

ICS 43.040.10
T 35
备案号：59235-2018

DB44

广东省地方标准

DB44/T 2099.3—2018

电动汽车无线充电系统 第3部分：磁耦合

Electric vehicle wireless power transfer system—
Part 3: Magnetic filed wireless power transfer

2018-01-02 发布

2018-04-02 实施

广东省质量技术监督局

发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 分类	2
5 互操作性	2
6 系统总体要求	4
7 通讯	5
8 电击防护	5
9 人体防护	6
10 结构要求	6
11 材料和部件的强度	6
12 测试条件要求	6
13 电磁兼容性 (EMC)	8
14 标记和说明	8
附录 A (资料性附录) 磁场无线充电系统 A (WT-WPT 系统 A)	9
附录 B (资料性附录) 磁场无线充电系统 B (MF-WPT 系统 B)	18
附录 C (资料性附录) 磁场无线充电系统 C (MF-WPT 系统 C)	26
附录 D (资料性附录) 磁场无线充电系统 D (MF-WPT 系统 D)	29
附录 E (资料性附录) 参数定义	33
附录 F (资料性附录) 控制环路	37

前 言

DB44/T 2099—2018《电动汽车无线充电系统》分为十个部分：

- 第1部分：通用要求；
- 第2部分：通信协议；
- 第3部分：磁耦合；
- 第4部分：接口；
- 第5部分：安全；
- 第6部分：管理系统；
- 第7部分：电能计量要求；
- 第8部分：地面设施；
- 第9部分：车载设备；
- 第10部分：充电站。

本部分为DB44/T 2099—2018的第3部分。

本部分按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本部分由广东省电动汽车标准化技术委员会提出并归口。

本部分起草单位：中兴通讯股份有限公司、深圳市标准技术研究院、中兴新能源汽车有限责任公司、深圳市科陆电子科技股份有限公司、深圳奥特迅电力设备股份有限公司、比亚迪汽车工业有限公司、广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院、广东省中山市质量技术监督标准与编码所、普天新能源有限责任公司、广州能源检测研究院。

本部分主要起草人：胡超、刘红军、李海东、王益群、李涵、赵勇、章登清、焦永杰、李志刚、梁丰收、牛凯华、赵小坤、肖隆兴、叶俊文、樊哲、邵浙海、卢嘉敏、王龙、高士艳、林娴。

电动汽车无线充电系统 第3部分：磁耦合

1 范围

本部分规定了磁场无线充电系统的特点和工作条件，电气安全要求，功率等级要求，对齐要求，以及电磁兼容性要求。

本部分适用于采用磁耦合方式向电动汽车进行无线充电的设备。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 4208-2008 外壳防护等级 (IP 代码)

DB44/T 2099.1-2018 电动汽车无线充电系统 第1部分：通用要求

DB44/T 2099.2-2018 电动汽车无线充电系统 第2部分：通信协议

DB44/T 2099.5-2018 电动汽车无线充电系统 第5部分：安全

ISO 534:2011 纸与纸板-厚度、密度和比容积的规定 (Paper and board - Determination of thickness, density and specific volume)

IEC 61980-1-2014 电动汽车无线充电系统 第1部分 通用要求 (Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 1: General requirements)

ICNIRP 2010 ICNIRP 时变磁场的电磁场曝露限值导则 (ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time varying electric and magnetic fields (1 Hz - 100 kHz))

3 术语和定义

DB44/T 2099.1-2018 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

磁场无线充电 magnetic field wireless power transfer (MF-WPT)

通过磁耦合方式从电源向电力负载进行无线电能传输的充电方式。

3.2

原边线圈 primary coil

原边设备包含一个或多个绕组，该绕组产生感应磁场进行磁场无线输电。

3.3

副边线圈 secondary coil

副边设备包含一个或多个绕组，该绕组与原边线圈产生的磁场进行耦合，完成磁场无线输电。

3.4

工作频率 system frequency

指无线充电系统进行功率传输的频率范围，其带宽覆盖标称频率，但带宽中心不一定为标称频率。谐波不包括在工作频率带宽内。

3.5

标称频率 nominal frequency

系统设计的最优工作频率。对于可调频率系统，当原副边对齐且所有部件都以设计参数稳定工作时，系统将工作于标称频率。

3.6

标称位置 nominal location

原副边设备中心点为对齐状态，即偏移量为零；且无线传能距离为制造商标定的最佳传能距离。

4 分类

4.1 磁极结构

MF-WPT 系统根据磁极结构分为如图 1 所示的类型。

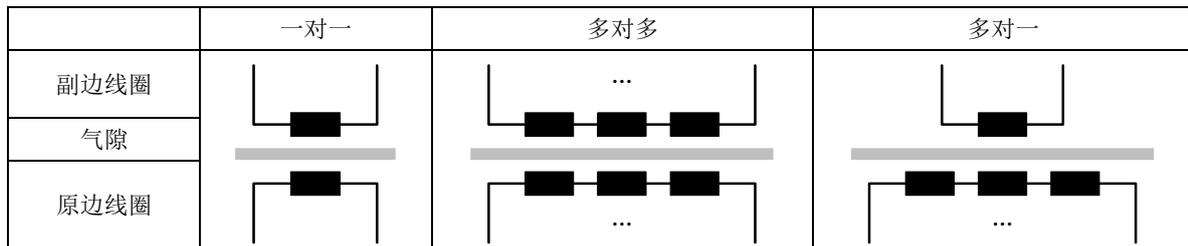


图1 磁极结构

4.2 谐振电路拓扑

MF-WPT 谐振电路图例见 B.3。

4.3 传输功率等级

根据 MF-WPT 系统的最大输入功率等级，MF-WPT 系统按如表 1 进行分类。电网输入的功率不应超过对应功率等级的功率限制。

表1 MF-WPT 输入功率等级

等级	MF-WPT1	MF-WPT2	MF-WPT3	MF-WPT4	MF-WPT5	MF-WPT6
额定输入功率/kW	$P \leq 3.7$	$3.7 < P \leq 7.7$	$7.7 < P \leq 22$	$22 < P \leq 33$	$33 < P \leq 66$	$P > 66$

5 互操作性

5.1 概述

仅当地面设备与电动汽车之间建立了正常的互操作性时,无线充电系统地面设备才能向电动汽车进行安全且高效的能量传输。

地面设备和电动汽车满足 DB44/T 2099.1-2018 中第 6 章的要求时,是具备可互操作的。

5.2 功率等级

不同功率等级原、副边设备互操作性应满足表 2 要求。

表2 功率等级的互操作性

	原边设备						
	功率等级	MF-WPT1	MF-WPT2	MF-WPT3	MF-WPT4	MF-WPT5	MF-WPT6
副边设备	MF-WPT1	必须支持	建议支持	—	—	—	—
	MF-WPT2	建议支持	必须支持	—	—	—	—
	MF-WPT3	—	—	必须支持	—	—	—
	MF-WPT4	—	—	—	必须支持	—	—
	MF-WPT5	—	—	—	—	必须支持	—
	MF-WPT6	—	—	—	—	—	必须支持

5.3 标称频率

可互操作的地面设备和电动汽车应使用相同的标称频率。

5.4 磁耦合

MF-WPT 系统根据磁通形状分类。

磁通形状不同,线圈类型不同,如图 2 所示;一种线圈也有可能产生多种不同磁通形状,详细说明见附录 A。

原边线圈产生时变磁通,穿过副边线圈的绕组。从而,相互靠近的两个或多个线圈能够进行功率传输。

无线充电系统的原边线圈和副边线圈通过气隙相互作用。通常以气隙中间平面为界将气隙分为两个区域,原边线圈处于其中的一个区域,而副边线圈则处于另外一个区域。

要互操作工作,原边设备和副边设备在磁场特性上应匹配。

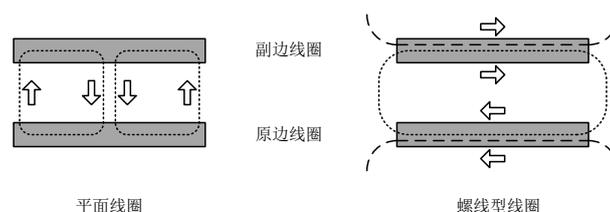


图2 磁通形状示例

5.5 谐振电路

原边设备的谐振电路拓扑应与副边设备相匹配。

5.6 调谐（可选）

若有必要，工作频率应调谐。调谐的实质是防止系统出现超调。

原副边错位，气隙波动以及元件特性的散射可通过频率调整进行校正。

5.7 系统效率

互操作性需要系统的最低效率满足 6.1 条款的规定。一致性通过使用相应的参考设备进行检验。由于原边设备和副边设备不可能总是最优对齐，WPT 系统需要工作在一定的偏移量内。偏移量符合 DB44/T 2099.4-2018 中 4.4 条款的要求。

6 系统总体要求

6.1 系统效率

在标称位置上，系统效率不应低于 90 %。

在垂直方向和水平方向最大偏移条件下，系统最低效率不应低于 85 %。

效率应在额定输入功率下进行测量，且测试负载为阻性负载。

某些特定的系统应用场景（比如，高功率等级或者高磁通等）强制需要辅助负载（比如，温度管理或者异物检测），辅助负载的功率消耗应包含在系统效率的计算中。

某些特定的系统应用场景不强制需要辅助负载，并且不允许部分载荷，在测量程序和类型认证文档中应有明确的说明进行确认。

6.2 原、副边设备结构

原、副边设备结构要求在本标准附录 A、附录 B、附录 C 和附录 D 给出了四种不同的磁场无线充电系统的设计例子。

6.3 磁场无线充电系统的功能

6.3.1 待机和唤醒功能

系统应具有待机和唤醒功能

6.3.2 兼容性检查功能

根据初始化阶段交互的信息，检查原边设备和副边设备之间的兼容性：

- a) 功率等级间的互操作性应符合表 2 的要求；
- b) 工作频率；
- c) 磁耦合；
- d) 电路拓扑；
- e) 调谐（可选）。

6.3.3 初始对齐检查

MF-WPT 系统应能确定原边设备和副边设备之间是否对齐。

6.3.4 启动功率传输

MF-WPT 系统应在指令和控制通讯正确建立并且原边设备和副边设备对齐之后，能够根据电动汽车的请求进行从原边设备到副边设备的功率传输。

6.3.5 执行功率传输

MF-WPT 系统应根据电动汽车的功率要求进行从原边设备至副边设备的功率传输。

MF-WPT 系统地面设备的传输功率不能超过最大传输功率限值。

电动汽车可以改变请求的传输功率。

6.3.6 终止功率传输

MF-WPT 系统应能够根据电动汽车的要求，停止从原边设备向副边设备的功率传输。

电动汽车能够要求停止功率传输。

6.3.7 用户发起的终止功率传输

MF-WPT 系统应提供途径允许用户终止功率传输，如通过按停止按钮。

6.3.8 安全监测与诊断

MF-WPT 系统应具有安全监测与诊断功能，可使用功率传输监测、热监测、活体保护、故障检测等安全措施：

- a) 功率传输监测；
应提供方法监测地面设备的实际输出与预期输出功率，电动汽车实际输入功率与预期输入功率的差异，当差异超过允许的范围时，应停止功率传输。
- b) 热监测；
——WPT 系统应符合 DB44/T 2099.1-2018 第 11.6 节的规定；
——应配备金属物体检测装置，当检测出金属物体时应停止功率传输。
- c) 活体保护；
——WPT 系统宜具备活体保护功能；
——可提供活体检测措施，当检测出活体时，可停止功率传输。
- d) 故障检测。当发生以下故障时，设备应停车功率传输：
——地面设备：短路、接地漏电、过温、绝缘失效、过流、过载等；
——车载设备：短路、过温、绝缘失效、过流、过载等。

6.3.9 区域通风要求的确定

若在功率传输过程中需要额外的通风装置，功率传输时应自动打开通风装置，否则不应进行功率传输。

6.3.10 功率传输状态

MF-WPT 系统地面设备和车载设备可通过指令和控制通讯交换各自的控制流程状态。

7 通讯

应满足 DB44/T 2099.2-2018 的相关要求。

8 电击防护

应满足 DB44/T 2099.1-2018 第 9 章的相关要求。

9 人体防护

应对系统进行 EMF 电磁暴露测试，其辐射值低于 ICNIRP 2010 参照水平。
具体限值和测试方法见 DB44/T 2099.5-2018 第 9 章节规定。

10 结构要求

应满足 DB44/T 2099.1-2018 中第 12 章的要求。

11 材料和部件的强度

11.1 车辆碾压测试

下述的测试方法适用于功率等级 MF-WPT1 和 MF-WPT2，其它功率等级的测试方法待定。

带供电电缆的原边设备应按照制造商预定的方式安装在平坦的混凝土底板上。

碾压力应为载荷 (5000 ± 250) N 的普通汽车轮胎 (P225/75R15 或其它类似轮胎)，且安装在钢轮毂上，胎压应为 (220 ± 10) kPa。车轮应以 (8 ± 2) km/h 的速度滚过测试设备。

碾压力应至少施加三次，从设备的一侧开始碾压，通过中间部分，直至设备的另一侧，应使设备的整个表面都受到碾压测试，同时 X 方向和 Y 方向都应进行测试。下一步，碾压方向调转 45° ，进行同样的测试。第三步，再调转 45° 角，进行同样的测试。

电缆测试时，电缆要平直，施加碾压力在电缆上。如果电缆安装在管道内或者类似情况，电缆的碾压测试不适用。

试验后不应有严重的破裂、折损或者变形，以致于：

- a) 带电部件被符合 GB 4208-2008 的 IPXXC 测试探头接触到；
- b) 机壳的完整性被破坏，以至于不能给设备的内部部件提供有效的机械保护或环境保护；
- c) 干扰设备正常工作，或破坏设备功能；
- d) 设备或其电缆夹不能为供电电缆提供合适的拉力；
- e) 带电部件和可接触到的不带电/接地的金属间的爬电距离和间隙，低于 IEC 61980-1-2014 条款 12.3 中的规定值；
- f) 其它可能会导致火灾或者触电风险的损害。

12 测试条件要求

12.1 测试平台设置

测试平台应容纳原、副边设备。

原、副边设备相对于原点的位置改变应符合本标准规定的范围。

测试性能时，需要连接合适的逆变器或者车载电子设备。功率测量通过纯阻性负载完成。

12.2 异物温升的测试体

异物温升测试体用于模拟测量处于工作区域（保护区域 1）内异物引起的温升。

其温升符合 DB44/T 2099.5-2018 第 11.6 章节规定的温升要求。

- 异物温升测试体可分为测试体 1 和测试体 2：
 ——测试体 1 的材料及大小应符合表 3 的规定；
 ——测试体 2 应为一元人民币硬币。

表3 测试体 1

材料	磁刚性 S 235 JR
大小	100 × 70 × 10 (mm×mm×mm)

12.3 火灾风险评估的测试体

燃烧测试体用于模拟检验处于工作区域（保护区 1）内异物抗燃烧的性能。
 测试体的材料成分、大小应符合表 4 的规定，厚度应符合 ISO 534-2011 的规定。

表4 燃烧测试体

材料	铝包膜材料，如，纸
大小	200 × 200 (mm×mm)

12.4 测试流程

12.4.1 概述

原边设备的位置应考虑制造商提供的安装高度。副边设备的初始位置是标称位置。其他位置如表 5 和图 3 所示。

根据测试步骤，副边设备的位置根据图 3 进行设置，为相对于原点的坐标位置。

表5 气隙和偏移设置

位置	方向	高度	位置序号
标称	标称	标称	1
偏移	0	最小	2
偏移	0	最大	3
偏移	X轴	标称	4
偏移	Y轴	标称	5
偏移	X轴+Y轴	标称	6
偏移	X轴+Y轴	最小	7
偏移	X轴+Y轴	最大	8

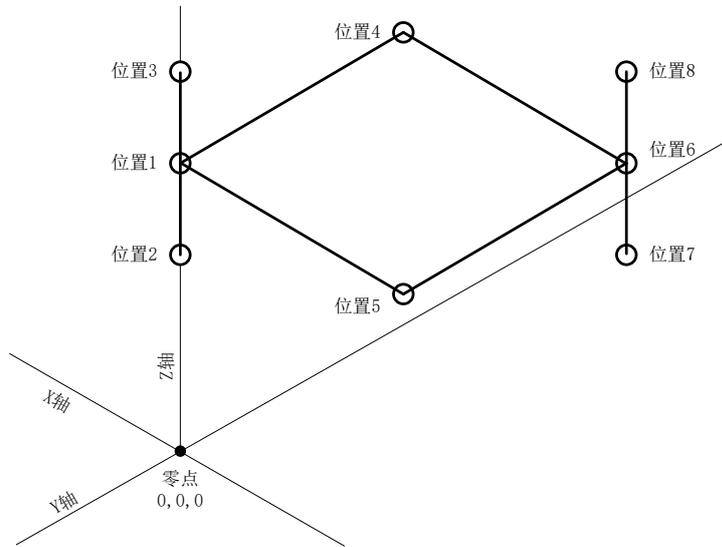


图3 副边设备的测试位置

12.4.2 温升测试

测试体位于工作区域内，原边设备和副边设备处于标称位置。达到热平衡后，通过测量探头来测量温升。温度应在稳态下测量。

测试参数如表 6 中所示。

表6 温升和燃烧测试参数

测试参数	参数值	备注
副边设备的位置	位置2	副边设备在0, 0, 0平面之上
副边设备的位置	位置3	副边设备在0, 0, 0平面之上
功率	P _{max} (副边输出)	由制造商提供
环境温度	T	25 °C

12.4.3 燃烧测试

测试体位于工作范围内，原边设备和副边设备处于标称位置。根据制造商提供的最大输出功率进行测试。

测试参数详见表 6。

13 电磁兼容性 (EMC)

应满足 DB44/T 2099.1-2018 第 15 章的要求。

14 标记和说明

应满足 DB44/T 2099.1-2018 第 16 章的要求。

附 录 A
(资料性附录)
磁场无线充电系统 A (WT-WPT 系统 A)

A.1 概述

附录 A 描述了 MF-WPT 系统 A 原边设备的定义。

A.2 MF-WPT系统A的几何定义

“镜像正方绕组 (Mirrored square winding)” 结构由两个对称线圈组成，即前线圈和后线圈。线圈为矩形的平面线圈，放在高磁导率材料 (如铁氧体) 的面板上。原边设备包含两个线圈，从车辆的行驶方向上看，为前线圈 (x 正方向) 和后线圈 (x 负方向)。在某一时刻，通过前线圈的电流是顺时针方向，而通过后线圈的电流是逆时针方向，这样在表面就形成两个对称的磁极。

这两个线圈的绕组通过表征电流磁链平衡 (current linkage balance, 见条款 A.8) 的单匝绕组来描述。只要满足电流磁链平衡，每个线圈绕组的实际数量和绕组的分布不做限定，由制造商自由定义。条款 A.3 给出了绕组的一个参考设计供参考。

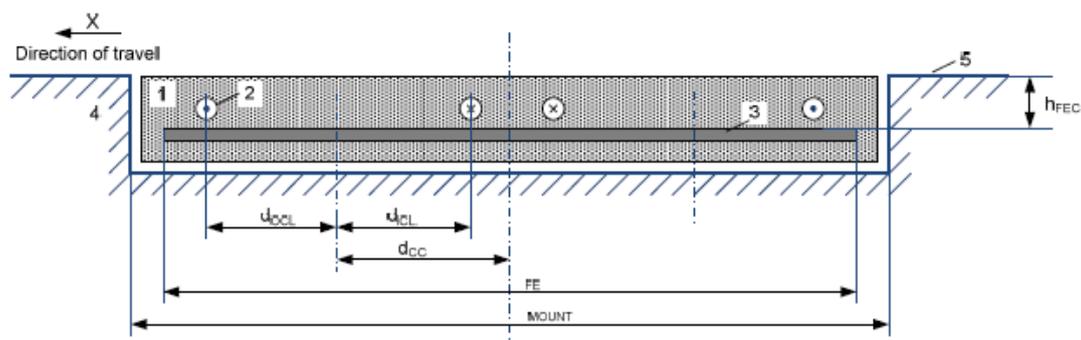
MF-WPT 系统 A 的原边设备安装在停车位的中心，如表 A.1。

表A.1 原边设备位置

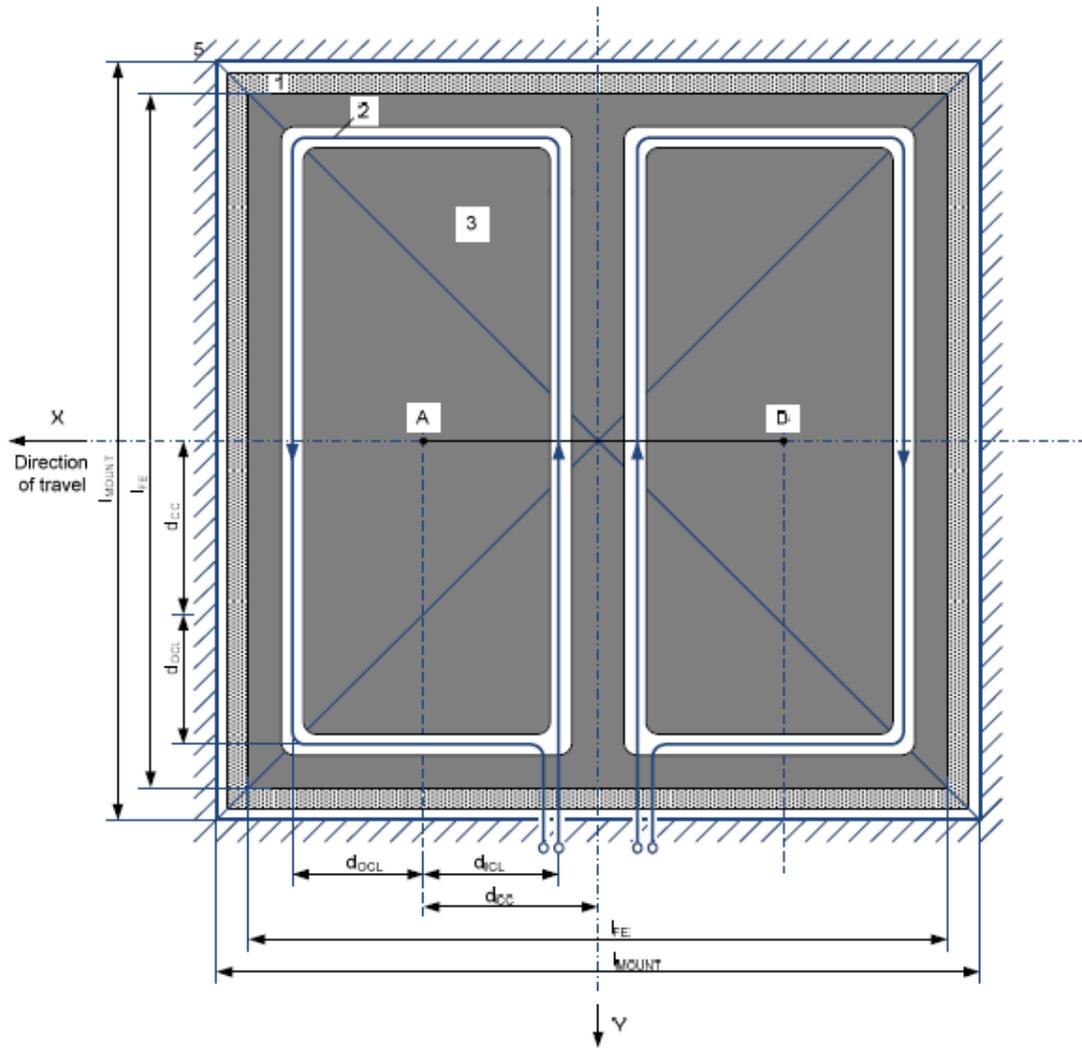
方向	原边设备零点坐标mm	坐标轴
行驶方向零点	± 0	X
垂直于行驶方向零点	± 0	Y
高度方向零点	± 0	Z

注：原边设备的零点为停车位的参考点，见DB44/T XXXX.1-XXXX中条款8.3.2的说明。

MF-WPT 系统 A 原边设备的几何尺寸定义由图 A.1 的侧视图和俯视图，连同表 A.2 的尺寸给出。



MF-WPT系统A的几何定义，侧视图



MF-WPT系统A的几何定义，俯视图

说明：

- 1——原边设备；
- 2——绕组；
- 3——磁回路（铁氧体平面）；
- 4——道路；
- 5——路边表面。

图A.1 镜像正方绕组和 MF-WPT 系统 A 的几何定义

表A.2 MF-WPT 系统 A 的几何数值

名称	缩写	数值	单位
安装空间的长度	l_{MOUNT}	1000	mm
磁回路长度	l_{FE}	800	mm
线圈中心距离	d_{CC}	200	mm

名称	缩写	数值	单位
电流磁链平衡内距离	d_{ICL}	140	mm
电流磁链平衡外距离	d_{OCL}	160	mm
磁芯封装高度	h_{FEC}	40	mm

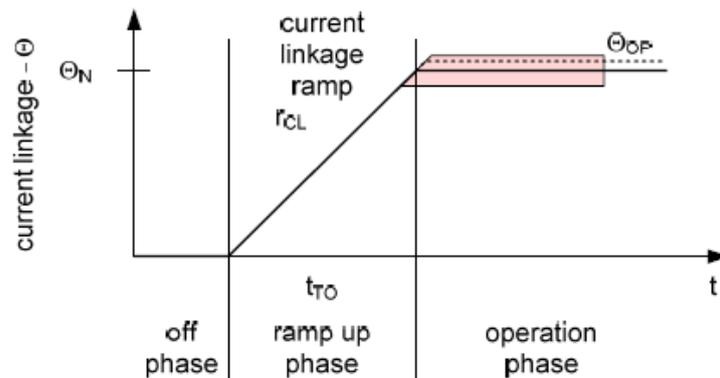
A.3 MF-WPT系统A的运行定义

MF-WPT 系统 A 的原边设备是电流磁链源。正常运行情况下，电流磁链 θ_{OP} 是常值，与副边设备的负载无关，其值为额定电流磁链 θ_N 。

电流磁链定义为穿过 A-B 线的电流大小，如图 A.2 所示。

注：电流磁链源等效于给定匝数绕组的电流源，制造商可以自由设计绕组。

如图 A.2，在开机阶段，MF-WPT 系统 A 为开环控制的电流磁链源，电流磁链的大小以速率 r_{CL} 提升。



图A.2 电流磁链源值的提升

在提升阶段和运行阶段，原边设备可以调节电流磁链 θ_{OP} ，不同于额定电流磁链值，使得从电网侧获得的传输功率与所需电网功率 PGN 保持一致。

表 A.3 给出了 MF-WPT 系统 A 的初始运行参数。

在原边设备和副边设备之间存在通信磁路的情况下，初始运行参数可能会修改成原边和副边设备所支持的其他参数。这就允许系统运行在更高的功率等级，比如 MF-WPT2。

表A.3 MF-WPT 系统 A 的初始运行参数

名称	缩写	值		单位
电流磁链（额定值）	θ_N	120	150	A_{rms}
工作频率	f_{sys}	140 ^(*)	85 ^(*)	kHz
频率范围	Δf	± 6	± 3	kHz
所需电网功率 PGN	PGN	3.3 (MF-WPT class 1)		kW
电流磁链提升率	r_{CL}	250		A_{rms}/s
注： ^(*) 工作频率为典型值。				

对于在 MF-WPT 系统 A 运行的副边设备，唯一的设计约束条件就是，当原边设备提供额定电流磁链

时，按额定几何尺寸设计的副边设备可以获得所需电网功率。

建议副边设备实现的谐振电路，其一阶近似为并联谐振电路。

注：本附录没有给出原边设备谐振网络的预定义。原边设备制造商可以自由选择，通过无源谐振电路还是有源电流控制的方式产生电流磁链源。

A.4 MF-WPT系统A原边设备的参考设计

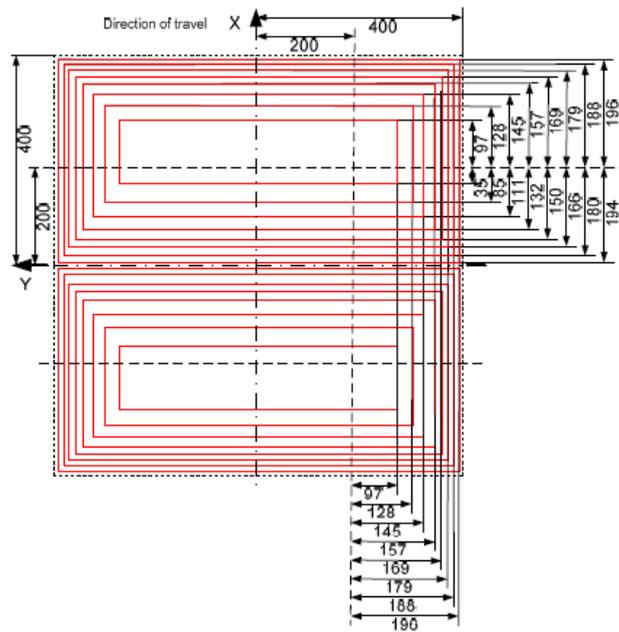
根据表 A.1 的尺寸定义，本条目给出原边设备的一种参考设计。

对于只提供副边设备产品的制造商，原边设备参考设计可以作为对应的原边设备。

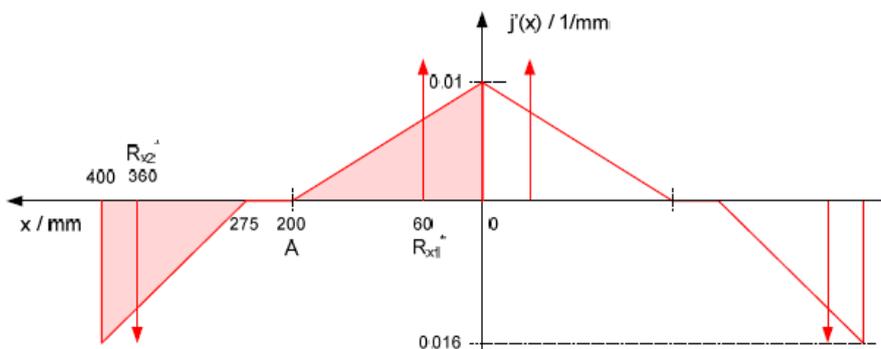
如图 A.3 原边设备参考设计的绕组，由两个三角形电流密度分布的半绕组组成。电流密度分布符合条款 A.1 中的电流磁链平衡定义，用于表 A.1 的可互操作 MF-WPT 系统 A。

相对电流密度 j' 是电流密度 j 除以半绕组的总电流磁链。

图 A.4 给出的是二乘八匝线圈的电流密度分布，为参考原边设备绕组的电流密度分布。



图A.3 参考原边设备的绕组几何尺寸



图A.4 参考原边设备的电流密度分布

A.5 副边设备的参考设计例

A.5.1 概述

下面例子展示的副边设备设计，符合条款 A.1 和 A.2 定义的 MF-WPT 系统 A 的互操作要求。相关的技术参数在条款 A.3 的 MF-WPT 系统 A 的参考设计中给出。

本条款的典型设计可以作为参考副边设备的测试设备，用于可互操作原边设备的功能评价。因此，设计参数涵盖了一系列尺寸参数，耦合系数和不同的绕组结构。

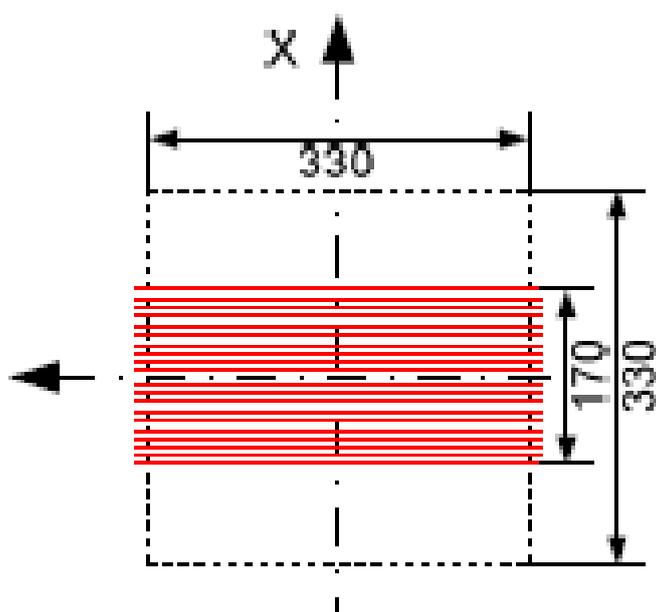
A.5.2 副边设备设计A1-中等尺寸螺线型线圈

如图 A.5，副边设备设计 A1 涵盖了一个中等尺寸的机械核心。由于采用了铝屏蔽的螺线型绕组，可以在较大气隙范围内提供高耦合系数。

表 A.4 给出了副边设备设计 A1 的参数。

表A.4 副边设备设计 A1 的参数

参数名称	参数值	坐标轴
行驶方向尺寸	330 mm	X
垂直于行驶方向尺寸	330 mm	Y
机械气隙	170 mm	Z
耦合系数	0.2~0.4	-
行驶方向偏移量	100 mm	X
垂直于行驶方向偏移量	200 mm	Y



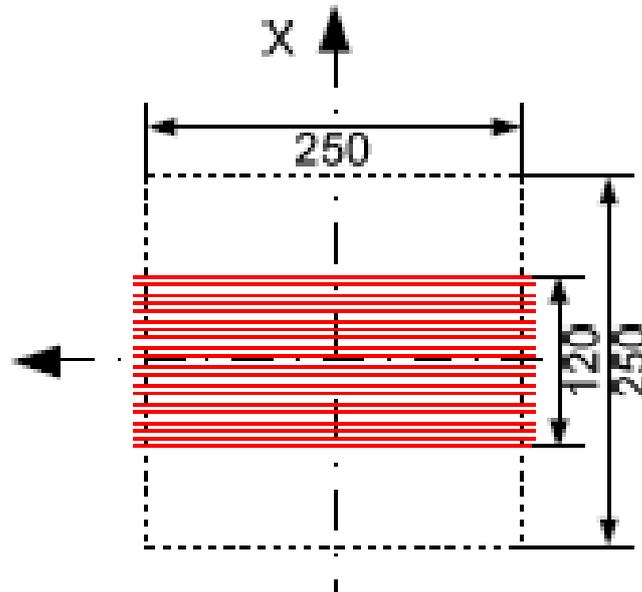
图A.5 副边设备设计 A1

A.5.3 副边设备设计A2-小尺寸螺线型线圈

如图 A.6，副边设备设计 A1 涵盖了一个小尺寸机械核心。由于采用了铝屏蔽的螺线型绕组，可以

在中等气隙范围内提供高耦合系数。

表 A.5 给出了副边设备设计 A2 的参数。



图A.6 副边设备设计 A2

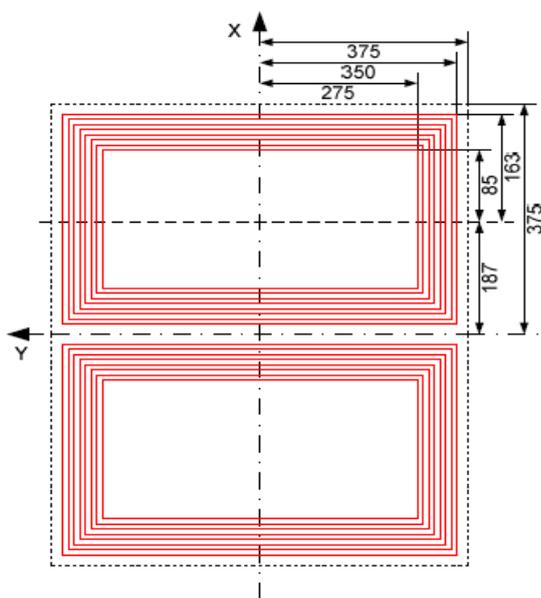
表A.5 副边设备设计 A2 的参数

参数名称	参数值	坐标轴
行驶方向	250 mm	X
垂直于行驶方向	250 mm	Y
机械气隙	100 mm	X
耦合系数	0.2	-
行驶方向偏移量	100 mm	X
垂直于行驶方向偏移量	200 mm	Y

A.5.4 副边设备设计B-大尺寸镜像矩形线圈

如图 A.7，副边设备设计 B 涵盖了一个大尺寸的镜像矩形线圈，可以在较大气隙范围内提供均匀的低磁通密度分布和高耦合系数。

表 A.6 给出了副边设备设计 B 的参数。



图A.7 副边设备设计 B

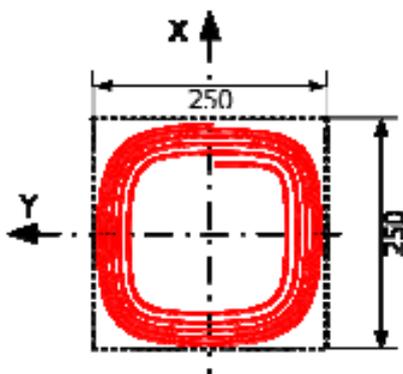
表A.6 副边设备设计 B 的参数

参数名称	参数值	坐标轴
行驶方向	750 mm	X
垂直于行驶方向	750 mm	Y
机械气隙	250 mm	X
耦合系数	0.3	-
行驶方向偏移量	100 mm	X
垂直于行驶方向偏移量	100 mm	Y

A.5.5 副边设备设计C-小尺寸矩形平面线圈

如图 A.8，副边设备设计 C 涵盖了一个小尺寸的矩形平面线圈，可以在中等气隙范围内提供高耦合系数。

表 A.7 给出了副边设备设计 C 的参数。



图A.8 副边设备设计 C

表A.7 副边设备设计 C 的参数

参数名称	参数值	坐标轴
行驶方向	250 mm	X
垂直于行驶方向	250 mm	Y
机械气隙	110 mm	X
耦合系数	0.1~0.25	-
行驶方向偏移量	100 mm	X
垂直于行驶方向偏移量	150 mm	Y

A.6 系统效率

在额定运行状态下，系统效率应至少达到 90%，见表 A.8。系统效率的测量参考 DB44/XXX.1。

表A.8 系统效率

系统	效率 (%)
MF-WPT 系统 A 设计 A1	90
MF-WPT 系统 A 设计 A2	90
MF-WPT 系统 A 设计 B	90
MF-WPT 系统 A 设计 C	90

A.7 结构要求

按第 12 章要求进行。

A.8 通信

按第 7 章和第 8 章要求进行。

A.9 电流磁链平衡定义

引入电流磁链平衡的定义，将分布式圆形或矩形绕组结构的描述，简化为单匝圆形或方形绕组，其半径为电流磁链平衡半径，流过的电流为总电流磁链。

注：在理想条件下，如果绕组位于两个具有无限大磁导率材料的层之间，且层间距离很小，分布式绕组和电流磁链平衡的单匝绕组会产生相同的磁通量。

假设电流密度分布为 j 的电流分布在一个半径为 r 的绕组上（如图 A.9），电流磁链平衡定义的单匝绕组的半径 R^* 可以通过公式（A.1）和（A.2）计算得到：

$$R^* = \sqrt{\frac{1}{\theta} \int_0^{\infty} r^2 j(r) dr} \dots\dots\dots (A.1)$$

$$\theta = \int_0^{\infty} j(r) dr \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

R^* ——单匝绕组半径；

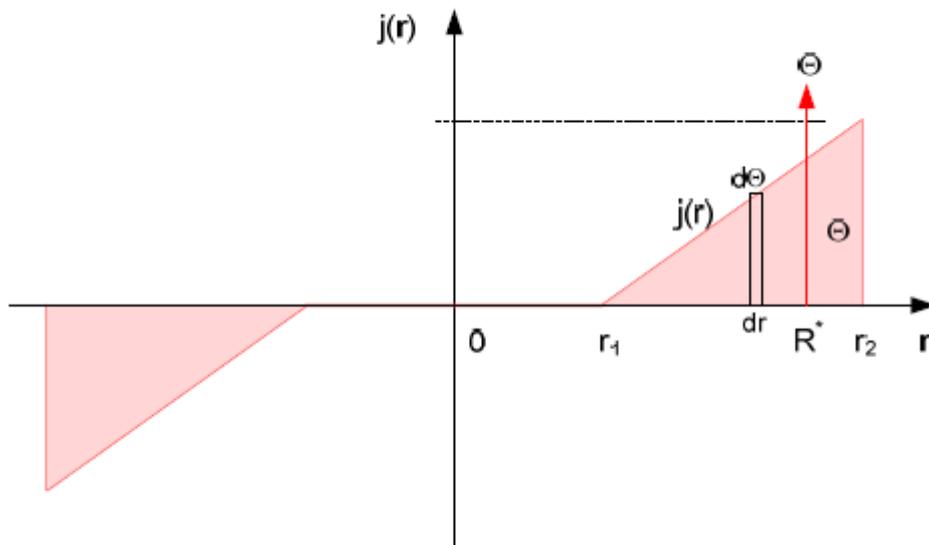
θ ——总电流磁链；

r ——绕组半径；

j ——电流密度分布。

如图 A.9 所示的三角形电流密度分布，使用公式 (A.3) 计算得到其电流磁链平衡半径为，

$$R^* = \sqrt{\frac{I_2^2}{2} + \frac{I_2 I_1}{3} + \frac{I_1^2}{6}} \dots\dots\dots (A.3)$$



图A.9 分布式圆形绕组电流密度分布 j

附录 B
(资料性附录)
磁场无线充电系统 B (MF-WPT 系统 B)

B.1 概述

本附录给出了一个可互操作的 MF-WPT 系统, 相同的参考原边设备, 可以支持至少功率等级 MF-WPT1 和 MF-WPT2, 即支持功率等级 MF-WPT1 和 MF-WPT2 之间的互操作。在本附录给出的原边设备可以支持多种不同的副边设备。

本附录描述的系统适用于乘用车和轻型货车。

本附录描述的系统使用交流电源输入, 但是不排除直流输入。

B.2 系统描述

MF-WPT 系统包括原边设备和副边设备, 进行磁场无线输电。原边设备和副边设备可含有一个或多个线圈。

根据 DB44/T 2099.1, 原边设备可以地埋安装, 也可以地上安装。

B.3 谐振拓扑

MF-WPT 谐振电路图例如图 B.1 所示, 原边、副边可采用这些谐振拓扑。

谐振拓扑	串联	并联	并联	串联	串并联	串并联
副边绕组						
气隙						
原边绕组						
	串联	并联	串联	并联	串并联	并联

注: 谐振电路拓扑不限于以上列举内容。

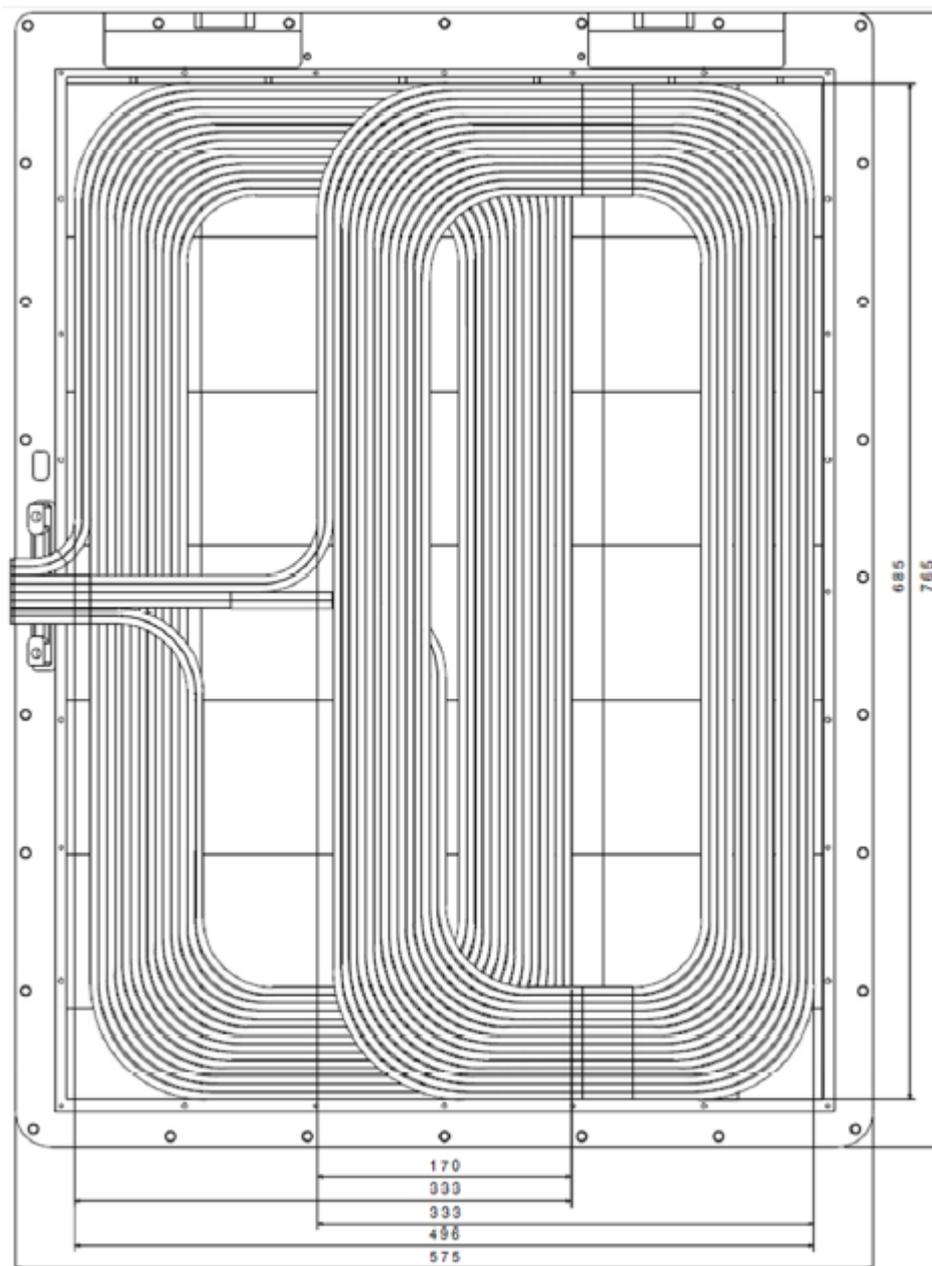
图B.1 谐振电路拓扑结构

B.4 原边设备

原边设备的最大尺寸在图 B.2 以及表 B.1 中给出, 安装在停车位的中间。

本附录的原边设备包含两个相同的线圈, 左线圈和右线圈。两个线圈均为矩形的平面线圈, 部分重叠, 放在高磁导率材料 (如铁氧体) 的面板上。通过两个线圈的电流可以独立控制, 以产生各种磁通密度特性。每个线圈绕组的匝数和绕组的分布不做详细定义, 只要满足总的磁场特性, 制造商可以进行自由设计。作为参考, 条款 B.4 给出了原边设备的一个参考设计。

表 B.1 中给出的值包含了安全操作所需的辅助系统（如活体保护系统、异物检测系统）。



图B.2 可互操作的原边设备

表B.1 原边设备的最大机械尺寸

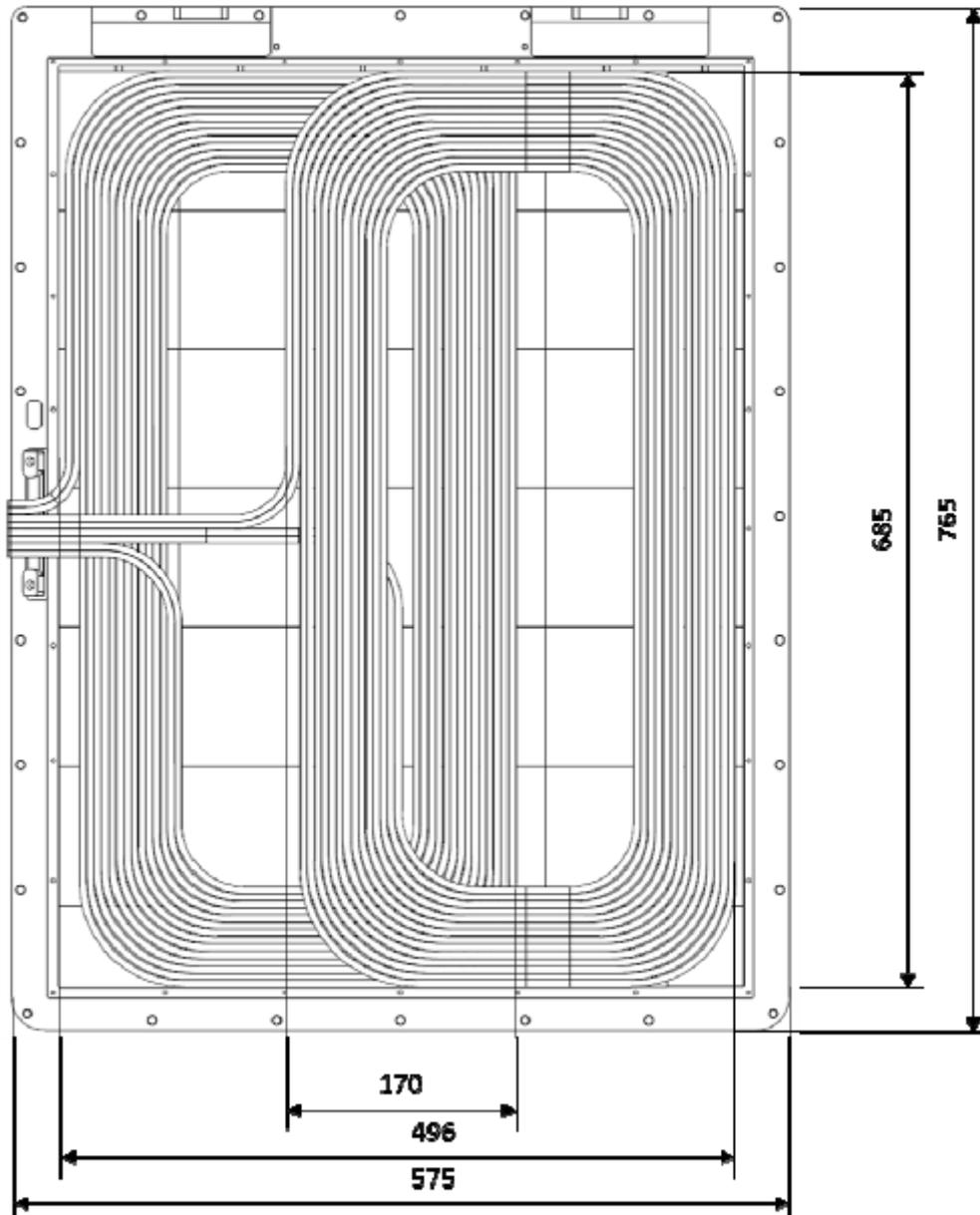
功率等级	MF-WPT1	MF-WPT2	MF-WPT3
行驶方向尺寸/mm	600	600	900
垂直于行驶方向尺寸/mm	800	800	900
距离地面高度/mm	50	50	55

注1：本附录没有给出原边设备谐振网络的预定义。原边设备制造商可以自由选择，通过无源谐振电路还是有源电流控制的方式产生电流磁链源。

注2：建议副边设备实现的谐振电路，其一阶近似为并联谐振电路。

B.5 原边设备的参考设计

图 B.3 和表 B.2 给出了原边设备的一个参考设计，符合本标准条款 B.2。该原边设备的参考设计作为设计例子，不对制造商的其他设计实现构成限制。



图B.3 原边设备的参考设计

表B.2 参考原边设备的规格

参数	值
绕组匝数	7
利兹线材料	铜

对于只提供副边设备产品的制造商，本原边设备参考设计可以作为对应的原边设备。本原边设备参考设计也可用于副边设备的可互操作兼容测试（见条款 B.6）。

B.6 兼容副边设备的典型设计

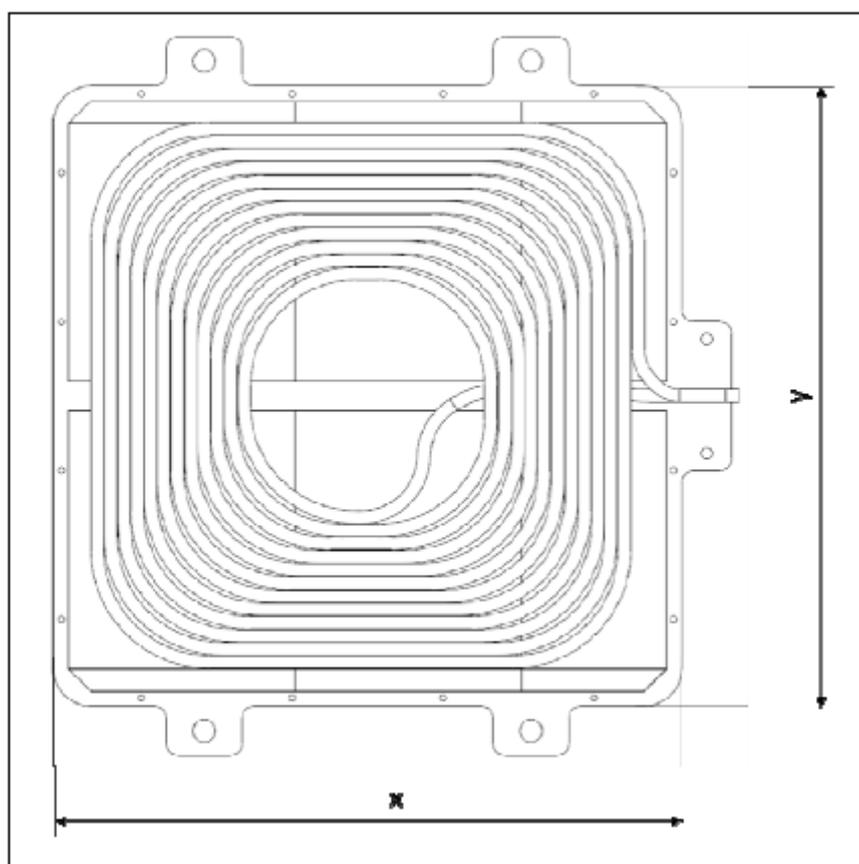
B.6.1 概述

下面例子展示的副边设备设计，是与原边设备可互操作的副边设备的设计实例。

本条款的设计例子可以作为参考副边设备的测试设备，用于可互操作原边设备的功能评价。因此，设计参数涵盖了一系列尺寸参数，耦合系数和不同的绕组结构。

B.6.2 副边设备设计A-圆形线圈

图 B.4 和表 B.4 给出的副边设备设计 A，采用圆形线圈。



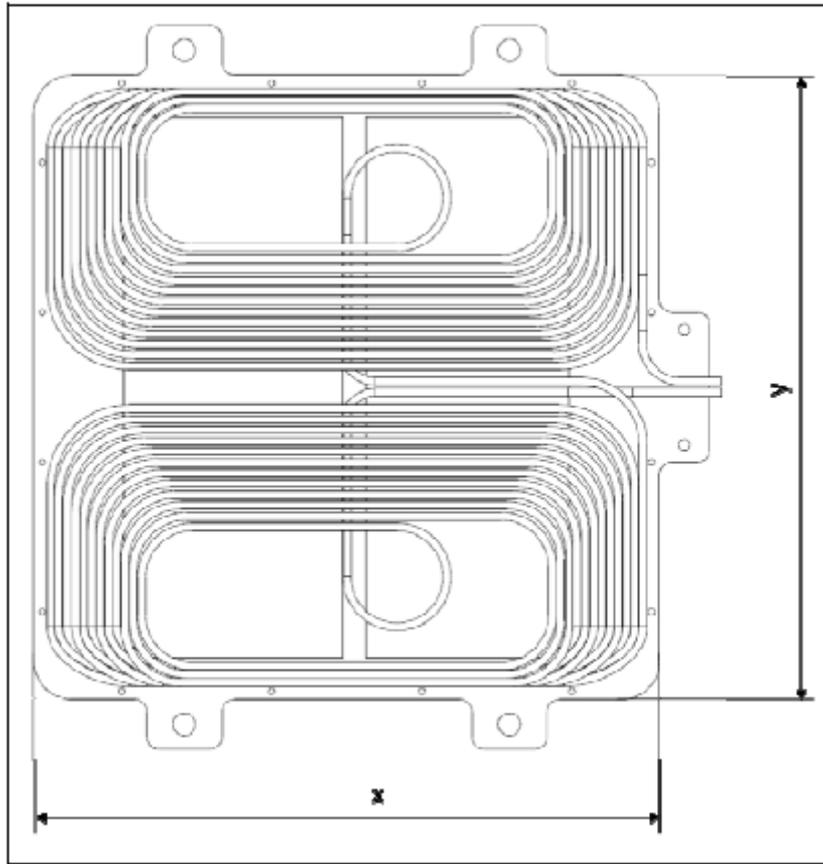
图B.4 副边设备设计 A-圆形线圈

表B.3 副边设备设计 A-圆形线圈的最大机械尺寸

功率等级	MF-WPT1	MF-WPT2	MF-WPT3
行驶方向尺寸/mm	250	400	750
垂直于行驶方向尺寸/mm	250	400	750
距离地面高度/mm	20	20	35

B.6.3 副边设备设计B1-镜像矩形线圈

图 B.5 和表 B.4 给出的副边设备设计 B1，采用镜像矩形线圈。



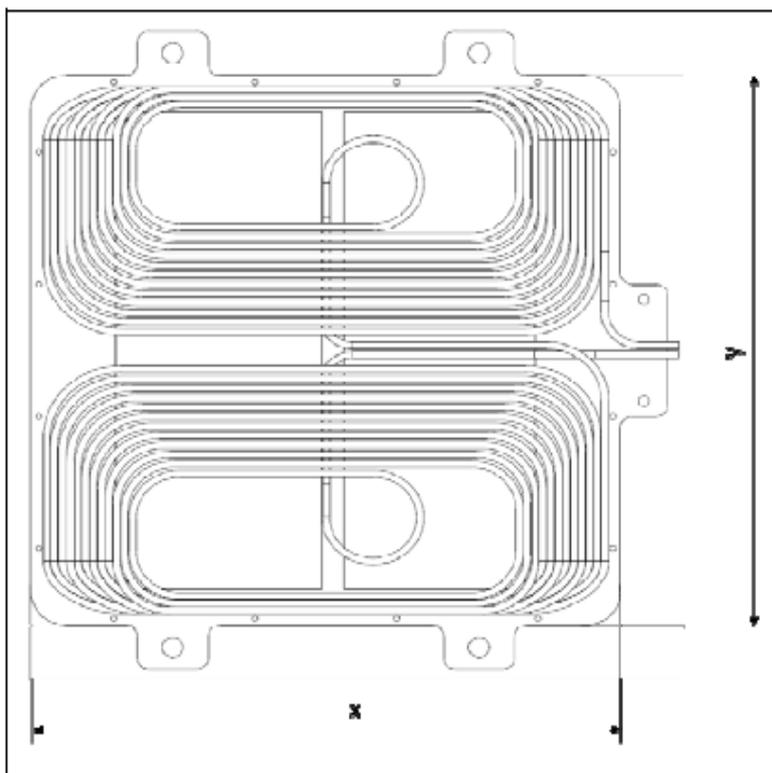
图B.5 副边设备设计 B1-镜像矩形线圈

表B.4 副边设备设计 B1 的最大机械尺寸

功率等级	MF-WPT1	MF-WPT2	MF-WPT3
行驶方向尺寸/mm	250	400	750
垂直于行驶方向尺寸/mm	250	400	750
距离地面高度	20	20	35

B.6.4 副边设备设计B2-镜像矩形线圈

图 B.6 和表 B.5 给出的副边设备设计 B2，采用镜像矩形线圈。



图B.6 副边设备设计 B2-镜像矩形线圈

表B.5 副边设备 B2 的最大机械尺寸

功率等级	MF-WPT1	MF-WPT2	MF-WPT3
行驶方向尺寸/mm	250	340	750
垂直于行驶方向尺寸/mm	190	270	600
距离地面高度/mm	20	20	35

B.7 效率

系统效率按照 DB44/T 2099.1-2018 的定义。

在垂直方向和水平方向所有要求的偏移情况下，系统效率应至少达到 80 %。在标称运行状态，系统效率应至少达到 85 %。系统效率的测量应在额定输入功率下进行。

B.8 额定位置与偏移

在实际应用中，副边设备和原边设备会有一个相对位置，MF-WPT 系统必须要考虑。MF-WPT 系统允许的最大位置偏移量由行驶方向（x）和垂直于行驶方向（y）的偏移同时确定。

表 B.6 给出了功率等级 MF-WPT1 支持的原边设备和副边设备之间的最大偏移量，要求系统效率能够达到本标准的要求。功率等级 MF-WPT2 支持的最大位置偏移待定。

表B.6 要求系统效率下的最大偏移量 (MF-WPT1)

MF-WPT1					
原边线圈尺寸 (mm)	副边线圈 尺寸(mm)	偏移(xmax/ymax) @z=100 mm(mm)	所需的最大 安匝	偏置xmax/ymax/mm @z=160 mm	所需的最大安 匝
765*575*50	设计A: 圆形 250*250*20	75/100	260	75/100	480
	设计B1: 镜像矩形 250*250*20	75/100	180	75/100	250
	设计B2: 镜像矩形 250*190*20	75/100	250	75/100	340
<p>注1: 原边设备按条款B.2, 副边设备设计(A, B1, B2)分别按条款B.4.1, B.4.2和B.4.3。“所需的最大安匝”指供给设备所需具有的给原边设备提供的能力。</p> <p>注2: 表中每行都给出了所支持的最大偏移量, 以及相应原边设备和副边设备的气隙。其边界条件是, 所有的安全要求(例如电气安全, 电磁兼容性/电磁辐射安全等)和系统效率要求(见条款B.5)都需要满足。在所有的偏移范围内, 传输功率为MF-WPT1的最大功率(即3.7 kW)。</p>					

B.9 副边设备的性能对比

条款 B.6 中的有些副边设备, 能够提供比表 B.6 更大的位置偏移。对于功率等级 MF-WPT1, 采用条款 B.2 的原边设备, 表 B.7 对副边设备设计 A, B1 和 B2 的最大偏移性能进行了对比。

表B.7 副边设备的性能对比 (MF-WPT1)

MF-WPT1					
原边线圈尺寸 (mm)	副边线圈尺寸(mm)	偏移(xmax/ymax) @z=100 mm (mm)	所需的最大 安匝	偏置(xmax/ymax) @z=160 mm(mm)	所需的最大安 匝
765*575*50	设计A: 圆形 250*250*20	100/150	310	75/100	480
	设计B1: 镜像矩形 250*250*20	100/150	220	100/150	280
	设计B2: 镜像矩形 250*190*20	75/125	300	75/100	340

B.10 工作频率

供给设备应能够按表 B.8 调整工作频率。

表B.8 工作频率

名称	符号	值 (kHz)
标称位置的工作频率	f_{sys}	85
频率范围	Δf	± 0.5

附录 C
(资料性附录)
磁场无线充电系统 C (MF-WPT 系统 C)

C.1 概述

本附录介绍静态 MF-WPT 系统，功率等级 MF-WPT1 和 MF-WPT2，记为 MF-WPT 系统 C。

MF-WPT 系统 C 适用于乘用车和轻型货车。

本附录描述的系统使用交流电源输入，但是不排除直流输入。

C.2 系统描述

MF-WPT 系统包括原边设备和副边设备，进行磁场无线输电。原边设备和副边设备可含有一个或多个线圈。

根据 DB44/T 2099.1，原边设备可以地面安装，也可以地上安装。

C.3 耦合系数的规格**C.3.1 工作气隙分类**

本条款定义了系统工作的最大离地距离。最大离地距离表征了机械气隙和安装高度，见 DB44/T 2099.1 的图 6。表 C.1 定义了最大离地距离的类别和对应的数值。

表C.1 最大离地距离分类

类别	工作气隙 (mm)
距离S	90-150
距离M	140-210
距离L	170-250

C.3.2 偏移范围

表 C.2 给出了偏移范围。

表C.2 MF-WPT 系统 C 的偏移范围

方向	偏移量 (mm)	轴
行驶方向偏移	± 70	X
垂直于行驶方向偏移	± 100	Y

C.3.3 参考副边磁芯的尺寸

本条款定义了参考副边磁芯的尺寸，磁芯尺寸分类见下表，表 C.3 给出了每种磁芯尺寸类别的尺寸。

表C.3 副边磁芯尺寸

类别	磁芯尺寸 (mm)	
	MF-WPT 1	MF-WPT 2
功率等级		
磁芯尺寸S	280 x 280	180 x 410
磁芯尺寸M	400 x 400	200 x 450
磁芯尺寸L	450 x 450	275 x 500

C.3.4 耦合系数范围

表 C4 给出了最大和最小耦合系数。表 C.4 还定义了每个副边磁芯参考尺寸的测量条件。

表C.4 耦合系数的范围

内容	符号	数值
最大耦合系数	K_{max}	0.25
最小耦合系数	K_{min}	0.09

C.4 传输功率的规格

原边设备的输出功率取决于原边设备的额定功率，以及副边设备的输入阻抗。本节对这些参数进行定义，以实现 MF-WPT 系统原边设备的通用性。

C.4.1 副边电路规格

附录 E 给出了副边设备输入阻抗的定义。表 C.5 和表 C.6 给出了副边设备的相关参数。

表C.5 谐振电路的参数

	项目	符号	数值
副边设备	电感	L_2	(50~200) μ H
	电容	C_{2s}	(18-70) * α nF
		C_{2p}	(18-70)*(1- α) nF

表C.6 谐振电路的参数范围

数值	α
最大值	1
最小值	0.25

C.4.2 副边设备输入阻抗的范围

附录 E 给出了副边设备输入阻抗的定义。表 C.7 给出了副边设备输入阻抗的范围。

表C.7 副边电路输入阻抗

输出功率 (kW)	阻抗 (Ω)			
	标称值	最小值	最大值	相位
0.5	187.4	109.6	272.5	± 10 deg

输出功率 (kW)	阻抗 (Ω)			
	标称值	最小值	最大值	相位
1.0	93.7	73.0	136.3	± 10 deg
2.0	46.9	36.5	68.1	± 10 deg
3.0	31.2	24.3	45.4	± 10 deg
4.0	23.4	18.2	34.1	± 10 deg
5.0	18.7	14.6	27.3	± 10 deg
6.0	15.6	12.2	22.7	± 10 deg
7.0	13.4	13.4	19.5	± 10 deg

C.4.3 原边电路规格

表 C.8 给出了原边谐振电路的电感值和电容值。

表C.8 谐振电路的参数

名称	项目	符号	数值
原边电路	电感	L_1	50-100 μ H
	电容	C_{1s}	35-70 nF

C.4.4 工作频率

原边设备和副边设备之间气隙和偏移量的变化,会导致电感值和耦合系数发生变化。为达到最低谐振条件,同时实现较高的传输效率,供给设备必须能够跟踪工作频率。

实现能量传输工作频率的范围为 80 kHz~90 kHz, 允许的频率变化范围 Δf 为 ± 0 kHz。

附 录 D
(资料性附录)
磁场无线充电系统 D (MF-WPT 系统 D)

D.1 概述

本附录介绍的静态 MF-WPT 系统, 应用于重型电动汽车 (要求大功率), 功率等级为 MF-WPT4, 记为 MF-WPT 系统 D, 并给出其规格要求。

D.2 系统描述

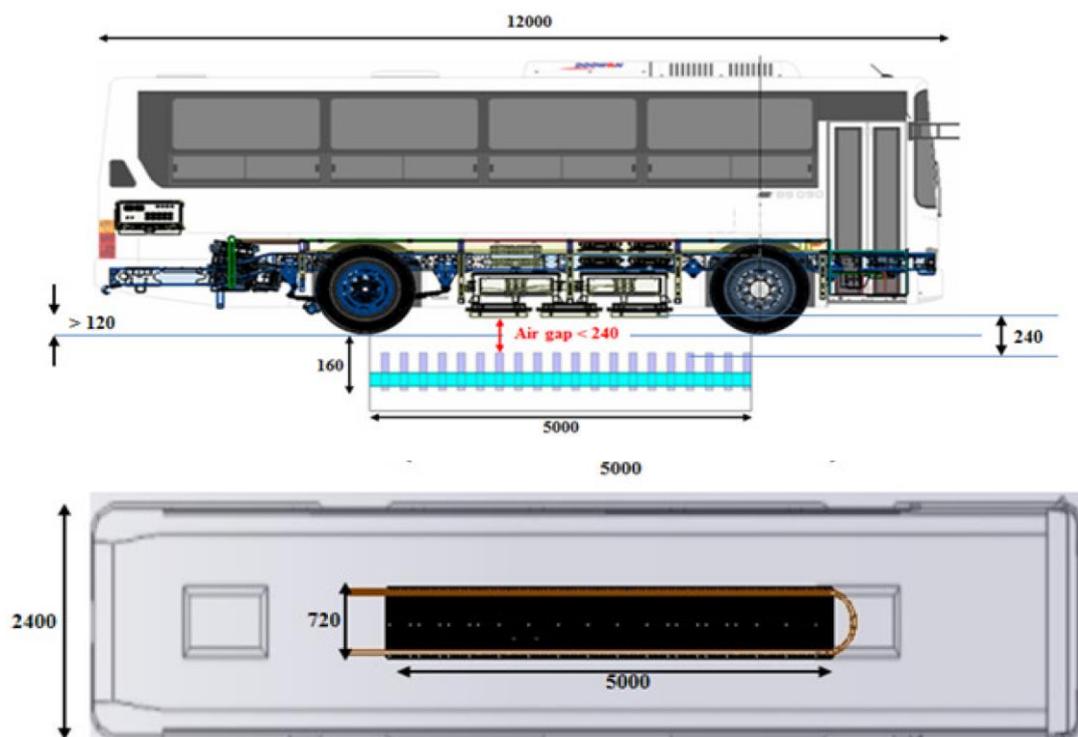
MF-WPT 系统包括原边设备和副边设备, 进行磁场无线输电。原边设备和副边设备可含有一个或多个线圈。

根据 DB44/T 2099.1, 原边设备可以地埋安装, 也可以地上安装。

MF-WPT 系统 D 原边设备的零点为停车位的参考点, 见 DB44/T 2099.1 第 7.3.3 节。表 D.1 和图 D.1 给出了原边设备的位置示意。

表D.1 原边设备的位置

方向	位置 (mm)	轴
行驶方向	5000 ± 50	X
垂直于行驶方向	720 ± 20	Y
高度方向	160 ± 30	Z



图D.1 原边设备的位置

D.3 系统结构

D.3.1 输入功率范围

大功率 MF-WPT 系统 E 的输入功率范围为大于 22 kW。

D.3.2 工作频率

表 D.2 给出大功率 MF-WPT 系统 E 的工作频率。

表D.2 工作频率

描述	符号	频率 (kHz)	频率 (kHz)
标称位置的工作频率	f_{SYS}	20	60
工作频率范围	Δf	± 1	± 1

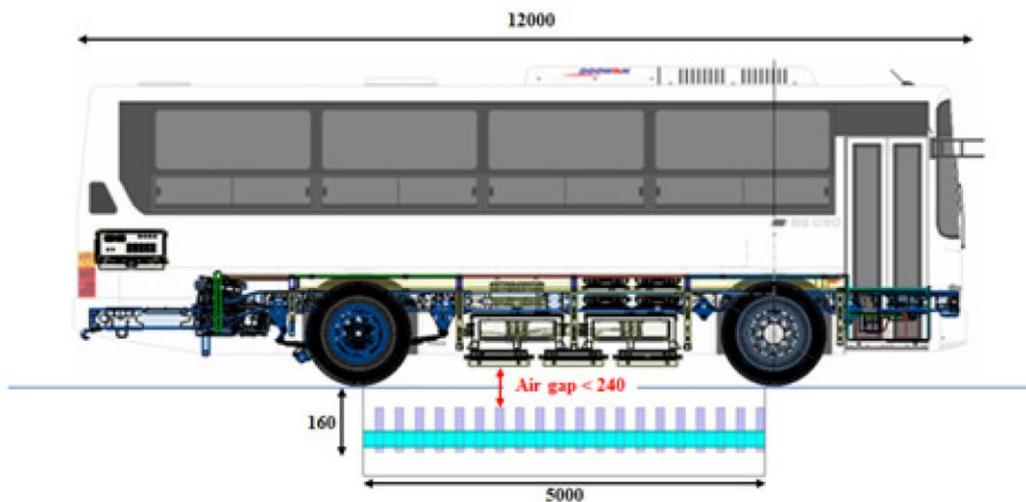
工作频率可从以下几点来考虑：可用的频带，电力电子器件的成熟度（高频下传输大功率），以及高频下传输大功率的安全性。

D.3.3 MF-WPT系统E的机械气隙

MF-WPT 系统 E 的机械气隙距离小于 240 mm，参见表 D.3 和图 D.2。

表D.3 气隙和偏移

描述	参数值 (mm)	轴
机械气隙	< 240	Z
行驶方向的偏移	$\pm xx$	X
垂直于行驶方向的偏移	$\pm xx$	Y



图D.2 机械气隙

D.3.4 MF-WPT系统E的系统效率

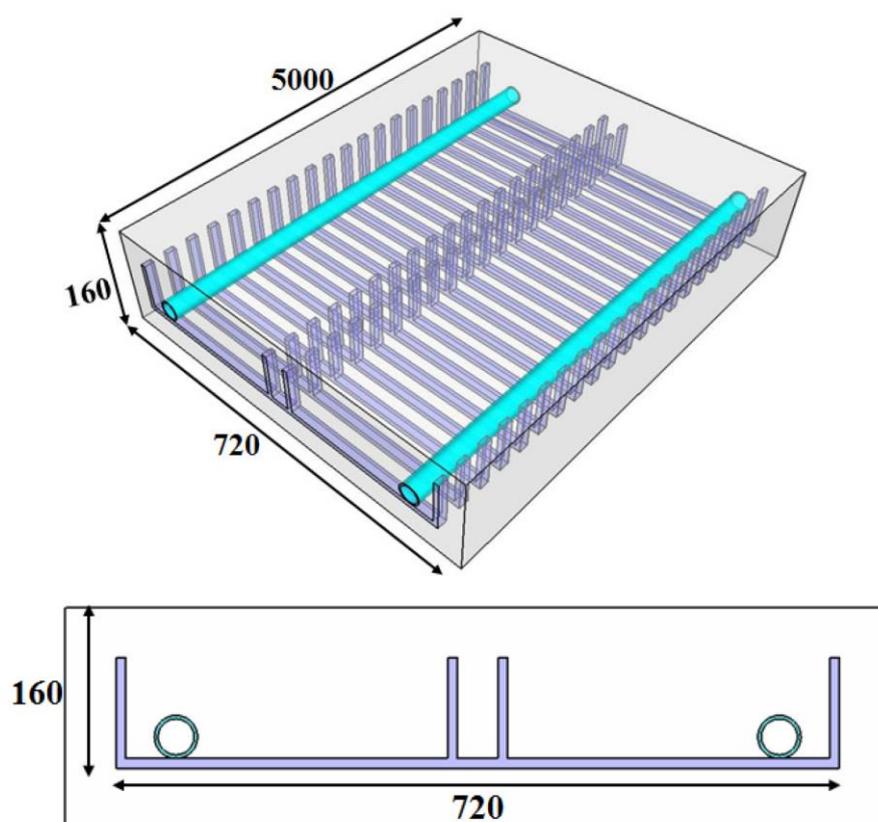
在额定工作点，系统效率应大于 80%，测量方法参考 DB44/T 2099.1。

D.4 原边设备的尺寸

表 D.4 给出了原边设备的尺寸。

表D.4 MF-WPT 系统 D 原边设备的尺寸

功率等级	MF-WPT4
行驶方向尺寸/mm	≤ 5000
垂直于行驶方向尺寸/mm	≤ 720
高度方向尺寸/mm	≤ 160



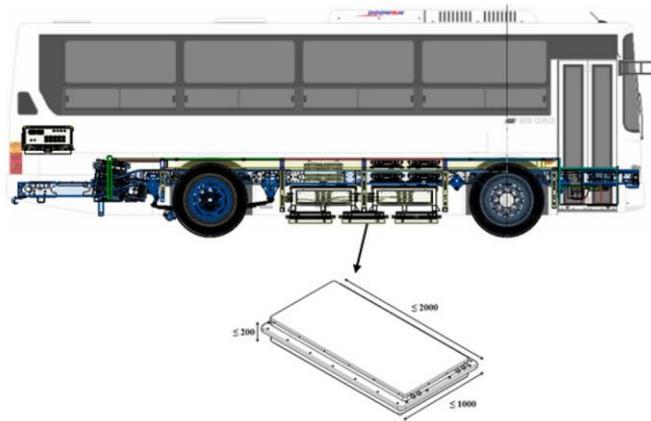
图D.3 MF-WPT 系统 E 原边设备的尺寸

D.5 副边设备的尺寸

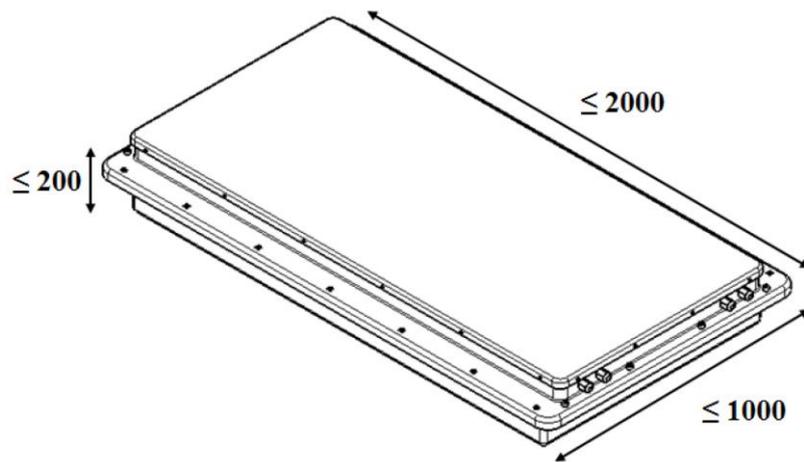
表 D.5、图 D.4 和图 D.5 给出了副边设备的尺寸。

表D.5 MF-WPT 系统 D 副边设备的尺寸

功率等级	MF-WPT4
行驶方向尺寸/mm	≤ 2000
垂直于行驶方向尺寸/mm	≤ 1000
高度方向尺寸/mm	≤ 200



图D.4 MF-WPT 系统 D 副边设备的位置



图D.5 MF-WPT4 系统 E 副边设备的尺寸

D.6 EMF规范

参考 DB44/T 2099.1—2018。

附 录 E
(资料性附录)
参数定义

E.1 最大的离地距离

原副边设备间的最大离地距离和工作气隙是 WPT 系统的关键设计参数。不同的工作气隙要求有相应的磁芯尺寸。为了适应不同的车辆离地距离以及不同载荷和胎压带来的变化，需要定义多个工作气隙范围，如表 E.1。

表E.1 最大离地距离范围

类别	描述
GAP S	较小气隙范围
GAP M	中等气隙范围
GAP L	较大气隙范围

不同工作气隙范围的原边设备和副边设备可具有互操作性（前提是所有互操作性要求都满足）。对于公共充电设施，原边设备必须与所有不同工作气隙范围的副边设备具有可互操作性。

E.2 偏移范围

原边设备和副边设备之间的位置偏移（相对于最优工作状态的对齐位置），可分为 X 方向和 Y 方向。通常来讲，工作气隙范围越大，支持的最大偏移越小。根据互操作性要求，原副边设备工作所要求的偏移范围如表 E.2。

表E.2 偏移范围

方向	描述	单位
X	前到后的偏移	mm
Y	右到左的偏移	mm

E.3 耦合系数范围

为了实现互操作性，车辆须安装合适的副边设备。举例来说，GAP L 的设备不能用在 GAP S 的场合，同理，GAP S 也不能用在 GAP L 的场合，这是因为这种不匹配的应用会导致耦合系数不匹配。为了避免这种情况，表 E.3 给出了具有通用性的耦合系数范围定义。

表E.3 耦合系数

内容	符号	描述
最大耦合系数	K_{max}	允许的最大耦合系数 (当耦合系数小于 K_{max} 时可以保证互操作性)
最小耦合系数	K_{min}	允许的最小耦合系数 (当耦合系数大于 K_{min} 时可以保证互操作性)

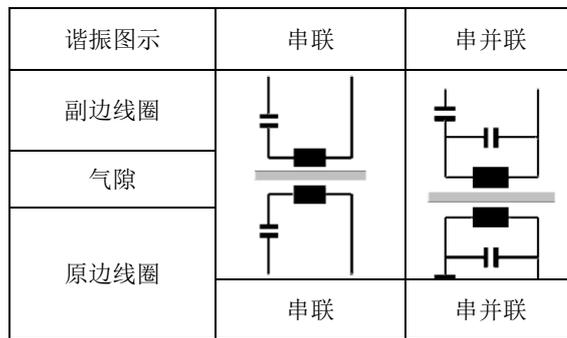
为了保证互操作性，原副边设备的耦合系数必须介于 K_{min} 和 K_{max} 之间。原边设备的耦合系数，须通过参考副边设备确认。副边参考设备的耦合系数，其磁芯尺寸是一个非常重要的参数。

E.4 WPT系统的系统配置

图 E.1 给出了 WPT 系统的系统配置。供给设备的配置在后续的章节中给出。WPT 系统控制器控制环路及参数定义见附录 F。

E.5 副边设备谐振电路拓扑结构

谐振电路的配置见图 E.1。



图E.1 谐振电路的配置

表 E.4 给出了谐振电路的参数。

表E.4 谐振电路

内容	项目	符号	描述
副边电路	电感	L_2	副边设备的电感值
	电容 (串联)	C_{2S}	副边串联谐振电容的容值
	电容 (并联)	C_{2P}	副边并联谐振电容的容值

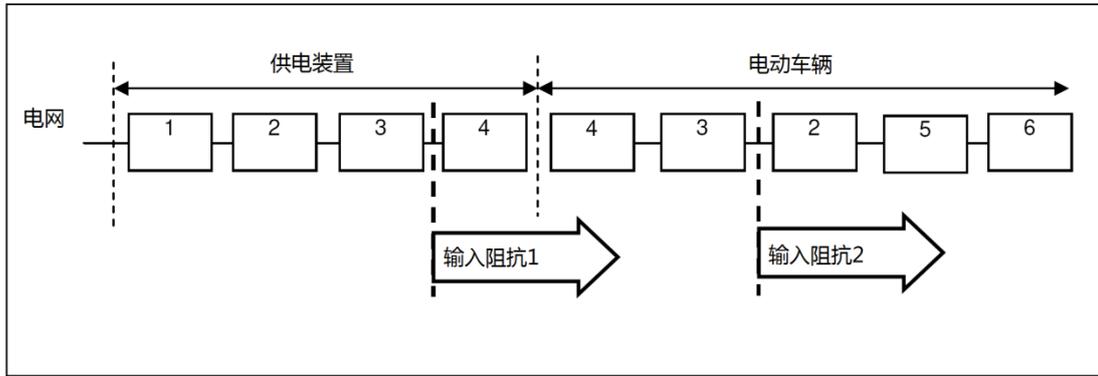
E.6 副边设备的输入阻抗范围

副边设备的输入阻抗必须是一个合适的值，表 E.5 给出了副边设备输入阻抗的定义，其范围与输出功率有关。

表E.5 副边设备的输入阻抗

名称	符号	描述
阻抗标称值	Z_{nom}	输入阻抗的标称值，从副边谐振电路看向WPT车辆供电电路
阻抗最小值	Z_{min}	输入阻抗的最小值，从副边谐振电路看向WPT车辆供电电路
阻抗最大值	Z_{max}	输入阻抗的最大值，从副边谐振电路看向WPT车辆供电电路
相角	Θ	输入阻抗的相角范围，从副边谐振电路看向WPT车辆供电电路

图 E. 2 是原边绕组处输入阻抗和副边设备处输入阻抗的示意图。



编号	描述
1	AC/DC整流和逆变
2	滤波器
3	谐振电容
4	线圈
5	整流电路
6	负载

图E. 2 原边绕组处和副边设备处的输入阻抗

E. 7 原边设备谐振电路拓扑结构

从 E. 6 条和 E. 7 条可以得到原边绕组处的输入阻抗，根据阻抗的范围，供给设备可选择合适的电路拓扑结构，来构建具有互操作性的 WPT 系统。图 E. 3 给出了原边设备谐振电路的配置，供给设备可从中选择一个或多个。

谐振图示	串联	串并联
副边绕组		
气隙		
原边绕组		
	串联	串并联

图E. 3 谐振电路结构

表 E. 6 给出了原边设备谐振电路的参数，原边设备可在逆变器电压/电流的限制范围内选择合适的参数值。

表E.6 谐振电路

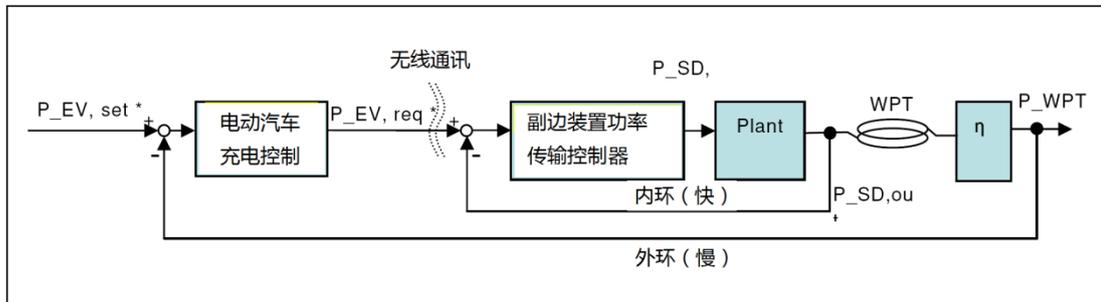
内容	项目	符号	描述
原边电路	电感	L_1	原边设备的电感值
	电容 (串联)	C_{1S}	原边串联谐振电容的容值
	电容 (并联)	C_{1P}	原边并联谐振电容的容值

附录 F
(资料性附录)
控制环路

F.1 充电控制环路及其时间常数

WPT 系统由地面设备和电动汽车组成，所以确定地面设备控制器和电动汽车控制器的功能就非常重要。本节定义了控制器的功能以及控制器的时间常数。

图 F.1 给出了 WPT 系统的控制环路，含两个环路，其中，内环用于控制地面设备的输出功率，外环用于控制向车载电池的输入功率（或者副边设备的输出功率）。



图F.1 WPT 系统控制环路

表 F.1 给出了地面设备和电动汽车控制器的功能描述。表 F.2 给出控制器的控制变量和输入变量。

表F.1 地面设备和电动汽车的功能描述

控制器	控制变量	输入变量	符号
电动汽车充电控制器	期望的充电功率	-	$P_{EV, set}$
	电动汽车向副边设备请求的充电功率	-	$P_{EV, req}$
	-	实际传输的功率	P_{WPT}
副边设备功率传输控制器	-	电动汽车向副边设备请求的充电功率	$P_{EV, req}$
	副边设备请求的输出功率	-	$P_{SD, req}$
	-	副边设备实际的输出功率	$P_{SD, out}$

表F.2 WPT 系统的地面设备控制器和电动汽车控制器

控制器	控制变量	输入的控制量
地面设备控制器	地面设备的输出功率	TBD
电动汽车控制器	电动汽车的输入功率	地面设备的参考输出功率

这些控制器都有独立的反馈环路，内环控制器的响应时间应比外环控制器的响应时间要快。表 F.3 给出了每个环路目标响应时间的定义。

表F.3 内环和外环响应时间的定义

控制器	环路	响应时间
地面设备控制器	内环	T_i ($T_i \ll T_v$)
电动汽车控制器	外环	T_v

表 F.3 定义的响应时间，如果合理设置这两个时间常数，就可以实现稳定的 WPT 功率传输控制。

广东省地方标准
电动汽车无线充电系统
第3部分：磁耦合
DB44/T 2099.3—2018

*

广东省标准化研究院组织印刷
广州市海珠区南田路563号1104室
邮政编码：510220
网址：www.bz360.org
电话：020-84250337