doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2022.03.020

中韩自主化全电子联锁系统对比研究

冯浩楠[1,2]，董成文[3,4]，李小帅[3,4]，马晓姣[3,4]，潘长清[3,4]

（1. 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所，北京 100081；2. 国家铁路智能运输系统工程技术研究中心，北京 100081；3. 中国铁道科学研究院集团有限公司标准计量研究所，北京 100081；4. 中铁检验认证中心有限公司，北京 100081）

摘 要：与传统的继电器接口方式相比，全电子执行单元具有灵活配置、节约成本、节省空间、调试安装方便等诸多优点，成为计算机联锁系统的发展趋势之一。从系统架构、通信协议、系统实验 3 个环节，对中韩两国自主化全电子联锁系统的研究进展进行对比分析。通过对比发现：韩国的全电子联锁系统主要借鉴欧洲铁路的 EULYNX 标准框架，应用于铁路干线；中国全电子联锁系统目前在城市轨道交通线路和部分场段有所应用，在铁路干线正处于实验阶段，可借鉴韩国全电子联锁系统的经验。二者在系统架构、通信协议方面采用安全可靠的措施保障系统的安全，最后通过实验室和工程现场试验，验证系统的可行性。

关键词：城市轨道交通；信号系统；自主化；全电子联锁系统；标准通信接口

中图分类号：U231.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2022)03-0129-06

Comparative Study on Indigenous All Electric Interlocking Systems between China and South Korea

FENG Haonan[1,2], DONG Chengwen[3,4], LI Xiaoshuai[3,4], MA Xiaojiao[3,4], PAN Changqing[3,4]

(1. Signal and Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081; 2. The Center of National Railway Intelligent Transportation System Engineering and Technology, Beijing 100081; 3. Standard and Metrology Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081; 4. China Railway Test and Certification Center, Beijing, 100081)

Abstract: Compared with the traditional method using relay interface, the all-electric execution units have many advantages, such as flexible configuration, cost saving, space saving, and easy commissioning and installation, and have become one of the development trends of computer interlocking systems. The research progress of indigenousall-electric interlocking systems in China and South Korea was compared and analyzed from three aspects: system architecture, communication protocol, and system test. Through comparison, it was found that the all-electric interlocking systems in South Korea mainly follow the EULYNX standard framework in the European railway, mainly used in the main line; the all-electric interlocking systems in China are currently used in the urban rail transit lines and some depots, and is in the experimental phase in the main line, so as to learn from the experience of South Korea. Both systems use safe and reliable measures to ensure the safety of the system in terms of the system architecture and communication protocol, and verify the feasibility of the system through laboratory and

收稿日期：2021-07-10　修回日期：2021-10-09

第一作者：冯浩楠，男，副研究员，从事城市轨道交通控制系统研究，fenghaonan@rails.cn

通信作者：董成文，男，高级工程师，从事轨道交通系统标准研究，dongchw3177@126.com

基金项目：中国铁道科学研究院重点基金(ATH20Y010)

引用格式：冯浩楠，董成文，李小帅，等. 中韩自主化全电子联锁系统对比研究[J]. 都市快轨交通，2022，35(3)：129-134.

FENG Haonan, DONG Chengwen, LI Xiaoshuai, et al. Comparative study on indigenous all electric interlocking systems between China and south korea[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(3): 129-134.

engineering field tests.
Keywords: urban rail transit; signal system; indigenous; all-electric interlocking system; standard communication interface

1 研究背景

计算机网络和通信技术的快速发展，促进铁路信号技术不断升级，列车运行实现了高速化和高密度化。地面的联锁系统通过用电子控制器件代替继电器装置的方式，完成了信号系统的数字化升级，降低了维护成本，提高了系统的可维护性[1-2]。

近年来，中国的兰州交通大学[3-5]、众合科技、北京全路通信信号设计研究院、西南交通大学[6]、中国铁道科学研究院[7-8]等对全电子联锁系统进行了研究，在国内部分铁路支线和车辆段等场合应用，但仍未在国内铁路领域大规模推广应用。

韩国全电子联锁系统研究起始于 1990 年。针对全电子联锁系统中存在的问题和薄弱环节，2001 年起对全电子联锁系统制定了相应的标准和规范，并在韩国大多数车站正式推广使用。例如，京釜高速铁路的全电子联锁系统已进入全面升级的阶段[1]。基于韩国无线列车控制系统(Korean radio based train control system，KRTCS)，采用了以全电子联锁系统为中心的信号系统标准化方案，实现了对韩国信号系统的标准化管理[2]。

下面以中国铁道科学研究院研发的 TYJL-IIIE 型自主化全电子联锁系统为例，将其与韩国自主化全电子联锁系统在架构、通信协议、实验等方面进行对比，为中国全电子联锁系统的发展和相关标准的制定提供参考。

2 联锁系统

中韩自主化全电子联锁系统均采用联锁逻辑与对象控制分离的架构，前者重点实现联锁的逻辑功能，后者主要完成对外部对象的安全通信和管理。联锁逻辑与对象控制的数字化交互，特别是对轨旁设备进行 IP(Internet Protocol，网际互联协议)的控制方式，与传统的继电联锁相比，拓展了联锁系统的控制范围，增强了灵活性，同时为联锁系统功能拓展和升级改造等提供了便利。

2.1 系统架构

韩国设计的自主化全电子联锁系统为中心的信号控制架构，借鉴欧洲联锁子系统连接倡议(European initiative linking interlocking subsystems，EULYNX)的架构，对联锁系统接口对象进行分类统一的标准化管理，如图 1 所示[9]。

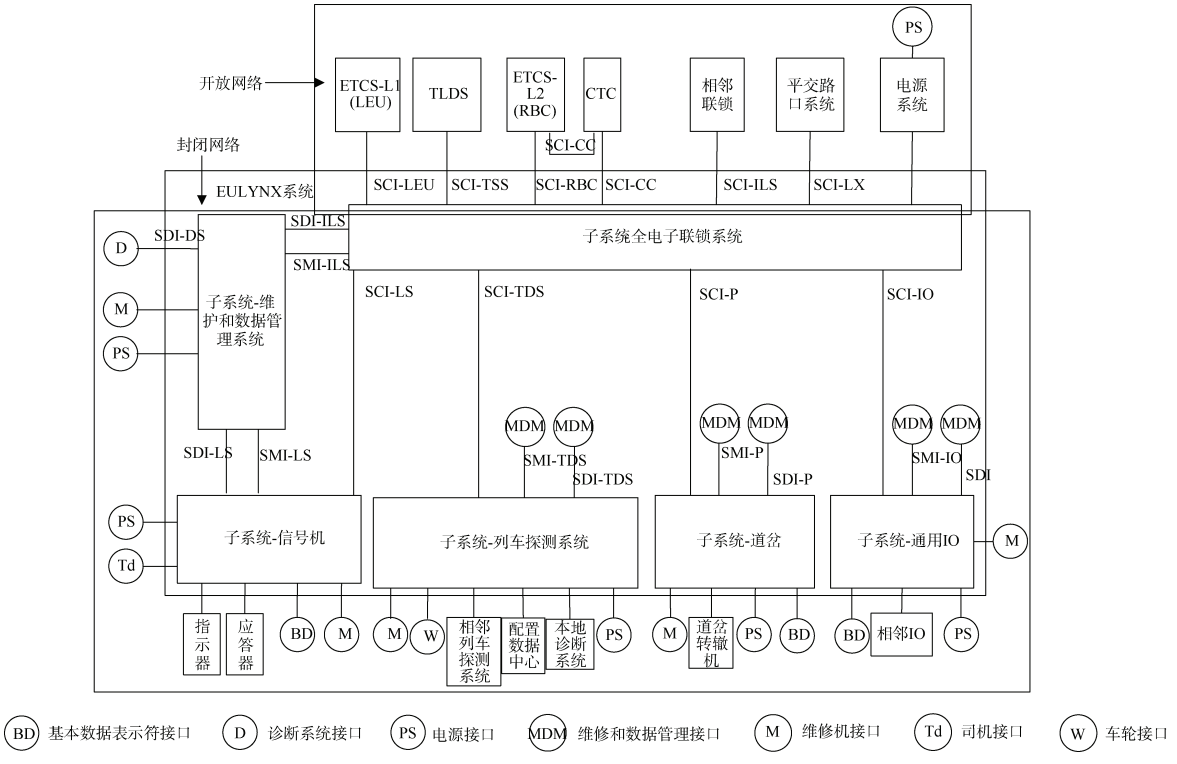

图 1 基于 EULYNX 的全电子联锁架构

Figure 1 Structure of the all-electric interlocking system based on EULYNX

与韩国全电子联锁系统的架构类似，中国自主化全电子联锁系统也根据通信对象特性进行分类管理。在针对轨旁设备的对象控制器设计上略有不同：韩国的对象控制器形式上分为通信模块、主控制单元(main control unit，MCU)模块和输入/输出模块三部分，一个输入/输出模块对应一个 IP；中国自主化全电子联锁系统为对象控制单元(object control unit，OCU)和控制模块两部分，前者完成与联锁逻辑部分的信息交互和传输处理，后者实现对轨旁设备数据的安全采集和驱动功能，一个 OCU 有冗余双网 IP，对应多个类型的控制模块。二者的对比如表 1 所示。

表 1　全电子联锁系统架构

Table 1　System architecture of the all-electricinterlocking system

对比项	韩国	中国
应用场景	高铁、普速铁路	场段，城市轨道交通
网络架构	双网冗余，分为内网和外网	双网冗余，分为内网和外网
外网连接控制系统	CTC、RBC，相邻联锁，平交道口系统	ATS、ZC，相邻联锁，VOBC
内网连接控制系统	信号机模块、道岔模块、列车探测模块、IO 模块	信号机模块、道岔模块、列车探测模块、IO 模块
逻辑部硬件	ARTESYN 扩展平台	TYJL-III 平台
逻辑部操作系统	VxWorks	DOS
对象控制器架构	通信模块、MCU 和控制模块	OCU 模块和控制模块
对象控制器位置	轨旁或信号房	信号房
控制器通信方式	VEM 总线	CAN 总线
安全认证	SIL4	SIL4

以常用的轨旁设备——信号机和道岔为例，说明中韩控制模块控制差异。

2.2　控制模块

中国与韩国自主化全电子联锁系统中的信号和道岔控制模块，安全等级均为 SIL4，采用如下措施确保安全。

1) 二取二安全结构。都是比较一致后对外输出，韩国的控制模块采用现场可编程逻辑门阵列(field program mable gate array，FPGA)进行硬件比较，中国的控制模块在驱动电路采用了电子开关和机械开关异构组合方式，避免共模错误。

2) 输出反馈。输出传感器回“读”输出给轨旁设备信息的反馈，与从 CPU 接收的控制信息进行比较，检测错误。

3) 看门狗功能。设计读/写看门狗进行动态监测，每隔一段时间检测一次，如果未收到检查信号，表明是导向安全状态。当所有条件都恢复正常，才能处于运行状态。

4) 过流检测和防护功能。设置断路器，过流时切断信号电源。韩国的控制模块保护电路是在每个输出端口的负载电流为 1.1A～1.12 A 时工作，工作输出电压应降至额定值的 10%以内，在过流原因排除后自动恢复正常状态。

2.3　设备性能

对全电子联锁设备的性能指标进行对比，如表 2 所示。

表 2　全电子联锁设备性能指标

Table 2　Performance index of the all-electricalinterlocking equipment

	性能指标	韩国	中国
全电子联锁系统	操作环境/℃	–20～60	0～40
	控制轨旁对象最大数量/个	125	168
	可靠性评估	>10 万 h	>100 万 h
道岔模块	输出控制	2 台交流转辙机	1 台 ZD6 转辙机
	额定输出电压/V	AC 110～127	直流 220±10 (直流道岔)
	额定输出电流/A	0.5	最大 4
	工作电流/mA	30 以上	330
信号模块	输出控制	2 个 4 灯位	8 个通用的信号机
	额定输出电压/V	8×24DC	交流 110/220±10
	额定输出电流/A	0.5	单路最大工作电流 0.5
	工作电流/mA	在设备标准允许额定范围的 80%内工作	733 (满负载)

3　通信协议

标准的通信协议是关系到全电子联锁系统的功能扩展和与控制对象的互联互通，也影响系统的安全和可靠性。韩国和中国各自设计了一套符合安全标准的通信协议，以实现信息的可靠传输。

3.1　通信模型

基于互联互通开放系统(open system interconnection，OSI)7 层通信模型，中韩自主化全电子联锁通信模型的对比如表 3 所示。由此可知，通信的底层(包括物理层、数据链路层和网络层)模型相同，由服务要点(point of service，PoS)定义；通信的上层(包括传输

层、安全层、冗余层和应用层)共同形成标准通信接口(standard communication interface，SCI)。在应用层方面，二者根据系统特点和应用需求，分别制定了相应的应用协议；在安全通信层方面，韩国沿用欧洲的铁路安全运输应用协议 (rail safe transport application，RaSTA)[10]，中国采用铁道部制定的 I 型铁路信号安全协议(railway signal safety protocol-I，RSSP-I)。

表 3　全电子联锁系统通信模型

Table 3　Communication model of the all-electric interlocking system

OSI 通信层	韩国	中国
应用层	PDI (process data interface)	应用层
表示层	RaSTA	RSSP-I
会话层		
传输层	UDP/TCP	UDP
网络层	IP	IP
数据链路层	Ethernet	Ethernet
物理层	Ethernet	Ethernet

3.2　安全层协议

RaSTA 协议对网络设备(交换机、路由器)的安全要求包括信息流控制、安全管理、自我测试、安全会话管理、访问控制、传输数据保护、监控记录等 7 个领域共 21 种，如识别、身份验证、根据设置规则控制流量等进行控制。中国采用的 RSSP-I 协议对通信过程中的重复、删除、插入、重排序、损坏、延迟和伪装 7 种类型的威胁进行防护[11]。从标准、应用场景、安全码、传输层等指标，对两种安全通信协议进行对比，如表 4 所示。

表 4　全电子联锁系统安全层协议

Table 4　Protocol in the safety layer of the all-electricinterlocking system

对比项	RaSTA	RSSP-I
遵从标准	EN50129	EN50129
应用场景	封闭网络	封闭网络
协议架构	冗余层和安全重传层	冗余层和安全层
安全码	MD4	CRC64
安全码长度	8Byte	8Byte
传输层	UDP	UDP、TCP、RS-422
交互方式	周期	周期

3.3　应用层协议

全电子联锁系统的应用层包括两类标准接口：SCI 和标准诊断接口(standard diagnosis interface，SDI)。

3.3.1　通信标准接口协议

SCI 用于全电子联锁与其他控制系统或者轨旁系统的信息交互使用，是基于电报的接口，由传输层和应用层组成，未声明的电报定义不可用。根据通信对象，可分为两类：一类属于控制系统级别；另一类属于轨旁设备级别。韩国的 SCI 遵循 EULYNX 标准，公开的通用标准接口以 SCI-XX 命名，如表 5 所示。在系统级的通信对象方面，韩国 SCI 标准仅涉及高铁、铁路等控制系统，而中国的 SCI 标准将国铁、城轨领域的控制对象全覆盖；在轨旁设备级通信对象方面，二者根据各自的功能需求和系统架构，完成了对轨旁设备的数字化协议。

表 5　全电子联锁系统标准通信接口协议

Table 5　Standard communication interface of the all-electric interlocking system

通信对象	韩国	中国	级别
控制命令系统	SCI-CC (control command)	HLHT-ATS	系统级
RBC	SCI-RBC (Radio block center)	国铁标准	系统级
相邻联锁	SCI-ILS (adjacent interlocking system)	HLHT-IL	系统级
轨道安全系统	SCI-TSS (track safety system)	无	系统级
道岔	SCI-P (Point)	OCU-道岔、OCU-下拉模块	轨旁级
信号机	SCI-LS (light signal)	OCU-信号机	轨旁级
轨道检测系统	SCI-TDS (track detection system)	OCU-轨道电路模块、OCU-计轴	轨旁级
平交道口系统	SCI-LX (level crossing system)	无	系统级
通用 IO	SCI-IO	OCU-FIMO 驱动模块、OCU-FIMI 采集模块、OCU-零散 IO 模块	轨旁级
半自动模块	无	OCU-半自动模块	轨旁级
场联模块	无	OCU-场联模块	轨旁级
电码化模块	无	OCU-电码化模块	轨旁级

3.3.2　标准维护接口协议

韩国自主化全电子联锁维护和数据管理(maintenance data management，MDM)与每个设备子系统之间的接口由 SDI-xx 定义，SDI 包括 SDI-LS、SDI-P、SDI-TDS 和 SDI-IO。

SDI 通信协议采用简单的网络管理协议(simple network management protocol，SNMP)或用于过程控制统一架构的对象链接和嵌入(OLE for process control-

unified architecture，OPC-UA)协议。当使用 SNMP 时，以事件驱动的方式收集诊断消息，发送到诊断收集器；当使用 OPC-UA 时，诊断消息以事件驱动的方式收集和存储在相关系统中。诊断收集器定时向连接系统请求诊断消息。特定的设备或子系统使用其中一个协议，MDM 兼容两者协议，使用 SNMP 或 OPC-UA 的诊断消息，以事件方式发送和接收信息。

中国自主化全电子联锁系统的维护信息的通信协议为 UDP 单向发送。应用内容分为两个级别：第一级为系统级监控信息，包括 OCU 与 CI 逻辑部通信状态、安全通信报警等错误信息，这些信息由 OCU 通过以太网传送给 CI 逻辑部，再由 CI 逻辑部发送给维修机；第二级为控制模块级监控信息，信号模块提供灯丝电流模拟量信息，道岔模块提供道岔动作时间、定位反位状态、动作电流数据等信息。上述这些信息由各个全电子执行模块通过 CAN 总线通信发送给维修分机，再由维修分机发送给维修机记录。为了对全电子执行系统的故障进行快速诊断和维修，还研发了远程智能运维系统。基于两套冗余结构的窄带物联网(narrow band internet of things，NB-IoT)通信方式，将上述关于控制模块的维修信息发送到云服务器，根据用户权限，给相关维修人员及时推送监控信息和报警，还可以对全电子执行系统进行在线维修和统计[12]。中韩标准维护接口协议的对比如表 6 所示。

表 6　全电子联锁系统标准维护接口协议

Table 6　Standard diagnosis interface of the all-electric interlocking system

项目	韩国	中国
通信协议	SNMP 协议或 OPC-UA 协议	UDP 协议
通信方式	呼叫应答	单向传输
维修信息	①监控对象数据；②基础数据的状态；③KRLYNX 现场设备子系统执行的版本检查结果；④故障指示；⑤工作环境温度报警；⑥制造规范；⑦服务功能交互状态；⑧操作状态；⑨PDI 连接故障；⑩PDI 连接状态；⑪安全协议连接状态	①常态类型数据 ②道岔动作曲线 ③模块状态数据 ④版本号数据

4　系统实验

4.1　实验室测试

韩国在进行实验室测试时，选取 3 家制造商的信号机和道岔产品与控制模块连接，进行互联互通测试。测试环境包括电源负载、直流电子负载、数字多仪表等装置，测试项目包括阻抗测试、ID 读写测试、输出电流测试和输出电压测试，实验室测试连接如图 2 所示。

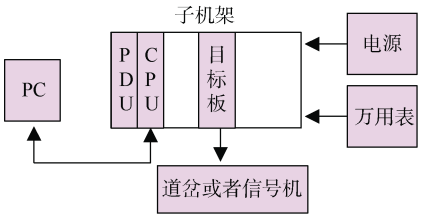

图 2　韩国自主化全电子联锁系统控制模块的实验室测试

Figure 2　Laboratory test on a control module of indigenous all-electric interlocking system in South Korea

为了验证控制单元硬件是否满足功能需求和性能需求，TYJL-IIIE 型全电子联锁系统的控制模块搭建测试环境如图 3 所示。24 V 电源接入电源后接板供电，PC 机通过 CAN 盒向控制模块发送控制命令，观察轨旁设备响应。测试项目包括控制模块工作电源、时钟电路、CAN 通信、复位电路、串口电路、轨旁设备控制电路、轨旁设备状态采集电路、事故电路和切换电路信号的功能和性能测试等 9 项内容。

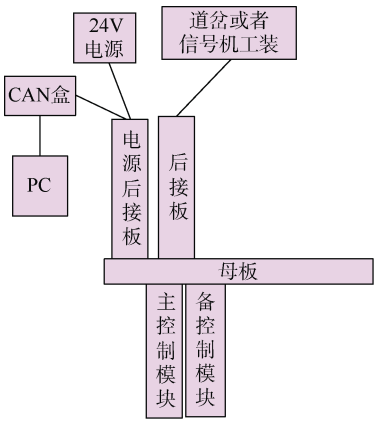

图 3　中国自主化全电子联锁系统控制模块实验室测试

Figure 3　Laboratory test on a control module of indigenous all-electric interlocking system in China

4.2　现场实验

韩国全电子联锁系统在 O-song 综合铁路试验轨道上进行现场兼容性测试，测试轨道如图 4 所示[13]。按照全电子联锁系统功能的划分，选取联锁集中站 TS02 和非集中站 TS03，按功能安装测试设备进行测试，测试内容如表 7 所示。

在投入城市轨道交通的现场使用前，中国铁道科学研究院研发的 TYJL-IIIE 自主化全电子联锁系统需

经过多项集成测试，包括验证冗余通功能的结构测试，验证内部接口、外部接口、电源接口的接口测试，验证安全通信、模块管理、轨旁设备控制的功能测试，验证通信周期、模块容量的性能测试，验证各种协议、配置参数的需求测试[14]。自主化全电子联锁系统的现场安装如图 5 所示。

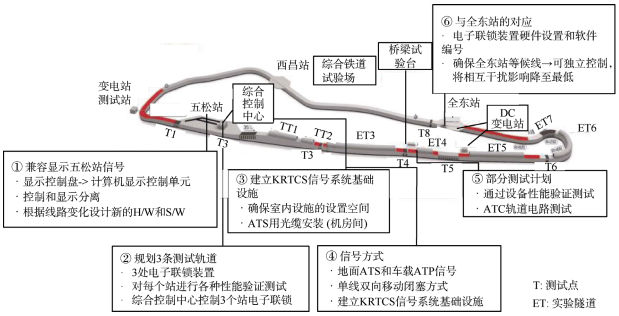

图 4　韩国全电子联锁系统测试线路

Figure 4　Test line on the all-electric interlocking system in South Korea

表 7　韩国全电子联锁系统的现场测试

Table 7　On-site test of the all-electric interlockingsystem in South Korea

测试对象	安装地点	接口测试和验证目标
联锁逻辑单元和 IP 对象控制器	TS02	开放网络接口测试，包括 CTC、RBC、LEU、远程维护部门、全电子联锁装置(相邻站)等接口和联锁逻辑分布式控制功能测试
维护和数据管理单元	TS02	综合维修信息管理功能测试
IP 对象控制器	TS03	封闭网络接口测试，包括与安全设施(障碍物检测等)、平交道口设备、轨道切换器、轨道电路/计轴/虚拟(逻辑)轨道电路等，以及全电子联锁装置的接口

图 5　TYJL-IIIE 全电子联锁系统机柜

Figure 5　TYJL-IIIE all-electric interlocking system cabinet

5　结语

中国和韩国根据本国铁路特性，开发了自主化全电子联锁系统。韩国铁路信号设备大多来自欧洲信号厂商，因此全电子联锁系统的开发沿用了欧洲的 EULYNX 标准框架，以便于对韩国信号系统升级改造；目前，中国全电子联锁系统处于自主化研制应用评估阶段。

1) 在全电子联锁系统的架构方面，二者都采用联锁逻辑和控制功能分离的架构。韩国的全电子联锁控制模块可安放在轨旁或室内，而中国的控制模块则安放在室内。

2) 二者的应用场合不同，目前韩国全电子联锁系统设计和试验主要应用于高铁线路，而中国全电子联锁系统的应用场合主要集中在场段和城市轨道交通领域，基于其应用效果，将在铁路领域逐步推广使用。

3) 在全电子联锁系统通信协议方面，韩国完全借鉴欧洲 EULYNX 标准框架，而中国自主化全电子联锁系统处于由厂商根据系统特点自行定制的阶段，中国全电子联锁系统标准正在制定。

4) 在全电子联锁系统性能测试方面，二者都设计了严格的测试过程，完成了实验室测试和现场工程化测试，试验结果验证了系统的性能，保障了系统的安全可靠性。

参考文献

[1] HWANG Kyunghwan, LEE Kilyong, KIM Yeonhwa, et al. Standardization study of conventional and high speed railway signaling system[C]//2017 Korean Railway Society Conference. South Korea, Soeul, 2017.

[2] SEUNG Jeong KIM Tae Kwon, EOM Kitae, et al. Safety network for IP based electronic interlocking euipment[C]//2018 Korean Railway Society Conference. South Korea, Soeul, 2018.

[3] 何涛. 轨道交通全电子化联锁系统安全技术研究与系统分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
HE Tao. Research and analysis of safety technology on the rail transit all electronic computer interlocking system[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University. 2014.

[4] 苏琛, 旷文珍, 许丽. 全电子计算机联锁系统中点灯控制电路的抗雷电冲击性能分析与设计[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(5): 137-140.
SU Chen, KUANG Wenzhen, XU Li. Analysis and design of lightning resistance ability of signal lightning control circuit for all-electronic computer interlocking system[J]. Railway standard design, 2016, 60(5): 137-140.

（下转第 154 页）