

飞机电传刹车系统设计与验证技术

刘泽华*, 贾爱绒, 谢彦

中航工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘 要: 针对传统的刹车系统设计与系统试验验证的不足, 在系统设计上提出了基于数字电传刹车系统的自动刹车控制技术、刹车压力反馈调节技术、射流管式压力刹车阀技术。采用基于虚拟样机的协同仿真技术和系统闭环半物理验证技术, 建立了一套飞机数字电传刹车系统协同虚拟仿真验证方法和电传刹车闭环控制试验验证平台, 提高了系统仿真试验的效率, 缩短系统的研制周期。

关键词: 数字电传刹车系统; 自动刹车; 射流管刹车阀; 刹车压力反馈调节; 协同仿真; 半物理验证

中图分类号: V227.5 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2016) 09-0031-05

飞机刹车控制系统是非常复杂的机电系统, 可直接影响飞行安全。传统的刹车系统采用机械、液压为主的控制方式, 由于存在着间隙、摩擦力、变形、易受污染等机械系统固有的弊端, 导致这类刹车系统故障率高、可靠性低、寿命短、维修性差、使用维护成本高, 制约了技术性能和作战效能的进一步提升^[1-3]。在系统验证方面, 目前飞机机轮刹车系统试验验证平台主要是基于传统的物理台架和铁鸟试验台的静态试验为主, 辅助基于惯性台的动态验证试验, 但系统惯性台试验存在一定弊端, 使得刹车系统的设计和验证必须采用先进的设计理念和方法, 以满足飞机性能要求和降低飞机研制的风险。

本文对当前飞机电传刹车系统中一些关键和先进的设计及验证技术进行了初步论述, 重点对自动刹车技术、射流管刹车阀技术、机轮刹车压力反馈调节技术、基于虚拟样机的协同仿真技术和半物理验证平台及试验验证技术的研究与应用情况进行了评述。

1 系统先进设计技术

1.1 自动刹车技术

自动刹车系统的控制与飞机相关专业交联关系比较复杂, 与飞机总体、飞控、动力装置、起落架系统等都存在信息交联^[4], 其系统控制流程如图 1 所示。

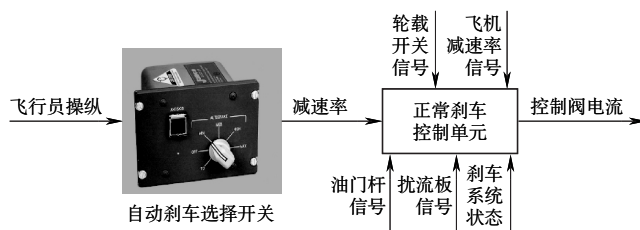


图 1 自动刹车系统控制流程图
Fig.1 Automatic braking system control flowchart

自动刹车控制律的控制策略就是在飞机刹车过程中使飞机减速率保持为恒定的值, 恒减速率控制的主要目的是改善乘客舒适度, 在自动刹车控制的过程中, 其难点是要充分考虑与防滑刹车系统的匹配性, 通过两者综合共同完成整个刹车过程, 对自动刹车采用的控制方式如图 2 所示。

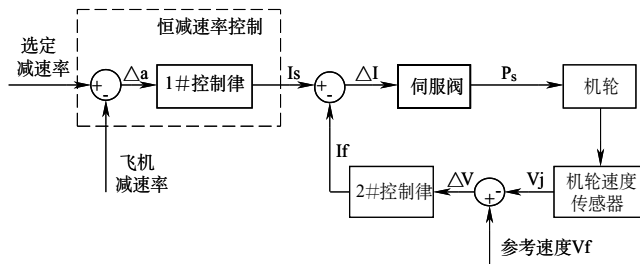


图 2 自动刹车控制律原理框图
Fig.2 Automatic braking system control law principle

收稿日期: 2016-04-11; 退修日期: 2016-06-07; 录用日期: 2016-07-21

* 通讯作者: Tel: 029-86832406 E-mail: liuzehua526@126.com

引用格式: LIU Zehua, JIA Airong, XIE Yan. Advanced design and experiment technology of Brake-By-Wire (BBW) control systems[J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(09):31-35. 刘泽华, 贾爱绒, 谢彦. 飞机电传刹车系统设计与验证技术[J]. 航空科学技术, 2016, 27(09):31-35.

其中,恒减速率控制称为1#控制律,完成刹车功能,采用PID控制方式。防滑控制称为2#控制律,完成防滑功能,采用PD+PBM的控制方式。1#控制律输出的信号为刹车信号,2#控制律输出的信号为防滑信号,1#控制律所使用的飞机减速率是利用总线传递过来的飞机速度信号进行计算得出,飞机减速率在规定的时间内能够跟随选定减速率,从而实现恒减速率控制。

1.2 射流管刹车阀技术

以往刹车系统采用的伺服阀是喷嘴挡板式,其喷嘴和节流孔尺寸很小,油液内污染物的通阻力大,导致该附件的抗污染能力差,死区易漂移、失效模式不可控,工作可靠性低。射流管阀的主要优点表现在:抗污染能力强、故障安全、寿命长。因此,如果能将射流管压力伺服阀引入到飞机刹车控制系统,必将会给刹车系统特别是刹车控制阀性能带来质的提升。

通过理论研究了射流管压力伺服阀前置射流放大级理论、设计准则、恢复压力特性、静耗流量特性等技术,将计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)软件Fluent引入射流管压力伺服阀关键部件射流管流场建模中,如图3所示;研究了射流放大器结构与流场、射流管玻璃柱长度及其控制技术;温度、振动、冲击、加速度等极端环境下的特性分析和动态特征。

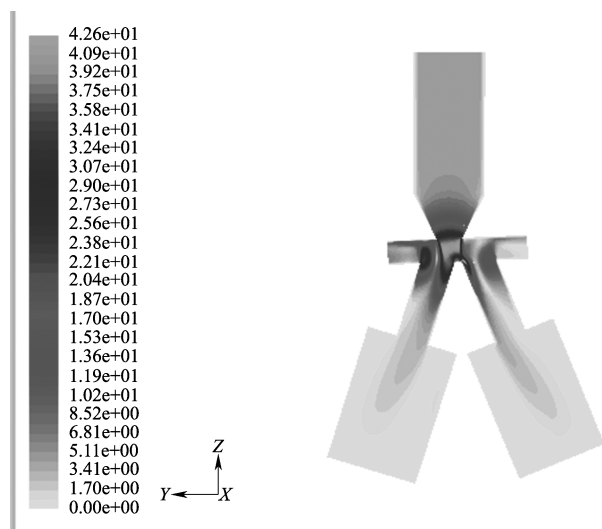


图3 射流管与接收管原理及建模

Fig.3 Jet pipe & receiving pipe principle and modeling

针对射流管刹车阀响应特性敏感的特征,从理论上分析了射流管刹车阀稳定平衡因素,通过系统仿真技术,建立射流管刹车阀扰动激励模型,对不同的影响源进行扰动因素分析,明确了改进射流管刹车阀稳定性的方法。

1.3 机轮刹车压力反馈调节技术

采用射流管刹车阀后,刹车系统各通道刹车压力差异性相对较高,当前射流管刹车阀自身输出压力的稳定性还有待进一步提升。基于此,提出了机轮刹车压力反馈调节控制策略,用以提高系统输出的稳定性,降低各通道输出的差异性。

刹车压力反馈调节由刹车指令提供输入信号,利用系统自带的压力传感器,结合控制单元和刹车控制阀构成闭环系统来控制调整压力。刹车压力反馈调节原理框图如图4所示,其中控制环节由刹车控制单元实现,压力传感器I/V变换、AD采集,双路刹车控制阀DA输出、V/I变换等环节由控制单元完成。

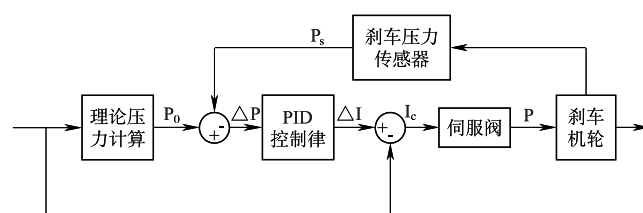


图4 刹车压力反馈调节原理框图

Fig.4 Brake pressure feedback modulate principle

根据实际使用统计,刹车伺服阀压力在工作过程中始终存在着偏高和偏低两种情况。经分析,刹车伺服阀参数漂移有死区漂移和增益漂移两种情况。因此,压力校准针对这两种情况进行校准。

刹车伺服阀是电流驱动型压力伺服阀,在一定范围内通过改变电流,能够改变压力。因此,无论是何种漂移引起的压力误差,只要刹车伺服阀漂移量在一定的可控范围内,均能够通过调整输出电流进行校正。当死区变化,假设死区减小,同样电流下压力增大,为了减小压力,可以减小电流,反之增大电流;当增益变化时,假设增益减小,同样电流下压力减小,为了增大压力,可以增大电流,反之减小电流。

2 系统先进验证技术

2.1 基于虚拟样机的协同仿真技术

(1) 系统建模与协同虚拟仿真环境

利用动力学建模软件 LMS Virtual.Lab、控制系统建模软件 Matlab、系统建模软件 LMS Imagine.Lab 各自的优势和这3个软件之间良好的联合仿真接口功能^[5],可以实现数字电传刹车系统协同仿真计算。基于此,构建了数字电传刹车系统协同仿真平台,此平台的建模与协同仿真环境克服了单

一软件在仿真领域的缺点,起到了优势互补的作用。刹车控制系统建模与协同仿真环境框图如图5所示。

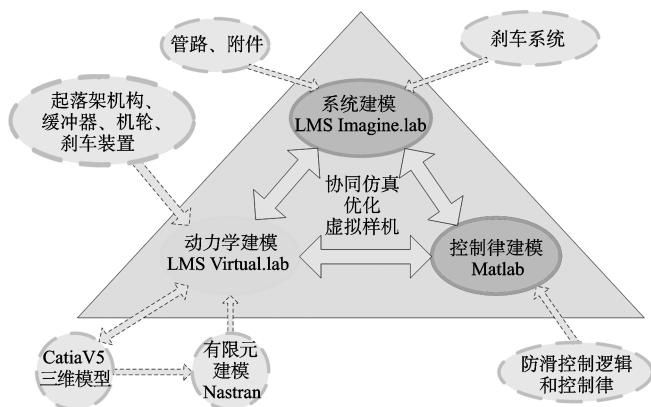


图5 机轮刹车系统建模与协同仿真环境

Fig.5 Wheel brake system modeling and collaborative simulation platform

(2) 电传刹车系统建模和仿真

刹车虚拟试验,是以传统的刹车惯性试验台为参照,取其最基本的原理,并抛去惯性台物理条件的不足。刹车虚拟试验以起落架落振仿真模型为基础,将道面模型与地面固定改为相对地面直线滑动,同时将道面模型变为可设定质量和运动速度的平板惯性体;增加主机轮刹车力矩作用点和机轮速度测量点,结合刹车控制系统模型可实现对刹车主轮的控制。构造这样的刹车虚拟试验模型,将极大简化对飞机三维模型准确性的依赖,避免在飞机动力学模型方面早期花费过多时间,并减少飞机数据复杂度,从而将关注点集中到与刹车直接相关的部分。

用 Matlab/Simulink 软件完成刹车控制律建模,依据提供的 CatiaV5 三维模型,建立起落架运动机构模型。采用子机构装配,构成完整主起落架模型,并在模型中定义机体质量块模型、平板道面、轮胎模型、气动力、机构、控制接口、初始状态等,完成动力学部分的建模。平板道面采用理想简单道面模型,轮胎力采用 Motion 的 Complex Tire 模型,图6为单通道刹车控制律模型,图7为射流管压力伺服阀模型,图8为系统协同虚拟模型,图9为系统仿真结果,对建立好的系统模型进行系统联合仿真,其结果用以指导系统的设计。

2.2 半物理验证平台及试验验证技术

为有效进行电传刹车控制系统综合试验,建立了系统半物理综合试验平台,该试验平台由信号激励与故障注入部分、物理电传刹车控制系统、实时飞行仿真系统、机轮速度驱动系统和系统信息显示告警系统组成。其中:

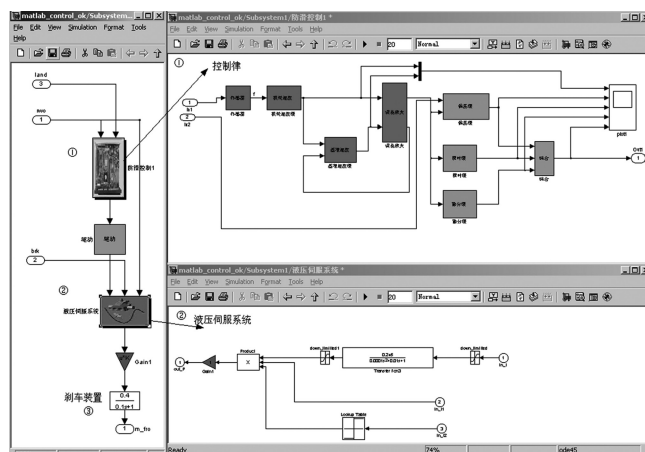


图6 单个刹车控制通道模型

Fig.6 Signal brake control channel model

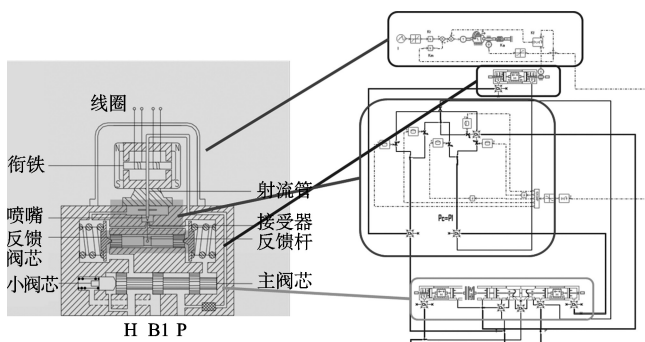


图7 射流管压力伺服阀模型

Fig.7 Jet pipe pressure servovalve model

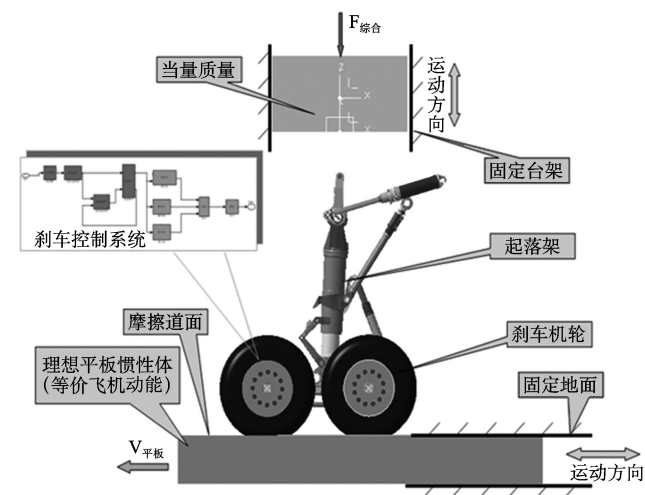


图8 系统协同虚拟模型

Fig.8 System collaborative simulation test model

(1) 信号激励与故障注入部分主要实现外部故障注入、DO 信号激励和 D/A 信号激励;

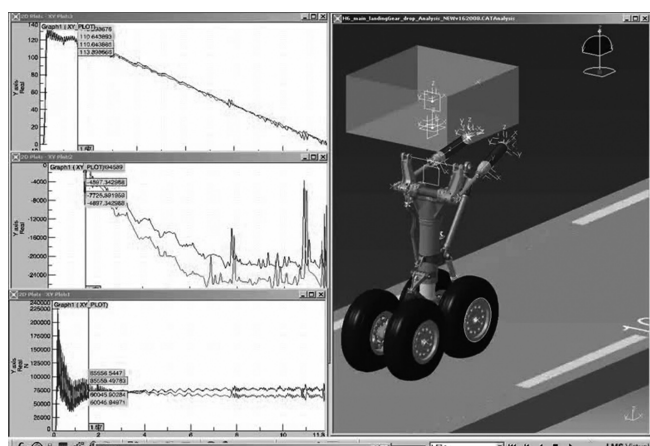


图9 系统仿真结果

Fig.9 System simulation test results

(2) 物理电传刹车控制系统作为被试件,均按照装机状态进行连接;

(3) 实时飞行仿真系统主要实现在电传刹车系统进行工作时,计算出飞机、起落架及机轮的运行状态,其内贮存有飞机、起落架和刹车机轮模型;

(4) 轮速驱动系统用于接收实时飞行仿真系统计算出的刹车机轮转速信号,并利用其控制系统,带动机轮速度传感器按照要求的转速进行运转;

(5) 系统信息显示告警系统主要实现电传刹车控制系统与上位机的通讯,显示电传刹车控制系统的概要信息以及告警信息,同时还可显示由实时飞行仿真系统传送过来的飞机相关信息,实现飞机滑跑刹车的可视化。

系统的具体组成部分如图 10 所示。通过系统闭环验证试验,能够更加真实的模拟整个机轮刹车系统的防滑刹车动态过程,通过对刹车控制单元增加相应的外部激励,能

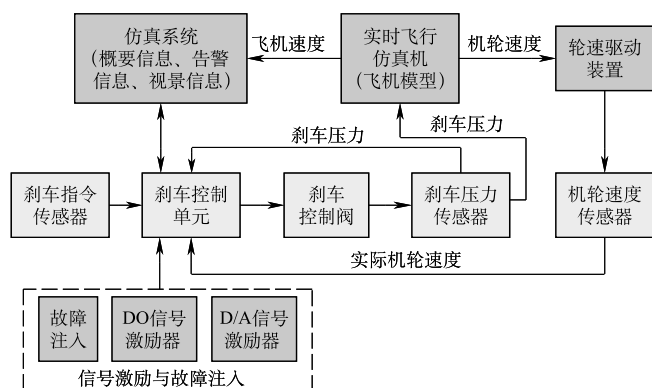


图10 数字电传刹车系统半物理验证平台组成

Fig.10 BBW control systems hardware-in-loop verification platform composing

够模拟系统在不同故障状态下飞机运行情况。将机轮速度通过飞机实时运算模型进行解算,采用物理驱动方式进行控制,能对整个机轮刹车系统及系统附件性能进行综合验证,相对于传统的物理台架验证,能够更加真实的进行系统动态试验,对系统能够更加全面、真实的进行验证。

3 结束语

飞机电传刹车系统的先进设计及验证技术,对提高飞机安全性、缩短飞机研制周期和研制成本均能起到良好的作用,具体归纳总结如下:

(1) 自动刹车技术的应用,可减轻驾驶员的工作负荷,提高刹车系统的安全性。

(2) 刹车压力反馈调节技术对改善主机轮刹车温度、刹车通道压力输出一致性、系统稳定性和安全性均起到良好的效果。

(3) 射流管刹车阀的应用,能显著提高刹车系统抗油液污染能力。

(4) 飞机数字电传刹车系统协同仿真技术和半物理试验验证技术的应用,能提高系统仿真试验的效率,缩短系统的研制周期。

AST

参考文献

- [1] 严爱军,王普,安晓辉.飞机防滑刹车控制方法综述[J].控制工程,2008,15(1):1-5.
YAN Aijun, WANG Pu, AN Xiaohui. Review of control method for airplane antiskid braking system [J]. Control Engineering of China, 2008, 15 (1): 1-5. (in Chinese)
- [2] 王辉,孙悦.飞机防滞刹车系统研究进展[J].液压气动与密封,2011,9:5-9.
WANG Hui, SUN Yue. Review of airplane antiskid braking system [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2011, 9: 5-9. (in Chinese)
- [3] 刘泽华,李振水,贾爱绒.大型飞机机轮刹车系统关键技术和发展趋势[C]//2013年首届中国航空科学技术大会,2013.
LIU Zehua, LI Zhenshui, JIA Airong. Developing trend and key techniques of large aircraft's wheel braking system[C]// The First Symposium of Chinese Aeronautical Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [4] 刘泽华,贾爱绒,谢彦,等.飞机自动刹车系统仿真验证技术[J].航空科学技术,2014,25(4):62-68.

LIU Zehua, JIA Airong, XIE Yan, et al. Simulation verification technology of aircraft automatic braking system [J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25 (4): 62-68. (in Chinese)

[5] 付永领, 齐海涛. LMS Imagine.Lab AMESim 系统建模和仿真 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.

FU Yongling, QI Haitao. Modeling and simulation system reference manual of LMS Imagine.Lab AMESim [M]. Beijing:

Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2011. (in Chinese)

作者简介

刘泽华 (1981—) 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 起落架控制系统设计。

Tel: 029-86832406 E-mail: liuzehua526@126.com

Advanced Design and Experiment Technology of Brake-By-Wire (BBW) Control Systems

LIU Zehua*, JIA Airong, XIE Yan

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: For the shortcoming of traditional brake system design and experiment, the auto brake control technology based on Brake-By-Wire (BBW) control system, brake pressure feedback modulate technology and jet pipe brake servovalve technology were put forward. The digital BBW control system collaborative simulation and hardware-in-loop verification bench were constructed based on virtual-prototype collaborative simulation technology and hardware-in-loop verification technology. The simulation experiment efficiency has been improved greatly and also shortening development cycle of the system.

Key Words: Brake-By-Wire (BBW) control system; auto brake; jet pipe brake servovalve; brake pressure feedback modulate; collaborative simulation; hardware-in-loop verification

Received: 2016-04-11; Revised: 2016-06-07; Accepted: 2016-07-21

*Corresponding author. Tel. : 029-86832406 E-mail: liuzehua526@126.com