

工程机械电气线束布置优化与抗干扰研究

韦艳红

柳工元象科技有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i3.14372

[摘要] 随着工程机械向智能化、高集成度方向发展,电气系统在整机中的作用愈发重要。电气线束作为连接整车各电子控制单元和传感器的纽带,其布置合理性与抗电磁干扰性能直接影响整机的安全性与可靠性。本文围绕工程机械电气线束布置优化展开研究,结合实际应用中的问题,分析线束布局存在的干扰源、传输路径与耦合方式,提出合理的布线规范与抗干扰措施。通过建模仿真与实车测试,验证了优化布置与屏蔽设计在提升系统稳定性方面的有效性,为工程机械线束系统的可靠设计提供参考。

[关键词] 工程机械; 电气线束; 布置优化; 电磁干扰(EMI); 抗干扰设计

中图分类号: TE984 **文献标识码:** A

Optimization and Anti-interference Research on Electrical Wiring Harness Layout of Construction Machinery

Yanhong Wei

Liugong Yuanxiang Technology Co., Ltd

[Abstract] With the development of engineering machinery towards intelligence and high integration, the role of electrical systems in the entire machine is becoming increasingly important. The electrical wiring harness, as a link connecting various electronic control units and sensors of the vehicle, has a direct impact on the safety and reliability of the entire machine due to its reasonable layout and anti electromagnetic interference performance. This article focuses on the optimization of electrical wiring harness layout in construction machinery. Combining with practical application problems, it analyzes the interference sources, transmission paths, and coupling methods in wiring harness layout, and proposes reasonable wiring specifications and anti-interference measures. Through modeling simulation and real vehicle testing, the effectiveness of optimized layout and shielding design in improving system stability has been verified, providing reference for the reliable design of engineering machinery wiring harness systems.

[Key words] Engineering machinery; Electrical wiring harness; Layout optimization; Electromagnetic interference (EMI); Anti interference design.

引言

电气线束作为工程机械电气系统中的核心传输介质,其功能不仅是传输电力与信号,更承担着系统稳定运行的重要保障。随着整车控制单元数量的增加,以及智能化模块的广泛应用,电气线束数量激增、结构复杂,导致布置空间紧张,易引起信号干扰、功率损耗与系统失效。传统线束设计主要依靠经验进行布线,缺乏系统化的仿真与验证手段,尤其在电磁干扰(EMI)日益严重的背景下,现有设计模式难以满足高可靠性要求。因此,开展线束布置优化与抗干扰研究,对提升工程机械电气系统的性能具有重要意义。

1 工程机械线束布置现状与问题分析

1.1 电气线束结构特点

工程机械电气线束主要由动力线、控制线和信号线组成,分布于驾驶室、发动机舱、电池仓、底盘及工作装置等部位。受整车结构复杂、功能模块多样等因素影响,线束数量庞大、路径较长,布设过程中常伴随多分支、多连接器的结构特征。同时,工程机械常工作于高温、高湿、高振动、极寒低温等恶劣环境,线束长期面临机械磨损和环境侵蚀,可靠性挑战显著增加。此外,受空间局限影响,布线过程易出现交叉、缠绕甚至急弯,不仅影响维护,也增加了故障率。尤其在未进行充分电磁兼容设计的情况下,高压动力线与弱信号线共槽铺设较为常见,易引发电磁干扰。

1.2 干扰源与传输路径

工程机械电气系统中的主要干扰源包括电机、继电器、电

磁阀、CAN总线以及无线通信模块等,这些部件在运行过程中产生的高频信号或瞬态电压易干扰周边线路。干扰信号可通过四种路径传播:一是传导干扰,主要沿供电线、接地线或信号线传播,影响敏感电路;二是辐射干扰,通过空气介质以电磁波形式耦合至邻近线束,干扰范围广泛;三是地电位反弹,在接地不规范、形成接地环路时,不同系统之间可能因电位差异而导致信号异常甚至器件损坏;四是共阻抗干扰,它通过公共阻抗(如电源线、地线等)将一个电路的电流变化传递到另一个电路,从而导致信号失真、噪声增加甚至设备故障。这些干扰路径复杂,若设计阶段未进行充分隔离与屏蔽,将严重影响系统稳定性^[1]。

1.3 常见问题

由于线束设计与布置不合理,工程机械在运行中易出现多种电气系统故障。最常见的问题包括ECU通信异常,特别是在CAN/LIN总线中出现数据丢包和传输延迟,进而导致控制逻辑失效;控制信号在传输过程中被干扰放大或失真,引发电磁阀、继电器等执行器误动作,降低操作安全性;系统整体抗干扰能力不足,常导致整机运行状态不稳定、故障频发,增加维修成本;此外,线束在高振动、过载和高温等环境下易发生疲劳损伤,出现绝缘老化、导体断裂等问题,进一步加剧电气故障的发生频率。

2 电气线束布置优化设计

2.1 布置原则

为了提高工程机械电气系统的运行稳定性和电磁兼容性能,电气线束的布置设计应遵循一系列科学合理的原则,以应对复杂环境下的高干扰、高强度使用场景。

首先,需坚持功能分区原则,即在结构布局上将高功率电源线(如电机供电)、控制信号线(如传感器输入)、通信总线(如CAN、LIN)进行物理隔离布置,避免因电磁场耦合引起的信号干扰或控制误动作。各类线束之间应保持最小隔离距离,特殊区域建议通过物理屏障或屏蔽措施进一步加强隔离效果。

其次,布线设计应遵循路径最短原则。在满足装配与维护条件的前提下,尽量选择最短且最直接的路径,以降低线路电阻、减少电压损耗,同时避免多次弯折带来的机械疲劳,提高线束寿命。此外,简化路径也有助于降低布线过程中的误接概率和后期维护的工作强度^[2]。

第三,必须明确避开干扰源原则。工程机械中如发动机控制单元、液压泵电机、逆变器、高压电容组等属于强干扰源区域,其周围存在高幅度电磁辐射和电流波动,弱信号线和通信总线应尽量远离这些区域布置,必要时采用金属波纹管或复合材料屏蔽套管进行封装隔离。对于必须近距离并行布置的情况,应通过交叉走线、45°角敷设等方法降低耦合系数,减小干扰传导路径。

最后,应严格遵循接地集中原则。不合理的多点接地容易在系统中形成回路路径,产生地电位差和环路电流,引发控制信号漂移甚至器件损坏。因此,低频电路中,推荐采用单点接地或星形接地结构,各子系统通过独立低阻抗地线接入同一接地母线,确保各部分地电位一致。针对敏感信号模块,如传感器与ECU之

间的地线,应避免与动力回路共享接地点,以降低耦合干扰的可能性。

2.2 空间利用与路径规划

在现代工程机械日益向智能化、小型化、高集成化发展的趋势下,线束系统面临布局空间紧张、部件集中度高的挑战。因此,电气线束的空间利用和路径规划不仅要考虑电气性能,还需兼顾结构合理性、可装配性与后期可维护性。

首先,应充分利用三维建模与布线仿真工具,如CAD三维设计平台结合Zuken E3、CATIA Harness等专业软件,对线束路径进行可视化建模、虚拟铺设与多方案对比。借助仿真分析可识别潜在干涉区域、高应力点和布线死角,从而在设计初期进行调整,避免返工。

在线束层级布置策略上,建议采用分层布线架构以提升布线的系统性和抗干扰性。具体而言:

第一层布置高压主电源线,如启动电源、电机供电线路,应布置于结构最下层或靠近车架主梁的槽道中,便于物理隔离和热量释放;

第二层布置控制信号线与通信总线,要求布线路径尽量短、远离高频设备,并使用定向支架与卡扣固定,防止振动松动;

第三层布置低压辅助线路和传感器输入输出线,可利用剩余空间灵活布置,但需确保其机械防护等级和环境密封性^[3]。

此外,在路径规划过程中,应特别注意结构部件的配合关系,如转动关节、伸缩臂、液压缸缸活动区等应预留合理的线束伸缩冗余,避免在机械运动过程中发生拉断、磨损或扭结。同时,通过设置标准化的线束夹具、波纹管保护、走线支架等配套结构,不仅提高整洁度和系统性,还显著增强抗震性与维护便利性。

综上所述,科学合理的布置原则结合智能路径规划工具,不仅能有效提升电气系统的电磁兼容性和抗干扰能力,也为整机可靠性和可维护性提供了有力保障,是现代工程机械电气设计不可或缺的核心环节。

3 抗干扰技术研究

3.1 屏蔽技术

屏蔽是抑制电磁干扰的基础性技术措施之一,主要针对高频信号线、CAN/LIN总线及关键控制信号线。在设计中,应对易受干扰的线束采用铝箔包裹或编织屏蔽层结构,有效阻断电磁辐射的耦合传播。为保证屏蔽效果,需确保屏蔽层单端接地,以防止形成环流,同时避免干扰信号通过地线回路传导。此外,对于高干扰区域或通信接口,推荐采用金属外壳的屏蔽连接器,其与屏蔽层形成连续的电磁屏障,进一步增强抗干扰性能。屏蔽技术的选型与实施必须与布线路径和干扰源分析相结合,做到分级分类防护,提高系统整体的电磁兼容性。

3.2 滤波与隔离

为削弱高频噪声及传导干扰的影响,在关键线束的输入端应配置电磁干扰(EMI)滤波器和共模电感器,用于吸收或反向阻断高频杂波,特别是在供电线路和CAN总线中,能显著降低干扰

传入概率。在控制系统中,针对信号传输链路还应引入光电隔离器件,使控制信号通过光电耦合传递,实现完全的电气隔离,有效阻止高电压突波的反向传导。在电源线束及高频数据线上还可以套上磁环,磁环会在线束周围形成磁场,对高频干扰信号进行衰减。同时,在电源分布上应用隔离型DC/DC电源模块,为不同功能子系统提供独立隔离电源,提升系统抗干扰能力和运行稳定性。滤波与隔离技术的协同配置是确保系统在复杂环境中稳定运行的关键手段^[4]。

3.3 接地系统优化

合理的接地系统设计对于消除地电位差干扰、避免接地回路至关重要。工程机械应构建统一接地系统(UGS),通过总线式星形接地结构,将各个子系统接地点集中引向同一电气中心,以实现电位均衡。严禁在不同功能模块间交叉接地,尤其是信号系统与动力系统间的共用接地会引起严重的地环流干扰问题。对于控制单元、传感器等高灵敏度设备,应在其附近设置独立的接地点,并通过低阻抗地线接入总地。接地布线应短、粗、直,并尽量远离高频干扰源区域,以确保地电位稳定,从源头减少干扰路径的形成。

3.4 分析仿真与试验验证

在抗干扰设计过程中,引入电磁兼容性(EMC)仿真和实验验证环节至关重要。设计阶段可采用CST、ANSYS HFSS等电磁仿真软件,对关键线束和部件进行场强分布、耦合路径、电流回路等方面的建模分析,提前预测潜在干扰风险。在整车验证阶段,需开展系统级EMC测试,如大电流注入法(BCI)模拟传导干扰响应,TEM/GTEM室辐射测试用于评估线束和ECU对电磁波的耐受能力。对在试验中表现异常的线束段或模块,应结合仿真结果进行定位分析,采取结构调整、屏蔽增强或滤波优化等整改措施,形成闭环设计流程,不断提升工程机械电气系统的抗干扰水平。

4 应用实例与效果分析

为验证本研究提出的电气线束布置优化与抗干扰设计方法的有效性,选取某中型液压挖掘机作为应用对象。该机型原线束系统结构复杂,控制模块分布分散,动力线与信号线混合布设,导致在作业过程中频繁出现CAN总线通信异常、执行器误动作等问题。故障诊断结果表明,其主要问题源于线束路径交叉、接地环路干扰及屏蔽措施不足。

在本研究框架指导下,对该挖掘机电气系统进行系统性整改。首先,按照功能分区原则重新规划线束路径,将动力线、通信线与控制信号线分层布设,减少交叉与共槽问题;其次,全面提升信号线束的屏蔽等级,关键通信线路采用双层屏蔽结构,并

通过金属壳体连接器形成连续屏蔽链;再次,重构接地网络,实施统一的星形接地结构,消除地电位差干扰源。

整改完成后,对整机进行EMC测试与实地作业验证。测试数据显示,系统通信误码率相较于整改前下降了80%,CAN总线的稳定性大幅提升。各项抗干扰指标均满足ISO 11452系列标准,包括传导抗扰度、辐射抗扰度和静电放电抗扰度等。长期现场运行结果表明,整车系统在高温、高湿、高电磁干扰环境下运行稳定性显著增强,基本消除了通信中断与误控制等现象,整机电气系统的可靠性和用户满意度均得到明显提升。

5 结论与展望

本文从工程机械电气系统的实际应用出发,系统分析了电气线束布置中存在的问题及其干扰机理,提出了基于功能分区、最短路径、避开干扰源与统一接地的线束布置优化策略,并结合屏蔽、滤波、隔离等抗干扰技术,构建了完整的工程机械电气抗干扰设计方案。通过实际案例验证,表明该方法不仅显著降低了通信错误率,提升了系统的抗干扰能力,还有效提高了整车运行的稳定性和可靠性。

展望未来,随着工程机械向智能化、高集成化发展,电气系统的复杂性将进一步增加。传统人工布线方式难以满足设计精度与效率要求。因此,未来研究可进一步引入人工智能辅助布线算法,结合遗传算法、强化学习等智能优化手段,实现自动化布线路径生成。同时,利用数字孪生平台构建整车线束虚拟模型,实现从设计、仿真、验证到优化的全流程闭环,推动线束系统设计向数字化、智能化、可预测方向发展,为下一代高可靠工程机械电气系统提供技术支撑。

【参考文献】

- [1]张人杰,王祯霖,耿慧,等.基于通道设计的电气导线互联系统线缆自动布局方法[J/OL].计算机辅助设计与图形学学报,1-15[2025-06-11].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2925.tp.20250206.1647.044.html>.
- [2]杨征朕,杨永富.新能源汽车线束的设计优化与可靠性分析[J].汽车知识,2025,25(06):101-103.
- [3]张小平,李健,杨小峰.预分支底盘电气CAN总线系统线束的设计和制造[J].光纤与电缆及其应用技术,2020,(03):21-24.
- [4]魏士勇.工程机械电气系统线束装配与布置原则分析[J].内燃机与配件,2019,(03):243-244.

作者简介:

韦艳红(1994--),女,壮族,广西柳州人,本科,研究方向:工程机械电器产品设计。