

基于疲劳测试的工业机器人重复定位精度测量与分析

李 斌, 才 磊, 郭建飞

(唐山松下产业机器有限公司, 河北 唐山 063000)

摘要: 工业机器人的定位精度是衡量机器人工作性能的一个重要指标, 按照国标规定一般选用激光跟踪仪完成单组测量实验。该方法忽略了在实际应用中机器人长期处于疲劳作业状态, 伴随着机器人关键零部件的老化其重复定位精度会发生偏移, 因而不能真实反映机器人的工作性能水平。为解决此问题, 设计了以激光测距仪为测量工具, 以机器人末端负载块为测量点, 能够在长期疲劳测试环境下中监测机器人重复定位精度变化趋势的实验平台。同时设计了以机器人疲劳测试和重复定位精度测试为主程序的实验流程控制方法。最后以 6 kg 负载的工业机器人为实验对象, 对该机器人进行了长时间的重复定位精度测量及数据整理分析。结果表明: 机器人在长期疲劳作业状态影响下其重复定位精度发生明显的下降趋势, 验证了机器人的关键零部件老化对定位精度的影响。相比与国标中单组测量实验结果, 在疲劳测试过程中测量的数据结果更符合企业应用实际, 更具有代表性和参考意义。

关键词: 工业机器人; 重复定位精度; 疲劳测试

中图分类号: TP242

文章编号: 1000-0682(2024)05-0065-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.05.013

Measurement and analysis of repeated positioning accuracy of industrial robot based on fatigue test

LI Bin, CAI Lei, GUO Jianfei

(Panasonic Welding Systems (Tangshan) Co., Ltd., Hebei Tangshan 063000, China)

Abstract: The positioning accuracy of industrial robot is an important index to measure the working performance of robot. According to the national standard, laser tracker is generally used to complete a single group measurement experiment. This method ignores the fact that the robot is in the fatigue working state for a long time in practical application, and the repeated positioning accuracy will shift with the aging of joint components, so it can not truly reflect the working performance level of the robot. To address this issue, an experimental platform with laser rangefinder as measuring tool and robot end load block as measuring point was designed to monitor the trend of repeated positioning accuracy of the robot in the long-term fatigue test environment. At the same time, the experimental flow control method based on robot fatigue test and repeated positioning accuracy test was designed. Finally, an industrial robot with a load of 6 kg was used as the experimental object for long-term repeated positioning accuracy measurement and data analysis. The results show that under the influence of long-term fatigue operation, the repetitive positioning accuracy of robots shows a significant downward trend, verifying the impact of aging of key components of robots on positioning accuracy. Compared with the single set of measurement experiment results in the national standard, the measured data results in the fatigue test process are more in line with the actual application of enterprises, and more representative and reference significance.

Keywords: industrial robot; repeated positioning accuracy; fatigue test

收稿日期: 2024-03-20

第一作者: 李斌(1989—), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 中级工程师, 研究方向为工业机器人及周边辅机设计 & 研究。

0 引言

工业机器人的定位精度是衡量机器人工作性能的一个重要指标^[1-4],其包含绝对定位精度和重复定位精度。绝对定位精度是指工业机器人实际定位点与理想定位点的接近程度,是否精准移动到理想定位点的能力^[5-7]。而重复定位精度是指工业机器人以相同的速度和姿态往复多次运动到空间同一定位点的能力^[8]。目前绝大部分的工业机器人属于示教再现的编程方式^[9-10],其运行的起点和终点位置都是提前示教编辑出来的,这要求机器人具有较高的重复定位精度,对其绝对定位精度则要求不高。目前大部分研究人员主要借助激光跟踪仪为实验设备^[11-12],依照 GB/T 12642—2013《工业机器人性能规范及其试验方法》^[13]规定对机器人的重复定位精度进行短时间的单组测量。陈国培^[14]介绍了基于激光跟踪仪对工业机器人位置重复性测试的流程及测量结果。张艳菊等^[15]根据国标标准要求设计了工装夹具,利用激光跟踪仪实现了工业机器人位姿特性的检测。吴清锋等^[16]完成了在不同振动环境下的机器人位置重复性检测。何洪军等^[17]完成了对 SCARA 机器人重复定位精度测试试验台的搭建及测试。张洪兵等^[18]利用激光跟踪仪完成了在不同额定速度下的工业机器人重复定位精度的测量。王庆杰等^[19]以 ABB 机器人为研究对象确定了机器人位姿测量中激光跟踪仪的最优布局位置。

在机器人应用企业的实际工作中,机器人往往长期处于不间断的疲劳作业状态,同时伴随着关键零部件的老化磨损^[20],会对机器人的重复定位精度产生明显的影响。而国标规定的测量标准与这种实际应用情况并不完全匹配,其测量结果不能完全反映应用中的机器人实际的工作性能水平。为解决此问题,该文研究搭建了能够使机器人在长期疲劳测试中进行重复定位精度的测量的实验平台,同时设计了以机器人疲劳测试和重复定位精度测试为主要程序的实验流程控制方法,并基于此实验平台及方法对某型号的工业机器人重复定位精度进行了测量与分析,其测量过程更贴近应用企业生产实际,故其测量结果更具有参考价值。

1 实验平台搭建

1.1 机器人实验平台简介及工作原理

该实验平台包括激光测距仪及支撑架、计算机及定制软件、PLC、机器人本体及控制箱、机器人负

载测量块等,如图 1 所示。激光测距仪作为该实验的定位测量工具,具有精度高、速度快、成本低的优势^[21]。相比于目前市场流行的激光跟踪仪设备,激光测距仪能够保持长时间的稳定监测工作需求,不需要人工操作,可有效排除人为操作不当引起的测量误差。该实验采用的是日本基恩士公司的 LK-G155 激光测距仪,参考测量距离在 150 mm 处,测量范围为 ± 40 mm,其重复测量精度达到 $0.5\ \mu\text{m}$,完全满足机器人重复定位精度的测量要求。激光测距仪由激光感测头和控制单元组成,激光感测头发射测量激光光束,其光束投射到被测量件上以实现测量定位,其控制单元连接到控制器上用于数据通讯。激光测距仪的控制单元用于数据显示、存储及发送,其设有 RS-232C 接口,通过与计算机通讯,将测量数据信息发送给计算机。PLC 作为数据信号发送的控制器,主要负责工作流程的逻辑控制和数据的打包发送。该实验采用西门子 S7-200 型 PLC,其 IO 模块与机器人控制箱的 IO 模块连接即实现信号的交互通讯。计算机的定制软件应用 LabVIEW 开发设计,主要负责显示测量数据结果及整个实验的逻辑控制指令的发送。当计算机接收到激光测距仪发送的数据结果后,可通过 PLC 传输向机器人控制箱发送动作指令,使机器人本体按照要求进行移动运行。

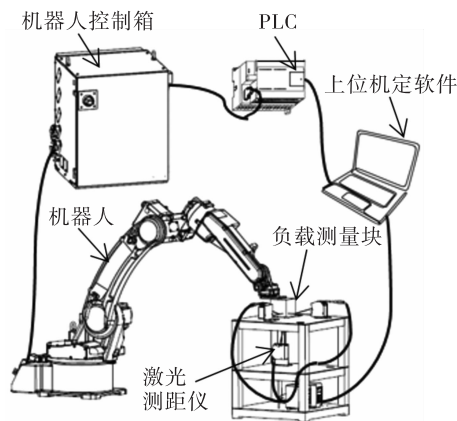


图 1 实验平台示意图

1.2 机器人实验平台测量坐标系的建立

机器人的重复定位精度需要测量机器人末端在空间 3 个方向上的位置偏差信息,故以该实验在机器人末端测量点位置建立测量三维坐标系。该实验机器人末端通过法兰连接安装一个负载测量块。该负载测量块的重量根据机器人末端 100% 额定负载进行设计,其形状为正方体型。如图 2 所示,以负载测量块的一顶点定义为机器人末端测量点,以经过

该顶点的三条棱边形成一个三维测量坐标系,并定义 X, Y, Z 三个空间方向。

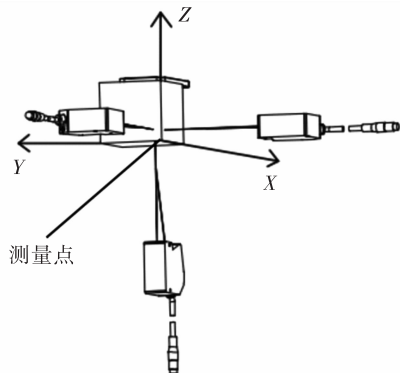


图2 测量坐标系示意图

该实验平台使用3个激光测距仪以获取机器人末端测量点的位置信息。3个激光测距仪通过支架安装固定,其安装位置分布于 X, Y, Z 三个空间方向,使其发出的3条激光光束相互垂直,在测量坐标系中相交于一点。当负载测量块随机器人运行进入到测量区域时,激光测距仪发出的3条激光光束会投射到负载测量块的3个相互垂直面上,且在3个垂直面上以红色投射点呈现,此时即可获得机器人本体末端负载块测量点的位置数据信息。在该实验开始前,需要提前设定机器人末端测量点位置。当机器人第一次到达测量点位置时,对激光测距仪采集到的距离数据清零,即定义该测量点位置在 X, Y, Z 三个方向坐标数据均为0。当机器人后续重复到达该测量点位置时,测量点位置即会产生在 X, Y, Z 三个方向的位置偏移量数据。

2 实验方法设计

2.1 机器人实验方法流程设计

基于上述实验平台的搭建,设计一套实验方法流程以测量机器人在长期疲劳测试环境中的重复定位精度。该实验方法主要涉及2个主程序的编辑设计及流程控制,2个主程序分别为机器人疲劳测试程序和机器人重复定位精度测量程序。如图3所示为整个实验方法的自动化控制流程,该实验以机器人疲劳测试程序开始,模拟用户现场机器人实际生产使用场景,进行不间断的最大运行速度下的疲劳运行模式,并通过计算机定制软件进行计时监控。当运行时间到达设定的时间间隔后,通过 PLC 向机器人控制箱发送信号指令,机器人进入到重复定位精度测量程序。在机器人重复定位精度测量程序中,通过激光测距仪采集机器人末端测量点的位置

偏移量数据,当采集次数达到设定要求后,再次通过 PLC 发送信号指令,机器人再次进入到疲劳测试程序中。通过整个实验的流程控制,可以获得机器人在长期不间断疲劳测试影响下的重复定位精度变化趋势,以实现判断机器人随着老化磨损是否仍能满足使用要求的目的。

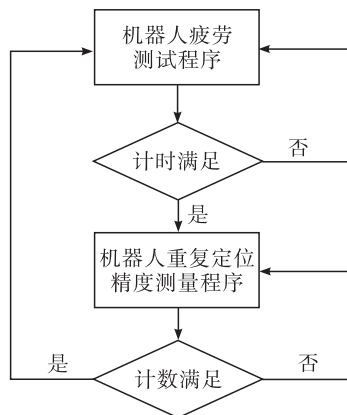


图3 实验控制流程图

该实验应用 LabVIEW 开发设计定制软件。图4所示为该计算机定制软件界面示意图,在软件界面中可显示计时功能和激光测距仪实时采集获得的数据结果。计算机软件界面中设有一些控制操作开关,可实现机器人伺服开关、运行启动、中间停止等自动化远程控制,同时也可实现激光测距仪的数据采集的复位清零控制。当机器人运行出现报警错误时,可通过 PLC 向计算机发送信号以停止实验进行。

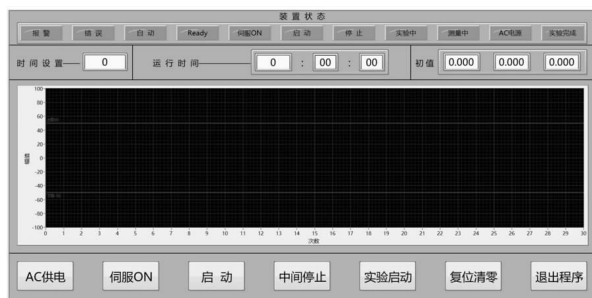


图4 软件界面示意

2.2 机器人疲劳测试程序设计

为了满足机器人能够在长期不间断疲劳工作的要求,基于上述实验流程,该实验设计了机器人疲劳测试程序。选取机器人各关节动作范围的极限点位置为示教点 P_{in} ,根据机器人各极限点位置情况设置多个示教点 $P_{n1}, P_{n2}, P_{n3}, \dots, P_{nm}$ 。设置机器人在100%负载条件和100%运行速度下进行机器人动作命令,机器人以 P_{n1} 点开始,依次到达 $P_{n2}, P_{n3}, \dots, P_{nm}$ 位置,当到达 P_{nm} 位置时,再循环到 P_{n1} 位置,只要实验时长未达到计算机计时设定值要求,机器人疲

劳测试程序就会一直往复循环进行,如图 5 所示。程序设计中使机器人各关节臂进行大幅度角度动作变化,确保机器人处于高负荷不间断的疲劳作业状态,以到达模拟应用企业真实作业场景的目的。

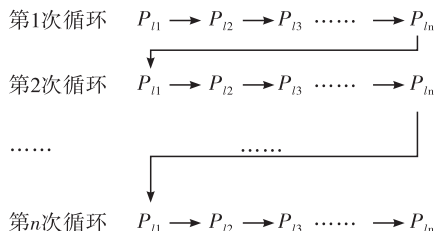


图 5 机器人疲劳测试程序示意图

2.3 机器人重复定位精度测量程序设计

为了能够对机器人进行重复定位精度的测量,基于上述实验流程,该实验具体设计了机器人重复定位精度测量程序。在测量区域中,提前建立一个测量位置示教点 P_o ,通过软件复位清零开关将示教点 P_o 在 X, Y, Z 三个方向上位置量均设为 0。如图 6 所示为程序运行到测量示教点 P_o 时的机器人姿态。当程序运行时机器人重复到达示教点 P_o 时,激光测距仪将会采集获得 X, Y, Z 三个方向上的位置偏移量 x_j, y_j, z_j 。当经过 n 次测量时,计算得的平均偏移量为 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$,计算公式如(1)(2)(3)所示:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \quad (2)$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j \quad (3)$$

式中: x_j, y_j, z_j 代表第 j 次测量时的数值。

机器人重复定位精度 RP_l 表示机器人在同一程序指令从同一方向重复 n 次后实到位置的一致程度。根据国标规定, RP_l 的计算公式如(4)所示:

$$RP_l = \bar{l} + 3 S_l \quad (4)$$

式中:

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \quad (5)$$

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}} \quad (n=30) \quad (6)$$

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (7)$$

当建立好测量位置示教点后,还需再建立一个机器人程序运行起始示教点 P_a ,一般选用机器人原点位置作为起始示教点 P_a 。如图 7 所示为程序运行起始示教点 P_a 时的机器人姿态。机器人以 P_a 点

开始运动到测量示教点 P_o ,在测量示教点 P_o 处停留几秒直到数据采集完成,此时仅完成了一次测量。计算机软件通过激光测距仪发送的数据信息记录测量次数,如果未达到测量次数设定要求,机器人会一直在起始示教点 P_a 和测量示教点 P_o 之间往复循环运动。根据国标标准规定,机器人重复定位精度测量循环次数为 30 次。

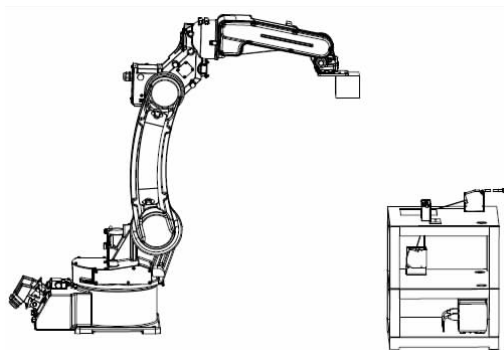


图 6 机器人开始姿态示意图

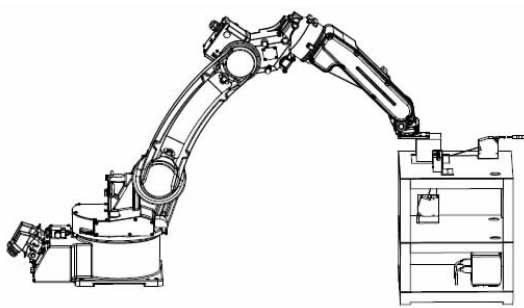


图 7 机器人测量姿态示意图

3 测量与分析

针对上述实验平台及实验方法,以某型号工业机器人作为被测对象进行实际测量,分析该工业机器人在不间断疲劳测试影响下其重复定位精度 RP_l 的变化趋势。机器人实验运行主要参数如表 1 所示。

表 1 机器人实验主要参数

机器人实验参数		参数值
自由度		6
负载能力		6 kg
疲劳测试运行速度		3 m/s
精度测量运行速度		0.3 m/s
各轴运动范围	轴 1	+170° ~ -170°
	轴 2	+155° ~ -90°
	轴 3	+180° ~ -85°
	轴 4	+190° ~ -190°
	轴 5	+110° ~ -130°
	轴 6	+400° ~ -400°

总实验时长设置为 100 天,实现设置机器人疲劳测试运行 24 小时后进行一组机器人重复定位精度测量,每组测量次数为 30 次。如图 8 所示为实验测量现场,保持实验环境恒温效果,防止外界环境温度变化影响实验测量结果。



图 8 实验测量现场

经过测量,整个实验共获得 100 组机器人重复定位精度值 RP_i ,如图 9 所示。测量结果显示:随着机器人疲劳测试时间的延长,机器人的重复定位精度值 RP_i 有显著的升高,故不能忽略机器人应用时长期疲劳作业的影响。

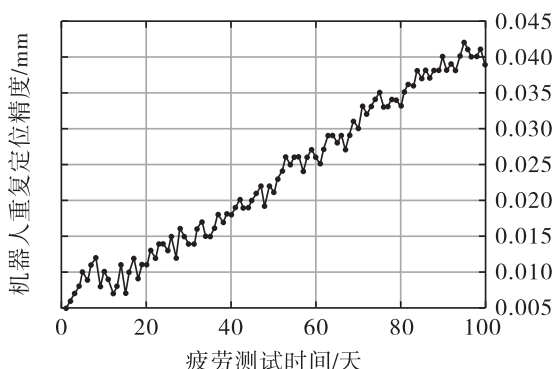


图 9 机器人重复定位精度测量数据

由于实验测量数据较多,截取 6 组机器人重复定位精度值 RP_i 如表 2 所示。当实验经过 24 小时测试后,获得得第一组机器人重复定位精度值 RP_i 仅为 0.005 mm,该结果可认为是机器人尚未受到疲劳作业影响,等同于国标标准的测量结果。经过 100 天疲劳测试后,机器人重复定位精度值 RP_i 达到了 0.039 mm。由此可见,机器人受到长期疲劳作业的影响,其重复定位精度值 RP_i 显著上升。机器人疲劳作业时间越长,其零部件老化越严重,其工作性能指标也随之下落。相比于国标单组测量结果,在长期疲劳测试环境中获取的机器人重复定位精度值 RP_i 更贴近与实际应用场景,其测量数据更具有代表性和参考意义。

表 2 实验测量数据

疲劳测试时间	机器人重复定位精度 RP_i
1 天	0.005 mm
20 天	0.011 mm
40 天	0.018 mm
60 天	0.026 mm
80 天	0.033 mm
100 天	0.039 mm

4 结论

目前国标规定的机器人重复定位精度测量实验方法,忽略了因长期疲劳工作下引起的关键零部件老化磨损对机器人工作性能产生的影响。为此,该文搭建了在疲劳测试环境下能够对机器人重复定位精度进行测量的实验平台,结合机器人疲劳测试程序和重复定位精度测量程序两个主程序进行了实验方法流程设计,并以某型号的工业机器人为被测对象进行了长期的重复定位精度测量实验及数据分析。测量结果表明:机器人受到长期疲劳作业的影响,其重复定位精度值 RP_i 显著上升,同时验证了机器人的关键零部件老化对机器人定位精度的影响。相比于国标单组测量结果,考虑疲劳测试的影响获得测量结果更贴近机器人真实工作水平,更具有代表性和参考意义。

参考文献:

- [1] 喻敏. 工业机器人精度评估与误差补偿研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2015.
- [2] 袁自成. 某弧焊机器人位姿精度可靠性分析方法研究[D]. 沈阳:东北大学,2015.
- [3] 习常堃. 基于旋量的 SCARA 工业机器人精度研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.
- [4] 贺惠农,黄连生. 工业机器人整机性能测试进展[J]. 中国计量大学学报,2017,28(02):133-140+168.
- [5] 史晓佳,张福民,曲兴华,等. KUKA 工业机器人位姿测量与在线误差补偿[J]. 机械工程学报,2017,53(08):1-7.
- [6] 朱剑芳. 基于激光测量的工业机器人定位研究[J]. 激光杂志,2018,39(10):143-146.
- [7] 吴锦辉,陶友瑞. 工业机器人定位精度可靠性研究现状综述[J]. 中国机械工程,2020,31(18):2180-2188.
- [8] 王鲁平,朱华炳,秦磊. 基于 MATLAB 的工业机器人码垛单元轨迹规划[J]. 组合机床与自动化加工技术,2014,05(11):128-132.
- [9] 段中兴,白杨. 结合深度学习的机器人示教系统设计[J]. 计算机测量与控制,2020,28(11):164-169.

- [10] 陈佳新. 基于体势的机器人示教再现技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2022.
- [11] 王斌,李航. 激光跟踪仪在机器人性能测试中的应用分析[J]. 电子元器件与信息技术,2021,5(05):202-204.
- [12] 郭鑫鑫,谭磊,刘晓琴,等. 基于激光跟踪仪的工业机器人性能测试方法[J]. 中国计量,2021(06):80-81+122.
- [13] 北京机械工业自动化研究所. 工业机器人性能规范及其试验方法:GB/T 12642—2013[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会,2014.
- [14] 陈国培. 基于激光跟踪仪的工业机器人位置重复性测试[J]. 机电工程技术,2020,49(10):162-164.
- [15] 张艳菊,符远翔,车丹. 激光跟踪仪在工业机器人位姿特性检测中的应用[J]. 机床与液压,2018,46(21):29-33+14.
- [16] 吴清锋,胡伟健,王清忠,等. 环境振动对工业机器人位置重复性的影响[J]. 机床与液压,2021,49(12):57-59.
- [17] 何洪军,张东宁,马传宝. 机械手臂重复定位精度和运动速度测量实验研究[J]. 微特电机,2016,44(03):35-37.
- [18] 张洪兵,连赵斌,成强,等. 基于 API 激光跟踪仪测量工业机器人重复定位精度[J]. 机械制造,2019,57(5):105-106.
- [19] 王庆杰,王金栋,成聪. 机器人位姿测量中激光跟踪仪布局位置研究[J]. 激光杂志,2020,41(01):35-38.
- [20] 程曼,邱城,李金峰,等. 机器人减速器疲劳寿命测试装置开发与研究[J]. 机械传动,2019,43(05):156-160.
- [21] 谷晓杰,卜春光,陈成,等. 三维激光测距系统设计与标定方法研究[J]. 沈阳理工大学学报,2014,33(01):10-14+47.

2024 年主题征文活动通知

各位作者朋友们:

《工业仪表与自动化装置》期刊开展“2024 年主题征文活动”,积极宣传并报道国内外工业流程自动化、工业互联网、人工智能、工业物联网、智能制造、智慧能源、分布式能源、仪器仪表等行业的发展方向、新技术和新工艺、应用科研设计、信息与动态,探讨新的工业革命的突破点,搭建企业、高校、行业开展论坛交流平台。

一、征文主题

智能传感器/工业自动化系统/智能测控技术/仪器仪表与系统设计应用/人工智能

二、征文要求

1. 稿件选题应符合上述 5 项主题,力求新颖、有创新或独特视角,应具学术性、前瞻性、实用性和指导性。
2. 稿件请用 Word 排版。论文模板参考本刊官网提供的投稿模板。
3. 投稿方式:请登陆本刊刊官网 <http://yb-zdh.shaangu-group.com>,在“作者在线投稿”中进行注册并投稿。

三、征文展示

1. 稿件经审核,符合要求的论文将发表在本刊。
2. 征文活动结束后,将评选优质论文,获奖论文的作者将被邀请参加本刊相关活动,并进行表彰宣传。

四、联系方式

联系地址:陕西省西安市高新区沣惠南路 8 号

邮政编码:710075

联系电话:029-81871277

E-mail:gyybbjb@126.com

《工业仪表与自动化装置》编辑部