为连接杆的直线运动而实现的。

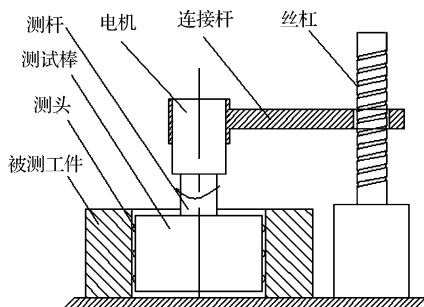


图1 圆柱度误差测量装置原理

测量装置工作时,被测工件固定不动,测试棒向下

运动进入被测工件中,并在电机的作用下匀速转动,测头上的传感器自动读取3个截面上不同测量点的坐标并将其存储到txt文件中,经过程序处理后求得误差值。获得测量点的坐标后,连接杆向上运动,测试棒离开被测工件,开始下一个被测工件的测量过程。

1.2 圆柱度误差评定数学模型

本研究以测头的回转中心为原点建立空间直角坐标系 $OXYZ$,沿着被测圆柱的轴线等距离的取 m 个测量截面,在每个测量截面等角度的取 n 个测量点,设被测零件实际轮廓上各测量点的坐标为 $P_{ij}(r_{ij}, \theta_{ij}, z_{ij})$, $i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n$ 。其中: i —被测零件的截面个数, j —各个测量截面上的采样点数, r_{ij} —被测零件截面上各点的实际半径, θ_{ij} —截面上相应测量点的角度。设圆柱的理想轴线 L 与其一个端面的交点坐标为 (a, b, c) ,轴线 L 的方向数为 (f, g, h) ^[5],则各测量点在直角坐标系下可以表示为:

$$\begin{aligned} x_{ij} &= r_{ij} \cos \theta_{ij} \\ y_{ij} &= r_{ij} \sin \theta_{ij} \\ z_{ij} &= z_{ij} \end{aligned} \quad (1)$$

圆柱的轴线方程如下式所示^[6-7]:

$$\frac{x_{ij} - a}{f} = \frac{y_{ij} - b}{g} = \frac{z_{ij} - c}{h} \quad (2)$$

截面上各测点到理想轴线 L 的距离如下式所示:

$$R = \frac{\begin{vmatrix} i & j \\ x_{ij} - a & y_{ij} - b \\ f & g \end{vmatrix}}{\sqrt{f^2 + g^2 + h^2}} \quad (3)$$

只要获得 a, b, c, f, g, h 这6个参数的最优值,便可求得理想轴线的方程,并求出圆柱度误差。由于式(3)化简后是非线性的,优化时难度较大,为了计算方便,需要做一些假设:理想轴线 L 平行于 z 坐标轴并且轴线与其某一端面交点的 z 轴坐标为零,即 $h = 1, c = 0$,这样需要优化的参数就由6个变为4个^[8-9]。公式(3)可以简化为:

$$R = \sqrt{(x_{ij} - fz_{ij} - a)^2 + (y_{ij} - gz_{ij} - b)^2} \quad (4)$$

采用最小区域法评定圆柱度误差即为通过寻找两个能够完全包容被测零件实际轮廓的同轴圆柱面,并且使其半径的差值最小,最小区域法如图2所示。由此可以将圆柱度误差的目标函数定义为:

$$f(a, b, f, g) = \max \{R_i\} - \min \{R_i\} \quad (5)$$

采用遗传算法搜索优化就是寻找 a, b, f, g 这4个待优化参数的近似最优值,进而求得目标函数的最小值,最小值即为圆柱度误差值。

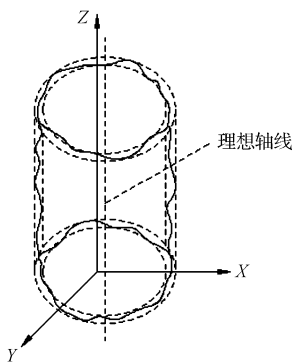


图2 最小区域法

2 基于遗传算法的零件圆柱度误差评定方法

遗传算法是美国 J. Holland 教授提出的一种全局随机搜索算法。与传统优化算法相比,由于遗传算法是从群体开始搜索,以概率进行迭代,具有全局优化搜索与随机搜索的优点,本研究采用遗传算法对最小区域圆柱度误差目标函数进行优化求解^[10]。

遗传算法的主要步骤有:编码并产生初始种群、适应度函数的选择、遗传搜索以及算法终止并输出最优参数,其流程如图3所示。

2.1 编码与初始种群生成

编码方式主要有二进制编码与实数编码两种,传统的遗传算法需要对待求问题进行编码,在找到最优解之后还需要解码,过程较为复杂,而且其寻优速度会随着字符串长度的增加而逐渐降低。为了减少寻优过程中的计算量,本研究采用实数编码方式进行编码。随机生成 n 个初始串集组成一个群体,遗传算法以这些串集作为初始点开始迭代。

2.2 适应度函数的选择

如何选择合适的适应度函数来评价群体的性能是遗传算法的关键。适值评估是遗传算法用来指导搜索方向的唯一法则,在搜索过程中通常不需要其他外部信息,只需目标函数和相应的适应度函数即可。适应度函数一般由目标函数变换而得,本研究将圆柱度误差目标函数表达式(5)的倒数作为适应度函数,其表达式如下式所示:

$$fit(a, b, f, g) = \frac{1}{\max\{R_i\} - \min\{R_i\}} \quad (6)$$

式中: R_i —各测量点到理想轴线 L 的距离,已在式(4)中给出。

式(6)中每个变量均代表一个基因, $U_{ij} = (a, b, f, g)$ 为4个变量组成的染色体,每个染色体就代表一

个可能解。根据测量点的坐标数据,染色体中基因的取值范围为 $a, b \in [-50, 1, 50, 1]$; $f, g \in [-1, 1]$ ^[11]。

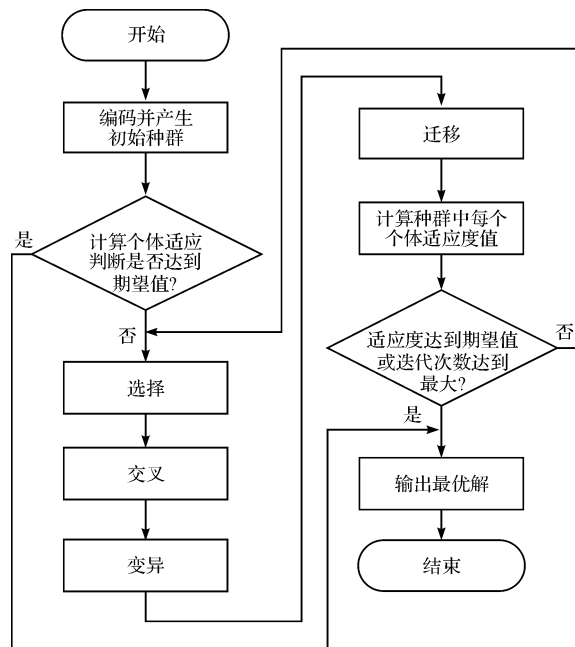


图3 遗传算法流程图

2.3 遗传搜索

遗传搜索主要包括选择、交叉、变异、迁移等,其目的是按照个体对环境的适应度值进行优胜劣汰的选择,从而使问题的解逐渐逼近最优解。

本研究中的选择算子采用轮盘赌方式,根据种群中个体的适应度值挑选出优良的个体进入到下一代,其进入到下一代的概率等于该个体的适应度值与所有个体的适应度值之和的比例^[12],如下式所示:

$$P = \frac{fit(u_k)}{\sum_{k=1}^N fit(u_k)} \quad (7)$$

从式(7)中可以看出个体的适应度值越大,其被选择进入到下一代的概率就越大。

在遗传算法中,交叉算子对进化过程起着重要的作用,单点交叉是最常用的交叉方式。具体操作是:通过随机设置一个交叉点,将该点前、后两个个体的组成部分互换,进而生成两个新的个体,交叉概率取值一般为 $0.6 \sim 0.8$ ^[13]。

本研究按照变异概率随机地改变个体某些染色体上的基因,生成新个体。通过比较新个体与原个体的适应度值,倘若新个体适应度值大于原个体,则朝着变异的方向继续变异,直至其数值小于原个体,然后找到最后大于原个体的新个体。变异概率取值一般为 $0.01 \sim 0.1$ 。

为了解决遗传算法中因早熟收敛而导致局部最优解的问题,笔者在遗传算法中引入迁移算子,将子群中

最好的个体迁移到其他子群,从而实现各个种群之间的信息交流,提高最优解的精度。

2.4 算法终止

当遗传代数达到预先设定的最大值时或者是适应度达到期望值时,算法终止并输出最优值,实现了利用遗传算法寻找目标函数最优参数的计算。在获得目标函数的最优参数后,求得式(5)的最小值即为最小区域圆柱度误差值。

3 圆柱度误差评定系统的构建

3.1 圆柱度误差在线检测装置的构成

圆柱度误差在线检测装置如图4所示,其主要由被测工件、输送机、传感器、挡板、丝杠升降平台、电机、测试棒等组成。

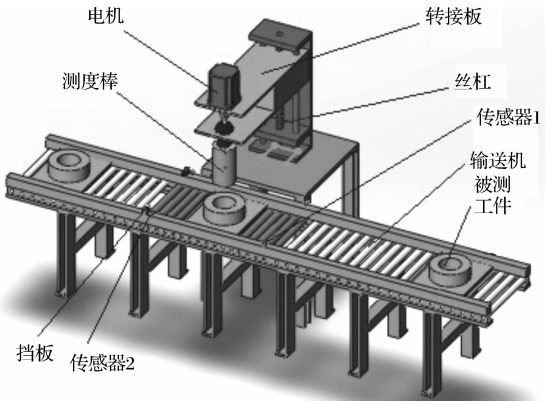


图4 圆柱度误差在线检测示意图

被测工件在输送机的作用下向前运动,当传感器1检测到被测工件时,挡板伸出,当传感器2检测到被测工件时,输送机停止工作。在丝杆升降平台的作用下,测试棒向下运动并进入到被测工件中,在电机的作用下,旋转一周,传感器自动采集被测工件的坐标数据。当完成数据采集后,挡板缩回,测试棒离开被测工件,输送机开始工作,进入下一个工件的检测过程。

3.2 圆柱度误差评定系统的组成及功能

圆柱度误差评定系统主要由评定算法模块和辅助模块组成,系统结构图如图5所示。不同的圆柱度误差评定方法,最终数据处理的结果也不相同。本研究采用最小区域法来评定圆柱度误差,对目标函数的待优化参数应用遗传算法进行求解,计算得到的最小值即为圆柱度的误差。

辅助模块由数据导入、数据存储、数据显示与图形可视化4部分组成,系统通过编写文本数据按钮的消息函数,读取预先存储在txt文件中的坐标数据,然后

对坐标数据进行计算获得误差值,最后将计算求得的误差值和拟合出的图形以直观的方式显示在软件界面中。

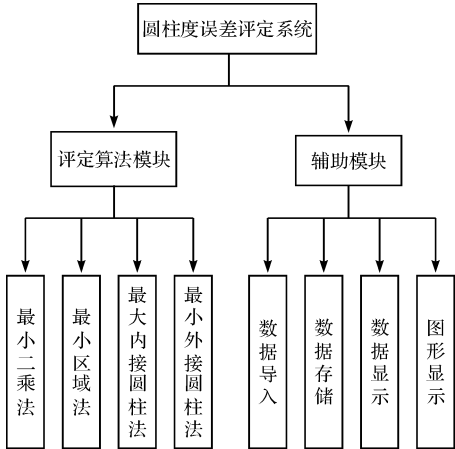


图5 圆柱度误差评定系统的结构

3.3 圆柱度误差评定系统实施技术

在设计圆柱度误差评定系统时,如果采用VC处理数据将会极大的增加工作量,并且难以保证处理精度。因此本研究借用Matlab强大的数学功能对检测到的数据进行处理,而用VC做出系统界面^[14]。目前,VC调用Matlab的方法主要有3种:第一种是使用Matlab Engine,但是其执行效率较低;第二种是使用Matcom;第三种是使用Matlab进行编译,产生可以被VC识别的DLL文件或COM组件。该评定系统采用的是在VC中调用Matlab COM组件。

首先笔者根据基于遗传算法的最小区域圆柱度误差评定方法编写m文件,并创建COM组件。通过在Matlab的命令窗口输入deploytool,可以打开Deploy Tool工具箱,点击创建发布工程,选择通用COM组件,将编写的m文件添加到组件类中,完成COM组件的编译。

然后本研究在VC中创建一个基于MFC对话框的工程,通过使用控件在对话框中设计的界面,如图6所示^[15]。笔者将创建COM组件时生成的dll文件拷贝到对话框工程文件夹中,并在VC中用#import把dll文件导入工程中^[16-17]。



图6 圆柱度误差评定系统

最后笔者编写程序,实现通过点击选择按钮打开存储测量点坐标的 txt 文件,以读的模式将文件中的坐标数据读入到坐标点数组中,选择误差评定方法,点击计算按钮,将获得的误差值输出到界面中,最终实现利用 VC 调用 Matlab COM 组件完成圆柱度误差评定的功能。

4 应用实例

本研究采用 EIC-300 电感电子柱测微仪,对海产品加工技术装备中应用的 NTN3220 角接触球轴承内环轴径($\Phi 100$)进行检测,并将检测到的数据经过坐标变换转换为直角坐标数据。3 个截面的坐标数据如表 1 所示。

表 1 3 个截面的坐标数据(单位:mm)

<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
50.009 5	0	10.000 0	50.007 8	0	30.000 0	50.008 4	0	50.000 0
43.279 3	24.986 5	10.000 0	43.276 5	24.987 3	30.000 0	43.278 7	24.988 3	50.000 0
24.990 1	43.284 1	10.000 0	24.993 5	43.284 1	30.000 0	24.992 7	43.284 1	50.000 0
0	49.984 9	10.000 0	0	49.983 6	30.000 0	0	49.984 3	50.000 0
-25.001 3	43.303 4	10.000 0	-25.002 5	43.302 6	30.000 0	-25.005 4	43.304 3	50.000 0
-43.275 2	24.985 0	10.000 0	-43.273 5	24.985 6	30.000 0	-43.276 3	24.986 8	50.000 0
-49.966 1	0	10.000 0	-49.964 3	0	30.000 0	-49.962 5	0	50.000 0
-43.282 3	-24.989 1	10.000 0	-43.283 4	-24.988 3	30.000 0	-43.284 2	-24.987 5	50.000 0
-24.989 6	-43.283 2	10.000 0	-24.988 7	-43.284 0	30.000 0	-24.988 3	-43.283 8	50.000 0
0	-50.012 7	10.000 0	0	-50.014 3	30.000 0	0	-50.013 5	50.000 0
25.007 7	-43.314 5	10.000 0	25.006 4	-43.314 8	30.000 0	25.008 0	-43.316 5	50.000 0
43.325 4	25.014 0	10.000 0	43.326 3	25.014 7	30.000 0	43.324 6	25.015 1	50.000 0

表 2 圆柱度误差值(单位:mm)

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>p</i>	<i>q</i>	最高点	最低点	误差值
最小区域法	-0.370 9	-0.006 4	0.003 3	0.006 3	0.086 7	0	0.086 7
最小二乘法	0.273 1	0.006 1	-0.003 5	-0.004 1	0.047 6	-0.044 5	0.092 1
最小外接圆柱法	0.264 0	0.006 9	0.001 9	-0.003 6	0	-0.088 3	0.088 3
最大内接圆柱法	-0.271 3	0.005 3	0.002 2	-0.004 5	0.091 5	0	0.091 5

5 结束语

本研究对圆柱度误差各种评定方式进行了分析,建立了最小区域圆柱度误差评定的数学模型,通过假设理想轴线 *L* 平行于 *z* 坐标轴并且其起点的 *z* 轴坐标为零,将需要优化的参数由 6 个降为 4 个,加快了优化过程。本研究采用实数编码和引入迁移算子的遗传算法对目标函数进行优化求解,并设计了圆柱度误差在线检测装置,利用 Matlab 与 VC 混合编程的方式,实现了在 VC 中调用 Matlab COM 组件,完成了圆柱度误差评定系统的构建。

笔者将电感电子柱测微仪检测到轴承内径数据用

本研究在 Matlab 中编写适应度函数 m 文件,然后在命令窗口中输入 gatool,弹出遗传算法优化工具箱,设置参数如下:

种群大小为 20,选择算子采用轮盘赌方式,交叉算子采用单点交叉,交叉概率取 0.8,变异概率取 0.1,迁移率取 0.2,迁移间隔取 20,迭代代数取 100。

经过 52 代迭代终止,本研究得到最小区域法的优化参数 *a*,*b*,*f*,*g* 的数值,求得的圆柱度误差为 0.086 7 mm。为了验证该算法的准确性,本研究分别采用最小二乘法、最小内接圆柱法与最大外接圆柱法来评定误差,圆柱度误差值如表 2 所示。通过比较 4 种常见的圆柱度误差的评定结果,可以看出采用最小区域法求出的圆柱度误差值最小,符合圆柱度误差评定理论。

于测试圆柱度误差评定系统的性能,计算结果表明,圆柱度误差评定系统能够满足检验零件精度的要求。

参考文献(References):

[1] 黄 祥. 基于最小区域法的圆柱度几何误差评定[J]. 组合机床与自动化加工技术,2013(6):27-29.
[2] 温秀兰,宋爱国. 基于改进遗传算法评定圆柱度误差[J]. 计量学报,2004,25(2):115-118.
[3] 贝广霞,楼佩煌,王晓勇,等. 基于遗传算法的圆柱度误差评定方法[J]. 山东大学学报:工学版,2008,38(2):33-36.
[4] 孔德隆. 形位误差评定算法及评定系统的研究[D]. 北京:北京交通大学机械与电子控制工程学院,2009.
[5] 丁 玲. 圆度与圆柱度误差评定算法的设计与应用[D].

- 西安:西安电子科技大学机电工程学院,2013.
- [6] 张娇娜,郭伟伟,曹衍龙,等. 圆柱度误差评价方法研究[J]. 机床与液压,2008,36(2):106-109.
- [7] 廖平. 基于遗传算法的形状误差计算研究[D]. 长沙:中南大学机电工程学院,2002
- [8] 郭慧,林大钧,潘家祯,等. 基于多种群遗传算法的圆柱度误差评定[J]. 工程图学学报,2008,29(4):48-53.
- [9] 刘涛,侯富勇,李传恒. 三段基圆渐开线涡旋型线的多目标遗传算法优化[J]. 流体机械,2015,43(8):40-43.
- [10] 陈颀,李郝林. 基于改进遗传算法的圆度误差评定[J]. 机械设计与制造,2006,27(1):20-21.
- [11] CUI Chang-cai. Form error evaluation of circles based on a finely-designed genetic algorithm [J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**,2004(2):59-62.
- [12] ZHOU Jing-bo, SUN Tao. Robustness and precision evaluation of the form error of micro-structured surfaces using real coded genetic algorithm [J]. **Journal of Beijing Institute of Technology**,2012(4):479-486.
- [13] 李学军,常智勇,莫蓉,等. 基于遗传算法的圆柱几何特征信息的测量[J]. 计算机工程与应用,2006(22):56-58.
- [14] 安红静,赵国勇,申永. 基于COM组件的圆度误差评定软件设计[J]. 机床与液压,2013,41(15):121-123.
- [15] 申远,古万荣. 零基础学 Visual C++ [M]. 4版. 北京:机械工业出版社,2014
- [16] 田丽华,曾航. 基于COM组件的Matlab与VC++混合编程[J]. 科技创新导报,2009(31):27-28.
- [17] 丁毓峰. 精通Matlab混合编程[M]. 北京:电子工业出版社,2012.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

- 陈强,张馨丹,孙连政,等. 基于遗传算法的机器零件圆柱度误差评定方法研究[J]. 机电工程,2016,33(2):134-139.
- CHEN Qiang, ZHANG Xin-dan, SUN Lian-zheng, et al. Construction and application of cylindrical error evaluation method for machine parts based on genetic algorithm[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016,33(2):134-139.
- 《机电工程》杂志:<http://www.meem.com.cn>

(上接第133页)

- [4] 梅宏彬. 滚动轴承振动监测与诊断理论方法系统[M]. 北京:机械工业出版社,1996.
- [5] 褚福磊,彭志科,冯志鹏,等. 机械故障诊断中的现代信号处理方法[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [6] WU J D, CHEN J C. Continuous wavelet transform technique for fault signal diagnosis of internal combustion engines [J]. **NDT. & E. International**,2006,39(4):304-311.
- [7] 王全先. 滚动轴承振动监测与诊断理论方法系统[M]. 北京:机械工业出版社,1996.
- [8] 史坤鹏. 机械设备故障诊断技术[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2013.
- [9] 王金东,代梅,夏法锋,等. 基于EMD信息熵和支持向量机的往复压缩机轴承故障诊断[J]. 流体机械,2014,42(7):61-64.
- [10] 欧伟光,张春良,郭莹莹,等. 基于形态分量分析的希尔伯特变换在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 机电工程技术,2015,44(3):12-16.
- [11] 王国彪,何正嘉,陈雪峰,等. 机械故障诊断基础研究“何去何从”[J]. 机械工程学报,2013,49(1):63-72.
- [12] 杨国安. 滚动轴承质量检验[M]. 北京:中国石化出版社,2014.
- [13] MU Gang, WANG Yu-ting, AN Jun, et al. Signal energy method for Identification of main oscillation mode in power system based on disturbed trajectory[J]. **Proceedings of the CSEE**,2007,27(19):7-11.
- [14] 曾储惠,黄方林,柳成荫,等. 基于信号能量分析的结构阻尼比识别方法[J]. 振动与冲击,2003,22(2):66-68.
- [15] LI Hui, ZHANG Yu-ping, ZHENG Hai-qi. Application of Hermitian wavelet to crack fault detection in gearbox[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2011, 25(4):1353-1363.
- [16] NIKOLAOU N G, ANTONIADIS I A. Rolling element bearing fault diagnosis using wavelet packets[J]. **NDT. & E. International**,2002,35(3):197-205.
- [17] 刘萍. 小波包-BP神经网络在采煤机滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 煤矿机械,2013,34(1):282-284.

[编辑:李辉]