

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902679

基于压力传感器的变压器油位检测和带电补油装置*

董玉坤¹ 沈胜楠² 路欣¹ 何颖¹ 冯理达¹

(1. 国网河北省电力有限公司信息通信分公司 石家庄 050000; 2. 国网保定供电公司 保定 071000)

摘要:针对变压器储油柜油位计测量中的“假油位”、绝缘油老化以及停电补油等问题,提出一种基于压力传感器的变压器油位检测及带电补油装置。该装置通过在储油柜放油管加装双压力传感器,运用二点压力差分算法对油位进行精准测量,减少因“假油位”造成的重复检修,通过油流和泵体分离、真空循环排气系统、进油和注油过程分离实现变压器储油柜的不停电补油,降低停电检修次数,有效提高设备整体运行可靠性和用户体验。通过国网保定供电公司现有变压器储油柜改造进行前后对比,验证了该装置测量准确性和实用性。

关键词: 变压器;油位计;假油位;双压力传感器;带电补油装置

中图分类号: TN **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Oil level measurement and charged oil compensating device of transformer based on pressure sensor

Dong Yukun¹ Shen Shengnan² Lu Xin¹ He Ying¹ Feng Lida¹

(1. State Grid Hebei Information & Telecommunication Branch, Shijiazhuang 050000, China;

2. State Grid Baoding Electric Power Supply Company, Baoding 070000, China)

Abstract: For the issues of false oil level in the measurement of the transformer oil conservator, the aging of the insulating oil and oil compensating after power failure, the paper proposes an oil level measurement and charged oil compensating device of transformer based on pressure sensor. Through installing dual pressure sensors in the oil storage tank drain pipe and using two-point differential pressure algorithm to accurately measure the oil level, The device can reduce repeating maintenance caused by false oil levels. Then, through the separation of oil flow and pump body, vacuum cycle exhaust system, separation of oil inlet and oil filling process, the oil storage of the transformer oil tank can be realized without power failure. The device can reduce the number of power failure maintenance, and effectively improve the overall operation reliability and user experience of the equipment. Through the transformation and comparison of the existing transformer oil conservator of the State Grid Baoding Power Supply Company, the measurement accuracy and practicability of the device were verified.

Keywords: transformer; oil level gauge; false oil level; double pressure sensor; charged oil filling

0 引言

随着经济的不断发展,企业和居民用户对电力需求不断增加^[1]。变压器作为输变电系统的核心设备,其安全平稳运行与否将直接影响供电的可靠性。变压器储油柜及油位计是保障变压器散热和绝缘的重要组件,是保障变压器“血压”正常运转的一双“眼睛”,对变压器安全

运行尤为重要。

变压器普遍使用的是指针式油位计和管式油位计,指针式油位计采用连通性原理进行油位检测,易发生呼吸器堵塞、指针卡涩、指针耦合性异常导致假油位现象。管式油位计采用机械传动原理进行检测,会因为密封性,导致水汽进入,绝缘油污染进而导致假油位^[2]。针对此类问题,专家学者开展了相关研究,文献[3]提出了雾霾环境下变压器套管油位检测方法,通过暗通道优先和颜

收稿日期: 2019-10-16 Received Date: 2019-10-16

* 基金项目: 国家电网公司科技基金(KJ2019-100)资助项目

色空间变换进行油位检测,虽计算精度较高,但费用较高,普适度不强。文献[4]提出了一种基于超声回波衰减信息的超声液位检测方法,该方法可通过不同界面下超声波反射、透射及衰减特性进行油位检测,虽操作简便,但受电磁环境影响,检测结果存在偏差。同时,对于变压器储油柜补油操作,普遍采用停电补油的方式。变压器停电流程复杂,停电补油费时费力,供电可靠性差。文献[5]提出了一种基于射流原理的液压泵补油装置,通过溢流能量驱动装置进行补油操作,虽工艺性好,但易渗入杂质气体。文献[6]提出了一种基于隔膜泵测控系统的设计和应用,增设关键测控点和专用装置,实现隔膜泵最优化控制策略。图1所示为保定供电公司2015~2018年主变补油检修台数和发现假油位台数。

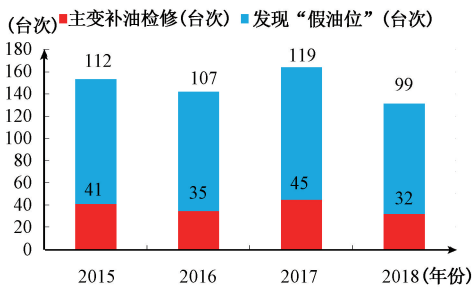


图1 保定供电公司变压器补油检修统计

Fig. 1 The oil maintenance statistics of Baoding area

在上述研究的基础上,本文提出一种基于压力传感器的变压器油位检测及带电补油装置。该装置采用双压力传感器,运用压强差原理,实现变压器油位精准测量,并通过带电补油装置,对补油全过程检测实现变压器储油柜的不停电补油。该装置普适性强,且密闭性强,实现油气分离,保障绝缘油质量。

1 变压器常用油位计和补油存在的问题

1.1 变压器常用油位计存在的问题

在电力系统中,35 kV以上油浸式变压器通常采用全密封设计,并配备带胶囊袋的储油柜和油位计。变压器常用油位计分为指针式油位计和管式油位计^[6-8]。指针式油位计工作原理是当储油柜油位发生变化,引起隔膜的变化,致使连动杆进行升降运动,通过磁矩矩作用,带动从动磁铁指针进行油位指示^[9-10]。指针式油位计工作原理是当储油柜油位发生变化,带动油浮的升降,并借助压力释放阀的压力调节进行油位指示^[11-12]。

随着变压器运行年数增加,两种油位计都会随着机械传动、变压器渗漏、密闭性减弱等因素造成油位计指示偏差产生“假油位”^[13]。“假油位”会造成运维人员对变

压器油位误判,进而形成“冬补夏放”的错误补油策略,造成资源浪费。同时,变压器油位过低易引起瓦斯保护误动,甚至造成释放阀动作^[14-15]。

1.2 变压器补油存在的问题

传统变压器补油过程需停电后进行操作。变压器停役流程复杂,操作过程繁琐,费时费力,影响用户的使用。变压器传统补油需要全过程人工监视,易出现过补油和欠补油的问题,补油过程还可能混入大量空气和产生乙炔等杂质气体,造成变压器绝缘油的老化^[16-18]。

2 基于压力传感器的变压器储油柜油位检测装置的设计

2.1 检测原理

压力传感器广泛应用于液体高度测量上,通过对液体压力值的测量和换算可得出液体高度。在变压器储油柜中,储油柜底部通常会连接一条放油管进行放油操作^[19-20]。为消除机械传动和全封闭条件的苛刻要求,同时满足储油柜油位的精准测量,本文通过在放油管末端安装压力传感器,通过二点压力差分算法计算得出储油柜油位高度。

2.2 基于双压力传感器的油位检测方法

在液体高度测量中,可通过压强计算得出,其中液体压强计算公式为:

$$P = \rho gh \quad (1)$$

式中: ρ 为液体的密度; g 为重力加速度,取值为 9.8 m/s^2 ; h 为液体液位高度。

对于采用压力计算变压器油位时, ρ 为储油柜绝缘油的密度。由于变压器储油柜的油温会随着环境温度和运行负荷发生变化,进而造成绝缘油密度的变化^[21-22]。变压器绝缘油密度同其他物质类似与温度成正比关系, t 温度下,油的密度公式为:

$$\rho_t = \rho_{20} + \gamma(t - 20) \quad (2)$$

其中,在温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 下,45#变压器油密度 $\rho_{20} = 879 \text{ kg/m}^3$, γ 为变压器油膨胀系数, $\gamma = -0.0007 \text{ (g/cm}^3\text{)}/^\circ\text{C}$ 。

为消除变压器温度的变化造成的绝缘油密度的改变,本文提出一种基于双压力传感器的油位检测方法。将2个高精度压力传感器(工作温度范围在 $-20 \text{ }^\circ\text{C} \sim 160 \text{ }^\circ\text{C}$)封装在不锈钢材料外壳中,涂环氧漆,中间通过输油管来连接储油柜放油管,并对二点压力进行相关计算,得出油位值。油位检测装置如图2所示,具体原理如下。

通过油位检测装置安装的两个压力传感器,可获取两点压强值 P_1 和 P_2 ,其中:

$$P_1 = \rho_1 g h_1 \quad (3)$$

$$P_2 = \rho_2 g h_2 \quad (4)$$

$$h_3 = h_1 - h_2 \quad (5)$$

对于变压器储油柜细小物体的放油管两点油温差异可忽略不计,所以可认为 $\rho_1 = \rho_2$,计算可得出 h_1 ,进而计算出油位。

$$h_1 = \frac{P_1 h_3}{P_1 - P_2} \quad (6)$$

式中: P_1 和 P_2 为两点的压力值; h_3 为两点的高度差值(该值为确定值)。通过该方法可消除储油柜绝缘温度的变化对测量结果的影响。

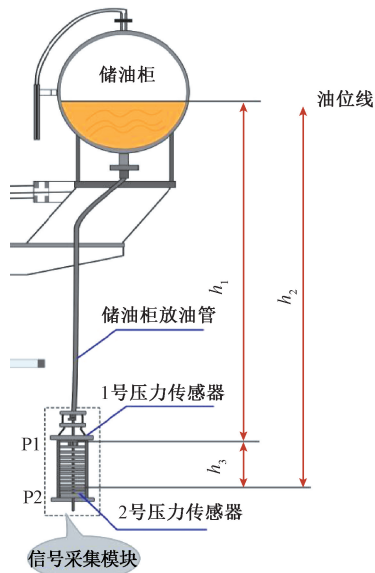


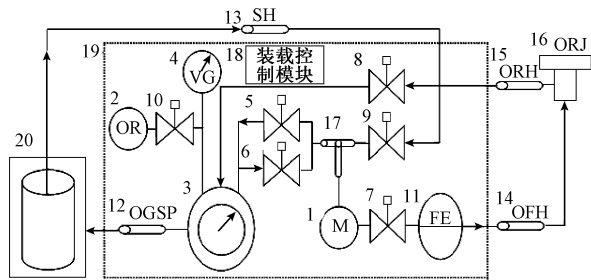
图2 油位检测装置

Fig. 2 Oil level detection device

3 变压器带电补油装置的设计

3.1 带电补油装置原理

变压器不停电补油装置分为排气和注油两个过程,该装置排气过程采用真空循环排气工艺,采用隔膜泵,借助隔膜将油流和泵体分离,并通过真空循环排气系统,在补油前通过油流内部循环,排净管道内全部空气,将进油和注油过程分离,交替进行,实现风险分段控制。在进油过程,对真空度进行实时监测,避免大量空气进入油枕,在注油过程中,对补油压力进行监测,防止因压力释放阀动作而喷油,最终实现变压器油枕带电补油,带电补油原理如图3所示。



- 1—补油电机;2—真空泵;3—油气分离器;4—真空表;
- 5~10—电磁阀;11—滤芯;12—油气分离器排油口;
- 13—吸油软管;14—注油软管;15—回油软管;
- 16—补油接头;17—三通接头;18—设备控制模块;
- 19—变压器带电补油装置;20—补油桶

图3 变压器带电补油装置原理

Fig. 3 The schematic diagram of transformer charged oil filling device

3.2 变压器带电补油流程

1) 变压器储油柜排气

当储油柜油位过低时,开启补油流程,真空泵进行排气环节。开通图3电磁阀6、8、10,注油装置内的空气通过真空泵被抽走,形成压强差。补充油通过压强差进入吸油管13和油气分离器,待补充油升高到油气分离器高度约1/4时,油位计进行信号反馈,控制模块关闭电磁阀6、8,按下停止按钮,电磁阀和真空泵被关闭停止,排气过程结束。

2) 变压器储油柜注油

在注油过程中,需观察储油柜补油管阀门处气泡状况。补油阀门处无气泡则进行补油操作,否则需重复进行循环排气。储油柜注油环节,需开启电磁阀7、8,补油电机启动,补充绝缘油通过吸油软管、电磁阀等部件,补入变压器油枕内。待补油达到设定目标值后,控制模块进行停止操作,补油管阀门、补油电机和电磁阀停止作业,补油流程结束。

3) 变压器储油柜排油

补油结束后,需排除装置中残留绝缘油,进行资源回收。控制模块启动装置排油流程,开通电磁阀6~9和补充油电机开始作业抽取装置内残留绝缘油,排入到油桶,直至无油排出,停止排油流程,控制模块停止和关闭补油电机和电磁阀,带电补油装置如图4所示。

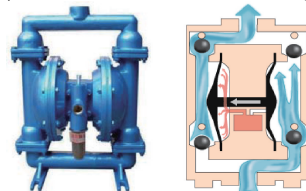


图4 带电补油装置

Fig. 4 Charged oil filling device

4 油位检测及带电补油试验分析

4.1 试验装置

本文选取了某变电站 5 台 35 kV 油浸变压器,5 台变压器储油柜直径为 $\Phi 780$ mm,对变压器进行升温试验,通过变压器储油柜中自带的传统管式油位计测量储油柜油位高度。在不破坏变压器原有结构下进行改装,本文通过封装,设计成外置封装式便携油位测量箱,采用内置锂电池进行供电,通过本装置测量与管式油位计进行对比。按照图 4 制作成带电补油隔膜泵进行补油操作,装置采用外接电源进行供电。

4.2 结果及讨论分析

正常情况下,油温的变化会改变绝缘油的密度,进而

表 1 本装置油位检测与管式油位计检测的比较表

Table 1 The comparison table of oil level detection and tube type oil level meter detection

序号	本体油温/ $^{\circ}\text{C}$	变压器储油柜油位高度/cm	管式油位计显示油位比例/%	本装置显示油位比例/%	显示比例相对误差/%
1	19.9	43.2	41.9	40.2	0.30
2	32.8	43.6	52.1	42.9	0.80
3	45.3	43.9	62.5	43.1	0.60
4	53.4	44.2	72.2	60.7	11.50
5	64.7	44.4	74.7	45.5	0.80
6	72.8	44.7	80.2	46.1	0.90

对 4 台正常变压器外置补油装置进行补油 1 000 mL 操作,补油过程,该装置补油速度适中,压力释放阀均未动作。从储油柜出口进行提取部分绝缘油进行含气试验、油色谱试验和油品试验,绝缘油外观透明无杂质,经测试绝缘油酸值 KOH 0.05 mg/g、水溶性酸 PH4.5,击穿电压 50 kV,灰分 0.005%,绝缘油未发现甲烷、乙炔等杂质气体,油品质量合格。

经试验,该装置操作简单,测量精度高,可实现数据即时采集、集中存储、定量分析,与目前变压器常用油位计(管式和指针式)工作原理不同,符合《国家电网公司十八项重大反事故措施》中,常用变压器应配置两套基于不同原理的油枕油位检测装置的要求,可辅助变电站巡检员油位检测,辅助油位计缺陷研判。该装置带电补油安全可靠,操作简单,符合《电力安全工作规程》,可提高设备整体运行可靠性和供电可靠性。

5 结论

本文通过分析变压器储油柜油位计测量出现的“假油位”、污染绝缘油以及停电补油等问题,提出了一种基于压力传感器的油位检测和带电补油装置。该装置通过双压力传感器,运用二点压力差分算法可消除由于温度的不同造成绝缘油密度的变化带来的测量误差,实现了

导致变压器的油位会随着油温的变化而变化,本文对变压器进行升温试验,并采用热成像仪记录当前 5 台变压器的绝缘油温度,通过变压器本身管式油位计和本文便携式油位测量箱进行测量对比,部分测量结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,序号 4 的本装置油位测量结果与变压器自身的管式油位计测试结果差距较大为 11.5%。巡视人员初步判断此台变压器油位过高,对此台变压器进行放油操作,放至管式油位计显示为 60.9%,隔天后再对此台变压器进行再次测试,通过本装置测试油位为 50.4%。巡视人员提取放油的部分样本,进行油化试验和微水检测,经测试绝缘油含有大量氧气,导致油位计测试为假油位,而本装置油位计测试正确,验证了该装置的测试准确性。

油位的精准测量;通过隔离泵,真空循环排气,进油和注油过程分离,实现了变压器补油“零污染”、“零停电”“零风险”的特点,后期还可通过扩展铠装屏蔽电缆,远距离与信号采集模块连接,实时接收压力变化信号,实现远程在线监测,可视化展示和智能定量补油。经试验检测,该装置测量精准,带电补油安全可靠,具有很好的实用价值。

参考文献

- [1] 张堉,温育明,王山. 多功能航空液压油箱研究与试验[J]. 液压与气动,2018(11):104-107.
ZHANG Y, WEN Y M, WANG SH. Research and experiment of multifunction aero hydraulic tank [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics,2018(11):104-107.
- [2] 谢苗,谢春毛,毛君,等. 基于图像识别的喷嘴流量试验台油位检测系统[J]. 传感技术学报,2016,29(11):1779-1784.
XIE M, XIE CH X, MAO J, et al. Nozzle flow test bench level detection system based on image recognition [J]. Journal of Sensing Technology, 2016, 29 (11): 1779-1784.
- [3] 石林玉,谢维成,蒋文波,等. 变压器套管油位雾霾图像检测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(6):854-861.

- SHI L Y, XIE W CH, JIANG W B, et al. Image-based measurement method of transformer bushing oil-level in fog and haze[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(6): 854-861.
- [4] 莫润阳, 牛海清, 郭然, 等. 瓷套式电缆终端油位的超声检测[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(5): 745-748.
- MO R Y, NIU H Q, GUO R, et al. Oil level detection of porcelain cable termination by ultrasound method[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2016, 30(6): 854-861.
- [5] 王志武. 采煤机液压调高系统的补油装置及液压虹吸阀的设计[J]. *机床与液压*, 2013, 41(2): 91-92+95.
- WANG ZH W. Design of oil supply device and hydraulic siphon valve of hydraulic height adjustment system for coal mining machine[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2013, 41(2): 91-92, 95.
- [6] 李琪, 苏宝国, 张秀川, 等. 大型变压器真空注油工艺的改进及相关设备的研制[J]. *变压器*, 2014, 51(11): 49-52.
- LI Q, SU B G, ZHANG X CH, et al. Improvement of vacuum oil filling process and development of related equipments for large capacity transformers [J]. *Transformer*, 2014, 51(11): 49-52.
- [7] 李海燕, 何梦, 黄林, 等. 超高压变压器油中酸类物质的生成规律和变压器热老化状况分析[J]. *高电压技术*, 2015, 41(6): 1959-1964.
- LI H Y, HE M, HUANG L, et al. Correlation between the generation of acidic products and the thermal aging of oil-paper insulation of the UHV transformer[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(6): 1959-1964.
- [8] 李洁珊, 王朝硕, 章禹, 等. 基于历史信息挖掘的变压器健康状态聚类方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(14): 94-99.
- LI J SH, WANG CH SH, ZHANG Y, et al. A clustering method for transformer health state based on historical information mining [J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(14): 94-99.
- [9] 王飞鹏, 万春香, 穆朋, 等. 氟化无纺聚丙烯驻极体滤膜用于变压器油净化的过滤性能[J]. *重庆大学学报*, 2019, 42(8): 39-49.
- WANG F P, WAN CH X, MU P, et al. Transformer-oil filtration properties of fluorinated nonwoven polypropylene electret films [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2019, 42(8): 39-49.
- [10] 熊彪, 王帅, 李必鑫, 等. 基于 ARENA 的航空兵场站油料保障效能仿真评估[J]. *兵器装备工程学报*, 2018, 39(4): 92-96.
- XIONG B, WANG S, LI B X, et al. Simulation for POL support effectiveness evaluation of air base based on ARENA [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2018, 39(4): 92-96.
- [11] 陈汉城, 蔡金锭. 基于多时域特征参量的变压器油纸绝缘状态综合评估[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(7): 184-190.
- CHEN H CH, CAI J D. Synthetic insulation state evaluation based on multiple time-domain characteristic parameters for transformer oil-paper[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(7): 184-190.
- [12] 伍衡, 楚金伟, 贾洁非, 等. 一起换流变压器压力释放阀动作及储油柜漏油原因分析[J]. *变压器*, 2016, 53(3): 42-46.
- WU H, CHU J W, JIA J F, et al. Analysis of pressure relief device action and conservator oil leakage for converter transformer [J]. *Transformer*, 2016, 53(3): 42-46.
- [13] 龚杰, 龚敏, 谭一粟, 等. 浅析变压器油位计和呼吸器故障[J]. *变压器*, 2015, 52(8): 62-66.
- GONG J, GONG M, TAN Y S, et al. Brief discussion on faults of oil-level meter and respirator for transformer[J]. *Transformer*, 2015, 52(8): 62-66.
- [14] 黄晓明, 黄志华, 张华娇, 等. 变电站整站二次设备就地化及运维方案研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(5): 173-178.
- HUANG X M, HUANG ZH H, ZHANG H J, et al. Research on the localization and maintenance scheme of secondary equipment in substation [J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(5): 173-178.
- [15] 潘晋新, 景博, 李振刚, 等. 机载燃油泵电应力加速退化建模与试验设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(11): 50-56.
- PAN J X, JING B, LI ZH G, et al. Modeling and experimental design of accelerated stress degradation of airborne fuel pump [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(11): 50-56.
- [16] 阴法明, 王康, 赵力. 电缆护套厚度灰度矩亚像素测量研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(10): 128-133.
- YIN F M, WANG K, ZHAO L. Sub-pixel edge detection algorithm based on gray-moment for thickness measurement of cable sheath material [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(10): 128-133.
- [17] 任喜伟, 何立风, 宋安玲, 等. 油水界面测量与计算[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(9): 95-115.
- REN X W, HE L F, SONG AN L, et al. Measurement

and calculation of oil-water interface[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(9):95-115.

[18] 林智勇,张达敏,郑运鸿,等. 应用去极化电量评估油纸绝缘变压器老化状态[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8):160-165.

LIN ZH Y, ZHANG D M, ZHENG Y H, et al. Application of depolarization charge to evaluate the aging state of oil-paper insulation transformer [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8):160-165.

[19] 祁宏昌,张斌,黄嘉盛,等. 基于 STFT 和 DBN 的高压电缆瓷套式终端液位智能检测[J]. 中国测试, 2019, 45(4):47-52.

QI H CH, ZHANG B, ZHANG J SH, et al. Liquid level intelligent detection of high voltage cable porcelain termination using short-time Fourier transform and deep brief networks [J]. China Measurement & Testing Technology, 2019, 45(4):47-52.

[20] 贺德华,蔡金锭,蔡嘉. 基于弛豫电量的变压器油纸绝缘老化评估[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5):1079-1085.

HE D X, CAI J D, CAI J. Aging evaluation of transformer oil-paper insulation based on quantity of relaxation charge [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5):1079-1085.

[21] 李琪,苏宝国,张秀川,等. 大型变压器真空注油工艺的改进及相关设备的研制[J]. 变压器, 2014, 51(11):49-52.

LI Q, SU B G, ZHANG X CH, et al. Improvement of vacuum oil filling process and development of related equipments for large capacity transformers [J]. Transformer, 2014, 51(11):49-52.

[22] 王志武. 采煤机液压调高系统的补油装置及液压虹吸阀的设计[J]. 机床与液压, 2013, 41(2):91-92, 95.

WANG ZH W. Design of oil supply device and hydraulic siphon valve of hydraulic height adjustment system for coal mining machine [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(2):91-92, 95.

作者简介



董玉坤, 2013 年于东北电力大学获得硕士学位, 现为国网河北省电力有限公司信息通信分公司工程师, 主要研究方向为电力系统智能设备研究和数据处理。

E-mail: dongyukunbbs@126.com.cn

Dong Yukun received his M. Sc. degree from Northeast Electric Power University in 2013. Now he is an engineer at State Grid Hebei Information & Telecommunication Branch. His main research interests include intelligent equipment research and data processing of power systems.