

# 舰船内部光纤总线与光电转换节点的抗毁伤与重构技术研究

李少鹏 费香邦

上海航天电子技术研究所

DOI: 10.32629/jpm.v7i4.8873

**[摘要]** 本文针对传统铜缆电气总线在舰船高对抗环境下抗干扰与抗毁伤能力不足的问题，系统研究了舰船内部光纤总线与光电转换节点的核心技术。深入分析了光纤总线电磁免疫、硬件旁路、三维螺旋布线及高抗毁封装的抗毁伤机理，阐述了光电转换节点光电混合组网、环网自愈、实时性保障与环境适应性强化的重构机制。研究成果可为提升舰载通信系统的战场生存能力与故障恢复效率提供关键技术支撑。

**[关键词]** 舰船光纤总线；光电转换节点；抗毁伤技术；拓扑重构；故障检测

## Research on Damage Resistance and Reconstruction Technologies for Internal Ship Fiber Optic Buses and Photoelectric Conversion Nodes

Li Shaopeng Fei Xiangbang

Shanghai Aerospace Electronic Technology Research Institute

**[Abstract]** Addressing the insufficient interference and damage resistance of traditional copper cable electrical buses in high-defense ship environments, this study systematically investigates core technologies for internal ship fiber optic buses and photoelectric conversion nodes. It provides an in-depth analysis of damage resistance mechanisms—including electromagnetic immunity, hardware bypass, three-dimensional spiral cabling, and highly damage-resistant packaging—for fiber optic buses, while elucidating reconstruction mechanisms for photoelectric conversion nodes featuring electro-optical hybrid networking, ring network self-healing, real-time performance assurance, and enhanced environmental adaptability. The research findings offer critical technical support for improving the battlefield survivability and fault recovery efficiency of shipboard communication systems.

**[Key words]** ship fiber optic bus; photoelectric conversion node; anti-destruction technology; topology reconstruction; fault detection

舰船是高对抗环境之下的复杂性的作战平台，其内部的通信系统可靠性会直接地管辖到指挥控制、发射和态势感知等的功能的正常实现与否。传统的基于铜缆的电器总线，在遇到强电磁干扰或者物理冲击及局部毁伤情况之下，容易出现链路中断或者数据的误码，很难满足现代的海战对于通信连续性及生存能力的严苛性的要求。因此，以光纤为传输介质和光电转换节点为主的新型舰载通信架构应运而生，成为提升系统抗毁伤能力和故障之后重构效率的关键技术路径。

### 一、光纤总线的抗毁伤技术机理与实现路径

#### (一) 电磁免疫性与物理层隔离机制

光纤传输技术用其独特的物理上的特点，给舰船内部的通信系统提供了比铜缆更好的电磁免疫性。其主要的机理为：光纤以光信号为主要载体，信号在传输上全部依赖于光子在玻璃或者塑料纤维中的全反射，以此从本质上隔绝了外部的电磁场的影响<sup>[1]</sup>。在舰船中的极端复杂电磁环境中，集中了如高功率相控阵雷达、主炮发射系统和电子战设备及大功率的推进电机等强电磁干扰源。传统的基于铜缆的电器总线，如以太网或者CAN总线，其金属的导体在强电磁脉冲（EMP）或者持续电磁干扰（EMI）的作用之下，非常容易感应出高达上百伏的尖峰电压，会直接导致物理层（PHY）的芯片被烧毁，进而引发通信

链路的中断。与之相比较，光纤的介质对于电磁干扰有着天然的“绝对免疫”的能力。不管是相邻舱室还是雷达机房抑或大功率的电机舱，借助光纤链路所传输的信号都可以保证其纯净度，以此从本质上消除了因为地环流和感应电压所导致的通信失效的风险。这一特点也被广泛地应用在舰载作战系统的实时通信骨干网中，尤其是在连接雷达、火控计算机和近防炮控制器等关键节点的反射内存的环网中，保证了在“电子炼狱”环境之下的数据链路的稳定性和可靠性。

### (二) 硬件旁路开关的工作原理与触发条件

为了能够应对战斗损毁或者一些突发的障碍所形成的节点失效，舰载光纤网络均引入了硬件的旁路开关机制，这同时也是实现网络“降级运行”和“不死”通信的主要保障。这一机制的主要原理为，基于一个由继电器所控制的物理光开关，其工作的模式会按照节点的实际状态自动地切换。在正常的模式之下，在光电转换节点供电正常而且内部的逻辑工作的时候，光开关会引导来自上一节点的输入光信号进入板卡的内部。信号会首先完成光电的转换，继而被写入节点的本底反射内存中，在经过相关处理之后，再经过光电转换模块重新发射成为光信号，并传递给环网中的下一个节点。此时，数据流经过节点处理会实现数据的读写和转发。

在节点因为被导弹的碎片集中或者供电中断或者软件死机而被迫失效的时候，系统会马上进入旁路模式中。此时，光开关之内的继电器在失去了电力或者控制信号之后会瞬间被释放，物理上也会直接把“光纤输入”的端口和“光纤输出”的端口进行短接。光信号也不再会进入故障节点的内部中，而是像在铁轨之上的“变道”一样，直接地“划过”这一节点，继续沿着光纤环网传输到后续的节点中。这样的切换过程是完全的物理动作，响应的时常 $<1$ 毫秒，且并不依赖于任何的上册协议或者软件的判断。

### (三) 多重冗余链路与三维螺旋布线设计

单一链路的防护性能是比较有限的，现代的舰船光纤总线借助拓扑冗余和空间不限来优化创建系统级的容错架构。在链路层面普遍使用“一主两备”甚至是“四链路冗余”的设计，各个链路之间为物理独立排布，以此避免出现共因失效的情况，主链路在断裂的时候系统可以在10毫秒之内就自动地切换到备用的链路中<sup>[2]</sup>。

空间布线则使用了三维分布式的螺旋方法，光纤沿着舰体的纵梁和肋骨等的受力骨架嵌入式排布形成了覆盖全舰的网格状的网络。这一设计方式不仅有利于舰体结构提供更多物理保护，又可以让任意两点之前存在多条通信路径，进而实现局部损毁但不影响全局的连通性。冗余链路和三维网格布线的融合，从空间的维度上大幅度提升了光纤总线系统的整体容错和生存的能力。

### (四) 高抗毁封装结构与环境适应性强化

光纤自身是非常脆弱的，要借助特殊的封装工艺来抵御舰船的恶劣环境。舰用的光纤使用多层次递进式的抗毁坏封装体系，具体为，基本级：该级别为双层的紧套封装，以此强化其抗拉伸和剪切的能力，较为适用于常规的舱室；中级：该级别为不锈钢的螺旋铠装，以此提升其抗冲击和抗压变的性能；最高级：该级别为双层的不锈钢铠装+阻燃外护套，可以抵御破片、火焰和强拉伸力，以此保障极端毁伤之下关键光纤的整体性和完整性。

另外，舰用的光纤与相关器件还需要满足 $-40^{\circ}\text{C}$ 、 $+85^{\circ}\text{C}$ 的宽温、高盐雾、高湿度和强震动冲击等环境要求。连接器要使用带锁机构的LC双工或者航空级别的MT0/MP0的接口，光电转换节点也使用全密封VPX板卡的设计。借助从光纤到连接器再到节点设备的全方位的强化，保证光纤总线系统能够在海洋工况和战场的环境中长期且可靠地运行。

## 二、光电转换节点的重构机制与关键技术挑战应对

### (一) 电光混合组网架构与协议透明转换

为了兼顾性能、成本和对于现有的系统的实际兼容性，现代的舰船通信网络大部分使用“光骨干+电末端”的混合组网结构方式。其核心在于：在主干通信链路上使用光纤开展长距离、高宽带和抗干扰的传输，在末端的设备附近会保留短距离的电器连接，以此来降低系统的改造成本并最大限度地利用现有的设备接口<sup>[3]</sup>。

以工业现场总线的改造为例，在舰船的自动化系统中，中央控制器是主站，其PROFIBUS-DP接口则借助安装光纤转换的模块，把基于RS-485电气标准的差分信号转换成为光信号。该光信号则经由单模或者多模光纤所构成的骨干网络转出到远程的舱室的分布式I/O站或者设备群的附近。而在接收端，另一台的光纤转换模块会把光信号精准地还原成标准的PROFIBUS-DP电信号，再借助短距离的铜缆接入到现场从站设备中。这样的结构方式支持星型、链型甚至环网等的多样化拓扑，完美地适配舰船的分舱式和线性布局的物理结构。

协议透明转换是实现平滑重构和向后兼容的关键。高性能的光电转换节点内置了专用的协议处理芯片和微处理器，可以实现对原有通信协议的无损和透明的转发。同样，对于CAN总线，CANOPEN总线光纤中继器支持10K到500Kbit/s的塑料自适应，数据全透明地传输，并保留CAN总线的对等传输和总线的仲裁等的全部优点。这样的协议级别的透明性，会让网络在向光纤化设计和重构的过程中，最大限度地保护既有的投资，进而实现平滑的过渡。

### (二) 双冗余总线与环网自愈机制

为了应对舰船高对抗环境之下的单点故障的风险，创建有着自愈能力的冗余网络是重构机制的核心。其主要体现在物理层面使用双冗余甚至多链路的设计，融合环网拓扑来实现快速故障的管理和路径的切换。

双冗余总线是提升其可靠性的经典设计。系统创建了两条物理隔离和逻辑同步运行的总线网络。在正常的状态之下,数据在主通道中传输;如果主通道因为电缆的断裂或者接口故障或者强干扰所导致的通信质量下降等,系统会在微秒级的时间之内自动地切换到备用通道中。这样的方式可以把通信中断的概率降到 $10^{-9}$ /小时的量级,以此满足关键作战系统对连续性的要求。

环网自愈机制则提供了更高层次的空间容错能力。借助多个光电转换节点用光纤首尾相连,构成一个闭合的环境网络的方案。在环网中的任何一条链路(光纤)或者节点出现故障的时候,数据流就可以自动地反向绕行,借助环路的另一侧路径到达目的地,进而保证通信的连续性。这样“手拉手”或者闭环的连接方法,尤其是用在舰船线性分布的舱段或者设备集群之间的互联。在舰载的环境之下,结合应建的旁路开关,在某一个节点因为战斗损毁或者掉电失效的时候,其内置的光继电器会有时间的释放,在物理上把输入和输出的光纤直接地短接在一起,让光纤“跳过”这一故障的阶段,进而实现网络降级运行之下的自愈。这样的硬件级别的旁路动作一般会在毫秒甚至微秒之内完成,远远地快于软件协议层之间的切换,给系统的重构赢得了非常宝贵的时间。

### (三) 实时性保障与延迟控制技术

舰载的武器系统,如火控和近防炮,对于通信的延迟有着毫秒级甚至微秒级的极限性要求,任何不可预测的延迟或者抖动都可能会出现拦截的失效。所以,光电转换节点的重构机制必须内嵌确定性的实时性的保障技术。

反射内存环网是有效解决这一挑战的最佳方案。其和基于交换或者仲裁的传统网络不同,反射内存网络中的数据沿着单向的流动,每一个阶段会把接收到的数据写入本地的映射内存中并马上转发,数据环绕一周的时间是一定的。如,每一个节点的延迟可能会低到450纳秒,这让整体网络的传输延迟变得完全可以预测,并不受网络负载的影响。这样的确定性延迟消除了传统以太网CSMA/CD机制或者交换机排队所带来的随机抖动,让火控阶段并不需要因为网络延迟做复杂的预测补偿,进而变得更加纯粹且可靠。

在软件 and 控制的层面上,会借助精细化的心跳包和看门狗机制来实现毫秒级的故障检测和响应。系统可以在共享的内存中给每一个网络的节点都设置心跳计数器,并由独立的健康监控任务来固定周期开展监测。如果发现某一个节点的心跳计算停滞超过了预定的阈值,即判断这一节点“死机”,会马上触发报警并启动备用的模式来切换流程。与此同时,硬件看门狗电路监控节点的主处理器实际运行状态,一旦软件跑飞或者死锁,看门狗超时会被强制复位节点或者触发硬件旁路的开关。另外,在协议层,使用信用制流控避免网络的拥堵,并借

助差分曼彻斯特编码来强化信号的抗干扰能力,以期保证数据在传输上的稳定性和实时性。

### (四) 环境适应性与机械稳定性设计

舰船的光电转换节点长期地工作在盐雾、高湿、宽温变、强震动和冲击的恶劣环境中,其物理的结构可靠性是重构功能能够更好实现的物质基础。所以,其在设计上必须遵循非常高的环境适应性和机械稳定性的标准。

在硬件的结构和封装的层面,节点会广泛的使用加固的VME或者VPX总线的形式。其中,VPX板卡使用导冷的设计,完全密封且没有风扇,以此从本质上杜绝了盐雾的腐蚀和灰尘的侵入。反射内存卡等的主要模块则作为PMC/XMC子卡扣装在VPX的主板之上,将谈汉族背板的互联,抗震性能远远高于普通插卡式的工控机。光电转换器件自身使用密封的外壳,内部实现电器隔离,以此保证光电能够精准地传递。设备的外壳防护等级普遍要求达到IP66或者更高,以此抵御喷水和灰尘等的侵入。

在元器件选型与环境参数上,必须选用工业级宽温器件。例如,CANOPEN总线光纤中继器等设备提供宽温类型选项,其工作温度范围可达 $-40^{\circ}\text{C}$ 至 $85^{\circ}\text{C}$ ,存储温度范围达 $-40^{\circ}\text{C}$ 至 $85^{\circ}\text{C}$ ,以满足从寒带到赤道的全球部署需求。工作湿度范围需覆盖5%至95%RH,以适应海上高湿环境。电源设计须具备宽压输入(如DC10V-36V)和双电源冗余能力,并集成反接保护、防雷浪涌保护(每线1500W)及15KV静电保护,以应对舰上复杂的电网状况。

机械结构设计则强调抗振与维护便捷。节点采用波纹式高强度金属外壳,支持35mm DIN导轨安装,稳固且易于集成。连接器普遍选用具有锁紧机构的LC双工光纤接口或更坚固的型号,防止在50g以上的冲击下脱落。一些先进设计还将光纤收发跳线插头整体绑定,实现狭窄舱室内单手单次插拔,提升维护效率并防止误插。

### 结束语:

综上,本文系统阐明了舰船光纤总线的抗毁伤机理与光电转换节点的重构技术体系。相关技术可有效解决传统铜缆总线在高对抗环境下的生存性难题,为舰载通信系统的可靠性提升提供了可行路径。未来可进一步探索智能化故障重构与新型抗毁材料应用,助力新一代舰船通信网络的升级发展。

### [参考文献]

- [1] 储蓄蓄,洪东. 基于PSO-RBFNN的舰船光纤通信流量预测[J]. 舰船科学技术,2025,47(20):190-194.
- [2] 周银祥. 基于嵌入式技术的舰船捷联控制系统基准设计[J]. 舰船科学技术,2024,46(18):175-178.
- [3] 张涛. 舰船用光纤轴频电场电流测量技术研究[D]. 哈尔滨工业大学,2024. DOI:10.27061/d.cnki.ghgdu.2024.001945.