基于鲁棒控制的光纤电流互感器的噪声抑制

李 慧 张春熹 张 晞 张朝阳

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

摘 要:光纤电流互感器是一类存在模型参数不确定性的系统,为提高系统测量精度,利用鲁棒控制理论提出了系统的鲁棒 H_∞ 控制器设计方案.分析系统的检测原理并建立数学模型.针对光纤电流互感器系统给出控制器设计指标,使得闭环系统渐近稳定且提高系统噪声抑制能力.理论证明控制器设计方案满足设计指标的要求,并利用线性矩阵不等式的可行解给出了控制器的构造方法.最后通过计算机仿真和实验结果证明了此控制器设计方案的可行性和有效性.

关 键 词:光纤电流互感器;不确定性;噪声抑制

中图分类号:TM 452$^+$.94

文献标识码:A **文 章 编 号**:1001-5965(2009)01-0087-04

Noise suppression of fiber optic current transformer system based on robust control

Li Hui Zhang Chunxi Zhang Xi Zhang Chaoyang

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The fiber optic current transformer is a system that comprises parameter uncertainty and noise signals. For improving precision of the system, the design of robust H-infinite controller was discussed. The fiber optic current transformer based on closed-loop detection was analyzed, and the model of the system was built. The design problem of the fiber optic current transformer controller was considered which guaranteed that the closed loop system was asymptotically stable and the noise suppression of the system was improved. The controller was proved that the control system meets the design target. Then the problem of the design of the robust controller can be solved on the basis of linear matrix inequality technique. The result was provided to show the effectiveness and feasibility of the robust controller by the computer's simulation and experimental test.

Key words: fiber optic current transformer; uncertainty; noise suppression

随着输变电网络系统的发展,电压等级越来越高,传统的电磁式电流互感器呈现出不可克服的难题:绝缘困难、制造成本高、体积大、重量重,以及固有的磁饱和、铁磁谐振和有油易燃易爆等缺点,不能满足新一代电力系统的要求.与此同时,光纤电流互感器因为采用光纤作为信号感应和传输的媒介,不仅有绝缘性能好、受电磁干扰影响小的优势,而且还有结构简单、体积小、重量轻、成本低等独特优点,已经成为世界范围内的研究热点.

但实际应用中,光纤电流互感器系统内部的光路噪声以及由温度变化引起的双折射即系统扰动信号,影响测量精度.因此抑制光纤电流互感器系统的扰动信号成为迫切需要解决的关键技术.

1 光纤电流互感器系统模型分析

光纤电流互感器系统模型存在不确定性,主要为参数不确定性和扰动.光源光功率、探测器和前放增益随温度的变化,导致系统前项通道增益

收稿日期:2008-02-26

作者简介:李 慧(1981—),女,山东聊城人,博士生,lihuibuaa@gmail.com.

的不确定性.光路噪声以及由温度变化引起的双折射为系统扰动输入信号 w.

1.1 光路模型

从光纤电流互感器系统的工作原理[1-2]可知,由输入电流引起的法拉第效应的非互易相位差:

$$\Delta\varphi_s = 4NVI \tag{1}$$

其中,N 为传感光纤的匝数;V 为传感光纤的 Verdet 常数;I 为导线中传输的电流值.在实际系统中 $\Delta\varphi_s$ 同时包含各种噪声,光路噪声以及由温度变化引起的双折射为系统的主要噪声源,限制系统精度.

1.2 电路模型

到达探测器的光强是 $\Delta\varphi_s$ 的余弦函数,为提高系统的灵敏度加入方波调制并采用数字闭环、阶梯波反馈方案[3],余弦函数变为正弦函数.

1) 探测器与前放电路

到达探测器的光功率、探测器的光电转换与前放电路增益的模型为比例环节,25℃常温时为定值并设其乘积为 K_1,系统在工作温度 $-40\sim+60$℃范围变化时设其乘积变化为 ΔK_1.

2) 模数转换与解调环节

设模数转换系数以及采样个数的乘积为 K_{AD};

$$\begin{aligned} &K_{AD}\times(K_1+\Delta K_1)\times(1+\sin(\Delta\varphi))-\\ &K_{AD}\times(K_1+\Delta K_1)\times(1-\sin(\Delta\varphi))=\\ &\quad 2K_{AD}\times(K_1+\Delta K_1)\times\sin(\Delta\varphi) \end{aligned} \tag{2}$$

$$\Delta\varphi=\Delta\varphi_s-\Delta\varphi_f \tag{3}$$

闭环系统的反馈相位 $\Delta\varphi_f$ 和 $\Delta\varphi_s$ 抵消,相位差 $\Delta\varphi$ 近似为 0,则 $\sin\Delta\varphi\approx\Delta\varphi$,光纤电流互感器即可认为线性系统.设模数转换与解调环节的模型为 K_2.

3) 闭环数字控制器 $D(z)$

4) 数模转换和数模转换器的放大驱动电路

以数模转换器的数字输出作为系统的输出和反馈,从模型分析数模转换器为零阶保持器,其模型为 $\dfrac{1-e^{-Ts}}{s}$.数模转换器的模拟驱动电路模型为 K_3.求 Z 变换为

$$\begin{aligned} &Z(1-e^{-Ts})\times Z\left(\frac{K_3}{s}\right)=\\ &(1-Z^{-1})\times\left(K_3\frac{Z}{Z-1}\right)=K_3 \end{aligned} \tag{4}$$

5) 相位调制器

相位调制器的功能为把电压信号转换为相位信息,为比例环节设为 K_4.

设 $k_1=K_1\times K_2$,$\Delta k=\Delta K_1\times K_2$,$k_2=K_3\times K_4$.

系统模型框图如图 1 所示,u 为反馈控制信号;z 为输出信号.为提高系统精度,利用鲁棒 H_∞ 控制理论研究控制算法 $D(z)$,抑制电流互感器的扰动输入信号 w.

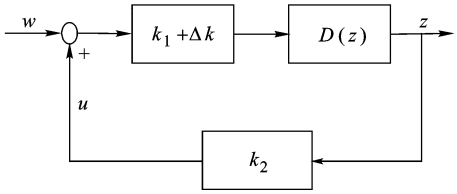

图 1 等效的电流互感器系统方框图

2 控制器算法

2.1 预备知识

1) 光纤电流互感器系统描述

由于 Δk 的存在,引入了系统参数的不确定性.光纤电流互感器的系统模型为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x}(k+1)=&\begin{bmatrix}0 & 1\\ -6(k_1+\Delta k)k_2 & -2(k_1+0.2\Delta k)k_2\end{bmatrix}\boldsymbol{x}(k)+\\ &\begin{bmatrix}0\\ -(k_1+\Delta k)k_2\end{bmatrix}\boldsymbol{u}(k)+\begin{bmatrix}0\\ k_1\end{bmatrix}\boldsymbol{w}(k)\\ \boldsymbol{z}(k)=&[1\quad 0]\boldsymbol{x}(k)+0.5\boldsymbol{u}(k) \end{aligned} \tag{5}$$

考虑由以下状态方程描述光纤电流互感器系统:

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{x}(k+1)=&(\boldsymbol{G}+\Delta\boldsymbol{G})\boldsymbol{x}(k)+\\ &(\boldsymbol{H}_1+\Delta\boldsymbol{H}_1)\boldsymbol{u}(k)+\boldsymbol{H}_2\boldsymbol{w}(k)\\ \boldsymbol{z}(k)=&\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{D}\boldsymbol{u}(k) \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

其中,$\boldsymbol{x}(k)\in\mathbf{R}^n$ 为系统的状态变量;$\boldsymbol{G}$,$\boldsymbol{H}_1$,$\boldsymbol{H}_2$,$\boldsymbol{C}$ 和 $\boldsymbol{D}$ 为描述系统模型的已知实常数矩阵;$\Delta\boldsymbol{G}$ 和 $\Delta\boldsymbol{H}_1$ 为反映系统模型中参数 Δk 不确定性的未知实矩阵,因为在实际系统中 Δk 的变化是有界的,所以 $\Delta\boldsymbol{G}$ 和 $\Delta\boldsymbol{H}_1$ 是范数有界的,且具有以下形式:

$$[\Delta\boldsymbol{G}\quad\Delta\boldsymbol{H}_1]=\boldsymbol{F}\boldsymbol{M}[\boldsymbol{E}_1\quad\boldsymbol{E}_2] \tag{7}$$

其中,$\boldsymbol{M}$ 满足 $\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\leqslant\boldsymbol{I}$ 的不确定矩阵;$\boldsymbol{F}$,$\boldsymbol{E}_1$ 和 $\boldsymbol{E}_2$ 是已知的常数矩阵,反映了不确定参数的结构信息.

2) 闭环控制算法的设计指标

针对系统的指标要求和系统的参数不确定性,控制器的设计指标:

① 闭环系统是渐近稳定的;

② 当 $\boldsymbol{w}(k)$ 被看成是一个有限能量的扰动信号时,从 $\boldsymbol{w}(k)$ 到 $\boldsymbol{z}(k)$ 的闭环传递函数 $\boldsymbol{T}(z)$ 满足 $\|\boldsymbol{T}(z)\|<\gamma$,其中 $\gamma>0$ 是给定的标量,表示系

统抑制干扰信号的能力.

设计一个状态反馈控制律 $\boldsymbol{u}(k)=K\boldsymbol{x}(k)$,使得对光纤电流互感器如式(7)所示的所有参数不确定性,闭环系统都能满足以上设计指标,$\boldsymbol{u}(k)$称为式(6)的一个鲁棒 H_∞保性能控制律[4].

2.2　控制器的设计

引理 1[5]　给定适当维数的矩阵 $\boldsymbol{Y},\boldsymbol{Z}$ 和 $\boldsymbol{E}$,

$$\begin{bmatrix} -\boldsymbol{Q} & \boldsymbol{0} & (\boldsymbol{GQ}+\boldsymbol{H}_1\boldsymbol{N})^{\mathrm{T}} & (\boldsymbol{E}_1\boldsymbol{Q}+\boldsymbol{E}_2\boldsymbol{N})^{\mathrm{T}} & (\boldsymbol{CQ}+\boldsymbol{DN})^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{0} & -\gamma^2\boldsymbol{I} & \boldsymbol{H}_2^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{GQ}+\boldsymbol{H}_1\boldsymbol{N} & \boldsymbol{H}_2 & -\boldsymbol{Q}+\varepsilon\boldsymbol{F}\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{E}_1\boldsymbol{Q}+\boldsymbol{E}_2\boldsymbol{N} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\varepsilon\boldsymbol{I} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{CQ}+\boldsymbol{DN} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{I} \end{bmatrix}<0 \tag{9}$$

进而,如果式(9)有一个可行解 $\varepsilon,\boldsymbol{Q},\boldsymbol{N}$,则状态反馈控制律:

$$\boldsymbol{u}(k)=\boldsymbol{N}\boldsymbol{Q}^{-1}\boldsymbol{x}(k) \tag{10}$$

是式(6)的一个鲁棒 H_∞保性能控制律.

证明　定义 $\boldsymbol{K}=\boldsymbol{N}\boldsymbol{Q}^{-1}$,应用式(10)到式(6),得到如下的闭环系统:

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{x}(k+1)&=\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{H}_2\boldsymbol{w}(k) \\ \boldsymbol{z}(k)&=\boldsymbol{C}_{\mathrm{c}}\boldsymbol{x}(k) \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

其中

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}=\boldsymbol{G}+\boldsymbol{H}_1\boldsymbol{K}+\boldsymbol{F}\boldsymbol{M}(\boldsymbol{E}_1+\boldsymbol{E}_2\boldsymbol{K})$$

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{c}}=\boldsymbol{C}+\boldsymbol{D}\boldsymbol{K}$$

根据离散系统界实引理[5]:矩阵 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{c}}$ 渐近稳定,且 $\|\boldsymbol{T}(z)\|_\infty<\gamma$ 当且仅当存在满足矩阵不等式:

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}-\boldsymbol{P}+\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{H}_2(\gamma^2\boldsymbol{I}-\boldsymbol{H}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{H}_2)^{-1}\boldsymbol{H}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}+\boldsymbol{C}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_{\mathrm{c}}<0 \tag{12}$$

成立的对称正定矩阵 $\boldsymbol{P}$,且使得 $\gamma^2\boldsymbol{I}-\boldsymbol{H}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{H}_2>0$.根据矩阵的 Schur 补性质,式(12)和 $\gamma^2\boldsymbol{I}-\boldsymbol{H}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{H}_2>0$ 成立当且仅当

$$\begin{bmatrix} -\boldsymbol{P}+\boldsymbol{C}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_{\mathrm{c}} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{0} & -\gamma^2\boldsymbol{I} & \boldsymbol{H}_2^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{G}_{\mathrm{c}} & \boldsymbol{H}_2 & -\boldsymbol{P}^{-1} \end{bmatrix}<0 \tag{13}$$

$$\begin{bmatrix} -\boldsymbol{P} & \boldsymbol{0} & (\boldsymbol{G}+\boldsymbol{H}_1\boldsymbol{K})^{\mathrm{T}} & (\boldsymbol{E}_1+\boldsymbol{E}_2\boldsymbol{K})^{\mathrm{T}} & (\boldsymbol{C}+\boldsymbol{D}\boldsymbol{K})^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{0} & -\gamma^2\boldsymbol{I} & \boldsymbol{H}_2^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{G}+\boldsymbol{H}_1\boldsymbol{K} & \boldsymbol{H}_2 & -\boldsymbol{P}^{-1}+\varepsilon\boldsymbol{F}\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{E}_1+\boldsymbol{E}_2\boldsymbol{K} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\varepsilon\boldsymbol{I} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{C}+\boldsymbol{D}\boldsymbol{K} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{I} \end{bmatrix}<0$$

对上式分别左乘和右乘矩阵 $\mathrm{diag}\{\boldsymbol{P}^{-1},\boldsymbol{I},\boldsymbol{I},\boldsymbol{I},\boldsymbol{I}\}$,并记 $\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{P}^{-1},\boldsymbol{N}=\boldsymbol{K}\boldsymbol{P}^{-1}$,即可得式(9).　**证毕**

3　仿真分析与实验验证

式(9)是一个线性矩阵不等式,因此可以应用 LMI 工具箱中的求解器 feasp 来求解该线性矩阵其中 $\boldsymbol{Y}$ 是对称的,则 $\boldsymbol{Y}+\boldsymbol{Z}\boldsymbol{M}\boldsymbol{E}+\boldsymbol{E}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Z}^{\mathrm{T}}<0$ 对所有满足 $\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\leqslant\boldsymbol{I}$ 的矩阵 $\boldsymbol{M}$ 成立,当且仅当存在一个常数 $\varepsilon>0$,使得

$$\boldsymbol{Y}+\varepsilon\boldsymbol{Z}\boldsymbol{Z}^{\mathrm{T}}+\varepsilon^{-1}\boldsymbol{E}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}<0 \tag{8}$$

定理 1　对给定的常数 $\gamma>0$ 和式(6),存在一个保性能控制律 $\boldsymbol{u}(k)$当且仅当存在常数 $\varepsilon>0$ 以及对称正定矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 和矩阵 $\boldsymbol{N}$,使得

根据 $\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}=\boldsymbol{G}+\boldsymbol{H}_1\boldsymbol{K}+\boldsymbol{F}\boldsymbol{M}(\boldsymbol{E}_1+\boldsymbol{E}_2\boldsymbol{K})$,则

$$\begin{bmatrix} -\boldsymbol{P}+\boldsymbol{C}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_{\mathrm{c}} & \boldsymbol{0} & (\boldsymbol{G}+\boldsymbol{H}_1\boldsymbol{K})^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{0} & -\gamma^2\boldsymbol{I} & \boldsymbol{H}_2^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{G}+\boldsymbol{H}_1\boldsymbol{K} & \boldsymbol{H}_2 & -\boldsymbol{P}^{-1} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{F} \end{bmatrix}\boldsymbol{M}\begin{bmatrix} \boldsymbol{E}_1+\boldsymbol{E}_2\boldsymbol{K} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} \boldsymbol{E}_1+\boldsymbol{E}_2\boldsymbol{K} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix} \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{F} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}<0 \tag{14}$$

根据引理 1 和 $\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\leqslant\boldsymbol{I}$,式(14)成立当且仅当存在常数 $\varepsilon>0$,使得

$$\begin{bmatrix} -\boldsymbol{P} & \boldsymbol{0} & (\boldsymbol{G}+\boldsymbol{H}_1\boldsymbol{K})^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{0} & -\gamma^2\boldsymbol{I} & \boldsymbol{H}_2^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{G}+\boldsymbol{H}_1\boldsymbol{K} & \boldsymbol{H}_2 & -\boldsymbol{P}^{-1}+\varepsilon\boldsymbol{F}\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} \varepsilon^{-1}(\boldsymbol{E}_1+\boldsymbol{E}_2\boldsymbol{K})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{E}_1+\boldsymbol{E}_2\boldsymbol{K})+\boldsymbol{C}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_{\mathrm{c}} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix}<0 \tag{15}$$

进一步应用 Schur 补性质并根据 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{c}}=\boldsymbol{C}+\boldsymbol{D}\boldsymbol{K}$ 得

$$\begin{bmatrix} -\boldsymbol{P} & \boldsymbol{0} & (\boldsymbol{G}+\boldsymbol{H}_1\boldsymbol{K})^{\mathrm{T}} & (\boldsymbol{E}_1+\boldsymbol{E}_2\boldsymbol{K})^{\mathrm{T}} & (\boldsymbol{C}+\boldsymbol{D}\boldsymbol{K})^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{0} & -\gamma^2\boldsymbol{I} & \boldsymbol{H}_2^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{G}+\boldsymbol{H}_1\boldsymbol{K} & \boldsymbol{H}_2 & -\boldsymbol{P}^{-1}+\varepsilon\boldsymbol{F}\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{E}_1+\boldsymbol{E}_2\boldsymbol{K} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\varepsilon\boldsymbol{I} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{C}+\boldsymbol{D}\boldsymbol{K} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{I} \end{bmatrix}<0$$

不等式[6].根据光纤电流互感器系统取值:$k_1=0.1,k_2=1,|\Delta k|\leqslant0.1$.给定 $\gamma=0.1$,由定理 1 的设计方法得到系统的鲁棒 H_∞保性能控制律:

$$\boldsymbol{u}(k)=\begin{bmatrix} -1.9786 & -0.0117 \end{bmatrix}\boldsymbol{x}(k)$$

在光纤电流互感器的系统仿真模型中,加入均值为 0、方差为 1 服从正态分布的噪声信号模

拟系统扰动输入，把鲁棒 H_∞ 保性能控制律设计方法得到的控制律 $\boldsymbol{u}(k)$ 代入仿真模型和实际系统；并与原有的控制算法做仿真比较和实验验证.

图2为原有的控制算法得到的系统仿真输出，图3为鲁棒 H_∞ 控制算法得到的系统仿真输出. 图4和图5为相应的实验数据.

结果表明采用鲁棒 H_∞ 控制理论设计的控制律，明显地改善了系统对扰动输入的抑制能力.

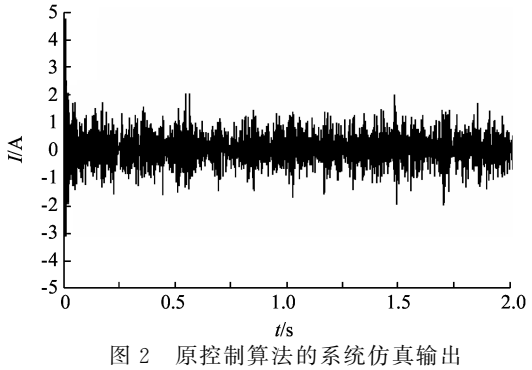

图2 原控制算法的系统仿真输出

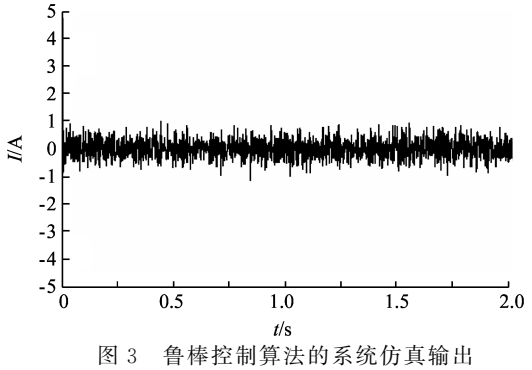

图3 鲁棒控制算法的系统仿真输出

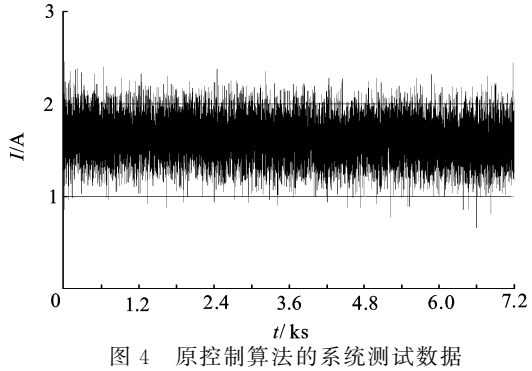

图4 原控制算法的系统测试数据

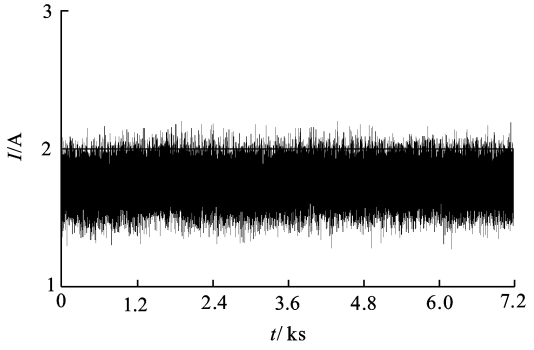

图5 鲁棒控制算法的系统测试数据

4 结 论

为了提高系统抗干扰能力，分析系统模型，对光纤电流互感器系统提出控制器设计指标，用鲁棒 H_∞ 控制理论设计控制算法. 仿真和实验结果表明，所提出的控制策略与原系统相比具有较强的干扰抑制能力，提高了系统的测量精度.

参考文献（References）

[1] Blake J, Tantaswadi P, de Carvalho R T. In-line Sagnac interferometer current sensor[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(1): 116－121

[2] Guido F. Reciprocal reflection interferometer for a fiberoptic Faraday current sensor[J]. Appl Opt, 1994, 33: 6111－6122

[3] 邬占军，张晞，王夏宵，等，高精度光纤陀螺高带宽信号检测方案[J]. 北京航空航天大学学报，2006，32(11)：1365－1368
Wu Zhanjun, Zhang Xi, Wang Xiaxiao, et al. Broad bandwith signal detection scheme for high precision fiber optic gyroscope[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(11): 1365－1368 (in Chinese)

[4] Zhou Kemin, Doyle J C, Glover K. Robust and optimal control[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1996: 489－490

[5] 贾英民. 鲁棒 H_∞ 控制[M]. 北京：科学出版社，2007：156－160
Jia Yingmin. Robust H_∞ control [M]. Beijing: Science Press, 2007: 156－160(in Chinese)

[6] 俞立. 鲁棒控制-线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京：清华大学出版社，2002：250－252
Yu Li. Robust control-linear matrix inequality approach [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 250－252(in Chinese)

(责任编辑：赵海容)