

DOI:10.11918/202209001

# 改进型电动汽车无线充电磁耦合机构 互操作性评价方法

姜金海, 兰宇, 宋凯, 杨光

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 不同类型无线充电设备的互操作性是影响电动汽车无线充电技术普及的重要因素。互操作性指不同地面和车载设备匹配时,系统以规定效率输出额定功率的能力。针对现有互操作性评价方法存在评价判据不全面、评价结果准确性低等问题,引入表征系统谐振特性和负载特性的失谐因子与负载因子,提出一种基于双因子的互操作性评价方法。首先,分析基于传统地面侧与车辆侧端口阻抗的方法在评价系统效率方面的不足;随后,建立失谐因子和负载因子与系统功率、效率及电流限值之间的数学关系,根据国家标准限值推导可互操作的双因子区域及其边界函数,得到基于双因子的互操作性评价判据。实验结果表明,所提方法可从输出功率、系统效率和电流限值三方面综合评价互操作性,不仅解决了传统阻抗法评价判据不全面的问题,还提升了评价结果的准确性。

**关键词:** 电动汽车无线充电;磁耦合机构;互操作性;端口阻抗;失谐因子

中图分类号: TM12

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2026)03-0001-09

## Improved interoperability evaluation method for magnetic coupler of wireless EV charging

JIANG Jinhai, LAN Yu, SONG Kai, YANG Guang

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The interoperability of different assemblies is an essential factor affecting the popularization of wireless electric vehicle charging technology. Interoperability refers to the ability of the system to output rated power with specified efficiency when different ground and vehicle assemblies are paired. Aiming at the problems of incomplete evaluation criteria and low accuracy of evaluation results, this paper introduces the detuning factor and load factor representing the system resonance and load, respectively, and proposes an interoperability evaluation method based on two factors. Firstly, the limitations of the traditional evaluation method based on interface impedance are revealed. Secondly, the relationship between the detuning/load factors and system power, efficiency, and current limits are established. Then, according to the limits specified in national standards, the two factors' interoperable region and its boundary functions are deduced, and the interoperability evaluation criterion based on the two factors is obtained. Experiments show that the proposed method can evaluate interoperability comprehensively from output power, system efficiency, and current limits. It not only solves the problem of incomplete evaluation criteria in the traditional method, but also improves the accuracy of interoperability evaluation results.

**Keywords:** electric vehicle wireless charging; magnetic coupler; interoperability; interface impedance; detuning factor

在电动汽车无线充电(wireless electric vehicle charging, WEVC)技术产业化过程中,随着技术的持续迭代,各类无线充电设备之间的互操作性已成为关键技术环节<sup>[1]</sup>。互操作性的定义是不同地面设备和车载设备匹配时,系统以规定效率输出额定功率的能力<sup>[2]</sup>。互操作性差将导致设备匹配时充电

效率低下,造成电能浪费,甚至无法正常充电。尤其在公共充电场景中,若无法保障车载设备与公共充电装置的互操作性,将导致大量车辆无法使用该充电装置,严重阻碍电动汽车无线充电产业的发展。

如图1所示,WEVC系统的互操作性包括通信、补偿网络和磁耦合机构3个层面<sup>[3]</sup>。其中,通信互

收稿日期: 2022-09-01; 录用日期: 2022-10-20; 网络首发日期: 2023-12-14

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20231214.0841.003>

基金项目: 国家自然科学基金(52277006)

作者简介: 姜金海(1987—),男,博士,副教授

通信作者: 宋凯, kaisong@hit.edu.cn

操作性由通信硬件与通信协议决定,理论瓶颈较少;补偿网络互操作性主要考察电路拓扑匹配时的输出特性,仅涉及电路模型的推导,相关研究也比较深入;而磁耦合机构互操作性涉及功率、效率、传输距

离、偏移容忍度等多个参量,属于多目标优化、多物理场耦合、多尺度协同控制的复杂问题,目前相关研究尚不充分。

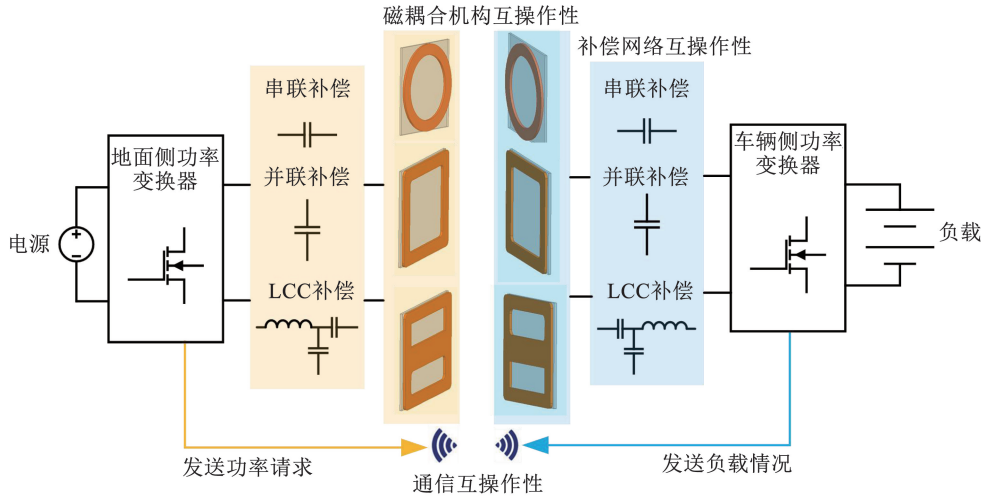


图 1 电动汽车无线充电系统互操作性

Fig. 1 Interoperability of WEVC system

为准确评价磁耦合机构之间的互操作性,现有研究通常采用以下方法。

1) 基于功率效率的评价方法

由于互操作性的核心评价指标是功率和效率,评价任意两台设备是否具有互操作性最常用和最直观的方法是功率效率评价法。国际标准 SAE J2954 及国家标准 GB/T 38775.7 - 2021 明确规定:被测系统必须在规定的充电位置,以目标效率传输额定功率,额定工作点效率不低于 85%,最大偏移点效率不低于 80% [4-5]。该方法在国外产业界广泛应用,如美国高通公司对不同产品进行了互操作性测试 [6-7],通过效率测试结果判断是否满足互操作性要求。Witricity、高通等企业 与韩国科学技术院 (KAIST) 等科研机构合作,通过开展功率因数测试、电磁暴露水平评估和人体安全性验证,丰富了互操作性测试的内涵 [8-9]。然而,该方法只能表征端口外部能量特性,无法反映端口内部参数对互操作性的影响,无法为产品优化设计提供理论依据。

2) 基于线圈自身参数的评价方法

针对功率效率评价法需满功率测试的局限,橡树岭国家实验室提出基于 kQ 参数的评价方法,即通过耦合系数(k)与品质因数(Q)对不同系统的性能进行评价 [10],然而仅 k、Q 两项参数难以覆盖互操作性的多维度要求。德国汽车企业联合会提出基于线圈安匝数的评价方法:在额定输出功率下,通过检测线圈安匝数是否低于上限值判断互操作性是否达标 [11]。但该方法仍需满功率交叉测试,与功率效率

评价法相比没有显著优势。

3) 基于端口特征的评价方法

为解决无法关联内部参数和互操作性的问题,德国卡尔斯鲁厄理工学院首次提出基于端口阻抗的评价方法 [12]:定义车辆侧设备 (vehicle assembly, VA) 端口阻抗  $Z_{VA}$  和地面侧设备 (ground assembly, GA) 端口阻抗  $Z_{GA}$ ,并分别规定了二者的标准取值区域;当被测设备端口阻抗值位于阻抗标准区域内,则互操作时输出功率可达到标准值,满足互操作性要求。由于端口阻抗表达式中包含线圈自感、互感、负载等参数,通过将阻抗测量值映射到标准区域并与标准值进行比较,可精准确定设备参数的调整方向,使端口阻抗更接近标准值,以提升互操作性水平。在此基础上,德国慕尼黑理工大学将基准设备不同负载电压下的端口阻抗点投影至复平面,形成可互操作的阻抗范围 [13-14]。作者所在研究团队在原有阻抗基础上定义了相关特征系数,对传统阻抗区域进行精确划分,降低了边界处的误判率。清华大学欧阳明高院士团队和河北工业大学张献教授团队也针对该方法提出了相应的改进措施 [15-17],有效拓展了端口阻抗评价法的应用范围。

综上所述,尽管端口阻抗评价法在描述系统参数影响、改善评价结果可视化等方面具有优势,但仍存在一些不足:

1) 基准阻抗区域的边界缺乏精确数学函数支撑 (现有研究多通过基准设备的阻抗计算值或测量值连线形成该区域),难以保证区域边界处评价的

准确性。

2) 仅依靠端口阻抗值难以表征传输效率等关键指标,评价维度不全面。

本文针对上述不足,提出基于双因子的改进型端口阻抗评价法,旨在提升互操作性评价的准确性与全面性。

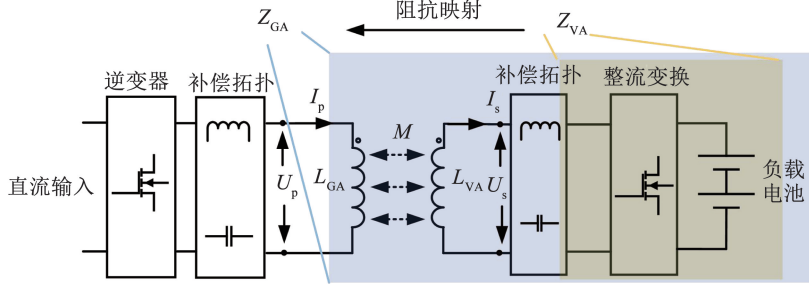


图2 端口阻抗的电路表征

Fig.2 Circuit characterization of the interface impedance

根据阻抗映射理论,从输入端口将接收侧电路等效为串联在发射侧的反射阻抗,由式(1)计算得到:

$$Z_{\text{ref}} = \frac{(\omega M)^2}{j\omega L_{VA} + r_{VA} + Z_{VA}} \quad (1)$$

式中: $\omega$ 为工作角频率; $M$ 为线圈互感; $L_{VA}$ 为车辆侧接收线圈的自感, $r_{VA}$ 为其内阻; $L_{GA}$ 为地面侧发射线圈的自感, $r_{GA}$ 为其内阻。

系统输出功率 $P_{\text{sec}}$ 和传输效率 $\eta$ 表达式分别为:

$$P_{\text{sec}} = I_p^2 \text{Re}(Z_{\text{ref}}) = (\omega M I_p)^2 \frac{A}{A^2 + B^2} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\text{Re}(Z_{\text{ref}})}{\text{Re}(Z_{\text{ref}}) + r_{GA}} = \frac{(\omega M)^2 A}{(\omega M)^2 A + r_{GA}(A^2 + B^2)} \quad (3)$$

式中:

$$\begin{cases} A = r_{VA} + \text{Re}(Z_e) \\ B = \omega L_{VA} + \text{Im}(Z_e) \end{cases} \quad (4)$$

由式(2)~(4)可知:当系统工作频率和发射线圈电流 $I_p$ 固定时,系统输出功率与传输效率的决定因素有 $M$ 、 $L_{VA}$ 、 $Z_{VA}$ 和 $r_{GA}$ 。 $Z_{GA}$ 的表达式为

$$Z_{GA} = j\omega L_{GA} + r_{GA} + \frac{(\omega M)^2}{j\omega L_{VA} + Z_{VA}} \quad (5)$$

可以发现, $Z_{VA}$ 和 $Z_{GA}$ 包含了决定输出功率与传输效率的全部关键参数,二者具备作为互操作性评价指标的必要条件。

## 1.2 互操作性的端口阻抗表征模型

由式(5)推导得到 $Z_{GA}$ 的实部和虚部表达式:

$$\begin{cases} \text{Re}(Z_{GA}) = r_{GA} + \frac{(\omega M)^2 \text{Re}(Z_{VA})}{\text{Re}(Z_{VA})^2 + [\omega L_{VA} + \text{Im}(Z_{VA})]^2} \\ \text{Im}(Z_{GA}) = \omega L_{GA} + \frac{(\omega M)^2 [\omega L_{VA} + \text{Im}(Z_{VA})]}{\text{Re}(Z_{VA})^2 + [\omega L_{VA} + \text{Im}(Z_{VA})]^2} \end{cases} \quad (6)$$

## 1 基于端口阻抗的互操作性评价方法

### 1.1 端口阻抗的电路表征

WEVC系统的端口阻抗电路模型如图2所示。其中, $Z_{VA}$ 为VA侧线圈两端向负载方向的整体阻抗; $Z_{GA}$ 为GA侧线圈两端向负载方向的整体阻抗。

如式(6)所示,可通过被测阻抗与基准阻抗的关系判断被测产品是否具有互操作性。

1) 对于 $Z_{GA}$ :实部 $\text{Re}(Z_{GA})$ ,若除 $r_{GA}$ 外的部分增大,则实现相同输出功率所需 $I_p$ 减小,容易实现互操作,因此,判据为 $\text{Re}(Z_{GA})$ 不小于基准值;虚部 $\text{Im}(Z_{GA})$ ,若除 $\omega L_{GA}$ 外的部分增大,则会引入额外虚部导致系统功率容量下降,能否输出额定功率存疑,因此,判据为 $\text{Im}(Z_{GA})$ 不大于基准值。

2) 对于 $Z_{VA}$ :实部 $\text{Re}(Z_{VA})$ ,若被测值增加,则反射至GA侧的 $\text{Re}(Z_{VA})$ 随之下降,不利于互操作,故 $\text{Re}(Z_{VA})$ 的通过性判据是被测值不大于基准值;虚部 $\text{Im}(Z_{VA})$ ,仅当 $\omega L_{VA} + \text{Im}(Z_{VA})$ 趋向零时,才能避免 $Z_{GA}$ 引入额外虚部,但无法确定额外虚部是否会导致互操作性丧失,故 $\text{Im}(Z_{VA})$ 的通过性判据不明确。

在输出额定功率的前提下,根据国家标准线圈参数计算基准设备的端口阻抗集合,并映射到复平面,形成基准阻抗区域,如图3所示。

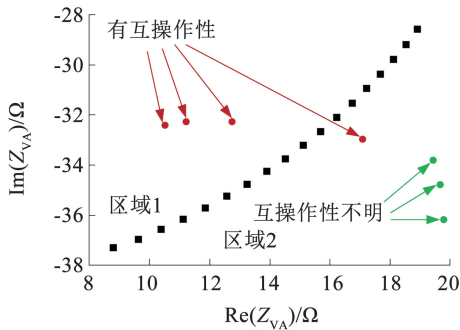
由图3可以看出, $Z_{VA}$ 与 $Z_{GA}$ 基准阻抗点均将阻抗平面分为2个区域,若被测阻抗位于基准阻抗点组成的射线上,则表示被测产品与基准设备完全等效。对于 $Z_{VA}$ ,区域1中的阻抗点代表相同 $\text{Im}(Z_{VA})$ 时具有更小的 $\text{Re}(Z_{VA})$ ,可保证额定输出功率,因此可判定GA与VA具备互操作性;区域2中的阻抗点代表相同 $\text{Im}(Z_{VA})$ 时具有更大的 $\text{Re}(Z_{VA})$ ,其输出是否达到额定值难以判断,互操作性存疑。对于 $Z_{GA}$ ,区域1中的阻抗点代表 $\text{Re}(Z_{GA})$ 不低于基准值,可保证额定输出功率,因此可判定VA与GA具备互操作性;区域2中的阻抗点代表相同 $\text{Re}(Z_{GA})$ 时具有更大的 $\text{Im}(Z_{GA})$ ,在GA侧引入的更大虚部是否影响系统

性能无法判断,因此互操作性存疑。

在传统阻抗评价法中,大量阻抗点的互操作性难以直观判定,导致其准确性和完备性受限。具体地,传统阻抗评价法在应用中面临以下问题:

1) 判据过于严格:要求被测产品性能不低于基准设备,而国家标准仅要求效率不低于 85%,偏移时不低于 80%,可能导致部分合格产品被误判。

2) 指示性不足:仅能通过被测阻抗点所在区域

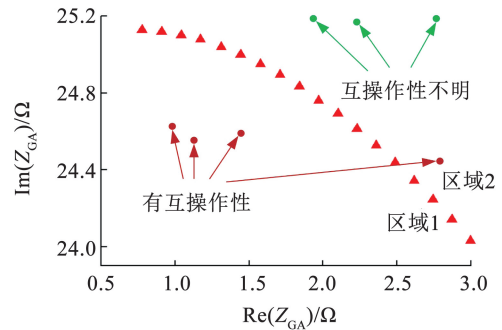


(a) 车辆侧端口阻抗区域

判断产品是否具有互操作性,无法从中获知不同阻抗值对应的系统工况,不利于产品优化。

3) 边界准确性低:图 3 中两个区域内均存在可互操作的阻抗点,表明该方法的基准阻抗边界无法精确区分互操作性是否达标,评价准确性受限。

综上所述,传统阻抗评价法虽能反映不同参数对互操作性的影响,但在准确性、指示性和实用性方面仍有待改进。



(b) 地面侧端口阻抗区域

图 3 根据国家标准参数绘制的基准阻抗区域

Fig. 3 Reference impedance region referring to national standards

## 2 基于双因子的改进型端口阻抗评价法

### 2.1 失谐因子和负载因子的引入

为解决传统阻抗评价法的不足,本章引入两类表征车载端电气特征的评价因子,对基准阻抗区域进行重构。

将式(5)变形为

$$Z_{GA} = j\omega L_{GA} + r_{GA} + \frac{(\omega M)^2}{\text{Re}(Z_{VA}) [1 + j \frac{\text{Im}(Z_{VA}) + \omega L_{VA}}{\text{Re}(Z_{VA})}]} \quad (7)$$

引入失谐因子  $\delta$  和负载因子  $\xi$ 。 $\delta$  反映车载端线圈、补偿拓扑和负载变化对谐振状态的影响; $\xi$  反映互感和负载的变化对系统输出功率的影响。定义如下:

$$\begin{cases} \delta = \frac{\text{Im}(Z_{VA}) + \omega L_{VA}}{\text{Re}(Z_{VA})} \\ \xi = \frac{(\omega M)^2}{\text{Re}(Z_{VA})} \end{cases} \quad (8)$$

$\delta$  为车载端回路阻抗虚部与实部的比值, $\delta = 0$  代表车载端回路完全谐振, $\delta > 0$  代表车载端回路呈感性, $\delta < 0$  代表车载端回路呈容性。故通过  $\delta$  的取值可判断车载端是否工作在可接受的失谐范围内。 $\xi$  与反射阻抗具有相似特性,与输出功率直接相关,通过  $\xi$  的取值可判断车载端的功率输出能力。将式(8)代入式(7)可得:

$$Z_{GA} = j\omega L_{GA} + r_{GA} + \frac{\xi}{1 + j\delta} =$$

$$\left( \frac{\xi}{1 + \delta^2} + r_{GA} \right) - j \left( \frac{\delta \xi}{1 + \delta^2} + \omega L_{GA} \right) \quad (9)$$

其中,

$$\begin{cases} \delta = - \frac{\text{Im}(Z_{GA}) + \omega L_{GA}}{\text{Re}(Z_{GA}) - r_{GA}} \\ \xi = [\text{Re}(Z_{GA}) - r_{GA}] + \frac{[\text{Im}(Z_{GA}) + \omega L_{GA}]^2}{\text{Re}(Z_{GA}) - r_{GA}} \end{cases} \quad (10)$$

$\xi$  和  $\delta$  共同决定系统能否输出额定功率。相同线圈电流下,输出功率随  $\xi$  增大而上升,随  $\delta^2$  增大而下降,因此,根据线圈电流限值可推导双因子的取值范围。

### 2.2 基于双因子的评价原理

以 WPT1/Z3 功率等级为例(国标规定 GA 线圈电流有效值不超过 65 A,输出功率不低于 3.3 kW),忽略  $r_{GA}$  的影响,系统满足功率要求的条件是“该电流在  $\text{Re}(Z_{GA})$  上产生的功率不低于 3.3 kW”,即:

$$\frac{65^2 \xi}{1 + \delta^2} \geq 3300 \quad (11)$$

由式(11)可以得出, $\delta$  的取值范围随  $\xi$  增加而逐渐扩大。由式(9)和(10)可推导出式(12)和式(13),以此在  $Z_{GA}$  阻抗平面绘制  $\delta$  和  $\xi$  的取值曲线,如图 4(a)所示。可以发现,随着  $\delta$  取值改变,在阻抗平面内产生一系列近似以  $(0, \omega L_{GA})$  为起点的射线,其斜率由  $\delta$  决定。表示  $\xi$  的曲线族是以  $(r_{GA} + \xi/2, \omega L_{GA})$  为圆心, $\xi$  为直径的圆。

$$\text{Im}(Z_{GA}) \approx \omega L_{GA} - \delta \text{Re}(Z_{GA}) \quad (12)$$

$$[\operatorname{Re}(Z_{GA}) - \frac{\xi}{2}]^2 + [\operatorname{Im}(Z_{GA}) - \omega L_{GA}]^2 = (\frac{\xi}{2})^2 \quad (13)$$

通过式(11)可获取  $\xi$  和  $\delta$  的上下限值,其中, $\xi$  越大越能保证额定功率输出,其上限值将在下文推导。当  $\delta$  为 0 时, $\xi$  取其下限值  $0.78 \Omega$ 。该下限值会随输出功率等级及线圈电流限值变化而改变,若  $\xi$  下限值小于  $0.78 \Omega$ ,则表明功率等级低于 WPT1,或线圈电流限值高于  $65 \text{ A}$ ,但不影响本文所提方法的有效性。而对于取值不同的  $\xi, \delta$  的上下限值可由式(14)计算得到:

$$-\sqrt{(\xi/0.78) - 1} \leq \delta \leq \sqrt{(\xi/0.78) - 1} \quad (14)$$

进一步考虑另一互操作性评价指标,即传输效率。互操作时的传输效率等效为 VA 和 GA 侧效率的乘积。其中,GA 与 VA 侧效率由式(15)计算:

$$\begin{cases} \eta_{GA} = \frac{\operatorname{Re}(Z_{GA}) - r_{GA}}{\operatorname{Re}(Z_{GA})} = \frac{\xi}{\xi + (1 + \delta^2)r_{GA}} \\ \eta_{VA} = \frac{\operatorname{Re}(Z_{VA}) - r_{VA}}{\operatorname{Re}(Z_{VA})} \end{cases} \quad (15)$$

国标规定 VA 线圈电流有效值不超过  $35 \text{ A}$ ,故  $\operatorname{Re}(Z_{VA})$  下限值为  $3.3 \text{ kW}/(35 \text{ A})^2 = 2.69 \Omega$ ,而 VA 线圈内阻  $r_{VA}$  与  $\operatorname{Re}(Z_{VA})$  通常相差 2~3 个数量级,VA 侧效率近似为 1,讨论中可忽略,互操作时的

系统效率主要由 GA 侧效率决定。由于国标对正对和偏移时系统效率的规定值分别为  $85\%$  和  $80\%$ ,反映到磁耦合机构大致为  $94\%$  和  $88\%$ ,取  $r_{GA}$  为国标参数,可得:

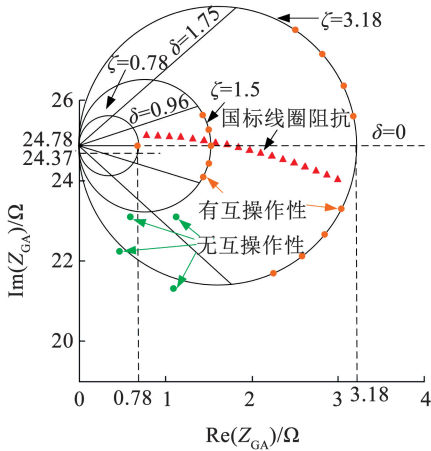
$$\begin{cases} \eta_{GA} = \frac{\xi}{\xi + 0.04(1 + \delta^2)} \geq 94\%, & \text{正对时} \\ \eta_{GA} = \frac{\xi}{\xi + 0.04(1 + \delta^2)} \geq 88\%, & \text{偏移时} \end{cases} \quad (16)$$

$\delta$  在正对和偏移时的取值范围分别为:

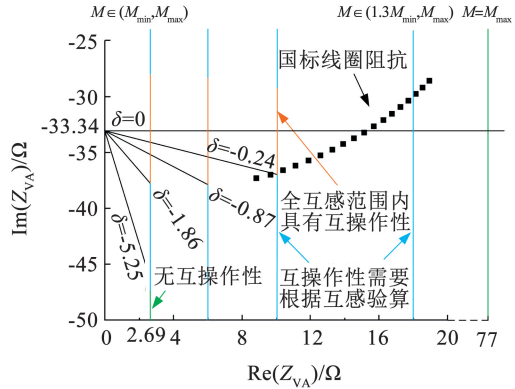
$$\begin{cases} -\sqrt{1.59\xi - 1} \leq \delta \leq \sqrt{1.59\xi - 1}, & \text{无偏移} \\ -\sqrt{3.41\xi - 1} \leq \delta \leq \sqrt{3.41\xi - 1}, & \text{最大偏移} \end{cases} \quad (17)$$

由式(17)计算得到的  $\delta$  取值范围大于式(14)的范围。由于输出功率和传输效率均需达到限值,对式(14)和式(17)所得集合进行“与”运算得到  $\delta$  的上下限仍如式(14)所示。

此处可推导  $\xi$  的上限值。结合 VA 线圈电流上限, $3.3 \text{ kW}$  功率等级下  $\xi$  的上限值由式(8)求得,每个互感  $M$  下均存在  $\xi$  上限为  $\xi \leq (\omega M)^2/2.69$ 。因此,使用  $Z_{GA}$  评价产品 VA 互操作性时,需先测量全偏移范围内产品 VA 与基准 GA 的互感,根据所得互感计算  $\xi$  上下限值,进一步得到  $\delta$  取值范围。



(a) 地面侧端口阻抗区域



(b) 车辆侧端口阻抗区域

图4 地面侧与车辆侧端口阻抗基准区域

Fig.4 Reference impedance regions of  $Z_{GA}$  and  $Z_{VA}$

不难看出,表示  $\xi$  的曲线族是一系列通过点  $(r_{GA}, \omega L_{GA})$ 、沿横轴分布的圆,最终形成一个圆形平面,在图 4(a)中以直径为  $0.78, 1.5$  和  $3.18$  的 3 个圆为例进行分析。为反映  $\xi$  和  $\delta$  之间存在的相互影响,每个圆均与以相应  $\delta$  为斜率的射线相交,则圆弧可分为被射线所夹部分和其他部分。

1) 直径为  $0.78$  的圆表示  $\xi$  取下限值  $0.78 \Omega$ ,此时保证互操作时额定功率输出的条件是  $\delta = 0$ ,故射线  $\delta = 0$  与圆的交点是该圆周上唯一满足互操作

性要求的点。圆内部区域由于  $\xi$  低于下限值,无法以不超过  $65 \text{ A}$  的电流输出额定功率。

2) 直径为  $1.5$  的圆表示  $\xi$  取  $1.5 \Omega$ ,此时保证互操作时额定功率输出的条件是  $\delta \in (-0.96, 0.96)$ ,故斜率符合该范围的所有射线与圆周的交点,被两条射线所夹圆周上的所有点均满足互操作性要求。

3) 直径为  $3.18$  的圆表示  $\xi$  取国标参数下的上限值  $3.18 \Omega$ ,同理可得,被斜率为  $\pm 1.75$  的两条射

线所夹圆周上的所有点均满足互操作性要求。

由上述分析可得,对于国标参数,满足互操作性要求的区域为:以(0.78, 24.78)为圆心,弧度逐渐增加的圆弧组成的近似扇形平面。对于任一被测  $Z_{GA}$ ,根据阻抗点在图 4(a)中所处区域可判断被测产品 VA 是否满足互操作性要求。

以上介绍了产品 VA 与基准 GA 互操作时的评价方法。使用基准 VA 与产品 GA 互操作时,上述方法中的被测量变为  $Z_{VA}$ ,需要确定  $Z_{VA}$  阻抗区域。

第一,如前文所述, $\text{Re}(Z_{VA})$  的下限值为 2.69  $\Omega$ ,低于下限时无法在电流限制内输出额定功率。其理论上限值由于互感无上限而无法确定,此处考虑实际情况,为便于分析,根据国标互感最大值和  $\xi$  最小值计算  $\text{Re}(Z_{VA})$  上限值为 77  $\Omega$ 。

第二,额定功率输出时必须考虑被测 GA 线圈电流是否超限,故在  $\text{Re}(Z_{VA})$  由 2.69  $\Omega$  变化至 77  $\Omega$  过程中,需根据对应互感值分别验算  $\xi$  是否满足式(10),这表示每个  $\text{Re}(Z_{VA})$  在不同互感下均对应一个  $\delta$  的范围。例如, $\text{Re}(Z_{VA})$  为 2.69  $\Omega$  时,根据式(17)计算得到国标互感最小及最大值对应的  $\delta$  范围分别为 (-1.86, 1.86) 和 (-5.25, 5.25),而  $\text{Re}(Z_{VA})$  为 77  $\Omega$  时,系统仅能在国标互感最大值和  $\delta=0$  时满足互操作性要求。若  $\delta$  属于互感最小值对应的取值范围,全互感范围内必然满足互操作性;若  $\delta$  属于互感最大值对应的取值范围,互操作性还需进一步验证。

由于  $Z_{VA}$  不包含互感信息,需测得产品 GA 与基准 VA 之间的互感值,并由此分别计算  $\xi$  和  $\delta$ ,代入式(13)计算取值范围。

第三,关注  $\delta$  对传输效率的影响,其上下限的计算与分析  $Z_{GA}$  时一致,不超过限值表示传输效率不低于标准值。

由式(8)可推导出:

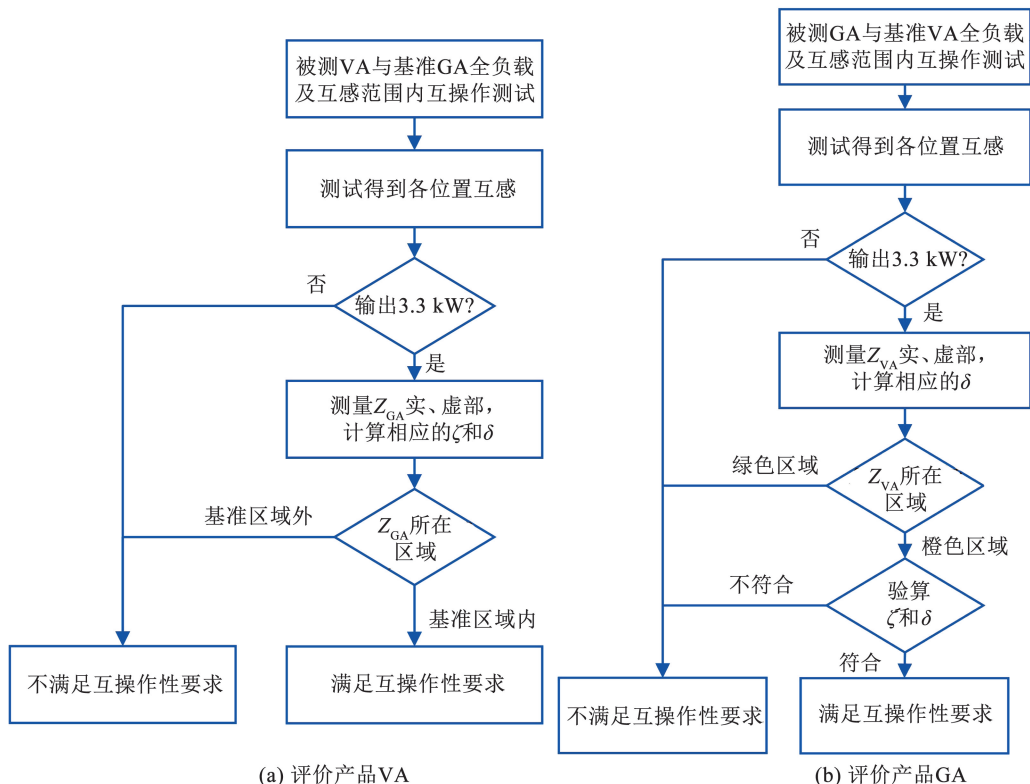
$$\text{Im}(Z_{VA}) = \delta \text{Re}(Z_{VA}) - \omega L_{VA} \quad (18)$$

式(18)表明, $\delta$  的取值曲线为以(0,  $-\omega L_{VA}$ )为起点的射线,斜率由  $\delta$  决定,如图 4(b)所示。图中橙色部分为不同  $\text{Re}(Z_{VA})$  下必然满足互操作性的阻抗区域;蓝色部分为互操作性需要验算的区域;绿色部分为必然不具备互操作性的区域。其中,橙色区域随  $\text{Re}(Z_{VA})$  增加而减小,近似呈三角形分布;蓝色区域随  $\text{Re}(Z_{VA})$  先扩大后缩小至一个点。可以发现,国标线圈阻抗点大部分分布于橙色区域,小部分位于蓝色区域的阻抗点经过互感验算证实具有互操作性。

对  $Z_{VA}$  测量值的互操作性验算方法为:首先,测得产品 GA 与基准 VA 之间在各测试位置的互感值  $M$ ;之后,对每个  $Z_{VA}$  测量值,根据对应的  $M$ ,由式(8)计算得到  $\xi$  和  $\delta$ ;最后,根据式(14)判断此时  $\delta$  是否在  $\xi$  决定的取值范围内,若在,则互操作性得到验证,反之不具有互操作性。

### 2.3 基于双因子的评价流程与判据

基于双因子的互操作性评价流程如图 5 所示。



(a) 评价产品 VA

(b) 评价产品 GA

图 5 双因子评价法的评价流程

Fig. 5 Evaluation process of the two-factor evaluation method

对于不同功率等级的产品互操作性评价,由于电流限值不同,可互操作的双因子区域也存在差异,以 WPT1/Z3 功率等级为例,双因子的评价判据为:

1)评价产品 VA 时,每个测试位置的互感对应一个  $\xi$  上限值, $\xi$  下限值固定。若被测  $Z_{GA}$  位于以  $\xi$  为直径的圆与以  $\pm \delta$  为斜率的射线所截圆弧上,则该产品 VA 满足互操作性要求,反之不满足。

2)评价产品 GA 时,若被测  $Z_{VA}$  位于由  $Re(Z_{VA}) = 2.69 \sim 77 \Omega$  构成的射线与以  $\pm \delta$  为斜率的射线所截线段上,且满足上述  $Z_{VA}$  测量值验算条件,则该产品 GA 满足互操作性要求,反之不满足。

基于双因子的互操作性评价方法改善了传统阻抗法的不足,具体体现在:

1)该方法不再单纯比较被测产品与基准设备的阻抗大小,而是直接将国标功率、效率要求转化为复平面区域,改善了基准设备性能过高导致的误判。

2)失谐因子和负载因子比传统阻抗更清晰地反映了失谐程度、负载、互感和线圈内阻等对互操作性的影响。对于不满足互操作性要求的产品,被测阻抗点所在位置可指导产品参数优化,以提升互操作性。

3)相比于传统阻抗法,明确规定了满足互操作性要求的区域边界,有利于提升评价准确性和方法的标准化。

### 3 实验验证

测试对象为国家标准 WPT1/Z3 方案,选择负载  $15 \Omega$  和  $55 \Omega$ ,分别表示负载电压低于和超过上限  $420 V$  的工况。测试平台如图 6 所示,主要包括:高频逆变电源、具备  $x, y, z$  三方向运动能力的测试台架(用于模拟 VA 与 GA 设备不同偏移情况)、电子负

载(用于模拟电池充电时的等效负载)。通过功率分析仪测量系统输出能效特性,使用示波器观测端口电压、电流并计算相应阻抗值。



图 6 磁耦合机构互操作性测试平台

Fig. 6 Interoperability test platform for magnetic couplers

图 7 所示为示波器记录的 GA 端口电压及电

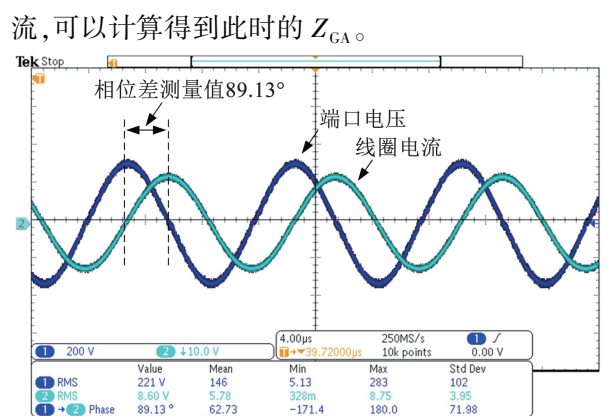


图 7 示波器记录的 GA 端口电压及电流

Fig. 7 GA port voltage and current recorded by the oscilloscope

在满功率输出条件下对端口阻抗进行测试,两种负载阻值下的被测阻抗值分别记录在图 4 所示的阻抗区域中,用红色三角形阻抗点表示,如图 8 所示。

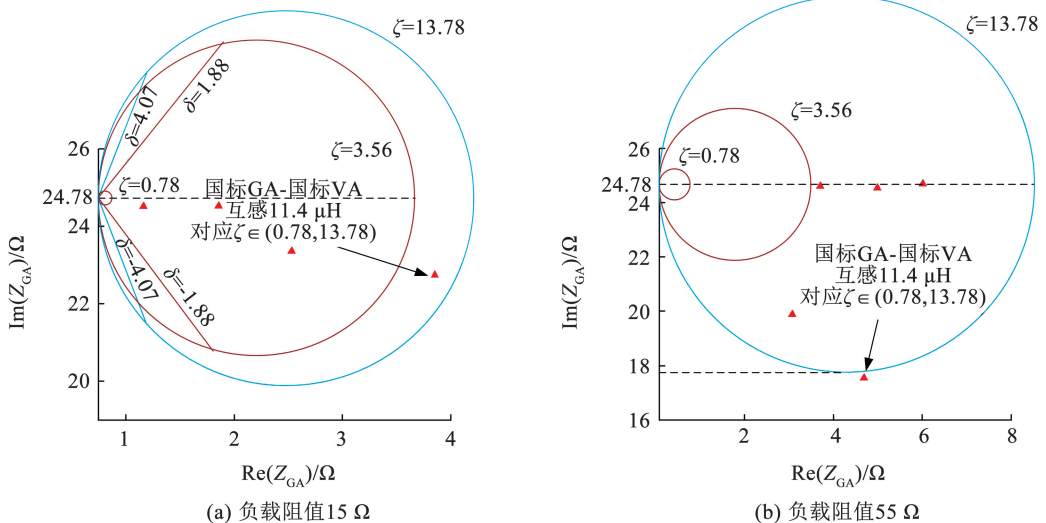


图 8 地面侧设备端口阻抗测试结果

Fig. 8 Experimental results of  $Z_{GA}$

由图 8(a)可知,  $Z_{GA}$  阻抗点位于相应  $\delta$  与以  $\xi$  为直径的圆所截成的圆弧上,表明此时系统输出功率、传输效率超过标准下限,线圈电流应力在标准限值以内,满足互操作性要求。

图 8(b)中阻抗点分布于对应  $\delta$  所夹角度之内,但分布于以  $\xi$  上限值为直径的圆周之外。这说明负载为  $55 \Omega$  时系统输出功率和传输效率高于标准下限,但 VA 线圈电流超过  $35 \text{ A}$ ,仍不具有互操作性,这与 LCC 补偿下增加负载导致接收线圈电流增加的理论相符。

使用国标 VA 与三类 GA 进行  $Z_{VA}$  阻抗测试,结果用黑色矩形阻抗点表示。由图 9 看出,负载  $55 \Omega$  对应的  $\text{Re}(Z_{VA})$  小于下限值  $2.69 \Omega$ ,导致 VA 线圈电流超限,与图 8(b)所述结论一致;负载为  $15 \Omega$  时,  $Z_{VA}$  处于橙色区域,证明国标 GA 与国标 VA 具有互操作性。

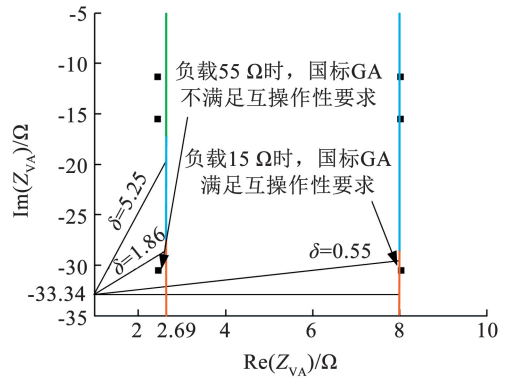


图 9 车辆侧设备端口阻抗测试结果

Fig. 9 Experimental results of  $Z_{VA}$

选择负载  $55 \Omega$ , 国标 GA 与国标 VA 在  $x, y$  方向均偏移  $150 \text{ mm}$  的情况对所提方法重新进行验证,多次测量后得到的端口阻抗  $Z_{GA}$  实、虚部测量值如图 10 所示,证明国标 GA 与国标 VA 具有互操作性。

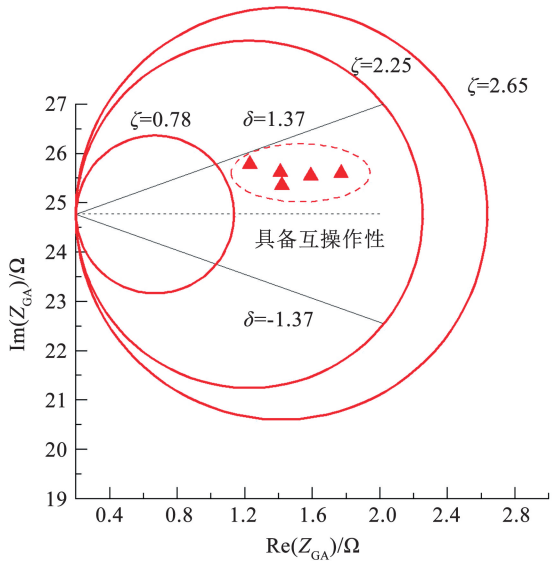
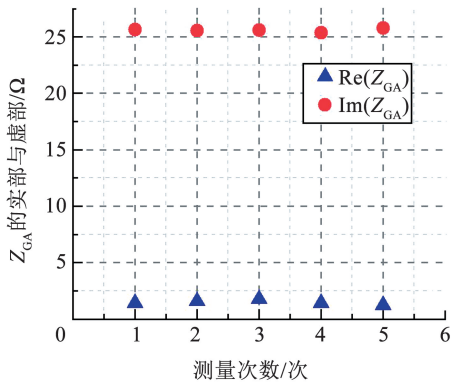


图 10 多次测量情况下地面侧设备端口阻抗测试结果

Fig. 10 Experimental results of  $Z_{GA}$  with multiple measurements

综上所述,基于双因子的互操作性评价法与功率效率评价法的结果一致,而且通过阻抗点所处位置可以判断系统功率、效率是否达标及电流应力是否超限,改善了传统阻抗法缺少精确的评价判据、评价结果可视化差等不足。

### 4 结 论

本文针对传统基于端口阻抗的互操作性评价方法存在的评价判据不足和评价准确性低的问题开展研究,提出了基于失谐因子和负载因子的改进型端口阻抗评价法,主要结论如下:

1) 通过引入表征系统谐振特性的失谐因子( $\delta$ )和表征负载特性的负载因子( $\xi$ ),在复平面内建立

了双因子与系统输出功率、效率及电流限值的数学关系,实现了互操作性评价从“阻抗比较”到“标准映射”的转变。

2) 根据国家标准规定的功率、效率限值,推导出可互操作的双因子取值范围及其边界函数,明确“被测阻抗点同时满足双因子限值”是互操作性的充要条件,解决了传统阻抗法评价判据不足的问题,提升了评价结果的准确性。

### 5 未来展望

为进一步完善互操作测试方法,推动电动汽车无线充电技术产业化进程,未来还可以在以下方面进行深入研究:

1)确定端口阻抗基准区域时,可以更精细地考虑地面环境、车辆安装环境、机械结构等外界因素的影响,设置合理的容忍区域,以适应实际产品测试需求。

2)通过阻抗区域重构,将更多的互操作要求转化为可视的复平面区域,进一步增加互操作性评价判据,完善电动汽车无线充电系统的互操作评价体系。

## 参考文献

- [1]张萱,李旭玲,张伟,等.电动汽车充电互联互通安全要求研究[J].电气应用,2019,38(11):44  
ZHANG Xuan, LI Xuling, ZHANG Wei, et al. Research on safety requirements for electric vehicle charging interoperability [J]. Electrotechnical Application, 2019, 38(11): 44. DOI: 10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2019.11.012
- [2]兰昊.电动汽车无线充电系统通用要求重难点分析[J].标准科学,2017(7):65  
LAN Hao. Analysis on the general requirements of wireless charging system for electric vehicle [J]. Standard Science, 2017, 7: 65. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5698.2017.07.013
- [3]BAGCHI A C, KAMINENI A, ZANE R A, et al. Review and comparative analysis of topologies and control methods in dynamic wireless charging of electric vehicles[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(4):4947. DOI: 10.1109/JESTPE.2021.3058968
- [4]SAE J2954: Wireless power transfer for light-duty plug-in/electric vehicles and alignment methodology[S]. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2019
- [5]GB/T 38775.7-2021.电动汽车无线充电系统第7部分:互操作性要求及测试车辆端[S].北京:中国标准出版社,2021  
GB/T 38775.7-2021. Electric vehicle wireless power transfer-Part 7: Interoperability requirements and testing-vehicle side [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021
- [6]OMBACH G, KURSCHNER D, MATHAR S, et al. Optimum magnetic solution for interoperable system for stationary wireless EV charging[C]//Tenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). Monte Carlo, Monaco: IEEE, 2015:1. DOI:10.1109/EVER.2015.7112996
- [7]SIMON O, MAHLEIN J, TURKI F, et al. Field test results of interoperable electric vehicle wireless power transfer [C]//18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE16 ECCE Europe). Karlsruhe, Germany: IEEE, 2016: 1. DOI: 10.1109/EPE.2016.7695694
- [8]OMBACH G. Design and safety considerations of interoperable wireless charging system for automotive [C]//2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). Monte-Carlo, Monaco: IEEE, 2014: 1. DOI: 10.1109/EVER.2014.6844157

- [9]SCHNEIDER J, CARISON R, SIROTA J, et al. Validation of wireless power transfer up to 11kW based on SAE J2954 with bench and vehicle testing [C]//WCX SAE World Congress Experience. Detroit, MI, United states: SAE International, 2019: 1. DOI: 10.4271/2019-01-0868
- [10]MILLER J M, SCHRAFEL P C, LONG B R, et al. The WPT dilemma-high K or high Q [C]//2016 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW). Knoxville, TN, USA: IEEE, 2016: 128. DOI: 10.1109/WoW.2016.7772079
- [11]SONG K, WEI R, ZHANG H, et al. Interoperability evaluation of wireless EV charging systems using coil ampere-turns [C]//2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Harbin, China: IEEE, 2019: 1. DOI: 10.1109/ICEMS.2019.8921585
- [12]BARTH D, CORTESE G, DARRAT A H, et al. Interoperability rating of wireless charging equipment using a decoupled impedance interface [C]//2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Gijon, Spain: IEEE, 2020: 1. DOI: 10.1109/VPPC49601.2020.9330964
- [13]HASSLER M, NIEDERMEIER F, KRAMMER J, et al. A method for interoperable interface description of inductive power transfer systems [C]//2018 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2018: 1. DOI: 10.1109/WoW.2018.8450902
- [14]KRAUS D, HASSLER M, COVIC G A, et al. Impedance based design method for interoperable wireless power transfer systems [C]//2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2021: 1580. DOI: 10.1109/ECCE47101.2021.9595472
- [15]SHI B, YANG F, WEI B, et al. Electrical interoperability evaluating of wireless electric vehicle charging systems based on impedance space [J]. World Electric Vehicle Journal, 2021, 12(4): 245. DOI: 10.3390/wevj12040245
- [16]张献,陈志鑫,沙琳,等.基于三参数表征电动汽车无线充电系统互操作性评价方法研究[J].中国电机工程学报,2022,42(4):1569  
ZHANG Xian, CHEN Zhixin, SHA Lin, et al. Research on interoperability evaluation method of electric vehicle wireless power transfer system based on three parameters characterization [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1569. DOI: 10.13334/j.0258-8013.psee.201981
- [17]张献,白雪宁,沙琳,等.电动汽车无线充电系统不同结构线圈间互操作性评价方法研究[J].电工技术学报,2020,35(19):4150  
ZHANG Xian, BAI Xuening, SHA Lin, et al. Research on interoperability evaluation method of different coils in wireless charging system of electric vehicles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(19): 4150. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.191225

(编辑 丁晓清)