Dynamical Systems and Control 动力系统与控制, 2017, 6(3), 127-135
Published Online July 2017 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/dsc
https://doi.org/10.12677/dsc.2017.63016

State Feedback Reliable Tracking Control with H_2 Performance for against Actuator Failures

Zhihui Liu[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: 1969191000@qq.com, *Fuzhong163@163.com, boyao163@163.com

Received: Jun. 16th, 2017; accepted: Jul. 9th, 2017; published: Jul. 12th, 2017

Abstract

Aiming at the linear stochastic system, the H_2 reliable tracking control problem with actuator failure is studied. First, the state feedback tracking controller is designed to keep the closed-loop system asymptotically stable, while satisfying the H_2 performance index. Furthermore, the condition and design algorithm of the state feedback reliable controller which satisfies the H_2 performance index and the actuator failure are given. It can be seen that the system can't be stabilized under the action of the original state feedback controller when the actuator is faulty. However, the state feedback reliable tracking controller proposed in this paper can keep the system asymptotically after the fault which is stable and satisfies the corresponding H_2 performance index, which verifies the validity and feasibility of the conclusion.

Keywords

State Feedback, Actuator Failure, H_2 Reliable Tracking Control, Linear Matrix Inequality (LMI)

抵御执行器故障的H_2可靠跟踪控制

刘志慧[1]，王福忠[2*]，姚　波[1]

[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: 1969191000@qq.com, *Fuzhong163@163.com, boyao163@163.com

收稿日期：2017年6月16日；录用日期：2017年7月9日；发布日期：2017年7月12日

*通讯作者。

文章引用: 刘志慧, 王福忠, 姚波. 抵御执行器故障的 H_2 可靠跟踪控制[J]. 动力系统与控制, 2017, 6(3): 127-135.
https://doi.org/10.12677/dsc.2017.63016

摘　要

针对线性定常系统，研究了具有执行器故障的H_2可靠跟踪控制问题。首先设计状态反馈跟踪控制器使得闭环系统保持渐近稳定，同时满足H_2性能指标。进一步，给出了满足H_2性能指标，考虑执行器故障的状态反馈可靠控制器存在的条件及设计算法。通过数例仿真可以看出，当执行器故障时，该系统在原状态反馈控制器作用下无法保持稳定，但是，利用本文提出的状态反馈可靠跟踪控制器可使系统在发生故障后仍保持渐近稳定，且满足相应的H_2性能指标，验证了本文给出结论的有效性和可行性。

关键词

状态反馈，执行器故障，H_2可靠跟踪控制，线性矩阵不等式(LMI)

1. 引言

现代控制工程系统正朝着大规模、复杂化的方向发展，特别是航空航天、大型化工、高速铁路等控制系统，这些系统一旦发生故障可能造成人员和财产的巨大损失。因此，设计一类控制器使系统在发生故障时仍可以保持其正常运行是具有实际意义的。

可靠控制的基本思想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，无论系统是否发生故障都能使闭环系统保持稳定，并具有满意的性能指标。可靠控制设计主要考虑系统的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，本文主要是考虑连续故障。1980 年 Siljak 第一次提出可靠控制的概念[1]，之后许多学者对其进行了深入研究[2] [3] [4]。文献[2]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。文献[3]通过引入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[4]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。线性系统的 H_2 控制问题早已成为控制中的一个热点问题，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也在控制领域中得到了更多的青睐。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[5] [6] [7] [8] [9]。文献[5]中提出来连续时间系统的 H_2 性能指标及其计算方法。文献[6]中给出具有抵御任意故障的 H_2 动态输出反馈控制器的设计。文献[7]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。跟踪控制问题是设计控制器使系统的输出尽可能地接近外部参考输入。线性系统的跟踪控制日趋完善而可靠跟踪控制的研究却非常有限[8] [9] [10] [11],所使用的故障模型是离散的,这种故障模型并不能完全刻画实际发生的故障,而本文考虑的是连续故障模型，文献[6]针对具有不确定性的线性定常系统给出了可靠跟踪控制存在的充分条件。以上的文章中，有的涉及可靠控制，有的涉及 H_2 控制，也已经达到了比较完善的程度。但是都未涉及到具有执行器故障的 H_2 可靠跟踪控制。

本文在考虑连续故障模型的基础上，给出线性系统 H_2 可靠跟踪控器存在的充分条件，利用求解 LMI 完成对 H_2 可靠跟踪控制器的设计。这种故障模型包含离散故障模型,同时也考虑了信号偏离准确值的故障类型。由此可靠跟踪控制器构成的闭环系统，使得无论执行器是否发生故障，都可使闭环系统保持渐

近稳定并且满足 H_2 性能指标。最后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

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

其中，$x(t)\in R^n$ 是状态标量，$u(t)\in R^m$ 是控制变量，$y(t)\in R^p$ 是输出变量，A,B 是适维矩阵，C 是适维行满秩矩阵，η 为有界输入干扰。

由系统(1)构成的增广系统

$$\begin{cases}\dot{x}(t)=Ax(t)+Bu(t)+\eta\\ \dot{q}(t)=Cx(t)-y_r(t)\end{cases} \tag{2}$$

其中 $y_r(t)$ 为跟踪参考信号。

控制器形式为

$$u(t)=Kx(t) \tag{3}$$

由系统(1)的增广系统(2)可以重写闭环系统为

$$\dot{z}(t)=\bar{A}z(t)-\omega(t) \tag{4}$$

其中 $\bar{A}=\hat{A}+\hat{B}K$，$z(t)=\begin{bmatrix}x(t)\\ q(t)\end{bmatrix}$，$\hat{A}=\begin{bmatrix}A & 0\\ C & 0\end{bmatrix}$，$\hat{B}=\begin{bmatrix}B\\ 0\end{bmatrix}$，$\omega(t)=\begin{bmatrix}\eta\\ -y_r\end{bmatrix}$。

执行器连续增益故障矩阵模型描述为：

$$u^f(t)=F_a u(t) \tag{5}$$

其中，$u(t)\in R^p$ 为系统的控制输入变量，$u^f(t)\in R$ 为考虑执行器故障系统的输入变量。F_a 为执行器故障矩阵，其形式为

$$F_a=diag\left(f_{a1},f_{a2},\cdots,f_{a2}\right)$$

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：

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

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

定义 1： 对于系统(1)，存在控制器式(3)使系统(1)输出 $y(t)$ 渐进跟踪参考信号 $y_r(t)$。即有 $\lim\left(y(t)-y_r(t)\right)=0$ 成立。则称控制器为渐进跟踪控制器。

引理 1： 对于闭环系统(4)如果存在控制增益矩阵 K，使闭环系统内部渐进稳定，则使系统(1)的输出 $y(t)$ 渐进跟踪参考信号 $y_r(t)$。

证：因为闭环系统(4)内部渐近稳定，也就是系统 $\dot{z}(t)=\bar{A}z(t)$ 渐近稳定。对于系统(4)两端对时间求导得 $\ddot{z}(t)=\bar{A}\dot{z}(t)$。这说明渐近趋近于零。$\dot{z}(t)=\begin{bmatrix}\dot{x}(t)\\ \dot{q}(t)\end{bmatrix}$，$\dot{q}(t)=y(t)-y_r(t)=Cx(t)-y_r(t)$，则系统(1)的输出 $y(t)$ 渐近跟踪参考信号 $y_r(t)$。

引理 2：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 $AX+XA^{\mathrm{T}}+BB^{\mathrm{T}}<0$，$\mathrm{trace}\left(CXC^{\mathrm{T}}\right)<\gamma^2$;

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

3. 主要结论

首先给出了正常线性系统带有 H_2 的状态反馈跟踪控制器设计：

定理 1：对于系统(1)及给定的 γ 若存在正定对称矩阵 X 和矩阵 W 使得下列线性矩阵不等式(LMI);

$$\hat{A}X+X\hat{A}^{\mathrm{T}}+\hat{B}W+\left(\hat{B}W\right)^{\mathrm{T}}+\hat{B}\hat{B}^{\mathrm{T}}<0 \tag{6}$$

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

成立。则存在状态反馈控制器 $K=WX^{-1}$，使系统(1)的闭环系统(4)渐进稳定，且输出 $y(t)$ 渐进跟踪参考信号 $y_r(t)$.

证明：对于系统(4)忽略 ω，可得闭环系统 $\dot{z}(t)=\bar{A}z(t)$，其中 $\bar{A}=\hat{A}+\hat{B}K$

考虑 H_2 性能指标的充分条件是存在一个对称矩阵 X，使得

$$\left(\hat{A}+\hat{B}K\right)X+X\left(\hat{A}+\hat{B}K\right)^{\mathrm{T}}+\hat{B}\hat{B}^{\mathrm{T}}<0$$

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

即

$$\hat{A}X+\hat{B}KX+\left(\hat{A}X+\hat{B}KX\right)^{\mathrm{T}}+\hat{B}\hat{B}^{\mathrm{T}}<0$$

进一步变化可得 LMI

$$\hat{A}X+X\hat{A}^{\mathrm{T}}+\hat{B}W+\left(\hat{B}W\right)^{\mathrm{T}}+\hat{B}\hat{B}^{\mathrm{T}}<0$$

其中 $K=WX^{-1}$.

显然式(6)成立则系统(4)内部渐进稳定。利用 Schur 补可知，根据引理 1 则系统内部渐进稳定，且输出 $y(t)$ 渐进跟踪参考信号 $y_r(t)$。

下面考虑执行器故障(5)的前提下 H_2 可靠跟踪控制器存在的充分条件，同时给出涉及控制器的 LMI 方法。当线性系统发生执行器故障，考虑如下线性系统

$$\begin{cases}\dot{x}(t)=Ax(t)+Bu^f(t)+\eta\\ y(t)=Cx(t)\end{cases} \tag{7}$$

其中，$x(t)\in R^n$ 是状态变量，$u^f(t)$ 是考虑执行器故障的控制输入，$y(t)\in R^p$ 是输出变量，A,B 是适维

矩阵，C 是适维行满秩矩阵，η 为有界输入干扰。

由系统(1)构成的增广系统

$$\begin{cases}\dot{x}(t)=Ax(t)+Bu(t)+\eta\\ \dot{q}(t)=Cx(t)-y_r(t)\end{cases}\tag{8}$$

其中 $y_r(t)$ 为跟踪参考信号。

控制器形式为

$$u(t)=Kx(t)\tag{9}$$

由系统(1)的增广系统(2)可以重写闭环系统为

$$\dot{z}(t)=\bar{A}z(t)-\omega(t)\tag{10}$$

其中 $\bar{A}=\hat{A}+\hat{B}F_aK$，$z(t)=\begin{bmatrix}x(t)\\ q(t)\end{bmatrix}$，$\hat{A}=\begin{bmatrix}A & 0\\ C & 0\end{bmatrix}$，$\hat{B}=\begin{bmatrix}B\\ 0\end{bmatrix}$，$\omega(t)=\begin{bmatrix}\eta\\ -y_r\end{bmatrix}$。

定义 2：对于系统(7)，在考虑执行器故障的情况下存在控制器式(9)使系统(1)输出 $y(t)$ 渐进跟踪参考信号 $y_r(t)$。即有 $\lim\left(y(t)-y_r(t)\right)=0$ 成立。则称控制器为渐进跟踪控制器。

定理 2：对于系统(7)存在对于正定对称矩阵 X 和矩阵 W 使得下列线性矩阵不等(LMIs)：

$$\hat{A}X+X\hat{A}^{\mathrm{T}}+\hat{B}\varphi_{ai}W+\left(\hat{B}\varphi_{ai}W\right)^{\mathrm{T}}+\hat{B}\hat{B}^{\mathrm{T}}<0\tag{11}$$

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

成立。则存在状态反馈控制器 $K=WX^{-1}$，使系统(7)的闭环系统(10)渐进稳定，且输出 $y(t)$ 渐进跟踪参考信号 $y_r(t)$。

证明：对于系统(7)和控制器(9)构成的闭环系统(10)是渐进稳定的且满足 H_2 性能指标的充分条件是存在一个对称正定矩阵 X，使得

$$\left(\hat{A}+\hat{B}F_aK\right)X+X\left(\hat{A}+\hat{B}F_aK\right)^{\mathrm{T}}+\hat{B}\hat{B}^{\mathrm{T}}<0$$

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

即

$$\hat{A}X+\hat{B}F_aKX+\left(\hat{A}X+\hat{B}F_aKX\right)^{\mathrm{T}}+\hat{B}\hat{B}^{\mathrm{T}}<0$$

进一步变化可得 LMI

$$\hat{A}X+X\hat{A}^{\mathrm{T}}+\hat{B}F_aW+\left(\hat{B}F_aW\right)^{\mathrm{T}}+\hat{B}\hat{B}^{\mathrm{T}}<0$$

其中 $K=WX^{-1}$。

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

所以有

$$\hat{A}X+X\hat{A}^{\mathrm{T}}+\hat{B}\sum_{i=1}^{2^p}\alpha_{ai}\varphi_{ai}W+\left(\hat{B}\sum_{i=1}^{2^p}\alpha_{ai}\varphi_{ai}W\right)^{\mathrm{T}}+\hat{B}\hat{B}^{\mathrm{T}}<0$$

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

$$\hat{A}X+X\hat{A}^{\mathrm{T}}+\hat{B}\varphi_{ai}W+\left(\hat{B}\varphi_{ai}W\right)^{\mathrm{T}}+\hat{B}\hat{B}^{\mathrm{T}}<0$$

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 H_2 状态反馈可靠跟踪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：

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

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

其中 $\gamma = 1.5$.

设计状态反馈控制器为：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.4550 & -3.0384 & -5.2640 & -3.6529 & 1.9684 \\ 5.5441 & -2.2932 & 5.2633 & 2.1985 & 0.2588 \\ 1.6332 & -4.6248 & 1.6225 & 0.7440 & 2.4861 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.4550 & -2.0384 & -6.2640 & -3.6529 & 1.9684 \\ 4.5441 & 0.2932 & 4.2633 & 2.1985 & 0.2588 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

使闭环系统(3)的保持稳定，如图 1。

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 H_2 状态反馈可靠跟踪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，设计新的状态反馈可靠跟踪控制器：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5.4125 & -13.8488 & -25.7705 & -13.6914 & 10.5993 \\ 17.5293 & -4.7117 & 19.2545 & 8.1069 & -1.0429 \\ 26.5462 & -38.2723 & 6.7386 & 5.5225 & 8.5134 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5.0249 & -6.6977 & -5.5409 & -2.3828 & 1.9684 \\ 4.5441 & -0.2932 & 4.2633 & 2.1985 & 0.2588 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

使系统重新保持稳定，如图 3。

图 3 描述的是对 $F = diag\left(f_1, f_2\right), 0 \le f_1 \le 1, 0 \le f_2 \le 1$ 的故障的前提下，重新设计的带有 H_2 性能指标的状态反馈控制器，使系统重新保持稳定。

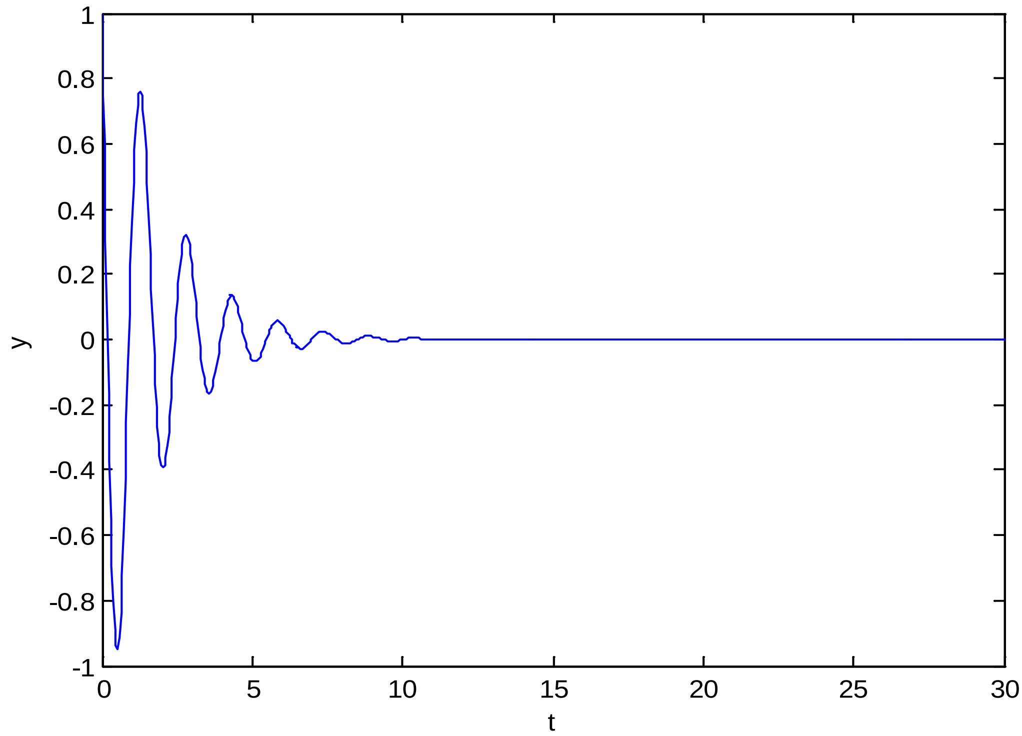

Figure 1. Designing state feedback tracking controller to keep the system asymptotically stable
图 1. 设计状态反馈跟踪控制器使系统保持渐近稳定

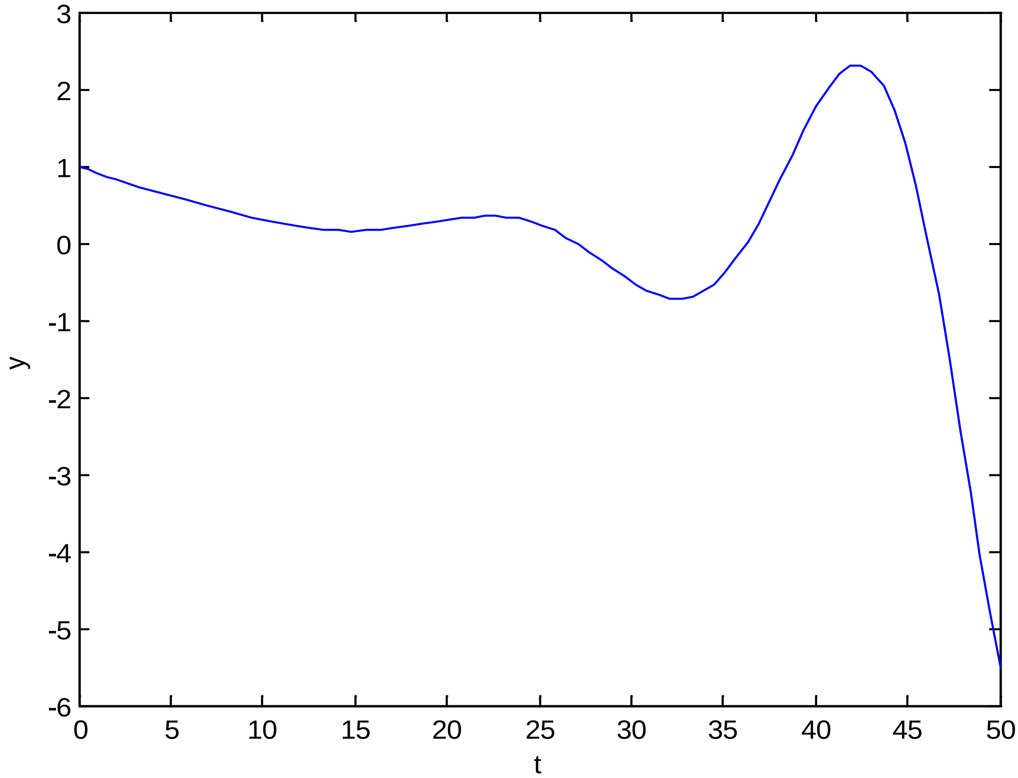

Figure 2. System failure, the original controller can't keep the system asymptotically
图 2. 系统出现故障，原控制器无法使系统保持渐近稳定

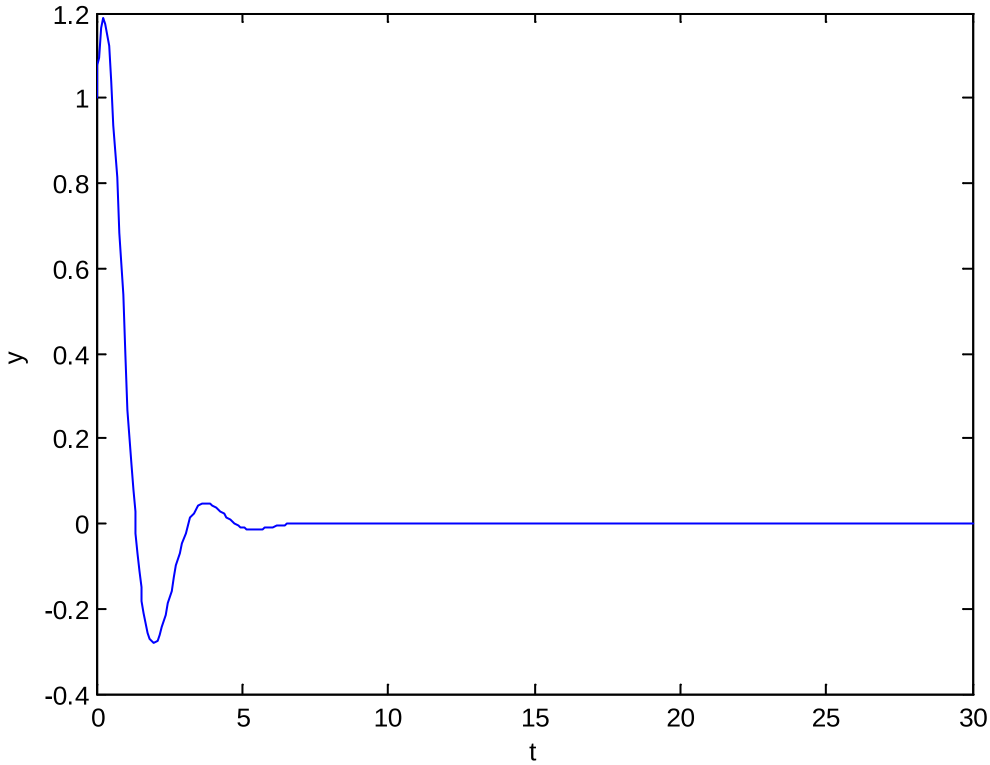

Figure 3. Resisting the actuator failure of the controller, so that the system can maintain asymptotic stability
图 3. 抵御执行器故障的可靠控制器，使系统重新保持渐近稳定

5. 结论

综上所述，文中给出的不考虑故障的情况下，正常跟踪控制器可以使闭环系统保持稳定且满足相应的性能指标，但是，当系统出现故障时，正常控制器下的闭环系统将失去稳定性。在相同故障情形下，利用文中给出的可靠控制器就可以使系统重新保持稳定，同时满足一定的性能指标。通过数例仿真说明了文中给出的设计算法的可行性和可靠控制器的有效性。

参考文献 (References)

[1] Veillette, R.J., Medanic, J.V. and Perkins, W.R. (1992) Design of Reliable Control System. *IEEE Transaction on Automatic Control*, **37**, 290-304. https://doi.org/10.1109/9.119629

[2] 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.

[3] Ma, L.C., Meng, X.Y., Liu, Z.Z., *et al.* (2012) Multi-Objective and Reliable Control for Trajectory-Tracking of Rendezvous via Parameter-Dependent Lyapunov Functions. *Acta Astronatica*, **81**, 122-136.

[4] Vesely, V. and Rosinova, D. (2011) Robust Static Output Feedback Controller LMI Based Design via Elimination. *Journal of the Franklin Institute*, **348**, 2468-2479.

[5] 姚波，王福忠，张庆灵. 基于 LMI 可靠跟踪控制器设计[J]. 自动化学报, 2004, 30(6): 863-871.

[6] 王福忠，姚波，井元伟，张嗣瀛. 考虑执行器故障的不确定线性系统可靠跟踪控制[J]. 控制与决策，2004，19(5): 570-572.

[7] 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.

[8] Boukas, E.K. (2006) Static Output Feedback Control for Stochastic Hybrid Systems: LMI Approach. *Automatica*, **42**, 183-188.

[9] 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. https://doi.org/10.1080/00207179.2013.822991

[10] Sun, P., Wang, S.Y. and Su, X.J. (2014) Robust Redundant Input Reliable Tracking Control for Omni Directional Rehabilitative Training Walker. *Mathematical Problems in Engineering*, **2014**, Article ID 636934.

[11] Sakthivel, R., Selvaraj, P., Lim, Y.D. and Karimi, H.R. (2016) Adaptive Reliable Output Tracking of Networked Control Systems against Actuator Faults. *Journal of the Franklin Institute*, **354**, 3813-3837.