

新能源汽车高压线束电磁兼容优化设计

陆佳旺

湖南华菱线缆股份有限公司 特种线缆制备湖南省重点实验室 湖南 湘潭 411101

【摘要】：随着新能源汽车技术的快速发展，新能源汽车高压线束的电磁兼容优化设计涉及到从源头控制干扰、加强抗干扰能力、合理布局和优化电气系统设计等方面。通过合理选材、接地、屏蔽和滤波等技术措施，可以有效减少电磁干扰、提高系统的稳定性与安全性。设计时要充分考虑热管理与电弧、电涌防护等因素，确保高压线束在复杂的电气环境中能够正常工作。最终优化设计不仅能够提高系统性能，还能确保满足行业法规要求并通过电磁兼容性认证。本文结合新能源汽车高压线束电磁兼容优化设计进行分析，以供参考。

【关键词】：新能源汽车；高压线束；电磁兼容；优化设计

DOI:10.12417/2811-0722.25.09.007

1 新能源汽车高压线束电磁兼容优化设计原则

1.1 降低电磁干扰

采用金属屏蔽材料或编织屏蔽层对高压线束进行电磁屏蔽，有效减少外部电磁波的干扰以及内部电磁波对周围电气设备的辐射。合理规划线束的布局，使得高压电缆与低压信号线分开，避免直接接触，以降低互相干扰的风险。对传输电流的高压线缆使用扭绞线或对绞线，以减少电流引起的辐射和电磁噪声。

1.2 良好的接地设计

高压线束在车辆结构上有良好的接地设计，避免由于地面电位不一致而引起的电磁干扰。为防止高频噪声回路干扰其他电气设备，应使用低阻抗的接地路径，特别是在高压电气系统和低压系统之间要有有效的隔离。选用高电磁屏蔽效能的材料，如铝箔、铜箔等，对高压电缆进行包覆，从源头减少辐射。优化高压系统中电流的波形与频率，避免高频信号的产生，通过滤波器等方法抑制高频噪声。

1.3 增强抗干扰能力

针对可能的干扰源（如电机、逆变器、充电桩等），通过滤波、隔离、屏蔽等技术增强线束的抗干扰能力。将高压线束分段，采用独立的接地或屏蔽设计，减少一个部分的电磁干扰对其他部分的影响。高压线束传输过程中可能伴随较高的热量，因此需要考虑热管理问题，避免因过热导致线束损坏或影响电磁兼容性。设计时要确保线束有良好的散热路径，并尽量避免线束与高温区域直接接触。通过使用温度传感器和热管理系统，监控高压线束的温度，确保其在安全工作温度范围内运行，避免因过热影响电磁兼容性。

1.4 防止电弧与电涌

高压线束在连接和断开时可能会产生电弧，需要采取电弧抑制措施，如使用电弧抑制器件或优化连接方式，防止电弧对电磁兼容性的影响。通过在高压线束中安装电涌保护器件（如气体放电管、金属氧化物压敏电阻等），有效吸收电涌，防止

电涌对其他电气设备和系统的干扰。设计过程中要考虑到新能源汽车所需的电磁兼容性认证，确保设计能够通过必要的认证测试，如车辆的 EMC 测试和认证。

2 新能源汽车高压线束电磁兼容优化设计的关键技术

2.1 电磁屏蔽设计

为了降低电磁波的辐射和外部干扰，采用高效的屏蔽材料至关重要。常用的屏蔽材料包括金属箔、导电塑料和编织金属网等，材料能够有效地阻止电磁波穿透，减少辐射干扰。屏蔽层必须确保完整且无缝隙，避免屏蔽效果受到破坏。如果屏蔽层出现接缝或孔隙，电磁波将通过这些薄弱区域泄漏或进入，从而影响设备的抗干扰性能。屏蔽层必须有效接地，以便将电磁波引导到地面，避免在设备内部形成干扰信号。接地不良会降低屏蔽效能，增加设备的辐射和干扰。对于高压线束的屏蔽设计，应该确保屏蔽层完全覆盖电缆的导体，并且屏蔽层能够与电缆外壳、接头等部分有效连接，形成电磁屏蔽的“闭环”。特别是在线束的连接点处，必须注意密封和连接技术，避免屏蔽层的断开。对于大多数电缆，采用全覆盖式屏蔽结构，确保每个部分都被完全包裹。在某些特殊应用中，可能会采用分段式设计，根据需要对电缆的不同部分进行定向屏蔽。这种方法能够提供针对性的电磁干扰保护。

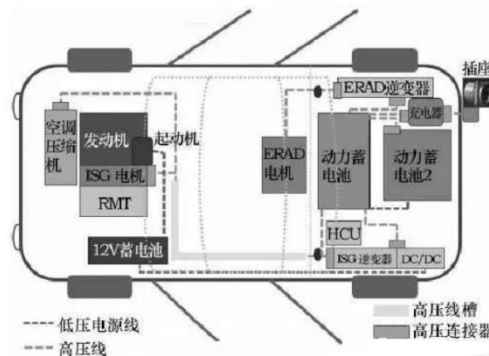


图1 新能源汽车高压线束设计体系

2.2 电缆布局与导线设计

2.2.1 避免与敏感信号线并行布置

高压线束应避免与低压信号线并行布置。低压信号线通常对电磁干扰非常敏感，若与高压线束平行布置，可能会通过电磁耦合或感应效应将干扰引入信号线中，导致信号失真、错误操作等问题。为了降低这种干扰，应尽量使高压线束与低压线束保持一定的距离。并且，高压线束的布置应该尽量避开与低压线接触的情况，避免直接接触，以减少互相干扰的风险。高压线束的长度直接影响电磁辐射的强度。

表 1 细化优化设计措施

优化设计方面	具体措施
线束结构优化	合理设计线束布局，减少线束间电势差；采用合适绝缘材料和隔离措施，防止电气接触。
接地设计优化	采用大面积接地，减少接地电阻；通过电势均衡技术，如在线束中添加均衡电路或使用均衡电缆。
电磁屏蔽	在高压线束周围添加金属屏蔽罩或导电涂层等电磁屏蔽材料；选择铁、钢、铜、铝等具有良好导电性和电磁屏蔽性能的材料。
滤波器设计	根据高压线束工作频率范围和电磁辐射频谱特性，选择低通、带通或带阻滤波器等合适类型和参数的滤波器，并在合适位置布置。
布线方式	高压线束与低压线束分层设计，距离保持在 200-300mm；避免高压线束与低压线束交叉、绕圈；大电流线束单独布置，与易干扰部件及其线束距离不小于 10cm；大电流回路的电源正极线和负极线并行布置，靠近车身金属板。
固定方式	合理分布线束载荷，增加支撑固定装置，直线布置固定点间距 $\leq 300\text{mm}$ ，过弯布置固定点分别在弧线两端，固定点与连接器间距 $\leq 150\text{mm}$ ；采用汽车级扎带和绝缘支架等固定装置。

2.2.2 减少电缆的弯曲

高压线束在布置过程中，应尽量减少电缆的弯曲角度。弯曲角度过大时，电流的流动会受到影响，增加电磁辐射的可能性。此外，过度弯曲还可能引起电缆内的电气性能下降（如线对之间的阻抗不稳定），进而影响电磁兼容性。如果必须弯曲，应采用平缓的弯曲方式，避免急剧的折叠或转角，以减少电流波动和电磁干扰。高压线缆采用对绞或扭绞的方式，是减少电磁干扰的有效手段之一。在对绞结构中，两个导体互相扭转，这样可以有效地抵消由电流波动引起的电磁场。特别是在高频信号传输中，这种方式能够减少电磁波的辐射。对绞线可以大幅度减小电缆周围的电磁场，从而降低电磁辐射对周围环境的影响。通过将电流的变化分布在两个导体之间，可以大大减少感应干扰。

2.2.3 使用合适的线缆护套和屏蔽

在高压线缆的布局中，选择合适的护套材料也能有效降低电磁辐射。使用导电护套覆盖电缆，可以提供额外的屏蔽效果，减少高频噪声的辐射。护套的设计应确保无缝隙、连续性强，能够有效屏蔽电缆中的高频干扰，防止它们对外部环境和其他

电气系统产生影响。高压线束的走向规划应避免交叉和重叠，尤其是避免高压线束和低压线束的交错。交错会导致电磁干扰的耦合，增加互相干扰的风险。在必要的交叉情况下，尽量保证交叉的角度接近 90 度，减少干扰耦合的可能性。为了进一步增强电磁兼容性，应在高压线缆上采用屏蔽层，并确保屏蔽层有效接地。良好的接地可以将电磁波引导到地面，从而减少对系统的影响。屏蔽材料和接地设计的质量直接影响电磁兼容性效果，因此，必须确保接地系统的低阻抗和屏蔽层的完整性。

2.3 接地与隔离设计

2.3.1 接地设计

所有电气系统中的部件，尤其是高压线束和低压电气系统，应确保通过接地连接到共同的地面。这能有效地避免电磁干扰源的形成，确保电气系统的安全性和稳定性。接地电阻应该尽量低，以确保有效的电磁波引流。高接地电阻可能会导致电气系统中出现不稳定的电流路径，从而影响电磁兼容性，甚至危及设备安全。对于高压电气系统和低压控制系统，应设计独立的接地路径。这样做有助于避免高压系统中的电流或噪声通过接地线传播到低压控制系统中，防止低压系统受到高压系统的电磁干扰。

2.3.2 隔离设计

隔离设计的目的是防止高压系统产生的电磁干扰影响到低压控制系统的信号传输。有效的隔离技术可以确保两个系统的电磁波不会相互耦合，避免互相干扰。变压器在电气系统中是常见的隔离装置，尤其是在交流电系统中。通过变压器的电磁感应原理，可以将高压信号和低压信号完全隔离，防止电磁干扰通过电缆传输。变压器还可以提供电压转换功能，使得高压系统和低压系统能够在不同的电压级别上正常工作，而不产生电气接触。光耦合器利用光信号隔离电气信号的器件。它能够在不直接接触的情况下传输电信号，同时避免电磁干扰的传递。光耦合器通常用于低压控制信号的隔离，能够防止高压线束的电磁波对控制系统造成影响。光耦合器尤其适用于需要高频信号传输的场合，因为它能够在高频条件下保持较好的隔离性能。除了变压器和光耦合器外，还有一些其他类型的隔离器件，如磁性分离器、共模扼流圈等。这些器件可以用于进一步增强系统中的电磁隔离性能，特别是在需要更高电压或更复杂电气系统的应用场合。隔离器件的选择应该根据系统的工作频率、信号类型、噪声水平以及系统的电气特性来决定，以确保最佳的隔离效果。

2.3.3 隔离与接地的协同设计

接地设计和隔离设计必须密切配合，才能实现理想的电磁兼容性。在高压系统和低压系统的接地设计时，既要保证接地电阻低，又要确保接地系统的独立性，以避免电气干扰的传播。同时，隔离装置应针对高压系统产生的电磁波进行有效的隔

离,保护低压控制系统免受干扰。高压电气系统的屏蔽设计也应与接地设计协同工作,确保屏蔽层和接地系统形成闭环,有效地引导电磁干扰进入地面,从而避免对其他敏感设备产生影响。接地设计时要避免形成接地环路,因为环路会导致电流在接地系统中循环,从而增强电磁干扰,影响设备的稳定运行。接地电缆的布局应尽量短且直,以降低接地电阻和避免增加干扰源。高压与低压系统之间的电气隔离非常重要,隔离措施不当可能导致信号污染和系统故障。

2.4 滤波与噪声抑制技术

高压线束中,电磁干扰是常见的问题,特别是高频噪声。这些噪声不仅会影响信号的传输质量,还可能影响其他电气系统的正常工作。为了解决这个问题,通常采用滤波器和电磁吸收材料:滤波器通过在系统的关键位置安装合适的滤波器,可以有效抑制高频噪声的传播。滤波器能够吸收和滤除干扰信号,确保信号的稳定传输。例如铁氧体磁环,能够有效地吸收电磁波并减少其传播。通过将材料包裹在电缆上或在线束的关键部分使用,能有效降低电磁辐射,避免噪声对设备和其他系统的干扰。

2.5 电弧与电涌保护设计

高压系统中电弧和电涌是另一种常见的电磁干扰源。电弧通常发生在开关操作、连接和断开时,会引起局部高温,进而产生电磁干扰。电涌则是由瞬间的电压波动引起的,可能导致系统不稳定甚至损坏。为减少这些干扰,使用适当的电弧抑制器件,能够有效抑制电弧产生的高频噪声。电涌保护装置如气体放电管和金属氧化物压敏电阻能有效吸收和消耗过高的电压脉冲,防止电压波动对系统造成损害。它们能够通过限制瞬时电压升高,避免系统中其他组件受到损害,同时减少电磁干扰的产生。

2.6 高温环境下的电磁兼容性设计

新能源汽车的高压系统通常需要在高温环境下工作,因此高压线束设计需要特别关注材料的耐高温性能。高压线束的绝缘材料需要具备良好的热稳定性和电磁兼容性。对于高温环境,选择具有较高耐热温度的材料非常关键,避免在高温条件下发生绝缘失效或电磁屏蔽效果下降。例如,采用高性能的聚四氟乙烯、硅橡胶等材料,材料具有良好的耐温性和电气性能。高温条件下,材料的电磁屏蔽效果可能下降,影响系统的电磁

兼容性。因此,设计时应确保所选材料在高温环境下仍能维持较好的电磁屏蔽性能,不会引起电磁干扰。高压系统中由于能量转换、开关操作等原因,会产生大量热量,因此热管理设计十分重要。必须采用散热系统(如散热片、热管等)来确保高压线束及其周围环境保持在安全的温度范围。良好的热管理能够避免因过热导致的电磁干扰问题,确保系统的稳定运行。

2.7 电磁兼容性标准与测试

新能源汽车的高压线束在设计和制造过程中需要符合相关的电磁兼容性标准,以保证系统的正常运行并减少对其他设备的干扰。测量系统在工作时的辐射干扰,确保其辐射水平不超过规定的限值。测试电气系统的传导干扰,评估通过电源线或信号线传播的电磁干扰。评估系统对静电放电的抗扰能力,确保外部静电干扰不会影响设备的正常运行。检查系统在电磁干扰(如雷击、开关操作等)条件下的稳定性。通过标准测试,可以确保高压线束符合电磁兼容性要求,并能够有效抵抗外部电磁干扰。

2.8 智能化与监测技术

随着技术的进步,越来越多的智能化技术被应用于高压线束的设计中,以提高其电磁兼容性和系统的稳定性。在高压线束设计中集成电磁监测系统,可以实时监控线束周围的电磁环境。通过传感器监测电磁场的变化,系统能够及时发现潜在的电磁干扰源。这种技术可以动态调整和优化电气系统的运行参数,以减少干扰。智能化诊断系统能够实时检测电气系统的电磁兼容性状况,帮助工程师发现电磁兼容性问题并进行快速调整。这些系统可以通过算法分析电气系统的运行数据,优化电磁屏蔽或隔离策略,提高抗干扰能力。通过对电磁环境进行实时分析和动态调整,智能化系统能够有效提高高压线束及其周围环境的电磁兼容性。这不仅减少了干扰的可能性,还可以提高整体系统的稳定性和可靠性。

3 结论

新能源汽车高压线束的电磁兼容优化设计是多层次的复杂任务,涵盖了从电磁屏蔽、接地设计、滤波噪声抑制,到高温环境控制、电涌保护等多个关键技术领域。通过综合运用上述关键技术,可以有效地降低电磁干扰,提升高压线束在新能源汽车中的电磁兼容性,确保系统的安全稳定运行。同时,符合相关标准和进行严格测试也是确保设计成功的关键。

参考文献:

- [1] 混纺荧光指示线的编织布保护线束设计. 方宁;郭建栋.机械工程师,2024(12).
- [2] 自定位卡扣的一体式发泡橡胶保护线束设计. 方宁;郭剑峰.机械工程师,2025(01).
- [3] 一种线束开发车型配置分析方法. 阴志勇;段雅媛;蒋志群;姚能志;潘零冬;王强伟.汽车电器,2025(01).
- [4] 汽车低压线束布置浅析. 王小云;傅翔;曹尚贵.汽车电器,2025(02).