

新能源汽车高压电控产品线束的集成化设计与电磁兼容优化

祁恒

湖南中联重科智能高空作业机械有限公司, 湖南 长沙 410200

[摘要]新能源汽车高压电控系统的性能以及可靠性在很大程度上依靠其核心血管也就是高压线束的集成化设计情况以及电磁兼容性的表现。文章较为系统地对高压线束的功能结构组成、集成化设计的核心原则以及具体的实施路径展开了探讨,着重针对三维布局优化、连接器集成设计还有轻量化技术应用等关键环节进行了剖析。还对高压线束电磁干扰的机理以及主动抑制策略展开了深入的研究,并且提出了像多层屏蔽结构、磁环优化布局以及差异化接地滤波等一系列核心技术方案,建立了一个包含多物理场仿真、严格实验测试以及全面可靠性验证的集成化与 EMC 协同验证体系。

[关键词]新能源汽车; 高压线束; 电磁兼容

DOI: 10.33142/hst.v8i8.17345

中图分类号: TN914

文献标识码: A

Integrated Design and Electromagnetic Compatibility Optimization of High-voltage Electronic Control Product Wiring Harness for New Energy Vehicles

QI Heng

Hunan Zoomlion Intelligent Access Machinery Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410200, China

Abstract: The performance and reliability of high-voltage electronic control systems in new energy vehicles largely rely on the integrated design of their core blood vessels, namely high-voltage wiring harnesses, and the performance of electromagnetic compatibility. The article systematically explores the functional structure composition of high-voltage wiring harnesses, the core principles of integrated design, and specific implementation paths, with a focus on analyzing key aspects such as 3D layout optimization, connector integration design, and lightweight technology applications. We also conducted in-depth research on the mechanism of electromagnetic interference in high-voltage wire harnesses and active suppression strategies, and proposed a series of core technical solutions such as multi-layer shielding structure, magnetic ring optimization layout, and differentiated grounding filtering. We established an integrated and EMC collaborative verification system that includes multi physical field simulation, rigorous experimental testing, and comprehensive reliability verification.

Keywords: new energy vehicles; high voltage wiring harness; electromagnetic compatibility

新能源汽车产业的迅猛发展对高压电控系统的功率密度、可靠性与安全性提出了近乎严苛的要求。作为连接电池、电机控制器及驱动电机等核心高压部件并承担电能传输与信号控制功能的关键载体,高压线束设计的优劣直接影响着整车的性能表现、电磁环境乃至安全运行。传统分散式、经验驱动的线束设计方法在应对高压大电流、高频开关噪声及复杂空间约束时已显得捉襟见肘。因此,推动高压线束向高度集成化、轻量化及强电磁兼容性方向演进,成为了产业技术升级的必然选择。

1 高压电控系统线束集成化设计基础

1.1 高压线束功能与结构组成

在新能源汽车当中,高压线束系统属于极为重要的组成部分,它构建起了电能传输以及信号控制方面的主干网络,这一系统的最为关键的功能便是打造出一条从动力电池包开始出发,经过电机控制器来进行精准的调控操作,最后能够抵达驱动电机,进而实现能量高效转化的具备极高可靠性的电源传输路径。这条路径是需要去承载几百伏特的电压以及几百安培的电流的,所以对于绝缘性能、载

流能力还有长期热稳定性等方面都提出了近乎极限的要求。除此之外,还有一套相当精密的信号通信线束拓扑和电源主回路紧密地耦合在一起,它的职责是在像电池管理系统、整车控制器以及电机控制器等这些关键电控单元相互之间快速且准确地传递控制指令以及状态反馈信息,而这一信息流是否完整对于整车的协调控制而言有着极为重要的影响作用。高压线束典型的物理结构是由导体线芯、多层绝缘防护层、电磁屏蔽层、外护套以及专门用来满足高压互锁与密封要求的连接器共同组合而成的,其中各个部分在材料选取以及结构设计方面所呈现出的协同情况从根本上决定了整个系统的性能极限所在之处。

1.2 集成化设计核心原则

要达成高压线束的优异性能,需严格遵从三大核心设计原则。空间布局的优化属于集成化设计的首要条件,得在极为有限且充斥着机械运动部件、高温热源以及敏感电子设备的整车底盘和引擎舱空间当中,借助精准的三维建模与动态仿真手段,科学地去规划线束的走向以及固定点位,尽最大可能避开潜在的机械挤压磨损、震动疲劳断裂

以及和散热系统气流组织之间的冲突干扰情况。轻量化与材料选型直接关系到整车能耗以及续航里程,设计人员要全面评估像高铝铝合金这类导体材料替代传统铜导线时所涉及的导电损失、机械强度以及成本效益的平衡点,并且积极探索特种工程塑料在绝缘层与护套薄壁化应用方面所存在的技术极限,在保障安全冗余的前提下达成细致到克的重量削减效果^[1]。模块化接口设计是提高装配效率、维护便利性以及系统可扩展性的关键举措,借助定义标准化的高压连接器接口规范,涵盖物理锁紧机构、端子定义以及密封要求等内容,达成不同子系统之间类似即插即用式的高效集成效果,大幅降低产线装配的复杂程度以及售后维护的成本支出。

2 高压线束集成化设计实施路径

2.1 三维布局与走线规划

借助计算机辅助设计工具来细致开展三维布局以及走线规划工作,这可是规避物理冲突的根本所在。在整个设计进程当中,务必要运用数字化样机技术展开全工况动态干涉方面的检查,尤其要着重去规避和转向机构、悬架运动包络、高温排气管路还有液冷管道之间可能出现的空间干涉风险。就热管理冲突的缓解来讲,高压线束得主动绕开像散热器高温出风区域、电机控制器散热翅片这类的主要热源,倘若有必要的话,可以采用隔热套管或者对线束自身的散热路径布置加以优化。一味地追求最短路径以及低电感布线,既能减少线缆的使用量,又能降低电压降损耗,并且还能够极为有效地降低由于长回路而引入的寄生电感,要知道这种电感在功率器件进行高频开关操作的时候,特别容易引发过电压尖峰,进而对功率半导体器件的安全构成威胁。所以,优先选用绞线对设计并且尽可能地将回路面积最小化,这是抑制感性耦合噪声最为基础的手段。

2.2 连接器与接插件集成设计

高压互锁集成方案在确保高压系统操作安全方面起着极为关键的作用,它是核心的保障措施。此方案规定要在所有的高压连接器内部集成 HVIL 低压信号回路^[2]。要是连接器出现意外断开的情况或者没有完全锁紧,系统能够马上检测到,并且会主动切断高压电源的输出,从源头上彻底杜绝带电插拔的风险。连接器得具备极为出色的防水防尘等级,主流的设计一般都要求能够达到 IP67 的防护级别。在像电池包出口、电机控制器接口这样的关键区域,甚至需要满足更为严格的 IP6K9K 等级,以此来保证在高压水枪冲洗、深水浸泡以及极端沙尘环境之下,电气接触能够长期稳定可靠地维持。连接器集成设计还应当综合考量盲插导向、防错结构、二次锁止以及适应高振动工况的抗振性能等方面的情况。

2.3 线束轻量化技术

铝导线取代铜导线的可行性已然成为行业轻量化方面的关注焦点。参照中国汽车技术研究中心有限公司于 2024 年所出具的研究报告来看,高规格经过退火处理的

铝合金导体,在具备和传统铜导体同等载流能力的情况下,其重量能够减少高达 40% 之多。虽说它的电导率仅仅约为铜的 61%,然而凭借增大截面积这一方式,还是可以在处于可接受范围内的电压降情况之下达成颇为显著的减重成效。预计到 2025 年的时候,国内部分高端电动车型的高压母线当中,铝导线的渗透率将会突破 30%。绝缘材料呈现出薄壁化的趋势,这主要是得益于像交联聚烯烃、薄壁聚酰胺这类特种高分子材料性能的不断突破。在保持和传统设计同等的耐压等级以及阻燃性能的前提下,绝缘层的厚度得以持续不断地降低,就好比部分先进的设计已经实现了壁厚仅为 0.6mm 的薄壁绝缘层,并且能够满足 3000VDC 的耐压要求,相较于传统的设计而言,其减薄的程度达到了 25% 左右。

3 电磁兼容优化关键技术

3.1 高压线束 EMI 干扰机理

要想切实有效地去抑制电磁干扰,那么先得把高压线束电磁干扰的内在机理给彻底弄清楚才行。像 IGBT、SiCMOSFET 这类功率半导体器件,它们进行高速开关操作的时候,就会成为主要的差模噪声来源。在这个过程中,会在直流母线上形成特别高的 dv/dt 以及 di/dt ,然后借助线束,以传导和辐射这两种方式,对周边的低压设备造成干扰。至于共模噪声,它主要是由于开关器件和散热器之间存在寄生电容耦合而形成的^[3]。其产生的电流会沿着由线束屏蔽层以及车身地所构成的回路流动,如此一来,其辐射所带来的危害影响范围就更为广阔了。高频噪声会通过容性耦合以及感性耦合这两种路径,侵入到邻近的低压信号线或者通信总线当中,进而致使传感器信号出现失真的情况,还会让 CAN 通信产生错误,甚至使得控制器的功能都陷入到紊乱的状态。简单来讲,高压线束一方面自身会受到干扰的影响,另一方面又充当着重要的发射天线的角色。

3.2 EMC 主动抑制策略

多层屏蔽结构设计属于抑制辐射以及串扰的关键防线,其中最优方案往往会选用内层致密且有高覆盖率的铜或者镀锡铜丝编织层来给予主要的低频磁屏蔽效能,而外层则会覆盖铝塑复合薄膜层以此来反射高频电磁干扰,如此一来便能实现宽频带屏蔽效能的提升,其有效屏蔽效能能够达到 60dB 以上。在噪声源头附近就近加装磁环以及共模扼流圈是最为直接的滤波方式,其布局方面的优化显得极为重要,磁环需要紧挨着干扰源,比如电机控制器输出端进行安装,凭借高磁导率铁氧体来吸收共模噪声能量,共模扼流圈则要依据干扰频谱特性精准设计其阻抗频率曲线,并且安装在容易受到干扰的设备之前,像是 DC-DC 变换器、车载充电机的输入端前,以此来滤除线缆上感应到的共模电流。

3.3 接地策略与滤波技术

接地策略的选择对于系统的 EMC 性能有着极为重要的影响。就单点接地而言,它比较适合应用于低频模拟电

路当中,如此一来便能够有效地避免地环路干扰情况的出现。与之不同的是,多点接地这种方式则更有利于高频数字电路或者大功率单元达成低阻抗接地的效果,进而将地电位浮动的程度尽可能地降到最低限度。在高压电控系统里面,通常会采用混合接地策略。比如说,功率地往往会采用多点低阻抗的方式连接到电池包壳体或者是车身地,而敏感信号地则是先通过单点进行汇集,然后再连接至主接地点。在高压滤波电容集成方案方面,把 X/Y 安规电容以及直流支撑电容组合起来集成在电机控制器直流母线输入端,这可是抑制传导 EMI 的一种标准做法。其中, X 电容是跨接在正负母线之间的,其主要作用是滤除差模干扰; Y 电容则是连接在母线与接地壳体之间的,它的主要功能是滤除共模干扰。而且,这些电容的容量以及耐压值都得依据具体的工况来严格地进行选型操作。

4 集成化与 EMC 协同验证方法

4.1 仿真分析阶段

在虚拟验证这个阶段,电磁场仿真技术充当着预测以及优化方面的先驱角色。那种基于有限元分析 FEA 或者时域有限差分法 FDTD 所构建起来的仿真工具,是能够精准地去模拟高压线束处在真实且复杂的电磁环境当中开展工作之时所产生的近场还有远场辐射特性,并且还能够预测它和车载天线、传感器这类敏感设备之间存在的潜在耦合干扰,进而对屏蔽层的设计以及滤波器参数的优化给予相应的指导。并且更为关键的一点在于要开展热力学多物理场耦合验证相关的工作,也就是要去分析在大电流工况的情况之下,线束由于焦耳热而引发的温升情况,以及这种温升对于绝缘材料的老化状况、导体电阻变化等方面所产生的影响。与此还要去考察在温升和机械振动应力相互作用的情形之下,连接器接触电阻的稳定性状况以及材料的疲劳寿命情况,从而达成将设计缺陷尽早地暴露出来并加以闭环修正的目的。

4.2 实验测试标准

物理样机得经受住国际以及行业标准极为严格的测试。EMC 测试项目的各项要求严格按照 CISPR25 以及 ISO11452 系列标准来执行,其涵盖了传导发射 CE、辐射发射 RE、传导抗扰度 CS、辐射抗扰度 RS 等一系列核心项目,以此保证线束系统自身产生的干扰发射不会超出限定的数值,并且在外部存在较强干扰的情况下依然能够维持功能的正常运转^[4]。电气安全测试方面,则是依照 ISO6469 的要求,针对绝缘电阻、耐压强度、爬电距离还有电气间隙等逐一进行验证,在这些测试当中,耐压测试一般需要承受的工作电压的数倍之多的电压,比如要能够承受 2500VAC 并且持续 1 分钟时间而没有出现击穿闪络的情况,从而给乘员的安全给予稳固的保障。

4.3 可靠性验证

长期服役的可靠性是需要依靠加速环境应力试验来

加以评估的。其中,振动疲劳测试会模拟实际道路载荷谱,参照企业标准或者通用规范比如 SAEJ2380,在三个正交轴向施加特定频率以及加速度的随机振动,以此来考察线束固定点、弯折处以及连接器端子经过长时间振动之后出现的机械损伤状况,还有电气连接方面所发生的劣化情况。而高低温循环耐受性测试,则是把样品放置于像-40°C至+125°C这样的极端温变环境中,进行多达数百次的快速循环操作,借此评估绝缘材料出现的脆化龟裂情况、密封件弹性失效的情况、端子镀层微动磨损的情形以及接触电阻发生漂移等各类失效模式,从而保证系统能够在寒区以及热带气候条件下具备良好的适应性。

5 结束语

新能源汽车高压线束的集成化设计以及电磁兼容优化属于一项复杂的系统工程,其中涉及电、磁、热、力、材料等诸多学科相互间深度的交叉融合。本文全面且细致地构建起了一套完整的技术体系,该体系包含了设计相关的基础理论、核心技术所遵循的路径以及协同验证的具体方法等内容。相关研究明确指出,只有在空间布局方面加以优化、在轻量化材料上予以应用、在模块化接口设计上做出改进等集成化各个维度,和多层屏蔽技术、主动滤波策略、科学接地方法等 EMC 维度相互间达成深度的协同配合,并且从全局层面去探寻最优方案,才有可能在高功率密度、轻量化、具备强大的抗干扰能力以及有着超高的可靠性等这些乍一看似乎相互矛盾的目标当中找到最为理想的平衡点。鉴于 SiC/GaN 等第三代半导体器件逐渐普及之后所带来的更高开关频率方面的挑战,还有 800V 高压平台针对绝缘系统提出了更为严格的要求,未来的相关研究需要进一步去深入探索新型的纳米复合屏蔽材料、智能主动噪声抵消技术以及基于数字孪生理念构建的全生命周期预测性维护模型等方面的内容,持续不断地推进高压线束在集成创新以及电磁兼容基础研究领域的发展进程,这对于稳固我国新能源汽车产业在技术方面所处的领先地位以及其在市场中占据的核心竞争力而言,无疑有着不容忽视的战略价值。

[参考文献]

- [1]时培成,单子贤,朱海龙,等.新能源汽车动力电池系统集成化设计技术综述[J].中国机械工程,2025(1):07-08.
 - [2]赵文毓.考虑新能源汽车引入的汽车制造商产品线策略研究[D].上海:上海大学,2024.
 - [3]方舟.考虑网络效应的 JL 新能源汽车产品线设计优化研究[D].山东:山东大学,2024.
 - [4]李昊.考虑质量与成本交互效应的 SLS 新能源汽车产品线一体化设计优化研究[D].山东:山东大学,2024.
- 作者简介:祁恒(1986.4—),男,学历:本科,毕业院校:太原科技大学,所学专业:工业工程,目前职称:自动控制。