

# 某型直升机旋翼载荷模拟系统力耦合性分析

## Force Coupling Analysis of Helicopter Main Rotor Blade's Loading Analog System

西北工业大学自动化学院 屈魏华 袁朝辉  
中国直升机设计研究所 陈林青 林景红

**[摘要]** 直升机主桨载荷模拟系统是一个多输入多输出液压伺服加载系统,该系统助力器和加载缸之间存在复杂的非线性耦合关系。通过建立系统的数学模型分析了该系统存在的力耦合关系,发现其造成的影响在系统允许的误差范围之内,因此可忽略这部分耦合因素。从而为简化系统控制策略提供依据。

**关键词:** 液压伺服加载系统 多输入多输出 力耦合

**[ABSTRACT]** The load simulation system of the helicopter rotor blade is a MIMO hydraulic servo loading analog system. And there are complicated non-linear coupling relationships among the booster and the loading cylinders in this system. After mathematical model is established and the force coupling relationship is analyzed, it is found that the effect of error is within the scope of the system's permission. So the displacement of the coupling between channels can be ignored. Thus it provides the basis to simplify system control strategy.

**Keywords:** Hydraulic servo loading system MIMO Force coupling

直升机主桨载荷模拟系统是在实验室条件下,模拟直升机飞行过程中的气动载荷情况,完成对直升机液压系统性能的考核<sup>[1]</sup>。

直升机主桨桨叶在飞行过程中受到的气动载荷通过桨毂、变距杆、自动倾斜器传递到3个助力器上<sup>[2]</sup>。对于液压系统的试验可将气动载荷折算到3个助力器上,载荷模拟系统采用三通道加载模拟上述载荷。图1为该主桨载荷模拟系统的结构示意图,上半部分为3套加载缸,下半部分为3个助力器,加载缸的下支点通过自动倾斜器模拟件上的连接件与助力器的上支点相连接,构成一个联动的整体。助力器依据操作输入驱动自动倾斜器运动,加载装置在跟随自动倾斜器运动的同时完成各通道力的控制,该系统为多输入多输出(MIMO)耦合系统。

对于这类MIMO耦合系统的控制,通常是依据耦合数学模型设计解耦控制算法。但是所建立的耦合数学模型与实际系统的特性往往存在着差异,依据耦合模型

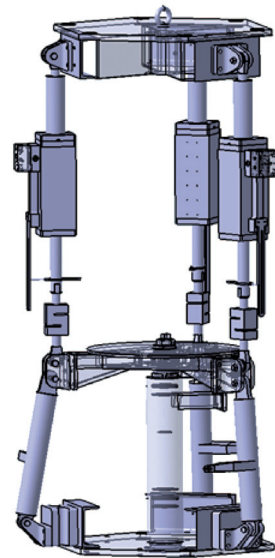


图1 主桨负载模拟系统结构示意图  
Fig.1 Structure diagram of main rotor blades load simulation system

的解耦算法其实际应用效果并不理想。工程上,常通过耦合关系的分析和简化得到一个相对简单易于实现的控制策略。本文通过对上述载荷模拟系统的3个助力器和3个加载缸耦合关系的分析,给出该MIMO耦合系统的简化控制策略的依据。

### 1 多通道载荷模拟系统的结构原理

由图2可知:前助力器上支点 $A'$ 在 $X$ 轴上, $B'$ 是后助力器1的上支点, $C'$ 是后助力器2的上支点,前助力器,后助力器1、2在其最短行程状态时分别与中心轴 $z$ 轴有 $10^\circ$ 和 $5^\circ$ 的倾角。

### 2 自动倾斜器模拟盘倾角及轴高的计算

图3是沿前助力器1上支点与自动倾斜器模拟盘中心连线垂直方向剖面图,其中: $A$ 是前助力器1下支点, $OO'$ 是中心轴线, $A'n'$ 为自动倾斜器平面,且已知: $A'O'=O'n'=r$ ,前助力器1下支点与中心轴线距离 $AO=R_1$ ,前助力器1的长度 $l_1$ ,后助力器2下支点 $B$ 与中心轴线距离 $BO=R_2$ ,后助力器3下支点 $C$ 与中心轴线距离 $CO=R_3$ ;后助力器2的长度为 $l_2$ ,后助力器3的长度

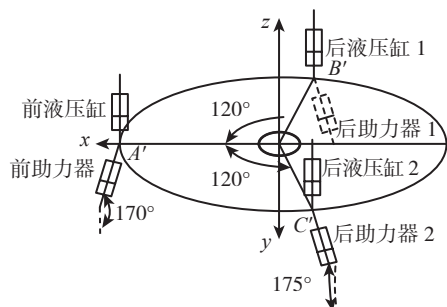


图2 对顶结构示意图  
Fig.2 Opposite vertex structure diagram

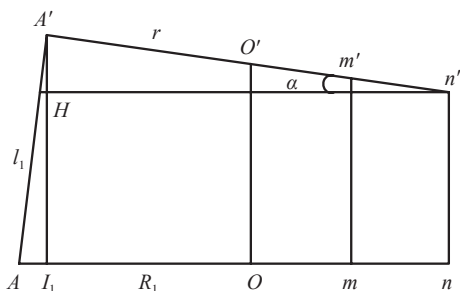


图3 沿AA'O'平面剖面示意图  
Fig.3 Cross-section diagram along the AA'O' plane

为  $l_3$ 。

由图3中几何关系可得：

$$\begin{cases} AI_1 = R_1 - \frac{1}{2}Hn' = R_1 - r \cos \alpha \\ h_1 = A'I_1 = \sqrt{AA'^2 - AI_1^2} \\ nn' = A'I_1 - A'H \\ h_0 = OO' = A'I_1 - \frac{1}{2}A'H \end{cases}$$

即有：

$$\begin{cases} h_1 = \sqrt{l_1^2 - (R_1 - r \cos \alpha)^2} \\ h_0 = h_1 - r \sin \alpha \end{cases}, \quad (1)$$

同理,对于后助力器2可推导出：

$$\begin{cases} h_2 = \sqrt{l_2^2 - (R_2 - r \cos \beta)^2} \\ h_0 = h_2 + r \sin \beta \end{cases}, \quad (2)$$

对于后助力器3可推导出：

$$\begin{cases} h_3 = \sqrt{l_3^2 - (R_3 - r \cos \gamma)^2} \\ h_0 = h_3 + r \sin \gamma \end{cases}. \quad (3)$$

3个助力器的上支点位于自动倾斜器模拟盘上,3个活塞杆的伸缩运动共同作用下,自动倾斜器模拟盘会有沿着z轴方向的直线运动和关于XOY平面的偏转运动。如图4所示,  $A'I$ 是前助力器1上支点到XOY平面的垂线,  $B'F$ 是后助力器2上支点到XOY平面的垂线,  $C'E$ 是后助力器3上支点到XOY平面的垂线。

由图4空间关系知：

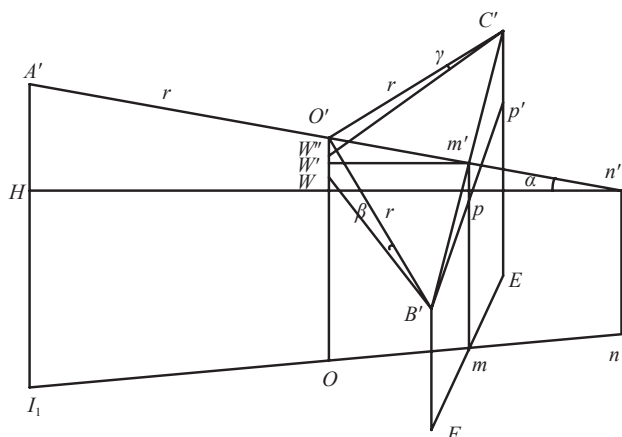


图4 3个助力器空间关系图  
Fig.4 Three boosters space relation graph

$$\begin{cases} AI_1 + nn' = 2OO'; OO' + nn' = B'F + C'E; O'W' = \frac{r \sin \alpha}{2} \\ C'P' = C'E - B'F; O'W = O'W' + \frac{C'P'}{2}; O'W'' = O'W - \frac{C'P'}{2} \\ \sin \beta = \frac{O'W}{O'B'}; \sin \gamma = \frac{O'W''}{O'C'} \end{cases}$$

即有：

$$\begin{cases} 3h_0 - h_1 = h_2 + h_3 \\ \sin \beta = \frac{1}{2} \sin \alpha + \frac{1}{2r} (h_3 - h_2) \\ \sin \gamma = \frac{1}{2} \sin \alpha - \frac{1}{2r} (h_3 - h_2) \end{cases}. \quad (4)$$

故联立式(1)、(2)、(3)、(4)可推导出：

$$\begin{cases} \sin \alpha = \sin \beta + \sin \gamma \\ \sin \beta - \sin \gamma = \frac{1}{r} (\sqrt{l_3^2 - (R_3 - r \cos \gamma)^2} - \sqrt{l_2^2 - (R_2 - r \cos \beta)^2}) \\ \sqrt{l_1^2 - (R_1 - r \cos \alpha)^2} - 3r \sin \alpha = \sqrt{l_3^2 - (R_3 - r \cos \gamma)^2} + \sqrt{l_2^2 - (R_2 - r \cos \beta)^2} \end{cases}. \quad (5)$$

在方程组(5)中,仅有3个夹角  $\alpha, \beta, \gamma$  是未知参数,故可确定：

$$\begin{cases} \alpha = g_1(l_1, l_2, l_3) \\ \beta = g_2(l_1, l_2, l_3) \\ \gamma = g_3(l_1, l_2, l_3) \\ h_0 = \sqrt{l_1^2 - (R_1 - r \cos \alpha)^2} - r \sin \alpha \end{cases}. \quad (6)$$

### 3 加载缸长度及倾角的计算

已知中间轴  $OO''$  的高度是固定不变的,即  $OO'' = h_0$ 。再假设  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_1', \theta_2', \theta_3'$  分别为3个助力器和3个液压缸与Z轴之间的夹角。设  $AD = a$ 。

对图5(a)进行分析可知,前助力器1与前加载缸1满足如下关系：

$$\begin{aligned} A'D' &= OO'' - A'I, \text{ 即 } h'_1 = H - h_1; \\ A''D' &= A''O'' - D'O'', \text{ 则 } A'D' = r - r \cdot \cos \alpha; \end{aligned}$$

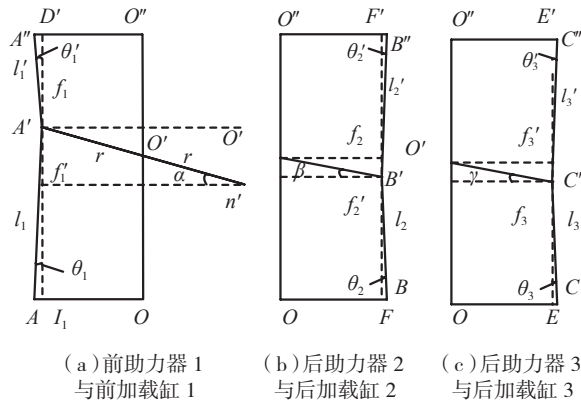


图5 模拟支架剖面几何示意图

Fig.5 Sectional geometry diagram of the simulation support

$$\tan \theta' = \frac{A'D'}{A'D'}$$

利用以上 3 个关系式可解出:

$$\theta_1 = \eta_1(\alpha, h_1), \quad (7a)$$

$$\text{从而 } l_1 = \frac{H - h_1}{\cos \theta_1}. \quad (7b)$$

同理对图 5 (b) 进行分析可得:

$$\theta_2 = \eta_2(\beta, h_2), \quad (8a)$$

$$l_2 = \frac{H - h_2}{\cos \theta_2}. \quad (8b)$$

对图 5 (c) 进行分析可得:

$$\theta_3 = \eta_3(\gamma, h_3), \quad (9a)$$

$$l_3 = \frac{H - h_3}{\cos \theta_3}. \quad (9b)$$

$$\text{又因为 } \begin{cases} AI_1 = R_1 - r \cos \alpha \\ \sin \theta_1 = \frac{AI_1}{l_1} \end{cases},$$

$$\text{所以有 } \theta_1 = \sin^{-1} \left( \frac{R_1 - r \cos \alpha}{l_1} \right). \quad (10)$$

同理可推导得:

$$\begin{cases} \theta_2 = \sin^{-1} \left( \frac{R_2 - r \cos \beta}{l_2} \right) \\ \theta_3 = \sin^{-1} \left( \frac{R_3 - r \cos \gamma}{l_3} \right) \end{cases}. \quad (11)$$

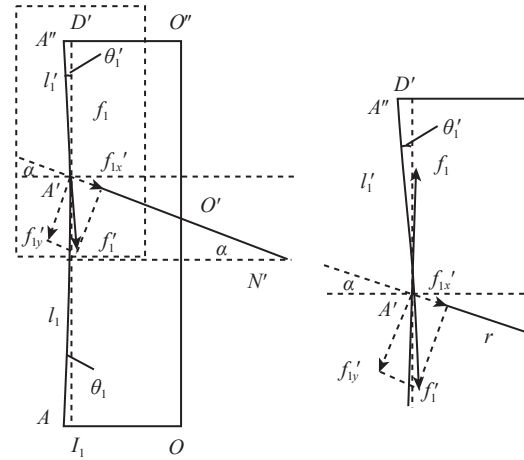
### 4 3 个加载缸与 3 个助力器的力耦合关系

假设自动倾斜器模拟盘沿  $x$ 、 $y$  轴的转动惯量分别为  $J_x$ 、 $J_y$ , 角加速度分别为  $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$ ,  $f_i'$  为负载缸原始输出力,  $f_i$  为负载缸输出力为  $f_i'$  时助力器的受力。

根据图 6 和刚体对定轴的转动定律进行分析可知:

$$\sin \frac{\pi}{3} \cdot M_{\theta\beta} + \sin \frac{\pi}{3} \cdot M_{\theta\gamma} = J_x \alpha_x, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} [f_1' \cos(\theta_1 + \alpha) \times r - f_1 \cos(\theta_1 + \alpha) \times r] - \\ \sin \frac{\pi}{6} \cdot M_{\theta\beta} + \sin \frac{\pi}{6} \cdot M_{\theta\gamma} = J_y \alpha_y \end{aligned}, \quad (13)$$



(a) 沿  $xz$  平面剖面力关系示意图 (b) 曲线框局部放大图

图6 模拟支架剖面力关系示意图

Fig.6 Sectional force relationship diagram of the simulation support

$$\begin{aligned} f_1 \cos \theta_1 - f_1' \cos \theta_1 + f_2 \cos \theta_2 - f_2' \cos \theta_2 + \\ f_3' \cos \theta_3 - f_3 \cos \theta_3 = m(a - g) \end{aligned}, \quad (14)$$

其中:

$$M_{\theta\beta} = f_2' \cos(\theta_2 + \beta) \times r - f_2 \cos(\theta_2 + \beta) \times r,$$

$$M_{\theta\gamma} = f_3' \cos(\theta_3 + \gamma) \times r - f_3 \cos(\theta_3 + \gamma) \times r;$$

则式(12)、(13)、(14)列成矩阵形式为:

$$AF' = BF + k, \quad (15)$$

其中:

$$F = [f_1 \quad f_2 \quad f_3]^T, F' = [f_1' \quad f_2' \quad f_3']^T,$$

$$k = \begin{bmatrix} J_x \alpha_x \\ J_y \alpha_y \\ m(a - g) \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\theta_2 + \beta) \times r & -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\theta_3 + \gamma) \\ \cos(\theta_1 + \alpha) \times r & -\frac{1}{2} \cos(\theta_2 + \beta) \times r & \frac{1}{2} \cos(\theta_3 + \gamma) \times r \\ -\cos \theta_1 & -\cos \theta & \cos \theta_3 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\theta_2 + \beta) \times r & -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\theta_3 + \gamma) \times r \\ \cos(\theta_1 + \alpha) \times r & -\frac{1}{2} \cos(\theta_2 + \beta) \times r & \frac{1}{2} \cos(\theta_3 + \gamma) \times r \\ -\cos \theta_1 & -\cos \theta_2 & \cos \theta_3 \end{bmatrix},$$

则有:

$$F'(S) = A^{-1}B \cdot F(S) + A^{-1}k. \quad (16)$$

由式(16)证实了直升机液压系统试验旋翼加载系统是一个 MIMO 耦合系统, 系统各状态变量间存在复杂的非线性关系。

以  $f_1(s)$  所在通道, 即前负载缸与前助力器所在通道为例, 可推导得:

$$\begin{aligned} f_1'(s) = A^{-1}B [1 \quad 2] \cdot \left[ \frac{G_{N1}(S)}{G_D(S)} x_{v1} - \frac{G_{N2}(S)}{G_D(S)} x_{d1} \right] + \\ A^{-1}B [1 \quad 2] \cdot f_2(s) + A^{-1}B [1 \quad 3] \cdot f_3(s) + A^{-1}k[1] \end{aligned}, \quad (17)$$

$$\text{其中: } f_1(s) = \frac{G_{N1}(S) \cdot x_{v1} - G_{N2}(S) \cdot x_{d1}}{G_D(S)} \circ$$

由式(17)可以看出,前助力器受到的力有4部分:其一为本通道依据输入指令产生的输出力,如式(17)右边第1项所示;其二为另两个载荷模拟通道作用在前负载缸模拟通道上的耦合力,如式(17)右边中间两项所示;其三为自动倾斜器模拟件的惯性力,如式(17)右边第4项所示。

### 5 多通道系统力耦合分析

根据加载缸设计尺寸和自动倾斜器模拟组件设计尺寸可知,加载缸最小长度  $l_{\min} = 980\text{mm}$ ,自动倾斜器模拟盘半径  $r = 383\text{mm}$ 。由图5可知:

$$\sin \theta_1' = \frac{r(1 - \cos \alpha)}{l} < \frac{383.4(1 - \cos \alpha)}{980}, \text{ 且系统}$$

指标  $|\alpha| < \pm 3^\circ$ 。故可推算出  $\theta_1' < 0.03^\circ$ 。

同理系统指标  $|\beta| < \pm 7^\circ$  时,  $\theta_2' < 0.167^\circ$ ;  $|\gamma| < \pm 7^\circ$  时,  $\theta_3' < 0.167^\circ$ ,故可做如下近似:

$$f_1' \cos \theta_1' \approx f_1', f_2' \cos \theta_2' \approx f_2', f_3' \cos \theta_3' \approx f_3' \quad (18)$$

此时,计算  $f_2'$  和  $f_1' \cos(\theta_1' + \alpha)$  之间以及  $f_2 \cos \beta$  和  $f_2 \cos(\beta - \theta_2)$  之间的差距为:

$$\begin{cases} \frac{|f_1' \cos(\theta_1' + \alpha) - f_1'|}{f_1' \cos(\theta_1' + \alpha)} \times 100\% < 0.140\% \\ \frac{|f_2' \cos(\theta_2 + \beta) - f_2'|}{f_2' \cos(\theta_2 + \beta)} \times 100\% < 0.787\% \\ \frac{|f_3' \cos(\theta_3 + \gamma) - f_3'|}{f_3' \cos(\theta_3 + \gamma)} \times 100\% < 0.787\% \end{cases}$$

从而可做如下近似:

$$f_1' \cos(\theta_1 + \alpha) \approx f_1', f_2' \cos(\theta_2 + \beta) \approx f_2', f_3' \cos(\theta_3 + \gamma) \approx f_3' \quad (19)$$

由第1节可知:  $\theta_1 < 10^\circ$ ,  $\theta_2 < 5^\circ$ ,  $\theta_3 < 5^\circ$ ; 又根据3个助力器空间安装关系,经计算测量有:

$$|\theta_1 + \alpha| < 13^\circ, |\theta_2 + \beta| < 12^\circ, |\theta_3 + \gamma| < 12^\circ \circ$$

此时,计算  $f_2$  和  $f_2 \cos \theta_2$  之间以及  $f_2$  和  $f_2 \cos(\beta - \theta_2)$  之间的差距:

$$\begin{cases} \frac{|f_2 \cos \theta_2 - f_2|}{f_2 \cos \theta_2} \times 100\% < 0.382\% \\ \frac{|f_2 \cos(\theta_2 + \beta) - f_2|}{f_2 \cos(\theta_2 + \beta)} \times 100\% < 2.23\% \end{cases} \quad (20)$$

由式(20)可知,  $f_2$  和  $f_2 \cos \theta_2$  之间以及  $f_2 \cos \alpha$  和  $f_2 \cos(\alpha - \theta_2)$  之间的差距很小,满足5%的技术要求。同理做如下近似,

$$\begin{cases} f_2 \cos \theta_2 \approx f_2 \\ f_2 \cos(\theta_2 + \beta) \approx f_2 \end{cases} \quad (21)$$

$$\text{同理: } \begin{cases} f_3 \cos \theta_3 \approx f_3 \\ f_3 \cos(\theta_3 + \gamma) \approx f_3 \end{cases} \quad (22)$$

此时,计算  $f_1 \cos \theta_1$  和  $f_1 \cos(\alpha + \theta_1)$  之间的差距:

$$\frac{|f_1 \cos(\theta_1 + \alpha) - f_1 \cos \theta_1|}{f_1 \cos(\theta_1 + \alpha)} \times 100\% < 1.07\% \quad (23)$$

由式(23)可知,  $f_1 \cos \theta_1$  和  $f_1 \cos(\alpha + \theta_1)$  之间的差距很小,满足5%的技术要求。因此,做如下近似:

$$f_1 \cos(\theta_1 + \alpha) \approx f_1 \cos \theta_1 \quad (24)$$

将式(18)、(19)、(21)、(22)和(24)代入式(12)、(13)和(14)改写为:

$$\begin{cases} \frac{\sqrt{3}}{2}(f_2' - f_2 + f_3' - f_3) = J_x a_x \\ f_1' - f_1 \cos \theta_1 - \frac{1}{2}(f_2' - f_2) + \frac{1}{2}(f_3' - f_3) = \\ J_y a_y - f_1' + f_1 \cos \theta_1 - f_2' + f_2 + f_3' - f_3 = m(a - g) \end{cases} \quad (25)$$

可以得出近似之后加载缸输出力和助力器受力以及自动倾斜器模拟件的运动状态之间的关系:

$$\begin{bmatrix} f_1' \\ f_2' \\ f_3' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0.6667 & -0.3333 \\ 0.5774 & -0.3333 & -0.3333 \\ 0.5774 & 0.3333 & 0.3333 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{J_a a_a}{r} \\ \frac{J_b a_b}{r} \\ m(a - g) \end{bmatrix} \quad (26)$$

由式(26)可知,经过了近似处理之后发现,加载缸的输出力跟助力器的受力之间还存在一定的差距,主要的影响因素为自动倾斜器模拟件的运动状态。如果在载荷模拟过程中,按照给定的助力器所承载荷直接进行控制,那么助力器的实际受力与原定载荷之间必然存在着差距,此差距主要来自方程式(26)中右边第2项的影响。

根据系统在试验过程中的各项数据,分析式(26)中右边第2项对系统产生的最大影响。试验过程中的最大载荷模拟力为50000N,自动倾斜器模拟件的半径  $r = 0.3834\text{m}$ ,助力器输出端的最大运动加速度为  $30.68\text{m/s}^2$ ,自动倾斜器模拟件的质量约为8kg,最大角加速度为  $86.16\text{rad/s}^2$ ,最大转动惯量为  $0.15\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。经计算可以得出:

$$\begin{cases} \left| \frac{J_a a_a}{r} \right| < 33.71\text{N} \\ \left| \frac{J_b a_b}{r} \right| < 33.71\text{N} \\ |m(a - g)| < 165.44\text{N} \end{cases} \quad (27)$$

将式(27)所示结果代入式(26),可得:

$$\begin{cases} |f_1' - f_1 \cos \theta_1| < 32.6733\text{N} \\ |f_2' - f_2| < 46.9209\text{N} \\ |f_3' - f_3| < 85.8458\text{N} \end{cases} \quad (28)$$

根据式(28)可知,自动倾斜器模拟件的运动状态对各个载荷模拟通道的影响较小,其误差不超过最大模

拟负载的 0.172%。故可忽略这部分影响因素,将式(26)改写为:

$$\begin{bmatrix} f'_1 \\ f'_2 \\ f'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}, \quad (29)$$

由式(29)可知:  $\theta_1$  与前助力器 1 的长度和夹角  $\alpha$  有关,是一个随 3 个助力器运动关系变化而变化的变量值,其中  $\alpha$  可由公式(6)求得。但  $\alpha$  与 3 个助力器的长度之间存在非线性关系,这增加了  $\alpha$  求解的难度和精确性。但若  $\theta_1$  变化范围不大,且当其取某一定值时仍能满足工程精度要求,则在系统正常工作时,将  $\theta_1$  作为变量不断的精确求解出来的工程意义不大。按照此思路,根据前助力器 1 在六边形笼架上的安装关系,可测算出  $\theta_1$  的变化范围是  $(7.697^\circ, 10^\circ)$ 。在此取  $\theta_1$  是其上、下限的近似平均值,即  $\theta_1=8.8^\circ$ 。则其误差范围可由以下方法确定:

$$\left| \frac{\cos 10^\circ - \cos 8.8^\circ}{\cos 10^\circ} \right| \times 100\% = 0.347\%$$

$$\left| \frac{\cos 7.697^\circ - \cos 8.8^\circ}{\cos 7.697^\circ} \right| \times 100\% = 0.279\%$$

由以上求解可知,当使用  $\theta_1=8.8^\circ$  时,其误差小于 0.347%,满足系统工程要求。则式(29)可变化为:

$$\begin{bmatrix} f'_1 \\ f'_2 \\ f'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.988 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (30)$$

由式(30)可看出,由于前助力器 1 安装倾角较大,导致加载缸 1 输出力为  $f_1$  时,只有其中的 0.988  $f_1$  传递给了前助力器 1。故为满足系统设计要,当前助力器 1 所需的载荷谱为  $P$  时,控制系统输入指令应调整为 1.012 $P$ 。

## 6 结论

本文通过以上对于系统中存在的力耦合情况分析,经计算发现其关系虽然复杂,但造成的影响在系统允许的误差范围之内,因此可忽略这部分耦合因素。从而该多通道系统的各负载模拟通道可实现独立控制,采用与单通道系统相同的控制方案,从而论证了在满足工程要求的前提下,该 MIMO 耦合系统可实现一个相对简单易于实现的控制策略。

### 参考文献

- [1] 王占林. 液压伺服控制. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1987.
- [2] 路录祥,王新洲,王遇波. 直升机结构与设. 北京: 航空工业出版社, 2009.

(责编 小城)

(上接第 63 页)

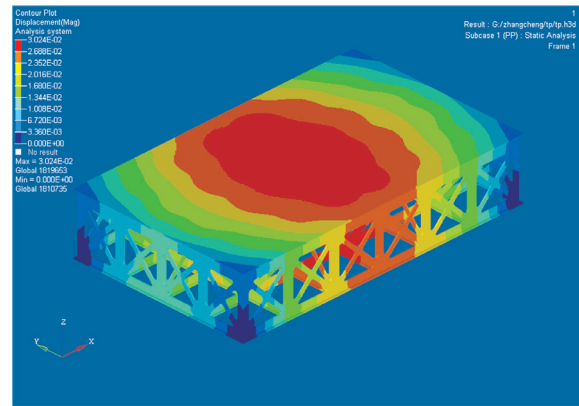


图6 桁架式开口模型变形量云图

Fig.6 Deformation cloud chart for truss type opening model

表1 方形开口模型与桁架式开口模型变形量和质量对比

开口结构	质量 /kg	变形量 /mm
方形开口	2066.489	6.296e-02
桁架式开口	2024.316	3.024e-02

的变形量及重量对比。

通过上述结果可知,在边界条件相同和质量近似的情况下,桁架式开口模型的变形量约为方形开口模型变形量的 48%。由此可知,框架式模具底部支撑结构采用桁架式开口形式要优于方形开口形式,其结构效率优势明显。

## 3 结论

本文对航空复合材料制造过程中使用的框架式模具的底部支撑结构进行了拓扑结构优化。通过拓扑结构优化的结构,结合工程经验,认为框架式模具底部支撑结构采用桁架式开口形式具有较好的结构效率;并通过有限元模拟,对比了方形开口与桁架式开口模型在边界条件相同和质量近似的情况下的结构变形,证明了框架式模具底部支撑结构采用桁架式开口形式具有明显的结构效率优势。

### 参考文献

- [1] 李学修,黄虎,刘长虹. 拓扑优化方法在轻卡车身结构改进中的应用. 上海工程技术大学学报, 2007, 21(1):11-15.
- [2] 潘峰,朱平,孟瑾. 微型货车车架的拓扑优化设计与研究. 机械设计与研究, 2008, 24(2): 87-90.
- [3] 扶原放,金达锋. 多工况悬架下摆臂结构优化设计方法研究. 机械设计与制造, 2009(8): 1-3.
- [4] 岳广全,张博明,杜善义,等. 热压罐成型工艺所用框架式模具的变形分析. 复合材料学报, 2009, 26(5):148-152. (责编 深蓝)