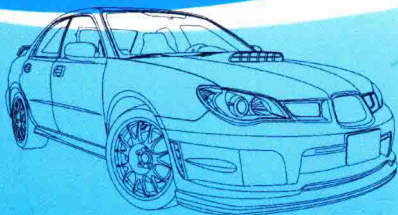
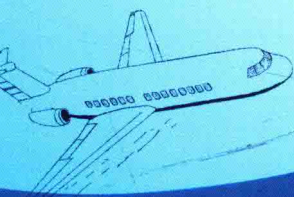
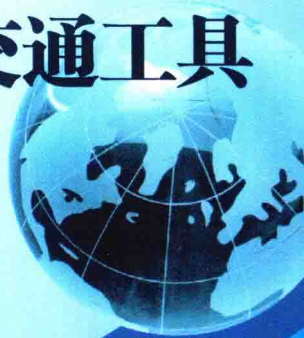


大型固定翼多轮交通工具 制动系统研究

吴华伟 张远进 著



南京大学出版社

大型固定翼多轮交通工具 制动系统研究

— 吴华伟 张远进 著



南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大型固定翼多轮交通工具制动系统研究 / 吴华伟,
张远进著. — 南京: 南京大学出版社, 2017. 4

ISBN 978-7-305-18409-3

I. ①大… II. ①吴… ②张… III. ①飞机—制动装
置—研究 IV. ①V227

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 071895 号

出版发行 南京大学出版社

社 址 南京市汉口路 22 号 邮 编 210093

出 版 人 金鑫荣

书 名 大型固定翼多轮交通工具制动系统研究

著 者 吴华伟 张远进

责任编辑 刘 灿 编辑热线 025-83597482

照 排 南京南琳图文制作有限公司

印 刷 虎彩印艺股份有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 12.25 字数 209 千字

版 次 2017 年 4 月第 1 版 2017 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-305-18409-3

定 价 42.00 元

网址: <http://www.njupco.com>

官方微博: <http://weibo.com/njupco>

官方微信号: njupress

销售咨询热线: (025) 83594756

* 版权所有, 侵权必究

* 凡购买南大版图书, 如有印装质量问题, 请与所购
图书销售部门联系调换

内 容 简 介

航空工业是一个对国家经济、政治和军事有重要影响的高新技术产业,而大飞机的研制和生产水平是航空工业和国家经济技术水平的最直接体现。目前,世界上只有为数不多的几个国家可以研制、生产大型固定翼交通工具。制动系统具有地面减速、滑行、差动转弯等功能,是飞机等固定翼交通工具的重要安全保障系统。大型固定翼交通工具具有高安全、高可靠、大吨位、全天候等特点。为减少轮胎对跑道表面的压力和起落架自身的质量,大型飞机的主起落架一般采用小车式多轮结构。其中四轮小车式结构最为常见。目前,我国还没有真正意义的多轮刹车控制系统,因此,需要对小车式多轮飞机刹车控制系统的各项关键技术进行深入研究。

本书作者结合自己多年从事航空、汽车制动系统研究经历,系统开展了大型固定翼小车式多轮飞机制动系统理论与应用技术研究。本书详细阐述了大型固定翼交通工具制动系统的基本知识和研究现状。系统介绍了作者在刹车材料适应性、跑道状态适应性、多轮轮速采集和协调控制;多轮制动系统可靠性;基于模糊控制和萤火虫算法的跑道状态自适应控制算法;基于多变着陆环境的小车式多轮飞机制动仿真验证,基于跑道状态的动力联试方法等研究。本著作可供交通信息工程及控制专业的师生使用,也可作为从事航空、汽车等交通工具整车、制动系统等科研与生产的人员的参考用书。

作 者 简 介

吴华伟,男,1979年出生,博士,湖北文理学院机械与汽车工程学院副教授。2002年7月毕业于西安交通大学机械工程及自动化、市场营销专业,获工学和管理学双学士学位;2002.7—2005.7就职于中国航空附件研究所(航空609所),从事设计工作;2005.7—2008.1就职于西安航空制动科技有限公司(航空514厂),从事设计工作;2008.9—2012.12就读于中南大学交通信息工程及控制专业,并获工学博士学位。长期致力汽车、航空等交通领域的机电控制系统设计、仿真、优化及故障诊断及健康管理等方面的教学科研工作。先后承担、参与了多项新能源汽车控制器、军民飞机制动系统、863等科研工作,深入企业一线,为企业建言献策、联合攻关,与地方企业签订7个技术开发合同,科技成果鉴定达“国内领先”水平3项,科技成果转化1项,技术培训300余人次,指导汽车方面本科毕业生31人,研究生3人,有效地服务襄阳经济的发展。发表学术论文20余篇,其中EI检索5篇,核心期刊10余篇。荣获湖北省第四批“博士服务团”工作先进个人,空军装备理论研究优秀成果奖1项,中航工业514厂科技进步一等奖1项,中航工业609所科技论文二等奖3项,“湖北文理学院第五届新进教师教学基本功大赛”优胜奖1项,获第六届襄阳市青年科技奖,作为主要发明人,获得实用新型专利2项,发明专利2项。

张远进,男,1992年出生,湖北文理学院联合培养研究生,从事飞机防滑刹车系的研究。并先后参与多项飞机制动系统、新能源汽车电机控制器等科研工作。发表学术论文2篇,申请软件著作权3项,授权实用新型专利2项,申请发明专利1项。

随着社会和科技的发展,人们接触和交往的空间越来越广泛,频率也越来越高。从马车、自行车、摩托车、轮船到汽车、高铁、飞机,“高效、安全、快捷”一直是现代交通工具发展永恒的话题。航空工业是一个对国家经济、政治和军事有重要影响的高新技术产业,是衡量一个国家综合实力的重要指标。大飞机的研制和生产水平是航空工业、国家经济技术水平的最直接体现。目前世界上只有为数不多的几个国家可以研制、生产大型固定翼交通工具。制动系统具有地面减速、滑行、差动转弯等功能,是飞机等固定翼交通工具的重要安全保障系统。大型固定翼交通工具具有高安全、高可靠、大吨位、全天候等特点。为减少轮胎对跑道表面的压力和起落架自身的重量,大型飞机的主起落架一般采用小车式多轮结构。其中四轮小车式结构最为常见。目前,国内从事刹车系统的研究主要集中在主起落架单轮或双轮刹车系统,系统的控制也多采用PID+PBM等简单方式,而真正的四轮小车式刹车系统的研究基本处于起步阶段,因此,需要对小车式多轮飞机刹车控制系统的各项关键技术进行深入研究。

本书作者结合自己多年从事航空、汽车制动系统研究经历,系统开展了大型固定翼小车式多轮飞机制动系统理论与应用技术研究。本书详细阐述了大型固定翼交通工具制动系统的基本知识和研究现状。系统介绍了作者在刹车材料适应性、跑道状态适应性、多轮轮速采集和协调控制;多轮制动系统可靠性;基于模糊控制和萤火虫算法的跑道状态自适应控制算法;基于多变着陆环境的小车式多轮飞机制动仿真验证,基于跑道状态的动力联试方法等研究。

第1章阐述了大型固定翼飞机多轮交通工具制动系统原理及构型。首先介绍了制动系统的工作原理及发展现状,对飞机着陆的运动特性和状态进行了分析,建立了相应的运动学方程;接着介绍了大型固定翼多轮飞机的构型及配对;最后对小车式多轮飞机刹车系统的数学模型进行了建模。

第2章介绍了小车式多轮飞机刹车系统控制策略的研究。针对小车式多轮飞机刹车系统的控制策略,从数字滤波技术和智能控制算法两方面对刹车系统展开了研究。介绍了基于模糊控制和萤火虫算法的跑道状态自适应控制算法,改善了刹车系统的可靠性。

第3章介绍了小车式多轮飞机刹车系统可靠性研究。可靠性研究是航空设备可靠性设计的重要环节,通过对飞机刹车系统的可靠性分析、维修性分析、辅助安全措施分析、BCU故障注入分析,从质量保证、环境试验等方面提高了飞机刹车系统的整体可靠性。同时,本章在飞机刹车系统中引入非相似性余度设计概念,由完全独立的工作组,使用不同的开发语言、不同的开发工具、不同的微处理器,设计出非相似双余度刹车控制单元。

第4章介绍了小车式多轮飞机刹车系统材料适应性的研究。首先,综合阐述了现代制动系统的刹车材料的发展;接着,针对小车式多轮飞机刹车材料适应性问题,采用初始加压、刹车指令多级处理技术、五级偏压调节等技术应用于飞机刹车材料,从而得出新方法对不同厂家、不同工艺的刹车盘适应性更强、制动过程更加平稳的结论。

第5章介绍了小车式多轮飞机刹车系统试验验证。介绍了基于多变着陆环境的小车式多轮飞机制动仿真验证,在MATLAB/SIMULINK环境下进行了载荷和跑道状态相同、跑道状态不同、内外侧载荷不同、左右载荷不同、载荷和跑道均不同、跑道状态变化六种常见的多轮飞机着陆状态的制动仿真。提出根据飞机实际着陆全跑道状态,进行地面惯性动力联试的新方法,更加真实地模拟外场情况。

第6章对本书的研究工作进行了总结和概括,并对下一步工作进行了展望。

本书是著者多年研究成果的汇集,得到中南大学黄伟明、胡春凯老师,中国航空附件研究的库于鳌研究员、西安航空制动有限公司的何学工研究员对制动系统基础知识的细心指导;本书的出版得到湖北文理学院“机电汽车”学科群和纯电动汽车动力系统设计与测试开放基金的资助,在此表示衷心的感谢!

限于著者水平有限,书中有错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

著者

2017年1月

目

录

第 1 章 大型固定翼飞机多轮交通工具制动系统原理及构型	1
1.1 大型固定翼交通工具制动系统概述	3
1.1.1 国内外刹车系统发展历程和现状	7
1.1.2 飞机防滑刹车控制算法	15
1.1.3 飞机与汽车刹车系统的区别	23
1.1.4 现役制动系统常见故障及解决措施	25
1.2 大型固定翼多轮飞机制动过程受力及构型分析	33
1.2.1 飞机机体动力分析	34
1.2.2 着陆阶段分析	38
1.2.3 制动效率评价方式	39
1.2.4 小车式多轮构型及配对研究	40
第 2 章 小车式多轮飞机刹车系统控制策略的研究	43
2.1 小车式多轮飞机刹车系统轮速和制动参考速度的研究	45
2.1.1 飞机轮速传感器原理	45
2.1.2 小车式多轮轮速采集系统设计	46
2.1.3 基于防滑控制参数的轮速数字滤波	49
2.1.4 仿真演算及试验验证	55
2.2 小车式多轮飞机自适应模糊刹车控制系统的研究	58
2.2.1 轮胎与跑道的摩擦模型	60
2.2.2 自适应模糊刹车控制系统	62
2.2.3 防滑刹车模糊控制器	64
2.2.4 基于模糊控制与 PID 控制对比试验	66
2.3 小车式多轮飞机基于萤火虫算法的控制系统的研究	70
2.3.1 萤火虫算法的研究及应用	70

2.3.2 基于萤火虫算法优化 BP 神经网络的最佳滑移率识别方法	73
第 3 章 小车式多轮飞机刹车系统可靠性的研究	79
3.1 小车式多轮刹车控制系统可靠性分析	81
3.1.1 小车式多轮刹车控制系统可靠性分配	82
3.1.2 余度管理及非相似余度刹车控制单元	86
3.1.3 基于萤火虫算法的余度规划方法	91
3.1.4 其他可靠性保障手段	96
3.2 小车式多轮刹车控制系统维修性分析	97
3.2.1 系统维修性分析	97
3.2.2 维修性设计原则	99
3.2.3 小车式多轮刹车控制系统 BCU 故障注入系统	102
3.2.4 维修测试及评价	107
3.3 小车式多轮刹车控制系统的辅助安全措施	108
3.3.1 胎压监测系统	109
3.3.2 刹车温度监测系统及保护措施	110
3.3.3 自动调隙及磨损指示	112
3.3.4 控制辅助系统	114
第 4 章 小车式多轮飞机刹车材料适应性的研究	119
4.1 常见刹车材料的分类及特性	121
4.2 刹车材料的适应性控制方法	123
4.2.1 IPP 初始加压技术	124
4.2.2 MPTB 刹车指令多级处理技术	126
4.2.3 PPB 多级偏压技术	127
4.2.4 试验验证	130
第 5 章 小车式多轮飞机刹车系统试验验证	133
5.1 基于多变着陆环境的小车式多轮飞机制动仿真验证	135
5.1.1 机轮模型	136
5.1.2 液压管路模型	137

5.1.3 飞机起落架模型	138
5.1.4 刹车装置模型	140
5.1.5 液压系统模型	142
5.1.6 制动系统算法模型	143
5.1.7 仿真及结果	144
5.2 基于全跑道状态的动力联试新方法	154
5.2.1 地面动力惯性试验平台	155
5.2.2 基于跑道状态的动力联试方法	156
5.2.3 动力评价准则	160
5.2.4 试验结果	161
第6章 总结与展望	169
参考文献	173

== 第 **1** 章 ==

**大型固定翼飞机多轮交通
工具制动系统原理及构型**

随着社会和科技的发展,人们的接触和交往空间越来越广泛,频次也越来越高。从马车、自行车、摩托车、轮船到汽车、高铁、飞机,“高效、安全、快捷”一直是现代交通工具发展永恒的话题。

固定翼交通工具,是利用机翼上下气流产生的升力和发动机产生的推力来工作的。大型固定翼飞机的载重量达 200 t,载客量达 800 人,速度一般为 500~2 000 km/h,相对于其他交通工具,只有百万分之几的失效率,在 800 km/h 以上的距离,具有绝对的竞争力,从而赢得人们的高度青睐。航空工业是一个对国家经济、政治和军事有重要影响的高新技术产业,而大飞机的研制和生产是航空工业和国家经济技术水平的最直接体现。中共中央政治局常委、国务院总理李克强早在 2015 年曾做出批示,希望继续发展进取精神,攻坚克难,不断提升我国自主研制大飞机能力,为建造强国做出新贡献。

大型固定翼交通工具具有高安全、高可靠、大吨位、全天候等特点。为减少轮胎对跑道表面的压力和起落架自身的重量,大型飞机的主起落架一般采用小车式多轮结构。其中四轮小车式结构最为常见,我国还没有真正意义上的多轮刹车控制系统。相对于小型飞机而言,小车式多轮飞机对刹车材料适应性、跑道状态适应性、多轮轮速采集和协调控制等方面的要求更高,也更为复杂。因此,研制出符合我国国情的大型固定翼多轮飞机制动系统,以缩短与国外先进水平的差距,并在实践中赶超国外先进水平,来提升国家核心竞争力,是符合国家战略发展的需求,而且是必需的、紧迫的。

1.1 大型固定翼交通工具制动系统概述

大飞机一般是指起飞总重超过 100 t 的运输类飞机,包括军用、民用大型运输机,也包括 100 座以上的干线客机。本书中的大飞机特指客运型 150 座级以上的民用飞机(即国内常称的“干线飞机”)。大飞机代表了“一个国家竞争力的制高点”,它关系到国家安全和国民经济的大局,与国家利益息息相关。刹车系统涉及机械、液压、电气、电子、控制、材料等多学科多领域,是飞机重要的安全保障系统。相对于汽车、火车等其他交通工具,飞机刹车系统具有能量大、速度高、吨位大,工作环境相对比较恶劣等特点。飞机刹车系统一般包括正常刹车系统(包括自动刹车)、备份刹车系统和应急/停留刹车系统等,可实现刹车、防滑、接地保护、侧间(交叉)保护、滑水保

护、差动刹车、起落架收上止转刹车、故障检测及告警等功能。对于军用飞机,为提高飞机机动性能,一般还要设计起飞线停机刹车功能(对于使用炭刹车盘的,该功能也称静刹车),即在发动机最大推力状态下,使用最大刹车压力应能刹住机轮。

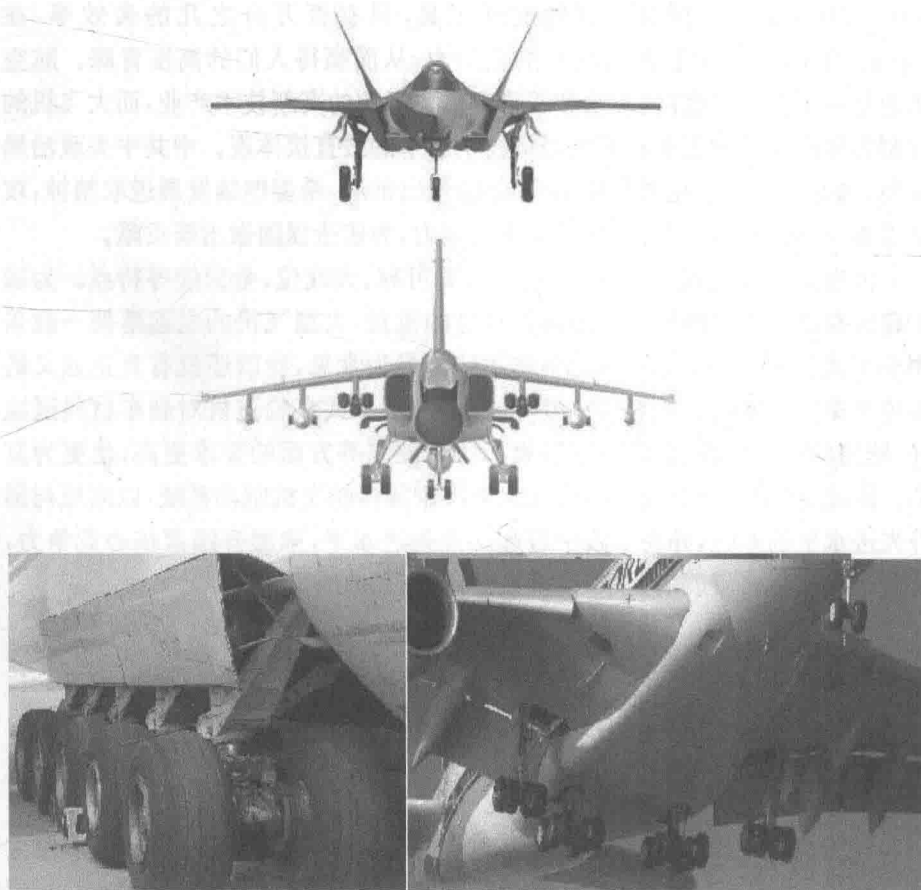
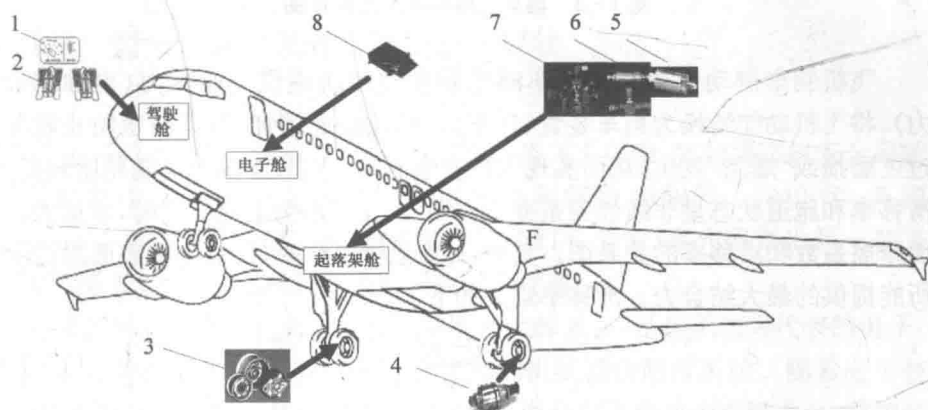


图 1-1 固定翼飞机示意图

随着人们对高效性、平稳性、安全性要求越来越高,现代运输机变得越来越大,原来的单轮或双轮起落架结构已经远远不能满足现代航空发展的需求。为减少对跑道道面的压力和起落架自身的重量,大型飞机多采用多轮多支柱结构,如两支柱八轮小车式、两支柱十二轮小车式、四支柱十六轮小车式、六支柱十六轮等。其中最为常见的是四轮小车式结构,即一个起落架上转配四个

机轮,如 IL-86、IL-96、MD11、B747、B757、B767、A340、A380。

常见刹车系统一般包括轮速传感器 WST(Wheel Speed Tachometer)、刹车指令传感器 P&PS(Pedal Position Sensor)、自动刹车选择器 A/BS(Auto-brake Switch)、防滑刹车控制单元 BSCU/ABCU(Braking System Control Unit or Alternate Brake Control Unit)、电液伺服阀 SV(Servo Valve)、液压保险 F(Hydraulic Fuse)、梭形阀 SHV(Shuttle Valve)、压力传感器 PT(Pressure Transducer)、机轮和刹车装置(Wheel & Brakes)等组成。常见机轮刹车系统组成和分布如图 1-2 所示。



1—自动刹车选择器 A/BS;2—刹车指令传感器 P&PS;3—机轮和刹车装置 Wheel & Brakes;4—轮速传感器 WST;5—压力传感器 PT;6—液压保险 F、梭形阀 SHV;7—电液伺服阀 SV;8—防滑刹车控制单元 BSCU/ABCU

图 1-2 机轮刹车系统布局图

飞机刹车系统工作过程(以正常防滑刹车系统为例):防滑刹车控制单元根据飞行员刹车指令信号(通过刹车踏板传感器或自动刹车选择器获得)的要求输出相应的刹车压力;同时监测机轮速度信号,计算飞机参考速度,并根据机轮速度信号的变化,来判断机轮打滑状态,计算出防滑信号,来调节刹车压力的输出,以解除机轮抱死现象,使其恢复正常滚转状态。从而实现飞机安全平稳高效的制动。防滑刹车控制原理图如图 1-3 所示。

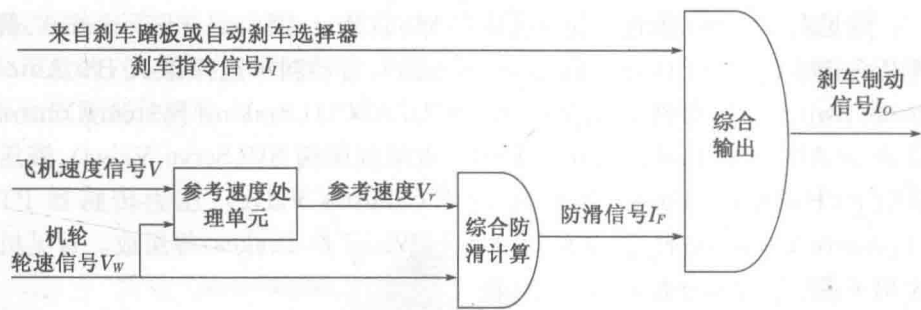


图 1-3 典型防滑刹车控制原理图

飞机刹车制动主要依靠刹车时轮胎和地面所提供的摩擦力(也称结合力),将飞机动能转换为刹车装置(刹车盘)的热能而消耗掉,同时也防止轮胎过度磨损或“爆胎”发生,从而实现飞机安全制动。这种摩擦力又随轮胎载荷、滑移率和跑道状态呈非线性关系变化。图 1-4 所示为载荷一定时,常见的地面摩擦系数和滑移率的关系图。其中, σ_p 为最佳滑移率,代表跑道表面对轮胎所能提供的最大结合力。滑移率定义如下:

$$\sigma = \frac{v - v_w}{v} \tag{1-1}$$

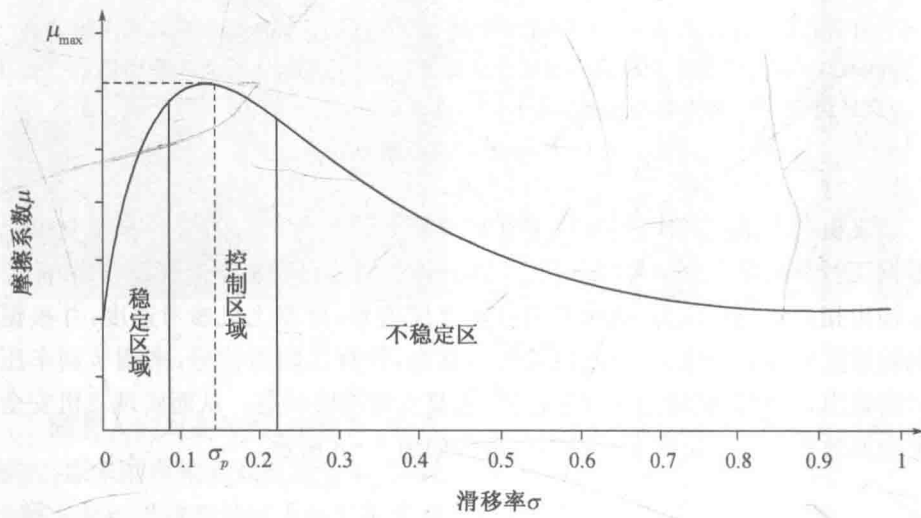


图 1-4 滑移率和摩擦结合系数的关系

式中: v_w ——机轮(轮胎)的线速度;

v ——飞机或刹车参考速度。

图 1-4 中, σ_p 左边区域为稳定区, 该区域跑道与轮胎间的摩擦系数随着滑移率增加而增加; σ_p 右边区域为不稳定区, 该区域跑道与轮胎间的摩擦系数随着滑移率增加而减小, 当滑移率超过一定门限时, 机轮出现抱死迹象, 严重时还会因单点磨损过热引起“啃胎”或“爆胎”的现象, 影响飞机安全。在飞机刹车滑跑制动过程中, 应尽可能将滑移率控制在 σ_p 附近, 以充分利用跑道表面与轮胎间可能产生的摩擦力, 安全高效地实现飞机制动。

1.1.1 国内外刹车系统发展历程和现状

自 1903 年莱特兄弟第一次真正实现人类飞天以来, 如何将飞机安全高效平稳的刹停是人们一直研究的热点和急需解决的问题。1940 年, 英国 Dunlop 公司(现与 ABSC 公司组建成 MIGGITE 公司)率先研制出第一套飞机刹车系统, 掀开了飞机刹车系统研制的新序幕。

目前世界上的飞机刹车系统主要有两大体系: 一是英美法为代表的电子/数字式防滑刹车系统; 二是以苏俄为代表的机械惯性防滑系统。随着电子技术和控制技术的发展, 目前电子或数字式防滑刹车系统成为世界主流, 我国也由 20 世纪五六十年代学习苏俄机械惯性防滑刹车系统逐渐形成了自己的电子/数字防滑刹车系统。

1. 世界主要飞机刹车系统供应商

飞机刹车系统属于飞机起飞着陆系统的一部分。飞机起降过程中因存在巨大消耗和磨损, 导致其维修耗资巨大。据统计, 一般航空公司用于机轮和刹车系统的维修费用仅次于发动机的维修费用。刹车系统的生产和维护在航空产业市场竞争也非常激烈, 国际上主要有六大飞机刹车系统制造商。

(1) 美国 MEIGGITT

美国 MEIGGITT 是一家集刹车控制系统(含监测)、机轮、附件(阀、传感器)、全电刹车、刹车盘于一体的综合性公司。由著名的英国邓禄普航空刹车系统公司(Dunlop Aerospace Braking System)和美国的亚布斯 ABSC 公司(Aircraft Braking Systems Corporation)合并组建而成, 是国际上机轮刹车系统比较齐全的公司。其产品主要集中在军用飞机、支线飞机和部分干线飞机,