

基于模型的民用飞机自动刹车系统设计与研究

陈国慧* 张娟 张博强 陆峰

(西安航空制动科技有限公司, 西安 710075)

摘 要: 针对民用飞机刹车系统的重要组成部分—自动刹车系统,介绍了自动刹车系统的功能,并对其原理进行了简单介绍,提出了一种适用于自动刹车系统开发的基于模型驱动的设计方法,根据自动刹车的功能需求,建立其对应的行为模型,对需求进行确认以及验证,根据自动刹车的功能架构对其行为模型进行集成,形成自动刹车功能的集成模型,确认、验证其架构的正确性。最后,综合考虑自动刹车的需求以及行为模型,建立基于模型的各工况测试用例,包括着陆刹车以及中止起飞测试用例,对自动刹车系统需求进行自动化测试,验证其正确性、完整性。最后,以着陆阶段自动刹车某一减速率为例对该方法进行了验证,确认了该方法的正确性。模型及管理工具分别为 Library、Stateflow、Simulink。

关键词: 自动刹车;基于模型的系统工程;行为模型;自动化测试

中图分类号: V227; V37

文献标识码: A

OSID:



0 引言

民用飞机自动刹车系统是机轮刹车系统的一部分,能够减轻飞行员的工作负担,提升乘客的舒适性,提高飞机起飞和着陆阶段的安全性,国外民用飞机刹车控制系统均具备自动刹车功能^[1-2]。本文将基于模型的系统工程应用在自动刹车系统开发中^[3],从需求捕获到确定自动刹车系统的需求,建立需求对应的行为模型,将需求更加直观且无歧义的表达、传递、确认,根据自动刹车系统架构进行模型集成,确认其性能能够达到利益相关方的需要,并且能够在设计阶段应用模型确认、验证需求的合理性、可用性,在设计阶段发现错误,避免系统设计错误引起的反复^[4]。

1 自动刹车系统原理

自动刹车系统是由飞行员控制自动刹车选择开关在需要实施制动前预先设定想要的减速率,飞机需要制动时,自动激活其制动功能使飞机停止。自动刹车系统提供飞机起飞阶段的终止起飞功能

(rejected takeoff, 简称 RTO)以及着陆阶段的自动刹车功能。在起飞阶段,如果飞行员选择终止起飞, RTO 将输出最大刹车压力或者固定减速率使飞机制动。在着陆阶段,自动刹车提供高、中、低三个档位的减速率制动飞机^[5]。自动刹车系统在工作时,实时检测其相关产品的性能。自动刹车的功能分解如图 1 所示。

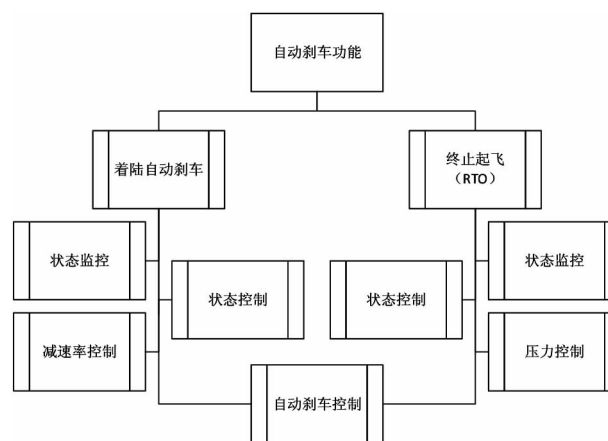


图 1 自动刹车功能分解图

* 通信作者。E-mail: nuaacgh@163.com

引用格式: 陈国慧,张娟,张博强,陆峰. 基于模型的民用飞机自动刹车系统设计与研究[J]. 民用飞机设计与研究,2020(3): 61-66. CHEN G H, ZHANG J, ZHANG B Q, LU F. Design and research of civil aircraft autobrake system based on model[J]. Civil Aircraft Design and Research,2020(3):61-66(in Chinese).

2 基于模型的自动刹车设计

2.1 基于自动刹车系统需求的行为模型

本文采用基于模型的自动刹车系统设计,在系统开发阶段首先对需求进行定义,根据用自然语言描述的需求建立基于 Library 的行为模型,用行为模型确认单个需求的正确性,集成模型完善需求,在确认过程中将模型与需求反复迭代,最终形成可发布的需求及模型。将所有需求的行为模型均在 Library 中建立,并与需求建立连接,实现需求与模型的一一对应,形成可追溯的链条,如图 2 所示。

BCS-115, [ID from Original] - 当刹车控制系统满足以下所有条件时,应设置着陆自动刹车处于待命状态并使自动刹车选择开关锁定:

- 飞行员选择自动刹车选择开关的着陆档位
- 飞机不在地面
- 所有脚踏位置小于门限值 [ABS_LDG_LOCK_MAX_PEDAL]
- 自动刹车功能可用

BCSSYS-1682 - LandingAutoBrakeArm着陆自动刹车待命

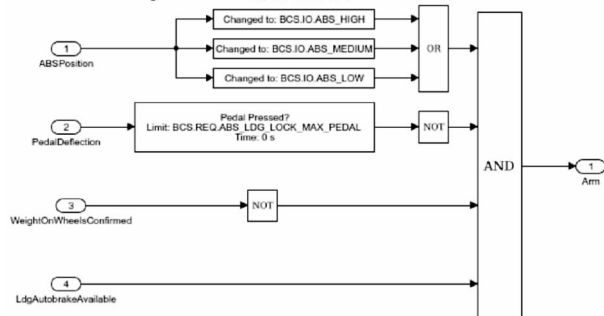


图 2 基于需求的行为模型

2.2 自动刹车系统行为模型库

自动刹车功能提供的两种刹车模式均包含:可

用、待命、解除待命、激活、快速解除激活以及柔和解除自动刹车这六个状态。可用状态:主要是通过判断刹车系统、减速率、油门杆位置等信号判断自动刹车是否可用,如果可用则可进入下一状态,否则自动刹车系统将按照故障处理。待命状态:通过轮载信号判断自动刹车是否可用,脚踏位置等信号判断飞机是否进入自动刹车待命状态,如进入待命状态则自动刹车开关将锁定在对应档位,如飞机未进入自动刹车待命状态则自动刹车选择开关将回复到 OFF 档位。解除待命:通过判断脚踏位置是否超控等信号判断是否解除待命状态。激活:在自动刹车系统处于待命状态后,通过轮载信号、油门杆位置、机轮速度等信号判断是否激活自动刹车。解除激活:解除激活分为快速解除和柔和解除,当自动刹车系统故障时则快速解除,通过脚踏位置、飞机速度判断飞机是否退出自动刹车。其中柔和解除需要将自动刹车输出的压力调整到脚踏输出的压力,其公式如下所示:

$$P_b = P_a * (1 - C) + P_p * C \quad (1)$$

$$C = \frac{|P_p - P_a|}{C_s} \quad (2)$$

其中 P_b 为实时刹车压力, P_a 为自动刹车输出压力, P_p 为脚踏刹车压力, C_s 为常数,是压力上升的斜率。

基于上述的逻辑建立基于 Library 的自动刹车系统的行为模型库,模型库中包含自动刹车系统的所有需求,并实现了一一对应的关系,如图 3 所示。

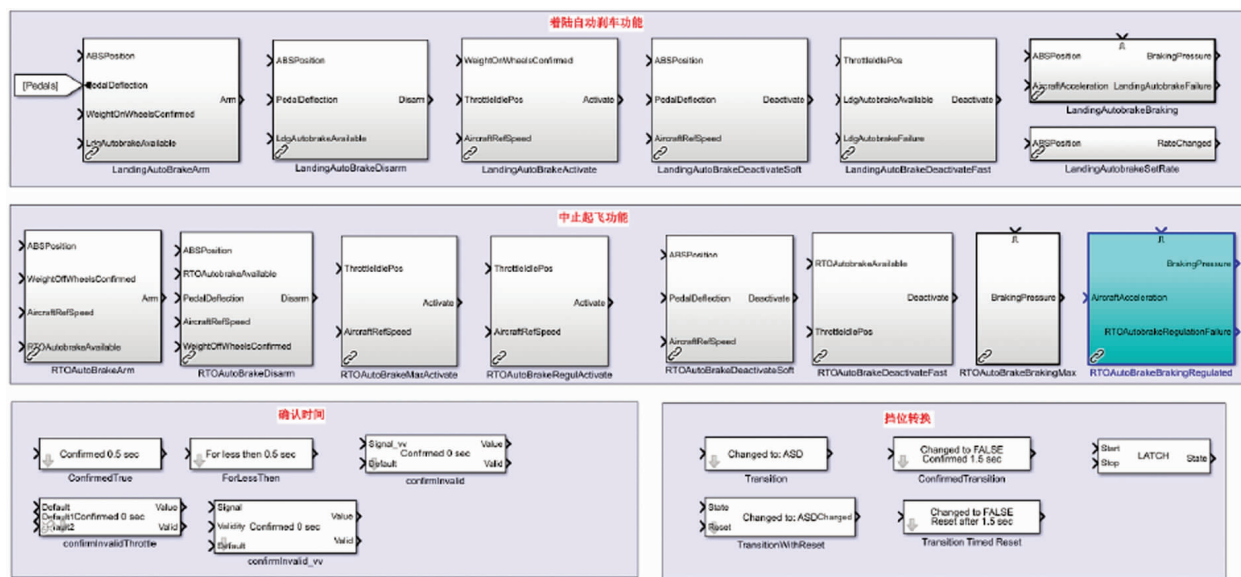


图 3 自动刹车系统行为模型库

2.3 基于 Stateflow 平台的状态转换模型

根据需求建立自动刹车系统的行为模型库后,考虑该系统存在多个状态,且状态之间需要互相转

换,本文采用有限状态机的图形实现工具 Sateflow 解决这一问题,形成着陆阶段自动刹车以及 RTO 的状态转换模型^[6-8],其形式如图 4 所示。

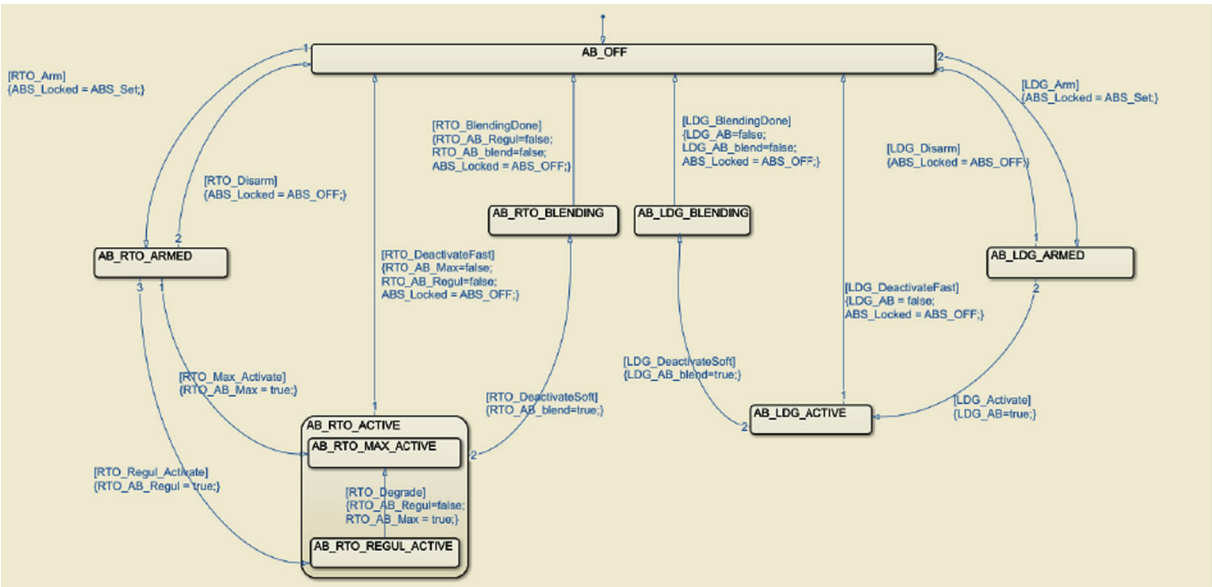


图 4 基于 Stateflow 的状态转换

3 基于模型的自动刹车系统集成测试

3.1 基于架构的自动刹车系统集成模型

自动刹车功能主要是由各状态、状态转换以及在自动刹车控制律实现的。对自动刹车系

统需求以及行为模型定义后,需确定自动刹车系统的功能架构,本文确定了着陆阶段自动刹车以及 RTO 的架构,如图 5 所示,图中分别对各状态的定义、触发条件、功能以及下一步工作进行了说明。

状态	描述	触发	活动	状态	描述	触发	活动
着陆待命状态	从OFF档位到着陆档位	满足以下条件时,处于自动刹车待命状态: <ul style="list-style-type: none">◆飞行员选择着陆刹车的档位◆脚蹬无输入(小于限制门限)◆着陆自动刹车可用◆BCU检测的ABS位置信号一致◆飞机不在地面	ABS锁位	中止起飞待命状态	从OFF档位到中止起飞档位	满足以下条件时,处于中止起飞待命状态: <ul style="list-style-type: none">◆飞行员选择中止起飞的档位◆脚蹬无输入(小于限制门限)◆着陆自动刹车可用◆BCU检测的ABS位置信号一致◆飞机不在空中	ABS锁位
着陆解除待命状态	从着陆档位恢复到OFF档	当满足以下任一条件时: <ul style="list-style-type: none">◆飞行员选择OFF档位◆着陆自动刹车不可用◆脚蹬输入(大于门限值)	解除ABS锁位,恢复到OFF档	中止起飞解除待命状态	从中止起飞档位恢复到OFF档	当满足以下任一条件时: <ul style="list-style-type: none">◆飞行员选择OFF档位◆着陆自动刹车不可用◆脚蹬输入(大于门限值)◆飞机不在地面	解除ABS锁位,恢复到OFF档
着陆激活状态	实施自动刹车	满足以下所有条件时: <ul style="list-style-type: none">◆飞机在地面◆油门杆在慢车位或者反推位	使飞机按照预设减速率减速	中止起飞激活状态	实施中止起飞	满足以下所有条件时: <ul style="list-style-type: none">◆飞机速度大于某一门限值◆油门杆在慢车位或者反推位	使飞机输出最大制动能力使飞机减速
着陆快速解除激活状态	恢复到OFF档位	当满足以下任一条件时: <ul style="list-style-type: none">◆着陆自动刹车不可用◆自动刹车功能失效◆自动刹车功能故障	恢复到OFF档位,并告警	中止起飞快速解除激活状态	恢复到OFF档位	当满足以下任一条件时: <ul style="list-style-type: none">◆中止起飞不可用◆自动刹车功能失效◆自动刹车功能故障	恢复到OFF档位,并告警
着陆柔和解除激活状态	按照一定的斜率解除自动刹车	当满足以下任一条件时: <ul style="list-style-type: none">◆脚蹬输入(大于门限值)◆ABS飞行员选择OFF档位◆飞机停止	恢复到OFF档位,按照固定斜率解除自动刹车压力	中止起飞柔和解除激活状态	按照一定的斜率解除中止起飞	当满足以下任一条件时: <ul style="list-style-type: none">◆脚蹬输入(大于门限值)◆ABS飞行员选择OFF档位◆飞机停止	恢复到OFF档位,按照固定斜率解除自动刹车压力

图 5 自动刹车架构

根据着陆自动刹车以及 RTO 的架构对自动刹车系统的行为模型进行集成,集成自动刹车功能模型。该集成模型是在 Simulink 中进行,将 Library 中的行为模型以及 Stateflow 的状态模型嵌在 Simulink 中运行,Stateflow 是由 Library 中的事件进行驱动。在这一过程中,可对各需求的接口,完整性以及架构的合理性进行确认,完善需求及架构。自动刹车功能的集成模型如图 6 所示。其中 AutoBrakeLogic 模块为自动刹车系统各状态判断、转换的集成模型, LandingAutoBrakeBraking 以及 RTOAutoBrakeBraking 为自动刹车的控制律,其输出为飞行员选定的减速率对应的刹车压力。其中自动刹车控制律采用固定

减速率控制,飞行员选择预定减速率的挡位,实时接收飞机的减速率,经过 PID 控制算法进行计算,得到其刹车电流,而输出的刹车电流经过限幅设置输出最终的自动刹车控制电流,其中限幅设置主要是根据不同挡位设置不同的刹车电流上限,以此解决当前跑道能够提供的最大结合力与选择挡位不匹配的问题,减少其频繁打滑的情况。自动刹车输出刹车电流后,将其刹车电流与脚蹬生成的刹车电流以及基于滑移率控制的刹车电流对比输出最小的刹车电流,以防止轮胎爆破或者机轮锁死的情况。Blending 模块则为公式(1)表达的模型,即压力调整模块。

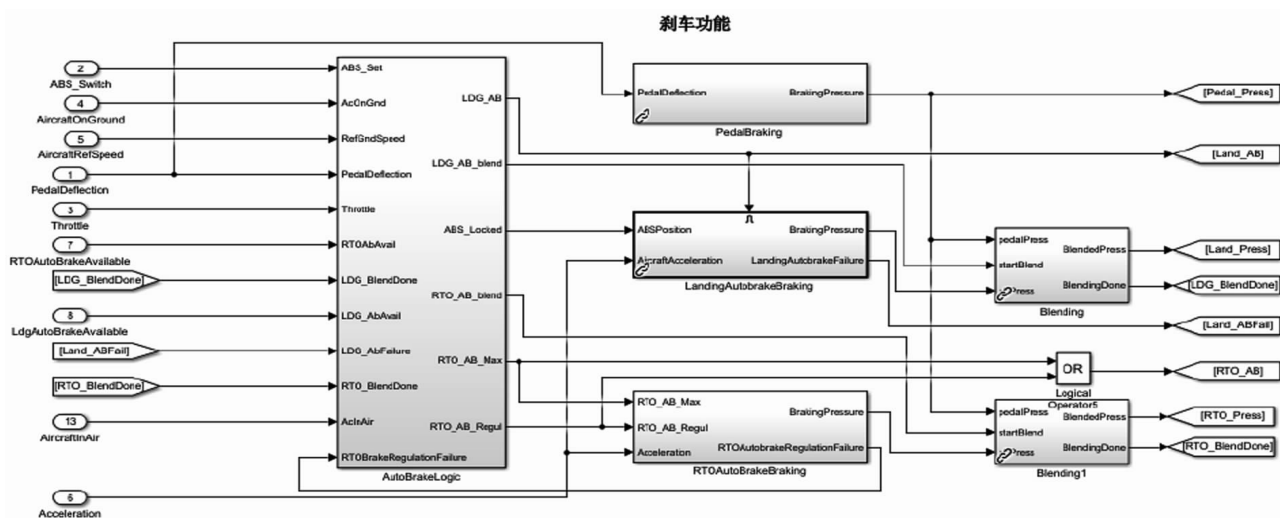


图 6 基于 Simulink 的自动刹车功能集成

3.2 基于模型的测试用例

完成自动刹车系统的需求定义、架构设计、模型集成后,综合考虑自动刹车系统的应用场景,包括着陆阶段的高、中、低档位,RTO 的最大刹车压力或固定减速率,以及系统的各需求,利用 Variant Model 建立自动刹车系统的测试用例,如图 7 所示。测试用例分别为着陆阶段自动刹车、着陆阶段自动刹车超控、RTO 以及 RTO 超控四种场景,在这四个测试用例中分别定义了自动刹车功能模型的输入,应用 .m 文件定义测试用例执行的先后顺序,分别执行这 4 个测试用例,对自动刹车功能模型进行测试。且对输入的参数值进行自动化的设置对不同工况的被测模型进行测试^[9]。完成自动刹车功能模块的自动化测试。

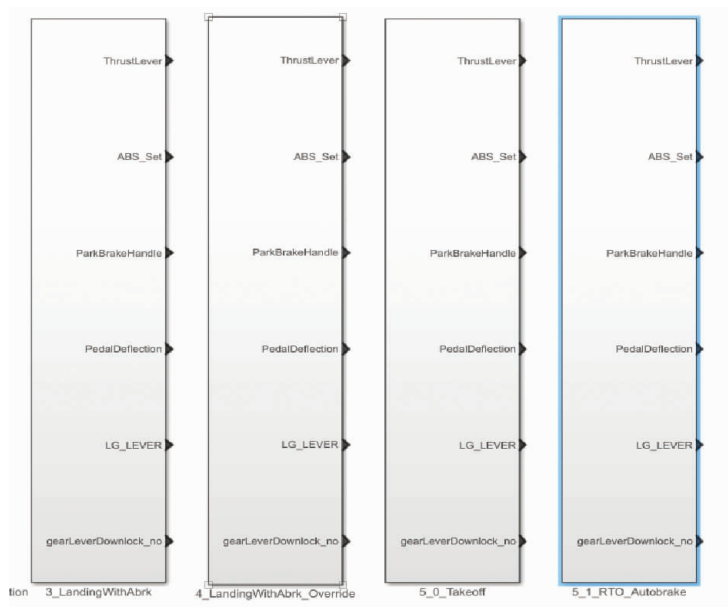


图 7 自动刹车系统测试用例

4 自动刹车系统仿真验证

自动刹车功能集成后,应建立自动刹车系统的闭环控制模型,包括自动刹车系统的测试用例、飞机模型、控制阀模型、机轮模型、跑道模型,对各模块进行集成,建立自动刹车系统的集成仿真模型。对其性能进行仿真分析,调试自动刹车系统的控制律,使其能够在不同跑道条件下自动调试,从而使飞机在整个刹车过程中能够维持在预设的减速率。自动

刹车系统仿真模型能够在设计前期确认其逻辑以及性能的正确性,发现潜在的问题,能够缩短设计时间,规避设计—生产反复迭代问题,有效提高设计效率^[10]。

本文以着陆阶段自动刹车系统的 3.0 m/s^2 的固定减速率,干跑道条件为例进行仿真,其仿真结果如图8所示。从仿真结果可以看出,自动刹车系统使飞机减速率维持在 3.0 m/s^2 附近反复调整。



图8 自动刹车系统仿真结果

5 结论

本文所应用的方法已经在民用飞机自动刹车系统研制项目中进行了实际应用。实践表明,基于模型的自动刹车系统设计可以快速、有效的对系统需求、架构设计进行确认,具有唯一性、复用性等特点。建模工具以及需求与模型管理工具的应用,可有效减轻研发人员的重复工作,更直观的显示了需求,辅助设计团队对系统需求进行验证,对设计思路不断完善,提高工作效率。此外,基于需求的行为模型能够避免需求的模糊描述,保证设计语言一致性,避免

自然语言带来的理解歧义,而且系统数字化模型可以支撑系统级仿真分析,精确评估系统设计方案的合理性。

参考文献:

- [1] 刘泽华,徐鹏国,李振水,等. 飞机自动刹车系统标准研究[J]. 航空标准化与质量,2016(3): 6-9.
- [2] 刘劲松,陈国慧,马晓军. 飞机先进制动技术发展与研究[J]. 航空科学技术,2019(12): 7-15.
- [3] 吴颖,刘俊堂. MBSE 技术研究及其在飞机机电系统综合设计中的应用//第二届中国系统仿真技术及其应用学术年会论文集[C]. 中国新疆乌鲁木齐

- 齐:中国自动化学会系统仿真专业委员会,2019:380-385.
- [4] 齐广峰,夏路. MBSE 在飞控系统设计中的应用探讨[J]. 数字通信世界,2019(9):255+258.
- [5] 温仲君. 飞机自动刹车系统设计要点分析[J]. 自动化应用,2019(1):27-28.
- [6] 费思聪. 大型民用飞机自动刹车控制系统研究[J]. 电子科技,2016(3):102-105.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 海晓航. 基于 MBSE 的民机起落架系统建模与仿真分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
- [10] 严康. 某型飞机防滑刹车控制盒的仿真和测试[D]. 武汉:武汉工程大学,2017.

作者简介

陈国慧 女,硕士,工程师。主要研究方向:刹车控制系统。
E-mail: nuaacgh@163.com

张 娟 女,硕士,工程师。主要研究方向:刹车控制系统。
E-mail: yxzhang559@163.com

张博强 男,硕士,工程师。主要研究方向:刹车控制系统。
E-mail: tzzhang2018@126.com

陆 峰 男,硕士,工程师。主要研究方向:刹车控制系统。
E-mail: handsomelufeng@126.com

Design and research of civil aircraft autobrake system based on model

CHEN Guohui * ZHANG Juan ZHANG Boqiang LU Feng

(Xi'an Brake Technology Co., Ltd, Xi'an 710075, China)

Abstract: Aiming at the automatic brake system, which is an important part of the civil aircraft brake system, this paper introduces the function of the automatic brake system and its principle, and puts forward a model-based design method suitable for the development of the automatic brake system. According to the functional requirements of the automatic brake, the corresponding behavior model was established, and the requirements were confirmed and verified. According to the functional architecture of automatic brake, the behavior model was integrated to form an integrated model of automatic brake function, and the correctness of its architecture was confirmed and verified. Then, considering the demand and behavior model of automatic brake, the test cases of various working conditions based on the model were established, including the test cases of landing brake and reject takeoff to conduct automatic test on the demand of automatic brake system and verify its correctness and considering. Finally, taking a certain deceleration rate of automatic braking in landing phase as an example, the correctness of the method was verified. The model and management tools were Library, Stateflow, and Simulink.

Keywords: autobrake; model-based systems engineering(MBSE); behavior model; automatic test

* Corresponding author. E-mail: nuaacgh@163.com