

电磁兼容性测试技术在新能源汽车电子系统中的应用与优化

王乐天, 杨旭, 丁思, 赵晓东, 孔永淑

(深圳华通威国际检验有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要:随着新能源汽车产业的迅速发展,电子系统在汽车安全、性能和舒适度中的作用日益增强。然而,这些系统的复杂性和互联性增加了电磁兼容性问题的风险,可能对汽车的可靠性和安全性造成影响。因此,研究新能源汽车电子系统的电磁兼容性测试技术及其优化设计不仅对提升车辆性能、保障驾驶安全具有重要意义,还对遵守法规要求、推动汽车行业可持续发展产生深远影响。

关键词:新能源汽车;电子系统;电磁兼容性;安全

中图分类号:U463 文献标识码:A

Application and optimization of electromagnetic compatibility test technology in new energy vehicle electronic system

WANG Letian, YANG Xu, DING Si, ZHAO Xiaodong, KONG Yongshu

(Shenzhen Huatongwei International Inspection Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: With the rapid development of the new energy vehicle industry, the role of electronic systems in vehicle safety, performance, and comfort is increasingly important. However, the complexity and interconnectivity of these systems increase the risk of electromagnetic compatibility issues, which may have an impact on the reliability and safety of automobiles. Therefore, studying the electromagnetic compatibility testing technology and optimization design of new energy vehicle electronic systems is not only of great significance for improving vehicle performance and ensuring driving safety, but also has a profound impact on improving regulatory requirements and promoting the sustainable development of the automotive industry.

Key words: new energy vehicle, electronic system, electromagnetic compatibility, secure

1 新能源汽车电子系统电磁兼容性测试的必要性

1.1 提升安全性与可靠性

在新能源汽车电子系统中,电磁兼容性测试可以提升系统的安全性与可靠性,确保电子设备在电磁环境中正常运作而不引起不必要的干扰,从而降低由电磁干扰引发的故障概率并保障车辆的正常运行。这种测试不仅能够识别和量化电子系统对外界电磁干扰的敏感程度(即电磁敏感性),还能进一步指导电子系统设计的优化,确保系统在各种电磁环境下的稳定性和可靠性^[1-2]。因此,电磁兼容性测试不仅有助于满足法规要求,更是确保新能源汽车电子系统安全、可靠运作的必要手段。

1.2 避免电子系统互相干扰

随着车载电子系统的日益复杂和高度集成,不同

电子设备之间会产生电磁干扰,从而影响设备的正常运行,甚至导致系统功能失效。通过评估电子系统发射的电磁干扰水平以及系统对外部电磁干扰的敏感性,电磁兼容性测试能够识别和减少潜在的干扰源^[3]。通过这些测试,研究人员可以在设计阶段对电子系统进行调整和优化,如采用适当的电磁屏蔽和滤波技术确保各系统模块在电磁复杂的环境中协同工作而不会相互干扰。因此,电磁兼容性测试是确保新能源汽车电子系统间相互兼容、高效稳定运作的关键步骤。

1.3 符合法规与标准要求

随着电磁环境的日益复杂,国际和地区制定了一系列严格的电磁兼容性标准,旨在保障电子设备在不同环境下能够正常运作,并防止电磁干扰对其他设备造成影响。这些标准涵盖了广泛的测试项目,包括但不限于辐射和传导干扰的测量、电磁敏感性评估以及

抗干扰能力验证。基于这些标准进行严格的电磁兼容性测试,不仅能确保新能源汽车电子系统的性能和安全性,还有助于获得市场准入资格和维持竞争力^[4]。此外,法规与标准是新能源汽车电子系统设计 and 测试过程中的重要参考因素,对于促进汽车行业的可持续发展和技术创新具有重要意义。

2 电磁兼容性预测模型

2.1 电磁兼容性模型

基于电磁理论和系统理论,电磁兼容性模型旨在描述和分析新能源汽车电子系统中的电磁干扰和电磁敏感性问题。模型通常建立在 Maxwell 方程的基础上,用以预测电磁场的分布、传播和电子设备间的相互作用:

$$\begin{cases} \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \cdot D = \rho \\ \nabla \cdot B = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, E 和 H 分别代表电场和磁场强度; D 和 B 分别是电位移和磁通密度; J 代表电流密度; ρ 是电荷密度; t 表示时间。

为了应用于电磁兼容性分析,这些方程需要与边界条件和初始条件结合以适应具体的电子系统和操作环境。人们可通过数值方法(如有限元法或时域有限差分方法)对这些方程进行求解,以获得电磁场分布、电磁干扰路径和电磁屏蔽效果的定量预测。

2.2 预测模型的验证与校准

作为确保电磁兼容性预测结果的准确性和可靠性的关键步骤,预测模型的验证与校准涉及模型预测值和实验测量值的对比,旨在评估和优化模型的性能。在采用统计分析方法量化模型预测的准确度和误差时,一般用均方根误差评估预测值与实际测量值之间的差异,表达式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (2)$$

式中, P 是模型的第 i 个预测值; O_i 是第 i 个实际测量值; n 是数据点的总数, $RMSE$ 值越小表示模型预测的准确性越高。

除了 $RMSE$,还可以使用决定系数 R^2 评价模型预测值与实际测量值之间的相关程度,表达式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

根据以上公式,可以校准模型并调整模型参数,直至模型的预测结果与实验数据吻合,从而提高预测模型的准确性和可靠性。

3 电磁兼容性测试技术在新能源汽车电子系统中的应用

3.1 电动汽车驱动系统的电磁兼容性测试

在新能源汽车电子系统中,电动汽车驱动系统的电磁兼容性测试旨在确保驱动系统能够在复杂电磁环境下稳定运行,同时最小化对其他系统的电磁干扰,步骤如下。(1)进行辐射干扰和传导干扰测试,评估驱动系统在工作时产生的电磁辐射和通过连接线缆传播的电磁干扰量。(2)执行辐射敏感性和传导敏感性测试,确定外部电磁场对驱动系统操作的影响程度。(3)开展电磁脉冲测试,评估驱动系统面对瞬态电磁干扰时的韧性和恢复能力。(4)实施静电放电测试,确保驱动系统对静电放电事件具有足够的抵抗力。通过这些测试,可以评估电动汽车驱动系统的电磁兼容性表现,从而为系统设计和优化提供依据,并确保汽车在多变电磁环境中的稳定运行。

3.2 充电系统的电磁兼容性测试

针对充电系统,电磁兼容性测试分为辐射干扰测试和传导干扰测试 2 大类,旨在评估充电设备在操作过程中产生的电磁干扰对周围电子设备的影响,以及该系统对外部电磁干扰的抵抗能力。其中,辐射干扰测试主要关注充电系统在工作时通过空气传播的电磁波对其他设备的影响,而传导干扰测试则评估通过电源线或信号线传播的干扰^[5]。此外,充电系统需接受电磁敏感性测试,以验证其对外来电磁干扰的抵抗力,进而确保在复杂的电磁环境中能正常工作。

3.3 其他电子系统的电磁兼容性测试应用

新能源汽车中的其他电子系统(如信息娱乐系统、车辆控制系统及先进驾驶辅助系统)均需进行电磁兼容性测试,以确保其在复杂电磁环境下的正常运行和相互间无干扰性。(1)对于信息娱乐系统,电磁兼容性测试主要关注其是否会因外部电磁干扰影响而出现显示故障或信号传输中断,同时评估其本身产生的电磁干扰对其他电子系统的影响^[6]。(2)车辆控制系统是新能源汽车的神经中枢,其电磁兼容性测试是为了保证关键控制指令在电磁干扰环境下的准确性和可靠性,避免误操作或系统失效。(3)先进驾驶辅助系统具有自动刹车、车道保持等功能,其电磁兼容性测试则专注于确保传感器和执行机构在强电磁干扰下的准确响应,从而维护行车安全。

4 电磁兼容性测试技术在新能源汽车电子系统中的优化设计

4.1 电子系统设计优化

在新能源汽车电子系统中,电磁屏蔽设计旨在确保电子系统免受外部电磁干扰,并减少系统本身对外界的电磁辐射。电磁屏蔽的效能可以通过屏蔽效能(SE)进行量化:

$$SE = 20 \log_{10} \left(\frac{E_i}{E_t} \right) \quad (4)$$

式中, E_i 表示未经屏蔽的电磁辐射强度; E_t 为经过屏蔽材料后的辐射强度。 SE 的强弱取决于材料的电导率、磁导率以及屏蔽层厚度,由反射损耗、吸收损耗和多次反射损耗3部分组成,可表示为:

$$SE = RL + AL + ML \quad (5)$$

反射损耗主要由电磁波与屏蔽材料界面的阻抗不匹配导致;吸收损耗与电磁波穿透屏蔽材料时被吸收有关;多次反射损耗涉及电磁波在屏蔽材料内部的反射。其中,吸收损耗可以进一步通过材料的内在特性和厚度进行计算,表达式为:

$$AL = 8.686 \cdot \left(\frac{\pi f \mu \sigma d}{2} \right)^{1/2} \quad (6)$$

式中, f 是电磁波的频率; μ 为材料的磁导率; σ 是电导率; d 代表屏蔽材料的厚度。通过合理选择材料属性和设计屏蔽层的厚度,可以提高电磁屏蔽效能并有效减少电磁干扰,从而优化新能源汽车电子系统的性能和提高可靠性。

电路布局与线束设计的优化旨在减少电磁干扰并提升系统的整体性能和可靠性,核心原理是电磁兼容性(EMC)设计准则,主要关注电磁场的传播、耦合机制以及干扰抑制。电路布局优化旨在最小化回路面积以降低磁环路产生的干扰,其模型为:

$$A = l \times w \quad (7)$$

式中, A 表示回路面积; l 和 w 分别为回路的长度和宽度。通过优化设计尽量减小 l 和 w 的值,可以有效减少由电流回路产生的磁场干扰。在线束设计中,电磁干扰的抑制可通过控制线间的耦合系数(k)实现,耦合系数的计算公式为:

$$k = \frac{L_m}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (8)$$

式中, L_m 为互感; $L_1 L_2$ 分别为2条导线的自感。通过优化线束布局(如并排布置或采用绞合线的方式)可以减小互感 L_m 并降低耦合系数 k ,从而减少电磁干扰。此外,电路布局与线束设计需考虑信号完整性和功率完整性的优化,以确保信号传输的稳定性和电源

供应的可靠性。

4.2 系统调试与测试流程优化

电磁干扰源的识别与定位是优化系统调试与测试流程的关键环节,这一过程通常依托电磁场理论与先进的信号处理技术构建模型。其中,基于时域反射和时域发射技术的模型尤为常用,它们紧密依赖传输线理论:

$$V_{out}(t) = V_{in}(t) * h(t) \quad (9)$$

式中, $V_{out}(t)$ 是传输线末端的输出电压; $V_{in}(t)$ 是输入电压; $h(t)$ 为传输线的脉冲响应函数;*表示卷积运算。通过分析 $V_{out}(t)$ 的波形,可以识别电磁干扰源的位置和性质。

电磁干扰的强度和位置可通过解决逆问题来定位,即通过测量得到的电磁场分布反推干扰源的特性。该过程可以通过Maxwell方程简化模型进行描述,结合边界条件和逆算法,表达式如下:

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times E) - \omega^2 \epsilon E = -i\omega J \quad (10)$$

式中, E 是电场强度; μ 与 ϵ 分别是介质的磁导率和电容率; ω 为角频率; J 是干扰源的电流密度。通过对上述方程进行数值求解并结合测量数据,可以定位电磁干扰源的精确位置。

在新能源汽车电磁兼容性测试中,整车级测试与验证优化占据核心地位,其目的在于评估和确保汽车作为一个整体在各种电磁环境下的性能和安全性。整车级测试的模型可以表示为:

$$\begin{cases} \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \end{cases} \quad (11)$$

优化策略包括设计多目标优化算法以平衡电磁兼容性与其他设计目标(如成本和重量)。以遗传算法或粒子群优化为例,优化模型如下:

$$\begin{cases} \min_x \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)\} \\ \text{s. t. } g(x) \leq 0, h(x) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中, x 是设计变量; $f_1(x)$ 是优化目标;若最小化电磁干扰,则 $g(x)$ 和 $h(x)$ 分别是不等式和等式约束。通过这种方式可以系统地调整设计参数,实现整车级测试与验证的优化,从而确保新能源汽车在各种电磁环境中的安全性和可靠性。

参考文献:

- [1] 寇晓斐. 汽车散热系统的电磁兼容分析与优化[D]. 天津: 天津工业大学, 2019.
- [2] 李有志, 韩正. 电子诊断技术在新能源汽车检测与维修中的应用研究[J]. 汽车测试报告, 2023(1): 65-67.

(下转第72页)