飞机防滑刹车系统动态特性仿真研究

时培涛 吴瑞祥 张燮年 胡枫梧
(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院) (航空总公司第 609 所)

摘 要 以国内某现役机种为对象,本文在综合考虑了飞机机体、起落架、轮胎、传感器等特性的基础上,推导了适用于飞机刹车滑跑的动力学模型,该模型重点考虑了起落架和轮胎的动态特性,突出简单、实用和通用性的要求,并加入到相对滑动量控制的电子防滑刹车系统的数字仿真软件中,完善了防滑刹车系统的软件平台,以用来研究飞机系统的动态特性与刹车性能的关系. 利用本软件对飞机刹车动态性能作了全面的定量分析,对设计和改进刹车系统有重要的指导意义.

关键词 起落架; 轮胎; 飞机; 飞机防滑系统; 刹车仿真; 力学模型
分类号 V 226

飞机防滑刹车系统性能研究一直是国外关注的课题,美国兰利中心、波音公司等均投入大量人力物力予以研究[1~5]. 目前,国内防滑刹车的研究重点主要集中在防滑控制规律的基础上,并且已有比较成熟的防滑刹车仿真软件. 但是飞机防滑刹车系统作为飞机大系统中的子系统又与飞机机体、起落架、轮胎等特性息息相关,而这方面的研究工作国内很少展开,所以对飞机防滑刹车系统动态特性仿真具有重要意义.

以往的防滑刹车仿真软件在建立数学模型时,只把飞机整个看成一刚性体,只考虑了轮胎的转动动力学方程. 有些文献虽对飞机的动态特性作了一些建模工作,但都不完全、不系统,重点也是在防滑控制率的仿真上.

本文则是以我国国产的某型飞机为对象,把工作重点放在刹车动态特性仿真上,在借鉴一些飞机着陆滑跑的力学模型基础上,建立了机体、起落架、轮胎、传感器等动力学模型,加入基于速度控制-偏压调节的防滑控制规律,并完善了已有的数字防滑刹车软件平台. 对于飞机刹车滑跑的动力学模型,这里只作了简单介绍,详细可参见文献[6]. 文章则是利用此模型探讨了飞机刹车的动态特性与刹车性能的关系,对缩短电子防滑刹车系统的研制周期,寻找系统各个环节参数之间的良好匹配具有重要的现实意义.

1 飞机刹车滑跑动力学方程

飞机在地面刹车滑跑时,假设没有侧风或是侧风很小,飞机对称着陆滑跑,飞机简化为三自由度的运动体,即航向、下沉位移(垂直方向)、俯仰运动. 机体简化为一集中质量,主起落架等效成一变长度的悬臂梁,其质量集中在轮心处,且只考虑主起落架的纵向振动. 轮胎只有垂直变形和航向变形,无侧向变形和偏航角.

1.1 机体的动力学方程

飞机刹车滑跑受力图见图 1.

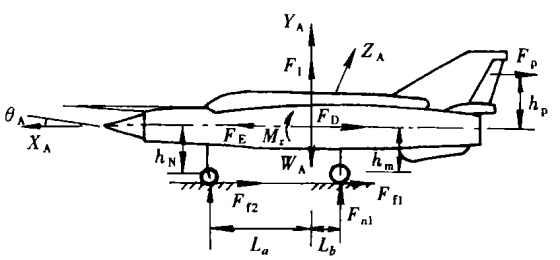


图 1 飞机刹车滑跑受力图

航向、垂直方向、俯仰方向上的方程为

$$\frac{W_A}{g}\ddot{X}_A = F_E - F_D - N_s F_{t1} - F_{t2} - F_P \quad (1)$$

$$\frac{W_A}{g}\ddot{Y}_A = F_l + N_s F_M + F_N - W_A \quad (2)$$

$$I_A\ddot{\theta}_A = M_Z + F_P h_P + F_N L_a - F_{f2} h_N - T_{f2} - F_M L_b - N_s R_s h_M - T_s \quad (3)$$

式中 F_E 为飞机发动机的推力; F_D 为飞机气动阻力; F_{t1}、F_{t2} 为主、前起落架作用于机体的广义力,由于航向上的方程以机体为对象,同时考虑起落架的弹性变形,所以 F_{t1}、F_{t2} 不等于前、主机轮的地面力; F_P 为阻力伞气动阻力; F_l 为飞机的气动升力; F_M 为主起落架缓冲器的内力; F_N 为前起

收稿日期: 1998-03-25 第一作者 男 26 岁 硕士生 100083 北京

落架缓冲器的内力;M_z 为俯仰气动力矩;$F_N L_a - F_{f2} h_N - T_{f2}$ 为前起落架各力产生的力矩;$F_M L_b + N_s R_s h_m + T_s$ 为主起落架各力产生的力矩;R_s、T_s 分别为机轮给起落架的水平广义力、广义弯距;$N_s = 2$,为起落架的个数.

1.2 起落架的水平动力学方程

考虑到支柱的一阶弹性弯曲变形,如图 2 所示,有

$$M_s(\ddot{X}_s - \ddot{X}_A) + C_s \dot{X}_s + K_s X_s = F_{ht} N_b + \frac{3}{2L} T_b N_b \tag{4}$$

推导的详细过程可参见文献[7].

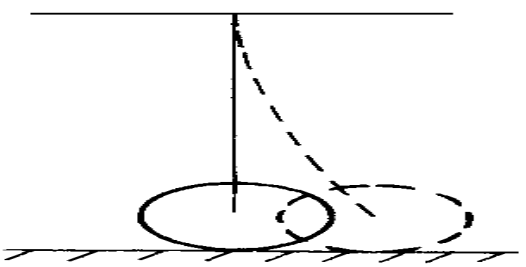


图 2 起落架的变形图

对于立柱式起落架缓冲器上的载荷由 3 部分组成:空气阻力 F_a;油液阻力 F_o;摩擦力 N_f,即

$$F_M = F_o + F_a + N_f \tag{5}$$

其中

$$F_o = \frac{\rho A_h^3}{2(C_d A_o)^2} \dot{S}_1 | \dot{S}_1 | = \frac{1}{2} D_s \cdot \dot{S}_1 | \dot{S}_1 |$$

$$F_a = \frac{P_o A_a}{(1 - A_a S_1 / V_o)^n}$$

式中 N_f 为缓冲器密封和垂直立柱的正压力产生的摩擦力,对于摇臂式起落架,活塞杆不受弯矩,摩擦力计算简单,可认为与缓冲器内空气压力成正比,此时有 $N_f = K_m F_a$.

前起的建模与主起基本相同,由于前机轮不刹车,滚动摩擦力对飞机阻力的贡献很小. 这里不考虑起落架、轮胎的变形. 对于摇臂式起落架还有一个传力系数的问题,有 $F_N = \Phi_N F_{n2}$,Φ_N 为垂直传力系数,对于摇臂式起落架,传力系数是随行程而变化的. 前面讨论的立柱式起落架的传力系数约为 1. 在建模和仿真中把传力系数看成常值,即飞机在停机载荷时的传力系数.

1.3 机轮与轮胎制动模型

根据所建模型的假设,认为轮胎在刹车滑动中具有上下和周向的轮胎变形,且纵向与径向变形之间无影响,轮胎的制动模型如图 3.

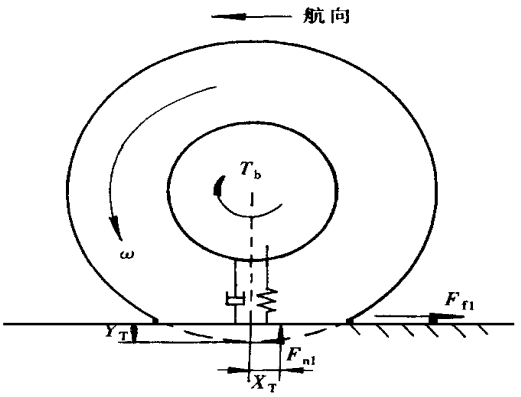


图 3 轮胎的变形图

1) 轮胎的径向变形

$$M_s \ddot{Y}_T = F_M - K_{VT} Y_T - C_{VT} \dot{Y}_T \tag{6}$$

2) 轮胎的水平变形

由轮胎的张性理论,利用拉格朗日方程推导出轮胎的水平变形方程为

$$M_{T1} \ddot{X}_T + M_{T2}(\ddot{X}_s - \ddot{X}_A) + M_{T3} \dot{\omega} = F_{f1} - C_{hT} \dot{X}_T - K_{hT} X_T \tag{7}$$

其中 M_{T1}、M_{T2}、M_{T3} 为轮胎的广义质量.

$$M_{T1} = \frac{M_T}{2\pi}(1 - e^{-2\pi})$$

$$M_{T2} = \frac{M_T}{2\pi}(1 + e^{-\pi})$$

$$M_{T3} = \frac{M_T}{\pi} R_r (1 - e^{-\pi})$$

详细推导可参见文献[7].

3) 机轮的转动动力学

飞机滑跑刹车时,机轮受到刹车力矩和地面摩擦力矩的作用,对机轮应用转动惯量定律可得

$$I_w \dot{\omega}_w = F_{hT} R_T + F_{n1} \lambda_X - T_b \tag{8}$$

式中 F_{hT} 为轮胎的水平广义力,$F_{hT} = C_{hT} \dot{X}_T + K_{hT} X_T$;地面摩擦力 $F_{f1} = F_{n1} \mu(\sigma)$,结合系数 μ 是相对滑移率 σ 的非线性函数. 在考虑飞机起落架、轮胎等动态特性后,相对滑移率 σ 的定义为

$$\sigma = \frac{\dot{X}_A - \dot{X}_s - R_r \omega_w - \dot{X}_T}{\dot{X}_A} \tag{9}$$

传感器装在机轮轮轴上,由于起落架立柱的角变形,传感器测得的转速与机轮的转速略有不同,所以有

$$\omega_T = \omega_w - \frac{3}{2L} \dot{X}_s \tag{10}$$

综合飞机机体和起落架各部分的运动方程,可统一写成如下形式:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [D]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F\} \tag{11}$$

编写计算机仿真程序,并对已有的防滑刹车

软件进行改进,来研究飞机动态特性对刹车系统的影响.

2　飞机防滑刹车软件框图

本文结合国产的某型飞机,在 Borland C++ 3.1 for Windows 下编制了基于滑移量控制的仿真软件平台.该软件不仅可以对防滑刹车系统的参数进行编辑,同时也可对飞机、起落架、轮胎等动态特性进行仿真,并可进行动态分析,仿真的流程框图如图 4 所示.

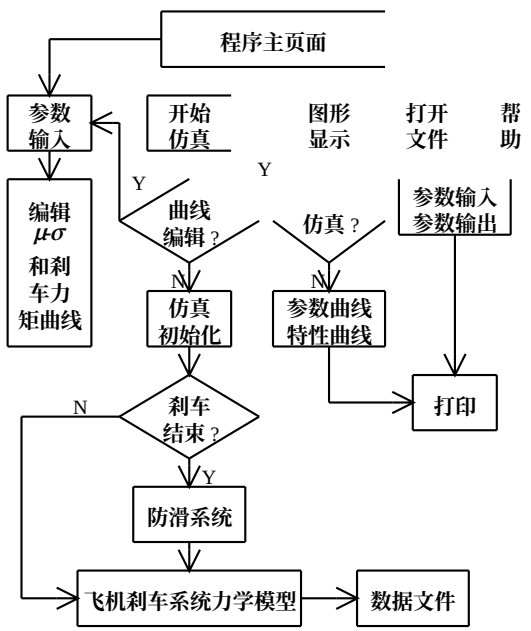


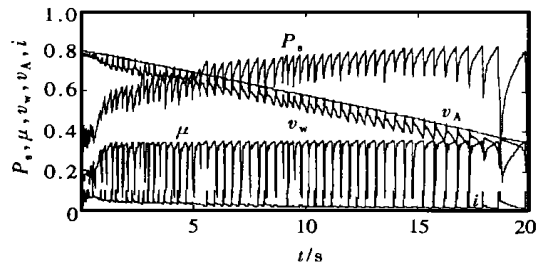
图 4　刹车仿真软件的流程图

3　仿真研究

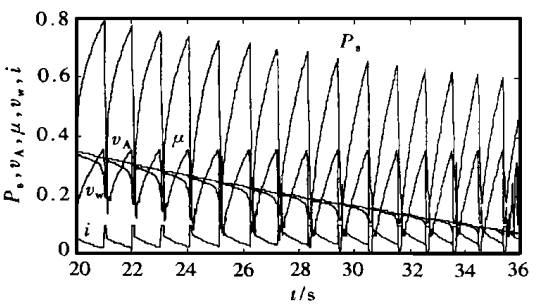
3.1　仿真结果

通过实验和研究表明:在干路面的条件下,防滑刹车系统并不是始终工作,飞机的动态特性不很明显,而在湿路面等恶劣的环境下,地面结合系数较低,防滑刹车系统始终工作,湿路面条件下的刹车性能可见图 5.图中纵坐标各参数采用了归一化的方法,各参数值的范围可参见文献[7].各符号的意义为: P_s ——刹车压力; v_A ——飞机速度; v_w ——机轮线速度; μ ——结合系数; i ——防滑电流.初始条件为 $\mu_{max}=0.356$,其余参数与干路面下的条件相同.仿真结果如下:仿真时间为 35.9 s;理想的刹车距离为978.8 m;实际刹车距离为1 333.3 m;刹车距离效率为 73.4 %,刹车结合系数效率为 75.55 %.

图 6 是机体、起落架和轮胎的动态位移曲线.由图 6 可看出,在湿路面的条件下,由于防滑系统的始终工作,松紧刹车引起起落架的纵向弹性振动.轮胎的动态特性也比较明显.

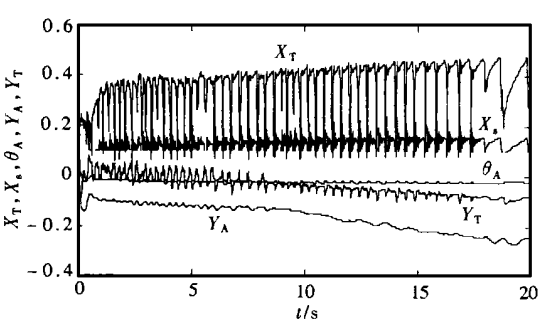


a 0～20 s 内的参数历程曲线

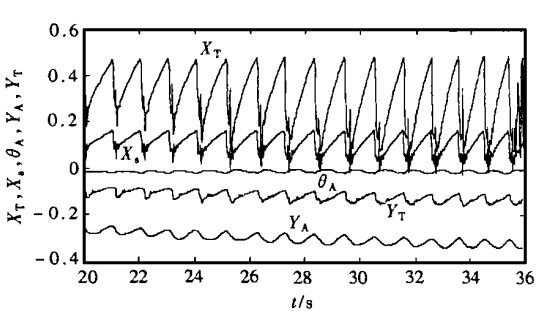


b 20 s 以后的参数历程曲线

图 5　湿路面的刹车曲线



a 20 s 内参数历程曲线



b 20 s 以后参数历程曲线

图 6　湿路面条件下系统位移曲线

3.2　结论分析

通过改变系统参数仿真,得出如下主要结论:

1) 飞机防滑刹车时,起落架的纵向刚度对飞机刹车性能有一定的影响,刚度越大对飞机刹车性能的影响越小,防滑刹车系统的工作频率远低

于起落架的自振频率,若起落架的刚度过小,其固有频率就有可能接近刹车系统的工作频率,且起落架刹车振动的摆幅过大,就有可能引起刹车失灵,或起落架"走步"的现象.

2) 机轮的转动惯量对刹车系统的性能也有较大的影响.通过仿真可发现,机轮的转动惯量越小,机轮速度由于松紧刹车而变化越快,相对滑动率在超过设定值而引起防滑系统工作时,常产生由于机轮速度变化快或者说松刹车不及时,机轮不是马上回转而是被刹死.

3) 轮胎的径向和纵向刚度都对刹车的动态特性有一定的影响,由于目前对轮胎的特性与地面的相互机理研究甚少,这里提出的模型只能一定量地反映动态关系.地面反力由于轮胎的纵向变形引起的偏移起到了加速机轮的作用,其对滑跑距离的影响不是很大.

4) 其它一些参数的影响,包括飞机发动机的慢车推力、飞机重心的分布、防滑系统的工作频带、刹车系统的关键部件——电液压力伺服阀等都对刹车性能有显著的影响,详细分析可参见文献[7].

4 结束语

由于建立了比较完整的飞机防滑刹车系统动力学模型,重点对飞机刹车滑跑的动态特性进行了仿真,完善了防滑刹车系统数字仿真平台,利用此软件不仅可以对防滑刹车规律进行仿真优化,还可以综合考虑刹车系统与飞机大系统的动态关系,使刹车系统的设计更加可靠.

仿真程序经过简单改造可仿真不同机型、不同起落架结构、不同刹车规律飞机的刹车仿真,为研制新型的刹车系统提供了理论依据.

参 考 文 献

1 Amberg R L. Baseline analog simulation for evaluation of brake anti-skid systems. AD 681955,1969

2 Horne W B,McCarty J L,Tanner J A. Some effects of adverse conditions on performance of airplane antiskid braking systems. NASA TND-8202,1982

3 Tanner J A,Stubbs S M. Dynamics of aircraft antiskid braking systems. N82-18204,1982

4 Stubbs S M,Tanner J A,Smith E G. Behavior of aircraft antiskid braking systems on dry and wet runway surfaces: a slip-velocity-controlled,pressure-bias-modulated systems. N80-12084,1980

5 Skorupa J A. System simulation in aircraft landing gear and tire development, AD-No 34942,1976

6 刘锐琛. 飞机地面滑行动力响应分析. 中国航空科技文献, HJB910922,1991

7 时培涛. 飞机刹车系统动态性能仿真研究:[学位论文]. 北京:北京航空航天大学机电工程系,1998

Dynamic Characteristics Simulation of Aircraft Anti-Skid Braking System

Shi Peitao Wu Reixiang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics,School of Mechanical Engineering and Automation)

Zhang Xienian Hu Fengwu

(Institute 609 of Aviation Industry of China)

Abstract Based on the dynamic response of aircraft body, the spring, damping of landing gears, friction characteristics of the tires,sensors, and so on,mechanical model for aircraft anti-skid braking system is set up. The model is simple but practical and universal,which is integrated with velocity-rate-controlled and pressure-bias-modulated aircraft anti-skid system. Simulation software for braking design is developed and revised. By using the software and taking some fighter in China as an example,this paper discusses relation between the aircraft dynamic response and braking performance,especially the influence of landing gears and tires on braking performance. Some valuable conclusions, which are helpful to design and improve the aircraft anti-skid braking system,are drawn.

Key words landing gears; tires; airplanes; aircraft anti-skid system; braking simulation; mechanical model