

高速磁浮运行控制系统与城轨信号系统 CBTC 的对比分析

吴卫平, 胡 剑, 高 原

(轨道交通信号系统湖南省工程研究中心, 湖南 长沙 410005)

摘 要: 运行控制系统是高速磁浮交通最核心的中枢系统, 其控制并保证了高速磁浮列车的安全运行。为深入掌握该系统的关键特性, 将高速磁浮运控系统的系统结构、进路办理等方面同城轨信号系统 (CBTC) 进行综合比较分析, 研究高速磁浮运控系统可借用的 CBTC 成熟技术和相关概念, 从而加快其研发进度。

关键词: 高速磁浮列车; 城轨信号系统; 运控系统

中图分类号: U237

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2018)03-0056-04

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2018.03.012

Comparative Analysis of the Operation Control System for High-speed Maglev and the CBTC Signal System for Metro

WU Weiping, HU Jian, GAO Yuan

(Hunan Province Rail Transit Signaling System Engineering Research Center, Changsha, Hunan 410005, China)

Abstract: The backbone of high-speed maglev system is the operation control system (OCS), which is responsible for train control and operation safety. In order to provide theoretical basis for further research and to better understand the key features of OCS, comparative researches were made between CBTC (communication based train control) system and the OCS from different aspects including system framework, routing, etc. Through comparative analysis, it can accelerate system development based on part of CBTC technology and related concepts.

Keywords: high-speed maglev train; CBTC (communication based train control) system; OCS (operation control system)

0 引言

国家发展改革委在轨道交通装备关键技术产业化方面明确提出, 发展高速、智能、绿色铁路设备, 并形成具有国际领先水平和自主知识产权的产品^[1], 其中就包括研制新一代时速 600 km/h 高速磁悬浮列车。高速磁浮是一个系统复杂、技术难度大、可供参考资料少, 从顶层到各级子系统都存在很多空白和未知难点需要去攻克。尤其是运行控制系统 (operating control system,

OCS), 它是高速磁浮系统的控制中枢, 负责保证列车的安全及运营的高效, 但目前国内对其的研发大都是在“无人区”探索, 面临风险非常大。为此, 本文采用综合比较的方法, 从系统结构、进路办理以及车门/屏蔽(站台)门等方面将高速磁浮 OCS 系统与当前最成熟的信号系统——城轨信号系统 (communication based train control, CBTC) 系统进行比较, 明确高速磁浮 OCS 系统可借用 CBTC 系统哪些成熟的方案及概念, 从而避免重新开发, 以加快系统研制速度; 同时, 考虑到高速磁浮 OCS 系统的特殊性, 在不能借用 CBTC 方案的情况下提出安全、可行的新方案。

收稿日期: 2017-11-30

作者简介: 吴卫平 (1976-), 男, 高级工程师, 主要从事信号系统研发工作。

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB1200602)

1 系统简介

1.1 CBTC 系统

CBTC 系统目前已广泛应用于地铁信号系统中，其典型的架构如图 1 所示^[2]。

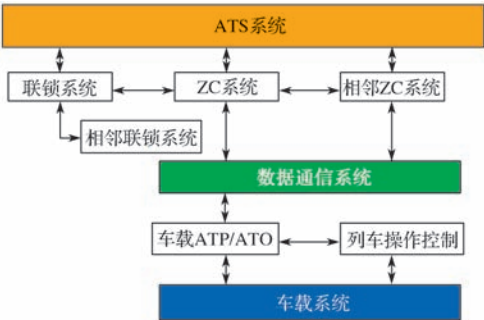


图 1 CBTC 系统典型结构
Fig.1 Typical structure of CBTC system

正常运营情况下，列车自动监控系统（automatic train supervision, ATS）根据时刻表自动下发进路指令给轨旁信号子系统（联锁 CI 或区域控制器 ZC）。轨旁信号设备办理进路有两种方式：一种由 ZC 和 CI 共同完成，另一种由 CI 单独完成。ZC 在已办理进路的基础上进行移动授权，并通过数据通信系统将移动授权发送给车载列车自动防护系统（automatic train protection, ATP），车载 ATP 依据移动授权进行列车防护。列车自动驾驶（automatic train operation, ATO）在车载 ATP 的防护下进行列车自动驾驶。

1.2 高速磁浮 OCS 系统

与传统轮轨交通相比，高速磁浮具有以下特点：

- （1）列车为无人驾驶^[3]；
- （2）轨旁无信号机、计轴系统、轨道电路及应答器等设备；
- （3）列车定位完全依赖于车载设备；
- （4）牵引控制及供电设备安装在地面。

高速磁浮 OCS 系统与 CBTC 系统相比存在一定差异，主要体现在系统结构、进路、车门 / 屏蔽门联动等方面。以上海高速磁浮运营示范线为例，高速磁浮 OCS 系统结构如图 2 所示。

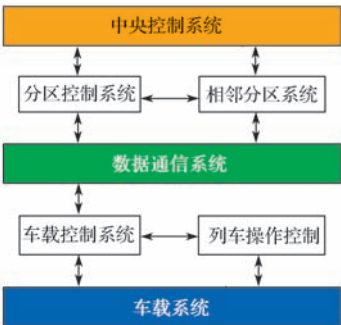


图 2 高速磁浮 OCS 系统典型结构
Fig.2 Typical structure of the OCS for high-speed maglev

正常情况下，中央控制系统根据时刻表自动下发进路指令给分区控制系统；分区控制系统完成进路办理、道岔防护和速度防护曲线计算等功能，并将线路数据、速度防护曲线等信息发送给车载控制系统；列车安全防护由分区控制系统和车载控制系统共同完成。

2 高速磁浮 OCS 系统与 CBTC 系统对比分析

2.1 系统构架

CBTC 系统由车载 ATP、ZC、CI、ATS 和 DCS 构成，而高速磁浮运控系统由车载控制系统、分区控制系统、中央控制系统和无线通信系统构成^[4]（图 3）。

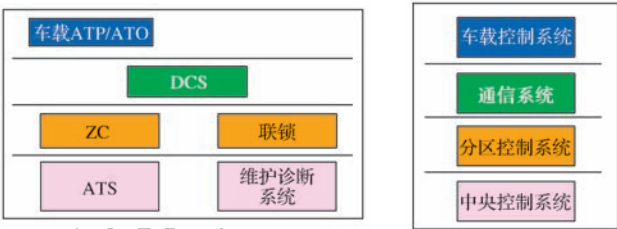


图 3 CBTC 系统和高速磁浮运控系统结构对比
Fig.3 Comparison between the CBTC system and the OCS for high-speed maglev

CBTC 系统与高速磁浮 OCS 系统功能分配比较如表 1 所示。

表 1 CBTC 系统与高速磁浮运控系统功能对比
Tab.1 Functions of the CBTC system and the OCS for high-speed maglev

项目	CBTC 系统	OCS 系统
车载控制	ATP/ATO：完成安全防护、运行曲线计算、列车测速定位、列车启停、车门控制等	车载控制系统：悬浮的安全控制、安全定位、速度监控、触发安全制动、制动器的安全检查、运行状态的评估、故障和紧急情况下的强制停车、车载供电的监视和控制、车门的安全控制
分区控制	ZC：移动闭塞安全防护计算 CI：进路控制、区段封锁、道岔防护、计轴 & 轨道电路、列车定位	分区控制系统：线路防护、进路预定、线路区段封锁、危险点保护、道岔设备保护、车辆管理、维修区和自动运行区区间交接区保护、牵引供电系统控制、速度曲线计算与监控、紧急停车等
中央控制	ATS：运行调度、时刻表编辑 维护诊断系统：维护诊断	中央控制系统：自动运行功能、运行诊断、时刻表编辑
通信	DCS：通信功能	通信系统：通信功能

由图 3 和表 1 可以看出，高速磁浮 OCS 系统与 CBTC 系统架构相近，功能部分相同。但由于高速磁浮交通特殊的牵引控制及牵引供电方式，系统架构和功能分配需在 CBTC 系统上进行适应性改动：

（1）由于高速磁浮牵引由分区控制系统控制，因此高速磁浮车载控制系统无 ATO 功能，ATO 对应的部

分功能分配到中央控制系统中。

(2) 速度曲线计算与监控、牵引切除在 CBTC 系统中为车载 ATP 功能；在磁浮 OCS 系统中分区控制系统与车载控制系统均执行速度曲线计算与监控，牵引切除则由分区控制系统执行。

(3) CBTC 系统轨旁信号系统由 ZC 和 CI 组成，其中 CI 是信号系统的基础，办理进路和防护道岔，ZC 管理列车；而高速磁浮轨旁信号系统则只有分区控制系统，其功能包括进路办理、道岔防护、列车管理等。

(4) 分区控制系统为高速磁浮 OCS 系统的核心子系统，集成了进路办理、道岔防护、列车管理、速度曲线计算与监控、牵引切除等功能，相比于 CBTC 系统中的轨旁信号系统，其集成度更高，但功能更为复杂。

根据上述对比可知，在系统结构设计中，高速磁浮分区控制系统可借用 CBTC 的 ZC 和 CI 系统结构，车载控制系统可借用部分车载 ATP 系统结构，中央控制系统可借用部分 ATS 系统结构。

2.2 进路办理

2.2.1 进路

CBTC 系统中，进路办理是轨旁信号系统的核心功能，一般由联锁办理。联锁办理进路以信号机为起/终点^[5]，图 4 是联锁办理信号机进路的示例。

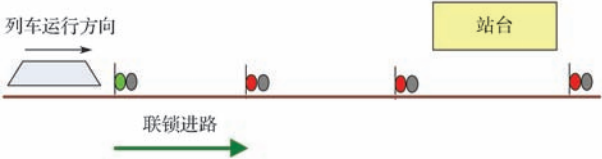


图 4 CBTC 系统联锁办理进路
Fig.4 CI route of the CBTC system

高速磁浮分区控制系统的进路办理依然遵循传统联锁进路基本原理。由于高速磁浮轨旁既无信号机，也无计轴、轨道电路等辅助定位设备，因此分区控制系统办理进路起点为列车报告的定位，终点为站台或辅助停车区，并根据列车报告的定位触发办理进路和解锁进路，如图 5 所示。

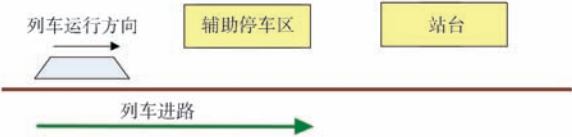


图 5 高速磁浮列车进路办理
Fig.5 Route of the high-speed maglev train

2.2.2 反向进路

在 CBTC 系统中，反向进路依赖于轨旁所设置的反向运行信号机。一般情况下，反向进路为站间进路，如图 6 所示。

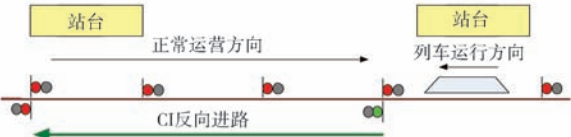


图 6 CBTC 系统联锁反向进路
Fig.6 Reversed CI route of the CBTC system

在高速磁浮系统中，反向进路与正向进路办理方式一样，该进路起点为列车当前所在位置，终点为站台（或辅助停车区），如图 7 所示。高速磁浮系统的反向进路不受轨旁设备布置影响，可正常办理。

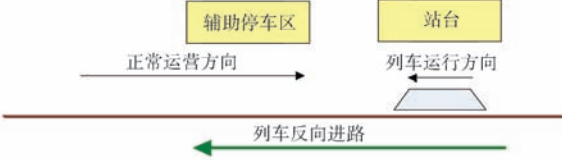


图 7 高速磁浮列车反向进路
Fig.7 Reversed route of the high-speed maglev train

2.2.3 长进路办理

在 CBTC 系统中，长进路^[6]一次性办理成功，会占用过多资源，从而影响了运营效率。所以，一般情况下，长进路会折成若干个信号机进路，依次办理，如图 8 所示。当列车准备运行时，CI 将长进路折成 3 个进路，首先办理并开放 CI 进路 1；当列车进入 CI 进路 1 区后，办理并开放 CI 进路 2；当列车进入 CI 进路 2 区后，办理并开放 CI 进路 3。

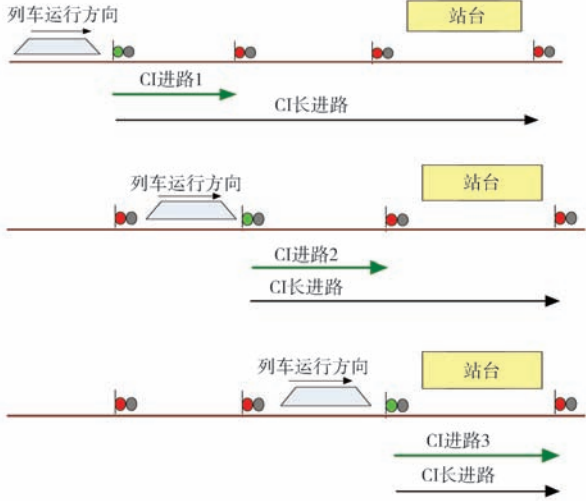


图 8 CBTC 系统联锁长进路
Fig.8 Long CI route of the CBTC system

高速磁浮牵引分区与运控分区一一对应，牵引分区在同一时间内只允许一列车运行。因此一个分区控制系统同时只为最多两列列车办理进路：一列运行列车和一列待运行列车。

在高速磁浮 OCS 系统中，长进路也分成若干个列车进路，依次办理。如图 9 所示。当列车进入进路 1 时，办理及开放列车进路 2；当列车进入列车进路 2 时，办理及开放列车进路 3。

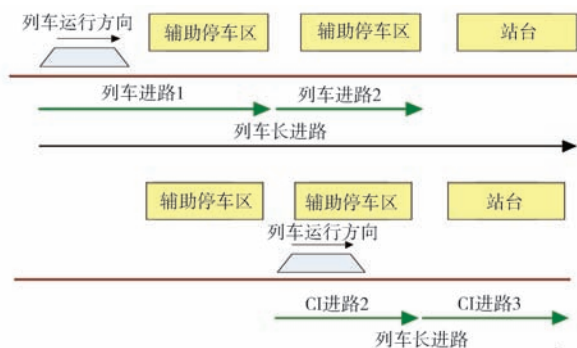


图 9 高速磁浮列车长进路
Fig.9 Long route of the high-speed maglev train

在高速磁浮 OCS 系统中，进路办理已摆脱传统联锁办理信号机进路方式，进路起点不依赖信号机设置，可在线路任何位置办理列车进路，更加灵活。因此，在进路方面，高速磁浮 OCS 系统不能借用 CBTC 联锁进路，而是要用全新列车进路进行设计。

2.3 车门 / 屏蔽（站台）门联动

CBTC 系统中，车门 / 屏蔽（站台）门联动如图 10 所示。

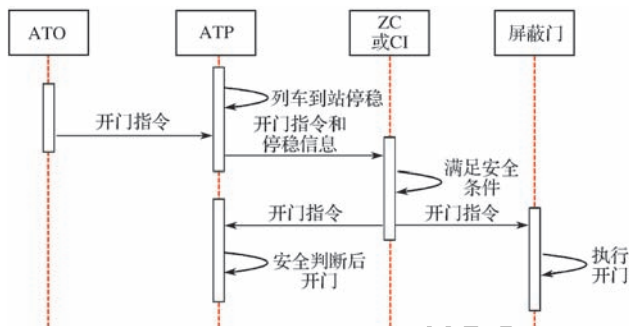


图 10 CBTC 系统车门 / 屏蔽（站台）门联动
Fig.10 Interaction between train doors and platform doors in the CBTC system

当列车到站停稳后，车载 ATO 给车载 ATP 发送开门请求，车载 ATP 将该请求给轨旁信号设备（CI 或 ZC）。轨旁信号设备收到请求后判断满足安全条件后，同时向屏蔽（站台）门和车载 ATP 发送开门命令。

高速磁浮系统中，ATO 功能集成在运控系统中央控制子系统，车门 / 屏蔽（站台）门联动如图 11 所示。

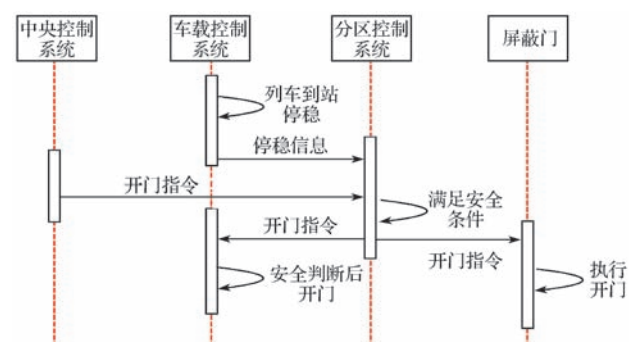


图 11 高速磁浮 OCS 系统车门 / 屏蔽（站台）门联动
Fig.11 Interaction between train doors and platform doors in the OCS

车载控制系统向分区控制系统报告停稳信息，分区控制系统将该信息报告给中央控制系统。中央控制系统向分区控制系统发出开门请求，分区控制系统判断满足安全条件后，同时向屏蔽（站台）门和车载控制系统发送开门命令。

可见，高速磁浮 OCS 系统在车门 / 屏蔽（站台）门联动可借用部分 CBTC 车门 / 屏蔽（站台）门联动方案，但在控制过程中要进行适应性修改。

2.4 其他性能的对比

如表 2 所示，高速磁浮 OCS 系统在牵引控制、线路数据以及 ATO 功能和辅助定位等方面都不能直接借用 CBTC 相关功能，但可借用 CBTC 相关成熟概念，如线路数据、牵引控制等。

表 2 高速磁浮 OCS 系统和 CBTC 的其他性能对比
Tab.2 Comparison of the OCS and the CBTC system on other aspects

项目	高速磁浮 OCS 系统	CBTC 系统
牵引控制	分区系统控制牵引系统	车载 ATP 控制牵引系统
线路数据	分区系统唯一存储线路数据；分区系统根据当前列车进路，给车载控制系统发送相关线路数据	ZC、CI、车载 ATP 都存储线路数据，在升级时较复杂，要确认数据
ATO 功能	由中央控制系统和牵引系统共同完成	集成在车载 ATO 上
辅助定位系统	无	有计轴系统 / 轨道电路

3 结语

本文对高速磁浮 OCS 系统与城轨 CBTC 系统进行对比分析，在系统结构、功能分配以及车门 / 屏蔽（站台）门联动方面，高速磁浮 OCS 系统可在 CBTC 系统上进行适应性修改，从而缩短设计周期；在进路设计、牵引控制、线路数据以及 ATO 功能方面，高速磁浮 OCS 系统虽不能直接借用 CBTC 的相关功能，但可借用 CBTC 相关成熟概念。

高速磁浮 OCS 系统因其由分区系统控制牵引系统，因此系统设计结构朝地面集成方向发展；而城轨信号系统朝着车载集成方向发展^[7]。这两种方向代表各自不同领域未来发展方向，也是无人驾驶两种不同技术流派的典型代表。

参考文献：

[1] 国家发展改革委印发轨道交通装备关键技术产业化实施方案 [EB/OL].(2017-12-28)[2017-12-30].https://www.sohu.com/a/213340686_100017896.

表 2 列出了“神华号”机车连续运行 12 h、每节车产生的车载数据大小和转储耗时。受机车运行情况和现场环境影响，车载数据大小和转储耗时均取平均值。

表 2 12 h 车载数据平均大小及转储耗时
Tab.2 The average size and dump time consuming of twelve-hour locomotive on-board data

车载设备	数据大小 /MB	压缩后大小 /MB	转储耗时
控制系统	400	17	101 s
安全监控	1	0.27	2 s
制动系统	10	1.1	8 s
重联系统	20	6.3	40 s
走行部监测	60	12	76 s
列尾检测	1	0.1	1 s
语音	3.5	3.5	23 s
视频监视	110 592	110 592	180 h

实时监视车载设备负载情况，增加转储功能后，车载设备 CPU 和内存占用率无明显增加，未超过车载设备正常运行的最大占用率；在智能转储过程中，车载设备 CPU 和内存占用率稳定，无明显起伏，车载设备各项功能运行正常。使用 wireshark 软件抓包^[10]，从 WIFI 上截取数据，可以看到数据已经加密，难以进行解密和破解。

现场试验发现，正常情况下，机车在站场内的停留时间不超过 4 h。由于视频文件太大，无法全部转储到地面数据中心，因此车载智能数据装置增加了视频剪辑功能，只剪辑出特定场景下的视频进行转储，并对转储的文件设置了优先级，将视频文件转储优先级调到最低。

根据现场用户需求，车载智能数据装置正常情况下不进行语音提示，只有在智能转储系统无法完成转储时，才提示用户进行人工转储。

经过验证，“神华号”机车进入神池南站和黄骅港站时，车载数据（视频除外）只需 5 min 左右就能转储到地面数据中心，无需人工干预，满足车载数据安全可靠、高效智能的转储要求。

5 结语

机车车载数据转储是机车运用管理中的重要环节，是开展机车数据分析业务的基础。本文在分析了车载数

据转储的需求后，提出了一种车载数据智能转储系统，并对系统的结构和主要功能进行了设计。现场验证结果表明，该系统数据转储效率高，安全性、可靠性和智能化程度都满足现场需求，适合进行推广应用。由于受 WIFI 网络带宽限制，该系统目前还不能完成大容量视频数据的高速转储，这也是后续的研究方向。

参考文献：

[1] 王庆武, 唐国平. 机车远程监视与诊断系统研究与设计 [J]. 机车电传动, 2012 (3): 42-57.
WANG Q W, TANG G P. Research and Design of China Locomotive Remote Monitoring and Diagnosis System [J]. Electric Drive for Locomotives, 2012 (3): 42-57.

[2] 张维. 神华八轴机车无线同步控制的制动系统软件设计 [J]. 铁道机车车辆, 2016, 36 (5): 51-56.
ZHANG W. Software Design of Wireless Synchronous Control for Shenhua 8-axle Locomotive Brake System [J]. Railway Locomotive & Car, 2016, 36 (5): 51-56.

[3] 中国铁路总公司. TJ/JW 024—2014 中国机车远程监测与诊断系统 (CMD 系统) 车载子系统暂行技术规范 [S]. 2014.

[4] 刘德芳. 基于规则的任务管理系统的设计与实现 [D]. 南昌: 南昌大学, 2016.

[5] 矫健, 郭悦, 贾志凯. 动车组检修数据同步机制研究 [C] // 吴忠泽. 第十一届中国智能交通年会大会论文集. 北京: 电子工业出版社, 2016: 1135-1141.

[6] 陈铖, 邹涛. 一种基于时间序列的动态加密方法 [J]. 通信技术, 2011, 44 (4): 127-128.

[7] 刘明, 方娇莉, 尹业华, 等. 嵌入式监控系统中断点续传的设计与实现 [J]. 计算机技术与发展, 2012, 22 (2): 192-195.
LIU M, FANG J L, YIN Y H, et al. Design and Implementation of Function of Broken-Point Continuingly-Transferring in Embedded System [J]. Computer Technology and Development, 2012, 22 (2): 192-195.

[8] 杨占民, 曹斌, 阎凡兵, 等. 基于 MD5 和数字水印的电子签章文件校验方案 [J]. 贵州大学学报 (自然科学版), 2013, 30 (3): 113-117.
YANG Z M, CAO B, LV F B, et al. Electronic Signature File Check Scheme Based on MD5 and Digital Watermark [J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2013, 30 (3): 113-117.

[9] WANG X J, FAN L X. The Application Research of MD5 Encryption Algorithm in DCT Digital Watermarking [J]. Physics Procedia, 2012, 25: 1264-1269.

[10] BANERJEE U, VASHISHTHA A, SAXENA M. Evaluation of the Capabilities of WireShark as a tool for Intrusion Detection [J]. International Journal of Computer Applications, 2011, 6(7): 1-5.

(上接第 59 页)

[2] IEEE-SA Standards Board. IEEE Standard for Communications-Base Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements [EB/OL]. [2017-12-01]. <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1474.1-2004.htm>.

[3] Railway applications—Urban guided transport management and command/control systems-Part2: Functional requirements specification: IEC62290-2 [S].

[4] 杨光, 唐祯敏. 高速磁浮列车运行控制系统体系结构研究 [J]. 中国铁道科学, 2006, 27 (6): 68-69.

[5] 王瑞峰, 高继祥. 铁路信号运营基础 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.

[6] 华钢, 左明. 轨道运输监控系统长进路的自动生成 [J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28 (3): 289-290.
HUA G, ZUO M. Auto-Generation of Long Admission Passage in Railway Conveying Monitoring System [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28 (3): 289-290.

[7] Railway applications—Urban guided transport management and command/control systems-Part 3: System requirements specification: IEC62290-3 [S].