

文章编号：1005-8451 (2018) 11-0043-06

高速铁路智能牵引供电系统研究

董文哲，郭晨曦，杨斯泐

(中国铁道科学研究院集团有限公司 机车车辆研究所，北京 100081)

摘要：智能化是未来高速铁路牵引供电系统的发展趋势，但目前智能牵引供电相关技术并没有得到广泛应用。传统牵引供电系统依旧存在数据采集分散凌乱，各系统之间缺乏信息共享等问题。研究智能牵引供电系统和智能牵引变电所的总体架构与特点，分析智能牵引供电相关设施的关键技术与方案。针对智能牵引供电系统在信号采集和传输方式的变革，提出智能牵引供电系统的测试与评估方法，对于智能牵引供电系统的建设和检测验收具有一定的参考作用。

关键词：智能牵引供电系统；IEC61850；智能一次设备；测试评估

中图分类号：U224 : TP39 **文献标识码：**A

Intelligent traction power supply system in high-speed railway

DONG Wenzhe, GUO Chenxi, YANG Sile

(Locomotive and Car Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited,
Beijing 100081, China)

Abstract: Intelligentization is the development trend of the high-speed railway traction power supply system in the future, but related technologies have not been widely used currently. The traditional traction power supply system still has problems such as disorganized data collection, and lacking of information sharing. This paper studied the overall architecture and characteristics of intelligent traction power supply systems, analyzed the key technologies and solutions for intelligent traction power supply related facilities, aiming at the transformation of the signal acquisition and transmission mode of the system, proposed the test and evaluation method for the system. It has a certain reference function for the construction and acceptance of the intelligent traction power supply system.

Keywords: intelligent traction power supply system; IEC61850; intelligent primary equipment; test evaluation

牵引供电系统作为高速列车的唯一动力来源，是保障高速铁路安全、可靠、高效运行的关键。随着我国高速铁路的迅速发展，对牵引供电系统也提出了信息化、自动化、智能化的技术要求。我国电气化铁路牵引供电系统智能化研究在多年前已经展开，在综合自动化、智能化方面，对电气设备和运营管理平台等开展了相应的研究。如文献[1]围绕智能牵引变电站的自动化关键技术展开理论分析和应用研究，文献[2]提出将故障预测与健康管理与主动维护的理论及技术应用于高速铁路牵引供电系统，文献[3]对传统牵引变电所的智能化改造提出思路，文献[4]研究了数字化供电管理信息系统，实现了供电资产、生产、物资数据的实时共享。目前，国内智能牵引供电系统的建设依旧处于起步阶段，尚未得到大面

积推广应用。很多研究借鉴于智能电网的相关技术而忽略了牵引供电系统本身的架构和特点，对于智能牵引供电系统建成后的测试评估和运营维护的研究更是极少。因此，本文从智能牵引供电系统的特点出发，研究智能牵引供电系统和智能牵引变电所的原理、架构和相关设施的关键技术及方案，并提出智能牵引供电系统建成后的测试与评估方法，对智能牵引供电系统的建设具有一定的意义。

1 智能牵引供电系统组成及特点

1.1 智能牵引供电系统特点

智能牵引供电系统是以智能化牵引供电设施和高速双向通信网络为基础，以信息化、网络化、自动化、互动化为特征，具备全息感知、多维融合、重构自愈、智慧运维特性，运用先进的测量、传感、控制、通信、信息、人工智能等技术，为铁路提供安全可靠、高效优质牵引动力的系统。在智能牵引供电系统中，

收稿日期：2018-05-09

基金项目：中国铁道科学研究院科研开发基金项目（2017YJ159）。

作者简介：董文哲，在读硕士研究生；郭晨曦，研究员。

可以设置以供电臂为单元的智能化、网络化、标准化的信息处理平台，通过测控保护系统实现实时保护和监控等功能^[5]。实时采集和监测牵引供电设施运行信息并上网，能够解决传统供电系统信息不畅和缺乏交互的弊端。智能牵引供电系统也能够更全面更及时的根据运行检修的各类监测数据，实现对牵引供电系统的不断优化和调整。

1.2 智能牵引供电系统组成及架构

智能牵引供电系统按照功能设施构成划分，主要由智能牵引供电设施、智能供电调度系统、智能供电运行检修管理系统及通信网络4部分组成。智能牵引供电系统采用四级框架，如图1所示。

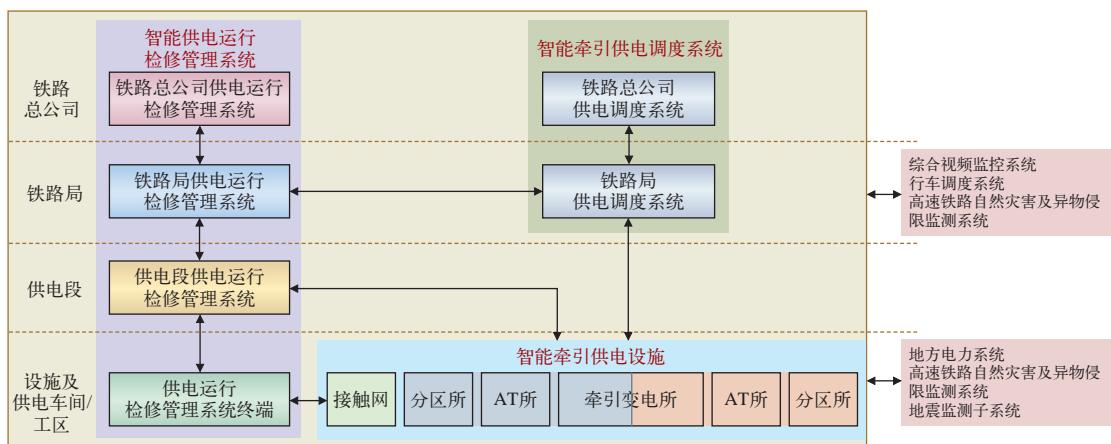


图1 智能牵引供电系统层级架构图

1.2.1 智能牵引供电设施

建立在IEC 61850通信技术规范基础上，按分层分布式来实现智能牵引供电设施间的信息共享和互操作性，其主要由智能高压设备和分布于牵引变电所、分区所、AT所的测控保护系统等组成。

1.2.2 智能供电调度系统

在既有供电SCADA系统的基础上，结合智能牵引供电设施的功能特点，实现运行监测全景化、报警分析综合化、调度作业自动化、调度决策精细化。智能供电调度系统采用总公司、铁路局二级架构，其中，总公司系统实现对全国范围牵引供电设施的运行状态监视以及对各铁路局供电调度作业的协调指导，铁路局系统实现对铁路局管辖范围内的牵引供电设施的远程监视、测量、控制及调度作业管理。

1.2.3 智能供电运行检修管理系统

对智能牵引供电设施等设备进行基础数据、检

测监测、运行检修作业、设备状态评估与预测等全寿命周期管理。

1.2.4 智能牵引供电系统通信网络

采用工作可靠、结构简单和易于维护的架构，并采用铁路通信网专用通道，满足实时性和可靠性的要求。通信通道主要由远动通道、复示通道、运行检修维护通道、广域测控保护通道、故障测距通道及供电运行检修管理通道构成。

2 智能牵引变电所

智能牵引变电所是智能牵引供电系统的重要组成部分，其建立在先进的网络通信协议基础之上，智

能化设备模型可以映射到不同的通信协议，通过分层、分布的通信网络体系，面向对象建模，提供对象的自我描述和配置以及信息传输服务，实现智能牵引供电系统的网络联系^[6]。智能通信网络构建为

3层结构：过程层、间隔层、站控层，具体结构，如图2所示。

2.1 过程层

过程层包括牵引变压器、断路器、隔离开关、电流互感器、电压互感器等智能高压设备及其所属的智能组件以及独立的智能电子装置，承担一次设备信息数字化、智能化的重要功能，主要完成电气量检测和设备运行状态参数检测以及控制命令的发送和执行，是整个智能牵引变电所的基础。

2.2 间隔层

间隔层主要汇总站内本间隔的过程层实时数据信息，实施对该间隔的一次设备保护控制。间隔层包括继电保护装置、系统测控装置、监测功能组的智能电子装置（IED，Intelligent Electronic Device）等二次设备^[7]。智能牵引变电所内二次设备也变成数字化功能模块，如继电保护、防误闭锁、测量控制、

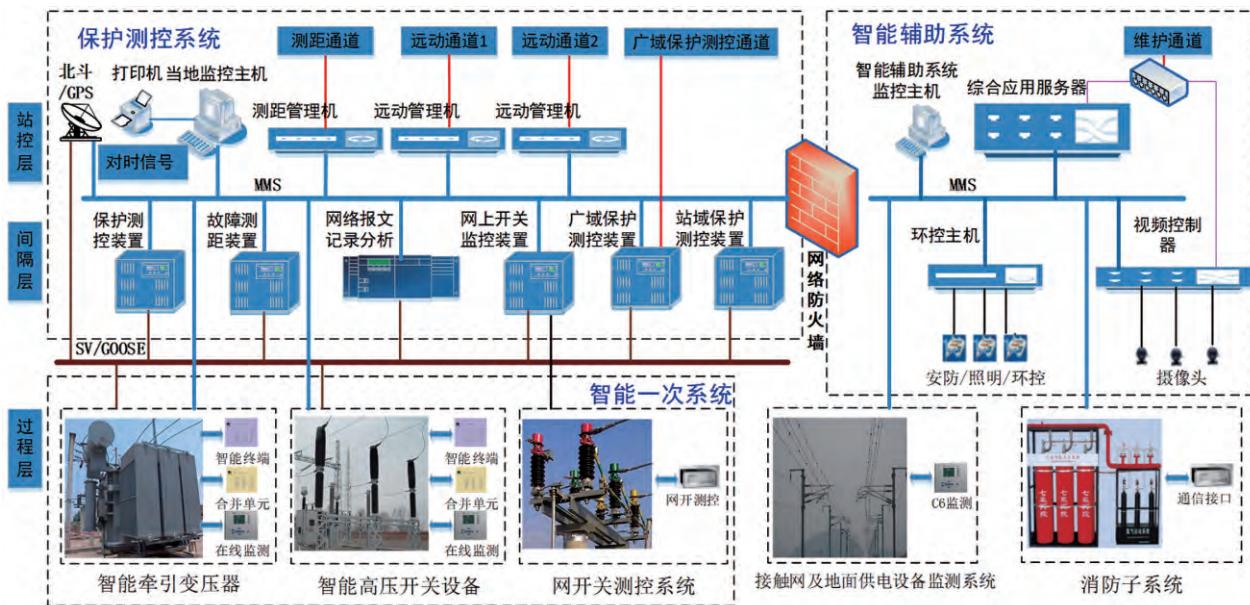


图2 智能牵引变电所结构示意图

故障录波等全部基于标准化、模块化的微处理设计，模块之间的连接全部采用高速的网络通信，真正实现数据共享、资源共享。按照应用功能合理配置逻辑节点，实现或支持实现测量、控制、保护、计量和监测等功能。

2.3 站控层

站控层包括当地监控主机、测距管理机、远动管理机、对时系统、智能辅助系统监控主机和综合运用服务器等，实现面向全站设备的监视、控制、告警及信息交互功能，完成数据采集、数据处理、状态监视、设备控制和运行管理等功能。

3 智能化一次设备

一次设备智能化是智能牵引供电系统的重要标志之一，主要实现信息采集和数据共享功能。智能牵引变电所一次设备主要包括：智能断路器、电子式互感器和智能牵引变压器等。

3.1 智能断路器

断路器是牵引供电系统中非常重要的一个设备。设计并完成断路器智能化方案，实现断路器数字化通信与控制，使断路器具有状态在线监测功能，这对于提高牵引供电智能化水平和提高供电可靠性都具有积极的意义。目前，实现断路器智能化主要通过两种方式。

(1) 在制作过程中将智能控制、通信传输等模

块嵌入断路器内部，实现智能断路器的一体化。

(2) 在断路器上单独加装智能组件，通过智能组件与传统1次设备联通，在线采集信息和监测一次设备运行状态，并对其进行控制操作，在一个间隔内即可实现智能保护和控制功能。

考虑到因为第1种方式工艺复杂且难以实现，并参考电力系统智能变电站对智能一次设备的标准规范，智能牵引变电所中的智能断路器宜采用添加智能组件的方式实现智能化。

智能组件主要包括开关设备控制器和监测功能组件。其中，监测功能组件将检测信息通过网络报文传递给站控层。开关设备控制器利用光纤与测控保护设备进行网络通信，且符合IEC61850标准规范，采用GOOSE报文进行通信，在断路器间隔内采集和传输开关状态，并接受控制信息^[8]。

断路器的智能组件可以根据不同的功能需求，添加不同的智能组件模块，如继电保护模块等，从而实现高度集成，提高智能断路器的可靠性。

3.2 互感器

互感器是牵引供电系统中进行电气信息采集的重要设备，也是连接一次和二次设备的重要纽带。互感器的精度和可靠性与牵引供电系统安全、高效、经济运行密切相关。传统的电磁式互感器体积庞大、绝缘结构复杂、固有磁饱和、铁磁谐振等缺点，难以满足智能牵引变电所的发展需求。目前，智能牵

引变电所一般采用电子互感器或者常规互感器数字化的方式。

3.2.1 电子式互感器

电子式互感器采用新型光电技术，具有体积小、精度高、抗电磁干扰能力强等优点，在智能电网建设中得到推广。电子式互感器通过一次传感器对电气信息进行采集，经过一次转换器对信号进行处理以及模数转换后，由光纤通信传输给二次转换器，对信号处理后再输出给二次设备。

电子互感器分为电子式电流互感器和电子式电压互感器，其又分为有源和无源两种类型^[9]。对于电子式电流互感器，无源型存在一些难以突破的技术，比如磁光效应会随环境因素而变化等，暂时难以在智能牵引变电所进行大规模推广应用。而对于无源电子式电压互感器，由于光学传感材料的可靠性和灵敏度、微弱信号检测技术及稳定性等方面还需要进一步改进，同样不能够达到实用化。

3.2.2 电磁式互感器数字化

电磁式互感器数字化，是将电磁式互感器采集到的模拟信号传输给合并单元，经合并单元进行模数转换，并按照 IEC61850-9-1 或 IEC61850-9-2 通信协议将处理后的信息传输给二次设备。合并电源对模拟信号的处理过程，如图 3 所示。

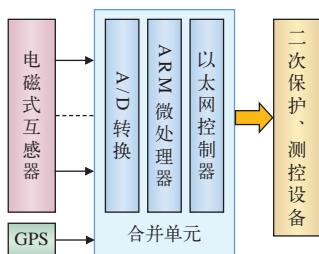


图3 合并单元模拟信号处理示意图

目前，上述两种方式的互感器均有应用，但考虑到与电力系统相配合且方便原有牵引变电所智能化改造，优先选用电磁式互感器数字化的方案。

3.3 智能牵引变压器

与智能断路器类似，牵引变压器的智能化主要依靠“常规变压器 + 传感器 + 智能组件”的方式，通过配置智能组件，使得牵引变压器各类信息通过光纤与控制室相连接，从而实现牵引变压器的测量、监测和保护功能，如图 4 所示。

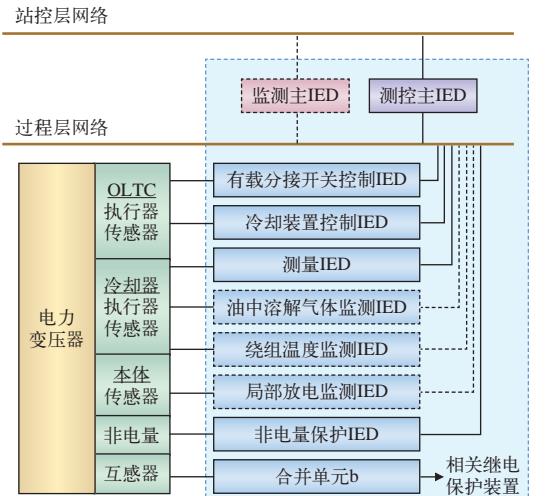


图4 牵引变压器智能组件

图 4 中可以看出，智能组件可以完成对变压器绕组温度、局部放电、油中溶解气体、有载分接开关控制等进行检测，并将监测到的信息传递给过程层网络和站控层网络，为实现牵引变压器高级应用功能提供了信息支撑，提高了牵引变压器的智能化和稳定性。

4 智能牵引供电系统检测与评估

以智能牵引变电所为基础的智能牵引供电系统在信号采集和传输方式上的变革，使得变电所内控制、保护以及电流、电压信号均以数字信号方式在网络中传递，传统的检测与评估手段都不再适用，也无法满足智能供电系统的要求。随着智能牵引供电技术的推广和应用，有必要对适应智能牵引供电系统的检测与评估技术进行研究。

4.1 智能牵引供电系统试验评估原理

智能通信网络 3 层结构：

(1) 过程层是连接一次设备的通道，主要完成电气参数和设备运行状态参数检测以及控制命令的发送与执行。

(2) 间隔层归总面向通用对象的变电站事件报文（GOOSE 报文）、实时传输数字采样信息的通信服务报文（SMV 报文）等过程层传输的实时数据信息^[10]，通过间隔层设备进行保护、测控、计量、录波等功能，分析并完成一次设备保护控制，并把数据信息传输给站控层。

(3) 站控层得到信息后完成数据存储、显示，

并实时完成操作、打印、图像等多媒体功能^[11]。

智能牵引供电系统试验评估的数据信息主要来源于过程层采样信息数据和间隔层实时数据信息。试验评估技术的关键在于对SMV、GOOSE报文进行实时采集捕获和解析。

根据目前智能牵引供电系统执行的相关规范和标准，在智能牵引供电系统试验评估周期内，应对智能牵引变压器、断路器、隔离开关、GIS开关柜等一些关键智能一次设备运行状况进行监测和数据交换，通过过程层获取试验数据，并采用基于IEC61850标准的测试仪对间隔层智能装置进行性能测试^[12-13]。除传统的测试项目外，间隔层还需要增加对过程层信息的检测功能，在线收集来自过程层的采样值报文和过程层的GOOSE报文，对来自过程层的数据完备性进行评估，对可能发生的丢包、积错、误码，延时、同步性等问题及时进行告警和记录。

4.2 智能牵引供电系统试验内容

4.2.1 智能牵引供电系统基础数据源测试

监测接触网系统动态、静态运行质量、疲劳损伤，并监测牵引变压器、互感器、GIS柜、馈线电缆等牵引变电所关键设备的数据特征。

(1) 根据智能牵引供电系统运行参数测试，考核动车组运行工况下供变电系统性能，验证牵引网内电流分配是否符合要求，同时检验牵引网内是否存在谐振过电压，考核智能牵引变电所引入电源的电能质量。

(2) 通过测试，验证智能牵引供电系统在越区供电、分开供电等紧急供电方式下设备动作逻辑准确性并评估其运行状态。

需要通过在线收集和解析来自过程层的GOOSE报文以及站内智能组件发出的GOOSE和MMS报文，对智能牵引变电所主变压器相关数据、220 kV侧母线电压电流、27.5 kV侧母线电压、馈线电流、分区所接触网末端电压、供电臂上、下行穿越电流、AT所两侧吸上电流等参数进行实时记录和测试。对采样结果进行相关计算和分析，统计归纳出各项被测数据，进而指导智能牵引供电系统进行调整和优化。

4.2.2 智能牵引供电系统保护装置测试

通过对接触网进行人工短路，测试智能牵引供

电系统在发生短路故障时，系统保护装置保护动作的正确性，同时对智能牵引供电系统故障测距的准确性进行检验。在进行接触网短路时，在线收集过程层和间隔层的采样报文，对来自过程层数据的完备性进行评估，并对短路期间采样时可能发生的误码、丢包、同步性等问题进行记录和告警。对于收集到的采样值报文和GOOSE报文进行解析和重构，并记录短路电压及不同馈线电流波形，分析不同所享的故障报告数据，从而检验保护动作的正确性并对故障测距的准确性进行评判。

5 结束语

目前，已在京沈客运专线阜新牵引变电所至黑山北牵引变电所之间约50 km范围内搭建了智能牵引供电系统，实现多系统整合、多信源数据共享，并完善了故障预警机制和系统健康评估体系。

本文分析智能牵引供电系统的原理及特点，从功能设施结构方面对智能牵引供电系统架构进行研究，并分析了智能牵引变电所的过程层、间隔层、站控层，研究了智能断路器、互感器、智能牵引变压器的工作原理及方案选择。此外，针对智能牵引供电系统的特点及原理，提出了智能牵引供电系统基础数据源及保护装置的测试与评估方法。随着智能牵引供电系统的逐步推广，研究人员未来应加大对智能牵引供电技术的系统性研究，推进智能牵引供电相关标准与规范的建立，不断促进智能牵引供电系统进一步的发展。

参考文献：

- [1] 王传启. 高速铁路智能牵引变电站自动化关键技术研究 [D]. 武汉：华中科技大学，2013.
- [2] 王 琦，何正友，林 圣，等. 高铁牵引供电系统PHM与主动维护研究 [J]. 西南交通大学学报，2015，50 (5)：942-952.
- [3] 姜筱届. 智能化变电所技术在牵引供电系统中的应用 [J]. 电气化铁道，2014 (1)：10-12.
- [4] 陈国剑. 铁路局数字化供电系统设计 [J]. 铁路计算机应用，2017，26 (5)：23-26.
- [5] 王 物. 高速铁路牵引供电自动化网络通信系统研究 [D]. 成都：西南交通大学，2007.

(下转 P55)

表1 实验结果

匹配点	左匹配点图像坐标	右匹配点图像坐标	Z_{wi} (单位: mm)
P_1	(340, 211)	(356, 241)	6011.056
P_2	(401, 299)	(410, 301)	5869.654
P_3	(454, 301)	(466, 321)	5634.301
P_4	(499, 351)	(511, 352)	5586.214
P_5	(520, 394)	(531, 401)	5790.358
P_6	(594, 401)	(611, 421)	5585.964
P_7	(686, 511)	(691, 534)	5653.325
P_8	(769, 542)	(789, 556)	5716.596
P_9	(861, 589)	(934, 601)	5393.874
P_{10}	(985, 642)	(997, 661)	5425.324



图6 图像测距系统运行结果图

- 道通信信号, 2017, 53 (7) : 9-10.
- [3] SRINIVASA N. Vision-based vehicle detection and tracking method for forward collision warning in automobiles[C]// IEEE Intelligent Vehicle Symposium ,2002: 626-631.
- [4] 张 琢. 铁路调车作业事故分析及对策研究 [J]. 中国铁路, 2009 (3) : 26-30.
- [5] 迟学力. 视频图像处理技术在保障机车调车作业安全方面的研究与实践 [J]. 铁道通信信号, 2015 (10) : 71-74.

(上接 P47)

- [6] 张 雷. 高速铁路牵引变电所数字化设计 [J]. 铁路技术创新, 2010 (1) : 30-32.
- [7] Zeynal H, Eidiani M, Yazdanpanah D. Intelligent Substation Automation Systems for robust operation of smart grids[C]// Innovative Smart Grid Technologies - Asia. IEEE, 2014:786-790.
- [8] 覃 剑. 智能变电站技术与实践 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [9] 高 翔. 数字化变电站应用技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

- [6] LI Mengxiang, LAVES JM. Some aspects of zoom lens camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(11):1105-1120.
- [7] SARKIS M, SENFT C T, DIEPOLD K. Modeling the Variation of the Intrinsic Parameters of an Automatic Zoom Camera System using Moving Least-Squares[C]// IEEE International Conference on Automation Science, 2007, 10.
- [8] 樊庆文, 王德麾, 袁中凡. 一种基于数字图像的空间测距方法 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2010, 42 (3) : 228-232.
- [9] 王文波. 基于单目视觉的实时测距方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [10] 杨 鑫, 马 斌, 王健生, 等. 基于单目视觉的矿井机车障碍物检测和测距方法 [J]. 工矿自动化, 2014, 40 (11) : 96-99.
- [11] RUBLEE E, RABAUD V, KONOLIGE K, et al. ORB: An Efficient Alternative to SIFT or SURF[J]. International Conference on Computer Vision, 2011, 58(11):2564 -2571.
- [12] YAN K, SUKTHANKAR R. PCA-SIFT: a more distinctive representation for local image descriptors[J]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2004, 2(2) :506-513.
- [13] 黄桂平, 李广云, 王保丰, 等. 单目视觉测量技术研究 [J]. 计量学报, 2004 (4) : 314-317.
- [14] 奚长一. 基于定焦平移序列图像的测距技术研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2013.
- [15] 刘东东. 基于 USB 摄像头的单目视觉测距技术的研究 [D]. 大连: 大连交通大学, 2014.
- [16] 吴章江, 李湘敏. 计算机图像处理在铁路上的应用 [J]. 中国铁道科学, 1993 (1) : 36-41.
- [17] 李 欣, 董建园. 单目视觉测距在移动机器人的应用 [J]. 计算机技术与发展, 2013, 23 (11) : 247-250.
- [18] 袁雨桐. 基于单目视觉的智能车前方障碍物识别与测距 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.

责任编辑 徐侃春

- [10] Li J, Huang Q, Hu F K, et al. Performance Testing on GOOSE and MSV Transmission in One Network[J]. Energy Procedia, 2011(12): 185-191.
- [11] 张小易, 彭志强. 智能变电站站控层测试技术研究与应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (5) : 88-94.
- [12] 龚 泉, 刘 琳, 杨 帆. 基于 IEC-61850 标准的数字化变电站系统测试 [J]. 华东电力, 2009, 37 (6) : 936-940.
- [13] 王李东, 文劲宇. 牵引变电所二次设备智能检测系统的研究 [J]. 电气化铁道, 2004 (5) : 11-13.

责任编辑 徐侃春