

智能轨道快运系统用综合无线通信系统的设计

李 缘, 胡云卿, 张 恒, 陈 杨, 张 楠
(中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 综合无线通信系统主要负责轨道车辆与地面系统的通信、数据传输及语音通话功能。文章根据智能轨道快运系统的运营需求, 进行定制化的系统方案和功能设计, 其利用 4G 公网或自建专网模式, 实现了智能轨道快运系统的车地数据传输、语音呼叫、数据安全等功能。实际项目验证表明, 本方案可有效承载列车运行、生产运营、乘客服务等相关业务。

关键词: 综合无线通信系统; 数据传输; 智能轨道快运系统; 长期演进 (LTE); 轨道交通终端 (TAU)

中图分类号: U491.5⁺1

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2021)02-0080-06

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2021.02.014

Design of Integrated Wireless Communication System for Autonomous-rail Rapid Transit

LI Yuan, HU Yunqing, ZHANG Heng, CHEN Yang, ZHANG Nan
(CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Integrated wireless communication system is mainly responsible for the communication, data transmission and voice call function between rail vehicle and its ground system. In this paper, according to the requirements of autonomous-rail rapid transit, a customized system scheme and functional requirements are designed using 4G public network or self-built private network mode to realize functions such as train to ground data transmission, voice call, data security management and so on. Actual project verification results show that this scheme can effectively carry the train operation, production and operation, passenger service and other customer service related business.

Keywords: integrated wireless communication system; data transmission; autonomous-rail rapid transit; long term evolution(LTE); train access unit(TAU)

0 引言

综合无线通信系统作为智能轨道快运系统 (autonomous-rail rapid transit, ART) 的重要组成部分^[1], 其主要负责智轨电车车载设备与地面设备之间的信号与数据交互, 满足 ART 智能化运营需求, 为业主提供运营调度、服务、应急指挥的车地传输通道。

常规的轨道交通综合无线通信系统因频谱资源紧张, 申请困难, 且建设成本难以降低, 不宜被直接用于 ART 系统^[2]。本文根据 ART 车地数据交互量少、行车线路处于城市建筑物之间的特点, 设计了一种 ART 综合无线通信系统方案, 其可行性通过实际市场项目得以验证。

1 系统方案

ART 综合无线系统的设计是基于智轨电车三编组模式及其可共用城市现有车道的特性进行的, 可确保语音及数据通信功能、调度管理功能的实现,

收稿日期: 2020-09-03

作者简介: 李缘 (1985—), 男, 工程师, 从事有轨电车及智能轨道快运系统通信系统设计工作。

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1201602)

并保证通信全线场强覆盖；同时，系统的安全性、可靠性、可扩容性和后期工程的延续性也是系统设计的重要考虑项点^[3]。

1.1 无线制式选择

根据 ART 的综合无线通信系统需求，可选择 LTE（4G）公网或专网进行数据承载^[4]。

综合无线公网通信，即借助移动通信运营商的 4G 无线网络来提供“语音+数据”的通信能力，其无须地面额外建设无线基站、增加射频拉远单元（remote radio unit，RRU）设备，可节约前期投资成本并缩短建设周期；但网络可能会因为短时间内数据量激增而造成信道阻塞，导致无法满足现场调度、视频回传及车载人工广播等通信需求。

综合无线专网通信系统，对其需自行铺设沿途基站设备，以使 ART 项目所有通信设备得以全面覆盖，且网络资源可以不被其他不相关用户占用，具有安全性、可靠性及可控性方面的优势；但需要提前向当地电信部门申请频段，且前期投资较大，后期也需要投入一部分维护费用^[5]。

公网和专网详细对比如表 1 所示。

表 1 公网与专网对比		
Tab. 1 Comparison between public network and private network		
特性	公网	专网
覆盖方式	依托运营商基站，覆盖范围广	自建基站，覆盖指定范围，但需申请频段
数据安全性	需增加加密措施，安全性低	安全性高，数据不外流，在用户内部
可控性	不可控，网络资源可能被占用	完全可控
网络延迟	较高，根据公网环境波动较大	较低
故障分析便捷性	难，需要运营商配合	易
成本	投资低，长期租赁	前期投资高，后续维护成本低
建造周期	短	长

1.2 方案设计

常规综合无线通信系统包含车载子系统和地面子系统两部分。本文设计的 ART 综合无线通信系统结合 ART 特点，在满足智轨电车需求前提下，简化了综合无线通信系统部分功能，从而节约了建设成本^[6]。简化后的 ART 综合无线系统架构(以公网为例)如图 1 所示。

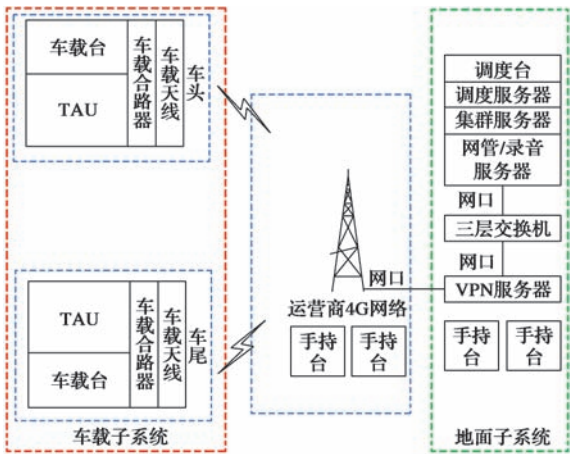


图 1 ART 综合无线系统架构
Fig. 1 Architecture of the ART integrated wireless system

1.2.1 车载子系统

长期演进（long term evolution，LTE）车载轨道交通终端（train access unit，TAU）被部署在列车编组的前后带司机室车厢，TAU 天线被安装在带司机室车厢外侧顶部，TAU 通过以太网接口与车内交换机连接，以实现 TAU 与车内数据业务的信息交互；车内采用以太网组网，各车厢通过车载交换机互联。乘客信息系统（passenger information system，PIS）地面服务器的流媒体信息则通过运营商网络经 TAU 下发到车内的 PIS 播放控制器上。另外，在车辆上部署二次开发集群车载台，以实现列车调度的相关业务功能。ART 车载子系统结构如图 2 所示。

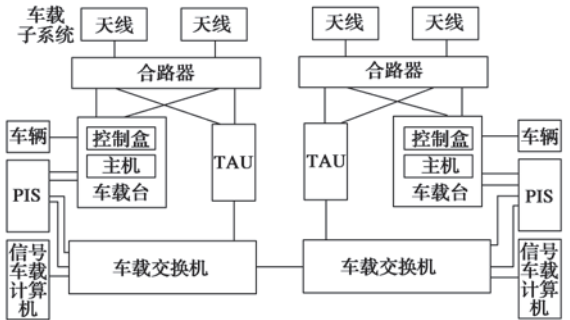


图 2 ART 车载无线通信系统结构
Fig. 2 Structure of the ART on-board wireless subsystem

1.2.2 地面子系统

地面子系统结构如图 3 所示。其中控制中心放置各专用通信系统的中心设备，包括 VPN 服务器、三层交换机、集群服务器、调度服务器、调度台、网管录音服务器、网管录音终端^[7]。VPN 服务器为 19 inch（1 inch=2.54 cm）设备。VPN 服务器向上通过三层交换机经传输网交换机与视频监控系统（closed circuit television，CCTV）的地面服务器、PIS 的地

面服务器、信号系统等设备连接。

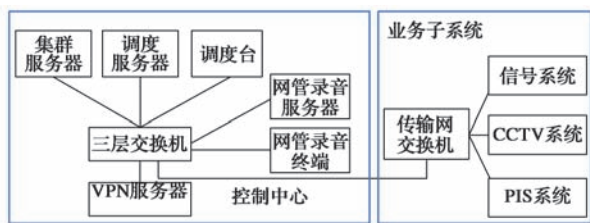


图3 ART综合无线通信系统地面子系统结构
Fig.3 Structure of the ART ground wireless subsystem

2 系统功能

ART综合无线通信系统可为信号系统提供业务数据双向传输、CCTV视频监控信息上传等数据传输业务，同时具备语音集群调度功能^[8]。

2.1 基本要求

根据ART整体要求，采用无线通信技术来保障车地数据传输能稳定、可靠、安全地进行，ART综合无线通信系统基本要求如下：

(1) 多天线接送信号。系统终端支持 2×2 双天线多输入多输出(multi input multi output, MIMO)技术。在下行链路中，多天线发送方式包括发送分集、空间复用、多用户MIMO和波束赋形等传输模式；在上行链路中，多个用户组成的虚拟MIMO也进一步提高了上行系统容量。

(2) 越区切换。车载子系统与地面系统配合，以支持跨RRU的越区切换，切换指标依赖运营商网络技术要求。

(3) 网络安全。系统应具备多种方式和层次的访问控制安全机制，限制非法接入，采取安全策略以保证网络的安全性。

(4) 质量服务(quality of service, QoS)机制。系统必须支持基于运营商网络的QoS算法。

(5) 隔离要求。车载子系统应能实现车载PIS/CCTV系统与信号系统的隔离；TAU上电期间，LAN口之间不得进行数据交互。

(6) 天线要求。系统车载天线不得对信号系统车载天线产生干扰。

(7) 组播功能。系统应能支持实现组播功能。

2.2 系统数据传输功能

车载子系统与地面子系统配合实现车辆与地面之间信号数据的双向传输，包括车辆位置、速度等信息的上传以及时刻表、临时限速等信息的下发。

信号业务要求通信优先级高，即要求车载子系统及地面子系统最先保证该业务的传输，且该业务的传

输不受其他业务传输的影响。

车载子系统与地面子系统配合工作。一方面为地面与车辆之间PIS业务数据的下发提供传输通道，即由地面PIS服务器将视频或图像信息通过广播或者组播传输到车厢内播放。PIS业务传输的视频图像分为标清或高清两种，一般下行传输速率为 $2 \sim 8$ Mb/s。另一方面，为车辆与地面之间CCTV业务数据提供传输通道，即将车辆视频监控图像通过无线通信的方式实时传输到控制中心进行集中监控。

2.3 系统语音功能

综合无线通信系统不仅具备提供语音点呼、组呼、紧急呼叫及广播呼叫等基本集群业务功能，还提供了编组、抢占优先级、呼叫转接、动态重组、强插/强拆等高级集群业务。此外，系统还具备消息业务功能。系统语音功能具体如下：

(1) 语音点呼。其指一个主叫方与一个被叫方(即一对一)之间的全双工、半双工呼叫。

(2) 语音组呼。其作为集群的基本功能，是一个主叫方与多个被叫方(即一对多)之间的半双工呼叫。组呼模式是多个独立的移动台(或调度台与多个移动台)之间进行的一点对多点通信，用户或者调度员都可以发起组呼。组呼的被叫方可以是用户，也可以是调度台。

(3) 广播呼叫。其指一个主叫方与多个被叫方(即一对多)之间的单工呼叫。广播呼叫过程中，只允许呼叫发起方讲话。

(4) 紧急呼叫。其是一种在紧急情况下的特殊呼叫方式，具有最高呼叫优先级，用以在最短时间内、以最便捷的方式将信息通报给预先指定的用户或者群组。紧急呼叫发起的同时，系统将自动向调度台和被叫方发送声光告警提示信息，即调度台在收到紧急呼叫请求后会有声音和图像提示，同时显示紧急呼叫发起者的用户名。

(5) 强插/强拆。通话组呼叫过程中，调度员可以通过调度台强行介入此通话组的通话，并具有优先权。此功能确保调度员能够向一个通话组发布重要信息，而不管是否有成员正在发话。强插是具有权限的调度台能插入到一个正在进行的组呼中，并获得当前组呼的话权；且调度台能从插入的组呼中退出，该组呼继续保持。强拆是指具有权限的调度台强行释放某个组呼或单呼，以释放信道。

(6) 消息业务。其指终端用户之间、调度台和终端用户之间的点对点短信、点对群组短信，其单条短信不少于200个字节。调度台支持预置短信功

能，最多可预置 100 条短信。支持预定义状态短信和紧急状态短信功能。调度台支持所有已接收、已发送短信的保存与导出。当达到短信存储限额时，会有提醒。

(7) 车载广播呼叫。行车调度员可以对其管辖的某一列电车、部分电车或全部正线电车进行乘客广播。电车广播功能需要车载台和车载广播系统设备配合，需要设计车载台和车载广播系统之间的接口来交互广播指令和语音信息。

(8) 抢占优先呼叫。有权限的用户发起呼叫时，可选择本次呼叫为抢占优先呼叫。该呼叫拥有高优先级，可通过强拆低级别呼叫的方式抢占资源。

(9) 话权管理。组呼或半双工单呼建立后，主叫获得首次话权，组内成员可通过按下 PTT 键进行话权申请，由系统决定话权分配；松开 PTT 键可释放话权，即可取消排队。话权管理包括话权申请、话权释放、话权抢占、话权排队、话权提示功能。

(10) 迟后接入。在组呼建立时，用户因关机或不在服务区等原因没能及时加入呼叫，一旦用户开机、进入服务区或主动拨打激活组时，系统能够将该用户加入呼叫中。

(11) 扫描群组。系统支持用户扫描一个或者多个群组，当扫描到某个组有集群通话时，及时参与通话。当终端扫描的多个通话组都有语音呼叫时，终端可以自动接入高优先级的呼叫，确保用户不会错过高优先级通话组的重要讲话。

(12) 呼叫转接。其指当用户由于被叫号码未知、呼叫权限限制等原因，无法直接与被叫用户通信时，可以拨打调度台号码来呼叫集团调度台。

(13) 动态重组。调度台出于工作需要，可以对所管理的用户进行灵活的动态编组。调度台可以将若干个群组（称之为子群组）和（或）若干个用户（称之为子用户），重组到另外一个已经存在的群组（称之为母群组）中。调度台可以将子群组或者子用户从母群组中撤销。

3 方案验证

综上，结合宜宾 ART T1 线（含主线和支线）LTE 系统需求，本文定制了宜宾 ART 综合无线系统设计方案。该系统主要由核心网（EPC）、基站设备、车载设备及手持终端等组成，系统结构如图 4 所示。

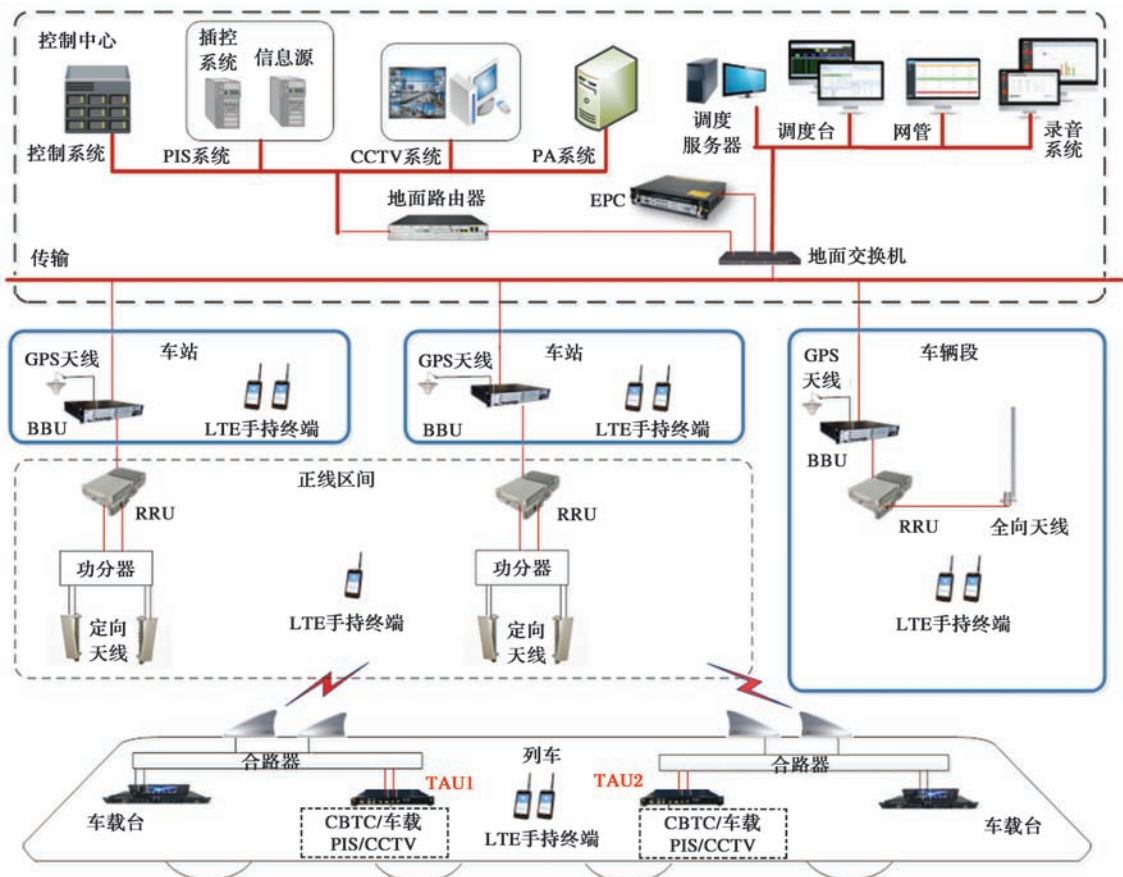


图 4 宜宾智轨综合无线系统结构

Fig. 4 Structure diagram of the intelligent rail integrated wireless system for Yibin ART

3.1 无线制式选择

根据宜宾 ART T1 线建设情况，为保证在紧急事件发生时网络资源不被其他不相关用户占用而影响紧急信息的传送，并保证通话内容和数据对外保密，要求网络具有极强的安全性、高可靠性保障；同时考虑到后期其他线路建设需要的拓展功能，本项目采用 LTE 专网承载的传输方式。

3.2 系统组成

LTE 无线专网通信系统由核心网设备、基站基带处理单元（building based band unit，BBU）设备、基站 RRU 设备、天馈系统（含功分器、合路器和天线）以及传输通道等组成。

车辆段（含控制中心）部署核心网设备、业务接入交换机。

线路覆盖方式采用“BBU+RRU”方案。在工程沿线设置 BBU/RRU 设备，其中 BBU 通过传输系统提供的传输通道与调度中心核心网连接，RRU 采用光纤与 BBU 直接连接。

在智轨电车上部署 TAU、合路器、车载台及天线等设备，车辆数据通过车载网络连接到车载 TAU，经过合路器和天线与地面无线系统相连，车载台承担车辆的语音呼叫业务。

3.3 频率规划

国家无线电管理委员会批复宜宾 ART T1 线使用的频段是 1 790~1 800 MHz，全线共使用了 8 套 BBU，20 个 RRU。全线共经 20 个区，无线通信工作频率全部均在 1 790~1 800 MHz 范围内。

3.4 业务规划

LTE 无线通信系统为控制中心与列车之间提供车地数据传输通道，涉及的业务包含信号系统的车地通信、车载视频的上传和地面 PIS 信息的下发，车地传输的带宽如表 2 所示。

表 2 带宽计算
Tab. 2 Bandwidth calculation

项目	上行需求速率 / ($\text{kb}\cdot\text{s}^{-1}$)	下行需求速率 / ($\text{kb}\cdot\text{s}^{-1}$)	备注
手持终端	50	50	1 部
车载台（集群）	100	100	2 台
TAU- 信号及车辆状态信号	100	150	2 路
TAU-CCTV	4 000	0	2 路
TAU-PIS	0	4 000	2 路
合计	4 250	4 300	

当单小区只存在 1 列车时，LTE 无线通信系统上行总带宽为 4.25 Mb/s，下行总带宽为 4.3 Mb/s；当单个小区内限定最多存在 3 列车，LTE 无线通信系统上行总带宽为 12.75 Mb/s，下行总带宽为 12.9 Mb/s。

3.5 无线通信信号覆盖方案

正线区间设置 RRU 设备和室外定向天线。在车辆段（含控制中心）通信设备室内设置 BBU 设备，在车辆段楼顶设置 RRU 设备、天线杆塔和室外全向天线。

在城市轨道交通场景下，在无线信号发射端 RRU 处的主要损耗参考值如表 3 所示。由表可知，RRU 发射端的天线馈线、合路器损耗、线缆损耗合计约 2.3 dB，则无线通信信号连接损耗按 2.5 dB 计算。

表 3 RRU 传输损耗
Tab. 3 Transmission loss of RRU

名称	单位损耗 / dB	计入 单位值	损耗 / dB
合路器损耗	7	0	0
二公分损耗	3.3	0	0
1/2" 跳线传输损耗（每百米）	10.5	0.2	2.1
7/8" 传输电缆传输损耗	5.5	0	0
接头插入损耗	0.1	2	0.2
合计			2.3

在无线信号接收端 TAU 处的主要损耗参考值如表 4 所示。由表可知，TAU 接收端的天线馈线、合路器损耗、线缆损耗合计约 8.975 dB，则无线通信信号穿透损耗按 10 dB 计算。

表 4 TAU 传输损耗
Tab. 4 Transmission loss of TAU

名称	单位损耗 / dB	计入 单位值	损耗 / dB
合路器损耗	7	1	7
二公分损耗	3.3	0	0
1/2" 跳线传输损耗（每百米）	10.5	0.15	1.575
7/8" 传输电缆传输损耗	5.5	0	0
接头插入损耗	0.1	4	0.4
合计			8.975

采用自由空间传播模型对 LTE 系统信号覆盖链路进行计算。根据实际场景设置模型参数，具体如下：系统带宽为 10 MHz；系统子帧配比为 0，特殊子帧配比为 7；信道类型为 EPA 步行者信道模型；中心工作频率为 1 795 MHz；模型为郊区；穿透损耗

为 10 dB；连接损耗为 2.5 dB；开启 HARQ，双天线；天线挂高 20 m。根据以上配置，RRU 单向覆盖最大距离为 640 m。

3.6 扫频测试及结果

用扫频仪分析全线设备所处环境在 1 790~1 800 MHz 频率附近的无线干扰情况，发现全线都存在 1 805-1 815 MHz 的强邻带干扰。在未安装滤波器的情况下，系统会对现场的 ART 综合无线通信系统 RRU 工作信号造成较强干扰；但在全线 RRU 安装了滤波器以后，避免了该强邻带干扰的影响。

4 结语

本文根据车地通信及行车线路特点，提出一种 ART 综合无线通信系统方案。该方案被用于在宜宾 ART 项目中。该线路自 2019 年 12 月全线开通运行后，ART 综合无线通信系统运行良好，可有效承载列车运行相关业务，为列车提供了一个安全、可靠的数据传输通道。

目前该综合无线通信系统受制于 LTE（4G）传输数据量及带宽的影响，仅能满足现有的运营行车需求。随着 5G 通信的发展，若采用 5G 无线通信技术，综合无线通信系统将在传输速率、时延、连接数据量等性能方面都有更大的提升。

参考文献：

[1] 陈杨,张恒,李缘,等.智能轨道快运系统乘客信息系统设计[J].控制与信息技术,2020(1): 87-92.
CHEN Y, ZHANG H, LI Y, et al. Design of the Passenger Information System for Autonomous-rail Rapid Transit[J]. Control and Information Technology, 2020(1): 87-92.

[2] 张恒.浅析城市智能轨道快运系统设计要点[J].智能城市,2018,4(4): 106-107.

[3] 李博睿.轨道交通通信业务及承载方案分析[J].中国新通信,2019(6): 12-13.

[4] 黄辉.基于TDD-LTE技术的城市轨道交通车地无线通信网络化技术[J].城市轨道交通研究,2016,19(4): 29-33.
HUANG H. Networking of Metro Wireless Communication System Based on TDD LTE Technology[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(4): 29-33.

[5] 刘潍清,方鸣.地铁中的无线通信系统及其制式[J].现代城市轨道交通,2013(2): 16-20.
LIU W Q, FANG M. Wireless Communication Systems in Metro and Their Modes[J]. Modern Urban Transit, 2013(2):16-20.

[6] 郑继平,曹美阁,刘晓磊,等.轨道交通LTE车地无线综合通信网络方案设计与研究[J].城市建设理论研究(电子版),2019(15): 157.

[7] 中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会.LTE-M系统总体架构及系统功能规范:CZJS/T 0062—2016[S].北京:中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会,2016.

[8] 中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会.LTE-M系统需求规范:CZJS/T 0061—2016[S].北京:中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会,2016.



广告目录：

湖南中车时代通信信号有限公司（封二）；公益广告（后插1）；中车时代电动汽车股份有限公司（后插2，3）；株洲时代新材料科技股份有限公司（后插4）；安徽省康利亚股份有限公司（封三）；株洲中车时代电气股份有限公司（封四）