

智能轨道快运系统快速充电技术研究

肖磊, 张洪彬, 吴俊亮, 程玉溪, 粟爱军, 蒋小晴

(中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 针对智能轨道快运系统 (autonomous-rail rapid transit, ART) 大功率快速充电需求, 文章分析了车载动力电池式储能系统及地面快速充电系统对 ART 这种中小运量城市轨道交通制式的适应性及其带来的车地通信交互难题。通过对比分析超级电容式有轨电车及动力电池式公交客车充电方式, 基于 ART 线路运营特点, 提出了一种双无线通信链路的升弓充电方案。该方案通过引入无线通信链路, 解决了升弓充电无通信硬线情况下充电交互信息的传输问题; 同时在充电位配备射频定位系统, 配合司机在充电位一键完成升弓充电操作, 缩短了充电准备时间及实际充电时间, 提高了 ART 线路运营效率。实际应用结果证明了该方案的有效性和实用性。

关键词: 智能轨道快运系统; 储能系统; 充电系统; 无线链路; 升弓充电; 射频定位

中图分类号: TM910.6

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2020)01-0072-05

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2020.01.013

Research on the Charging Technology for Autonomous-rail Rapid Transit

XIAO Lei, ZHANG Hongbin, WU Junliang, CHENG Yuxi, SU Aijun, JIANG Xiaoqing

(CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Aiming at the high-power fast charging demand of autonomous-rail rapid transit (ART), a medium-volume urban rail transit system, it analyzed the adaptability of on-board power battery energy storage system and ground rapid charging system for ART. But this system architecture also brings the problem of vehicle-ground communication interaction into consideration. Based on a comparative analysis of the charging methods of supercapacitor trams and power battery buses, this paper proposed a double wireless charging scheme based on the characteristics of the operating lines of ART. By introducing the wireless communication link, the solution solves the problem of transmission of charging interactive information in the case of the pantograph raising charging scheme, which has no telecommunication lines. At the same time, the charging station is equipped with an RFID locating system, to cooperate with the driver to complete the pantograph raising charging operation with one button, shortening the charging preparation time and the actual charging time, and the efficiency of ART line operation is improved. Practical results verified the validity and utility of this scheme.

Keywords: autonomous-rail rapid transit(ART); energy storage system; charging system; wireless communication link; pantograph raising charging; RFID location

0 引言

在城市不断发展的今天, 城市轨道交通的应用越来越广泛^[1]。轨道交通架空网供电方式不仅需要设置大量接触网, 也给城市景观及配套设施的建设带来影响^[2], 因此, 使用无架空网供电的城市轨道交通系统越来越受

到城市管理者的青睐^[3]。基于车载储能的无架空网供电方案为其中一种重要技术路线, 其城市轨道交通中得到了越来越广泛的应用, 是目前车载储能方式的主要研究方向之一^[4], 也是智能轨道快运系统 (autonomous-rail rapid transit, ART) 采用的供电方式。

本文首先介绍了传统超级电容式有轨电车及动力电池式公交客车充电方式特点; 然后通过分析 ART 实际运营工况, 提出了一种基于双无线通信链路的升弓充电方案, 并从充电准备时间及实际充电时间两方面进行分

收稿日期: 2019-12-23

作者简介: 肖磊 (1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力电子与电力传动、车辆控制。

基金项目: 湖南省科技重大专项 (2017GK1010)

析,最后通过智轨电车正线充电测试结果验证了该方案的有效性,其可提高ART运营效率。

1 车载储能系统及地面充电系统需求分析

车载储能系统及地面充电系统作为ART能量之源,在整个大系统中扮演着重要角色^[5]。

目前储能式有轨电车常采用车载超级电容器为其储能装备,并在每个车站或每隔一个车站设置快速充电站,有轨电车车辆运行到站点后,在上下客间隙时间内完成充电工作^[6]。这种方式消除了运行线路区间段的架空线路,让线路更简洁、城市更美观^[7];但该模式下全线所需配备的快速充电站较多,导致供电系统成本居高不下。

车载动力电池已在新能源公交客车领域得到广泛应用。对于装配有动力电池的新能源车辆,其地面充电装置包括传导式和非接触式^[8]。传导式地面充电装置一般会设置充电枪,且内部配备通信接口,可在插枪后与车载电池管理系统(battery management system, BMS)构成CAN通信通路;但该方式充电功率小,充电速度慢。非接触式充电装置会配备车载充电机,直接在车内完成充电机与电池间的通信交互,该方式车地设备间无通信交互,简化了地面充电系统功能,但增加了车辆载重及设备所需安装空间。

ART作为一种中低运量城市轨道交通系统,大多数应用场景下发车时间间隔在5 min以上,在客流高峰时发车间隔时间约为3 min。如果快速充电系统能在5 min内完成智轨电车单向运行能耗的补充,即可仅在首末站设置快速充电站,首末站区间由车载动力电池供能。这将大幅降低ART在供电系统基础设施方面的成本投入。

通过计算与实际测试,三编组模式下的智轨电车线路运行综合电耗约为2.2 kW·h/km。针对极寒地区,如冬季在哈尔滨-30℃环境温度、AW3载荷且车载空调全负荷运行时,智轨电车线路运行电能损耗约为3.5 kW·h/km。针对极热地区,如夏季在卡塔尔50℃环境温度,同样工况下,智轨电车线路运行电能损耗约为3.2 kW·h/km。故对于长度在20 km以内运营线路,智轨电车单向运行电能损耗范围为44~70 kWh。智轨电车采用橡胶轮承载,对车辆载重敏感性高,故车载储能系统需在保证安全基础上尽可能提高能量密度,以在有限载重配额内发挥最大的续航能力。目前,国内超级电容器产品性能最好的能量密度也仅30 W·h/kg(不含冷却系统)^[9],其仅为快充型磷酸铁锂动力电池的1/5,价格约为快充型磷酸铁锂动力电池的15倍,寿命约为磷酸铁锂动力电池的2倍^[10]。

鉴于此,对于20 km里程内的运营线路,选择快充型磷酸铁锂电池作为智轨电车的储能系统,在线路首末站建设快速充电站,同时将充电变流功能移至地面充电系统,是满足ART运营要求且性价比最优的选择。表1示出ART电池系统基本参数。

表1 电池系统基本参数
Tab. 1 Battery system parameters

项目	性能
额定容量/A·h	368
标称电压/V	643.2
额定能量/kW·h	236.7
最大允许充电电流(SOC50%, 25℃)/A	868
最大允许充电功率/kW	600
最大允许放电电流(SOC50%, 25℃)/A	1 000
质量(含冷却系统)/kg	2 136

2 ART快速充电系统组成

ART快速充电系统由一体化预装式智能充电站、双极性充电轨、地面定位识别装置及无线通信系统构成。图1示出ART快速充电系统拓扑。

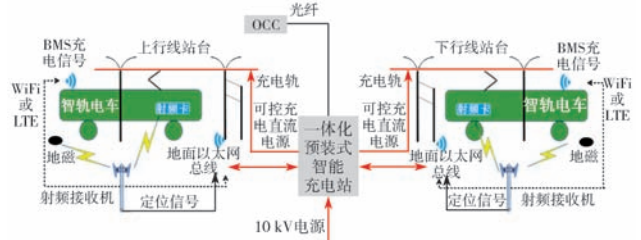


图1 ART快速充电系统拓扑
Fig. 1 Topology of ART quick-charging system

2.1 一体化预装式智能充电站

一体化预装式智能充电站采用集装箱形式将10 kV高压开关柜、三绕组特种变压器、低压配电柜、电抗器、变流器、隔离开关柜以及控制装置集成在一个15 m×3 m×3 m(长×宽×高)的集装箱中,单个集装箱可支持两个充电位,安装时现场仅需修建地基即可。

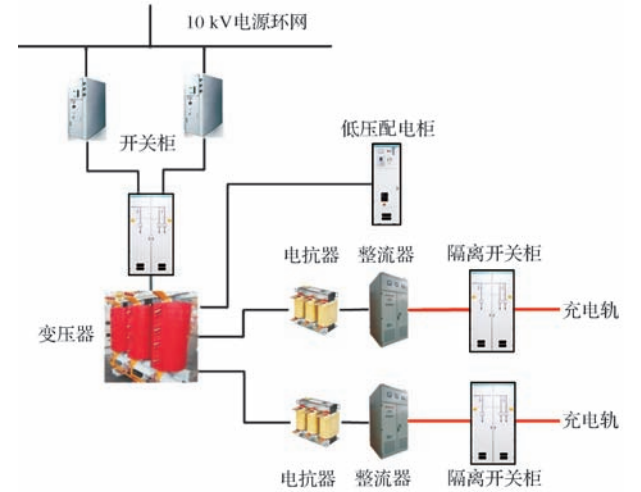


图2 预装式智能充电站关联关系
Fig. 2 Association diagram of pre-installed charging substation

10 kV 开关柜包括进线柜、计量柜、PT 柜和馈线柜。2 台进线柜由 2 路独立市政 10 kV 环网柜取电, 经馈线柜输出至变压器。三绕组特种变压器一次侧被接入馈线柜, 二次侧包含 2 路 500 V 充电回路绕组及 1 路 400 V 低压配电绕组。低压配电柜被接入变压器 AC 400 V 绕组, 用于供给智能充电站自用电及邻近站台用电。

电抗器被设置在变压器二次侧绕组与变流器之间, 用于滤波、无功补偿及限制短路电流等。

变流器采用“PWM 四象限整流 + 多重化 DC/DC 斩波”方案。PWM 四象限整流通过调节相电压和相电流矢量相位关系, 可有效提高变流器网侧功率因数。斩波部分采用双向三重错相控制, 可有效降低输出电流脉动。

隔离开关柜内集成安装有极性转换装置。其输出端配有电压互感器, 可在车辆升弓且完成弓轨接触后采集车载电池电压并自动配置直流输出极性, 最后直流电压经快速断路器及隔离开关后被输送至充电轨。

2.2 双极性充电轨

由于智轨电车采用胶轮承载, 其回流系统与有轨电车钢轮钢轨回流方式有所差异, 因此需配备双极性充电轨。双极性充电轨一般被设置于集装箱附近车站或单独设置的充电站点内。充电轨的长度需满足车辆双向行驶时车顶受电弓的触轨充电要求。充电轨包含一组铜铝合金材质的正负极双轨和一套充电轨带电灯显设备。

2.3 地面定位识别装置及无线通信系统

ART 快速充电系统借用为整个 ART 配备、由 WiFi 与 LTE(long term evolution) 建立双冗余备份的无线通信链路, 以实现智轨电车与快速充电系统的数据交互。

智轨电车定位系统包括地面设备(定位射频接收机和地磁等)和车载设备(射频标签卡)。车辆进入充电位后, 触发地面定位设备发出定位信息, 此时该充电位地面定位设备所绑定的地面充电桩与进站车辆建立无线通信链路连接, 完成车地充电信息交互的准备。

3 ART 快速充电系统控制策略及流程

3.1 控制策略及流程对比与分析

超级电容储能式车辆在充电时, 地面充电设备与车载储能装置间无需进行通信交互, 而是按固定的充电曲线(图 3)进行充电。地面设备通过弓轨接触方式采集超级电容电压信息, 在充电开始阶段, 采用额定恒流方式充电; 当超级电容模块电压升高至一定值时, 地面充电设备切换至恒压充电方式, 充电电流逐渐下降, 直至车辆降弓驶离, 充电结束。

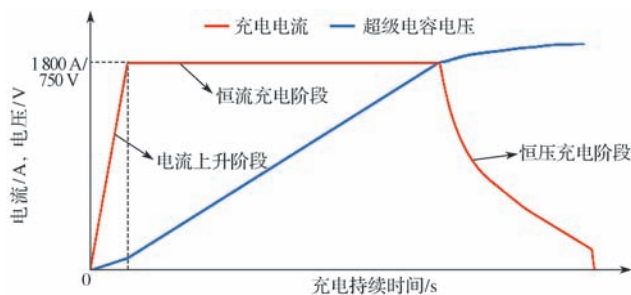


图 3 超级电容器充电电流/电压

Fig. 3 Charging current/voltage of super capacitor

动力电池储能式车辆在充电时, 相较超级电容储能方式, 储能电池的电化学模型对输入电流更敏感, 与电池正负极相接的充电装置其直流输出端不能仅靠检测电池电压的方式来切换充电模式。储能电池接收充电电流的能力会随单体电压、电池温度等参数的变化而变化。BMS 会根据电池自身状态持续更新充电电流需求, 而充电机则需实时地响应 BMS 的电流需求。因此地面充电机与车载 BMS 间的信息交互是一个持续且动态的过程。

车载动力电池在城市公交领域已得到大规模应用, ART 快速充电可以借鉴普通新能源电动公交车辆的充电策略。目前纯电动公交车辆一般采用插枪方式充电。为保证充电连接的安全性, 根据 GB/T 20234-2015《电动汽车传导充电用连接装置》标准, 充电枪插头与车载枪充口触头接触顺序为: (1) 保护接地; (2) 直流电源正负与车辆端连接确认; (3) 低压辅助电源正负与车辆端连接确认; (4) CAN 通信线与车辆端连接确认^[11]。

直流充电桩充电流程如图 4 所示^[12]。充电枪与车辆完成物理连接后, 充电桩控制器获得连接确认信号, 相关接触器导通, 低压辅助电源向回路供电; 电池与地面充电桩建立车地握手通信; 经绝缘检测、参数辨识后, 若一切正常, 则充电桩开始送电, 电池进入正式充电阶段^[13]。在充电阶段, BMS 实时监测车辆电池电压、电流和温度等参数并与充电桩进行通信, 以便充电桩及时调整输出电压和电流^[14]。

从开始物理连接操作至充电机启动输出电流这段时间被称为充电准备时间, 其主要包括插枪操作时间及充电机触控屏操作时间。参考市面上普通插枪式直流充电桩产品参数, 插枪操作耗时受人为因素影响较大, 通常耗时约 20 s, 插枪操作完成后, 低压通信回路、低压辅源回路及高压充电回路同时建立; 充电机触控屏操作耗时受充电机 CPU 处理器性能及系统高低压回路自检时间影响较大, 通常约 30 s, 故充电准备时间合计约 50 s。50 s 充电准备耗时对于公交车辆来说可以接受; 但 ART 线路

运营要求发车时间精确，发车间隔紧凑，故需尽可能缩短充电准备时间，以提高有限时间内的补电效率。

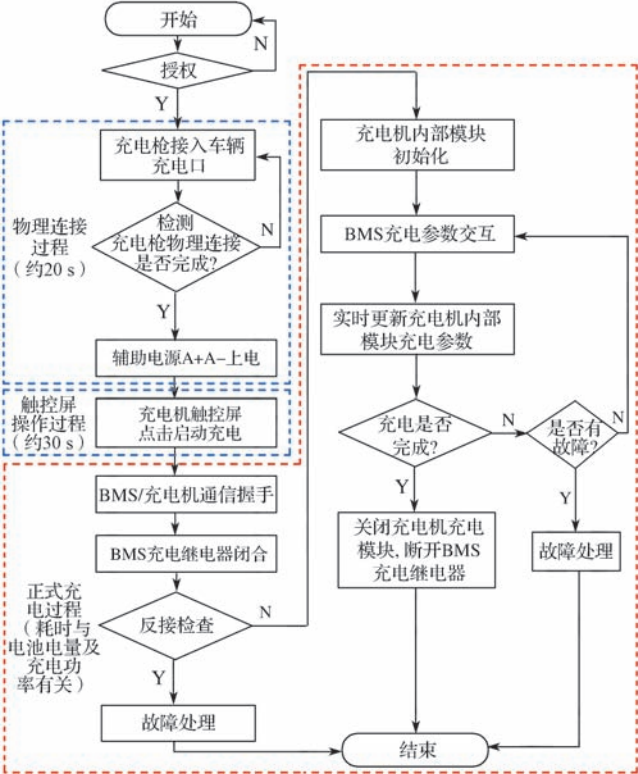


图4 直流充电桩充电流程
Fig. 4 Flow diagram of DC charging spot

3.2 专有充电策略与流程

在智轨电车充电系统中引入无线通信链路，以解决储能电池与地面充电系统之间的实时信息交互问题。充电系统无线通信包括 WiFi 和 4G-LTE 两种模式，优先使用 WiFi 通信链路，4G-LTE 模式作为备用通信链路。

智轨电车驶入充电站前，车载 WiFi 模块与地面 WiFi 完成连接，4G-LTE 模式实时进行连接。充电站存在多个充电位，为建立智轨电车与所在充电位间的网络地址对应关系，每个充电位配备 1 套射频定位设备；进站后，定位接收机可识别进站车辆车头安装的标签卡。上、下行充电站横向间隔约 4 m，射频定位精度小于 1 m，以保证车辆到站后定位的准确性。定位信息被识别成功后，射频接收机生成定位信息，并通过无线链路传至车辆；车辆根据位置信号确定目标地面充电机网络地址。

到达充电点后，司机点击“升弓”按钮（也可设置“自动升弓”），触发以太网无线链路的车载端确认数据向目标网络地址发出，自动建立车载网络设备与地面充电机以太网接口间的无线通信通路；同时车载受电弓继电器被触发闭合，其继电器反馈确认信号至 BMS，触发 BMS “充电允许” 状态位变化。类似于直流充电时，插枪后触发的 CC2 连接确认信号。

对于“弓充”流程，车辆驶入充电轨下，点击“升弓”

按钮（亦可设置为“自动升弓”）至充电机启动输出电流间的时间为充电准备时间。相较纯电动公交车的“枪充”流程，智轨电车的充电流程中，通过在车辆进站前建立车地以太网无线通信通路，将插枪操作中低压通信回路建立过程提前至充电准备时间之前；同时将插枪操作中人为因素影响降低。充电准备时间中等待弓轨接触耗时总共仅需 4 s。弓轨接触后可自动激活“启动充电”免去触控屏操作时间，系统回路自检耗时约 5 s。实际“弓充”充电准备时间仅为 9 s 左右，远低于“枪充”流程。图 5 示出智轨电车快速充电流程。

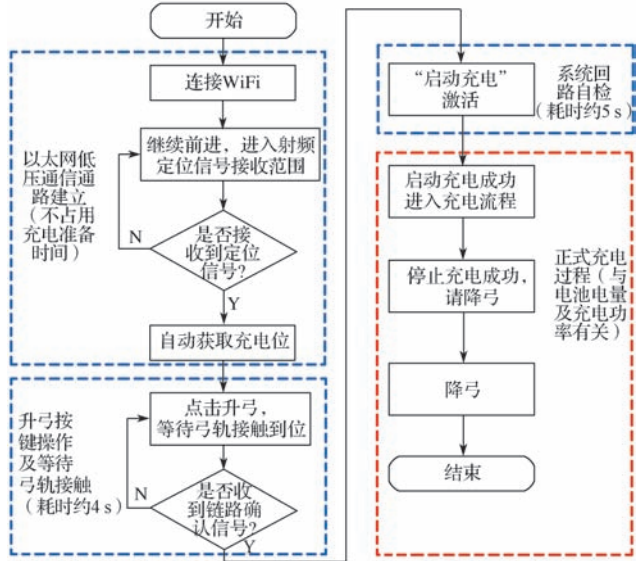


图5 智轨电车快速充电流程
Fig. 5 Charging flow of autonomous-rail rapid tram

通过建立无线通信交互，快速充电系统具备了根据车载 BMS 的充电电流需求进行分段充电的能力，最高可稳定输出 600 kW 电功率。相较于 150 kW 直流充电桩，输出同样电能时，ART 快速充电系统充电速度提升近 3 倍。通过缩短充电准备时间和实际充电时间，ART 运营线路在有限的发车间隔内充电效率得以提高，线路运营效率也随之提高。

智轨电车可双向行驶且地面快充设备配备有双极性充电轨，车顶受电弓升弓到位，在充电位完成弓轨接触后，地面充电机需先检测车载电池高压正负极；随后根据电池极性判断电能输出极性，并触发相应的隔离开关动作；隔离开关动作完成后，充电机进行车地充电回路绝缘检测，同时隔离开关后端充电模块启动电池电压检测，触发充电机“充电允许”开关，状态位变化，并通过无线通信链路向车载网络控制器 (vehicle control unit, VCU) 发送充电允许信息。

车辆收到充电机充电允许信息后，“启动充电”信号被激活，开始进入到 BMS 与充电机间按标准 GB/T 27930-2015 《电动汽车非车载传导式充电机与电

池管理系统之间的通信协议》要求进行的充电交互流程,包括充电握手、参数辨识和参数配置;上述报文信息正常,则触发充电准备就绪信号,从而进入正式充电过程。整个正式充电阶段,电池需持续发送充电需求和充电状态信息至充电机;充电机实时接收充电需求信息后,回复充电机状态报文,并持续监控整车端是否发送“停止充电”报文,若收到停止充电报文,则进入停止充电状态。

正式充电阶段,若经控制屏触发“停止充电”、“电池充满自动停充”及“故障停充”(包括充电机故障停充、电池故障停充和网络故障停充)等信号,则会导致充电过程终止。充电机在成功停止充电后,会退出车地无线连接状态,等待下一次车辆驶入而触发无线网络连接;同时,整车高压回路检测到无充电电流后,受电弓连接确认信号清零,受电弓继电器断开,继电器反馈状态位信息至BMS,触发电池充电允许状态位信号变化;控制屏触发“停充成功降弓”提示,司机点击“降弓”按钮,至此,车地充电交互结束,车辆等待下一次升弓触发充电交互流程。

4 测试验证

目前ART快速充电系统已在株洲市与宜宾市ART线路上进行部署及应用,获得了较好的效果^[15]。其关联设备主要涉及车载BMS、VCU和充电机。VCU与BMS间采用车载CAN总线协议通信,通过车内CAN通信线束直接连接;VCU与充电机通过无线通信链路完成数据交互^[16]。

CAN总线通信阶段交互内容包括充电握手、充电参数配置、充电阶段和充电结束。在充电阶段,电池采用分段恒流方式充电,由电池BMS根据电池荷电状态(state of charge, SOC)、单体电压及电芯温度等参数计算出充电电流需求;充电机作为分段恒流源,根据电池电流需求输出电能。图6示出ART快速充电系统输出电流波形。可以看出,快速充电系统根据BMS电流需求实行分段充电,最大输出电流达到868 A,输出功率稳定在600 kW,并在第一段300 s内完成了50 kW·h的电能输出,满足了系统的设计要求。目前ART快速充电系统已具备1 000 kW以上的充电能力,后续将通

过提升储能电池的受流能力来提升智轨电车的充电能力。在某些对发车密度需求较大的应用场景下,可通过增加车载储能电池配置以满足运营要求。

5 结语

ART作为一种新型中小运量轨道交通制式,为解决城市公共交通问题提供了一种新选择。本文针对智轨电车充电方式特点,提出了智轨电车的充电系统拓扑与充电控制策略。采用所提方案,大大缩短了充电准备时间和实际充电时间,提高了ART线路运营效率。

随着新能源车车辆车载以太网技术的推进,新一代储能电池BMS可直接与VCU通过车内以太网总线相连接,能有效减少通信链路节点,且双方数据交互无需协议转换,从而进一步保证交互数据的完整性和真实性^[17]。随着5G技术的发展,充电系统无线链路也可在现有4G-LTE基础上进行同步升级,将进一步提升数据传输的可靠性和传输速率。

参考文献:

- [1] 孔令洋. 城市轨道交通系统型式选择研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [2] 仇保兴. 加强落实城市公共交通优先发展战略[J]. 城市交通, 2006, 4(1):5-10.
- [3] 代珂璠. 城市公共交通与社会经济的适应性研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [4] 冯江华. 轨道交通装备技术演进与智能化发展[J]. 控制与信息技术, 2019(1): 1-6.
- [5] 张恒. 浅析城市智能轨道快运系统设计要点[J]. 智能交通, 2018(4): 106-107.
- [6] 陈裕楠. 基于超级电容的现代有轨电车充电装置的设计[D]. 武汉: 中国船舶研究院, 2016.
- [7] 田耕. 超级电容电动汽车的受电弓及自动快速充电站[J]. 北京汽车, 2009(5):37-41.
- [8] 孟伟, 张露. 浅谈电动汽车充电技术[J]. 汽车电器, 2015(6):1-4.
- [9] 张伟先, 文午. 储能式现代有轨电车地面充电系统[J]. 电力机车与城轨车辆, 2015(4): 30-32.
- [10] 徐蓓. 磷酸铁锂电池荷电状态估算及电池管理系统的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [11] 陶显峰. 电动汽车直流充电桩自动测试平台的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [12] 徐伟凡. 300kW直流充电桩的设计[D]. 合肥: 安徽工程大学, 2019.
- [13] 史冬冬. 电动汽车直流充电桩设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [14] 陆濛洲, 罗印升, 宋伟, 等. 电动汽车直流充电桩控制系统的设计与实现[J]. 电子科学技术, 2017, 4(4):101-107.
- [15] 肖华, 宿兰芳. 道无形, 驭有术 智轨系统跑出一条线、驶进一座城[J]. 城市轨道交通, 2017(8):48-49.
- [16] 张洪彬, 曾妮. 智轨电车惊艳亮相北京国际城市轨道交通展[J]. 城市轨道交通, 2018(7):56-57.
- [17] 赵帅. 智轨信号系统关键技术方案研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2019, 16(5), 56-58.

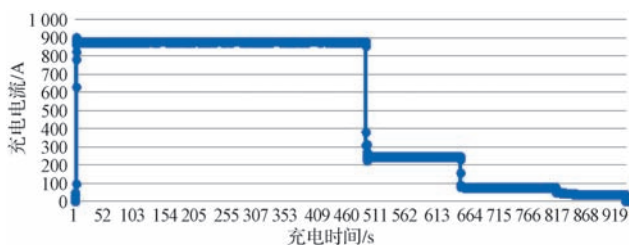


图6 ART快速充电系统输出电流

Fig. 6 Output current of ART quick-charging system