

工频磁场抗扰度系统的自动校准技术研究

冯建强¹, 姜楠¹, 周海鹏²

(1. 西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077; 2. 西安优来测科技有限公司, 西安 710065)

摘要: 针对工频磁场抗扰度系统校准规范缺失的现状,依据有关国家和国际标准,对工频磁场抗扰度系统的自动校准技术做了系统研究。提出了需要校准的4类参数,即:输出电流值、总谐波畸变率、线圈常数和磁场均匀区。对每类参数给出了校准方法及线路,设计了自动校准系统,并通过试验进行了验证。这些工作为规范该系统的校准及为下一步编写校准规范奠定了技术基础。

关键词: 工频磁场抗扰度系统; 校准方法; 校准系统

Research on Automatic Calibrating Technology of Power Frequency Magnetic Field Immunity System

FENG Jianqiang¹, JIANG Nan¹, ZHOU Haipeng²

(1. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China;

2. Xi'an YouLaice Technology Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: A research on the automatic calibrating technology of power frequency magnetic field immunity system is carried out based on national and international standards for absence of calibrating regulation. Three kinds of parameters are provided together with the dedicated calibrating methods and circuits. And then, an automatic calibrating system is design to improve calibrating quality and efficiency. This job lays the technical foundation to regulate the calibrating activities and establish the calibrating regulation subsequently.

Key words: power frequency magnetic field immunity system; calibrating method; calibrating system

0 引言

安装于工业设施、发电厂、中高压变电所中的电气电子设备面临工频磁场干扰的危险,为确保该类设备在这些环境中能正常工作,按3C规定需要对其进行工频磁场(power frequency magnetic field, PFMF)抗扰度试验^[1-7],PFMF抗扰度系统是实施该项试验的标准装置。按照规范,需要定期(一般为一年或两年)对该类装置进行校准,以确保量值传递的准确性和有效性。

目前,中国还没有PFMF抗扰度系统的校准规范。依据有关国家和国际标准^[2-3],参考有关文献^[1,3-21],文中对PFMF抗扰度系统的校准技术进行了系统研究,涵盖校准要求、校准方法、校准系统及试验验证等内容,以期规范该类装置的校准工作,为后续编写校准规范奠定技术基础。

1 校准要求

1.1 PFMF抗扰度系统组成

PFMF抗扰度系统组成参见图1,其包括:工频电流发生器、磁场线圈以及它们之间的专用互连电缆(不超过3 m双绞线或同轴电缆)。

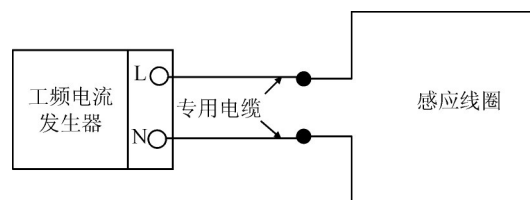


图1 PFMF抗扰度系统组成

Fig. 1 System composition of PFMF

1.2 校准要求

根据上述组成及文[1-2]给出的校准原则,结合本单位的校准经验,提出需要校准的4类参数:输出

电流值、总谐波畸变率^[15-16]、线圈常数^[17]和磁场均匀区^[18],各个参数的含义及校准要求如下。

1.2.1 输出电流值

即对工频电流发生器的电流有效值进行校准。典型的工频电流发生器由一台调压器(接至配电网)、一台电流互感器和一套控制电路组成;发生器可在连续方式和短时方式下工作。因此需要对其输出电流值进行校准的参数、准确度级别要求为

- 1)连续方式下有效值范围为1.2~120 A;
- 2)短时(1~3 s)方式下有效值范围为:360~1 200 A;
- 3)准确度级别2级。

1.2.2 总谐波畸变率

该参数也是针对工频电流发生器的。从图1可知,工频电流发生器经专用互联电缆连接到磁场线圈,通过磁场线圈产生磁场。该试验主要是考核被试件(equipment under test, EUT)对工频磁场的耐受,因此要尽量避免产生工频磁场以外的磁场(比如由电流谐波产生的杂散磁场),以免影响试验的准确性。所以需要对工频电流发生器的输出电流谐波进行控制。依据标准,其输出电流总谐波畸变率(电流THD)不超过8%,准确度级别2级。

1.2.3 线圈常数

指尺寸确定的磁场线圈所产生的磁场强度 H 与馈入电流 I 的比值,即 $F_{\text{coil}}=H/I$ 。 F_{coil} 表征了磁场线圈将工频电流转换为工频磁场的效率,该值越大效率越高。实际使用中,磁场线圈形状和大小需要依据试品外形尺寸而定, F_{coil} 需要通过校准确定。 I 值在1.2.1中已经测出, H 值需另行测试。

1.2.4 磁场均匀区

即磁场线圈的磁场均匀区,指工频电流馈入磁场线圈后,在线圈内产生的、以线圈平面几何中心磁场强度为参考点、沿空间变化的磁场区域,若规定磁场强度相比于参考点在 ± 3 dB以内变化,则认为该区域的磁场是均匀的,称为磁场线圈磁场均匀区,简称磁场均匀区(magnetic field uniform, MFU),MFU也是试验中的最大允许试验区域,表征了PFMF抗扰度系统所允许试验的最大设备外形尺寸,是一个重要的系统指标,所以需要专门校准。

2 校准方法

本章对第1章确定的4类参数,设计专门的校准方法。

2.1 输出电流值校准

按1.2.1的分析,需要校准的输出电流值(rms)

幅值范围为1.2~1 200 A,准确度要求为2级,则校准仪器最好选用准确度级别0.2级,这样校准仪器引入的不确定度可控;基于上述分析,设计的校准线路见图2。

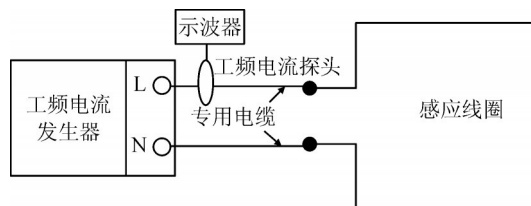


图2 输出电流值校准线路

Fig. 2 Calibrating line of output circuit

本次校准所用仪器主要参数如下:①工频电流探头变比为0.005 V/A,最大电流(rms)1 400 A,如Pearson 1330;②示波器的带宽不低于50 MHz,采样率优于200 MSa/s,如Tek DOP3000系列。

2.2 总谐波畸变率校准

按1.2.2节的分析,设计的总谐波畸变率校准线路见图3。

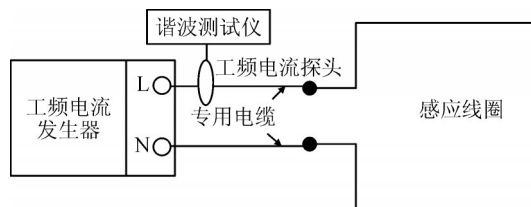


图3 总谐波畸变率校准线路

Fig. 3 Calibrating line of THD

本次校准所用的谐波测试仪为Fluke 1738电能质量记录仪,其电流THD测试参数是:最大工频电流6 000 A,谐波电流为工频电流的1 000%,分辨率为测量电流的0.10%,基本准确度0.5级。

2.3 线圈常数校准

F_{coil} 是磁场线圈的一个固有参数,与校准所用的信号无关,为便于校准,采用工频电流做激励。由1.2.3节可知, $F_{\text{coil}}=H/I$,因此要校准该参数,需要测出 H 及 I ; I 参数的测量可由2.1给出的线路来完成; H 参数通过如下方式测量:采用工频电流发生器产生工频电流馈入待测线圈后,在待测线圈的几何平面中心,放置工频磁场探头采集磁场信号(磁场探头平面与线圈几何平面重叠,即测垂直极化场),经光纤传输到后端的工频磁场接收装置,即可读取 H 值;电路连接见图4。

本次校准除2.1节所使用的仪器外,还新增两台仪器,主要参数要求是:①工频电流发生器:产生50 Hz(或60 Hz)工频电流,输出电流(rms)30 A,频率容差 ± 1 Hz,电流容差 $\pm 1\%$,总谐波畸变率 $\leq 8\%$,满足

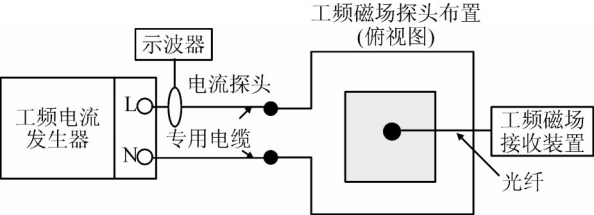


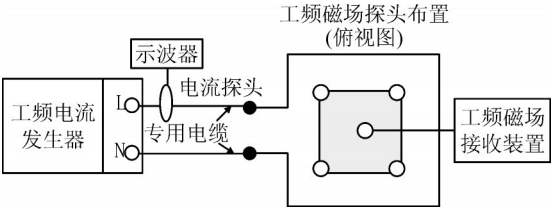
图4 线圈常数校准线路

Fig. 4 Calibrating line of coil factor

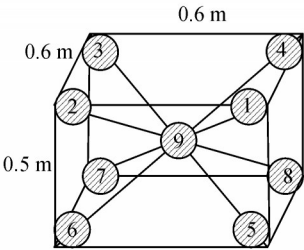
此要求的工频电流源都可以;②工频磁场测量装置:包括工频磁场探头和接收装置,其中工频磁场探头可以是霍尔效应探头或直径不大于0.1 m的多匝罗氏线圈,动态范围1~100 A/m,如Holaday HI-3604。

2.4 磁场均匀区校准

MFU 直接关系到试验中可使用的有效试验区域,激励信号采用试验工频信号最为合适,本参数校准采用符合 2.3 节要求的工频电流源。专门的工频磁场校准线路见图 5,将各向同性工频磁场探头顺序放置在磁场线圈的 9 个位置,见图 5(b),采集工频磁场信号,经光纤与后端的工频磁场接收装置相连,通过该装置读取工频磁场数据(A/m)。



(a) 磁场均匀域校准线路图(俯视)



(b) 工频磁场探头布置图(三维)

图5 场均匀域校准图

Fig. 5 Calibrating line of FU

需要指出的是:图 5(b)中的均匀域边长是针对边长为 1 m 的正方形线圈给出的推荐值,不同尺寸的线圈这些值是不同的,实际校准中应做适当调整。

本次校准所需要的仪器同 2.1 节和 2.3 节。

3 自动校准系统

为了准确高效地实现第 2 章的校准方法,本章设计了专用的自动校准系统^[19-21]。该系统包括两部

分:硬件子系统和软件子系统。

3.1 硬件子系统

按功能,硬件子系统可以划分为 3 个模块:①电流测量模块:包括电流探头及示波器;②谐波测量模块:包括电流探头及谐波测试仪;③工频磁场测量模块:包括工频磁场探头及工频磁场接收装置,见图 6。

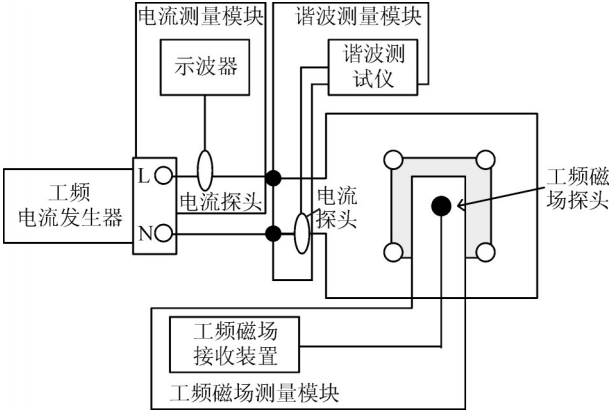


图6 硬件子系统组成

Fig. 6 Component of hardware subsystem

各模块的基本工作原理是:

电流测量模块。电流探头提取工频电流发生器输出的电流,并输入示波器,在时域下对电流幅值(有效值)进行校准。

谐波测量模块。电流探头提取工频电流发生器输出的电流,并输入谐波测试仪,谐波测试仪对工频电流源的输出电流总谐波畸变率进行检测。

工频磁场测量模块。工频电流发生器产生的电流通过专用电缆馈入磁场线圈,工频磁场探头放置在磁场线圈平面几何中心,提取工频磁场强度并输入接收装置,测出磁场强度大小。

3.2 软件子系统

上述硬件子系统中,涉及到 3 套相对独立但又紧密配合的模块,需在不同的位置及多个电流设定值下校准,参数设置、数据读取及数据处理工作量大,如果单靠手工进行,校准效率低,且容易引入误差。

分析上述设备:工频电流发生器、示波器、谐波测试仪及工频磁场接收装置都配备了程控接口(比如 GPIB、LAN、USB 或 RS-232 等),这就为采用基于计算机软件控制的自动校准技术奠定了基础。

基于此,设计了专门的校准软件,框图见图 7。该套软件包括 4 个一级模块:参数设置、仪器控制、校准控制及数据处理,各个一级模块又进一步划分为 4 个二级模块,以控制设备实现校准过程、数据处理、校准记录和校准报告的自动化。

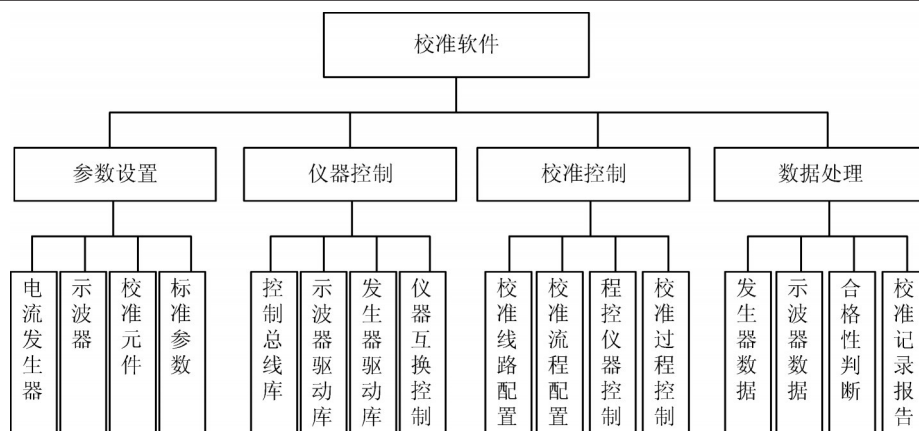


图7 校准软件框图

Fig. 7 Block of software calibration

Lab windows CVI 是 T&M 领域的主流开发工具之一,自带强大的驱动程序库,支持 SCPI 指令,可以很好兼容上述程控仪器;另外,CVI 自带的丰富仪表控件,也为设计良好的 GUI 提供了方便,因此采用其作为本校准软件的前端开发工具。本校准的数据处理量不是特别大,Microsoft 推出的小型数据库软件 Access,既可保证一定的处理速度(相比于数据文件存储模式),也可有效控制软件体积及开发成本,被选择作为后台数据存储工具。

4 试验验证

为验证线路和方法,设计了输出电流值、总谐波畸变率及线圈常数校准试验,由于场均匀域所用仪器及使用的方法与线圈常数相同,只是增加了更多的位置,就不再赘述。

4.1 连续输出电流值校准

设置 PFMF 发生器输出磁场强度为 100 A/m,通过示波器可以读取电压值,重复测量 10 次,得到测量值见表 1。

表1 输出电流值校准

Table 1 Calibration of output current

A

1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	8次	9次	10次
120.018	120.023	120.191	120.192	120.186	120.187	120.218	120.232	120.174	120.191

还可以计算出,在工频电流发生器输出磁场强度为 100 A/m 时,其端口输出电流有效值的均值为 120.161 A,与设定值偏差为+0.13%。

4.2 输出电流总谐波畸变率校准

设置 PFMF 发生器输出磁场强度设置为 100 A/m,重复测量 10 次,得到的总谐波畸变率测量值见表 2。

表2 总谐波畸变率校准

Table 2 Calibration of THD

%

1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	8次	9次	10次
0.012 7	0.013 4	0.013 2	0.012 5	0.014 4	0.013 4	0.013 2	0.012 2	0.012 9	0.012 7

可以得到算数平均值为 0.0131,即 1.31%。

4.3 磁场线圈因素校准

通过工频磁场探头和工频磁场接收装置,可以

得到位于线圈几何平面中心的磁场强度,重复测量 10 次,得到测量值见表 3。

可以得到算出平均值为 100.44 A/m。

表3 工频磁场强度校准

Table 3 Calibration of PFMF

A/m

1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	8次	9次	10次
101.18	99.89	100.89	100.46	99.95	101.12	100.96	100.23	99.23	100.47

依据 $F_{\text{coil}}=H/I$,求得 $F_{\text{coil}}=100.44/120.161=0.84$ A/m,与理论值 0.86 A/m 接近,偏差为 2.3%。

从试验数据可以看出,校准数据集中,重复测试的数据稳定,校准结果也与设定值接近,校准系

统具有可用性,达到设计目标。

5 结语

针对PFMF抗扰度系统校准规范缺失的现状,结合相关国家国际标准和自身经验,提出了PFMF抗扰度系统校准要求、校准方法和校准线路,并开发出自动校准系统,提高了校准质量和效率,这些工作为规范该类试验装置的校准及下一步编制校准规范奠定了技术基础。

参考文献:

- [1] 张昕,王铭仁. 变电站绝缘在线监测系统工频磁场干扰分析[J]. 电工技术, 2009, 8(2): 18-19.
ZHANG Xin, WANG Mingren. Anti interference analysis of power frequency magnetic field in substation insulation on-line monitoring system[J]. Electric Engineering, 2009, 8(2): 18-19.
- [2] 电磁兼容 试验和测量技术 工频磁场抗扰度试验: GB/T 17626.8—2006[S]. 北京: 国家质量技术监督局, 2006.
Electromagnetic compatibility-testing and measurement techniques-power frequency magnetic field immunity test: GB/T 17626.8—2006[S]. Beijing: The State Bureau of Quality and Technical Supervision, 2006.
- [3] Testing and measurement techniques-power frequency magnetic field immunity test: IEC 61000-4-8: 2009[S]. 2009.
- [4] 阻尼振荡磁场抗扰试验系统校准规范: JJF(机械)103—2012[S]. 北京: 中国机械联合会, 2012.
Calibration specification for damped oscillatory magnetic field immunity test system: JJF(Mechanics)103—2012[S]. Beijing: China Machinery Industry Federation, 2012.
- [5] 陈炜峰, 刘伟莲, 周香. 电磁兼容及其测试技术[J]. 电子测量技术, 2008, 1(4): 101-104.
CHEN Weifeng, LIU Weilian, ZHOU Xiang. Electromagnetic compatibility and its test technology[J]. Electronic Measurement Technology, 2008, 1(4): 101-104.
- [6] 李明, 朱中文, 蔡伟勇. 电磁兼容技术研究现状与趋势[J]. 电子质量, 2007, 7(4): 61-64.
LI Ming, ZHU Zhongwen, CAI Weiyong. Research status and future trends of electromagnetic compatibility technology[J]. Electronics Quality, 2007, 7(4): 61-64.
- [7] 钱振宇. 工频磁场的抗扰度试验[J]. 仪表技术, 2001, 3(2): 24-25.
QIAN Zhenyu. Power frequency magnetic field immunity test[J]. Instrumentation Technology, 2001, 3(2): 24-25.
- [8] 脉冲磁场抗扰试验系统校准规范: JJF(机械)104—2012[S]. 北京: 中国机械联合会, 2012.
Calibration specification for pulse magnetic field immunity test system: JJF(Mechanics)104—2012[S]. Beijing: China Machinery Industry Federation, 2012.
- [9] 刘易勇, 任稳柱, 李珂, 等. 脉冲磁场发生器自动校准技术研究[J]. 测控技术, 2013, 5(3): 112-114.
LIU Yiyong, REN Wenzhu, LI Ke, et al. Research on automatic calibration technology of pulse magnetic field generator[J]. Measurement & Control Technology, 2013, 5(3): 112-114.
- [10] 刘易勇, 任稳柱, 冯建强, 等. GB/T 11022新旧版中电磁兼容性差异的比较与分析[J]. 高压电器, 2012, 48(4): 80-83.
LIU Yiyong, REN Wenzhu, FENG Jianqiang, et al. Comparison and analysis for the change of EMC specification in the different versions' GB/T 11022[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(4): 80-83.
- [11] 刘易勇, 姚斯立, 冯建强, 等. 智能高压电器磁场及传导抗扰度屏蔽室的电磁环境电平研究[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 18-22.
LIU Yiyong, YAO Sili, FENG Jianqiang, et al. Research on EM ambient level of shielded room for magnetic-field and conduct sensitivity aiming for intelligent HV appliances[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5): 18-22.
- [12] 李素洁, 刘易勇. 振荡波磁场发生器的校准[J]. 工业仪表与自动化装置, 2014, 50(3): 79-81.
LI Sujie, LIU Yiyong. Calibration for damped oscillatory magnetic field generator[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2014, 50(3): 79-81.
- [13] 黄攀. 工频磁场感应线圈校准[J]. 安全与电磁兼容, 2005, 6(4): 56-59.
HUANG Pan. Power frequency magnetic field induction coil calibration[J]. Safety & EMC, 2005, 6(4): 56-59.
- [14] 杨火炎. 降低变电站 10 kV 电压谐波畸变率[J]. 农村电气化, 2013, 1(2): 44-45.
YANG Huoyan. Reducing harmonic distortion rate of 10 kV voltage in substation[J]. Rural Electrification, 2013, 1(2): 44-45.
- [15] 陈萍. 配电系统谐波源及畸变率的探讨[J]. 电工技术杂志, 2003(3): 26-28.
CHEN Ping. Discussion on harmonic source and distortion rate of distribution system[J]. Electrotechnical Journal, 2003(3): 26-28.
- [16] 黄文广. 工频磁场测试系统分析及其感应线圈的设计[J]. 医疗装备, 2010, 11(3): 13-15.
HUANG Wenguang. Analysis of power frequency magnetic field testing system and design of induction coil[J]. Chinese Journal of Medical Device, 2010, 11(3): 13-15.
- [17] 王之魁, 樊庆文, 王德麾, 等. 基于亥姆霍兹线圈的均匀磁场发生器设计分析及应用[J]. 医疗卫生装备, 2014, 10(4): 1-3.
WANG Zhikui, FAN Qingwen, WANG Dehui, et al. design and application of uniform magnetic field generator based on Helmboltz coils[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2014, 10(4): 1-3.

(下转第 267 页)

- ysis. International Electrotechnical Commission; IEC 60599; 2007[S]. 2007.
- [20] 变压器油中溶解气体分析和判断导则: DL/T 722—2007[S]. 2007.
- Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil; DL/T 722—2007[S]. 2007.
- [21] 杨廷方, 张航, 黄立滨. 基于改进型主成分分析的电力变压器潜伏性故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 149-153.
- YANG Tingfang, ZHANG Hang, HUANG Libin. Incipient fault diagnosis based on improved principal component analysis for power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 149-153.
- [22] 宋斌, 刘志雄, 李恩文, 等. DGA中三比值缺码研究初探[J]. 电力系统自动化, 2015, 35(12): 60-64.
- SONG Bing, LIU Zhixiong, LI Enwen, et al. Preliminary study of undefined three-ratio code in DGA[J]. Electric Power Automation Equipment. 2015, 35(12): 60-64.
- [23] 曹建, 范竞敏, 丁家峰. 改进的灰熵关联度算法用于变压器故障诊断[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(4): 25-29.
- CAO Jian, FAN Jingmin, DING Jiafeng. Fault diagnosis of transformer using an improved grey entropy relation algorithm[J]. Proceeding of the CSU-EPSA, 2009, 21(4): 25-29.
- 覃煜(1985—), 男, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为高电压绝缘技术及高电压试验技术。

(上接第261页)

- 2014, 10(4): 1-3.
- [18] 蔡青, 陆福敏. 自动校准系统与实验室信息管理系统连接[J]. 上海计量测试, 2009, 1(4): 5-8.
- CAI Qing, LU Fumin. The connection between auto-calibration system to laboratory information management system[J]. Shanghai Measurement and Testing, 2009, 1(4): 5-8.
- [19] 蒋红娜, 宫海波. 系统校准自动化技术研究与实现[J]. 中国科技信息, 2017, 10(2): 25-26.
- JIANG Hongna, GONG Haibo. Research and implementation of system calibration automation technology[J]. China Science and Technology Information, 2017, 10(2): 25-26.
- [20] 杨晓东, 马川, 刘成国, 等. 通用电子测量仪器自动测量系统的实现[J]. 计算机测量与控制, 2016, 5(3): 42-43.
- YANG Xiangdong, MA Chuang, LIU Chengguo, et al. Realization of universal electronic measurement instrument auto-measurement system[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 5(3): 42-43.
- [21] 赖纪顺. 微型计算机运算与控制技术研究[J]. 国管理信息化, 2016, 5(1): 180.
- LAI Jishun. Research on microcomputer operation and control technology[J]. China Management Informationization, 2016, 5(1): 180.
- 冯建强(1974—), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事高、低压电器产品检测方面的研究工作。