

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.12.007

盘式制动器总成形位公差在线测量机开发*

庞 茂,孔 敏

(浙江科技学院 机械与能源工程学院,浙江 杭州 310023)

摘要:由于盘式制动器的形位公差精度要求高,使得制动器形位公差的测量过程复杂,难以满足在线测量要求,为此,提出了一种基于激光位移传感器的盘式制动器总成形位公差在线测量系统。根据盘式制动器在线检测的要求,提出了一种可以对制动盘总成平行度和径向、周向厚度差等指标进行快速计算的方法;介绍了该测量机的机械系统、测控系统、软件系统等组成及特点,给出了其系统误差的标定方法;在该测量机上对某型制动盘总成形位公差进行了测试。研究表明:该测量机测量的主要检测项目值与三坐标测量机测量的差值均小于 $1\ \mu\text{m}$,多次测量的标准差小于 $0.5\ \mu\text{m}$,测量机的测试精度和重复性均能满足制动盘在线测试的要求;同时,与其他接触式位移传感器相比,由于使用了激光位移传感器,该在线测量系统避免了磨损问题的发生。

关键词:盘式制动器;形位公差;在线测量;激光位移传感器

中图分类号:TH71;U463.512;TP206

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2021)12-1558-06

Online measuring machine for geometric tolerance of disc brake assembly

PANG Mao, KONG Min

(School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou310023, China)

Abstract: It was difficult to meet the requirement of online measurement because of the high precision of geometric tolerance and the complex measurement process of the automobile brake disc. Aiming at this problem, an online measurement system of geometric tolerance of brake disc assembly based on laser displacement sensor was proposed. According to the requirement of online inspection of disc brake, the fast calculation method of the brake disc parallelism, the difference of radial and circumferential thickness were adopted. The composition and characteristics of the test bed were introduced, and the mechanical system, measurement and control system, software and calibration of systematic error were shown in detail. In addition, the geometric tolerance of a type of brake disc assembly was measured on this test bed. The results show that the difference between the values of test items measured by this machine and those measured by CMM is less than $1\ \mu\text{m}$. The standard deviation of multiple measurements is less than $0.5\ \mu\text{m}$, which provides test support and reference for the development and improvement of this kind of products. For one thing, the accuracy and repeatability of the test bed can meet the requirements of online test of brake disc assembly; for another, the laser displacement sensor avoids the wear problem of other contact displacement sensors.

Key words: brake disc; geometric tolerance; online test;laser displacement sensor

0 引 言

因制动力矩大、通风冷却条件好等优点,目前盘式制动器在各类车辆上得到了广泛应用。

盘式制动器的制造精度是影响其性能的重要因

素。盘式制动器的形位误差过大,其在工作过程中就会有抖动、啸叫等异常现象发生。

对于制动盘的检测方式一般多采用千分表等,用人工进行测量。该类检测方法的准确度不高、效率低、人为因素影响大,无法适应制动盘大规模检测的需求。

收稿日期:2021-05-19

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(LQY19E050001)

作者简介:庞茂(1978-),男,内蒙古包头人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事车辆检测与故障诊断方面的研究。E-mail:palmy@zust.edu.cn

为提高制动盘检测的精度和效率,研究人员对检测方法进行了大量的研究,并开发出了一批检测设备。

基于接触式测量原理,王燕涛等人^{[1]83}提出了一种制动盘形位公差检测方法,并利用该方法,完成了对制动盘形位公差数据的实时在线检测。邢毅飞等人^[2]提出了一种制动盘形位公差数字化检测仪的实现方案。但上述两篇文献中提出的检测方案均针对的是制动盘零件,且检测的公差项目也较多,共布置有 9 支电感式位移传感器。卢媛方、柯子龙及梁浩杰等人^[3-5]都针对制动盘面端跳动的测量方法及相关设备进行了研究;但他们提出的方法都只是对端面跳动一项公差项目进行检测,功能较单一。

姜风国等人^[6]设计开发了刹车盘自动检测设备,利用该设备可对制动盘刹车面、基准面及小端面及外径尺寸进行检测。赵兴等人^[7]提出了一种汽车制动盘面振自动检测设备,并对该设备实现方案及机械结构进行了说明。VANNONIA M 等人^[8]讨论了测量量块平行度误差的两种方法:第一种方法利用接触式探头,在固定位置取样测量厚度,平行度误差由采样区域的最大和最小厚度之差给出;第二种方法基于干涉法,生成相对表面的高度图,对干涉测量数据进行处理,然后得到其平行度误差。其中的第一种方法较为简单方便,但需要事先校准,且仅能提供有限数量样本的点信息;第二种方法能提供大量数据点的信息,但对设备和测量程序方面的要求较高,不适用于在线测量。

在平行度、跳动等形位公差检测方面,KHAN M I 等人^[9]提出了一种基于平面度的平行度误差测量方法,采用实数编码遗传算法来确定平面度系数和平面度误差,其测量结果与三坐标测量机的测量结果吻合较好。PEI Y C 等人^[10]提出了一种基于激光位移传感器的径向跳动非接触式测量方法,该方法具有成本低、精度高、适用性强等优点。HZ A 等人^[11]提出了一种几何公差的优化设计方法,通过对误差进行敏感性分析和排序,提供了一种定量的公差优化策略。LIU Y 等人^[12]提出了一种基于空间解析几何理论的轴形和位置公差测量方法,实现了对具有几何误差的大尺寸轴的在线非接触测量;该方法鲁棒性强,对安装误差和测量环境不敏感,其测量精度约为 0.01 mm,测量时间约为 10 min。

上述几种方法在检测方法、检测精度上均有一定程度的改善和提升,但检测设备及过程复杂,难以对公差项目进行在线评定。

林旺等人^[13]提出了一种采用非接触式的光学检测方法对平行度进行测量的方法,但是该方法仅适用

于检测倾角大,且精度不高的对象。王世强等人^{[14]3}基于新一代 GPS,提出了一种平行度误差投影迭代评定法,在保证评定准确性的基础上可以有效减少计算量,但仍难以对公差项目进行在线评定。汤漾平等^[15]开发了一种用于机械制造专业教学的形位公差测量设备,该设备可对多项公差进行测量,但该方法无法应用于工业在线测量。

由此可见,上述相关研究主要针对制动盘零件的部分公差项目进行的检测,针对制动盘总成(制动盘与轮毂合装件,下同)的检测较少。由于测量传感器多采用接触式电感类传感器,该类传感器长期使用时,其测头磨损会引起检测误差。在测量方法上,采用光学检测及基于新一代 GPS 的检测方法,使用的仪器及计算方法复杂,难以用于在线检测。

笔者在分析制动盘总成制造误差检测要求的基础上,提出一种采用非接触式激光传感器的盘式制动器总成形位公差在线测试方案及设备,并对其检测精度和效能进行分析,从而为该类产品设计制造提供参考依据。

1 公差检测项目及方法

1.1 形位公差检测项目

笔者开发的盘式制动器总成形位公差项目主要包括制动盘刹车面对基准的跳动量、平行度,及上下刹车面径向厚度差,以及在指定圆周上的周向厚度差等。

此处笔者以某型盘式制动器为例,其要求的形位公差项目如图 1 所示。

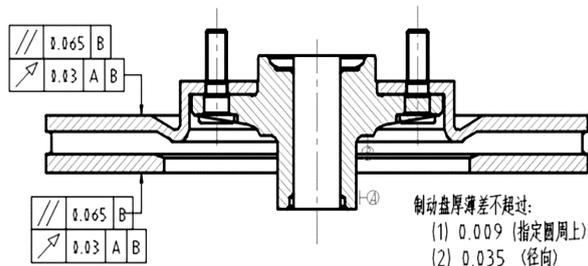


图 1 盘式制动器总成形位公差项目

由图 1 可知,盘式制动器的形位公差精度要求都比较高。

1.2 形位公差检测方法

按照平面类形位公差定义进行评定非常繁琐复杂,为提高检测效率,满足在线检测的要求,笔者对盘式制动器总成公差项目的检测方法进行了简化。其中,上、下刹车面跳动测量:将位移传感器垂直布置在制动盘刹车面固定的圆周上,制动盘绕轴线旋转一周

的过程中传感器示值的最大和最小读数之差即为其跳动值。

制动盘上、下刹车面径向厚度差:将位移传感器垂直布置在制动盘上下刹车面,然后将传感器组从制动盘外侧沿径向移动至内侧,该过程中传感器示值的最大和最小读数之差。制动盘上、下刹车面厚度差:测量制动盘在转动一周的过程中,上、下刹车面在指定圆周上的传感器示值差的最大值^{[1]84}。制动盘面平行度测量:要寻找包含制动盘刹车面所有点,且两者之间距离最小的两平行平面之间的距离。

该方案通过标准盘校准基准平面为水平面,其方程为^{[10]5-6}:

$$Z = Ax + By + C \quad (1)$$

且两个与基准平面平行的最小区域包容面分别为:

$$Z_1 = Ax + By + C_1 \quad (2)$$

$$Z_2 = Ax + By + C_2 \quad (3)$$

则刹车面对基准平面的平行度误差为:

$$\delta = \frac{C_1 - C_2}{\sqrt{A^2 + B^2 + 1}} \quad (4)$$

但在实际测量时,制动盘旋转一周过程中,系统仅采集了其在两个圆周上的坐标值,无法得到刹车面上全部点的三维坐标值。此处,笔者采用的制动盘平行度测量数据示意图如图 2 所示。

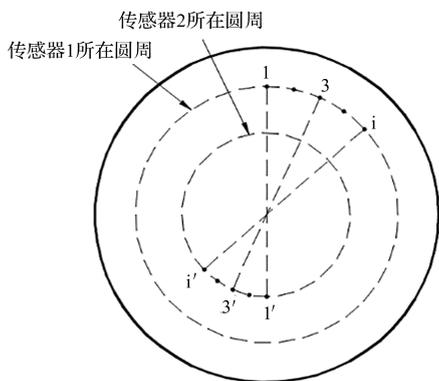


图 2 制动盘平行度测量数据示意

图 2 中: i 和 i' 为位于通过制动盘圆心直线的两个端点,且两端点处于制动盘径向的两个不同圆周上。

笔者在这两个圆周上分别布置两只位移传感器,计算所有位于两个圆周上并通过圆心的直线两端点到基准面的距离差:

$$D_i = |Z_i - Z_{i'}| \quad (5)$$

式中: Z_i — i 点到基准面的距离。

则制动盘面相对基准面的平行度误差即为式(5)中所有距离差的最大值:

$$D_{\max} = \text{Max} \{ D_i \} \quad (6)$$

2 测量机原理

该测量机主要由机体、传感器模块、试件旋转模块及测控系统等组成。传感器模块在制动盘上下刹车面沿径向分别布置有两组激光位移传感器,同时该模块可在伺服丝杠机构驱动下整体沿径向移动,传感器的位置可根据不同规格的试件进行调整。试件旋转模块可通过直流调速电机驱动制动盘连续旋转。

测量机原理如图 3 所示。

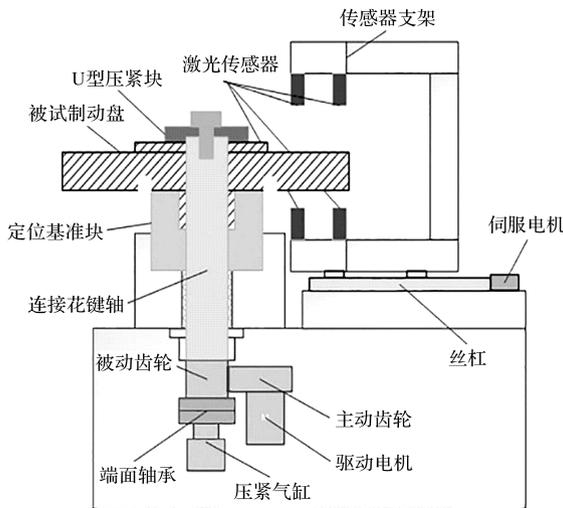


图 3 测量机原理框图

进行测量时,系统以制动盘总成的轮毂轴承安装面进行轴向和径向定位,同时轮毂中间的花键套与旋转模块中的夹具花键轴对接;然后,伺服电机驱动传感器模块沿径向进入制动盘面,记录制动盘上下刹车面沿径向的数据变化;接着激光位移传感器固定不动,直流电机驱动制动盘旋转一周,通过对 4 个激光位移传感器数据的高速采样和分析,得出上下刹车面的平面度、跳动、对基准的平行度,以及制动盘周向厚薄差,并与预设标准值比较进行产品合格性的评定。

3 测量机组成

测量机采用脚轮支撑的可移动式整体结构,包括机械系统、测控系统及软件系统。

测量机产品的外形如图 4 所示。

3.1 机械系统

测量机的机械系统包括基础台架、试件定位旋转装置及传感器移动装置等。

基础台架采用铝合金框架 + 基准平台,框架对整个系统起到支撑作用。基准平台采用厚度 10 mm 的钢板加工而成,除对其他运动机构支撑外,也是整个测



图 4 测量机产品图

试系统的基准平面,所以需满足足够的平面度及装配精度要求。

试件定位旋转装置如图 5 所示。

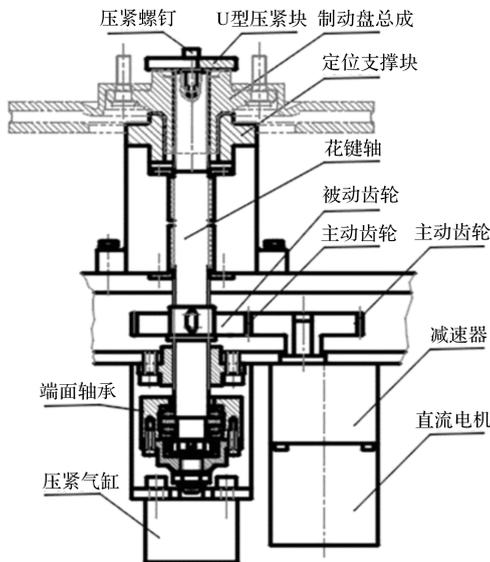


图 5 测量机定位旋转机构结构图

装置中的定位基准块与制动盘上轮毂轴承安装面相配合,可实现制动盘轴向和径向定位。同时直流调速电机驱动一组齿轮副旋转,齿轮副的被动齿轮与花键轴连接。花键轴上加工有与轮毂轴承内花键相配的花键结构。

为避免测量过程中制动盘旋转时出现抖动,而影响测量结果,压紧气缸通过一组端面轴承和上侧的 U 型压紧块将制动盘压紧在支撑块上,以确保制动盘在压装状态下旋转,无轴向和径向的窜动。

传感器移动装置包括传感器支架及传动装置。安装在专用支架上的传感器模块可在精密伺服传动系统驱动下沿制动盘径向运动,可确保测量时激光位移传感器测量装置沿径向被平稳推入,测量过程中传感器稳

定。同时为满足测试仪对多个产品型号的通用性,传感器模块作为一个整体可在支架上沿垂向和径向调整。

3.2 测控系统

测量机测控系统由激光位移传感器、工业控制计算机、高速数据采集卡、数字 IO 控制卡及信号调理模块组成,主要用于执行机构的控制和传感器数据采集。

3.2.1 工控系统及信号采集卡

测控系统采用工控机,其对于工业现场的振动、粉尘及温湿度有较好适用性。信号采集板卡主要完成对激光位移传感器数据采集,数字 IO 控制卡完成测量机的测试流程的自动控制和监测。

测量机的模拟量输入信号为 4 路激光位移传感器数据,模拟量输出信号为驱动制动盘旋转的直流电机及激光移动伺服模组的调速,数字量输入输出信号则包括电机启停、试件夹紧机构、故障报警等。综合上述分析,笔者选用研华公司 IPC610 系列工控机和 PCI1712 多功能数据采集卡,具有 16 路模拟量采集通道,2 路模拟量输出通道,16 路数字量输入通道和 16 路数字量输出通道,并通过 PCLD 系列端子板实现信号输入输出的光电隔离。

3.2.2 激光位移传感器

针对接触式电感位移传感器在长期使用中的磨损问题,笔者为测量机选用非接触式 CCD 激光位移传感器。该传感器激光波长为 655 nm,具有精度高、抗干扰能力强、使用寿命长等优点,激光位移传感器量程为 ± 5 mm,线性度 $\pm 0.05\%$ FS,重复精度可达 ± 0.05 μ m,响应频率 1 kHz,可满足测量机应用要求。

3.3 测量软件系统

此处的形位误差测量软件系统采用 Visual Basic 开发,可完成对测量机的执行机构控制、数据采集分析及检测数据存储及追溯,主要功能模块包括检测流程控制、信号采集处理、系统状态监控及故障自诊断、试验结果显示、报表生成及数据追溯等。

测试模块可完成对盘式制动器性能的自动检测。用户根据测试的产品型号预设允许的形位公差值后,测试模块按照预置的流程自动完成测试动作,读取位移传感器数据,并进行中值滤波后,按前述的算法可得到各项形位公差测量值。

该模块的程序界面如图 6 所示。

状态监测模块可对测量机进行开机自诊断和故障报警,对夹紧、旋转及伺服模组的动作进行单步调试,可查看激光传感器实时信号的波形,进行滤波前后波形的对比等。

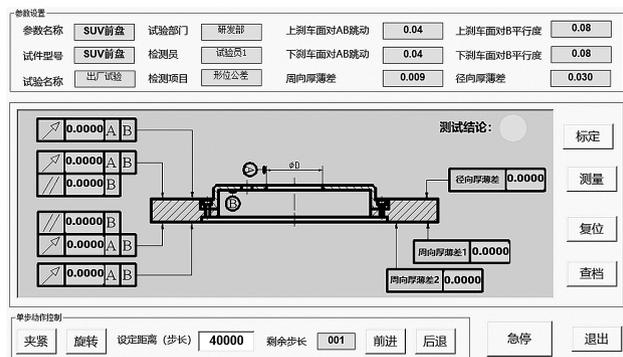


图 6 性能检测模块程序界面

数据管理模块主要功能是测试数据的存储、检索和测试报表的生成和打印。模块可将产品测试数据自动存盘,也可根据用户选择将测试数据及结论按设定的模板打印生成测试报告。同时,用户还可通过多种方式检索存储的测量数据,实现对以往数据的追溯和管理。

4 试验及结果分析

4.1 试验流程

测量时试验人员将制动盘总成花键槽与旋转轴的花键人工对齐,放置在支撑块上,U型压紧块插入旋转轴,按下测试按钮;压紧气缸收回,通过U型压紧块将制动盘紧压在支撑块上;伺服电机驱动传感器模组沿制动盘径向推进测试区,其间采集记录外侧激光位移传感器数据,软件系统计算刹车面的平行度;到达设定的圆周位置后,制动盘连续旋转一周,系统记录传感器数据,可计算上下刹车面的跳动量和厚度差。

系统根据测试值与标准设定值进行比较,给出OK或NG的检测结论,压紧气缸释放,人工取下U型压紧块和被测制动盘,完成一个测试周期。单个测试周期约4.5s,可满足在线测试的节拍。

在每次开机正式测试前,需要使用标准标定盘对测量机的系统误差进行标定,标定操作流程与正式测试相同。标准标定盘根据产品的基本尺寸专门定制,其误差值 $<0.005\text{ mm}$ 。标定时可对测量机状态进行验证和修正。

4.2 测试数据分析

为验证该测量机的精度和稳定性,笔者在该测量机上对某型盘式制动器总成的形位误差进行了测试。首先采用标准盘对测量机进行标定,然后对同一制动盘总成进行连续10次的测量,计算各公差项10次测量的平均值及标准差,并将结果与同一件产品在三坐标测量机测得和结果进行对比。

某型制动盘形位公差测量结果如表1所示。

表 1 某型制动盘形位公差测量结果(单位: μm)

检测项目	公差值	三坐标测量值	10次平均值	标准差	3σ 置信区间
上面跳动1	30	25.9	26.5	0.25	[25.8—27.3]
上面跳动2	30	29.3	30.2	0.39	[29.0—31.4]
上面平行度	80	40.2	39.3	0.34	[38.3—40.4]
下面跳动1	30	29.1	29.4	0.15	[28.9—29.8]
下面跳动2	30	25.7	25.1	0.19	[24.1—25.2]
下面平行度	80	48.2	47.2	0.47	[45.7—48.6]
径向厚度差	30	8.6	6.3	0.80	[3.9—8.7]
周向厚度差	9	3.5	3.7	0.21	[3.1—4.3]

由表1可知,除径向厚度差标准差略大外,本机测量的各检测项目的标准差均小于 $0.5\ \mu\text{m}$,这可能是因为多次测量时的径向厚度差测量位置不同导致的;同时,各检测项目的 3σ 置信区间均能覆盖三坐标测量值,表明检测仪的测量准确度和重复性均能满足产品在线检测的精度要求。

5 结束语

笔者介绍了一种用于盘式制动器总成形位公差在线快速测量的方案,及相关测量机的结构和组成,并在测量机上对某型制动盘总成形位公差进行了测试。

测试结论如下:

(1)测量机采用非接触式激光位移传感器,测量中避免了对制动盘表面的接触及传感器自身磨损,提高了测量精度,同时也降低了测量机的使用成本;

(2)测量机能够自动定位、夹紧,并完成对制动盘总成形位公差的测量,检测节拍约为4.5s,测量精度、重复性及节拍均可满足产品在线测量的要求,并在实际生产中取得良好的应用效果,可为该类技术和产品的研发改进提供参考;

测量机存在的不足是:与接触式电感位移传感器相比,激光位移传感器的精度和分辨率及稳定性略差,因此对于检测精度要求较高的厚度差检测,测量机的重复误差绝对值较大,实际值在公差带边缘时可能引起误判,在该种情况下可通过系统提示进行人工测量,确认产品的合格性。

后续,笔者将进一步研究提升测量机检测精度和稳定性,改善产品实际误差值在公差带边缘时可能引起的误判,同时研究制动盘总成的周向跳动、平面度、垂直度等公差项目的在线检测,提高测量机的适用范围和自动化程度。

参考文献 (References):

[1] 王燕涛,朱彬,姜风国,等. 汽车制动盘形位公差检测方

- 法与方案设计[J]. 现代制造工程,2013(8):83-86.
- [2] 刑毅飞,姜风国,朱 彬. 汽车制动盘形位公差数字化检测仪开发[J]. 现代制造工程,2014(1):88-91.
- [3] 卢媛方. 浅谈制动盘面端跳动测量[J]. 装配制造技术,2020(3):105-106.
- [4] 柯子龙. 汽车制动盘端面跳动自动测量设备的研制[D]. 武汉:湖北工业大学机械工程学院,2018.
- [5] 梁浩杰. 汽车制动盘端面跳动检测设备研制[D]. 广州:华南理工大学机械与汽车工程学院,2015.
- [6] 姜风国,朱 彬,王燕涛. 刹车盘自动检测设备的设计[J]. 仪表技术与传感器,2014(2):42-44.
- [7] 赵 兴,朱永平. 汽车制动盘自动检测设备的研制[J]. 组合机床与自动化加工技术,2019(11):131-133,138.
- [8] VANNONIA M, BERTOZZI R. Parallelism error characterization with mechanical and interferometric methods[J]. **Optics and Lasers in Engineering**,2007,45(6):719-722.
- [9] KHAN M I, MA S Y, SAIFULLAH S. New method of plane to plane parallelism error measurement based on flatness plane[J]. **Advanced Materials Research**,2014,941-944
- (2):2209-2218.
- [10] PEI Y C, XIE H L, TAN Q C. A non-contact high precision measuring method for the radial runout of cylindrical gear tooth profile[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**,2020,138(Apr.):106543. 1-106543. 15.
- [11] HZ A, FL A, MB A, et al. Tolerance optimization for sheet metal parts based on joining simulation[J]. **Procedia CIRP**,2021,100(3):583-588.
- [12] LIU Y, LI G, ZHOU H, et al. On-machine measurement method for the geometric error of shafts with a large ratio of length to diameter[J]. **Measurement**,2021,176(1):109194.
- [13] 林 旺,贾宏志. 平行平板平行度的检测[J]. 光学仪器,2016,38(1):16-19.
- [14] 王世强,郑 鹏. 新一代 GPS 下的平行度误差投影迭代评定法[J]. 机械设计与制造,2020(6):3-7.
- [15] 汤漾平,祝 贺. 机械制造专业形位公差综合测量实验设备的研制[J]. 机电工程,2012,29(1):42-45.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

庞 茂,孔 敏. 盘式制动器总成形位公差在线测量机开发[J]. 机电工程,2021,38(12):1558-1563.

PANG Mao, KONG Min. Online measuring machine for geometric tolerance of disc brake assembly[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2021, 38(12):1558-1563.《机电工程》杂志;<http://www.meem.com.cn>

(上接第 1528 页)

- [12] ALEX J S, BERNHAR S. A tutorial on support vector regression[J]. **Statistics and Computing**,2004,14(3):199-222.
- [13] XIANG G, HUANG D. A Metamodeling method based on support vector regression for robust optimization[J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**,2010,23(2):242-251.
- [14] QIAO M, MA X, LAN J, et al. Time-series gas prediction model using LS-SVR within a Bayesian framework[J]. **Mining Science and Technology**,2011,21(1):153-157.
- [15] YANG M G, CONG B R, XIAO L L, et al. Adaptive online prediction method based on LS-SVR and its application in an electronic system[J]. **Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering**,2012,13(12):881-890.
- [16] WEN Y D, LI M H, YANG H, et al. A hybrid AR-EMD-SVR model for the short-term prediction of nonlinear and non-stationary ship motion[J]. **Journal of Zhejiang University Science A: Applied Physics & Engineering**,2015(7):562-576.
- [17] YI Y, RONG F, CHANG H Y, et al. SVR mathematical model and methods for sale prediction[J]. **Journal of Systems Engineering and Electronics**,2007,18(4):769-773.
- [18] 韩 平,王天堃,孟永毅. 基于 LS-SVM 的一次风机振动在线监测及故障预警研究[J]. 机电工程,2016,33(5):629-632.
- [19] 王 文,钱 江. 有限差分法模拟电梯悬挂系统横向受迫振动[J]. 振动工程学报,2014,27(2):180-185.
- [20] 梅德庆,杜小强,陈子辰. 基于滚动导靴-导轨接触模型的高速曳引电梯振动分析[J]. 机械工程学报,2009,45(5):264-270.
- [21] 郭丽峰,张国雄,李醒飞,等. 电梯轿厢-导轨耦合动力系统建模及其动态特性[J]. 机械工程学报,2007,43(8):186-191.
- [22] 冯永慧,张建功. 高速电梯水平振动模型的建立与仿真[J]. 上海交通大学学报,2007,41(4):557-560.
- [23] 李醒飞,张晨阳,李立京,等. 电梯导轨对轿厢振动的影响[J]. 中国机械工程,2005,16(2):23-26,30.
- [24] UTSUNOMIYA K, OKAMOTO K, YUMURA T, et al. Active roller guide system for high-speed elevators[J]. **Elevator World**,2002,50(4):86-90.
- [25] AZIZAH M, AZLAN M Z, NOR E N B. Cuckoo search algorithm for optimization problems-a literature review[J]. **Applied Mechanics and Materials**,2013,2728(842):502-506.

[编辑:李 辉]