



分段重构控制策略

葛彤 冯正平 朱继懋

(上海交通大学船舶与海洋工程学院 上海 200030)

(E-mail: tongge@mail1.sjtu.edu.cn)

摘要 现有控制重构方案均需要精确的故障定位,存在着诊断过程中系统耐故障能力不足的缺陷.文中提出一种分段重构的重构策略以解决该问题.只要故障被定位至某些适当的元件集合,控制重构就开始进行,并随诊断过程的深入分段推进.该策略被转化为一个鲁棒模型跟踪问题,并提出一种基于 H_2/H_∞ 混合性能指标优化的控制律设计方法实现.针对某飞行器具体设计了可重构飞控系统,结果表明该方法具有很好的重构效果.

关键词 可重构控制,故障容错, H_2/H_∞ 控制.

A MULTISTAGE CONTROL RECONFIGURATION STRATEGY

GE Tong FENG Zhengping ZHU Jimao

(Dept. Naval Architecture & Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

Abstract In current control reconfiguration schemes, the reconfiguring process does not occur until faults are located accurately. This may cause the fault tolerance problem during the diagnosis process. We propose a multistage strategy in which the reconfiguring process starts once the faults are located in some suitable element sets, and carries forward through other stages along with the diagnosis process advancing. The strategy is transformed into a robust model-following problem, and a mixed H_2/H_∞ method is provided for that problem. The above strategy and design method were applied to some advanced aircraft, and the results showed their effectiveness.

Key words Reconfigurable control, fault accommodation, H_2/H_∞ control.

1 引言

可重构控制系统由基本鲁棒控制律和故障后的重构控制律分别来保证正常情况下和故障后闭环系统具有尽可能好的性能,然而对重构控制律的调用是在确知故障元件集合

后进行的^[1,2],这可能导致系统诊断过程中严重偏离平衡状态.本文针对此问题提出一种新的控制重构策略,在诊断开始的同时就根据已有信息重构控制律,可以降低故障引起的偏差.采用文[3,4]提出的诊断系统以在诊断过程中不断更新诊断信息,信息更新的时刻记为 $\{t_i, i=0,1,\dots,s\}$,每一区间 (t_i, t_{i+1}) 伴随一个当前可能故障元件集 $\Omega(t_i)$,分段重构策略可叙述为:随 $\{\Omega(t_i)\}$ 序列的推进,分段调节控制律,使得闭环系统对 $\Omega(t_i)$ 中的任何可能故障保持稳定,并具有尽可能好的性能和尽可能一致的动态特性.

2 重构控制律设计

2.1 问题描述

闭环系统性能和耐故障能力可分别通过二次型性能指标和 H_∞ 范数约束来保证,一致性要求实际上提出了一个模型跟踪问题,因此实现以上控制策略实际上是一个具有 H_∞ 范数约束、二次性能指标优化的模型跟踪系统设计问题.

\hat{n} 阶系统动力学标称模型和 n_0 阶参考模型方程分别为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \hat{A}\hat{x}(t) + \hat{B}u(t) + \hat{D}_1w_1(t), \\ \hat{y}_m(t) = \hat{C}\hat{x}(t) + \hat{J}u(t) + \hat{D}_2w_2(t), \\ \hat{y}_r(t) = \hat{C}_r\hat{x}(t), \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_0(t) = A_0x_0(t) + B_0w_0(t), \\ y_{r0}(t) = C_{r0}x_0(t). \end{cases} \quad (2)$$

上式中 \hat{y}_m, \hat{y}_r 分别为被控对象的测量输出和被控输出, y_{r0} 为参考输出, w_0 为具有单位 H_2 范数的平方可积外部输入; w_1, w_2 分别为系统噪声和测量噪声; \hat{D}_1, \hat{D}_2 均为对角阵,且 \hat{D}_2 非奇异; A_0 稳定, (\hat{A}, \hat{D}_1) 可稳.它们形成广义被控对象

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + D_1w(t), \\ y(t) = Cx(t) + D_2w(t), \\ z(t) = E_1x(t) + E_2u(t). \end{cases} \quad (3)$$

上式中 $x = [x_0^T, \hat{x}^T]^T$; $w = [w_0^T, w_1^T, w_2^T]^T$; $y = [w_0^T, (\hat{y}_m - \hat{J}u)^T]^T$; A, B, C, D_1, D_2 为相应的增广矩阵;且

$$E_1 = \begin{bmatrix} H_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{r0} & -\hat{C}_r \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad E_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ H_2 \end{bmatrix}, \quad R_2 = E_2E_2^T > 0, \quad (4)$$

其中 H_1, H_2 分别为适当的状态与控制加权, H_2 为正定对角阵.设控制律与广义被控对象同阶,且具有以下标称形式

$$\begin{cases} \dot{x}_c = A_c x_c(t) + B_c y(t), \\ u(t) = C_c x_c(t), \end{cases} \quad (5)$$

它和广义被控对象形成以下标称闭环系统

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}(t) = \tilde{A}\tilde{x}(t) + \tilde{D}w(t), \\ z(t) = \tilde{E}\tilde{x}(t), \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\tilde{x} = [x^T, x_c^T]^T$, $\tilde{A}, \tilde{D}, \tilde{E}$ 为相应矩阵.

方程(1)~(6)是系统标称模型.对于某可能执行器故障情况 $\omega \subseteq \Omega$,故障后的模型参

数分别以下标“ $\tilde{\omega}$ ”(或“ $\tilde{\Omega}$ ”)来标记. 本文假设某执行器故障体现为其对应控制效能的完全丧失, 则 $B_{\tilde{\omega}}, \hat{J}_{\tilde{\omega}}$ 分别为将 B, \hat{J} 中与故障执行器对应的列置 0 所得, $H_{2\tilde{\omega}}$ 为将 H_2 中和故障执行器对应的对角元置 0 所得, $C_{c\tilde{\omega}}$ 为将 C_c 中和故障执行器对应的行置 0 所得, 其它模型参数发生相应变化. 控制律设计的目的是寻求 (5) 式形式的控制律, 使得对于任意故障情况 $\omega \subseteq \Omega$ 有

(i) $\tilde{A}_{\tilde{\omega}}$ 渐近稳定; (7)

(ii) 对于某 $\gamma > 0$, 由 w 至 z 的闭环传函满足

$$\|G_{\tilde{\omega}}(s)\|_{\infty} \leq \gamma; \quad (8)$$

(iii) 二次性能指标

$$J_{\tilde{\omega}}(A_c, B_c, C_c) = \text{tr}(L_{\tilde{\omega}} \cdot \tilde{R}_{\tilde{\omega}}) = \text{tr}(L_{\tilde{\omega}} \cdot \tilde{E}_{\tilde{\omega}}^T \cdot \tilde{E}_{\tilde{\omega}}) \quad (9)$$

极小, 其中 $L_{\tilde{\omega}}$ 为故障闭环系统能控性克莱姆阵.

2.2 广义优化问题

定理 1. 对于 (6) 式所描述的系统 and 某可能故障元件集 Ω , 如果存在

$$\tilde{Q} \geq 0, \quad (10)$$

使得

$$\tilde{A}\tilde{Q} + \tilde{Q}\tilde{A}^T + \gamma^{-2}\tilde{Q}\tilde{R}\tilde{Q} + \tilde{V} = 0, \quad (11)$$

其中

$$\tilde{V} = \tilde{W} + \gamma^2 \tilde{B}_0 R_2^{-1} \tilde{B}_0^T = \begin{bmatrix} V_1 & V_0 B_c^T \\ B_c V_0^T & B_c V_2 B_c^T \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\tilde{R} = \tilde{E}^T \tilde{E} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & C_c^T R_2 C_c \end{bmatrix}, \quad \tilde{W} = \tilde{D} \tilde{D}^T = \begin{bmatrix} W_1 & W_0 B_c^T \\ B_c W_0^T & B_c W_2 B_c^T \end{bmatrix}. \quad (13)$$

那么对于任意 $\omega \subseteq \Omega$, 如果 $(\tilde{A}_{\tilde{\omega}}, \tilde{D})$ 可稳, 则 (7) 和 (8) 式成立, 且

$$\tilde{J}(A_c, B_c, C_c) \triangleq \text{tr}(\tilde{Q}\tilde{R}) \geq J_{\tilde{\omega}}(A_c, B_c, C_c). \quad (14)$$

证明可参见文 [5].

$\tilde{J}(A_c, B_c, C_c)$ (称为广义性能指标) 提供了各种故障情况下二次性能指标的上限, 可以通过极小化该指标间接优化各故障情况下的二次性能. 这样, 前述的控制律设计问题可以转化为以下的广义优化问题: 寻求使 $(\tilde{A}_{\tilde{\omega}}, \tilde{D})$ 可稳的控制律 (A_c, B_c, C_c) , 满足 (10) 和 (11) 式并极小化广义性能指标.

引入拉格朗日乘子 \tilde{P} 形成目标函数

$$L(A_c, B_c, C_c, \tilde{Q}, \tilde{P}) \triangleq \text{tr}\{\tilde{Q}\tilde{R} + [\tilde{A}\tilde{Q} + \tilde{Q}\tilde{A}^T + \gamma^{-2}\tilde{Q}\tilde{R}\tilde{Q} + \tilde{V}]\tilde{P}\}, \quad (15)$$

则 $(A_c, B_c, C_c, \tilde{Q}, \tilde{P})$ 极小化 L 的必要条件是以下极值条件

$$dL(A_c, B_c, C_c, \tilde{Q}, \tilde{P}) = 0. \quad (16)$$

定理 2. 对于 (1)~(3) 式描述的系统, 如果存在 $Q \geq 0$, $z > 0$ 和 $\tilde{P} \geq 0$, 满足

$$R_1 + Z\Sigma Z - \gamma^{-2}Z\Phi Z > 0, \quad (17)$$

$$0 = AQ + QA^T + V_1 + \gamma^{-2}QR_1Q - \Phi, \quad (18)$$

$$0 = (A + \gamma^{-2}QR_1)^T Z + Z(A + \gamma^{-2}QR_1) + R_1 - Z\Sigma Z + \gamma^{-2}Z\Phi Z, \quad (19)$$

$$0 = (A - Q\tilde{\Sigma} + \gamma^{-2}QR_1 - V_0 V_2^{-1} C)^T \tilde{P} + \tilde{P}(A - Q\tilde{\Sigma} + \gamma^{-2}QR_1 - V_0 V_2^{-1} C) + Z\Sigma Z, \quad (20)$$

其中

$$\Phi = Q\tilde{\Sigma}Q + V_0V_2^{-1}CQ + QC^TV_2^{-1}V_0^T + V_0V_2^{-1}V_0^T, \quad (21)$$

$$\Sigma = BR_2^{-1}B^T, \tilde{\Sigma} = C^TV_2^{-1}C, \quad (22)$$

那么

$$A_c = A - Q\tilde{\Sigma} - \Sigma Z + \gamma^{-2}QR_1 - V_0V_2^{-1}C, \quad (23)$$

$$B_c = QC^TV_2^{-1} + V_0V_2^{-1}, \quad (24)$$

$$C_c = -R_2^{-1}B^TZ \quad (25)$$

是(16)式的解,使 (\tilde{A}_z, \tilde{D}) 可稳,且满足(10)和(11)式(证明参见文[5]).

3 设计及仿真实例

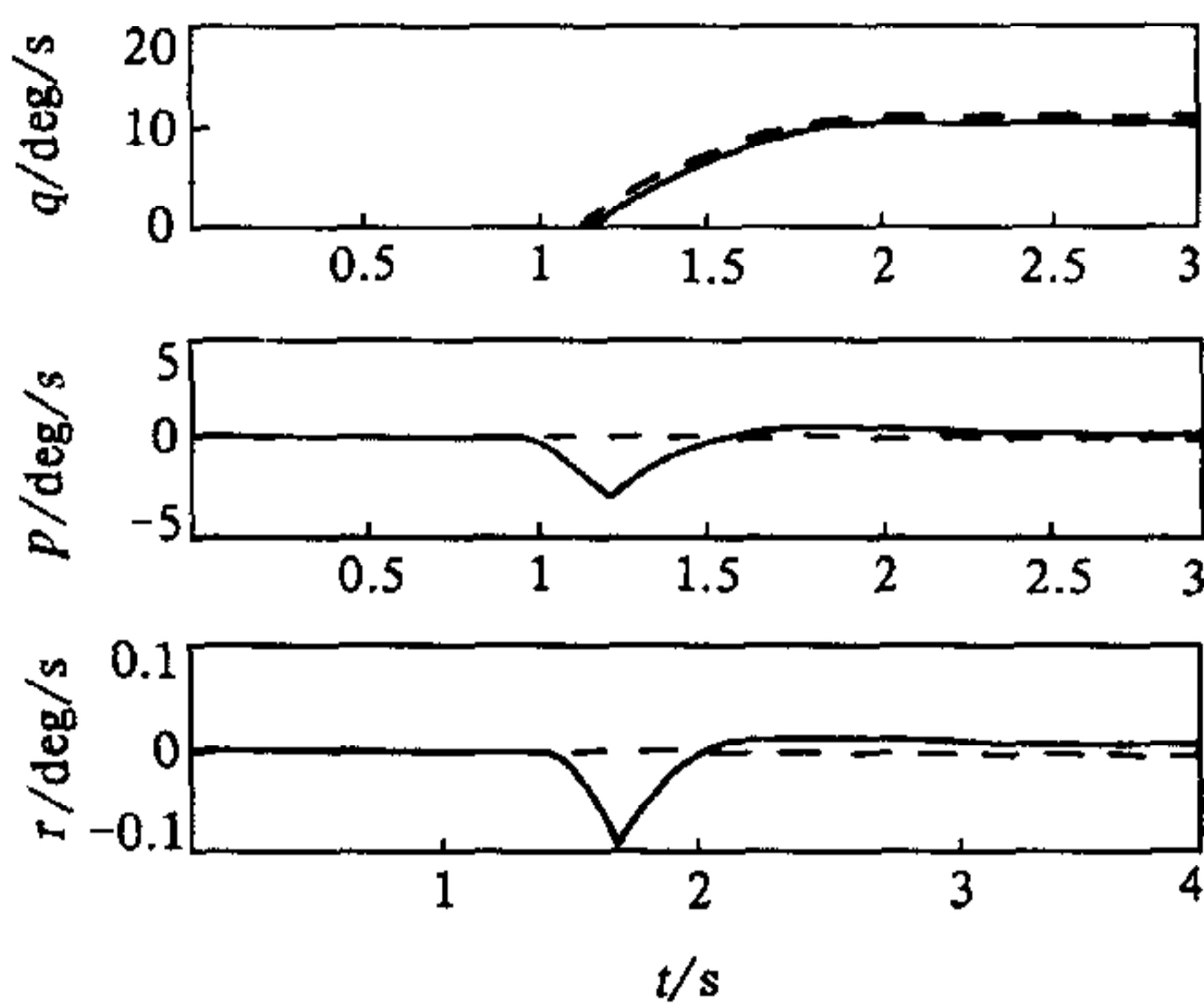


图1 仿真响应

针对某型飞机开发了可重构飞控系统仿真系统 RECFLY,其中存贮着针对 $\Omega = \emptyset, \{\text{DIR}, \text{DIL}\}, \{\text{DER}, \text{DEL}\}, \{\text{DCR}, \text{DCL}\}$ 等情况设计的控制律(DIR, DIL, DER, DEL, DCR, DCL 分别代表右侧和左侧内升降副翼、外升降副翼和前翼), $\Omega = \emptyset$ 控制律为基本控制律,其它3个用于诊断过程中控制律重构.参考模型具有短周期形式,且选取三个姿态角速率 p, q, r 作为被控输出.

现取指令输入 $I_q = 10(1)\text{deg/s}, I_p = I_r = 0$,对应 $w_0 = [I_p, I_q, I_r]^T$,并设 $t = 1\text{s}$ 时DI损失,飞机真实响应如图1实线所示,参考模型输出如图中虚线所示.

$t = 1\text{s}$ 时,故障发生,真实飞机响应偏离期望轨迹; $t = 1.21\text{s}$ 故障定位至 $\Omega = \{\text{DIR}, \text{DIL}\}$,调用对应控制律,真实响应立刻又被拉回期望轨迹; $t = 1.6\text{s}$ 时故障定位至DIR,采用伪逆法^[5]利用 $\Omega = \emptyset$ 对应的控制律直接进行重构,系统性能几乎完全恢复.可见,分段调节控制规律有效地控制了响应偏差.

参 考 文 献

- 1 Mayback P S, Stevens R D. Reconfigurable flight control via multiple model adaptive control methods. In: Proc. 29th Conference on Decision and Control, Honolulu, HI, 1990, 3351~3356
- 2 Raza S J, Silverthorn J T. Use of the Pseudo-Inverse for Design of a Reconfigurable Flight Control System. AIAA Paper Collection of Technical Papers—AIAA Guidance, Navigation and Control, 1985, 349~356
- 3 葛彤,邓建华. 复杂动态系统故障检测与诊断. 航空学报, 1997, 18(1):12~16
- 4 葛彤,邓建华. 组合概率信息的复杂动态系统层次故障检诊方法. 自动化学报, 1997, 23(4):538~542
- 5 葛彤. 自修复飞行控制系统研究[博士学位论文]. 西安:西北工业大学, 1996

葛彤 1971年生,1996年毕业于西北工业大学飞机系,获工学博士学位,现为上海交通大学船舶与海洋工程学院副教授.主要研究领域为智能控制和自修复技术.