

doi: 10.7690/bgzd.2014.03.018

飞翼无人机舵面控制分配技术

张栋, 李春涛, 杨艺

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘要: 针对飞翼布局无人机各控制舵面之间耦合性强、实际舵机存在位置与转速约束等问题, 提出一种基于效率分级的改进直接舵面分配策略。对各舵面进行操纵效率分级, 针对每一级舵面提出一种改进的离散状态下的直接分配方法, 并用实例对各舵面的操纵能力进行仿真分析。仿真结果表明: 改进的直接分配法在舵面位置与转速 2 种约束同时存在的情况下, 能提高分配的精度, 抑制各通道的耦合现象。

关键词: 飞翼布局; 链式分配; 离散时间; 改进的直接分配法

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

Control Allocation for Effectors of Fly-Wing UAVs

Zhang Dong, Li Chuntao, Yang Yi

(College of Automation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper presents a control allocation method based on effectiveness classification using a modified way of direct allocation for the problems that the fly-wing configuration UAVs have strong control coupling, the actual actuator is simultaneously limited by position and rate of angular motion constraints. Carry out control effectiveness classification on every control surface. Aiming at every control surface, put forward direct allocation method based on modified discrete state. Then use example to carry out simulation analysis on control surface operation ability. The simulation results show that the modified direct allocation method can improve allocation precision and constrain coupling of every channel based on constrain of control surface position and rotating speed.

Keywords: flying wing configuration; chain allocation; discrete time; modified direct allocation method

0 引言

近年来, 随着无人机技术的不断发展, 新布局无人机的研究与应用越来越受到关注, 其中又以飞翼布局无人机的关注度最高。飞翼布局无人机与传统无人机三组舵面对应三轴通道的“一一”映射架构不同, 采用多操纵面结构, 提高了无人机的冗余能力。但是, 随着舵面数量的增加, 各通道操纵耦合现象明显, 即当某一舵面偏转时, 会在其余两轴通道上产生不必要的耦合力矩, 这种现象大大提高了无人机控制的难度; 同时, 由于飞翼布局无人机俯仰通道力臂短, 因此在控制时常常需要多组舵面同时使用才能产生所需的控制效应, 此时传统控制律直接输出舵面的设计思路已经不能满足其设计要求。为了解决上述问题, 相关研究人员将控制律设计和舵面偏转分离设计, 引入控制分配环节, 实时地将控制律产生的三轴力矩(或系数)分配到各个舵面上, 大大降低了多操纵面带来的控制律设计难度。

目前, 飞翼无人机控制分配方法中应用较广的有: 链式分配^[1]、广义逆和直接分配^[2-3]等, 这些方法最大的优势在于实现简单, 分配及时, 能够很好地满足实际工程的需要。其中直接分配法是由

Durham^[3]提出的一种基于转矩可达空间(available moment subset, AMS)的分配方法, 其优点在于可在舵面位置约束下最大可能地实现所需分配的量。但由于实际物理舵面除了位置约束外还存在转动速率的约束, 因此在采用链式分配思路的基础上, 结合改进的直接分配方法进行控制分配实现, 能够在舵面偏转存在位置、速率等物理约束的情况下较精确地实现力矩(或系数)的分配。

1 问题提出

样例飞翼布局无人机舵面左右对称分布, 左机翼上的舵面分布如图 1 所示。

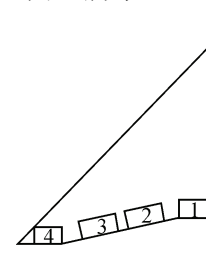


图 1 左机翼舵面分布示意图

舵面由最内侧往外分别为 1 号舵面 δ_1 、2 号舵面 δ_2 、3 号舵面 δ_3 、4 号舵面 δ_4 , 右机翼对应的为 5

收稿日期: 2013-10-10; 修回日期: 2013-11-14

基金项目: 飞行器控制一体化技术重点实验室航空科学基金资助(20125252057); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXLX12_0159); 中央高校基本科研业务费专项资金资助

作者简介: 张栋(1988—), 男, 江苏人, 在读硕士, 从事飞行控制技术研究。

号舵面 δ_5 、6号舵面 δ_6 、7号舵面 δ_7 、8号舵面 δ_8 ，如表1所示。

表1 舵面编号

升降副翼		阻力方向舵	
左机翼	右机翼	左机翼	右机翼
1	5		
2	6	4	8
3	7		

其中， δ_4 及 δ_8 为分裂式阻力方向舵，其同一时刻只有一片舵面偏转作为方向舵使用， δ_4 偏转为正， δ_8 偏转为负。其余6片舵面作为升降副翼使用。

针对样例无人机提出了如图2的控制结构。

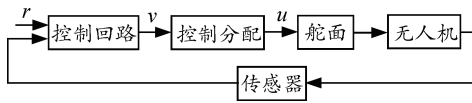


图2 控制结构

其中： r 为系统的参考输入； v 为控制器给出的伪指令； u 为实际舵面的偏转指令。控制回路根据参考输入 r 与无人机当前状态解算出伪指令 v ，该指令通过控制分配模块解算出舵面偏转指令。

在设计控制分配策略时，作如下假设：

- 1) 忽略舵面偏转产生的力效应；
- 2) 忽略舵机的动态特性。

设控制量(即实际舵面输出)为 $u \in R^m$ ，

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

实际舵面偏转时存在位置与速率约束，数学描述如式(2)~式(3)所示：

$$u_{i\min} \leq u_i \leq u_{i\max} \quad (2)$$

$$\dot{u}_{i\min} \leq \dot{u}_i \leq \dot{u}_{i\max} \quad (3)$$

其中： u_i 为第 i 个舵机的输出； \dot{u}_i 为第 i 个舵机输出的速率(即转动速率)。控制分配问题即在上述约束条件下求解式：

$$Bu = v \quad (4)$$

其中 B 为舵面操纵效率矩阵，设舵面偏转产生的力矩系数为

$$C_m = f(u, x) = C_m(u, x) \quad (5)$$

其中： u 为控制量； x 为无人机当前的状态量； $C_m(u, x)$ 为受舵面偏转影响的力矩系数。

$$C_m(u, x) = Bu \quad (6)$$

所以可得

$$B = \frac{\partial f}{\partial u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_m} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial u_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \frac{\partial f_n}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_m} \end{bmatrix} \quad (7)$$

一般情况下，无人机飞行时需要分配三轴力矩(或系数)，因此可令式(7)中 $n=3$ 。由 B 阵的形式可知，当控制量 $u_i(i=1,2,\dots,m)$ 作用时，会在所有通道上产生影响，这就是前面所提的操纵耦合问题，也是控制分配需要解决的一个重点问题。

2 链式分配

在实际工程应用中，为了提高舵面的利用效率，通常使用链式分配方法。其基本思路是将各舵面各组舵面进行分级，操纵效率高的舵面优先级高，操纵效率低的舵面优先级低^[4]。进行分配时，优先使用级别较高的舵面，当上级舵面饱和时才使用次一级舵面。其分配思路如图3所示。

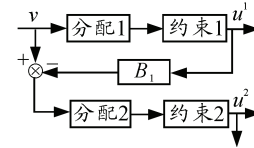


图3 链式分配原理图

其中 B_1 为第一级舵面的操纵效率矩阵。其数学描述为：将 m 个控制输入量分为 M 组，并将相应的控制效率矩阵分为 M 组，即：

$$\begin{cases} u = \begin{bmatrix} u^1 \\ u^2 \\ \vdots \\ u^M \end{bmatrix} \\ B = (B_1, B_2, \dots, B_M) \end{cases} \quad (8)$$

首先用第一组控制量来实现伪控制输入 v ，使得 $B_1 u^1 = v$ ，如果用第一组分配所得量不能满足需求，则依次使用其余组舵面来实现控制分配。其过程表示如下：

$$\begin{cases} u^1 = \text{sat}_{u^1}(P_1 v) \\ u^2 = \text{sat}_{u^2}(P_2(v - B_1 u^1)) \\ \vdots \\ u^M = \text{sat}_{u^M}(P_M(v - \sum_{i=1}^{M-1} B_i u^i)) \end{cases} \quad (9)$$

其中， $B_i P_i = I$ ， sat_{u^i} 代表第 i 级舵面偏转的位置约束，即

$$\text{sat}_{u^i} = \begin{cases} u_{\max}^i & \text{if } u^i \geq u_{\max}^i \\ u^i & \text{if } u_{\min}^i < u^i < u_{\max}^i \\ u_{\min}^i & \text{if } u^i \leq u_{\min}^i \end{cases} \quad (10)$$

为了实现舵面偏转限制下的控制分配，使用直接分配法对每一级舵面进行分配，但是由于实际舵面偏转还存在转动速率的约束，因此在直接分配法的基础上进行了改进，提出一种离散状态下的直接分配法，有效地解决了上述 2 种物理约束下的控制分配问题。

3 离散状态下的直接分配法

首先需要指出的是，为了满足实际工程需要，在链式分级时使每一级舵面都与三轴通道一一对应，因此下述直接分配法中的操纵效率矩阵维数为 3×3 。

3.1 基本原理

设各舵面偏转位置约束空间^[3]为：

$$\Omega = \{u \in R^m \mid u_{i\min} \leq u_i \leq u_{i\max}\} \subset R^m \quad (11)$$

该空间的边界子空间记为： $\partial(\Omega)$ 。

控制量 u 通过与操纵效率矩阵 B 的乘积得到伪指令 $v \in R^n$ ，即 $Bu = v$ ，其中 $B: R^m \rightarrow R^n$ 。 Ω 在 R^n 上的映射记为： Φ ，该空间称为转矩可达空间 (attainable moment subset, AMS)，记其边界子空间为 $\partial(\Phi)$ 。由于只考虑 B 阵满秩的情况，故易证得 $\partial(\Omega)$ 到 $\partial(\Phi)$ 的映射是一一对应。

记所需的三轴指令为

$$m_d = \begin{bmatrix} m_l \\ m_M \\ m_N \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中， m_l, m_M, m_N 分别为控制器给出的所需的滚转、俯仰、偏航力矩(力矩系数)。则 m_d 可看作 AMS 空间中从原点 $(0,0,0)$ 出发的一个向量，记其方向上的单位向量为 \hat{m}_d ，则有

$$\hat{m}_d = \frac{m_d}{\|m_d\|} \quad (13)$$

易知，该向量方向上的射线必与 AMS 某一表面相交，找出这个交点，求解出其对应的三轴力矩系数数量：

$$m_d^* = \begin{bmatrix} m_l^* \\ m_M^* \\ m_N^* \end{bmatrix} \quad (14)$$

即为所求三轴力矩系数方向上的最大可达解，同时求解出该点对应的控制量：

$$u_d^* = \begin{bmatrix} u_1^* \\ u_2^* \\ \vdots \\ u_m^* \end{bmatrix} \quad (15)$$

根据所需的三轴力矩系数 m_d 与 m_d^* 的大小关系求解实际需要的控制量，即

1) 当 $|m_d| \geq |m_d^*|$ 时， $u_d = u_d^*$ ；

2) 当 $|m_d| < |m_d^*|$ 时， $u_d = k u_d^*$ ，其中 k 为一个小于 1 的比例系数。

当 $|m_d| < |m_d^*|$ 时， $u_d = k u_d^*$ ，其中 k 为一个小于 1 的比例系数。

然而，实际舵面偏转除了存在位置约束外，还存在偏转速率的约束，为了更加准确地贴近实际工程的要求，笔者提出了离散状态下的直接分配法，在速率约束下能够实现较高精度的分配。由于实际飞控系统输出的为离散信号，更增加了这种方法的合理性。

设离散信号的周期为 Δt ，则在一个周期内，式 (3) 可改写为：

$$\dot{u}_{\min}^{(i)} \Delta t \leq \Delta u^{(i)} \leq \dot{u}_{\max}^{(i)} \Delta t \quad (16)$$

其中 Δu_i 为第 i 个周期内舵面的偏转。同时，由于舵面偏转可测，故式 (11) 可改写为：

$$u_{\min}^{(i)} - u^{(i-1)} \leq \Delta u^{(i)} \leq u_{\max}^{(i)} - u^{(i-1)} \quad (17)$$

其中， $u^{(i-1)}$ 为上一周期的舵面偏转量。综合式 (16)、(17) 可得单位时间内舵面约束为：

$$\Delta u_{\min}^{(i)} \leq \Delta u^{(i)} \leq \Delta u_{\max}^{(i)} \quad (18)$$

其中

$$\Delta u_{\max}^{(i)} = \min \{ \dot{u}_{\max}^{(i)} \Delta t, u_{\max}^{(i)} - u^{(i-1)} \} \quad (19)$$

$$\Delta u_{\min}^{(i)} = \max \{ \dot{u}_{\min}^{(i)} \Delta t, u_{\min}^{(i)} - u^{(i-1)} \} \quad (20)$$

这样就将速率约束问题转化为一个采样周期内的位置约束问题，此时再利用上述分配方法进行分配。

这里求出的控制量均为每一个采样周期内的控制量增量，且每个采样周期内的 AMS 空间的原点是第 $(i-1)$ 个采样周期时所求得的三轴力矩(系数)，此时待分配的量

$$\Delta m^{(i)} = m_d - m^{(i-1)} \quad (21)$$

求得的控制量为

$$u^{(i)} = u^{(i-1)} + \Delta u^{(i)} \quad (22)$$

其中， $\mathbf{m}^{(i)}$ 及 $\mathbf{u}^{(i)}$ 为第 i 个采样周期内的待分配指令及舵面偏转量。

3.2 求解控制量

求解分配量的首要问题是求解所需指令向量与 AMS 空间表面的交点。设所需的三轴指令向量为

$$\mathbf{m}_d = \begin{bmatrix} m_l \\ m_M \\ m_N \end{bmatrix} \quad (23)$$

如图 4 所示，其方向上的延长线必与 AMS 空间交于一点^[5-7]。

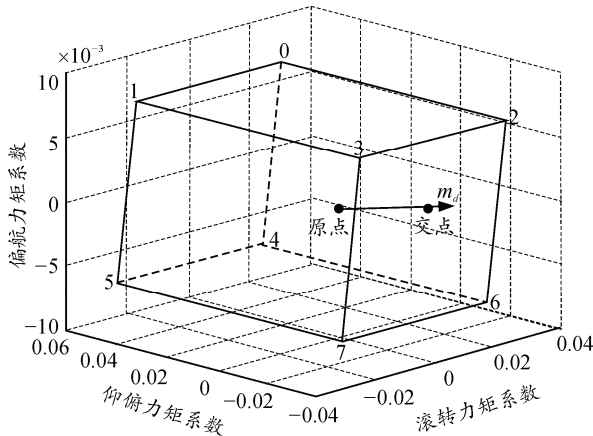


图 4 指令向量与 AMS 空间相交示意图

为了求解控制量，需要确定上述交点位于哪个面内，其方法如下：

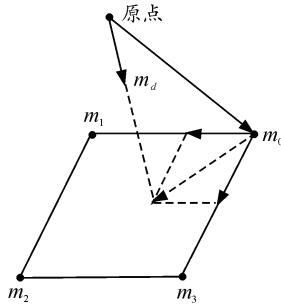


图 5 向量与面的交点位置求解示意图

如图 5 所示，面 $m_0m_1m_2m_3$ 为 AMS 某表面， \mathbf{m}_d 为所需的伪指令。取该面任一顶点 m_0 ，由其决定的两条边分别为： $\mathbf{m}_{0-1} = \mathbf{m}_1 - \mathbf{m}_0$ 、 $\mathbf{m}_{0-3} = \mathbf{m}_3 - \mathbf{m}_0$ ，令 \mathbf{m}_d 与面 $m_0m_1m_2m_3$ 相交的向量为 $a\hat{\mathbf{m}}_d$ ，则可得

$$a\hat{\mathbf{m}}_d = \mathbf{m}_0 + b\mathbf{m}_{0-1} + c\mathbf{m}_{0-3} \quad (24)$$

由于 $\hat{\mathbf{m}}_d$ 、 $[\mathbf{m}_0 : \mathbf{m}_{0-1} : \mathbf{m}_{0-3}]$ 已知，则根据式 (24) 可求得 a, b, c ，当 $a > 0$ ， $0 \leq b \leq 1$ ， $0 \leq c \leq 1$ 时， $a\hat{\mathbf{m}}_d$ 与面 $m_0m_1m_2m_3$ 的交点在 $m_0m_1m_2m_3$ 内部，否则不在该面内，需选取其他面进行计算，直至满足条件为止。

当求解出指令向量与 AMS 空间表面的交点之后，该交点对应指令向量上的最大可达解^[7]，即

$$\mathbf{m}_d^* = a\hat{\mathbf{m}}_d \quad (25)$$

其对应的舵面偏转指令为 \mathbf{u}_d^* ，则有

$$\mathbf{B}\mathbf{u}_d^* = \mathbf{m}_d^* = a\hat{\mathbf{m}}_d \quad (26)$$

结合式 (17) 可得

$$\mathbf{B}\mathbf{u}_d^* = \mathbf{B}\mathbf{u}_i^* + b\mathbf{B}\mathbf{u}_{i-j}^* + c\mathbf{B}\mathbf{u}_{i-k}^* \quad (27)$$

其中： \mathbf{u}_i^* 为 AMS 空间某顶点对应的舵面偏转向量； $\mathbf{u}_{i-j}^* = \mathbf{u}_j^* - \mathbf{u}_i^*$ ， $\mathbf{u}_{i-k}^* = \mathbf{u}_k^* - \mathbf{u}_i^*$ 。由于 $\partial(\Omega)$ 到 $\partial(\Phi)$ 的映射是一一对应的，所以由上式可得

$$\mathbf{u}_d^* = \mathbf{u}_i^* + b\mathbf{u}_{i-j}^* + c\mathbf{u}_{i-k}^* \quad (28)$$

若所需指令方向上的最大可达解 $a\hat{\mathbf{m}}_d < \mathbf{m}_d$ ，即 $a < |\mathbf{m}_d|$ ，则取 \mathbf{u}_d^* 为所求的控制量的解，此结果为所求力矩方向上的最优解；如果需求力矩向量方向上的最大可达力矩 $a\hat{\mathbf{m}}_d \geq \mathbf{m}_d$ ，即 $a \geq |\mathbf{m}_d|$ ，则可得：

$$\mathbf{u}_d = \frac{|\mathbf{m}_d|}{a} \mathbf{u}_d^* \quad (29)$$

3.3 连续性证明

工程应用中要求舵面偏转尽量避免产生大的跳动现象，反应到分配问题上即，对于连续变化的力矩系数给定，其求解得到的控制量是否连续，这里给出证明。

由 AMS 空间的表面定义可知，表面上的任一点是某 2 个控制量任意变化（显然当交点连续变化时，这 2 个量的变化是连续的），其余控制量饱和形成的，这就说明对于同一个面，其对应的操纵效率矩阵 \mathbf{B} 是定常矩阵。

由式 (29) 可得

$$\mathbf{u}_d^* = \frac{a}{|\mathbf{m}_d|} \mathbf{u}_d \quad (30)$$

代入式 (26) 化简可得

$$\mathbf{B}\mathbf{u}_d = \mathbf{m}_d \quad (31)$$

则对于任意小的需求量 $\Delta\mathbf{m}_d$ ，有

$$\mathbf{B}\Delta\mathbf{u}_d = \Delta\mathbf{m}_d \quad (32)$$

则有

$$\mathbf{B}(\mathbf{u}_d + \Delta\mathbf{u}_d) = \mathbf{m}_d + \Delta\mathbf{m}_d \quad (33)$$

令 $\mathbf{m}_d = g(x)$ ， $\mathbf{m}_d + \Delta\mathbf{m}_d = g(x + \Delta x)$ ，当需求量为连续时，有

$$g(x + \Delta x) - g(x) < \xi \quad (34)$$

恒成立，其中 ξ 为一个小量，此时有，

$$B(u_d + \Delta u_d) - Bu_d < \xi \quad (35)$$

恒成立，同时又因为 B 一定，所以可得 u_d 连续。

4 仿真验证

4.1 舵面分级

针对样例无人机，取其马赫数 $Ma = 0.2$ 为当前飞行状态，对各组舵面纵向及横侧向的操纵能力进行分析，得到各通道相应的操纵效率示意图如图 6。

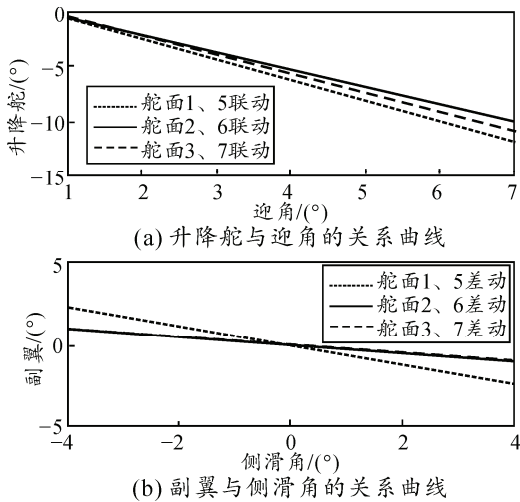


图 6 操纵效率示意图

由图 6 可知，在俯仰通道上，三组舵面操纵效率相近，其中以舵面 2、6 最高，1、5 最低；在滚转通道上，舵面 2、6 及舵面 3、7 操纵效率较接近，舵面 1、5 相比较低；同时，为了保证第二级具有足够的分配能力，对各舵面进行分级如表 2。

表 2 舵面分级

控制通道	第一级	第二级
滚转	舵面 3、7 差动	
俯仰	舵面 1、5 联动	舵面 2、6
偏航	舵面 4、8 单偏	※

注意：其中偏航通道由于只有 4、8 舵可以使用，在分配的时候需要注意第一级通道是否饱和。若第一级分配时是另 2 个通道之一饱和，则第二级分配时需将舵面 4、8 剩余的舵偏余量继续分配，以增量的形式累加到第一级的分配量上去；若第一级分配时偏航通道饱和，由于其余通道能够提供的偏航效应非常小，此时偏航通道的分配量为最大。

舵面偏转约束为：

$$-30^\circ \leq u_i \leq 30^\circ \quad (36)$$

$$-60 \text{ (}^\circ\text{)/s} \leq \dot{u}_i \leq 60 \text{ (}^\circ\text{)/s} \quad (37)$$

4.2 仿真算例 1

为验证第一级未饱和情况下控制分配的正确性及精确度，同时验证改进算法的优越性，给定待分配信号：

- 1) 滚转通道为幅值 0.03，周期 30 s 的正弦信号+随机干扰信号；
- 2) 俯仰通道为幅值 0.03，周期 30 s 的正弦信号+随机干扰信号；
- 3) 偏航通道为幅值 0.01，周期 30 s 的正弦信号+随机干扰信号。

对于操纵性线性度较好的滚转轴与偏航轴，传统直接分配法也能够满足一定的精度要求，而对于俯仰通道，由于其线性度较差，传统直接分配法无法满足要求。图 7 为传统方法下的俯仰力矩系数分配结果，图 8 为改进直接分配法的俯仰力矩系数分配结果。

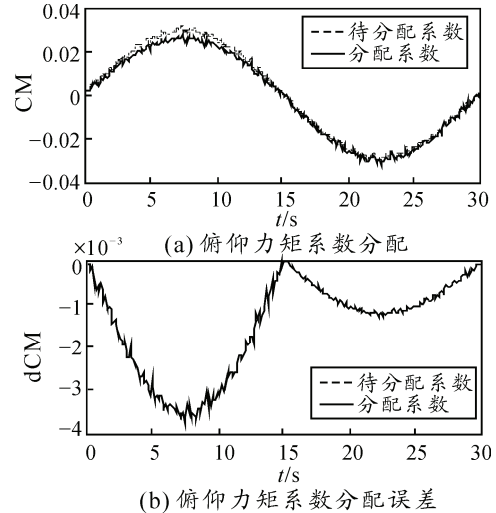


图 7 传统直接分配法：俯仰通道分配结果示意图

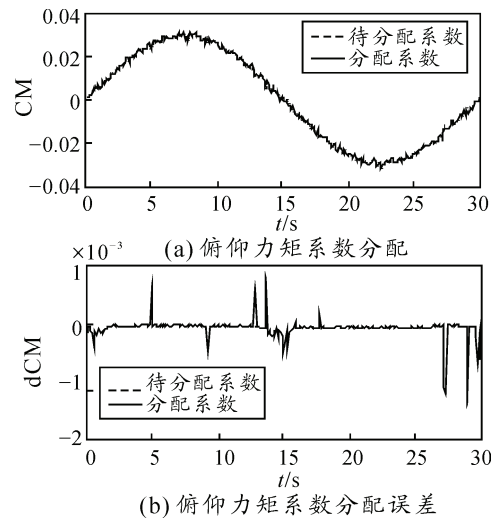


图 8 改进的直接分配法：俯仰通道分配结果示意图

由图7与图8对比可得，改进的直接分配算法在舵面位置及角速率约束下能够较精确地分配各通道所需的分配指令，俯仰轴分配精度得到了明显的改善。

4.3 仿真算例2

为验证第一级未饱和情况下分配算法对不相关通道的操纵耦合的抑制能力，分别给定待分配信号：

1) 滚转通道幅值为 0.03，周期为 30 s 的正弦信号+随机干扰信号，其余两通道给定信号恒为 0。滚转通道单独给定信号时三轴力矩系数见图 9。

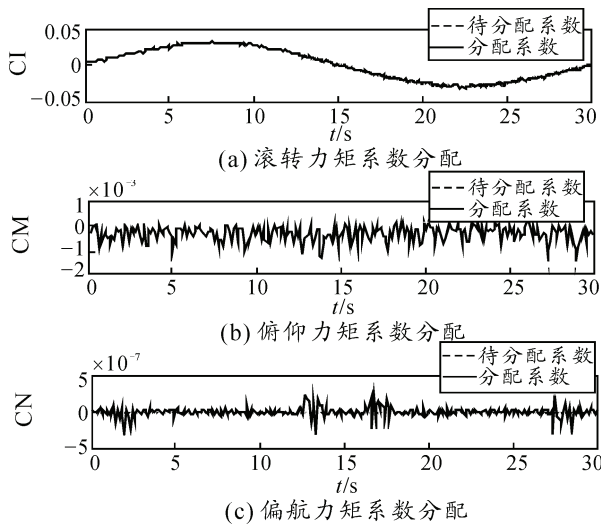


图9 滚转通道单独给定信号时三轴力矩系数

由图9可知，当只对滚转通道进行分配时，俯仰通道分配所得为 10^{-3} 量级，抑制能力相对较弱，这同样是由于舵面 1、5 偏转产生的俯仰力矩效应在舵偏为 0 附近呈现较强非线性导致的；偏航通道分配所得为 10^{-7} 量级，其对应的舵面 4、8 偏转约为 0，抑制效果较好。

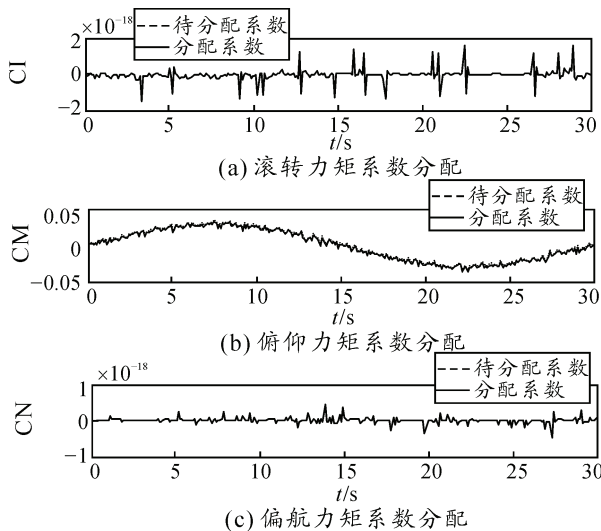


图10 俯仰通道单独给定信号时三轴力矩系数

2) 俯仰通道幅值为 0.03，周期为 30 s 的正弦信号+随机干扰信号，其余两通道给定信号恒为 0。俯仰通道单独给定信号时三轴力矩系数见图 10。

由图 10 可知，当只对俯仰通道进行分配时，滚转通道分配所得为 10^{-18} 量级，偏航通道分配所得为 10^{-19} 量级，其对应的舵面偏转约为 0，抑制效果好。

3) 偏航通道幅值为 0.01，周期为 30 s 的正弦信号+随机干扰信号，其余两通道给定信号恒为 0。偏航通道单独给定信号时三轴力矩系数见图 11。

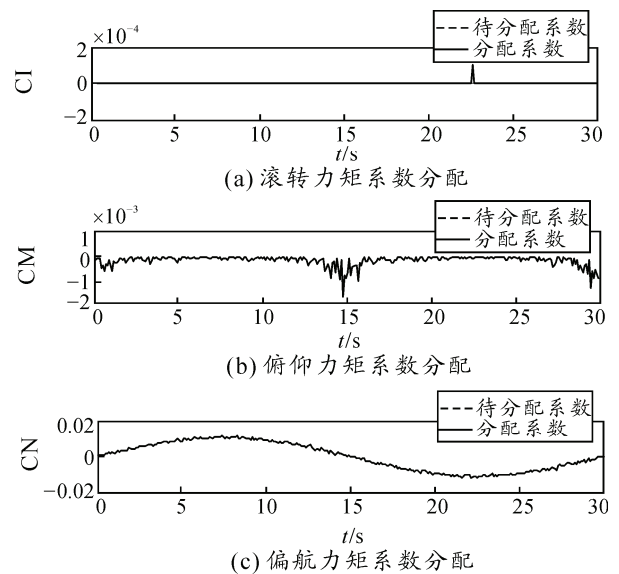


图11 偏航通道单独给定信号时三轴力矩系数

由图 11 可知，当只对偏航通道进行分配时，滚转通道分配所得为 10^{-4} 量级，其对应的舵面 3、7 偏转约为 0，抑制效果较好；俯仰通道分配所得为 10^{-3} 量级，抑制能力相对较弱，这同样是由于舵面 1、5 偏转产生的俯仰力矩效应在舵偏为 0 附近呈现一定非线性导致的。

4.4 仿真算例3

为了验证链式分配的正确性，给定待分配信号：

1) 滚转通道为幅值 0.03，周期 30 s 的正弦信号+随机干扰信号；2) 俯仰通道为幅值 0.15，周期 30 s 的正弦信号+随机干扰信号；3) 偏航通道为幅值 0.01，周期 30s 的正弦信号+随机干扰信号。

三轴通道分配结果示意图和舵面偏转示意图分别见图 12 和图 13。

由图 12 和图 13 可知，当第一级俯仰通道饱和时，第二级 2、6 舵面开始偏转；当待分配量在第一级舵面能力范围之内时，第二级舵面回零，仍然由第一级舵面进行分配，综上可知链式分配可行。

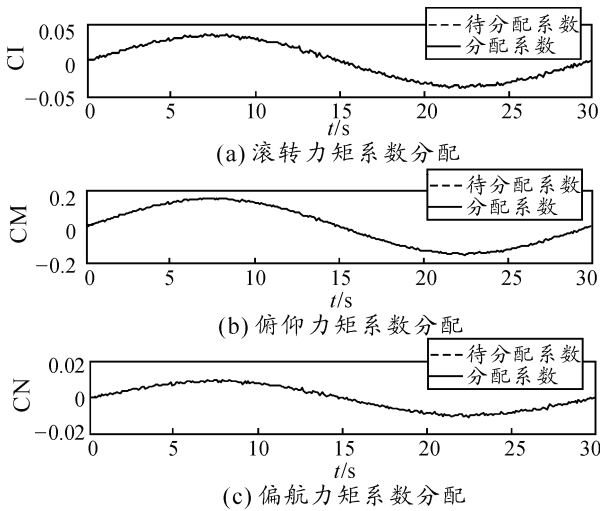


图 12 三轴通道分配结果示意图

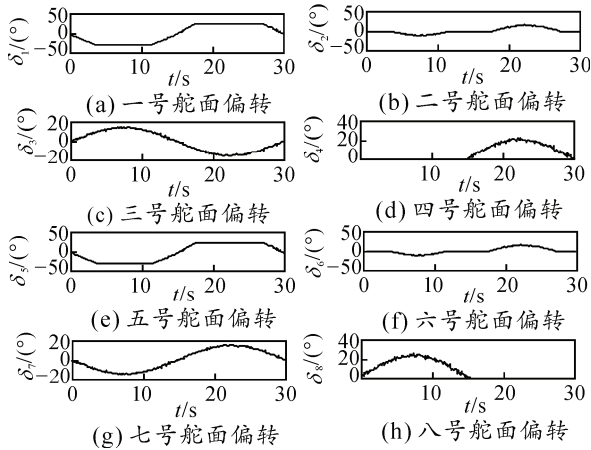


图 13 舵面偏转示意图

(上接第 57 页)

参考文献:

[1] Ross D., Lim J., Lin R., et al. Incremental learning for robust visual tracking[J]. IJCV 77 (2008) 125-141.

[2] Mei X., Ling H. Robust visual tracking and vehicle classification via sparse representation[G]. PAMI 33 (2011) 2259-2272.

[3] Avidan, S. Support vector tracking[G]. PAMI26 (2004) 1064-1072.

[4] Collins R., Liu Y., Leordeanu M. Online selection of discriminative tracking features[G]. PAMI 27(2005) 1631-1643.

[5] Achlioptas D. Database-friendly random projections[J]. Johnson- Lindenstrauss with binary coins. J. Comput. Syst. Sci 66 (2003) 671-687.

5 结束语

笔者针对舵面存在偏转位置及转动速率约束，提出了离散状态下的直接分配法，有效地解决了传统直接分配法在存在转动速率约束时不能精确分配的问题，仿真结果证实了该方法的有效性。

参考文献:

[1] Richard J. Adams, James M. Buffington, Siva S. Banda. Design of Non-linear Control Laws for High Angle-of-Attack Flight[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1994, 17(4): 737-746.

[2] Wayne C. Durham. Constrained Control Allocation[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1993, 16(4): 717-725.

[3] Wayne C. Durham. Constrained Control Allocation: Three-Moment Problem[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1994, 17(2): 330-333.

[4] 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.

[5] 张杰, 陆宇平, 徐志辉. 多操纵面受限控制直接分配新算法[J]. 飞行力学, 2012, 30(5): 422-426.

[6] 李春涛, 胡盛华. 基于动态逆的无人机飞行控制律设计[J]. 兵工自动化, 2012, 31(5): 1-4.

[7] 李卫琪, 魏晨, 陈宗基. 受限直接分配新算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(11): 1177-1180.

[8] Wayne C. Durham. Attainable moments of the constrained control allocation problem[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1994, 17(6): 1371-1373.

[6] Wright J., Yang A., Ganesh A., et al. Robust face recognition via sparse representation[G]. PAMI 31 (2009) 210-227.

[7] Viola P., Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features[J]. In CVPR (2001) 511-518.

[8] Babenko B., Yang M. H., Belongie S. Robust object tracking with online multiple Instance learning[J]. AMI 33 (2011) 1619-1632.

[9] Ng A., Jordan M. On discriminative vs. generative classifier: a comparison of logistic regression and naive bayes[J]. In NIPS (2002) 841-848.

[10] Diaconis P., Freedman D. Asymptotics of graphical projection pursuit[J]. Ann. Stat12 (1984) 228-235.

[11] Kalal Z., Mikolajczyk K., Matas J. Tracking-Learning-Detection[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on 34.7 (2012)1409-1423.