

# 基于MEMS传感器的起重机吊钩 运动实时监控系统的

薛 峰,苑伟政,常洪龙,袁广民,申 强  
(西北工业大学 微纳米系统重点实验室, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 针对起重机吊钩运动状态的实时监控问题,设计并实现了一种基于MEMS传感器的吊钩运动监控系统。利用微型加速度计和磁强计实时测量了吊钩的二维倾角和水平方位角;分析了多种不同的磁强计补偿方法,针对强磁环境下水平方位角误差较大的特点,提出了一种基于T-S模糊逻辑的吊钩旋转角误差补偿方法;研制了系统样机,并进行了性能测试。研究表明,起重机吊钩倾角测量精度达到 $0.3^\circ$ ,平面旋转角精度达到 $0.8^\circ$ ,可满足实际应用要求,具有良好的应用前景。

**关键词:** 起重机吊钩运动;MEMS传感器;状态监控系统;T-S模糊逻辑

中图分类号: TP277;TH21;TH39 文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2012)08-0911-05

## Lifting hook motion state monitor system based on MEMS sensors

XUE Feng, YUAN Wei-zheng, CHANG Hong-long, YUAN Guang-min, SHEN Qiang  
(Micro and Nano Electromechanical Systems Laboratory, Northwestern Polytechnical University,  
Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Aiming at the practical application of low-lost lifting hook movement, a lifting hook motion state monitor system based on MEMS sensors was presented. Two dimensional dip angle and azimuth angle of the hook can be measured with the micro accelerometer and magnetometer in real time. Different magnetometer compensation methods were analyzed. Because of the big error of the azimuth angle in strong magnetic environment, an error compensation method using T-S fuzzy logic was proposed. Model machine was manufactured and the performance was tested. The results indicate that the measurement precision of dip angle can reach  $\pm 0.2^\circ$  and azimuth angle can reach  $\pm 0.8^\circ$ . The application requirements is satisfied and the foreground is great.

**Key words:** lifting hook movement; micro-electromechanical systems (MEMS) sensor;state monitor system;T-S fuzzy logic

## 0 引 言

起重机工作过程中,吊钩频繁地进行起钩、平移、落钩等运动,不可避免地存在因吊钩摆幅过大而导致的安全隐患。因此对吊钩运动进行实时监控,不仅有助于起重机驾驶员掌握其工作状态,也可有效防止事故的发生。目前对吊钩运动状态的监控,主要是通过驾驶员的目测,这样难以准确掌握其运动过程,因此开发吊钩运动监控系统具有重要意义。由于吊钩结构本身的限制,所预留的空间极为有限,传统传感器

体积较大,不适合吊钩的安装,MEMS传感器具有体积小、成本低的天然优点,成为吊钩运动监控系统所需传感器的不二选择。

由于吊钩本身结构的限制及其工作环境的不确定性,国内外都较少开展对于起重机吊钩运动监控的研究。如文献[1]使用图像处理方式跟踪吊钩运动状态,不足之处在于图像算法复杂,且误判率比较高。吊钩水平方位角过大,将产生旋转位移,造成所吊重物位置的不确定,而文献[2-4]针对特型吊钩,仅给出了二维倾角测量方法。

本研究从起重机现场应用角度出发,采用MEMS加速度计和微磁强计组合,通过误差补偿,实现对吊钩倾角和水平方位角的实时监控,开发低成本、高精度的运动状态监控系统,不仅可满足起重机现场使用要求,也可以为起重机吊臂闭环控制系统的研究提供物理参量。

## 1 吊钩运动状态测量原理

吊钩主要由两部分构成:外框架和吊钩钩体(如图1所示)。外框架连接缆绳并起到固定支撑钩体的作用,钩体只能在外框架的支撑下做沿中心轴的单自由度旋转,吊钩运动状态的测量主要包含对吊钩沿缆绳垂直地面方向的二维倾角运动和沿钩体顶端水平方向的平面旋转角的测量,从吊钩结构可以看出,钩体和外框架的二维倾角相等,而对于平面内旋转,本研究更关心钩体及其所吊货物的当前状态。

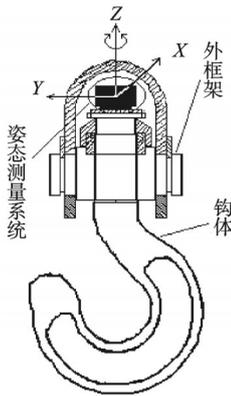


图1 吊钩终端安装示意图

本研究将姿态测量系统安装在吊钩钩体顶端,与之固连,定义载体坐标系如图1所示:  $X$  沿横轴向右,  $Y$  沿纵轴向前,  $Z$  轴沿缆绳垂直方向轴向上。如可实时测量得到该坐标系下相应物理量:  $X$  轴倾角、 $Y$  轴倾角、水平旋转角,即可确定吊钩的运动状态。

### 1.1 倾角解算方法

倾角指  $X$  轴和  $Y$  轴分别与水平面的夹角,反映当前吊钩相对缆绳垂直方向的倾斜程度,若倾角超出一定范围,驾驶员应当采取措施减小摆动<sup>[5]</sup>。

在吊钩这种缓慢运动的物体上安装的加速度计的各轴测量值可近似认为是重力加速度  $g$  在各轴的分量,按照空间矢量合成原理,可以得到沿  $X$ 、 $Y$  轴的倾角  $\alpha$ 、 $\gamma$  的计算公式分别为:

$$\alpha = \arcsin \frac{g_y}{\sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2}} \quad (1)$$

$$\gamma = \arcsin \frac{g_x}{\sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2}} \quad (2)$$

式中:  $g_x$ 、 $g_y$ 、 $g_z$ —三轴 MEMS 加速度计的测量值,根据

吊钩实际应用情况,本研究定义  $\alpha$ 、 $\gamma$  的取值范围为  $(0^\circ, 60^\circ)$ 。

### 1.2 平面旋转角解算方法

平面旋转角指吊钩绕  $Z$  轴相对初始角度的偏转角,主要反映吊钩的扭摆程度,若扭摆过大,则可能导致缆绳断裂或所吊重物碰撞到周边物体。三轴微磁强计可以输出立体空间内两两正交的 3 个轴的当前磁场强度值,磁强计通过测量地磁场强度确定吊钩的平面旋转角。本研究的初始角度取地磁北极方向。旋转角可以通过下面的公式计算:

$$\psi = \arctan \frac{Y_H}{X_H} \quad (3)$$

式中:  $X_H$ 、 $Y_H$ —磁强计读出的  $X$ 、 $Y$  轴磁场强度。

本研究定义  $\psi \in (0, 360^\circ)$ , 当确定参考初始位置角度后,即可测量出吊钩挂载后的相对参考值的旋转角度。

## 2 基于 T-S 模糊逻辑的吊钩旋转角误差补偿

吊钩及周边都为铁磁材料,不可避免地受到强磁干扰,严重影响旋转角的测量精度。文献[6]提出的四点补偿是一种常用的方法,该方法只适合弱磁环境下应用;文献[7]采用神经网络方法对磁强计的系统误差和温度进行补偿,但存在不易编程实现、计算量较大等不足,其工程化可行性不高<sup>[8]</sup>。本研究提出一种适合应用于强磁环境下的旋转角误差补偿方法。

如采用弱磁补偿方法,在铁磁材料的实验环境下的计算结果如表1所示。

表1 弱磁补偿法补偿结果

真值	$\eta/(^\circ)$	误差	真值	$\eta/(^\circ)$	误差
0	0	0	180	201.26	21.26
20	27.31	7.31	200	217.47	17.47
40	54.07	14.07	220	233.02	13.02
60	78.19	18.19	240	247.71	7.71
80	101.06	21.06	260	263.64	3.64
100	122.46	22.46	280	280.64	0.64
120	143.30	23.30	300	298.54	-1.46
140	163.37	23.37	320	316.38	-3.62
160	182.55	22.55	340	338.13	-1.87

从表1中可以看出,相对于参考值,其误差绝对值最大可达  $23.73^\circ$ , 均方差为  $20.36^\circ$ , 已不能作为测量值输出,需要经过在线补偿。本研究选用 T-S 模糊模型来对平面旋转角误差建模,借助 T-S 方法,建立非线性的模糊规则。

为简化运算,本研究建立二次局部T-S模型规则:

$$y = a_1\theta^2 + a_2\theta + b \quad (4)$$

式中:  $y$ —经过TS模型后的平面旋转角输出;  $\theta$ —补偿前平面旋转角读数;  $a_1, a_2, b$ —敏感系数。

式(4)也称为模糊基函数。

制定模糊规则是建立在实验与经验的基础上的,本研究把平面旋转角变化的论域 $[0^\circ, 360^\circ]$ 划分为6个模糊子集,所采用的隶属度函数如图2所示。

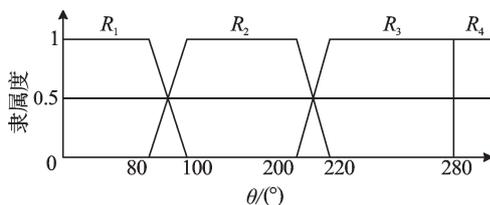


图2 模糊隶属度函数

在模糊逻辑算法中,  $a_1, a_2, b$  可视作线性局部模型系数,如能得到3个敏感系数,则可确定在  $R_i$  规则下的模糊基函数。本研究通过表1中的重复实验数据,采用最小二乘法来确定模糊基函数中的3个系数:

$$[a_{1i} \ a_{2i} \ b_i] = \begin{bmatrix} 0.001\ 016 & 0.686\ 9 & 0.132\ 1 \\ 0.001\ 136 & 0.662\ 8 & 1.432\ 3 \\ -0.000\ 503 & 1.514\ 0 & -104.863\ 9 \\ 0.002\ 786\ 7 & 2.773\ 9 & -279.185\ 8 \end{bmatrix} \quad (5)$$

这4组参数可视作局部规则中的线性因子,可通过实验数据提前得到,并预存于计算机中,作为实时推理所需调用参数。

对于补偿前的平面旋转角读数 $\theta$ ,其模糊推理类似于与该温度有关的所有规则的插值运算,各规则以在该温度条件下所分配的不同权重为根据,则权重表示如图3所示。在此例中,模糊输出值为:

$$y = \lambda_1 y_1 + \lambda_2 y_2 \quad (\lambda_1 + \lambda_2 = 1) \quad (6)$$

式中:  $\lambda_i$ —输入变量在规则  $R_i$  上的隶属度,也可以看成是第  $i$  条规则加权因子。

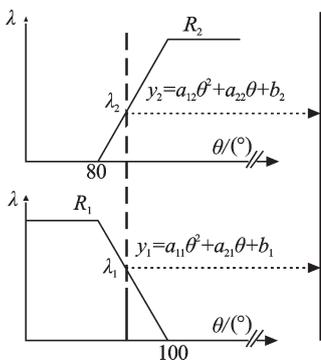


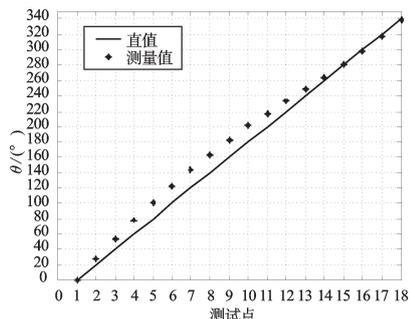
图3 模糊推理

为达到实际应用的目的,本研究采用重心法,将模糊集合映射为一个确定的点,对于任何输入平面旋转角读数,其模糊输出可写成:

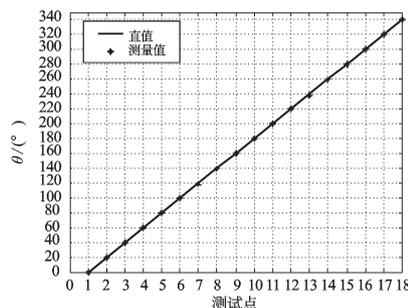
$$y = \frac{\sum_{i=0}^6 \lambda_i (b_i + a_{ri} T)}{\sum_{i=0}^6 \lambda_i} \quad (7)$$

式中:  $y$ —经过误差补偿后的平面旋转角输出。

本研究将表1数据作为模糊输入集合,经过模糊规则计算,输出结果如图4(b)所示,其误差绝对值最大不超过 $0.8^\circ$ ,均方差为 $0.54^\circ$ ,经过补偿后的精度有明显提高。



(a) 弱磁补偿法补偿效果



(b) 基于TS模糊逻辑的补偿算法效果

图4 不同补偿方法效果比较

### 3 系统实现

由于吊车的保养周期为几个月或1年,并且传感器进行在线标定后应避免频繁卸下,本研究引入安装误差,并在系统实现过程中考虑符合长期使用要求,如在线标定、低功耗等。

#### 3.1 系统功能模块

系统总体框架如图5所示,包含4个模块,分别是数据采集、信息处理、数传和控制显示模块<sup>[9-11]</sup>。

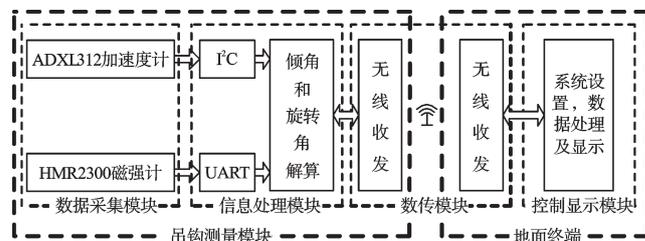
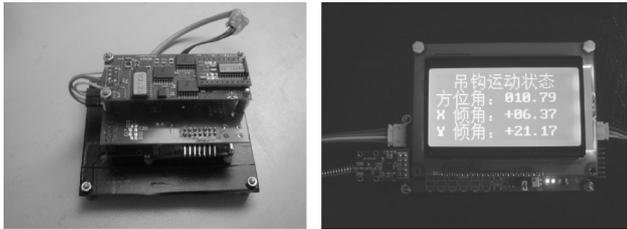


图5 系统总体框图

该系统采用ADI公司的三轴MEMS加速度计ADXL312作为倾角测量传感器,其量程为 $\pm 3\text{ g}$ ,精度

为 2.9 mg/LSB; 微磁强计采用 Honeywell 公司的 HMR2300。信息处理模块使用 TI 公司的低功耗 16 位单片机 MSP430F149, 实现对传感器的信号采集和姿态解算, 通过数传模块将姿态信息发送给地面终端; 地面终端通过相同的数传模块接收运动状态信息并控制液晶显示, 同时, 地面终端可以发送控制指令给吊钩终端, 例如磁强计校正参数指令、系统休眠指令等。系统实物如图 6 所示。



(a) 吊钩测量模块 (b) 地面终端  
图6 测量系统实物

### 3.2 方位角在线标定技术

在吊钩测量模块安装好后, 应尽量避免频繁拆下, 同时为满足测量系统在各型吊钩上的通用性, 采用一套在线标定技术是十分有必要的, 利用该技术, 本研究可以在测量系统安装好后通过地面终端发送指令设定补偿参数, 这样即使吊钩的使用环境变化后, 本研究也可以迅速、方便地对方位角进行遥控标定。以铁磁转台为例, 在线标定过程步骤如下: ①将测量模块水平安装在转台上, 并开机; ②地面终端发送标定指令给测量模块, 此时, 测量模块进入标定模式; ③按照第 2 节所述标定方法获得参数(式(5))后, 通过地面终端发送回测量模块并存储; ④地面终端发送标定完成指令, 测量模块进入正常工作状态。

### 3.3 低功耗技术

吊钩测量模块的电源设计是重点和难点之一, 不仅要满足各个模块供电电压, 同时还要兼顾系统总功耗。MEMS 器件本身即具有低功耗的优势, 如 ADXL312 本身带有多种低功耗模式, 如睡眠模式和待机状态。在正常工作模式下, 电流为 57  $\mu\text{A}$ , 而在待机模式下, 电流只有 0.1  $\mu\text{A}$ 。

地面终端为操作员提供了待机按钮, 可以通过数传模块发送指令给吊钩终端, 控制 MCU 切断传感器供电。恢复供电的方法与之类似。实验结果表明, 在待机状态下, 系统电流小于 5 mA。

## 4 实验分析与验证

为验证系统精度, 本研究用分度台及转台分别测试姿态角和平面旋转角的测量效果, 系统测试环境如图 7 所示。本研究通过读取分度台和转台的标称值,

并由接收终端得到的测量值进行比较。

本研究对倾角的测试如图 7(a)所示, 将系统固定于分度台上, 调整分度头水平零位, 与输出一致, 先对 X 轴方向的倾角进行测量, 参考点从  $(-60^\circ, 60^\circ)$ , 以  $10^\circ$  递增并记录系统的输出值, 其测量结果如表 2 所示。



(a) 分度头测量倾角 (b) 水平转台测量方位角

图7 系统测试环境

表2 X轴倾角数据

真值/ $^\circ$	$\alpha$ / $^\circ$	误差/ $^\circ$	真值/ $^\circ$	$\alpha$ / $^\circ$	误差/ $^\circ$
-10	-10.12	0.12	10	9.81	0.19
-20	-19.90	-0.1	20	19.75	0.25
-30	-29.88	-0.12	30	29.83	0.17
-40	-39.85	-0.15	40	39.74	0.26
-50	-49.88	-0.12	50	50.04	-0.14
-60	-60.17	0.17	60	60.08	-0.18

由表 2 可知, 相对参考值, X 轴倾角各测量点的最大误差不超过  $0.3^\circ$ , 均方差为  $0.15^\circ$ 。

本研究将系统转换  $90^\circ$  方向安装并对 Y 轴进行测量, 测量结果如表 3 所示, 计算得滚转角测量最大误差不超过  $0.3^\circ$ , 均方差为  $0.15^\circ$ 。

表3 Y轴倾角数据

真值/ $^\circ$	$\gamma$ / $^\circ$	误差/ $^\circ$	真值/ $^\circ$	$\gamma$ / $^\circ$	误差/ $^\circ$
0	0.03	0.03	10	9.82	0.18
-10	-9.86	0.14	20	19.87	0.13
-20	-20.11	-0.11	30	29.81	0.19
-30	-30.13	-0.13	40	39.78	0.22
-40	-40.15	-0.15	50	49.88	0.12
-50	-50.12	-0.12	60	59.81	0.19
-60	-60.17	0.17			

水平旋转角的测试在转台上进行, 如图 7(b)所示。转台由铁磁材料制作而成, 可以反映系统应用现场的强磁环境, 本研究将测量系统固定在转台上, 参考点从  $0^\circ$  起, 以  $20^\circ$  为增量递增到  $360^\circ$ , 测量结果如表 4 所示。

从表 4 中可以看出测量点的最大误差不超过  $0.8^\circ$ , 均方差为  $0.39^\circ$ 。相对于表 1 的在线补偿前数据, 精度提高了 25 倍。由此可知, 基于 T-S 模糊逻辑的补偿算法在实际应用中能有效提高水平旋转角精度。

表4 平面旋转角

真值/(°)	$\eta$ /(°)	差值/(°)	真值/(°)	$\eta$ /(°)	差值/(°)
0	0.13	0.13	180	180.74	0.74
20	19.65	-0.35	200	200.13	0.13
40	40.24	0.24	220	220.65	0.65
60	60.05	-0.05	240	239.35	-0.65
80	80.01	-0.01	260	259.38	-0.62
100	99.63	0.37	280	279.80	-0.20
120	119.73	0.27	300	300.56	0.56
140	140.02	0.02	320	319.66	-0.34
160	160.27	0.27	340	340.14	0.14

## 5 结束语

本研究从工程应用角度出发,不仅考察了起重机吊钩传感器的精度、带宽、量程等测量指标,同时对磁强计误差补偿、系统功耗以及系统组合进行了研究。从测量数据可以看出,俯仰角和滚转角精度达到 $0.3^\circ$ ,补偿后的平面旋转角精度达到 $0.8^\circ$ ,数据输出速率 $80\text{ Hz}$ ,可以满足用户需求。系统功耗实测正常工作电流 $50\text{ mA}$ ,待机电流小于 $5\text{ mA}$ 。驾驶员在驾驶室即可实时监控吊钩运动状态。

### 参考文献(References):

[1] 杨山虎,李彦明,刘成良. 基于吊钩动作智能跟踪的塔机图像监控[J]. 机电一体化,2010,5(4):25-28.

- [2] 喻言,张春巍,李芦钰,等. 大型铺管船吊钩摆动监测的无线倾角传感器集成与测试[J]. 传感技术学报,2007,20(12):2716-2719.
- [3] YU Yan, OU Jin-ping, ZHANG Jun, et al. Development of wireless MEMS inclination sensor system for swing monitoring of large-scale hook structures[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2009, 56(4): 1072-1077.
- [4] OU Jin-ping, ZHANG Chun-wei, LI Lu-yu, et al. Swing Motion Control of Flexible Suspended Hook Structure System [C]//4th World Conference on Structural Control and Monitoring, Portugal: [s.n.], 2006: 11-13.
- [5] 蒋庆仙,马小辉,陈晓璧,等. 双轴倾角传感器的设计与实现[J]. 传感器与微系统,2009,28(12):86-88.
- [6] 曾庆化,刘建业,李荣冰. 基于恒定姿态误差的磁罗差偏差补偿算法研究[J]. 传感器与微系统,2006,25(4):31-34.
- [7] 焦飞,赵忠,王璐. 基于RBF神经网络的全姿态磁航向误差建模与补偿[J]. 测控技术,2007,26(10):85-87.
- [8] GEBRE E D. Magnetometer autocalibration leveraging measurement locus constraints[J]. **Journal of Aircraft**, 2007, 44(4): 1361-1368.
- [9] 魏萍,韩波,李平. 基于S3C44B0X的航姿测量系统的设计与实现[J]. 机电工程,2006,23(4):17-20.
- [10] 刘业颜,郑文. 基于WINSOCK的远程信号采集与分析系统[J]. 机电工程技术,2010,39(1):28-29.
- [11] 张震,王剑,黄国辉,等. 高性能通用温度采集仪的研制[J]. 机电工程,2010,27(3):80-84.

[编辑:张翔]

(上接第901页)

- [5] CALVO A P, VELAZQUEZ V F, ZEPEDA S A, et al. Topological design approach for an electrical car chassis [N]. SAE Technical Paper, 2011-01-0069.
- [6] BENDSOE M P, KIKUCHI N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method [J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 1988, 71(2): 197-224.
- [7] PARIS J, NAVARRINA F, COLOMINAS I, et al. Topology optimization of continuum structures with local and global stress constraints [J]. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, 2009, 39(4): 419-437.
- [8] SUI Y K, YE H L, PENG X R. Topological optimization of continuum structure with global stress constraints based on ICM method [J]. **Computational Methods**, 2006(PTS1-2): 1003-1014.
- [9] LIN Jiang-zi, LUO Zhen, TONG Li-yong. A new multi-objective programming scheme for topology optimization of compliant mechanisms [J]. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, 2010, 40(1-6): 241-255.
- [10] XIE Y M, STEVEN G P. Evolutionary Structural Optimization [M]. Berlin: Springer Verlag, 1997.
- [11] HUANG X, XIE Y M. Bi-directional evolutionary topology optimization of continuum structures with one or multiple materials [J]. **Computational Mechanics**, 2009, 43(3): 393-401.
- [12] HUANG X, ZUO Z H, XIE Y M. Evolutionary topological optimization of vibrating continuum structures for natural frequencies [J]. **Computers & Structures**, 2010, 88(5-6): 357-364.
- [13] SUN X F, YANG J, XIE Y M. Topology optimization of composite structure using bi-directional evolutionary structural optimization method [J]. **Procedia Engineering**, 2011(14): 2980-2985.
- [14] 赵德斌,樊军,厉国柱. 基于ANSYS的自行车车架拓扑优化设计[J]. 工程设计学报, 2009, 12(5): 391-394.
- [15] 孙蕾,任晓琳,孟辉. 基于ANSYS的桥梁结构拓扑优化设计[J]. 中国高新技术企业, 2009(20): 38-39.

[编辑:张翔]