



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104749959 B

(45)授权公告日 2017.05.10

(21)申请号 201510205113.X

审查员 李亚琼

(22)申请日 2015.04.27

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104749959 A

(43)申请公布日 2015.07.01

(73)专利权人 重庆大学

地址 400044 重庆市沙坪坝区沙正街174号

(72)发明人 宋永端 卢颖 王磊 陈晨 张涛

周宏颖

(74)专利代理机构 重庆信航知识产权代理有限公司

公司 50218

代理人 穆祥维

(51)Int.Cl.

G05B 13/04(2006.01)

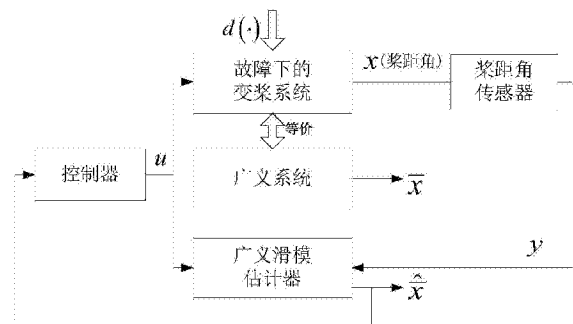
权利要求书4页 说明书9页 附图2页

(54)发明名称

一种基于广义滑模估计器的机组变桨容错控制方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于广义滑模估计器的机组变桨容错控制方法,包括如下步骤:1)建立同时存在执行器故障和传感器故障下的变桨系统模型;2)引入增广状态向量,将原来故障下变桨系统模型变换成广义系统模型;3)基于广义系统模型设计广义滑模估计器,实现对桨叶位置状态估计和系统故障重构;4)基于状态估计设计容错控制方法,实现故障系统的状态稳定;5)根据确保估计误差系统和原状态系统稳定的线性矩阵不等式条件,计算参数矩阵,把各参数矩阵配置给所设计的估计器和控制器。本发明建立了估计误差系统和原状态系统稳定的条件,确保估计误差收敛性和状态的有界性,最终实现对执行器故障和传感器故障的重构,以及对故障变桨系统的容错控制。



1. 一种基于广义滑模估计器的机组变桨容错控制方法, 其特征在于, 该方法包括如下步骤:

1) 建立同时存在执行器故障和传感器故障下的变桨系统模型;

首先, 考虑存在执行器故障下的叶轮动态方程:

$$M(\cdot)\ddot{x}(t) + \Phi(t, x, \dot{x}) + d(t, x, \dot{x}) = u(t) + f_a(t) \quad (1)$$

再次, 考虑存在传感器故障下的桨距角测量方程为:

$$y(t) = x(t) + f_s(t) \quad (2)$$

其中, $M(\cdot) = J_{LB} + J_{BI} > 0$; $\Phi(t, x, \dot{x}) = \left(\frac{dJ_{LB}}{dt} + \frac{dJ_{BI}}{dt} + k_{DB} + k_{RL} \right) \dot{x} + \left(\frac{dk_{DB}}{dt} + \frac{dk_{RL}}{dt} \right) x$; $x(t) \in \mathbb{R}$, $\dot{x}(t) \in \mathbb{R}$, $\ddot{x}(t) \in \mathbb{R}$ 分别代表实际的桨距角、相应的角速度以及相应的角加速度, $y(t) \in \mathbb{R}$ 是桨距角的实际测量值, $d(t, x, \dot{x}) \in \mathbb{R}$ 是推进器、叶片升力、叶片弯曲、振动及不平衡载荷引起的总力矩, $u(t) \in \mathbb{R}$ 是控制输入, $f_a(t) \in \mathbb{R}$ 是执行器故障函数, $f_s(t) \in \mathbb{R}$ 是传感器故障函数, J_{LB} 为空气加速引起的等效惯量力矩, J_{BI} 是转子叶片沿其纵轴的全部惯性力矩, k_{DB} 是阻尼系数, k_{RL} 是摩擦系数;

进一步, 方程 (1) 可以写成:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + B[u(t) + f_a(t) - \Phi(t, x, \dot{x}) - d(t, x, \dot{x})] \quad (3)$$

$$\text{其中, } X = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix};$$

而测量方程 (2) 可以写成:

$$Y(t) = CX(t) + D_s f_s(t) \quad (4)$$

其中 $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $D_s \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ 为已知的 2 乘 1 阶的常值矩阵;

2) 引入增广状态向量 \bar{X} , 将原来故障下变桨系统模型变换成一种新型的广义系统模型;

定义如下的增广矩阵:

$$\begin{aligned} \bar{X}(t) &\triangleq \begin{bmatrix} X \\ f_a \\ D_s f_s \end{bmatrix}, \quad \bar{A} \triangleq \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & -\delta & 0 \\ 0 & 0 & -I_2 \end{bmatrix}, \quad \bar{B} \triangleq \begin{bmatrix} B \\ 0_{1 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix}, \quad \bar{C} \triangleq [C \quad 0_{2 \times 1} \quad I_2], \\ \bar{E} &\triangleq \begin{bmatrix} I_2 & \delta^{-1} B & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix}, \quad \bar{N} \triangleq \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} \\ 0_{1 \times 2} \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_f \triangleq \begin{bmatrix} \delta^{-1} B & 0_{2 \times 1} & -B \\ 1 & 0 & 0_{1 \times 2} \\ 0_{2 \times 1} & D_s & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix}, \\ \bar{f} &\triangleq \begin{bmatrix} \delta f_a + \dot{f}_a \\ f_s \\ d \end{bmatrix}, \quad \bar{\Phi} \triangleq \begin{bmatrix} -B\Phi \\ 0_{1 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

其中, I_p 代表维数为 p 单位矩阵, $0_{k \times 1}$ 代表 k 行 1 列的零矩阵, 参数 $\delta > 0$ 要使得下面条件 (6) 成立;

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \delta I_2 + A & B \\ C & 0 \end{bmatrix} = 3 \quad (6)$$

其中rank表示矩阵的秩；

最终,可以得到一个增广的广义系统模型 (7)；

$$\begin{cases} \bar{E}\dot{\bar{X}}(t) = \bar{A}\bar{X}(t) + \bar{B}u(t) + \bar{B}_f \bar{f}(t) + \bar{\Phi}(X) \\ Y(t) = \bar{C}\bar{X}(t) \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\bar{X}(t) \in \mathbb{R}^5$ 是式 (5) 中所定义的维数为5的广义系统向量, $Y(t) \in \mathbb{R}^2$ 是维数为2的广义系统测量输出向量, $\bar{\Phi}(X) \in \mathbb{R}^5$ 是式 (5) 中所定义的维数为5的广义非线性向量, $\bar{E} \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$ 是式 (5) 中所定义的5乘5阶的矩阵, $\bar{A} \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$ 是式 (5) 中所定义的5乘5阶的参数矩阵, $\bar{B} \in \mathbb{R}^{5 \times 1}$ 是式 (5) 中所定义的5乘1阶的参数矩阵, $\bar{B}_f \in \mathbb{R}^{5 \times 3}$ 是式 (5) 中所定义的5乘3阶的矩阵, $\bar{C} \in \mathbb{R}^{2 \times 5}$ 是式 (5) 中所定义的2乘5阶的参数矩阵, $\bar{f} \in \mathbb{R}^3$ 是式 (5) 中所定义的维数为3的广义故障向量；

3) 基于广义系统模型 (7) 设计出以下结构的广义滑模估计器 (8), 实现对桨叶位置状态估计和系统故障重构；

$$\begin{cases} (\bar{E} + \bar{L}_D \bar{C}) \dot{\xi}(t) = (\bar{A} - \bar{L}_P \bar{C}) \xi(t) - \bar{N}Y(t) + Bu(t) + \bar{\Phi}(\hat{X}) + \bar{L}_s u_s(t) \\ \hat{X}(t) = \xi(t) + (\bar{E} + \bar{L}_D \bar{C})^{-1} Y(t) \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\xi(t) \in \mathbb{R}^5$ 是维数为5的中间变量向量, $\hat{X}(t) \in \mathbb{R}^5$ 是维数为5的增广的广义系统状态估计向量, $\bar{N} \in \mathbb{R}^{5 \times 2}$ 是式 (5) 中所定义的5乘2阶的矩阵, $\bar{L}_D \in \mathbb{R}^{5 \times 2}$, $\bar{L}_P \in \mathbb{R}^{5 \times 2}$, $\bar{L}_s \in \mathbb{R}^{5 \times 3}$ 分别是所设计的5乘2阶的微分增益矩阵, 5乘2阶的比例增益矩阵以及5乘3阶的滑模增益矩阵, $u_s(t) \in \mathbb{R}^3$ 是维数为3的连续的输入信号；

3.1) 设计微分增益 $\bar{L}_D = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} \\ 0_{1 \times 2} \\ I_2 \end{bmatrix}$, 则可证明矩阵 $(\bar{E} + \bar{L}_D \bar{C})$ 是非奇异的；

3.2) 设计比例增益 \bar{L}_P ；

首先, 利用如下李雅普诺夫方程 (9) 求解出矩阵 \bar{Z} ；

$$-\left(\mu I + (\bar{E} + \bar{L}_D \bar{C})^{-1} \bar{A}\right)^T \bar{Z} - \bar{Z} \left(\mu I + (\bar{E} + \bar{L}_D \bar{C})^{-1} \bar{A}\right) = -\bar{C}^T \bar{C} \quad (9)$$

其中, $\mu > 0$ 满足 $\text{Re} \left[\lambda_i \left((\bar{E} + \bar{L}_D \bar{C})^{-1} \bar{A} \right) \right] > -\mu$ ；

进一步, 比例增益 \bar{L}_P 可通过式子 (10) 进行计算；

$$\bar{L}_P = (\bar{E} + \bar{L}_D \bar{C}) \bar{Z}^{-1} \bar{C}^T \quad (10)$$

3.3) 设计滑模增益 $\bar{L}_s = \bar{B}_f$ ；

3.4) 令 $\bar{W} \triangleq (\bar{E} + \bar{L}_D \bar{C})^{-1}$ 和 $\bar{e}(t) \triangleq \hat{X}(t) - \bar{X}(t)$, 定义如下滑模面：

$$s(t) = \bar{B}^T \bar{W}^T \bar{P} \bar{e}(t) \quad (11)$$

其中, $\bar{P} > 0$ 为正定矩阵, 且满足以下条件:

$$\bar{B}^T \bar{W}^T \bar{P} = \bar{H} \bar{C} \quad (12)$$

其中, $\bar{H} \in \mathbb{R}^{3 \times 2}$ 是由 \bar{P} 所确定的 3 乘 2 阶的设计矩阵;

于是, 最终设计的滑模面变为:

$$s(t) = \bar{H} \bar{C} \bar{e}(t) \quad (13)$$

设计的连续输入信号具有如下的滑模形式:

$$u_s(t) = -(\delta \alpha_0 + \alpha_1 + \beta_0 + d_0 + \gamma) \frac{s(t)}{(\|s(t)\| + o)} \quad (14)$$

其中, $\delta > 0$ 满足条件 (6), $\gamma > 0$ 为设计参数, $o > 0$ 是一个小常数, 取 $o = 10^{-3}$, $\alpha_0, \alpha_1, \beta_0$ 和 d_0 满足以下条件 (15):

$$|f_a(t)| \leq \alpha_0, \quad |\dot{f}_a(t)| \leq \alpha_1, \quad |f_s(t)| \leq \beta_0, \quad |d(t)| \leq d_0 \quad (15)$$

4) 基于状态估计设计容错控制方法, 实现故障系统的状态稳定;

4.1) 基于状态估计值, 定义一个积分型滑模面 (16):

$$\hat{s}(t) = G \hat{X}(t) - \int_0^t G(A+BK) \hat{X}(\tau) d\tau \quad (16)$$

其中, $G \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ 和 $K \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 分别是所设计 1 乘 2 阶的参数矩阵; 矩阵 G 要使得 $GB=1$, 矩阵 K 要使得矩阵 $(A+BK)$ 是霍尔维茨的;

4.2) 所设计的控制器结构 (17) - (18) 如下所示:

$$u(t) = K \hat{X}(t) + \Phi(\hat{X}) + u_{s3}(t) - \delta^{-1} u_{s1}(t) - \gamma_1 \hat{s}(t) - \rho(t) \frac{\hat{s}(t)}{(\|\hat{s}(t)\| + o)} \quad (17)$$

且

$$\rho(t) = \|G \bar{L}_{p1}\| \|\bar{C} \bar{e}(t)\| + \delta^{-1} \|\dot{f}_a(t)\| \quad (18)$$

其中,

$$\bar{L}_{p1} = [I_2 \quad 0_{2 \times 1} \quad 0_{2 \times 2}] \bar{L}_P$$

$$u_{s1}(t) = [1 \quad 0 \quad 0] u_s(t) \quad (19)$$

$$u_{s3}(t) = [0 \quad 0 \quad 1] u_s(t)$$

5) 给出估计误差系统和原状态系统稳定的条件, 计算参数矩阵, 并把各参数矩阵配置给所设计的估计器和控制器;

稳定性条件: 在滑模控制 $u_s(t)$ 和控制输入 $u(t)$ 下, 如果存在 2 乘 2 阶的正定矩阵 $R \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$, 2 乘 2 阶的正定矩阵 $\bar{P} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 和 3 乘 2 阶的矩阵 $\bar{H} \in \mathbb{R}^{3 \times 2}$ 使得下面 LMI 优化问题 (20) 成立:

$$\min(v(\theta + \varepsilon) + (1-v)\vartheta)$$

st.

$$\begin{bmatrix}
 (A+BK)^T R + R(A+BK) & R(BG-I_2)\bar{L}_p\bar{C} & I_2 & R(I_2-BG) & 0 & 0 \\
 (R(BG-I_2)\bar{L}_p\bar{C})^T & (\bar{A}-\bar{L}_p\bar{C})^T \bar{W}^T \bar{P} + \bar{P}\bar{W}(\bar{A}-\bar{L}_p\bar{C}) & 0 & 0 & I_5 & \bar{P}\bar{W} \\
 I_2 & 0 & -\theta I_2 & 0 & 0 & 0 \\
 (R(I_2-BG))^T & 0 & 0 & -\varepsilon I_2 & 0 & 0 \\
 0 & I_5 & 0 & 0 & -\theta I_5 & 0 \\
 0 & \bar{W}^T \bar{P} & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon I_5
 \end{bmatrix} < 0$$

$$\begin{bmatrix}
 -\theta I_5 & (\bar{B}^T \bar{W}^T \bar{P} - \bar{H}\bar{C})^T \\
 (\bar{B}^T \bar{W}^T \bar{P} - \bar{H}\bar{C}) & -I_3
 \end{bmatrix} < 0$$

(20)

其中, θ 是固定常数,

则可以确保估计误差系统和原状态系统的稳定;

通过LMI工具箱的“mincx”求解器,可以方便地求解以上线性矩阵不等式优化问题,计算出所设计的参数矩阵 \bar{H} ;

最后,在风电变桨系统中,将LMI优化问题中求解出的参数矩阵 \bar{H} ,同以上步骤中所设计的微分增益矩阵 \bar{L}_D ,比例增益矩阵 \bar{L}_p ,滑模增益矩阵 \bar{L}_s ,控制器参数矩阵G和K相应配置给所设计的估计器和控制器,实现对桨叶位置的估计和对执行器故障和传感器故障的重构,实现变桨系统稳定。

一种基于广义滑模估计器的机组变桨容错控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于估计器的容错控制方法,尤其涉及一种基于广义滑模估计器的机组变桨容错控制方法。

背景技术

[0002] 对于风力发电这类实际工程系统,长期运行时通常不可避免地出现执行器故障或是传感器故障。对于一个发生故障的动态系统,如何维持系统稳定成为控制系统设计的一个重要课题。

[0003] 目前,大多数容错控制方法都建立在传统的故障检测与诊断(FDD)基础上。但是,现存故障检测与诊断(FDD)技术并不能直接反映故障对系统状态的影响程度。于是在FDD基础上,提出了故障重构的思想:根据已被故障影响的过程变量的测量值来估计出故障的大小和位置,几乎可以将故障信号完整地重现出来,不但能够直观地反映出故障的发生、发展过程,还可通过对信号的分析方便地获得关于故障的类型、性质、严重程度以及可能对系统造成的影响、危害等一系列信息。

[0004] 目前,针对风力变桨系统,还没有完整地在模型里考虑其非线性、不确定性以及多重故障(包括执行器故障和传感器故障)同时存在的情况。针对变桨系统这样复杂的故障情况,对执行器故障或是传感器故障的重构和还原造成了极大的难度。目前,对于故障重构方法的研究成果主要体现在基于观测器或估计器的故障重构技术上。目前主要有三大类:一是基于广义观测器的估计方法;二是基于滑模观测器的故障重构技术;三是基于鲁棒自适应观测器的方法。这三类方法在不同的应用场合体现着自身的优缺点。但在现有的研究成果中,还没有将故障重构的方法有效地应用到机组变桨的故障系统中去,进而同时实现对执行器故障和传感器故障的重构并有效地获取故障信息,采取更有效的容错控制措施。

发明内容

[0005] 针对现有技术中风电变桨系统存在的上述不足,本发明充分考虑了系统的非线性、不确定性以及同时存在执行器故障和传感器故障的情况,提供了一种基于广义滑模估计器的机组变桨容错控制方法,不仅能实现执行器故障和传感器故障的重构,还能实现故障系统的状态稳定。

[0006] 为了解决上述技术问题,本发明采用了如下技术方案:

[0007] 一种基于广义滑模估计器的机组变桨容错控制方法,其特征在于,该方法包括如下步骤:

[0008] 1) 建立同时存在执行器故障和传感器故障下的变桨系统模型;

[0009] 首先,考虑存在执行器故障下的叶轮动态方程:

$$[0010] \quad M(\cdot)\ddot{x}(t) + \Phi(t, x, \dot{x}) + d(t, x, \dot{x}) = u(t) + f_a(t) \quad (1)$$

[0011] 再次,考虑存在传感器故障下的桨距角测量方程为:

$$[0012] \quad y(t) = x(t) + f_s(t) \quad (2)$$

[0013] 其中, $M(\cdot) = J_{LB} + J_{BI} > 0$; $\Phi(t, x, \dot{x}) = \left(\frac{dJ_{LB}}{dt} + \frac{dJ_{BI}}{dt} + k_{DB} + k_{RL} \right) \dot{x} + \left(\frac{dk_{DB}}{dt} + \frac{dk_{RL}}{dt} \right) x$;
 $x(t) \in \mathbb{R}$, $\dot{x}(t) \in \mathbb{R}$, $\ddot{x}(t) \in \mathbb{R}$ 分别代表实际的桨距角、相应的角速度以及相应的角加速度,
 $y(t) \in \mathbb{R}$ 是桨距角的实际测量值, $d(t, x, \dot{x}) \in \mathbb{R}$ 是推进器、叶片升力、叶片弯曲、振动及不平衡
 载荷引起的总力矩, $u(t) \in \mathbb{R}$ 是控制输入, $f_a(t) \in \mathbb{R}$ 是执行器故障函数, $f_s(t) \in \mathbb{R}$ 是传感器故
 障函数, J_{LB} 为空气加速引起的等效惯量力矩, J_{BI} 是转子叶片沿其纵轴的全部惯性力矩, k_{DB}
 是阻尼系数, k_{RL} 是摩擦系数;

[0014] 进一步, 方程 (1) 可以写成:

$$[0015] \quad \dot{X}(t) = AX(t) + B[u(t) + f_a(t) - \Phi(t, x, \dot{x}) - d(t, x, \dot{x})] \quad (3)$$

$$[0016] \quad \text{其中, } X = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix};$$

[0017] 而测量方程 (2) 可以写成:

$$[0018] \quad Y(t) = CX(t) + D_s f_s(t) \quad (4)$$

$$[0019] \quad \text{其中 } C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_s \in \mathbb{R}^{2 \times 1} \text{ 为已知的 2 乘 1 阶的常值矩阵};$$

[0020] 2) 引入增广状态向量 X , 将原来故障下变桨系统模型变换成一种新型的广义系统
 模型;

[0021] 定义如下的增广矩阵:

$$[0022] \quad \bar{X}(t) \triangleq \begin{bmatrix} X \\ f_a \\ D_s f_s \end{bmatrix}, \quad \bar{A} \triangleq \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & -\delta & 0 \\ 0 & 0 & -I_2 \end{bmatrix}, \quad \bar{B} \triangleq \begin{bmatrix} B \\ 0_{1 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix}, \quad \bar{C} \triangleq [C \quad 0_{2 \times 1} \quad I_2],$$

$$\bar{E} \triangleq \begin{bmatrix} I_2 & \delta^{-1} B & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix}, \quad \bar{N} \triangleq \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} \\ 0_{1 \times 2} \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_f \triangleq \begin{bmatrix} \delta^{-1} B & 0_{2 \times 1} & -B \\ 1 & 0 & 0_{1 \times 2} \\ 0_{2 \times 1} & D_s & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\bar{f} \triangleq \begin{bmatrix} \delta f_a + \dot{f}_a \\ f_s \\ d \end{bmatrix}, \quad \bar{\Phi} \triangleq \begin{bmatrix} -B\Phi \\ 0_{1 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix}.$$

[0023] 其中, I_p 代表维数为 p 单位矩阵, $0_{k \times 1}$ 代表 k 行 1 列的零矩阵, 参数 $\delta > 0$ 要使得下面条
 件 (6) 成立;

$$[0024] \quad \text{rank} \begin{bmatrix} \delta I_2 + A & B \\ C & 0 \end{bmatrix} = 3 \quad (6)$$

[0025] 其中 rank 表示矩阵的秩;

[0026] 最终, 可以得到一个增广的广义系统模型 (7);

$$[0027] \quad \begin{cases} \bar{E} \dot{\bar{X}}(t) = \bar{A} \bar{X}(t) + \bar{B} u(t) + \bar{B}_f \bar{f}(t) + \bar{\Phi}(X) \\ Y(t) = \bar{C} \bar{X}(t) \end{cases} \quad (7)$$

[0028] 其中, $\bar{X}(t) \in \mathbb{R}^5$ 是式 (5) 中所定义的维数为5的广义系统向量, $Y(t) \in \mathbb{R}^2$ 是维数为2的广义系统测量输出向量, $\bar{\Phi}(X) \in \mathbb{R}^5$ 是式 (5) 中所定义的维数为5的广义非线性向量, $\bar{E} \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$ 是式 (5) 中所定义的5乘5阶的矩阵, $\bar{A} \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$ 是式 (5) 中所定义的5乘5阶的参数矩阵, $\bar{B} \in \mathbb{R}^{5 \times 1}$ 是式 (5) 中所定义的5乘1阶的参数矩阵, $\bar{B}_f \in \mathbb{R}^{5 \times 3}$ 是式 (5) 中所定义的5乘3阶的矩阵, $\bar{C} \in \mathbb{R}^{2 \times 5}$ 是式 (5) 中所定义的2乘5阶的参数矩阵, $\bar{f} \in \mathbb{R}^3$ 是式 (5) 中所定义的维数为3的广义故障向量;

[0029] 3) 基于广义系统模型 (7) 设计出以下结构的广义滑模估计器 (8), 实现对桨叶位置状态估计和系统故障重构;

$$[0030] \quad \begin{cases} (\bar{E} + \bar{L}_D \bar{C}) \dot{\xi}(t) = (\bar{A} - \bar{L}_P \bar{C}) \xi(t) - \bar{N} Y(t) + B u(t) + \bar{\Phi}(\hat{X}) + \bar{L}_s u_s(t) \\ \hat{\bar{X}}(t) = \xi(t) + (\bar{E} + \bar{L}_D \bar{C})^{-1} Y(t) \end{cases} \quad (8)$$

[0031] 其中, $\xi(t) \in \mathbb{R}^5$ 是维数为5的中间变量向量, $\hat{\bar{X}}(t) \in \mathbb{R}^5$ 是维数为5的增广的广义系统状态估计向量, $\bar{N} \in \mathbb{R}^{5 \times 2}$ 是式 (5) 中所定义的5乘2阶的矩阵, $\bar{L}_D \in \mathbb{R}^{5 \times 2}$, $\bar{L}_P \in \mathbb{R}^{5 \times 2}$, $\bar{L}_s \in \mathbb{R}^{5 \times 3}$ 分别是所设计的5乘2阶的微分增益矩阵, 5乘2阶的比例增益矩阵以及5乘3阶的滑模增益矩阵, $u_s(t) \in \mathbb{R}^3$ 是维数为3的连续的输入信号;

$$[0032] \quad 3.1) \text{ 设计微分增益 } \bar{L}_D = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} \\ 0_{1 \times 2} \\ I_2 \end{bmatrix}, \text{ 则可证明矩阵 } (\bar{E} + \bar{L}_D \bar{C}) \text{ 是非奇异的;}$$

[0033] 3.2) 设计比例增益 \bar{L}_P ;

[0034] 首先, 利用如下李雅普诺夫方程 (9) 求解出矩阵 \bar{Z} ;

$$[0035] \quad -(\mu I + (\bar{E} + \bar{L}_D \bar{C})^{-1} \bar{A})^T \bar{Z} - \bar{Z} (\mu I + (\bar{E} + \bar{L}_D \bar{C})^{-1} \bar{A}) = -\bar{C}^T \bar{C} \quad (9)$$

[0036] 其中, $\mu > 0$ 满足 $\text{Re} \left[\lambda_i \left((\bar{E} + \bar{L}_D \bar{C})^{-1} \bar{A} \right) \right] > -\mu$;

[0037] 进一步, 比例增益 \bar{L}_P 可通过式子 (10) 进行计算;

$$[0038] \quad \bar{L}_P = (\bar{E} + \bar{L}_D \bar{C}) \bar{Z}^{-1} \bar{C}^T \quad (10)$$

[0039] 3.3) 设计滑模增益 $\bar{L}_s = \bar{B}_f$;

[0040] 3.4) 令 $\bar{W} \triangleq (\bar{E} + \bar{L}_D \bar{C})^{-1}$ 和 $\bar{e}(t) \triangleq \hat{\bar{X}}(t) - \bar{X}(t)$, 定义如下滑模面:

$$[0041] \quad s(t) = \bar{B}_f^T \bar{W}^T \bar{P} \bar{e}(t) \quad (11)$$

[0042] 其中, $\bar{P} > 0$ 为正定矩阵, 且满足以下条件:

$$[0043] \quad \bar{B}_f^T \bar{W}^T \bar{P} = \bar{H} \bar{C} \quad (12)$$

[0044] 其中, $\bar{H} \in \mathbb{R}^{3 \times 2}$ 是由 \bar{P} 所确定的3乘2阶的设计矩阵;

[0045] 于是, 最终设计的滑模面变为:

$$[0046] \quad s(t) = \bar{H} \bar{C} \bar{e}(t) \quad (13)$$

[0047] 设计的连续输入信号具有如下的滑模形式:

$$[0048] \quad u_s(t) = -(\delta\alpha_0 + \alpha_1 + \beta_0 + d_0 + \gamma) \frac{s(t)}{(\|s(t)\| + o)} \quad (14)$$

[0049] 其中, $\delta > 0$ 满足条件 (6), $\gamma > 0$ 为设计参数, $o > 0$ 是一个小常数, 取 $o = 10^{-3}$, $\alpha_0, \alpha_1, \beta_0$ 和 d_0 满足以下条件 (15):

$$[0050] \quad |f_a(t)| \leq \alpha_0, \quad |\dot{f}_a(t)| \leq \alpha_1, \quad |f_s(t)| \leq \beta_0, \quad |d(\cdot)| \leq d_0 \quad (15)$$

[0051] 4) 基于状态估计设计容错控制方法, 实现故障系统的状态稳定;

[0052] 4.1) 基于状态估计值, 定义一个积分型滑模面 (16):

$$[0053] \quad \hat{s}(t) = G\hat{X}(t) - \int_0^t G(A+BK)\hat{X}(\tau)d\tau \quad (16)$$

[0054] 其中, $G \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ 和 $K \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ 分别是所设计 1 乘 2 阶的参数矩阵; 矩阵 G 要使得 $GB=1$, 矩阵 K 要使得矩阵 $(A+BK)$ 是霍尔维茨的;

[0055] 4.2) 所设计的控制器结构 (17) - (18) 如下所示:

$$[0056] \quad u(t) = K\hat{X}(t) + \Phi(\hat{X}) + u_{s3}(t) - \delta^{-1}u_{s1}(t) - \gamma\hat{s}(t) - \rho(t) \frac{\hat{s}(t)}{(\|\hat{s}(t)\| + o)} \quad (17)$$

[0057] 且

$$[0058] \quad \rho(t) = \|GL_{p1}\| \|\bar{C}\bar{e}(t)\| + \delta^{-1} \|\dot{f}_a(t)\| \quad (18)$$

[0059] 其中,

$$\bar{L}_{p1} = [I_2 \quad 0_{2 \times 1} \quad 0_{2 \times 2}] \bar{L}_p$$

$$[0060] \quad u_{s1}(t) = [1 \quad 0 \quad 0]u_s(t) \quad (19)$$

$$u_{s3}(t) = [0 \quad 0 \quad 1]u_s(t)$$

[0061] 5) 给出估计误差系统和原状态系统稳定的条件, 计算参数矩阵, 并把各参数矩阵配置给所设计的估计器和控制器;

[0062] 稳定性条件: 在滑模控制 $u_s(t)$ 和控制输入 $u(t)$ 下, 如果存在 2 乘 2 阶的正定矩阵 $R \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$, 2 乘 2 阶的正定矩阵 $\bar{P} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 和 3 乘 2 阶的矩阵 $\bar{H} \in \mathbb{R}^{3 \times 2}$ 使得下面 LMI 优化问题 (20) 成立:

$$\begin{aligned}
 & \min(v(\theta+\varepsilon)+(1-v)\vartheta) \\
 & \text{s.t.} \\
 [0063] \quad & \begin{bmatrix} (A+BK)^T R + R(A+BK) & R(BG-I_2)\bar{L}_p\bar{C} & I_2 & R(I_2-BG) & 0 & 0 \\ (R(BG-I_2)\bar{L}_p\bar{C})^T & (\bar{A}-\bar{L}_p\bar{C})^T \bar{W}^T \bar{P} + \bar{P}\bar{W}(\bar{A}-\bar{L}_p\bar{C}) & 0 & 0 & I_5 & \bar{P}\bar{W} \\ I_2 & 0 & -\theta I_2 & 0 & 0 & 0 \\ (R(I_2-BG))^T & 0 & 0 & -\varepsilon I_2 & 0 & 0 \\ 0 & I_5 & 0 & 0 & -\theta I_5 & 0 \\ 0 & \bar{W}^T \bar{P} & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon I_5 \end{bmatrix} < 0 \\
 & \begin{bmatrix} -\theta I_5 & (\bar{B}_f^T \bar{W}^T \bar{P} - \bar{H}\bar{C})^T \\ (\bar{B}_f^T \bar{W}^T \bar{P} - \bar{H}\bar{C}) & -I_3 \end{bmatrix} < 0 \\
 & (20)
 \end{aligned}$$

[0064] 其中, v 是固定常数,

[0065] 则可以确保估计误差系统和原状态系统的稳定;

[0066] 通过LMI工具箱的“mincx”求解器,可以方便地求解以上线性矩阵不等式优化问题,计算出所设计的参数矩阵 \bar{H} ;

[0067] 最后,在风电变桨系统中,将LMI优化问题中求解出的参数矩阵 \bar{H} ,同以上步骤中所设计的微分增益矩阵 \bar{L}_D ,比例增益矩阵 \bar{L}_p ,滑模增益矩阵 \bar{L}_s ,控制器参数矩阵 G 和 K 相应配置给所设计的估计器和控制器,实现对桨叶位置的估计和对执行器故障和传感器故障的重构,实现变桨系统稳定。

[0068] 与现有技术相比,本发明具有如下优点:

[0069] 1、首次将广义滑模估计器的故障重构方法应用到机组变桨的故障模型中,有效地实现故障的重构和系统的稳定。

[0070] 2、通过LMI工具箱来求解LMI优化问题,可以容易地得到所设计的估计器增益矩阵,参数设计简单,且易于实现。

附图说明

[0071] 图1为一种基于广义滑模估计器的机组变桨容错控制方法的流程图;

[0072] 图2为实际桨距角与估计桨距角的曲线图;

[0073] 图3为实际的执行器故障曲线和估计的执行器故障曲线对比图;

[0074] 图4为实际的传感器故障曲线和估计的传感器故障曲线对比图。

具体实施方式

[0075] 下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细说明。

[0076] 一种基于广义滑模估计器的机组变桨容错控制方法,其流程如图1所示,该方法包括如下步骤:

[0077] 1) 建立同时存在执行器故障和传感器故障下的变桨系统模型;

[0078] 首先,考虑存在执行器故障下的叶轮动态方程:

$$[0079] \quad M(\cdot)\ddot{x}(t) + \Phi(t, x, \dot{x}) + d(t, x, \dot{x}) = u(t) + f_a(t) \quad (1)$$

[0080] 再次,考虑存在传感器故障下的桨距角测量方程为:

$$[0081] \quad y(t) = x(t) + f_s(t) \quad (2)$$

$$[0082] \quad \text{其中, } M(\cdot) = J_{LB} + J_{BI} > 0; \Phi(t, x, \dot{x}) = \left(\frac{dJ_{LB}}{dt} + \frac{dJ_{BI}}{dt} + k_{DB} + k_{RL} \right) \dot{x} + \left(\frac{dk_{DB}}{dt} + \frac{dk_{RL}}{dt} \right) x;$$

$x(t) \in \mathbb{R}$, $\dot{x}(t) \in \mathbb{R}$, $\ddot{x}(t) \in \mathbb{R}$ 分别代表实际的桨距角、相应的角速度以及相应的角加速度, $y(t) \in \mathbb{R}$ 是桨距角的实际测量值, $d(t, x, \dot{x}) \in \mathbb{R}$ 是推进器、叶片升力、叶片弯曲、振动及不平衡载荷引起的总力矩, $u(t) \in \mathbb{R}$ 是控制输入, $f_a(t) \in \mathbb{R}$ 是执行器故障函数, $f_s(t) \in \mathbb{R}$ 是传感器故障函数, J_{LB} 为空气加速引起的等效惯量力矩, J_{BI} 是转子叶片沿其纵轴的全部惯性力矩, k_{DB} 是阻尼系数, k_{RL} 是摩擦系数;

[0083] 进一步,方程(1)可以写成:

$$[0084] \quad \dot{X}(t) = AX(t) + B[u(t) + f_a(t) - \Phi(t, x, \dot{x}) - d(t, x, \dot{x})] \quad (3)$$

$$[0085] \quad \text{其中, } X = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix};$$

[0086] 而测量方程(2)可以写成:

$$[0087] \quad Y(t) = CX(t) + D_s f_s(t) \quad (4)$$

$$[0088] \quad \text{其中 } C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_s \in \mathbb{R}^{2 \times 1} \text{ 为已知的2乘1阶的常值矩阵。}$$

[0089] 2) 引入增广状态向量 \bar{X} , 将原来故障下变桨系统模型变换成一种新型的广义系统模型;

[0090] 定义如下的增广矩阵:

$$[0091] \quad \bar{X}(t) \triangleq \begin{bmatrix} X \\ f_a \\ D_s f_s \end{bmatrix}, \quad \bar{A} \triangleq \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & -\delta & 0 \\ 0 & 0 & -I_2 \end{bmatrix}, \quad \bar{B} \triangleq \begin{bmatrix} B \\ 0_{1 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix}, \quad \bar{C} \triangleq [C \quad 0_{2 \times 1} \quad I_2],$$

$$\bar{E} \triangleq \begin{bmatrix} I_2 & \delta^{-1} B & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix}, \quad \bar{N} \triangleq \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} \\ 0_{1 \times 2} \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_f \triangleq \begin{bmatrix} \delta^{-1} B & 0_{2 \times 1} & -B \\ 1 & 0 & 0_{1 \times 2} \\ 0_{2 \times 1} & D_s & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\bar{f} \triangleq \begin{bmatrix} \delta f_a + \dot{f}_a \\ f_s \\ d \end{bmatrix}, \quad \bar{\Phi} \triangleq \begin{bmatrix} -B\Phi \\ 0_{1 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix}.$$

[0092] 其中, I_p 代表维数为 p 单位矩阵, $0_{k \times 1}$ 代表 k 行 1 列的零矩阵, 参数 $\delta > 0$ 要使得下面条件(6)成立;

$$[0093] \quad \text{rank} \begin{bmatrix} \delta I_2 + A & B \\ C & 0 \end{bmatrix} = 3 \quad (6)$$

[0094] 其中 rank 表示矩阵的秩;

[0095] 最终,可以得到一个增广的广义系统模型(7);

$$[0096] \quad \begin{cases} \bar{E}\dot{\bar{X}}(t) = \bar{A}\bar{X}(t) + \bar{B}u(t) + \bar{B}_f\bar{f}(t) + \bar{\Phi}(X) \\ Y(t) = \bar{C}\bar{X}(t) \end{cases} \quad (7)$$

[0097] 其中, $\bar{X}(t) \in \mathbb{R}^5$ 是式 (5) 中所定义的维数为5的广义系统向量, $Y(t) \in \mathbb{R}^2$ 是维数为2的广义系统测量输出向量, $\bar{\Phi}(X) \in \mathbb{R}^5$ 是式 (5) 中所定义的维数为5的广义非线性向量, $\bar{E} \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$ 是式 (5) 中所定义的5乘5阶的矩阵, $\bar{A} \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$ 是式 (5) 中所定义的5乘5阶的参数矩阵, $\bar{B} \in \mathbb{R}^{5 \times 1}$ 是式 (5) 中所定义的5乘1阶的参数矩阵, $\bar{B}_f \in \mathbb{R}^{5 \times 3}$ 是式 (5) 中所定义的5乘3阶的矩阵, $\bar{C} \in \mathbb{R}^{2 \times 5}$ 是式 (5) 中所定义的2乘5阶的参数矩阵, $\bar{f} \in \mathbb{R}^3$ 是式 (5) 中所定义的维数为3的广义故障向量。

[0098] 3) 基于广义系统模型 (7) 设计出以下结构的广义滑模估计器 (8), 实现对桨叶位置状态估计和系统故障重构:

$$[0099] \quad \begin{cases} (\bar{E} + \bar{L}_D\bar{C})\dot{\xi}(t) = (\bar{A} - \bar{L}_P\bar{C})\xi(t) - \bar{N}Y(t) + Bu(t) + \bar{\Phi}(\hat{X}) + \bar{L}_s u_s(t) \\ \hat{X}(t) = \xi(t) + (\bar{E} + \bar{L}_D\bar{C})^{-1} Y(t) \end{cases} \quad (8)$$

[0100] 其中, $\xi(t) \in \mathbb{R}^5$ 是维数为5的中间变量向量, $\hat{X}(t) \in \mathbb{R}^5$ 是维数为5的增广的广义系统状态估计向量, $\bar{N} \in \mathbb{R}^{5 \times 2}$ 是式 (5) 中所定义的5乘2阶的矩阵, $\bar{L}_D \in \mathbb{R}^{5 \times 2}$, $\bar{L}_P \in \mathbb{R}^{5 \times 2}$, $\bar{L}_s \in \mathbb{R}^{5 \times 3}$ 分别是所设计的5乘2阶的微分增益矩阵, 5乘2阶的比例增益矩阵以及5乘3阶的滑模增益矩阵, $u_s(t) \in \mathbb{R}^3$ 是维数为3的连续的输入信号。

$$[0101] \quad 3.1) \text{ 设计微分增益 } \bar{L}_D = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \mathbf{0}_{1 \times 2} \\ I_2 \end{bmatrix}, \text{ 则可证明矩阵 } (\bar{E} + \bar{L}_D\bar{C}) \text{ 是非奇异的;}$$

[0102] 3.2) 设计比例增益 \bar{L}_P ;

[0103] 首先, 利用如下李雅普诺夫方程 (9) 求解出矩阵 \bar{Z} :

$$[0104] \quad -(\mu I + (\bar{E} + \bar{L}_D\bar{C})^{-1}\bar{A})^T \bar{Z} - \bar{Z}(\mu I + (\bar{E} + \bar{L}_D\bar{C})^{-1}\bar{A}) = -\bar{C}^T\bar{C} \quad (9)$$

[0105] 其中, $\mu > 0$ 满足 $\text{Re}[\lambda_i((\bar{E} + \bar{L}_D\bar{C})^{-1}\bar{A})] > -\mu$;

[0106] 进一步, 比例增益 \bar{L}_P 可通过式子 (10) 进行计算;

$$[0107] \quad \bar{L}_P = (\bar{E} + \bar{L}_D\bar{C})\bar{Z}^{-1}\bar{C}^T \quad (10)$$

[0108] 3.3) 设计滑模增益 $\bar{L}_s = \bar{B}_f$;

[0109] 3.4) 令 $\bar{W} \triangleq (\bar{E} + \bar{L}_D\bar{C})^{-1}$ 和 $\bar{e}(t) \triangleq \hat{X}(t) - \bar{X}(t)$, 定义如下滑模面:

$$[0110] \quad s(t) = \bar{B}_f^T \bar{W}^T \bar{P} \bar{e}(t) \quad (11)$$

[0111] 其中, $\bar{P} > 0$ 为正定矩阵, 且满足以下条件:

$$[0112] \quad \bar{B}_f^T \bar{W}^T \bar{P} = \bar{H} \bar{C} \quad (12)$$

[0113] 其中, $\bar{H} \in \mathbb{R}^{3 \times 2}$ 是由 \bar{P} 所确定的3乘2阶的设计矩阵;

[0114] 于是,最终设计的滑模面变为:

$$[0115] \quad s(t) = \bar{H}\bar{C}\bar{e}(t) \quad (13)$$

[0116] 设计的连续输入信号具有如下的滑模形式:

$$[0117] \quad u_s(t) = -(\delta\alpha_0 + \alpha_1 + \beta_0 + d_0 + \gamma) \frac{s(t)}{(\|s(t)\| + o)} \quad (14)$$

[0118] 其中, $\delta > 0$ 满足条件 (6), $\gamma > 0$ 为设计参数, $o > 0$ 是一个小常数, 取 $o = 10^{-3}$, $\alpha_0, \alpha_1, \beta_0$ 和 d_0 满足以下条件 (15);

$$[0119] \quad |f_a(t)| \leq \alpha_0, \quad |\dot{f}_a(t)| \leq \alpha_1, \quad |f_s(t)| \leq \beta_0, \quad |d(\cdot)| \leq d_0 \quad (15)$$

[0120] 4) 基于状态估计设计容错控制方法, 实现故障系统的状态稳定;

[0121] 4.1) 基于状态估计值, 定义一个积分型滑模面 (16):

$$[0122] \quad \hat{s}(t) = G\hat{X}(t) - \int_0^t G(A+BK)\hat{X}(\tau)d\tau \quad (16)$$

[0123] 其中, $G \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ 和 $K \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ 分别是所设计 1 乘 2 阶的参数矩阵; 矩阵 G 要使得 $GB=1$, 矩阵 K 要使得矩阵 $(A+BK)$ 是霍尔维茨的;

[0124] 4.2) 所设计的控制器结构 (17) - (18) 如下所示:

$$[0125] \quad u(t) = K\hat{X}(t) + \Phi(\hat{X}) + u_{s3}(t) - \delta^{-1}u_{s1}(t) - \gamma_1\hat{s}(t) - \rho(t) \frac{\hat{s}(t)}{(\|\hat{s}(t)\| + o)} \quad (17)$$

[0126] 且

$$[0127] \quad \rho(t) = \|G\bar{L}_{p1}\| \|\bar{C}\bar{e}(t)\| + \delta^{-1} \|\hat{f}_a(t)\| \quad (18)$$

[0128] 其中,

$$\bar{L}_{p1} = [I_2 \quad 0_{2 \times 1} \quad 0_{2 \times 2}] \bar{L}_p$$

$$[0129] \quad u_{s1}(t) = [1 \quad 0 \quad 0]u_s(t) \quad (19)$$

$$u_{s3}(t) = [0 \quad 0 \quad 1]u_s(t)$$

[0130] 5) 给出估计误差系统和原状态系统稳定的条件, 计算参数矩阵, 并把各参数矩阵配置给所设计的估计器和控制器;

[0131] 稳定性条件: 在滑模控制 $u_s(t)$ 和控制输入 $u(t)$ 下, 如果存在 2 乘 2 阶的正定矩阵 $R \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$, 2 乘 2 阶的正定矩阵 $\bar{P} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 和 3 乘 2 阶的矩阵 $\bar{H} \in \mathbb{R}^{3 \times 2}$ 使得下面 LMI 优化问题 (20) 成立:

$$\begin{aligned}
& \min(v(\theta + \varepsilon) + (1-v)\theta) \\
& \text{st.} \\
& \left[\begin{array}{cccccc}
(A+BK)^T R + R(A+BK) & R(BG-I_2)\bar{L}_p\bar{C} & I_2 & R(I_2-BG) & 0 & 0 \\
(R(BG-I_2)\bar{L}_p\bar{C})^T & (\bar{A}-\bar{L}_p\bar{C})^T \bar{W}^T \bar{P} + \bar{P}\bar{W}(\bar{A}-\bar{L}_p\bar{C}) & 0 & 0 & I_5 & \bar{P}\bar{W} \\
I_2 & 0 & -\theta I_2 & 0 & 0 & 0 \\
(R(I_2-BG))^T & 0 & 0 & -\varepsilon I_2 & 0 & 0 \\
0 & I_3 & 0 & 0 & -\theta I_3 & 0 \\
0 & \bar{W}^T \bar{P} & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon I_3
\end{array} \right] < 0 \\
& \left[\begin{array}{c}
-\theta I_3 \quad (\bar{B}^T \bar{W}^T \bar{P} - \bar{H}\bar{C})^T \\
(\bar{B}^T \bar{W}^T \bar{P} - \bar{H}\bar{C}) \quad -I_3
\end{array} \right] < 0 \\
& (20)
\end{aligned}$$

[0133] 其中, v 是固定常数, 则可以确保估计误差系统和原状态系统的稳定。

[0134] 通过LMI工具箱的“mincx”求解器, 可以方便地求解以上线性矩阵不等式优化问题, 计算出所设计的参数矩阵 \bar{H} 。

[0135] 最后, 在风电变桨系统中, 将LMI优化问题中求解出的参数矩阵 \bar{H} , 同以上步骤中所设计的微分增益矩阵 \bar{L}_D , 比例增益矩阵 \bar{L}_P , 滑模增益矩阵 \bar{L}_S , 控制器参数矩阵 G 和 K 相应配置给所设计的估计器和控制器, 实现对桨叶位置的估计和对执行器故障和传感器故障的重构, 实现变桨系统稳定。

[0136] 在机组变桨中采用上述设计的广义滑模估计器结构 (8) 和容错控制率 (17) - (18), 按照上述的矩阵参数设计步骤, 可以实现对桨距角及桨距角速度的估计, 执行器和传感器故障的重构以及桨叶位置的稳定。图2表明通过本发明的广义滑模估计器和容错控制方法, 桨距角位置不仅能得到估计, 而且能实现状态稳定; 图3表明执行器故障的估计情况; 图4表明传感器故障的估计情况, 均表明了本发明的广义滑模估计器具有较好的故障估计效果。

[0137] 最后说明的是, 以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制, 尽管参照较佳实施例对本发明进行了详细说明, 本领域的普通技术人员应当理解, 可以对本发明的技术方案进行修改或者等同替换, 而不脱离本发明技术方案的宗旨和范围, 其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

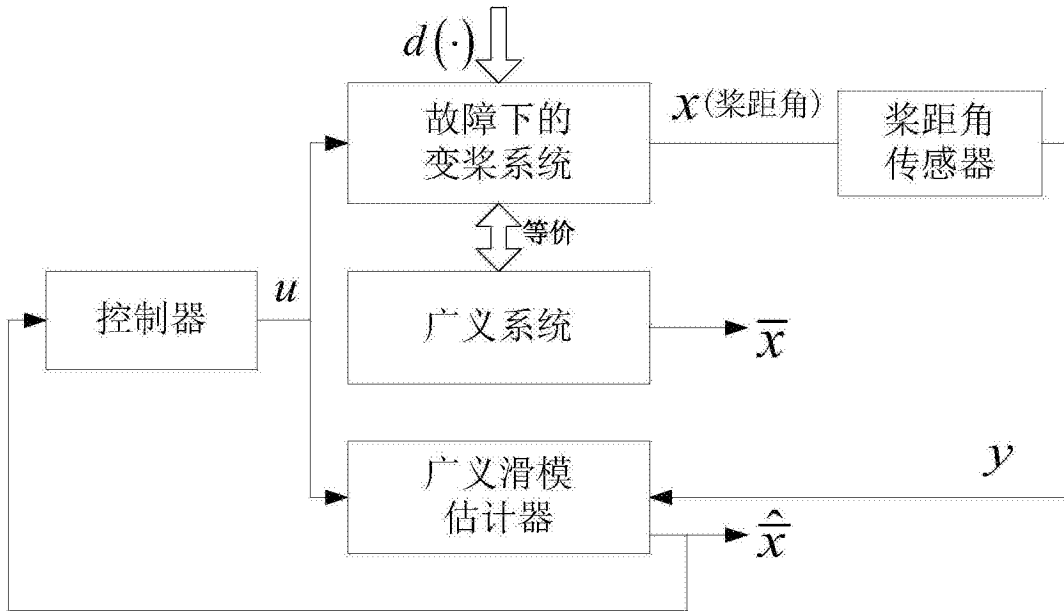


图1

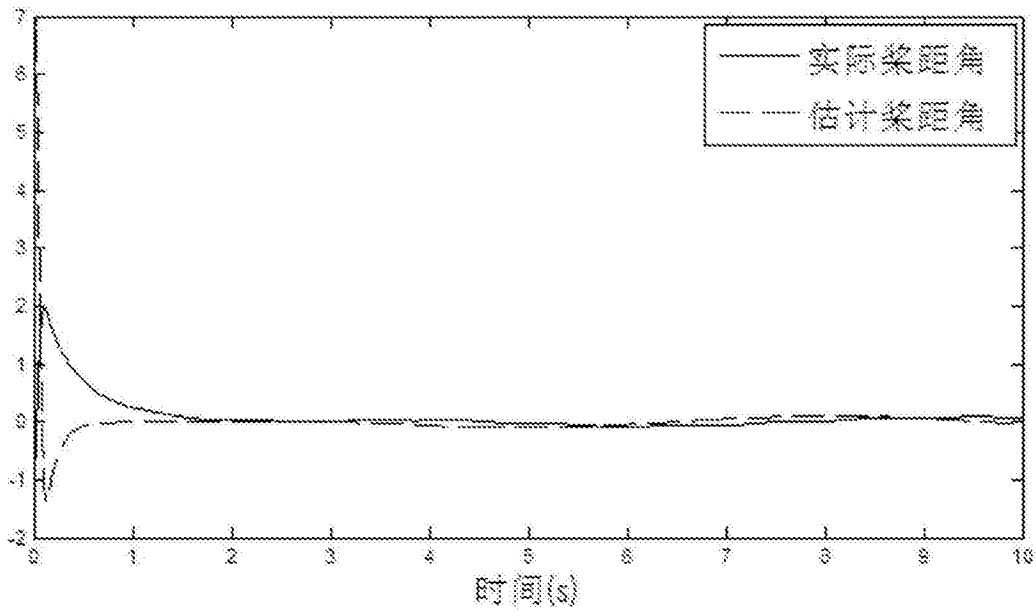


图2

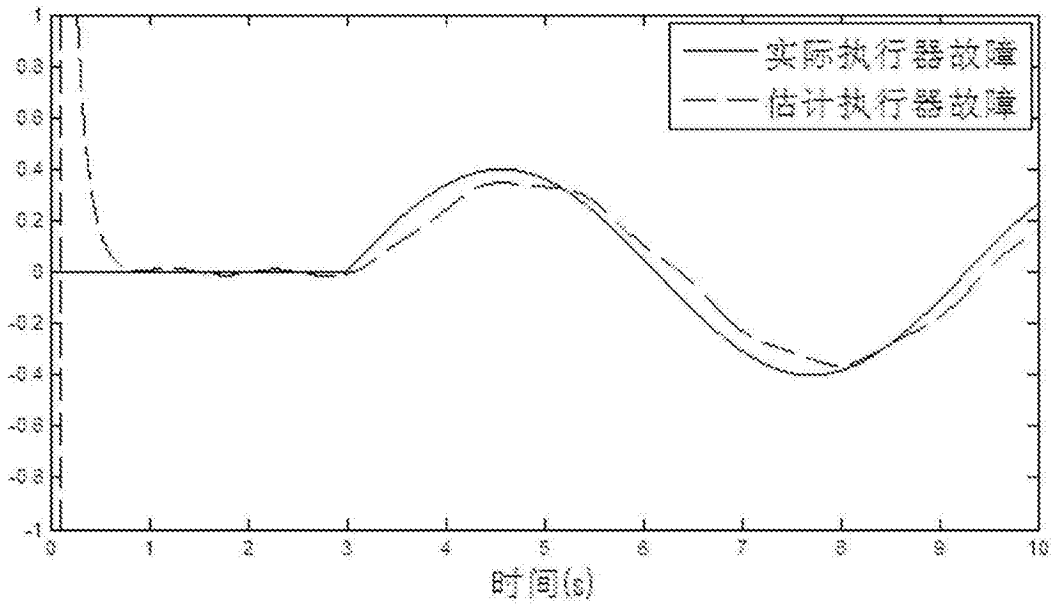


图3

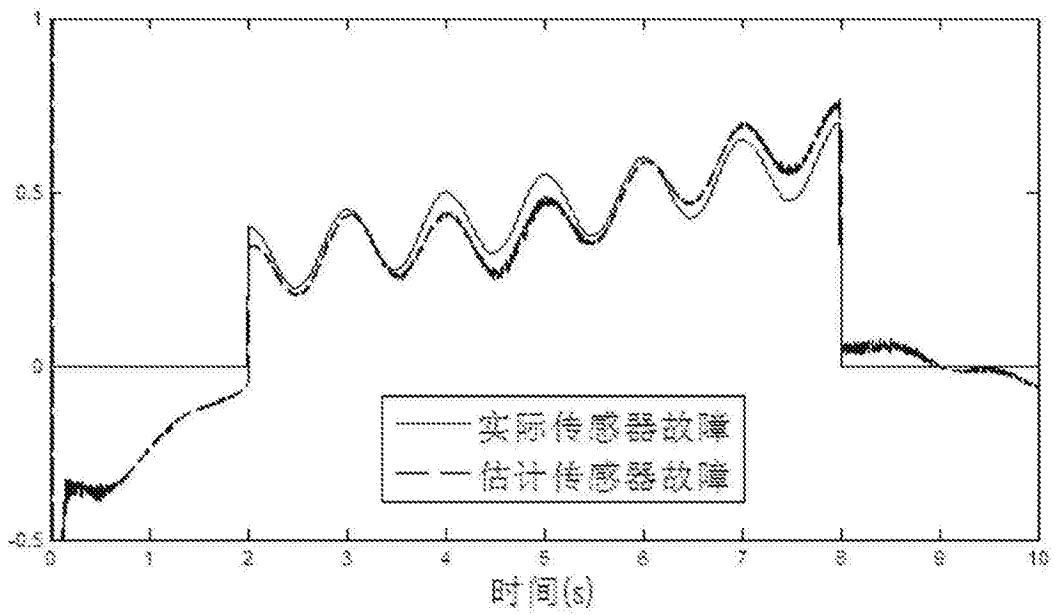


图4