

[通信系统]

电气调试中电磁干扰检测与规避技术研究

文/张新龙

上海振华重工股份（集团）有限公司长兴分公司

针对自动化岸桥项目中通信系统面临的电磁干扰问题，提出一套系统的检测与规避方法。通过对干扰源的识别、传播路径的分析以及受体敏感度的评估，建立电磁兼容性评估模型。研究采用近场探测、传导发射测量等多种检测技术，对岸桥上的变频器、开关电源等关键设备进行了电磁干扰特性分析。

港口自动化的快速发展使自动化岸桥成为关键设备，其可靠性与作业效率直接影响港口运营效能。然而，岸桥上大功率变频器、开关电源等设备产生的电磁干扰，严重威胁通信系统的正常运行。特别是在长电路、动力电路与通信电路并行的复杂环境中，干扰问题更为突出。电磁干扰检测技术的研究和有效规避措施的制定，对提升自动化岸桥的整体稳定性能具有重要意义。研究通过系统分析与实验，探讨电磁干扰检测与规避的有效方法，旨在为自动化岸桥的电磁兼容性设计提供理论依据和实践指导。

自动化岸桥电磁干扰问题分析

1. 干扰源识别与特性

自动化岸桥系统中的主要电磁干扰源包括大功率变频器、开关电源和电机驱动器。变频器在开关过程中产生的高频谐波是最显著的干扰源，典型的6 kV变频器在10 kHz~1 MHz频段内产生的电磁干扰强度可达80~100 dB μ V^[1]。开关电源在50~100 kHz频率范围内产生的传导干扰峰值可达80 dB μ V。电机驱动器在启动和制动过程中会产生瞬态干扰，其幅值可达数千伏。干扰源的特性与其工作原理、电路拓扑和控制策略密切相关，准确识别和量化这些干扰源的特性是制定有效规避措施的基础。

2. 传播路径分析

电磁干扰在自动化岸桥系统中的传播主要通过导线耦合、辐射耦合和共模阻抗耦合三种方式，如图1所示。动力电缆和通信电缆并行敷设时，电容耦合和感应耦合成为主要的干扰传播途径。实测数据表明，当动力电缆与通信电缆间距小于80 mm时，耦合干扰强度增加15~20 dB。长电路耦合效应更加显著，当电缆长度从10 m增加到100 m时，通信电缆上的感应干扰电压增加约20 dB。共模阻抗耦合主要由不合理的接地系统引起，可导致30 MHz以下频段的传导干扰增加10 dB以上。

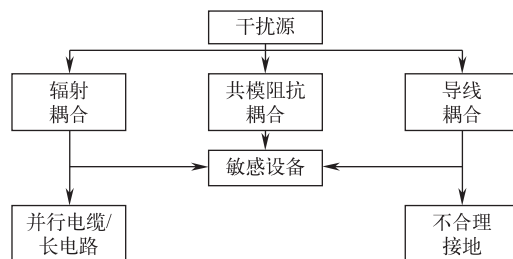


图1 电磁干扰传播路径图

3. 通信系统敏感度评估

自动化岸桥中的通信系统作为主要的干扰受体，其敏感度与通信协议和物理层特性密切相关。实验结果显示，Profibus-DP总线在1.5 Mbps波特

率下，对3 MHz以下的干扰信号最为敏感，抗干扰阈值约为1 V峰峰值。工业以太网在100Mbps速率下，对30 MHz左右的干扰信号敏感度最高，抗干扰阈值约为100 mV峰峰值。CAN总线系统对共模干扰较为敏感，1 Mbps速率下的共模抗扰度阈值约为2 kV。通过精确评估不同通信系统的敏感度特性，可针对性地设计滤波和屏蔽措施，提高系统的整体电磁兼容性水平。

4. 变频器与开关电源干扰特性分析

315 kW变频器产生的电磁干扰主要集中在开关频率（典型值为4 kHz）及其谐波上。在150 kHz~30 MHz频段内，传导干扰最高达95 dB μ V，辐射干扰在3 m测试距离下最高达55 dB μ V/m。干扰强度与负载电流呈正相关，负载从空载增加到满载时，干扰强度平均增加12 dB。24 V/10 A开关电源在150 kHz~30 MHz频段内产生的传导干扰峰值达80 dB μ V，主要集中在开关频率（通常为50~100 kHz）及其谐波上。采用软开关技术可在1 MHz以上频段降低干扰强度约15 dB。

电磁干扰检测技术研究

1. 近场探测与辐射发射测量

近场探测技术在自动化岸桥电磁干扰检测中发挥关键作用。研究采用频率范围为30 MHz~3 GHz的电场探头和磁场探头，以5 cm的扫描步进对岸桥控制柜内部进行精细扫描。所得电磁场强度分布图揭示了多个局部干扰热点，其中最强干扰源位于变频器功率模块附近，场强高达120 dB μ V/m。此数值远超一般电子设备的抗扰度水平，表明变频器模块是主要电磁干扰源。辐射发射测量在半电波暗室中进行，测试距离设定为3 m，符合国际EMC测试标准。测量结果显示，自动化岸桥系统在30 MHz~1 GHz频段内的辐射发射峰值出现在100 MHz附近，强度约为50 dB μ V/m，超出EN 61000-6-4工业环境辐射发射限值。在岸桥的起升和俯仰操作时，辐射强度增加10~15 dB，表明动态操作条件下电磁干扰问题更为严重。

2. 传导发射与长电路耦合效应分析

传导发射测量采用线路阻抗稳定网络（LISN）对电源线和信号线上的传导干扰进行定量分析。测量结果显示，在150 kHz~30 MHz频段内，电源线

上的传导干扰峰值高达90 dB μ V，主要集中在变频器开关频率的奇次谐波上。信号线上的传导干扰峰值约为70 dB μ V，相对较低但仍超出通信系统的抗扰度阈值。长电路耦合效应测试通过并行敷设100 m长的动力电缆和通信电缆进行模拟。实验数据表明，当两类电缆间距从200 mm减小到50 mm时，通信电缆上的干扰电压增加15 dB；频谱分析显示，耦合干扰主要集中在10 kHz~1 MHz频段，与变频器的开关频率及其谐波高度相关。研究发现，采用双层屏蔽和多点接地技术可将耦合干扰降低20 dB以上，效果显著。

电磁干扰规避措施

1. 布线优化与屏蔽技术

针对电磁耦合干扰的问题，自动化岸桥的布线优化策略以动力电缆与通信电缆的隔离为核心。将两类电缆的最小间距扩大至150 mm，并在中间增设接地金属隔板，可使通信电缆上的干扰电压平均降低18 dB，可有效减少电容耦合和感应耦合的影响。对于长距离传输，如过大梁的Profibus/Profinet通信线，采用全程金属管穿线技术，确保管路电气连续性和两端可靠接地，该方法提供物理隔离，形成法拉第笼效应，显著降低外部电磁场的干扰。电缆屏蔽采用双层结构，外层为编织屏蔽，内层为铝箔屏蔽，此组合充分利用两种材料的优势，有效降低30 MHz~1 GHz频段内的辐射发射15 dB。控制柜设计方面，使用高导电性镀锌钢板，并优化门缝密封，进一步增强整体屏蔽效果。

对于通过滑环箱连接的特殊线路，增加专用的通信环在抗干扰方面带来显著优势。通过在滑环箱中设置独立的通信环，可有效隔离动力线路和通信线路，大幅降低电磁耦合干扰。这种设计使得通信信号在旋转传输过程中保持高质量，减少信号失真和数据错误。专用通信环通常采用金触点设计，具有低接触电阻和高稳定性，能够保证长期可靠运行。此外，通信环的屏蔽性能优于普通滑环，提供了额外的抗干扰保护。在实际应用中，增加通信环后，通信系统的误码率显著降低，系统响应速度提高，有效提升自动化岸桥的整体操作性能和可靠性。

2. 接地系统改进

自动化岸桥接地系统的改进主要针对共模阻抗

过高的问题。研究采用多点接地技术取代原有的单点接地方式，在关键设备处增设4个等电位连接点，将系统的最大共模阻抗从0.5 Ω 降至0.1 Ω 。此改进使30 MHz以下频段的传导干扰平均降低10 dB，显著提高系统的抗干扰能力。变频系统接地采用独立回路设计，避免与通信电缆接地线连接或中间断路，有效防止变频器产生的高频干扰通过共同接地路径影响敏感设备。在吊具设计中，CAN通信系统的电磁兼容性得到重点关注。CAN总线采用双绞线结构，与动力电缆保持100 mm以上间距，必要时使用金属隔离槽。关键节点增加共模电感和TVS保护电路，抑制高频干扰和瞬态高压。变压器采用二次侧与三次侧独立线圈设计，阻止变频系统谐波传播至辅助电源。CAN节点电源采用独立滤波电路，确保供电质量。

3. 滤波器设计与应用

针对自动化岸桥中变频器产生的高频干扰，设计综合滤波器。该滤波器由共模电感、差模电容和Y电容组成，在150 kHz~30 MHz频段内提供平均40 dB的衰减。实际应用中，此滤波器使变频器输出的传导干扰降低35 dB。开关电源输出端增加LC滤波电路，有效抑制50~100 kHz范围内的高频干扰。自动化岸桥吊具通信系统采用多重防护措施。CAN总线作为主要通信方式，配备专用滤波器抑制动力电源谐波干扰。对于仍在使用的ASI信号，同样增加滤波保护。长距离传输场景下，CAN、Profibus和Profinet等系统均采用中继器或信号放大器，有效补偿超过100 m的信号衰减。CAN总线两端安装120 Ω 终端电阻，优化信号质量。这些针对性措施显著提升了吊具通信系统的电磁兼容性，大幅降低了各类通信故障的发生率，确保吊具操作的稳定性和精确性。不同滤波器的性能比较见表1。

表1 自动化岸桥系统中不同滤波器的性能比较

滤波器类型	应用位置	频率范围	衰减效果	主要优势
综合滤波器	变频器输出	150 kHz~30 MHz	35~40 dB	宽频带抑制，高衰减
LC滤波器	开关电源输出	50~100 kHz	25~30 dB	结构简单，成本低
EMI滤波器	吊具电源系统	10 kHz~1 MHz	20~25 dB	抑制ASI信号干扰
CAN专用滤波器	CAN总线接口	1~10 MHz	15~20 dB	提高CAN信号质量

现场应用与效果评估

1. 测试方案设计与实施

自动化岸桥电磁兼容性改进效果的验证采用系统化的测试方案。测试内容涵盖通信系统误码率、关键设备电磁干扰发射水平、通信电缆上的干扰电压以及系统电磁辐射环境等多个方面。在实施规避措施前后分别进行测试，以对比分析改进效果。通信系统误码率测试重点关注Profibus-DP和工业以太网在不同工况下的性能。关键设备电磁干扰发射水平测试主要针对变频器和开关电源，采用近场探测和传导发射测量技术。通信电缆上的干扰电压测试通过高阻抗探头在不同负载条件下进行。系统电磁辐射环境测试在半电波暗室中进行，测试距离为3 m，覆盖30 MHz~1 GHz频段。测试方案的设计充分考虑自动化岸桥的特殊结构和运行特点，确保测试结果的准确性和代表性。

2. 数据采集与分析方法

数据采集采用专业的电磁兼容测试设备，包括频谱分析仪、示波器和EMI接收机。为确保数据的可靠性，每组测试重复进行5次，取平均值作为最终结果。数据分析采用MATLAB软件进行处理，主要包括频谱分析、统计分析和相关性分析。频谱分析重点关注干扰信号的频率分布特征，识别主要干扰频段和谐波成分。统计分析主要计算干扰信号的均值、方差和峰值，评估干扰强度的整体水平和波动范围。相关性分析探讨干扰强度与设备负载、环境温度等因素的关系。对于通信系统的误码率数据，采用长时间监测方法，记录24 h内的误码率变化，分析其与岸桥操作工况的关联。

3. 改进效果量化与性能提升评估

电磁兼容性改进措施的效果通过定量分析得以明确。通信系统误码率由 10^{-5} 降至 10^{-7} ，变频器传导干扰发射水平在150 kHz~30 MHz频段内平均降低32 dB。通信电缆上的干扰电压峰值由2 V降至0.2 V，系统电磁辐射环境在30 MHz~1 GHz频段内平均降低13 dB，均达到相关工业标准要求。改进后的自动化岸桥因通信故障导致的停机时间减少85%，年作业量增加约20万标准箱，见表2。这些量化指标不仅体现在电磁兼容性的显著提升，还直接反映在操作稳定性提高和维护成本降低上。

表2 自动化岸桥电磁兼容性改进前后性能对比

性能指标	改进前	改进后	改善幅度
通信系统误码率	10-5	10-7	降低99%
变频器传导干扰 (150 kHz~30 MHz)	95 dB μ V	63 dB μ V	降低32 dB
通信电缆干扰电压峰值	2 V	0.2 V	降低90%
系统辐射 (30 MHz~1 GHz)	50 dB μ V/m	37 dB μ V/m	降低13 dB
年通信故障停机时间	240 h	36 h	减少85%
年增加作业量 (标准箱)	-	200 000	新增

结束语

针对自动化岸桥项目中的电磁干扰问题，研究构建系统的检测与规避方法体系。通过分析干扰源、传播路径和受体特性，结合先进检测技术，识别了关键干扰源及其影响机制。提出的布线优化、接地改进、滤波器应用等策略显著降低电磁干扰。现场应用结果表明，通信系统误码率降低两个数量级，变频器干扰发射水平平均降低32 dB，系统辐射环境改善13 dB，年作业量增加约20万标准箱。未来研究将着重探索智能化电磁兼容性管理系统，以应

对日益复杂的港口自动化环境，并扩展至其他类型的港口自动化设备，如自动化轨道吊和堆场设备，全面提升港口自动化系统的电磁兼容性水平。**EA**
(收稿日期：2024-10-15)

参考文献

[1] 陈耀耀. 电气调试中电子电路的干扰问题探究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2020(19): 9-10.

[2] 刘伟, 高海南, 张松林, 等. 基于波束捷变的多波束设备抗电磁干扰方法研究[J]. 船电技术, 2023, 43(6): 64-68+75.

[3] 钱钰钰, 孙仲杰, 刘梅, 等. 监控系统电磁干扰研究和检测不确定度评定[J]. 安徽科技, 2022(4): 42-44.

[4] 管梅. 电子产品的电磁兼容检测技术分析[J]. 集成电路应用, 2024, 41(3): 76-77.

[5] 左明瑞. ADS-D系统中的电磁干扰及抗干扰技术[J]. 信息记录材料, 2023, 24(9): 227-229.

