

基于参数辨识的电动舵机系统健康仿真和评估*

周维正¹, 李学锋¹, 曾庆华²

(1. 北京航天自动控制研究所, 北京 100854; 2. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:针对目前电动舵机系统故障诊断方法不能有效预测缓变故障,提出基于舵机系统模型的状态变量检测法对飞行器常用的执行机构电动舵机系统进行健康分析与仿真评估。分析电动舵机系统子系统电机本体、控制器、传动机构的常见故障,对其中反映系统性能的关键参数进行数学建模;通过对系统注入不同的健康参数得到相关故障状态下的状态变量特征,进而作为定位故障源的知识库,引入健康因子评估故障参数的变化趋势;仿真算例选择电机本体的主要物理参数电机绕组阻值和反映永磁体性能的电机力矩常数作为健康因子,通过定位知识库建立的健康因子评估算法验证了方法的可行性。

关键词:变量检测;模型辨识;故障注入;健康评估

中图分类号:TP183 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2016)04-132-05

Research on health simulation and evaluation for electric servo system based on parameter identification

ZHOU Weizheng¹, LI Xuefeng¹, ZENG Qinghua²

(1. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China;

2. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: For the fact that the current fault diagnosis methods cannot detect soft fault effectively, a variable detection method based on electric servo system model was proposed for health simulation and evaluation. Common failures of electric servo system, such as motor module, controller and transmission mechanism were analyzed, and the mathematical models were built up for common health states. By injecting different health coefficients into the system, the characteristics of state variable were obtained, so the knowledge base was built up to locate the source of faults and to evaluate the changing trend of the failure parameter by health factors. Finally, the resistance of winding and the motor torque constant are chosen as health factors, the feasibility of health factors estimation algorithm is verified by simulation.

Key words: variable detection; model identification; fault injection; health evaluation

电动舵机作为飞行器系统的常见执行机构,其性能和可靠性对整个系统有着巨大的影响。国内外针对电动舵机系统的故障检测和可靠性分析做了大量的工作。其中,文献[1-3]研究的重点集中在对特征观测变量的信号处理及时频分析;文献[4]美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)针对执行机构专门成立课题研究模型方法和数据方法在工程实际中的应用;文献[5-6]从构造观测器的角度进行分析,分别为自适应方法和神经网络方法;文献[7]基于一元分析线性回归研究舵机故障的诊断算法;文献[8]采用递推批量最小二乘法对观测器的参数进行Volterra泛函级数辨识,提取特征量,从而实现舵机的故障诊断;文

献[9]以液压舵机非线性模型为基础,以回归型支持向量机模型,通过与实际舵机并行工作输出残差进行故障隔离。

1 电动舵机系统健康状态分析

电动舵机系统主要由四部分组成,电机控制和驱动器、电机、传感器以及传动机构。对于舵机故障分析也主要集中于这四部分。实际系统由于成本、体积、性能的考量不可能对所有部件进行故障监测,因此本节给出实际系统健康分析的具体流程,如图1所示。

如图1所示,首先针对舵机系统做可靠性分析,然后对可靠性差、需要重点监测的薄弱环节进行归纳总结编码,进而提取其数学模型,分析特征

* 收稿日期:2015-11-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61174120)

作者简介:周维正(1987—),男,黑龙江嫩江人,博士研究生,E-mail:zhouweizheng2005@163.com;

李学锋(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:lixuefengvip@126.com

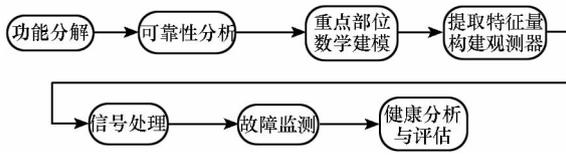


图1 系统评估流程

Fig.1 Process of system assessment

量进行信号处理、故障监测、健康分析及评估。

根据对电动舵机系统故障统计的调研,着重对H桥电路、电机本体以及传动机械三部分进行分析。这三部分的主要健康参数如表1所示。表1中给出了三个建模单元,每个单元的主要健康参数以及相应的方程描述。

在对电动舵机系统的研究文献中,大都着重针对电机的控制模型进行控制算法的分析,这种模型在分析舵机的控制算法、理论计算以及系统设计时很有帮助,但不能反映健康监测理念下的系统不同健康状态下的性能以及行为机理的监控。

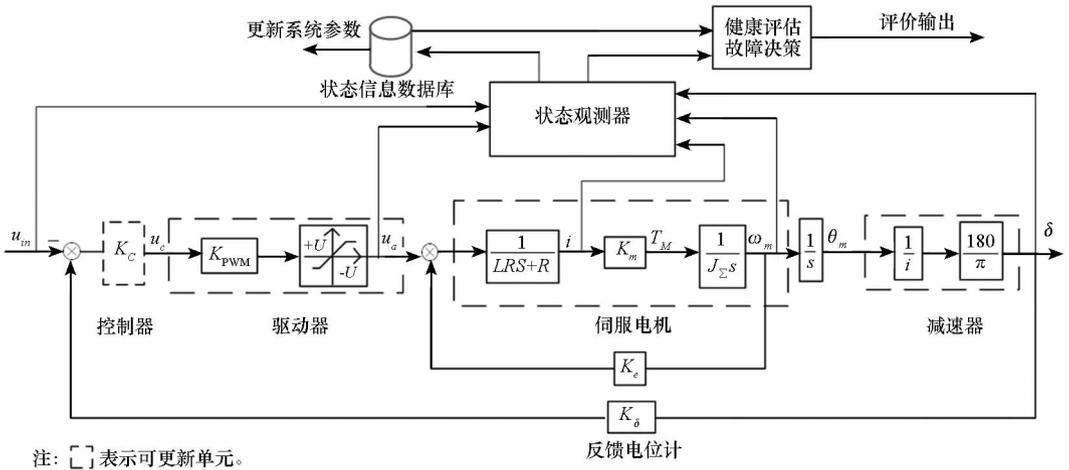
综合两类故障诊断方法——基于模型的方法和基于信号处理的方法,提出基于参数辨识的健康分析控制总模型如图2所示。相比传统控制

模型加入了状态观测器,通过对系统典型特征量的采样、分析、信号处理辨识系统的参数,进而对系统进行健康状态的评估。同时对系统不同状态下的工作点进行健康模式的存储,数据库可以提供模式识别时的参考样本,离线更新仿真评估参数或在线更新控制参数。在图2中重点画出的可更新单元有控制器、驱动器、伺服电机、减速器。

表1 电动舵机系统健康参数分析表

Tab.1 Health parameters of electric servo system

建模单元	健康参数	方程描述
驱动器H桥电路	开关管导通电阻 R_{on}	$G_a(s) = K_{pwm} e^{-\tau s}$
	开关管导通延时时间 T_{on}	
	放大倍数 K_{pwm}	
电机本体	电机绕组电阻 R	$u_a = L_a \frac{di_a}{dt} + i_a R_a + E_b$
	电机绕组电感 L	
	电机转速常数 K_E	$E_b = K_E \frac{d\theta_m}{dt}$
	电机力矩常数 K_L	$T_M = K_T i_a$
传动机械	传动比 i	$T_f = -K_m \dot{\theta}$
	黏性摩擦系数为 K_m	



注: []表示可更新单元。

图2 健康监测模式下舵机健康仿真模型

Fig.2 Schematic model of servo system in health monitor mode

2 健康指标定位评估算法

对控制周期内的传感器采样信号进行取均值、方差、频率分析算出特征量,再根据计算公式算出延展特征量。将这一系列特征值更新到健康参数结构体的特征向量中,并由健康评价函数判断是否有故障发生。

健康评价函数定义特征向量为:

$$\mathbf{X} = \{X_1 \quad X_2 \quad \dots \quad X_N\} \quad (1)$$

在各环节参数健康时,采样特征向量标准值为:

$$\mathbf{X}_0 = \{X_{10} \quad X_{20} \quad \dots \quad X_{n0}\} \quad (2)$$

定义特征向量的健康指标为:

$$h_i = \begin{cases} 1 & \\ 1 - \frac{X_i - X_{i0}}{M} & \\ 0, & |X_i - X_{i0}| > M \end{cases} \quad (3)$$

则特征变量的健康向量为:

$$\mathbf{H}_x = \{h_1 \ h_2 \ \dots \ h_n\} \quad (4)$$

当系统某个参数发生变化后,特征向量的健康指标势必发生变化,偏离 1。健康评估的核心算法就是通过 \mathbf{H}_x 的值,评价系统主要参数发生了怎样的变化。

这里定义系统参数向量:

$$\mathbf{P} = \{P_1 \ P_2 \ \dots \ P_N\} \quad (5)$$

系统参数向量标准值:

$$P_0 = \{P_{10} \ P_{20} \ \dots \ P_{N0}\} \quad (6)$$

参数向量的健康因子向量定义为:

$$\boldsymbol{\alpha} = \left\{ \frac{P_1}{P_{10}}, \frac{P_2}{P_{20}}, \dots, \frac{P_N}{P_{N0}} \right\} \quad (7)$$

对于实际系统来说参数的健康因子向量的变化导致了特征向量指标的变化。在给定的输入信号下,健康因子向量可作为辨识黑箱系统的输入,而特征变量的健康向量可作为辨识黑箱系统的输出。健康检测则是上述问题的逆问题,即根据检测得到的特征变量的健康向量来评估参数的健康因子向量。

通过对系统不同参数的健康因子进行故障注入的方式,可以通过仿真或实验得到特征变量的健康向量 \mathbf{H}_x ,通过注入数据和 \mathbf{H}_x 中各特征变量数据作为函数拟合的数据,辨识健康因子的模型 $f(\alpha_i)$,它是特征变量对系统某一参数的偏导,求 $f(\alpha_i)$ 的逆函数可以得到健康因子估算矩阵 \mathbf{G} 。

$$\mathbf{F}_{mn} = \begin{bmatrix} f_{11}(\alpha_1) & f_{12}(\alpha_2) & \dots & f_{1n}(\alpha_n) \\ f_{21}(\alpha_1) & f_{22}(\alpha_2) & \dots & f_{2n}(\alpha_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{m1}(\alpha_1) & f_{m2}(\alpha_2) & \dots & f_{mn}(\alpha_n) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{G}_{mn} = \begin{bmatrix} g_{11}(h_1) & g_{12}(h_2) & \dots & g_{1n}(h_n) \\ g_{21}(h_1) & g_{22}(h_2) & \dots & g_{2n}(h_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m1}(h_1) & g_{m2}(h_2) & \dots & g_{mn}(h_n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

对于故障参数 α_i 来说,估算矩阵存在

$$\forall j, k \in m \quad |g_{ji}(h_j) - g_{ki}(h_k)| < \varepsilon \quad (10)$$

同时基于一元线性回归方法分析各特征变量与当前注入参数的相关系数 $\rho(\alpha_i, h_j)$,相关度越大,说明参数的变化对某一特征变量的影响越大;若相关度为 0,则该特征变量并不能反映该参数的变化。

相关度系数为:

$$\rho(\alpha_i, h_j) = \frac{\sum_{k=1}^n (\alpha_{ik} - \bar{\alpha}_i)(h_{jk} - \bar{h}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (\alpha_{ik} - \bar{\alpha}_i)^2 \sum_{k=1}^n (h_{jk} - \bar{h}_j)^2}} \quad (11)$$

相关度矩阵 $\boldsymbol{\rho}_{mn}$ 为:

$$\boldsymbol{\rho}_{mn} = \begin{bmatrix} \rho(\alpha_1, h_1) & \rho(\alpha_1, h_2) & \dots & \rho(\alpha_1, h_n) \\ \rho(\alpha_2, h_1) & \rho(\alpha_2, h_2) & \dots & \rho(\alpha_2, h_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho(\alpha_m, h_1) & \rho(\alpha_m, h_2) & \dots & \rho(\alpha_m, h_n) \end{bmatrix} \quad (12)$$

对定位的参数与所有特征变量的相关度进行加权处理,得到加权后的相关度系数 q 为:

$$q(\alpha_i, h_j) = \frac{|\rho(\alpha_i, h_j)|}{\sum_{j=1}^n |\rho(\alpha_i, h_j)|} \quad (13)$$

加权后的估算矩阵 \mathbf{HG}_{mn} 为:

$$\mathbf{HG}_{mn} = \begin{bmatrix} q_{11}g_{11}(h_1) & q_{12}g_{12}(h_2) & \dots & q_{1n}g_{1n}(h_n) \\ q_{21}g_{21}(h_1) & q_{22}g_{22}(h_2) & \dots & q_{2n}g_{2n}(h_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{m1}g_{m1}(h_1) & q_{m2}g_{m2}(h_2) & \dots & q_{mn}g_{mn}(h_n) \end{bmatrix} \quad (14)$$

根据估算矩阵可以得到定位后的参数健康因子向量中对应的 α_i 为:

$$\alpha_i = \sum_{k=1}^m \mathbf{HG}_{ki} \quad (15)$$

3 仿真算例

以某些舵机为例,仿真参数如表 2 所示。

表 2 舵机系统参数
Tab.2 Parameters of servo system

参数	数值	参数	数值
额定电压	24 V	转动惯量	$2.5 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
绕组电阻	4.8 Ω	转矩常数	0.063 7 N · m/A
绕组电感	1.6 mH	H 桥电阻	0.1 Ω
传动比	55	负载转矩	0.01 N · m

健康观测量的选取原则是可反映系统的物理性能,阻值的变化可反映绕组铜线是否发生短路或断路,转矩常数可反映永磁体是否发生退磁;特征向量选取电流值、转速值,加电后固定时间采样特征向量值,则归一化后的电流、转速与电阻、转矩常数的关系如图 3 所示。

对于建模的电机系统,采用曲线拟合方法,对于 α_k 采用二次多项式可以很好地拟合曲线,对于 α_R 采用分段拟合效果比较好,则经过辨识的矩阵 \mathbf{F} 以及相关度矩阵 $\boldsymbol{\rho}$ 如表 3 所示。

根据对系统的健康分析建模,建立了电机绕组、转矩常数对观察特征变量转速、电流的评估公

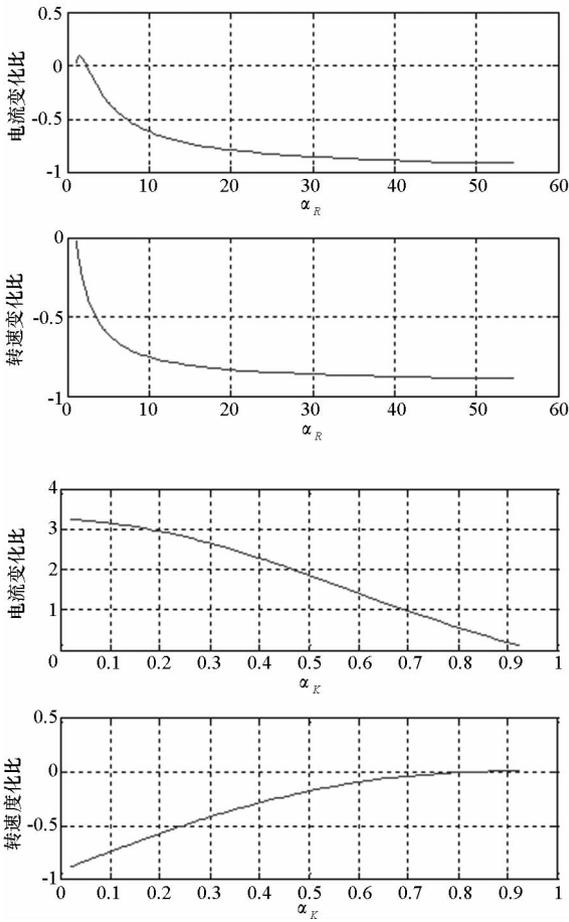


图3 α_R, α_k 与电流、转速特征向量的变化关系

Fig. 3 relation between representative vector of electricity, motor speed and health factor α_R, α_k

式,接下来对该健康评估方法进行验证和评价,评估误差曲线如图4所示。从图中可以看出,对于健康因子的评估曲线基本拟合了故障注入曲线,由于对 α_R 采用分段拟合,在两段衔接处的估算值

有一定偏差,这个问题可以通过细化分段区域和采用高阶拟合的方法来修正,这说明该仿真评估算法有一定的实用性和准确性。

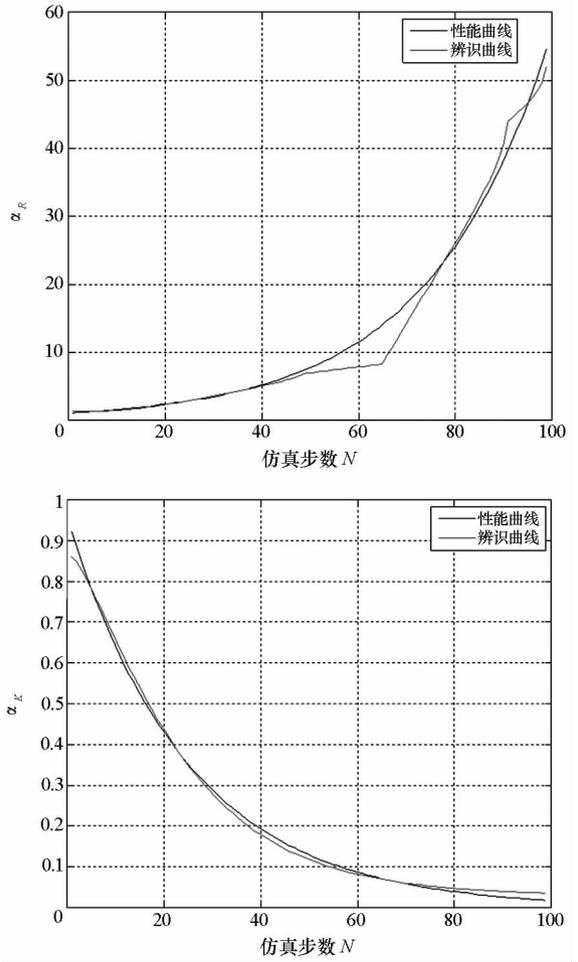


图4 α_R, α_k 评估曲线与故障注入曲线关系

Fig. 4 Relationship between evaluation curve of α_R, α_k and fault injection curve

表3 辨识的健康因子模型及相关度矩阵

Tab. 3 Identified health factor model and relevance matrix

	F_{22}	ρ_{22}
$1 < \alpha_R < 7$	$\begin{bmatrix} -0.10783\alpha_R + 0.2244 & -2.153\alpha_k^2 - 1.693\alpha_k + 3.3 \\ -0.10717\alpha_R - 0.0494 & -1.088\alpha_k^2 + 2.026\alpha_k - 0.931 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.986 & -0.9867 \\ -0.935 & 0.9776 \end{bmatrix}$
$\alpha_R > 7$	$\begin{bmatrix} 0.000098\alpha_R^2 - 0.01\alpha_R - 0.6376 & -2.1529\alpha_k^2 - 1.6929\alpha_k + 3.3048 \\ 0.000042\alpha_R^2 - 0.0045\alpha_R - 0.766 & -1.0883\alpha_k^2 + 2.026\alpha_k - 0.93105 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.9 & -0.9867 \\ -0.89 & 0.9776 \end{bmatrix}$

4 结论

基于状态变量的检测和系统参数辨识的方法对导弹电动舵机系统展开健康管理及分析:首先对电动舵机典型子系统参数进行健康建模,提取反映系统性能的特征变量;然后进行信号分析处

理、故障诊断、健康评估及性能预测;最后通过仿真数据建立相应故障知识库,提取特征变量变化规律,为健康诊断提供样本空间,实现健康行为模型的构建。选择电机本体两类关键参数——电机绕组电阻和电机转矩常数建立健康因子向量,选择观测电流和转速两种易采集的状态变量作为特

征向量,通过评估算法来反映系统参数的健康状况,从而证明评估定位算法的可行性。

参考文献 (References)

[1] Burth M, Roepke K, Filbert D. Diagnosis of universal motors by current and vibration signal analysis (part 1) [J]. *Technisches Messen*, 1997, 64(1): 3 - 10.

[2] Burth M, Roepke K, Filbert D. Diagnosis of universal motors by current and vibration signal analysis (part 2) [J]. *Technisches Messen*, 1997, 64(2): 47 - 53.

[3] Gühmann C, Filbert D. Fault diagnosis of electric low-power motors by analyzing the current signal [C]//*Proceedings of Fault Detection Supervision & Safety for Technical Processes*, 1992: 141 - 146.

[4] Balaban E. Discovery and systems health [OL]. National Aeronautics and Space Administration, 2012 - 05 - 14 [2015 - 11 - 20]. <http://ti.arc.nasa.gov/tech/dash/diagnostics-and-prognostics/actuator-prognostics>.

[5] 吴彬, 廖瑛, 曹登刚, 等. 基于自适应观测器的导弹电动舵机故障诊断研究 [J]. *系统仿真学报*, 2011 (3): 618 - 621.
WU Bin, LIAO Ying, CAO Denggang, et al. Modeling and simulation of process of propellant refueling to space stations [J]. *Journal of System Simulation*, 2011 (3): 618 - 621. (in Chinese)

[6] 张文广, 史贤俊, 肖支才, 等. 基于 RBF 神经网络的导弹

舵机系统故障检测 [C]//第 29 届中国控制会议, 北京, 2010: 3958 - 3962.

ZHANG Wenguang, SHI Xianjun, XIAO Zhicai, et al. Study on the fault diagnosis of the missile servo system based on RBF neural network [C]// *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*, Beijing, 2010: 3958 - 3962. (in Chinese)

[7] 王鹏, 张瞿辉, 金波, 等. 基于一元线性回归分析的舵机故障诊断算法 [J]. *火力与指挥控制*, 2009, 34(7): 20 - 24.
WANG Peng, ZHANG Quhui, JIN Bo, et al. A new algorithm for actuator fault diagnosis based on unitary linear recursive analysis [J]. *Fire Control and Command Control*, 2009, 34(7): 20 - 24. (in Chinese)

[8] 张华君. 基于递推批量最小二乘的 Volterra 级数辨识方法 [J]. *小型微型计算机系统*, 2004, 25 (12): 2282 - 2286.
ZHANG Huajun. Volterra series identification method based on recursive least square algorithm [J]. *Mini-micro Systems*, 2004, 25(12): 2282 - 2286. (in Chinese)

[9] 胡良谋, 曹克强, 徐浩军. 基于回归型支持向量机的液压舵机故障诊断 [J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(23): 5509 - 5512.
HU Liangmou, CAO Keqiang, XU Haojun. Fault diagnosis for hydraulic actuator based on support vector regression [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(23): 5509 - 5512. (in Chinese)