

引用格式:王伟,管永康.六旋翼无人机的控制分配[J].电光与控制,2018,25(7):43-47. WANG W, GUAN Y K. Control allocation of six-rotor UAVs[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(7):43-47.

## 六旋翼无人机的控制分配

王伟, 管永康

(南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心,南京 20044)

**摘要:**以六旋翼无人机为控制对象,针对经典控制分配方法在控制输入值过大时易出现电机转速指令值饱和的缺点,提出一种根据权重进行分配的改进方案。根据控制输入值的变化来实时更新权重系数以避免电机转速饱和。仿真结果表明所提分配方法能提高分配的合理性,抑制各通道的耦合现象,能有效提高六旋翼无人机的抗饱和性,有助于改善无人机的飞行性能。

**关键词:**六旋翼无人机; 输入饱和; 权重控制分配

**中图分类号:** V279; TP273.3 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.07.009

## Control Allocation of Six-rotor UAVs

WANG Wei, GUAN Yong-kang

(Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology,  
Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Taking a six-rotor UAV as the controlled object, and considering the shortcoming of the classical control allocation method that the motor speed command value will become saturate when the control input value is too large, we propose an improved scheme for control allocation according to the weights. The weight coefficient is updated in real time according to the changes of the control input value to avoid saturation of motor speed. The simulation results show that, the proposed method can improve the rationality of allocation, reduce the coupling of each channel, enhance the anti-saturation capability of the six-rotor UAV effectively, and improve the flight performance of the UAV.

**Key words:** six-rotor UAV; input saturation; weight control allocation

### 0 引言

近年来无人机技术发展迅速,特别是多旋翼无人机由于成本低廉、使用方便等优点,在众多领域得到了广泛的应用。随着应用的推广,对多旋翼无人机安全性能和飞行性能的要求也日益提升,因为一旦多旋翼飞行器在空中发生偶然性故障,往往会造成巨大损失<sup>[1]</sup>。目前主要采取提高无人机硬件可靠性、改进飞机结构、改进控制器等措施提升无人机的性能,本文通过改进控制分配方法来提升无人机的安全性与稳定性。

### 1 控制分配简介

控制分配方法是解决执行器冗余控制的有效方法。在六旋翼无人机的使用中,其基本思想是将上层

的电机控制指令依据某种优化目标分配给冗余电机,并确保满足电机的约束条件。为了在飞行控制中实现有效的控制分配,国内外学者提出了多种方案,主要有经典控制分配方法、动态控制分配方法、链式递增法和直接分配等<sup>[2]</sup>。经典控制分配方法由BODSON提出,该方案使用了伪逆矩阵方法,这种方法能求得执行器不饱和时的最优解,但是,这种方法不能有效解决电机转速限制问题<sup>[3]</sup>;LUO等提出一种基于模型预测控制理论框架下的动态控制分配方法,该方法能有效满足线性假设下的控制分配问题,但是这种方法对执行机构动力学模型的依赖程度较高,当模型失配或存在不确定性建模误差时性能将急剧退化<sup>[4]</sup>;链式递增法首先由BUFFITON提出,该方法的优点是容易实现,不足之处是当约束条件动态变化时,会产生较大的广义力误差<sup>[5]</sup>;直接分配法最先由DURHAM提出,该方法能有效处理边界约束问题,但当执行器的维数较多时,其可达集的求解运算量会增大,严重降低运算速度<sup>[6]</sup>。

上述4种分配方法中,经典控制分配法应用最为

收稿日期:2017-07-23

修回日期:2017-08-18

作者简介:王伟(1972—),男,黑龙江双鸭山人,博士,教授,研究方向为无人机控制。

广泛,但随着应用场景不断扩大,易发生电机输入饱和的缺点也日益明显。本文主要针对经典控制分配方法的缺点,提出一种权重控制分配方法。权重控制方法加入对控制输入的评价,在发生执行机构失效故障时,无需调整控制率<sup>[7]</sup>,就能有效提高飞机的抗饱和性。

图1为自主设计研发的植保六旋翼无人机,载重量为10 kg,负载起飞重量约为24 kg。因为载重量比较大,满载时在有强风等大扰动发生情况下容易出现分配给电机的转速指令饱和<sup>[8]</sup>。本文以此六旋翼无人机为控制对象,针对经典控制分配方法不能有效解决电机转速指令饱和的缺点,提出一种新型控制分配方法,并通过仿真来验证提出改进方案的有效性和优越性。



图1 六旋翼无人机

Fig.1 Six-rotor unmanned aerial vehicle

## 2 经典控制分配方法

### 2.1 多旋翼无人机控制分配方法

多旋翼无人机的特点主要在于动力系统具有多个电机执行器,控制分配是解决执行器冗余控制的有效方法,它可将控制系统的设计分解为基本控制率的设计与控制分配算法的设计,从而降低控制系统设计的复杂度<sup>[9]</sup>。

传统方法中,控制分配器解决了约束性系统方程问题<sup>[10]</sup>,系统可以被映射为  $g(\delta(t)) = \mathbf{V}(t)$ ,  $\delta(t)$  为输入控制信号。在多旋翼飞行器的情况下,对系统方程线性化后,根据约束性线性控制分配问题的标准,控制分配的问题可以表示为

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{V}_{\text{cmd}} \quad (1)$$

式中:  $\boldsymbol{\Omega}$  为各个电机转速的集合,  $\boldsymbol{\Omega} = (\omega_1^2 \ \omega_2^2 \ \dots \ \omega_n^2)$ , 电机个数为  $n$ ;  $\mathbf{V}_{\text{cmd}}$  是无人机各个力矩的集合,  $\mathbf{V}_{\text{cmd}} = (\mathbf{T} \ \mathbf{L} \ \mathbf{M} \ \mathbf{N})^T$ , 推力力矩为  $\mathbf{T}$ , 横滚力矩为  $\mathbf{L}$ , 俯仰力矩为  $\mathbf{M}$ , 偏航力矩为  $\mathbf{N}$ 。

假设无人机有  $n$  个旋翼, 各个电机满足  $0 < \omega_{\min}^2 \leq \omega_i^2 \leq \omega_{\max}^2$ ,  $\forall i, i = 1, 2, \dots, n$ 。给出下面定义:  $\mathbf{T}_{\min} = n\mu\omega_{\min}^2$ ,  $\mathbf{T}_{\max} = n\mu\omega_{\max}^2$ ,  $\mu$  是无人机电机生成推力的效率系数, 则

$$\mathbf{T}_{\min} \leq \mathbf{T} \leq \mathbf{T}_{\max} \quad (2)$$

### 2.2 六旋翼无人机的经典控制分配方法

如图2所示,将六旋翼无人机各轴分解到机体坐

标系,推力力矩为六轴电机推力总和,结合六旋翼无人机的结构特点,各力矩与转速的关系容易得出,由此得到六旋翼无人机的映射方程为

$$\begin{pmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{L} \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mu & \mu & \mu & \mu & \mu & \mu \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}\mu l}{2} & -\frac{\sqrt{3}\mu l}{2} & 0 & \frac{\sqrt{3}\mu l}{2} & \frac{\sqrt{3}\mu l}{2} \\ l\mu & \frac{l\mu}{2} & -\frac{l\mu}{2} & -l\mu & -\frac{l\mu}{2} & \frac{l\mu}{2} \\ -k & k & -k & k & -k & k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \\ \omega_5^2 \\ \omega_6^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

即  $\mathbf{V} = \mathbf{A}\boldsymbol{\Omega}$ 。式中:  $k$  为电机生成航向角力矩的效率系数;  $l$  为机臂长度。

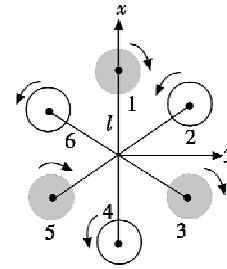


图2 六旋翼无人机分析示意图

Fig.2 Analysis of six-rotor unmanned aerial vehicles

根据  $\mathbf{A}^+ = \mathbf{A}^T(\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1}$  容易得到矩阵  $\mathbf{A}$  的伪逆矩阵  $\mathbf{A}^+$  为

$$\mathbf{A}^+ = \frac{1}{6\mu l} \begin{pmatrix} l & 0 & 2 & -\mu l k^{-1} \\ l & -\sqrt{3} & 1 & \mu l k^{-1} \\ l & -\sqrt{3} & -1 & -\mu l k^{-1} \\ l & 0 & -2 & \mu l k^{-1} \\ l & \sqrt{3} & -1 & -\mu l k^{-1} \\ l & \sqrt{3} & 1 & \mu l k^{-1} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式(4)表述了六旋翼无人机经典控制分配的伪逆矩阵。由矩阵可见,经典伪逆矩阵分配方法没有把各个电机的转速限制约束进去,各电机只能在有限范围内产生力矩和推力<sup>[6]</sup>;由此本文提出一种加入权重系数的方法来改进经典控制分配方法,能够显著提高控制力矩的可达范围。

## 3 权重控制分配方法

权重控制分配方法是在经典控制分配方法的基础上,融入权重系数  $\mathbf{W} = \text{diag}\{a; b; c; a; b; c\}$ ;  $a, b, c$  为非负数,且  $a + b + c = 1$ 。由上则有矩阵  $\mathbf{A}$  的权重伪逆矩阵  $\mathbf{A}_w^+$  为

$$\mathbf{A}_w^+ = \mathbf{W}\mathbf{A}^T(\mathbf{A}\mathbf{W}\mathbf{A}^T)^{-1} = \frac{1}{6\mu} \begin{pmatrix} 3al & 0 & 2 & -\mu l k^{-1} \\ 3bl & -\sqrt{3} & 1 & \mu l k^{-1} \\ 3cl & -\sqrt{3} & -1 & -\mu l k^{-1} \\ 3al & 0 & -2 & \mu l k^{-1} \\ 3bl & \sqrt{3} & -1 & -\mu l k^{-1} \\ 3cl & \sqrt{3} & 1 & \mu l k^{-1} \end{pmatrix} \quad (5)$$

根据  $V = A\Omega$  得到六旋翼无人机的权重控制分配方法的映射关系式为

$$\Omega = A_w^+ V \quad (6)$$

因为电机转速的约束条件  $0 < \omega_{\min}^2 \leq \omega_i^2 \leq \omega_{\max}^2$ , 得到权重分配的力矩范围

$$\begin{cases} T_{\min}l \leq 3aTl \pm 2M \mp \mu l k^{-1}N \leq T_{\max}l \\ T_{\min}l \leq 3bTl \mp \sqrt{3}L \pm M \pm \mu l k^{-1}N \leq T_{\max}l \\ T_{\min}l \leq 3cTl \mp \sqrt{3}L \mp M \pm \mu l k^{-1}N \leq T_{\max}l \end{cases} \quad (7)$$

航向角方向与横滚和俯仰方向相互不影响, 所以为简便本文论述, 可先将航向角方向力矩忽略, 只考虑推力、横滚和俯仰方向的力矩。

### 3.1 权重分配法的力矩可达值分析

将式(7)中的偏航角力矩  $N$  取0, 则式(7)可以写为

$$\begin{cases} 2|M| \leq \min\{(3aT - T_{\min})l, (T_{\max} - 3aT)l\} \\ |\sqrt{3}L - M| \leq \min\{(3bT - T_{\min})l, (T_{\max} - 3bT)l\} \\ |\sqrt{3}L + M| \leq \min\{(3cT - T_{\min})l, (T_{\max} - 3cT)l\} \end{cases} \quad (8)$$

根据式(8)分析可知, 当权重系数都为  $1/3$  时, 权重分配方法的力矩可达值表达式就是经典控制分配方法的力矩可达值表达式(经典控制分配法是一种特殊的权重控制分配方法)。当给定一组权重系数,  $T, L, M$  的可能取值在一个中心对称的多边形中, 只需找到对称多边形的边界, 就可得到权重分配方法的力矩的最大可达值。

为方便分析, 对式(8)进行处理, 令

$$\begin{cases} e = \frac{T_{\min}}{3T} \\ E = \frac{T_{\max}}{3T} \\ \bar{L} = \frac{L}{Tl} \\ \bar{M} = \frac{M}{Tl} \end{cases} \quad (9)$$

式(8)可以简化为

$$\begin{cases} 2|\bar{M}| \leq 3\min\{a - e, E - a\} \\ |\sqrt{3}\bar{L} - \bar{M}| \leq 3\min\{b - e, E - b\} \\ |\sqrt{3}\bar{L} + \bar{M}| \leq 3\min\{c - e, E - c\} \end{cases} \quad (10)$$

根据式(10), 可以分析得出经典控制分配方法和权重控制分配方法的最大  $L$  可达值。经典控制分配方法权重系数都为  $1/3$ , 解算式(10)可得最大  $\bar{L}$  取值为

$$\bar{L}_{\max}^{\text{classical}} = \begin{cases} \frac{1-3e}{\sqrt{3}} & E+e \geq \frac{2}{3} \\ \frac{3E-1}{\sqrt{3}} & E+e < \frac{2}{3} \end{cases} \quad (11)$$

权重控制分配方法(根据式(9)和式(10))为

$$\bar{L}_{\max}^{\text{weighted}} = \begin{cases} \frac{\sqrt{3}(1-3e)}{2} & E \geq 1-2e \\ \frac{\sqrt{3}(E-e)}{2} & \frac{1-e}{2} \leq E < 1-2e \\ \frac{\sqrt{3}(3E-1)}{2} & E < \frac{1-2e}{2} \end{cases} \quad (12)$$

即

$$\bar{L}_{\max}^{\text{weighted}} = \sqrt{\alpha} \quad \alpha = \min(1-3e, E-e, 3E-1) \quad (13)$$

根据式(10)和式(12)容易得到力矩与时间的变化关系的折线图(见图3)。图3为经典控制分配和权重控制分配的力矩可达值范围的比较。

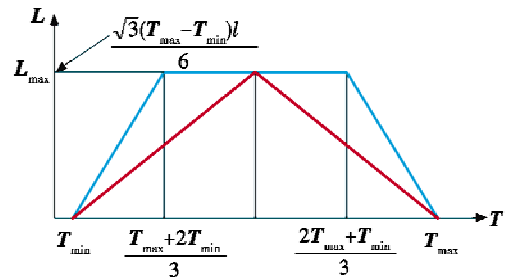


图3 权重分配方法和经典分配方法力矩可达值范围对比

Fig.3 Scopes of moments of weight allocation method and classical method

由折线图可以直观看出, 经典法(红线)的  $L$  取值范围比权重法(蓝线)小。  $L, M$  方向相同, 同理  $M$  取值范围也可得出, 根据  $L, M$  的取值范围容易得到权重法可达区域的3D显示图(见图4)。

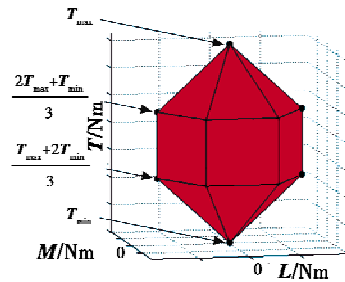


图4 权重法可达区域3D显示图

Fig.4 3D diagram of the weighted admissible region

给定满足式(1)的  $T$ , 不难得出  $L, M$  的可达值范围的六边形, 见图5。

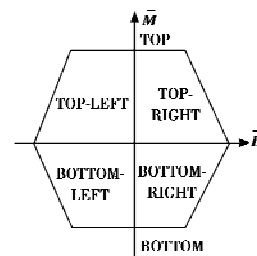


图5  $\bar{L}, \bar{M}$ 可达范围区域

Fig.5 Weighted admissible region of  $\bar{L}$  and  $\bar{M}$

根据式(12)和式(13)中的 $\alpha$ 定义,以及图5的六边形,容易得到各边界上 $L, M$ 的相互关系。

本小节在给定权重系数和 $T$ 的情况下,分析得到权重分配法的 $L, M$ 的可达值及其相互关系表达式,下文将会根据不同 $L, M$ 的取值,给出权重系数的求解方法。

### 3.2 权重系数的求解方法

给定一组 $(T, L, M)$ ,可以计算出式(8)中权重伪逆矩阵的权重系数 $a, b, c$ 。根据给定的 $(L, M)$ 所在的不同区域,结合上文给出的模型图,可以大体分为两种情形:1) 设置点 $(\bar{L}, \bar{M})$ 在权重分配法力矩可达区域的边界;2) 设置点 $(\bar{L}, \bar{M})$ 在权重分配法力矩可达区域的内部,下文针对两种情况分别给出权重系数的计算方法。

#### 3.2.1 设置点在可达区域边界,计算权重系数

当设置点在可达区域边界,为满足式(8)中的约束条件,针对式(11)、式(13)中3种情况进行讨论计算。

1) 情况1。 $E \geq 1 - 2e (T_{\min} \leq T \leq \frac{T_{\max} + 2T_{\min}}{3})$ 。

① 在上下边界:

$$b = \frac{1+e}{4} - \operatorname{sgn}(\bar{M}) \frac{\bar{L}}{\sqrt{3}}, a = \frac{1-e}{2}, c = 1 - a - b。$$

② 在左上和右下边界:

$$c = \frac{-1+5e}{2} + \frac{2|\bar{L}|}{\sqrt{3}}, b = \frac{1-e}{2}, a = 1 - b - c。$$

③ 在右上和左下边界:

$$b = \frac{-1+5e}{2} + \frac{2|\bar{L}|}{\sqrt{3}}, c = \frac{1-e}{2}, a = 1 - b - c。$$

2) 情况2。 $\frac{1-e}{2} \leq E < 1 - 2e (\frac{T_{\max} + 2T_{\min}}{3} \leq T \leq \frac{2T_{\max} + T_{\min}}{3})$ 。

① 在上下边界:

$$b = \frac{2-E-e}{4} - \operatorname{sgn}((E+e-\frac{2}{3})\bar{L}\bar{M}) \min\left(\frac{|\bar{L}|}{\sqrt{3}}, \frac{|3E+3e-2|}{4}\right), a = \frac{E+e}{2}, c = 1 - a - b。$$

② 在左上和右下边界:

$$c = \begin{cases} \frac{1-2E+e}{2} + \max\left(\min\left(\frac{2|\bar{L}|}{\sqrt{3}}, \frac{3E-1}{2}\right), \frac{1-3E}{2}\right) & E+e \geq \frac{2}{3} \\ \frac{1+E-2e}{2} - \min\left(\max\left(\frac{2|\bar{L}|}{\sqrt{3}}, \frac{3E-1}{2}\right), \frac{1-3e}{2}\right) & \text{其他} \end{cases}$$

$$b = \frac{E+e}{2}, a = 1 - b - c。$$

③ 在右上和左下边界:

$$b = \begin{cases} \frac{1-2E+e}{2} + \max\left(\min\left(\frac{2|\bar{L}|}{\sqrt{3}}, \frac{3E-1}{2}\right), \frac{1-3E}{2}\right) & E+e \geq \frac{2}{3} \\ \frac{1+E-2e}{2} - \min\left(\max\left(\frac{2|\bar{L}|}{\sqrt{3}}, \frac{3E-1}{2}\right), \frac{1-3e}{2}\right) & \text{其他} \end{cases}$$

$$c = \frac{E+e}{2}, a = 1 - b - c。$$

3) 情况3。 $E < \frac{1-e}{2} (\frac{2T_{\max} + T_{\min}}{3} < T \leq T_{\max})$ 。

① 在上下边界:

$$b = \frac{1+E}{4} + \operatorname{sgn}(\bar{M}) \frac{\bar{L}}{\sqrt{3}}, a = \frac{1-E}{2}, c = 1 - a - b。$$

② 在左上和右下边界:

$$c = \frac{-1+5E}{2} - \frac{2|\bar{L}|}{\sqrt{3}}, b = \frac{1-E}{2}, a = 1 - b - c。$$

③ 在右上和左下边界:

$$b = \frac{-1+5E}{2} - \frac{2|\bar{L}|}{\sqrt{3}}, c = \frac{1-E}{2}, a = 1 - b - c。$$

上文给出的权重系数都是 $L, M$ 在可达区域的边界上, $L, M$ 可能是不同取值,但是都在3D可达区域的模型图内。从上述讨论也可以看出,不同的设置点取值会导致权重系数的相应变化。本文以 $E=0.8, e=0.2$ (情况1)为例,给出设置点的取值,如图6所示。

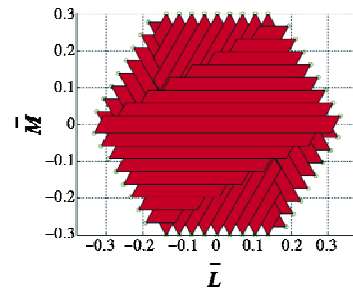


图6 参考设置点(绿圈)与权重系数对应的可达区域(红色多边形)

Fig. 6 Admissible regions (red polygons) corresponding to the set points (green circles) and weight coefficients

图6为参考设置点和扭矩取值的分布图(纵横坐标分别为 $L, M$ 方向单位化后的取值范围)。从图6可知,每个参考设置点都能满足式(10)中的约束条件。

#### 3.2.2 设置点在可达区域内部,计算权重系数

当设置点在权重法可达区域内部,可以将设置点投射到可达区域的边界,沿着这个方向连接原点与可达区域边界上的点,先求出可达区域边界上的点对应的权重系数,再计算设置点相应的权重系数。特殊的,当设置点在经典可达区域的内部时,权重系数可直接得出,即 $a=b=c=1/3$ (上文已知经典分配方法是一种特殊的权重控制分配方法<sup>[5]</sup>)。下面给出设置点在可达区域内部时的权重系数求解方法。

1) 设置点 $(\bar{L}, \bar{M})$ 在经典分配方法可达区域内部或者边界上: $a = b = c = 1/3$ 。

2) 设置点 $(\bar{L}, \bar{M})$ 在经典分配方法可达区域外部, 在权重分配方法可达区域内部。首先, 将设置点 $(\bar{L}, \bar{M})$ 分别投影到经典分配法和权重分配法的可达区域边界上得到 $(\bar{L}_w, \bar{M}_w)$ 和 $(\bar{L}_c, \bar{M}_c)$  (如图7所示)。根据上文提出的设置点在可达区域边界上的权重系数的求解方法, 求得设置点 $(\bar{L}_w, \bar{M}_w)$ 对应的权重系数 $a_w, b_w, c_w$ , 最后利用插值法计算权重系数

$$\begin{cases} a = \frac{1}{3} + (a_w - \frac{1}{3})\delta \\ b = \frac{1}{3} + (b_w - \frac{1}{3})\delta \\ c = 1 - a - b \\ \delta = \begin{cases} \frac{\bar{L} - \bar{L}_c}{\bar{L}_w - \bar{L}_c} & \bar{M}_w = \bar{M}_c \\ \frac{\bar{M} - \bar{M}_c}{\bar{M}_w - \bar{M}_c} & \text{其他} \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

图7中红线代表设置点 $(L, M)$ 根据式(8)的约束条件形成的可达区域, 如果设置点连续变化, 上文提出的插值法保证权重系数也连续变化。

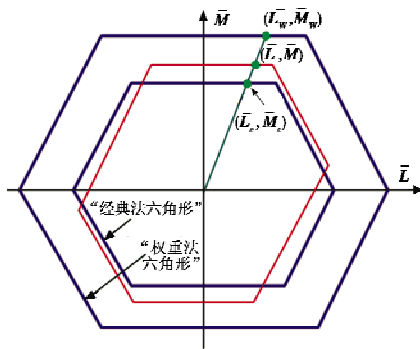


图7 插值法求解权重系数分析图  
Fig.7 Analysis of interpolation method for weighted coefficients

### 3.3 对航向角的分析

此时 $N \neq 0$ , 根据式(7),  $N$ 越大,  $(L, M)$ 空间越小, 所以 $N$ 的值不能太大。定义 $T_N = \mu k^{-1} N_{\max}, \bar{T}_{\min} = T_{\min} + T_N, \bar{T}_{\max} = T_{\max} - T_N$ 。

由此, 求解方法与上文相似, 本文不再赘述。

## 4 仿真实验验证与分析

为了验证本文设计的权重分配法的效果, 进行仿真实验。如图8所示(横坐标为时间, 纵坐标为归一化

后的扭矩输出值), 在相同大目标值输入(蓝线)的情况下, 经典控制分配方法的实际输出扭矩(绿线)相比权重控制分配方法的实际输出扭矩(红线)在任何时刻都小(即权重控制分配方法的可达区域始终比经典控制分配的可达区域大)。

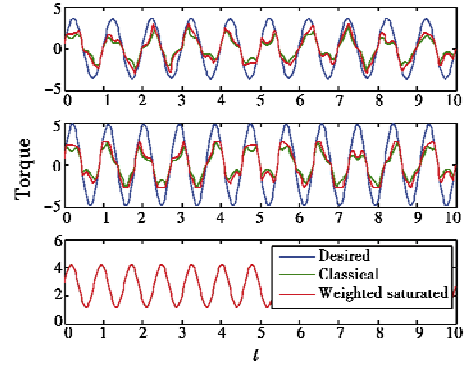


图8 仿真实验分析  
Fig.8 Analysis of simulation

## 5 结论

以上论述与仿真结果表明, 本文提出的新型权重控制分配方法明显优于经典控制分配方法, 能加大六旋翼无人机的有效输出, 提升无人机的安全性与稳定性。

### 参考文献

- [1] 陈阳, 梁焜, 王世勇, 等. 基于滑模与控制分配的六旋翼飞行器容错控制[J]. 电光与控制, 2014, 21(5): 24-28.
- [2] YANG Y. The fault tolerant control of hexacopter [D]. Chiba: Chiba University, 2017.
- [3] 陈勇, 易坚, 董新民, 等. 多操纵面飞机变参数动态控制分配策略[J]. 控制与决策, 2016, 31(6): 1015-1020.
- [4] 宋筱祺. 基于自适应技术的不确定系统容错控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [5] 张鸿翔. 推力矢量飞行器容错控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [6] 李丽荣, 刘春生, 韩璞. 基于智能控制的多操纵面飞行器控制分配研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(6): 19-22.
- [7] 陈阳, 梁焜, 王世勇, 等. 基于滑模与控制分配的六旋翼飞行器容错控制[J]. 电光与控制, 2014, 21(5): 24-28.
- [8] 曹翔宇, 胡昌华, 乔俊峰, 等. 基于故障补偿思想的导弹执行机构主动容错控制研究[J]. 电光与控制, 2013, 20(3): 30-34.
- [9] 苗楠. 基于控制分配的航天器姿态容错控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [10] 刘凯悦, 冷建伟. 四旋翼无人机的自适应容错控制[J]. 电光与控制, 2017, 24(8): 104-108.