Dynamical Systems and Control 动力系统与控制, 2016, 5(3), 124-133
Published Online July 2016 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/dsc
http://dx.doi.org/10.12677/dsc.2016.53014

Hans汉斯

Static Output Feedback Reliable Control with H_2/H_∞ Performance against Actuator Failures

Yichao Xu[1], Fuzhong Wang[2*], Bo Yao[1]

[1]College of Mathematics and System Science, Shenyang Normal University, Shenyang Liaoning
[2]Department of Basic Education, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang Liaoning
Email: xuyichaosherry@126.com, boyao163@163.com, *Fuzhong163@163.com

Received: Jul. 6th, 2016; accepted: Jul. 24th, 2016; published: Jul. 29th, 2016

Abstract

For a linear system and considering the continuous fault model, this paper proposed the problem of a static output feedback reliable controller with H_2/H_∞ performance. First, we give the existing sufficient conditions of H_2/H_∞ performance with the premise that the system is without faults, and we can get the rate of static output feedback reliable control. Then under the actuator failures, we use convex combination method, redesign the static output feedback controller and a static output feedback reliable controller can be obtained by using linear matrix inequality. And the close-loop system obtained by the reliable controller can keep asymptotically stable when the actuator fails. A simulation example is given to illustrate the feasibility and effectiveness of the results.

Keywords

H_2/H_∞ Reliable Control, Actuator Failures, Static Output Feedback, Linear System, Linear Matrix Inequality (LMI)

抵御执行器故障的H_2/H_∞静态输出反馈可靠控制

徐艺超[1]，王福忠[2*]，姚　波[1]

*通讯作者。

文章引用: 徐艺超, 王福忠, 姚波. 抵御执行器故障的 H_2/H_∞静态输出反馈可靠控制[J]. 动力系统与控制, 2016, 5(3): 124-133. http://dx.doi.org/10.12677/dsc.2016.53014

[1]沈阳师范大学数学与系统科学学院，辽宁 沈阳
[2]沈阳工程学院基础教学部，辽宁 沈阳
Email: xuyichaosherry@126.com, boyao163@163.com, *Fuzhong163@163.com

收稿日期：2016年7月6日；录用日期：2016年7月24日；发布日期：2016年7月29日

摘　要

针对线性系统，考虑连续增益故障模型，本文研究了具有执行器故障的H_2/H_∞静态输出反馈可靠控制问题。首先，在执行器无故障的前提下，给出H_2/H_∞性能指标存在的充分条件，进而得出系统的静态输出反馈控制率。然后，基于执行器故障，利用凸组合方法处理故障，重新设计静态输出反馈控制器，通过求解线性矩阵不等式的方法，完成静态输出反馈可靠控制器的设计。由此可靠控制器构成的闭环系统，使得当执行器发生故障时，也可使闭环系统的保持渐近稳定。最后的数值仿真验证了本文结果的有效性和可行性。

关键词

H_2/H_∞可靠控制，执行器故障，静态输出反馈，线性系统，线性矩阵不等式(LMI)

1. 引言

反馈控制是指在控制系统中，将系统的实际输出和期望输出进行比较，形成误差，从而为确定下一步的控制行为提供依据，实现对被控对象进行控制的任务，这就是反馈控制原理。文献[1]通过引入时变的状态变量，设计了时变系统的状态反馈控制器以及基于状态观测器的输出反馈控制器。文献[2]基于线性矩阵不等式给出了保成本可靠控制器的参数化表示。文献[3]利用凸组合方法，得出当执行器发生故障时系统渐近稳定的条件。目前反馈控制中主要是动态输出反馈和状态输出反馈，动态输出反馈结构复杂消耗能量，状态输出反馈需要系统对状态进行采集，但一般很难做到。目前，静态输出反馈相对于动态输出反馈和状态输出反馈研究的学者较少。文献[4]给出了线性系统静态输出反馈镇定的 LMI 方法。文献[5]利用线性矩阵不等式方法设计了随机混合系统的无脉冲以及随机稳定的静态输出反馈控制器。文献[6]通过构造一个二次 Lyapunov 函数，结合线性矩阵不等式的约束条件，给出了控制器存在的充分条件。以上文章涉及到的静态输出控制都不是可靠的，一旦系统的传感器或者执行器发生故障，系统将不再稳定，所以设计一个静态输出可靠控制是必要的也是具有实际意义的。可靠控制是将系统可能发生的故障考虑在系统控制器的设计过程中，其设计主要考虑系统的是执行器和传感器故障，故障类型分为“中断”故障和增益故障，“中断”故障也称为离散故障，增益故障也称为连续故障，本文主要研究连续故障。自 1980 年 Siljak 发表关于可靠镇定的文章以后，许多学者对其进行了深入研究[7]-[9]。文献[10]给出了在连续故障的前提下，基于 LMI 方法给出了反馈控制器存在的充分条件，并且提出了考虑执行器和传感器双故障的系统的完整性设计方法。文献[11]以执行器故障诊断为前提，解决了连续时间系统的可靠时滞控制问题。线性系统的 H_2 控制问题早已成为控制科学中的一个热点问题，系统的 H_2 性能指标在航空航天、加工制造等问题中十分重要，得到普遍关注和广泛应用。许多学者在对线性系统的 H_2 控制研究方面取得了诸多成就[12]-[14]。文献[12]提出来连续时间系统的 H_2 性能指标及其计算方法。文献[13]提出了基于 LMI 的系统的 H_2 输出反馈解。文献[14]基于模糊系统，通过李雅普诺夫稳定理论，对系统的广义 H_2 控制进行了研究。自从上个世纪年 90 代初由 Zames [15]提出 H_∞控制以来，许多学者对 H_∞控制进行了研究，

并设计出很多 H_∞控制器。文献[16]针对一类含有时变时滞的不确定线性系统，基于 Lyapunov 稳定性理论，给出了系统存在保成本 H_∞鲁棒可靠控制器应满足的一个矩阵不等式；文献[17]对于非线性系统，利用障碍 Lyapunov 方法，研究了切换系统的 H_∞控制器设计问题。从如今的研究现状可见，在理论方面研究 H_2/H_∞的学者还是比较少的，带有可靠控制的研究更是微乎其微，所以，H_2/H_∞的静态输出反馈可靠控制是有必要和有意义的。

文章首先设计了一个带有 H_2/H_∞性能指标的静态输出反馈控制器，当执行器发生故障时，系统不稳定。基于此，重新设计了一个静态输出反馈控制器，新的控制器不仅带有 H_2/H_∞性能指标，而且可以抵御执行器故障。同时，文章给出了基于 LMI 求解静态输出反馈控制器的充分条件。所设计出的控制器保证了无论是在无故障，还是发生执行器故障时所设计的带有 H_2/H_∞性能指标的静态输出反馈控制器都是可靠的。数值仿真验证了本文结果的有效性和可行性。

2. 问题描述

考虑线性定常系统：

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \tag{1}$$

其中，$x(t) \in R^n$ 为系统的状态变量，$u(t) \in R^p$ 为系统的控制输入变量，$y(t) \in R^m$ 是系统的输出变量，$A \in R^{n\times n}$ 和 $B \in R^{n\times p}$ 是不依赖系统的常规矩阵，$C \in R^{m\times n}$ 是系统的测量行满秩矩阵。

执行器连续增益故障矩阵模型为：$u^f(t) = F_a u(t)$。

其中 $u(t) \in R^p$ 为执行器正常信号向量，$u^f(t) \in R^p$ 为考虑执行器故障的信号向量。F_a 为执行器故障矩阵，其形式为 $F_a = diag\left(f_{a1}, f_{a2}, \cdots, f_{ap}\right)$

其中 $\underline{f_{ai}} \le f_{ai} \le \overline{f_{ai}}, 0 \le \underline{f_{ai}} \le 1, \overline{f_{ai}} \ge 1, (i = 1, 2, \cdots, p)$。

故障处理(凸组合法)：

设集合 $\delta_a = \left\{\varphi_{ai} \mid \varphi_{ai} = diag\left(\varphi_{ai1}, \varphi_{ai2}, \cdots, \varphi_{aip}\right), \varphi_{aij} = \underline{f}_{ai} \text{ or } \overline{f}_{ai}, j = 1, 2, \cdots, p\right\}$,

显然，集合 δ_a 有 2^p 个元素。由集合 δ_a 的元素为顶点构成的超多面体及内部表述的集合是凸的，记为：

$$\Delta_a = \left\{F_a \mid F_a = diag\left(f_{a1}, f_{a2}, \cdots, f_{ap}\right), \underline{f}_{ai} \le f_{ai} \le \overline{f}_{ai}, i = 1, 2, \cdots, p\right\}$$

这样由上述两个集合描述的矩阵 $F_a \in \Delta_a$。对于任意 $F_a \in \Delta_a$ 使得 $F_a = F_{ai}$，总可以找到 $\alpha_{ij} \ge 0, i = 1, 2, \cdots, 2^p$ 满足 $\sum_{i=1}^{2^p} \alpha_{ai} = 1$ 使得 $F_a = \sum_{i=1}^{2^p} \alpha_{ai}\varphi_{ai}$。

引理 1 [18]：已知 S 是 $n \times n$ 正定对称矩阵 $(m \le n)$，G 是适维行满秩矩阵，则矩阵 GSG' 可逆。

分析：证明 GSG' 可逆，等价于证明方程 $GSG'X = 0$ 只有零解。

证明：

设 $GSG'X = 0$

$\therefore XGSG'X = 0$

整理得 $(G'X)' S (G'X) = 0$

$\because S$ 是 $n \times n$ 正定对称矩阵

$\therefore G'X = 0$

$\therefore GG'X = 0$

又∵ GG' 可逆，则只有零解 $X=0$

综上可得，方程只有零解，即 GSG' 可逆，引理得证。

引理 2： 如果 $MP=Q,P,Q\in R_m^{m\times n}$，则 M 可逆。

引理 3： 对系统(1)，设 $\alpha>0$ 是一个给定的常数，则以下条件是等价的：

1. 系统渐近稳定，且 $\Gamma_{ee}<\alpha$；

2. 存在一个对称矩阵 $P>0$，使得 $\begin{bmatrix} A^{\mathrm{T}}P+PA & PB & C^{\mathrm{T}} \\ B^{\mathrm{T}}P & -\alpha I & D^{\mathrm{T}} \\ C & D & -\alpha I \end{bmatrix}<0$。

引理 4： 假定系统(1)是渐近稳定的，则：

1. $\|T\|_2<\infty$，当且仅当 $D=0$；

2. 如果 $D=0$，则以下结论是等价的：

1) $\|T\|_2<\gamma$；

2) 存在对称矩阵 $X>0$ 使得 $AX+XA^{\mathrm{T}}+BB^{\mathrm{T}}<0$，$trace\left(CXC^{\mathrm{T}}\right)<\gamma^2$；

3) 存在对称矩阵 $Y>0$ 使得 $A^{\mathrm{T}}Y+YA+C^{\mathrm{T}}C<0$，$trace\left(B^{\mathrm{T}}YB\right)<\gamma^2$。

3. 主要结论

首先给出了正常线性系统静态输出反馈可靠控制器设计：

对线性系统(1)引入静态输出反馈控制器：

$$u(t)=Ky(t) \tag{2}$$

由此得到闭环系统：

$$\dot{x}(t)=(A+BKC)x(t) \tag{3}$$

定理 1： 对于闭环系统系统(3)，存在静态输出反馈 H_2/H_∞控制器的充分条件为对于正定对称矩阵 X 和矩阵 U 使得下列线性矩阵不等式(LMIs)：

$$\begin{bmatrix} XA^{\mathrm{T}}+AX+(BUC)^{\mathrm{T}}+BUC & B & XC^{\mathrm{T}} \\ B^{\mathrm{T}} & -\alpha I & D^{\mathrm{T}} \\ CX & D & -\alpha I \end{bmatrix}<0$$

$$AX+BUC+XA^{\mathrm{T}}+(BUC)^{\mathrm{T}}+BB^{\mathrm{T}}<0$$

$$trace\left(CXC^{\mathrm{T}}\right)<\gamma^2$$

存在可行解。如果可行解为 (X,U)，则相应的静态输出反馈控制器为 $K=UW^{-1}$。

其中，W 可以由 $WC=CX$ 求得。

证明：对于系统(1)和控制器(2)构成的闭环系统(3)是渐进稳定的且满足 H_2/H_∞性能指标的充分条件是存在对称正定矩阵 P 和 X，使得

$$\begin{bmatrix} (A+BKC)^{\mathrm{T}}P+P(A+BKC) & PB & C^{\mathrm{T}} \\ B^{\mathrm{T}}P & -\alpha I & D^{\mathrm{T}} \\ C & D & -\alpha I \end{bmatrix}<0 \tag{4}$$

$$\left(A+BKC\right)X+X\left(A+BKC\right)^{\mathrm{T}}+BB^{\mathrm{T}}<0 \tag{5}$$

$$trace\left(CXC^{\mathrm{T}}\right)<\gamma^{2}$$

不等式(4)两边同时乘以 $diag\left(X,I,I\right)$ 得

$$\begin{bmatrix} X\left(A+BKC\right)^{\mathrm{T}}+\left(A+BKC\right)X & B & XC^{\mathrm{T}} \\ B^{\mathrm{T}} & -\alpha I & D^{\mathrm{T}} \\ CX & D & -\alpha I \end{bmatrix}<0 \tag{6}$$

通过引入 W，(5)(6)式变

$$\begin{bmatrix} \left(AX+BKWC\right)^{\mathrm{T}}+\left(AX+BKWC\right) & B & XC^{\mathrm{T}} \\ B^{\mathrm{T}} & -\alpha I & D^{\mathrm{T}} \\ CX & D & -\alpha I \end{bmatrix}<0$$

$$AX+BKWC+\left(AX+BKWC\right)^{\mathrm{T}}+BB^{\mathrm{T}}<0$$

进一步变化可得 LMIs

$$\begin{bmatrix} \left(AX+BUC\right)^{\mathrm{T}}+\left(AX+BUC\right) & B & XC^{\mathrm{T}} \\ B^{\mathrm{T}} & -\alpha I & D^{\mathrm{T}} \\ CX & D & -\alpha I \end{bmatrix}<0$$

$$AX+BUC+XA^{\mathrm{T}}+\left(BUC\right)^{\mathrm{T}}+BB^{\mathrm{T}}<0$$

其中， $X=P^{-1}$， $WC=CX$， $U=KW$ 。

下证 W 可逆：

对等式 $WC=CX$ 两边乘以 C' 得： $WCC'=CXC'$

则 $W=CXC'\left(CC'\right)^{-1}$

即证 CXC' 可逆。

由引理 1 可知 CXC' 可逆，故 W 可逆。

综上，定理 1 得证。

然后讨论系统发生执行器故障时，线性系统静态输出反馈可靠控制器的设计方法。

当线性系统发生执行器故障，系统可以描述为：

$$\begin{cases} \dot{x}\left(t\right)=Ax\left(t\right)+BF_{a}u\left(t\right) \\ y\left(t\right)=Cx\left(t\right) \end{cases} \tag{7}$$

对系统(7)引入静态输出反馈控制器：

$$u\left(t\right)=Ky\left(t\right) \tag{8}$$

由此得到闭环系统：

$$\dot{x}\left(t\right)=\left(A+BF_{a}KC\right)x\left(t\right) \tag{9}$$

定理 2: 对于闭环系统(9)，如果存在静态输出反馈 H_2/H_∞ 控制器的充分条件为对于正定对称矩阵 X 和矩阵 U ，下列线性矩阵不等式：

$$\begin{bmatrix} XA^{\mathrm{T}}+AX+\left(B\varphi_{ai}UC\right)^{\mathrm{T}}+B\varphi_{ai}UC & B & XC^{\mathrm{T}} \\ B^{\mathrm{T}} & -\alpha I & D^{\mathrm{T}} \\ CX & D & -\alpha I \end{bmatrix}<0$$

$$AX+B\varphi_{ai}UC+XA^{\mathrm{T}}+\left(B\varphi_{ai}UC\right)^{\mathrm{T}}+BB^{\mathrm{T}}<0$$

$$\mathrm{trace}\left(CXC^{\mathrm{T}}\right)<\gamma^2$$

存在可行解。如果可行解为$\left(X,U\right)$，则相应的静态输出反馈控制器矩阵增益为$K=UW^{-1}$。

其中，W 可以由$WC=CX$ 求得。

证明：对于系统(7)和控制器(8)构成的闭环系统(9)是渐进稳定的且满足 H_∞性能指标的充分条件是存在一个对称正定矩阵P和X，使得

$$\begin{bmatrix} \left(A+BF_aKC\right)^{\mathrm{T}}P+P\left(A+BF_aKC\right) & PB & C^{\mathrm{T}} \\ B^{\mathrm{T}}P & -\alpha I & D^{\mathrm{T}} \\ C & D & -\alpha I \end{bmatrix}<0 \tag{10}$$

$$\left(A+BF_aKC\right)X+X\left(A+BF_aKC\right)^{\mathrm{T}}+BB^{\mathrm{T}}<0 \tag{11}$$

$$trace\left(CXC\right)^{\mathrm{T}}<\gamma^2$$

不等式(10)两边同时乘以$diag\left(X,I,I\right)$得

$$\begin{bmatrix} X\left(A+BF_aKC\right)^{\mathrm{T}}+\left(A+BF_aKC\right)X & B & XC^{\mathrm{T}} \\ B^{\mathrm{T}} & -\alpha I & D^{\mathrm{T}} \\ CX & D & -\alpha I \end{bmatrix}<0 \tag{12}$$

通过引人 W，(11) (12)式变为

$$\begin{bmatrix} \left(AX+BF_aKWC\right)^{\mathrm{T}}+\left(AX+BF_aKWC\right) & B & XC^{\mathrm{T}} \\ B^{\mathrm{T}} & -\alpha I & D^{\mathrm{T}} \\ CX & D & -\alpha I \end{bmatrix}<0$$

$$AX+BF_aKWC+\left(AX+BF_aKWC\right)^{\mathrm{T}}+BB^{\mathrm{T}}<0$$

进一步变化可得：

$$\begin{bmatrix} \left(AX+BF_aUC\right)^{\mathrm{T}}+\left(AX+BF_aUC\right) & B & XC^{\mathrm{T}} \\ B^{\mathrm{T}} & -\alpha I & D^{\mathrm{T}} \\ CX & D & -\alpha I \end{bmatrix}<0$$

$$AX+BF_aUC+XA^{\mathrm{T}}+\left(BF_aUC\right)^{\mathrm{T}}+BB^{\mathrm{T}}<0$$

其中，$X=P^{-1}$，$WC=CX$，$U=KW$。

由于 $F_a=\sum_{i=1}^{2^p}\alpha_{ai}\varphi_{ai}$

所以有

$$\begin{bmatrix} \left(AX+B\sum_{i=1}^{2^p}\alpha_{ai}\varphi_{ai}UC\right)^{\mathrm{T}}+\left(AX+B\sum_{i=1}^{2^p}\alpha_{ai}\varphi_{ai}UC\right) & B & XC^{\mathrm{T}} \\ B^{\mathrm{T}} & -\alpha I & D^{\mathrm{T}} \\ CX & D & -\alpha I \end{bmatrix}<0$$

$$AX+B\sum_{i=1}^{2^p}\alpha_{ai}\varphi_{ai}UC+XA^{T}+\left(B\sum_{i=1}^{2^p}\alpha_{ai}\varphi_{ai}UC\right)^{\mathrm{T}}+BB^{\mathrm{T}}<0$$

$\alpha_{ij}\ge 0, i=1,2,\cdots,2^p$ 且满足 $\sum_{i=1}^{2^p}\alpha_{ai}=1$

故有：

$$\begin{bmatrix} XA^{\mathrm{T}}+AX+\left(B\varphi_{ai}UC\right)^{\mathrm{T}}+B\varphi_{ai}UC & B & XC^{\mathrm{T}} \\ B^{\mathrm{T}} & -\alpha I & D^{\mathrm{T}} \\ CX & D & -\alpha I \end{bmatrix}<0$$

$$AX+B\varphi_{ai}UC+XA^{\mathrm{T}}+\left(B\varphi_{ai}UC\right)^{\mathrm{T}}+BB^{\mathrm{T}}<0$$

即不等式组得证。

其中， $X=P^{-1}$， $WC=CX$， $U=KW$ 。

4. 数值仿真

本文研究的是，首先考虑正常的线性系统在无故障的情况下，通过设计带有 H_2/H_∞性能指标的静态输出反馈控制器使闭环系统保持稳定；再考虑正常的线性系统发生执行器故障，系统出现不稳定的情况，通过重新设计控制器，使系统达到稳定。

考虑如下系统：

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-1&6&1\\1&2&1\\1&2&-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\x_3\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}1&2&-7\\1&3&1\\-1&-4&1\end{bmatrix}u,\quad y=\begin{bmatrix}1&0&4\\1&-1&2\\0&1&3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\x_3\end{bmatrix}$$

其中 $\alpha=0.1$

设计的带有 H_2/H_∞性能指标的静态输出反馈控制器为

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-5.3334&-2.5122&-0.1362\\-0.4252&-3.5326&-4.1673\\1.5889&6.3893&-10.0488\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\x_3\end{bmatrix},\quad \begin{bmatrix}u_1\\u_2\\u_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}8.5760&-13.9606&-13.8084\\-6.9814&8.2321&7.3427\\5.8115&-5.6043&-4.6207\end{bmatrix}\begin{bmatrix}y_1\\y_2\\y_3\end{bmatrix}$$

使闭环系统(3)的保持稳定，如图 1。此时， $\gamma=3.2916$ 。

图 1 表示的是正常的线性系统在无故障的情况下，通过设计一个带有 H_2/H_∞性能指标的静态输出反馈控制器使系统保持稳定。

考虑发生执行器故障 $F=diag\left(f_1,f_2\right)$，其中 $0\le f_1\le 1, 0.5\le f_2\le 1.2$，原控制器无法使系统稳定，如图 2。

图 2 描述的是考虑系统在故障 $0\le f_1\le 1, 0.5\le f_2\le 1.2$ 情况下，在原控制器的作用下，系统无法保持渐近稳定。

针对同一故障，设计新的带有 H_2/H_∞ 性能指标的静态输出反馈控制器为：

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-4.1664 & -2.7321 & -0.7513\\ -0.9790 & -3.4828 & -5.5147\\ 1.3419 & 6.1789 & -8.2958\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\\ x_3\end{bmatrix},\quad \begin{bmatrix}u_1\\ u_2\\ u_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1.9960 & -15.1471 & -15.8596\\ -3.7342 & 5.0235 & 4.4343\\ 4.6161 & -4.6611 & -3.6666\end{bmatrix}\begin{bmatrix}y_1\\ y_2\\ y_3\end{bmatrix}$$

使系统重新保持稳定，如图 3。此时 $\gamma = 9.4539$ 。

图 3 描述的是对 $F = diag\left(f_1, f_2\right)$， $0 \le f_1 \le 1, 0.5 \le f_2 \le 1.2$ 的故障的前提下，重新设计的带有 H_2/H_∞ 性能指标的静态输出反馈控制器，使系统重新保持稳定。

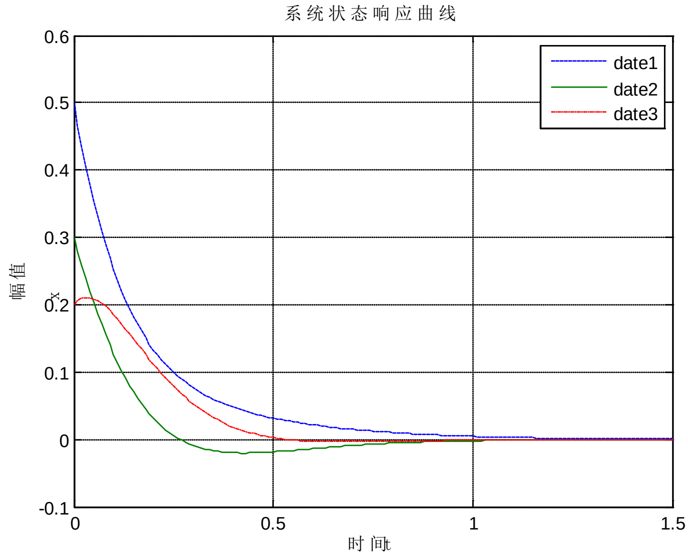

Figure 1. Designed static output feedback controller keeps the system asymptotically stable
图 1. 设计的静态输出反馈控制器使系统保持渐近稳定

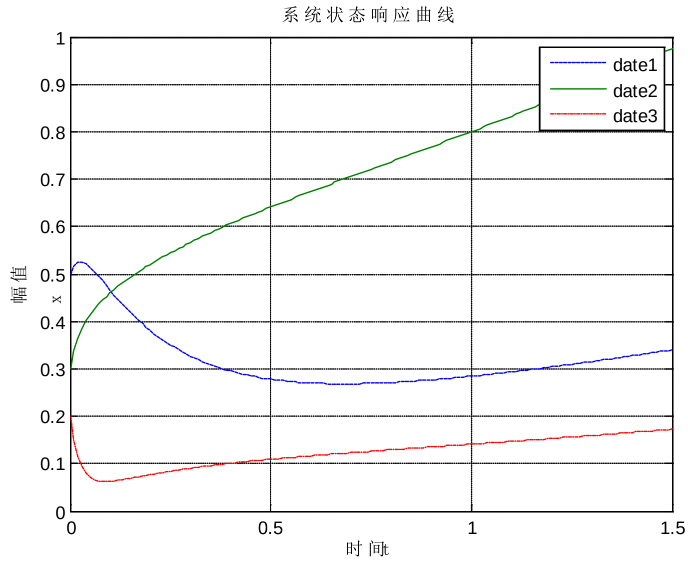

Figure 2. The system fails, and the original controller cannot keep the system asymptotically stable
图 2. 系统出现故障，原控制器无法使系统保持渐近稳定

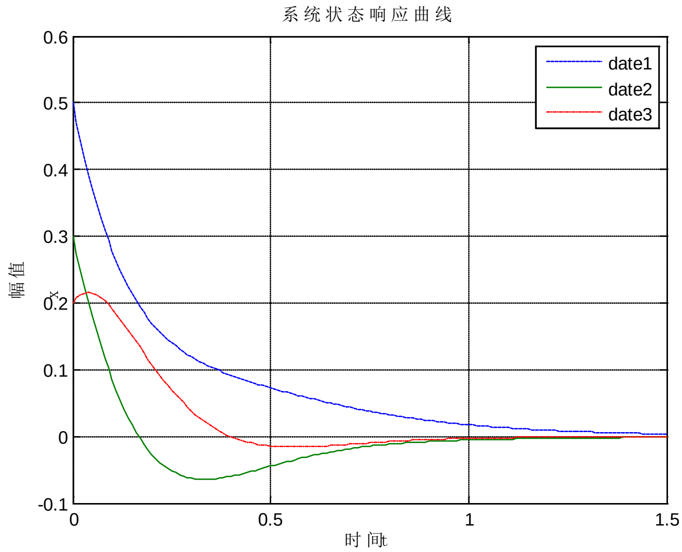

Figure 3. Use the controller which is against actuator failures, the system keeps asymptotically stable again
图 3. 使用抵御执行器故障的控制器，使系统重新保持渐近稳定

5. 结论

对于线性系统，本文研究了具有执行器故障的 H_2/H_∞性能指标的静态输出反馈可靠控制问题。首先我们讨论了在不考虑故障的情况下，通过设计控制器使系统保持稳定；然后系统发生故障，在原控制器的作用下，系统无法保持渐近稳定；最后针对同一系统同一故障，通过重新设计控制器，使得系统重新保持稳定。文章中的数值仿真证明了可靠控制器的有效性。

参考文献 (References)

[1] 张健，辛晓帅，徐红兵. 一类线性时变系统的输出反馈控制[J]. 自动化学报, 2014, 40(2): 373-378.

[2] 任俊超，胡刚，谢湘生. 不确定广义系统的保成本可靠控制[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(9): 81-84, 93.

[3] 刘玉忠，王立敏，史书慧. 不确定切换系统的可靠控制[J]. 计算技术与自动化, 2007, 26(3): 17-20.

[4] Wang, J.Z. and Zhang, J.F. (2001) An LMI Approach to Static Output Feedback Stabilization of Linear System. *Control Theory and Application*, **18**, 843-846.

[5] Boukas, E.K. (2006) Static Output Feedback Control for Stochastic Hybrid Systems: LMI Approach. *Automatica*, **42**, 183-188. http://dx.doi.org/10.1016/j.automatica.2005.08.012

[6] Wang, J.-W., Wu, H.-N. and Li, H.-X. (2014) Static Output Feedback Control Design for Linear MIMO Systems with Actuator Dynamics Governed by Diffusion PDEs. *International Journal of Control*, **87**, 90-100. http://dx.doi.org/10.1080/00207179.2013.822991

[7] Veillette, R.J., Medanic, J.V. and Perkins, W.R. (1992) Design of Reliable Control System. *IEEE Transaction on Automatic Control*, **37**, 770-784. http://dx.doi.org/10.1109/9.119629

[8] 王福忠，姚波，张嗣瀛. 具有执行器故障的保成本可靠控制[J]. 东北大学学报, 2003, 24(7): 616-619.

[9] Ma, L.C., Meng, X.Y., Liu, Z.Z. and Du, L.F. (2012) Multi-Objective and Reliable Control for Trajectory-Tracking of Rendezvous via Parameter-Dependent Lyapunov Functions. *Acta Astronatica*, **81**, 122-136. http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.07.023

[10] 王福忠，姚波，张庆灵. 基于 LMI 双故障动态输出反馈完整性控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(6): 976-980.

[11] 乔军丽，贾新春，刘博. 具有执行器故障的连续时间系统的可靠时滞控制[J]. 中北大学学报, 2006, 27(2): 18-20.

[12] Sigurd, S. and Postiethwaite, I. Multivariabe Feedback Control: Analysis and Design[M]. 西安：西安交通大学出版社, 2011: 135-136.

[13] 王德进. H_2 和 H_∞优化控制理论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001: 200-202.

[14] 李江荣. 模糊系统的广义 H_2 控制[D]: [博士学位论文].西安: 西安电子科技大学, 2012.

[15] Zames, G. (1981) Feedback and Optimal Sensitivity: Model Reference, Transformations, Multiplicative Seminorms, and Aroximate Inverses. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **26**, 301-320. http://dx.doi.org/10.1109/TAC.1981.1102603

[16] 滕青芳，范多旺，严伟. 不确定时变时滞系统的保成本 H_∞鲁棒可靠控制[J]. 兰州交通大学学报，2010，29(6): 74-78.

[17] 刘茜，赵军. 带有状态约束的非线性切换系统的 H_∞控制器设计[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(3): 314-317.

[18] Ge, D., Wang, F.Z. and Yao, B. (2014) Static Output Feedback Reliable Control with Actuator Failures. *Proceedings of the* 2014 *Congress on Industrial Engineering*, *Machine Design and Automation & Computer Science and Application*, World Scientific, Sanya, 479-483.