

飞机自动刹车系统仿真验证技术

刘泽华^{1,*}, 贾爱绒¹, 谢彦¹, 李振水²

1. 中航工业第一飞机设计研究院 飞控液压设计研究所, 陕西 西安 710089

2. 中航工业第一飞机设计研究院 总师办, 陕西 西安 710089

摘要: 根据飞机刹车系统设计要求和系统的特点, 提出飞机自动刹车系统总体框架。以自动刹车中止起飞 (RTO) 为例, 对控制逻辑进行设计, 利用Stateflow工具建立控制逻辑模型并进行仿真, 仿真结果表明控制逻辑的正确性。建立自动刹车系统半物理仿真试验台, 通过给定减速率 3m/s^2 , 对自动刹车系统进行全数字仿真和半物理仿真, 全数字仿真得到飞机滑跑距离为672m, 半物理仿真得到滑跑距离为1016m, 减速率在 $2.88\sim 3.07\text{m/s}^2$ 之间变化, 均满足系统设计要求, 验证了系统设计的正确性和合理性。

关键词: 自动刹车; 中止起飞; 数字仿真; 半物理仿真; Stateflow

中图分类号: V227.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5453 (2014) 04-0062-07

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^[1]。自动刹车系统是目前国外军用运输机和民用飞机的一项标准配置,在国外空客系列飞机(A320、A330、A340和A380)和波音系列飞机(B737、B747、B757、B767、B777和B787)上有着广泛应用,国外近年来研制的军用飞机,如An70、A400M等机型都配置了自动刹车系统,国内ARJ21-700飞机、C919飞机也设置有自动刹车系统。自动刹车系统作为先进刹车控制系统的重要组成部分,能最大限度地提高刹车性能,显著改善乘员和乘客在着陆过程中的舒适度,同时还可以减轻飞行员的工作负荷,避免飞行员操纵刹车不当可能导致的危险。设置自动刹车系统是保证飞机飞行安全的一项重要措施。

自动刹车系统是一个相对复杂的多输入控制系统,国内自动刹车技术还处于一片空白,相关的技术资料几乎没有。在自动刹车系统的设计过程中,自动刹车控制律中恒减速率与防滑控制结合的研究以及自动刹车实现方法的研究都是必须攻克的关键技术。

试验作为型号研制的一个重要部分,其目的是在设计初期将设计过程中可能出现的问题及早暴露,对系统的设计进

行充分的分析和验证。随着仿真技术的逐步发展,仿真已经从研究设计的一种试验手段,逐步发展为各类型仿真系统互联,可以人工参与交互作用的一种综合环境,成为系统验证的一个非常重要环节。在自动刹车系统研制过程中,通过系统仿真验证,可以节约研制成本、降低研制风险和缩短研制周期。

1 总体构架

自动刹车系统的控制与飞机总体、飞控、动力装置、起落架等都具有信息交联,其系统控制流程如图1所示。

自动刹车系统的核心技术是恒减速率控制,即在飞机刹

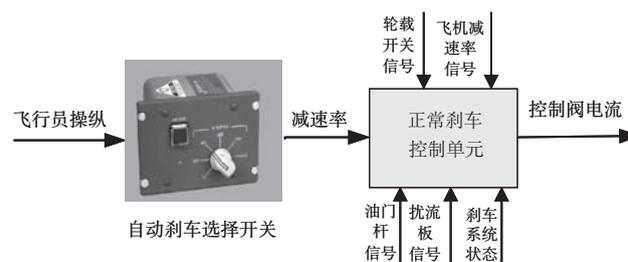


图1 自动刹车系统控制流程图

Fig.1 Control flowchart of automatic braking system

收稿日期: 2013-11-25; 录用日期: 2013-12-20

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

引用格式: LIU Zehua, JIA Airong, XIE Yan, LI Zhensui. Simulation verification technology of aircraft automatic braking system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(04): 62-68. 刘泽华, 贾爱绒, 谢彦, 李振水. 飞机自动刹车系统仿真验证技术[J]. 航空科学技术, 2014, 25(04): 62-68.

车过程中使飞机减速率保持为恒定值。恒减速率控制的主要目的是提高乘客舒适度。在自动刹车过程中,要充分考虑与防滑刹车系统的匹配性,自动刹车与防滑刹车综合共同完成整个刹车过程。自动刹车系统采用的控制原理如图2所示。

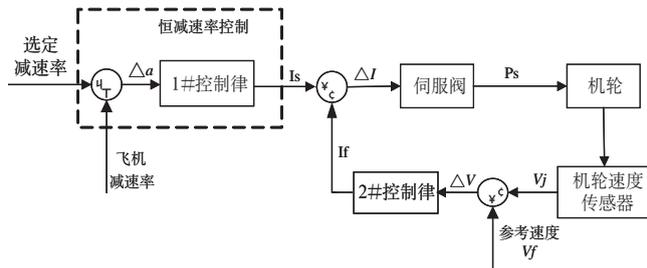


图2 自动刹车系统控制原理

Fig.2 Control principle of automatic braking system

图中,1#控制律为恒减速率控制,完成刹车功能,采用PID控制方式。2#控制律为防滑控制,完成防滑功能,采用PD+PBM的控制方式。1#控制律的输出信号为刹车信号,2#控制律的输出信号为防滑信号,1#控制律所使用的飞机减速率由飞机速度信号进行微分计算得出,刹车信号与防滑信号综合后,最后输出给伺服阀执行机构。当无防滑信号时,选定减速率与飞机减速率应保持一致,当存在防滑信号时,飞机减速率在规定的时间内及幅值内能够跟随选定减速率,从而实现恒减速率控制。

2 Stateflow建模及仿真

2.1 自动刹车控制逻辑设计

控制逻辑在自动刹车控制中占有非常重要的地位,是整个过程的指令输出单元。控制逻辑模型的正确与否决定了自动刹车系统能否按飞机飞行状态进行刹车控制,进而影响飞机起飞和着陆的安全。控制逻辑模型依据飞机飞行状态变化进行设计,其信息包括飞机起落架轮载、自动刹车选择开关、防滑状态、自动刹车状态、参考速度、飞机油门杆位置、扰流板位置、刹车脚蹬位置等,对于自动刹车状态变化主要有待命、激活、使用 and 解除。

以自动刹车中止起飞(RTO)为例,建立自动刹车RTO控制逻辑,如图3所示。

2.2 Stateflow原理

具有有限组模式或状态的系统称为有限状态机(Finite State Machine, FSM)^[2,3]。FSM系统采用事件动机制,当特定事件发生时,系统从A状态转换到B状态。Stateflow是有限状态机的图形实现,以可视的状态(State)和转移(Transition)描述FSM系统,用事件(Events)结合转移条件(Condition)控制系统流程。

在Stateflow中提供了图形界面支持的设计有限状态机设计方法,它允许用户建立起有限的状态,并用图形的形式绘制出状态迁移的条件,从而构造出整个有限状态机系统。所以在Stateflow下,状态和状态转换是其最基本的元素,Stateflow框图如图4所示。图中有4个状态,状态的转换是有条件的,其中有的是状态之间相互转换,还有A状态自行转换。在Stateflow框图中,还应该表明这些状态迁移的条件或事件^[4]。

Stateflow可以通过定义输入、输出和Simulink交互。输

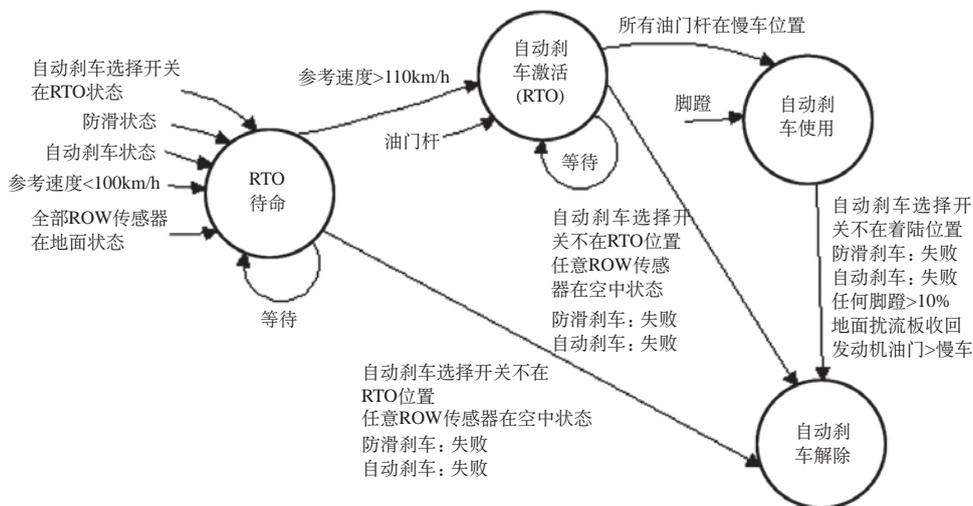


图3 RTO状态自动刹车控制逻辑

Fig.3 Automatic braking control logic of RTO state

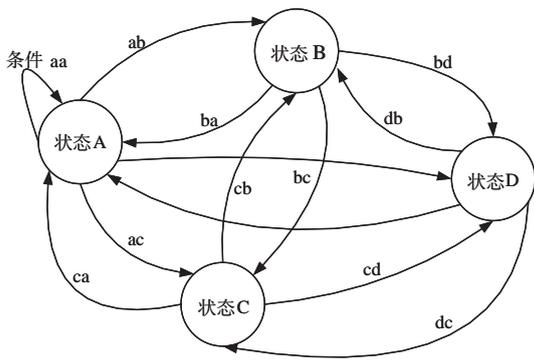


图4 Stateflow框图
Fig.4 Stateflow scheme

人、输出有数据也有事件。每个Stateflow模块都属于子封装的Simulink模块。仿真执行时Stateflow机制把流程图转成Simulink的内部描述S-function。所以Stateflow生成的逻辑可以直接嵌入到Simulink模型下,两者是无缝结合的^[5]。这样就能在仿真过程用事件驱动连续行为间的切换。

2.3 自动刹车控制逻辑仿真

以自动刹车RTO控制逻辑为例,根据飞机总体设计,构建了控制逻辑模型,如图5所示,模型输入为自动刹车外部交联信号状态,输出为自动刹车系统状态。对应的Stateflow框图如图6所示。在MATLAB的Simulink环境下,对控制逻辑模型进行仿真,结果如图7所示。

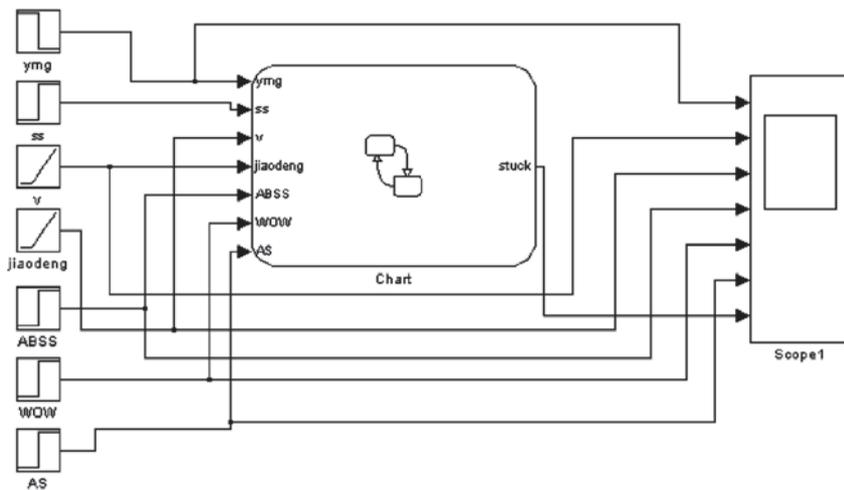


图5 自动刹车RTO控制逻辑模型
Fig.5 Automatic braking control logic model of RTO state

图7中油门杆状态、飞机速度、脚蹬行程、自动刹车选择

开关状态、轮载状态和刹车系统状态为自动刹车的输入,自动刹车状态为系统的输出(0、1、2、3分别表示待命、激活、使用、解除),由图7可知自动刹车在不同时间和不同条件下的状态迁徙符合设计的自动刹车控制逻辑(如图3所示),仿真结果正确可行,符合飞机飞行状态中自动刹车状态变化规律。

3 仿真验证

利用MATLAB的Simulink工具箱,完成自动刹车半物理仿真软件的搭建。通过系统的全数字仿真和半物理仿真对设计的自动刹车系统进行验证和优化^[6-8]。

建立了自动刹车系统半物理仿真验证平台,如图8所示。该半物理仿真平台能完成自动刹车系统全数字仿真和半物理仿真。

3.1 全数字仿真

利用仿真验证平台建立自动刹车系统全数字仿真模型,如图9所示。通过给定 $3m/s^2$ 的减速率,对自动刹车系统进行仿真,仿真结果如图10、图11所示。

从图10可以得到,机轮速度很好的跟踪飞机速度的变化,从图11可以得到,飞机滑跑距离为672m,满足设计要求(滑跑距离不大于1200m)。

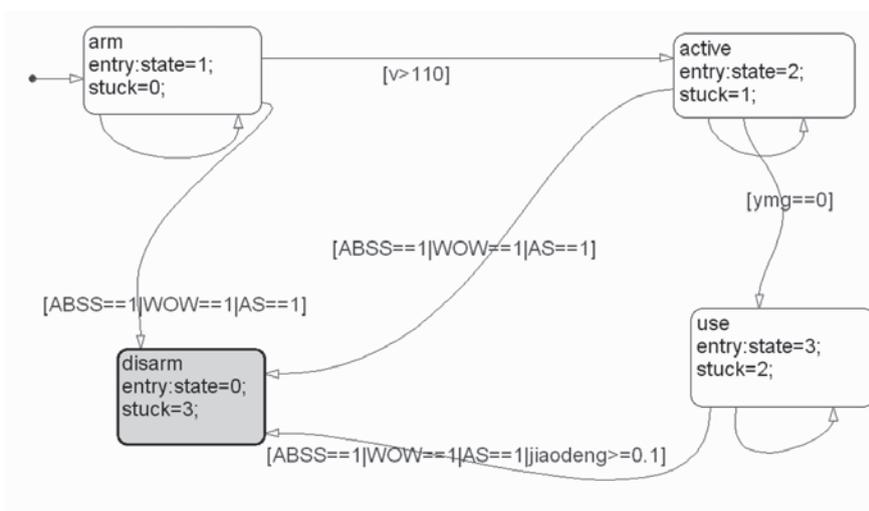


图6 自动刹车RTO控制逻辑Stateflow框图
Fig.6 Stateflow scheme for automatic braking control logic of RTO state

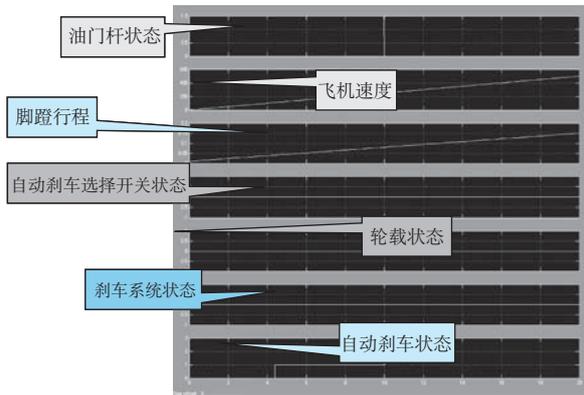


图7 RTO模式自动刹车仿真输出

Fig.7 RTO model automatic braking simulation output

3.2 半物理仿真

为了方便进行半物理仿真试验,便于现场调参,在Labwindows环境下进行上位机软件设计,软件主界面如图12所示。

在软件主界面可进行参数设置,在主界面中,点击半物

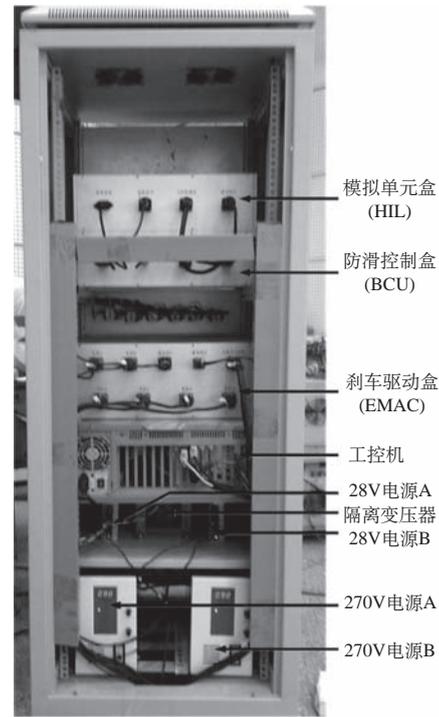


图8 半物理仿真验证平台

Fig.8 Hardware-in-loop simulation validation platform

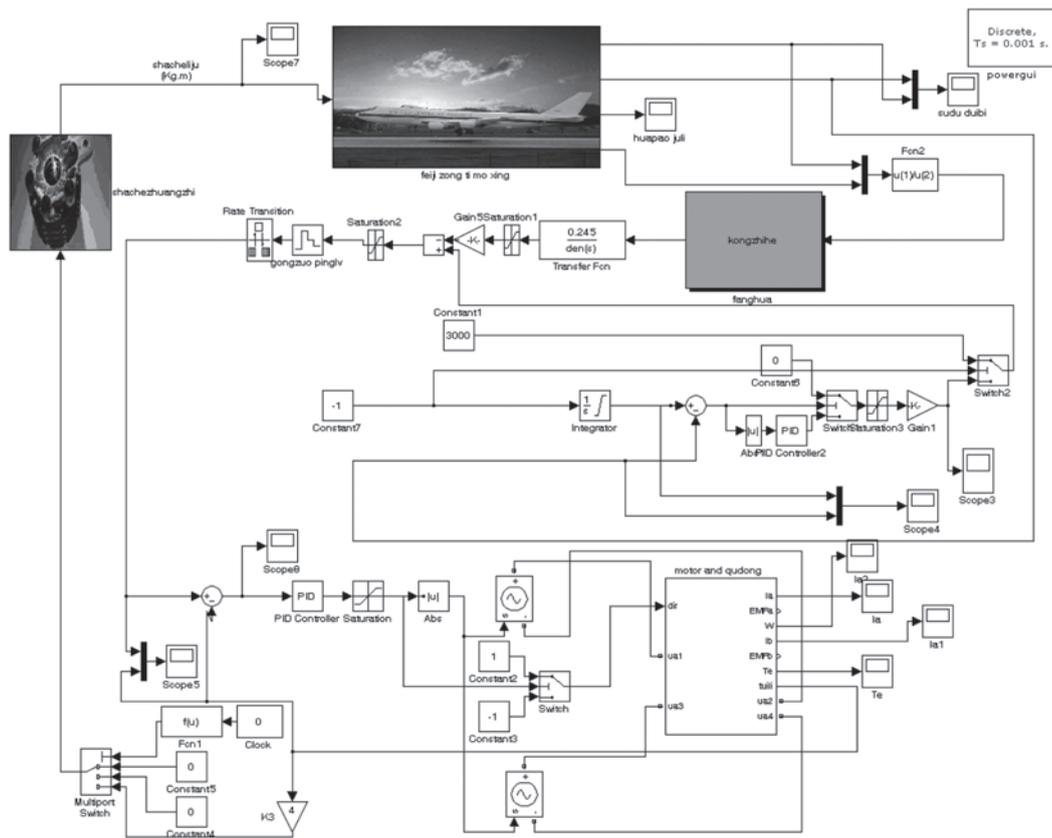


图9 全数字模型

Fig.9 Mathematical model

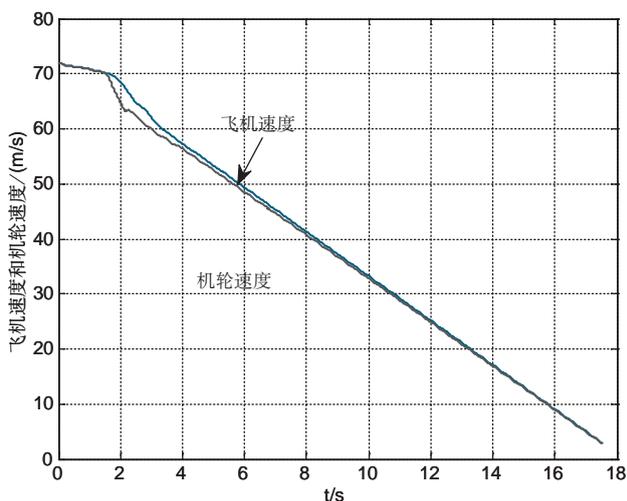


图10 飞机速度和机轮速度

Fig.10 Aircraft speed and wheel speed

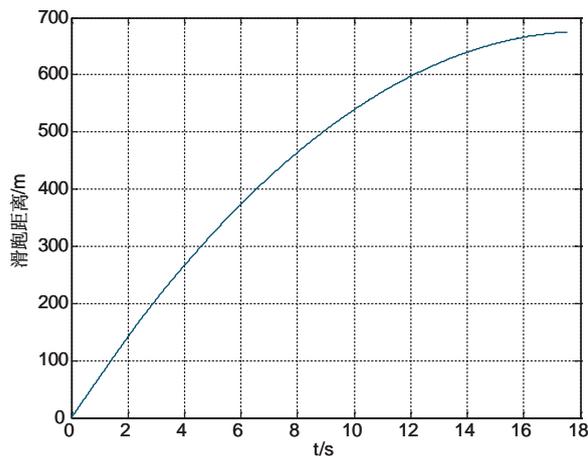


图11 滑跑距离

Fig.11 Running distance

理仿真模型菜单,选择控制盒为物理方式。将半物理仿真模型下载到DSP(Digital Signal Processor)中后,可进行半实物试验。图13是刹车控制单元为实物时的一种半物理仿真模型。选定减速率为 3m/s^2 进行刹车试验,得到试验结果如图14所示。

仿真试验结果表明,飞机采用自动刹车后,其滑跑距离为1016m,减速率在 $2.88\sim 3.07\text{m/s}^2$ 之间变化,系统滑跑距离和平稳性均满足设计要求(滑跑距离不大于1200m,减速率波动控制在 $\pm 10\%$)。

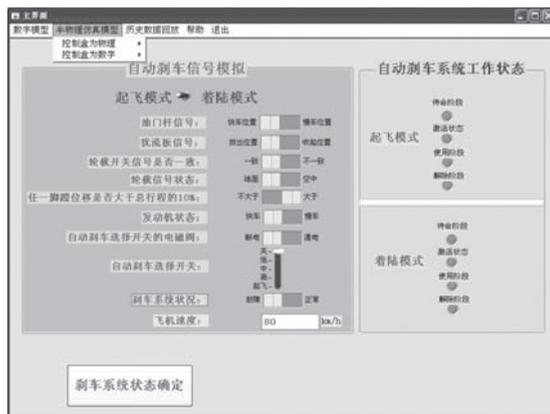


图12 刹车上位机主界面

Fig.12 Brake upper computer main interfaces

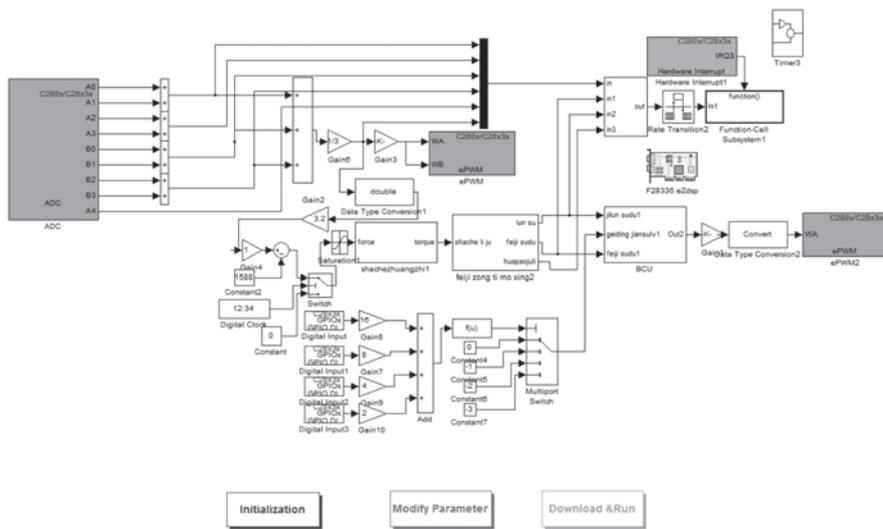
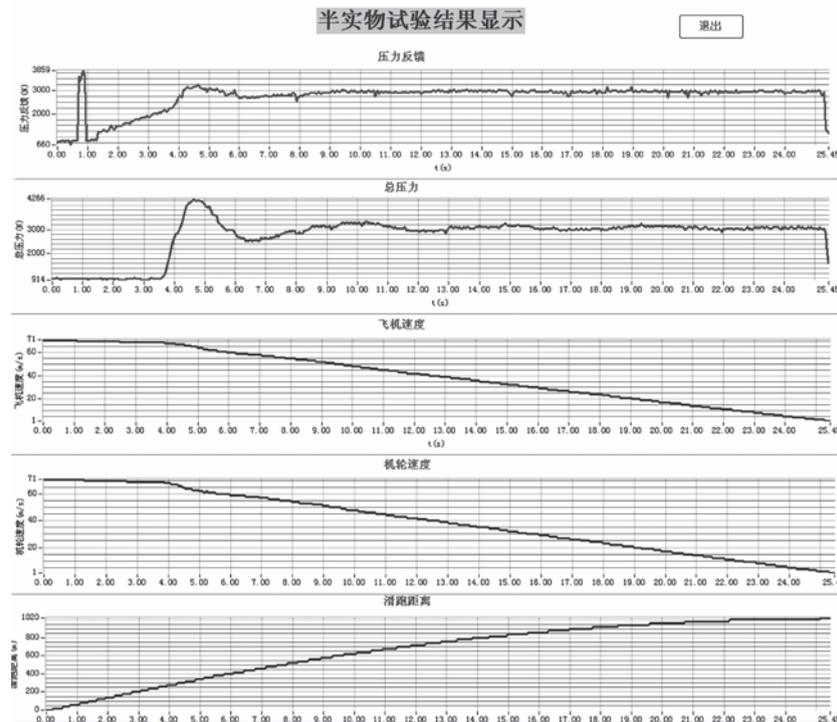


图13 半物理仿真试验模型

Fig.13 Hardware-in-loop simulation test model

图14 减速率为 3m/s^2 时的试验结果Fig.14 Test results of 3m/s^2 deceleration

4 结论

建立了自动刹车控制逻辑,利用MATLAB软件的Stateflow建立了自动刹车RTO控制逻辑仿真模型,并通过仿真验证了控制逻辑的正确性。

为进行自动刹车系统验证,建立自动刹车系统半物理仿真试验平台,并研究了其仿真试验方法,通过数字仿真和系统半物理仿真,验证系统运行满足飞机对自动刹车系统要求。

AST

参考文献

[1] 田广来,谢利理.机轮刹车系统的控制与仿真技术[J].测控技术,2006,25(2): 1-4.

TIAN Guanglai, XIE Lili. Development of control and simulation technology of aircraft braking system [J]. Test and Control Technology, 2006,25(2): 1-4. (in Chinese)

[2] 薛定宇,陈阳泉.基于MATLAB/Simulink的系统仿真技术与应用[M].北京:清华大学出版社. 2002:366-376.

XUE Dingyu, CHEN Yangquan. System Simulation technology and Application Based on MATLAB/Simulink [M].Beijing: Tsinghua University Press, 2002:366-376. (in Chinese)

[3] 吕学志,于永利,刘云赋,等.基于Stateflow的PERT网络仿真

方法[J].军械工程学院学报,2010,22(3): 55-58.

LV Xuezhi, YU Yongli, LIU Yunfu, et al. A simulation approach of PERT network based on Stateflow[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2010,22(3): 55-58.

[4] 范辉,张宇文,李文哲.基于状态流的一类混杂动态系统仿真方法[J].系统仿真学报,2009,21(22): 7014-7018.

FAN Hui, ZHANG Yuwen, LI Wenzhe. Simulation method for a class of hybrid system based on stateflow [J]. Journal of System Simulation, 2009,21(22): 7014-7018. (in Chinese)

[5] 王宏军,王航宇.Stateflow在飞行器建模仿真中的应用研究[J].西安工业大学学报,2009,29(5): 479-482.

WANG Hongjun, WANG Hangyu. Modeling and simulation of aircraft control logic based on stateflow [J].Journal of Xian Technological University,2009,29(5): 479-482. (in Chinese)

[6] 闫晓东,韩冰.试验设计方法在飞行器性能仿真验证中的应用[J].飞行力学,2012,30(1):79-82.

YAN Xiaodong, HAN Bing. Application of experiment design method in performance simulation validation for flight vehicle [J]. Flight Dynamics , 2012,30(1):79-82. (in Chinese)

- [7] 蔡达真,谢利理,徐关澄.基于飞机刹车半实物仿真系统的监控平台的设计[J].测控技术,2011,30(10):83-87.
CAI Dazhen, XIE Lili, XU Guancheng. Design of monitor platform baesd on hardware-in-the-loop simulation of aircraft braking system[J]. Test and Control Technology, 2011,30(10):83-87. (in Chinese)
- [8] 戴成建,董世良.双余度电传刹车系统仿真试验环境设计与应用[J].系统仿真学报,2011,23(1):123-126.
DAI Chengjian, DONG Shiliang. Designing and application of double redundant aircraft wheel brake system by wire simulation test environment[J]. Journal of System Simulation,2011,23(1):123-126. (in Chinese)

作者简介

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

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

贾爱绒(1966—) 男,学士,高级工程师,主要研究方向:起落架控制系统设计与研究。

Tel: 029-86832241 E-mail: airongjia@126.com

谢彦(1986—) 男,学士,助理工程师,主要研究方向:起落架控制系统设计与研究。

Tel: 029-86832241 E-mail: xieyan@126.com

李振水(1961—) 男,副总师,研究员,主要研究方向:飞机液压、起落架控制系统研究。

Simulation Verification Technology of Aircraft Automatic Braking System

LIU Zehua^{1*}, JIA Airong¹, XIE Yan¹, LI Zhensui²

1. Department of Flight Control & Hydraulic System, AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

2. Office of Chief Designer, AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: According to aircraft braking system design requirement and system characteristic, a aircraft automatic braking system whole frame was proposed. Taken automatic braking control logic of RTO state for example, control logic was designed, control logic model was set up and simulated using Stateflow, the simulation results show the correction of the control logic. The automatic braking system hardware-in-loop simulation was established. Through a given reduction rate of 3m/s^2 , the digital simulation and hardware-in-loop simulation were processed, results show that the taxiing distance of digital simulation was 672m, of hardware-in-loop simulation was 1016m, reduction rate changed between $2.88\sim 3.07\text{ m/s}^2$, meet the requirment of system design, and its correctness and rationality is verified.

Key Words: automatic braking system; RTO; digital simulation; hardware-in-loop simulation; stateflow

Received: 2013-11-25; Accepted: 2013-12-20

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