

Electric Bus Battery-Swapping System Based on Robots

QI Hui¹

Shandong Electric Power Research Institute
Electric Power Robotic Technology Laboratory of State
Grid Corporation of China
Jinan, China

WANG Xin²

Shandong Electric Power Research Institute
Electric Power Robotic Technology Laboratory of State
Grid Corporation of China
Jinan, China
wangx@powerrobot.org

Abstract—Electric Vehicle which could save energy and protect environment, is an important part of strong smart grid and will be the trend of automotive industry in the future. Nowadays, battery-swapping is the main method of EV charging. In this paper, electric bus battery-swapping system based on robots which includes cartesian robot, stacker and battery charging bay, is introduced considering mechanical parts and control system. At the same time, the experimental data and advanced techniques of the battery swap system are introduced finally.

Keywords- electric vehicle; battery-swapping system; mechanical parts; control system

I. 引言

电动汽车具有显著的节能和环保优势，推广应用电动汽车能够有效缓解石油资源紧张，提高居民生活质量^[1-3]。电动汽车已成为二十一世纪传统汽车工业改造和发展的主要方向，引起了世界范围内的普遍关注和重视^{[4][5]}。

电动汽车充换电基础设施是电动汽车产业链的重要组成部分^{[6][7]}，美国、欧盟、日本、韩国、中国等国家纷纷投入大量资金，启动基础设施关键技术设计和示范性工程规划建设^[8]。慢充、快充、换电池是电动汽车能源补充的主要方式^[9]。慢充方式耗费大量的充电时间，设备综合利用效率低，需大批配电网设施的升级改造^[10]；快充方式充电效率低，对电池组寿命损害大，向配电网侧产生大量谐波干扰^[11]；换电池方式能够解决上述问题，一方面，可实现电池的科学存储、合理充电、专业维护，实现电池的安全与质量问题的有效管控，另一方面，可实现充换电基础设施与智能电网的合理衔接，提高电力负荷的综合利用效率，同时也有利于电池组的梯度利用和回收^[12]。

“换电为主，插充为辅，集中充电，统一配送”是当前我国电动汽车能源补充的主要模式^[12]，该模式获得了电动汽车厂家、电池企业、运营单位的一致认可^{[13][14]}。本文从机械组成原理和控制系统设计两个方面入手，重点介绍了山东电力研究院基于多机器人协同技术的电动公交车换电系统最新研究成果，及其在山东临沂焦庄电动汽车智能充换电站的实验测试情况。

II. 系统概述

多机器人协同换电系统是基于国家电网公司电动汽车充换电站相关技术标准和设计规范的基础上设计完成的，由两套直角坐标机器人、堆垛机和电池充电架等设备组成。电池充电架底层设置四个中转台，可实现直角坐标机器人与堆垛机取放电池的合理衔接。其换电系统整体布局图如下图所示。

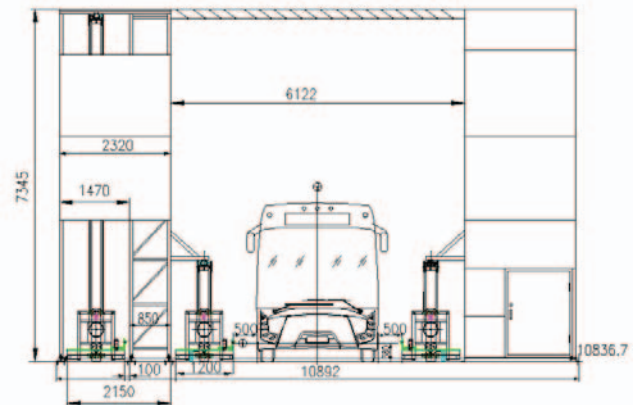


图 1 换电系统

Fig.1 Battery-swapping system

工作流程如下：

- A. 电动公交车驶入充换电站内后，操作人员打开电动公交车电池舱门，通过控制平台的开始按钮，启动直角坐标机器人和堆垛机的协调运转；
- B. 直角坐标机器人开始寻找到车内电池的靶点位置，根据传感器检测的车体位置信息，修正机器人自身姿态，其快换机械手将待充电电池顺序取出，放于电池充电架底层的中转台上；
- C. 堆垛机按照后台控制系统的指令从电池充电架上取出新电池，放到闲置的中转台上，再将直角坐标机器人快换机械手取出的待充电电池放到电池充电架的指定单元位置上；

- D. 直角坐标机器人的快换机械手将堆垛机取来的新电池放入电动公交车内。遵循相同的流程，完成九块电池的更换；
- E. 待全部电池更换完毕后，操作人员将电动公交车电池舱关闭，车辆驶出换电工位。

III. 系统设计

A. 直角坐标机器人

直角坐标机器人是电动公交多机器人协同换电系统核心设备，可通过与堆垛机交互，实现电动公交车电池的“以旧换新”。它包括水平移动、货叉伸缩、快换机械手伸缩、竖直升降、角度微调、俯仰纠偏六个方向自由度。结合传感器实时数据信息传递，在西门子 S7-300PLC 控制系统控制下，实现自由度方向的机械配合随动。直角坐标机器人外型如下图所示：



图 2 直角坐标机器人

Fig.2 Cartesian robot

六个自由度分别为：

水平移动(X 轴)：在交流伺服电机与减速器配合驱动下，机器人沿水平直线导轨行走。

货叉伸缩(Y 轴)：采用多级行程倍增机构，可实现机器人沿垂直龙门立柱方向伸缩。下叉固定，通过齿轮齿条驱动中叉运动，中叉又通过链轮带动上叉运动，可以使货叉取得两倍以上行程。

快换机械手伸缩(Y 轴)：采用齿轮齿条传动的机械原理，完成电池组的取放操作，其运动方向与货叉伸缩方向相同。

竖直升降(Z 轴)：采用钢丝绳传动的机械原理，实现机器人沿龙门立柱竖直方向进行升降运动。

角度微调(R 轴)：采用滚珠丝杠传动的机械原理，纠正电动公交车停车位置轴线与机器人地轨平行度偏差，克服了电动公交车左右倾斜的问题。

俯仰纠偏(T 轴)：采用滚珠丝杠传动的机械原理，纠正电动公交车电池左右不同高度上的偏差，解决了车体头尾倾斜的问题。

直角坐标机器人六个自由度配合随动以适应车体姿态和电池外箱的相对位置，克服了机器人对车体停靠位置的依赖，同时也解决了电池取放过程中电池相对位置变化的问题，提高了换电系统的自动化水平与设备运行可靠性。快换机械手上还设有柔性电磁吸盘和解锁装置。当机器人准确到位后，电磁吸盘吸住电池外箱，伺服电机驱动解锁装置动作，实现电池外箱机械锁开闭操作。

直角坐标机器人采用视觉、超声、色标、光电、拉力等多传感融合技术，确保直角坐标机器人的精确定位，准确完成电池的取放。

视觉传感器：位于机器人快换机械手的下端。传感器与电池外箱的靶点反光板相对应，传感器跟踪并计算出靶点反光板中心点的位置偏差，进而驱动直角坐标机器人到达 X 轴和 Z 轴方向上的准确位置。

超声传感器：位于机器人快换机械手两侧。采集快换机械手与电池外箱之间的距离信号，驱动直角坐标机器人到达 Y 轴方向上的准确位置。经过测试，传感器移动精度控制在 0.5mm 范围内，与感应面夹角 $\pm 10^\circ$ 之间可正常工作。

色标传感器：位于机器人快换机械手两侧。采集电池箱解锁信息(红色为闭锁，白色为解锁)，提供电池箱锁闭状态信息。

光电传感器：位于机器人各个自由度两端。检测原点、水平极限位置，确保直角坐标机器人的六个自由度方向的准确到位。

拉力传感器：测量钢丝绳的实际拉力，具备拉力过载保护功能。

B. 堆垛机



图 3 堆垛机

Fig.3 Stacker

堆垛机主要完成中转台与电池充电架单元之间的电池交互。它可进行水平行走，竖直升降，货叉伸缩三个自由度方向的运动，其快换机械手可实现电池组的取放及电磁锁的关闭等操作。由于中转台和电池充电架单元的电池位置是固定的，仅通过视觉传感器辨识中转台和电池充电架单元标识码，便可确定中转台和电池充电架单元的准确位置。

C. 电池充电架

电池充电架是由横梁和支柱连接组成的若干层结构的桁架体，电池在电池充电架单元上定位锁紧。工位分布为9行12列，每个充电单元外侧贴有标识码，内部含安装有光电开关和烟雾传感器。光电开关用于电池有无信息的判断，烟雾传感器可避免电池过充现象的发生。电池充电架顶端安装堆垛机天轨，正面安装直角坐标机器人天轨。电池充电架外型如下图所示。



图 4 电池充电架

Fig4 Battery-charging bay

电池充电架实现了整体充电区域的密封，可将充电环境控制在温度 25℃±5℃及湿度 75%恒定范围内，提高了不同季节电池能量的总体存储效率。

D. 控制系统

控制系统框图如下：

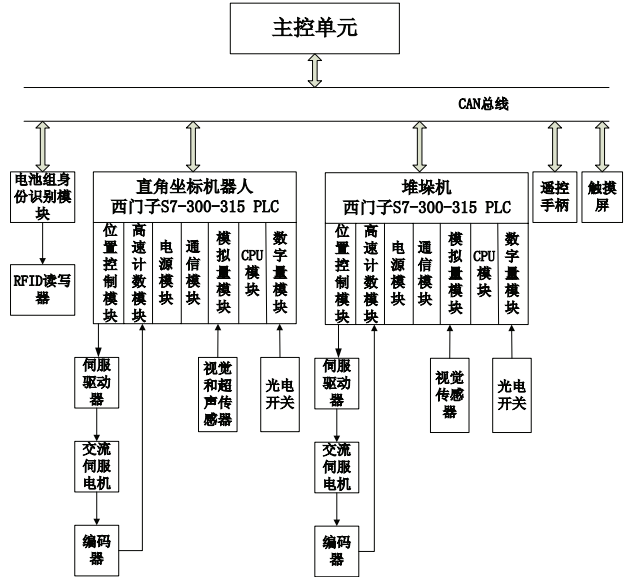


图 5 控制系统

Fig.5 Control system

主控单元为一工业控制计算机，提供整个换电系统的后台监控，是系统的关键核心部分。各个模块通过 CAN 总线实现与后台监控系统的实时通信。一方面，后台监控系统控制两侧机器人运动节拍，防止电池装卸过程中车体单侧倾斜现象的发生；另一方面，与两个堆垛机实时交互，提供堆垛机取放电池的充电架单元位置，协调快换机器人与堆垛机电池取放的配合衔接。

利用 RFID 读写器采集电池组换电次数、电量电压等信息，方便于电池组的定期维护；利用遥控手柄进行单步故障解决和示教轨迹规划，实现了换电系统的故障解除，提高了机器人的启动和运行效率；利用触摸屏启动和紧急关闭直角坐标机器人与堆垛机。

直角坐标机器人控制部分采用西门子 S7-300-315 PLC，内部整合了位置控制模块、高速计数模块、模拟量和数字量模块、CPU 模块等部分。位置控制模块控制六个自由度方向交流伺服电机动作范围，通过高速计数器采集电机反馈的码盘值，构成闭环控制系统[15]。所有伺服电机均采用位置环方式控制。天轨固定位置上的挡片，结合机器人光电传感器的读取，实现控制系统高速计数器定位中断，可规避机器人水平移动方向上因打滑出现的累计误差，确保机器人运动的准确性。利用 DMP 视觉传感器和超声传感器，可实现直角坐标机器人 X/Y/Z 三个方向上的精确定位。各个自由度机械部分两侧都安装有光电开关，可避免不同方向的超范围动作，同时实现机器人速度控制。

堆垛机与直角坐标机器人控制部分原理相似。由于电池充电架位置固定，因而堆垛机只需视觉传感器，配合读取电池充电架单元标识码，即可完成堆垛机与电池充电架单元间的精确定位。

当系统出现故障时，控制系统能够在不授权的情况下对运行设备进行急停，优先级为第一位。

IV. 结论



图 6 电动公交多机器人协同换电系统

Fig.6 Electric bus battery-swapping system based on robots

电动公交机器人协同作业换电系统如上图所示。采用直角坐标机器人和堆垛机器人基于中转平台协同作业的方式，系统已在山东临沂焦庄电动汽车充换电站内进行了现场运行实验。经过实验测试，每组电池平均更换时间少于 2 分钟，完成一辆公交车（9 组）电池更换时间不超过 10 分钟，满足了国家电网公司电动汽车充换电站的有关技术标准和设计规范。

整个系统采用了先进的机器人集群控、机械配合随动、轨迹示教规划技术，可自主完成电池更换任务。在显著提高电池更换效率的同时保证了换电作业的可靠性和稳定性。此外，机器人之间的相对独立也提高了系统的扩展性和维护性。

致谢

该成果来源于国家电网公司科技项目《电动汽车电池自动更换装置及监控系统研究》，项目编号：SGKJ[2011]05 号。

References

- [1] ZHANG Wen-liang, WU Bin, LI Wu-feng, et al. Discussion on Development Trend of Battery Electric Vehicles in China and Its Energy Supply Mode[J]. Power System Technology, 2009,33(4):1-6(In Chinese).
- [2] WU Ying-zi, WANG Kang, WEI Zhen-lin, et al. Matching policies of Chinese electric vehicles industry development[J]. Power Demand Side Management, 2008,10(2):71-74(In Chinese).
- [3] LI Pei-heng, YI Xiang-xiang, Hou Fu-shen. Current Situation of Foreign Electrical Automobile Development and Its Enlightenment to China[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2004, 30(1):48-54(In Chinese).
- [4] CHEN Qing-quan, SUN Li-qing. Status and future trends of electric vehicles[J]. Science & Technology Review, 2005, 23(4) : 24-28(In Chinese).
- [5] XIA De-jian. Overview on Research in Electric Vehicles[J]. Energy Technology and Economics, 2010, 22(7): 49-55(In Chinese).
- [6] XU Fan, YU Guo-qin, GU Lin-feng, et al. Tentative analysis of layout of electrical vehicle charging stations[J]. East china electric power, 2009,37(10):1678-1683(In Chinese).
- [7] LI Li-li, ZHANG Yi-bin, ZHOU Yuan-bing, et al. Infrastructures for the Electric Vehicles in china[J]. Energy Technology and Economics, 2011, 23(8): 6-10(In Chinese).
- [8] WU Ying-zi, WANG Kang, WEI Zhen-lin, et al. Matching policies of Chinese electric vehicles industry development[J]. Power Demand Side Management, 2008, 10(2):71-74(In Chinese).
- [9] KANG Ji-guang, WEI Zhen-lin, CHENG Dan-ming, et al. Research on electric vehicle charging mode and charging stations construction[J]. Energy Technology and Economics, 2009,11(5): 64-66(In Chinese).
- [10] LU Mang, ZHOU Xiao-bing, ZHANG Wei. Research on Development of Charging Facilities for Electric Vehicles at Home and Abroad[J]. Central China Electric Power, 2010,23(5):16-30(In Chinese).
- [11] ZHANG Shu-wei. Prospect of Electric vehicle in china from the Perspective of Technology Dynamics[J]. Energy Technology and Economics, 2010, 22(8): 37-41(In Chinese).
- [12] WANG Xian-qin. Existing Bottleneck Problems and Counter measures in china s Electric Vehicle Development[J]. Energy Technology and Economics, 2011, 23(3): 1-10(In Chinese).
- [13] JIA Jun-guo. Operation and construction of smart power charging network services for electric vehicles[J]. Energy Technology and Economics, 2011,13(2):50-51(In Chinese).
- [14] Mr. Vidyadhar Gulhane, Prof. M. R. Tarambale, Prof. Dr Y P Nerkar. A Scope for the Research and Development Activities on Electric Vehicle Technology in Pune City[J]. IEEE, 2006,3: 1-8.
- [15] ZHANG Feng-hua, HAN Bao-ling, LUO Qing-sheng, et al. Control system design of palletizing robot based on PLC technology[J]. Computer Measurement & Control, 2009,17(11):2191-2196(In Chinese).