

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.246012

V2G 直流充电桩检测方案与检测系统设计

张倩, 陈熙, 王立永, 赵宇彤, 金渊, 关宇, 张心

(国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100051)

摘要: 针对现有 V2G 直流充电桩现场检测装置功能不全面、检测方案单一、控制及管理困难等问题, 依据国家相关标准, 设计了 V2G 直流充电桩检测方案和检测系统。首先, 根据需要设计了 3 种检测方案: 现场检测方案、实验室检测方案以及动力电池检测方案。不同的检测方案对应 V2G 充电桩不同检测环境和检测项目。然后, 依据 3 种检测方案给出了检测系统的硬件设计和软件设计, 能够实现对 V2G 直流充电桩充放电功能、直流输出性能、并网性能及保护功能等进行检测。同时还可以对电动汽车动力电池状态进行评估, 从而判断电池潜在风险。最后, 通过对 V2G 直流充电桩和车辆动力电池进行不同项目检测。测试结果表明所设计的检测方案和检测系统能够准确实现对 V2G 直流充电桩的功能和性能检测。

关键词: V2G 直流充电桩; 检测系统; 现场检测; 实验室检测; 通信连接; 数据采集

Design of detection scheme and system for a V2G DC charging pile

ZHANG Qian, CHEN Xi, WANG Liyong, ZHAO Yutong, JIN Yuan, GUAN Yu, ZHANG Xin

(Electric Power Science Research Institute of State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100051, China)

Abstract: There are problems of incomplete function, just a single detection scheme and difficult control and management with the existing V2G DC charging pile field detection device. Thus a detection scheme and system for a V2G DC charging pile are designed in line with relevant national standards. First, given the needs, three detection schemes, i.e. field, laboratory and power battery schemes, are designed. Different detection schemes correspond to different environments and items of V2G charging piles. Then, for the three detection schemes, the hardware and software of the detection system are designed. These can detect the charging and discharging function, DC output and grid-connected performance and protection function of the pile. The detection system can also evaluate the state of the power battery of the electric vehicle, and in this way judge the potential risk to the battery. Finally, by testing the V2G DC charging pile and vehicle power battery in different circumstances, the results show that the designed scheme and system can accurately detect the function and performance of a V2G DC charging pile.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5400-202211163A-1-1-ZN).

Key words: V2G DC charging pile; detection system; on-site inspection; laboratory testing; communication connection; data acquisition

0 引言

车辆到电网(vehicle to grid, V2G)的概念最早是由 Amory Letendre 的学者于 1995 年提出, 后来美国特拉华大学的 Willett Kempton 教授继续跟进研

究^[1-4]。V2G 技术的核心思想在于实现电动汽车与电网的双向互动, 将电动汽车的储能源作为电网和可再生能源的补充, 利用电网峰谷价差与负荷波谷充电、波峰并网放电^[5-6], 维持电网平衡, 使电网可靠有效地运行^[7]。

随着电动汽车推广应用与便捷化充电需求的增长, 电动汽车充电桩的安装规模正在快速扩大^[8-9], 充电桩测试技术的需求也在增加, 相关技术研究也

基金项目: 国家电网公司科学技术项目资助 (5400-202211163A-1-1-ZN)

在同步展开^[10-11]。为了全面准确地评估充电桩直流电能表计量性能^[12]，文献[13]研制的远程充电桩直流电能表校验装置在传统校验方式上，结合远程校验主站，降低了校验周期，节约了成本。文献[14-16]针对充电桩检测过程中的互操作性检测装置和输入输出检测装置等进行了研制，但是只给出了单一检测方案，并没有进行系统的检测方案设计。为了提高充电桩现场检测服务能力^[17]，文献[18]提出的电动汽车充电桩现场检测方法，以高速公路电动汽车充电桩为研究对象，主要测试充电桩输出电压、电流、功率等是否符合要求，但V2G直流充电桩检测功能缺乏，检测方法覆盖范围不全面。文献[19]提出的双向充电设施测试方案，以两个双向功率型直流充电设施为例，有效实现双向充电设施的测试，但也没有给出V2G直流充电桩的测试方法。

总结现有的电动汽车充电桩检测技术，发现当前电动汽车充电桩测试研究大多针对单向充电桩^[20-21]，对于V2G直流双向充电桩的测试研究较少。V2G直流充电桩现场检测装置和方法较少，且存在着方法单一，装置检测功能不全面，控制及管理困难等问题^[22-23]。

针对此问题，本文首先提出了V2G直流充电桩现场检测方案^[24-25]和实验室检测方案，然后对测试装置的硬件和软件进行了设计，确保检测装置功能全面，最后对V2G直流充电桩进行了检测，包括直流输出性能检测、充放电计量检测^[26]以及车辆动力电池状态评估。实验测试结果表明了本文提出的检测方案和检测系统的正确性和实用性。

1 测试方案设计

本文根据不同的检测环境和测试项目，提出了3种对应的检测方案，以实现V2G直流充电桩的功能检测和动力电池状态评估。以V2G直流充电桩为待测设备，与不同测试负载连接时，可实现对V2G直流充电桩的性能与功能检测，包括充电桩直流输出性能、电网接入性能、保护功能、充放电计量与能耗等。此外，当检测装置与电动汽车连接时，能够实现对电动汽车动力电池状态评估，并通过多指标综合分析，准确判断并提示电池潜在风险，形成电池体质检测报告并给予使用者建议。

1.1 V2G充电桩现场测试方案

V2G充电桩现场测试包含V2G充电桩对拖测试方案和V2G充电桩储能电池负载测试方案，两种方案有各自不同的特点，可以根据现场测试需求进行选择，V2G直流充电桩测试方案如图1所示。

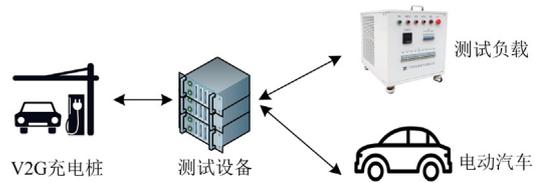


图1 V2G直流充电桩测试方案
Fig. 1 Scheme of V2G DC charging pile test

1.1.1 V2G充电桩负载

为了检测V2G充电桩充放电效率和相应调度功能，以V2G充电桩为测试负载，设计V2G充电桩对拖测试方案，其原理如图2所示。

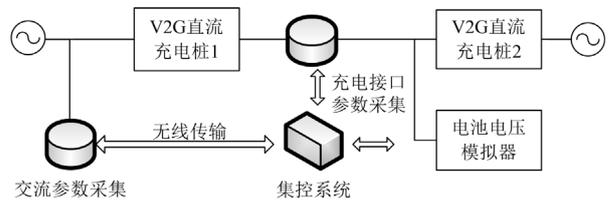


图2 V2G充电桩对拖测试方案原理
Fig. 2 V2G charging pile docking test

在图2中，V2G充电桩1作为被测充电桩，V2G充电桩2作为测试负载，两者通过充电接口采集装置接入测试系统，并进行直流侧的参数采集。通过交流参数采集模块在V2G充电桩1的交流侧或交流配电柜进行参数采集，由集控系统模拟电动汽车的电池管理系统(battery management system, BMS)对V2G充电桩进行连接通信，并匹配充放电工况的参数。电池电压模拟器则通过模拟电动汽车的电池电压，使其作为被测V2G充电桩1的充放电参数检测时的信号支撑，同时起到延迟V2G充电桩2启动时间节拍的作用。在测试完成后，集控系统自动保存测试原始数据和图形，并生成测试报告。

该测试方案以V2G充电桩为测试负载，大大节约了测试设备成本，测试系统体积小，方便现场测试。

1.1.2 电池负载

为了检测V2G充电桩充放电切换功能，以DC/DC和储能电池为测试负载，测试方案原理如图3所示。当外挂直流负载时，能够检测充电桩直流输出的限压、限流、纹波等参数。

当检测V2G充电桩放电功能时，储能电池作为能量承受载体。而在测试V2G充电桩充电功能时，储能电池放电，V2G充电桩则作为能量承接载体。整个过程中的测试数据由集控系统采集并存储。当外挂直流负载时，可以对V2G充电桩直流侧输出的

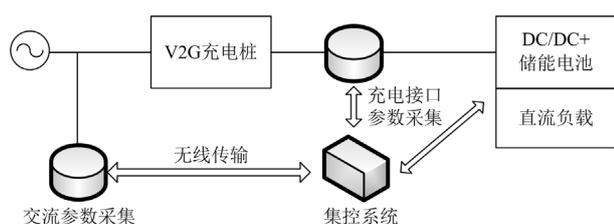


图3 V2G 充电桩储能电池负载测试

Fig. 3 Battery load test of V2G charging pile

纹波、限压、限流等参数进行测试。

以 DC/DC 和储能电池为测试负载时, 现场测试设备较多, 携带不便, 但能够完成直流充电桩充放电功能检测。

1.2 V2G 直流充电桩实验室检测方案

V2G 直流充电桩现场检测方案能够基本完成必须的测试项目, 但对于部分测试项目, 如充电桩

充放电稳流精度测试、稳压精度测试等, 需要接入电网才能完成测试。基于此, 提出 V2G 直流充电桩实验室测试方案, 将检测装置与实验室四象限 180 kVA 可编程交流电源、电池模拟器 AV900 等对接, 其测试系统如图 4 所示。

实验室测试系统包括双向模拟电源、防孤岛实验检测装置、V2G 充电桩、互操作测试设备、可编程直流负载、双向可编程电源和工控机等, 可实现双向交、直流电性能及 V2G 充电桩的充、放电功能测试。当断开并离网切换开关时, 测试 V2G 充电桩在反向充电工况下的离网防孤岛保护功能, 弥补现场检测欠缺条件造成的空白。当闭合并离网切换开关时, 模拟 V2G 充电桩与电网相连, 此时可对充电桩反向充电时对电网造成的影响以及稳流稳压精度等进行测试。

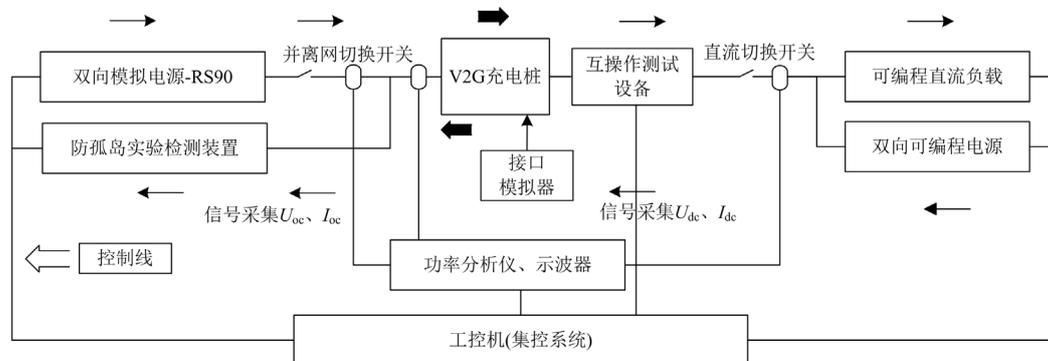


图4 V2G 充电桩实验室测试系统

Fig. 4 Laboratory test system of V2G charging pile

双向模拟电源主要用于模拟电网特性, 同时能够保障 V2G 充电桩交流侧输入稳定。防孤岛实验检测装置用于 V2G 充电桩离网或并网时防孤岛保护测试, 该装置可精确模拟交流谐振状态, 负荷功率连续可调。该装置也能够精确模拟 50 Hz 交流谐振状态, 满足并联 RLC 电路谐振时, 在电路工作频率等于谐振频率条件下, 电路消耗的感性无功与容性无功相等。在进行直流充电纹波等参数测试时, 可编程直流负载能够模拟测试负荷。参数双向可编程电源则用于模拟电动汽车动力电池充放电特性。互操作测试设备集成了车辆接口模块、8 通道高速高精度波形采集模块、电池电压模拟模块、7.5 kW 负载模块、BMS 模拟测试软件模块、基于 CAN 总线的数据采集模块和嵌入式控制器等, 能够完全模拟电动汽车充电回路和充电接口电路故障, 不仅可以实现各路信号的采集与测量, 还可以模拟车辆 BMS, 实现协议一致性和互操作性测试。工控机主要进行测试流程编辑、数据监测采集和数据存储。

测试完成后, 自动保存测试原始数据、图形, 生成测试报告。

V2G 直流充电桩实验室测试方案不仅能够完成现场测试方案中的部分测试功能, 最重要的是能够实现对 V2G 充电桩的直流输出性能、有功功率与无功功率调节功能、过载能力等现场不方便测试的项目进行测试。

1.3 动力电池状态评估测试方案

当检测设备与电动汽车连接时, 可对电动汽车动力电池进行状态评估, 并且能够通过多指标综合分析, 准确判断电池潜在风险, 动力电池状态评估测试原理如图 5 所示。

该测试方案主要设备包括车辆电池检测设备、双向直流电源、V2G 充电桩和电动汽车。双向直流电源能够在进行车辆电池测试时对车辆电池进行充放电。车辆电池检测设备包括主控系统、车辆 BMS 模拟软件、高精度参数采集模块、交流内阻测试模块。

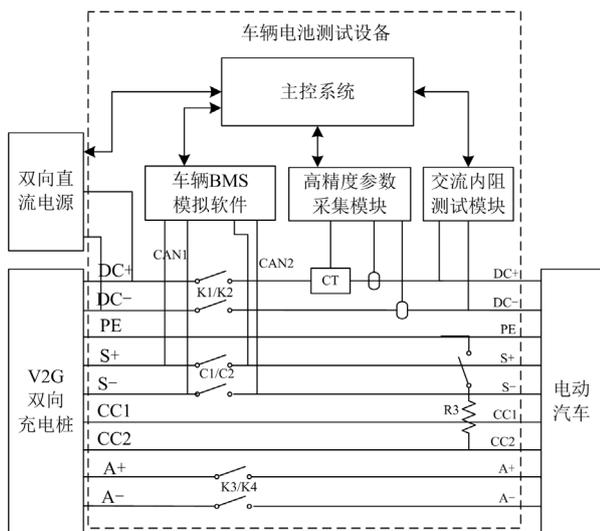


图 5 动力电池状态评估测试

Fig. 5 Power battery condition evaluation test

当使用 V2G 双向充电桩进行测试时，断开 C1/C2，车辆电池参数测试仪的 CAN1 和 V2G 充电桩通信，车辆电池参数测试仪的 CAN2 和电动汽车通信。同时在部分测试项目中，主控系统能够控制 V2G 充电桩按测试流程的要求输出电压、电流。当闭合 C1/C2 时，使用双向可编程直流电源测试模式，此时车辆电池参数测试仪的 CAN2 和车辆通信，用其他通信方式控制双向可编程直流电源给车辆电池充放电。车辆电池测试设备可采集 CAN 线上的报文，记录车辆信息及充电过程参数，可高精度测试电池的充电电压和电流，测试的电压和电流的精度达 0.05%。

该测试方案能够完成对电动汽车电池电压、电流偏差分析、SOC 偏差测试、充放电温度分析、直

流内阻测试等。

综合以上测试方案，针对不同测试负载，V2G 直流充电桩测试项目完成率如表 1 所示。

表 1 不同负载下 V2G 充电桩测试完成率

Table 1 Test completion of V2G charging pile under different loads

测试项目	负载类型		
	现场设备	车辆	实验室模拟电池
互操作性	88	55	100
充放电功能	100	70	100
直流输出性能	43	0	100
充放电计量与能耗	100	100	100
电网接入及保护功能	73	50	100
动力电池状态评估	0	100	0

2 测试系统设计

测试系统设计包括硬件设计和软件设计两部分，硬件是整个测试系统的基础，软件部分则主要完成测试系统的通信协议、数据采集分析。

2.1 硬件设计

测试系统硬件组成及其连接如图 6 所示，将工控机、数据采集、充电接口等集为一体。其中控制单元主要用于确认连接回路电阻、回路通断、绝缘状态模拟、电池电压模拟、车辆 BMS 模拟、测试负载等部件的编程控制。工控机实现测试系统控制、数据监测采集、数据存储、报告导出等。在对电动汽车动力电池进行测试时，能够利用相关算法对电池寿命状态进行评估。数据采集用于采集直流侧的电压、电流、功率等数据，采集的数据经工控机存储并生成数据报告。

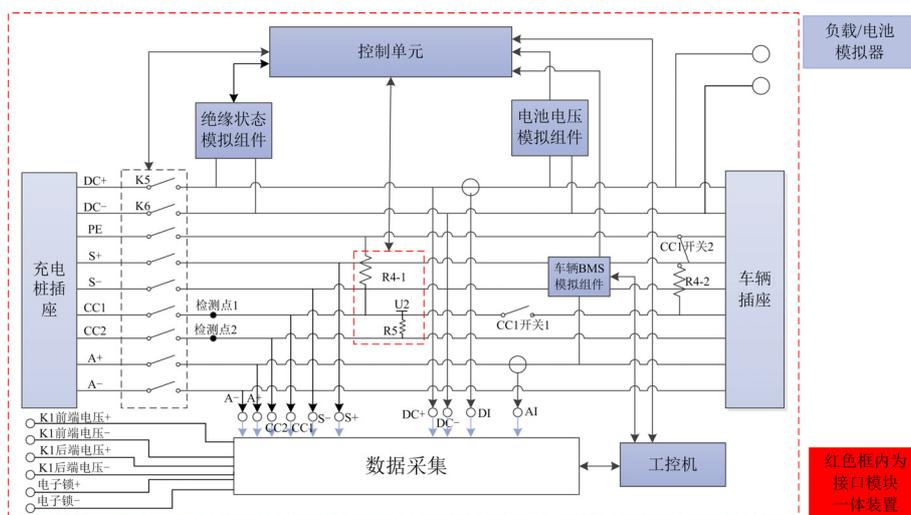


图 6 测试系统硬件连接图

Fig. 6 Hardware connection diagram of test system

本文提出的方案中测试系统是串联在充电桩和负载(电动汽车)中的, 系统装置连接要符合国家标准, 需要根据相关国家标准进行设计。根据国标可知, 直流充电所用的插头和插座均包含 9 对触头, 各个触头的额定电压、额定电流和功能定义如表 2 所示。

表 2 充电桩插头额定参数值及含义
Table 2 Value and meaning of rated parameter of charging pile plug

触头标识	额定电压、电流	功能含义
DC+	750 V/1000 V	主功率正极
	80 A/125 A/200 A/250 A	
DC-	750 V/1000 V	主功率负极
	80 A/125 A/200 A/250 A	
PE	—	接地点
S+	0~30 V、2 A	CAN 总线 CANH
S-	0~30 V、2 A	CAN 总线 CANL
CC1	0~30 V、2 A	枪头插座连接确认 1
CC2	0~30 V、2 A	枪头插座连接确认 2
A+	0~30 V、20 A	低压辅助电源正极
A-	0~30V、20 A	低压辅助电源负极

2.2 软件设计

测试系统软件主要目的在于实现用户管理、项目测试、车桩通信等功能需求。根据功能需求不同划分图 7 所示的结构框图, 各子系统按照相应需求又划分多个下级子系统, 然后将子系统集成便得到符合功能需求的完整系统测试软件。

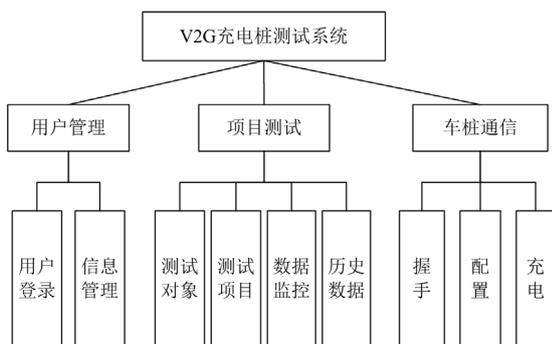


图 7 V2G 测试系统结构框图

Fig. 7 Structural block diagram of V2G test system

2.2.1 用户管理子系统

用户管理子系统主要对用户登录验证、信息管理等进行设计。用户登录前需要进行用户名与密码双重验证才能登录成功进入测试系统。测试系统不仅对用户信息进行管理, 同时在用户登录时记录使用时长并更新累计登录次数, 实现动态管理用户信

息的功能。图 8 展示了用户信息管理流程。

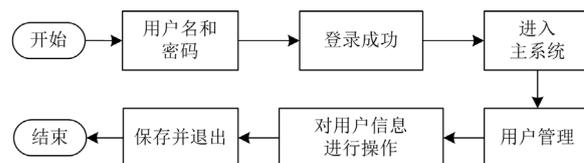


图 8 用户信息管理流程

Fig. 8 User information management flow

2.2.2 项目测试子系统

项目测试子系统是整个测试系统的核心部分, 需要测试规程标准中要求的测试项目, 并对结果进行分析。其中测试对象可分为 V2G 充电桩和电动汽车动力电池, 针对不同的测试对象, 检测项目也不同。对于 V2G 充电桩而言, 需要对其输出电压/电流、辅源电压/电流、CC1/CC2 电压等进行数据监控, 同时会对历史数据以及报警数据进行记录。而对电动汽车动力电池需要对电池充放电电压/电流、荷电状态(state of charge, SOC)、温度变化等进行检测。图 9 为项目测试子系统主界面。



图 9 项目测试子系统主界面

Fig. 9 Main interface of project test subsystem

2.2.3 车桩通信子系统

车桩通信子系统设计重点在于建立测试系统与 被测对象之间的通信连接, 通信流程如图 10 所示。在通信连接成功后才能对测试对象进行相关项目测试。图 11 展示了所设计的车桩通信连接系统界面。

3 实验分析

将所设计的硬件部分与软件部分结合成整个测试系统, 根据需要对 V2G 充电桩直流输出性能进行检测并对电动汽车动力电池状态进行评估。本文以国内某品牌的 V2G 直流充电桩为被测充电桩, 搭配不同的测试方案, 完成直流输出性能测试、充放电计量测试和动力电池状态评估测试。测试主要依据

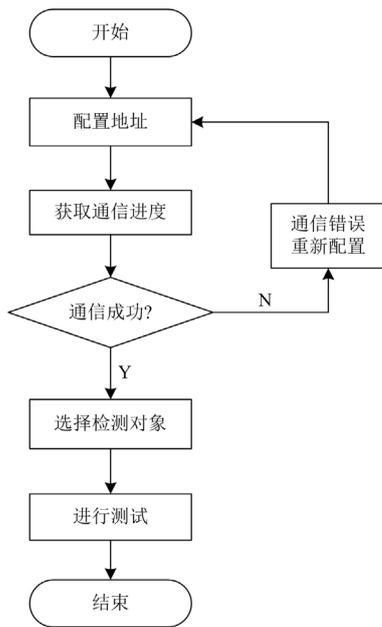


图 10 车桩通信流程

Fig. 10 Communication flow of vehicle piles



图 11 车桩通信连接系统界面

Fig. 11 Communication connection system interface of car and charging pile

6 项国家标准：GB/T 27930-2015、GB/T 31486-2015、GB/T 34658-2017、GB/T 34120-2017、GB/T 34133-2017、GB/T 18487.2-2017 及 2 项行业标准：NB/T 33001-2018、NB/T 33021-2015。

3.1 直流输出性能测试

在 V2G 直流充电桩实验室测试方案中，重点在于 V2G 充电桩直流输出性能测试。直流输出性能测试包括充放电稳流精度测试、稳压精度测试、纹波测试、充放电电流电压测试等。

3.1.1 充放电稳流精度测试

V2G 充电桩额定电压和电流分别为 750 V 和 80 A。V2G 装置在恒流充放电状态下运行，直流输入电流设定在额定值的 20%~100%范围内，设定 3 种情况下电流 16 A、40 A、80 A。调整交流电源电压在额定值的±15%范围内变化。直流侧电压在规

的相应调节范围内变化时，找出在变化范围内输入直流电流的极值。按照式(1)计算充放电稳流精度时，要求充放电装置直流侧稳流精度不应超过±1%。

$$\delta_{I_o} = \frac{I_{oM} - I_{oZ}}{I_{oZ}} \times 100\% \quad (1)$$

式中： δ_{I_o} 表示稳流精度； I_{oM} 表示直流输出电流极限值； I_{oZ} 表示当交流侧电压为额定值且直流侧电压在调整范围内的中间值时直流输出电流测量值。

从表 3 所示的稳流精度测试结果可以看出，被测 V2G 充电桩直流侧输出稳流精度符合标准。

表 3 充电稳流精度试验结果

Table 3 Test results of charge-discharge current stability accuracy

恒流值/A	电压值/V	I_{oM} /A	I_{oZ} /A	稳流精度/%
16	250	15.8	16.1	-1.8
	400	15.9	16	-0.62
	575	16.1	16	0.62
40	250	39.9	40	0.25
	400	39.8	39.85	0.12
	575	40	40.1	0.25
80	250	79.9	80	-0.12
	400	79.89	79.95	-0.075
	575	80.1	80	0.12

3.1.2 充放电稳压精度测试

V2G 充电桩在恒压充电状态下运行，直流侧电压设定在规定调节范围内，调整交流电源电压在额定值±15%范围内变化，直流输出电流在额定值的 0~100%范围内变化，找出上述变化范围内直流侧电压的极值。按照式(2)计算时，要求充放电装置直流侧稳压精度不应超过±0.5%。

$$\delta_U = \frac{U_M - U_Z}{U_Z} \times 100\% \quad (2)$$

式中： δ_U 表示稳压精度； U_M 表示直流侧电压极限值； U_Z 表示当交流侧电压为额定值且直流输出电流为额定电流 50%时直流侧电压测量值。

从表 4 所示的稳压精度测试结果可以看出，被测 V2G 充电桩直流侧输出稳压精度符合标准。

表 4 稳压精度试验结果

Table 4 Test results of voltage stabilization accuracy

恒压值/V	U_Z /V	U_M /V	稳压精度/%
250	250.1	250	0.04
400	399.8	400.2	0.1
575	574.9	575.1	0.34

3.1.3 直流输出电流、电压纹波测试

将 V2G 充电桩连接实验室测试系统，负载为电池模拟装置，直流输出最大电压为 400 V，直流输

出额定电流为 50 A。设置充电桩在恒流状态下运行, 根据电动汽车充电设备检验试验规范(NB/T 33008.1-2018)要求, 选定直流侧电流分别为其额定电流值的 100%、80%、60%、40%和 20%等 5 种工况, 由示波器分别采集充电桩直流侧电流的纹波值。由式(3)计算直流电流纹波有效值系数。

$$X_{I_{\text{rms}}} = \frac{I_{\text{rms}}}{I_{\text{DC}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $X_{I_{\text{rms}}}$ 表示电流纹波有效值系数; I_{rms} 表示输出电流交流分量有效值, 单位为 A; I_{DC} 表示直流输出电流平均值, 单位为 A。

得到的电流纹波有效值系数如表 5 所示, 50 A 恒流工况下电流纹波波形如图 12 所示。从测试结果可以看出, 随着测试电流的减小, 电流纹波有效值系数会增大。其中 50 A 恒流工况下电流纹波有效值系数最小为 0.5295, 10 A 恒流工况下电流纹波有效值系数最大为 1.0100。

表 5 电流纹波测试结果

Table 5 Current ripple test results

检测点/A	电流纹波有效值系数
50	0.5295
40	0.5876
30	0.6239
20	0.7641
10	1.0100

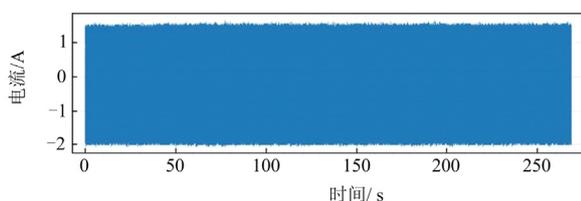


图 12 50 A 恒流工况下电流纹波波形

Fig. 12 Current ripple waveform under 50 A constant current working condition

调节被测 V2G 充电桩工作在恒压充电状态下, 设定被测充电桩直流侧电压为最大值 400 V。接入电池模拟装置, 调整电池模拟装置使被测充电桩直流侧电流在 20%~100%额定电流下变化, 变化步长为 20%直流额定电流。利用德维创功率分析仪测量充电桩直流侧电压的纹波值, 按照式(4)计算电压纹波有效值系数。

$$X_{U_{\text{rms}}} = \frac{U_{\text{rms}}}{U_{\text{DC}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $X_{U_{\text{rms}}}$ 表示电压纹波有效值系数; U_{rms} 表示输

出电压交流分量有效值, 单位为 V; U_{DC} 表示直流输出电压平均值, 单位为 V。

测得电压纹波有效值系数如表 6 所示, 电压纹波波形如图 13 所示。在不同电流工况下, 电流越大, 电压纹波系数越大, 其中在 10 A 电流值时电压纹波系数最小为 0.0109, 50 A 电流值时电压纹波系数最大为 0.0180。

表 6 电压纹波测试结果

Table 6 Voltage ripple test results

检测点/A	电压纹波有效值系数
50	0.0180
40	0.0161
30	0.0142
20	0.0125
10	0.0109

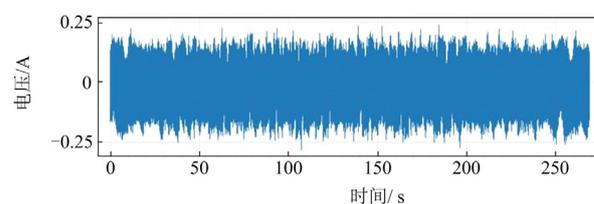


图 13 电压纹波波形

Fig. 13 Voltage ripple waveform

3.2 V2G 充电桩充放电计量测试

基于 V2G 充电桩现场测试方案, 搭配国内某品牌便携式直流负载进行模拟充电, 从而对被测充电桩进行充放电计量测试。测试结果如表 7 和表 8 所示, 每个测试点运行 10 min, 每 5 min 测量一次, 最后取平均值。

表 7 充放电计量误差(恒流)

Table 7 Measurement error of charge and discharge under constant current

恒流值/A	测试点 电压/V	标准电 能量/kWh	电表计电 量/kWh	电能量 误差/%
0	375	0	0	0
40	375	1.252	1.248	-0.16
80	375	2.481	2.475	-0.20

表 8 充放电计量误差(恒压)

Table 8 Measurement error of charge and discharge under constant voltage

恒压值/V	测试点 电流/A	标准电 能量/kWh	电表计电 量/kWh	电能量 误差/%
300	40	0.995	1.024	2.91
525	40	1.748	1.765	0.97
750	40	2.495	2.456	-1.56

查阅该充电桩的铭牌可知准确度等级为2，其标准误差限为±2%。而由表8中测试结果可以看出，在某些测试点的工作误差超过了±2%，表明被测充电桩计量电能存在不精确状况。

3.3 动力电池状态评估测试

将检测装置与车辆连接，对电动汽车动力电池状态进行评估测试。基本性能测试包括容量测试、内阻测试、电压一致性测试、温度测试、充放电能量效率测试等。本文测试车辆型号为小鹏P7，动力电池为三元锂电池，电池规格为408 V/240 Ah。

电池健康状态(state of health, SOH)用来定量描述当前电池的性能状态，量化表征当前电池相对于新电池存储电能的能力，其定义如式(5)所示。

$$S_{OH} = \frac{C_c}{C_r} \times 100\% \quad (5)$$

式中： C_c 表示当前电池容量； C_r 表示电池额定容量。

从图14所示的电池充放电可用容量对比结果可以看出，电池健康状态 S_{OH} 为93.44%时，电池健康度良好。

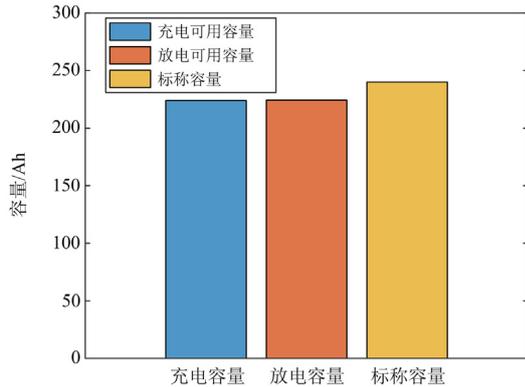


图14 充放电可用容量对比

Fig. 14 Comparison of available capacity of charge and discharge

将采集得到的 S_{OC} 和BMS得到的 S_{OC} 进行比较，得到 S_{OC} 误差曲线，测试结果如图15所示。

图15所示的电池 S_{OC} 测试误差平均值为1.137%，测试结果表明系统对电池 S_{OC} 预估较为准确。

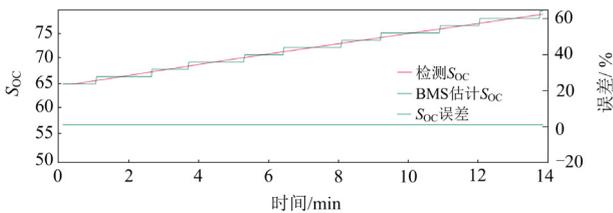


图15 S_{OC} 误差测试结果

Fig. 15 S_{OC} error test result

在测试BMS电池电流偏差时，用实际的充放电电流和检测到的BMS电流比较分析得到电池电流偏差，生成电流偏差曲线，平均后得到电流偏差值，同理可得到电压偏差值。图16和图17分别为电流和电压的测试结果。

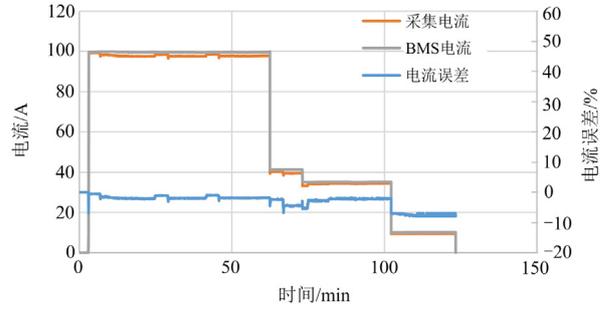


图16 电流测试结果

Fig. 16 Current measurement result

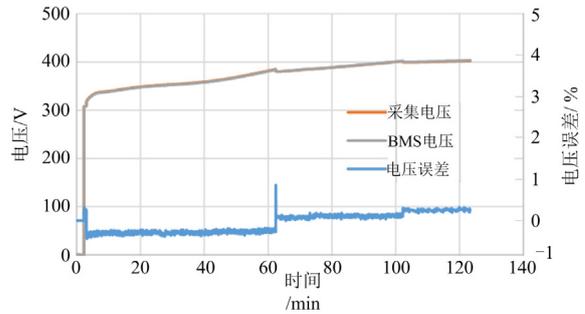


图17 电压测试结果

Fig. 17 Voltage measurement result

从图16和图17测试结果可以看出，电池电流测量最大误差为0.074 A，最大相对误差为0.093%，电压测量最大误差为0.523 V，最大相对误差0.342%。电流误差和电压误差均较小，测量误差越小，表明车辆的安全性能越佳。

4 结论

本文设计了一种测试系统，实现对V2G直流充电桩直流输出特性的测试，同时完成了对电动汽车动力电池状态评估测试。首先，根据电动汽车充电设备检验试验规范以及充电桩功能检测需求，设计了3种不同检测方案。然后，设计了充电桩检测装置硬件部分，其中主控模块能够模拟电动汽车充、放电能力及上级调度系统。最后基于C#的VS2013平台，设计了检测装置软件部分，实现了数据交互对象的通信连接以及数据采集的测试任务。

基于设计的3种检测方案，分别完成对V2G直流充电桩直流输出性能测试、充放电计量测试以及

动力电池状态评估测试, 实验结果表明被测 V2G 充电桩充放电稳流精度和稳压精度符合标准, 但是该充电桩电能表计量电能精度存在不精确状况, 需进行更换, 以备后续使用。在对电动汽车动力电池进行检测后, 得知该电池健康度良好, 安全性能佳, 能够继续长久使用。以上不同实验项目检测的测试结果表明, 所提出的检测方案和设计的检测系统能够准确实现对 V2G 直流充电桩的功能和性能检测。

目前对 V2G 充电桩的相关检测项目及检测方法, 尚未出台统一标准, 因此在测试 V2G 充电桩直流输出电流电压纹波时只能参考现行充电桩(即单向充电方式)和双向变频器的国标检测项目, 测试点位只选取了一部分, 取值不够全面。因此在后续的研究中将继续改善测试方案, 使其满足更多需求测试。

参考文献

- [1] KEMPTON W. Electric vehicles as a new power source for electric utilities[J]. *Transportation Research Part D*, 1997, 2(3): 157-175.
- [2] 林晓明, 唐建林, 张帆, 等. 基于虚拟同步策略的电动汽车 V2G 技术在多能互补系统中的研究及应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(13): 143-150.
LIN Xiaoming, TANG Jianlin, ZHANG Fan, et al. Research and application of electric vehicle V2G technology based on a virtual synchronization strategy in a multi-energy complementary system[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(13): 143-150.
- [3] 胡思洋, 杨健维, 廖凯, 等. 计及大规模电动汽车接入的配电网故障分析方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(16): 33-46.
HU Siyang, YANG Jianwei, LIAO Kai, et al. Fault analysis method for an urban distribution network considering large-scale electric vehicle access[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(16): 33-46.
- [4] 杨钰君, 于艾清, 丁丽青. 基于停车需求的电动汽车移动储能多目标充放电协调控制[J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(4): 65-77.
YANG Yujun, YU Aiqing, DING Liqing. Multi-objective coordinated control of charging and discharging for mobile energy storage of electric vehicles based on parking demand[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(4): 65-77.
- [5] HUANG Z, FANG B L, DENG J. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G-enabled electric vehicles in building integrated energy system[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(1): 48-55.
- [6] 余子淳, 范宏, 夏世威. 计及电动公交车 V2G 响应的区域综合能源系统两阶段优化调度[J]. *中国电力*, 2022, 55(7): 179-192.
YU Zichun, FAN Hong, XIA Shiwei. Two-stage optimal scheduling of regional integrated energy system considering V2G response of electric buses[J]. *Electric Power*, 2022, 55(7): 179-192.
- [7] 李伟豪, 杨伟, 左逸凡, 等. V2G 模式下基于 SaDE-BBO 算法的有源配电网优化[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(4): 41-49.
LI Weihao, YANG Wei, ZUO Yifan, et al. Optimization of active distribution network based on SaDE-BBO algorithm in V2G mode[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(4): 41-49.
- [8] 吴小汉, 张谦, 粟尧嘉, 等. 基于区块链的私有充电桩共享平台交易策略[J]. *发电技术*, 2022, 43(3): 439-451.
WU Xiaohan, ZHANG Qian, SU Yaojia, et al. Sharing platform trading strategy of private charging pile based on blockchain[J]. *Power Generation Technology*, 2022, 43(3): 439-451.
- [9] 范宏, 李嘉晖, 郭琦. 考虑用户充电决策行为的电动汽车充电引导策略[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(4): 23-30.
FAN Hong, LI Jiahui, GUO Qi. Electric vehicle charging guidance strategy considering user charging decision-making behavior[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(4): 23-30.
- [10] 丁超, 李勇, 姜利, 等. 电动汽车直流充电系统 LLC 谐振变换器软开关电压边界分析[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(1): 3-11.
DING Chao, LI Yong, JIANG Li, et al. Analysis of soft switching voltage boundary of LLC resonant converter for EV DC charging system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(1): 3-11.
- [11] LU X M, LYER K L V, LAI C, et al. Design and testing of a multi-port sustainable DC fast-charging system for electric vehicles[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2016, 44(11/15): 1576-1587.
- [12] 徐子立, 李前, 胡浩亮, 等. 电动汽车充电桩直流电能表检定装置的研制[J]. *电测与仪表*, 2011, 48(12): 65-69.
XU Zili, LI Qian, HU Haoliang, et al. Research on verification equipment of DC electrical energy meter for electric vehicle charger[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2011, 48(12): 65-69.
- [13] 纪红刚, 周凌. 电动汽车充电桩直流计量装置远程校验方法的研究[J]. *计量与测试技术*, 2017, 44(6): 69-71.
JI Honggang, ZHOU Ling. A research of remote calibration methods for DC metering of EV charging station[J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2017, 44(6): 69-71.

[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 interoperability test system of DC charging pile[J]. Electric Engineering, 2018(13): 67-69.

[15] 黄小庆, 李隆意, 徐鹏鑫, 等. 多主体博弈共赢的电动汽车充电桩共享方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(11): 2945-2961.
HUANG Xiaoqing, LI Longyi, XU Pengxin, et al. Electric vehicle charging pile sharing method based on multi-subject[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(11): 2945-2961.

[16] WANG Qunfei, LU Xiaoli, YANG Dongjunming. Fault diagnosis of DC-DC module of V2G charging pile based on fuzzy neural network[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 772(1).

[17] 朱科屹, 宋娟, 周唯, 等. 电动汽车直流充电桩综合测评指标体系研究[J]. 工业技术创新, 2017, 4(1): 17-21.
ZHU Keyi, SONG Juan, ZHOU Wei, et al. Investigation on comprehensive evaluation index hierarchy for direct-current electric vehicle charging stations[J]. Industrial Technology Innovation, 2017, 4(1): 17-21.

[18] 周志坚, 赵阳, 马浩, 等. 高速公路电动汽车充电桩现场检测方法[J]. 智能电网, 2016, 4(4): 432-436.
ZHOU Zhijian, ZHAO Yang, MA Hao, et al. A kind of field test method for electric vehicle charging pile[J]. Smart Grid, 2016, 4(4): 432-436.

[19] 李秉宇, 常征, 武光华, 等. 双向功率型直流充电桩互测方法及策略研究[J]. 电气传动, 2022, 52(3): 65-71.
LI Bingyu, CHANG Zheng, WU Guanghua, et al. Research on mutual measurement method and strategy of bi-direction power type DC charging piles[J]. Electric Drive, 2022, 52(3): 65-71.

[20] 刘梓强, 金涛, 刘宇龙, 等. 基于张量重构融合诊断的电动汽车直流充电桩开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1831-1843.
LIU Ziqiang, JIN Tao, LIU Yulong, et al. Open circuit fault diagnosis method of electric vehicle DC charging pile based on tensor reshape fusion diagnostic model[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1831-1843.

[21] 毛玲, 张钟浩, 赵晋斌, 等. 车-桩-网交融技术研究现状及展望[J]. 电工技术学报, 2022, 37(24): 6357-6371.
MAO Ling, ZHANG Zhonghao, ZHAO Jinbin, et al. Research status and prospects of fusion technology of vehicle-charging pile-power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(24): 6357-6371.

[22] 林楷东, 杨景旭, 张勇军, 等. 双电源供电充电站的需求响应优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 68-75.
LIN Kaidong, YANG Jingxu, ZHANG Yongjun, et al. A demand response optimization model for charging stations with dual power supply[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 68-75.

[23] 李斌, 李涛永, 刘畅, 等. 多充电桩并联谐振特性及虚拟阻尼控制策略[J]. 电气传动, 2018, 48(10): 70-74.
LI Bin, LI Taoyong, LIU Chang, et al. Parallel resonant characteristics and virtual damping control strategy of multi-charging pile[J]. Electric Drive, 2018, 48(10): 70-74.

[24] 周林. 直流充电桩测试系统设计与开发[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
ZHOU Lin. Design and development of DC charger test system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[25] 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.
TAO Xianfeng. Design and implementation of automatic test platform for DC charging pile of electric vehicle[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.

[26] 叶祥平, 张汉周, 陶显峰, 等. 直流充电桩自动测试平台设计[J]. 中国测试, 2018, 44(增刊 1): 129-134.
YE Xiangping, ZHANG Hanzhou, TAO Xianfeng, et al. Design of automatic test platform for DC charging pile[J]. China Measurement & Test, 2018, 44(S1): 129-134.

收稿日期: 2023-08-09; 修回日期: 2024-03-18

作者简介:

张倩(1990—), 女, 硕士, 工程师, 从事智能用电技术工作; E-mail: zhangqian20170801@163.com

陈熙(1990—), 女, 硕士, 工程师, 从事电动汽车充电及其检测技术工作;

王立永(1973—), 男, 博士, 高级工程师, 从事新能源技术工作。

(编辑 张颖)