

纯电动城市客车无线充电系统设计

鲁飞, 雷超, 王爱林

(安徽安凯汽车股份有限公司, 合肥 230051)

摘要:本文针对12 m纯电动低地板城市客车,设计了一套高效、安全的无线充电系统。通过试验确定无线充电接收器的最佳充电距离为距地面225 mm。同时采用3 mm非磁性铝板作为金属屏蔽层,在确保充电效率的同时满足国际辐射防护委员会的人体防护要求。此外,还设计了无线充电控制器,能够精准控制并实时监测充电进程。最终实现静态充电、动态充电及休眠远程唤醒等功能。

关键词:纯电动城市客车;无线充电系统;充电发射器;充电接收器;充电控制器

中图分类号:U469.72

文献标志码:A

DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2025.04.007

Design of a Wireless Charging System for Pure Electric City Buses

LU Fei, LEI Chao, WANG Ailin

(Anhui Ankai Automobile Co., Ltd., Hefei 230051, China)

Abstract: Aiming at 12 m pure electric low-floor urban buses, this paper designs a highly efficient and secure wireless charging system. Through experimental verification, the optimal charging distance for the wireless charging receiver is 225 mm from the ground. Meanwhile, a 3 mm non-magnetic aluminum plate serves as the metal shielding layer, which not only ensures charging efficiency but also meets the human protection requirement of the International Commission on Radiological Protection (ICRP). Additionally, this paper designs a wireless charging controller, which can precisely control and monitor the charging process in real time. The system ultimately achieves functions including static charging, dynamic charging, and remote wake-up from hibernation.

Key words: pure electric city bus; wireless charging system; charging emitter; charging receiver; charging controller

随着电动客车数量的不断增加,大城市内的充电场地和车桩不足的问题日益凸显,寻找新型充电方式对于电动客车的发展尤为重要。法国已铺设了一段2 km长的电动汽车无线充电道路;我国也在试点道路上部署了无线充电装备^[1-2]。2022年,国家发展改革委等多部门联合出台了《关于进一步提升电动汽车充电基础设施服务保障能力的实施意见》^[3],其中明确提出要加强和推进无线充电等新型充电技术研发。2023年5月,工信部发布了首部无线充电领域的规范性文件——《无线充电(电力传输)设备无线电管理暂行规定》^[4]。在国家政策的推动下,汽车无线充

电技术的发展迎来了诸多利好^[5]。

1 无线充电城市客车总体方案设计

无线电能传输(Wireless Power Transmission, WPT)是一种无需物理接触即可传输电能的技术,其主要传输形式包括电磁感应、电磁谐振耦合、微波天线、激光等。本文采用的无线充电技术基于电磁谐振耦合原理,通过埋设在地下的无线充电发射装置,将电磁能经由车载无线充电接收器转换为电能,进而为电动汽车动力电池充电^[6-7]。

基于纯电动城市客车日常运营与充电需求,其通

收稿日期:2024-11-09。

第一作者:鲁飞(1989—),男,硕士,高级工程师,主要从事新能源客车系统集成设计工作。E-mail:lufei@ankai.com。

常采用 60~120 kW 充电功率的有线充电桩充电,每小时充电能量在 60~120 kW·h 之间。考虑到城市客车的运营特点,本文设计的无线充电方案将功率设定为 90 kW,通过 3 个无线充电接收器实现,即每个接收器的功率为 30 kW,可有效满足城市客车的运营需求。

1.1 充电场景分析

为了更好地设计无线充电控制系统,需要对无线充电客车的充电场景进行分析,具体可分为五大场景:

1) 场景 1——静态充电。车辆停在指定的充电点位后,为了确保无线充电达到最高效率,车辆的电子控制空气悬架系统(Electronic-Controlled Air Suspension, ECAS)会自动启动,精准降低车身高度,使无线充电接收器与地面充电装置处于最佳距离匹配状态。随后充电流程自动开启,确保电量稳步提升。充电结束或启动车辆时,ECAS 会将车身高度恢复至正常行驶位置。

2) 场景 2——动态充电。车辆一边行驶一边充电,此场景需将安全要素置于首位。考虑到行驶过程中的稳定性需求,ECAS 不对车身高度进行调节,车辆始终维持正常行驶高度,以避免因车身高度变化引发安全隐患。同时,无线充电系统会持续适配车辆的动态变化,保障充电稳定进行。此场景的动态充电发射器埋设在车辆运营的整条道路下,因而成本过高。

3) 场景 3——远程唤醒充电。这属于静态充电的一种特殊模式。车辆停车熄火后,车主若有紧急充电需求,可借助远程遥控装置,突破距离限制,轻松启动充电程序,让车辆在无人值守的情况下自动开启充电,实现便捷高效的充电体验。

4) 场景 4——远程唤醒充电失败后的再次尝试。若首次远程唤醒操作因信号干扰、电量过低或系统短暂故障等因素未能成功激活充电,系统将自动记录并排查问题,间隔 5 min 后再次有条不紊地执行远程唤醒充电操作,直至成功开启充电流程,确保车主的充电需求不被搁置。

5) 场景 5——充电未成功反馈。在整个充电过程中,若因充电接口故障、电池过热保护、外部电源中

断或其他意外状况导致充电无法顺利完成,车辆的智能监测系统会立即捕捉到异常,并及时、精准地将充电失败信息反馈至车主的移动端或车辆仪表盘,以便车主第一时间知晓情况并采取相应的补救措施。

1.2 无线充电系统总体布置方案

对上述五类无线充电场景进行分析,城市客车需配置无线充电接收器、无线充电控制器(本文称为 EVCU)、ECAS、仪表和天线等装置。其中,无线充电接收器用于将电磁能转换成电能;EVCU 用于与无线充电系统和整车进行中转控制;ECAS 用于调节车身高度;仪表用于显示无线充电状态信息;天线用于远程控制。上述各个部件的布置如图 1 所示。

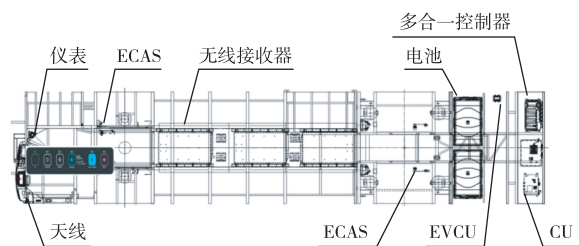


图 1 无线充电系统布置图

1.3 ECAS 高度调节设计

本文纯电动城市客车的无线充电方式为磁耦合谐振式。无线传输距离对无线充电发射器和接收器的工作效率有决定性影响。为确定无线充电的最佳距离,进行了相关测试,最终得到无线充电发射器和接收器之间的距离为 225 mm 时充电效率最高。

ECAS 通常有 3 个正常调节位置,分别是最低位置(180 mm)、正常位置(250 mm)和最高位置(320 mm)。正常行驶时,底架与地面的高度约为 250 mm。考虑到充电效率,本文设计的 ECAS 增加了第四位置,通过此功能可将无线充电时底架与地面的高度设定为 225 mm,从而实现最高充电效率。

2 无线接收器电磁屏蔽方案设计

无线充电接收装置布置在车辆底盘下(如图 2 所示),通过接收无线发射器的电磁波产生电能。无线充电系统周围的磁场强度不应超过标准安全范围,即不能让漏磁场影响充电系统周围的工作设备和车厢

外的人员。因此,需要在车辆上采取相应的电磁屏蔽措施进行防护。无线充电发射器与车身之间的屏蔽材料必须是非磁性材料才能有效阻隔磁场的传输。非磁性材料有铜、铝、黄铜等。金属铝的耦合系数和传输效率与黄铜、铜基本相当,而铝材料制作的屏蔽层比黄铜材料和铜材料的都要轻很多,且铝材价格较低。因此采用铝制材料作为金属屏蔽层^[8-11]。

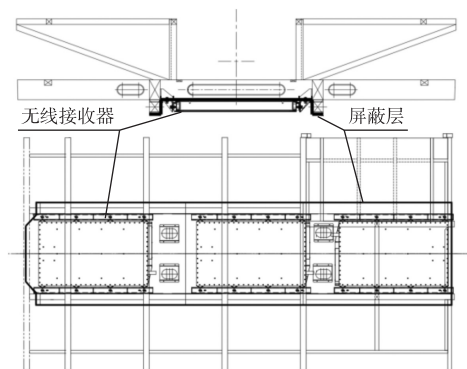


图2 无线充电接收器布置图

为了确定屏蔽层铝板的厚度,对不同厚度的屏蔽层铝板进行了样件测试。测试结果显示,当铝屏蔽层厚度分别为1、2、3 mm时,无线充电发射器和无线充电接收器的输出效率和传输效率变化不大。由于该铝板的尺寸较大,综合考虑屏蔽层铝板的结构强度和刚度,最终选用3 mm厚的非磁性铝板(5052-H36)制作金属屏蔽层。

3 无线充电流程及交互信息设计

根据上述无线充电场景,设计了无线充电流程,如图3所示。为实现无线充电功能,自主开发了无线充电控制器。该控制器统筹处理无线充电系统信息和整车信息,并对无线充电系统和整车进行控制,以实现静态、动态以及休眠等场景的无线充电功能。

根据无线充电流程设计方案,无线充电控制器需要与无线充电系统和整车交互大量信息,因此根据需求设计了整车和无线充电系统的通信内容,见表1。

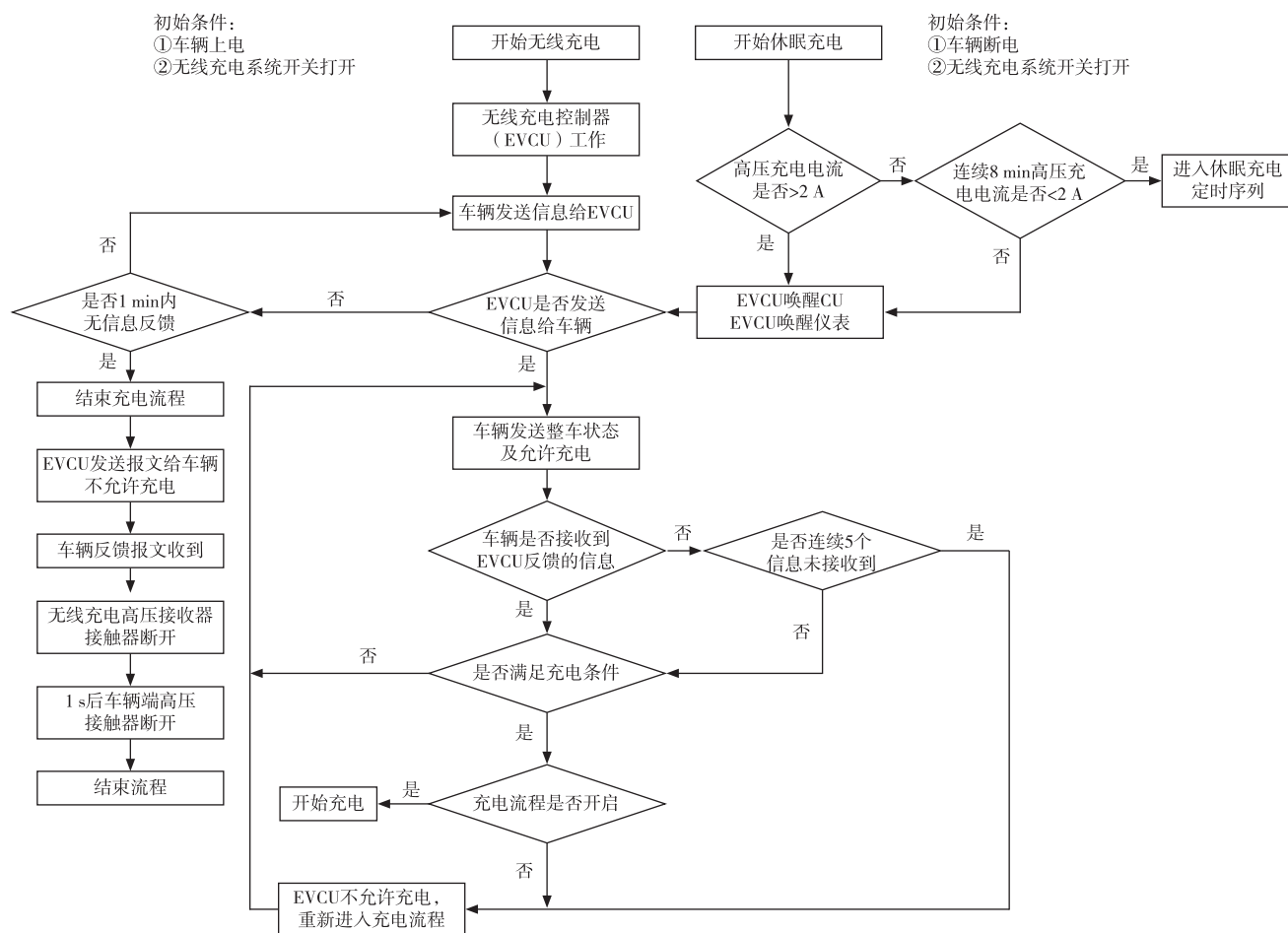


图3 无线充电流程图

表 1 通信信息表

节点	信息定义	信号定义	
	数据名称	分辨率	注释
Tx	允许充电	/	0=not allowed, 1= allowed Charge should only be allowed if
Tx	充电电流	2 A/1 bit	00000000= 0 A 10010101= 300 A
Tx	充电电量	1%/bit	00000000= 0% 1100101= 100%
Tx	电池温度	1 ℃/1 bit	00000000= -40 ℃ 10100001= 120 ℃
Tx	整车检测电流	2 A/1 bit	00000000= 0 A 11111111= 511 A
Tx	充电状态	/	0= discharging(-) 1= charging(+)
Tx	制动状态	/	0= off, 1= on(stop)
Tx	挡位状态	/	00- NA, 01- Neutral, 10- Drive, 11-Reverse
Tx	ECAS 状态	/	0= other, 1= second high level position
Rx	允许充电反馈	/	0=not allowed, 1= allowed
Rx	充电电流反馈	2 A/1 bit	00000000= 0 A 10010101= 300 A
Rx	充电功率	1 kW/1 bit	00000000= 0 kW 11111111= 255 kW
Rx	接收器工作状态	1count	Bit=0, no active receivers; Bit= 1, at least 1 active receiver
Rx	接收器错误反馈	/	Bit= 0, at least 1 active is functional Bit = 1, noreceivers are functional
Rx	充满电小时	4 bit	0000= 0, 1111= 15
Rx	充满电分钟	2 bit	00= 0, 01= 15, 10= 30, 11= 45
Rx	充电条件反馈	/	0= not possible, 1= possible

4 无线充电验证和电磁安全测试

4.1 无线充电功能验证

为验证纯电动城市客车无线充电的部分功能,搭建了无线充电功能模拟测试平台。其中,车载设备包括无线充电接收器系统、无线充电高低压连接线束、无线充电控制器以及装有动力电池的纯电动城市客车;地面充电设备包括便携式随车电源(模拟无线发射器)和测试线缆。

1) 场景 1 静态无线充电测试。开启无线充电系统电源开关和便携式电源,无线充电控制器检测到车辆车速为 0、挡位为空挡时被唤醒。此时若检测到无线接收器端有 2 A 电流,则进入静态无线充电流程。随后,无线充电控制器唤醒整车,检测故障,ECAS 调节车身为第二高度(225 mm),点亮仪表,并闭合高压无线充电回路,开始充电。

2) 场景 2 动态无线充电测试。无线充电控制器检测到车辆有车速、挡位为前进挡时被唤醒。此时若检测到无线接收器端有 2 A 电流,则进入动态无线充电流程。本文动态充电是模拟车辆动态情况,并非实际道路测试。

3) 场景 3、4 和 5 是场景 1 的延伸,充电测试结果基本一致。

4) 结束流程。当电池电量为 100%或者需要结束充电时,无线充电控制器控制无线充电高压回路断开,整车恢复到车辆充电起始状态,充电完成。

无线充电过程、结束流程以及再上电流程,均由无线充电控制器进行 24 小时不间断监控。监控期间,无线充电控制器会紧密结合整车状态开展工作,依据车辆的电量情况、各模块报文信息、高压接触器状态以及各个系统的要求,实时灵活调整监控策略,精准把控充电和非充电环节,以此确保无线充电系统安全可靠。

以上充电和结束充电流程均进行了多轮测试,无线充电控制器完成了所有功能的测试。最终,静态充电时单个无线接收器的充电功率可达 30 kW,充电效率超过 90%;动态充电功率可达 20 kW,充电效率超过 60%。

4.2 电磁安全测试

针对第 2 部分无线充电接收器设计的电磁屏蔽

方案,对电磁辐射数值进行测试,将车内车外分为 3 个区域,分别是 A、B1 和 B2。由于 B1 和 B2 是对称位置,最终选取 A 和 B1 进行测试,如图 4 所示。根据 ICNIRP^[12-13]规定,暴露的磁场强度应低于 $27\ \mu\text{T}$ 。经过多次测试,A 和 B1 两点的磁感应强度平均值分别为 $21.65\ \mu\text{T}$ 和 $25.65\ \mu\text{T}$,且各自多次测量结果的最大值均低于 $27\ \mu\text{T}$,满足要求^[12-13]。

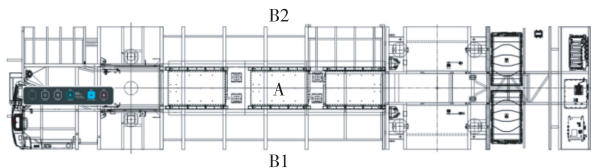


图 4 电磁安全测试

5 结束语

本文聚焦于城市客车无线充电技术,自主研发了无线充电控制器。该控制器实现了纯电动城市客车的静态和动态充电功能。但动态无线充电测试目前仅处于实验室阶段,其在实际道路环境下的可靠性还有待验证。后续计划开展实际道路测试,以验证无线充电功能的可靠性与稳定性。

参考文献:

- [1] 窦润田,张献,李永建,等. 磁耦合谐振无线电能传输系统电磁屏蔽应用发展与研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023,43(15):6020-6040.
- [2] 史佳兰,蔡黎,代妮娜,等. 电动汽车磁耦合谐振无线充电系统研究发展综述[J]. 电池工业,2022,26(4):190-192.
- [3] 发展改革委. 国家发展和改革委员会等部门关于进一步提升电动汽车充电基础设施服务保障能力的实施意见:发改能源规[2022]53号[A/OL]. (2022-01-10)[2024-11-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/21/content_5669780.htm.
- [4] 工业和信息化部. 无线充电(电力传输)设备无线电管理暂行规定[A/OL]. (2023-05-22)[2024-11-01]. https://www.gov.cn/gongbao/2023/issue_10626/202308/content_6897062.html.
- [5] 王瑜. 电动汽车无线充电系统发展现状与应用[J]. 汽车实用技术,2023,48(11):6-14.
- [6] 张强. 静态谐振式电动汽车无线充电系统研究[D]. 合肥:安徽理工大学,2021.
- [7] 李响. 电动汽车无线充电系统电磁屏蔽技术研究与效率优化[D]. 北京:北京交通大学,2021.
- [8] 李长青. 电动汽车无线充电线圈优化设计与磁屏蔽研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2021.
- [9] 张献,王朝晖,魏斌,等. 电动汽车无线充电系统中电屏蔽对空间磁场的影响分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1580-1588.
- [10] MOHAMMAD M, ONAR C O, GALIGEKERE P V, et al. Magnetic shield design for the double-D coil-based wireless charging System[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(12): 15740-15752.
- [11] 赵军,赵毅航,武志军,等. 电动汽车无线充电系统对心脏起搏器的电磁兼容与热效应影响[J]. 电工技术学报, 2022,37(增刊1): 1-10.
- [12] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz) [J]. Health Physics, 1998, 74(4): 494-522.
- [13] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz-100 kHz) [J]. Health Physics, 2010, 99(6): 818-836.