

# 基于 SWB 平台下的飞机防滑刹车系统的研究

## Aircraft Anti-Skid Braking System Based on SWB Platform

西北工业大学自动化学院 汪楚锐 蔡达真 谢利理

**[摘要]** 防滑刹车系统是飞机重要的机载设备,对飞机的起飞、安全着陆起着重要的作用。文中介绍了以iHawk 并行仿真计算机为硬件平台,结合航空机轮刹车实验台,设计了飞机防滑刹车模型,并详细介绍了整个系统的数学建模及仿真研究,深入探讨了飞机动力与运动特性。经仿真测试,验证了该半实物仿真系统可行、有效,并且该系统有助于新技术、新理论在飞机刹车系统设计中的应用与推广,具有较强的实际工程意义。

**关键词:** 飞机防滑刹车 航空机轮刹车试验台 半实物仿真 Simulation Workbench (SWB)

**[ABSTRACT]** Braking system is an important airborne device of an aircraft, which plays an important role in taking off and safe landing. The hardware platform based on the iHawk concurrent simulation computer is introduced in this paper. The anti-skid braking system model is designed through air wheel braking test bench. The Mathematical modeling and simulation of the whole system are presented. Dynamics and movement characteristics of aircraft is discussed in detail. Through simulation test, it is proved that this semi-physical simulation system is practical and efficient, and is helpful for application and popularization of new technologies and new theories in the aircraft braking systems.

**Keywords:** Aircraft anti-skid braking system Aircraft wheel bralce test bench Semi-physical simulation Simulation Workbench (SWB)

随着军用和民用航空工业的进步和发展,飞机朝着大吨位、高速度方向发展的需求日益强烈,这就使得飞机要在很短的时间内吸收更大的飞机着陆时的动能,所以对飞机的刹车系统来说是个严峻的考验。飞机着陆过程持续时间短,工作环境恶劣,受到各种内外部不稳定因素以及系统非线性的影响,

安全问题难以保证。所以研究具有适应性强、安全、平稳、高效的飞机防滑刹车系统是一个技术难题。

由于飞机构成系统的部件复杂和周围环境变化的不确定性,使得飞机刹车系统成为一个具有不确定性与时变参数的复杂非线性伺服控制系统。在设计与试验过程中,系统仿真作为重要技术得到了广泛的应用。由

于数字仿真在建立飞机模型时会存在一定的误差,而半实物仿真的显著特点是“硬件在回路中”,与传统的数字仿真相比,由于试验中实物模型参与整个仿真过程,试验过程中各个环节更逼近真实的状态,试验结果的可信度与参考价值更高,比数字仿真更接近实际,比实物仿真投资少、效率高,是较理想的研究手段。

本文提出一种基于并行计算机的飞机防滑刹车系统半实物仿的方法,从半实物仿真的角度研究飞机刹车特性,为飞机刹车控制系统的试验研究提供更加有效的试验平台。

## 1 飞机防滑刹车系统分析

飞机刹车系统主要包括机轮、速度传感器、刹车控制单元、液压伺服阀、刹车装置等。当飞机着陆后,由原来的飞行状态变为在地面的滑跑状态,刹车系统开始工作,机轮速度传感器提供与机轮速度成正比的近似正弦信号,并以此表征机轮速度传给刹车控制单元;刹车控制单元结合给定踏板信号值以及接收到的机轮速度信号值,通过相应的控制规律输出防滑电流信号到液压伺服阀,控制液压伺服阀的输出刹车压力,该压力经刹车装置转变为作用在机轮动盘和静盘间的刹车力矩,以此来制动机轮,实现飞机的减速。

### 1.1 飞机防滑刹车的动力学分析

飞机滑跑时,轮胎和跑道间产生的反向摩擦力称为结合力(当驾驶员脚踩刹车时,通过连接管路给刹车装置施加一定的刹车压力,使机轮由于受到刹车装置产生的刹车力矩而减速,从而造成轮胎与地面之间的相对滑动,由此产生的摩擦力给飞机一个向后的拉力即制动力,刹车系统中称其为结合力),结合力与地面对轮胎的支持力的比值称为结合系数。一般来说,机轮在刹车过程中的受力情况非常复杂。但是,如果忽略一些次要的因素,就可以大大简化机轮的受力分析。图1为单一机轮受力分析的简化模型,推广到整个飞机也很适用<sup>[1]</sup>。

在图1中, $V_x$ 表示飞机速度, $w$ 表示机轮角速度, $J$ 表示机轮转动惯量, $T_b$ 表示机轮刹车力矩, $r$ 表示机轮有效半径, $F_s$ 表示机轮所承受的力, $F_x$ 表示轮胎/地面结合力矩。

轮胎/地面结合系数 $\mu$ 是指在给定路况下,机轮与路面之间的摩擦系数,它对跑道性质和表面状况非常敏

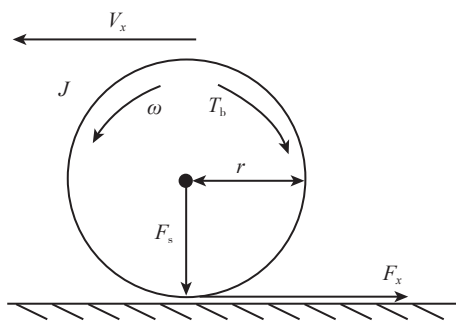


图1 机轮受力模型分析

Fig.1 Analysis of wheel force model

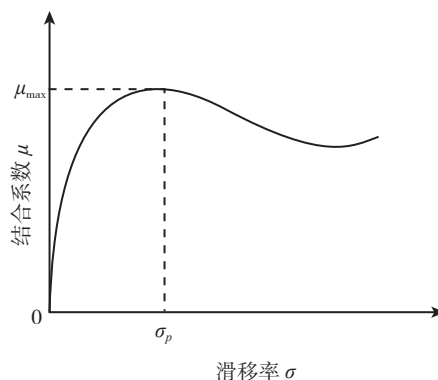


图2 结合系数与滑移率的关系

Fig.2 Relationship of associative coefficient and slip ratio

感,可以在短时期内发生很大的范围变化。结合系数越大,机轮与跑道之间能够产生的最大纵向力和侧向力也越大。忽略滚动摩擦等因素,机轮动力学方程可以简化为:

$$F_x = \rho F_s, \quad (1)$$

$$J\dot{\omega} = rT_x - T_b. \quad (2)$$

飞机刹车过程中,当  $T_b$  较小且未达到极限时,地面提供的结合力矩  $M_x$  足以克服刹车力矩  $T_b$  使车轮滚动;当  $T_b$  继续上升到某一足够大的值时,  $M_x$  达到地面所能提供的最大结合力矩,此时结合力矩已不再增加,但刹车力矩却可以随着刹车压力的增大而继续增大,会导致机轮抱死而出现拖胎现象。因此,若想充分利用地面结合力矩,就必须及时合理地调节刹车力矩。如果刹车力矩偏小,则刹车效率低下,而过大的刹车力矩会致使机轮产生较深打滑,甚至导致严重的后果。

由以上分析,飞机防滑刹车控制的目的是—方面防止飞机陷入深度打滑的危险状态,另一方面追求最大的结合系数,使飞机获得尽可能大的负加速度。

### 1.2 轮胎与跑道表面结合系数分析

飞机刹车制动主要依靠刹车时轮胎和地面之间产生的结合力。在飞机重量一定的情况下,影响结合力的主要因素是结合系数。而结合系数又受多种因素的影响,比如滑移率、轮胎与地面的最大摩擦系数(最大摩擦系数与跑道路面状况密切相关)、飞机速度的变化、轮胎类型以及环境因素等。其中滑移率和轮胎与地面的最大摩擦系数最为重要<sup>[2]</sup>。在飞机刹车过程中,机轮速度小于飞机速度时将产生滑移,滑移率  $\sigma$  定义为:

$$\sigma = \frac{(V_x - vr)}{V_x}. \quad (3)$$

如图2所示,滑移率  $\sigma$  与结合系数  $\mu$  呈非线性关系。在整个刹车过程中,结合系数存在一个最大值  $\mu_{\max}$ ,它对应的滑移率为最佳滑移率  $\sigma_p$ 。防滑刹车就是要在整个刹车过程中让滑移率跟踪最佳滑移率  $\sigma_p$ ,产生最大结合系数  $\mu_{\max}$ ,从而达到最佳刹车效率<sup>[1]</sup>。

描述结合系数和滑移率关系的表达式为:

$$\mu = B \sin(C \arctan D \sigma), \quad (4)$$

其中,  $B$ 、 $C$ 、 $D$  均为大于0的常数。

### 1.3 航空机轮刹车试验台模型分析

航空机轮刹车试验台是重要的航空机轮试验设备,每年承接大量的机轮试验和检验任务,对我国的航空机轮的科研与生产起着非常重要的作用。该设备采用大直径鼓轮代替飞机跑道,将飞机机轮对地面的相对运动转化为机轮对鼓轮的相对运动,能模拟飞机的起飞、滑行、着陆和刹车等过程,可以在给定的轮胎载荷、鼓轮速度、刹车压力等参数下对航空轮胎及刹车装置的各项参数进行测试,从而检验受试装置的性能指标。

由于鼓轮的圆周速度相当于飞机在跑道上的直线速度,所以鼓轮组合的动能应当等于飞机着陆时分解在一个机轮上的动能。飞机的质量  $M$  (一个机轮承受的质量)乘以鼓轮半径  $R$  的平方,在数量上等于鼓轮组合的转动惯量  $J$ ,即:

$$M \cdot R^2 = J. \quad (5)$$

在刹车试验时,若从鼓轮组合能量中加上或减去一部分可控能量,刹车装置能够吸收或消耗的能量就可以大于或小于鼓轮组合能量,在这种情况下,鼓轮组合的有效惯量具有不同的视在值,可以代表不同质量的飞机,称为惯量模拟。鼓轮的视在惯量就是已知的模拟惯量<sup>[3]</sup>。

由上面的分析可以知道,刹车试验系统是用一个大直径大惯量的鼓轮来模拟飞机的跑道,把飞机相对于跑道的运动转化为机轮相对于鼓轮的运动。飞机在着陆时具有动能<sup>[4]</sup>为:

$$E_0 = \frac{1}{2} m v_0^2. \quad (6)$$

在机轮刹车试验过程中,轮胎在鼓轮上产生刹车力矩,鼓轮组合的转动动能被刹车装置(刹车盘)吸收,变

成热量耗散掉。在理想条件下,不计摩擦、风阻和引擎的反推力等因素影响,飞机从着陆所具有的初始速度开始刹车到停止的整个过程中,刹车装置所吸收的能量应当等于刹车试验开始时具有相同圆周速度的等惯量鼓轮组合所具有的转动动能。既有  $E_0 - E = E_B$ , 其中,  $E_B$  为刹车能量,  $E$  为鼓轮当前的动能, 又因为

$$\frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv^2 = \int T_B w dt \quad (7)$$

式中,  $w$  为机轮速度,  $T_B$  为刹车力矩。由此可以算出飞机当前速度  $v$ 。

## 2 基于 SWB 平台下的防滑刹车仿真的实现

Simulation Workbench (简称 SWB) 是美国 Concurrent Computer 公司推出的一款专门进行实时仿真的开发工具,是允许仿真模型实时地执行循环的一个软件包,既可以连接外围设备的输入输出,还可以通过模型信号和参量使程序与操作人员之间互动。SWB 完全支持 Concurrent Computer 公司的 iHawk 多处理器平台,支持 Simulink 和 C/C++/Fortran 等手工代码模型联合仿真。SWB 所有组成部分通过一个内存实时数据库 (RTDB) 相互联系,即所有组成部分将映射到这个共享内存内以达到相互传递信息的目的。RTDB 可以被所有的仿真进程所访问,并且 RTDB 存储仿真使用的所有数据,可以使得每个组成部分之间以最快的速度进行通信,有效地保证了软件设计的实时性。

为了减少系统进行数学建模时带来的误差,提高仿真的逼真程度,半实物仿真要求在条件允许的情况下应尽可能在仿真系统中接入实物,以取代相应部分的数学模型。在整个飞机刹车系统中,根据现有机轮刹车系统试验条件和环境,将液压系统和刹车控制盒用实物系统来代替模型接入仿真回路,而航空机轮刹车试验台模型、轮胎、机轮与跑道结合系数等用物理实现比较困难,因此采用数学模型,通过仿真计算机接入仿真回路<sup>[5]</sup>。这样由模型系统和实物系统就可以组成机轮刹车半物理仿真试验系统,具体原理组成如图 3 所示。

在半物理仿真系统中,飞机刹车控制单元和液压系统作为实物设备接入仿真回路中,并通过各种 I/O 板卡与实时仿真机连接。信号调理模块则是实现实时仿真机与实物系统间的接口桥梁。

(1) 机轮速度模拟电路。实时仿真机的 D/A 板卡中输出的是电压信号,该电压信号经过机轮速度模拟电路进行电压信号向频率信号之间的变换,以模拟飞机的

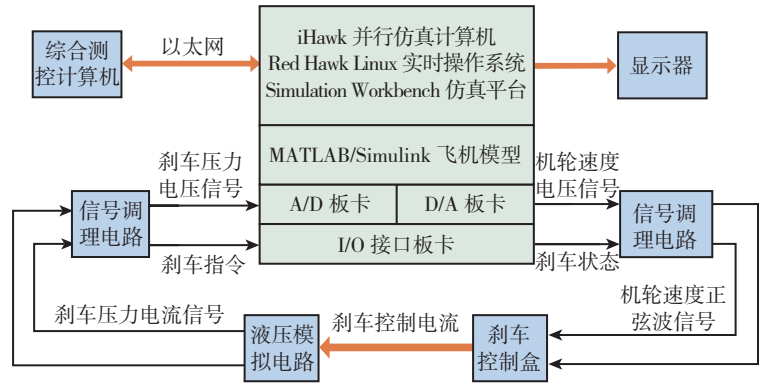


图3 飞机刹车半物理仿真系统结构  
Fig.3 Semi-Physical simulation system structure of aircraft brakes

机轮速度信号,输入到刹车控制单元(实物系统)内部。

(2) 模拟输入放大电路。液压系统(实物系统)输出与控制刹车压力的电流信号,经过模拟输入电路调理及放大后转换为相应的电压信号,然后再由实时仿真机的 A/D 板卡采集并输入到计算机内部。

(3) 开关量调理电路。实时仿真机的 I/O 板卡通过开关量调理电路输入或输出飞机刹车过程中的数字信号。

结合前面的飞机动力学方程,将它们有机组合在一起,理清清楚它们之间的相互作用及影响关系,于是就得到了机轮刹车系统总的仿真模型,如图 4 所示。仿真模型中只有刹车装置模型以及飞机动力学模型,液压以及控制盒是实物。图 4 所示小方块是仿真模型与 I/O 板卡相连接的模块,是 SWB 软件特有的一个功能,通过这个输入输出模块,可以很方便地通过板卡来发出以及接收信号。

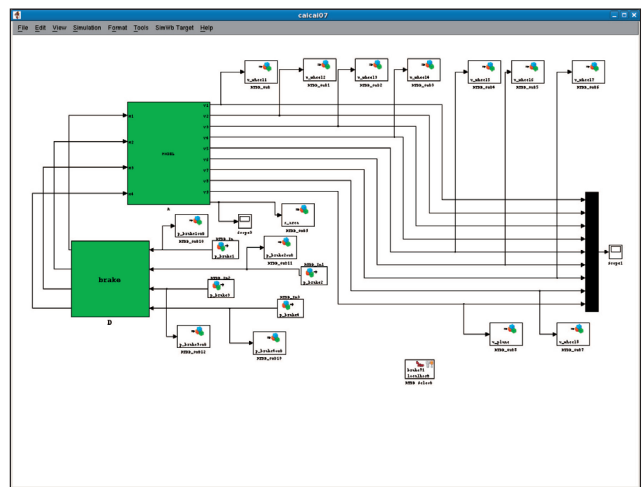


图4 飞机刹车总体模型  
Fig.4 Overall model diagram of aircraft brake

### 3 仿真试验与结果分析

设定某型号飞机初始速度为 72m/s,最大刹车压力为 10MPa,在积水跑道下进行的仿真试验,仿真步长为 1ms。从仿真曲线中可以看出,初始阶段机轮打滑较深,刹车力矩突变,这是刹车系统在落地瞬间尚未进入正常工作状态。经短时间的调节,刹车系统工作趋于稳定,打滑变浅,刹车力矩曲线的振幅逐渐加强,这时刹车效率较高,飞机速度不断减小直至刹停<sup>[6]</sup>。

在图 5 中,蓝线表示的刹车压力曲线,红线代表机轮速度曲线,绿线代表飞机速度曲线,黑线代表飞机从刹车开始到停止走过的距离。当机轮速度下降时,刹车压力增大,当机轮速度下降过快时,控制盒会认为出现了机轮打滑现象,这时会输出一个大的防滑电流,以减少刹车压力,机轮打滑越严重,打滑时间越长,防滑电流越大,刹车压力越小;当刹车压力减小时,机轮速度上升,控制盒输出较小的防滑电流,增大刹车压力,以控制机轮速度。所以机轮速度曲线总是一升一降的,刹车压力曲线也是一升一降的。从刹车速度曲线可以看出飞机的防滑功能还是比较好的,没有出现严重的抱死现象,且打滑频率在正常的范围之内,刹车效率达到了 91.33%,刹车时间为 45.7s,刹车距离为 1659m,说明建立的飞机模型较为合理,实物系统正常工作;并且在 1ms 的仿真步长设定下,半实物仿真系统较好地达到了实时性的要求,满足了各软、硬件系统不同模块之间的同步要求。因此,该半实物仿真系统能够真实地模拟这个飞机的刹车过程,反映飞机刹车的状态变化,证明了整套飞机刹车半实物仿真系统的可行性与有效性。

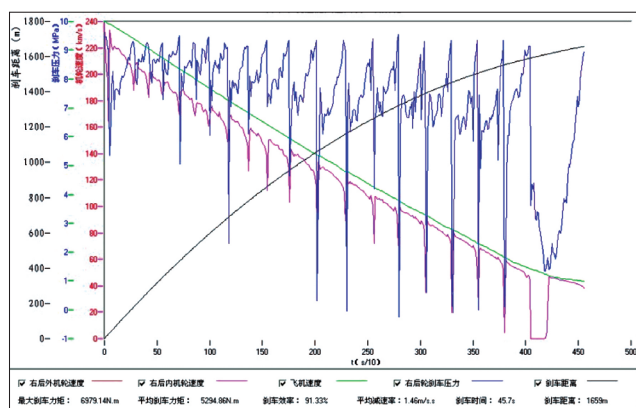


图5 飞机刹车系统半实物仿真波形

Fig.5 Semi-physical simulation waveforms of aircraft brake system

### 4 结束语

本文介绍了基于 iHawk 并行仿真平台、Simulation

Workbench 仿真环境下对飞机防滑刹车系统的研究,仿真曲线能够较为准确地反映飞机刹车过程中的状态变化,证明了整套飞机刹车半实物仿真系统的可行性与有效性。该方法可以及早发现系统设计中的缺陷,确定最佳控制策略以降低风险、缩短设计周期、减少试验成本,而且有助于新技术、新理论在飞机刹车系统设计中的应用与推广,具有较强的实际工程意义。

### 参考文献

- [1] 宋海滨. 飞机防滑刹车控制方法研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
- [2] 温兴清. 基于动态摩模型的路面辨识及最优刹车控制研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [3] 张谦. 飞机电传数字防滑刹车系统控制律仿真研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 1999.
- [4] 鄢全文. 航空机轮试验台电器柜改造与能量控制 [D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
- [5] 姜伟, 谢利理. 飞机刹车系统的并行计算机半实物仿真. 航空精密制造技术, 2006, 42(5): 43-47.
- [6] 齐洁, 谢利理, 王健. 基于并行计算机的飞机刹车系统半实物仿真. 系统仿真学报, 2007, 19(13): 3101-3104. (责编 小城)

(上接第 71 页)

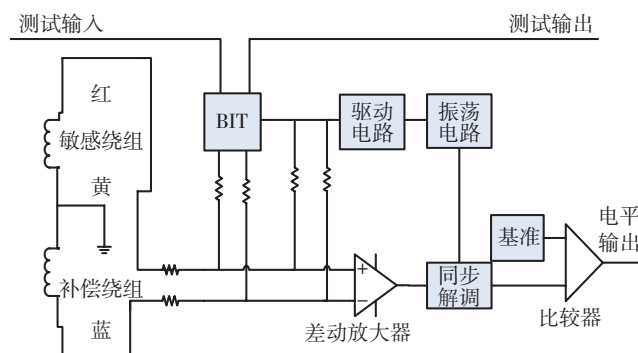


图4 信号处理电路

Fig.4 Signal processing circuit

理系统发展的方向为更加智能化,更加客户化。

而随着接近传感器不断地优化结构设计和电路设计,传感器向着更长平均故障间隔时间、更高测量精度和更低廉价格的方向发展。

### 参考文献

- [1] FAA. 美国联邦航空条例 FAR-25 部, 2009.
- [2] 伊恩·莫伊尔, 阿伦·西布里奇. 民用航空电子系统. 北京: 航空工业出版社, 2009.
- [3] 陈圣灵, 侯成晶. 传感器技术及应用电路. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [4] 飞机设计委员会总编委会. 飞机设计手册·电气系统设计. 北京: 航空工业出版社, 1999. (责编 良辰)