

# 基于虚拟惯性台的刹车系统仿真研究

## Study on Brake Control System Test Method Based on Virtual Simulation Experiments

中航工业第一飞机设计研究院 李强 李志勇 李胜军 李振水

**[摘要]** 针对传统的惯性台试验不具备带起落架刹车能力,无法开展多轮起落架系统刹车试验的不足,提出了一种能与试验室惯性台试验原理、方法相结合,又能克服传统的物理试验不足的虚拟惯性台试验方法。利用仿真软件建立了虚拟惯性台仿真试验模型,对模型进行了仿真分析,并与外场实测结果进行了对比。结果表明:仿真分析结果与实测结果较为接近,所建立的模型简易可行,可以方便开展带起落架的多轮起落架刹车系统虚拟试验。

**关键词:** 虚拟惯性台 刹车 虚拟试验

**[ABSTRACT]** With the lack of traditional virtual simulation experiments test don't have the capability with landing gear, which also can't be carried out several rounds of the landing gear brake system test, this paper proposes one test method which is combined with laboratory simulation experiments test principle and can overcome the traditional test method by the lack of physical test. Based on software MATLAB, the model of virtual simulation experiments are established and analyzed in the simulation. With the contrast of outfield test result, it shows that simulation analysis result is proximity to outfield test result. The model is simple and convenient to carry out brake system virtual test with multi-wheel landing gear.

**Keywords:** Virtual simulation experiments  
Brake Virtual test

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.S2.097

飞机防滑刹车系统是飞机重要的机载动作系统,对飞机的起飞、安全着陆起着重要的作用<sup>[1]</sup>,刹车系统性能的好坏直接影响飞机及机载人员的安全。在飞机试飞测试阶段之前,飞机刹车系统需在惯性台上进行反复的试验测试,然而受空间的限制,试验台上难以开展带多轮起落架的机轮刹车试验,并且惯性轮表面不能很好地模拟真实跑道的不平度、光滑度。这样,如果等到试飞前才测试刹车系统的性能,容易延误研制周期。

基于数学模型的虚拟惯性台试验方法能够有效克服传统惯性试验台的不足,灵活模拟不同道面路况,同时不受结构和空间限制。因此,需对基于虚拟惯性台的

刹车控制系统试验方法进行研究,以便为刹车系统设计和试飞验证提供借鉴。

### 1 虚拟惯性台试验

虚拟惯性台试验是指运用现代仿真技术,完全基于数学模型开展刹车系统虚拟试验。结合试验室惯性台试验原理,使用水平运动道面模型模拟传统物理试验用的惯性轮,用起落架数学模型模拟实际机轮,利用水平运动道面模拟惯性台机轮与道面之间的相对运动,并且能够充分考虑飞机升力、阻力的影响,同时能够充分验证道面不平度、道面干湿等复杂道面情形下飞机刹车系统的性能。

### 2 刹车控制系统虚拟试验模型的建立

虚拟惯性台主要由机体质量块、固定地面、起落架、移动地面和刹车机轮组成(图1)。通过建立各部分的模型,设定虚拟试验初始状态,进行动力学求解,根据刹车系统的动态控制调节过程得到刹车压力和机轮速度变化曲线,进而评估防滑刹车系统性能。

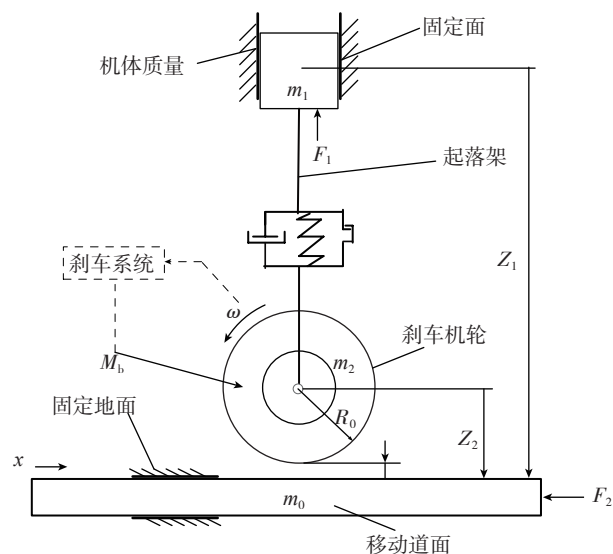


图1 带起落架的刹车系统虚拟试验简化示意图

Fig.1 Brake system virtual test with landing gear simplify sketch

#### 2.1 虚拟惯性台

起落架的缓冲器内力:

$$f = K_1 h + C_1 \dot{h} + (K_2 \varepsilon + C_2 \dot{\varepsilon}),$$

机轮与道面之间的正压力:

$$N = K_3 \delta + C_3 \dot{\delta},$$

上式中:  $K_1$  为当量弹簧刚度;  $K_2$  为限制力模型的接触弹簧刚度;  $K_3$  为轮胎刚度;  $\delta$  为轮胎压缩量;  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  为阻尼系数;  $\varepsilon$  为限制力模型的接触深度。

机轮与道面之间的摩擦系数  $\mu = D \sin (C \arctg (B \sigma))$ , 与滑移率  $\sigma$  具备统计意义的曲线关系:

$$\sigma = \frac{V - \omega R}{\max(|V|, 10^{-12})}。$$

当飞机速度一定时,对于不同的跑道表面,如干跑道、湿跑道、冰跑道状况下,系统摩擦系数与滑移率的关系如下:

$$\text{干跑道: } \mu = 0.8 \sin (1.5344 \arctg (14.0326 \sigma)),$$

$$\text{湿跑道: } \mu = 0.4 \sin (2.0192 \arctg (8.2098 \sigma)),$$

$$\text{冰跑道: } \mu = 0.2 \sin (2.0875 \arctg (7.201788 \sigma)),$$

机体质量块的垂直运动模型:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{z}_1 &= m_1 g - F_1 - f \\ F_1 &= 0.5 \rho C_y S_y V^2 \end{aligned}$$

刹车机轮的垂直运动模型:

$$m_2 \ddot{z}_2 = m_2 g + f - N,$$

刹车机轮的转动模型:

$$J \dot{\omega} = \mu N R - M_b,$$

移动道面的水平运动模型:

$$\begin{aligned} m_0 \ddot{x} &= -\mu N - F_2 \\ F_2 &= 0.5 \rho C_x S_x V^2 \end{aligned}$$

刹车距离的模型:

$$s = \int_0^t V(t) dt,$$

上式中:  $F_1$  为气动升力;  $\rho$  为空气密度;  $C_y$  为升力系数;  $S_y$  为升力计算面积;  $M_b$  为刹车力矩;  $F_2$  为气动阻力;  $C_x$  为阻力系数;  $S_x$  为阻力计算面积;  $V(t)$  为刹车机轮速度。

### 2.2 刹车系统虚拟试验建模

刹车控制系统<sup>[2]</sup>由防滑控制盒、压力伺服阀、刹车装置、机轮、轮胎、速度传感器等组成,机轮速度信号经速度传感器后与基准速度(由机轮速度设计得到)做比较处理,得到速度差信号,这个信号是控制系统真正的输入<sup>[3]</sup>。然后把它送给防滑控制盒,控制盒有一个防滑电流输出,送给压力伺服阀从而控制伺服阀输出的刹车压力,该刹车压力到达刹车装置后,通过液压活塞作用于压紧盘调节刹车装置之间的压紧力,从而改变刹车力矩,刹车力矩与轮胎和跑道之间的结合力矩共同控制机轮的转动,形成一个以机轮速度为负反馈的闭环控制系统,运用 MATLAB 建立刹车控制系统数学模型。根据机体及起落架、机轮受力数学模型<sup>[4-5]</sup>,利用动力学建模

软件建立虚拟惯性台模型。

### 3 刹车系统虚拟试验结果

设定移动道面质量为飞机当量质量,设置刹车机轮初始离地高度 0.3m、初始转速为 0r/s。表 1 给出了在干跑道和湿跑道状况下多轮起落架刹车虚拟试验以及外场实测刹车距离及时间结果。

表1 虚拟试验结果与外场实测结果对比

项目	虚拟试验结果	外场实测结果
干跑道下刹车距离 /m	455	442
湿跑道下刹车距离 /m	670	665
干跑道下刹车时间 /s	10	8
湿跑道下刹车时间 /s	24	23.5

### 4 试验结果分析

防滑刹车系统性能主要指标为刹车压力、刹车距离、刹车时间以及机轮速度,从仿真曲线可以看出:在湿跑道条件下,防滑刹车系统始终工作,飞机机轮速度和刹车压力的动态特性比较明显。湿跑道下刹车距离为 670m,刹停时间为 24s,与外场实测结果基本一致;在干跑道条件下,防滑刹车系统并不始终工作,机轮速度变化曲线与实际刹车趋势较为一致,证明所建立的刹车控制系统虚拟试验模型是正确、有效的。

### 5 结束语

通过建立合理的虚拟惯性台刹车系统仿真试验模型并选取合理的参数,运用 MATLAB 等仿真软件对刹车系统进行了起落架多轮刹车虚拟仿真,仿真曲线表明所建立的虚拟惯性台刹车系统与外场实测结果基本吻合,仿真结果可作为实际物理试验验证的参考,为实际物理试验提供指导。

### 参考文献

- [1] 邹美英,谢利理.飞机液压刹车系统数字仿真研究.计算机仿真,2005,22(8):45-48.
- [2] 周恩智.飞机防滑刹车仿真技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2009.
- [3] 杨新文,吴瑞祥,胡枫梧.飞机刹车系统的数字仿真.系统仿真学报,1997(4):56-61.
- [4] 张明,聂宏.飞机地面转弯和刹车响应动力学分析.航空学报,2008,29(3):616-621.
- [5] 李思政.多轮多支柱起落架飞机滑跑响应分析[D].西安:西北工业大学,2006.

(责编 宁军)