

Research on the Design Technology of Monitoring the State of Intermediate Joints in Submarine Cables

Yong Gu WeiYiChen

Zhongtian Ocean System Co., Ltd., Nantong, Jiangsu, 226010, China

Abstract

In the ocean observation system, the intermediate joint of the submarine cable is a relatively fragile link. When the joint is damaged due to external forces and is in a critical state of damage, the system can temporarily operate normally. However, after a period of time, the system suddenly becomes completely paralyzed, and the sea conditions may not allow offshore construction, resulting in the loss of ocean data for a period of time. This will cause a linear decrease in the system's operating rate. This system installs MEMS temperature and humidity sensors, strain gauges, and acceleration sensors at the joint, using low-power software and hardware design to monitor temperature and humidity, resistance changes (deformation), angle, and acceleration at the joint. The Kalman filter algorithm is used to process the data, and when abnormal temperature and humidity, strain voltage, angle, and acceleration are detected, an alarm is issued to predict faults in advance and handle them in advance.

Keywords

Intermediate joint of submarine cable; Low power consumption; Temperature and humidity; Strain gauges; Acceleration; give an alarm; Anticipate faults

海底电缆中间接头状态监测设计技术研究

顾勇 陈伟毅

中天海洋系统有限公司, 中国 · 江苏 南通 226010

摘 要

海洋观测系统中, 海底电缆中间接头是较脆弱的环节, 当接头处由于外力原因损坏, 处于损坏的临界状态, 系统暂时能正常运行, 但过一段时间后, 系统突然全面瘫痪, 而此时海况可能并不允许出海施工, 而使海洋数据丢失一段时间, 这会造成系统运行率的直线下降。本系统在接头处安装MEMS温湿度传感器、应变片和加速度传感器, 采用低功耗软硬件设计, 来监测接头处的温湿度、阻值变化(形变)、角度和加速度, 并采用卡尔曼滤波算法处理数据, 在监测到温湿度、应变电压、角度和加速度异常时, 发出告警, 从而提前预知故障, 提前处理。

关键词

海底电缆中间接头; 低功耗; 温湿度; 应变片; 加速度; 告警; 预知故障

1 引言

海洋观测系统中, 海底电缆中间接头是较脆弱的环节, 当接头处由于外力原因损坏, 处于损坏的临界状态, 系统暂时能正常运行, 但过一段时间后, 系统突然全面瘫痪, 而此时海况可能并不允许出海施工, 而使海洋数据丢失一段时间, 这会造成系统运行率的直线下降^[1]。

2 设计方案

2.1 概述

本系统在海底电缆中间接头处安装 MEMS 温湿度传感器、应变片和加速度传感器, 采用低功耗软硬件设计, 来监

测接头处的温湿度、应变电压(形变)、角度和加速度, 并采用卡尔曼滤波算法处理数据。在监测到温湿度、应变电阻、加速度和角度异常时, 发出告警, 从而提前预知故障, 提前处理。

2.2 控制拓扑图

如上图所示, 系统包括温湿度传感器、加速度传感器、应变片传感器、CPU 芯片和通信芯片。

温湿度传感器采集温度和湿度; 加速度传感器采集加速度和角速度, CPU 收到数据后计算出角度值, 并通过卡尔曼滤波算法对角度进行滤波处理; 应变片遇到形变时, 电阻发生变化, 并通过直流电桥产生不平衡电压, CPU 的模拟采样采集到电压数值, 并通过卡尔曼滤波算法对电压值进行滤波处理; 当 CPU 监测到温湿度、应变电压、加速度、角速度和角度数值异常时, 通过串口通信芯片发送事件信息给主控系统。

【作者简介】顾勇(1989-), 男, 中国江苏南通人, 本科, 工程师, 从事海洋观测技术及仪器的研究。

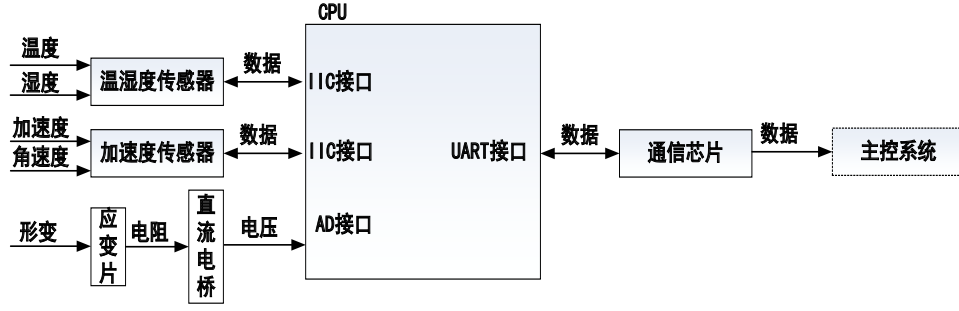


图 1 控制拓扑图

2.3 温湿度数据采集设计概要

温湿度传感器采用 MEMS 传感器类型的，MEMS 技术允许在较小空间内集成多个传感器功能，同时保持较低功耗。比如 Bosch 的 BME680 等温湿度传感器。

2.4 姿态数据采集设计概要

姿态传感器也是采用 MEMS 传感器类型，比如 Bosch 的 BMI160 等加速度传感器。

加速度传感器采集 x、y、z 的加速度和角速度数据。

2.5 卡尔曼滤波算法简介

从理论上讲，卡尔曼滤波算法曾经被称为线性最小均方估计子，因为它利用含有噪声的线性传感器（数据）使线性随机系统的均方估计误差最小化^[2]。

线性随机系统的离散时间模型具有下列形式：

$$x_k = \Phi_{k-1}x_{k-1} + G_{k-1}\omega_{k-1} \quad (1.4.1-1)$$

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (1.4.1-2)$$

其中，零均值不相关随机过程 $\{\omega_k\}$ 和 $\{v_k\}$ 在 t_k 时刻的协方差分别为 Q_k 和 R_k 。对应的卡尔曼滤波器方程具有下列形式^[2]：

$$\hat{x}_{k(-)} = \Phi_{k-1} \hat{x}_{(k-1)+} \quad (1.4.1-3)$$

$$P_{k(-)} = \Phi_{k-1} P_{(k-1)+} \Phi_{k-1}^T + G_{k-1} Q_{k-1} G_{k-1}^T \quad (1.4.1-4)$$

$$\hat{x}_{k(+)} = \hat{x}_{k(-)} + \bar{k}_k (z_k - H_k \hat{x}_{k(-)}) \quad (1.4.1-5)$$

$$\bar{k}_k = P_{k(-)} H_k^T (H_k P_{k(-)} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (1.4.1-6)$$

$$P_{k(+)} = P_{k(-)} - \bar{k}_k H_k P_{k(-)} \quad (1.4.1-7)$$

其中，符号 (-) 表示变量的先验值（测量值中的信息被利用以前的值），符号 (+) 表示变量的后验值（测量值中的信息被利用以后的值）。x 为系统状态变量，z 为测量值，变量 K_k 为卡尔曼增益， Φ 为状态转移矩阵，Q 为噪声的协方差矩阵，P 为协方差矩阵，H 为灵敏度矩阵，G 为过程噪声耦合矩阵，R 为测量噪声协方差矩阵。

2.6 角度理论计算

欧拉角旋转顺序为：偏航（Z 轴， Ψ 符号表示）- 俯仰（Y 轴， θ 符号表示）- 横滚（X 轴， λ 符号表示），将导航坐标系 n 经过三次旋转，旋转后与载体坐标系 b 对齐。

可以得到如下方向余弦矩阵^[3]：

$$C_n^b = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \lambda \sin \theta \cos \psi - \cos \lambda \sin \psi & \sin \lambda \sin \theta \sin \psi + \cos \lambda \cos \psi & \sin \lambda \cos \theta \\ \cos \lambda \sin \theta \cos \psi + \sin \lambda \sin \psi & \cos \lambda \sin \theta \sin \psi - \sin \lambda \cos \psi & \cos \lambda \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1.4.2-1)$$

$$C_b^n = [C_n^b]^T \quad (1.4.2-2)$$

当传感器静止或者低频运动时，地理坐标系坐标系重力场

$$g^n = [0 \quad 0 \quad g]^T \quad (1.4.2-3)$$

载体坐标系，即传感器测量值，重力场分量

$$g^b = [g_x^b \quad g_y^b \quad g_z^b]^T \quad (1.4.2-4)$$

$$\begin{aligned} g^b &= C_n^b g^n \\ &= [-\sin \theta * g \quad \sin \lambda \cos \theta * g \quad \cos \lambda \cos \theta * g]^T \\ &= [g_x^b \quad g_y^b \quad g_z^b]^T \end{aligned}$$

可以得出

$$\theta = \sin^{-1} g_x^b / g \quad (1.4.2-5)$$

$$\lambda = \tan^{-1} g_y^b / g_z^b \quad (1.4.2-6)$$

当传感器静止或者低频运动时，地理坐标系坐标系磁力场

$$m^n = [\cos \sigma \quad 0 \quad \sin \sigma]^T \quad (1.4.2-7)$$

载体坐标系，即传感器测量值，磁力场分量

$$m^b = [m_x^b \quad m_y^b \quad m_z^b]^T \quad (1.4.2-8)$$

$$m^b = C_n^b m^n \quad (1.4.2-9)$$

结合式 (1.4.2-1) 和式 (1.4.2-9) 可以得出：

$$m_x^b = \cos \theta \cos \psi \cos \sigma - \sin \theta \sin \sigma \quad (1.4.2-10)$$

$$m_y^b = (\sin \lambda \sin \theta \cos \psi - \cos \lambda \sin \psi) \cos \sigma + \sin \lambda \cos \theta \sin \sigma \quad (1.4.2-11)$$

$$m_z^b = (\cos \lambda \sin \theta \cos \psi + \sin \lambda \sin \psi) \cos \sigma + \cos \lambda \cos \theta \sin \sigma \quad (1.4.2-12)$$

(1.4.2-11) * $\sin \lambda$ + (1.4.2-12) * $\cos \lambda$ ，可得

$$m_y^b \sin \lambda + m_z^b \cos \lambda = \sin \theta \cos \psi \cos \sigma + \cos \theta \sin \sigma \quad (1.4.2-13)$$

(1.4.2-11) * $\cos \lambda$ - (1.4.2-12) * $\sin \lambda$, 可得

$$m_y^b \cos \lambda - m_z^b \sin \lambda = -\sin \psi \cos \sigma \quad (1.4.2-14)$$

(1.4.2-13) * $\sin \theta$ + (1.4.2-10) * $\cos \theta$, 可得

$$(m_y^b \sin \lambda + m_z^b \cos \lambda) \sin \theta + m_x^b \cos \theta = \cos \psi \cos \sigma \quad (1.4.2-15)$$

(1.4.2-14) / (1.4.2-12), 可得

$$\Psi = \tan^{-1} \left(\frac{m_y^b \sin \lambda - m_z^b \cos \lambda}{(m_y^b \sin \lambda + m_z^b \cos \lambda) \sin \theta + m_x^b \cos \theta} \right) \quad (1.4.2-16)$$

综上所述可得:

$$\theta = \sin^{-1} g_x^b / g \quad (1.4.2-5)$$

$$\lambda = \tan^{-1} g_y^b / g_z^b \quad (1.4.2-6)$$

$$\Psi = \tan^{-1} \left(\frac{m_z^b \sin \lambda - m_y^b \cos \lambda}{(m_y^b \sin \lambda + m_z^b \cos \lambda) \sin \theta + m_x^b \cos \theta} \right) \quad (1.4.2-16)$$

2.7 角度实际计算

先利用滑动滤波算法和阈值滤波算法对加速度和角速度数据进行简单的滤波, 考虑到姿态传感器放置在水下金属腔体, 传感器无法测量地磁场数据, 所有仅用加速度值带入式(1.4.2-5)和式(1.4.2-6)计算出横滚角和俯仰角, 然后利用上述卡尔曼滤波算法对角度进行滤波处理。卡尔曼滤波算法核心代码如下:

卡尔曼参数初始化

kalman_est_value = 0; (估计值任意初值)

kalman_est_cov = 0.1; (估计协方差任意不为0的值)

kalman_mea_cov = 0.2; (测量协方差任意不为0的值)

卡尔曼增益计算

kalman_gain = kalman_est_cov * sqrt(1 / (kalman_est_cov * kalman_est_cov + kalman_mea_cov * kalman_mea_cov));

本次滤波值估计值

kalman_est_value = kalman_est_value + kalman_gain * (kalman_mea_value - kalman_est_value);

更新估计协方差

kalman_est_cov = sqrt(1 - kalman_gain) * kalman_est_cov;

更新测量协方差

kalman_mea_cov = sqrt(1 - kalman_gain) * kalman_mea_cov;

偏航角采用角速度积分的方法计算, 计算方法如下:

angle_z = angle_z + w_z_value * t;

其中 w_z_value 为 z 方向的角速度值, t 为采样周期。

2.8 应变片数据采集

2.8.1 电阻应变片工作原理^[4]

电阻应变片的工作原理是基于敏感栅中的金属丝的应

变效应, 即在金属导体产生形变时, 它的电阻值发生相应变化。例如一根金属电阻丝, 在其未受力时, 原始电阻值为 $R=L/S$ 。当该丝受到轴向拉力 F 作用时, 电阻值的相对变化为 $dR = dL/S - LdS/S^2 + LdS/S$ 。因此可通过测量变化后电阻值来确定作用力 F 。

2.8.2 直流电桥测量电路

测量电路如下图所示, R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 为桥臂电阻, R_1 为电阻应变片, E 为电压源。

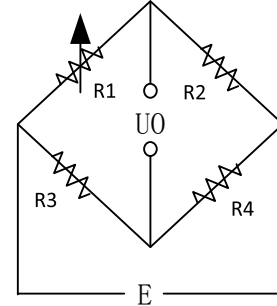


图2 直流电桥测量电路

初始状态设计电路, 使 $R_1 R_4 = R_2 R_3$, 此时电桥平衡, $U_0 = 0V$; 当应变片 R_1 阻值发生变化时, 可以通过如下公式^[4]计算出 U_0 值。

$$U_0 = E \frac{R_4 \Delta R_1 / R_3 R_1}{(1 + \Delta R_1 / R_1 + R_2 / R_1)(1 + R_4 / R_3)} \quad (1.5.2-1)$$

3 控制软件流程

系统在监测到湿度超过阈值并且持续1分钟, 则上报告警信息至主系统; 监测到加速度、角度、应变片电压超过阈值, 并且1分钟后继续判断应变片电压是否超过阈值, 则上报告警信息至主系统。具体流程图如下图所示:

4 结语

本系统在监测海底电缆中间接头处的温湿度、加速度、角度和应变电压数据异常时, 发出告警, 从而提前预知故障, 提前处理。本系统为海底电缆中间接头状态监测设计技术提供了一种低成本思路, 从理论上讲可以提前预知故障, 从而提高系统运行率。

参考文献

- [1] 顾勇, 倪晶晶, 张志峰, 等. 海缆接头状态监测装置: 中国, ZL 2023 2 2901304.2[P]. 2024-05-28.
- [2] Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews. 卡尔曼滤波理论与实践 (MATLAB版) (第四版) [M]. 刘郁林, 陈邵荣, 徐舜, 译. 北京: 电子工业出版社, 2017.7: 1-2, 176.
- [3] 郑淑孟. 基于MEMS惯性传感器的人体姿态和位移检测[D]. 广州: 暨南大学, 2015: 17.
- [4] 吴祥晨, 吴杨杰, 王柳烟. 电阻应变片测量电路的灵敏度研究与误差分析 [J]. 智能应用, 2014, 03 (044): 51.