

故障录波在车桩网安全方面的应用研究

王剑¹, 刘英男², 李志勇¹, 王圣¹

(1. 山东山大电力技术股份有限公司, 山东 济南 250001; 2. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 设计了一种基于故障录波器的电动汽车充电安全预警系统, 采用故障录波装置采集实时数据, 并将数据上传至监控平台, 监控平台对数据进行分析计算, 提前预警电动汽车充电过程缺陷。通过对电动汽车充电过程分析, 建立监测信息模型, 提取电动汽车充电缺陷特征量, 用于缺陷预警, 通过对监测信息和特征量计算, 识别设备温度和电压是否存在异常。充电桩故障录波装置作为独立于充电桩和电动汽车的第三方装置, 一方面监控电动汽车及充电装置的运行状态, 另一方面通过智能算法对电动汽车充电过程和故障过程中的信息进行分析、比较, 保护充电装置, 提高充电桩安全运行水平。

关键词: 故障录波; 电动汽车; 充电桩; 故障预警; 相关系数; 时间序列

Application of fault recording in safety of vehicle pile net

WANG Jian¹, LIU Yingnan², LI Zhiyong¹, WANG Sheng¹

(1. Shandong University Electric Power Technology Co., Ltd., Jinan 250001, China;

2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: This paper designs an early warning system for charging safety of electric vehicle based on fault recorder, which collects real-time data by using fault recorder and uploads the data to the monitoring platform. The monitoring platform analyses and calculates the data to warn the defects of charging process of electric vehicle in advance. Based on the analysis of charging process of electric vehicle, the monitoring information model is established to extract the characteristic quantity of charging defect of electric vehicle for defect warning. By calculating the monitoring information and characteristic quantity, the abnormal temperature and voltage of equipment can be identified. As a third-party device independent of charging pile and electric vehicle, charging pile fault recorder monitors the operation status of electric vehicle and charging device on the one hand, and analyses and compares the information of charging process and fault process of electric vehicle through intelligent algorithm on the other hand, protects charging device and improves the safe operation level of charging pile.

Key words: fault recording; electric vehicle; charging pile; fault warning; correlation coefficient; time series

0 引言

2019年以来,在人类交通活动日益增长与能源供需及气候变化问题之间矛盾日益凸显的情况下,电动汽车及充电桩成为全球汽车产业发展的热点领域^[1]。在2013至2019年中国电动车充电桩数量呈现快速增长,在2016年呈现200%的增速^[1]。未来随着全球新能源车型特别是纯电动车型不断增多,新能源汽车产量将出现爆发式增长,到2018年国内新能源汽车产量将达到127万辆以上,其中2014年的增长速率达到200%的速度^[1-2]。

在电动汽车和充电桩高速增长的情况下,新能源汽车安全事故呈现多发态势,多起事件让人民大

众对新能源车的安全性再度担忧,成为行业发展的难题。随着保有量增加,过去几年,我国电动汽车起火事故逐年增加,从2014年之前的每年不到10起增加至2018年的40起^[2-5]。

从起火原因来看,因充电导致的起火事故共5起,占比50%之多,成为起火事故的第一诱因;其次是碰撞起火和行驶中自燃各两起,各占20%。电动汽车不管是充电状态、行驶中还是静置,均有起火事故的发生^[2-5]。电动汽车充电安全问题已渗入到充电过程的各个环节,必须引起足够的重视。

电动汽车的核心技术是其能量转换系统,这一层面上面临着电池技术上的突破,由于路况、技术等方面的原因,蓄电池作为电动汽车的薄弱环节,

是故障的多发点，也是故障诊断的重点。充电过程中对于设备绝缘、极限温升、表面允许温度、保护接地电阻连续性以及动力电池各项参数等的安全性监测，能够有效防止由于绝缘丧失、漏电或者单体电池失效等可能导致的人员触电、设备短路甚至起火等事故^[5-6]。

本文通过设计一种基于故障录波器的电动汽车充电安全预警系统，通过故障录波装置采集电动汽车和充电桩的数据，搭建电动汽车充电安全数据信息模型，提取电动汽车电池单体、电池箱和充电桩功率模块缺陷特征量，基于数据统计分析方法，提前预警电动汽车和充电桩缺陷。

1 原理分析

电力故障录波是一种基于故障录波信息的调度端电网故障诊断系统。故障录波器已广泛用于电力系统，可在系统发生故障时，自动、准确地记录故障前后各种电气量的变化情况，通过对这些电气量的分析和比较，对分析处理事故、判断保护装置是否正确动作、提高电力系统安全运行水平有着重要作用^[6]。

电动汽车充电是电能变换过程，可以看作小型的电气系统。故障录波模块对电动汽车充电过程中的信息进行采集，并在充电桩故障时，自动准确记录故障前后各种电气量的变化情况和相关报文数据，通过这些信息的分析、比较，对分析处理事故、判断保护是否正确动作、提高充电桩安全运行水平均有着重要作用。

2 电动汽车充电监测信息模型及缺陷特征量提取

电动汽车电池采用锂电池、铅酸电池等，本文以锂电池为研究对象，进行缺陷故障特征量提取。

2.1 电动汽车充电过程监测信息模型

文献[7]提出电动汽车充电设施监控系统应提供完善的配电监控、充电监控、安全防护监控等功能，完成对充电设备、配电设备及其他设备的集中监视和控制管理^[7]。

根据现场实践和理论分析，电动汽车充电桩充电过程中需监测的信息包括以下方面：

- (1) 交流充电桩、直流充电桩电气量和开关量、充电桩运行环境数据，通过充电桩数据接口获取；
- (2) 电动汽车电池数据，通过 BMS 电池管理系统获取；
- (3) 配电系统、充电站的供电数据，通过配电室电表进行采集。

电动汽车充电过程信息来源分为交流充电桩、直流充电桩、电动汽车、配电信息。

表 1 信息模型

Table 1 Information model

数据来源	数据类型
交流充电桩	交流输入电压、交流输入电流、交流输出电压、交流输出电流、控制导引电压、充电枪温度、运行环境温度、运行环境湿度
直流充电桩	交流输入电压、交流输入电流、直流输出电压、直流输出电流、控制导引电压、充电枪温度、运行环境温度、运行环境湿度
电动汽车	电池电压、电池充电电流、电池 SOC、电池温度
配电监控系统	供电电压、供电电流、供电功率

2.2 电动汽车电池单体缺陷特征量提取

电动汽车电池单体故障^[8-11]包括以下方面：

- (1) 由于过充、过放、温度过高或者过低导致单体老化，此时电池充电时电压上升很快，温度上升快；
- (2) 电池单体差异大，最终导致单体电池故障；
- (3) 由于过充、高温或潮气进入电池导致的单体膨胀；
- (4) 过充、过放、过温导致的电池内部短路或热失控。

针对电池故障特征，建立电动汽车电池充电过程特征量信息，如表 2 所示。

表 2 电池单体监控特征量

Table 2 Monitoring characteristic quantity of battery cell

序号	特征量
1	电池单体温度
2	运行环境温度
3	单体最高电压
4	单体最低电压

2.3 电动汽车电池箱缺陷特征量提取

电动汽车电池箱缺陷包括^[8-11]以下方面：

- (1) 由于腐蚀或装配缺陷导致的连接器故障；
- (2) 由于机械振动或过温导致保险丝故障；
- (3) 由于机械振动或过温导致的绝缘老化。

针对电池箱故障特征，建立电动汽车电池箱充电过程特征量信息，如表 3 所示。

表 3 电池箱缺陷监控特征量

Table 3 Characteristic quantity of battery box defect monitoring

序号	特征量
1	电池箱温度
2	运行环境温度
3	电池组总电压
4	电池组充电电流

2.4 直流充电桩功率模块缺陷特征量提取

文献[12]调研了14家直流充电桩设备生产厂家的运行情况, 其中充电桩功率模块故障包括^[12-14]:

- (1) 模块故障导致的直流母线电压值、电流值不准确;
- (2) 模块损坏导致的线路短路或断路、温度过高。

针对充电桩故障特征, 建立电动汽车充电桩功率模块充电过程特征量信息, 如表4所示。

表4 充电桩功率模块缺陷监控特征量

Table 4 Defect monitoring characteristic quantity of power module of charging post

序号	特征量
1	直流母线电压
2	直流母线电流
3	功率模块温度

3 电动汽车充电过程缺陷预警算法

通过分析电动汽车电池单体、电池箱和直流充电桩功率模块充电过程中的缺陷以及相应特征量, 通过多源数据统计分析, 提前预警电动汽车充电过程故障, 保障电动汽车充电安全。

3.1 基于统计分析的温度异常预警

监测电动汽车电池单体、电池箱和充电桩功率模块温度, 计算设备温升和相对温差。设置各个模块的温度预警阈值, 获取当前时刻监测数据后, 首先判断是否超出告警阈值, 如未超限值, 则计算温升, 通过温升和相对温差判断设备是否正常, 温度异常预警算法流程如图1所示。

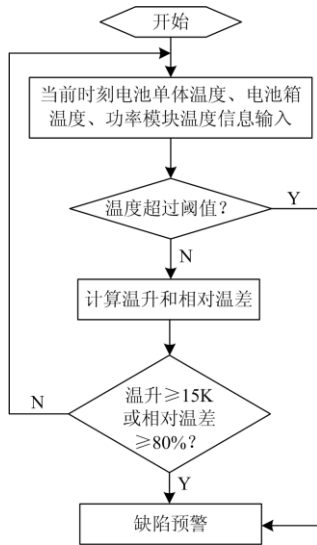


图1 温度异常预警算法流程

Fig. 1 Flow of temperature anomaly early warning algorithm

温升及相对温差计算公式采用文献[15]中规定计算, 计算如式(1)和式(2)所示。

$$\Delta t = T_1 - T_0 \quad (1)$$

$$\delta = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_0} \quad (2)$$

式中: Δt 为温升; T_1 为发热设备温度; T_0 为运行环境温度; δ 为相对温差; T_2 正常设备温度。

当温升 $\Delta t \geq 15K$ 或相对温差 $\delta \geq 80\%$, 提醒运维人员电动汽车充电状态异常, 提前采取措施, 必要时停止充电进行检修。

3.2 基于相关系数的电池单体异常预警

由于电池出厂时不一致, 长时间运行导致单体差异越来越大, 最终导致单体电池故障。单体在电池组充电过程中, 每个单体的最高电压 U_{\max} 、最低电压 U_{\min} 和温度 T 应保持基本一致, 通过计算同一时刻各电池单体之间的差异相关系数, 用于识别电池单体异常。

电池单体 a、b 和 c 状态量用向量表示。

$$S_a = [U_{a\max}, U_{a\min}, T_a] \quad (3)$$

$$S_b = [U_{b\max}, U_{b\min}, T_b] \quad (4)$$

$$S_c = [U_{c\max}, U_{c\min}, T_c] \quad (5)$$

式中, S_a 、 S_b 、 S_c 为电池单体 a、b 和 c 的状态向量, 状态向量由单体最高电压、单体最低电压和温度表示。

相关系数可有效表达变量间的线性关系, 从而准确判断变量间的相似性^[16]。各电池单体间的相关系数为

$$r_{ab} = \frac{\text{cov}(S_a, S_b)}{\sigma_a \sigma_b} \quad (6)$$

$$r_{bc} = \frac{\text{cov}(S_b, S_c)}{\sigma_b \sigma_c} \quad (7)$$

$$r_{ac} = \frac{\text{cov}(S_a, S_c)}{\sigma_a \sigma_c} \quad (8)$$

式中: cov 表示为向量内积; σ 为向量长度; r_{ab} 、 r_{bc} 、 r_{ac} 为电池单体间的相关系数, 将该相关系数值作为电池单体状态诊断参量。根据监测数据的实时变化, 动态设置相关系数阈值, 对电池单体异常进行预警。

3.3 基于时间序列的电动汽车充电缺陷预警

分析故障录波采集的监控历史数据和电动汽车充电过程记录的故障时刻电气量波形可知, 该时间序列具有周期性, 采用 ARIMA 模型对电动汽车充电过程电气量进行预测, 提前预警, 故障发生前停止充电。本文对电动汽车充电过程中充电电压 U 、充电电流 I 进行时间序列预测。

ARIMA 模型是目前应用较广泛的时间序列分析方法,最早由 Box 和 Jenkins 于 1970 年提出^[17-18]。其基本思路是:利用差分方法对原始时间序列进行平稳化,通过平稳序列自相关与偏自相关函数的特性,判断模型的类型以及模型阶数和未知参数,之后对模型的有效性进行检验,最终对未来的时间序列进行分析预测。

采用 ARIMA(p, q, d)模型进行预测,其代表对非平稳的随机序列变量进行 d 次差分处理后,得到电压和电流平稳序列。之后,将平稳序列拟合为 ARMA(p, q)模型,该模型的表达式为

$$U_t = \varphi_1 U_{t-1} + \dots + \varphi_p U_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (9)$$

$$I_t = \varphi_1 I_{t-1} + \dots + \varphi_p I_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (10)$$

式中: U_t 和 I_t 为电压和电流平稳序列; $\varphi_1 \dots \varphi_p$ 为自回归系数; p, q 分别为自回归和滑动平均阶数; ε_t 为白噪声序列; θ 为滑动平均系数。

将故障录波器获取的充电过程中的电压和电流历史数据输入模型,训练得到电压和电流的模型参数。根据阈值设定,判断下一时刻的电压和电流是否超限,故障录波平台提前进行预警。

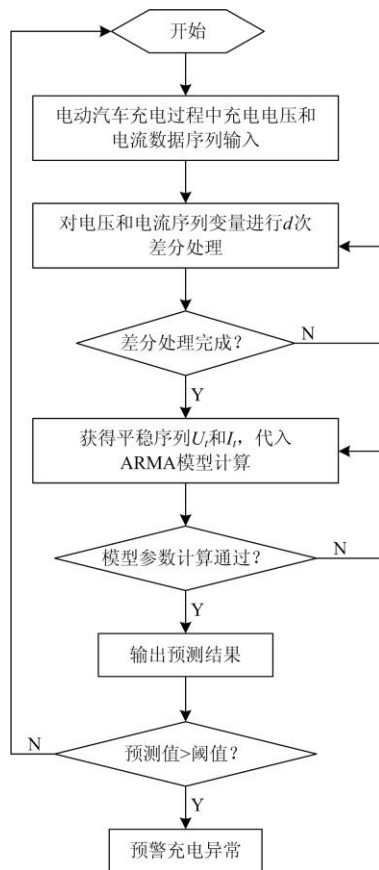


图 2 基于时间序列的电动汽车充电预警流程

Fig. 2 Early warning process of EV charging based on time series

4 工程实现

电动汽车充电安全预警系统由嵌入式录波模块和录波监控平台两部分组成,系统架构如图 4 所示。

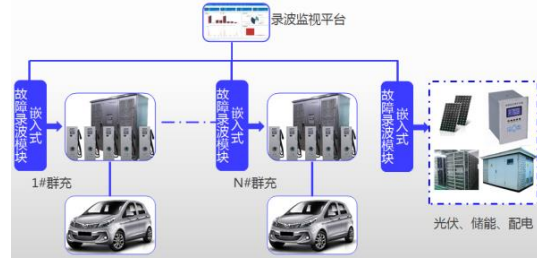


图 3 系统架构

Fig. 3 System architecture

4.1 嵌入式录波模块

嵌入式录波模块作为一个单独模块,安装于充电桩内部,但独立于充电桩设备本身,采用高可靠性防水、防火、防爆不锈钢外壳,采集充电桩和充电车辆各数据信息。模块自身带大容量缓存,可就地存储录波数据,也可以通过以太网与充电桩录波监视平台联网,将记录数据上传至监视平台。

嵌入式录波硬件架构如图 4 所示,充电桩录波装置具备核心控制器。控制器具备软件调试 JTAG 接口,同时通过防水接头分别与电动汽车和充电桩连接,获取相应的模拟信号、开关量信号、通信数据和外设数据。

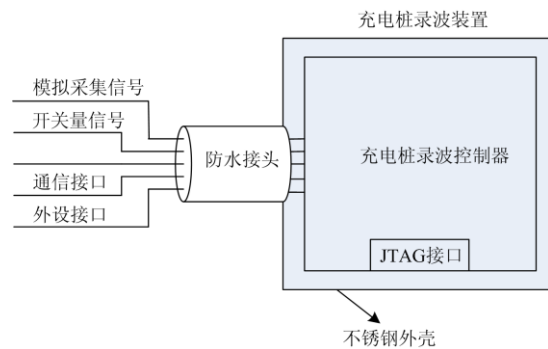


图 4 录波模块硬件架构

Fig. 4 Hardware architecture of recording module

4.2 电动汽车充电录波监控平台

录波监控平台通过以太网与各充电桩录波装置实时通信,可以实时在线监控充电过程。并通过大数据分析,结合事故案例异常数据,作出故障预警。录波监视平台功能包括以下方面:

- (1) 实时监控,实时记录充电过程中的各项数据;
- (2) 离线分析,通过对故障录波信息分析比较,分析事故原因,判断保护装置是否正确动作;

(3) 故障预警, 通过对电动汽车及充电桩的数据采集和分析以及故障过程中的录波, 提前预警故障隐患。

5 结论与展望

提出了一种故障录波的电动汽车充电过程安全预警系统, 通过搭建信息模型, 提取缺陷特征量, 采用统计分析、相关系数和时间序列模型算法, 预警电动汽车充电状态。综合状态量分析判断电动汽车充电是否存在异常, 及时发现潜在缺陷。该系统应用于充电站现场, 能够提取预警, 提高了运维检修效率, 保障了充电桩及电动汽车的安全运行。

随着电动汽车充电过程故障录波安全预警系统的不断深化, 故障录波装置可接入多个充电站的配电信息, 通过与配电网自动化等系统相结合, 研究优化的调控策略, 对区域内的充电设施进行调控, 在有效利用电网资源的同时, 减少对电网的影响。

参考文献

- [1] 王鑫, 周步祥, 唐浩. 考虑用户因素的电动汽车有序充放电控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 129-137.
WANG Xin, ZHOU Buxiang, TANG Hao. A coordinated charging/discharging strategy for electric vehicles considering customers' factors[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 129-137.
- [2] 胡道栋, 杨校辉, 克潇, 等. 充电桩群控操作管理单元的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 135-141.
HU Daodong, YANG Xiaohui, KE Xiao, et al. Design and implementation of charging pile group operation management unit[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 135-141.
- [3] 王俊霞, 陈志刚, 郭葳, 等. 电动汽车换电智能监控系统的改进[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 81-87.
WANG Junxia, CHEN Zhigang, GUO Wei, et al. Modification of intelligent monitoring system for EV battery swap station[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 81-87.
- [4] 周逢权, 连湛伟, 王晓雷, 等. 电动汽车充电站运营模式探析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 63-66, 71.
ZHOU Fengquan, LIAN Zhanwei, WANG Xiaolei, et al. Electric vehicle charging station operation mode analysis[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 63-66, 71.
- [5] 徐广腾, 杜科, 张涛, 等. 电动汽车充电设施检测技术及故障分析[J]. 供用电, 2018, 35(10): 19-24, 43.
XU Guangteng, DU Ke, ZHANG Tao, et al. EV charging facility detection technology and fault analysis[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(10): 19-24, 43.
- [6] 王帅. 智能变电站故障录波器的设计[D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
WANG Shuai. The design of the power fault recorder in intelligent substation[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2015.
- [7] 张晶, 时玮, 张元星, 等. 电动汽车充电过程安全因素及动态预警[J]. 电源技术, 2019, 43(5): 861-863, 868.
ZHANG Jing, SHI Wei, ZHANG Yuanxing, et al. Analysis of safety factors and dynamic warning during charging process of electric vehicle[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(5): 861-863, 868.
- [8] 赵明宇, 王刚, 汪映辉, 等. 电动汽车充电设施监控系统设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(11): 65-69.
ZHAO Mingyu, WANG Gang, WANG Yinghui, et al. Design and implementation of a supervisory and control system for charging facilities of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(11): 65-69.
- [9] 李正哲, 郭威. 充电桩测试中泄放回路故障分析及处理[J]. 河北电力技术, 2017, 36(3): 43-44, 47.
LI Zhengzhe, GUO Wei. Fault analysis and treatment on discharge circuit of charging pile test[J]. HEBEI Electric Power, 2017, 36(3): 43-44, 47.
- [10] 刘真通. 基于模型的纯电动车辆动力系统故障诊断研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
LIU Zhen tong. Model-based fault diagnosis of electrified driven powertrains in pure electric vehicles[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [11] 王一卉. 纯电动汽车锂电池故障诊断系统的研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2015.
WANG Yihui. Pure electric vehicles lithium battery research of fault diagnosis system[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2015.
- [12] 陈枫, 袁军, 周芸菲, 等. 基于改进状态空间模型的充电桩故障预警系统智慧评价方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55: 404-407.
CHEN Feng, YUAN Jun, ZHOU Yunfei, et al. Research on intelligent evaluation method of charge pile fault early warning system based on improved state space model[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55: 404-407.
- [13] 窦汝鹏, 王娇娇, 李津. 国内电动汽车和直流充电桩兼容性测试和分析[J]. 汽车电器, 2018(6): 23-25.

- DOU Rupeng, WANG Jiaojiao, LI Jin. Test and analysis on domestic electric vehicles and DC charging piles charging compatibility[J]. Auto Electric Parts, 2018(6): 23-25.
- [14] 周俊, 万伟江, 丁霄寅, 等. 直流充电桩互操作性测试系统设计研究[J]. 电工技术, 2018(13): 67-69.
ZHOU Jun, WAN Weijiang, DING Xiaoyin, et al. Design and research on the interopeprability test system of DC charging pile[J]. Electric Engineering, 2018(13): 67-69.
- [15] 国家能源局. 带电设备红外诊断应用规范: DL/T 664—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
National Energy Administration. Application code for infrared diagnosis of live equipment: DL/T 664—2016[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.
- [16] 魏振, 吴寿山, 史蕾琦, 等. 基于相关系数的避雷器带电检测相对测量法及应用[J]. 电瓷避雷器, 2018(4): 31-34.
WEI Zhen, WU Shoushan, SHI Leiyang, et al. The relative measurement method based on correlation coefficient of arrester live detection and its application[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(4): 31-34.
- [17] 麦鸿坤, 肖坚红, 吴熙辰, 等. 基于 R 语言的负荷预测 ARIMA 模型并行化研究[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3215-3220.
- MAI Hongkun, XIAO Jianhong, WU Xichen, et al. Research on ARIMA model parallelization in load prediction based on R language[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3215-3220.
- [18] 王宏伟, 张利民, 姜建平, 等. 特高压站避雷器泄漏电流在线监测和分析系统[J]. 电瓷避雷器, 2019(6): 67-72.
WANG Hongwei, ZHANG Limin, JIANG Jianping, et al. On-line monitoring and analysis system of lightning arrester leakage current in UHV substation[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(6): 67-72.

收稿日期: 2019-10-30

作者简介:

王 剑(1972—), 男, 汉族, 工学硕士, 高级工程师, 研究方向为故障录波器及充电桩研发;

刘英男(1987—), 男, 工学硕士, 山东大学电气工程学院助理研究员, 研究方向为电力设备在线监测及智能运维, 充电桩检测技术; E-mail: liuyingnan@sdu.edu.cn

李志勇(1979—), 男, 汉族, 研究方向为故障录波器及充电桩研发。