

控制与决策

Control and Decision

基于改进观测器的故障检测方法

石怀涛, 侯马骁, 吴玉厚, 佟圣皓, 何劝云

引用本文:

石怀涛, 侯马骁, 吴玉厚, 佟圣皓, 何劝云. 基于改进观测器的故障检测方法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(8): 2033–2039.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1229>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于对偶观测器的谐波提取方法](#)

Harmonic extraction method based on dual observer

控制与决策. 2022, 37(7): 1847–1852 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1517>

[基于动态观测器零极点优化的网络控制系统故障检测](#)

Pole-zero optimization design of dynamic observer for fault detection of networked control systems

控制与决策. 2021, 36(6): 1351–1360 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1107>

[基于向量集逆区间滤波的故障观测器设计](#)

Vector set inversion interval filtering based fault observer design

控制与决策. 2021, 36(12): 2973–2981 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0212>

[Fal函数的改进及3种新型非线性扩张状态观测器](#)

Advanced fal function and three novel nonlinear extended state observers

控制与决策. 2021, 36(7): 1655–1662 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1652>

[基于变速趋近律的Buck型变换器抗扰动控制](#)

Disturbance rejection control of Buck converters based on variable rate reaching law

控制与决策. 2021, 36(4): 893–900 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1073>

基于改进观测器的故障检测方法

石怀涛¹, 侯马骁¹, 吴玉厚¹, 佟圣皓^{1†}, 何劝云²

(1. 沈阳建筑大学 机械工程学院, 沈阳 110168;
2. 中国建筑科学研究院有限公司 建筑机械化研究分院, 河北 廊坊 065000)

摘要: 提出一种基于改进观测器的故障检测方法. 首先, 设计一种改进的观测器, 该观测器相比于 Luenberger 观测器拥有更多的设计自由度; 然后, 引入 l_1/H_∞ 性能指标提升观测器产生残差的干扰鲁棒性和故障敏感度, 自适应阈值的设计可以有效避免故障预警的误报; 最后, 通过仿真和实验验证所提出方法的有效性.

关键词: 故障检测; 观测器; 自适应阈值; 球轴承

中图分类号: TP11 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1229

引用格式: 石怀涛, 侯马骁, 吴玉厚, 等. 基于改进观测器的故障检测方法[J]. 控制与决策, 2022, 37(8): 2033-2039.

Research of fault detection method based on modified observer

SHI Huai-tao¹, HOU Ma-xiao¹, WU Yu-hou¹, TONG Sheng-hao^{1†}, HE Quan-yun²

(1. College of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. Institute of Building Mechanization, China Academy of Building Research, Langfang 065000, China)

Abstract: In this paper, a method based on the modified observer is proposed to detect faults. Firstly, a modified observer is designed, which has more design degrees of the freedom than the Luenberger observer. Then, the disturbance robustness and fault sensitivity of residuals are improved by introducing l_1/H_∞ performance. In addition, the design of adaptive threshold can effectively avoid fault false alarm. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by simulation and experiments.

Keywords: fault detection; observer; adaptive threshold; ball bearing

0 引言

在过去 10 年中, 故障诊断技术得到了广泛的研究和应用, 在各个行业中均具有很高的经济影响. Leão 等^[1]提出了几种针对深沟球轴承的故障诊断技术. 人工检查和超声测试是故障诊断中广泛使用的非破坏性技术的示例, 这些方法是昂贵的, 因为设备需要停机对里面的机械元件进行详细和定期的检查才能获得令人满意的结果.

随着故障诊断技术不断发展, 可以将故障诊断方法大致分为两类: 基于数据的故障诊断方法^[2-3]和基于模型的故障诊断方法^[4-5]. 其中: 基于数据的故障检测方法依赖于历史过程数据; 基于模型的故障检测方法是在硬件冗余方法的基础上发展起来的, 具有低成本、容易实现的特点. Gomez 等^[6]利用角度方法建立具有早期故障的轴承动力学模型. Sun 等^[7]通过压缩感知的方法测量原始轴承数据集, 并检测出故

障. 基于模型的故障检测方法比基于数据驱动的故障检测方法更加快速, 因此前者被广泛使用, 该方法的关键是残差的产生和阈值的设定^[8].

作为有效的残差生成器, Luenberger 观测器^[9]引起了很多关注, 目前许多专家已经对基于观测器的故障检测方法进行了研究. Chen 等^[10]提出了一种新颖的未知输入观测器解耦故障和干扰. Zhang^[11]将卡尔曼滤波器用于优化 Luenberger 观测器的增益参数, 以此增加残差的扰动鲁棒性. Chebotarev 等^[12]引入 L_1/L_2 性能指标解决残差的扰动鲁棒性. 这些方案仅增加了残差未知扰动的鲁棒性, 而没有增加残差的故障敏感度. 近些年, 基于 GKYP 引理, 对有限频域的 H_-/H_∞ 故障检测观测器进行设计, 通过多目标优化使观测器产生的残差具有更好的干扰鲁棒性和故障敏感度^[13]. Chibani 等^[14]对模糊系统进行了有限频域的 H_-/H_∞ 故障检测观测器设计. 然而, 上述方法仅

收稿日期: 2020-09-04; 录用日期: 2021-06-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075348); 辽宁省自然科学基金项目(2019-ZD-0654); 辽宁省教育厅项目(Infw202007); 辽宁省兴辽英才青年拔尖人才项目(XLYC2007031).

†通讯作者. E-mail: tongshenghao@sjzu.edu.cn.

停留在理论层面,很难应用于实际.一方面,上述文献研究的是基于 H_∞ 性能指标的干扰鲁棒性条件,要求未知干扰满足 l_2 范数有界,而实际系统中,一些信号不是能量有界而是峰值有界的,很难根据范数理论得到较为准确的阈值;另一方面,随着工作条件和模型变得越来越复杂,Luenberger观测器中的单个增益参数难以在多约束和复杂的优化过程中使产生的残差拥有更好的表现.鉴于此,本文首先基于Luenberger观测器提出一种拥有更多设计自由度的观测器,与Luenberger观测器相比,可以使产生的残差具有更好的表现;然后将 l_1/H_∞ 的性能指标引入改进的观测器中,克服了引入 H_-/H_∞ 性能指标的不足,使所设计的观测器更加符合实际.

大多数基于模型的故障检测方法仅专注于设计产生残差的观测器,关于如何选择故障检测方案中所需阈值的研究很少.在故障检测方法中,尽管系统没有故障,但是干扰和模型不确定性残差几乎总是非零,通过选择适当的阈值可以避免故障预警的误报.因此,计算所需的阈值在故障检测中起着决定性的作用.现有的大多数阈值选择方法均依赖于常数阈值^[15].与常数阈值相比,时变阈值在降低预警误报方面具有优势.Raka等^[16]推导了线性模型的动态阈值生成器.Khan等^[17]给出的离散时间系统的鲁棒自适应阈值旨在实现故障检测.上述方法是在设计故障检测观察器之后设计时变阈值的,显然不能实现实时的故障检测.为了解决该问题,本文同时设计残差生成器和相应的自适应阈值,用于实时检测系统故障.基于改进观测器的故障检测方法,主要内容如下:

1) 设计一个改进观测器用于系统故障检测,该观测器包含更多设计自由度,可以使观测器产生的残差具有更好的表现.

2) 将 l_1/H_∞ 性能指标引入改进的观测器,提升残差的扰动鲁棒性和故障敏感度.

3) 针对含有不确定扰动的系统实时设计自适应阈值,减少故障预警的误报和漏报.

1 基于改进观测器的故障检测方法

1.1 系统描述

考虑如下线性系统:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Ed(t) + Ff(t), \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t). \quad (2)$$

其中: $x(t) \in R^n, y(t) \in R^p, d(t) \in R^q, f(t) \in R^m$ 分别为状态、输出、未知扰动、故障信号; $A \in R^{n \times n}, E \in R^{n \times q}, F \in R^{n \times m}, C = R^{p \times n}$ 分别为系统的矩阵系数.

假设1 系统中包括的未知扰动 $d(t)$ 是有边界的, $\|d(t)\| \leq \|d(t)\|_\infty$,其中 $\|d(t)\|_\infty$ 为已知常数.

首先,基于Luenberger观测器设计一种改进的观测器;然后,将 l_1/H_∞ 性能指标引入改进观测器产生的残差中,给出残差扰动鲁棒性、自适应阈值以及故障敏感度的约束条件;最后,将其转换为凸优化问题,获得改进观测器的增益参数.

1.2 改进观测器设计

基于系统(1)和(2),设计观测器

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \Psi A \hat{x}(t) + L(y(t) - C \hat{x}(t)), \\ \hat{x}(t) = \xi(t) + \phi y(t). \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\xi(t)$ 为中间变量; $\hat{x}(t)$ 为 $x(t)$ 的观测值; Ψ, ϕ, L 为矩阵增益, Ψ, ϕ 满足

$$\Psi + \phi C = I. \quad (4)$$

式(4)转化为

$$[\Psi \ \phi] \begin{bmatrix} I \\ C \end{bmatrix} = I. \quad (5)$$

根据文献[18]中引理3,式(5)转化为

$$\begin{bmatrix} \Psi \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ C \end{bmatrix}^\dagger + \Gamma \left(I - \begin{bmatrix} I \\ C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ C \end{bmatrix}^\dagger \right). \quad (6)$$

Γ 为自由选择的矩阵;增益参数 Ψ, ϕ 分别为

$$\begin{cases} \Psi = HX_1 + \Gamma(I - HH^\dagger)X_1, \\ \phi = HX_2 + \Gamma(I - HH^\dagger)X_2. \end{cases} \quad (7)$$

其中: $H = \begin{bmatrix} I \\ C \end{bmatrix}, X_1 = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, X_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}$.

当 $\Psi = I, \phi = 0$ 时,观测器(3)变为

$$\dot{\hat{x}}(t) = A \hat{x}(t) + L(y(t) - C \hat{x}(t)). \quad (8)$$

观测器(8)的形式与Luenberger观测器相同,很明显,观测器(3)相比于观测器(8)拥有更多的设计自由度.

定义状态的误差为 $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$,通过式(1)~(3),获得误差系统

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) = \\ &(\Psi A - LC)e(t) + \Psi Ed(t) + \Psi Ff(t). \end{aligned} \quad (9)$$

残差为

$$r(t) = y(t) - C \hat{x}(t) = Ce(t). \quad (10)$$

误差系统(9)与残差(10)分为如下2个子系统:当 $f(t)=0$ 时,有

$$\begin{cases} \dot{e}_d(t) = (\Psi A - LC)e_d(t) + \Psi Ed(t), \\ r_d(t) = Ce_d(t); \end{cases} \quad (11)$$

当 $d(t) = 0$ 时, 有

$$\begin{cases} \dot{e}_f(t) = (\Psi A - LC)e_f(t) + \Psi F f(t), \\ r_f(t) = C e_f(t). \end{cases} \quad (12)$$

残差引入的 l_1/H_∞ 指标性能如下:

1) l_1 性能指标为

$$\frac{\|r_d(t)\|_\infty}{\|d(t)\|_\infty} < \alpha; \quad (13)$$

2) H_∞ 性能指标为

$$\|r_f(t) - Q f(t)\|_2 < \beta \|f(t)\|_2, \quad (14)$$

其中 Q 为加权函数.

1.3 扰动鲁棒性分析

考虑一般的 Lyapunov 函数, 并利用如下定理给出扰动鲁棒性条件.

定理 1 若存在 $\alpha > 0$, 矩阵 $P_1 > 0$, 使得矩阵不等式满足

$$[M]_{2 \times 2} < 0, \quad (15)$$

$$[N]_{3 \times 3} < 0. \quad (16)$$

其中: 矩阵 $M_{2 \times 2}$ 中非零元素为 $M_{1,1} = \tilde{A}^T P_1 + P_1 \tilde{A} + \lambda P_1$, $M_{1,2} = P_1 \tilde{E}$, $M_{2,2} = -\mu$; 矩阵 $N_{3 \times 3}$ 中非零元素为 $N_{1,1} = -(1 - \lambda)P_1$, $N_{1,3} = \tilde{C}^T$, $N_{2,2} = -(\alpha - \mu)I$, $N_{3,3} = -\alpha I$. 则误差系统(11)稳定且满足 l_1 性能指标, 从而给出了未知干扰鲁棒性条件.

证明 定义 Lyapunov 函数

$$V_1(e_d(t)) = e_d^T(t) P_1 e_d(t). \quad (17)$$

受文献[19]启发, 下式可以使误差系统(11)稳定且满足 l_1 性能指标:

$$\dot{V}_1(e_d(t)) + \lambda V_1(e_d(t)) - \mu d^T(t) d(t) < 0, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & r_d^T(t) r_d(t) - \alpha [(1 - \lambda) V_1(e_d(t)) + \\ & (\alpha - \mu) d^T(t) d(t)] < 0. \end{aligned} \quad (19)$$

误差系统(11)化简为

$$\begin{cases} \dot{e}_d(t) = \tilde{A} e_d(t) + \tilde{E} d(t), \\ r_d = \tilde{C} e_d(t). \end{cases} \quad (20)$$

其中: $\tilde{A} = (\Psi A - LC)$, $\tilde{E} = \Psi E$, $\tilde{C} = C$.

由式(17)、(18)和(20), 得到

$$\begin{aligned} & \dot{V}_1(e_d(t)) + \lambda V_1(e_d(t)) - \mu d^T(t) d(t) = \\ & [e_d^T(t) \quad d^T(t)] \begin{bmatrix} \tilde{A}^T P_1 + P_1 \tilde{A} + \lambda P_1 & P_1 \tilde{E} \\ * & -\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_d(t) \\ d(t) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (21)$$

由式(18)和(21), 得到

$$M = \begin{bmatrix} \tilde{A}^T P_1 + P_1 \tilde{A} + \lambda P_1 & P_1 \tilde{E} \\ * & -\mu \end{bmatrix} < 0. \quad (22)$$

由式(17)、(19)和(20), 得到

$$\begin{aligned} & \alpha^{-1} r_d^T(t) r_d(t) - ((1 - \lambda) V_1(t) + (\alpha - \mu) d^T(t) d(t)) = \\ & [e_d^T(t) \quad d^T(t)] \begin{bmatrix} \alpha^{-1} \tilde{C}^T \tilde{C} - (1 - \lambda) P_1 & 0 \\ * & -(\alpha - \mu) I \end{bmatrix} \times \\ & \begin{bmatrix} e_d(t) \\ d(t) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (23)$$

由式(19)和(23), 得到

$$\begin{bmatrix} \alpha^{-1} \tilde{C}^T \tilde{C} - (1 - \lambda) P_1 & 0 \\ * & -(\alpha - \mu) I \end{bmatrix} < 0. \quad (24)$$

由舒尔补, 式(24)转化为

$$N = \begin{bmatrix} -(1 - \lambda) P_1 & 0 & \tilde{C}^T \\ * & -(\alpha - \mu) I & 0 \\ * & * & -\alpha I \end{bmatrix} < 0. \quad (25)$$

综上, 定理 1 得证. \square

1.4 自适应阈值分析

根据 Lyapunov 函数和残差给出自适应阈值数学表达式.

定理 2 若存在实标量 $l_1 > 0$, $l_2 > 0$, 则系统(11)存在矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} l_1 C^T C - P_1 & 0 \\ * & -l_2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (26)$$

使得如下自适应阈值表达式成立:

$$\gamma = \frac{1}{l_1} V_1(0) e^{-\lambda t} + \left(\frac{\mu}{l_1 \lambda} + l_2 \right) \|d(t)\|_\infty^2. \quad (27)$$

其中: γ 为判断故障是否发生的自适应阈值; $V_1(0)$ 为 Lyapunov 函数初始值; λ 、 μ 为式(18)定义的未知标量.

证明 由定理 1, 得

$$V_1(e_d(t)) \leq V_1(0) e^{-\lambda t} + \frac{\mu}{\lambda} \|d(t)\|_\infty^2. \quad (28)$$

矩阵不等式(26)保证了下式成立:

$$[e_d^T(t) \quad d^T(t)] \begin{bmatrix} l_1 C^T C - P_1 & 0 \\ * & -l_2 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_d(t) \\ d(t) \end{bmatrix} < 0. \quad (29)$$

由式(10)、(28)和(29), 得

$$\|r_d(t)\|^2 \leq \frac{1}{l_1} V_1(0) e^{-\lambda t} + \left(\frac{\mu}{l_1 \lambda} + l_2 \right) \|d(t)\|_\infty^2. \quad (30)$$

综上, 定理 2 得证. \square

1.5 故障敏感度分析

考虑一般的 Lyapunov 函数并利用如下定理给出故障敏感度的条件.

定理 3 若存在 $\beta > 0$, 矩阵 $P_2 > 0$, 使得如下矩阵不等式成立:

$$[A]_{3 \times 3} < 0, \quad (31)$$

其中矩阵 $A_{3 \times 3}$ 中非零元素为

$$\begin{aligned} A_{1,1} &= \tilde{A}^T P_2 + P_2 \tilde{A}, \\ A_{1,2} &= P_2 \tilde{F} - \tilde{C}^T \Pi, \\ A_{1,3} &= \tilde{C}^T, \\ A_{2,2} &= (\Pi^T \Pi - \beta^2) I, \\ A_{3,3} &= -I. \end{aligned}$$

则误差系统(12)稳定且满足 H_∞ 性能指标.

证明 定义 Lyapunov 函数

$$V_2(e_f(t)) = e_f^T(t) P_2 e_f(t), \quad (32)$$

其中 $P_2 > 0$.

故障敏感度引入的 H_∞ 性能指标需要保证下式成立:

$$\dot{V}_2(e_f(t)) + (r_f(t) - \Pi f(t))^T (r_f(t) - \Pi f(t)) - \beta^2 f^T(t) f(t) < 0. \quad (33)$$

误差系统(12)转化为

$$\begin{cases} \dot{e}_f(t) = \tilde{A} e_f(t) + \tilde{F} f(t), \\ r_f(t) = \tilde{C} e_f(t). \end{cases} \quad (34)$$

其中: $\tilde{A} = \Psi A - LC$, $\tilde{F} = \Psi F$, $\tilde{C} = C$.

由式(32)~(34),得到

$$\begin{aligned} &\dot{V}_2(e_f(t)) + (r_f(t) - \Pi f(t))^T (r_f(t) - \Pi f(t)) - \\ &\beta^2 f^T(t) f(t) = \\ &[e_f^T(t) \quad f^T(t)] \begin{bmatrix} \tilde{A}^T P_2 + P_2 \tilde{A} + \tilde{C}^T \tilde{C} & P_2 \tilde{F} - \tilde{C}^T \Pi \\ * & \Pi^T \Pi - \beta^2 I \end{bmatrix} \times \\ &\begin{bmatrix} e_f(t) \\ f(t) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (35)$$

由式(33)和(35),得到

$$\begin{bmatrix} \tilde{A}^T P_2 + P_2 \tilde{A} + \tilde{C}^T \tilde{C} & P_2 \tilde{F} - \tilde{C}^T \Pi \\ * & (\Pi^T \Pi - \beta^2) I \end{bmatrix} < 0. \quad (36)$$

引入舒尔补定理,将式(36)转化为

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \tilde{A}^T P_2 + P_2 \tilde{A} & P_2 \tilde{F} - \tilde{C}^T \Pi & \tilde{C}^T \\ * & (\Pi^T \Pi - \beta^2) I & 0 \\ * & * & -I \end{bmatrix} < 0. \quad (37)$$

综上,定理3得证. \square

1.6 故障检测决策

通过如下算法获得观测器(3)增益参数的最优值,从而实现更早的故障进行检测.

算法1 在式(15)、(16)、(26)和(31)不等式条件下,通过如下凸优化问题求解观测器(3)中的 Ψ 、 ϕ 、 L 增益参数:

$$\min \rho_1 \alpha + \rho_2 \beta - \rho_3 l_1 + \rho_4 l_2, \quad (38)$$

其中 $\rho_1 > 0$, $\rho_2 > 0$, $\rho_3 > 0$, $\rho_4 > 0$ 为加权因子,应事先给出.

注1 本文结合残差与自适应阈值检测系统是否发生故障. 无故障发生时,残差小于自适应阈值;发生故障时,将无法保证残差小于自适应阈值的关系. 此外,扰动鲁棒性和故障敏感度限制条件使得扰动对残差的影响最小,故障对残差的影响最大.

2 仿真与实验验证

2.1 深沟球轴承模型建立

深沟球轴承将滚动体与内外滚道之间的接触视为弹簧-阻尼系统,系统简化模型如图1所示.

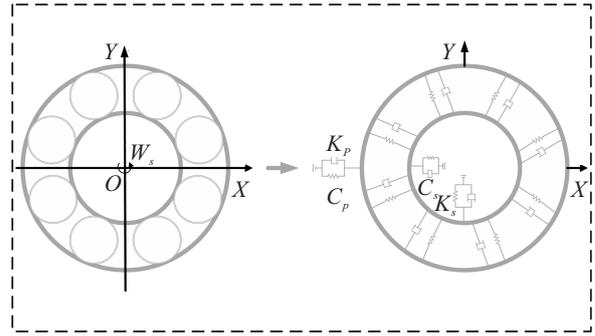


图1 深沟球轴承简化模型

在大多数的深沟球轴承故障检测方法中,通常针对特定故障(如裂缝,不均匀载荷)进行动力学建模. 为了使故障检测方法具有普适性,将深沟球轴承中的所有故障均认为是故障信号 F_f . 根据牛顿第二定律,含外圈损伤的深沟球轴承动力学模型^[20]为

$$\begin{aligned} M_s \ddot{X}_s + C_s \dot{X}_s + K_s X_s + F_f &= F_{b1}, \\ M_s \ddot{Y}_s + C_s \dot{Y}_s + K_s Y_s + F_f &= F_{b2}, \\ M_p \ddot{X}_p + C_p \dot{X}_p + K_p X_p + F_f &= F_{b3}, \\ M_p \ddot{Y}_p + C_p \dot{Y}_p + K_p Y_p + F_f &= F_{b4}. \end{aligned} \quad (39)$$

其中: K_s 为内圈与主轴之间的接触刚度; C_s 为内圈与主轴之间的阻尼; K_p 为轴承座之间的接触刚度; C_p 为外圈与轴承之间的阻尼; F_f 为故障信号; F_{b1} 、 F_{b2} 、 F_{b3} 、 F_{b4} 为未知扰动.

将深沟球轴承外圈两自由度的动力学模型转化为状态空间方程,即

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A_x X(t) + E_x d_x(t) + F_x f_x(t), \\ y_x(t) = C_x X(t); \end{cases} \quad (40)$$

$$\begin{cases} \dot{Y}(t) = A_y Y(t) + E_y d_y(t) + F_y f_y(t), \\ y_y(t) = C_y Y(t). \end{cases} \quad (41)$$

其中: $X(t) = \begin{bmatrix} X_s \\ \dot{X}_s \end{bmatrix}$, $Y(t) = \begin{bmatrix} Y_s \\ \dot{Y}_s \end{bmatrix}$; $d_x(t) = F_{b1}$, $d_y(t) = F_{b2}$, $d_x(t)$ 和 $d_y(t)$ 分别为水平和垂直方向扰动; $f_x(t) = f_y(t) = F_f$ 分别为水平和垂直方向故障信

$$\text{号}; A_x = A_y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -M_s^{-1}K_s & -M_s^{-1}C_s \end{bmatrix}, E_x = F_x = E_y = F_y = \begin{bmatrix} 0 \\ -M_s^{-1} \end{bmatrix}, C_x = C_y = [0, 1].$$

2.2 数值仿真

首先,利用数值仿真验证所提出方法的优势,扰动为 $d_x(t) = 0.03 \times \cos(350 \times \pi/6)t, d_y(t) = 0.03 \times \sin(350 \times \pi/6)t$,故障信号的仿真数值为

$$f_x(t) = f_y(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 3; \\ 0.06, & 3 \leq t \leq 10. \end{cases} \quad (42)$$

算法1中,参数 $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho_4 = 1$,利用 Matlab 中 LMI 工具包求解凸优化得到观测器增益参数

$$\Psi_n A_n - L_n C_n = \begin{bmatrix} 0 & 0.9294 \\ -0.5377 & -0.3801 \end{bmatrix},$$

$$\Psi_w A_w - L_w C_w = \begin{bmatrix} 0 & 0.9294 \\ -0.5192 & -0.241 \end{bmatrix}.$$

自适应阈值(27)中的实标量 $l_1 = 2.32, l_2 = 0.18, \lambda = 0.34, \mu = 0.83$.

所提出观测器与 Luenberger 观测器在相同的优化条件下产生残差以及自适应阈值如图2和图3所示.

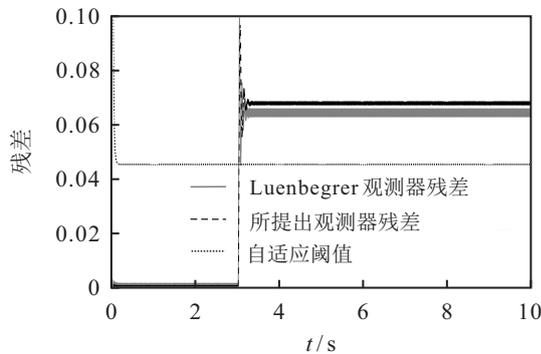


图2 水平方向深沟球轴承残差与自适应阈值

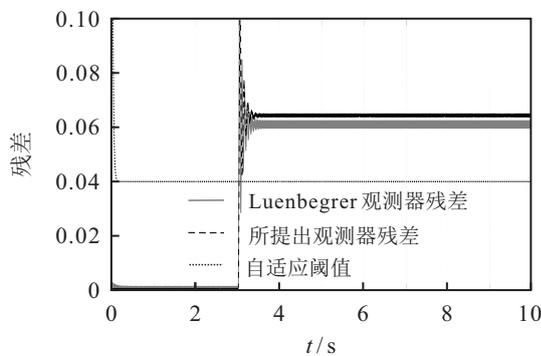


图3 竖直方向深沟球轴承残差与自适应阈值

由图2和图3可见,当无故障发生时,自适应阈值大于残差,若出现故障,则残差会超过自适应阈值并发出警报.

表1分别计算了故障发生和无故障发生时产生残差的有效值,定量地验证了所提出观测器相比于 Luenberger 观测器具有更好的表现.当无故障发生时,深沟球轴承内外圈采用改进观测器产生残差RMS分别等于0.000 51和0.000 48,远小于采用 Luenberger 观测器产生的残差0.001 1;当故障发生时,深沟球轴承内外圈采用改进观测器产生残差RMS分别等于0.064 56和0.064 61,大于采用 Luenberger 观测器产生残差RMS的0.061 25和0.061 31.

表1 发生故障前后改进观测器产生残差与 Luenberger 观测器产生残差的有效值

	$0 \leq t < 3$		$3 \leq t \leq 10$	
	水平	竖直	水平	竖直
Luenberger 观测器	0.001 1	0.001 1	0.061 2	0.061 3
所提出观测器	0.000 51	0.000 48	0.064 5	0.064 6

2.3 实验背景

实验装置为两轴承实验台,如图4所示.故障轴承安装在轴承座1,轴承座2为无故障轴承,2个轴承座相距760 mm.深沟球轴承型号为6312,振动响应传感器型号为AIC 60.

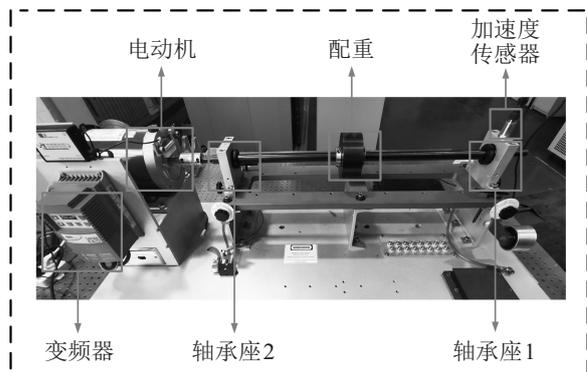
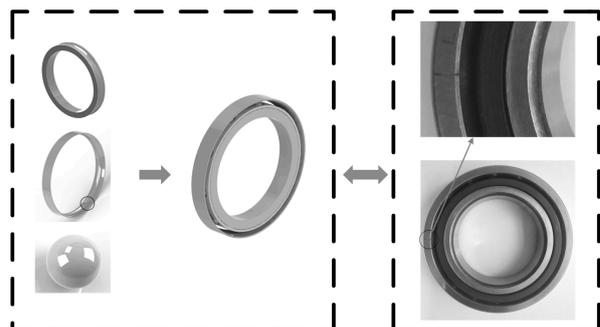


图4 两轴承实验台

深沟球轴承的刚度、阻尼等参数采用文献[21]得到的数据,利用上述实验装置对外圈损伤深沟球轴承进行实验,外圈的损伤深度为0.5 mm,宽度为0.2 mm.图5展示了深沟球轴承的外圈损伤.



外圈故障装配示意图

实际外圈故障轴承

图5 含外圈损伤的深沟球轴承装配示意图

2.4 实验结果与分析

利用两轴承实验台以及传感器,分别测量含有外部损伤深沟球轴承以及正常深沟球轴承水平和竖直方向的振动响应数据.

所提出观测器与Luenberger观测器采用正常深沟球轴承实际测得的振动响应数据,得到的残差以及自适应阈值如图6和图7所示.

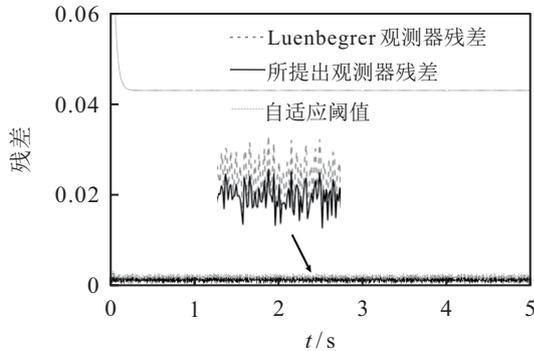


图6 水平方向正常深沟球轴承残差与自适应阈值

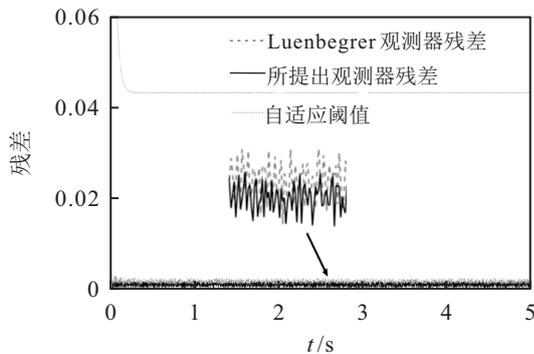


图7 竖直方向正常深沟球轴承残差与自适应阈值

所提出观测器与Luenberger观测器采用外圈损伤深沟球轴承实际测得的振动响应数据,得到的残差以及自适应阈值如图8和图9所示.

由图6和图7可见,无论是水平方向还是竖直方向,真实测量正常深沟球轴承振动响应信号产生的残差明显低于自适应阈值,此时无故障预警.由图8和图9可见,无论是水平方向还是竖直方向,真实测量外圈损伤深沟球轴承振动响应信号产生的残差明显高于自适应阈值,此时故障预警.采用Luenberger观

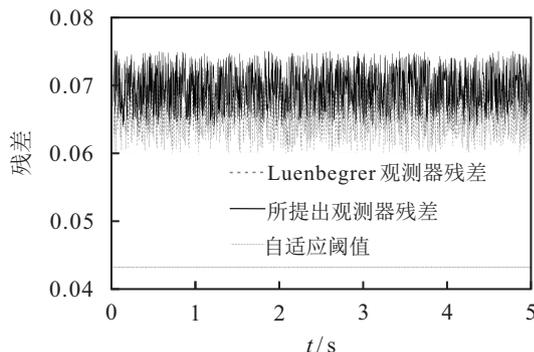


图8 水平方向外圈损伤深沟球轴承残差与自适应阈值

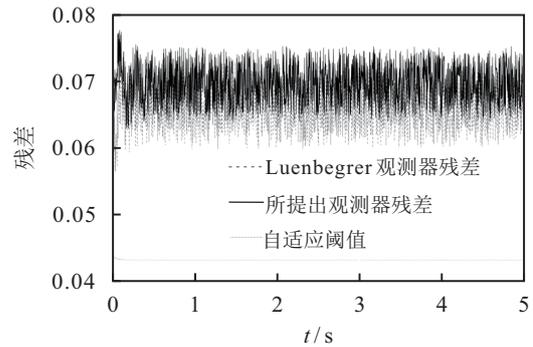


图9 竖直方向外圈损伤深沟球轴承残差与自适应阈值

测器产生的残差虽然也可以对故障进行检测,但是采用改进观测器产生的残差无论是未知扰动鲁棒性还是故障敏感度均具有更好的表现.综上所述,采用改进的观测器相比于采用Luenberger观测器可以检测更加早期的故障,具有一定的实际意义.

3 结论

本文提出了一种基于改进观测器的故障检测方法.当没有故障时,基于改进的观测器产生残差远低于未知扰动幅值;发生故障时,残差高于故障幅值.结果表明, l_1/H_∞ 性能指标的引入提升了观测器产生残差的故障敏感度以及未知扰动鲁棒性.自适应阈值中的参数通过优化使得无故障发生时,自适应阈值与残差之间的距离较小且高于残差.一旦发生故障,残差高于自适应阈值,此时将发出故障警报.根据含故障深沟球轴承定量分析以及实验结果表明,所提出方法产生的残差,无论是未知扰动的鲁棒性还是故障敏感度均优于基于Luenberger观测器产生的残差,所提出的故障检测方法可以检测更加早期的故障.综上所述,所提出方法在故障检测中具有良好的表现,是深沟球轴承故障检测的良好替代方法.未来的工作会将观测器应用到变工况条件下(旋转速度、负荷)检测深沟球轴承的早期故障.

参考文献(References)

[1] Leão L S, Cavalini A A J, Morais T S J, et al. Fault detection in rotating machinery by using the modal state observer approach[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 458: 123-142.

[2] Lei Y G, Yang B, Jiang X W, et al. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 138: 106587.

[3] 沈长青, 汤盛浩, 江星星, 等. 独立自适应学习率优化深度信念网络在轴承故障诊断中的应用研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(7): 81-88.

(Shen C Q, Tang S H, Jiang X X, et al. Bearings

- fault diagnosis based on improved deep belief network by self-individual adaptive learning rate[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(7): 81-88.)
- [4] Shi H T, Bai X T. Model-based uneven loading condition monitoring of full ceramic ball bearings in starved lubrication[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 139: 106583.
- [5] Ye D, Chen M M, Yang H J. Distributed adaptive event-triggered fault-tolerant consensus of multiagent systems with general linear dynamics[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(3): 757-767.
- [6] Gomez J L, Khelf I, Bourdon A, et al. Angular modeling of a rotating machine in non-stationary conditions: application to monitoring bearing defects of wind turbines with instantaneous angular speed[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 136: 27-51.
- [7] Sun W J, Zhao R, Yan R Q, et al. Convolutional discriminative feature learning for induction motor fault diagnosis[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(3): 1350-1359.
- [8] 杨光红, 张志慧. 基于区间观测器的动态系统故障诊断技术综述[J]. *控制与决策*, 2018, 33(5): 769-781. (Yang G H, Zhang Z H. Review of interval observer based fault diagnosis techniques for dynamic systems[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(5): 769-781.)
- [9] Luenberger D G. Observing the state of a linear system[J]. *IEEE Transactions on Military Electronics*, 1964, 8(2): 74-80.
- [10] Chen J, Patton R J, Zhang H Y. Design of unknown input observers and robust fault detection filters[J]. *International Journal of Control*, 1996, 63(1): 85-105.
- [11] Zhang Q H. Adaptive Kalman filter for actuator fault diagnosis[J]. *Automatica*, 2018, 93: 333-342.
- [12] Chebotarev S, Efimov D, Răissi T, et al. Interval observers for continuous-time LPV systems with L_1/L_2 performance[J]. *Automatica*, 2015, 58: 82-89.
- [13] Henry D. Structured fault detection filters for LPV systems modeled in an LFR manner[J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2012, 26(3): 190-207.
- [14] Chibani A, Chadli M, Shi P, et al. Fuzzy fault detection filter design for T-S fuzzy systems in the finite-frequency domain[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2017, 25(5): 1051-1061.
- [15] Gu Y, Yang G H. Fault detection for discrete-time Lipschitz non-linear systems in finite-frequency domain[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2017, 11(14): 2177-2186.
- [16] Raka S A, Combastel C. Fault detection based on robust adaptive thresholds: A dynamic interval approach[J]. *Annual Reviews in Control*, 2013, 37(1): 119-128.
- [17] Khan A Q, Ding S X. Threshold computation for fault detection in a class of discrete-time nonlinear systems[J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2011, 25(5): 407-429.
- [18] Wang Z H, Lim C C, Shen Y. Interval observer design for uncertain discrete-time linear systems[J]. *Systems & Control Letters*, 2018, 116: 41-46.
- [19] Zhang Z H, Yang G H. Event-triggered fault detection for a class of discrete-time linear systems using interval observers[J]. *ISA Transactions*, 2017, 68: 160-169.
- [20] 王凯. 深沟球轴承单、多点故障动力学复合模型与振动特性分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019. (Wang K. Dynamic modeling and vibration characteristics of deep groove ball bearings with single and multi-point faults[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.)
- [21] 杨瑞. 含局部故障球轴承-刚性转子系统动力学特性分析及其应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018. (Yang R. Research on dynamic characteristics and its application of a ball bearing-rigid rotor system with a local defect[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.)

作者简介

石怀涛(1982—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能主轴故障诊断等研究, E-mail: sht@sjzu.edu.cn;

侯马骁(1996—), 男, 硕士生, 从事早期故障检测等研究, E-mail: houmax@stu.sjzu.edu.cn;

吴玉厚(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 从事机械故障诊断等研究, E-mail: wuyh@sjzu.edu.cn;

佟圣皓(1989—), 男, 讲师, 博士, 从事机械故障诊断等研究, E-mail: tongshenghao@sjzu.edu.cn;

何劝云(1979—), 男, 高级工程师, 从事机械故障诊断等研究, E-mail: 18716176@qq.com.

(责任编辑: 魏冰)