

12 kV 真空灭弧室真空度测试校验仪的研究

梁义明¹, 贾守辉³, 邵涛², 王东珏², 于洋², 张伟², 严萍²

(1. 吉林省电力有限公司电力科学研究院, 长春 130021; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190;
3. 吉林省通化供电公司, 通化 134001)

摘要: 基于磁控脉冲放电的真空度测试仪在电力系统中广泛应用,但其测量结果和精度越来越受到关注。笔者论述了真空度校验仪的测量原理,阐述了校验仪主要四部分的设计,包括真空灭弧室选择、抽真空系统、绝缘考虑和真空度测量,给出了校验仪的控制流程和方法,通过测试介绍了校验仪装置的抽真空时间曲线、典型离子电流与真空度关系曲线及在短期重复测试的问题及解决办法。该装置适合电力系统用校验 12 kV 真空灭弧室真空度测试仪的校验。

关键词: 真空开关; 真空度测量; 磁控放电法; 校验仪

中图分类号: TM85;TB77

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2011)02-0022-05

Research of Vacuum Test Calibration Instrument of 12 kV Vacuum Interrupter

LIANG Yi-ming¹, JIA Shou-hui³, SHAO Tao², WANG Dong-jue², YU Yang², ZHANG Wei², YAN Ping²

(1. Jilin Electric Power Research Institute Co., Ltd., Changchun 130021, China;
2. Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. Tonghua Power Company in Jilin Province, Tonghua 134001, China)

Abstract: Vacuum degree measurement of vacuum interrupter based on magnetron discharge method has been used extensively in the power system, and the precision has been paid more and more attention. In this paper, a vacuum calibration instrument was studied. Firstly, the measurement principles and design was described, and its four parts including vacuum interrupter choice, vacuum pumping system, insulation consideration and measurement of vacuum degree were presented. The control method of the instrument was also given. Via the experiment and test, the vacuum pumping time, relation curve of typical ionic current and vacuum degree, and repetitive measurement problem were presented. It can be found that the test instrument of vacuum interrupter can be used for the calibration.

Key words: vacuum interrupter; vacuum degree measurement; magnetron discharge; calibration instrument

0 引言

真空断路器目前在低压及中压领域占有一定比例,目前 10 kV 电网中的断路器采用真空断路器较多^[1-2]。真空断路器是以真空为绝缘和熄弧介质的开关电器,今后还将在高压领域逐渐取代 SF₆ 断路器。真空断路器与其他类型断路器相比,具有安全可靠、寿命长、维修工作量小、环境不受污染等优点。真空断路器真空灭弧室内的真空度是衡量真空断路器是否合格的重要标志。为了实现电流的分断和灭

弧,真空灭弧室内的压强一般不高于 $6.6 \times 10^{-2} \text{ Pa}^{[3-4]}$ 。如果真空灭弧室内的真空度在其有效范围以外,真空断路器就不能保证其绝缘性能,或者不能可靠地开断短路电流乃至负荷电流,从而导致其动作失败,严重时还会导致真空断路器完全失效,危及电网安全。因此真空断路器的用户特别关心运行中的真空灭弧室内部的真空度,由于运行环境及各种随机因素的影响,仍然有因真空度过低造成的开关故障存在,不仅在真空灭弧室出厂前准确地测出其真空度,而且在使用过程中要实现真空灭弧室真空度的现场测量^[4-6]。

为确定灭弧室内的真空度是否在安全范围以内,

收稿日期:2010-10-19; 修回日期:2010-11-26

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50437020)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of china(50437020).

已经有很多方法和相关的仪器被提出来并加以研究开发。在实际应用中,真空灭弧室真空度的测量方法主要有^[7-12]:观察法、火花计法、耐压法、高频电流开断放电法、吸气剂颜色变化的判定法、射线法、高频预击穿电流法、电光变换法、耦合电容法、磁控脉冲放电等。从目前实际应用来看,真空度测量结果精度较高,重复性较好,在电力系统中广泛运用。基于磁控脉冲放电法的真空度测试仪先测量出真空灭弧室内的离子电流,其次根据该离子电流—真空度曲线查找对应的压强,最后计算得到真空度。因此,一台完善的真空度测试仪应该储存各种型号的真空灭弧室的离子电流—压强曲线。需要指出的是,目前使用的真空度测试仪,都是根据厂家最初的设置来现场测量真空度,对现场测量数据的真实性和可靠性缺乏判断,因此需要研制校验仪来对这些常用的测量仪进行校验,通过真实的真空环境下的测量结果来判断测量仪的测量精度。笔者介绍一种用于 12 kV 真空开关测试仪的校验装置,可以实现真空开关测试仪的校验,对保证真空度测试仪的测量准确性和保障配电网的安全运行具有重要的意义。

1 测量原理

目前常见的校准方法有:系统法和样管法 2 种^[3-5]。系统法是将真空灭弧室接到真空系统中,并将系统抽到一定的真空度,用标准真空计测量系统的真空度。样管法是用带热阴极电离真空规管的真空灭弧室,抽气后从排气台上封离后,达到一定的真空度,作为样管,与需要校准的真空计进行真空度的比对校准。系统法因为是动态抽真空^[13, 15],有时灭弧室内真空度很难满足,真空度有误差,而样管法需要标准的真空管子,在出口处有标准真空计,而实际很难有标准的,而且一次校验实验完成后,需要较长时间再抽真空,而样管随时间变化真空度也会降低,因此需采用一种结合上述 2 种方法优点的新方法,既能保证真空灭弧室内的真空度相对稳定,确保排除真空度呈动态变化的因素,又能在不需要大量样品管的基础上保证较小的误差。笔者借鉴了系统法和样管法,采用的灭弧室是实际应用的灭弧室型号,热阴极电离真空规管就在灭弧室抽真空出口,同时比系统法增加了储气罐,能保证真空度动态平衡,而且设计多个接口保证校对试验能在短时间内重复进行。

真空度测试校验仪的抽真空系统的原理图见图 1,系统分为 2 级,前级为机械泵,其抽真空范围从大气压到 10^{-1} Pa,后级为分子泵,其抽真空范围

为 $10^{-7} \sim 10^{-1}$ Pa。分子泵与插板阀连接,插板阀用来隔断泵与抽真空对象,插板阀后连接储气罐,是为了保护抽真空对象,一般不直接将其连接到 2 级泵上,中间加装储气罐起到过渡作用。插板阀与储气罐间接一个低真空计,测量此处的压强,进而决定开启分子泵的时刻,以保护分子泵。储气罐接放气阀,一次试验完毕后,开启放气阀使储气罐内压强变为大气压。储气罐再接电磁阀,之后再接抽真空对象,此处接高真空计和低真空计,用于测量压强,近似认为此处的压强值等于抽真空对象内部压强值。真空度测试校验仪抽真空系统的模型图见图 2。

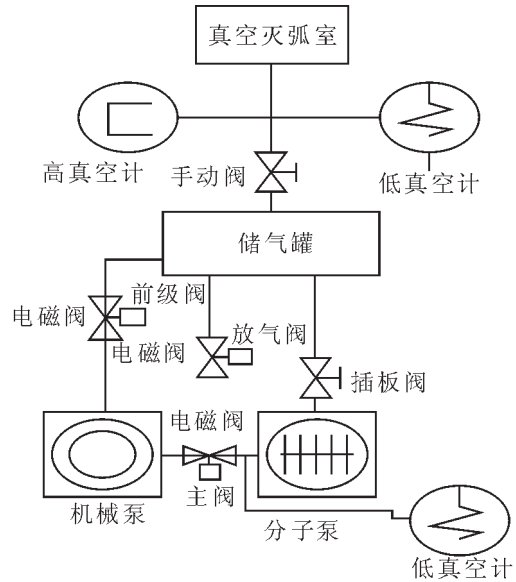


图 1 真空度测试校验仪原理图

Fig.1 Schematic of the test calibration instrument

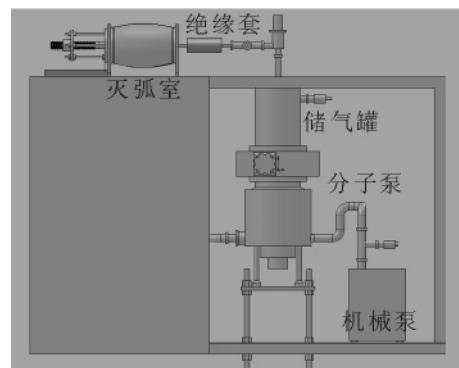


图 2 真空度测试校验仪的模型图

Fig.2 Model of the test calibration instrument

2 校验仪各部分设计

2.1 灭弧室选择

目前陶瓷外壳的真空灭弧室属于一次封排工艺,而玻璃外壳的真空灭弧室仍采用单灭弧室抽真空方式,因此选择玻璃外壳灭弧室,可选择未抽真空的玻璃泡子,并预留好抽真空接口。该试验中采用

2种型号的玻璃真空灭弧室,分别为直径100 mm和110 mm的玻璃泡子,不需要预先抽真空。

2.2 抽真空系统设计

该试验的抽真空系统由前级机械泵和后级分子泵组成。通过机械泵和分子泵联合使用和优化,同时结合一定的真空设计,可实现 10^{-4} Pa以上的真空度。抽真空系统图见图1。分子泵采用FZF-150/600的真空泵,水冷方式,机械泵采用2XZ-4,机械泵与分子泵通过主阀连接,由电磁阀控制。为了让真空灭弧室内部真空度相对动态稳定,在分子泵出口设计一个储气罐,并在储气罐与分子泵出口之间增加一个插板阀。同时在储气罐的出口连接一个手动微调阀,通过微调阀来控制真空灭弧室内的真空度。

2.3 灭弧室与抽真空系统连接部分设计

校验试验过程中灭弧室一端接约20 kV高压,另一端接离子电流测量电路,当真空灭弧室内压强较高时,会出现击穿现象,使后级的抽真空系统带电,危及系统安全,所以在灭弧室与抽真空系统之间加装了一绝缘导管,材料为聚四氟乙烯,聚四氟乙烯在较宽频率范围内的介电常数和介电损耗都很低,而且击穿电压、体积电阻率和耐电弧性都较高。即使灭弧室被击穿,也能保证后级系统不带电。由于直接接聚四氟乙烯管到管道很容易导致漏气,通过一定的真空设计,完全保证了系统的密封性,直接将聚四氟乙烯管两端与法兰成为一体,两端再直接通过金属管件连接到抽真空系统和真空灭弧室管道。

2.4 真空度测量

真空度的准确测量是该仪器研制的关键,采用的复合真空计由电阻真空计和热阴极电离真空计组成,它具有测量范围宽(电阻真空计: $1.0 \times 10^{-1} \sim 1.0 \times 10^5$ Pa,热阴极电离真空计: $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-1}$ Pa),响应快,重复性好,测量稳定可靠,抗干扰能力强等优点,特别适合于宽范围真空的测量。同时,采用了单片机系统来对测量数据进行非线性处理及误差修正,因此具有较高的精确度。

为了优化抽真空系统的合理运行,设计了2个真空度测量点,一个测量点在机械泵口,测量真空计为电阻真空计;另一个测量点在聚四氟乙烯管与储气罐之间,测量真空计为电阻真空计和热阴极电离真空计。

2.5 真空度调节

在真空系统中,精确调节真空度非常困难。真空系统本身就是一个动态的稳定,因此需要调节分子泵以及各种阀门间的配合来实现。该项目中,为了实现真空灭弧室的真空度相对稳定,需要通过调节来实现,具体需要分子泵、插板阀和手动微调阀

来实现,其中插板阀室放置在分子泵出口和储气罐之间,手动微调阀在储气罐与真空灭弧室连接管道之间。一般可通过调节手动微调阀的闭合程度来调节真空度,有时也可调节插板阀的闭合程度来配合手动阀调节真空度。

3 校验仪运行与控制

校验仪试验过程控制流程见图3。仪器接上市电后,依次开启机械泵、前级阀,同时打开插板阀、手动微调阀和复合真空计开关。当机械泵泵口处真空计测量显示压强值低于10 Pa后,关闭前级阀并打开主阀,同时按下分子泵电源按钮,即实现系统的抽真空试验状态。

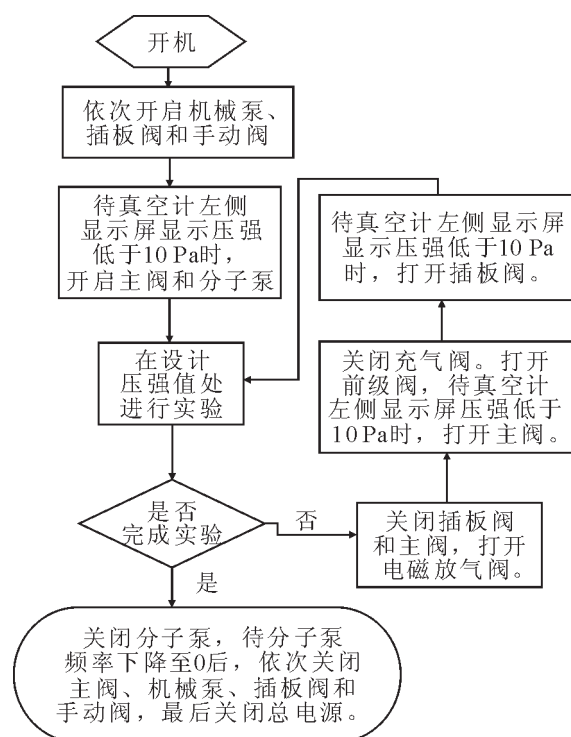


图3 校验仪试验过程控制流程图

Fig.3 Control flow diagram of the experimental course of the calibration instrument

通过调节手动微调阀和插板阀的开合程度,当真空度到达所设值时,便可进行试验,测量此真空度下的离子电流,按照标准规定进行校验实验。如果重复在某真空度下进行实验时,首先将插板阀和主阀完全闭合,打开手动阀,同时不关机械泵和分子泵。在确定插板阀完全关闭后,打开电磁放气阀实现真空灭弧室内部与大气连接。关闭电磁放气阀,再打开前级阀,当复合真空计的右侧显示屏显示的压强值低于10 Pa后,关闭前级阀并打开主阀,打开插板阀抽真空,适时调节手动微调阀和插板阀,实现真空度的稳定,再次进行校验实验。

4 校验测试

4.1 抽真空性能

抽真空系统先通大气, 从压强 1.0×10^5 Pa 开始抽气, 机械泵开启, 当压强下降至 10 Pa 时, 分子泵开启。抽真空系统不到 2 min 就能进入 2.0×10^{-2} Pa, 约 23 min 就能到 1.0×10^{-3} Pa, 不到半小时就能进入 10^{-4} Pa 数量级, 到两个半小时就能到 4.3×10^{-4} Pa, 抽真空速率曲线见图 4。根据测试仪一般的测试范围是 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ Pa, 可以看出校验仪完全能满足使用。由于第 1 次抽真空测试时间稍长, 到 4.3×10^{-4} Pa 超过 2 h, 但在重复测试中, 1 h 内均能到达。

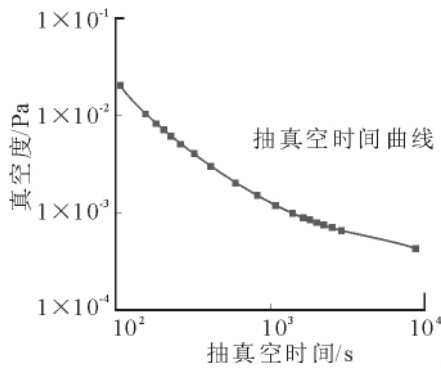


图 4 真空度校验仪抽气时间曲线

Fig.4 Pumping time curve of the calibration instrument

4.2 真空度—离子电流曲线测试

利用笔者研制的真空度测试校验仪, 通过抽取不同的真空度, 在测试仪^[16]的配合下, 可得到不同真空度下试验所获得的离子电流, 典型离子电流—真空度波形见图 5。

4.3 重复校验结果分析

在测试试验中, 可以发现如果在同一真空度条件下, 使用测试仪重复测量结果见表 1, 短时间条件下, 在同一真空度对灭弧室进行重复测量时, 会使得离子电流变小, 反之, 离子电流的变小直接导致测试仪显示真空度反而升高, 但是实际真空灭弧室的真空度并没有变化, 重复测量导致测试仪显示真空度变小的主要原因是在短时间内, 一定真空度条件下, 一定空间内容易电离的空气分子数目有限, 如果在短时间内多次施加脉冲高压, 就会导致易电离的空气分子数目急剧下降, 从而使得离子电流数值变小, 直接引起测试仪显示真空度升高。

总而言之, 在对测试仪进行校验过程中, 不能在短时间内利用测试仪对同一真空灭弧室重复测量, 否则会导致测量结果的额外波动。因此在使用校验仪校验测试仪时, 可通过对校验仪的重复放气, 再迅速的抽真空装置来实现。主要方法: 一次实

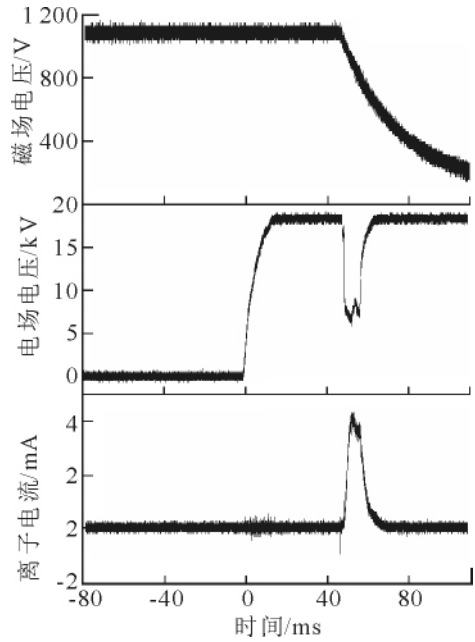


图 5 压强在 1.0×10^{-2} Pa 时的波形曲线 (灭弧室直径 100 mm, 触头开距 10 mm)

Fig.5 Magnetic field voltage, electric field voltage, and ionic current curves at a vacuum degree of 1.0×10^{-2} Pa (explosion chamber diameter 100 mm, contactor torque 10 mm)

表 1 相同真空度情况下重复测量结果对比

Tab.1 Comparison of repeated measurements under the same vacuum degrees

真空度 /Pa	未换气重复测量 /mA	换气后重复测量 /mA
3.0×10^{-2}	2.808	4.476
1.0×10^{-2}	2.442	3.962
7.0×10^{-3}	1.212	2.525
4.0×10^{-3}	0.343	1.976
2.5×10^{-3}	0.192	0.577
1.0×10^{-3}	0.043	0.091

验完毕后, 关闭插板阀, 隔断分子泵与储气罐及其后真空灭弧室的连通, 打开手动阀, 保证新充入气体能够快速充分的进入真空灭弧室内, 关闭主阀, 打开放气阀, 充入新气体; 之后, 关闭放气阀, 打开前级阀, 此时的真空系统通过旁抽通路对储气罐及其后真空灭弧室进行抽气, 待复合真空计左侧屏幕显示值低于“ $1.0E-1$ ”时, 打开主阀, 等待复合真空计左侧屏幕显示值低于“ $1.0E-1$ ”, 再打开插板阀, 使得分子泵对后级系统进行抽气, 这样做的原因是分子泵的开启存在一个压强最大值, 为了保护分子泵正常运行, 需要其后级系统压强低于 1.0×10^{-1} Pa。以上操作的优点是避免了重复关闭和开启分子泵, 储气罐前级通路在充气过程中仍然保持高真空度, 减少了分子泵的工作负荷, 因此, 当插板阀打开后, 整个

系统的真空度能够迅速降低至实验所需值。

5 结语

总之,结合一定的电气和真空设计,该校验装置能完成对基于磁控脉冲放电法的真空度测试开展校验工作。笔者介绍了该装置的各部分设计,并对该校验装置的抽真空功能、离子电流曲线获取和重复校验结果均进行了介绍。该校验仪是一台可模拟真空断路器工况,真空度可控,调节真空度精度高,测量方便,具备高电压保护功能,可与计算机或上位机进行通讯的仪器,方便电力系统校验真空测试仪使用。

参考文献:

- [1] 王季梅.真空开关理论及其应用[M]. 西安:西安交通大学出版社,1986.
WANG Ji-mei.Theory and application of vacuum switch[M]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press,1986.
- [2] 王季梅,苑舜.大容量真空开关理论及其产品开发[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.
WANG Ji-mei,YUAN Shun.Large capacity vacuum switching theory and product development [M]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press,2001.
- [3] JB/T 8738—1998. 3.6~40.5 kV 交流高压开关设备用真空灭弧室[S].
JB/T 8738—1998. 3.6~40.5 kV high-voltage switchgear vacuum interrupter[S].
- [4] DL/T 846.9—2004. 高电压测试设备通用技术条件 第9部分:真空开关真空度测试仪[S].
DL/T 846.9—2004.Part 9 of high voltage test equipment, vacuum switch vacuum tester[S].
- [5] 赵智忠,邹积岩,文化宾,等.高压真空灭弧室的电场设计的新方法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(6):109-113.
ZHAO Zhi-zhong,ZOU Ji-yan,WEN Hua-bin,et al.New method for electric field Design in high voltage vacuum interrupter[J]. Proceeding of CSEE,2005,25(6):109-113.
- [6] 杨韧,王季梅,卢江平,等.高压真空断路器真空度测量方法的探讨[J]. 西北电力技术,2003,23(5):1-4.
YANG Ren,WANG Ji-mei,LU Jiangping,et al.High voltage vacuum circuit breaker vacuum measurement method [J]. Northwest Electric Power Technology,2003,23(5):1-4.
- [7] 李炜,郭媛媛,王承玉,等.基于X射线量变化评估真空度灭弧室真空度的方法[J]. 高压电器,2008,44(4):315-318.
LI Wei,GUO Yuan-yuan,WANG Cheng-yu,et al.Change assessment based on the amount of X-ray vacuum method of vacuum interrupter[J]. High Voltage Apparatus,2008,44(4):315-318.
- [8] 范兴明,邹积岩,陈昌龙,等.基于DSP的真空断路器状态参数在线监测装置[J]. 电力系统自动化,2005,29(8):99-103.
FAN Xing-ming,ZOU Ji-yan,CHEN Chang-long,et al. DSP on-line monitoring device based on the state parameters of vacuum circuit breaker[J]. Power System Automation,2005,29(8):99-103.
- [9] 陈振生.10 kV 高压开关柜的故障在线检测方法[J]. 电力系统自动化,1996,20(1):32-35.
Chen Zhen-sheng.10 kV high voltage switchgear fault line detection method[J]. Power System Automation,1996,20(1):32-35.
- [10] 邹积岩,何俊佳,程礼椿.真空灭弧室的真空度测试与在线监测[J]. 高压电器,1993,30(5):26-29.
ZOU Ji-yan,HE Jun-jia,CHENG Li-chun.Vacuum interrupter vacuum test and line monitoring[J]. High Voltage Apparatus,1993,30(5):26-29.
- [11] 赵子玉,陈雾,李兆治,等.不拆卸灭弧室测量真空度的技术研究[J]. 电工技术杂志,2003,43(8):32-35.
ZHAO Zi-yu, CHEN Wu, LI Zhao-zhi, et al. Non-disassemble vacuum interrupter technique measurements [J]. Electrical Technology Magazine,2003,43(8):32-35.
- [12] 段雄英.真空灭弧室真空度在线检测的试验研究[J]. 高压电器,2000,35(4):31-32.
DUAN Xiong-ying.Experimental study of on-line detection of vacuum degree in a vacuum interrupter[J]. High Voltage Apparatus,2000,35(4):31-32.
- [13] 朱少仁.一种新的真空度校准装置[J]. 真空电子技术,1991(4):59.
ZHU Shao-ren.A new vacuum calibration device[J]. Vacuum Electronics Technology,1991(4):59.
- [14] 李恩玲,刘峰擎.真空开关管内真空度检测的研究[J]. 西安理工大学学报,2000,16(2):192-195.
LI En-ling,LIU Feng-qing. Study of vacuum degree detection in a vacuum switch[J]. Transaction of Xi'an University of Technology,2000,16(2):192-195.
- [15] 王罡,王正石.真空开关管真空度的测量[J]. 真空电子技术,2002(1):70-72.
WANG Gang,WANG Zheng-shi.Vacuum switch vacuum measurement[J]. Vacuum Electronics Technology,2002(1):70-72.
- [16] 王东珏,梁义明,石一,等.基于便携式锂离子真空开关真空度测量仪的研制[J]. 高压电器,2010,46(11):26-30.
WANG Dong-jue,LIANG Yi-ming,Shi Yi,et al. A portable vacuum degree measuring instrument with Lithium battery for vacuum Interrupters[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(11):26-30.

梁义明(1977—),男,工程师,主要从事高压电器、过电压及防污技术方面的工作。