

多操纵面飞机控制分配方法研究

申晓明*, 吕新波, 黄振威

中航飞机股份有限公司研发中心, 陕西 西安 710089

摘 要: 列举了目前国外典型的多操纵面飞机及其操纵特点, 针对该类飞机存在操纵面维数多于控制指令维数的问题, 阐述了控制分配的原理和数学表达形式, 比较了国内外控制分配问题的解决方法及其优缺点, 并给出了控制分配技术的优势和难点, 为型号研制提供参考。

关键词: 多操纵面; 控制分配; 控制指令

中图分类号: V212.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2016) 09-0008-04

为了追求更高的机动性、操纵性和气动特性, 现代飞机在布局上使用多种新型操纵面, 如升降副翼、海狸尾、阻力方向舵和推力矢量等。传统飞机主要布置副翼、方向舵和升降舵三组舵面, 用于控制滚转、偏航和俯仰运动, 在操纵面容许范围内, 飞机所需操纵力矩对应的操纵面偏转量是唯一确定的。与传统布局相比, 多操纵面布局为飞行控制提供了灵活的实现方式, 操纵面有多种组合形式产生预期的操纵力矩。但是, 操纵面数目增加使控制耦合性增强, 偏转可能产生不利的耦合力矩, 且操纵面有偏转限制。因此, 如何使操纵面进行合理偏转, 实现预期运动, 这正是控制分配的核心问题。

20 世纪 90 年代中期, 国外开始控制分配问题的研究, Wright 实验室在带推力矢量 F-16 飞机验证伪逆法的有效性^[1]; 道格拉斯宇航中心在 F15 ACTIVE 验证机研究控制分配的可行性; Davision 在新型操纵面 (Innovative Control Effector, ICE) 验证机对自适应分配策略进行研究。国内也进行了基于性能最优的多操纵面飞机配平^[2]、带推力矢量飞机控制分配、最优控制分配策略等方面的理论研究。

国内外对多操纵面飞机控制分配的研究在理论、仿真模拟、试验等方面已取得一定成果。因此, 有必要对国内外研究进展进行梳理, 从数学原理、实现方法、优势与难点等方面对控制分配技术进行分析, 供设计参考。

1 多操纵面飞机

目前, 国外典型的多操纵面飞机如图 1 所示^[3]。

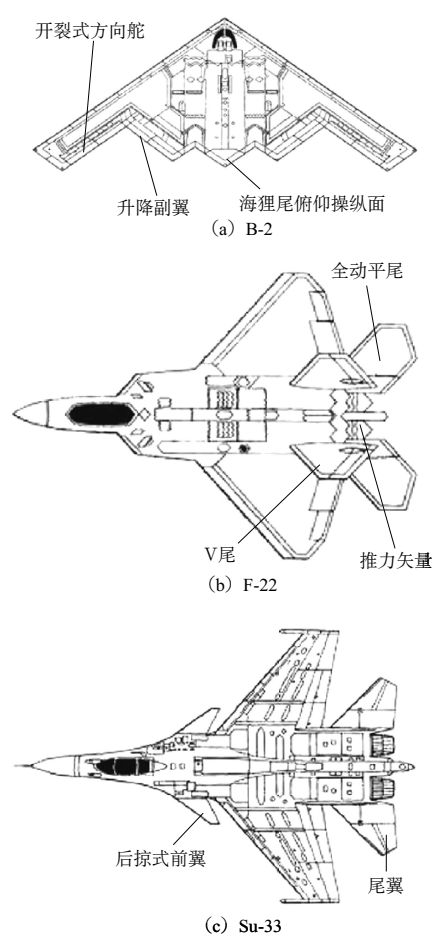


图 1 国外典型的多操纵面飞机

Fig.1 The typical overseas aircrafts with multi-control surfaces

收稿日期: 2016-04-21; 退修日期: 2016-07-20; 录用日期: 2016-07-25

* 通讯作者: Tel.: 029-86832287 E-mail: buaashenxiaoming@sina.com

引用格式: SHEN Xiaoming, LV Xinbo, HUANG Zhenwei. Research on the control allocation for aircrafts with multi-control surfaces [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27 (09): 08-11. 申晓明, 吕新波, 黄振威. 多操纵面飞机控制分配方法研究 [J]. 航空科学技术, 2016, 27 (09): 08-11.

多操纵面飞机显著特点是操纵面具有冗余特性,操纵面维数多于控制指令维数。多组操纵面可产生相同的控制效果,如海狸尾、升降副翼、推力矢量和尾翼均可控制俯仰运动,一组操纵面也可以产生不同的控制效果,如升降副翼同向偏转控制俯仰运动、差动偏转控制滚转运动。

2 控制分配原理

当操纵面数目过多时,传统控制思路不能满足多操纵面飞机的要求,传统的控制系统结构如图2所示,控制律针对操纵面来设计。目前,典型的多操纵面飞机控制系统结构如图3所示,控制律与操纵面之间增加了控制分配过程。

控制分配的任务是将虚拟控制指令 v 合理的分配至多操纵面,得到操纵面期望值 u ,输入至执行机构并产生偏转 δ ,获得预期控制。 v 通常为力矩或角加速度指令。

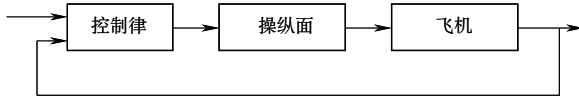


图2 传统的控制系统结构图
Fig.2 The traditional control system

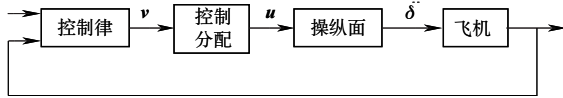


图3 基于控制分配的控制系统结构图
Fig.3 The control system based on control allocation

控制分配问题也可简单理解为如何将完成任务所需的三轴操纵力矩合理的分配至多操纵面。“合理”包含考虑操纵面约束和充分利用操纵面能力两方面内容。

控制分配问题以数学形式描述:

对于虚拟控制指令 $v(t) \in R^n$, 寻找 $u(t) \in R^m$ 满足 $v(t) = g(u(t))$ 。 $g(\cdot)$ 为 $R^m \rightarrow R^n$ 的非线性映射函数, 且 $m > n$, 即操纵面维数多于控制指令维数。

一定范围内,操纵面偏转量与产生的力矩基本呈线性关系。对 $v(t)$ 线性化,控制分配问题可描述为:

$$v = Bu \quad (1)$$

式中: B 为操纵面控制效率矩阵。

操纵面存在偏转角度约束和偏转速率约束,约束范围即为控制分配的可实现区域,具体表达式如式(2),式(1)、式(2)构成控制分配问题的完整表述。

$$\begin{cases} u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max} \\ \rho_{\min} \leq \rho(t) \leq \rho_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $u(t)$, $\rho(t)$ 为偏转角度和速率; $u_{\min}$, $u_{\max}$ 为偏转角度的最小和最大值; $\rho_{\min}$, $\rho_{\max}$ 为偏转速率的最小和最大值。

3 控制分配实现方法

基于上述控制分配问题,研究人员提出多种解决方法,可按照非优化和优化进行分类。非优化方法以串接链最具代表性,基于优化目标控制分配有广义逆、直接分配、数学规划等方法。近年来又出现基于智能控制理论的多种方法。

3.1 串接链

串接链原理是将操纵面进行优先性分级,首先偏转优先级高的操纵面,如果饱和,再利用优先级低的操纵面,产生因饱和而未能实现的控制指令。其控制分配原理见图4。

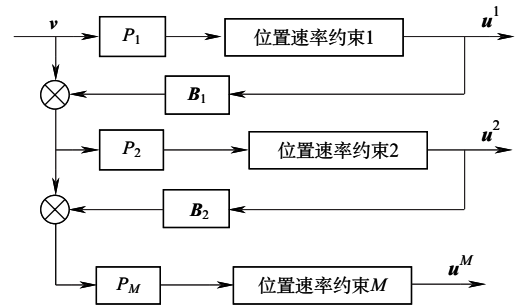


图4 基于串接链的控制分配原理
Fig.4 The method of control allocation based on daisy-chain

将控制输入和效率矩阵分为 M 组,如式(3)所示:

$$\begin{aligned} u &= [u^1 \quad u^2 \quad \cdots \quad u^M]^T \\ B &= [B_1 \quad B_2 \quad \cdots \quad B_M] \end{aligned} \quad (3)$$

则利用串接链进行控制分配的表达式如式(4)所示:

$$v = B_1 u^1 + B_2 u^2 + \cdots + B_M u^M \quad (4)$$

首先,利用 u^1 使 $v = B_1 u^1$, 如果 u^1 未超出约束,则控制分配实现。如果 u^1 已达到约束边界且 $v \neq B_1 u^1$, 则利用 u^2 与 u^1 共同实现 $v = B_1 u^1 + B_2 u^2$, 其中 u^1 已饱和。如果 u^2 饱和且 $v \neq B_1 u^1 + B_2 u^2$, 再依次使用 $u^3 \dots u^M$ 直至满足等式(4)。在一定条件下,控制输入 $u^1, u^2 \dots u^M$ 均饱和,式(4)仍不满足,则串接链不能实现控制分配。

串接链的优点是工程实现简单,分配方式灵活,速度快,最大限度使用常规操纵面,但是未充分发掘操纵面潜力,分配结果不一定最优。

3.2 广义逆

广义逆是对虚拟控制量 v 的广义逆求解,得到操纵面期望值 u 。当 u 超出约束时,将进行截断或其他方法处理。广义逆包含伪逆、多级伪逆、加权伪逆等多种方法^[4]。

以伪逆法为例,取操纵量的最小二次范数(能量函数)为优化指标,代价函数 $J = \mathbf{u}^T \mathbf{u}$, 约束条件 $\mathbf{v} = \mathbf{B}\mathbf{u}$, 标量函数 $H(\mathbf{u}, \lambda) = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{u} + \lambda^T (\mathbf{B}\mathbf{u} - \mathbf{v})$, 依据求极值条件, 得到最优解:

$$\mathbf{u} = \mathbf{B}^+ \mathbf{v} = \mathbf{B}^T (\mathbf{B}\mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{v} \quad (5)$$

伪逆法求解时未考虑操纵面约束, 计算的最优解需进行约束判断, 如果超出约束限制, 将进行截断处理, 则控制分配结果不能实现预期操纵。基于上述问题, 出现多级伪逆、加权伪逆等改进方法:

多级伪逆原理与串接链类似, 如果伪逆法求解结果超出约束范围, 对于剩余的虚拟控制量, 利用未饱和操纵面, 通过伪逆法再次进行分配, 直至分配结果不超出约束。加权伪逆依据各操纵面的效率和使用侧重点, 设置权值系数, 避免操纵面过早进入饱和状态。

广义逆的优点是数学原理简单, 但是在控制分配时部分操纵面可能提前达到约束边界, 不能实现预期操纵。

3.3 直接分配法

直接分配法由弗吉尼亚理工大学 Durham 教授基于可达力矩集提出, 利用几何优化法直接寻找可行的 $\mathbf{u}^*$, 使 $\mathbf{v}^* = \mathbf{B}\mathbf{u}^*$ 尽可能接近虚拟控制量 $\mathbf{v}$ 。可达力矩集是指在操纵面偏转约束下, 所能达到的操纵力矩集合。

该方法可描述为: 对于给定的操纵效率矩阵 $\mathbf{B}$, 有约束的可达力矩集合 Ω , 虚拟控制量 (该方法中为期望操纵力矩) $\mathbf{v}$, 确定操纵输入 $\mathbf{u} \in \Omega$, 使 $\mathbf{u}$ 在 $\mathbf{v}$ 的单位向量方向产生的力矩向量幅值最大, 进而求出操纵输入。

Durham 最早提出面搜索方法, 搜索整个力矩可达集的面, 寻找期望力矩向量与可达力矩集面的交点, 确定最大可达力矩向量及对应的操纵输入^[5]。

直接分配法优点是原理简单, 几何意义直观, 充分考虑操纵面饱和情况, 能够实现可达力矩集内所有值, 但是力矩维数增加时, 该方法计算复杂度迅速增加, 计算量过大。

3.4 数学规划方法

数学规划方法包含线性规划方法和非线性规划方法。选取一定的优化目标, 可将控制分配问题转化为线性规划问题。多操纵面飞机的优化目标可由飞行阶段确定, 通常有巡航升阻比最大、起飞升力最大和操纵面偏转量最小等。

目前, 控制分配的多数方法是基于线性模型提出, 即操纵面偏角与产生的力矩呈线性关系, 实际上, 新型操纵面偏角与产生力矩可能存在非线性关系, 针对此类问题, 提出非线性规划方法。常见的非线性规划方法有二次规划和多目

标规划。非线性规划方法具备对虚拟控制量精确分配, 同时满足约束条件, 实现优化目标的优点, 有重要的应用价值。

利用非线性规划进行控制分配时, 优化目标 $f(\mathbf{u})$ 需满足 $\min f(\mathbf{u})$ 。

约束条件有如下非线性形式:

$$\begin{cases} g(\mathbf{u}) = \mathbf{v} \\ \mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}_{\max} \\ \boldsymbol{\rho}_{\min} \leq \boldsymbol{\rho}(t) \leq \boldsymbol{\rho}_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

数学规划方法优点是能够实现基于任务的最优控制分配, 在工程应用上具有重要意义, 但是该方法还需考虑实时性与计算量等问题。

3.5 基于智能控制理论的分配方法

智能控制理论的发展为控制分配提供了新方法, 智能控制具有运算量小、收敛快速等优点, 将智能控制理论与控制分配相结合, 形成多种控制分配方法。可用于控制分配的智能控制理论包括神经网络、粒子群优化、遗传算法等。

神经网络对于非线性函数具有良好的逼近能力, 而控制分配正是解决虚拟控制指令到操纵面输入的非线性映射。因此, 神经网络在解决控制分配问题上具有广阔潜力。

粒子群优化是一种基于迭代的优化方法, 利用初始化的一组随机解, 在解空间追随最优的粒子进行搜索, 通过逐步迭代得到最优解, 可以实现多操纵面的最优控制分配。

遗传算法是一种模仿生物进化过程的随机方法, 从问题可能潜在解集的一个种群开始, 按照适者生存和优胜劣汰的原理, 逐代演化出越来越优良的近似解, 作为问题最优解。

4 控制分配的优势与难点

4.1 控制分配的优势

将控制分配与传统控制方法进行比较, 有如下优势:

(1) 控制律与操纵面偏转中间添加控制分配过程, 当某个操纵面发生故障时, 在能力可达范围内利用控制分配算法更改操纵面偏转策略, 无需调整控制律, 便于实现容错控制。

(2) 传统控制系统中, 关键操纵面故障对飞行特性有明显影响, 控制分配降低了关键操纵面的关键性, 一定范围内可利用剩余操纵面实现预期运动。

(3) 利用控制分配方法, 可实现基于飞行任务的最优控制, 便于不同飞行阶段充分发挥飞机的潜力。

4.2 控制分配的难点

目前, 多操纵面飞机控制分配技术的研究已取得一定成果, 但仍存在许多难点, 在未来工作中需要深入研究:

(1) 控制分配方法均需考虑计算量的问题,如果计算量过大,获得结果花费大量时间,工程中使用难以保证实时性,目前多数方法仍停留在数值验证阶段,主要受到计算量的限制。设计计算快速的控制分配方法是重点发展方向。

(2) 对于多操纵面飞机,操纵面以不同形式偏转时,效率存在差异,会产生不同的控制效果。在使用加权伪逆、加权自适应等考虑权值的算法时,如何依据操纵面的使用特点设置权值,这是控制分配需要关注的难点之一。

(3) 目前多数控制分配方法基于线性模型提出,基于非线性模型的方法以数学规划为主。发展多种可用于非线性模型的方法,在工程上将具有重要应用。

5 结束语

控制分配作为多操纵面飞机的关键技术之一,在该类型飞机的未来发展中将发挥重要作用。文中列出的控制分配实现方法均有不同的优缺点,在使用时,应掌握各方法的特点,依据实际需求,选取合适的方法,实现高效可靠的控制分配。

AST

参考文献

- [1] 陈勇,董新民. 多操纵面飞行器控制分配技术的发展及应用[J]. 飞行力学, 2012, 30 (4): 289-294.
CHEN Yong, DONG Xinmin. Development and application of control allocation for multi-effector vehicle [J]. Flight Dynamics, 2012, 30 (4): 289-294. (in Chinese)

- [2] 刘艳,高正红. 基于飞行性能最优的多操纵面飞机配平研究[J]. 飞行力学, 2009, 27 (5): 17-20.
LIU Yan, GAO Zhenghong. Trimming for aircraft with multiple control effectors based on flight performance optimization [J]. Flight Dynamics, 2009, 27 (5): 17-20. (in Chinese)
- [3] 《世界飞机手册》编写组. 世界飞机手册 2011[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.
Editorial Team of World Aircraft Handbook. World aircraft handbook 2011 [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [4] 王磊,王立新,贾重任. 多操纵面飞翼布局作战飞机的控制分配方法[J]. 航空学报, 2011, 32 (4): 571-579.
WANG Lei, WANG Lixin, JIA Zhongren. Control allocation method for combat flying wing with multiple control surfaces [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32 (4): 571-579. (in Chinese)
- [5] Durham W C. Attainable moments for the constrained control allocation problem [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1994, 17 (6): 1371-1373.

作者简介

申晓明(1990—)男,硕士,助理工程师。主要研究方向: 飞机设计。

Tel: 029-86832287

E-mail: buaashenxiaoming@sina.cn

Research on the Control Allocation for Aircrafts with Multi-control Surfaces

SHEN Xiaoming*, LV Xinbo, HUANG Zhenwei

AVIC Aircraft CO., Ltd. R&D Center, Xi'an 710089, China

Abstract: The current typical overseas aircraft with multi-control surfaces and their control characteristic were presented in this thesis. It's shown that the numbers of control surfaces exceeds the control command. Then, the elements and math expression of control allocation was discussed. The solutions of control allocation were analyzed specially, and there merits and demerits were pointed out. Finally, the advantages and key points of control allocation were depicted, provide a reference for model development.

Key Words: multi-control surfaces; control allocation; control commands

Received: 2016-04-21;

Revised: 2016-07-20;

Accepted: 2016-07-25

*Corresponding author. Tel. : 029-86832287 E-mail: buaashenxiaoming@sina.cn