

基于广义逆控制的飞控系统鲁棒性

崔玉伟 吴小光

(中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所,西安,710065)

摘要:本文基于广义逆控制的飞控系统,提出了基于广义逆控制的飞控系统框架,分析了控制系统的不确定性以及在控制效能矩阵存在不确定性时的飞控系统鲁棒性问题。为解决当前开环广义逆控制系统的控制误差和不稳定,建立了基于闭环反馈的广义逆控制系统,由此实现了飞控系统的鲁棒性设计。针对某型先进飞机的不确定性问题进行了开环和闭环控制的对比仿真验证,仿真结果表明基于闭环广义逆控制的设计方法能够有效解决控制效能矩阵存在不确定性时的系统鲁棒性问题,实现飞控系统的稳定性设计,对广义逆控制方法在实际工程中的应用起到了积极的推动作用。

关键词:飞行控制;闭环;鲁棒性;广义逆控制

中图分类号:V249.1

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2017)S-0114-05

Robustness of Flight Control System Based on Generalized Inverse Control Method

CUI Yuwei, WU Xiaoguang

(AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an, 710065, China)

Abstract: Beginning with the flight control system based on generalized inverse control method, the paper provides the system architecture based on multi-effector control allocation and decision, and analyses the uncertainties of the control system and the robustness of the flight control system when the control performance matrix is uncertain. To solve the problem of control error of the current open-loop generalized inverse control system, a generalized inverse control system based on closed-loop feedback is established, and the robust design of the flight control system is realized. The simulation is carried out aiming at the uncertainty problem of advanced aircraft. Results show that the generalized inverse control system based on closed-loop feedback can solve the robustness of the system under the control uncertainty matrix effectively, which plays a positive role on promoting the practical application in the project.

Key words: flight control; closed-loop; robustness; generalized inverse

为适应现代先进飞机日益提升的性能要求,多操纵面的冗余气动布局,已逐渐成为现代飞机设计的共识^[1,2]。同时,随着随控布局设计思想的提出,飞控系统的设计与飞机气动布局的形式密不可分。对于引入多种新型操纵面控制方式和组合方式的飞机来说,基于多操纵面分配与决策的控制策略,就成为当前飞控系统设计中不可或缺的重要技

术。近年来,针对新型多操纵面分配与决策的控制方法层出不穷,并且在各类飞行器的飞控系统设计中得到越来越多的技术验证。从 20 世纪 90 年代开始,Durham^[3]等就针对多操纵面分配与决策进行基于几何的直接分配方法,这类方法能够实现转矩可达集的全部分配,分配效率可以达到 100%。同时,Bodson^[4,5]等利用优化思想,诸如二

收稿日期:2017-05-15;修订日期:2017-06-20

通信作者:崔玉伟,男,工程师,E-mail:798352819@qq.com。

引用格式:崔玉伟,吴小光. 基于广义逆控制的飞控系统鲁棒性[J]. 南京航空航天大学学报,2017,49(S):114-118.
CUI Yuwei, WU Xiaoguang. Robustness of flight control system based on generalized inverse control method[J].
Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2017,49(S):114-118.

次规划方法,不仅解决多操纵面分配问题,而且实现了冗余操纵面情况下的最优控制设计。国内针对多操纵面分配与决策问题也有着较为广泛的研究。文献[6]针对高性能战斗机利用自适应逆和动态控制分配策略,结合多种控制分配方法进行飞控系统的控制律设计,实现大迎角机动的设计。文献[7]针对伪逆法分配效率低的问题,提出利用粒子群算法优化广义逆的方法寻找最优广义逆的加权阵,实现了广义逆法分配效率的大幅提高。文献[8]提出一种新型的控制分配方法,将操纵面分配转化为排序问题处理,得到良好的控制效果。由此可见,多操纵面分配与决策的控制方法,已经得到了广大研究学者的关注,并且获得了越来越多的成果,其中基于广义逆控制的分配方法最为广泛。但是,由于其涉及到多个领域和学科,其控制理论的发展也受到限制,整体而言还没有形成完整的控制理论框架。在众多的控制方法和算法中如何选择控制策略和它对控制系统稳定性的影响,以及各参数不确定性对系统鲁棒性的影响,目前虽然有着一些学者在进行研究和探索^[9,10],但总体而言还缺少一定的理论支撑,还值得进一步完善和深入研究。

本文针对基于广义逆控制的飞控系统,研究其在控制效能矩阵存在不确定性情况下的系统鲁棒性问题,并建立基于闭环反馈的广义逆控制系统,实现飞控系统的鲁棒性设计。

1 基于广义逆控制的系统框架

基于多操纵面分配与决策的飞控系统框架,如图1所示,旨在根据飞行任务的控制要求,通过飞行控制计算分系统的多模态指令构型、飞行控制律解算,实时地对操纵面的组合方式与控制方式进行调整,生成的控制指令经伺服作动分系统驱动飞机操纵面,进而对飞机进行最优控制。其中,多操纵

面分配与决策的控制策略承担着核心作用。

从图1可知,与传统的飞控系统框架不同,基于多操纵面分配与决策的控制策略,在飞控系统设计中将飞行控制律与多操纵面分配与决策策略分开设计,一方面,不影响传统飞行控制律的设计,它仍然可以利用传统的飞控系统设计方法,以控制指令和被控对象的状态反馈为输入,得到期望的力矩控制向量;另一方面,引入多操纵面分配与决策的策略设计,针对多操纵面的冗余气动布局,以期望的力矩控制向量为输入,经过控制策略的解算,形成实际的操纵面控制向量。因此,整个飞控系统的结构就发生了重大变化,对于这一复杂的系统,其稳定性和鲁棒性就成为控制系统设计过程中非常重要的问题。

针对多操纵面分配与决策问题,国内外研究者开展了大量的研究,提出了很多控制策略,主要有基于优化的广义逆控制方法和数学规划方法,以及基于直接分配的几何法两大类^[11,12]。本文主要针对广义逆控制,进行飞控系统鲁棒性的研究。

2 飞控系统的鲁棒性分析

2.1 控制系统的不确定性

对于任何控制系统,无论采用何种设计技术,控制策略一般基于与被控对象动态行为有关的信息设计,这种信息可能是脉冲响应、阶跃响应、传递函数和偏微分方程等,可以称之为被控对象的数学模型。但在实际控制工程中,被控对象的精确数学模型往往难以得到,有时,即使能得到被控对象的精确模型,但也因为过于复杂,需要在控制系统工程化设计时进行简化。此外,随着被控对象及其控制系统的工作条件或环境的变化,被控对象本身的特性和控制系统元器件的老化,整个系统也会随之发生变化,从而偏离当初设计时所依据的特性,导

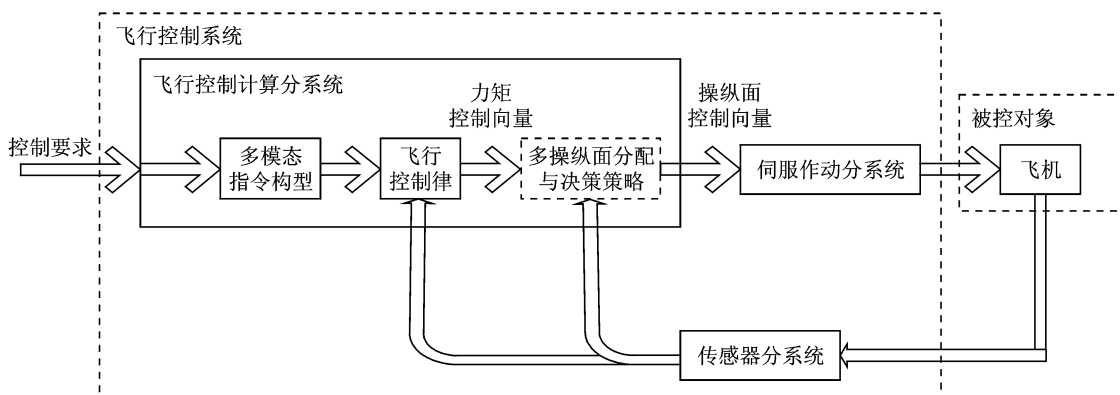


图1 基于多操纵面分配与决策的飞控系统框架

Fig.1 Flight control system architecture based on multi-effector control allocation and decision

致系统控制产生的误差。

以上两点就构成了控制系统的不确定性。因此,从实际控制工程的角度出发,希望按照某种约束,使得控制系统对被控对象数学模型的不确定性不那么敏感,也就是说,控制系统对于其被控对象应该具有一定的鲁棒性。

2.2 控制效能矩阵存在不确定性下的鲁棒性问题

在飞控系统的设计中也同样存在上述问题,诸如,在多操纵面分配与决策的求解过程中,控制效能矩阵 \mathbf{B} 无法精确获得,一般根据飞行状态通过理论数据插值来获得,称之为标称的控制效能矩阵,用 \mathbf{B}_{r0} 来表示;而实际的操纵面控制向量与力矩控制向量之间的线性映射,即实际的控制效能矩阵,用 \mathbf{B}_r 来表示,往往与解算出的标称控制效能矩阵不完全一致,这样就导致控制效能矩阵的不确定性。这样的开环控制策略,往往会造成明显的控制误差,进而可能影响整个飞控系统的动态特性。

就控制效能矩阵存在不确定性下的控制问题给出如下描述:

对于线性控制问题来说,从操纵面控制向量 $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^n$ 到期望的力矩控制向量 $\mathbf{v}_d \in \mathbf{R}^m$ 的带约束的线性映射,可以描述为

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_d &= \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \text{subject to } \mathbf{u}_{\min} &< \mathbf{u} < \mathbf{u}_{\max} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: \mathbf{B} 为控制效能矩阵, \mathbf{u}_{\min} 和 \mathbf{u}_{\max} 分别为各操纵

面的位置限制和速率限制带来的操纵面偏转限制。

由于控制效能矩阵存在不确定性,那么存在不确定性的控制问题就可以描述为

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_d &= \mathbf{B}_{r0}\mathbf{u} \\ \text{subject to } \mathbf{u}_{\min} &< \mathbf{u} < \mathbf{u}_{\max} \end{aligned} \quad (2)$$

基于广义逆控制的方法,一般选取具有最小范数的 $\mathbf{B}^+ = \mathbf{B}^T(\mathbf{B}\mathbf{B}^T)^{-1}$ 作为 \mathbf{B} 的广义逆来进行求解,所以,该多操纵面分配与决策问题的广义逆解为

$$\mathbf{u} = \mathbf{B}_{r0}^+ \mathbf{v}_d \quad (3)$$

而依据指令解算后的操纵面控制向量 \mathbf{u} ,其产生的实际的力矩控制向量 \mathbf{v}_r 为

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{B}_r \mathbf{u} = \mathbf{B}_r \mathbf{B}_{r0}^+ \mathbf{v}_d \quad (4)$$

因此,由于标称的控制效能矩阵 \mathbf{B}_{r0} 与实际的控制效能矩阵 \mathbf{B}_r 之间存在的差异,使得实际的力矩控制向量 \mathbf{v}_r 与期望的力矩控制向量 \mathbf{v}_d 不一致,进而造成控制误差。

3 基于广义逆控制的鲁棒性设计

为了消除控制效能矩阵 \mathbf{B} 的不确定性造成的控制误差,引入闭环反馈的广义逆控制,在广义逆控制方法的基础上,通过反馈实际的力矩控制向量,构成闭环广义逆控制系统,其系统框架如图2所示。

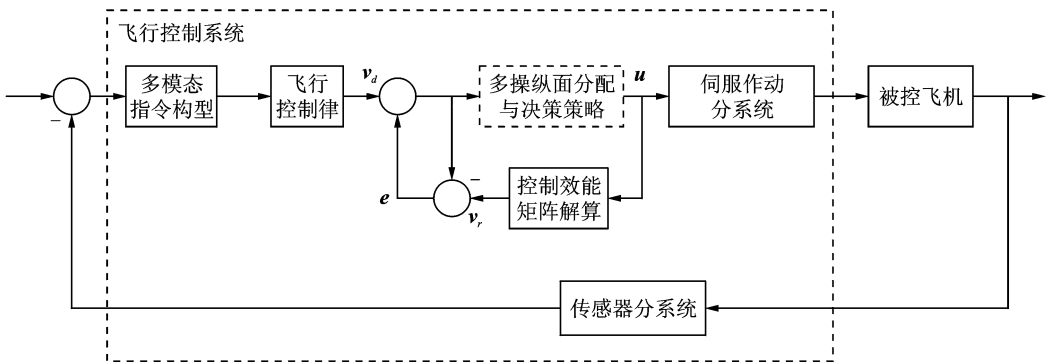


图2 基于闭环反馈的广义逆控制系统框架

Fig. 2 Generalized inverse control system architecture based on closed-loop feedback

从图2可知,闭环广义逆控制系统,就是在原来广义逆控制方法的基础上,反馈实际的力矩控制向量 \mathbf{v}_r ,那么,多操纵面分配与决策策略的解算对象就不再是对期望的力矩控制向量 \mathbf{v}_d 进行分配,而是将前一拍反馈的实际力矩控制向量与期望的控制向量的差值,即控制误差 e 引入到期望的力矩控制向量 \mathbf{v}_d 中,两者相加再进行操纵面控制向量的解算。

4 仿真实验

为了验证所设计的闭环广义逆控制系统的鲁棒性,分别对开环、闭环两种控制框架进行了对比仿真与分析。假定经过数据插值推算的标称的控制效能矩阵 \mathbf{B}_{r0} 存在很严重的偏差,比如20%的偏差,这就是上述所指的控制效能矩阵的不确定性

在仿真实验之前,首先给出某型先进飞机的数

学模型,在 $H=3000\text{ m}$, $Ma=0.3$ 时的线性小扰动模型方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}_u\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \end{cases} \quad (5)$$

$$\mathbf{B}_r = \begin{bmatrix} 0.7984 & -0.7984 & -4.5787 & -3.9413 & 3.9413 & 4.5787 & 2.6919 \\ 1.3841 & 1.3841 & -1.0906 & -1.7433 & -1.7433 & -1.0906 & 0.0046 \\ -0.3970 & 0.3970 & -0.2014 & -0.4256 & 0.4256 & 0.2014 & -1.6265 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_{r0} = \begin{bmatrix} 0.6387 & -0.6387 & -3.6630 & -3.1530 & 3.1530 & 3.6630 & 2.1535 \\ 1.1073 & 1.1073 & -0.8725 & -1.3946 & -1.3946 & -0.8725 & 0.0037 \\ -0.3176 & 0.3176 & -0.1611 & -0.3405 & 0.3405 & 0.1611 & -1.301 \end{bmatrix}$$

式中:状态变量 $\mathbf{x}=[V \ \alpha \ \beta \ p \ q \ r \ \psi \ \theta \ \varphi \ x_p \ y_p \ z_p]^T$;操纵面控制向量 $\mathbf{u}=[\delta_d \ \delta_{cr} \ \delta_{dl} \ \delta_{fl} \ \delta_{fr} \ \delta_{or} \ \delta_r]^T$;力矩控制向量 $\mathbf{v}=[C_l \ C_m \ C_n]^T$ 。

(1)跟踪输入指令: $\theta=5^\circ, \varphi=5^\circ, \psi=5^\circ$,如图3和图4分别为开环、闭环广义逆控制系统的响应曲线。

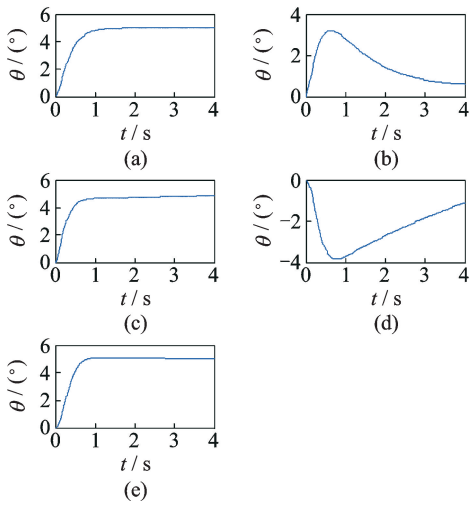


图3 开环结构下的系统时域响应(1)

Fig. 3 Response based on open-loop structure (1)

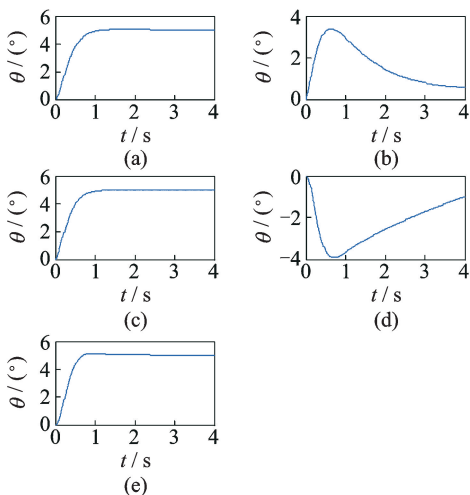


图4 闭环结构下的系统时域响应(1)

Fig. 4 Response based on closed-loop structure (1)

(2)跟踪输入指令: $\theta=15^\circ, \varphi=15^\circ, \psi=15^\circ$,如图5和图6分别为开环、闭环广义逆控制系统的响应曲线。

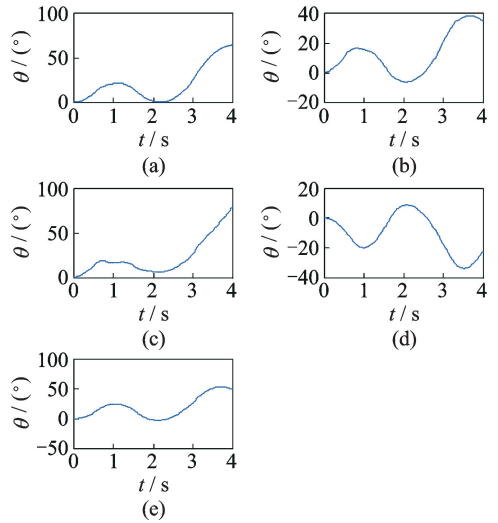


图5 开环结构下的系统时域响应(2)

Fig. 5 Response based on open-loop structure (2)

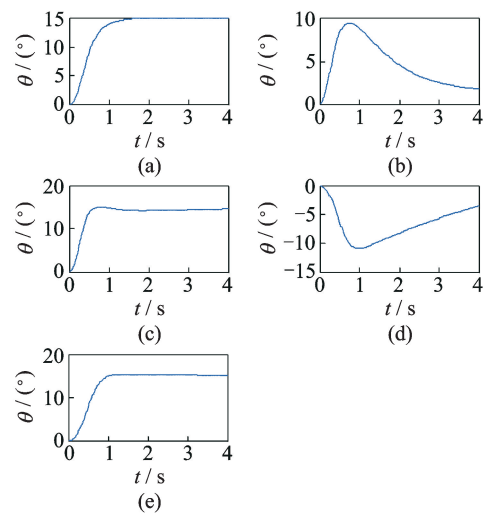


图6 开环结构下的系统时域响应(6)

Fig. 6 Response based on open-loop structure (6)

结合两组对比响应曲线图可以看出,当采用开环结构的控制系统时,由于标称的控制效能矩阵 \mathbf{B}_{r0} 和实际的控制效能矩阵 \mathbf{B}_r 不一致,存在较大的不确定性,引起系统控制的不稳定性,滚转角 φ 有逐渐增大的趋势,响应出现不稳定的趋势,而且当

面临较大机动(15°)的能力需求时,系统控制已经呈现不稳定和发散现象,如图3和图5。针对同样的机动要求,采用闭环结构的控制系统,消除了控制效能矩阵存在不确定性时造成控制误差对系统响应的影响,从图4和图6可以看出,俯仰角 θ 、滚转角 φ 均很快达到稳定状态。分析可知,只要标称的控制效能矩阵 B_{r0} 和实际的控制效能矩阵 B_r 不一致,其差值就会对控制误差进行综合,使得系统稳定。

通过对比仿真,可以验证闭环广义逆控制系统具有一定的稳定鲁棒性,它可以通过消除控制效能矩阵不确定性对系统的影响,使得系统保持稳定。

5 结束语

本文针对开环广义逆控制系统的控制误差,从控制系统的不确定性出发,分析了在控制效能矩阵存在不确定性下的飞控系统鲁棒性问题,建立了基于闭环反馈的广义逆控制系统。随后,针对某型先进飞机的不确定性问题进行了仿真验证,结果表明该设计方法具有良好的控制误差抑制能力,能够有效解决系统鲁棒性设计问题,对整个飞控系统的鲁棒性具有很大的提升作用。

参考文献:

- [1] 张汝麟. 飞行控制与飞机发展[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(12): 1077-1083.
ZHANG Rulin. Development of flight control with aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(12): 1077-1083.
- [2] 占正勇, 刘林. 多操纵面先进布局飞机控制分配技术研究[J]. 飞行力学, 2006, 24(1): 13-16.
ZHANG Zhengyong, LIU Lin. Control allocation for high performance aircraft with multi-control effectors [J]. Flight Dynamics, 2006, 24(1): 13-16.
- [3] DURHAM W C. Computationally efficient control allocation [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2001, 24(3): 519-524.
- [4] FROST S A, TRINH K V, BODSON M. A framework for optimal control allocation with structural load constraints[R]. AIAA-2010-8112, 2010.
- [5] BODSON M. Evaluation of optimization methods for control allocation [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2002, 25(4): 703-711.
- [6] 柳扬, 安锦文. 多操纵面战斗机飞行控制系统设计研究[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(3): 360-363.
LIU Yang, AN Jinwen. Design of multi-surfaces fighter flight control system [J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(3): 360-363.
- [7] 史静平, 章卫国, 李广文, 等. 基于粒子群优化算法的广义逆控制分配方法[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(10): 3735-3737.
SHI Jingping, ZHANG Weiguo, LI Guangwen, et al. Generalized inverse control allocation method based on PSO [J]. Application Research of Computers, 2009, 26(10): 3735-3737.
- [8] 杨凌云, 高金源, 申功璋. 飞行控制中的一种新型最优控制分配方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(5): 572-576.
YANG Lingyu, GAO Jinyuan, SHEN Gongzhang. New optimal control allocation method for flight control system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(5): 572-576.
- [9] EZAL K, PAN Z, KOKOTOVIC P V. Locally optimal and robust backstepping design [C] // IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(2): 260-270.
- [10] REINER J, BALAS G J, GARRARD W L. Robust dynamic inversion for control of highly maneuverable aircraft [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1995, 18(1): 18-24.
- [11] 史静平, 屈晓波, 李广文. 一种基于转矩可达集裁剪设计的广义逆分配方法[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(1): 8-13.
SHI Jingping, QU Xiaobo, LI Guangwen. An effective design of tailored generalized inverse control allocation method [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(1): 8-13.
- [12] BODSON M. Evaluation of optimization methods for control allocation [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2002, 25(4): 703-711.