航空母舰液压拦阻系统拦阻力建模与仿真

张明晖 袁 理 洪冠新

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191)

摘 要：以国内外普遍使用的某型航空母舰液压拦阻系统为研究对象，从其组成和工作原理出发.针对产生拦阻力的主要元器件，根据液压系统的传动基本理论建立了液压拦阻系统的拦阻器系统和滑轮缓冲系统的数学模型.利用该模型结合舰载机着舰动力学模型和拦阻索动力学模型进行了拦阻动力学的数值仿真，对比了仿真值与试验值的区别，分析计算了某型舰载机以不同重量、速度着舰的拦阻动力学过程.验证了滑轮缓冲系统能有效减缓拦阻索张力，且通过改变控制阀口通油面积可以实现不同质量飞机在基本相同的距离上实现安全拦阻，说明模型的合理性.

关 键 词：航空母舰；拦阻系统；液压系统；建模与仿真

中图分类号：V 271.4

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)01-0100-04

Aircraft carrier hydraulic arresting gear arresting force modeling and simulation

Zhang Minghui Yuan Li Hong Guanxin

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A certain aircraft carrier hydraulic pressure arresting system was studied. As the main arresting forcing producing components, the mathematical models of the hydraulic block system and pulley buffer system were established according to the basic theory of hydraulic transmission system. Using these two models, combining the dynamic models of the arresting cable and the aircraft's landing process, a series of numerical simulations were carried out under different aircraft weight and landing velocity. The simulation value was compared with trial value and the difference was studied. The result showed that the pulley buffer system can reduce the tension of the arresting cable effectively and that the change of the control valve can realize the arresting of aircrafts with different weight within around 100 m, which also verified the rationality of the model.

Key words: aircraft carriers; arresting gear; hydraulic system; modeling and simulation

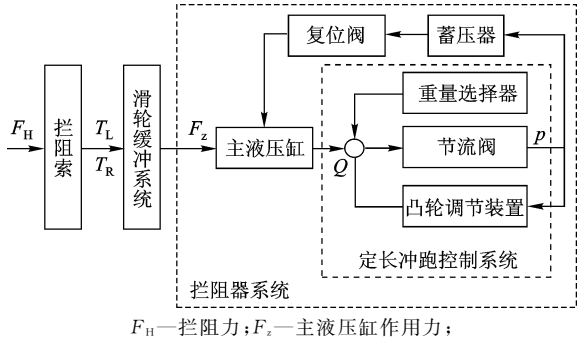
利用拦阻索拦阻着舰是现代航空母舰舰载机着舰的主要方式，航母拦阻系统的拦阻能力是航母与舰载机重要的适配条件之一.拦阻系统随着航母的诞生便已出现，通过设计巧妙的控制机构，实现了不同重量、速度的舰载机等距离拦阻，使得航母可以满足不同类型飞机的服役要求，提高了航母综合作战能力.目前对于舰载机拦阻的研究主要进行简单的动力学仿真分析，拦阻力则主要是根据其纵向分量与拦阻索冲程的近似函数给出，也有的把液压拦阻系统简化为简单的一个液压缓冲装置[1]，从理论上不能真实体现液压拦阻装置的工作机理和动力学过程，因此本文依据国外某拦阻系统原理建立仿真模型，以方便进行拦阻动力学仿真分析和研究.而且通过选取不同的系统参数进行仿真分析，对设计不同性能拦阻系统也有一定帮助.

收稿日期：2008-12-24

作者简介：张明晖(1977—)，男，硕士生，河南三门峡人，zhangmh@ase.buaa.edu.cn.

1　航母液压式拦阻系统的工作原理

国内外现役航空母舰上普遍使用的拦阻装置为 MK7 型液压缓冲式拦阻系统,可以在 100 m 左右距离上拦阻重量范围在 4.536～22.68 t、最大 74.588 m/s 的啮合速度着舰的飞机.其组成主要包括舰上部分与舰下部分.舰上部分包括拦阻索和支撑机构,舰下部分包括拦阻索系统(滑轮组索)、滑轮缓冲系统、拦阻器系统、钢索末端缓冲系统、复位系统、冷却系统等,拦阻器系统又由主液压缸、定长冲跑控制系统、蓄能器、膨胀气瓶、定滑轮组等组成[2].其工作原理如图 1 所示,当舰载机尾钩挂上任意一根拦阻索,拉动滑轮索,拦阻索经过滑轮缓冲系统和一系列动滑轮组带动主液压缸的柱塞,将主液压缸里的油液经定长冲跑控制系统挤压进蓄能器,压缩空气产生阻尼力,吸收能量;使飞机逐渐减速,当飞机被拦停且拦阻索与飞机尾钩脱离后,复位阀打开,蓄能器中高压油液经冷却器回流到主液压缸,实现拦阻索复位.其中滑轮缓冲器主要是减缓拦阻过程中钢索张力峰值;定长冲跑控制系统是液压拦阻的控制元件,可根据飞机重量通过重量选择器调节初始开口面积,以实现在基本相同距离上拦阻不同重量飞机,在拦阻过程中凸轮调节装置根据主液压缸柱塞的运动规律,调节凸轮改变控制阀开口面积,控制油液流量,从而控制拦阻力的恒稳.本文主要是对拦阻力进行仿真,因此针对产生拦阻力的拦阻索、滑轮缓冲系统、主液压缸、定长冲跑控制系统、蓄压器建立其数学模型.



F_H—拦阻力;F_z—主液压缸作用力;
T_L,T_R—钢索左、右张力;Q—油液流量;p—压力.

图 1　液压拦阻系统工作原理

2　液压拦阻系统模型

由图 1 工作原理可以得知要想求解 F_H,得先求解拦阻器系统的主液压缸作用力 F_z,而后和滑轮缓冲系统及拦阻索动力学方程联立求解即可得到 F_H,因此首先来对拦阻器系统进行建模确定 F_z.拦阻器系统是产生拦阻力、吸收能量的主要部件,是拦阻器系统的核心.其产生液压阻尼力的主要工作元件是主液压缸、定长冲跑控制系统、蓄压器组成,因此对其每个元件建立运动方程.

2.1　拦阻器系统方程

1) 柱塞运动速度方程

柱塞是拦阻力通过滑轮缓冲系统带动一组动滑轮组挤压主液压缸产生运动,由图 2 所示,可得柱塞动力学方程:

$$\frac{\mathrm{d}v_r}{\mathrm{d}t}=(F_z-\mu v_r-A_r p_1)\frac{1}{m_r} \tag{1}$$

式中,v_r 为主液压缸柱塞运动速度,由钢索的运动通过滑轮组传递给柱塞;m_r 为柱塞(包括动滑轮组)的质量;A_r 为主液压缸柱塞截面积;μ 为油液黏性阻尼系数;p_1 为主液压缸的油液压力,可由定长冲跑控制系统的流量方程求出.

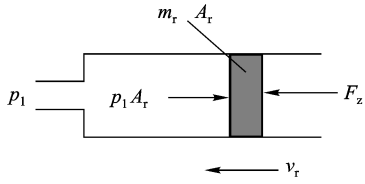


图 2　主液压缸柱塞受力分析

2) 系统油液流量方程

油液流量由定长冲跑控制阀控制,定长冲跑控制阀为节流阀.通过节流阀的流量主要取决于阀口通流面积和阀口前后压差[3],如下式:

$$Q=K_v A_v\left[\frac{2}{\rho}(p_1-p_2)\right]^n \tag{2}$$

式中,A_v 为控制阀通油面积;K_v 为油液流量系数;ρ 为油液密度;p_2 为控制阀阀口后压力;n 为由阀口形状决定的参数,本文节流阀的阀芯选择锥形阀,n 取 0.5[4].

① 控制阀后油液压力的方程

p_2 由蓄能器活塞运动方程确定:

$$m_p\frac{\mathrm{d}v_p}{\mathrm{d}t}=(p_2-P_f)A_p \tag{3}$$

式中,m_p,A_p,v_p 分别为蓄压器活塞质量、有效截面积和运动速度;P_f 为蓄压器气瓶中空气压强,由空气压缩量决定.由于拦阻过程时间很短,蓄压器气瓶空气压缩过程可看作绝热过程,则有

$$P_f=\frac{P_{f0}V_{f0}^{1.4}}{\left(V_{f0}-\int_0^t A_p v_p\right)^{1.4}}=\frac{P_{f0}V_{f0}^{1.4}}{\left(V_{f0}-\int_0^t Q\right)^{1.4}} \tag{4}$$

式中,P_{f0} 为气瓶初始压强;V_{f0} 为气瓶初始体积.

② A_v 的确定

控制阀由阀芯、阀套、凸轮调节装置组成.凸轮运动带动阀套、阀芯运动,改变通油孔的面积,

以达到控制拦阻力的目的.凸轮由柱塞驱动,因此,A_v 是柱塞运动行程的函数,即

$$A_v = A_{v0} - \Delta A = A_{v0} - A(s) \tag{5}$$

式中,A_{v0} 为控制阀的初始开口面积,通过人工由重量选择器来调节,以拦阻不同重量飞机,飞机越重,初始阀口面积应越小;s 为柱塞作动器行程,函数 $A(s)$ 的具体形式取决于凸轮轮廓线和 s 的变化以及节流阀口的形状,选择合适的凸轮轮廓线,就能控制拦阻过程阀口流量的变化,减缓了拦阻过程中阀口面积的变化,使得流过控制阀的油液总流量相同,从而保证不同舰载机的拦阻距离相同.

凸轮调节装置的凸轮型面的设计根据节流阀的阀口形状和具体的拦阻指标进行设计,根据本文节流阀的阀芯采用锥形阀,半锥角为 α,为了简化控制关系凸轮曲线可设计成阿基米德螺线,可使节流阀的阀门杆的向下的位移 y 是凸轮转角的线形函数.$y=k_\theta\theta$,θ 为凸轮的转角,其由柱塞驱动满足关系式 $\theta=k_s s$,k_s 由液压作动筒的最大长度和凸轮最大转角比值确定.k_θ 值由凸轮产生的最大位移和最大位移时的凸轮转角比值决定.

因此阀门通油面积的变化量 $A(s)=\pi d_1 y\sin\alpha$,因此可以得到 A_v 关于 s 的函数关系.其中 d_1 为节流阀座口的直径.

忽略油液的弹性变性,由式(2)~式(5)联立可得 p_1 与 v_r 的对应关系:

$$p_1 = \frac{A_r^2 v_r^2 \rho}{2K_v^2 A_v^2} + \frac{m_p A_r}{A_p^2}\frac{\mathrm{d}v_r}{\mathrm{d}t} + \frac{P_{f0}V_{f0}^{1.4}}{(V_{f0}-A_r v_r)^{1.4}} \tag{6}$$

将式(6)代入式(1)得到 F_z 关于 v_r 的表达式:

$$F_z = m_r\frac{\mathrm{d}v_r}{\mathrm{d}t} + \mu v_r + \frac{A_r^3 v_r^2 \rho}{2K_v^2 A_v^2} + \frac{M_p A_r^2}{A_p^2}\frac{\mathrm{d}v_r}{\mathrm{d}t} + \frac{A_r P_{f0} V_{f0}^{1.4}}{\left(V_{f0} - A_r\int_0^t v_r\right)^{1.4}} \tag{7}$$

2.2 滑轮缓冲系统方程

滑轮缓冲系统为一个小型液压缓冲系统,位于舰面下,左右各一个,由动滑轮、液压筒、活塞、阀门和蓄能器组成.钢索绕过滑轮,滑轮与活塞相连,当钢索张力大于液压筒压力时,活塞被拉出减缓钢索拉出速度 $v_{cb}=v'_{cb}-v_{hp}$,v_{cb} 为滑轮缓冲系统后钢索拉出速度,和 v_r 满足 $v_r=v_{cb}/k$,k 为拦阻机系统的动滑轮组的数目,v'_{cb} 为滑轮缓冲系统前钢索拉出速度,由拦阻索几何关系以及飞机速度确定,v_{hp} 为滑轮缓冲系统活塞运动速度,满足下式:

$$m_{hp}\frac{\mathrm{d}v_{hp}}{\mathrm{d}t} = 2T - P_h A_{hp} \tag{8}$$

$$P_h\left(V_0 - A_{hp}\int_0^t v_{hp}\mathrm{d}t\right)^{1.4} = P_{h0}V_0^{1.4} \tag{9}$$

式中,m_{hp},A_{hp} 分别为缓冲系统活塞质量和有效面积;T 为左(或右)钢索张力;P_h 为油液压强,由于忽略油液压缩和蓄能器活塞质量,P_h 与蓄能器空气压强相同;P_{h0},V_0 分别为空气初始压强与体积.

2.3 拦阻索动力学方程

忽略拦阻索与滑轮组索的弹性变形.拦阻器 F_z 与 T_L,T_R 之间的关系为

$$T_L + T_R = F_z/(4N) \tag{10}$$

其中 N 为拦阻器上动滑轮个数.舰载机尾钩受到的 F_H 与 T_L 及 T_R 满足如下关系[5]:

$$-F_H\sin\varepsilon_H = T_R\sin\varepsilon_C - T_L\sin\varepsilon_C \tag{11}$$

$$F_H\cos\varepsilon_H = T_R\cos\varepsilon_C + T_L\cos\varepsilon_C \tag{12}$$

式中各参数的含义见图3所示,由飞机相对甲板的运动速度、位移,姿态决定.因此在已知飞机的运动参数后由式(8)~式(12)迭代求解可以得到 F_H.

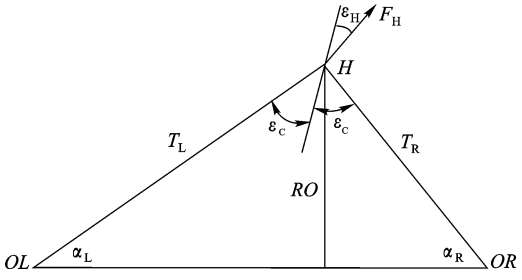


图3 拦阻索受力简图

3 仿真算例

根据上述各方程,在 MATLAB 环境下利用 SIMULINK 工具箱建立拦阻动力学的仿真模型.

1) 计算某型飞机以重量 14 t、速度 56.58 m/s(相对航母的速度,下同)着舰,并与实验值进行比较,见图4.

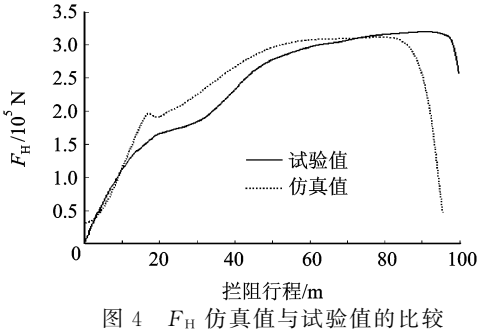


图4 F_H 仿真值与试验值的比较

2) 计算某型飞机在不同重量和速度状态下

的着舰拦阻过程:重量 14 t,着舰速度 56.58 m/s;重量 18t,着舰速度 63.5 m/s;重量 22 t,着舰速度 69.25 m/s.不考虑航母摇荡运动.对比在相同拦阻距离情况下拦阻系统的拦阻特性.仿真曲线见图 5～图 6.

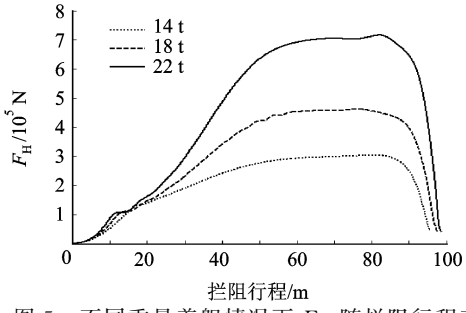


图 5　不同重量着舰情况下 F_H 随拦阻行程变化

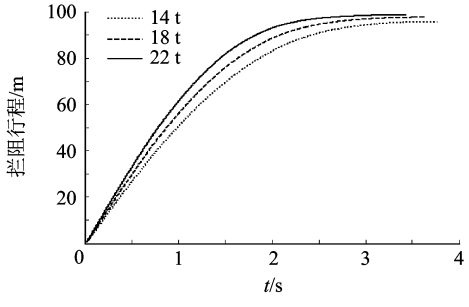


图 6　不同重量着舰情况下拦阻行程变化

从仿真值与试验值比较可见,拦阻力的仿真值和实验值趋势一致,拦阻力的峰值基本接近,滑轮缓冲系统能有效地减小拦阻索张力,如图 4 所示在 20 m 左右拦阻力有变缓的趋势.从对不同的质量飞机在不同啮合速度拦阻结果可知,只需要改变控制阀阀口的通油面积就能实现飞机重量越大,拦阻力越大,不同重量的飞机能在100 m左右的距离上安全拦阻.因此所建立的拦阻力模型从液压系统理论上是合理的.可用在分析舰载机的拦阻特性研究时的拦阻力的模型中.但是曲线在整个过程中数值上二者有一定量的误差,分析原因首先忽略了初始时刻拦阻钢索的弹性变形的动载荷和在整个过程中油液的弹性压缩和膨胀造成的油液的压力变化,再次控制阀的阀口通油面积与阀芯的形状和凸轮的曲线形状不是很准确,是造成误差的一个原因.而且仿真所使用的拦阻系统部分参数与真实参数有差别,也导致了曲线的差别.因此可以在进一步的研究中要考虑到拦阻索和油液的弹性变形及定长冲跑控制系统的凸轮控制阀与节流阀的控制关系,进一步得到更加精确的仿真数据.

4　结 束 语

本文分析了航空母舰液压拦阻系统的组成及工作原理,结合舰载机的动力学模型,建立了拦阻力的数学模型,并进行了仿真验证.验证结果与实验值稍有误差,但变化趋势和峰值基本相同,能够实现在相同距离上对不同质量舰载机的安全拦阻,可以作为不同型号的舰载机拦阻钩载荷分析和着舰拦阻安全性分析的建模依据,同时也为航空母舰的液压拦阻装置的研制和设计提供一定的参考价值.

参考文献(References)

[1] 张鑫.舰载机拦阻着舰动力学分析与仿真[D].西安:西北工业大学力学与土木建筑学院,2007
Zhang Xin. Dynamic analysis and simulation of carrier aircraft arrest deck-landing[D]. Xi'an:School of Mechanics and Civil and Architecture,Northwestern Ploytechnical University,2007(in Chinese)

[2] 鸥汛.航母的阻拦装置[J].现代舰船,2005,9(A):45－48
Ou Xun. Arresting gear of aircraft carrier[J]. Modern Ship, 2005, 9(A):45－48(in Chinese)

[3] 李永堂,雷步芳,高雨茁.液压系统建模与仿真[M].北京:冶金工业出版社,2003
Li Yongtang,Lei Bufang,Gao Yuzhuang. Hydraulic pressure system modeling and simulation[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press,2003(in Chinese)

[4] 何存兴.液压元件[M].北京:机械工业出版社,1981:396－398
He Cunxing. Hydraulic pressure element[M]. Beijing:China Machine Press,1981:396－398(in Chinese)

[5] 胡孟权,林国华.舰载飞机着舰拦阻动力学分析[J].空军工程大学学报:自然科学版,2000,1(5): 8－11
Hu Mengquan,Lin Guohua. Arresting dynamics research of carrier aircraft [J]. Journal of Air Force Engineering University:Natural Science Edition,2000,1(5):8－11(in Chinese)

(编　辑:赵海容)