

文章编号: 1001-0920(2005)05-0589-03

饱和系统鲁棒控制及其在飞行控制中的应用

史忠科

(西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 给出一种饱和系统鲁棒稳定性的分析和设计方法。通过对不确定系统的 H_∞ 优化过程的分析, 并根据其反馈控制原理, 按全部和部分输入超过限制分别考虑不同指标下的优化计算问题, 得到了输入受限制条件下的 3 种 Riccati 方程。飞行控制器设计和仿真结果表明, 采用该方法可给出满意的控制效果。

关键词: 饱和系统; 鲁棒控制; 系统稳定性; 飞行控制

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Robust controller designing method for input-constrained systems and its application to aircraft control

SHI Zhong-ke

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China. E-mail: zkeshi@nwpu.edu.cn)

Abstract: A method for designing robust controller of processes subject to saturation nonlinearities is presented. Based on the principles of optimal H_∞ control, characteristics of input constraints are considered in the computations of Lyapunov weighted matrices. To simplify the optimal process, different descriptions for input weighted matrix of systems is discussed and three Riccati equations are improved for solving H_∞ control problems. An aircraft landing control design shows that the new algorithm gives the satisfactory responses.

Key words: input constrained systems; robust control; system stability; flight control

1 引言

饱和非线性广泛存在于各类实际控制系统中, 它的存在经常给系统带来不利的影响, 降低了系统的性能指标, 如引起滞后、静差加大、振荡加剧等, 甚至影响系统的稳定性^[1~4]。因此, 饱和非线性系统的控制问题得到了日益广泛的重视。目前, 处理此类系统控制问题的方法主要是无冲击抗饱和变换方法(AWBT)和模型预测控制方法(MPC)^[2~4]。虽然这两种方法能够分析饱和非线性问题, 但对方法本身的鲁棒性、可实现性等问题涉及较少, 在飞行控制等问题中难以实际应用。为此, 本文采用直接设计方法找到一种简单、实用的饱和非线性系统的鲁棒稳定性分析和控制器设计方法。

2 问题描述

设线性系统的状态方程为

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ew, u_{\min} < u < u_{\max} \quad (1)$$

式中: $x \in R^n$ 为状态向量, $u \in R^m$ 为控制向量, $w \in R^r$ 为扰动向量; A, B, E 为已知的系数矩阵; 并假设 (A, B) 是能稳的。

系统(1)在 H_∞ 指标下鲁棒稳定的充要条件是存在对称正定矩阵 P , 且满足 Riccati 方程

$$A^T P + PA + C^T C + \gamma^2 PEE^T P - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (2)$$

如果直接按式(2)求解控制规律, 当输入加以限制时通常会导导致系统偏离工程要求, 甚至发散。为此, 本文给出如下设计方法。

收稿日期: 2004-06-10; 修回日期: 2004-10-08

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(69925306); 航空基金项目(01D53010)。

作者简介: 史忠科(1956—), 男, 陕西岐山人, 教授, 博士生导师, 从事飞行控制、交通控制的研究。

3 H 指标下的鲁棒控制器设计方法

考虑式(2)及 $u = -R^{-1}B^T Px$, 可得

$$x^T(A^T P + PA + Q + \gamma^2 PEE^T P) x - u^T R u = 0 \quad (3)$$

当输入全部超过限制值时, 可将式(2) 修改为

$$A^T P + PA + Q + \gamma^2 PEE^T P - \frac{u_m^T R u_m}{x^2} I = 0 \quad (4)$$

如果部分输入超过限制, 而且加权阵具有以下形式:

$$R = \text{diag}[R_1, R_2, \dots, R_m], \quad (5)$$

可将式(2) 修改为

$$A^T P + PA + Q + \gamma^2 PEE^T P - P \left(\sum_{i=r+1}^m B R_i B^T \right) P - \sum_{j=1}^r \frac{u_{i,m}^T R u_{i,m}}{x^2} I = 0 \quad (6)$$

对于加权阵 R 的一般情形, 设

$$R^{-1} = \begin{bmatrix} \hat{r}_1 & & & \\ & \hat{r}_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \hat{r}_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\Gamma}_1 \\ \hat{\Gamma}_2 \\ \vdots \\ \hat{\Gamma}_m \end{bmatrix}, \quad (7)$$

则具有输入约束的鲁棒控制问题可由下式求得:

$$A^T P + PA + Q + \gamma^2 PEE^T P - PB \left(\sum_{i=r+1}^m \hat{r}_i \hat{\Gamma}_i \right) B^T P - \sum_{j=1}^r \frac{u_{i,m}^T R u_{i,m}}{x^2} I = 0 \quad (8)$$

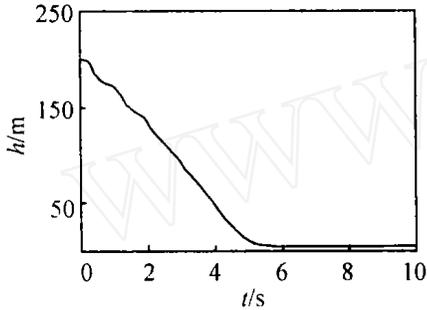
这样, 便得到了输入约束下求解 H 问题的新的 Riccati 方程

4 飞行控制器设计

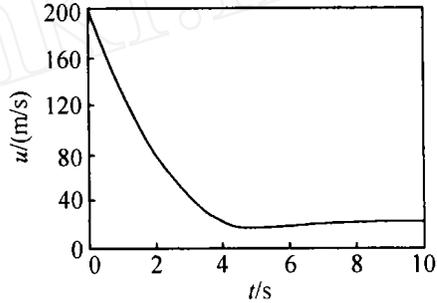
有横侧、高度变化等不确定因素时的飞机着陆模型可表示如下:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + E\xi(t). \quad (9)$$

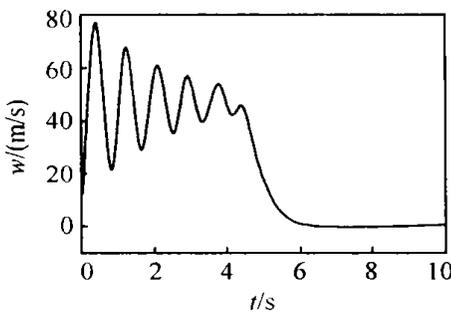
式中: $x = [h, u, w, q, \theta]^T$; $u = [\delta_a, \delta_e]^T$; h 为高度; u, w 分别为沿飞机体轴系 x, z 轴的速度分量; q 为俯仰



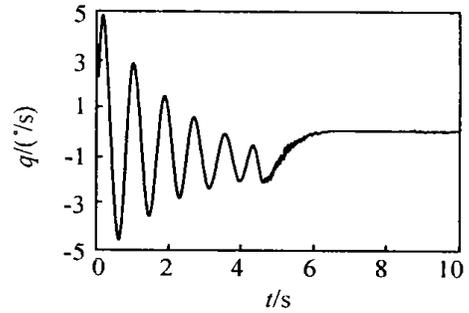
(a) 飞机着陆的高度时间历程曲线



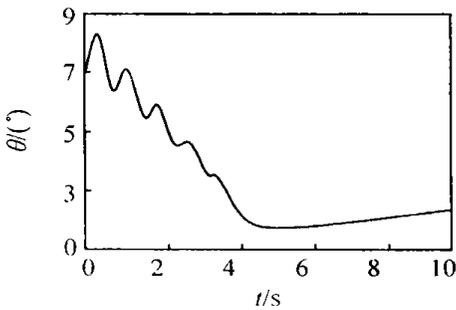
(b) 飞机着陆的纵向速度时间历程曲线



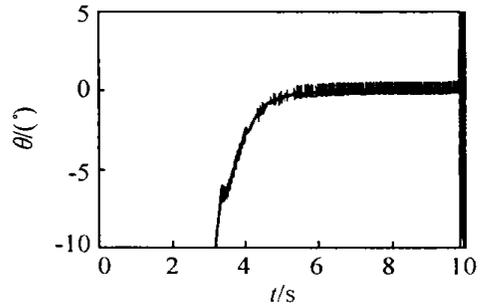
(c) 飞机着陆的法向速度时间历程曲线



(d) 飞机着陆的俯仰角速度时间历程曲线



(e) 飞机着陆的俯仰角时间历程曲线



(f) 飞机着陆的升降舵偏角时间历程曲线

图1 按本文方法设计得到的飞机着陆响应曲线

角速度; θ 为俯仰角; δ_e 为发动机油门控制角; δ_r 为升降舵偏转角

系数矩阵的取值为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0.087 & -0.996 & 0 & 0.608 \\ 0 & -0.17 & -0.003 & -0.014 & 9.773 \\ 0 & -0.255 & 0.008 & 50.01 & -0.885 \\ 0 & 0.001 & -1.125 & -1.47 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 2.334 & -0.556 \\ 0 & -8.09 \\ 0 & -6.47 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -0.17 & -0.03 \\ -0.055 & 0.058 \\ 0.001 & -0.125 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

采用 H_2 指标设计的输入将超出 $-70^\circ \delta_e$ 0° ; $-90^\circ \delta_r$ 80° 的范围。如果对输入限制到 $-20^\circ \delta_e$ 0° ; $-50^\circ \delta_r$ 30° ; 则仿真过程发散。

按照输入受限的 H_2 指标(式(8)) 设计的状态反馈阵为

$$K = \begin{bmatrix} -0.1314 & 0.0088 & 0.0314 & 0.2166 & -1.2048 \\ -4.5858 & -53.7766 & 6.7476 & 5.9253 & -209.8957 \end{bmatrix};$$

闭环极点为

$$\sigma(A - BK) = \{-54.2588, -0.8202 + 7.4789i, -0.8202 - 7.4789i, -0.0874, -0.0093\};$$

油门开度为 $\delta_e = -10^\circ$ 。

为了说明问题, 给出按式(8) 设计控制系统的图形结果(见图 1)。由图 1 可知, 采用本文方法可得到满意的结果。

5 结 语

实际系统中, 因能量的限制或安全性原因, 控制系统的输入常常限制在一定的取值范围内, 而传统基于 H_2 指标的标准优化算法都没有考虑输入量的限制问题。本文通过分析系统优化过程, 按全部和部分输入超过限制分别考虑不同指标下的优化计算问题, 得到了输入受限条件下的 3 种 Riccati 方程。并对该 Riccati 方程进行了讨论, 得到了最优解的存在性问题。将本文算法用于飞行控制器设计, 得到了飞机着陆控制的满意效果。还可将其应用于所有线性系统输入受限制时的 H_2 指标下的优化计算, 也可推广到 H_2 指标或其他输入受限的 Riccati 方程修正问题。

参考文献(References)

- [1] Bernstein D. S., Michel A. N. A chronological bibliography on saturating actuators[J]. *Int J Robust and Nonlinear Control*, 1995, 5(5): 375-380.
- [2] Gwak, Kwan-Woong, Masada, et al. Structural analysis of nonlinear control systems using singular value decomposition: Part II - control of an input-constrained thermal system [J]. *Dynamic Systems and Control Division*, 2003, 72(1): 271-277.
- [3] Rojas O svaldo J., Goodwin Graham C., Seron Maria M., et al. An SVD based strategy for receding horizon control of input constrained linear systems[J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 2004, 14(13-14): 1207-1226.
- [4] Saberi Ali Shi Guoyong, Stoorvogel Anton A., Han Jian. Constrained stabilization problems for discrete-time linear plants[J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 2004, 14(5): 435-461.

(上接第 585 页)

- [4] Fung C F., Billings S A., Zhang H. Generalised transfer functions of neural networks[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 1997, 11(6): 843-868.
- [5] Vrbaj, Puncochar M., Drahos J. Formal uncertainty and membership transfer in fuzzy simulation of complex technological systems[J]. *Systems Analysis Modelling Simulation*, 1997, 28: 43-47.
- [6] Huijberts H J C. Characterization of static feedback realizable transfer functions for nonlinear control systems[J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 1998, 11: 979-993.
- [7] Lew J S., Lim K B. Robust control of identified

reduced-interval transfer function [J]. *IEEE Trans on Control System Technology*, 2000, 8(5): 833-841.

- [8] Hwang C L. Fuzzy linear pulse-transfer function-based sliding-mode control for nonlinear discrete-time systems [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2002, 10(2): 187-197.

- [9] 林文强, 缪瑞平. 一种道路模拟系统辨识信号的产生方法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2003, 24(2): 140-143.

(Lin W Q., Miao R P. An approach to generate the signal of road simulation system [J]. *J of Northeastern University (Natural Science)*, 2003, 24(2): 140-143.)