

# 飞机刹车系统先进技术研究与发展

雷晓霖<sup>1</sup>, 高光辉<sup>1</sup>, 李兵强<sup>2</sup>, 刘帅楠<sup>2</sup>, 曲青阳<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 西北工业大学自动化学院, 西安, 710129)

**摘要** 针对多电/全电飞机的发展趋势和现代飞机起飞重量大、着陆速度高的特点,提出了飞机刹车系统防滑控制、全电刹车、刹车材料等先进技术的重点研究方向。首先介绍了飞机刹车系统的组成及其基本工作原理,然后分别从刹车控制系统、防滑控制理论、刹车材料技术3个方面对其发展过程及研究现状进行了总结。最后根据现代飞机制动特点,分析了以上3个重要技术目前存在的问题,并对未来飞机刹车系统的发展趋势进行了展望。

**关键词** 刹车系统; 防滑控制; 全电刹车; 刹车材料

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2022.06.002

**中图分类号** V227.5 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2022)06-0008-09

## Research and Development on Advanced Technology of Aircraft Brake System

LEI Xiaoben<sup>1</sup>, GAO Guanghui<sup>1</sup>, LI Bingqiang<sup>2</sup>, LIU Shuainan<sup>2</sup>, QU Qingyang<sup>1</sup>

(1. Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;  
2. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract** Aimed at the problems that being multi-electric/all-electric aircraft and in view of development trend, modern aircraft is heavy in weight in taking off and high at landing speed, a key research direction of anti-skid control of aircraft brake system, all-electric brake, brake material and other advanced technologies is put forward. First, the composition of the aircraft brake system and its basic working principle is introduced, and then its development process and research status from three aspects of brake control system, anti-skid control theory and brake material technology are summarized. Finally, according to the characteristics of modern aircraft braking, the existing problems of the above-mentioned three important technologies are analyzed, and the development direction of aircraft braking system in the future is prospected.

**Key words** brake system; anti-skid control; electric brake system; brake material

随着各国航空工业技术的不断进步,促进了飞机性能不断提高。在军事领域,空中力量优势是现代战争取胜的关键因素之一。因此,迫切需要研发高速、多功能的高性能战机来提高综合作战能力。在民用航空领域,人们对飞机的安全、舒适性显得格外重视。着陆作为飞机执行飞行任务的最后阶段,具有时间短、故障率高的特征。据调查,大约50%的航空事故都发生在飞机着陆阶段,其中大多数都是由于滑跑超

**收稿日期:** 2021-05-10

**基金项目:** 航空科学基金(2019ZC096001)

**作者简介:** 雷晓霖(1972-),男,陕西华阴人,教授,研究方向为航空电气工程。E-mail:leixiaoben@aliyun.com

**引用格式:** 雷晓霖,高光辉,李兵强,等.飞机刹车系统先进技术研究与发展[J].空军工程大学学报,2022,23(6):8-16. LEI Xiaoben, GAO Guanghui, LI Bingqiang, et al. Research and Development on Advanced Technology of Aircraft Brake System[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2022, 23(6): 8-16.

限或者偏离跑道<sup>[1-2]</sup>,因此,飞机刹车系统的综合制动性能就十分重要。如何适应未来高性能飞机制动特点的变化,同时满足稳定舒适的乘客需求,成为各国航空制动工业亟需解决的问题。

飞机刹车系统主要由刹车控制器、刹车作动器、传感器和机轮刹车装置等组成<sup>[3]</sup>,其基本架构如图 1 所示。刹车控制器主要是对刹车过程进行控制,并具有防滑功能。早期的飞机速度低、重量小,飞行员可以凭经验采用点刹的方式刹停飞机而不发生严重打滑现象。但是对于现代高速重载的飞机,必须加入防滑控制功能以避免出现轮胎严重磨损,甚至爆胎的现象。刹车作动器主要根据控制信号输出刹车力矩,根据作动方式可以为分液压作动器、电静液作动器和机电作动器。目前最常用的是液压作动器,电静液作动器和机电作动器仍处于部分机型试验验证阶段,尚未完全推广。随着近年来各国对多电/全电飞机技术的研究不断深入,使用机电作动器的电刹车系统拥有了广阔的应用前景<sup>[4]</sup>。机轮和刹车装置主要研究刹车机轮、刹车盘摩擦材料及其附件。刹车盘摩擦材料,又称“热库”,主要用来吸收飞机制动过程中产生的巨大能量,对材料性能要求极高,是刹车系统的重点研究方向之一。

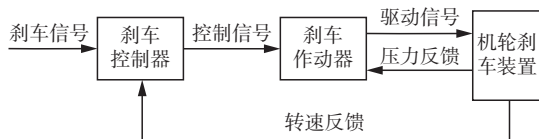


图 1 现代飞机防滑刹车系统基本架构

综上所述,飞机刹车系统的研究对象综合了力学、机械、电子学、控制和材料科学等多学科,研究范围广、难度大。本文总结了全电刹车技术、防滑控制技术和刹车材料技术的研究现状,重点分析了当下存在的问题,并对其发展方向作进一步探讨。

## 1 防滑刹车控制系统

### 1.1 研究进展

20 世纪 40 年代以后,随着飞机喷气式时代的到来,飞机的着陆速度显著提高,运载能力显著增强,防滑控制成为保障飞机安全制动的必要功能。第一台具有防滑控制功能的刹车系统是 Hydro-Aire 公司于 1948 年生产的 Mark I 型刹车系统,该系统最初是为 B-47 轰炸机研发设计,而后又大批量装备于 B-52、B-707 等军民飞机<sup>[5]</sup>。此后,防滑刹车控制系统不断更新和完善,经历了机械惯性式、模拟电子式、

数字电传式,目前正逐渐向全电刹车系统发展,如图 2 所示<sup>[6]</sup>。

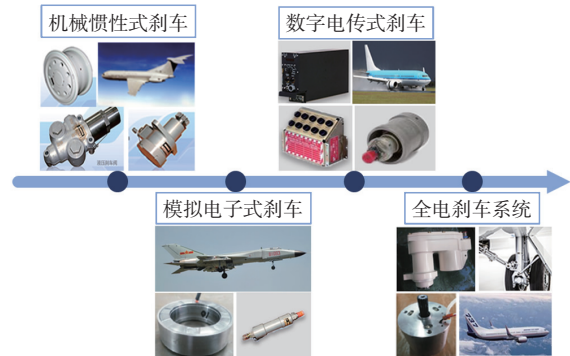


图 2 防滑刹车控制系统发展过程

早期的防滑刹车控制系统受限于电力电子器件和传感器技术,都是使用基于继电器的机械惯性式系统。该系统在控制方式上属于开-关式,主要由刹车阀、电磁活门、惯性传感器等部件组成。因为系统中无电子元件,所以不存在电磁干扰问题,具有可靠性高的优势,一直是苏式或俄式的主导产品。但是此类系统制动效率较低,一般只有 40%~60%。后期俄罗斯 Rubin 公司在机械惯性式系统的基础上,改进了刹车指令信号的传输模式,优化了控制流程,研发了双信号惯性防滑刹车系统和远距离遥控电液刹车系统(电传刹车)<sup>[7]</sup>。例如 Su-27 刹车系统采用双信号工作模式,根据飞机滑跑速度的变化采用不同的控制方式,使制动性能得到较大改善;伊尔-76 在 Su-27 刹车系统的基础上增加了电传操纵技术,减少了机轮附件数量,节省了重量和体积。这是该技术的首次成功应用,为此后全电刹车系统的研发奠定了基础<sup>[8]</sup>。

20 世纪 60 年代,电液伺服阀的出现以及电力电子器件的发展为防滑刹车系统的更新换代提供了良好的契机,英美等国开始研发新型电子防滑刹车系统<sup>[9]</sup>。相比于机械惯性式系统结构(对比见图 3),电子防滑刹车系统中增加了速度传感器、电子控制盒、电液伺服阀等部件。系统工作时电子控制盒根据速度传感器反馈的机轮状态向电液伺服阀(外形见图 4)输出控制信号,电液伺服阀再将接收到的控制信号转换成输出压力<sup>[10]</sup>。早期的电子控制盒内部采用模拟电路进行逻辑运算,因此这类系统也被称为模拟电子式刹车系统,如 Hydro-Aire 公司生产的 Mark II 和 Mark III、Dunlop 公司生产的 MK V 和 MK VI<sup>[11]</sup>型刹车系统。

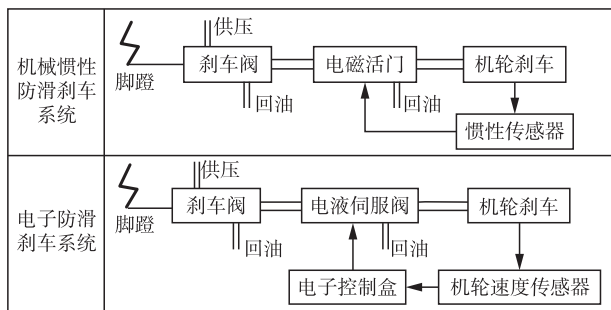


图 3 刹车系统结构对比图



图 4 Hydro-Aire 生产的高精度电液伺服阀

到 20 世纪 80 年代,电子控制盒的内部普遍采用高性能微处理机进行逻辑运算,这类系统则被称为数字电传式刹车系统。微处理机的使用使得运算效率大大提升,一些复杂的防滑控制算法得以实现,使得

刹车系统集成技术<sup>[12]</sup>、控制律优化技术<sup>[13]</sup>、系统冗余技术<sup>[14]</sup>、健康诊断技术<sup>[15]</sup>的应用成为可能。为了进一步提高制动安全性,数字电传式刹车系统还增加了一些功能附件,如 Mark IV 型系统增加了故障显示单元见图 5(a),能够提供可视化的故障指引,提高系统的可维护性。Mark V 型(见图 5(b))通过 SmartStem<sup>®</sup> 实现了先进的远程数据集中器架构,控制盒集成了制动温度检测系统和无线轮胎压力指示系统,通过实时获取制动温度和轮胎压力,实时监控轮胎磨损情况<sup>[16]</sup>。Hydro-Aire 公司作为美国最大的刹车控制系统生产商,其主要型号 Mark 系列产品的研发过程很好地反映了现代刹车控制系统的发展历程,主要技术特点见表 1。



(a)故障显示单元 (b)Mark V 型刹车控制单元  
图 5 故障显示单元和 Mark V 型刹车控制系统

表 1 Hydro-Aire 制动技术发展过程

型号	简介	元件技术	特点	典型应用
Mark I	首次增加防滑控制功能	继电器	着陆安全性显著提高	B-47、B-52
Mark II	首次安装轮速传感器	运算放大器	采用线性四通道压力控制阀调节制动压力	B-727、F-4
Mark III	首次采用自适应控制	运算放大器	采用高响应电液伺服阀;湿跑道制动性能改善	DC-9、B-737-200
Mark IV	首个基于微处理器的数字系统	微处理机	改进的控制算法使得制动效率达到 95%;采用调节增益防滑阀提高了可变刹车踏板输入下的系统性能	F-15、F-22
Mark V	完整的电传操纵系统	微处理机	高性能数字制动控制;首个在 B-787 上使用的电刹车控制系统	B-787

由表 1 可以看出,飞机刹车系统不断向机电综合控制方向发展,并且在多电/全电飞机技术的推动下,电刹车系统必将成为未来刹车系统的发展趋势<sup>[17-18]</sup>。早在 1998 年,美国 Goodrich 公司就在 F-16HD 成功进行了电刹车系统的滑行试验验证。该刹车系统采用 4 个高精度伺服电机取代原来的液压作动器,在高速、湿跑道和降额刹车条件下均达到了预期效果。2004 年,Goodrich 公司又为 B-787 客机提供了电刹车装置(如图 6 所示),这也是电刹车系统的首次商业应用<sup>[19]</sup>。相比之下,国内关于电刹车系统的研究起步较晚,但是目前也取得了一系列突破性的成果:航空工业集团赵文庆团队成功完成了国家预研项目“航空机轮全电刹车系统技术”,为国内全电刹车技术做出贡献;西北工业大学团队于

2013 年成功在某型无人机上开展全电刹车系统试验,成为我国电刹车系统研制与应用的里程碑<sup>[20]</sup>。



(a)电刹车装置 (b)刹车装置与机轮  
图 6 B-787 飞机电刹车装置

1.2 全电刹车技术及问题

随着航空工业技术的不断发展,多电/全电飞机技术逐渐成为研究热点。全电刹车系统作为多电/全电飞机的重要功能子系统,是实现多电/全电飞机的关键。相比于传统的液压刹车,全电刹车系统机



电一体化程度显著提高,不但避免了了液压元件过多导致的液压油污染、泄露诱发的系统故障,而且便于实现系统在线测试和诊断功能<sup>[21]</sup>。全电刹车系统与液压刹车系统架构对比见图 7。此外,全电刹车系统使用机电作动器作为刹车压力输出部件,使系统响应频率提高了 2~3 倍,显著改善了制动稳定性,其外形和内部结构如图 8 所示。

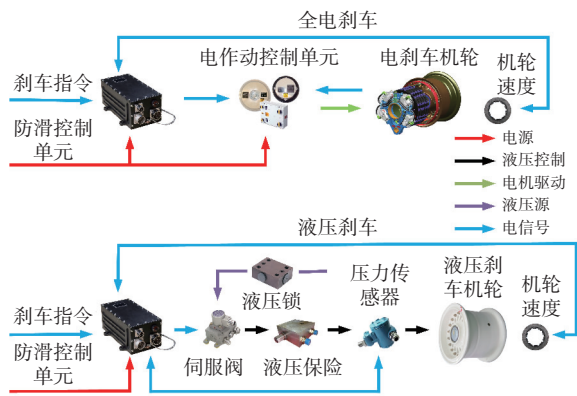


图 7 全电刹车系统与液压刹车系统架构对比



图 8 机电作动器及其作动结构

在全电刹车系统的工程化应用进程中,还存在以下问题需要重点关注:

1) 飞机刹车装置的工作环境温度高达 200 °C,对电机的可靠性设计提出了严峻的考验。除了研发新型的耐热材料,还需要采用新型的控制策略或由多台电机构成冗余设计来提高电机的可靠性和容错能力。由图 8 可以看出,机电作动器内部的传动机构通过伞齿轮进行直线作动力输出,这必然产生啮合齿隙,造成动力延迟、噪声与振动,影响电动伺服机构的动态性能与控制精度<sup>[22]</sup>。此外,现代高速重载飞机在着陆瞬间往往会产生过大负载,极易导致滚珠丝杠损伤。西北工业大学谢彦等人,在作动器的实验调试中,也多次出现丝杠卡死无法松刹的情况<sup>[23]</sup>,严重的还会导致滚珠轴承碎裂。因此,在生产过程中要确保所选材料的强度和刚度,并且单独设计手动松刹装置,以避免滚珠丝杠卡死造成严重的刹车事故。

2) 由于全电刹车系统中增加了刹车力矩反馈来消除摩擦力异常变化对控制精确性的影响,因此要考虑力传感器的可靠性设计和抗干扰问题<sup>[24]</sup>。在刹车系统复杂的工况下,除了高温、振动的影响,往往还存在大量电磁干扰,包括内部电源系统的逆变

辐射干扰、传导干扰以及线路之间的耦合干扰。由于力传感器的工作电压低,在长距离传输中极易造成干扰信号的叠加,使系统处于不稳定的工作状态。因此建议在设计中增加传感器的健康状态识别功能,以实现故障的快速检测,增强系统的可维护性。

## 2 防滑控制技术

### 2.1 研究进展

刹车系统工作过程中,防滑控制盒综合刹车指令信号和刹车力矩、机轮速度等状态反馈信号,以一定的控制算法实现对机轮的防滑控制<sup>[25]</sup>。随着防滑控制盒的逻辑运算能力不断提高,控制方法也在不断迭代升级,从机械惯性刹车系统的开关式控制,经历了电子防滑刹车系统的减速率式控制、滑移速度式控制,发展到滑移率式控制。开-关式防滑控制主要应用于机械惯性刹车系统中,依靠机轮上安装的惯性传感器不断检测机轮状态,通过电磁活门的反复动作进行刹车压力调节<sup>[26]</sup>。减速率式则是根据轮速传感器的反馈信号计算出机轮减速率,与预先设定的减速率值进行比较得到控制信号,再由电液伺服阀根据控制信号来调节刹车压力输出。该方法有效降低了打滑深度和频率,在干跑道上性能表现优异,但是在湿滑跑道上会出现频繁松刹情况,制动效率严重降低<sup>[27]</sup>。滑移速度式的控制对象是准滑移速度,由飞机参考速度和受刹机轮线速度作差得到。在其控制方法的设计上,国内常采用多门限 PID 方法,其中积分级改进成了压力偏调级(PBM),通过改善这一级的放电特性提高了刹车效率。但是该方法经常存在低速段打滑的现象,并且无法进行精确的跑道辨识,刹车效率一般只能达到 90%左右<sup>[28]</sup>。滑移率式的控制对象为滑移率,即机轮在制动过程中滑动部分所占的比例。滑移率式控制的关键是充分利用了轮胎与地面之间的结合力,因此可以从本质上提高制动效率。不同跑道状态下控制效果对比见表 2。

结合表 2 可知,在不同的跑道状态下,滑移率式控制均表现较好,尤其在湿滑跑道,由结合系数计算的刹车效率明显高于其他控制方式<sup>[30]</sup>。目前这种控制方式已经在欧洲部分机型上得到应用,未来具有广阔的应用前景。

表 2 NASA 关于不同防滑控制方式的试验结果<sup>[29]</sup>

系统名称	跑道状况	刹车效率		
		由刹车力矩计算	由结合系数计算	由刹车压力计算

系统名称	跑道状况	刹车效率		
		由制动力矩计算	由结合系数计算	由制动力计算
开-关式控制	干跑道	0.76	0.74	0.81
	湿跑道	0.78	0.69	0.71
减速率式控制	干跑道	0.83	0.81	0.85
	湿跑道	0.67	0.66	0.69
滑移速度式控制	干跑道	0.93	0.91	0.91
	湿跑道	0.71	0.68	0.7
滑移率式控制	干跑道	0.93	0.94	0.89
	湿跑道	0.75	0.81	0.70

## 2.2 先进控制技术及问题

由于飞机刹车系统是一个高度非线性系统,内部子模块之间耦合性强,工作环境存在大量的不确定干扰,这就对控制算法的设计提出了很高的要求<sup>[31]</sup>。在设计控制算法前,首先要分析影响飞机制动效率的主要因素。飞机制动主要依靠轮胎和地面之间的结合力起到阻力的作用,而影响结合力的主要因素是结合系数<sup>[32]</sup>,不同路况条件下,滑移率与结合系数的关系如图9所示。其中最大结合系数对应的滑移率称为最佳滑移率。

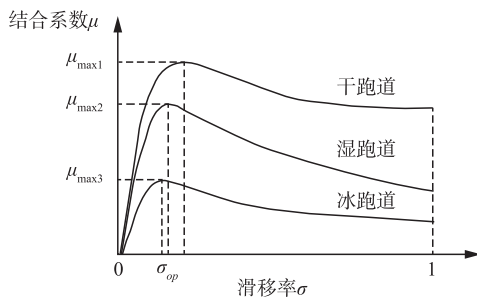


图9 滑移率-结合系数关系曲线

在实际制动过程中,将滑移率稳定在最佳滑移率附近,就能获得最大地面结合力,达到最佳刹车效率。但是,如何准确、实时地获得飞机速度,并且得到不同路况条件下的最佳滑移率,是制约滑移率式控制工程运用的主要因素。主要可以分为以下几个问题:

1)最佳滑移率信号的获取。最佳滑移率信号是实现滑移率控制的前提和关键,但是不可直接被测量,目前主要根据结合系数-滑移率之间的关系进行估计得到。由于轮胎和跑道之间的结合是一种复杂的物理现象,很难进行精确的模拟,常用参考模型的方法来描述结合系数-滑移率之间的关系,其关键是模型的设计和参数的在线辨识。常用的模型有:魔术公式模型、LuGre模型<sup>[33]</sup>和Burckhardt模型。彭晓燕等人<sup>[34]</sup>和Sharifzadeh等人<sup>[35]</sup>分别利用非线性参数估计法和极大似然法实现了对Burckhardt

模型参数的在线辨识,得到结合系数-滑移率之间的关系,再通过求极值的方法得到峰值结合系数和最佳滑移率,为滑移率控制提供了参考信号。

2)飞机速度信号的采集。为了实现对最佳滑移率的跟踪,需要获取当前飞机速度信号计算出实际滑移率,但是凭借现有的技术条件很难直接获取精确、实时的飞机速度信号。在已有的滑移率控制方案中,通过采用系统状态估计方法或直接使用前轮速度来代替飞机速度<sup>[36]</sup>。李玉忍等人<sup>[37]</sup>设计了一种基于扩展卡尔曼估计的方法,在跑道状态改变或机轮打滑时也能精确地估计飞机速度,改善了传统空速管测速在低速时信号波动大的问题。刘文胜等人<sup>[38]</sup>采用无味卡尔曼滤波(UKF)对机体速度进行在线估计和实时滤波,结合模糊神经网络控制,很好地完成了滑移率的跟踪任务。但是实际的着陆过程往往存在许多未知干扰,这就需要对算法进行不断地升级改进,才能达到装机使用的要求。

3)控制策略的设计。在对滑移率控制策略的研究中,使用较多的方法有滑模控制<sup>[39-42]</sup>、反馈线性化控制<sup>[39,43]</sup>、模糊神经网络控制<sup>[44]</sup>等。滑模控制针对含未建模动态和强非线性系统具有显著的鲁棒性,是一种高效的防滑刹车控制器解决方案,缺点是会产生输出不连续引起的抖振现象。虽然目前关于抖振的抑制算法有很多,但是对于飞机制动控制系统的是否处于稳定的工作状态则考虑较少。在今后的设计中,可以增加传感器来获取系统的工作状态,这也是实现闭环控制的重要前提与必要条件。随着人工智能的普及,一些先进的智能控制算法,如免疫算法、遗传算法、粒子群优化算法等,对跑道辨识和最佳结合系数估计具有重要应用价值。通过这些算法与滑移率控制经典理论结合起来,实现不同刹车工况下自寻优控制,将成为重点研究方向。

## 3 刹车材料技术

### 3.1 研究进展

飞机着陆初期,刹车盘“热库”温度可达1500℃以上,对材料的性能提出了严峻的考验<sup>[45]</sup>。在刹车装置的恶劣工况下,刹车材料除了热库体容量的要求,还必须具有高温下物理性能和化学性能稳定的特点,同时需要兼顾材料的摩擦和磨损性能,以保证最佳制动效果和刹车盘寿命<sup>[46]</sup>。第一代刹车材料是聚合物黏结材料。主要由钢纤维、还原铁粉和泡沫铁粉组成,该材料只适用于早期的轻型、



低速飞机<sup>[47]</sup>。第二代刹车材料为粉末冶金材料,该材料具有较强的机械强度和稳定的摩擦特性,成为当时主流的刹车材料。后来,结合先进的陶瓷制造工艺,Honeywell 公司研发了 Cerametalix<sup>®</sup> 系列金属陶瓷刹车装置,至今仍被安装在世界上最大的 B-737-700/800 机队<sup>[48]</sup>。第三代刹车材料是 C/C 复合刹车材料,这类刹车材料在减轻重量、提高吸热能力、节能环保等方面均优于粉末冶金刹车材料。目前,国内外已普遍采用碳刹车盘取代原来的金属刹车盘。中航工业制动为新舟 60、运 12、空客 320(如图 10 所示)、B-757 等生产碳刹车盘均已装机使用。

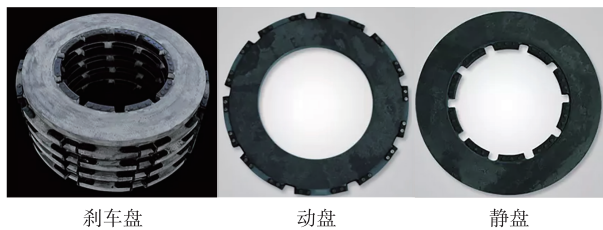
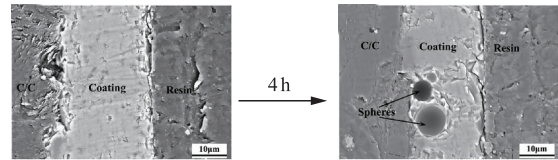
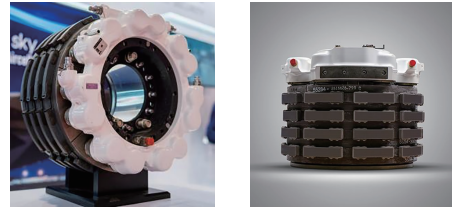


图 10 A320 系列飞机碳刹车盘

### 3.2 新型材料技术及问题

由于材料本身性质的原因,C/C 复合刹车材料存在高温下易被除冰剂和其他污染物氧化,潮湿状态下摩擦性能严重衰减的问题。目前已有的方法主要是从 2 个方面来优化材料性能,一是通过加入抗氧化涂层,二是在 C/C 复合刹车材料的制备过程中引入 C/SiC 基体,制成新型 C/C-SiC 摩擦材料,能够有效改善湿态下的摩擦性能,同时还能增强材料的抗氧化性。

针对当前主流的碳刹车材料高温下易被氧化的问题,西北工业大学凝固技术国家重点实验室范尚武等人<sup>[49]</sup>提出了一种双层结构 SiCN/glass-B<sub>4</sub>C 抗氧化涂层的解决方案。该方案首先引入 SiCN 层作为过渡层来改善硼硅玻璃与 C/C 复合材料之间的润湿性,其次将 B<sub>4</sub>C 引入外玻璃涂料中消耗扩散到涂层中的氧,反应产物 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在 800 °C 时具有较好的流动性,可以有效地修复涂层中的裂纹和气孔(如图 11 所示),显著改善了涂层的抗氧化性能。国外也开展了许多关于抗氧化涂层的研究,例如 Safran 集团生产的 Sepcarb<sup>®</sup> III OR(抗氧化)碳刹车盘,见图 12(a),Goodrich 公司生产的 Carbenix<sup>®</sup> 军用碳刹车盘,见图 12(b),均使用了先进的抗氧化涂层技术,有效提高了刹车盘的寿命。

图 11 SiCN/glass-B<sub>4</sub>C 涂层样品在 800 °C 氧化修复过程图 12 Sepcarb<sup>®</sup> III OR 和 Carbenix<sup>®</sup> 碳刹车盘

在改善碳刹车材料湿态摩擦性能方面,Renz R<sup>[50]</sup>提出了一种新型陶瓷基复合材料(CMC-SiC)的设计方案,通过在 1 500 °C 高温下往 C/C 复合材料中加入硅颗粒,制成了新型 C/C-SiC 复合材料,过程见图 13。采用 C/C-SiC 复合材料生产的刹车盘相比于碳刹车盘磨损率降低 50% 以上,湿态摩擦性能衰减降低 60% 以上,静摩擦系数提高 1~2 倍。国内西北工业大学张立同院士团队发明了化学气相渗透结合反应性熔体渗透的制造工艺,实现了 CMC-SiC 的低成本快速致密化,解决了国际上生产周期长、成本高的问题<sup>[51-54]</sup>。在各国对 C/C-SiC 材料的研究中,我国是世界首个将 C/C-SiC 摩擦材料用于制造飞机刹车盘的国家<sup>[55]</sup>。随着新工艺技术(激光加工、特种加工)的应用,新型 C/C-SiC 复合材料将向匀质、致密度高、气孔率低的方向发展。通过结合不同的制备方法,实现材料微结构-力学性能-摩擦磨损性能之间的协同设计,是今后提升材料性能的重点研究方向。

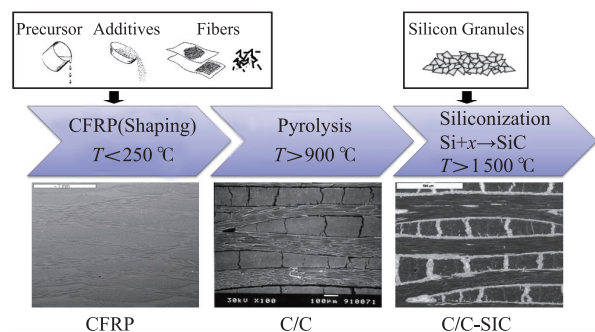


图 13 C/C-SiC 材料制备过程

## 4 发展趋势

综合以上刹车系统关键技术的研究进展及问题分析,可以预测飞机防滑刹车系统未来的发展趋势

包括:

1)智能化。随着人工智能技术的不断兴起,具有自主学习功能的智能控制理论在越来越多的领域中得到广泛应用。高性能微处理器的发展,极大地提高了系统的运算速度,为智能控制算法的实现提供了硬件保障。若在飞机刹车系统的防滑控制中采用智能控制策略,首先必将极大提高信息处理能力,为飞机刹车过程中干扰抑制、跑道结合系数识别困难等问题提供新的解决方案。其次,在机器学习、自主信息处理能力的加持下,可以改进传统的控制盒机内自检测功能(built in test, BIT),实现系统故障预测和健康管理(prognostic and health management, PHM)功能。通过预测并管理系统未来可能出现的风险,降低维修保障费用、提高战备完好率和任务成功率。最后,通过对积累的大量刹车系统故障数据进行分析研判,可以根据故障类型和机理建立故障树,为实现系统故障自修复功能提供理论支撑,进一步推动刹车系统智能化发展进程。

2)综合化。一是外部信息的综合。随着航空电气化的发展,各类电子信息可以利用5G技术相互传输和融合,因此可以在设计中增加刹车系统的在线监测功能。通过监测外部的跑道、气象等状态信息,并且与北斗定位系统、飞管、机场导航等系统进行信息交互,构建一个先进、高效的飞机地面运动综合控制系统。二是内部信息综合。四代机之后,以机电综合管理为基础的先进机电控制系统成为发展趋势。目前刹车控制系统还是机上“独立”的模块,信息获取方式单一。由于缺乏对飞机整体态势的感知,导致系统工作稳定性较低。基于现有的机载设备综合管理技术,采用高速、高可靠总线及分布式控制,远程管理刹车系统的传感器和附件,实现飞机刹车系统与机电系统、动力、飞控、航电等信息的共享也是未来主要的发展方向之一。

3)全电化。电能具有无污染、易传送、低损耗等特点,是飞机上最为理想的二次能源,也是促成多电/全电飞机设计理念的重要因素。随着各国对多电/全电飞机的研究不断深入,必将进一步推动刹车系统的全电化进程。首先,相比于传统的液压刹车,全电刹车系统具有极大的安全优势,在提高可靠性和可维护性方面也具有很大的发展空间。其次,随着新型高性能电机的研发以及智能控制技术的发展,相比于液压作动机构,在已有的响应频率优势上能够进一步提高控制的精确性,制动效率将显著提

高。最后,全电刹车系统作为多电/全电飞机的功能子系统,降低了机上二次能源形式多样化需求,提高了能源利用率,并且对于研发绿色电滑行技术、实现航空碳中和目标也具有重要意义。因此,全电化必将成为未来刹车系统的发展趋势。

## 5 结语

飞机刹车系统经过几十年的发展,取得了丰硕的研究成果。防滑控制盒、作动机构、机轮刹车材料等重要部件不断地进行更新换代,控制策略不断升级,成功地保障了各种军民机型的制动。但是,各国对飞机性能的追求没有止步,因此需要持续开展刹车系统的创新研究。除了在之前技术较为成熟的领域(如液压刹车系统)进行技术升级改造外,也要敢于打破常规,重新设计,寻求性能提升前景更广阔的创新点,如全电刹车系统的设计、新型刹车材料的设计等。在未来高性能制动需求的牵引下,不断推动飞机防滑刹车系统向智能化、综合化、全电化的方向发展。

## 参考文献

- [1] JIAO Z, ZHANG H, SHANG Y, et al. A Power-by-Wire Aircraft Brake System Based on High-Speed on-off Valves [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 106: 106177.
- [2] HE L, YE W, HE Z, et al. A Combining Sliding Mode Control Approach For Electric Motor Anti-Lock Braking System of Battery Electric Vehicle [J]. Control Engineering Practice, 2020, 102: 104,520.
- [3] 杨尊社, 娄金涛, 张洁, 等. 国外飞机机轮刹车系统的发展 [J]. 航空精密制造技术, 2016, (4): 40-44.
- [4] A-5A Wheels, Brakes and Skid Controls Committee. Information on Electric Brakes [Z]. USA: Aerospace Standard, AIR5937, 2019.
- [5] 何永乐. 飞机刹车系统设计 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.
- [6] 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, 30(12): 7-15.
- [7] 郁建. 基于虚拟样机的多轮飞机刹车系统半实物仿真 [D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
- [8] O'CONNELL C T, OYAMA H. Aircraft Brake System; U. S. Patent 9108726 [P]. 2015-8-18.
- [9] REIF K. Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems [M]. Weisbaden, Germany: Springer

- Vieweg, 2014.
- [10] 王利宁,王林,董玉忠. 电液压力伺服阀故障分析研究[J]. 液压气动与密封,2019,39(9):78-81.
- [11] MOIR I, SEABRIDGE A. Design and Development of Aircraft Systems[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2012.
- [12] DAVICO L, TANELLI M, SAVARESI S M, et al. A Deceleration-Based Algorithm for Anti-skid Control of Aircraft[J]. IFAC-Papers On Line, 2017, 50(1): 14168-14173.
- [13] 孙辉,闫建国,屈耀红. 输入输出受限的无人机防滑刹车系统容错控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2017,43(6):1132-1140.
- [14] 相里康,马瑞卿. 飞机全电刹车机电系统供电电源余度设计[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(1): 110-116.
- [15] 邢晓斌,刘忠平,韩亚国,等. 飞机防滑刹车系统试验研究[J]. 航空精密制造技术,2017,53(3):30-34.
- [16] Crane Aerospace & Electronics. C-130 Mark IV Antiskid Brake Control System [EB/OL]. (2019-02-20)[2020-9-18]. [https://goallclear.com/wp-content/uploads/2021/01/AC\\_Crane\\_Brochure\\_Marklv-compressed.pdf](https://goallclear.com/wp-content/uploads/2021/01/AC_Crane_Brochure_Marklv-compressed.pdf).
- [17] SHANG Y, LIU X, JIAO Z, et al. A Novel Integrated Self-Powered Brake System for More Electric Aircraft[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(5): 976-989.
- [18] JEAN-CHARLES M, JIAN F U. Review on Signal-by-Wire and Power-by-Wire Actuation for More Electric Aircraft [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(3): 857-870.
- [19] 李强,王丽丽. 波音 787 飞机全电刹车系统分析研究[C]//中国航空学会总体专业分会飞机发展与设计第十次学术交流会. 珠海:中国航空学会, 2015: 327-329.
- [20] 韩伟健. 飞机全电刹车机电作动系统的建模与控制方法研究[D]. 西安:西北工业大学,2015.
- [21] QIAO G, LIU G, SHI Z, et al. A Review of Electro-Mechanical Actuators for More/All Electric Aircraft Systems[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2018, 232(22): 128-151.
- [22] 陈晓雷. 多电飞机机电作动伺服系统控制策略研究[D]. 西安:西北工业大学,2016.
- [23] 谢彦,苏静,王红玲,等. 飞机全电刹车系统的发展与关键技术研究[J]. 航空工程进展, 2019, 10(6): 846-853.
- [24] HAN W, XIONG L, YU Z. Braking Pressure Control in Electro-Hydraulic Brake System Based on Pressure Estimation with Nonlinearities and Uncertainties[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 131: 703-727.
- [25] JIAO Z, WANG Z, SUN D, et al. A Novel Aircraft Anti-Skid Brake Control Method Based on Runway Maximum Friction Tracking Algorithm [J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 110: 106482.
- [26] 牟丹. 四点起落架飞机着陆及操纵特性分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.
- [27] 相里康. 飞机全电刹车力伺服控制与可靠驱动技术研究[D]. 西安:西北工业大学, 2018.
- [28] 梁波. 飞机电静液防滑刹车系统的仿真研究[D]. 西安:西北工业大学, 2009.
- [29] TANNER J A. Review of NASA Anti-Skid Braking Research [R]. SAE 8213931982.
- [30] 逯九利. 飞机制动控制系统综合性能研究[D]. 西安:西北工业大学,2018.
- [31] 付龙飞. 飞机防滑刹车系统的非线性控制技术应用研究[D]. 西安:西北工业大学,2017.
- [32] 丁磊,姚剑峰,张奇. 飞机电液刹车系统半物理仿真设计与实现[C]// 2016 航空试验测试技术学术交流会论文集. 上海:中国航空学会,2016:1-5.
- [33] 刘丽卓. 飞机防滑刹车控制系统关键技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2017.
- [34] 彭晓燕,章斌,陈昌荣. 基于RBF神经网络的最佳滑移率在线计算方法[J]. 机械工程学报,2011,47(14): 108-113.
- [35] SHARIFZADEH M, SENATORE A, FARNAM A, et al. A Real-time Approach to Robust Identification of Tyre-Road Friction Characteristics on Mixed- $\mu$  Roads[J]. Vehicle System Dynamics, 2018, 57(9): 1338-1362.
- [36] JI X, LIN H, ZHOU S. Slip Ratio Control for Aircraft Electric Braking System Based on Sliding Mode Control[C]// 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Harbin, China:IEEE, 2019: 1-5.
- [37] 王鹏,李玉忍,付龙飞,等. 基于扩展卡尔曼估计的飞机防滑刹车系统模糊控制[J]. 西北工业大学学报, 2015,33(3):478-483.
- [38] 刘文胜,王霞,马运柱,等. 基于无味卡尔曼滤波的飞机防滑刹车模糊神经网络控制[J]. 航空精密制造技术,2017,53(2):25-31.
- [39] 付龙飞,田广来,王鹏,等. 飞机防滑刹车系统滑移率自适应滑模控制研究[J]. 西北工业大学学报, 2015, 33(5):770-774.
- [40] ZHANG X, LIN H. Backstepping Fuzzy Sliding Mode



- Control for the Antiskid Braking System of Unmanned Aerial Vehicles[J]. *Electronics*, 2020, 9(10): 1731.
- [41] CHEN G, HUA M, ZONG C, et al. Comprehensive Chassis Control Strategy of FWIC-EV Based on Sliding Mode Control[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2018, 13(4): 703-713.
- [42] 彭晓燕,何磊,吕以滨. 基于滑移率的电子机械制动模糊滑模控制[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2018, 49(2):360-370.
- [43] ELLOUMI S, BRAIEK N B. On Feedback Control Techniques of Nonlinear Analytic Systems[J]. *Journal of Applied Research and Technology*, 2014, 12(3):500-513.
- [44] GAO J, GAO B. The Research on Aircraft Anti-skid Braking Switching Control with Road Online Identification Based on Fuzzy Algorithm[C]// *Proceedings of the 11th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC2019)*. Singapore: Springer, 2020: 1083-1093.
- [45] 周一帆,陆贤坤,刘海平,等. 航空刹车材料发展概述[J]. *化工设计通讯*, 2020, 46(6):83,126.
- [46] 季光明. 大型商用飞机炭刹车盘材料的应用进展[J]. *民用飞机设计与研究*, 2011(3):45-47.
- [47] 王宏儒,张艺,何永乐. 我国航空机轮材料应用发展研究[J]. *航空精密制造技术*, 2020, 56(4):42-46.
- [48] Wheels and Braking Systems. High-Performance Braking Products and Services [EB/OL]. (2016-04-16) [2020-10-13]. <https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aerobt/en/documents/landing-pages/brochures/C61-1547-000-000—WheelsAndBrakingSystemsbro.pdf>.
- [49] FAN W, MA X, LI Z, et al. Design and Optimization of Oxidation Resistant Coating for C/C Aircraft Brake Materials[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(1): 175-182.
- [50] RENZ R, KRENKEL W. C/C-SiC Composites For High Performance Emergency Brake Systems[C]// *The 9th European Conference on Composite Materials, Design and Applications*. Brighton, UK:DLR, 2000.
- [51] HEIDENREICH B, KLOPSCH L, KOCH D. CMC Materials for Aircraft Brakes[C]// *Germany 11th International Carbon Festival 2nd Global Carbon Cluster Forum*. Jeonju, Korea:[s. n.], 2016.
- [52] 西北工业大学. 超高温自愈陶瓷基复合材料的多相耦合快速致密化方法:CN202011335106. 9[P]. 2021-02-09.
- [53] WANG X, GAO X, ZHANG Z, et al. Advances in Modifications and High-Temperature Applications of Silicon Carbide Ceramic Matrix Composites in Aerospace: A Focused Review[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(9):4671-4688.
- [54] 陈智勇,徐颖强,肖立,等. C/C-SiC 复合材料致密度影响因素[J]. *航空材料学报*, 2021, 41(1):67-73.
- [55] 张西岩. 碳陶刹车盘——制动材料的新时代[C]// *第十七届国际摩擦密封材料技术交流暨产品展示会*. 郑州:中国摩擦密封材料协会, 2015:31-32.

(编辑:徐楠楠)