

文章编号: 1001-0920(2017)01-0171-05

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2015.1593

多操纵面飞机交叉耦合鲁棒控制分配策略

易 坚, 陈 勇[†], 董新民, 支健辉, 刘棕成

(空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038)

摘 要: 针对多操纵面飞机气动效能的交叉耦合不确定性, 基于混合优化提出一种鲁棒控制分配策略. 将交叉耦合效应描述为控制效能结构不确定性, 建立分配误差最小的单目标鲁棒最小二乘控制分配模型, 给出等价线性矩阵不等式构型. 进一步, 考虑操纵面偏转能量约束, 建立鲁棒混合优化控制分配模型, 以避免单目标优化下操纵面易饱和的问题. 仿真结果表明, 所提出的方法可容忍交叉耦合效应不确定性, 实现操纵面协调控制分配, 具有较好的鲁棒性.

关键词: 多操纵面飞机; 控制分配; 鲁棒控制; 交叉耦合不确定

中图分类号: V249.1

文献标志码: A

Robust control allocation with interactions for multiple effectors aircraft

YI Jian, CHEN Yong[†], DONG Xin-min, ZHI Jian-hui, LIU Zong-cheng

(College of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: With regard to the interactions uncertainty on control efficiencies of the multiple effectors aircraft, a robust control allocation strategy is proposed based on the hybrid optimum theory. The nonlinear interactive efficiencies is described as the structured uncertainty, the robust least-squares control allocation model is established based on the optimal object of minimum allocating worst-case, and an equal configuration using the linear matrix inequality is proved. Taking the restriction of deflection energy into consideration, the robust mixed-optimization control allocation model is established to avoid the saturation of the control surface. The simulation shows that, the proposed strategy can acquire concerted allocation solution with the interactions uncertainty tolerated, which has a preferably robustness.

Keywords: multiple effectors aircraft; control allocation; robust control; interactions uncertainty

0 引 言

现代飞机通常布置冗余操纵面, 以保证良好的控制性能、安全性能和隐身性能. 操纵面的密集布置在提高系统可靠性的同时, 使得操纵面之间的气动交互作用增强, 非线性交叉耦合控制效能明显^[1-4], 给控制指令分配带来了困难. 主要包括: 1) 如何建立非线性交叉耦合控制效能的精确模型; 2) 如何考虑交叉耦合效应, 实现操纵面控制指令的有效分配.

在精确已知操纵面非线性交叉耦合控制效能的前提下, 国内外专家对非线性控制分配问题展开了深入研究. 文献[3]考虑X-33矢量发动机间的交叉耦合效应, 基于序列线性规划得到了耦合非线性情况下的控制分配指令; 文献[4]利用线性操纵面补偿交叉耦合力矩, 针对某飞翼提出了一种交叉耦合控制分配方法; 文献[5]针对左右对称操纵面, 构建了非线性控制分配力矩可达集, 实现了非线性直接分配; 文献[6]将

非线性控制效能分段线性化, 提出了一种分段线性控制分配方法, 获得了较好的控制分配效果. 但是, 现代飞机操纵面数量多, 气动效应复杂, 即使开展大量的数值模拟计算和风洞试验也很难得到精确的非线性交叉耦合控制效能模型, 因此基于模型精确已知的控制分配方法具有较大的局限性.

对于不确定条件下的控制分配问题, 国内外专家结合鲁棒控制, 在航空^[7-8]、航天^[9]、轮船^[10]等控制领域进行了深入研究. 针对多操纵面控制效率矩阵不确定性, 文献[11]考虑控制效率矩阵的随机可锥二次表示不确定性, 提出了一种基于鲁棒优化的控制分配算法, 提高了系统适应能力; 文献[12]提出了一种鲁棒最小二乘控制分配方法, 可有效解决控制效率矩阵不确定的控制指令分配问题. 然而, 此类方法均未考虑操纵面交叉耦合效应.

本文将操纵面交叉耦合效应描述为系统的结构

收稿日期: 2015-12-25; 修回日期: 2016-07-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61304120, 61473307); 航空科学基金项目(20155896026).

作者简介: 易坚(1992—), 男, 博士生, 从事多操纵面飞行器控制分配的研究; 董新民(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事飞行器控制理论及运用等研究.

[†]通信作者. E-mail: chen_y043@163.com

不确定性,以分配误差与操纵面偏转量为优化目标,引入线性矩阵不等式^[12]建立不确定模型,提出一种混合优化鲁棒控制分配方法,以得到含操纵面交叉耦合的鲁棒控制指令.结合F-18多操纵面飞机模型的仿真结果表明,所提出的方法在操纵面存在交叉耦合不确定性条件下具有更佳的指令分配性能.

1 控制分配描述

对于多操纵面飞机,实现将期望的虚拟控制指令合理分配到各个操纵面的过程就是控制分配.常用的虚拟控制指令包括飞机三轴角加速度、控制力矩系数、力系数等,记为 $\mathbf{v} \in \mathbf{R}^n$.在小扰动条件下,多操纵面飞机的虚拟控制指令与操纵面偏转量可近似呈线性关系,可表示为^[1-2]

$$\mathbf{v} = \mathbf{B}\mathbf{u}. \quad (1)$$

其中: $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{n \times m}$ 为线性控制效率矩阵; $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^m$ 为操纵面偏转量,满足 $m > n = 3$.受结构、载荷等方面的约束,实际操纵面的偏转位置和偏转速率需满足

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max}, \dot{u}_{\min} \leq \dot{u} \leq \dot{u}_{\max}. \quad (2)$$

其中: u_{\max} 和 u_{\min} 分别为各操纵面偏转位置上下限, \dot{u}_{\max} 和 \dot{u}_{\min} 分别为操纵面偏转最大和最小速率.

考虑到计算机的离散处理方式,若控制系统的计算周期为 Δt ,则操纵面约束(2)可简化为

$$\mathbf{u} \in \Omega = \{\mathbf{u} | \underline{\mathbf{u}} \leq \mathbf{u} \leq \bar{\mathbf{u}}\}. \quad (3)$$

其中: Ω 为控制约束集, $\bar{\mathbf{u}} \in \mathbf{R}^m$ 和 $\underline{\mathbf{u}} \in \mathbf{R}^m$ 满足

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{u}} = \min(\mathbf{u}_{\max}, \mathbf{u} + \dot{\mathbf{u}}_{\max}\Delta t), \\ \underline{\mathbf{u}} = \max(\mathbf{u}_{\min}, \mathbf{u} + \dot{\mathbf{u}}_{\min}\Delta t). \end{cases} \quad (4)$$

结合式(1)和(3)即可得到多操纵面飞机线性控制分配模型.但是,实际飞机操纵面间不可避免地存在非线性交叉耦合效应,难以获取精确的数学模型,此时式(1)将无法严格成立.若忽略这一未建模动态,采用线性控制分配方法将存在一定的保守性.因此,本文在控制分配方程中考虑操纵面交叉耦合不确定性,基于混合优化的思想进行鲁棒控制分配器设计.

2 交叉耦合鲁棒控制分配器设计

2.1 交叉耦合控制分配问题描述

多操纵面飞机的虚拟控制指令 \mathbf{v} 与操纵面偏转量 \mathbf{u} 之间可拟合成一种非线性多项式^[2].考虑操纵面之间的交叉耦合效应,可描述为^[3-4]

$$v_r(u_i, u_j) = \frac{\partial^2 v_r}{\partial u_i \partial u_j} u_i u_j, \quad i, j = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

其中: u_i 和 u_j 分别为第 i 、 j 个操纵面的偏转量, $v_r(u_i, u_j)$ 为操纵面 i 和 j 组合偏转对第 r 维虚拟控制指令产生的交叉耦合作用.因此,结合式(5),可将含交叉耦合效应的控制分配问题表述为

$$\begin{cases} \mathbf{v} = (\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B})\mathbf{u}, \\ \underline{\mathbf{u}} \leq \mathbf{u} \leq \bar{\mathbf{u}}. \end{cases} \quad (6)$$

其中: $\Delta\mathbf{B} = 0.5 \times [\mathbf{Q}_l \mathbf{u}, \mathbf{Q}_m \mathbf{u}, \mathbf{Q}_n \mathbf{u}]^T$ 为操纵面交叉

耦合控制效率矩阵, \mathbf{Q}_l 、 \mathbf{Q}_m 和 \mathbf{Q}_n 分别为各虚拟控制指令分量的交叉耦合系数矩阵,可描述为

$$Q_i(i, j) = \frac{\partial^2 v_i}{\partial u_i \partial u_j}, \quad i, j = 1, 2, \dots, m. \quad (7)$$

其中: v_i 为虚拟控制指令在飞机滚转通道的分量,矩阵 \mathbf{Q}_m 、 \mathbf{Q}_n 与 \mathbf{Q}_l 类似,不再赘述.

由式(6)可知,交叉耦合控制效率矩阵为舵偏量的线性函数.在偏转范围内通过操纵面交叉组合可以获取交叉耦合非线性控制效率所组成的结构多面体.因此,将操纵面交叉耦合效应视为控制效能的不确定性,可将控制效率矩阵写成结构不确定性模型

$$\mathbf{B}(\boldsymbol{\xi}) = \mathbf{B} + \sum_{i=1}^m \xi_i \mathbf{B}_i. \quad (8)$$

其中: ξ_i 为不确定参数,且存在 $\rho > 0$ 使得 $\|\boldsymbol{\xi}\| \leq \rho^2$, $\boldsymbol{\xi} = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m]^T$.若 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_m$ 为单位阵列向量,则控制效率阵的交叉耦合不确定项 \mathbf{B}_i 可表述为

$$\mathbf{B}_i = [\mathbf{Q}_l \mathbf{e}_i, \mathbf{Q}_m \mathbf{e}_i, \mathbf{Q}_n \mathbf{e}_i]^T, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (9)$$

2.2 鲁棒最小二乘控制分配器设计

虚拟控制指令的准确跟踪是多操纵面飞行控制的重要前提,为此,考虑操纵面交叉耦合不确定性,以虚拟控制误差上界最小为优化目标,建立含操纵面物理约束的鲁棒最小二乘控制分配(RLCA)模型

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{u}} \max_{\|\boldsymbol{\xi}\| \leq \rho^2} \|\mathbf{W}_v(\mathbf{B}(\boldsymbol{\xi})\mathbf{u} - \mathbf{v})\|, \\ \underline{\mathbf{u}} \leq \mathbf{u} \leq \bar{\mathbf{u}}. \end{cases} \quad (10)$$

$\mathbf{W}_v = \text{diag}(w_{v1}, w_{v2}, \dots, w_{vn})$ 为对称正定权值阵.

引理1(Schur补引理^[13]) 对于给定的对称分块矩阵 $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{11} & \mathbf{S}_{12} \\ \mathbf{S}_{21} & \mathbf{S}_{22} \end{bmatrix}$,以下3个条件是等价的:1) $\mathbf{S} > 0$;2) $\mathbf{S}_{11} < 0, \mathbf{S}_{22} - \mathbf{S}_{21}\mathbf{S}_{11}^{-1}\mathbf{S}_{12} < 0$;3) $\mathbf{S}_{22} < 0, \mathbf{S}_{11} - \mathbf{S}_{12}\mathbf{S}_{22}^{-1}\mathbf{S}_{21} < 0$.

定理1 如果控制效率阵 $\mathbf{B}(\boldsymbol{\xi})$ 具有式(8)的结构不确定性,则求解线性矩阵不等式

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{u}, \tau, \lambda} \lambda. \\ & \text{s.t.} \begin{bmatrix} \lambda - \tau & * & * \\ 0 & \tau \mathbf{I} & * \\ \mathbf{W}_v(\mathbf{B}\mathbf{u} - \mathbf{v}) & \rho \mathbf{M}(\mathbf{u}) & \mathbf{I} \end{bmatrix} > 0; \\ & \mathbf{e}_i^T \bar{\mathbf{u}} - \mathbf{e}_i^T \mathbf{u} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m; \\ & \mathbf{e}_i^T \mathbf{u} - \mathbf{e}_i^T \underline{\mathbf{u}} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (11)$$

可得鲁棒最小二乘模型(10)的最优控制分配指令.其中: $\lambda > 0$ 为优化目标, $\mathbf{M}(\mathbf{u})$ 的定义在证明中给出.

证明 对于控制分配模型(10),定义分配误差

$$\eta(\boldsymbol{\xi}, \mathbf{u}) = \|\mathbf{W}_v(\mathbf{B}(\boldsymbol{\xi})\mathbf{u} - \mathbf{v})\|, \quad (13)$$

将式(13)展开,可以得到

$$\eta(\boldsymbol{\xi}, \mathbf{u}) = [1 \quad \boldsymbol{\xi}^T] \begin{bmatrix} h(\mathbf{u}) & * \\ \mathbf{g}(\mathbf{u}) & \mathbf{F}(\mathbf{u}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \boldsymbol{\xi} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

其中

$$h(\mathbf{u}) \triangleq (\mathbf{B}\mathbf{u} - \mathbf{v})^T \mathbf{W}_v^2 (\mathbf{B}\mathbf{u} - \mathbf{v}),$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{u}) \triangleq \mathbf{M}(\mathbf{u})^T \mathbf{W}_v (\mathbf{B}\mathbf{u} - \mathbf{v}),$$

$$\mathbf{M}(\mathbf{u}) \triangleq \mathbf{W}_v [\mathbf{B}_1 \mathbf{u}, \mathbf{B}_2 \mathbf{u}, \dots, \mathbf{B}_m \mathbf{u}],$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{u}) \triangleq \mathbf{M}(\mathbf{u})^T \mathbf{M}(\mathbf{u}).$$

定义最坏情况下的残差函数 $\lambda > 0$. 为了使优化残差尽可能小, 对于任意不确定系数向量 $\boldsymbol{\xi}$, 须满足 $\eta(\boldsymbol{\xi}, \mathbf{u}) < \lambda$. 定义 $\boldsymbol{\delta}' = \boldsymbol{\delta}/\rho$, 则 $\boldsymbol{\delta}'^T \boldsymbol{\delta}' \leq 1$, 因而为保证 $\eta(\boldsymbol{\xi}, \mathbf{u}) < \lambda$, 须满足

$$\begin{bmatrix} 1 & \boldsymbol{\xi}'^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda - \tau - h(\mathbf{u}) & * \\ -\rho \mathbf{g}^T(\mathbf{u}) & \tau \mathbf{I} - \rho^2 \mathbf{F}(\mathbf{u}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \boldsymbol{\xi}' \end{bmatrix} > 0, \quad (15)$$

其中 τ 为正数, 即满足

$$\begin{bmatrix} \lambda - \tau - h(\mathbf{u}) & * \\ -\rho \mathbf{g}^T(\mathbf{u}) & \tau \mathbf{I} - \rho^2 \mathbf{F}(\mathbf{u}) \end{bmatrix} > 0. \quad (16)$$

根据相关矩阵的定义, 式(16)可转化为

$$\begin{bmatrix} \lambda - \tau & * \\ 0 & \tau \mathbf{I} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (\mathbf{W}_v (\mathbf{B}\mathbf{u} - \mathbf{v}))^T \\ \rho \mathbf{M}^T(\mathbf{u}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{W}_v (\mathbf{B}\mathbf{u} - \mathbf{v}) & \rho \mathbf{M}(\mathbf{u}) \end{bmatrix} > 0. \quad (17)$$

根据引理1, 对式(17)等价变换即可得到式(11).

进一步考虑操纵面约束式(3), 可描述为

$$\mathbf{e}_i^T \underline{\mathbf{u}} \leq \mathbf{e}_i^T \mathbf{u} \leq \mathbf{e}_i^T \bar{\mathbf{u}}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (18)$$

因此, 结合式(17)和(18)可知, 定理1成立. \square

推论1 若令 $\rho = 0$, 则定理1可转化为

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{u}, \lambda} \lambda. \\ & \text{s.t.} \begin{bmatrix} \lambda & * \\ \mathbf{B}\mathbf{u} - \mathbf{v} & \mathbf{I} \end{bmatrix} > 0; \\ & \mathbf{e}_i^T \bar{\mathbf{u}} - \mathbf{e}_i^T \mathbf{u} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m; \\ & \mathbf{e}_i^T \mathbf{u} - \mathbf{e}_i^T \underline{\mathbf{u}} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (19)$$

求解该矩阵不等式可以得到不包含交叉耦合不确定性时的线性控制分配指令.

2.3 鲁棒混合优化控制分配器设计

由鲁棒最小二乘控制分配模型(11)可以发现, 由定理1得到的操纵面指令除了受到物理约束以外, 未对偏转耗能加以限制. 简言之, 鲁棒最小二乘控制分配指令容易出现大偏转情形, 甚至导致操纵面饱和. 为此, 进一步考虑以控制分配误差和舵偏量最小为优化目标, 建立鲁棒混合优化控制分配(RMCA)模型

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{u}} \max_{\|\boldsymbol{\xi}\| \leq \rho^2} (\|\mathbf{W}_v (\mathbf{B}(\boldsymbol{\xi})\mathbf{u} - \mathbf{v})\| + \|\mathbf{W}_u \mathbf{u}\|), \\ \underline{\mathbf{u}} \leq \mathbf{u} \leq \bar{\mathbf{u}}, \end{cases} \quad (20)$$

其中 $\mathbf{W}_v \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 和 $\mathbf{W}_u \in \mathbf{R}^{m \times m}$ 分别为虚拟控制指令和操纵面的对称正定权值矩阵.

定理2 若控制效率阵 $\mathbf{B}(\boldsymbol{\xi})$ 具有如式(8)所示的结构不确定性, 则求解线性矩阵不等式

$$\min_{\mathbf{u}, \tau, \lambda, \gamma} \lambda + \gamma;$$

$$\text{s.t.} \begin{bmatrix} \lambda - \tau & * & * \\ 0 & \tau \mathbf{I} & * \\ \mathbf{B}\mathbf{u} - \mathbf{v} & \rho \mathbf{M}^T(\mathbf{u}) & \mathbf{I} \end{bmatrix} > 0, \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} \gamma & * \\ \mathbf{u} & \mathbf{W}_u^{-2} \end{bmatrix} > 0, \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\kappa}_i^T \mathbf{e}_1 & * & * & * \\ 0 & \boldsymbol{\kappa}_i^T \mathbf{e}_2 & * & * \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \boldsymbol{\kappa}_i^T \mathbf{e}_m \end{bmatrix} \geq 0. \quad (23)$$

可得鲁棒混合优化模型(20)的最优控制分配指令. 其中: $\lambda > 0$ 与 $\gamma > 0$ 组成混合优化目标, $i = 1, 2$, 且有

$$\boldsymbol{\kappa}_1 \triangleq \bar{\mathbf{u}} - \mathbf{u}, \quad \boldsymbol{\kappa}_2 \triangleq \mathbf{u} - \underline{\mathbf{u}}.$$

证明 由定理1可知, 对于不确定参数 $\boldsymbol{\xi}$, 当满足式(11)时, 有 $\lambda > 0$, 使得 $\eta(\boldsymbol{\delta}, \mathbf{u}) < \lambda$ 成立. 进一步考虑操纵面偏转耗能限制, 即存在 $\gamma > 0$, 使得 $\|\mathbf{W}_u \mathbf{u}\| < \gamma$ 成立. 由引理1可知, 耗能约束可转化为

$$\begin{bmatrix} \gamma & * \\ \mathbf{u} & \mathbf{W}_u^{-2} \end{bmatrix} > 0. \quad (24)$$

对于 $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T$, 进一步根据式(18)可得

$$\text{diag}(u_1 - \underline{u}_1, u_2 - \underline{u}_2, \dots, u_m - \underline{u}_m) \geq 0, \quad (25)$$

$$\text{diag}(\bar{u}_1 - u_1, \bar{u}_2 - u_2, \dots, \bar{u}_m - u_m) \geq 0. \quad (26)$$

由前述定义可知

$$\begin{cases} u_i - \underline{u}_i = (\mathbf{u} - \underline{\mathbf{u}})^T \mathbf{e}_i, \quad i = 1, 2, \dots, m; \\ \bar{u}_i - u_i = (\bar{\mathbf{u}} - \mathbf{u})^T \mathbf{e}_i, \quad i = 1, 2, \dots, m. \end{cases} \quad (27)$$

因此, 结合式(11)、式(24)~(27)可知, 定理2成立. \square

推论2 若选择 $\gamma = 0$ 并剔除定理2中的线性矩阵不等式(24), 则定理2与定理1是等价的.

证明 选择 $\gamma = 0$, 则定理2与定理1优化目标均为分配误差的上界最小. 考虑操纵面物理约束(3)可知, 式(12)与(23)是等价的. 因此推论2成立. \square

推论3 令 $\rho = 0$, 则可将定理2转化为

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{u}, \lambda, \gamma} \lambda + \gamma; \\ & \text{s.t.} \begin{bmatrix} \lambda & * \\ \mathbf{B}\mathbf{u} - \mathbf{v} & \mathbf{I} \end{bmatrix} > 0, \end{aligned} \quad (28)$$

式(22)和(23).

从而可以得到不包含交叉耦合不确定性时的操纵面混合优化控制分配指令.

3 仿真与分析

3.1 仿真模型

为了验证方法的有效性, 以F-18飞机^[2]为对象进行仿真分析. 该飞机共包含7组独立的操纵面, 记为 $\mathbf{u} = [u_{le}, u_{re}, u_{la}, u_{ra}, u_r, u_{tef}, u_{lef}]^T$. 其中: u_{le} 、 u_{re} 为左、右升降舵, u_{la} 、 u_{ra} 为左、右副翼, u_r 为方向舵, u_{tef} 、 u_{lef} 为后缘和前缘襟翼. 各操纵面偏转位置和速率约

束如下:

$$\mathbf{u}_{\max} = [10.5, 10.5, 25, 25, 30, 40, 34]^T,$$

$$\mathbf{u}_{\min} = [-24, -24, -25, -25, -30, -8, -3]^T,$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{\max} = -\dot{\mathbf{u}}_{\min} = [100, 100, 100, 100, 100, 100, 100]^T.$$

在马赫数为 0.3、攻角为 15° 、侧滑角为 0° 、高度为 1000 英尺飞行条件下, 选择滚转力矩系数 C_l 、俯仰力矩系数 C_m 以及偏航力矩系数 C_n 为虚拟控制指令, 其与操纵面偏转量之间的非线性函数关系见文献 [2]. 由此可知, F-18 飞机操纵力矩中除了舵面自身偏转所产生的力矩外, 还包含舵面间交叉耦合效应产生的操纵力矩, 且前缘襟翼 u_{lef} 与左右副翼 u_{la} 、 u_{ra} 之间存在较强的交叉耦合效应.

进一步计算可知, 控制效率矩阵为

$$\mathbf{B} = 10^{-4} \times \begin{bmatrix} -7.025 & 7.025 & -9.183 & 0 & 0 \\ -89.90 & -9.69 & -9.69 & 9.183 & 2.554 \\ -1.409 & 1.409 & 0.7509 & -9.69 & 9.83 \\ 9.183 & 2.554 & 0 & 0 & 0 \\ -0.7509 & -12.11 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

横向交叉耦合系数矩阵 \mathbf{Q}_l 参数为

$$\mathbf{Q}_l(1, 1) = -\mathbf{Q}_l(2, 2) = -1.82 \times 10^{-6},$$

$$\mathbf{Q}_l(3, 3) = -\mathbf{Q}_l(4, 4) = 1.02 \times 10^{-6},$$

$$\mathbf{Q}_l(7, 3) = -\mathbf{Q}_l(3, 7) = -5.5 \times 10^{-6},$$

$$\mathbf{Q}_l(7, 4) = -\mathbf{Q}_l(4, 7) = 5.5 \times 10^{-6},$$

其余参数均为 0. \mathbf{Q}_m 和 \mathbf{Q}_n 可以通过类似方法得到. 进一步由式 (9) 可得交叉耦合不确定控制效率矩阵.

3.2 性能比较

分别对以下 3 种控制分配方案进行对比仿真分析: 1) LPCA 方案: 不考虑交叉耦合效应, 采用内点法对基于线性规划的控制分配律 (LPCA)^[3-4] 进行求解; 2) RLCA 方案: 考虑操纵面不确定交叉耦合效应, 基于鲁棒最小二乘控制分配模型 (10), 采用定理 1 求解控制分配律; 3) RMCA 方案: 考虑操纵面不确定交叉耦合效应, 基于鲁棒混合优化控制分配模型 (20), 采用定理 2 求解控制分配律.

给定期望的三轴虚拟控制指令为

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} 0.066 \sin(1.26t + 2.8) \\ -0.072 + 0.018t \\ 0.036 \cos(1.26t + 2.8) \end{bmatrix}.$$

对 3 种方案进行对比仿真, 采样频率为 50 Hz. 图 1 所示为虚拟控制指令动态曲线. 由图 1 可知, 对于给定的虚拟控制指令, LPCA 方案未考虑交叉耦合不确定性, 在俯仰方向产生了周期振荡响应和较大的分配误差; 在滚转及偏航方向, 当出现最大滚转控制指令时同样产生了一定的虚拟控制误差. 而 RLCA 方案

和 RMCA 方案在操纵面交叉耦合不确定性的影响下, 仍能比较精准地实现飞机的三轴运动控制效果.

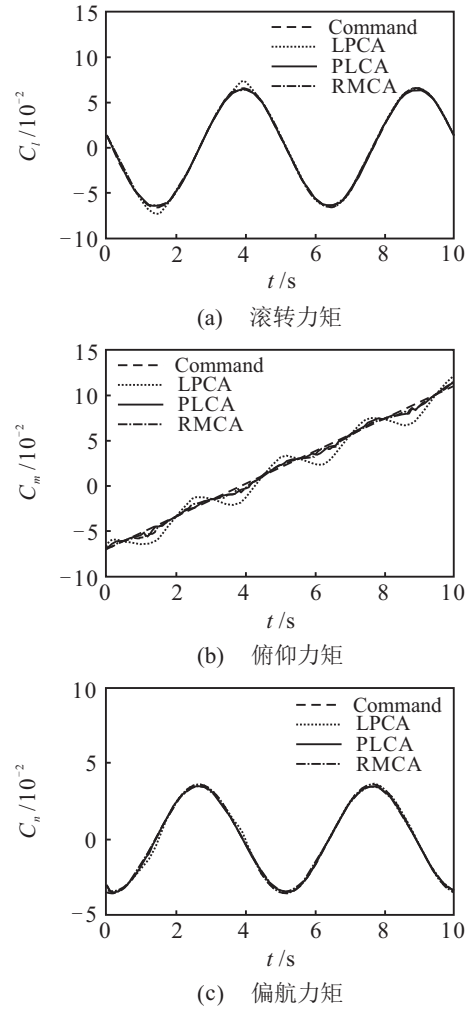


图 1 虚拟控制指令

图 2 给出了 3 种方案对应的操纵面偏转指令曲线. 由图 2 可以看到, 3 种方案生成的操纵面偏转具有类似的变化规律. 值得注意的是, 与 RMCA 方案相比, LPCA 方案操纵面偏转指令变化要剧烈得多, 右升降舵和前缘襟翼在第 1.5 s、2.5 s、5 s、7.5 s 以及第 4 s 时出现了明显的剧烈偏转指令, 且左、右副翼偏转速率要远大于 RMCA 方案. 由于 RLCA 方案未对操纵面偏转幅值进行优化, 后缘以及前缘襟翼出现较大的偏转量, 增加了系统耗能, 降低可用舵裕度, 而 RMCA 方案则较好地实现了所有操纵面的协调偏转.

进一步分析 3 种方案的工程可用性. 考虑单次指令分配误差及其计算时间, 如表 1 所示. 由表 1 可得, 对于给定的虚拟控制指令, 各方案在飞机 3 个轴向都产生了一定的分配误差, 但 RLCA 和 RMCA 方案有效考虑了操纵面交叉耦合效应, 其最大以及平均误差均远小于 LPCA 方案. RLCA 和 RMCA 单次指令分配计算时间较 LPCA 长, 且 RMCA 方案较 RLCA 方案计算时间略有增加, 但是 RMCA 方案单次指令分配计算最大耗时为 17.8 ms, 平均耗时为 13.4 ms, 小于本文

控制分配采样间隔(20ms),具有一定的工程实用性.

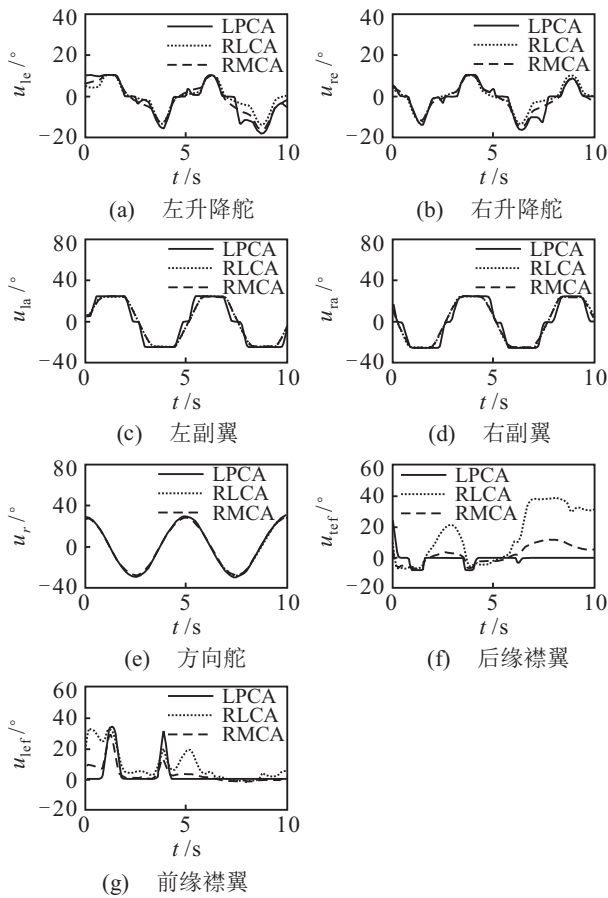


图 2 操纵面偏转指令

表 1 各控制分配方案性能对比

方案	最大误差	平均误差	最大时间/ms	平均时间/ms
LPCA	$\begin{bmatrix} 0.0091 \\ 0.021 \\ 0.0056 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.001 \\ 0.0088 \\ 0.0008 \end{bmatrix}$	9.7	6.8
RLCA	$\begin{bmatrix} 0.0025 \\ 0.0081 \\ 0.0042 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0007 \\ 0.0024 \\ 0.0006 \end{bmatrix}$	16.2	12.1
RMCA	$\begin{bmatrix} 0.003 \\ 0.0079 \\ 0.0045 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0006 \\ 0.0021 \\ 0.0006 \end{bmatrix}$	17.8	13.4

综上所述, RMCA 方案能够有效地考虑操纵面交叉耦合不确定效应, 充分考虑所有操纵面的物理约束和舵偏耗能, 实现了多操纵面飞机控制指令的有效分配, 具有较好的鲁棒性.

4 结 论

本文针对操纵面存在的交叉耦合不确定性效应, 研究了多操纵面飞机鲁棒控制分配方法. 通过对操纵面交叉耦合效应的分析, 考虑以控制分配误差和舵偏量最小为优化目标, 结合鲁棒优化理论建立了交叉耦合效应下的鲁棒混合优化控制分配模型, 并将其转化为等价的线性矩阵不等式形式. 结合 F-18 飞机模型的仿真结果表明, 所提出的方案可有效地考虑操纵面交叉耦合不确定性设计鲁棒混合优化控制分配器, 实现虚拟控制指令的协调合理分配.

参考文献(References)

- [1] Johansen T A, Fossen T I. Control allocation-a survey[J]. Automatica, 2013, 49(5): 1087-1103.
- [2] Bordignon K A. Constrained control allocation for systems with redundant control effectors[D]. Virginia: College of Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.
- [3] Oppenheimer M W, Doman D B. A method for including control effector interactions in the control allocation problem[C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conf and Exhibit. South Carolina: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007: 1-10.
- [4] Xu M X, Zhu X P, Zhou Z, et al. A control allocation method for flying wing aircraft with control effector interactions considered[J]. J of Northwestern Polytechnical University, 2014, 32(1): 69-73.
- [5] Bolender M A, Doman D B. Method for determination of nonlinear attainable moment sets[J]. J of Guidance Control and Dynamics, 2004, 27(5): 907-914.
- [6] Bolender M A, Doman D B. Nonlinear control allocation using piecewise linear functions[J]. J of Guidance Control and Dynamics, 2004, 27(6): 1017-1027.
- [7] Ye S j, Zhang Y M. Robust fault-tolerant control using on-line control re-allocation with application to aircraft[C]. American Control Conf. St.Louis: AACC, 2009: 5534-5539.
- [8] 马建军, 郑志强, 胡德文. 包含执行器动力学的子空间预测动态控制分配方法[J]. 自动化学报, 2010, 36(1): 130-138. (Ma J J, Zheng Z Q, Hu D W. Subspace predictive dynamic control allocation for overactuated system with actuator dynamics[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(1): 130-138.)
- [9] Reiman S E, Dillon C H, Lee H P, et al. Robust adaptive reconfigurable control for a hypersonic cruise vehicle[C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf. Chicago: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009: 10-13.
- [10] Vincenzo C, Andrea C. Parametric control allocation for a class of marine vessels[J]. Ocean Engineering, 2013, 58(2013): 275-283.
- [11] Ma J J, Li W Q, Zheng Z Q, et al. Control of allocation under uncertainty based on robust optimization[J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(6): 731-737.
- [12] Lei C, Ying Y. Disturbance rejection and robust least-squares control allocation in flight control system[J]. J of Guidance Control and Dynamics, 2011, 34(6): 1632-1643.
- [13] Yu L. Robust control—LMI approach[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 8-9.