

热设计基本理论综述及基于EMS的 磁性元件热仿真技术应用

Thermal design basic theory and the application of magnetics thermal simulation for EMS

黄家毅, 刘树林, 曹欣欣

东莞铭普光磁股份有限公司, 东莞, 523300

摘要: 随着微电子技术、半导体器件技术的快速发展, 要求功率元件的性能需要不断提升, 磁性元件作为电源的重要部件。本文较详细介绍了热设计理论基础以及对基于EMS的磁性元件热仿真应用案例, 借助EP13电源变压器实例对 EMS仿真分析过程进行演练说明和实测对比分析, 给如何运用 EMS软件进行产品电磁-热场耦合分析的方法, 并得到准确仿真结果给说详细说明, 可供同行技术人员参考和学习。

关键词: 磁性元件, 热仿真, EMS, 热设计, 电磁-热耦合分析

Abstract: With the rapid development of microelectronics technology and semiconductor device technology, the performance of power components needs to be improved constantly, and Magnetic components are important components for power supply. This paper in detail introduces the theory of thermal design basis and the magnetic components based on EMS for thermal simulation application cases, with the aid of EP13 power transformer on EMS simulation analysis process drilling examples and the analysis of the field contrast, how to use the EMS software product Electromagnetic - thermal field coupling analysis method, and obtain accurate simulation results, which give a reference for people.

Keywords: Magnetics, thermal simulation, EMS, Thermal design, Electromagnetic-thermal coupling

1 前言

随着微电子技术、半导体器件技术的快速发展, 促进传统产业升级变革, 推动数字经济与实体经济深度融合, 而多功能、多元件的集成和模块的方向不断向前发展要求功率元件的性能需要不断提升。在智能设备, 移动办公, 5G 技术, 云计算, VR/AR 技术等高新技术的快速发展的今天, 电子产品的大功率, 小型化, 集成化的三化发展。使得各种电子设备的整体功耗不断增加, 电子设备系统内部的温度不断上升。众所周知, 高温会加速老化, 让电子器件寿命变短, 高温因素严重增加了电子器件和产品的故障率。所以对电子产品和器件的进行热设计, 确保器件具有高性能并具备良好的热功耗和热工作环境成为技术攻克难点。

对于单一的元件来说, 磁性元件热设计也就是温升计算, 各种文献和书籍中都没给出统一的温升计算方法, 常

见的方法是根据表面平均损耗功率查表估计温升, 工程经验推导的热阻计算, 还有电流密度发来控制温升^[1]。由于磁性元件种类过多, 使用磁材种类也多, 磁材的导热系数也差不很大, 可能还会有其他绝缘材料、不导热材料在线圈中, 会影响传热。在实际工程设计中, 只有通过样品进行验证, 才能得到比较准确数值, 鉴于目前没有精确的温升核算的方法。如果设计一种全新的磁性元件的时候, 特别是涉及比较多绝缘材料, 温升设计就很难, 需要不断打样进行测试, 通过样机测试, 设计调整次数多, 迭代次数多, 从而会造成大量的开发成本和时间成本, 现在比较先进的手段是借助仿真软件进行仿真计算。仿真软件本身不难, 如果想获得较为准确的计算结果, 则要求仿真技术人员必须掌握各种电磁, 热力学或者力学物理理论以及大量工程经验还有相关元件设计理论基础, 这就本文提供

的热仿真基本理论综合论述和提供基于 Solidworks 插件 EMS 电磁 - 热力耦合仿真计算和实际测量的对比案例, 来说明一般磁性元件热仿真应用。

2 热设计的理论基础

2.1 热设计相关的基本术语及概念

2.1.1 温升和最大工作温度

温升指的是元件在正常工作自身表面温度与环境温度的差。如果忽略温度变化对空气物性的非线性影响, 器件或整机在通电工作时, 可以将一般常温 25℃ 环境温度下测量温度增量直接加上最高可能环境温度便可以获得最恶劣环境下的器件近似温度, 而最恶劣环境下还能长时间 (一般为 10 年) 正常工作, 此刻对应的器件温度对应为最大工作温度。例如在常温下内测得某器件温升为 40℃, 则在 85℃ 最高环境温度下该器件的最大工作温度将为 125℃。对于一般磁性元件 (比如电感器) 定义 40℃ 时候的温升对应直流有效电流为温升电流, 对于单独磁性器件温升电流测量只是加载直流有效电流, 实际上考虑测量误差和忽略交流电流所有损耗, 还有考虑所谓余量, 建议把无风条件温升 25-30℃ 这个区间对应的有效直流电流作为磁性元件的温升电流。

2.1.2 表征温度的方式

表征温度的方式有三种: 摄氏温度, 绝对温度, 华氏温度, 它们的换算关系如下:

$$T_K = 273.15 + T_c, T_c = 5(T_F - 32) / 9。$$

2.1.3 导热系数

表征材料导热性能的参数指标, 它表明单位时间、单位面积、负的温度梯度下的导热率, 单位为 $W/m \cdot K$ 或 $W/m \cdot ^\circ C$ 。

2.1.4 对流换热系数

反映两种介质间对流换热过程的强弱, 表明当流体与固体壁面的温差为 1℃ 时, 在单位时间通过单位固体换热面积的热量, 单位为 $W/m^2 \cdot K$ 或 $W/m^2 \cdot ^\circ C$ 。

2.1.5 热阻

热量在热流路径上遇到的阻力, 反映介质或介质间的传热能力的大小, 表明了 1W 热量所引起的温升大小, 单位为 $^\circ C/W$ 或 K/W , 可分为导热热阻, 对流热阻, 辐射

热阻及接触热阻四类。

2.1.6 黑度

实际物体的辐射力和同温度下黑体的辐射力之比, 它取决于物体种类、表面状况、表面温度。

2.2 热仿真技术研究

磁性元件 (线圈包括电感和电子变压器) 热特性

本文一开始就说明对热设计分为: 理论分析, 实验测试, 仿真分析。理论计算没有很准确的分析计算方法, 而实验测试可能涉及制样而需花费很长时间, 所以目前快而准的方法是使用电脑的仿真技术来进行模拟仿真计算。

热设计有三个层次, 分别是元件热设计、电路板级的热设计和环境级的热设计。本文只是针对元件来设计。判定热设计成败依据: 器件最大工作结温 $T_j \leq$ 降额允许值 (对磁性器件, 要求其温度不高于降额绝缘温度值)。

电子元器件的失效, 在某种程度上取决于局部温度场、电子元器件的工作过程和形式。因此, 充分了解电子元器件的热特性是正确进行热设计的重要保证, 以下将对常用磁性元件的热特性进行说明。

磁性元件线圈是一种常用的被动电子元器件, 是用绝缘导线 (例如漆包线) 绕制而成的电磁感应元件。其热失效的主要形式是绝缘材料和导体的失效。当电流通过导线时, 导体会产生热量, 对线圈而言, 磁芯或铁芯也是发热源, 磁芯材料的高于居里温度失去磁性而失效的问题不在这里做讨论。由于电感结构状态决定了其内部热点和表面之间的热阻较大。当热量不能及时散发导致温度远远超过绝缘材料的承受的温度时, 将会破坏导体的绝缘材料的绝缘性能, 从而造成烧毁并短路。磁性元件绝缘材料的绝缘性能与温度有密切的关系。对于绝缘材料大部分是有机材料, 温度越高, 老化速度越快, 绝缘性能越差。为确保绝缘性能, 几乎每种绝缘材料都有一个适当的最高允许工作温度 (极限温度), 在此温度以下, 可以长期安全地使用, 超过这个温度就会迅速老化。

这里补充绝缘材料在极限温度下工作的寿命除了本身特性还受制作工艺、材料所受的机械应力等因素的影响。所以选在绝缘材料时必须高于或等于最大工作温度。在考虑器件本身的最大工作温度, 以我们常见的 125℃ 等级的磁性元件为例, 一般最高工作环境温度为 85 摄氏度, 以温升小于 40℃ 的温升为设计前提, 所以热设计需要考虑在

表1 热设计中常用到的金属材料的导热系数、比热容和密度表

材料	牌号	导热系数 (conductivity)	比热容 (specific heat)	密度 (density)
铝合金	AL6063-T5	201 W/(m·K)	900J/(kg·K)	2700 kg/m ³
铝合金	AL1070	226 W/(m·K)	880J/(kg·K)	2700 kg/m ³
铝合金	AL1100	218 W/(m·K)	900J/(kg·K)	2700 kg/m ³
铝合金	AL5052	138 W/(m·K)	921J/(kg·K)	2700 kg/m ³
铝合金	AL6061	155 W/(m·K)	963J/(kg·K)	2700 kg/m ³
铝合金	AL1050	210 W/(m·K)	880J/(kg·K)	2700 kg/m ³
锌合金	ZN-3	104 W/(m·K)	419 J/(kg·K)	6600 kg/m ³
铜合金	C1100	391 W/(m·K)	390j/(kg·K)	8940 kg/m ³
铝合金	AL1050	391 W/(m·K)	880J/(kg·K)	2700 kg/m ³
锌合金	ZN-3	104 W/(m·K)	419 J/(kg·K)	6600 kg/m ³
铜合金	C1100	391 W/(m·K)	390j/(kg·K)	8940 kg/m ³

表2 常见物质的导热系数范围

物质种类	纯金属	金属合金	液态金属	非金属固体	非金属液体	绝热材料	气体
导热系数 W/(m·K)	100~1400	50~500	30~300	0.05~50	0.5~5	0.05~1	0.005~0.5

极限的环境,最大工作电流条件下,所谓结点最高温度必须小于 125℃,这是磁性元件热特性的限定条件。

2.3 热传递的三种方式和遵循定律

2.3.1 热传导

热传导过程中传递的热量按照 Fourier 导热定律计算:

$$Q = \frac{\lambda A(T_h - T_c)}{\delta}$$

其中: A 为与热量传递方向垂直的面积,单位为 m²;

T_h 与 T_c 分别为高温与低温面的温度;

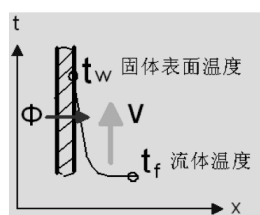
δ 为两个面之间的距离,单位为 m;

λ 为材料的导热系数,单位为 W/(m·K),表示了该材料导热能力的大小。一般说,固体的导热系数大于液体,液体的大于气体。例如常温下纯铜的导热系数高达 400W/(m·K),纯铝的导热系数约 204W/(m·K),水的导热系数为 0.6W/(m·K),而空气仅 0.025W/(m·K) 左右。

2.3.2 热对流

对流换热的热量按照牛顿冷却定律计算:

$$Q = hA(T_h - T_c)$$



其中:

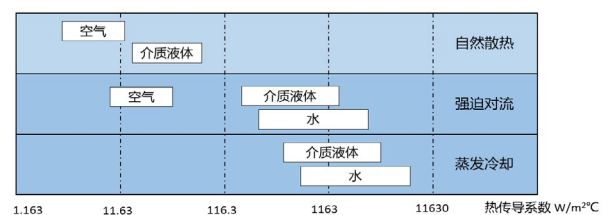
A 为与热量传递方向垂直的面积,单位为 m²;

T_h 与 T_c 分别为固体壁面与流体的温度;

h 是对流换热系数,自然对流时(所谓无风的情况)换热系数在 1 ~ 10W/(m²·K) 量级,以笔者的经验实际应用时一般只有 7 ~ 10W/(m²·K);强制对流时换热系数在 10 ~ 100W/(m²·K) 量级,实际应用时一般不会超过 30W/(m²·K)。磁性元件设计的时候主要以自然散热为准,本文中用于仿真的热对流设定的条件为 7 ~ 10W/(m²·K)。下表中给出不同情景表面传热系数的大致范围。

表3 不同情景表面传热系数的大致范围^[2]

(强迫对流空气流速 3m/s~15m/s,
强迫对流液体流速 0.3m/s~1.5m/s)^[3]



2.3.3 热辐射

热辐射是由于物体的温度高于绝对零度时发出电磁波的过程中,两个物体之间通过热辐射传递热量称为辐射换热。物体的辐射量计算公式为:

$$Q = 5.67e^{-8} \varepsilon A(T_h^4 - T_c^4)$$

公式中 T 指的是物体的绝对温度值 = 摄氏温度值 + 273.15; ε 是表面的黑度或发射率, 该值取决于物质种类, 表面温度和表面状况, 与外界条件无关, 也与颜色无关。磨光的铝表面的黑度为 0.04, 氧化的铝表面的黑度为 0.3, 各种颜色的油漆表面黑度达到 0.9, 雪的黑度为 0.8。

对于一般磁性元件金属铜的黑度很小, 加上磁性表面粗糙度很小, 产品面积很小, 所以温度热辐射很小, 在热仿真中忽略这部分设置。

2.4 热仿真软件介绍

常用热仿真软件的介绍

目前流行的热设计软件主要有: ANSYS ICEPAK, FLOTHERM。

ANSYS 软件是美国 ANSYS 公司研制的大型通用有限元分析 (FEA) 软件, 是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。它除了分析独立的温度场以外, 还具有多物理场耦合分析功能, 允许在同一模型上进行各种耦合计算, 如热 - 结构耦合、电 - 磁 - 流体 - 热耦合。ANSYS 包括众多模块, Maxwell, Icepak 等, 而 Icepak 软件由全球最优秀的计算流体力学软件, 专门为电子产品工程师定制开发的专业的电子热分析软件。目前如果需要 Maxwell 和 Icepak 进行电磁和热的联合仿真, 则需要通过 ANSYS Workbench 平台实现, Ansys 功能强大, 如进行电磁 - 热仿真, 则需要购买多个模块, 购买费用昂贵, 而且它对用户掌握的相关知识要求较高, 需要用户具有丰富的有限元方面的理论知识和仿真经验。

FLOTHERM 是一套由英国 FLOMERICS 软件公司面向电子系统结构设计工程师和电子电路设计工程师开发的电子系统散热仿真分析软件。是全球第一个专门针对电子散热领域的 CFD 软件, 它不但可以满足专业人士解决复杂的电子产品散热问题, 而且适合从事普通电子产品设计的结构人员对设计方案进行快速准确的热设计。对整机电子产品进行热仿真来说, 这是一个很好用的软件, 但是对于磁性元件行业并未发现有同行使用。

EMS 是一种电磁场模拟软件, 用于计算场 (电 / 磁 / 磁通 / 电位 / 涡流)、电路参数 (电感 / 电容 / 电阻 / 阻抗 / 通量连杆)、机械参数 (力 / 扭矩) 和损耗 (涡流 / 磁芯 // 铜损)。EMS 是 SOLIDWORKS 和 Autodesk Inventor 的黄金认证插件, 可以满足电机、发电机、传感

器、变压器、高压设备、电气开关、阀门、PCB、悬浮机、扬声器、永磁机、NDT 设备、逆变器、母线、电感器、生物医学等设备的仿真需求。它具备以下优点: (1) 全 3D 电磁场模拟。(2) 与 CAD 几何体无缝集成: EMS 无缝集成在两个主要平台: CAD - SOLIDWORKS 和 Autodesk Inventor, 使您能够模拟最复杂的电磁设计。(3) 多物理场功能: EMS 是一款真正的多物理软件, 使您能够在无忧无虑的集成环境中将磁性和电气设计与电路、运动、热和结构分析进行连接, 无需导入 / 导出任何数据。(4) 用户友好的界面, 简单易用^[4]。EMS 是目前铭普使用的正版仿真软件, 本文中将会使用 EMS 进行电热仿真。

3 EMS 的高频磁性元件仿真应用案例

3.1 仿真设置及其结果

以 POE 应用的 EP13 贴片电源变压器为例, 电路拓扑为反激式, 转换器有如下参数: 输入电压 $V_i=48V$ (42-57V), 开关频率 $f_s=250kHz$, 输出 $V_o=8V$, $I_o=2.3$ 。

初级绕组: $\varphi 0.16mm \times 4P \times 36Ts$

次级绕组: $\varphi 0.23mm \times 6P \times 9Ts$

根据反激的 CCM 的工作模式在满载输出 2.6A 电流条件下分别计算初次级绕组的有效电流:

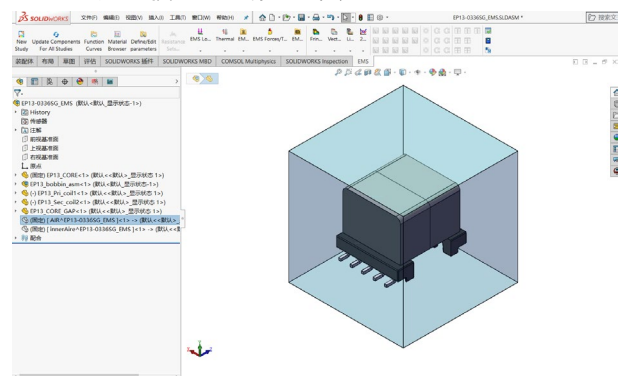
初级绕组电流 $I_{prms}=0.75 A$

次级有效电流 $I_{srms}=4.2 A$

仿真工作流程:

在 SOLIDWORKS 建模—>SOLIDWORKS 转配成零件—>SOLIDWORKS 进入仿真插件 EMS—>设置仿真条件

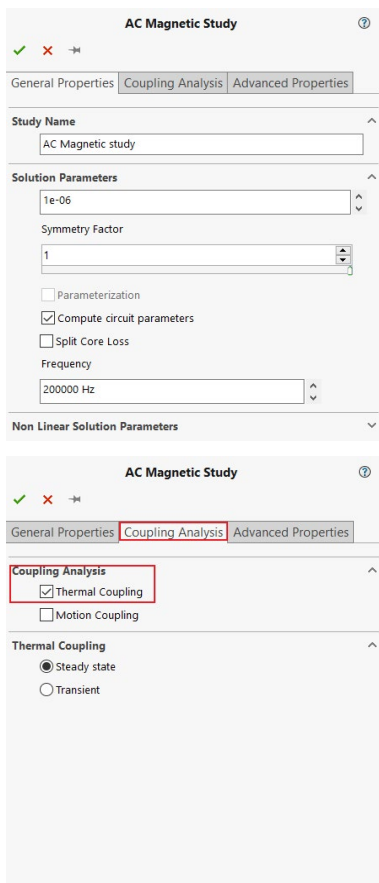
3.1.1 建立模型 (包括空气域)



上图 EP13 的最外面的方形区域为空气域, 这是 EMS 电磁仿真必须的前置条件, 图示为默认的 3d 电磁边

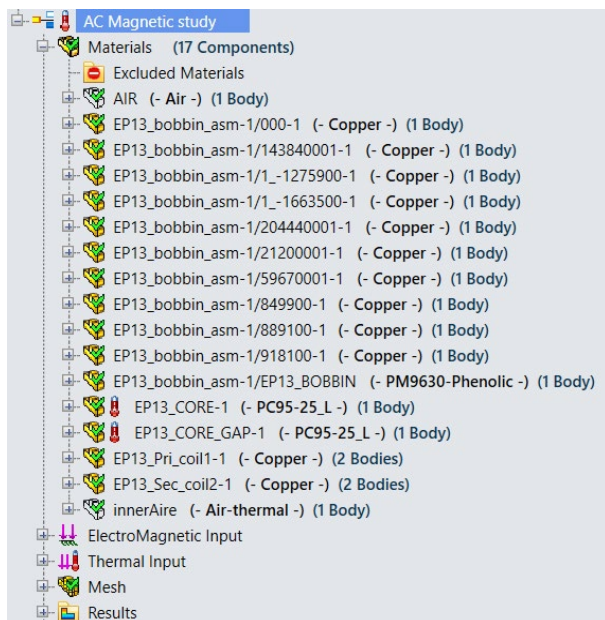
界限定。

3.1.2 进入 EMS 并建立 study (这里选在交流磁场和热力场)



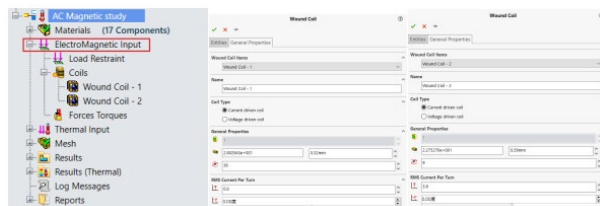
3.1.3 指派材料

磁芯 (PC95), 绕组 (铜), 骨架 (PM-9630)



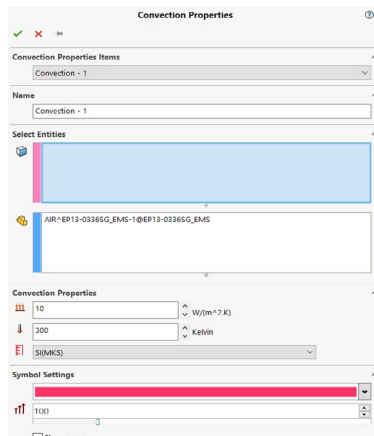
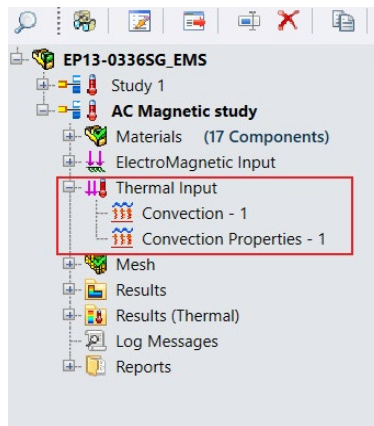
3.1.4 电磁输入设置

设置线圈, 主绕组为 Wound coil1 采用同等横截面积的 $\phi 0.32\text{mm} \times 4\text{P} \times 36\text{T}$ s



3.1.5 热输入 Thermal input

选择 convection 热传导, 选择空气域部分, 自然散热空气换热系数在 $10\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 开始温度为 300kelvin (常温 26.1°C), 我这里也单独给绕组部分设定一个空气域, 考虑里面空气流动性更新, 绕组所在空气设定为 8 or $9\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。



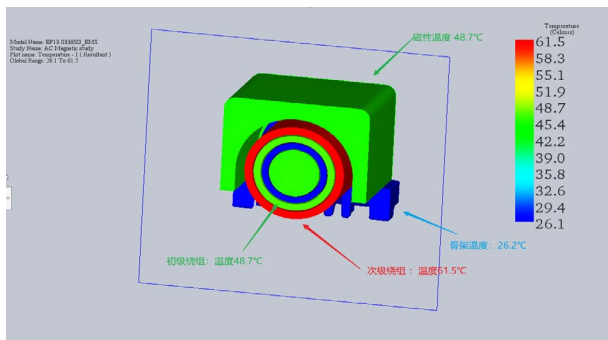
3.1.6 网格划分

采用系统自适应网格划分, 使用系统默认不做设定。

3.1.7 运行仿真得到如下结果

初始室温为 26.1°C , 骨架为不发热而且导热系数小,

故骨架为 26.2℃, 次级绕组温度为 61.5 摄氏度, 磁芯在交流电下有损耗, 磁性温度为 48.5℃。



3.2 变压器在整机上实测温升

实际上满载工作是测量电源变压器的温升情况

表 3-2 电源板上变压器实测温升

环境温度 (26℃), 输入 48V 输出满载电流 2.6A					
序号	#1	#2	#3	#4	平均值
磁芯温升 (℃)	20.3	22.3	21.5	19.5	20.9
线包温升 (℃)	33.4	32.3	32.3	33.9	32.975

由上表可得: 线包温升平均值为约为 33℃, 磁芯温升为约为 21℃。

3.3 结果对比分析

实测温升: 线包温升平均值为约为 33℃, 磁芯温升为约为 21℃

仿真温升: 线包温升平均值为约为 35.4℃, 磁芯温升为约为 22.6℃

通过样机测试的反馈数据看, 设备的实际散热能力与仿真分析基本一致。仿真结果均比测试结果偏高 2-3℃, 几乎和实测值一样, 说明仿真结果是正确的。

4 总结

本文较详细地介绍了热设计理论基础以及对基于 EMS 的磁性元件热仿真应用案例。

通过 EMS 仿真工具对热仿真技术进行了研究, 仿真中热输入设定为对流传热系数, 给出了空气无风条件下的对流系数设定, 并借助 EP13 电源变压器实例对 EMS 仿真分析过程演练说明和实测对比分析, 给同行技术人员介绍了运用 EMS 软件进行产品电磁-热场耦合分析的方法和流程。即利用 EMS 电磁-热仿真设计软件, 可以大大提高工作效率和准确性, 同时结合理论计算, 减少设计反复, 加快磁性元件的开发周期。

参考文献

- [1] Marian K. Kazimierczuk, High-Frequency Magnetic Components, Second Edition (2013).
- [2] 陈继良. 从零开始学散热. 15.
- [3] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 第三版 [M] 高等教育出版社, 1998.
- [4] Emworks 官网: <https://www.emworks.com/product/ems>.

作者简介

黄家毅, 男, 铭普光磁电子事业部主任工程师, 毕业于华南理工大学

地址: 广东省东莞市石排镇东园大道石排段 157 号

联系电话: 188-9879-6260

上接154页

6 结束语

本文阐述了面向 EV 的快速充电和无线供电、行驶中供电、液流体电池等各种充电技术的最新动向。这些技术中, 形成 EV 缺点的充电时间长、续航里程短, 解决这些问题的可能性尚属未知数, 总之, 正期待着朝实用化将其性能

进一步的发展。为了 EV 的愈益普及, 进而实现脱碳社会, 防止地球的升温暖化做出贡献。

原文出处: (日) クライソン, トロンナムチャイ, 电动自动车向け充电技术の最新动向, 【电气评论】Vol.106 No.10.2021 P.10-16