

应变传感器在船舶与海洋工程结构安全监测中的应用

0 引言

全球 90% 的贸易通过海运完成，船舶与海洋工程装备作为海洋经济活动的载体，其结构失效可能导致灾难性后果。传统定期检测模式存在检测周期长、盲区多以及主观性强等局限，难以满足现代装备向大型化和智能化发展的安全需求。应变传感器凭借高精度、高灵敏度及抗电磁干扰等优势，已成为结构健康监测系统的“神经末梢”，在实时感知结构状态、评估剩余寿命和指导维修决策等方面发挥关键作用。

1 应变传感器技术体系与选型策略

1.1 核心技术类型

电阻应变片工作原理基于金属丝电阻会随着所受应力而发生变化，电阻应变片精度为 $\pm 2 \mu\epsilon$ ，能很好地应用于动态应力监测场景。因其出色的性能，广泛运用在船舶结构应力监测。光纤光栅应变传感器利用光栅波长变化特性工作。该传感器精度可达 $\pm 1 \mu\epsilon$ ，在长距离分布式监测以及强电磁干扰环境下有着独特的优势，为海洋工程中的各类监测任务提供了高精度的测量支持。微机电系统（Micro Electro Mechanical System, MEMS）应变传感器基于压阻效应运作，其精度为 $\pm 5 \mu\epsilon$ ，适用于对设备小型化有需求以及高频动态监测的场景。由于自身特性，常用于小型设备的结构件，为小型设备的运行状态监测提供重要数据。振弦式应变计通过测量钢弦振动频率的变化来获取应变数据，其精度为 $\pm 3 \mu\epsilon$ ，适合长期监测以及在恶劣环境下进行监测。振弦式应变计在海洋工程的长期项目中得到了广泛应用，有力保障了海洋工程长期项目的监测工作顺利进行。

1.2 选型关键要素

- 1) 在应对可能出现的腐蚀问题时，推荐使用镀金引线 和聚酰亚胺基底的应变片。同时，钛合金的良好耐腐蚀性能 能够为传感器提供可靠的保护。
- 2) 温度补偿可选用自带温度补偿电路的应变片，其通 过内部集成的温度补偿电路能有效应对温度变化的影响。另 外，采用解耦技术使得传感器能够在温度变化的环境下准确 地获取监测数据，减少温度因素对测量结果的干扰。
- 3) 针对不同的应力监测场景有不同的适用产品。当面对局部应力集中的情况时，微型应变片凭借其小巧的体积可 精准捕捉局部应力的变化。整体结构监测选择光纤光栅传感器 阵能够实现多点同步测量，从而全面、准确地反映整体结构 的应力分布情况。
- 4) 为了确保安装效果，需要注意一些细节，如，采用 喷砂处理和使用底涂剂能够有效提高粘贴的牢固度。水下区域 建议使用硅橡胶与玻璃纤维增强树脂进行封装，确保在水下 复杂环境中具备良好的防护性能。

2 典型应用场景

2.1 船舶结构关键节点监测

在集装箱船舶中 0.4L（L 为船长）区域的甲板、舷侧、 底板布置光纤光栅应变传感器，构建三维应力监测网络。传 感器布局方面，在甲板纵骨与强横梁连接处、舷侧肋骨跨中、 双层底纵桁节点这些关键部位各布置 3 组应变花（直角应变 花或三轴应变花），这些位置是船体结构受力关键节点，通过应变花可测量不同方向应变，精确计算应力状态。数据采集 通过船舶局域网实现，将应变传感器采集的数据传输至驾 驶室监测终端。在监测终端实时显示应力云图，直观呈现船 体关键部位应力分布情况。当应力超过许用应力的 80% 时触 发声光报警，提醒船员和管理人员注意结构应力异常，及时 采取措施。应变传感器阵列采集船体结构应变数据，光纤解 调仪将光纤光栅传感器的波长信号转换为应变数据，边缘计 算单元对数据进行初步处理和分析，提取关键特征。处理后的 数据传输至舰船监控中心，在监控中心进行综合分析和存 储。应力预警模块根据设定阈值对数据进行判断，当应力超 过阈值时向船舶控制系统发送自动减载指令，实现对船舶结 构安全的智能控制和保护。

2.2 Offshore 平台导管架健康监测

在导管架关键立管节点、水平撑杆布置振弦式应变计与 加速度传感器，形成“应变-振动”协同监测系统。该系统 进行多参数融合，同步采集应变（包括静态应变和动态应 变）、加速度（反映结构振动频率响应）和波高数据等。通过机器学习算法，建立台风载荷-结构响应预测模型。将大量 历史台风数据、结构应变和振动数据等输入模型进行训 练，使模型学习到不同台风工况下结构的响应规律，从而实 现对未来台风来临时结构响应的准确预测。预警阈值设定基 于 DNV GL RP-C203 标准，设定静态应力阈值为材料屈服 强度的 60%，动态应力幅阈值为疲劳极限的 40%。当监测 数据超过这些阈值时，系统发出预警信号。某南海导管架在 超强台风“海燕”期间，监测到水平撑杆动态应力幅达 180 MPa，超过疲劳极限 36%。平台根据监测系统预警及时 启动避台程序，调整平台姿态、停止部分非关键作业，避免 了结构因疲劳断裂而发生严重事故，保障了平台人员安全和 设施稳定运行。

2.3 海底管道应变-腐蚀协同监测

在海底管道悬跨段（跨度 $>15D$ ，D 为管径）部署 MEMS 应变传感器与腐蚀电位传感器，采用湿插拔连接器实现水下 快速安装。监测参数包括应变（由振动引起的交变应力）、 腐蚀电流密度和海水流速等。MEMS 应变传感器监测管道 因涡激振动产生的应变，腐蚀电位传感器测量管道腐蚀情 况，海水流速传感器提供环境参数，综合分析这些参数，全

面掌握海底管道运行状态。预警机制为当应变循环次数超过 Miner 线性累积损伤准则的 70%, 或腐蚀速率 $>0.2 \text{ mm/a}$ 时, 触发管道内检测机器人 (Pipe inspection robot, PIG) 自动巡检。Miner 线性累积损伤准则用于评估结构在交变应力作用下的疲劳损伤程度, 当损伤达到一定程度, 或腐蚀速率过快时及时派出 PIG 对管道内部进行详细检测, 排查潜在缺陷。某深海管道应用该系统后, 取得显著技术突破。涡激振动导致的疲劳裂纹检出率从人工检测的 32% 大幅提升至 91%, 能及时发现更多潜在裂纹, 避免管道因裂纹扩展而发生泄漏事故。同时, 维护成本降低 45%, 通过精准检测和及时维护减少不必要的维护工作和损失, 提高海底管道运行经济性。

3 关键技术突破与系统集成

3.1 长期监测中的信号稳定性技术

3.1.1 温度漂移抑制

采用双光栅温补技术, 在应变光栅旁串联温度补偿光栅。当温度变化时应变光栅和温度补偿光栅的波长均发生变化, 但变化规律不同。通过计算两者波长差可消除温度对应变测量的影响, 精度可达 $\pm 0.5 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$, 有效提高应变测量在温度变化环境下的准确性。对于电阻应变片, 搭配动态补偿电路。利用惠斯通电桥结合热敏电阻, 当温度变化时热敏电阻阻值改变, 自动调整电桥平衡, 补偿温度引起的电阻变化, 实现 $-30^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 温漂 $< \pm 3 \mu\epsilon$, 保证电阻应变片在宽温度范围内稳定测量应变。

3.1.2 传感器耐久性提升

在光纤光栅表面沉积类金刚石 (Diamond-Like Carbon, DLC) 涂层, 涂层硬度达 2 000 HV, 可有效抵抗海生物附着。海生物附着在传感器表面会影响其测量精度和使用寿命, DLC 涂层使抗生物附着性能提升 5 倍, 确保光纤光栅传感器在海洋环境中长时间稳定工作。振弦式应变计采用全焊接密封工艺, 经过 DNV GL 1 000 m 水深耐压测试验证, 水下长期监测零泄漏率。全焊接密封可防止海水侵入应变计内部, 避免内部电子元件被腐蚀, 保证应变计在水下高压、高湿环境下长期可靠运行。

3.2 多源数据融合与智能分析

3.2.1 时空对齐技术

采用 IEEE 1588v2 时钟同步协议, 为应变、温度和载荷等多源数据提供高精度时间同步。该协议通过网络传输精确的时间信息, 确保各传感器采集数据的时间戳误差 $< 50 \mu\text{s}$ 。时间同步是多源数据融合的关键, 只有保证数据在时间上准确对齐才能基于时间序列进行因果分析, 准确揭示不同参数之间的内在联系和相互影响机制。

3.2.2 损伤识别算法

基于应变模态分析 (Strain modal analysis, SMA) 进行裂纹定位, 通过测量结构在不同激励下的应变模态振型变化, 识别裂纹位置。当结构出现裂纹时, 其应变模态振型会发生改变, 通过与健康结构的应变模态振型对比可定位裂纹位置, 误差 $< 50 \text{ mm}$, 实现对结构内部损伤的精准定位。改进的 Paris 公式用于疲劳寿命预测, 结合实时应变幅与循环次数进行计算。传统 Paris 公式在实际应用中存在一定局限性, 改进后的公式考虑更多实际因素, 如海洋环境腐蚀对疲劳裂纹扩展的影响。在某海上平台应用验证中, 预测疲劳寿命误差 $< 10\%$, 为结构维护和更换提供准确的寿命预测依据。

3.3 工程实施关键流程

3.3.1 传感器布局优化

运用有限元分析软件 (如 ANSYS 等) 进行预仿真, 模拟结构在不同工况下的应力分布情况。通过分析确定应力集中系数 > 3 的区域, 这些区域是结构最易出现损伤的部位。在这些区域加密布置传感器使传感器覆盖率提升至 92% 以上, 确保能够全面、准确地监测结构关键部位应力变化, 及时发现潜在安全隐患。

3.3.2 数据传输网络构建

在短距离数据传输场景中, 可采用 RS-485 总线 (传输距离 $\leq 1\ 200 \text{ m}$), 其具有传输距离较远、抗干扰能力较强的特点, 适用于船舶内部或海上平台局部区域传感器数据传输。也可采用 CAN 总线, 该总线抗干扰能力更强, 通信可靠性高, 在对数据传输可靠性要求较高的短距离传输场景中应用广泛。在长距离数据传输方面, 海底场景使用光电复合缆 (传输距离 $> 50 \text{ km}$) 既能传输光信号 (用于光纤传感器数据传输), 又能传输电信号 (为传感器供电), 满足海底长距离、大带宽数据传输需求。水面场景则可采用 4G/5G 物联网 (Internet of Things, IoT), 如华为 Ocean Connect, 利用无线通信技术实现数据快速传输, 不受线缆铺设限制, 便于实时远程监控和数据共享。

4 结束语

应变传感器作为船舶与海洋工程结构安全的“电子听诊器”, 正在推动传统“事后维修”模式向“预测性维护”转型。随着新材料、智能算法与通信技术的深度融合, 未来的应变监测系统将具备更强大的环境适应性、更高的监测精度与更智能的决策能力, 成为保障海洋工程装备安全、高效、绿色运行的核心技术支撑。在“双碳”目标驱动下, 应变监测技术与可再生能源海洋开发 (如漂浮式风电、海洋能装置等) 的结合, 将开启海洋工程智能化发展的新蓝海。

刘连钢¹, 陈刚², 王伟涛²

1. 大连职业技术学院, 辽宁大连 116035

2. 天津滨海讯腾科技集团有限公司, 天津 300171