



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计

基于虚拟仪器的飞机刹车系统模拟仿真
**Simulation of Aircraft Brake System
Based on Virtual Instrument**

姓 名 李柏越
学 院 航空航天学院
专 业 飞行器制造工程
指导教师 魏志民
职 称 讲师
完成时间 2022年6月3日



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计

基于虚拟仪器的飞机刹车系统模拟仿真
Simulation of Aircraft Brake System
Based on Virtual Instrument

姓 名 李柏越
学 院 航空航天学院
专 业 飞行器制造工程
指导教师 魏志民
职 称 讲师
完成时间 2022年6月3日

天津中德应用技术大学

本科生毕业设计（论文）选题申报表

学 院	航空航天学院	申 报 人	姓 名	魏志民
专 业	飞行器制造工程		技术职务	中级
题目名称	基于虚拟仪器的飞机刹车系统模拟仿真			
题目类型	自拟	题目来源	其他项目	
课题来源、背景及意义	<p>随着科学技术的发展,数字化仿真技术在航空领域中的应用日趋广泛,将此项技术应用于飞机内部系统教学和培训中,可以有效解决因设备不足、授课时间、场地有限的问题,降低学员培训成本,并且通过仿真技术让培训人员可以直观观察某一系统的具体运行方式,从而保证实操过程中的学员安全和授课效率。</p> <p>本课题通过掌握飞机液压刹车系统组成运行方式,基于 Labview 设计模拟仿真平台,通过可开发性的组合编程实现飞机液压刹车系统各机构动态模拟,增强教学的可靠性、合理性,有效提高液压刹车系统的培训和学习效果,同时为仿真平台设计在航空培训中的应用形式提供了借鉴。</p>			
任务及要求	<ol style="list-style-type: none"> 1. 查阅飞机系统手册,掌握飞机刹车系统组成构造及运行机制 2. 学习 Labview 编程软件 3. 依据飞机刹车系统结构组成确定数字化模拟方案 4. 通过 Labview 完成飞机刹车系统的模拟仿真 5. 验证测试仿真系统 			
工作条件	Labview2014、飞机刹车系统手册			
知识与能力要求	结合飞机刹车系统工作原理、学习并熟练使用 Labview 编程完成飞机刹车系统的模拟仿真。			
系（教研室）审查意见： <div style="text-align: center;">无</div>				
负责人(签名)： <u>张健</u> 2021 年 11 月 28 日				



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

毕业设计（论文）任务书

题 目：基于虚拟仪器的飞机刹车系统模拟仿真

学 院： 航空航天大学

专 业： 飞行器制造工程

学生姓名： 李柏越

学 号： 18414020217

起止日期： 2021年12月3日~2022年6月3日

指导教师： 魏志民

任务书下达日期：2021年12月3日

毕 业 设 计（论 文）任 务 书

1. 毕业设计（论文）课题背景及意义

飞机刹车系统是飞机运行中不可或缺的部分，它是一个具有相对独立功能的子系统其作用是承受飞机的静态重量动态冲击载荷以及吸收飞机着陆时的动能，实现飞机的起飞、着陆、滑行、转弯的制动和控制，对飞机的起飞、安全着陆起着重要的作用，刹车系统性能的好坏直接影响到飞机及机载人员的飞行安全，飞机着陆刹车过程持续时间短，工作环境复杂，同时会受到各种外部和内部不确定因素的影响，所以要求飞机刹车系统必须能够安全、可靠、迅速的刹停飞机。在飞机刹车系统的培训教学中，肯定会需要实物以验证和演示提供依据，因此需要高效可靠的仿真实验系统。

本课题通过掌握飞机液压刹车系统组成运行方式，基于 Labview 设计模拟仿真平台，通过可开发性的组合编程实现飞机液压刹车系统各机构动态模拟，实时显示液压刹车系统工作时油路及内部机构的工作状态，增强教学的可靠性、合理性，有效提高液压刹车系统的培训和学习效果，同时为仿真平台设计在航空培训中的应用形式提供了借鉴。

2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

研究内容 1

利用文献查阅法检索课题相关的技术资料 and 文献资源，对飞机刹车系统的结构组成和工作原理进行详细分析；

研究内容 2

学习 Labview 编程软件；

研究内容 3

依据飞机刹车系统结构组成确定数字化模拟方案，通过 Labview 完成飞机刹车系统的模拟仿真；

研究内容 4

验证测试仿真系统。

要求：掌握 Labview 软件的使用，并最终提交毕业论文一份。

毕 业 设 计（论 文）任 务 书

3. 毕业设计（论文）课题成果（包括毕业设计论文、图表、实物样品等）：

毕业设计论文一篇

4. 推荐参考资料：

- [1] 薛东青.民用飞机液压刹车系统构架研究[J].流体传动与控制,2012,05:24-26.
- [2] 邹美英,谢利理.飞机液压刹车系统数字仿真研究[J].计算机仿真,2005,08:45-49.
- [3] 卞晶.基于 LabVIEW 的飞机刹车系统半物理仿真平台设计[D].中南大学,2013.
- [4] 韩建辉.飞机刹车系统的设计与性能仿真分析[D].南京航空航天大学,2012.
- [5] 曾小信.飞机防滑刹车系统的建模与仿真研究[D].中南大学,2008.
- [6] 罗林.飞机刹车系统半实物仿真研究[D].西华大学,2016.
- [7] 周恩智.飞机防滑刹车仿真技术研究[D].南京航空航天大学,2008.
- [8] 张冲.基于 LabVIEW 的飞机防滑刹车控制器测试系统设计[D].西北工业大学,2007.
- [9] 杨一璜,刘建良,梁雪林.基于 LabVIEW 的飞机刹车控制器通用测试系统[J].仪表技术与传感器,2018,04:109-111+116.
- [10] 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,2008,01:1-4.
- [11] Li-li T G X I E. Development of control and simulation technology of aircraft braking system [J][J]. Measurement & Control Technology, 2006, 2.
- [12] Zou M, Xie L L. Research on digital simulation of aircraft hydraulic braking system[J]. Computer Simulation, 2005, 22(8): 45-49.
- [13] Ouyang X, Gao F, Yang H, et al. Modal analysis of the aircraft hydraulic-system pipeline[J]. Journal of aircraft, 2012, 49(4): 1168-1174.

所在专业审查意见：

同意

负责人：张健

2021 年 12 月 3 日



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计（论文）开题报告

题目：基于虚拟仪器的飞机刹车系统模拟仿真

学院：航空航天学院

专业：飞行器制造工程

学生姓名：李柏越

学号：18414020217

起止日期：2021年12月3日-2022年6月3日

指导教师：魏志民

开题日期：2022年3月5日

一、开题报告内容（课题的目的意义、与本课题有关的国内外研究（应用）情况及发展趋势、课题主要研究内容、参考文献等）

（一）国内外研究情况

仿真技术经过半个多世纪的发展，由最初简单的模拟仿真、数字仿真发展为物理仿真、半实物仿真(又称硬件在回路中的仿真)，到现在已经成为人们研究复杂系统的有力工具，它的应用领域已经非常广泛，涉及到工业、航空航天等武器系统以及与国民经济相关的各个领域。以美国为代表的发达国家高度重视仿真技术的发展和應用，10多年来美国国防部一直将仿真和建模技术列为国防关键技术，先后建成了红外成像制导武器系统的半实物仿真系统雷达寻的制导的毫米波半实物仿真系统 MSS-2，更好地满足了地空导弹毫米波精确制导系统和精确打击武器装备的复合制导系统需要。欧洲对于仿真技术的研究也十分重视。北大西洋公约组织(NATO)对应于美国分布交互仿真工业组成立了相应的研究机构进行跟踪研究，并制定了建模与仿真的计划。德国 Audi 汽车生产公司开发的 AudiHIL 测试工作台，使用了 TESIS(Munich, Germany)开发的 ve-DYNA 三维汽车动力学模型。由于在闭环控制中液压刹车系统的非线性及快速动态特性使得构建其系统模型非常困难，所以在 ve-DYNA 仿真模型中没有实现刹车液压系统的动力学模型，而是将真实的 A8 型液压刹车系统和 Audi A8 Quattro 四轮驱动的液压刹车系统置于一测试架上，该测试架与 ABS 控制器和 ve-DYNA 模型同时相连。为了像真实的汽车一样给 ECU 提供 I/O 信号，整个模型的仿真在采样周期 1ms 条件下进行(小于 ABS 控制器的采样时间)。半实物仿真作为汽车研发的重要手段之一，能够大大降低开发成本，缩短研制周期，提高开发效率。

国外对飞机刹车系统的仿真研究起步较早，在刹车控制规律液压系统和刹车控制单元等方面都进行了深入的研究，系统数学模型建立的也比较完善，但是由于保密等技术原因，有关飞机刹车系统仿真方面的报道比较少，查阅资料比较困难。

国内对飞机刹车系统的仿真技术的综合研究与应用方面起步较晚，与国外水平相比差距较大。南京航空航天大学韩建辉通过数学分析软件 MATLAB/SIMULINK 对飞机刹车系统的防滑刹车进行了研究，对刹车系统相关附件建立模型仿真并分析其动力学特性和工作原理，但是该研究目前仅局限在理论分析和数字仿真阶段。上海交通大学沈迎春团队在并行计算机平台，将实物接入仿真回路，在 RT-LAB 环境下构建了仿真平台，完全了飞机刹车系统控制和仿真做出了研究。南京航空航天大学周恩智针对飞机刹车实物仿真系统的需要，设计了基于 VB 环境的飞机刹车仿真监控软件，并在实时仿真数据采集部分做了研究。西北工业大学王健实现了在 Linux 系统环境对机轮刹车系统的半物理仿真试验，并在 Linux 环境下对飞机刹车系统进行数学建模，分析不同跑道类型下仿真试验的结果。但是该系统实时性不佳，且只是针对着陆刹车，对刹车因素考虑单一。

目前对于飞机刹车的研究大部分还局限于刹车系统模型的数学仿真或者对于单一附件的仿真，对于完整的飞机刹车系统的仿真较少，现有的半物理仿真多数是基于高速计算机

系统，刹车附件多数为数学模型代替，不能更真实逼真的对整个系统仿真，而对于飞机刹车整体过程的研究更少。随着飞机刹车系统越来越复杂，对系统的仿真要求不断增加，目受外界因素和建模环境的限制导致难以建立其数学模型，因此需要可以更真实的仿真系统对此进行研究。虚拟仪器技术利用高性能的模块化硬件，结合高效灵活的软件来完成各种测试、测量和自动化应用。虚拟仪器硬件平台和软件平台可以与不同的建模软件(MATLAB/Simulink、Labview 等)实现无缝集成，提供可灵活应用的接口。因此为提高飞机刹车系统的仿真精度利用虚拟仪器技术通过建立数学模型和实物模型共同组建飞机刹车系统仿真平台，是目前飞机刹车系统仿真研究的重要方向。

(二) 课题的目的和意义

本课题通过掌握飞机液压刹车系统组成运行方式，基于 Labview 设计模拟仿真平台，通过可开发性的组合编程实现飞机液压刹车系统各机构动态模拟，实时显示液压刹车系统工作时油路及内部机构的工作状态，对于飞机内部系统教学和培训，可以有效解决因设备不足、授课时间、场地有限的问题，降低学员培训成本，通过仿真演示让培训人员可以直接观察系统的具体运行方式，从而保证实操过程中的学员安全和授课效率。增强教学的可靠性、合理性，有效提高液压刹车系统的培训和学习效果，同时为仿真平台设计在航空培训中的应用形式提供了借鉴。

(三) 主要内容

研究内容 1 利用文献查阅法检索课题相关的技术资料 and 文献资源，对飞机刹车系统的结构组成和工作原理进行详细分析。

研究内容 2 学习 Labview 编程软件

研究内容 3 依据飞机刹车系统结构组成确定数字化模拟方案，通过 Labview 完成飞机刹车系统的模拟仿真

研究内容 4 验证测试仿真系统


参考文献：

- [1] 薛东青.民用飞机液压刹车系统构架研究[J].流体传动与控制,2012,05:24-26.
- [2] 邹美英,谢利理.飞机液压刹车系统数字仿真研究[J].计算机仿真,2005,08:45-49.
- [3] 卞晶.基于 LabVIEW 的飞机刹车系统半物理仿真平台设计[D].中南大学,2013.
- [4] 韩建辉.飞机刹车系统的设计与性能仿真分析[D].南京航空航天大学,2012.
- [5] 曾小信.飞机防滑刹车系统的建模与仿真研究[D].中南大学,2008.
- [6] 罗林.飞机刹车系统半实物仿真研究[D].西华大学,2016.
- [7] 周恩智.飞机防滑刹车仿真技术研究[D].南京航空航天大学,2008.
- [8] 张冲.基于 LabVIEW 的飞机防滑刹车控制器测试系统设计[D].西北工业大学,2007.
- [9] 杨一璜,刘建良,梁雪林.基于 LabVIEW 的飞机刹车控制器通用测试系统[J].仪表技术与传感器,2018,04:109-111+116.
- [10] 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,2008,01:1-4.

[11]	Li-li T G X I E. Development of control and simulation technology of aircraft braking system [J][J]. Measurement & Control Technology, 2006, 2.	
[12]	Zou M, Xie L L. Research on digital simulation of aircraft hydraulic braking system[J]. Computer Simulation, 2005, 22(8): 45-49.	
[13]	Ouyang X, Gao F, Yang H, et al. Modal analysis of the aircraft hydraulic-system pipeline[J]. Journal of aircraft, 2012, 49(4): 1168-1174.	
二、进度及预期结果		
起止日期	主要内容	预期结果
2021.12.3-2022.1.2	制订课题研究方案。	方案科学合理、实事求是。
2022.1.3-2022.1.16	查阅专业书籍、文献掌握 B737 飞机液压刹车系统的工作原理和部件组成。	掌握 B737 飞机液压刹车系统的工作原理和部件组成。
2022.1.17-2022.2.16	研究学习 LABVIEW 管路、传动机构的编程方法。	掌握 LABVIEW 管路、传动机构的编程方法。
2022.2.17-2022.2.27	初步设计飞机刹车系统数字化方案。	完整设计飞机刹车系统数字化方案。
2022.2.28-2022.3.20	利用 LABVIEW 对飞机刹车系统进行细节绘制。	利用 LABVIEW 绘制飞机刹车系统。
2022.3.21-2022.3.28	对此仿真面板进行开发编程以达到虚拟系统的仿真，并进一步完善设计，对其不合理处进行优化改进。	优化仿真系统。
2022.3.29-2022.6.3	撰写论文以及论文查重和答辩。	完成论文撰写以及论文查重和答辩。
完成课题的现有条件	B737 起落架系统手册、B737 飞机刹车组件模型	
指导教师意见	同意开题 指导教师： <u>魏志民</u> <u>2022</u> 年 <u>3</u> 月 <u>5</u> 日	
开题答辩小组意见	同意开题 组 长： <u>姚冀涛</u> <u>2022</u> 年 <u>3</u> 月 <u>5</u> 日	


天津中德应用技术大学
本科生毕业设计（论文）的声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本毕业设计（论文）的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本设计（论文）所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本毕业设计（论文）原创性声明的法律责任由本人承担。

毕业设计（论文）作者签名： 

2022年6月3日

本人声明：该毕业设计（论文）是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过设计（论文）的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

毕业设计（论文）指导教师签名： 

2022年6月3日

摘 要

飞机刹车作为起落架系统的重要子系统，主要用于飞机着陆和地面滑行时的滑跑距离控制，同时可为飞机系留提供刹车压力，因此在航线维护时需时常进行检查测试，一旦发现问题须及时进行维修。在 147 培训机构和各航空院校中，飞机刹车是飞机系统培训项目和课程中的重要内容，然而飞机刹车系统结构原理复杂，传统的培训方式很难达到理想的培训效果，即使培训机构和院校会购置一些刹车装置实体，但因其拆解过程复杂且具备一定的危险性，因此也很难做到物尽其用。针对以上问题，本文利用虚拟仿真技术，选取国内保有量较大的 B737NG 飞机刹车系统作为研究对象，开发出一个飞机刹车系统仿真平台，该平台可直接应用于各培训机构和航空院校对于飞机刹车系统的培训项目和课程中，切实提高培训效果。

本文首先阐述了虚拟仿真技术在教研方面的国内外研究现状，详细介绍了 B737NG 飞机刹车系统的结构组成和工作原理，利用虚拟仪器对飞机刹车系统进行了构建，并通过程序设计实现了飞机刹车系统仿真平台的开发。经验证，仿真平台可实现飞机正常、备用和蓄压气等三种形式刹车方式的演示，同时在平台中添加的多媒体资源可用于教学过程中的辅助培训资料，通过对仿真平台的应用可有效提高飞机刹车系统的教学效果，同时可为其他飞机系统的仿真实现提供方法借鉴。

关键词：飞机刹车系统；Labview；模拟仿真

ABSTRACT

As an important subsystem of the landing gear system, the aircraft brake is mainly used for the control of the sliding distance when the aircraft lands and taxis on the ground. Meanwhile, it can provide the brake pressure for the aircraft to stay. Therefore, it is necessary to check and test frequently in the course of airline maintenance. In 147 training institutions and the aviation colleges and universities, the aircraft brake is the important content in the aircraft system training programs and courses, however, principle of complex aircraft braking system structure, the traditional way of training is difficult to achieve the ideal training effect, even training institutions and colleges and universities will purchase some brake entity, but because of its process is complex and have a certain risk, So it's hard to make the best use of things. To solve above problems, this paper, by using the virtual simulation technology, selection of domestic ownership larger B737NG aircraft brake system as the research object, to develop an aircraft brake system simulation platform, the platform can be directly applied to the training institutions and aviation colleges for aircraft brake system of training programs and courses, enhance the training effect.

This paper first describes the research status of virtual simulation technology in teaching and research at home and abroad, introduces the structure and working principle of B737NG aircraft brake system in detail, uses virtual instrument to build the aircraft brake system, and realizes the development of aircraft brake system simulation platform through program design. Verified, the simulation platform which can realize the plane normal, backup and compressed air storage, and other forms of three kinds of brake way of demonstration, at the same time is added in the platform of multimedia resources can be used for the auxiliary training materials in the process of teaching, through the application of the simulation platform can effectively improve the teaching effect of aircraft braking system, at the same time can provide methods for other aircraft system simulation model.

Key words: Aircraft brake system; Labview; Simulation

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状及发展趋势	1
1.2.1 国外研究现状	1
1.2.2 国内研究现状	2
1.3 本文研究内容	3
第二章 飞机刹车系统介绍	4
2.1 飞机刹车系统组成	4
2.2 飞机刹车系统工作原理	7
2.3 本章小结	8
第三章 飞机刹车系统仿真平台设计	9
3.1 开发工具介绍	9
3.2 仿真平台功能需求分析	10
3.3 仿真平台方案设计	10
3.4 仿真平台程序设计	12
3.5 本章小结	17
第四章 飞机刹车系统仿真平台验证与应用	18
4.1 仿真平台功能验证	18
4.2 仿真平台应用分析	24
4.3 本章小结	24
结论	错误! 未定义书签。
参考文献	26
致谢	27

第一章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

飞机刹车作为起落架系统的重要子系统，主要用于飞机着陆和地面滑行时的滑跑距离控制，同时可为飞机系留提供刹车压力，因此在航线维护时需时常进行检查测试，一旦发现问题须及时进行维修。据国外报道，几乎占飞机着陆时事故总数的 50%，刹车系统失灵是导致事故发生的首要原因，可见其刹车系统在飞机安全中的重要性。在 147 培训机构和各航空院校中，飞机刹车是飞机系统培训项目和课程中的重要内容，然而飞机刹车系统结构原理复杂，传统的培训方式很难达到理想的培训效果，即使培训机构和院校会购置一些刹车装置实体，但因其拆解过程复杂且具备一定的危险性，因此也很难做到物尽其用。针对以上问题，本文利用虚拟仿真技术，选取国内保有量较大的 B737NG 飞机刹车系统作为研究对象，开发出一个飞机刹车系统仿真平台，该平台可直接应用于各培训机构和航空院校对于飞机刹车系统的培训项目和课程中，切实提高培训效果。

针对飞机刹车系统的特点和要求，运用虚拟仿真技术进行程序搭建，可以实现在培训安全安全、低耗费的情况下，在真实或接近于真实的环境下直观观察到飞机刹车系统的工作状态。本课题通过掌握飞机液压刹车系统组成运行方式，基于 LabVIEW 设计模拟仿真平台，通过可开发性的组合编程实现飞机液压刹车系统各机构动态模拟，对于飞机内部系统教学和培训，可以有效解决因设备不足、授课时间、场地有限的问题，降低学员培训成本，通过模拟演示，使参训人员能够对系统的具体工作方式进行直接观察，从而确保参训人员在实际操作过程中的安全和教学效率，增强教学的可靠性、合理性，有效提高液压刹车系统的培训和学习效果，同时为仿真平台设计在航空培训中的应用形式提供了借鉴。

1.2 国内外研究现状及发展趋势

1.2.1 国外研究现状

仿真技术经过半个多世纪的进步，由最早出现的简单模拟仿真、数字仿真到现在的物理仿真、半实物仿真(又称硬件在回路中的仿真)，已经成为人们研究复杂系统的有力工具，它的应用范围已经相当广阔，其中也包括了工业、航空航天等武器系统，以至与国民经济发展密切相关。最早提出高速全数字实时仿真计算机概念的是美国 ADI(模拟设备仪器)公司，凭借其雄厚的科研力量，成功参与了多项美国航空航天重点项目的研发，比如新型四代机 V-22 掠夺者无人机和空客 380 等，为用户带来崭新的、通用性良好的基于 ADvantage 的实时仿真控制系统，用来完

成刹车控制系统产品的研发、测试和校核及其 FAA(联邦航空管理局)的认证。波音公司还采用了 ADI 公司根据 ADvantage 的实时仿真控制系统,解决了波音 787 和波音 777 客机上的刹车系统的开发与试验等问题。巴西航空公司和 LMS 集团合作,开发并完成了包含飞控、液压和起落架等控制系统组成的"虚拟铁鸟"模型,该"虚拟铁鸟"中的部分组成通过网络分布式方法实现了集成化,将各个部件组成分布在不同的计算机上,并采用了 AMESIM(工程控制系统高级建模与仿真环境)的平台连接。赛斯纳航空公司采用了 MathWorks 公司的建模平台进行起落架和跑道建模,并结合物理控制系统在仿真目标机上,进行实时的快速原型和硬件在环模拟。澳菲亚飞机设备有限公司所研制的飞机轮胎刹车测试台,可以检测飞机在着陆刹车过程中车轮磨损和胎压改变的程度。韩国电子科研所采用数字仿真技术完成防滑控制算法的试验,并以液压控制系统、防滑刹车控制系统以及相关数学模型组成仿真平台。此系统以 MATLAB 的 Simulink 为基础工具开发了飞机防滑刹车仿真平台,由嵌入式的目标编译器产生模拟代码后,下发至基于 DSP 的仿真测试板。该系统虽然达到了半物理仿真的实时性要求,但功能扩展性、通用性较差。

国外对于飞机刹车系统的仿真研究开始得较早,在刹车控制规律液压控制系统和刹车控制单元等方面都开展了广泛的研究,控制系统数学模型构建的也比较完善,不过因为保密等技术因素,对于飞机刹车系统仿真方面的研究相对较少,查阅资料比较困难。

1.2.2 国内研究现状

对于飞机刹车系统及其仿真技术的综合研发在我国起步相对较晚,虽然与国外相比存在很大差距,但是却得到了迅速的发展。自 20 世纪 80 年代以来,中国研究了一批大型、高质量的半实物仿真系统,如红外制导导弹仿真系统、工程飞行模拟器等。但单独关注飞机刹车系统仿真技术的研究与应用方面,国内要逊色不少。南京航空航天大学韩建辉利用 MATLAB/SIMULINK 系统中的数学分析项目已经对飞机刹车系统展开了深入研究,以便从与刹车及刹车系统有关的附件中建立和分析飞机刹车系统的工作状态和原理,但目前的主要研究成果仍限于理论分析和数值仿真。上海交通大学沈迎春团队依靠将物体连接到模拟电路中构建了一个平行的计算机平台,之后在 RT 实验室环境中建立了仿真平台,完全控制和模拟飞机的刹车系统。南京航空航天大学周恩智开发了一款软件,以监测基于 VB 环境的飞机模拟刹车,并进行了实时数据收集研究。西北工业大学王建在 Linux 框架内实现了半物理系统仿真,并对飞机刹车系统进行数学模拟,在环境下对各种跑道模型的结果进行分析,但该系统具有很强的着陆制动针对性,仅对着陆制动有效,只考虑单一制动因素。

目前，对飞机刹车系统的主要研究仍限于刹车系统模型的数学仿真以及对单一附件的仿真，对整体的飞机刹车系统模拟研究较少，因为现有的半物理仿真多以高速计算机为依据，而刹车附件则多由模型所替代，因此无法对整体控制系统做出更真实、精度更高的模拟。由于现代飞机刹车控制系统越来越复杂，对系统的模拟要求越来越高，由于外部因素和建模环境的限制，数学模型也很难建立起来，我们需要能够对做出更真实的模拟系统进行深入研究。虚拟仪器技术通过先进的模块化硬件，结合高效的应用软件，实现了多种试验、检测和智能化应用的，硬件平台和软件平台，无缝集成不同的建模程序软件，创造可灵活使用的界面。所以，为了进一步提高飞机刹车系统的模拟准确度，借助与虚拟仪器技术联合建立的飞机刹车系统仿真平台，通过建立数学和实物仿真模型，是目前我国飞机刹车系统仿真研发的主要目标。^[3]

1.3 本文研究内容

1. 介绍论文研究的背景与意义，分析国内外仿真技术的发展现状和发展趋势。
2. 介绍 B737NG 型飞机刹车系统的组成结构，分析刹车系统的工作原理。
3. 通过对仿真平台的功能需求分析，结合仿真平台应用性要求，提出飞机刹车系统仿真平台总体设计方案，分析了自定义控件的开发和程序的设计方法。
4. 在 LabVIEW 环境下完成仿真平台各子系统和人机交互模块的开发与设计，对仿真平台进行功能验证及应用分析。
5. 对论文的研究工作进行总结，并对今后的优化方向进行展望。

第二章 飞机刹车系统介绍

本章主要分析了 B737NG 飞机刹车系统的组成及工作原理，并对飞机刹车系统中的一些关键部件进行了详细介绍。

2.1 飞机刹车系统组成

液压刹车系统控制主起刹车盘的液压压力。备用刹车选择活门和蓄压器隔离活门通过选择液压源来控制正常刹车、备用刹车和蓄压器刹车。刹车脚蹬控制正常和备用刹车系统。

液压刹车系统包括：刹车脚蹬公用机构、刹车钢索、刹车压力指示器、刹车计量活门、备用刹车选择活门、蓄压器隔离活门、蓄压器、蓄压器勤务组件、刹车液压保险、刹车换向活门、刹车盘组件、刹车释压活门等部件。

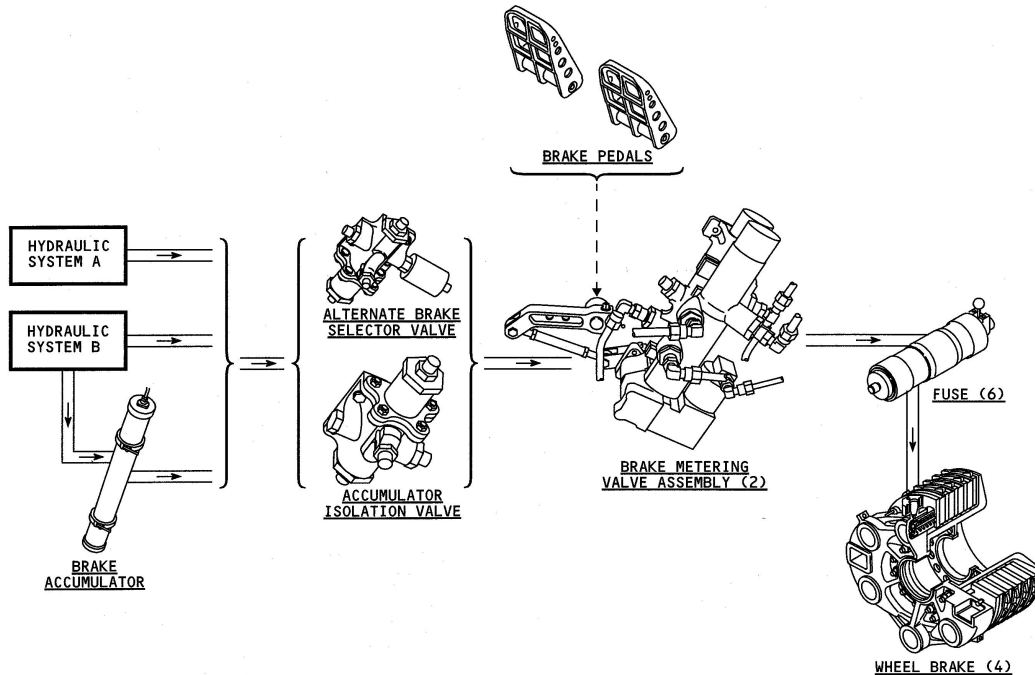


图 2-1 B737 液压刹车系统组成

1. 刹车计量活门

刹车计量活门接受脚蹬所传递过来的信号输入，输出计量刹车压力。正常刹车计量活门在正常刹车时使用 B 液压系统或蓄压器压力来进行。当 B 液压系统不工作时，备用刹车计量活门使用 A 液压系统进行备用刹车。

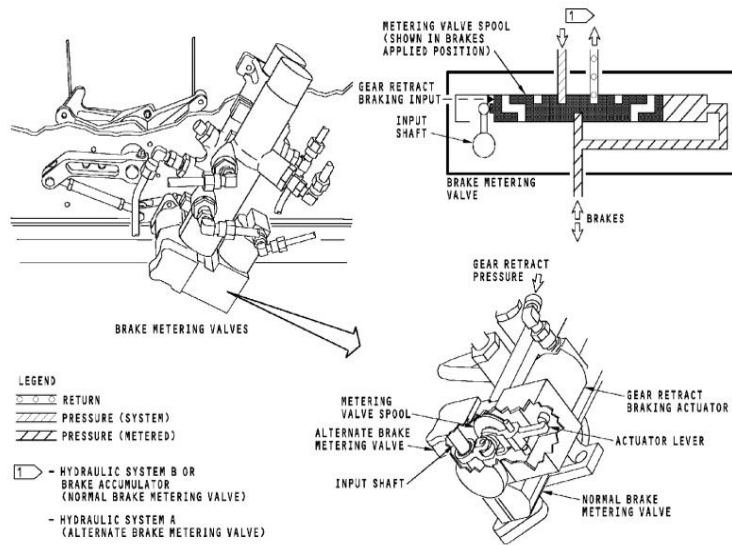


图 2-2 刹车计量活门

2. 备用刹车选择活门

备用刹车选择活门和蓄压器隔离活门共同控制正常刹车系统和备用刹车系统的压力。当“**A**”、“**B**”液压系统均有效时，**B** 液压控制活门使得 **A** 液压不能进入备用刹车系统。同时活门在这个位置时，备用刹车选择活门使用起落架收上管路的压力在起落架收上时为备用刹车系统供压。当 **B** 液压系统失效时，备用刹车选择活门作动，使得 **A** 液压系统为备用刹车系统供压。当内用刹车系统获得压力时，备用刹车选择活门压力电门提供一个信号给防滞系统。

3. 蓄压器隔离活门

当 **B** 液压系统不供压时，备用刹车选择活门过来的压力作动隔离活门，将蓄压器压力和正常刹车系统隔离。当 **A**、**B** 液压系统都不供压时，蓄压器压力作动蓄压器隔离活门，蓄压器为正常刹车系统供压。

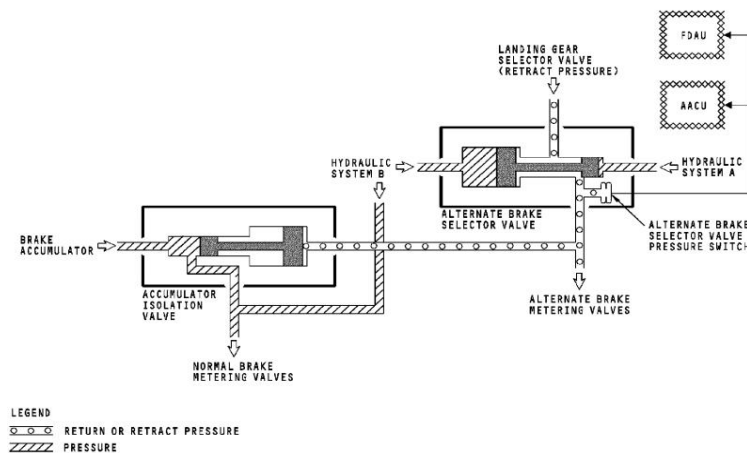


图 2-3 备用刹车选择活门、蓄压器隔离活门

4. 刹车换向活门

刹车换向活门选择正常/自动刹车或备用/机轮收上刹车中压力最高的进行刹车。当两个输入压力源之间的压差大于 80PSI 时，换向活门作动到止动位置，将更高压力的管路联接到刹车管路上。换向活门同时将压力偏低的管路关闭。

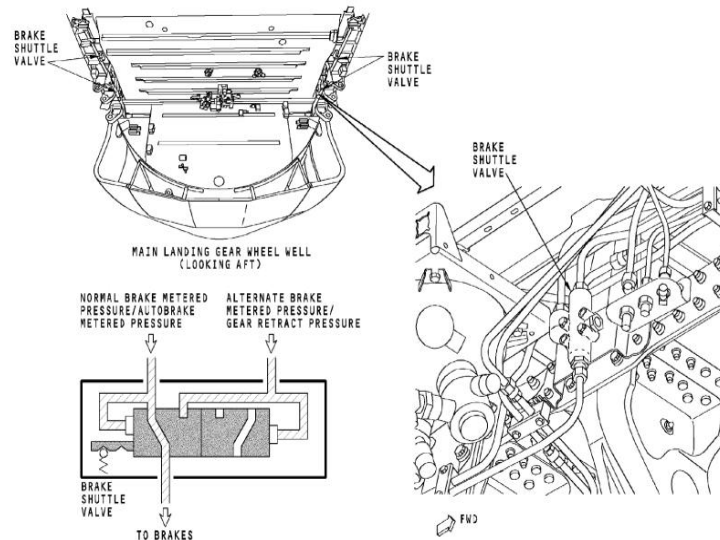


图 2-4 刹车换向活门

5. 防滞活门

防滞活门对刹车压力进行释压，防止机轮滞动。在正常刹车工作时，四个活门分别为每个机轮提供防滞保护。而在备用刹车工作时，两个防滞活门分别给每个主起起的两个机轮提供防滞保护。

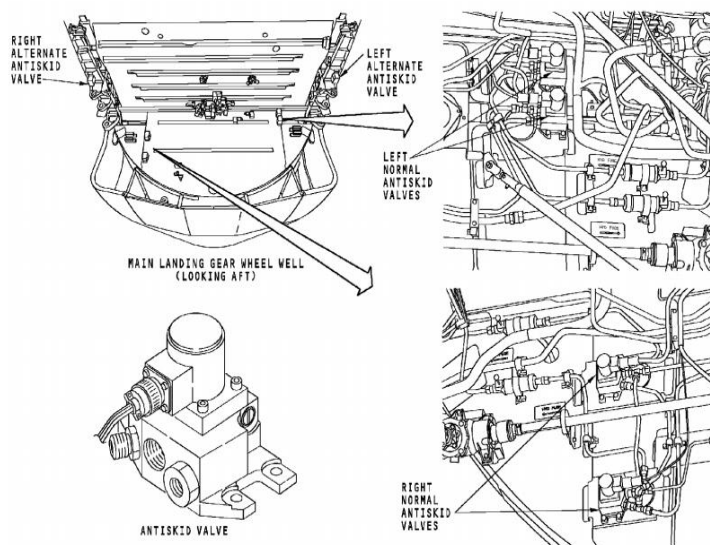


图 2-5 防滞活门

6. 刹车组件

刹车组件是由液压作动的动-静转子组件。刹车盘主要由下列部分组成：静子、转子、传压盘、调节销、轴套、磨损指示销、刹车管路接头/液压放气口。

刹车盘一般都带有轴套，轴承套装在可调换的主起轴承套的衬套上。通过刹车组件上的扭力销定位槽和主起内筒底部的扭矩销连接，把刹车时产生的扭力传递给主起减震支柱。一条保持钢索将另一侧主起的两个刹车盘连接在一起。刹车系统工作时，压力盘把静子与转子压在一起，使机轮减速并停止下来。而磨损销则可以按照刹车盘的损坏程度可以自行调节长度。

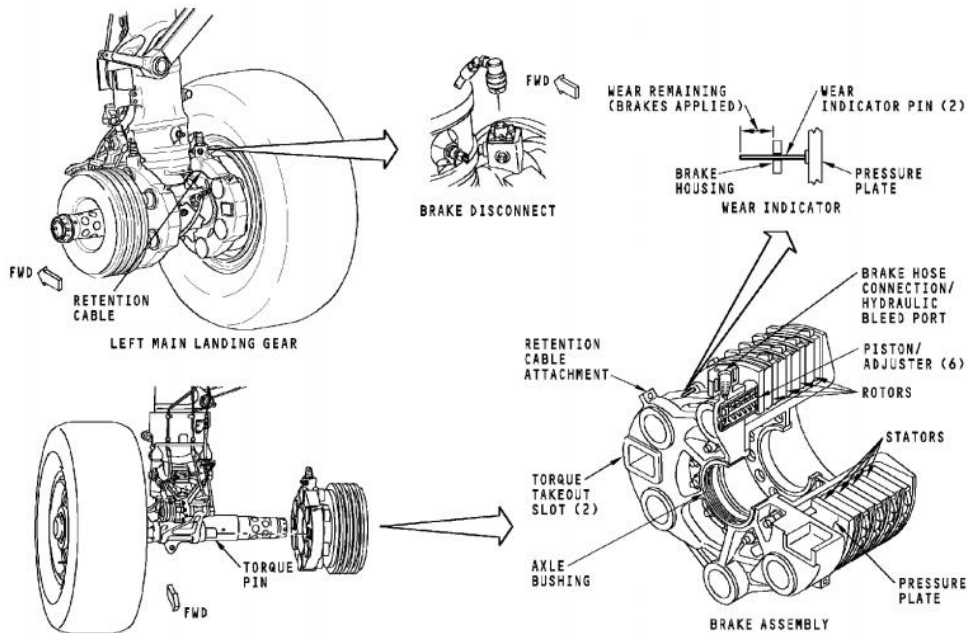


图 2-6 刹车组件

2.2 飞机刹车系统工作原理

液压刹车系统控制供往主起刹车组件的液压压力。

1. 正常刹车：如果液压系统 B 供应压力，正常刹车系统使用液压系统 B 压力来操纵刹车装置。

2. 备用刹车：当液压系统 B 不供应压力时，备用刹车系统使用液压系统 A 的压力操纵刹车装置。

3. 蓄压器刹车：当液压系统 A 和 B 不供应压力时，刹车蓄压器供应压力到正常刹车系统。刹车脚踏通过钢索控制刹车计量活门向刹车装置传送计量的刹车压力。刹车脚踏放松使计量活门柱塞推回到闭合位，这使刹车压力回油并松开刹车。

正常情况下由 B 系统提供压力，备用刹车选择器活门移动停止向备用刹车系统提供压力。而刹车会从正常刹车计量活门得到计量的 B 液压系统压力。B 液压系统压力同时为刹车蓄压器充压，并移动蓄压器隔断活门。

当 B 液压系统不能供压时,利用 A 液压系统的压力使备用刹车选择活门工作,此时液压系统的压力传送到备用刹车系统。刹车组件能够从备用刹车计量活门得到计量的 A 系统压力。

当 A、B 两个液压系统都无法供压时,由正常的刹车计量活门得到刹车蓄压器所提供的压力,此时蓄压器的压力打开蓄压器隔断活门。一旦蓄压器的压力增加超过正常值时,刹车系统释压活门在 3500psi 时开始开启,以保护蓄压器。

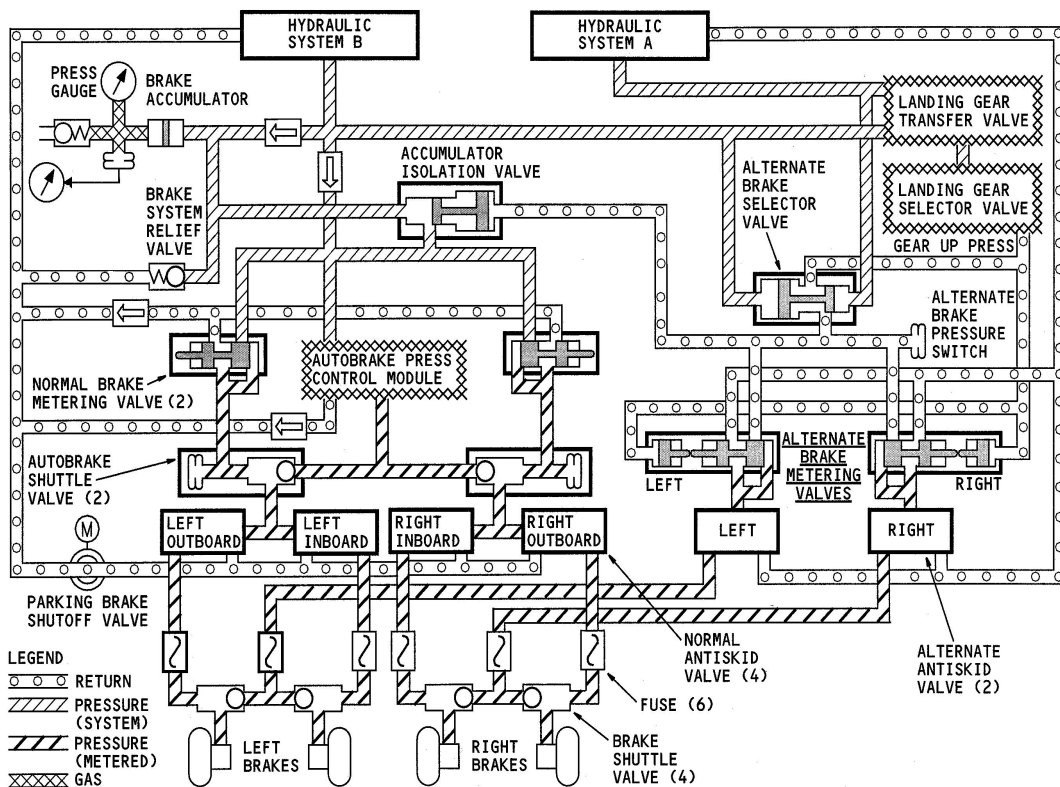


图 2-7 B737 液压刹车系统原理

2.3 本章小结

本章主要对 B737NG 飞机刹车系统的组成和工作原理进行分析,总结刹车系统工作方式作为仿真平台开发的理论依据。

第三章 飞机刹车系统仿真平台设计

本章介绍了实现仿真平台的关键技术，通过仿真平台的功能需求分析确定仿真平台设计方案，在 LabVIEW 编程环境下完成仿真平台的程序设计。

3.1 开发工具介绍

虚拟仿真技术以系统模拟为依据，仿真的实质是统计与调度系统，而不是要求系统的性能。比如单纯的数值仿真；将文字、图像、动画等显示方式添加到数值仿真的流程和结果中，这种仿真就叫做可视化仿真；在可视化仿真基础上添加声音和其他媒体，就可得到多媒体仿真。基于 PC 平台的虚拟现实系统的开发费用较低，因此得到了广泛的应用。虚拟仿真作为先进的人机交互技术，已被广泛应用于航空维修、设备研制、教育培训等领域。虚拟仪器，是一款以高性能模块化硬件为内核的高效率、高柔性的应用软件，可以完成各种测量、自动化等功能。而在虚拟仪器方面，目前应用最为普遍的是来自于 NI 公司的 LabVIEW。LabVIEW 又被称作 G 程序设计语言，是一种图形程序设计语言，和其他程序设计语言的主要区别就是 LabVIEW 在编写程序时，基本不需要写计算机程序，而是使用流程图，通过图标连接和程序框图来取代原有的程序代码，这样程序员就能更好地了解程序的运行过程。

LabVIEW 系统采用了高性能的模块化软件与硬件，因而具备高性能、可扩展性强、开发周期较短的优势。

1. 性能高

在 PC 技术的基础上发展的 LabVIEW 虚拟仪器技术，具备了功能强大的处理器和 I/O 技术，使它能够轻易地连接各类软硬件设备，从而更为准确的现场分析处理能力。其中设置了各类数据转换、数据处理、保存方法给用户提供服务。^[3]

2. 扩展强

高速发展的 NI 硬件和软件可以让工程师更好、更高效的开发程序。硬件上的各种数据采集卡和通讯卡，更新扩展性极强，即插即用。针对软硬件的发展，只需要对电脑进行更新或对硬件进行测试，对软件的更新就是对整个系统进行改进。

3. 开发周期短

通过使用 G 语言进行软件设计，可以大大简化程序设计，大大节省了软件编程和调试的时间。此外，NI 还能有效地与最新的测试仪器、通讯设备和电脑进行集成，节约了开发成本和时间。

正因为 LabVIEW 有很多优点，因此在某些领域其特点尤其突出：

1. 测试测量范围: LabVIEW 最早被设计用于测试测量, 因此它是目前 LabVIEW 应用范围最广的地方。经过几年的发展, LabVIEW 已得到了广泛的认可。目前, 大部分的检测设备和信息收集装置都配置有专门的 LabVIEW 驱动, 通过 LabVIEW 对这些设备进行简单的操作。同时, 使用者还能够非常方便地找到适用于试验与检测的各种 LabVIEW 工具箱。这些工具包几乎全部满足用户需求的功能, 并且可以让使用者更轻松地使用它们来开发软件, 有时甚至可以通过调用一些功能来构建一个测试和测量的完整的应用。

2. 控制领域: 控制与测试是两个相关度非常高的领域, 从测试领域起家的 LabVIEW 自然而然地首先拓展至控制领域。除此以外, 在工业控制领域中所用的电子设备、数据线等, 一般也都装有配套的 LabVIEW 驱动程序。因此利用 LabVIEW 可以非常方便的编写各类工业生产控制系统。

3. 仿真领域: 它涉及多个不同的数学运算功能, 因而尤其适合于模型、仿真、原型开发等。在进行机械设备的设计前, 可以利用 LabVIEW 软件进行计算机模拟, 对其进行验证, 并发现可能存在的问题。在物理仿真之前, 采用 LabVIEW 软件进行仿真, 可以得到相同的结果, 从而提高了实验人员对仿真结果的正确性。

3.2 仿真平台功能需求分析

根据飞机液压刹车系统中涉及到的各部件基本原理及功能, 实现刹车系统工作时液压油路的运行可视化状态。其次, 为了更加满足实际培训的需要, 该仿真平台应包括飞机刹车系统的基本工作原理叙述及刹车组件具体工作方式, 从而保证知识的理论性、科学性、确定性。除了搭建飞机刹车系统集成之外, 还应搭建正常刹车系统、备用刹车系统、蓄压器刹车系统三个子系统, 更为详细直观的演示在单个系统运行时各部件的工作状态, 结合理论基础进行更针对性的学习, 加深理解。

为了达到仿真平台的稳定可靠, 从而进一步满足培训需要, 仿真平台还必须满足以下几点要求:

1. 真实性, 以飞机刹车系统工作原理为基础, 使各机构部件工作状态得到准确演示, 有效提高液压刹车系统的培训和学习效果。

2. 联动性, 可以实现各个部件间的流畅联动运行, 保证所搭建的运行系统的合理性。

3. 交互性, 仿真平台应具备完善的人-机器互动界面, 且使用简单。

3.3 仿真平台设计方案

通过仿真系统原理可知, 仿真平台由实物和数学模型组成, 其中液压管路由 LabVIEW 控件中的“数值控件”实现, 刹车计量活门、换向活门等都可以利用“自定

义控件”实现其功能，而一些例如脚蹬、机轮等则用模型代替，具体仿真平台的组成结构如下图所示。

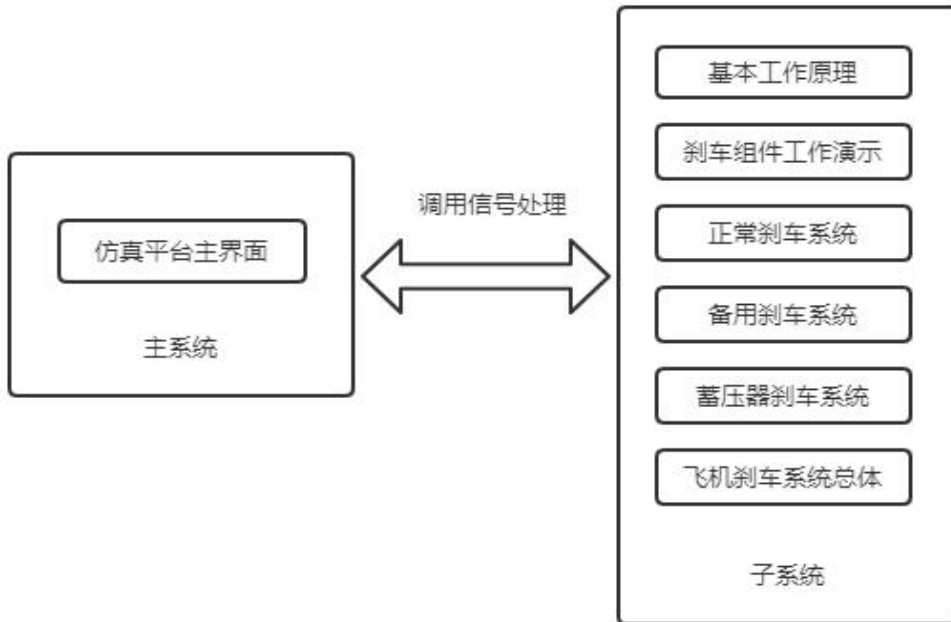


图 3-1 仿真平台的组成结构

本仿真平台主要包括基本工作原理叙述、刹车组件工作演示、正常刹车系统、备用刹车系统、蓄压器刹车系统、飞机刹车系统总体六个部分。为了确保仿真平台的精确性和可靠性，需要通过 LabVIEW 前面板与程序方框图协同控制编程，制作严密的设计流程，测试其功能性，并在相应的控件设计开发后完成仿真平台的最终设计开发，如图 3-2 所示。

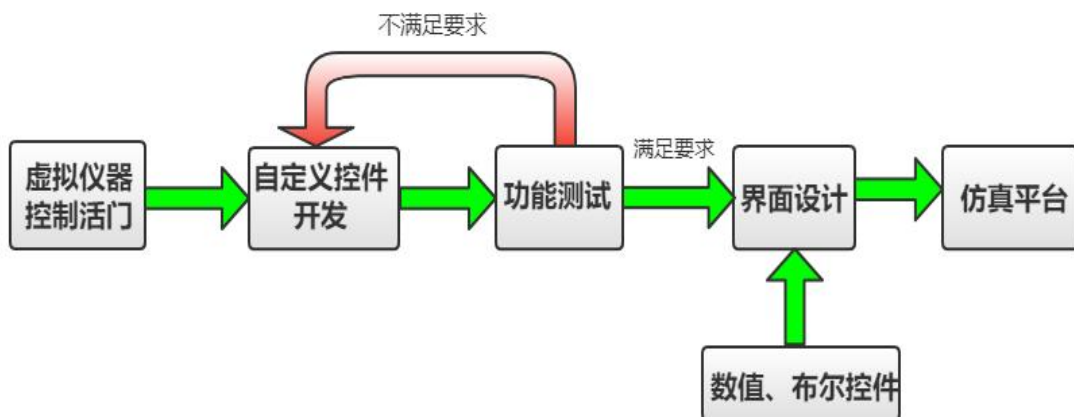


图 3-2 仿真平台开发流程

3.4 仿真平台程序设计

1. 基本循环语句的编程及自定义控件的开发

(1) 数值控件的编程

仿真平台在数值控件中主要是水平、竖直进度条的应用，在进度条循环语句中涉及到反馈节点及选择节点，反馈节点可以保存 VI 或循环上一次运行的数据，选择节点则是用来判断输入的数据是否正确。

在前面板添加进度条控件之后，为方便控制后续运行速度，故将该控件的刻度范围更改为 0-10，之后创建局部变量添加到循环语句（图 3-3）中，实现进度条的“+1 运行”。

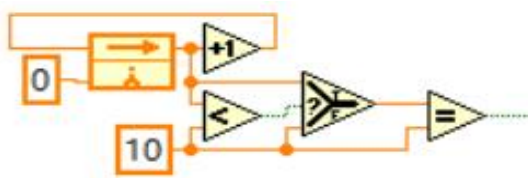


图 3-3 进度条控件循环语句

(2) 布尔控件的编程

布尔数据类型的取值可以是 1 或 0，及真(Ture)或者假(False)。一般情况下布尔类型即是逻辑类型，因而在编程框图中可以实现同、或、非、异或等的布尔计算。布尔类型数据部分是在前面板上的数据输入输出控件和数据显示控件，而另一个则是在程序框图上的布尔常量。

在本平台当中使用“指示灯”“开关”布尔控件，在创建空间之后，在 LabVIEW 程序框图中会出现相应的局部变量，将其与相应的条件结构框图相连即可。布尔控件编程时，需要分别编写“真”“假”两种情况，从而保证指示灯开或关状态时，所控制的各变量正常循环。

(3) 子系统的调用

根据先前所提到的仿真平台的组成可知，由“主界面”控制其他六个子系统的运行与否，故涉及到子 VI 的调用，调用语句如图 3-4 所示，在添加“目标 VI”“当前 VI”两个静态 VI 引用后可以实现子系统的调用。

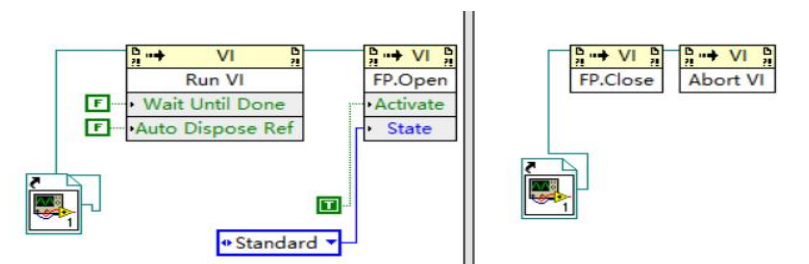


图 3-4 子系统调用语句

(4) 视频源的调用

在刹车组件工作演示中，需要编写调用系统播放器的语句。如图 3-5 所示，在正确添加视频文件路径后语句编写完整，应注意的，因虚拟仪器所搭建的系统都为 VI 的形式，其调用视频应转换成 avi 格式，MP4 是无法添加到语句当中运行的。

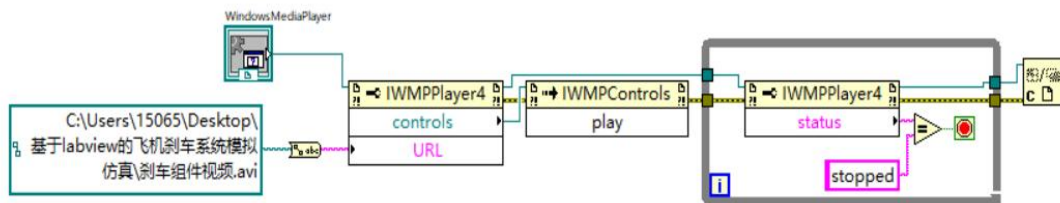


图 3-5 avi 视频调用语句

(5) 自定义控件的开发

刹车计量活门、刹车换向活门的开发需以 LabVIEW 中进度条控件为原型，具体过程如下：

- 1) 背景。利用界面修饰工具对进度条显示框的左右进行绘制。
- 2) 属性。通过改变量表标尺、外观等属性得到满足要求的属性样式。
- 3) 活塞。活塞开发是活门类控件开发中的重点，在 LabVIEW 的属性中并没有提供活塞样式，这就需要对进度条进行自定义开发。自定义开发过程是将进度条中的滑块替换成准备好的活塞模型图片，最后经过测试完成活门类控件的开发。

最后，将开发完成的刹车计量活门、刹车换向活门放置到平台面板相应位置，进行后续循环语句的编写，如图 3-6 所示。

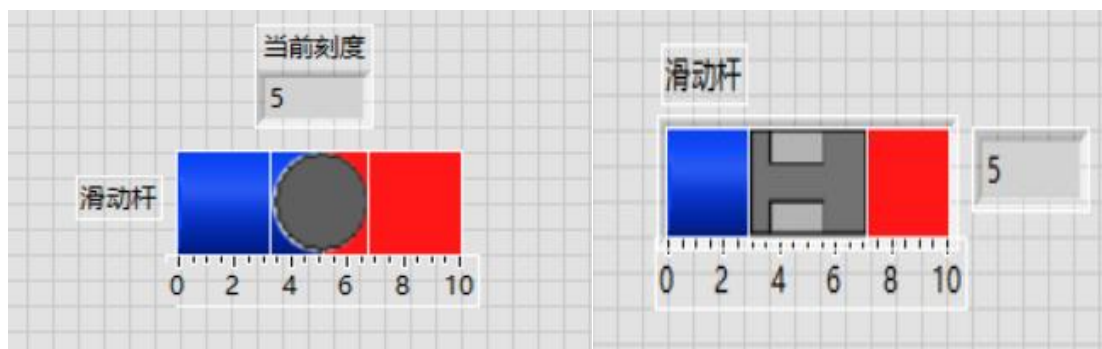


图 3-6 自定义控件

刹车换向活门（左） 刹车计量活门（右）

2. 刹车系统程序设计

以正常刹车系统进油为例，在掌握上述提到的数值控件、布尔控件、自定义控件编程原理后，进行刹车系统进油、回油两种工作状态下液压管路的循环编程。

将布尔控件连接到“条件结构”框图输入端，此时条件结构框图存在真、假两种变量关系，我们则需要根据已创建的若干个进度条控件工作时的状态创建局部变量，并增加一个常量约束。那么由刹车系统进油、回油工作原理可知，指示灯亮，条件结构为真，框图中的局部变量执行编程语句；反之，指示灯暗，条件结构为假，框图中局部变量执行常量约束，回到初始“未运行”状态，如图 3-7 所示。

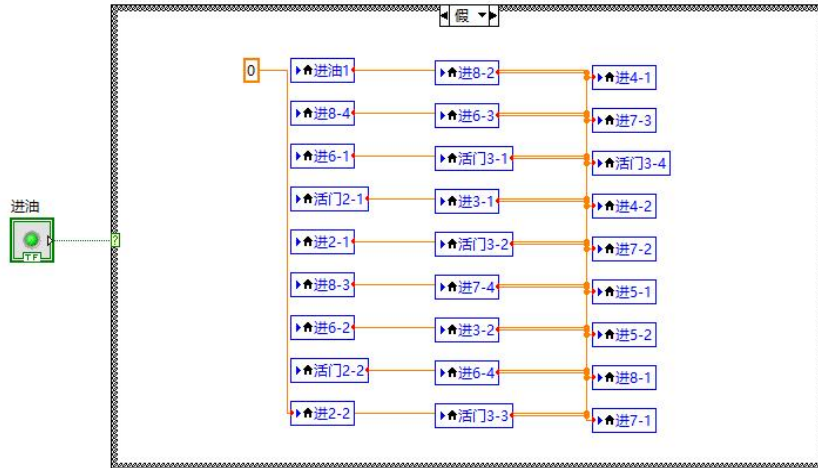


图 3-7 条件结构为假时的局部变量约束

当条件结构为“真”时，为了实现进度条之间的顺序结构，需要在此时的框图(条件结构为“真”)中添加“层叠式顺序结构”，它包含了一个或多个子程序的框架，用鼠标右击框架即可增加或删除子分支，或创建连续的本地变量，在框架之间传递数据，分层序列架构就确保了整个子程序的有序进行。这里的帧其实就是进度条运行顺序所在的框图，假设进度条运行顺序为“进度条 1-进度条 2-进度条 3”，则进度条 1 为 1 帧，进度条 2 为 2 帧.....以此类推。

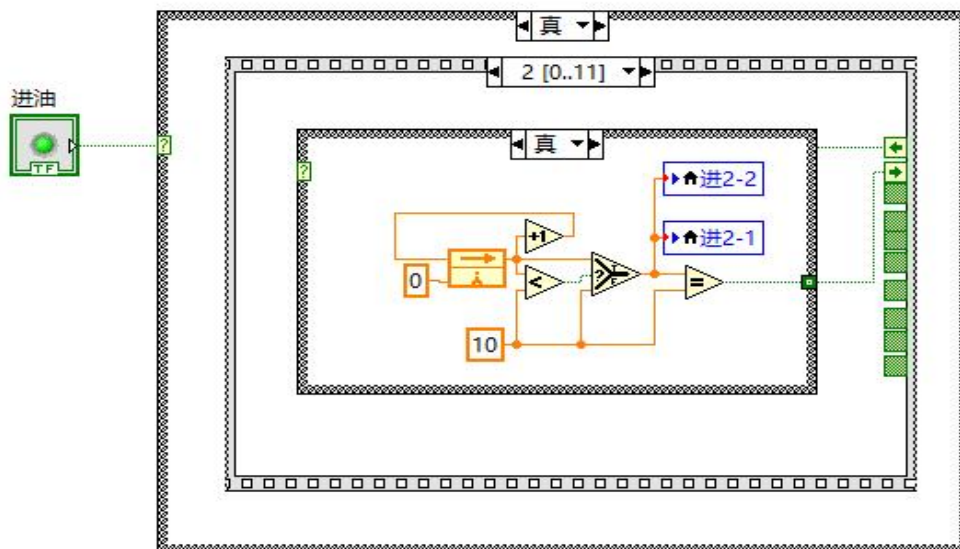


图 3-8 条件结构为真时的循环程序框图

在创建好所需的帧后，我们将每一帧对应的进度条所创建的局部变量与循环语句（图 3-2）相搭接构成该帧的变量执行程序。在完成刹车系统“进油状态”若干帧的编程后，右键单击顺序结构边框创建“顺序结构变量”，每一帧中条件结构框图的输入端连接上一帧条件结构框图的输出端所连接的顺序结构变量，从而实现编程序按顺序执行，如图 3-8 所示。

至此，正常刹车系统进油状态的编程完成，其回油状态编程过程与此类似。在完成两种状态的编程后，则需要对所添加的局部变量进行整合排列，整理程序框图，检测无误后，正常刹车系统子系统程序框图如图 3-9 所示。

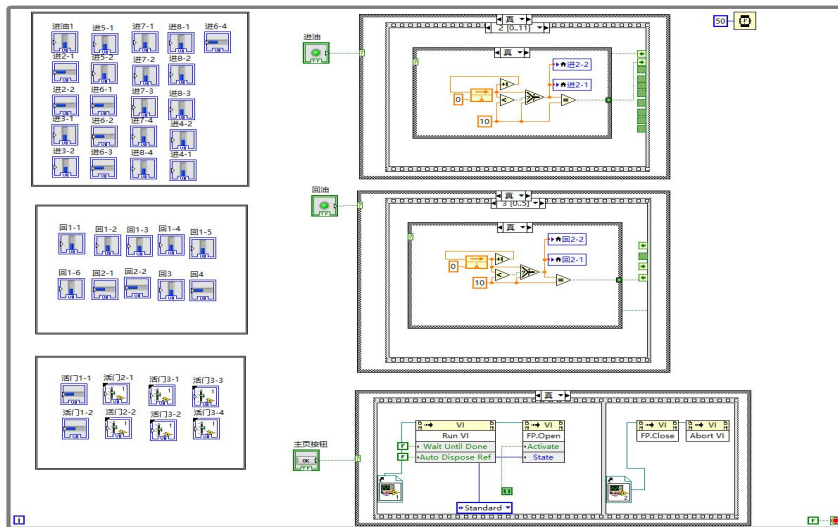
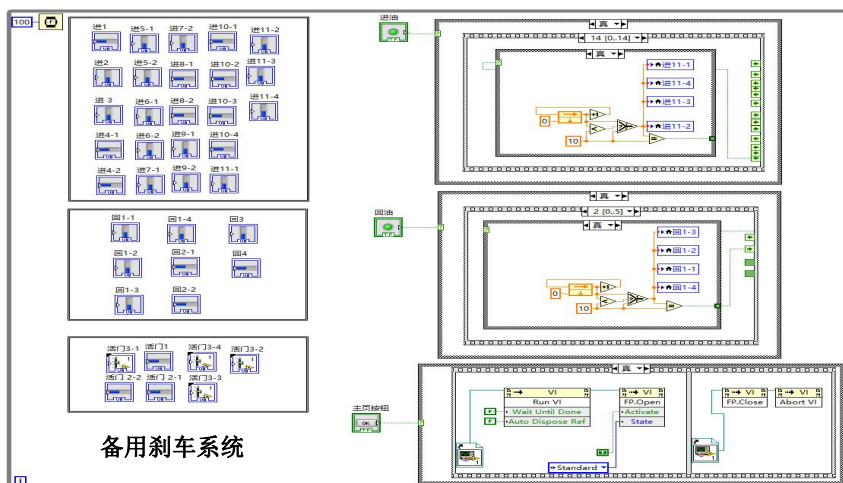


图 3-9 正常刹车系统程序框图

备用刹车系统、蓄压器刹车系统、液压刹车系统总体的运行程序则与正常刹车系统相仿，但应注意刹车计量活门、换向活门或蓄压器隔离活门的变量关系，应满足在各系统运行时，通过布尔控件的控制，完美切换该系统进油、回油两种工作状态。其程序框图如图 3-10 所示。



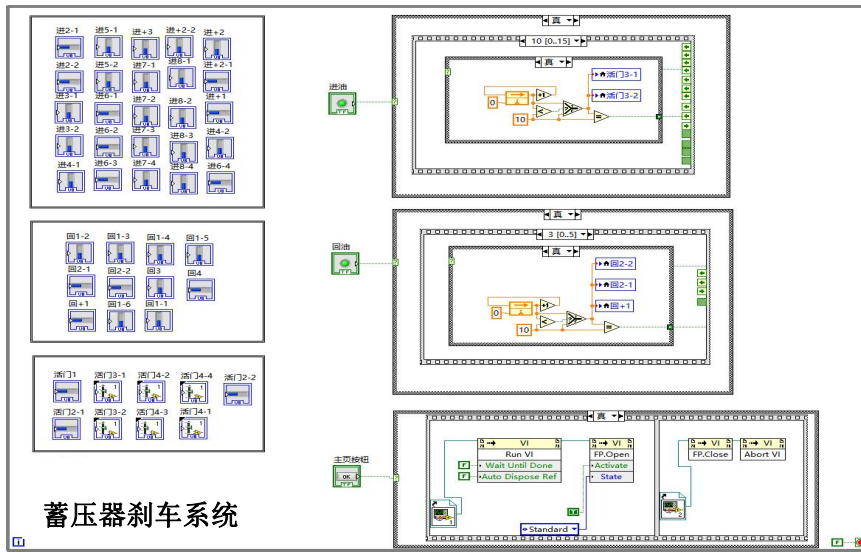
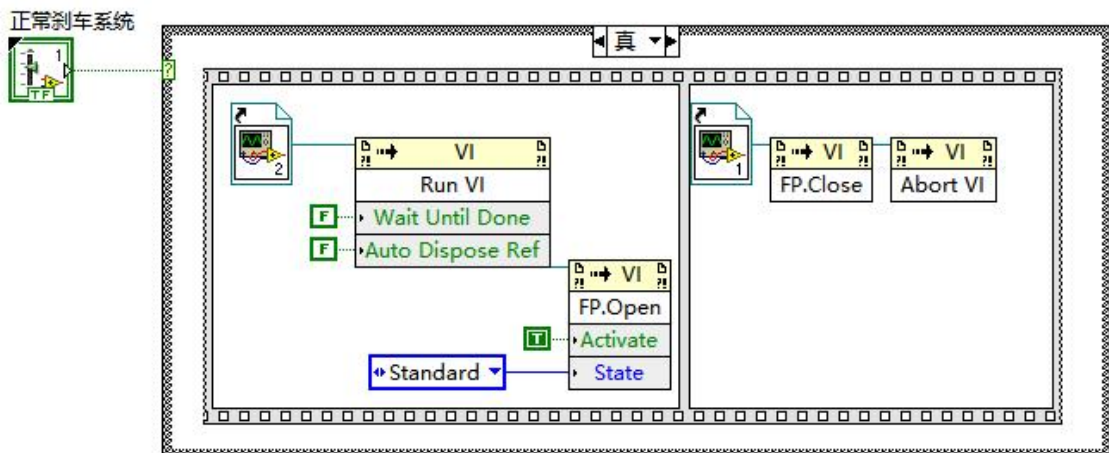


图 3-10 备用刹车系统、蓄压器刹车系统程序框图

需要注意的是在进行液压刹车系统总体的运行程序编程时，会出现“一管多用”，即一个进度条变量可由多个布尔控件（指示灯）控制，这种情况下应注意该变量的常量约束是否合理，避免出现两个布尔控件一开一关时该变量的约束不同，造成程序无法运行。

3. 仿真平台主界面程序设计

依据仿真平台设计，运用上文介绍的子系统调用语句进行基本工作原理、刹车组件工作演示、正常刹车系统、备用刹车系统、蓄压器刹车系统、飞机刹车系统总体六个子系统的调用编程。在 While 循环框图中添加条件结构框图，将创建好的布尔控件（开关）连接到条件框图的输入端，再将子程序调用语句添加到条件结构为“真”状态下，从而实现主界面与各个子系统页面间的切换，如图 3-11 所示。



第四章 飞机刹车系统仿真平台验证与应用

以 B737NG 飞机刹车系统为参照条件，运行设计的飞机刹车系统仿真平台进行系统验证与应用分析。

4.1 仿真平台系统验证

1. 仿真平台主界面

如图 4-1 所示，主界面中除了包含标题、飞机等基本元素外，还设置了基本工作原理、刹车组件工作演示、正常刹车系统、备用刹车系统、蓄压器刹车系统、飞机刹车系统总体六个布尔控件，用于实现主界面与各个子系统页面间的切换，切换时点击各选项即可调用相应的子系统程序。运行主界面，程序在切换至子系统时自动运行，用户可直接选择子系统的功能进行实现。



图 4-1 仿真平台主界面前面板

2. 刹车系统工作原理子系统

在选项卡中分别加入了飞机刹车系统工作原理图及工作原理，并根据 B737 航空器手册中刹车系统的工作原理标注了正常刹车系统、备用刹车系统、蓄压器刹车系统的重点，便于在培训过程中对知识点进行归纳总结，如图 4-2 所示。

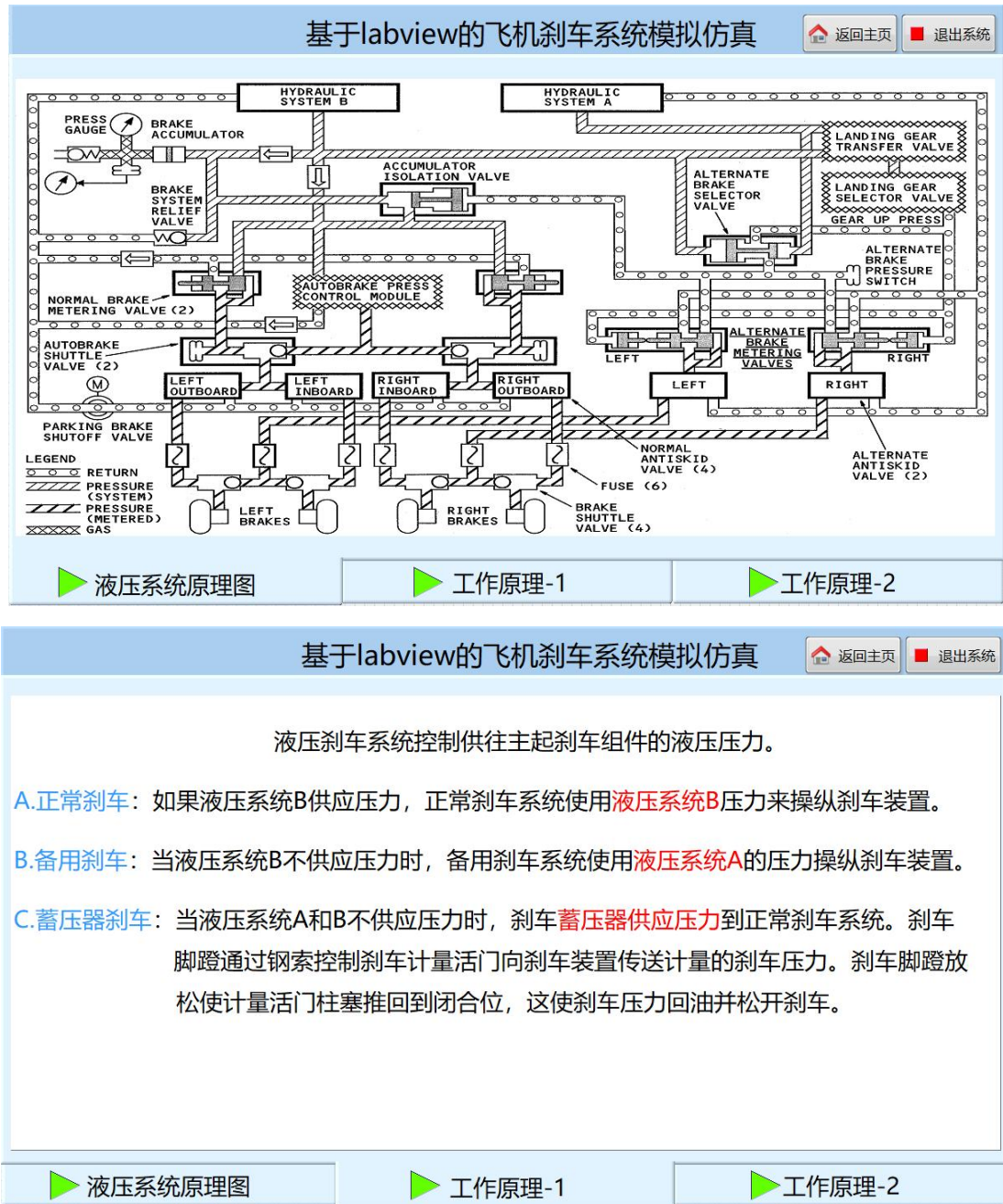


图 4-2 系统工作原理前面板

3. 刹车组件工作原理演示子系统

飞机滑跑过程中刹车组件中的动盘随着机轮一起旋转，制动时活塞向外伸出推动压紧盘，随着压紧盘不断推进，动盘和静盘之间的摩擦力不断增大。因此，动盘的转速随着摩擦力的不断增大而逐渐变慢。取消制动时，压缩弹簧通过调整器组件拉动压紧盘回动，动盘和静盘之间的摩擦力逐渐减小，动盘转速逐渐加快，当制动力完全撤销时动盘回复正常转动。

通过视频源调用语句，将刹车盘工作演示视频插入到该子系统视频路径当中，该视频可以充分展示在刹车系统工作过程当中刹车盘的收紧、放松，如图 4-3 所示。

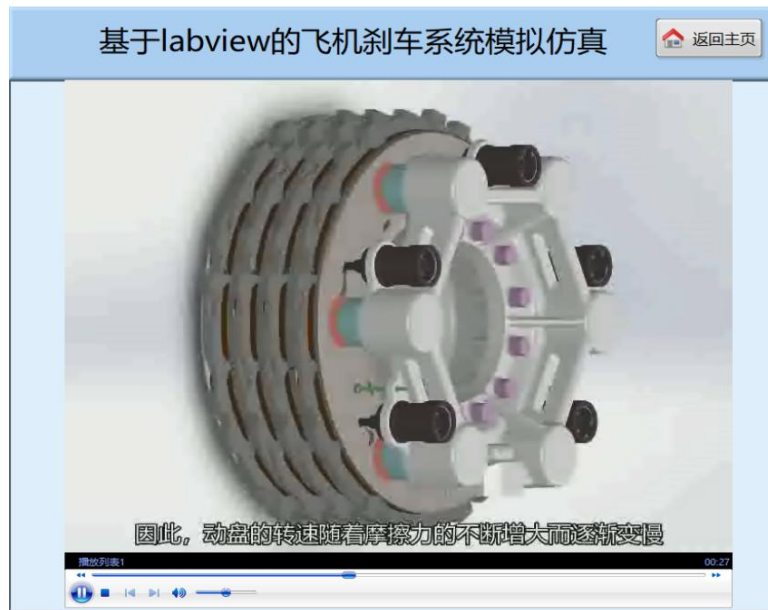


图 4-3 刹车组件演示前面板

4. 正常刹车子系统

进油状态：液压系统 B 工作，液压油分别流经刹车计量活门、自动刹车换向活门、防滑活门到达机轮，刹车盘在液压油的压力下开始工作，刹车盘盘将静子和转子压在一起，从而使机轮减速或停止下来，如图 4-4 所示。

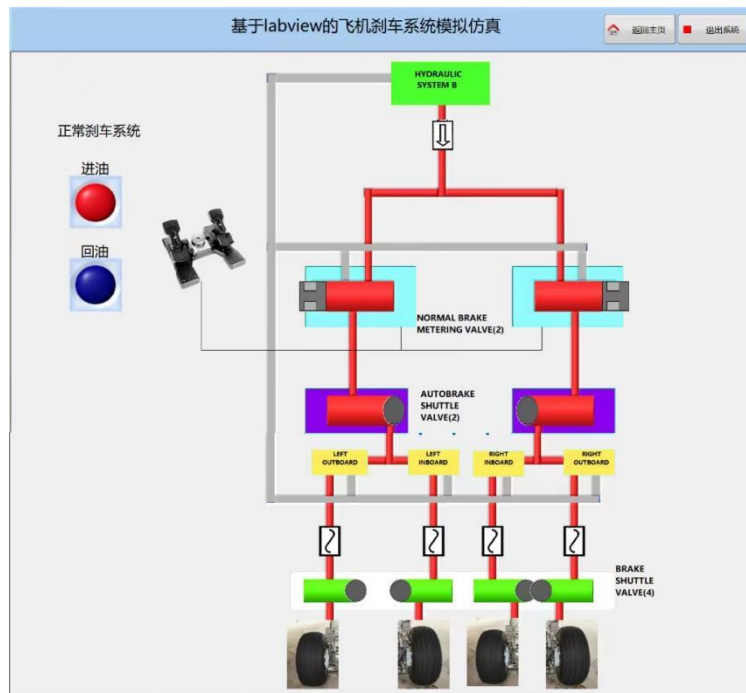


图 4-4 正常刹车系统进油状态

回油状态：刹车结束后，储存在刹车换向活门和刹车计量活门的液压油沿回油管路返回到油箱，等待下一次刹车工作，如图 4-5 所示。

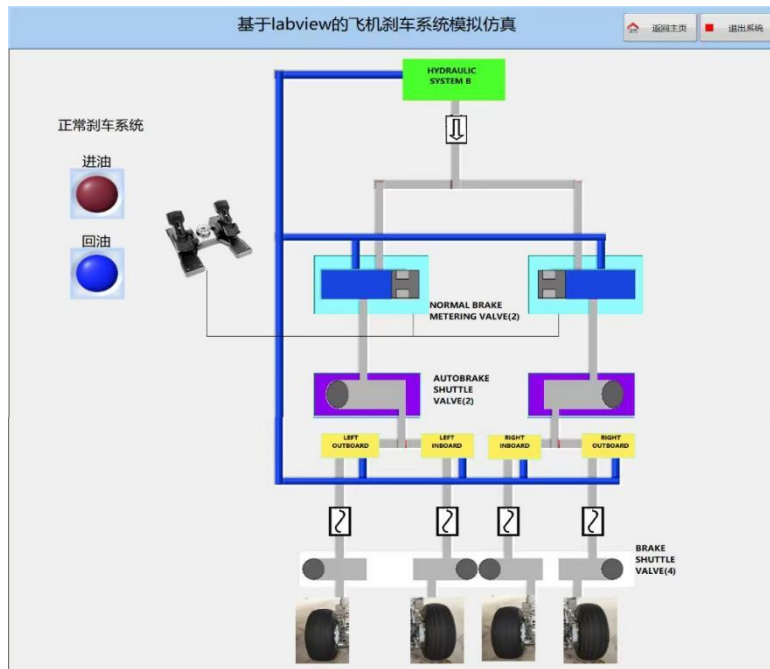


图 4-5 正常刹车系统回油状态

5. 备用刹车子系统

进油状态：液压系统 A 工作，液压油分别流经备用刹车选择活门、备用刹车计量活门、防滑活门到达机轮，刹车盘在液压油的压力下开始工作，刹车盘盘将静子和转子压在一起，从而使机轮减速或停止下来，如图 4-6 所示。

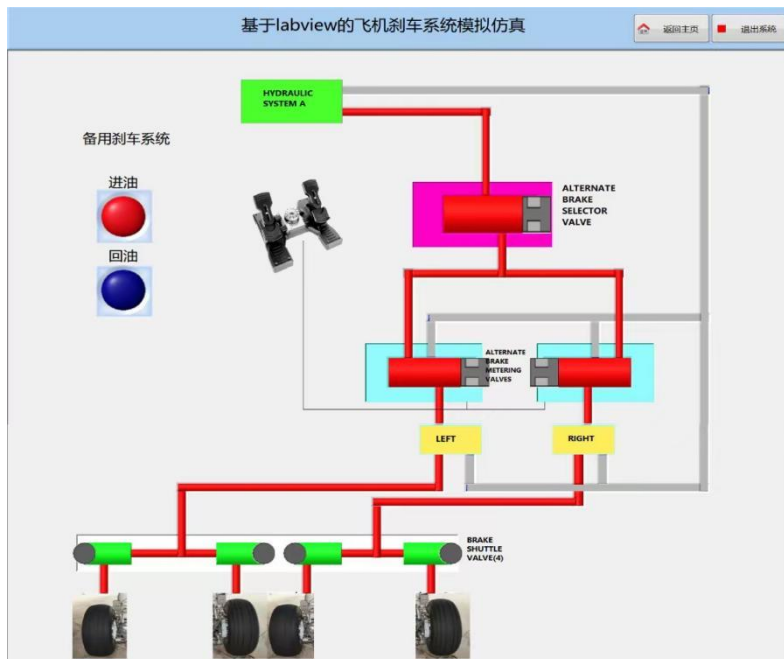


图 4-6 备用刹车系统进油状态

回油状态：刹车结束后，储存在刹车换向活门和备用刹车计量活门的液压油沿回油管路返回到油箱，等待下一次刹车工作，如图 4-7 所示。

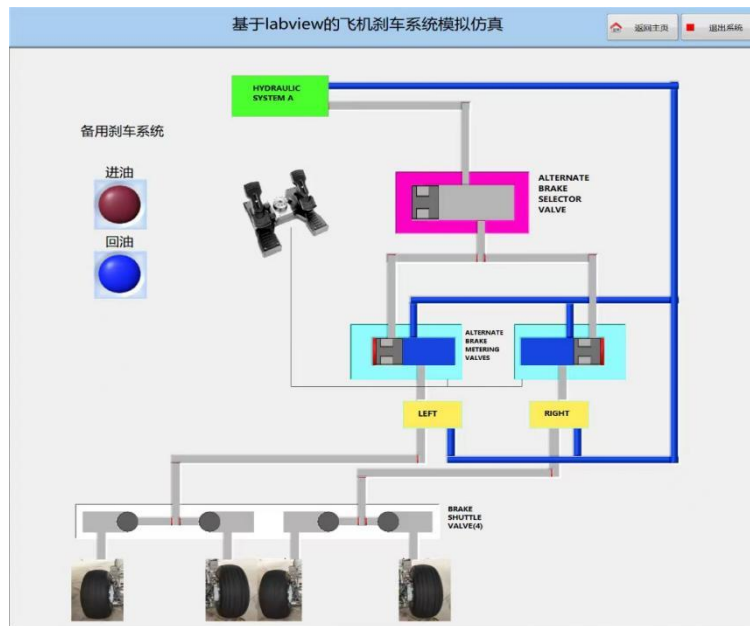


图 4-7 备用刹车系统回油状态

6. 蓄压器刹车子系统

进油状态：此时液压系统 A 和 B 不供应压力，刹车蓄压器供应压力到正常刹车系统。液压油从蓄压器流经蓄压器隔离活门，在流经刹车计量活门、自动刹车换向活门、防滑活门到达机轮，刹车盘在液压油的压力下开始工作，刹车盘盘将静子和转子压在一起，从而使机轮减速或停止下来，如图 4-8 所示。

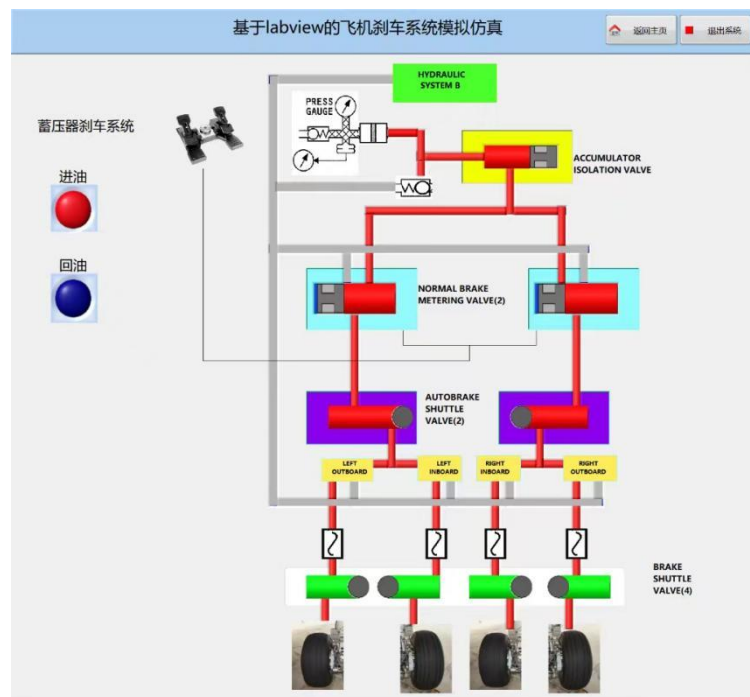


图 4-8 蓄压器刹车系统进油状态

回油状态：刹车结束后，除了储存在刹车换向活门和刹车计量活门的液压油，还包括流经释压活门的液压油沿回油管路返回到油箱，等待下一次刹车工作，如图 4-9 所示。

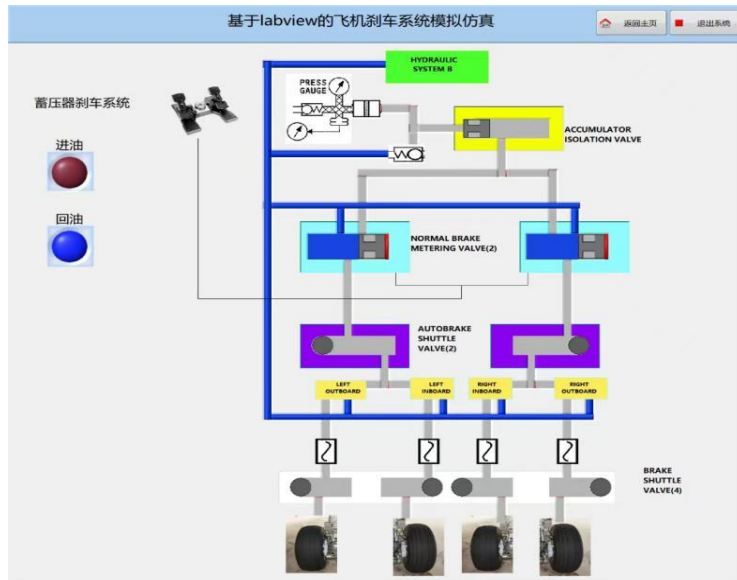


图 4-9 蓄压器刹车系统回油状态

7. 飞机刹车系统集成

完成正常刹车系统、备用刹车系统、蓄压器刹车系统搭建之后，根据刹车系统工作原理继续完成液压刹车总系统的设计，如图 4-10 所示，总体系统的设计包含三个子系统分别进油、回油的工作状态，其控件及相应变量关系与其他三个子系统相似，但在该系统中，某一控件不止参与了一个循环关系，应注意该变量的常量约束是否合理，避免出现两个布尔控件一开一关时该变量的约束不同，造成程序无法运行。

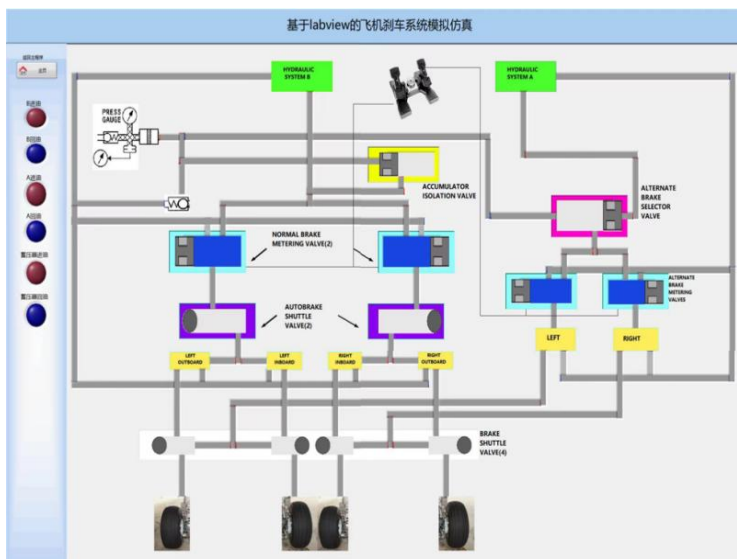


图 4-10 飞机液压刹车系统集成

4.2 仿真平台应用分析

基于 LabVIEW 开发的飞机刹车系统仿真平台，通过对飞机刹车系统各部分的基本原理和功能的分析，搭建包括基本原理、刹车组件演示、正常刹车系统、备用刹车系统、蓄压器刹车系统、飞机刹车系统总体六个子系统，通过反复试验和修正，使程序设计中各变量之间的关系清晰，各控件之间的条件合理，各子系统均能正常工作。经验证，仿真平台可实现飞机正常、备用和蓄压气等三种形式刹车方式的演示，同时在平台中添加的多媒体资源可用于教学过程中的辅助培训资料，更加人性化的人机交互界面，为有效提升液压刹车系统学习效果的培训提供了便捷可靠的讲解环境，基本满足了培训需求和教学的可靠性、合理性。

该平台可直接应用于各培训机构和航空院校对于飞机刹车系统的培训项目和课程中，通过对仿真平台的应用可有效提高飞机刹车系统的教学效果，同时可为其他飞机系统的仿真实现提供方法借鉴。

4.3 本章小结

本章详细说明了仿真平台各子系统的运行流程，在不同工作状态下对所建立各子系统的功能进行仿真验证，通过仿真平台应用分析说明仿真平台设计基本正确，开发的程序具有良好的显示效果，可直接应用于各培训机构和航空院校对于飞机刹车系统的培训项目和课程中。

结论

总结

本文以飞机刹车系统为研究对象，开发了基于 LabVIEW 的飞机刹车系统仿真平台。通过对仿真平台所依托的虚拟仪器、串口通信、编程语言等关键技术的学习，奠定了仿真平台的研发基础。在分析了飞机刹车系统及各部件工作原理及性能并确定了功能需求后，完成了仿真平台的总体方案设计。

根据总体方案设计，首先对仿真平台中各子系统进行程序搭建，然后在子系统搭建完成的基础上设计仿真平台的主界面调用各个子系统，实现不同页面下的切换，最后完成仿真平台与飞机刹车系统各部件联合试验，验证了仿真平台的可行性和可靠性。

基于 Labview 设计的模拟仿真平台，通过可开发性的组合编程实现飞机液压刹车系统各机构动态模拟，在飞机内部系统教学和培训当中，可以有效解决因设备不足、授课时间、场地有限的问题，降低学员培训成本，通过仿真演示让培训人员可以直接观察系统的工作方式，从而保证实操过程中的学员安全和授课效率。增强教学的可靠性、合理性，有效提高液压刹车系统的培训和学习效果，同时为仿真平台设计在航空培训中的应用形式提供了借鉴。

展望

本文针对 B737NG 飞机刹车系统的仿真平台进行的设计并实现，取得了一定的成果，但是飞机刹车系统是一个极其复杂多变的系统，在短时间内无法面面俱到，所以本文还有很多内容可以进一步研究，针对本平台，可以从进行以下几部分的深入工作：

1. 开发更符合真实状态的部件数学模型，例如仿真平台现采用数值控件建立管路模型，仿真的真实性与现实存在一定差距，后续可以通过自定义控件的开发提高部件仿真的精度，从而进一步提高仿真平台的真实性。
2. 本文的仿真平台主要实物是液压系统控制单元，例如脚蹬、机轮都是由模型代替，但是在设计时预留了备用的实物附件的接口，在以后的工作中，可以接入更多的实物装置，例如机轮、刹车装置等可视动态实物，以提高仿真的真实性。

参考文献

- [1] 薛东青.民用飞机液压刹车系统构架研究[J].流体传动与控制, 2012, 05:24-26.
- [2] 邹美英, 谢利理.飞机液压刹车系统数字仿真研究[J].计算机仿真, 2005, 08:45-49.
- [3] 卞晶.基于 LabVIEW 的飞机刹车系统半物理仿真平台设计[D].中南大学, 2013.
- [4] 韩建辉.飞机刹车系统的设计与性能仿真分析[D].南京航空航天大学, 2012.
- [5] 曾小信.飞机防滑刹车系统的建模与仿真研究[D].中南大学, 2008.
- [6] 罗林.飞机刹车系统半实物仿真研究[D].西华大学, 2016.
- [7] 周恩智.飞机防滑刹车仿真技术研究[D].南京航空航天大学, 2008.
- [8] 张冲.基于 LabVIEW 的飞机防滑刹车控制器测试系统设计[D].西北工业大学, 2007.
- [9] 杨一璜, 刘建良, 梁雪林.基于 LabVIEW 的飞机刹车控制器通用测试系统[J].仪表技术与传感器, 2018, 04:109-111+116.
- [10] 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, 01:1-4.
- [11] Li-li TGXIE. Development of control and simulation technology of aircraft braking system [J][J]. Measurement & Control Technology, 2006, 2.
- [12] Zou M, Xie L L. Research on digital simulation of aircraft hydraulic braking system[J]. Computer Simulation, 2005, 22(8): 45-49.
- [13] Ouyang X, Gao F, Yang H, et al. Modal analysis of the aircraft hydraulic-system pipeline[J]. Journal of aircraft, 2012, 49(4): 1168-1174.

致谢

时间的脚步是无声的，它在不经意间流逝，春去秋来，青春年华刹那方休。曾经的天真烂漫的我，现在已经成长为一个睿智沉稳的年轻人，我很幸运的认识了很多老师，他们教会了我怎样去享受生活，怎样去过更美好的生活！生命中到处都是驿站，已经到了告别的时候了，在这里，我要感谢所有曾经帮助我的人！

首先感谢我的导师魏志民老师，魏老师以清晰的思路、敏捷的反应、清新开放的学术态度投入我的论文选题和研究过程，给我的毕业论文以很大的写作空间。不忘老师深夜悉心指导的那几个夜晚，您的悉心点拨，耐心指导，使我在手足无措之际找到了出路，毕业在即，在此我向您表示最衷心的感谢，同时也祝您工作顺利，合家欢乐，身体健康，万事如意！

其次感谢我的大学辅导员王倩老师，大学四年我们亦师亦友，没有您的帮助就有我的今天。青丝执笔忘年交，课时专注课间聊。在成长的路上感谢您的陪伴，让我在失败中寻找原因，让我在泪水中看见彩虹，让我在争吵后反省自身，让我在成功时了解不足。毕业之际，我祝愿您在每一个春暖花开时，都有沁人肺腑的花期向您奔赴而来。

最后感谢我的父母，正是你们的爱让我一直幸福快乐地成长，我会在今后的学习工作中更努力的报答你们，你们养我长大，我陪你们到老。