

基于串联观测器的大系统强稳定方法*

胡寿松 连善强 曹 坚

(南京航空航天大学自动控制系统, 210016)

摘要: 本文对串型大系统提出了一种新的强稳定控制方法. 这种方法基于对被控系统设计串联观测器. 当被控对象开环稳定时, 可对串型大系统进行强稳定控制. 按照本文提出的方法, 对某型歼击机设计了强稳定飞行控制系统. 仿真结果表明, 本文提出的方法是可行的.

关键词: 强稳定性; 可靠性; 观测器

1 引言

用传统方法设计的系统反馈控制器, 在传感器失效时, 即使可利用残留的输入量和输出量来进行控制, 也会恶化系统的动态性能. 因此, 可靠控制系统设计问题引起了许多学者的广泛注意. Veillette 基于 H_∞ 范数和 Riccati 方程法, 研究了可靠控制器的设计方法, 并提出了强稳定性概念^[1]. Chu 改进了 Dosser 的工作, 提出了分散强稳定控制器存在的充要条件^[2]. 然而在实际控制器的设计过程中, 与被控对象串联的系统固定不变部分是客观存在的, 若采用现有的强稳定控制方法, 则会产生诸多不便与困难.

本文将系统中的固定不变部分和被控对象视为两个串联子系统, 设计相应的串联观测器和控制器. 在被控对象开环稳定的条件下, 可使闭环系统在传感器全部失效时仍可稳定运行, 且可有较好的动态品质.

2 系统的分解与增广

设系统固定不变部分及被控对象子系统为

$$S_1: \begin{aligned} \dot{x}_1 &= A_1 x_1 + [B_1 \ A_3] \begin{bmatrix} u^T & x_2^T \end{bmatrix}^T, \\ y_1 &= C_1 x_1. \end{aligned} \quad (1)$$

$$S_2: \begin{aligned} \dot{x}_2 &= A_2 x_2 + [B_2 \ C_1] \begin{bmatrix} u^T & x_1^T \end{bmatrix}^T, \\ y_2 &= C_2 x_2 + C_3 x_1. \end{aligned} \quad (2)$$

令 $y_2 = y$, 则 S_1 和 S_2 构成如下串型大系统

$$S: \begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_1 & A_3 \\ C_1 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u, \\ y &= [C_3 \ C_2] \begin{bmatrix} x_1^T & x_2^T \end{bmatrix}^T. \end{aligned} \quad (3)$$

对于 S_1 , 若 (A_1, C_1) 可观, 则存在实常阵 G_1 作为增益矩阵的渐近状态观测器

$$O_1: \quad \dot{\hat{x}}_1 = (A_1 - G_1 C_1) \hat{x}_1 + G_1 y_1 + [B_1 \ A_3] \begin{bmatrix} u^T & x_2^T \end{bmatrix}^T. \quad (4)$$

* 江苏省自然科学基金资助项目.

本文于 1993 年 8 月 27 日收到. 1994 年 12 月 5 日收到修改稿.

其估计误差 $\tilde{x}_1 = x_1 - \hat{x}_1$ 满足如下误差方程

$$\dot{\tilde{x}}_1 = (A_1 - G_1 C_1) \tilde{x}_1. \quad (5)$$

其中 $(A_1 - G_1 C_1)$ 的特征值可任意配置.

对于 S_2 , 若 (A_2, C_2) 可观, 可构造实常阵 G_2 作为增益阵的状态观测器

$$O_2: \quad \dot{\hat{x}}_2 = A_2 x_2 + G_2(y - \hat{y}) + [B_2 \ C_1] \begin{bmatrix} u^T & x_1^T \end{bmatrix}^T. \quad (6)$$

其估计误差 $\tilde{x}_2 = x_2 - \hat{x}_2$. 因 $\hat{x}_1$ 渐近, 故

$$\dot{\tilde{x}}_2 = (A_2 - G_2 C_2) \tilde{x}_2 + (C_1 - G_2 C_3) \tilde{x}_1. \quad (7)$$

显然, G_2 的选取可使 O_2 具有渐近性.

O_1 和 O_2 可构成下列串联渐近观测器.

$$O: \quad \begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 - G_1 C_1 & A_3 \\ C_1 - G_2 C_3 & A_2 - G_2 C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 & 0 \\ 0 & G_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u. \quad (8)$$

其估计误差方程

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}}_1 \\ \dot{\tilde{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 - G_1 C_1 & A_3 \\ C_1 - G_2 C_3 & A_2 - G_2 C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

令 $u = v_1 - K_1 x_1$, 可得 S_1 的闭环系统方程

$$\dot{x}_1 = (A_1 - B_1 K_1) x_1 + A_3 x_2 + B_1 v_1. \quad (10)$$

当 x_1 不可测时, 根据分离原理可用 $\hat{x}_1$ 代替 x_1 , 故式(10)又可表示为

$$\dot{\hat{x}}_1 = A_1 x_1 - B_1 K_1 \hat{x}_1 + A_3 x_2 + B_1 v_1. \quad (11)$$

上式与观测器(4)可构成增广子系统

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & -B_1 K_1 \\ G_1 C_1 & A_1 - G_1 C_1 - B_1 K_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \hat{x}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_1 \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} A_3 & 0 \\ 0 & A_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

命题1 若子系统(1)可控可观, 则由 K_1 和 G_1 的选取可使增广子系统(12)渐近稳定.

证 将 $\tilde{x}_1$ 表达式代入式(11)并与式(4)相减, 可得与式(12)等价的增广子系统

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}}_1 \\ \dot{\tilde{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 - B_1 K_1 & B_1 K_1 \\ 0 & A_1 - G_1 C_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \tilde{x}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} A_3 & 0 \\ A_3 & -A_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

因系统(13)的特征值是 $(A_1 - B_1 K_1)$ 和 $(A_1 - G_1 C_1)$ 特征值的并, 而 $(A_1 - B_1 K_1)$ 和 $(A_1 - G_1 C_1)$ 均是渐近稳定的, 命题得证.

由增广子系统(12)与被控对象(2)串联构成的系统, 称为广义对象. 因系统(12)渐近稳定, 故若对象(2)开环渐近稳定, 必有广义对象渐近稳定. 由式(12)及(2)得到广义对象方程

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & -B_1 K_1 & A_3 \\ G_1 C_1 & A_1 - G_1 C_1 - B_1 K_1 & 0 \\ C_1 & -B_2 K_1 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \hat{x}_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & 0 \\ B_1 & A_3 \\ B_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

在观测器(6)中, 以 $\hat{x}_1$ 代替 x_1 可写为

$$\dot{\hat{x}}_2 = G_2 C_3 x_1 + (C_1 - G_2 C_3 - B_2 K_1) \hat{x}_1 + G_2 C_2 x_2 + (A_2 - G_2 C_2) \hat{x}_2 + B_2 v_1. \quad (15)$$

将广义对象(14)与观测器(15)构成的增广系统称为增广广义对象,其方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & -B_1K_1 & A_3 & 0 \\ G_1C_2 & A_1 - G_1C_1 - B_1K_1 & 0 & A_3 \\ C_1 & -B_2K_1 & A_2 & 0 \\ G_2C_3 & C_1 - G_2C_3 - B_2K_1 & G_2C_2 & A_2 - G_2C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \hat{x}_1 \\ x_2 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_2 \end{bmatrix} v_1. \quad (16)$$

3 传感器失效与强稳定控制

当系统传感器全部失效时,系统输出 $y = 0$. 这时串联观测器(8)无法正常工作. 增广广义对象(16)往往失稳.

设外加输入为 v , 整体反馈增益阵 $K_2 = [K_{21} \ K_{22} \ K_{23}]$, 可得增广广义对象闭环方程

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & -B_1(K_1 + K_{21} + K_{22}) & A_3 & -B_1K_{23} \\ G_1C_1 & A_1 - G_1C_1 - B_1(K_1 + K_{21} + K_{22}) & 0 & A_3 - B_1K_{23} \\ C_1 & -B_2(K_1 + K_{21} + K_{22}) & A_2 & -B_2K_{23} \\ G_2C_3 & C_1 - G_2C_3 - B_2(K_1 + K_{21} + K_{22}) & G_2C_2 & A_2 - G_2C_2 - B_2K_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \hat{x}_1 \\ x_2 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_2 \end{bmatrix} v. \quad (17)$$

在上式中令 $y = 0$, 得传感器全部失效时的系统故障模型, 其中 $K = K_1 + K_{21} + K_{22}$:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & -B_1K & A_3 & -B_1K_{23} \\ G_1C_1 & A_1 - G_1C_1 - B_1K & 0 & A_3 - B_1K_{23} \\ C_1 & -B_2K & A_2 & -B_2K_{23} \\ 0 & C_1 - G_2C_3 - B_2K & 0 & A_2 - G_2C_2 - B_2K_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \hat{x}_1 \\ x_2 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_2 \end{bmatrix} v. \quad (18)$$

定义 带有串联观测器(8)和反馈控制器 K_1 和 K_2 的闭环系统(17)是强稳定的, 若传感器全部失效使系统 $y = 0$ 时, 故障模型(18)渐近稳定.

命题 2 若 S_1 可控可观, S_2 可观且开环稳定, 则闭环系统(17)强稳定, 且稳态估计误差

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_1(\infty) \\ \tilde{x}_2(\infty) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} A_1 - G_1C_1 & A_3 \\ C_1 - G_2C_3 & A_2 - G_2C_2 \end{bmatrix}^{-1} G_2 [C_3x_1(\infty) + C_2x_2(\infty)]. \quad (19)$$

证 因 S_1 和 S_2 可观, 故观测器(8)是渐近的. 又因 S_1 可控可观, 由命题 1 知, 适当选取 K_1 和 G_1 可使系统(12)渐近稳定, 且其极点可任意配置.

由于 S_2 开环稳定, 故广义对象(14)渐近稳定. 从而闭环系统(17)在传感器全部失效时的故障模型为式(18). 不难得到其估计误差方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}}_1 \\ \dot{\tilde{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 - G_1C_1 & A_3 \\ C_1 - G_2C_3 & A_2 - G_2C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ G_2C_3 & G_2C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

对上式两端取 $t \rightarrow \infty$ 时的极限, 则由式(9)知, 方程(20)是渐近稳定的. 故式(19)成立. 进而由定义知, 系统(17)强稳定. 命题得证.

上述命题表明, G_1 和 G_2 的选取应兼顾系统的稳态误差要求; 而 K_1 和 K_2 的选取, 可偏重于满足强稳定控制系统的动态品质要求。

4 歼击机的强稳定控制

设某型歼击机电传操纵系统纵向回路的固定不变部分由配平网络、结构滤波器及伺服舵回路组成。飞行状态为中空高速, 利用本文方法可以得到 $K_1 = [0.0163 \ 0.0155 \ 0.0025]$ 及 $K_2 = [0 \ 0 \ 0 \ 0.0169 \ 0.058 \ 0.013 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.1 \ 0.13 \ -1.2 \ -0.49]$ 。

当飞行控制系统正常时, 输出阶跃响应如图 1 的 (a) 和 (b) 所示, 其中 α 表示飞机迎角, θ 表示飞机俯仰角, 其纵坐标单位为度; n_y 表示飞机法向过载, 纵坐标单位为重力加速度 g 。

当飞行控制系统的迎角传感器及俯仰角速度传感器全部失效时, 系统的输出阶跃响应如图 1 的 (c) 和 (d) 所示。仿真结果表明, 飞机仍可稳定地飞行, 并具有较好的动态品质。

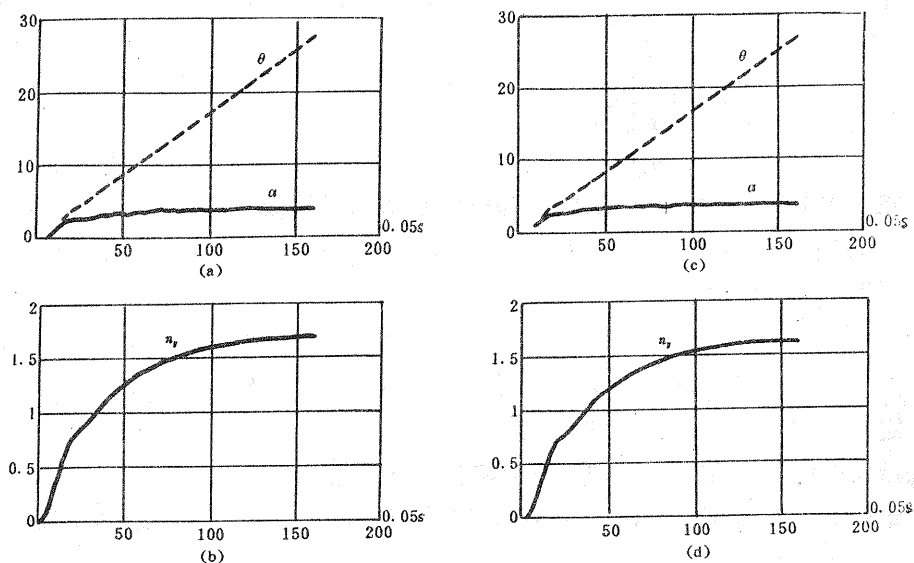


图 1 歼击机强稳定控制系统输出响应

参 考 文 献

- [1] Veillette, R. J.. On the Design of Reliable Control Systems. IEEE Trans. Automat. Contr., 1992, AC-37:327-335
- [2] Chu, C. C.. Some Results on the Problems of Decentralized Reliable Stabilization. Int. J. Control, 1991, 49(6):1343-

Strong Stable Method Based on Series Connection Observers for Large-Scale Systems

HU Shousong, LIAN Shanqiang and CAO Jian

(Department of Automatic Control, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics • Nanjing, 210016, PRC)

Abstract: In this paper, a new strong stable control method for series type large-scale systems is proposed via designing a group of observers in series connection for the controlled system. When the controlled object is of open loop stability, it is shown that such a method can be used for the series type large-scale systems. Finally, by applications of this new method, the strong stable control system for some type of fighters is also designed. The simulation results demonstrate that the control method under discussions is feasible.

Key words: strong stability; reliability; observer

本文作者简介

胡寿松 1937 年生. 南京航空航天大学自动控制系统教授, 中国自动化学会理事, 江苏省自动化学会副理事长. 主要研究领域为: 大系统分散容错控制, 关联大系统强稳定控制, H_∞ 鲁棒控制, 非线性系统的自修复控制等.

连善强 1965 年生. 1993 年在南京航空航天大学自动控制系统获工学硕士学位. 现为洛阳 014 中心工程师. 感兴趣的研究方向为关联大系统的强稳定控制.

曹 坚 1966 年生. 1988 年毕业于东南大学, 现为南京航空航天大学自动控制系统硕士生. 感兴趣的研究方向为关联大系统的强稳定控制.