

基于扩展卡尔曼滤波的吊钩姿态估计技术研究

杜署明, 郭源博, 张晓华

(大连理工大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 针对吊钩运动不定且易受大风、雾气等影响其作业效率问题, 提出并实现基于 MEMS 传感器的吊钩姿态估计系统; 建立吊钩三维空间运动模型, 消除吊钩扭转影响; 通过四元数的扩展卡尔曼滤波算法, 对 MEMS 陀螺仪、加速度计与磁强计进行数据融合, 解算得到吊钩三维姿态、摆角与摆向; 采用基于视觉检测的吊钩空间姿态为参考基准, 对起重机吊钩进行姿态估计验证; 实验结果表明: 该系统能有效融合 MEMS 传感器数据, 获得高精度的吊钩姿态, 实现姿态的实时检测。

关键词: 运动模型; 扩展卡尔曼滤波; MEMS 传感器; 视觉检测

Attitude Estimation of Crane Hook Based on Extended Kalman Filter

Du Shuming, Guo Yuanbo, Zhang Xiaohua

(College of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: An attitude estimation of crane hook system based on Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) sensors is proposed to address the problem of the inefficiency of crane due to the unstable movement of hook, the windy condition and foggy weather. A three-dimensional hook motion model is built to eliminate the negative effects of hook torsion; by fusing the data acquired from the MEMS gyroscope, accelerometer and magnetometer, the error quaternion extended kalman filter is implemented to solve the variables of attitude angle, oscillating angle and swing angle; Implementation using the designed attitude detection platform of crane based on visual inspection technology has been performed to verify the estimation. Experimental results illustrate the proposed system can effectively fuse the MEMS sensor data, achieve highly precise attitude and realize real-time detection.

keywords: motion model; extended Kalman filter; MEMS sensors; visual inspection

0 引言

随着工业经济的不断发展, 生产效率的日益提高, 起重行业也得到了空前的发展。目前已经广泛应用在重物搬运、救援现场、高空作业等很多领域, 受到了人们越来越多的关注。

然而, 在起重机作业过程中, 吊钩运动方向、位置不定, 容易因摆幅过大降低搬运效率。同时, 当工作现场多风、有雾气时, 会对吊钩运动产生影响, 操作员视野受阻容易发生操作失误, 甚至发生安全事故。实现对吊钩运动姿态的实时监测, 为稳钩措施提供了前提与保证, 有助于提高工作效率、避免意外情况的发生, 具有十分重要的意义。

目前, 以吊绳为观察对象, 采用图像处理的方式^[1], 对吊钩摆动进行监测, 算法复杂度高, 易受到雾气等作业环境的影响; 利用 MEMS 倾角传感器检测吊钩运动^[2], 提供了二维倾角测量, 未分析吊钩三维运动。

本文采用基于四元数的扩展卡尔曼滤波对 MEMS 传感器进行数据融合, 避免了图像处理的局限性; 给出三维吊钩姿态模型, 分析了吊钩三维运动过程, 减小吊钩扭转带来的干扰, 实现了高精度的吊钩姿态估计。

1 吊钩姿态估计系统模型

为便于模型分析, 将实际吊车系统抽象得到如图 1 所示的系统模型。

收稿日期: 2014-11-12; 修回日期: 2015-01-09。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51377013, 51407023)。

作者简介: 杜署明(1990-), 男, 山西运城人, 硕士, 主要从事惯性导航, 嵌入式系统设计方向研究。

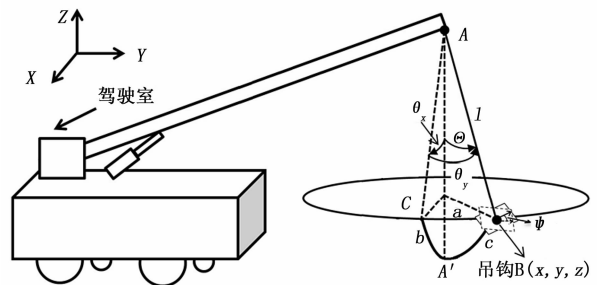


图 1 吊车系统模型

图 1 中, 建立吊钩某一时刻所在位置坐标系, 以地面为导航坐标系 XYZ , 吊钩载体坐标系为 $X'Y'Z'$ 。当吊钩垂直静止时, 吊钩载体坐标系 $X'Y'Z'$ 与导航坐标系 XYZ 重合。A 点为吊绳 l 与悬臂连接处, $B(x, y, z)$ 点为吊钩, 吊钩空间摆角为 Θ 。当 l 一定时, 可将吊钩空间摆动等效为球面运动, 对于球面三角形 $\Delta A'BC$, 顶点 A', B, C 为球面上的点, 弧长 a, b, c 的夹角构成的顶角, 用 A', B, C 表示, 吊钩 B 点在摆动中顺时针扭转 φ 角。

分析可知, 摆角 Θ 可由摆动 θ_x 和 θ_y 两个分运动合成, 其中, θ_x 为吊绳 l 在 XZ 平面的投影与 Z 轴的夹角, θ_y 为吊绳 l 与 XZ 平面的夹角。

针对上述模型, 建立系统整体设计框架, 如图 2 所示。固连于吊钩上的 MEMS 传感器得到吊钩运动信号; 经数据处理单元解算得到吊钩偏航角 ψ 、俯仰角 θ 、横滚角 γ 和扭转角 φ ; 最后通过无线模块与地面通信并实现参数配置。

根据欧拉角定义可知, 摆角分量 θ_x 和 θ_y 分别为横滚角 γ

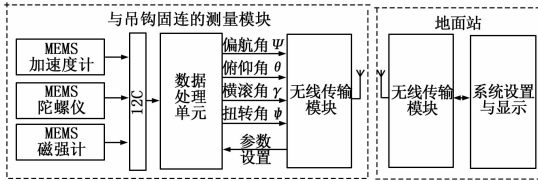


图 2 姿态估计系统框图

和俯仰角 θ ，即求取吊钩的姿态角即可得到其摆角 Θ 。

1.1 建立吊钩扭转模型

在实际作业过程中，大风、驾驶员操作不当等原因，会导致吊绳发生扭转，严重时甚至会发生吊绳断裂。为检测吊绳扭转角度，消除扭转对摆角及摆向测量，需要建立吊钩扭转模型，以消除扭转对姿态估计的影响。

若吊钩已发生扭转，建立空间矢量在载体坐标系与导航坐标系的关系，即姿态矩阵 C_n^b ：

$$C_n^b = \begin{bmatrix} c\gamma'c\psi' + s\gamma's\psi's\theta' & -c\gamma's\psi' + s\gamma'c\psi's\theta' & -s\gamma'c\theta' \\ s\psi'c\theta' & c\psi'c\theta' & s\theta' \\ s\gamma'c\psi' - c\gamma's\psi's\theta' & -s\gamma's\psi' - c\gamma'c\psi's\theta' & c\gamma'c\theta' \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中： c 和 s 分别代表 \cos 和 \sin ，扭转后吊钩偏航角 ψ' 、俯仰角 θ' 和横滚角 γ' 。

而当吊钩发生扭转，等效于其在未扭转时的姿态矩阵 C_n^b 基础上，再次绕载体坐标系 Z 轴顺时针旋转 φ 角。得到此时的姿态矩阵 T_n^b ：

$$T_n^b = \begin{bmatrix} c\psi(\cos\alpha\omega - s\psi(\sin\alpha\omega + \cos\gamma's\theta)) & c\psi(\sin\alpha\omega + \cos\gamma's\theta) & s\psi c\gamma\omega & s\alpha s\theta - c\alpha c\gamma s\gamma \\ -s\psi(\cos\alpha\omega - s\alpha s\gamma s\theta) - c\psi c\gamma\omega & c\psi(\cos\alpha\omega - s\alpha s\gamma s\theta) - c\gamma s\psi\omega & c\alpha s\theta + c\theta s\alpha s\gamma & \\ c\psi s\gamma + c\gamma s\psi s\theta & s\psi s\gamma - c\psi c\gamma s\theta & c\gamma c\theta & \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过对比式 (1) 与 (2) 可得：

$$\begin{cases} \sin\theta = M\sin\varphi\tan\gamma' + \cos\varphi\sin\theta' \\ Mtan\varphi = -\sin\varphi\sin\theta' + M\cos\varphi\tan\gamma' \end{cases} \quad (3)$$

式中， $M = \cos\theta\cos\gamma$ 。根据扭转角和扭转后的俯仰角 θ' 与横滚角 γ' ，可以求得吊钩扭转角的俯仰角 θ 和横滚角 γ 。为求解摆角 Θ ，由图 1 得：

$$\cos a = \cos\theta_x, \cos b = \cos\theta_x, \cos c = \cos\Theta \quad (4)$$

分析摆角 Θ 的两个分运动可知，顶角 C 为 90° ，根据球面三角形余弦定理可知：

$$\sin a \sin b \cos C = \cos c - \cos a \cos b = 0 \quad (5)$$

结合式 (4)、(5) 可得：

$$\cos\Theta = \cos\theta_x \cos\theta_y = M \quad (6)$$

由上式可以看出， M 仅与摆角 θ 的余弦有关。当摆角一定时，无论吊钩是否扭转，均不影响 M 值。结合式 (3)、(6) 即可求得吊钩空间摆角 Θ 。

1.2 吊钩投影偏向角解算

除吊钩姿态及摆角外，还需解算吊钩摆动时其在水平面的投影偏向角，即吊钩摆向。以吊钩静止处于垂直位置，相对于地理北极的角度 ψ 为基准，测量吊钩投影偏向角 Φ 。

如图 1 所示，根据球面三角形正弦定理：

$$\frac{\sin\theta}{\sin A'} = \frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin c}{\sin C} = \sin\Theta \quad (7)$$

角 A' 为平面 ACA' 与平面 ABA' 的夹角，即相对于初始

角度 ψ 的偏向角 Φ 。当吊钩摆动过程中，偏向角在 $\psi + \Phi$ 与 $\psi + 180^\circ - \Phi$ 两值间每隔半个摆动周期切换一次。

可以看到，采用上述吊钩三维姿态估计模型，消除了吊钩扭转的影响，并对吊钩的三维姿态角、摆角、投影偏向角进行了分析。

2 吊钩姿态解算

2.1 扩展卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波方程是一种线性最小方差估计，采用实时递推的方法，经过状态更新和量测更新两个过程，能够从量测信息中提取出被估计信息，适用于多维随机过程估计，具有计算机实现方便，实时性好等优点^[3]。

而姿态估计中所遇到的系统模型是非线性的，无法直接使用卡尔曼滤波方程进行迭代求解，这里采用扩展卡尔曼滤波算法对吊钩姿态估计进行求解^[4]。

2.2 扩展卡尔曼滤波器设计

首先建立吊钩姿态估计离散系统的状态方程：

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{f}[\mathbf{X}_{k-1}, \mathbf{W}_{k-1}, k-1] \quad (8)$$

这里选取四元数为状态量，采用三阶毕卡算法对四元数进行更新，由于近似的三阶毕卡算法为线性方程，故状态方程无需进行线性化处理，得到：

$$\mathbf{Q}_k = \left[\mathbf{I} \left(1 - \frac{\Delta\theta^2}{8} \right) + \left(\frac{1}{2} - \frac{\Delta\theta^2}{48} \right) \Delta\Theta \right] \mathbf{Q}_{k-1} + \mathbf{G}\mathbf{W}_{k-1} \quad (9)$$

$$\mathbf{Q}_k = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T \quad (10)$$

$$\Delta\Theta = \begin{bmatrix} 0 & -\Delta\theta_x & -\Delta\theta_y & -\Delta\theta_z \\ \Delta\theta_x & 0 & \Delta\theta_z & -\Delta\theta_y \\ \Delta\theta_y & -\Delta\theta_z & 0 & \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_z & \Delta\theta_y & -\Delta\theta_x & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\Delta\theta^2 = \Delta\theta_x^2 + \Delta\theta_y^2 + \Delta\theta_z^2 \quad (12)$$

其中： $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z$ 为陀螺仪采样时间间隔内的角增量。

建立系统观测方程，这里选取加速度计与陀螺仪的实测值为观测值，利用四元数姿态矩阵建立系统的观测方程：

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{h}[\mathbf{X}_k, \mathbf{V}_k, k] \quad (13)$$

$$\mathbf{Z}_k = [a_x, a_y, a_z, m_x, m_y, m_z]^T \quad (14)$$

$$\mathbf{h}[\cdot] = \begin{bmatrix} C_n^b & 0 \\ 0 & C_n^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{g}} \\ \tilde{\mathbf{m}} \end{bmatrix} + \mathbf{V}_k \quad (15)$$

其中： $a_x, a_y, a_z, m_x, m_y, m_z$ 分别为加速度计和磁强计 XYZ 轴的实测值， $\tilde{\mathbf{g}}, \tilde{\mathbf{m}}$ 分别为重力加速度和地磁场在导航坐标系下的矢量， C_n^b 为四元数表示的姿态矩阵^[5]。

对上式观测方程进行线性化，求解得到雅克比矩阵：

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{H}}_k^g \\ \tilde{\mathbf{H}}_k^m \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial h_1[\mathbf{Q}(t_k), t_k]}{\partial \mathbf{Q}_0(t_k)} & \frac{\partial h_1[\mathbf{Q}(t_k), t_k]}{\partial \mathbf{Q}_1(t_k)} & \frac{\partial h_1[\mathbf{Q}(t_k), t_k]}{\partial \mathbf{Q}_2(t_k)} & \frac{\partial h_1[\mathbf{Q}(t_k), t_k]}{\partial \mathbf{Q}_3(t_k)} \\ \frac{\partial h_2[\mathbf{Q}(t_k), t_k]}{\partial \mathbf{Q}_0(t_k)} & \frac{\partial h_2[\mathbf{Q}(t_k), t_k]}{\partial \mathbf{Q}_1(t_k)} & \frac{\partial h_2[\mathbf{Q}(t_k), t_k]}{\partial \mathbf{Q}_2(t_k)} & \frac{\partial h_2[\mathbf{Q}(t_k), t_k]}{\partial \mathbf{Q}_3(t_k)} \\ \frac{\partial h_3[\mathbf{Q}(t_k), t_k]}{\partial \mathbf{Q}_0(t_k)} & \frac{\partial h_3[\mathbf{Q}(t_k), t_k]}{\partial \mathbf{Q}_1(t_k)} & \frac{\partial h_3[\mathbf{Q}(t_k), t_k]}{\partial \mathbf{Q}_2(t_k)} & \frac{\partial h_3[\mathbf{Q}(t_k), t_k]}{\partial \mathbf{Q}_3(t_k)} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中， $\tilde{\mathbf{H}}_k^g$ 与 $\tilde{\mathbf{H}}_k^m$ 表达形式类似，只是相应的向量函数发生变化， $\tilde{\mathbf{H}}_k^g$ 中的向量函数 h_1, h_2, h_3 为姿态矩阵 C_n^b 与重力加速度 $\tilde{\mathbf{g}}$ 相乘得到，而 $\tilde{\mathbf{H}}_k^m$ 的向量函数为姿态矩阵 C_n^b 与地磁场 $\tilde{\mathbf{m}}$ 相乘

得到。

系统噪声和量测噪声分别为:

$$\begin{cases} \mathbf{W}_{k-1} = [\omega_{q0}, \omega_{q1}, \omega_{q1}, \omega_{q1}]^T \\ \mathbf{V}_k = [v_{ax}, v_{ax}, v_{ax}, v_{mx}, v_{mx}, v_{mx}]^T \end{cases} \quad (18)$$

\mathbf{W}_{k-1} 与 \mathbf{V}_k 均为不相关的高斯白噪声序列, 将上述建立的离散系统方程 (9)、(13)、(16) 按照离散型非线性扩展卡尔曼滤波器的计算步骤进行迭代更新^[6], 即可得到估计的四元数, 从而实现姿态角的估计更新。

3 实验结果与分析

3.1 姿态估计模块测试

为了验证上述方案, 以高精度的产品惯性导航模块 SDI-MAHRS 为基准, 对实验使用的 iNEMO 惯性模块进行姿态角测试。其中, 加速度计与磁强计采用 LSM303DLH 六轴 MEMS 传感器, 陀螺仪使用 LPR430AL 和 LY33ALH 作为角速度检测, 利用 STM32 处理器进行姿态解算, 得到图 3、图 4、图 5。

模块 SDI-MAHRS 俯仰角与横滚角静态精度小于 0.1° , 偏航角小于 0.5° , 俯仰角与横滚角动态精度小于 1.0° , 偏航角小于 2.0° 。通过测试得到, 设计的模块动态条件下偏航角最大误差角为 3.54° , 1σ 精度为 2.51° ; 俯仰角与横滚角最大误差角小于 1.34° , 1σ 精度小于 0.57° , 满足姿态估计要求。

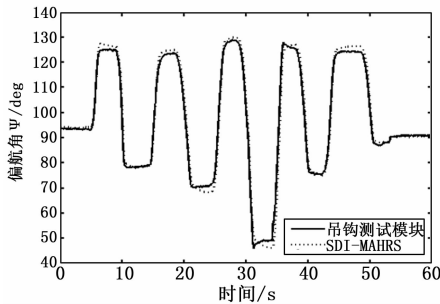


图 3 偏航角 ψ 测试对比

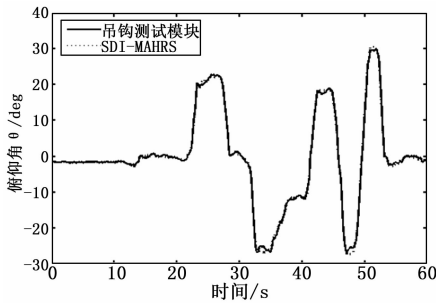


图 4 俯仰角 θ 测试对比

3.2 吊钩姿态估计测试

在保证测量模块精度的基础上, 需对模拟吊钩进行姿态估计, 实验平台如图 6 所示。

本文设计的吊钩姿态估计系统中, 在模拟吊钩底部安装激光头, 利用视觉测量系统检测光斑位置获得吊钩三维摆角, 以此为基准与设计的吊钩姿态估计模块比较。

首先, 将吊钩摆至一定角度, 使其自由运动, 由于吊钩在实际自由摆动过程中, 发生一定程度的扭转, 造成偏航角发生波动。同时, 该扭转相应地影响俯仰角和横滚角的测量。

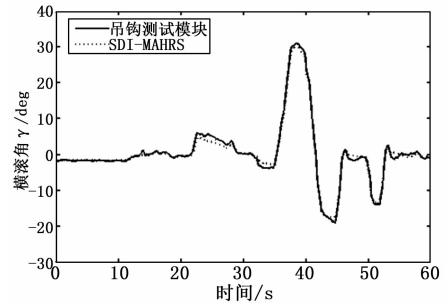


图 5 横滚角 γ 测试对比

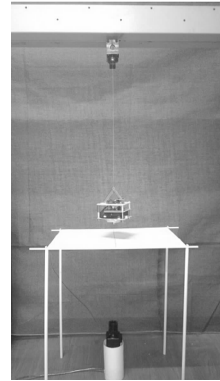


图 6 吊钩姿态估计系统实物图

利用前述建立的扭转模型和水平投影偏向角算法, 得到吊钩实时摆角与摆向如图 7、图 8 所示。

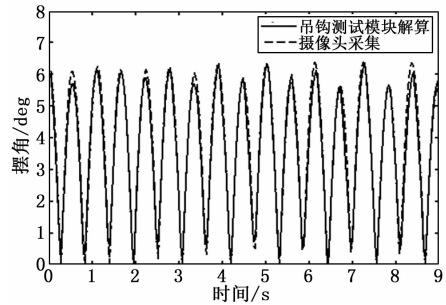


图 7 吊钩自由摆动摆角变化曲线图

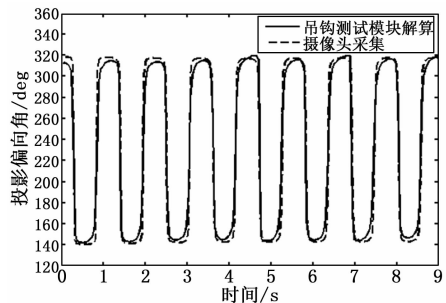


图 8 吊钩自由摆动摆向变化曲线图

由图 7、8 可知, 吊钩测试模块与摄像头采集所得吊钩三维空间摆角几乎重合, 最大误差角为 0.38° , 投影偏向角全方位指向偏差百分比 2.11% 。

(下转第 2507 页)

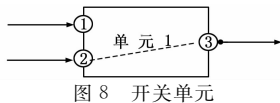


图 8 开关单元

针对故障模式不确定情况下的建模问题, 端信号模型允许定义故障与功能的关联关系为有时影响 (SOMETIMES AFFECTS), 表示故障模式对端口输出功能的可能影响。

表 1 开关单元信号映射

目标信号	源信号集	关联模式	表决阈值
端口信号[3]	端口信号[1]	任务模式①	100%
端口信号[3]	端口信号[2]	任务模式②	100%

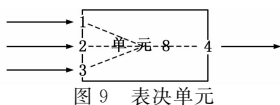


表 2 表决单元信号映射

目标信号	源信号集	关联模式	表决阈值
端口信号[4]	端口信号[1] 端口信号[2] 端口信号[3]	/	67%

基于端信号模型, 我们研发了电子装备综合诊断辅助软件, 支持基于电路网表创建模型, 并实现了 FMECA、测试性分析和预计、故障诊断等功能。图 10 为应用该软件所创建的图 1 所示的组合逻辑电路模型。

4 结论

作为主流测试性框图模型, 多信号模型建模需要更多的人工投入, 但模型描述相对更为精细; 混合诊断模型优势则体现在能够支持从 EDA、CAD 文件直接转化生成模型, 同时, 基于模型能够直接得到故障-测试的关联性 (测试覆盖故障集)。

综合二者所长, 模型改进方案通过将组元端口和结点所通过信息流直接视作信号, 组元端口与实际端口相对应, 引入结点, 省掉开关节点和表决节点, 增强了模型图与电子装备原理图一致性, 从而能够支持基于 EDA 文档例如网表文件自动化建模; 通过扩充信号映射定义, 在减少了图元节点的同时细化

(上接第 2503 页)

4 结语

本文针对吊钩特殊结构, 提出并建立吊钩姿态估计模型, 并与高精度产品模块进行对比, 在设计吊钩三维姿态估计平台上进行了测试, 理论分析和实验结果表明:

- 1) 吊钩扭转模型有效地消除了扭转对姿态估计带来的影响;
- 2) 四元数扩展卡尔曼滤波算法有效地对 MEMS 传感器进行数据融合, 迭代解算, 能应用于低成本的吊钩测量模块中;
- 3) 设计的吊钩姿态估计平台能够实现吊钩的三维空间姿态测量与验证。
- 4) 平台所用的吊钩测量模块提供姿态误差角小, 为进一步实现吊钩防摆打下基础。

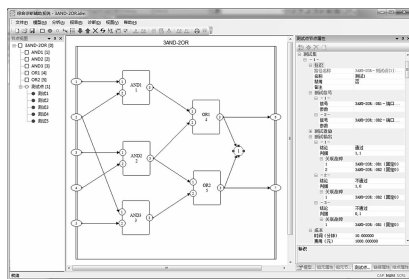


图 10 组合逻辑电路的端信号模型

了对信号传递过程的描述, 允许定义多输出测试, 使得通过模型图能够获得更为精确的故障-测试关联性。

参考文献:

- [1] 邱静, 刘冠军, 杨鹏, 等. 装备测试性建模与设计技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [2] Somnath Deb, Krishna R. Pattipati, Vijay Raghavan, et al. Multi-Signal Flow Graphs: A Novel Approach for System Testability Analysis and Fault Diagnosis [A]. Proc. IEEE AUTOTESTCON 1994 [C]. 1994: 361-373.
- [3] Eric Gould. Modeling It Both Ways: Hybrid Diagnostic Modeling and Its Application to Hierarchical System Designs [A]. Proc. IEEE AUTOTESTCON 2004 [C]. 2004: 361-373.
- [4] 龙兵, 王日新, 姜兴渭. 基于多信号模型航天器配电系统最优测试技术 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37 (4): 10-13.
- [5] 杨智勇, 许化龙, 许爱强. 基于多信号模型的故障诊断策略设计 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (2): 1616-1619.
- [6] 孔令宽. 基于多信号模型的卫星故障诊断技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [7] 林志文, 贺喆, 刘松风. 基于多信号模型的系统测试性分析与评估 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (2): 222-224.
- [8] 王成刚, 周晓东, 彭顺堂, 等. 一种基于多信号模型的测试性评估方法 [J]. 测控技术, 2006, 25 (10): 13-15.
- [9] 何光进, 叶晓慧, 王红霞. 多信号模型在故障诊断中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (1): 25-27.
- [10] 蒋俊荣, 黄考利, 吕晓明, 等. 基于混合诊断模型的测试性建模技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (12): 2690-2693.

参考文献:

- [1] Li Y, Gong L, Song J H, et al. ARM based load and hook measuring and tracking for precision hoist of tower crane [A]. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation [C]. Takamatsu, Japan, 2013: 1191-1196.
- [2] Yu Y, Ou J. P, Zhang J, 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): 1072-1078.
- [3] 唐小军, 阎杰, 张绪斌. 单球无味卡尔曼滤波在飞船姿态估计技术中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (9): 1822-1825.
- [4] 夏琳琳, 赵琳, 刘黎明, 等. 陆用 AHRS/GPS 紧耦合系统的迭代 EKF 算法 [J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15 (6): 707-712.
- [5] 秦永元. 惯性导航 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [6] Guo H Y, Hong C, Xu F, et al. Implementation of EKF for Vehicle Velocities Estimation on FPGA [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (9): 3823-3835.