

文章编号: 1001-2486(2000)05-0087-06

# 基于模型参数辨识的动力调谐陀螺故障诊断方法\*

杨定新, 陶俊勇, 陶利民

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 提出了基于动调陀螺转子动力学模型参数辨识的陀螺故障诊断方法, 详细探讨了其中的关键技术, 并以某型捷联惯导系统中的动调陀螺为对象, 在实测信号的基础上进行了故障仿真与实际诊断。结果表明该方法能有效地诊断动调陀螺故障, 具有一定的实际应用价值, 并为陀螺故障诊断研究提供了新的途径和思路。

**关键词:** 动力调谐陀螺; 参数辨识; 故障诊断

中图分类号: TP277 文献标识码: A

## The Diagnosis of DTG Based on Parameter Estimation Method

YANG Ding-xin, TAO Jun-yong, TAO Li-min

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A parameter estimation method is proposed for Dynamic Tuned Gyro (DTG) fault diagnosis based on kinetics model of rotor. Fault simulation and diagnosis experiments are carried out on the DTG of a strapdown inertial navigation system. The results show that the parameter estimation method is very efficient and practical, providing a new approach and idea for the gyro fault diagnosis.

**Key words:** dynamic tuned gyro; parameter estimation; fault diagnosis

陀螺是惯性导航系统的核心部件, 对其进行实时监测和故障诊断, 是保障惯导系统精度与可靠性的重要手段。有资料表明, 惯性平台故障中的 60% 属于陀螺故障, 因此陀螺故障诊断技术受到了广泛重视, 对陀螺组件失效等硬故障的诊断一般容易实现, 但对陀螺漂移等性能逐渐恶化的软故障诊断则具有很大困难。目前对陀螺软故障诊断一般采用奇偶向量法<sup>[1]</sup>、时间序列分析法<sup>[2]</sup>等, 奇偶向量法依赖于陀螺的余度配置, 在实际应用中受到一定的限制; 时间序列分析法在静电陀螺故障诊断中应用较成功。本文提出了基于模型参数辨识的动调陀螺故障诊断方法, 对其中的一些关键技术, 如: 信号获取与滤波、参数辨识、故障决策等进行了详细的研究。最后在某型捷联惯导系统动调陀螺实测信号的基础上进行了故障仿真与实际诊断, 结果表明该方法能准确、有效地诊断动调陀螺故障, 具有较好的实际应用价值。

## 1 基于参数辨识的故障诊断方法

一个系统可以用包含状态变量或输入输出变量的动态模型来描述, 常写成微分方程形式

$$y(t) + a_1 \dot{y}(t) + a_2 \ddot{y}(t) + \dots + a_n y^{(n)}(t) = b_0 u(t) + b_1 \dot{u}(t) + \dots + b_m u^{(m)}(t) \quad (1)$$

其中, 模型参数为  $\theta = [a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m]^T$ 。

当系统发生故障时, 通常表现为物理参数  $P$  的变化, 而物理参数的改变会引起系统模型参数的改变, 参数辨识法正是根据模型参数  $\theta$  与物理参数  $P$  之间存在的映射关系, 通过辨识系统模型参数, 并监测模型参数的变化来实现故障诊断的。基于参数辨识的故障诊断方法的一般步骤, 详见文献[3]。

## 2 动调陀螺的动力学模型描述

便于实际应用的二自由度动调陀螺动力学方程描述如下<sup>[4]</sup>

$$J\ddot{\alpha} + c\dot{\alpha} + k\alpha + L\beta + \mathcal{N} = M_x$$

\* 收稿日期: 2000-04-19  
基金项目: 国家预研基金项目(97J9.3.6KG0136)  
作者简介: 杨定新(1975), 男, 博士生。

$$J\ddot{\beta} + c\dot{\beta} + k\beta - L\ddot{\alpha} - \lambda\dot{\alpha} = M_y \tag{2}$$

式中,  $\alpha, \beta$  为陀螺转子自转轴相对壳体坐标系  $x_c$  和  $y_c$  轴的偏角;  $J$  为陀螺横向转动惯量,  $J = J_e + (I_e/2)$ ;  $L$  为陀螺动量矩,  $L = (J_z + I_e)\theta$ ;  $\lambda$  为正交弹簧刚度,  $\lambda = (c + D)\theta$ ;  $k$  为同向弹簧刚度,  $k = K - [I_e - (I_z/2)]\theta^2$ ;  $M_x, M_y$  为沿壳体坐标系的  $x_c$  和  $y_c$  轴作用于转子的控制力矩及干扰力矩;  $J_e, J_z$  为陀螺转子的横向转动惯量和极转动惯量;  $I_e, I_z$  为平衡环的横向转动惯量和极转动惯量;  $\theta$  为陀螺转子的额定转速;  $c$  为挠性轴内阻力系数;  $D$  为转子的外阻力系数;  $K$  为挠性轴弹簧刚度。

### 3 模型参数辨识方法

#### 3.1 陀螺输入输出数据获取及预处理

某捷联惯导系统中动调陀螺各信号连接关系如图 1 示。

陀螺  $x, y$  力矩器低端的电压  $U_x, U_y$  反映了控制力矩  $M_x, M_y$  的大小, 作为系统输入量, 并有如下关系:

$$\begin{aligned} M_x &= K_u U_x \\ M_y &= K_u U_y \end{aligned} \tag{3}$$

式中,  $K_u$  为比例常数。

陀螺两个自由度方向上前置放大器经解调后的输出电压  $U_{ix}, U_{iy}$  反映了转子自转轴相对壳体偏角  $\alpha$  和  $\beta$  的大小与方向, 作为系统输出量, 并有如下关系:

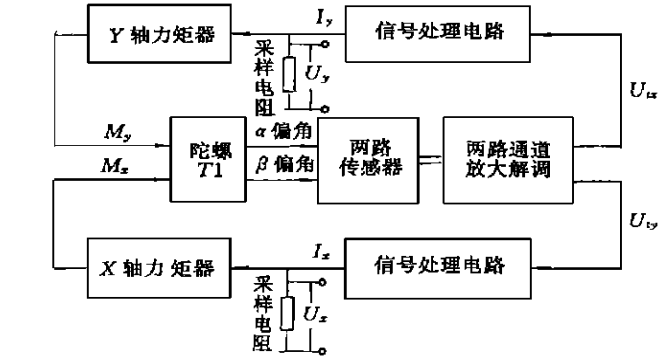


图 1 陀螺 T1 输入输出信号连接关系

Fig 1 Connection of I/O signals of gyro T1

$$\begin{aligned} \alpha &= K_T U_{ix} \\ \beta &= K_T U_{iy} \end{aligned} \tag{4}$$

式中,  $K_T$  为比例系数。

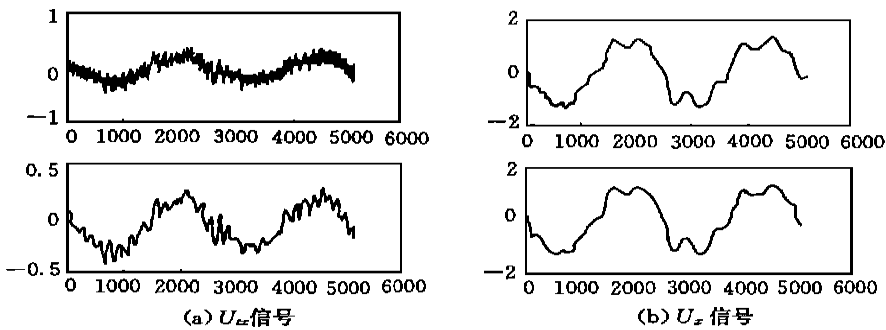


图 2 输入输出信号滤波前后时域波形

Fig. 2 Time domain waveforms of I/O signals after and before filtering

系统输入输出信号频率成分主要为低频分量(50Hz 以下), 实验中采样频率为 1kHz, 由于存在噪声干扰, 信号不能直接用于参数辨识, 须经滤波处理, 采用巴特沃兹低通滤波器, 取截止频率  $\omega_c = 50\text{Hz}$ , 根据滤波效果确定滤波器的阶次为 6 阶, 信号滤波前后波形如图 2 所示, 横坐标为采样点数, 纵坐标为信号幅值(V), 图中只给出了  $U_{ix}, U_{iy}$  信号。

#### 3.2 批处理最小二乘参数辨识法

参数辨识方法很多, 本文采用不同形式的最小二乘类方法辨识动调陀螺动力学方程的模型参数, 并与理论值进行比较, 根据实验结果确定在不同应用场合适宜的辨识方法。批处理最小二乘法习惯上称

为最小二乘法, 其所用的模型及具体算法详见文献[3]。

用最小二乘法辨识陀螺动力学方程(2)式中的第 1 式的模型参数, 设采样时间间隔为  $T$ , 将第 1 式离散化, 用后向一阶差分替换相应变量的一阶微分, 二阶差分替换二阶微分, 并变换成最小二乘格式如下

$$z(k) = \Phi^T(k) \theta \tag{5}$$

式中,  $z(k) = U_{ix}(k)$ ,  $\Phi^T(k) = [U_{ix}(k-1), -U_{ix}(k-2), -U_{iy}(k), U_{iy}(k-1), U_x]$ ,

$\theta = [a_2/a_1, a_3/a_1, b/a_1, b_2/a_1, K_u/a_1]^T$ , 记  $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5]$ ,

$$a_1 = \frac{J}{T^2} + \frac{c}{T} + k, a_2 = \frac{2J}{T^2} + \frac{c}{T}, a_3 = \frac{J}{T^2}, b_1 = \frac{L}{T} + \lambda, b_2 = \frac{L}{T}。$$

实验中采样频率取为 1kHz, 辨识出的模型参数随时间的变化曲线如图 3 所示, 其中(a)~(e)分别是模型参数  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_5$ 。横坐标为时间(s), 纵坐标为模型参数值。

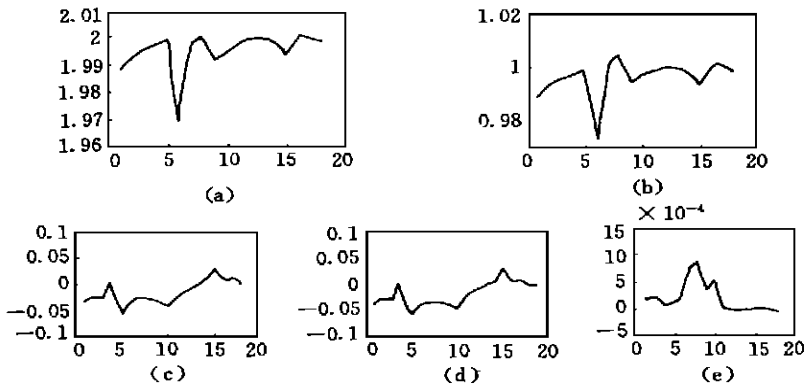


图 3 最小二乘法辨识所得模型参数随时间变化  
Fig. 3 The variation of model parameters through least square method

由动力调谐原理可知, 当动调陀螺实现精确调谐时, 同相弹簧刚度  $k = 0$ , 内外阻力系数  $c, D$  也可以忽略, 即有  $k \approx 0, c \approx 0, \lambda \approx 0$ 。因此由(5)式可知, 理论上  $\theta_1 \approx 2, \theta_2 \approx 1; \theta_3 \approx \theta_4$ , 且由于  $\theta_3, \theta_4$  中乘有采样间隔  $T$  的因子项, 而  $T$  本身很小, 故值接近 0;  $\theta_5$  由于乘有  $T$  的平方, 并考虑  $K_u$  的影响, 数量级上应比  $\theta_3, \theta_4$  小 2~3 个数量级。

从图 3(a)、(b)可知:  $1.96 < \theta_1 < 2.01, 0.97 < \theta_2 < 1.02$ , 这一结果与理论值非常吻合, 且两者波动趋势相同。从图 3(c)、(d)、(e)可知:  $-0.06 < \theta_3 \approx \theta_4 < 0.03$ , 两者波动趋势相同, 其值接近于 0, 且  $\theta_5$  比  $\theta_3, \theta_4$  的确小 2 个数量级。

综上所述, 最小二乘法得到的辨识结果能够正确反映陀螺的工作状态, 但由于该方法的计算量大, 难以满足在线实时应用的要求。为了解决这一问题, 进一步研究了基于递推最小二乘法的参数辨识方法。

### 3.3 递推最小二乘参数辨识法

递推最小二乘法的基本思想可以概括成:  $\theta(k) = \theta(k-1) + \Delta\theta$ 。该方法所用的模型同最小二乘法, 具体算法参见文献[3, 5]。辨识所得参数随时间变化情况如图 4 所示, 由图可知:  $1.85 < \theta_1 < 2.02, 0.85 < \theta_2 < 1.02, -0.1 < \theta_3 \approx \theta_4 < 0.07, \theta_5$  仍比  $\theta_3, \theta_4$  小 2 个数量级。可见该方法辨识结果与理论值是相符的, 与最小二乘法辨识所得结果的变化趋势是一致的。在实验中, 判别误差准则控制在  $10^{-5}$  以下时, 数据只需递推 200 次左右即得出结果, 若采样频率为 1kHz, 相当于 0.2s 左右即更新一次数据, 故能满足实时在线应用的要求。

但图 4 中的模型参数估计值波动较批处理法大, 这是由于递推算法出现了数据饱和现象。为解决这一问题, 进一步采用了带遗忘因子的递推最小二乘法, 遗忘因子取接近 1 的值, 这里取遗忘因子  $\eta =$

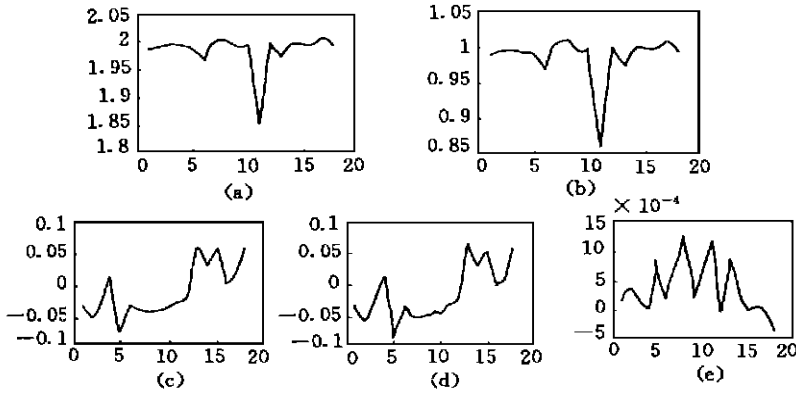


图4 递推最小二乘法辨识得模型参数随时间变化

Fig. 4 The variation of model parameters through recursive least squares method

0.99。辨识结果如图 5 所示, 由图可知: 带遗忘因子的递推最小二乘与一般递推最小二乘法相比所得到的辨识参数波动幅度显著变小, 因此在线实时应用场合宜用带遗忘因子的递推最小二乘方法。

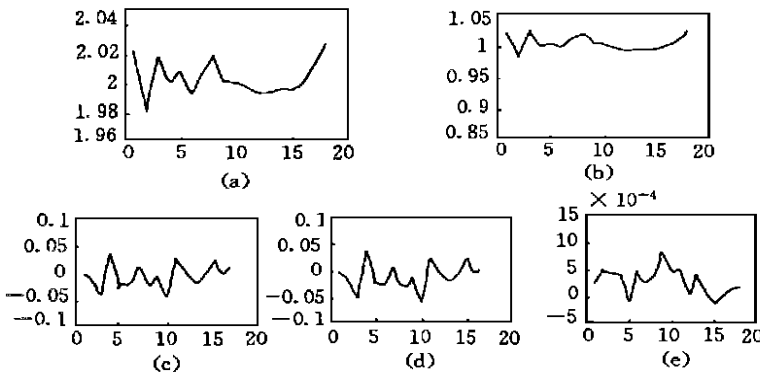


图 5 带遗忘因子递推最小二乘法辨识得模型参数随时间变化

Fig. 5 The variation of model parameters through recursive forgetting factor method

### 4 故障决策策略

常用的方法有阈值判决法、基于模型参数估计的决策方法等。阈值判决法描述为:

$$\eta_i = \frac{|\theta_i|}{|\theta_0|} \quad i = 1, 2, \dots, m. \tag{6}$$

式中,  $\theta_0$  代表标称模型参数值的均值,  $i$  代表参数号,  $m$  为辨识的总参数个数,  $j$  为实时测得的参数标记。

阈值判决准则为:

IF  $\eta_i < 0.5$ , OR  $\eta_i > 1.5$  THEN 系统状态异常或发生故障。

基于模型参数估计的决策方法<sup>[5]</sup>的基本思想是: 认为不同的模型参数对不同的物理结构参数的变化有不同的敏感度, 而物理结构参数的变化对应着相应的故障, 利用这一特征建立模型参数的变化到系统故障模式的映射。根据物理元件参数变化的容差限, 确定物理元件参数变化引起系统模型参数变化的容差限, 选择合适的特征化方法对模型参数变化的容差限进行特征化, 得到每一故障模式对应的特征向量。故障决策采用下面的分类方法:

$$\|C_j - C_R\| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |C_{ji} - C_{Ri}| \quad (7)$$

若  $\|C_l - C_R\| = \min_{1 \leq j \leq k} \|C_j - C_R\|$ , 则认为系统发生了第  $l$  类故障。  $C_j$  为某类故障模式的特征向量;  $C_R$  为实际的模型参数和较之标称理论模型参数的变化, 经特征化处理后的实际特征向量;  $n$  为模型参数个数;  $j = 1, 2, \dots, k$ ;  $k$  为系统故障模式的总数。

### 5 故障仿真与诊断实验

以某型捷联惯导系统的动调陀螺为研究对象, 应用前述的参数辨识方法、故障决策策略, 在动调陀螺实测信号的基础上, 进行了故障仿真与诊断实验。在正常的输入、输出信号中叠加人为的故障模拟信号, 包括阶跃型、缓变型、随机噪声增加、零均值随机信号四种。各故障模拟信号如图 6 所示。

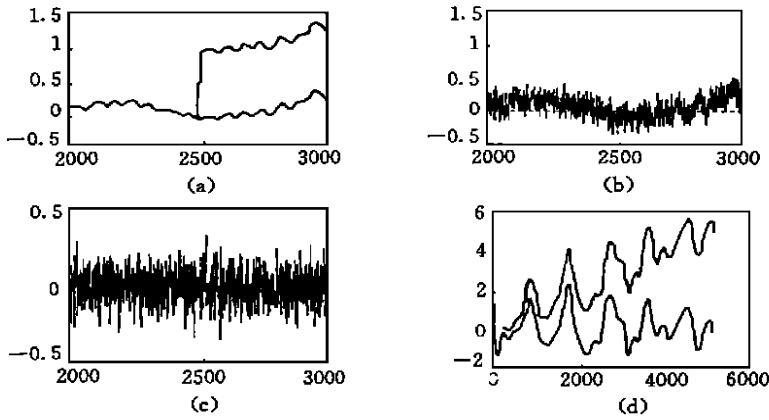


图 6 正常信号及各种故障模拟信号的时域波形

Fig 6 Time domain wave forms of normal and emulated faulty signals

图中横坐标为采样点数, 纵坐标为信号幅值(V)。图 6(a)所示为陀螺正常输出信号  $U_{ix}$  和其上叠加了阶跃幅度为 1 的故障模拟信号, 仿真突发性故障; 图 6(b)是在正常信号  $U_{ix}$  中叠加了随机噪声, 仿真外界强噪声干扰下的陀螺输出; 图 6(c)为零均值随机信号, 仿真器件损坏、 $U_{ix}$  信号丢失时的陀螺输出; 图 6(d)所示为正常信号  $U_x$  和其上叠加了线性缓变增量的故障模拟信号, 仿真性能变差类漂移性故障。

由正常信号、阶跃故障信号、强干扰噪声信号、零均值随机信号、缓变信号辨识得出的模型参数分别记为  $\theta_{norm}$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$ , 实验结果如下:

$$\begin{aligned} \theta_{norm} &= [1.9951, 0.9959, -0.0288, -0.0303, 0.0002], \\ \theta_1 &= [1.0055, 0.0058, -0.8660, -0.8881, 0.0032], \\ \theta_2 &= [0.3394, -0.3240, 1.2404, 0.9521, 0.0320], \\ \theta_3 &= [-0.0040, 0.0604, -0.2406, -0.3054, 0.0081], \\ \theta_4 &= [1.9946, 0.9955, -0.0195, -0.0198, 0.00002]. \end{aligned}$$

基于阈值判决方法的故障诊断结果如下

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{|\theta_1|}{|\theta_{norm}|} = [0.5, 0.0058, 30, 30, 15], & \eta_2 &= \frac{|\theta_2|}{|\theta_{norm}|} = [0.17, 0.32, 43, 31, 149], \\ \eta_3 &= \frac{|\theta_3|}{|\theta_{norm}|} = [0.002, 0.06, 8.36, 10, 37.4], & \eta_4 &= \frac{|\theta_4|}{|\theta_{norm}|} = [1.00, 1.00, 1.47, 1.5, 10.35] \end{aligned}$$

由以上分析可知, 不同模型参数对同一故障模式有不同的敏感度, 同一模型参数对于不同故障模式的敏感程度也不一样。对于阶跃型故障, 各模型参数均能反映出来, 相比之下  $\theta_1$  敏感度稍低一些; 在正常信号中叠加随机噪声导致各模型参数变化十分显著; 以零均值随机信号仿真陀螺信号丢失, 因此得到

的各模型参数均有明显变化;对于缓变型信号,模型参数  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$  变化均不明显,只有  $\theta_5$  变化了一个量级,因此利用  $\theta_5$  可以判别漂移性故障。总之,当各仿真故障发生时,通过阈值判决方法,均能检测出故障。

为了进一步将各故障模式有效地区分,对模型参数的变化进行特征化,提取出特征向量,并计算各故障模式间的距离。特征化方法是对  $\eta_{nom}$ ,  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $\eta_3$ ,  $\eta_4$  取常用对数,经特征化后的特征向量为:

$$C_{nom} = [0, 0, 0, 0, 0], C_{f1} = [0, -2, 1, 1, 1], C_{f2} = [-1, 0, 2, 1, 2], \\ C_{f3} = [-3, -1, 1, 1, 2], C_{f4} = [0, 0, 0, 0, 1].$$

运用基于模型参数估计的故障决策方法,根据(7)式可计算得到

$$\|C_{f1} - C_{f4}\| = 0.9, \|C_{f1} - C_{f3}\| = 1, \|C_{f1} - C_{f2}\| = 1, \\ \|C_{f2} - C_{f3}\| = 0.9, \|C_{f2} - C_{f4}\| = 1, \|C_{f3} - C_{f4}\| = 1.4.$$

可见各故障模式相互之间的距离均大于 0.9,已足够将各故障模式区分开来。

## 6 结论

本文将基于参数辨识的故障诊断方法,应用于动调陀螺的故障诊断中,研究了信号预处理、参数辨识方法、故障检测与分离决策等关键技术。通过实测信号基础上的故障模拟与实际诊断,验证了方法在实际应用中的有效性和可行性,并为陀螺软故障诊断提供了新的思路和途径。

## 参考文献:

- [1] 秦永元,牛惠芳. 余度斜置捷联惯导单个陀螺软故障的诊断和修复[J]. 导航,1996(1).
- [2] Jiang Hong, Yang Youtang, Yang Weiqin. Exploration on Failure Diagnosis of Electrostatic Suspended Gyro [R]. IEEE Trans. on AES, 1997, 33 (1):319~ 322.
- [3] 周东华,孙优贤. 控制系统的故障检测与诊断技术[M]. 北京:清华大学出版社,1994
- [4] 郭秀中. 惯导系统陀螺仪理论[M]. 北京:国防工业出版社,1996.
- [5] 胡昌华,李学锋等. 一种新的基于模型和参数估计的过程故障诊断 [J]. 西北工业大学学报,1995,13(1).