

# 复杂环境下起落架动力学行为研究 现状与展望



朱晨辰,王彬文,刘小川,王计真,马晓利  
中国飞机强度研究所,陕西 西安 710065

**摘要:** 高低温环境、侧向阵风及跑道湿滑是飞机着陆滑跑阶段较常见的恶劣场景,给飞机着陆安全性与滑行操纵性带来危害,是起落架动力学研究中重点关注的问题之一。在现有起落架动力学理论的基础上,考虑复杂环境因素的影响,学者分别采用理论分析、数值仿真、物理试验等手段对起落架着陆滑跑阶段的动力学特性进行了研究,形成了相关数值计算工具及试验技术,开展了动力学特性试验验证,并发展了起落架系统动力学优化设计方法。本文详细论述了军民机着陆与滑跑阶段涉及的关键动力学问题及研究现状,重点对复杂环境下飞机起落架相关试验技术、着陆缓冲分析与优化方法等方面进行了综述。最后,结合未来飞机起落架技术的发展与创新,对起落架着陆与滑跑动力学问题的未来发展方向进行了展望。

**关键词:** 高低温环境;侧风影响;湿滑跑道;试验技术;缓冲性能优化

中图分类号:V216.5

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.01.001

起落架是飞机的重要承力部件,作为飞机着陆滑跑阶段的主要缓冲吸能装置,具有吸收撞击能量、减缓冲击载荷的作用,直接影响飞机起飞、着陆过程中的安全<sup>[1]</sup>。随着当代军用飞机跨战区部署安排、民机的远航线运营,飞机在适航过程中,往往面临需要在温差较大的起降地着陆、在污染跑道等复杂地面环境下滑跑等情况,还可能遇到侧风、降雪等一系列恶劣环境,从而产生了一系列关乎飞机着陆安全的动力学问题。

商用喷气式飞机事故(1959—2020年)统计数据表明,飞机在着陆及滑跑阶段事故发生率为30%,其中又有20%的事故与复杂环境相关。极端高低温、湿滑道面等复杂着陆滑跑工况极易造成飞机起落架缓冲性能改变、轮胎特性改变、滑跑稳定性改变等环境适用性问题。CCAR-25部25.1309(a)条款要求航空器起落架系统必须保证在各种可预期的运行条件下能完成安全着陆及滑跑的预定功能,这里“可预期的运行条件”就包括着陆滑跑阶段可能遇到的极端高低温环境、侧风及湿滑跑道等情况。依据适航条款要求,还需通过分析和试验的方法表明起落架在复杂环境下功能和性能的符合性,并制定相关的限制范围,以保证飞机的着陆滑跑安全。

国外对大部分民机在复杂环境下的起落架相关着陆滑跑性能进行了深入的研究,并写入了飞机使用文件及维修

手册中。美国率先开始了飞机各系统对极端环境的适应性研究,在考虑各类复杂环境因素的试验技术上也有一定进展。俄罗斯研制的伊尔-76飞机起落架缓冲器性能参数有完整的随温度变化的参考数据,对于米格系列飞机,在环境试验方面也进行了一定的研究。而国内对飞机该部分起落架性能的研究及试验公开的较少,在已有型号研制中,对全机与少量系统进行过环境试验,积累了一定的设计和试验经验。目前,亟待开展考虑各种复杂着陆滑跑环境对起落架动力学的理论分析及试验技术的探索,为新一代军民机的效能发挥、服役安全和结构减重提供技术支撑。

随着计算机技术和非线性动力学理论的发展、人工智能技术的不断成熟,数字仿真已成为分析动力学问题的有力工具之一,结合理论、仿真、试验的一体化起落架动力学分析体系也已成为主要的动力学研究思路,对优化和提高起落架在多种环境下缓冲性能的适应性,提高起落架的承载能力、增加地面操纵安全性等具有重要意义。

本文梳理了考虑复杂环境的起落架动力学试验技术,总结了高低温、侧风、湿滑跑道等典型复杂环境影响下起落架动力学的研究进展,概述了起落架缓冲性能的智能优化算法应用,并结合未来起落架的设计需求,展望了复杂环境

收稿日期: 2022-08-30; 退修日期: 2022-11-15; 录用日期: 2022-12-16

引用格式: Zhu Chenchen, Wang Binwen, Liu Xiaochuan, et al. Research status and prospect of landing gear dynamics in complex environment[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(01): 1-11. 朱晨辰, 王彬文, 刘小川, 等. 复杂环境下起落架动力学行为研究现状与展望[J]. 航空科学技术, 2023, 34(01): 1-11.

下起落架动力学试验、分析与缓冲性能优化的发展。

## 1 复杂环境下起落架动力学试验技术

据近年民航着陆事故的统计数据<sup>[2]</sup>,复杂气象条件引起的事故率为12%,道面积水及道面风切变所引起的事故率为15%,是仅次于人为操纵因素之外的主要事故影响因素。因此,国内外学者在常规的飞机起落架动力学试验基础上,针对复杂环境,发展并补充了相关的特性试验。

目前,国外大部分军民用飞机均进行了详细的起落架缓冲器高低温性能研究,并在缓冲器的标牌或维修手册中给出了考虑温度影响的静压曲线,如波音737系列飞机、757系列飞机及空客系列飞机,其起落架缓冲器静压曲线均是一系列曲线范围,如图1所示。在一定的使用极限温度下,只要缓冲器静压曲线在规定范围内,就可以正常使用。

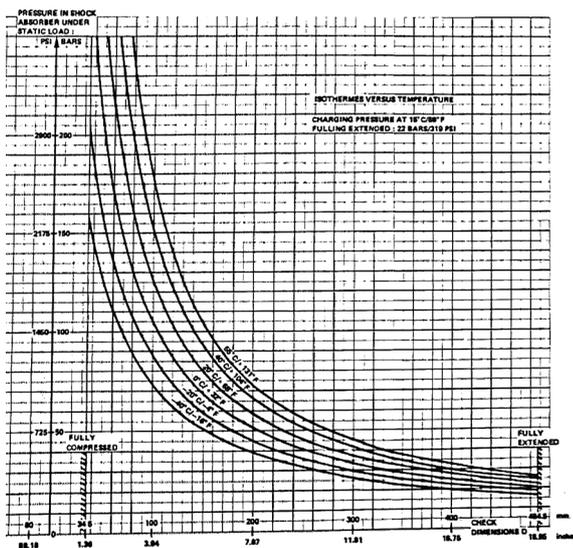


图1 空客系列飞机缓冲器不同温度下的维护曲线

Fig.1 Maintenance curves of airbus planes buffers at different temperatures

国外关于起落架对高低温影响的缓冲性能研究主要以试验为主,理论为辅。其中,西方国家的起落架供应商(如利勃海尔、古德里奇等)基于常规的起落架落震试验,在落震试验台架上增加环境温度控制箱,对起落架结构整体进行加热升温或液氮降温,然后进行落震试验。这种方法可以比较直观且真实地研究起落架缓冲器在高低温条件下的缓冲性能。俄罗斯对部分飞机起落架也采用类似方法开展高低温环境下的落震试验。

国内沿用了国外的试验经验,国军标GJB 67.9—1985、CCAR-25都对此类动力学试验内容及设计要求进行了一

定的规定<sup>[3-6]</sup>,对相关试验设备也进行了说明。强度所开展过某型飞机起落架的低温落震试验,采用引进的温度箱对起落架整体进行降温,对比了低温状态(-70°C)与常温状态(25°C)下起落架的缓冲性能,试验结果如图2所示,红线、蓝线分别为低温、常温状态下垂直载荷随时间变化曲线。低温状态下的着陆最大垂直载荷几乎是常温状态的两倍,投放吊篮位移较常温明显减小,低温状态的吊篮加速度也几乎是常温状态的两倍,低温状态缓冲性能明显较差。

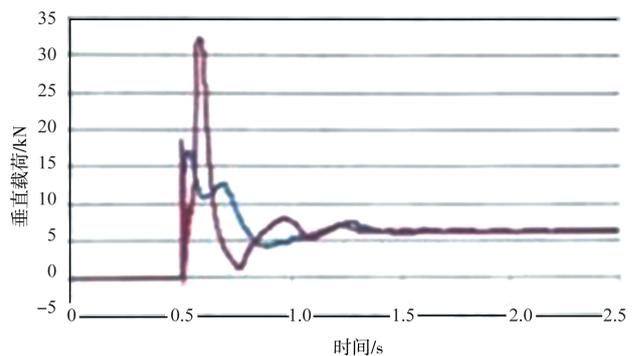


图2 低温、常温状态下垂直载荷变化图

Fig.2 Variation of vertical load at low temperature and normal temperature

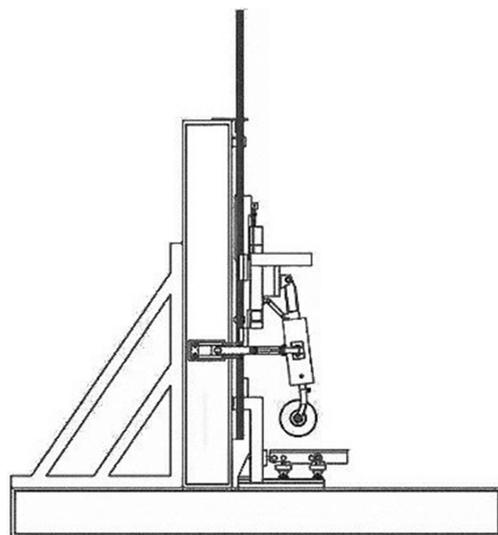


图3 起落架缓冲器极限工作温度落震试验装置

Fig.3 Ultimate operating temperature shock test device for landing gear buffer

魏小辉等<sup>[7]</sup>在此温度箱的基础上增加了用于实时监控缓冲器内腔瞬时油液数值的压力变送器,集成了一种可实时监控油压的飞机起落架缓冲器极限工作温度落震试验的装置,如图3所示,这种设计使试验获取的数据更为精确。

李冬梅等<sup>[8]</sup>发明了一种用于起落架落震试验的环境温

度模拟装置,如图4所示。其上箱体装备了现有的试验夹具,节省了试验件的反复安装拆卸,下箱体设置制冷及加热系统,以实现箱体内温度在 $-55\sim 70^{\circ}\text{C}$ 的迅速变化,这使整体试验设备结构更为紧凑。

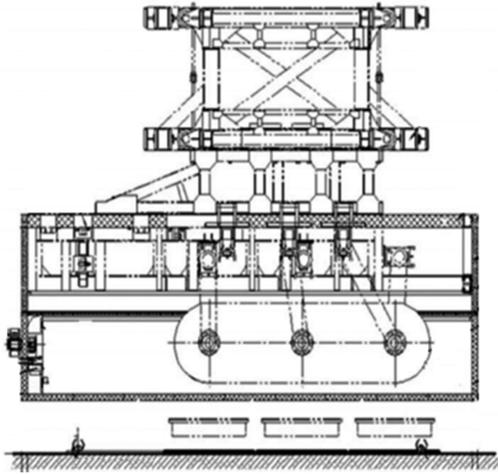


图4 起落架落震试验的环境温度模拟装置

Fig.4 Ambient temperature simulation device for landing gear crash test

胡锐等<sup>[9]</sup>开展了高温段( $20\sim 80^{\circ}\text{C}$ )的起落架缓冲性能研究试验。试验过程中通过内部夹有电阻丝的加热带对缓冲器外筒壁进行加热,采用热电偶进行温度的实时监控。其研究表明,高温对起落架缓冲器充填压力影响很大, $80^{\circ}\text{C}$ 时的压力值较常温状态变化率达24%,远高于 $\pm 10\%$ 的容差试验要求。且随着温度的升高,起落架缓冲系统效率减小,缓冲性能逐渐恶化,如图5所示。

以上方法均可以较真实地模拟高低温环境,试验结果较准确可靠,但高低温环境箱及加热带结构较复杂,设计周

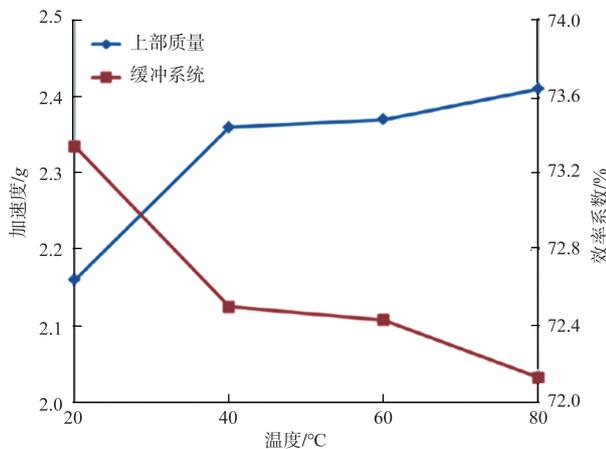


图5 缓冲系统效率随温度变化曲线

Fig.5 Buffer system efficiency as a function of temperature

期长,成本也较高。鉴于此,航空工业强度所提出了等效模拟方法进行高低温落震试验。该方法针对缓冲器腔内的充填参数,通过将充填气压改成不同温度点下的等效压力,将缓冲器内充填油液换成对应黏度密度的替代油液,在常温环境下进行高低温等效模拟试验。不过该等效试验方法尚未进行试验验证,且未有公开发表的验证研究。

国内目前所有飞机均未进行过深入的极限高低温起落架缓冲性能研究,大部分飞机不论在起落架标牌还是维修手册中,均只给出了一条常温下的缓冲器静压曲线。少数科研机构进行了理论分析,但大都未经过试验验证,或者与试验相符程度不高,计算结果难以用来指导飞机的设计及使用。其中,572厂对AG600飞机的高低温静压曲线进行研究,但没有公开发表的理论成果。

在湿滑跑道试验研究方面,美国国家航空航天局(NASA)最早提出了建设针对飞机起落架轮胎滑水试验装置的提案<sup>[10-11]</sup>。同期,Horne<sup>[12]</sup>等通过在起落架轮胎前缘设置喷水装置,模拟飞机轮胎在湿滑道面上的运行状态进行起落架的滑水试验。试验过程中,通过调节喷水装置水流大小来控制轮胎前缘水膜的厚度,确保轮胎在均匀连续的湿滑跑道上行驶,以开展对起落架临界滑水状态的研究。国外一直沿用此方法,在起落架出厂手册中给出了起落架的临界滑水速度范围。不过,在后续的研究中,学者们着重关注基于整机的湿滑跑道滑水试验,而仅针对起落架部件级的试验逐渐被剪裁。

总的来说,考虑复杂环境的起落架试验技术主要围绕高低温环境展开,国内外主要以试验验证为主,在探索温度影响起落架性能方面的公开研究性试验较少,影响机理方面的研究未见报道。在湿滑跑道方面的研究被整机级研究替代,起落架部件级试验研究较少,且逐渐被剪裁。

## 2 复杂环境对起落架动力学影响分析

### 2.1 高低温环境

据统计,我国各地机场温度差异较大,如新疆吐鲁番机场一年超过 $35^{\circ}\text{C}$ 的天数在100天以上,环境最高温度达 $49.6^{\circ}\text{C}$ ,地表温度曾达到 $83.3^{\circ}\text{C}$ 。而大兴安岭漠河机场年平均气温为 $-5^{\circ}\text{C}$ ,极端低温为 $-52.3^{\circ}\text{C}$ 。极端的温度将严重影响起落架缓冲支柱充填介质的物理特性,使缓冲性能发生变化,进一步影响飞机的起降安全,国内外学者就此展开了一系列研究。

K. W. Mahinder<sup>[13-14]</sup>提出了包含温度项的缓冲器内空气多变指数与油液阻尼系数的研究模型

$$\gamma = C \ln \frac{P_a}{P_{a0}} / (\ln \frac{P_a}{P_{a0}} - \ln \frac{T_a}{T_{a0}}) \quad (1)$$

$$C_d = \frac{75}{u} \frac{\text{lac}}{d^2(t-c)} + \zeta \quad (2)$$

式中,  $p_a$ 、 $p_{a0}$ 为瞬时压力值、初始压力值,  $T_a$ 、 $T_{a0}$ 为瞬时温度值、初始温度值,  $d$ 、 $a$ 、 $\zeta$ 为试验系数。他在文献中探讨了包含温度因素的雷诺数对于缩流孔和侧流孔缩流系数的影响。此外,还研究了油液压缩模量、气体可溶性、气穴现象,以及气体多变指数对缓冲支柱缓冲特性的影响,在气体多变指数中考虑温度影响。这不仅为后续的研究奠定了理论基础,也将温度影响的突破点指向对缓冲器设计参数中的气体多变指数及油液阻尼系数。

Heininen<sup>[15]</sup>建立了考虑温度因素的某型战斗机油气式缓冲器的仿真分析模型,仿真模拟了环境温度变化所引起的缓冲器内气液比变化对缓冲器内部压力等参数的影响。其仿真结果说明,如果温度引起腔内气液比发生畸变,缓冲器的阻尼能力将会显著下降,从而可能导致起落架的故障操作。

国内在考虑温度对起落架缓冲性能影响方面,也开展了一些分析与仿真研究。辛艳等<sup>[16]</sup>应用LMS软件建模仿真,对比了低温(-40℃)与常温(15℃)状态下的某型飞机起落架的缓冲性能。其将通过计算得到的两个温度下油液黏度值和腔内压力值作为初始输入,仿真得到低温时缓冲器行程较常温更大,缓冲效率更高的结论。并对比分析了低温情况下缓冲器气腔弹簧力和油液阻尼力两个因素对缓冲性能的影响,但理论分析的结果缺少低温落震试验数据的支撑,结论的准确性还有待验证。

Ning Shu等<sup>[17]</sup>研究了温度变化对缓冲器油液性能的影响,并利用流体阻尼平台对不同温度下的缓冲器进行了试验,得到了起落架缓冲器油阻尼力随位移的变化规律,如图6所示。然后基于动网格技术,对起落架缓冲器内部流场进行了计算流体力学(CFD)模拟。其结论是,温度的降低会导致油液黏度增加,黏度增加会导致雷诺数降低,雷诺数降低会导致流量系数降低,最终导致油液阻尼力增大。

方威等<sup>[18]</sup>主要针对温度对缓冲器空气弹簧力与轮胎性能的影响,对比了温度范围在-50~50℃区间起落架的缓冲性能变化,如图7所示。其仿真结果表明:环境温度的升高会导致起落架地面垂直载荷增加、缓冲器效率下降、使用过载系数增大等问题;环境温度降低会使缓冲器压缩行程变长、缓冲器效率增加,但当温度到达一定下限,将会危及飞行安全。

目前,考虑环境温度影响的起落架缓冲性能分析体系还处于发展阶段,现有的研究都是仅通过软件仿真,在研究温度对单一参数影响规律的基础上进行叠加,进行温度影

响的缓冲性能综合分析,且均尚未进行试验验证。未来在考虑温度对多参数耦合的缓冲性能影响研究,结合理论和试验的完善分析体系建立方面还需进一步深入探索。

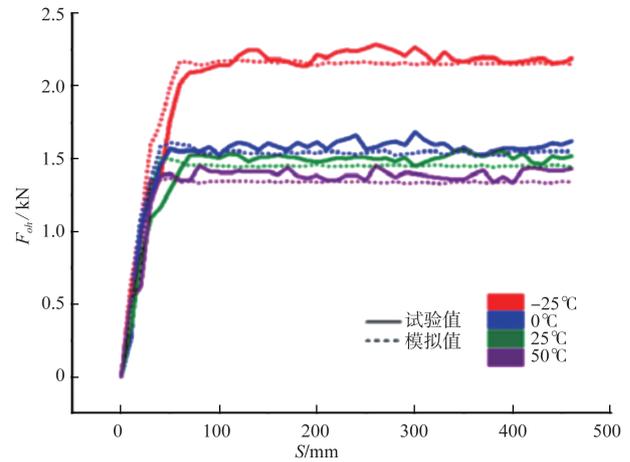


图6 不同温度下油液阻尼力随行程变化曲线

Fig.6 Variation curve of oil damping force with stroke at different temperatures

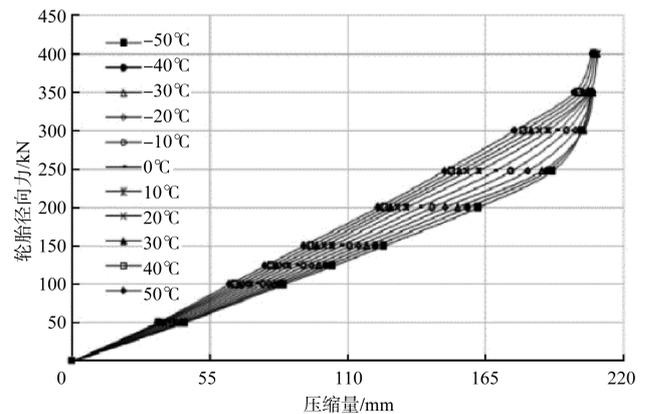


图7 不同温度下轮胎径向力曲线

Fig.7 Radial force curve of tire at different temperatures

## 2.2 侧风环境

霍志勤等<sup>[19]</sup>曾对欧洲民航商用飞机偏出跑道事件进行统计,见表1。结果表明,侧风情况对飞机的安全行驶影响占据主导地位。在飞机着陆滑跑过程中,当飞机受到侧风影响,原本起落架与道面的受力形式发生改变,飞机能否维持平衡状态取决于飞机与道面之间的相互作用力是否可以抵抗飞机所受的侧风作用。

起落架在跑道滑跑时受到来自道面的作用力包括支撑力和摩擦力两部分。当侧风作用时,轮胎受到侧向力,同时道面提供一个侧向摩擦力来阻止轮胎发生侧向滑移。由于轮胎自身的弹性及侧偏特性,其行驶方向发生偏离。由此分析飞机轮胎的侧偏行为是分析侧风作用下飞机与道面的

表1 欧洲地区偏出跑道事故主要因素统计

Table 1 Statistics of main factors of off-track accidents in Europe

阶段	主要因素	占比/%
着陆	侧风	31.6
	湿滑或污染跑道	23.7
	前轮转弯操纵不当	17.1
	起落架故障	7.9
	重着陆	7.9
	轮胎失效	7.9
	推力不对称	2.6
起飞	湿滑或污染跑道	40.9
	前轮转弯操纵不当	18.2
	状态监控不力	13.6
	侧风	13.6
	推力不对称	13.6

相互作用的重要内容之一。

牟让科等<sup>[20]</sup>对飞机在非对称载荷下着陆与滑跑时的受力进行了分析,建立了飞机非对称着陆过程中的六自由度全机动力学模型,其研究结果可以较准确地模拟飞机在非对称着陆过程中飞机的受力情况。苏彬<sup>[21]</sup>研究了飞机起落架横向运动的特点,建立了一种可用于风场且能反映起落架总体特性的数学模型,对风场中飞机的起飞、着陆、滑行、转弯等地面运动进行了数值仿真。其研究结果能较准确地模拟飞机在正侧风中着陆时,起落架缓冲支柱压缩量及载荷因子的特性曲线,如图8、图9所示,为侧风起飞、着陆仿真提供了工具。

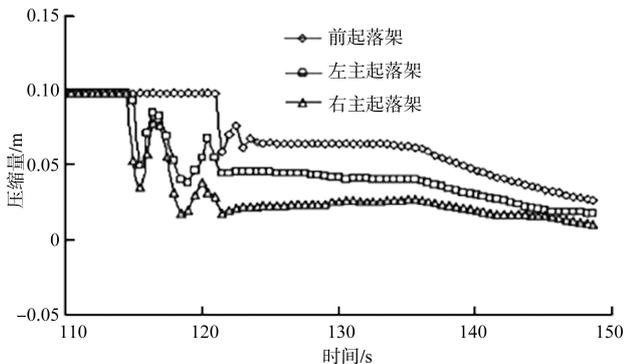


图8 缓冲支柱压缩量随时间变化曲线

Fig.8 Cushioning prop compression curve with time

刘芳兵等<sup>[22]</sup>从飞机侧风着陆滑行时受力状态和运动趋势入手,引入侧偏轮胎理论模型。

$$\mu = 0.75 - 0.0029(v - 96) \quad (3)$$

$$\mu_y = 0.52 + 4.6 \times 10^{-4}v - 6.4 \times 10^{-6}v^2 \quad (4)$$

式中, $\mu$ 为道面摩擦系数, $\mu_y$ 为侧向摩擦系数, $v$ 为飞机滑跑速度。其将侧风与轮胎相互作用转化为两个方向的摩擦系

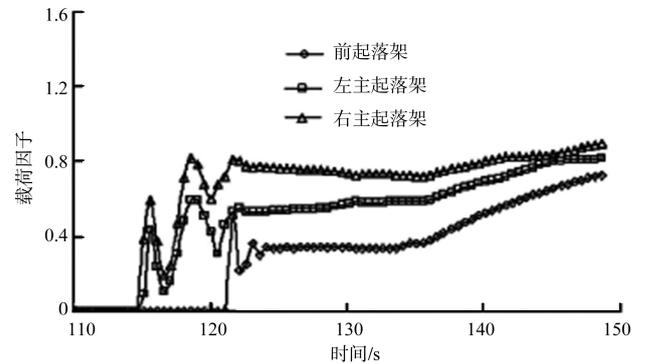


图9 载荷因子随时间变化曲线

Fig.9 Curve of load factor with time

数。在此基础上分析了不同侧风风速下,起落架滑跑偏航角随时间的变化规律,并通过ABAQUS对轮胎侧向力系数和道面支撑力展开多工况分析,结果如图10、图11所示。

J. Cobb等<sup>[23]</sup>总结了侧风速度对飞机起落架偏航力的规律,并且提出侧风影响与湿滑跑道耦合情况对飞机着陆安全影响更大。

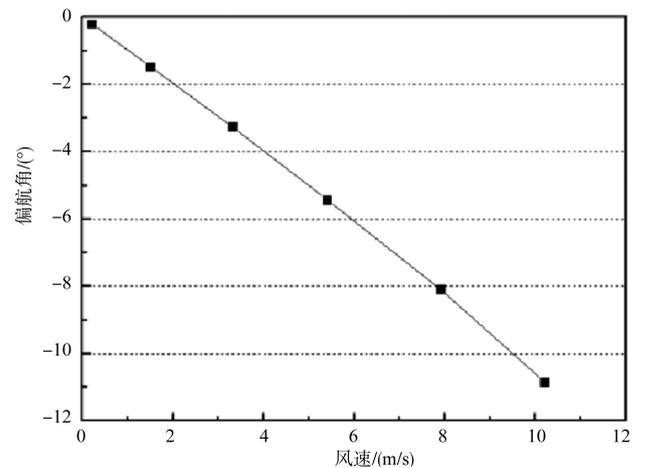


图10 不同侧风风速时的偏航角

Fig.10 Yaw angle at different crosswind speeds

P. W. Richards等<sup>[24]</sup>在对飞机起落架非线性子系统建模时考虑了侧风因素对起落架及轮胎受力的影响,并通过GearSim起落架仿真软件建立了考虑多因素的起落架子系统详细模型,研究飞机及起落架的着陆载荷动力学特性,其建立的仿真模型对起落架真实受载情况有较好的描述。

目前关于飞机侧风着陆阶段的研究主要围绕侧风中的飞机操纵控制展开,对飞机与道面相互作用的关注较少。轮胎侧偏行为的研究也主要围绕汽车轮胎展开,鲜少有针对飞机侧偏轮胎与道面相互作用的研究。

### 2.3 湿滑跑道

飞机在湿滑跑道上发生的滑水现象是对着陆安全的重要

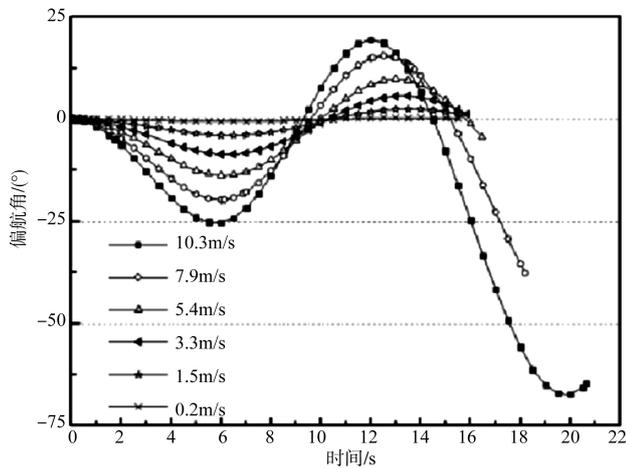


图11 不同侧风风速下偏航角随时间的变化

Fig.11 Yaw angle changes with time under different crosswind wind speeds

大威胁,飞机发生滑水现象是由于跑道表面积水改变了飞机轮胎与跑道面的接触条件,从而造成飞机刹车失灵和操控性能降低,进而引起跑道偏离事故。目前,国内外对湿滑跑道影响的研究主要通过全机滑水试验和轮胎划水试验进行,轮胎动力学部分也有相关的理论补充。

早在20世纪中叶,美国国家航空咨询委员会(NACA)就开始通过理论仿真结合试验对此问题进行研究。Horne和Dreher<sup>[25]</sup>通过对轮胎滑水试验数据展开分析,得出了轮胎胎压、道面水流速度等是影响轮胎抗滑性能的相关因素的结论,并通过拟合,得到了经典的轮胎临界滑水速度经验公式

$$v_h = 6.36 \sqrt{p} \quad (5)$$

式中, $v_h$ 为轮胎临界划水速度; $p$ 为轮胎气压。该经典公式通过试验数据得出,也是轮胎滑水问题的经典结论之一。大多数飞机在适航手册上对在湿滑跑道上滑跑的临界安全速度也是通过此经验公式得出的。

在后来的研究中,学者们不仅限于对滑跑临界速度的研究,逐渐把重点放在机轮的受载特性研究上。G. W. H. Van<sup>[26]</sup>提出飞机轮胎在一定水膜厚度上的升力公式,如式(6)所示,对原有的起落架动力学轮胎的受力模型进行了补充

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_{LH} \quad (6)$$

式中, $L$ 为轮胎受到的升力; $\rho$ 为流体密度; $V$ 为滑跑速度; $S$ 为轮胎接地区域面积; $C_{LH}$ 为升力系数,取值范围为0.67~0.85。

李岳等<sup>[27]</sup>建立了基于CEL算法的飞机起落架轮胎与积水道面的流固耦合分析模型,推导了轮胎接触面动水压强与起落架垂直载荷的表达式,研究了水膜厚度对起落架受载及

临界滑水速度的影响规律,如图12所示。其研究表明,起落架地面支撑力随积水道面滑跑速度的增大而震荡下降,且在相同滑跑速度下,起飞加速冲击阶段的垂直载荷较着陆阶段更大,湿滑道面对飞机起飞阶段比着陆阶段影响更大。

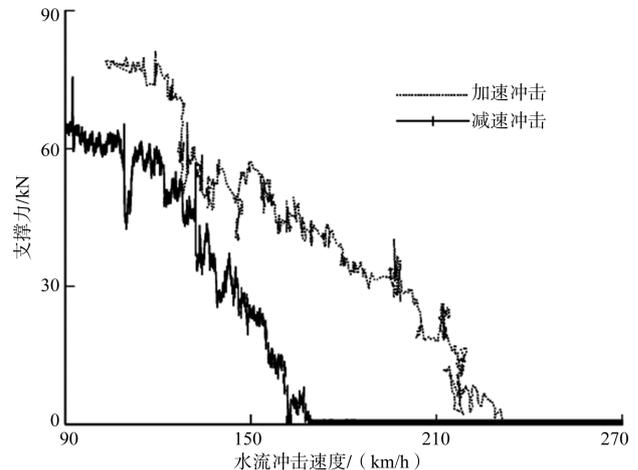


图12 加速与减速着陆冲击支撑力曲线

Fig.12 Acceleration and deceleration landing impact support curves

王永繁<sup>[28]</sup>以波音737主起落架为研究对象,用Fluent建立了考虑湿滑跑道的起落架动力学分析模型,对起落架轮胎着水滑跑过程进行了仿真。其研究得出,当道面积水浅、水膜厚度较薄时,动水压强的增长率较低,其引起的轮胎抬升与偏向力不足以对飞机安全造成威胁。当水膜厚度在5mm、8mm以上,轮胎动水压强增长迅速,8mm情况下,机轮受到动水压强平均增长率达到42.5%,机轮所受的偏向力和抬升力将会使飞机有偏出跑道的可能。

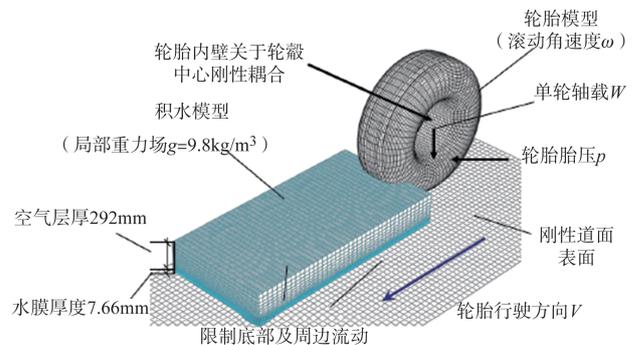


图13 道面支撑力计算模型

Fig.13 Calculation model of pavement support force

闫坤<sup>[29]</sup>针对污染跑道下的飞机起飞和着陆过程,提出了受液体污染物的阻力计算模型。计算得到了某型飞机起落架在湿滑跑道上滑跑速度与机轮所受阻力的变化关系,还得到了在不同深度积雪跑道上滑跑速度与机轮所受阻力

的变化关系,如图14、图15所示。

Huijbrechts等<sup>[30]</sup>建立了一个包含侧风及污染跑道耦合的飞机起落架滑跑动力学模型,计算了4种侧风与湿滑跑道组合工况,提出了一种在污染跑道上降低滑跑漂移风险的方法,并结合已有的试验数据库,开发了用以验证着陆滑跑偏移风险的分析系统。

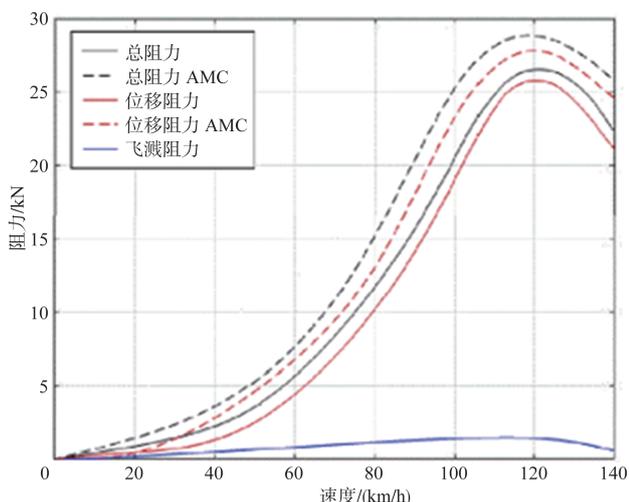


图14 5mm积水跑道滑跑速度与阻力的变化关系

Fig.14 Variation relationship between running speed and resistance of 5mm water racetrack

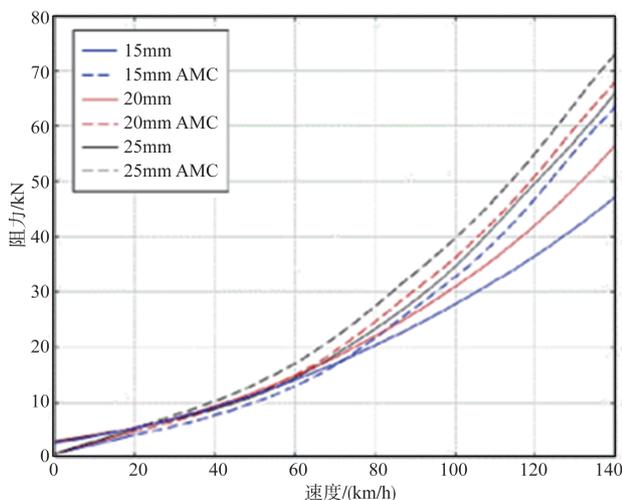


图15 15mm/20mm/25mm干雪跑道滑跑速度与阻力的变化关系

Fig.15 Variation relationship between speed and resistance of 15mm/20mm/25mm dry snow track

国外对湿滑跑道的研究整体起步较早,进行了大量理论结合仿真的研究,且有大量的地面实测数据支撑。国内起步较晚,且缺少相关试验数据和理论支持,相应的适航规章文件也还处在研究阶段。现有相关研究中,在汽车轮胎

滑水问题上的研究较多,但较少出现结合起落架结构的飞机轮胎与湿滑道面相互作用的相关理论,还需进一步发展。

### 3 起落架动力学性能优化新方法

缓冲系统是飞机起落架的重要组成部分,要求其能吸收并消耗飞机着陆冲击时产生的动能,且保证起落架的强度刚度不超过设计范围<sup>[31-32]</sup>。缓冲系统性能的好坏直接影响到飞机着陆过程的安全性,还要尽可能保证起落架的质量轻,结构尺寸小,强度和耐久性达到设计要求。因此,使起落架的综合缓冲性能达到最优,对于提高起落架的承载能力、增加地面操纵安全性和乘员舒适性等具有重要的意义。

起落架着陆滑跑过程是一个具有多输入、多输出的非线性动态过程,其输入和输出变量之间并不是简单的一一映射关系,学者们通常把它归结成一个多目标优化问题进行求解。随着多目标遗传算法、粒子群算法、蚁群算法被逐渐提出,且它们运算效率高、精度高的优势在各类优化求解问题上有广泛应用前景,学者们逐步将其应用于起落架性能优化。

Airoldi等<sup>[33-34]</sup>运用遗传算法,以起落架系统的标准特性与其仿真模型之间的区别为目标函数,以气体的多变指数和阻尼参数为设计变量,对非线性起落架模型进行了优化设计。优化结果被成功应用在了一种小型飞机非线性起落架的更新改型上,如图16、图17所示。其后几年中,Vi-ana和A. C. Felipe等<sup>[35]</sup>用遗传算法和粒子群优化方法同样求解了此类问题,也得到了较好的结果。

晋萍等<sup>[36]</sup>以着陆垂直载荷为目标函数,利用Adams软件中的智能优化器对缓冲器初始压力、油孔面积和油缸截面半径进行了优化设计,优化后的着陆垂直载荷降低了3%,获得了较好的缓冲优化结果。蔺越国等<sup>[37]</sup>采用ADAMS里的优化器,以缓冲支柱最大载荷和缓冲效率为目标函数,以油孔面积为设计变量进行了多目标优化设计,得到了某型起落架缓冲器的最优改型方案。徐方舟等<sup>[38]</sup>采用LMS优化器,针对某型飞机主起落架缓冲器,对缓冲器充填参数及阻尼孔配置进行了综合优化,其研究结果是缓冲性能落震最大载荷降低了19%,缓冲器效率由69%提升至78%,过载由3.67降至2.90,缓冲性能提升明显。刘天辉等<sup>[39]</sup>采用改进后的非线性响应面方法,以缓冲器缓冲效率为优化目标,支柱最大垂直载荷和最大行程为约束条件,对缓冲器内的设计变量进行了优化。优化后缓冲器效率较优化前增大了4.6%,优化前后的功量图如图18所示。

随着粒子群算法、退火算法、遗传算法等智能算法的逐

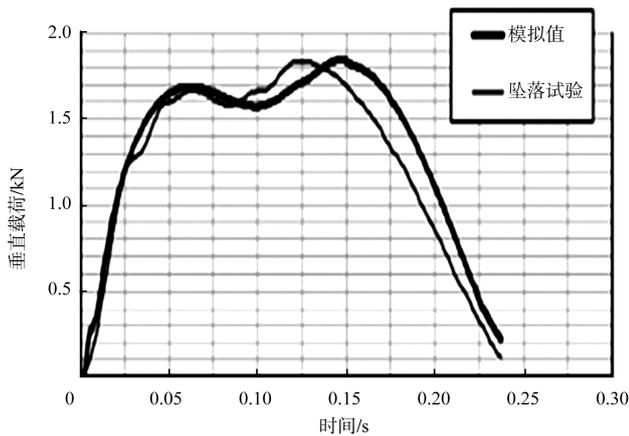


图16 垂直力随时间变化

Fig.16 The vertical force varies with time

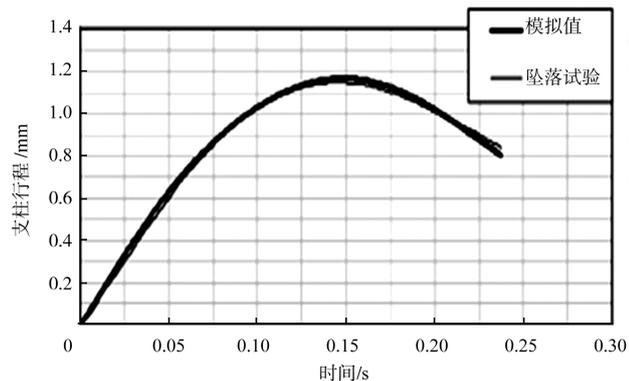


图17 垂直位移随时间变化

Fig.17 Vertical displacement varies with time

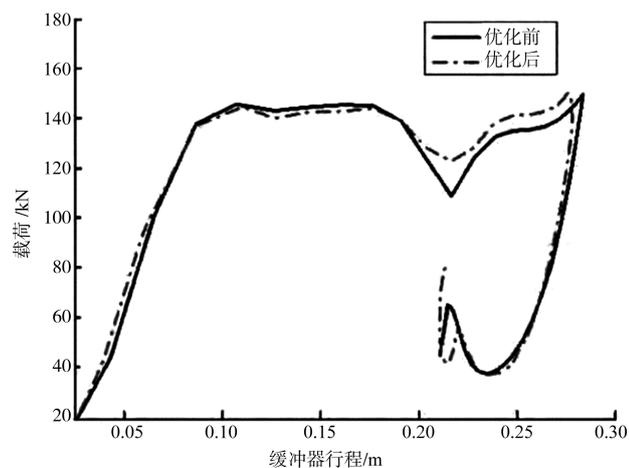


图18 优化前后功率图对比

Fig.18 Comparison between power map before and after optimization

渐完善,多目标优化的结果可以保证结果的综合最优性。将其用于起落架缓冲性能优化问题中,可以实现缓冲性能的综合最优,同时实现优化过程的自适应和自动化,有效缩短起

落架的设计开发周期,是未来发展的重要方向之一。

#### 4 结论及展望

国内外在起落架动力学分析、优化及试验部分已经开展了长期的研究,初步形成了起落架动力学分析及相关的试验技术,为现有型号研制和保证服役安全提供了基本的保障。而结合复杂环境对起落架缓冲性能进行分析的研究较少,且整体处于初步探索的阶段。

在动力学试验技术方面,国内大多通过引进国外先进技术,在考虑环境影响因素的机构的可靠性试验开展了较为充分的研究,但针对起落架系统动力学研究和试验较少。考虑复杂环境的试验技术主要围绕高低温环境展开,国内外均以试验验证为主,在探索环境对缓冲性能影响方面的研究及试验成果较少。湿滑跑道方面的研究主要以整机级外场试飞/着陆试验或单轮胎地面试验为主,考虑起落架系统的湿滑跑道滑跑试验研究较为缺乏。

在环境影响分析方面,温度因素尚未得到理论结合试验验证的完善分析体系,还需进行进一步的归纳。侧风着陆目前大多研究主要围绕操纵控制展开,在地面受载形式变化与道面的滑跑性能上研究不多,还需进一步深入探索。湿滑道面滑跑方面的研究大多针对汽车轮胎,相关轮胎划水动力学理论在飞机轮胎上的适用性不高,且针对起落架在湿滑跑道上滑跑稳定性的研究较少,对起落架受载情况的变化研究还需进一步发展。

在结合智能算法的缓冲性能综合优化方面的研究,大多是对缓冲器结构参数方面的优化,对用工程经验值的缓冲器设计参数的优化研究较少。对现有试验数据利用程度不高,可以开展根据试验数据驱动的起落架非线性动力学建模方法研究。应用粒子群算法、退火算法、遗传算法等智能算法,对起落架的缓冲性能优化问题进行结合,实现缓冲性能的综合最优,同时实现优化过程自适应和自动化,是未来发展的重要方向之一。

起落架着陆与滑跑动力学问题是一个复杂的非线性动力学问题,加之服役场景日趋恶劣、轮胎动态特性较为复杂、起落架与机身结构相互耦合等问题,其研究的难度进一步加大。尽管起落架着陆滑跑方面的研究已有近百年的历史,但诸多难题尚未攻克,仍未形成完善的考虑多因素影响的起落架动力学分析及试验技术体系。而飞机新型号研制过程中新的适航环境,必然会带来更多更严峻的挑战。

根据国内外关于复杂环境对起落架缓冲性能影响的现状和起落架缓冲技术的发展要求,以下几个方面的问

题有待于进一步深入研究:(1) 建立考虑温度影响的完善起落架缓冲器分析数学模型,其中涉及气动热及流体力学相关领域,为进一步提高起落架的环境适应性提供必要的理论基础;(2) 侧风、湿滑跑道研究方面,细化飞机轮胎滑跑受载特性,如考虑机轮受载的流固耦合问题、考虑起落架结构的轮胎滑水稳定性问题等;(3) 发展更高效更精准的缓冲性能分析与优化算法,并结合历年大量试验数据,开展数据驱动的起落架非线性动力学建模方法研究,规范起落架相关工程经验参数取值范围;(4) 完善考虑环境因素的起落架动力学试验技术规范,研发通用性好、可用于实验室的部件级环境模拟试验设备。

AST

### 参考文献

- [1] 航空航天工业部科学技术委员会. 飞机起落架强度设计指南 [M]. 成都:四川科学技术出版社,1989.  
Ministry of Aerospace Industry Science and Technology Committee. Aircraft landing gear strength design guide [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press,1989. (in Chinese)
- [2] 霍志勤,茹毅,韩松臣. 民航运输航空器着陆阶段偏出跑道事件分析模型[J]. 西南交通大学学报,2012,47(5):895-900.  
Huo Zhiqin, Ru Yi, Han Songchen. Event analysis model of aircraft deviating from runway during landing of civil aviation transportation [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47 (5): 895-900. (in Chinese)
- [3] 中国人民解放军空军. GJB 150A.3A—2009 军用装备实验室环境试验方法:第3部分 高温试验[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2009.  
The People's Liberation Army Air Force. GJB 150A.3A—2009 Military equipment laboratory environmental test methods: Part 3 High temperature test [S]. Beijing: Publishing and Distribution Department of Military Logo of General Armaments Department, 2009. (in Chinese)
- [4] 中国人民解放军空军. GJB 150A.4A—2009 军用装备实验室环境试验方法:第4部分 低温试验[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2009.  
The People's Liberation Army Air Force. GJB 150A.4A—2009 Military equipment laboratory environmental test methods: Part 4 Low temperature test [S]. Beijing: Publishing and Distribution Department of Military Logo of General Armaments Department, 2009. (in Chinese)
- [5] 中国人民解放军空军. GJB 150A.5A—2009 军用装备实验室环境试验方法:第5部分 温度冲击试验[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2009.  
The People's Liberation Army Air Force. GJB 150A.5A—2009 Military equipment laboratory environmental test methods: Part 5 Temperature shock test [S]. Beijing: Publishing and Distribution Department of Military Logo of General Armaments Department, 2009. (in Chinese)
- [6] 中国航空综合技术研究所. MIL-STD-810F 环境工程考虑和实验室试验[S]. 北京:航空综合环境重点实验室,2000.  
China Aeronautical Comprehensive Technology Research Institute. Mil-std-810F Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests [S]. Beijing: Key Laboratory of Aeronautical Integrated Environment, 2000. (in Chinese)
- [7] 魏小辉,甘雨,安邦宇,等. 飞机起落架缓冲器极限工作温度落震试验装置及其试验方法:CN111232242A[P].2020.  
Wei Xiaohui, Gan Yu, An Bangyu, et al. Aircraft landing gear buffer ultimate operating temperature shock test device and test method: CN111232242A[P]. 2020. (in Chinese)
- [8] 李冬梅,杨武刚,牟让科. 一种用于起落架落震试验的环境温度模拟装置:CN105675243A[P].2016.  
Li Dongmei, Yang Wugang, Mu Rangke. An ambient temperature simulation device for landing gear shock test: CN105675243A[P]. 2016. (in Chinese)
- [9] 胡锐,牟让科,宋得军,等. 温度对油-气式起落架缓冲性能的影响研究[J]. 航空工程进展,2022,13(3):150-156.  
Hu Rui, Mu Rangke, Song Dejun, et al. Effect of temperature on buffering performance of oil-gas landing gear [J]. Advances in Aeronautical Engineering, 2022, 13(3):150-156. (in Chinese)
- [10] Haeen E N. Low tire friction and cornering forces on a wet surface[Z]. NACA TN4406, 1958.
- [11] Fwa T F, Kumar S S, Ong G P, et al. Analytical modeling of effects of rib tires on hydroplaning[Z]. Transportation Research Record, 2018.
- [12] Horne W B. Air jets-A possible solution to hydroplaning and other associated runway wetness problems[C]//Proceedings of 17th Annual International Air Safety Seminar, New York, 1964: 35-40.
- [13] Mahinder K W. Oleo-pneumatic shock strut dynamic analysis and its real-time simulation[J]. Journal of Aircraft, 1976, 13(4):

- 303-308.
- [14] Mahinder K W. Oil compressibility and polytropic air compression analysis for oleo-pneumatic shock struts[J]. *Journal of Aircraft*, 1976, 13(7): 527-530.
- [15] Heininen A A. Modelling and simulation of an aircraft main landing gear shock absorber[D]. Tampere: Tampere University of Technology, 2015.
- [16] 辛艳, 延杰. 低温落震缓冲性能的影响探究[J]. *机械设计与制造工程*, 2021, 50(4): 83-86.  
Xin Yan, Yan Jie. Study on the influence of low temperature shock buffering performance [J]. *Machinery Design & Manufacturing Engineering*, 2021, 50(4): 83-86. (in Chinese)
- [17] Ning Shu, Gu Hongbin, Liu Hui. Analysis of temperature effect on damping characteristics of landing gear shock absorber [C]//*Proceedings of the 2020 International Conference on Aviation Safety and Information Technology*, 2020: 76-81.
- [18] 方威, 朱林刚, 王友善. 环境温度对飞机起落架缓冲性能影响分析[J]. *机械设计与制造工程*, 2021, 50(11): 76-80.  
Fang Wei, Zhu Lingang, Wang Youshan. Analysis of influence of ambient temperature on buffering performance of aircraft landing gear [J]. *Machinery Design and Manufacture Engineering*, 2021, 50 (11): 76-80. (in Chinese)
- [19] 霍志勤. 民航运输飞机偏出跑道原因分析及防范策略研究 [C]//*第二届国际管理科学与工程会议*, 2011.  
Huo Zhiqin. Cause analysis and prevention strategy of civil aviation transport aircraft deviating from runway [C]//*The Second International Conference on Management Science and Engineering*, 2011. (in Chinese)
- [20] 牟让科, 胡孟权. 飞机非对称着陆和滑跑载荷分析[J]. *机械科学与技术*, 2000(S1): 72-74.  
Mu Rangke, Hu Mengquan. Analysis of aircraft asymmetric landing and skidding load [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2000 (S1): 72-74. (in Chinese)
- [21] 苏彬, 王大海, 陈又军. 起落架数学模型及其在风场中的应用[J]. *飞行力学*, 2007, 25(1): 63-66.  
Su Bin, Wang Dahai, Chen Youjun. Mathematical model of landing gear and its application to wind field [J]. *Flight Mechanics*, 2007, 25 (1): 63-66. (in Chinese)
- [22] 刘芳兵. 湿滑跑道飞机着陆轮胎—水膜—道面相互作用[J]. *北京航空航天大学学报*, 2017, 43(12): 2382-2391.
- Liu Fangbing. Interaction of landing tire, water film and track surface for aircraft on wet runway [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43 (12): 2382-2391. (in Chinese)
- [23] Cobb J, Horne W B. Aircraft performance on slippery runways in crosswinds[R]. United States: NASA Langley Research Center Hampton, 1964.
- [24] Richards P W, Erickson A. Dynamic ground loads analysis using detailed modeling of landing gear and aircraft aeroservoelastics[C]//*AIAA Scitech 2019 Forum*, 2019: 0759.
- [25] Horne W B, Dreher R C. Phenomena of pneumatic tire hydroplaning[R]. NASA TN D-2056. 1963.
- [26] Van G W H. Hydroplaning of aircraft tires[C]//*The IMAPCR' 99-2nd International Meeting on Aircraft Performance on Contaminated Runways*. Canada, 1999.
- [27] 李岳, 蔡靖, 宗一鸣. 湿滑道面飞机轮胎临界滑水速度数值仿真[J]. *交通运输工程学报*, 2017, 17(5): 90-101.  
Li Yue, Cai Jing, Zong Yiming. Numerical simulation of critical water skiing speed of aircraft tire with wet slide surface [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2017, 17(5): 90-101. (in Chinese)
- [28] 王永繁. 机场道面积水区域飞机行驶力学特性研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2015.  
Wang Yongfan. Study on the mechanical characteristics of aircraft driving in airport road area and water area [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2015. (in Chinese)
- [29] 闫坤. 大型飞机污染跑道起降性能和飞行操作适航标准研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.  
Yan Kun. Research on the takeoff and landing performance and flight operation airworthiness standard of large aircraft contaminated runway [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [30] Huijbrechts W, Koolstra H J, Mulder J A. Using V mcg-limited V 1, controllability issues on contaminated runways and in crosswind[J]. *Journal of Aircraft*, 2019, 56(4): 1342-1352.
- [31] 周瑞鹏, 宋德军, 陈熠. 基于ALTLAS舰载机起落架落震缓冲性能分析[J]. *航空科学技术*, 2022, 33(1): 91-97.  
Zhou Ruipeng, Song Dejun, Chen Yi. Analysis of landing gear crash buffering performance of ALTLAS carrier aircraft [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, 33(1): 91-97. (in Chinese)

- [32] 胡锐, 刘小川, 白春玉, 等. 舰载飞机起降装置动力学试验研究进展[J]. 航空科学技术, 2022, 33(1):11-19.  
Hu Rui, Liu Xiaochuan, Bai Chunyu, et al. Research progress on dynamics test of carrier-based aircraft take-off and landing device [J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(1):11-19. (in Chinese)
- [33] Airolidi A, Lanzi L. Multi-objective genetic optimization for helicopter skid landing gears[C]// Structural Dynamics & Materials Conference. Canada, 2013.
- [34] Airolidi A, Lanzi L. Design of skid landing gears by means of multibody optimization[J]. Journal of Aircraft, 2006, 43(2): 555-563.
- [35] Viana S, Felipe A C. Identification of a non-linear landing gear model using nature-inspired optimization[J]. Shock and Vibration, 2008, 15(3-4):257-272.
- [36] 晋萍, 聂宏. 起落架着陆动态仿真分析模型及参数优化设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(5):498-502.  
Jin Ping, Nie Hong. Dynamic simulation analysis model and parameter optimization design of landing gear[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 35(5): 498-502. (in Chinese)
- [37] 蔺越国, 程家林. 飞机支柱式起落架落震仿真及缓冲器优化分析[J]. 飞机设计, 2007, 27(4):26-30.  
Lin Yueguo, Cheng Jialin. Vibration simulation and buffer optimization analysis of aircraft strut landing gear [J]. Aircraft Design, 2007, 27 (4) : 26-30. (in Chinese)
- [38] 徐方舟, 张斌, 宋春雨. 起落架落震缓冲性能优化分析[J]. 科技创新与应用, 2018(5):32-33.  
Xu Fangzhou, Zhang Bin, Song Chunyu. Optimization analysis of landing gear crash buffer performance [J]. Science & Technology Innovation and Application, 2018(5): 32-33. (in Chinese)
- [39] 刘天辉, 李占科. 双气腔油气式缓冲器缓冲性能优化分析[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2014, 30(6):720-723.  
Liu Tianhui, Li Zhanke. Double chamber type buffer buffer performance optimization of oil and gas analysis [J]. Journal of Harbin Commercial University (Natural Science Edition), 2014, 30 (6) : 720-723. (in Chinese)

## Research Status and Prospect of Landing Gear Dynamics in Complex Environment

Zhu Chenchen, Wang Binwen, Liu Xiaochuan, Wang Jizhen, Ma Xiaoli

*Aircraft strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China*

**Abstract:** High and low temperature environment, cross wind and slippery runway are common bad conditions in the landing and running stage of aircraft, which brings great harm to the landing safety and taxiing maneuverability of aircraft, and are one of the most important problems in landing-gear dynamics research. On the basis of the existing gear dynamics theory, aiming at complex environment situation, the researchers study the dynamic characteristics in the landing gear taxiing phase by means of theoretical analysis, numerical simulation and physical experiment, form the relevant numerical calculation tools and test technology, and carry out the dynamic characteristics experiment. The optimal design method of landing gear system dynamics is developed. This paper discusses in detail the key dynamics problems and research status of civil and military aircraft in landing and skidding stage, and focuses on aircraft landing gear test technology, buffering performance analysis and optimization in complex environment. Finally, combined with the development and innovation of aircraft landing gear technology in the future, the future development direction of landing gear and skidding dynamics is prospected.

**Key Words:** high and low temperature environment; crosswind influence; slippery runway; test technology; buffer performance optimization