

某型飞机拦阻系统建模分析及仿真实现

吴娟, 袁朝辉

(西北工业大学 自动控制系统, 陕西 西安 710072)

摘要:文章从理论上建立了某型飞机拦阻系统的仿真数学模型,并使用该数学模型针对三种不同的控制机构参数,作了仿真,仿真结果表明了该模型能够反映飞机被拦阻的真实过程,为拦阻系统的设计分析提供了有效工具。该仿真模型运行于 MATLAB 环境下 SIMULINK 软件中。

关键词:MATLAB;飞机拦阻系统;建模分析;仿真模型

中图分类号:V37 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2001)06-0011-04

某型飞机拦阻系统是目前正在研制的新型飞机拦阻系统,是机场重要常务保障设施,能根据遂行任务要求,不受飞机重量、起降速度、多机型和机场跑道保险道长度的制约,有效地拦阻正常降落和因意外原因冲出跑道的飞机,保障人机安全。系统设计的优劣会直接影响到飞机承受的过载、安全拦停距离及拦阻力变化状况,最终影响拦阻效果。鉴于此,在研制系统过程中,需要对系统进行仿真设计分析,以确定最佳的结构参数或更有效的控制方法,本篇文章从理论上对拦阻系统进行了建模分析,并建立了运行于 MATLAB 环境下 SIMULINK 软件中的仿真模型,为系统的设计分析奠定了基础。

1 系统原理介绍

拦阻飞机时要在飞机跑道的两侧各安装一套拦阻系统,两套系统结构完全相同,两条拦阻带通过网索连接在一起,当飞机撞网后,两条拦阻带在飞机的带动下从各自的能量吸收盘被拉出,同时带动能量吸收盘旋转,为了节省能源,有效利用飞机的动能,某型飞机拦阻系统设计成闭环全自动程控系统,利用能量吸收盘的旋转带动泵轴为转,通过泵及节流作用向液压系统提供高压油,高压油则通向刹车系统产生刹车力矩,对能量吸收盘产生有效刹车。系统控制机构采用针阀和凸轮控制阀联合控制的方法,针阀属于可调节流阀,作用是使系统建立刹车压力并通过预先调节节流口大小以适应不同重量、不同撞网速度飞机的拦阻,拦阻过程中节流口大小不变;凸轮控制阀属于可变节流阀,在拦阻过程中按一定程序改变节流口面积大小,与针阀相结合使系统获得较优的刹车压力,可通过调节凸轮初始位置来调节拦停距离。凸轮的转动靠吸收盘以一定的传动比带动。系统拦阻效果的优劣取决于机构控制规律,要求不同质量、不同撞网速度飞机在限定距离内被拦停,并且刹车压力、带的拉力、以及飞机的过载状况均能满足设计要求。

2 系统数学模型

2.1 被拦阻飞机动力学方程

$$\frac{d(m_f v)}{dt} = -(F_x + F_z)$$

式中, F_x 为飞机所受带的拉力沿飞机运动方向的分力, F_z 是飞机所受的运动阻力(可忽略不计)。

2.2 能量吸收盘的动力平衡方程

$$F_1 \cdot r - M_m - M_b - M_1 = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega$$

F_1 是带对飞机的拉力, M_m 、 M_b 、 M_1 分别是摩擦盘对吸收盘的摩擦力矩、带动泵轴转动的力矩及带动凸轮机构所需要的力矩(可忽略不计); J 、 B 分别为能量吸收盘的转动惯量和粘性阻力矩系数。

方程中物理量及参数计算如下(M_b 的计算见下面液压系统方程):

$$1) F_1 = \frac{F_x}{2\cos\alpha\cos\beta}, \text{ 其中 } \alpha = \arctan(H_j/S), \beta = \arctan(L_j/\sqrt{H_j^2 + S^2}), H_j, L_j \text{ 分别为机翼高度及与跑道宽度、机翼宽度有关的定值; } S = \int_0^t v d\tau \text{ 为飞机从撞网开始的运动位移, 可看出 } \alpha, \beta \text{ 参数是变参数。}$$

2) $r = r_1 + n(t) \cdot h$, 式中 r_1 为带盘内径, h 为带的厚度, $n(t)$ 为任意时刻吸收盘上带的圈数, 其值近似为

$n(t) = (-2\pi r_1 - \pi h) + \sqrt{(2\pi r_1 - \pi h)^2 + 4\pi h L(t)} / 2\pi h$, $n(t)$ 表达式中 $L(t)$ 为任意时刻剩余带长, 如果最大拉出带长为 $L(0)$, 任意时刻拉出带长为 L_d , 则 $L(t) = L(0) - L_d = L(0) - \int_0^t v_{ld} d\tau$, 式中 v_{ld} 为带拉出的切线速度。从上分析可看出, 由于 $L(t)$ 、 $n(t)$ 为变参数, 因此带的作用半径 r 亦为变参数。

3) $M_m = k_m \cdot p$, p 为刹车压力, k_m 为与刹车系统结构、刹车片数量及刹车片材料状况有关的定值。

$$4) J = \frac{Mr^2}{2}, \text{ 式中 } M = m + A_d \cdot L(t) \cdot \rho_d, M \text{ 表示吸收盘即时质量, } A_d, \rho_d \text{ 分别为带的截面积及带的密度。}$$

由于 M 及 r 随着带的拉出而变小, 因此转动惯量 J 亦变小, 为变参数。

$$5) \omega = \frac{v_{ld}}{r}, \text{ 式中 } v_{ld} = v_1 - \frac{dx}{dt}, v_1 \text{ 为靠近飞机处沿带方向带的运动速度, } v_1 = v\cos\alpha\cos\beta, x \text{ 为带拉力 } F_1 \text{ 作用}$$

下带的变形量, 其值为 $x = \frac{F_1 \cdot \int_0^t v_1 d\tau}{EA_d}$, E 为弹性模量。

2.3 液压系统方程

1) 泵的输出转矩 M_b 及实际输出流量 Q_b :

$$M_b = \frac{q_b \cdot p_b}{2\pi\eta_{bm}}, \quad Q_b = Q_0 - \Delta Q = Q_0 - 0.15 \cdot \frac{p_b \cdot Q_0}{16.5 \times 10^6} = q_b \cdot n_b (1 - 0.15 \cdot \frac{p_b}{16.5 \times 10^6})$$

式中, q_b 为泵的排量, p_b 为泵出口压力, η_{bm} 为泵的机械效率。 $n_b = \frac{\omega_b}{2\pi} = \frac{k_b \cdot \omega}{2\pi}$, k_b 为吸收盘到泵轴之间的传动比, Q_0 为泵理论输出流量, ΔQ 为泵泄漏量, 其计算式为近似计算。

2) 凸轮控制阀阀芯位移量 x_v 及相应阀口面积 A_w :

$$x_v = k_v [\rho(\theta_t) - \rho_0], \quad A_w = A(x_v)$$

式中, k_v 为阀芯位移量与凸轮径向位移量之间的比例系数, 转角 $\theta_t = \int_0^t \omega_t d\tau + \theta_0 = \int_0^t k_t \omega d\tau + \theta_0$, k_t 是凸轮轴与吸收盘转动轴之间的传动比, θ_0 是初始转角, 两式中函数 $\rho(\theta_t)$ 及 $A(x_v)$ 的设计是涉及到拦阻力控制效果的关键部分, 本文仿真模型中, $\rho(\theta_t)$ 、 $A(x_v)$ 采用国外某拦阻系统中凸轮及阀芯结构实测数据的拟合曲线, 实际设计系统时, 可依据仿真结果对 $\rho(\theta_t)$ 、 $A(x_v)$ 进行修正或根本修改。

3) 凸轮控制阀前后压差 Δp_t 及针阀前压力 P_t :

$$\Delta p_t = p_b - p_z = \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q_t}{C_d A_w} \right)^2 = \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q_b}{C_d A_w} \right)^2, \quad p_z = \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q_z}{C_d A_w} \right)^2 = \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q_b}{C_d A_w} \right)^2$$

式中, C_d (0.71 ~ 0.82) 为流量系数, A_w 为针阀阀口面积, 拦阻开始前预先调定。

4) 刹车盘的油液压力 p :

$$p = \begin{cases} p_0 & (p \text{ 取 } p_0, p_b \text{ 之大值, } p_0 \text{ 为蓄能器保压压力值}) \\ p_b = \Delta p_t + p_z & \end{cases}$$

综合上述各式, 可在 MATLAB 环境下利用 SIMULINK 仿真工具建立系统面向结构的仿真模型, 见图 1。

SIMULINK 仿真软件具有可视化、模块化、一体化的特点^[1], 设计拦阻系统时可依据仿真结果和设计思路不断修改模型图中模块参数甚至改变系统构造特性, 以期获得最佳设计效果。图 1 中多数模块须根据前面建立的有关方程、有关公式和参数自身的定义来构造, SIMULINK 的屏蔽和封装功能^[2], 可以创建这些模块的内部参数对话框, 使得在修改这些参数时非常方便。其中系统模块 subsystem1 针对安全阀模型而建立, 模块 subsystem 针对凸轮机构和凸轮控制阀部分而建立, 其它模块在此不一一介绍。

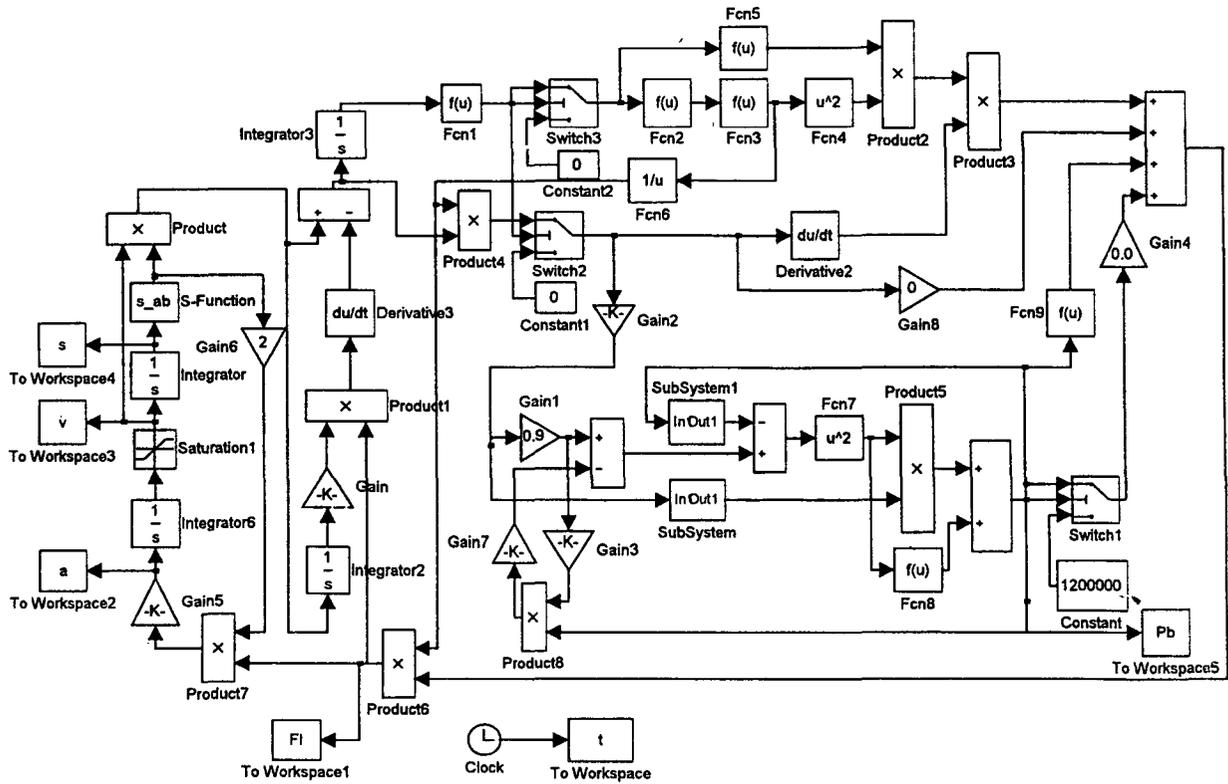


图1 某型飞机拦阻系统仿真模型

3 系统模型仿真实现

依照图1建立的模型,可进行系统仿真,仿真参数如表1所示,被拦阻飞机参数及调节参数如表2所示。

表1 系统仿真参数

r_1/m	h/m	A_d/m^2	$\rho_d/(kg/m^3)$	m/kg	k_m/m^3	$B/(N \cdot m \cdot S)$	$L(0)/m$	H_j/m	L_j/m	$q_b/(ml/r)$	η_{lim}	k_b	k_t
0.165	0.0085	0.00187	856	684	0.0294	0	226	0	26	90	0.9	0.952	0.00857

表2 被拦阻飞机参数及系统调节参数

被拦阻飞机重量/t	飞机撞网速度/(km/h)	A_{av}/mm^2	$\theta_0/(^\circ)$	k_v
35	352	14	60、90、90	0.7、0.7、0.3

$\rho(\theta_i)$ 及 $A(x_v)$ 的变化规律是涉及到拦阻力控制效果的关键,为了体现模型的有效及精确,仿真时可通过改变凸轮初始角 θ_0 及比例系数 k_v 值达到改变拦阻过程控制规律的效果。图2显示了三种不同控制机构参数情况下的仿真结果。对于35 t,352 km/h 撞网速度的飞机,要求拦停距离 ≤ 250 m,飞机过载 ≤ 3 g,带拉力 ≤ 50 t,刹车压力 ≤ 16.5 Mpa,从仿真结果可看出,当 $\theta_0 = 60^\circ$ 、 $k_v = 0.7$ 时,拦阻时各物理量变化均满足拦阻指标要求,当 $\theta_0 = 90^\circ$ 、 $k_v = 0.7$ 不变时,飞机过载量及带拉力超过(不满足)指标要求,而当 $\theta_0 = 90^\circ$ 不变、 $k_v = 0.3$ 时,各物理量变化又均满足了指标要求,可看出,该模型实现了拦阻系统拦阻过程的仿真,且物理量变化与国外类似拦阻系统拦阻效果相接近。

4 结论

- 1) 通过改变被拦阻飞机参数及调节参数,所建立的仿真模型适于不同重量、不同撞网速度飞机拦阻过程仿真,表明此模型系统很好解决了飞机拦阻系统的仿真问题,使拦阻过程更直观。
- 2) 此模型系统是面向结构的 SIMULINK 仿真模型图,多数模块含有内部参数对话框,进行参数修改时非常便捷,易于进行拦阻效果理论分析,也提高了真实系统的设计效率,为系统设计奠定了基础。
- 3) 模型图将系统压力超过安全阀调定压力时安全阀限压工况作了考虑,使模型图更接近真实系统。

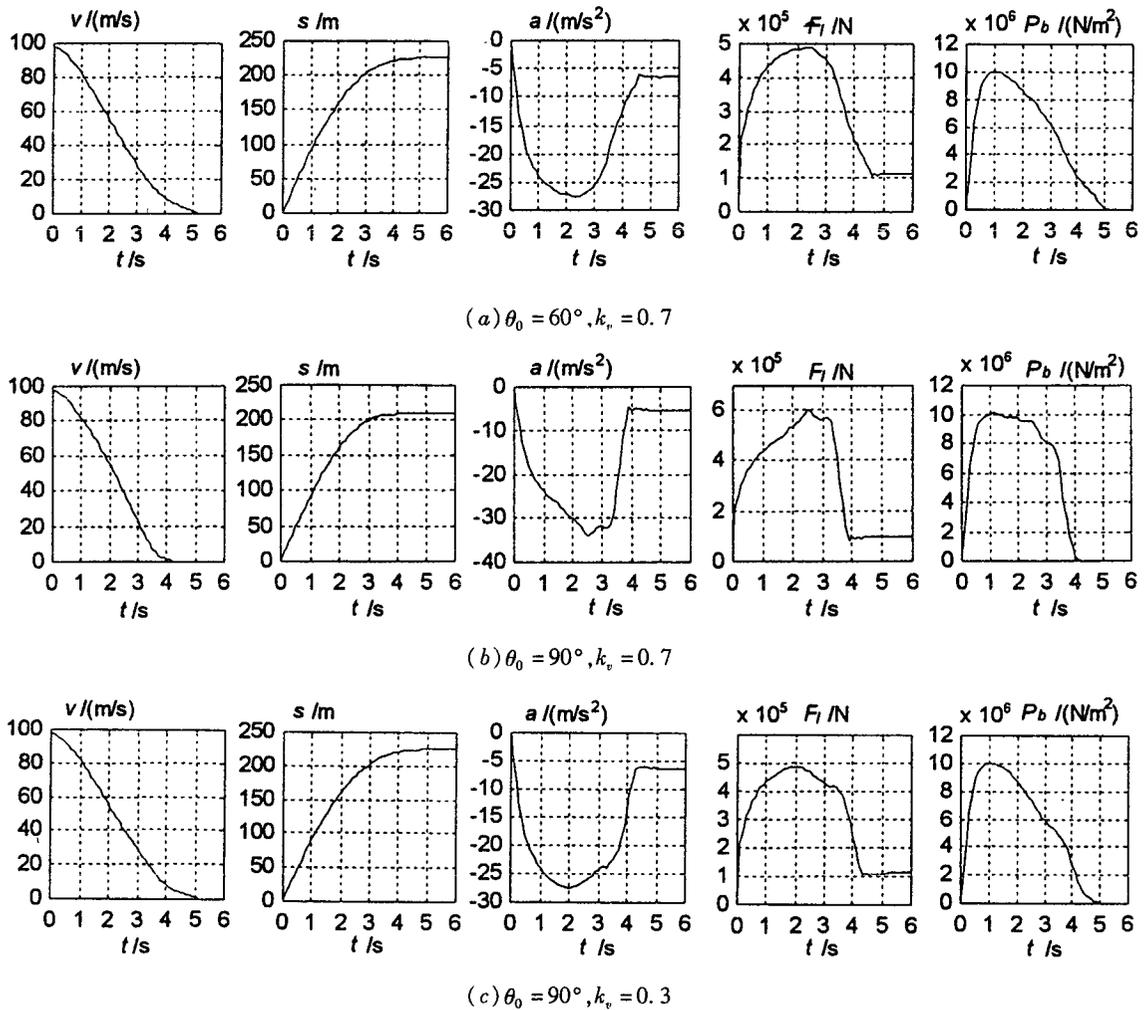


图2 三种不同控制机构参数情况下的仿真结果

参考文献:

- [1] 罗峰, 邓建华. 基于 MATLAB 的自修复飞控系统仿真[J]. 计算机仿真, 2000, (3): 45-84.
- [2] 廖德, 李治. 电力机车调速系统仿真研究[J]. 计算机仿真, 2000, (1): 40-42.
- [3] 楼顺天, 于卫. 基于 MATLAB 的系统仿真与设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.

Modeling Analysis and Simulation Realization For Commonly Used Mobile Aircraft Arresting System

WU Juan, YUAN Zhao-hui

(Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A simulation model for commonly used mobile aircraft arresting system is established theoretically in this paper. Simulation results with three kinds of different parameters of control mechanism show that the model can simulate the true process of aircraft being arrested and be an effective mathematical tool for design and analysis of the system. This model is run by using SIMULINK software under MATLAB environment.

Key words: MATLAB; aircraft arresting system; modeling analysis; simulation model