

电动汽车充电系统功能安全分析

周荣

(中国汽车技术研究中心有限公司, 天津 300300)

摘要: 以 ISO26262(GB/T34590)《道路车辆 功能安全》为基础, 利用危害和可操作性分析(HAZOP)的方法, 结合典型的电动汽车充电系统架构, 进行了电动汽车充电系统危害分析和风险评估, 提出了电动汽车充电系统的安全目标和安全要求。

关键词: 充电系统; 功能安全; HAZOP; ASIL 等级; 安全目标

Functional safety analysis of EV charging system

ZHOU Rong

(China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: Based on ISO26262 (GB/T34590) "Road Vehicles Functional Safety", this paper uses hazard and operability analysis (HAZOP) method and combines with typical EV charging system architecture to carry out EV charging system hazard analysis and risk assessment. The safety goals and safety requirements of the EV charging system are put forward.

Key words: EV charging system; functional safety; HAZOP; ASIL level; security goals

0 引言

2009年中国开始实施“十城千辆节能与新能源汽车示范应用工程”, 从此中国的电动汽车大规模产业化正式拉开序幕。根据公安部2018年底发布的数据, 截止到2018年12月, 中国的电动汽车保有量达到261万辆, 2019年1月至4月, 中国的电动汽车产销量达到36.8万辆, 目前, 中国有超过300万辆电动汽车在上路行驶, 电动汽车的产销量和保有量都位于世界第一。中国的电动汽车在爆炸性增长的同时, 由于设计、制造、运行等过程中存在的问题, 安全事故不断。对2011年至2018年公开报道过的所发生的电动汽车安全事故进行了统计, 共发生电动汽车着火的安全事故117次(见图1)^[1-2]。2018年度着火事故达到40次, 呈加速的态势, 进一步分析发现, 这些着火事故大部分是在充电过程中或充电后的一段时间发生的, 大部分原因是电池过充或电池内短路造成电池热失控和热扩散, 并且发生着火的恶性事故的概率很大; 其次是从2009年实施十城千辆示范应用工程已经十年, 有大量的运行车辆的动力电池接近报废, 极易导致安全事故的发生; 再就是由于前几年电动汽车的快速发展, 质量控制问题突显, 2018年度国家市场监督管理总局就发布

了11次电动汽车召回公告, 累计召回13.57万辆, 质量控制不严也是造成事故频发的原因。综上所述, 电动汽车充电安全成为电动汽车安全保障工作的重中之重。

本文从分析电动汽车的充电安全着手, 通过引入目前广泛使用的功能安全标准 IEC61508 和 ISO26262 等的程序和分析方法, 以提高电动汽车充电系统的安全完整性等级(ASIL)为目标, 对电动汽车充电系统进行危害分析和风险评估, 通过相应的安全机制的设计, 提高电动汽车充电安全的技术水平。

1 充电系统的结构和失效机理

1.1 电动汽车充电系统的结构

目前, 市场上出现的充电技术大约分成三大类: 传导充电、无线充电和换电, 但是市场主流的充电技术是传导充电。由于篇幅的限制, 本文主要以传导充电为例进行分析和研究。

电动汽车传导式充电系统结构形式有交流充电系统和直流充电系统两大类(如图2所示)。交流充电系统由充电桩、充电接口、车载充电机、电池管理系统(BMS)和电池包组成; 直流充电系统由直流充电机、充电接口、电池管理系统(BMS)和电池包组成。

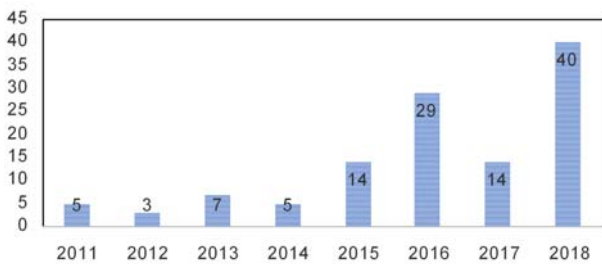


图 1 着火事故分布图
Fig. 1 Fire accident map

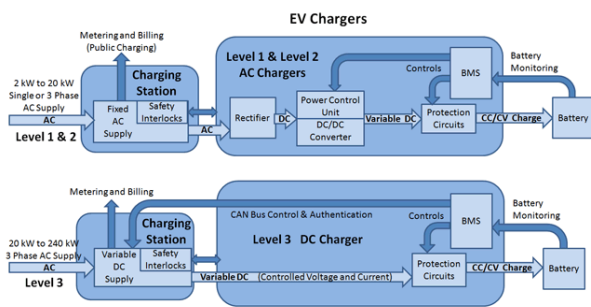


图 2 充电系统示意图
Fig. 2 Schematic diagram of charging system

1.2 充电系统的失效机理

1.2.1 电芯

1) 锂电池过充。电芯过充电时，正极的锂过度放出会使正极的结构发生变化，而放出的锂过多也容易无法插入负极中，也容易造成负极表面析锂，而且，当电压达到 4.5 V 以上时，电解液会分解生产大量的气体^[3-4]。

2) 锂电池负极能量不足。当锂电池正极部位的负极部位容量不足时，充电时所产生的锂原子无法插入负极石墨的间层结构中，会析在负极的表面形成结晶。在锂电池中长期形成结晶会导致短路，这时电芯急剧放电，会产生大量的热，烧坏隔膜。

3) 电池短路。分为内部短路和外部道路，内部电芯短路造成大电流放电，产生大量的热，烧坏隔膜，而造成更大的短路现象，会使电解液分解成气体，内部压力过大，电芯就会有危险；外部短路有可能是由于正负极接错所导致，由于外部短路，电池放电电流很大，会使电芯的发热，高温会使电芯内部的隔膜收缩或完全坏坏，造成内部短路。

1.2.2 电池包和电池系统

1) 机械结构。电芯连接不可靠；极限情况下(碰撞等)对电芯变形防护不好。

2) 电气安全。高压绝缘不良；极限情况下(着火等)阻燃效果差^[5]。

3) 热管理。夏天散热和冬天保温效果差；功能设计不合理(很多整车厂对放电考虑较全面，大功率充电考虑不足)。

4) 电池管理系统(BMS)。SOC 测算精度不够；通信功能不合要求；安全监控功能有缺陷等。

1.2.3 充电桩和直流充电机

漏电、绝缘失效以及与 BMS 通信失效等引起的人员触电，电池过充损坏以至起火燃烧。

1.2.4 充电接口

积尘、触头磨损、带电拔插(高压互锁不可靠)等引起过热导致人员受伤和设备损坏等。

1.2.5 日常维护

设备在使用一段时间后，会出现元器件老化、可靠性变差、性能降低和产生安全隐患等。

1.2.6 其他原因分析

车载充电机功能设计不合理；私自改装；不按要求充电等。

2 充电系统的功能安全导入

通过对大量的工业事故和灾难分析，起因都是与安全相关的系统的功能发生失效，因此，必须采取措施，用标准和法规来规范与安全相关的系统，避免技术缺陷造成灾难(生命、环境、设备、财产等)，从而催生了功能安全标准。2000 年国际电工组织(IEC)在吸收美国、德国等先进国家的安全标准的基础上，发布了 IEC61508《电子/电气/可编程电子安全相关系统的功能安全》系列标准，该标准的发布使得安全管理有据可依，它的理念和方法是对传统安全管理形式的一种突破。2010 年 IEC61508 标准发布了第二版。中国于 2006 年将 IEC61508 标准转换成中国国家标准 GB/T20438,2017 年将 IEC61508 标准第二版转换成 GB/T20438 第二版。2011 年国际标准化组织(ISO)在 IEC61508 标准的基础上，为了满足汽车产品安全管理的需要，发布了 ISO26262《道路车辆功能安全》系列标准，2017 年中国将 ISO26262 标准转换成中国国家标准 GB/T34590 系列标准^[6-7]。

IEC61508 标准和 ISO26262 标准关于安全管理的思路：以与安全有关的功能能够实现的概率，来保证安全的实现；让该功能的实现时时处于监视之下，当与安全有关的功能一旦丧失时，可及时获得相应信息；与安全有关的功能一旦丧失时，使其将会导致的伤害事件不发生，或至少降低其严重性，功能安全的衡量指标是安全完整性等级(SIL)或汽车安全性完整性等级(ASIL)。IEC61508 标准和 ISO26262 标准为制造厂提供了工业功能安全和车

辆功能安全的指导原则，制定了工业或车辆整个生命周期中与安全相关的所有活动，IEC61508 和 ISO26262 从需求开始，当中包括概念设计、软硬件设计，直至最后的生产、操作，都提出了相应的功能安全要求，其覆盖了工业或汽车整个生命周期，从而保证安全相关的电子产品的功能性失效不会造成危险的发生。功能安全标准的实施有二种途径：一种途径是严格按照功能安全标准的要求，产品概念、产品开发、生产和运行等全过程实施；另一种途径是对已经开发成功的产品，按照功能安全标准的要求，对产品进行检测和认证，不符合标准要求进行整改。ISO 26262 针对汽车行业重新定义了安全指标，与 IEC61508 标准相比：在汽车电子领域，几乎所有系统都是高要求或连续操作模式；几乎所有的系统都是类型 B (复杂系统)，即包含 MCU，不能诠释所有失效模式^[8-9]。

IEC61508 的安全完整性等级(SIL)分为 1~4 级，SIL4 为最高。ISO26262 的汽车安全完整性等级(ASIL)分为 A~D 级，D 级为最高。SIL 与 ASIL 的区别：在定义 SIL 时，IEC61508 会考虑针对在低要求、高要求或连续三种模式下运行系统的目标失效措施，用风险失效概率来表示。因此 SIL 被认为是一维的，只涉及规定操作模式下的失效概率(见表 1 和表 2)。但是 ASIL 涉及到严重性(S)、暴露率(E)和可控性(C)三个变量，ASIL 是三维的(见表 3)。IEC61508 是一个规范性标准，适用于高价值、小批量实施的系统；ISO26262 是一个基于目标的标准，适用于价值相对较低、大批量实施的系统^[10-11]。

表 1 安全完整性等级：在低要求下安全功能的目标失效量
Table 1 Safety integrity level: the target failure amount of safety functions under low requirements

安全完整性等级(SIL)	安全功能在要求时的危险失效平均概率($PF_{D,avg}$)
4	$\geq 10^{-5} \sim < 10^{-4}$
3	$\geq 10^{-4} \sim < 10^{-3}$
2	$\geq 10^{-3} \sim < 10^{-2}$
1	$\geq 10^{-2} \sim < 10^{-1}$

表 2 安全完整性等级：在高要求和连续模式下安全功能的目标失效量

Table 2 Safety integrity level: target failure of safety functions in high demand and continuous mode

安全完整性等级(SIL)	安全功能的每小时危险失效平均概率(PFH)
4	$\geq 10^{-9} \sim < 10^{-8}$
3	$\geq 10^{-8} \sim < 10^{-7}$
2	$\geq 10^{-7} \sim < 10^{-6}$
1	$\geq 10^{-6} \sim < 10^{-5}$

表 3 ASIL 等级确定

Table 3 ASIL determination

严重度等级	暴露概率	可控性等级		
		C1	C2	C3
S1	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	QM
	E3	QM	QM	A
	E4	QM	A	B
S2	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	A
	E3	QM	A	B
	E4	A	B	C
S3	E1	QM	QM	A
	E2	QM	A	B
	E3	A	B	C
	E4	B	C	D

注：QM(质量管理)表示不做要求。

按照 IEC61508 标准和 ISO26262 标准的适用范围，电动汽车充电系统的车载部分必须采用 ISO26262 标准，充电桩、充电机等地面设备可选 IEC61508 标准或 ISO26262 标准，但是充电桩和充电机等也属于大批量产品，采用 ISO26262 标准更有优势。(SIL 与 ASIL 对应关系关系见图 3)。

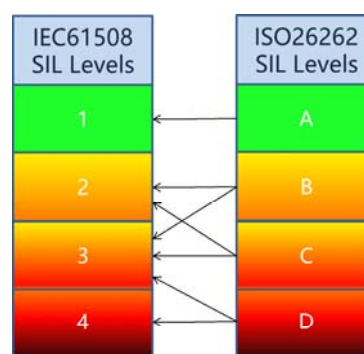


图 3 SIL 与 ASIL 对应关系

Fig. 3 SIL corresponds to ASI

3 充电系统的危害分析与风险评估

3.1 充电系统的功能

按照 ISO26262 标准的要求需要对充电系统的功能进行定义。从整车层面出发，电动汽车充电系统需要实现的功能是对可充电储能系统(动力电池包)补充电能和进行高压系统的监控和保护。在电动汽车充电系统中，需要实施功能安全标准的主要有充电机控制系统(含充电桩和线缆控制盒，下同)和电池管理系统等二个关键控制件，充电机控制系统通过与电池管理系统的通信，控制充电功率确保充电安全，同时监控绝缘和接触等是否良好，确保高

压安全。电池管理系统在充电过程中对充电电压、充电电流和充电温度等进行控制优化，计算电池的SOC等，与充电机控制系统进行通信，确保电池在充电过程中的安全。

3.2 充电系统的架构

在本文前面部分已经详细描述了充电系统的结构和失效机理，按照 ISO26262 标准给出的流程和方法，在进行安全分析的初期，需要定义相关项与其他相关项的功能边界及其相互接口，目的是定义相关项及其与环境和其他相关项的依赖性和相互影响。通过充电系统的架构就能够很好地理解充电系统的相关项、功能、系统或要素的结构的表现，识别结构模块以及边界和接口。图 4 是典型的电动汽车充电系统的架构示意图，描述了相关项的边界和接口。

3.3 充电系统危害识别

常用的安全分析方法有：安全检查表(SCL)，危险分析表(HAL)，危害和可操作性分析(HAZOP)，故障模式、影响和危害度分析(FMECA)，故障树分析(FTA)，事故树分析(ETA)，人为差错分析(HEA)等。这些分析方法帮助我们对失效原因和影响进行系统化和条理化的研究和分析，避免重复和遗漏。本文利用危害和可操作性分析(HAZOP)的方法，按照 ISO26262 标准的要求，对电动汽车充电系统进行危害分析与风险评估，提出充电系统的功能安全目标和功能安全要求。

本文对电动汽车充电系统的安全功能进行抽象，分为充电机控制系统的高压保护和电池管理系统的充电管理，并进行 HAZOP 分析，按照 HAZOP 的方法，将引导词分为功能丧失、在有需求时提供错误的功能、非预期功能和功能卡滞等四类。表 4

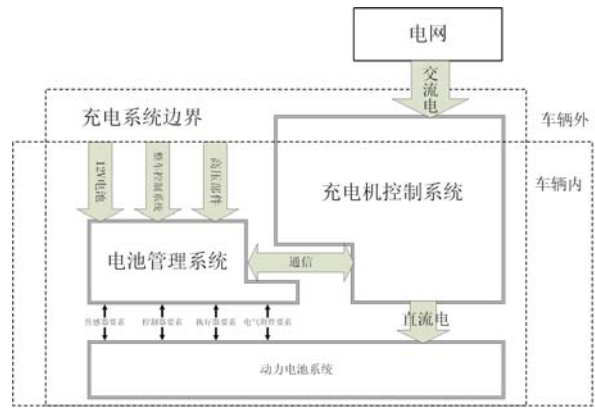


图 4 典型的电动汽车充电系统的架构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of a typical EV charging system

为应用 HAZOP 方法识别的高压保护和充电管理功能的异常表现。危害通常是针对整车层面来说的，表 5 为功能异常表现导致的整车层面的危害^[12-13]。

3.4 充电系统的危害分析和风险评估

通常危害需要结合特定场景才能形成危害事件，电动汽车充电时特定的场景有：无人值守充电、有人值守充电和充满电后静置。不管是快充和慢充，都有可能由于充电机控制系统和电池管理系统失效导致漏电、短路等以及动力电池系统过充、过流和过温而造成动力电池包产生热失控和热扩散，引发着火的危害。在不同的场景下，危害发生的严重度 S、驾驶员对危害的可控性 C 和场景的暴露概率 E 都有不同，需要逐条分析讨论。在利用 HAZOP 方法对充电系统进行危害分析和风险评估时，还需要结合功能丧失、在有需求时提供错误的功能、非预期功能和功能卡滞等四类情况具体分析，具体的安全要求要根据开发过程中的实际情况而定。

表 4 高压防护和充电管理功能的 HAZOP 分析-识别功能异常表现示例

Table 4 HAZOP analysis of high voltage protection and charge management functions-identification of abnormal performance examples

功能关键字	功能丧失	在有需求时提供错误的功能			非预期功能	功能卡滞	
		多于预期	少于预期	方向相反			
高压防护	绝缘监测	绝缘监测失效	N/A	该监控时没有监控	不该监控时监控	N/A	数据不更新
	漏电保护	漏电保护失效	不按要求频繁动作	该保护时不动作	不该保护时动作	N/A	卡滞在某动作
	短路保护	短路保护失效	不按要求频繁动作	该保护时不动作	不该保护时动作	N/A	卡滞在某动作
	高压互锁	高压互锁失效	N/A	时有时无	该互锁时不锁	不充电时接口无法脱开	N/A
充电管理	充电电压管理	电压管理失效	充电过压	N/A	N/A	N/A	卡滞在固定电压
	充电电流管理	电流管理失效	充电过流	充电电流不足	实际为放电	非预期充电	卡滞在固定电流
	充电温度管理	温度管理失效	N/A	N/A	N/A	N/A	卡滞在固定温度

表5 功能异常表现导致的整车层面的危害示例

Table 5 Examples of vehicle level hazards caused by abnormal performance

功能异常表现	整车层面的危害(最严重的情况)
充电时绝缘监测失效,造成对充电系统绝缘无法监控,当绝缘不良时引起某些部件等带电	电击,人员触电灼伤等
充电时漏电保护失效,造成充电时无法对漏电现象进行保护,引起某些部件带电	电击,人员触电灼伤等
充电时短路保护失效,造成充电时无法对短路进行保护,引起过流产生大量的热	起火,人员烧伤等
充电时高压互锁失效,造成充电时充电接口脱落,引起电弧或高压电暴露	起火或电击,人员烧伤或灼伤等
充电时电压超出预期,造成电池过充,引发热失控和热扩散	冒烟、起火、爆炸,人员烧伤或毒气中毒
充电时电流超出预期,造成电流过流,引发热失控和热扩散	冒烟、起火、爆炸,人员烧伤或毒气中毒
充电时温度超出预期,造成电流过温,引发热失控和热扩散	冒烟、起火、爆炸,人员烧伤或毒气中毒

表6是充电系统危害分析与风险评估示例。如果充电时发生着火危害,会危及到驾驶员、乘员或工作人员的生命,因此严重度定义为S3,对电动汽车充电(包括快充和慢充)几乎是每次驾驶都会发生的,所以将车辆充电的暴露概率定义为E4。车辆在无人值守充电和充满电后静置,驾驶员和工作人员对着火的危害不能控制,将可控性定义为C3;在有人值守充电时,驾驶员或工作人员能够看到冒烟或闻到燃烧气味,能够适度采取措施或离开,可以

避免产生人身伤害,对此危害有一定的可控性,固将可控性定义为C2。还有一个应用场景的细节需要考虑,对于纯电动汽车来说,经常会晚上在住所或者住所附近进行无人值守充电,此时如果充电导致着火极有可能引起住所所在的建筑物起火,人员及有可能在熟睡中无法对该危害进行回避,需要将汽车安全完整性等级定义为ASIL D,如果车库或充电位与住所不是连在一起,也可将汽车安全完整性等级定义为ASIL C^[14-16]。

表6 充电系统危害分析与风险评估示例

Table 6 Examples of hazard analysis and risk assessment for charging systems

整车层面 危害	系统面的 影响	可能的原因	危害场景	严重 度 S	暴露概率 E	可控 性 C	ASIL 等级
非预期的释放热能导致燃烧或明火	电池包释放热能导致燃烧或明火	电芯电压升高直至过充,电芯或者电池高阻抗引起过温,导致热失控和热扩散以及排气,引起电池包冒烟、起火以及化学物质泄漏;电池包过流甚至短路导致热失控和热扩散以及排气,引起电池包冒烟、起火以及化学物质泄漏;其他电芯设计失效或者缺陷导致的电芯内短路引起热失控和热扩散,引起电池包冒烟、起火以及化学物质泄漏。	晚上在住所或住所附近进行无人值守充电	S3	E4	C3	D/C
			晚上在住所或住所附近车辆充满电后静置	S3	E4	C3	D/C
			有人值守充电	S3	E2	C2	B

4 电系统的功能目标和安全要求

4.1 充电系统安全目标

根据上述充电系统的危害分析与风险评估,充电时,充电机控制系统和电池管理系统应发挥作用,进行高压保护和对充电管理,以避免电击、漏电、

短路和动力电池的过充、过流、过温等,导致着火和人员伤亡等的危害。根据不同的应用场景归纳出充电系统的安全目标。表7为电动汽车充电系统的安全目标示例。其中ASIL等级取分析的危害事件中最高的ASIL等级。

表7 充电系统安全目标示例

Table 7 Examples of charging system security goals

序号	系统层面失效	安全目标	ASIL
1	漏电	防止充电系统漏电导致设备带电	C
2	短路	防止充电系统过流产生大量的热	C
3	充电时充电接口脱落	防止充电接口产生电弧和高压电暴露	C
4	过充	防止电池过充,导致热失控和热扩散	C
5	过流	防止电池过流,导致热失控和热扩散	C
6	过温	防止电池过温,导致热失控和热扩散	C

4.2 充电系统安全要求

根据上述的充电系统安全目标得出该系统的安全要求，并将这些安全要求分配给充电系统架构中的不同要素，不考虑控制系统以外的独立的保护措施。

根据充电系统架构，需要考虑系统的安全状态；系统故障容错时间；故障探测或者失效减轻；故障或者失效的仲裁逻辑等要素。表 8 给出了充电系统功能要求的示例^[17-18]。

表 8 充电系统功能要求的示例

Table 8 Examples of functional requirements for charging systems

序号	安全目标	安全要求
1	防止充电系统漏电导致设备带电	充电机控制系统应监控充电系统的绝缘和漏电，当检测到绝缘不良和漏电时，使充电系统断开电源，进入安全状态。
2	防止充电系统过流产生大量的热	充电机控制系统应监控充电系统的短路，当检测到短路时，使充电系统断开电源，进入安全状态。
3	防止充电接口产生电弧和高压电暴露	充电机控制系统应监控充电系统的高压互锁，当检测到充电接口脱落时，使充电系统断开电源，进入安全状态。
4	防止电池过充，导致热失控和热扩散	BMS 应检测电芯电压，当电芯电压值超过安全阈值时，使电池系统在 FTTI 时间内进入安全状态
5	防止电池过流，导致热失控和热扩散	BMS 应检测电池系统的电流，当电流值超过安全阈值时，使电池系统在 FTTI 时间内进入安全状态
6	防止电池过温，导致热失控和热扩散	BMS 应检测电芯温度，当电芯温度值超过安全阈值时，使电池系统在 FTTI 时间内进入安全状态

5 结论

本文基于 ISO26262(GB/T34590)标准，利用 HAZOP 分析方法，尝试开展充电系统的危害分析和风险评估，提出了充电系统的功能安全目标和功能安全要求，对充电系统设计开发中推广应用功能安全标准有一定的借鉴意义。现在电动汽车在大规模产业化，对电动汽车提出更高的安全要求，以 IEC61508(GB/T20438)和 ISO26262(GB/T 34590)标准为基础的功能安全分析和应用将会越来越受到电动汽车行业的重视，以提高整个行业的安全保障水平。

参考文献

[1] 史宝华. 起火事故频发特来电两层防护充电网能让电动汽车更安全吗? [EB/OL]. [2019-05-13]. EV 世纪. https://mp.weixin.qq.com/s/Gj_D7DVTmkJ6iuO_5_nzqQ.
SHI Baohua. Can a two-layer protective charging network of Teld make electric cars safer?[EB/OL]. [2019-05-13]. EV Century. https://mp.weixin.qq.com/s/Gj_D7DVTmkJ6iuO_5_nzqQ.

[2] 两年内电动汽车共发生安全事故 48 起涉及 154 辆，概率约为十万分之二[EB/OL]. [2019-03-12]. EV Tank. <https://mp.weixin.qq.com/s/bYFM1yY-Buvtf6Y-NUO-FA>.
A total of 48 safety accidents involving 154 electric vehicles occurred within two years, with a probability of about 2 in 100,000[EB/OL]. [2019-03-12]. EV Tank. <https://mp.weixin.qq.com/s/bYFM1yY-Buvtf6Y-NUO-FA>.

[3] 电动汽车安全事故：电池缺陷与使用不当是主因 [EB/OL]. [2016-07-01]. 知行锂电. <https://mp.weixin.qq.com/s/YcGFMrl0UrFess3zj9H1VA>.

Electric vehicle safety accidents: battery defects and improper use are the main causes[EB/OL]. [2016-07-01]. MLE.<https://mp.weixin.qq.com/s/YcGFMrl0UrFess3zj9H1VA>.

[4] 电动汽车事故频发. 五大措施保障电池安全[EB/OL]. [2019-05-10] 奥动新能源. <https://mp.weixin.qq.com/s/qe1W7ucBZflfYW7xjNXi9g>
Electric vehicle accidents occur frequently, five measures to ensure battery safety[EB/OL]. [2019-05-10] Olympic New Energy. <https://mp.weixin.qq.com/s/qe1W7ucBZflfYW7xjNXi9g>

[5] 杨田, 刘晓明, 吴其, 等. 电动汽车充电站选址对电压稳定影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 31-37.
YANG Tian, LIU Xiaoming, WU Qi, et al. Research on impacts of electric vehicle charging station location on voltage stability[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 31-37.

[6] 电气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全: IEC61508—2010 (GB/T20438—2017)[S].
Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems: IEC61508—2010 (GB/T20438—2017)[S].

[7] 道路车辆 功能安全: ISO26262—2011 (GB/T34590-2017)[S].
Road vehicles-Functional safety: ISO26262—2011 (GB/T34590-2017)[S].

[8] 电动汽车传导充电系统 第一部分 通用要求: GB/T18487.1—2015[S].
Electric vehicle conductive charging system part 1: general requirements: GB/T18487.1—2015[S].

- [9] 吴连日. 电动汽车充电设施安规体系的分析[J]. 新能源汽车供能技术, 2017, 1(1): 23-31.
WU Lianri. Analysis of electric vehicle charging infrastructure safety systems[J]. Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles, 2017, 1(1): 23-31.
- [10] 冯晓升, 史学玲. 功能安全——一种保障安全的新思路[J]. 中国仪器仪表, 2005(10): 46-56.
FENG Xiaosheng, SHI Xueling. Functional safety-a new way to ensure safety[J]. China Instrumentation, 2005(10): 46-56.
- [11] 李波, 冯屹, 王兆, 等. 中国道路车辆功能安全标准化工作规划[J]. 中国标准化, 2017(12): 122-125.
LI Bo, FENG Yi, WANG Zhao, et al. Work plan for functional safety standardization of road vehicles in China[J]. China Standardization, 2017(12): 122-125.
- [12] 李波, 付越, 周荣. 电动汽车电池管理系统(BMS)功能安全标准研究[J]. 新能源汽车供能技术, 2019, 3(1): 19-23.
LI Bo, FU Ye, ZHOU Rong. Research on functional safety standard for battery management system (BMS) of electric vehicles[J]. Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles, 2019: 3(1): 19-23.
- [13] 朱洋洋, 贺春, 陈卓, 等. 电动汽车传导充电互操作典型测试案例分析[J]. 新能源汽车供能技术, 2019, 2(2): 29-32.
ZHU Yangyang, HE Chun, CHEN Zhuo, et al. Analysis of typical test of electric vehicle transmission on charging interoperability[J]. Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles, 2019, 2(2): 29-32.
- [14] 王龙宇, 刘灿, 王丙东, 等. 考虑微网充电站影响的输电网风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 114-121.
WANG Longyu, LIU Can, WANG Bingdong, et al. Risk based assessment method for transmission system considering the influence of micro-grid charging station[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 114-121.
- [15] 刘佳熙, 郭辉, 李君. 汽车电子电气系统的功能安全标准 ISO 26262[J]. 上海汽车, 2011(10): 58-61.
LIU Jiaxi, GUO Hui, LI Jun. Functional safety standard ISO 26262 for automotive electrical and electronic[J]. Systems Shanghai Auto, 2011(10): 58-61.
- [16] 申永鹏, 葛高瑞, 冯建勤, 等. 电动汽车交直流充电控制引导系统[J]. 新能源汽车供能技术, 2019, 2(4): 7-14.
SHEN Yongpeng, GE Gaorui, FENG Jianqin, et al. Design of control pilot system for AC/DC charging of electric vehicle[J]. Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles, 2019, 2(4): 7-14.
- [17] 王闪闪, 赵晋斌, 毛玲, 等. 基于电动汽车移动储能特性的直流微网控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 31-38.
WANG Shanshan, ZHAO Jinbin, MAO Ling, et al. A control strategy based on mobile energy storage characteristic of electric vehicles in DC micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 31-38.
- [18] 张戟, 万祥, 朱翔宇. 整车控制器功能安全设计和研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2016, 34(5): 683-687.
ZHANG Ji, WAN Xiang, ZHU Xiangyu. Functional safety design and research of vehicle controller[J]. Journal of Jiamusi university (Natural Science Edition), 2016, 34(5): 683-687.

收稿日期: 2019-09-08

作者简介:

周 荣(1959—), 男, 硕士, 研究员, 研究方向为电动汽车设计开发、汽车标准研究。E-mail: zhourong@catarc.ac.cn