

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.05.13

国内外指针式压力表智能计量检定技术

门平¹, 毕俊杰², 古兆兵³, 田桂东⁴, 卫恒⁵, 吴玲媛¹

(1. 中国人民解放军92601部队, 广东湛江524009; 2. 中国人民解放军91515部队, 海南三亚572016;
3. 军事科学院系统工程研究院, 北京100039; 4. 河南科技学院, 河南新乡453003;
5. 中国人民解放军32021部队, 北京100094)

摘要: 随着自动测量技术的发展和指针式压力表的计量需求不断增加, 压力表智能计量检定成为压力计量发展的趋势之一。文章回顾了指针式压力表计量检定发展历程, 阐述了压力表智能检定系统构成及其特点, 跟踪了压力表智能检定国内外的研究进展, 提出了压力表智能计量检定的基本架构, 最后总结了压力表智能检定发展趋势和挑战。对实现指针式压力表智能、高效、低成本计量检定具有一定的借鉴意义。

关键词: 指针式压力表; 智能检定; 自动校准系统; 机器视觉

中图分类号: TB935; TH812

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)05-0114-06

Pointer Pressure Gauge Technology Based on Intelligent Verification

MEN Ping¹, BI Junjie², GU Zhaobing³, TIAN Guidong⁴, WEI Heng⁵, WU Lingyuan¹

(1. PLA Unit No. 92601, Zhanjiang 524009, China; 2. PLA Unit No. 91515, Sanya 572016, China;
3. System Engineering Research Institute, Academy of Military Sciences, Beijing 100039, China;
4. Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China; 5. PLA Unit No. 32021, Beijing 100094, China)

Abstract: With the increasing measurement demand for pointer pressure gauge and the development of automatic measurement technology, pressure gauge intelligent verification has become one of the development trends of pressure measurement. This paper reviews the development process of pointer pressure gauge verification, describes the structure and characteristics of the pressure gauge intelligent verification system; compares and summarizes domestic and overseas research progress of pressure gauge intelligent verification; presents the basic structure of pressure gauge intelligent measurement and summarizes the challenges and development trends of pressure gauge intelligent verification. This paper provides reference for achieving intelligent, efficient and low-cost verification for pointer pressure gauge.

Key words: pointer pressure gauge; intelligent verification; automatic calibration system; machine vision

0 引言

指针式压力表作为压力测量装置, 因结构简单、可靠性高、不受电磁干扰、价格低廉等优点, 广泛应用于航空、航天、能源、特种设备、交通运输等工业领域的输送管道和压力容器中^[1-2]。为确保科研和生产体系的压力计量单位统一和量值准确可靠, 依据国家强制检定目录, 需周期检定的压力表包括贸易结算、安全防护、医疗卫生、环境监测四个方面4种11类,

检定依据为压力表计量检定规程^[3]。

纳入强制检定的指针式压力表数量庞大, 种类繁多, 目前主要通过手动加压装置进行造压, 再由人眼读取压力表示值, 检定一块压力表平均用时约为10 min, 长时间高强度的人工检定容易造成视觉疲劳, 人工估读数据出错的几率增大, 且人工成本巨大; 再者, 估读数据时, 受到人眼分辨力、观测距离、观测角度以及检定人员心理状态等因素的影响, 造成测量结果的分散性^[3-5]。

收稿日期: 2021-07-12; 修回日期: 2021-09-29

基金项目: 军内技术基础项目(201HJ15012)

引用格式: 门平, 毕俊杰, 古兆兵, 等. 国内外指针式压力表智能计量检定现状及发展趋势[J]. 计测技术, 2021, 41(5): 114-119.

MEN P, BI J J, GU Z B, et al. Pointer pressure gauge technology based on intelligent verification[J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(5): 114-119.

随着机器视觉(Machine Vision, MV)^[6]和人工智能技术(Artificial Intelligence, AI)^[7]的发展,基于计量检定工作的可靠性和经济性两方面因素考虑,将机器视觉技术和人工智能技术引入压力表计量领域,同时兼顾节约成本、提高效率以及保证数值估读的准确性。传统压力计量以实现单一压力量值的压力表为测量对象,聚焦国际制单位复现、量值传递和量值溯源的技术研究^[8];而指针式压力表智能检定从实现单一参量计量检定转变为压力表自动精确控压、压力数据自动判读、存储、自动生成检定文件、完成在线网上会签等全流程的量值传递和量值溯源技术研究,最大限度降低人为因素的影响,减小测量不确定度。因此最大限度实现指针式压力表智能检定是解决压力表日益增长的计量需求的关键,其目标是满足智能化、高效化、低成本压力计量检定需求。

1 智能检定系统构成

指针式压力表智能计量检定系统主要包括指针式压力表检定平台、自动压力产生及控制系统、机器视觉图像识别系统以及数据管理软件系统,指针式压力表智能计量检定系统框图如图1所示^[2,9-10]。

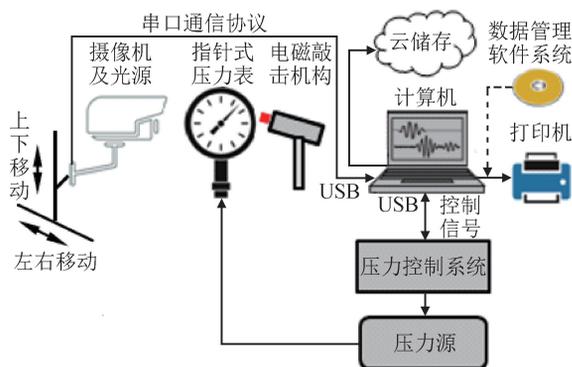


图1 指针式压力表智能检定系统

Fig.1 Intelligent verification system of pointer pressure gauge

压力表检定平台由计算机操控系统和实施计量检定工装平台组成,其中检定工装平台包括检测支架、数字压力传感器、压力控制截止阀、电磁敲击机构和摄像头移动导轨等。自动压力产生及控制系统包括预施压装置、升降压装置、过欠压保护装置、可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)、输入输出模块、电源模块、步进电机或电磁阀机构等部分,控制系统框图如图2所示。机器视觉识别系统由硬件系统和软件系统两部分组成,硬件系统包括镜头、光源和工业摄像(接收系统),软件系统包括图

像识别系统和核心算法,即压力表指针自动判读系统,其中光源采用圆顶式光源(DOME光源)^[11],此光源适用于玻璃面反射光较强的指针式压力表,摄像头采集到的图像清晰且没有阴影。机器视觉识别系统以工业相机为测量传感器,经过图像采集、图像处理、数据生成、数据计算等步骤实现对压力表指针位置的几何测量。数据管理软件系统包括压力表数据采集系统、数据处理系统、检定文件生成系统和存储数据查询系统等。



图2 压力控制系统框图

Fig.2 Schematic diagram of pressure control system

机器视觉识别系统的特点:采用非接触式测量方式,提高了响应速度,适合在线检测;具有长时间稳定、可靠地重复工作的性能,适用于流水线作业;适合在安全风险高、人机工程恶劣和环境差的区域工作。机器视觉检测系统常用于内孔径、端面尺寸、宽度、直径、长度等物理量精确的测量,并与生产线上PLC控制系统联接,以实现自动检测、测量、识别和定位功能。以上诸多优点使机器视觉识别技术适用于指针式压力表智能检定系统。

2 压力表智能检定国外现状

从全世界范围来讲,开展计量服务最早、最发达的计量研究机构分别来自德国、美国和英国,其开展的计量理论和技术研究、应用实践活动以及计量思想在全球范围内具有引领和驱动作用^[8]。

发达国家计量理念深入人心,无论是基础研究领域还是工程应用领域都深刻理解计量的重要作用,科技企业会主动联系国家计量技术机构寻求合作,以实现产品的质量控制和更新换代^[8]。早在1847年,英国Sydney Smith利用一端加载的阀门实现压力表的标定,直到上世纪七十年代前压力仪表检定一直处于手动操作阶段^[12]。随着计算机、机器视觉等技术的发展,压力表检定进入自动化时代,其发展主要表现在:一是适合现场检定的便携式压力检定仪;二是在实验室开展的带有计算机辅助系统的智能压力检定装置。英国Transmation于1994年成功研制1292型自动压力检定仪,这是第一台自动控压、并对检定数据进行记录的

便携式压力检定装置，实现了从标准压力自动产生到检定结果自动记录的全自动检定，造压误差为 0.05%，存在的不足是压力上限仅为 700 kPa，检定压力范围小^[1]；德国 Mahr 公司采用 CCD 相机进行图像采集，利用数字图像处理获取指针位置等参数，实现指针仪表的自动检定，不足是该仪器价格昂贵，维修不便，用户普及率低^[4,13]；美国 GE 公司开发的 Druck PACE7000 压力源及全数字模块化压力控制器，广泛应用于自动化压力校准装置，如图 3 所示，压力上限高达 21 MPa，压力控制误差为 0.005%，可以进行负压校准，并能进行触屏网络控制^[2]。英国剑桥大学 Baker 等人对流量计自动化检定装置进行了深入的研究，并给出了详尽的设计案例，同步实现水压、气压和流体温度的多参量精确计量^[14]。



图3 全自动压力校准系统
Fig. 3 Automatic pressure calibration system

从仪器开发角度阐述了国外压力表智能检定的发展现状，可以看出，压力表检定逐渐由自动化向智能化、网络化方向扩展，由单一参数计量向多参数计量方向发展，这符合美国等发达国家的计量发展理念，即为商业和政府提供世界领导地位的关键测量解决方案，聚焦于研发和创新，与工业界和科学界同仁一起激发创新，确保和提升测量科学的准确可靠，提高生活质量和促进贸易。

3 压力表智能检定国内现状

从时间角度来讲，国内关于指针式压力表自动检定系统的研究与国外处于同一时期^[15-16]，哈尔滨工业大学李铁桥教授在上世纪九十年代就研究了基于图像处理技术的指针式压力表自动判读系统，并研制出相应的全自动检定系统，实现了测量范围为 0 ~ 16 MPa、0.4 级以下指针式压力表的自动检定，改善了国内压力表检定的落后状况；华北电力大学岳国义等人研究了基于计算机视觉技术及程控标准信号源的智能指针式仪表识别系统，并提出新的距离判别方法，实验表明

新的识别方法更具合理性，识别精度优于人工识别^[17]；中国石油大学张伟、刘复玉针对海量数据库系统设计问题，设计出快速高效的 Oracle 数据库管理系统和 Web 网页数据查询系统，并将其应用于油田压力表批量智能检定中，实现了批量压力表检定海量数据快速查询、管理和展示，主要功能需求框图如图 4 所示^[9]；沈阳工业大学连兆杰研制出基于机器视觉技术的指针式压力表检定系统，通过边缘提取技术将表盘从压力表图像中提取出来。根据表盘尺寸和图像采集距离选择定焦镜头，确保最大直径压力表被检视场范围完整清晰。通过 Microsoft Visual Studio 2010 调用 Microsoft Word 2007 数据库，将 word 检定文档按国家标准自动写入检定记录中，提高了工作效率，各模块软件设计流程图如图 5 所示。根据上述工作，实现了精度为 0.4 级准确压力表的检定，可以实现不同直径指针式压力表快速准确检定，且适用多变复杂工作环境^[4]；北京康斯特仪表科技股份有限公司先后推出了 ConST811 现场全自动压力校验仪、ConST811A 智能全自动压力校验仪、ConST810 手持全自动压力校验仪，实现了真空至 7 MPa 范围自动控压压力计量检定，准确度等级最高可达 0.01 级，并可实现现场检定，不足之处是需要人工读取被检表数值；在智能压力控制器方面，先后推出 ConST820，ConST821，ConST822，ConST836 智能压力控制器，控压范围为 - 0.09 ~ 60 MPa，准确度等级最高可达 0.01 级^[18]。上述产品极大提升了我国压力计量自动化、智能化水平，实现了关键技术自主可控。

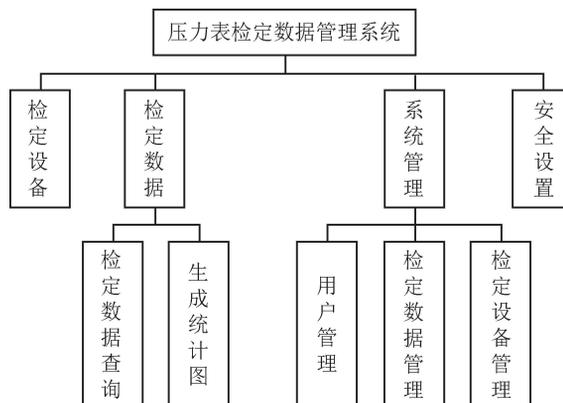


图4 压力表检定数据功能需求框图
Fig. 4 Functional requirements block diagram of pressure gauge verification data

综上所述，可以看出国内在指针式压力表智能检定诸多方面取得了长足的进步，但是研究工作还主要

集中在以基础研究为主体的高校内，且研究成果没有进行大规模普及或者只停留在某个行业。与国外相比，国内研究的检定系统仅仅针对压力一个参数进行计量，而国外已经实现了包括压力在内的多参数同步计量，且国内研究对象仅限于某一准确度等级范围内的压力表，没有实现压力表现有等级的全覆盖。因此为了更好地促进指针式压力表智能检定技术的研究、发展

和推广应用，高校应该主动与科技企业联系，发挥高校科研方面和企业生产工艺的长处，大力推动产学研用融合，实现智能压力计量对国家经济发展的支撑和保障作用；同时随着柔性压力传感器的持续深入研究^[19]，压力智能在线、在役监测成为可能，与温度及其他传感器组成智能监测网络系统，实现在役装备压力、温度等多参数实时监测、计量与评估。

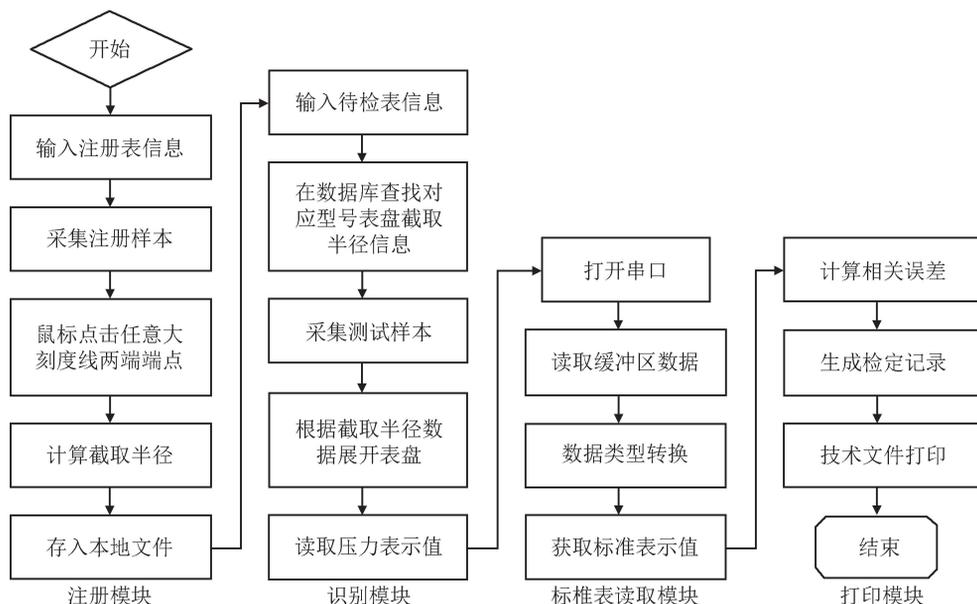


图5 软件设计流程图

Fig. 5 Software design flow chart

4 压力表智能计量系统基本架构

压力表智能计量检定或校准是压力参数计量的发

展趋势之一，图6为压力表智能计量系统基本架构，它建立在自动控制、机器视觉检测、物联网等技术发展基础之上，并随着现代测量技术的发展而不断进步

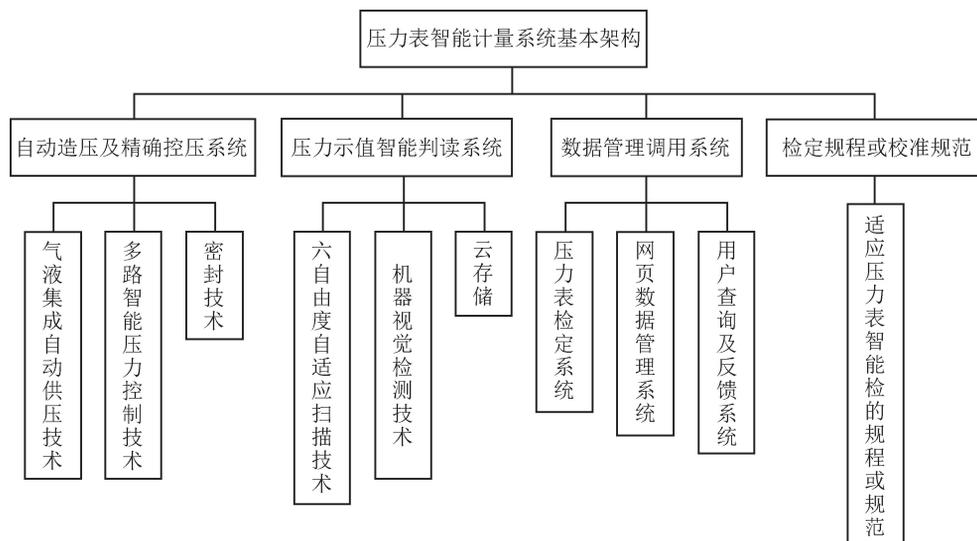


图6 压力表智能计量系统架构

Fig. 6 Framework of pressure gauge intelligent metrology system

和完善。可以看出,压力表智能计量系统基本架构可分为3个基本层级,从第2层级开始,每个层级一般包含硬件系统和软件系统。以数据管理调用系统为例,硬件系统包括工控机和数字终端,软件系统包括压力表检定系统、网页数据管理系统和用户查询及反馈系统。压力表检定系统涵盖压力表检定人机交互界面、被检表信息录入以及测量标准信息更新等功能。网页数据管理系统可以实现海量检定数据的存储、原始记录及证书的生成、网络会签、技术文件打印等功能。用户查询及反馈系统可以实现用户实时查询被检表所处的计量状态、电子证书下载、技术问题反馈以及到期溯源提醒等功能。随着压力智能计量系统的研究和推广应用,相应的检定规程也需要适时修订和更新。

5 压力表智能检定发展趋势和挑战

随着自动测量技术的发展,指针式压力表智能检定技术会日趋完善,将广泛应用于压力表计量领域,能够极大减轻计量检定人员的劳动强度,还能从技术层面减小人为读数引入的不确定度分量。本文给出了指针式压力表智能检定系统的构成,综述了国内外研究现状,在此基础上,给出了压力表智能计量系统的基本架构。但是,随着工业的不断发展和对压力计量的现实需求,压力表智能计量检定技术由技术研究到工程应用仍面临诸多机遇和挑战。

1)从量值传递角度,我国已建立以国家计量院为核心的法定计量体系,具备科学计量、法制计量和工程计量能力。根据检定规程,指针式精密压力表读数按最小刻度的十分之一来估读,这已经是人眼读数的极限,如果采用基于机器视觉精密检测技术的压力表智能检定系统,可以进一步提高读数的准确度,使压力量值传递真实、可靠,这符合技术计量完整精度的发展趋势。

2)随着工业物联网、人工智能和云计算技术的发展,应充分利用我国在人工智能数据积累、项目应用以及功能集成三方面的优势,通过大量测量数据的积累,挖掘影响测量的各种误差来源,并实时进行反馈,找出影响规律与消减方法,构建数学预测模型,形成软件,不断评估对测量的改善效果。将这些技术引入压力表智能计量,会极大提高工作效率,通过对海量计量数据的挖掘与分析,连续跟踪批量指针式压力表的使用寿命,并通过人工智能算法对其寿命进行预测,

合理给出指针式压力表的检定周期,为后续测量标准的修订提供坚实的实验基础。

3)随着深海、深空探测、远洋航行技术的不断拓展,如何保证设备的安全、可靠运行,这些离不开精确测量,同时为指针式压力表智能计量技术的应用提供更加广阔的应用范围。由于被检表所处的特殊环境,应在本文提出的压力表智能计量系统架构基础上,进一步发展非侵入式压力计量技术和虚拟计量技术,解决压力表在线、在役计量或校准难题。

4)2018年世界计量大会决定国际单位制7个基本单位采用物理常数重新定义,理论上,只要满足定义条件,基本量值就可以随时随地复现出来,省去了标准量值传递的中间环节使量值传递体系扁平化。为了实现量值传递的扁平化,需要精密或超精密测量设备,这就为压力智能计量提供了用武之地,推进包括压力在内的计量参数数字化、智能化计量进程,是智能制造“完整精度”实现的重要支撑,这将有力推动高效的国家计量体系和国家工业测量体系的建立。

参考文献

- [1] 张虹,刘燕,陈宏馨,等.压力表检定的发展概况[J].计量技术,1999,(8):26-28.
ZHANG H, LIU Y, CHEN H P, et al. Development of pressure gauge verification[J]. Measurement technology, 1999, (8): 26-28. (in Chinese)
- [2] 苏一鸣,杨水旺,张琦,等.基于Lab VIEW机器视觉的压力表自动化检定装置设计[J].计测技术,2020,40(1):57-60.
SU Y M, YANG S W, ZHANG Q, et al. Design of automatic calibration system for pressure gauges based on LabVIEW machine vision[J]. Metrology and measurement technology, 2020, 40(1): 57-60. (in Chinese)
- [3] 李涛,高博,周国洲.延长压力表检定周期的一种方法[J].工业计量,2019,29(1):83-85.
LI T, GAO B, ZHOU G Z. A method of prolonging the verification period of pressure gauge[J]. Industrial measurement, 2019, 29(1): 83-85. (in Chinese)
- [4] 连兆杰.基于机器视觉技术的指针式压力表检定系统的研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2016.
LIAN Z J. Research of verification system for pointer pressure gauge based on machine vision[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [5] 盛丹,李涛,张华锋.基于精准定位的压力表检定周期研究[C].2019航空装备服务保障与维修技术论坛暨中国航空工业技术装备工程协会年会,2019:373-375.

- SHENG D, LI T, ZHANG H F. Verification period estimation of pressure gauges based on accurate tracking [C]. Aviation equipment service support and maintenance technology forum, 2019: 373 - 375. (in Chinese)
- [6] LI R, TIAN F, CHEN S. Research on surface defect detection method of E - TPU midsole based on machine vision[J]. Journal of computer and communications, 2020, 8(11): 145 - 160.
- [7] PARASKEVOUDIS K, KARAYANNIS P, KOUMOULOS E P. Real - time 3D printing remote defect detection (stringing) with computer vision and artificial intelligence[J]. Processes, 2020, 8(11): 1464.
- [8] 任玲玲. 材料计量论述[J]. 计量科学与技术, 2021, 65(1): 3 - 7.
- REN L L. An overview of materials measurement[J]. Metrology science and technology, 2021, 65(1): 3 - 7. (in Chinese)
- [9] 张伟. 基于 Oracle 数据库系统在压力表智能检定中的研究与应用[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
- ZHANG W. Research and application on intelligent calibration of pressure gauge based on oracle database system [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015. (in Chinese)
- [10] 郑德亮. 铁路机车车辆专用压力表智能检定装置[D]. 大连: 大连交通大学, 2007.
- ZHENG D L. An intelligent detector for the dedicated pressure gauge of rolling-stock[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [11] 张建功. 彩色测量实验与图像处理技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- ZHANG J G. Research on color measurement experiment and image processing technology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)
- [12] BUDENBERG R C. A history of industrial pressure measurement[J]. Measurement and control, 1987, 20(8): 13 - 18.
- [13] 孙琳, 王永东. 指针式仪表自动检定系统图像识别技术[J]. 现代电子技术, 2011, 34(8): 101 - 104.
- SUN L, WANG Y D. Image recognition technology of index meter automatic verification system [J]. Modern electronics technique, 2011, 34(8): 101 - 104. (in Chinese)
- [14] BAKER R C, GAUTREY D P, MAHADEVA D V, et al. Case study of the electrical hardware and software for a flowmeter calibration facility[J]. Flow measurement and instrumentation, 2013, 29(1): 9 - 18.
- [15] 李铁桥, 富丽宇. 图象处理在指针式压力表自动判读方面的应用[J]. 自动化仪表, 1996, 17(12): 13 - 16.
- LI T Q, FU L Y. Application of image processing in automatic interpretation of pointer pressure gauge[J]. Automatic instrumentation, 1996, 17(12): 13 - 16. (in Chinese)
- [16] 张虹, 李铁桥, 陈宏磐, 等. 指针式压力表全自动检定系统的研制[J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(4): 345 - 347.
- ZHANG H, LI T Q, CHEN H P, et al. Development of a fully automatic calibration system for pressure gauges with pointers[J]. Chinese journal of scientific instrument, 1999, 20(4): 345 - 347. (in Chinese)
- [17] 岳国义, 李宝树, 赵书涛. 智能型指针式仪表识别系统的研究[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(4): 430 - 431.
- YUE G Y, LI B S, ZHAO S T. Intelligence identifying system of analog measuring instruments[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2003, 24(4): 430 - 431. (in Chinese)
- [18] 王棋, 陈玉娟, 王立梅. 基于 LabVIEW 的压力传感器自动检定系统设计[J]. 计测技术, 2017, 37(S1): 202 - 204.
- WANG Q, CHEN Y J, WANG L M. Design of pressure sensor automatic verification system based on LabVIEW[J]. Metrology and measurement technology, 2017, 37(S1): 202 - 204. (in Chinese)
- [19] 金凡, 吕大伍, 张天成, 等. 基于微结构的柔性压力传感器设计, 制备及性能研究进展[J]. 复合材料学报, 2021: 1 - 18.
- JIN F, LYU D W, ZHANG T C, et al. Design fabrication and performance of flexible pressure sensors based on microstructures[J]. Acta materiae compositae sinica, 2021: 1 - 18. (in Chinese)