

基于不平整跑道的飞机滑跑动力学模型研究综述



张莹^{1,2}, 秦若冰^{1,2}, 金峥嵘^{1,2}, 刘冲冲³, 石学成^{1,2}, 贾万涛^{1,2}

1. 西北工业大学, 陕西 西安 710129

2. 空天领域复杂性科学教育部重点实验室, 陕西 西安 710072

3. 中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 陕西 西安 710065

摘要: 飞机滑跑时会受到跑道不平整作用而引起随机振动, 不仅会影响飞机着陆滑跑过程中乘客的舒适性, 更会造成起落架结构损伤带来安全隐患。因此, 研究飞机滑跑系统在不平整跑道上滑跑的动力学行为具有重要的理论价值和现实意义。本文基于飞机滑跑系统动力学模型的结构特点, 重点探讨了非线性飞机滑跑系统从二质量块模型、多自由度模型到多体系统模型的发展变化。考虑跑道不平整对系统所带来的影响, 详细梳理了不平整跑道的描述方法, 而后为得到合理的外部载荷, 从频域的功率谱方法和时域的谐波叠加法出发, 分析不平整跑道对飞机滑跑系统的影响。最后, 基于飞机滑跑系统的发展和在滑跑过程中所面临的问题, 总结提出了复杂结构和环境对飞机滑跑动力学建模与影响分析的未来研究方向。

关键词: 飞机滑跑; 起落架; 随机动力学; 随机振动; 功率谱密度

中图分类号: V226

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.11.001

飞机作为目前速度最快、远程运输速度优势最为明显的交通运输工具, 极大地提升了人类的通勤及运输效率, 对经济发展起到了重要的推进作用^[1]。随着飞机的普及, 人们越发重视其安全性和舒适性。虽然目前飞机的安全性已经有相当的保障, 但是飞机仍存在一定的安全隐患^[2-3], 特别是着陆滑跑阶段, 来自不平整跑道的路面激励会使飞机产生剧烈的振动^[4], 不仅会导致客舱环境恶劣, 妨碍驾驶人员安全操控飞机, 降低飞机安全着陆的可靠性^[5], 还会造成飞机起落架构件的疲劳损伤, 减短飞机寿命^[6-7]。因此, 在着陆阶段开展飞机滑跑模型的动力学行为研究具有重要的理论价值和现实意义, 并且随着飞机性能的逐步提高, 舒适性设计也成为飞机评价指标中人们高度关注的重点^[8-9]。

为提高飞机滑跑舒适性和相关构件的疲劳寿命, 研究者通常采用理论建模、数值分析和试验研究等手段对飞机着陆滑跑阶段的动力学特性进行探索。通过对飞机着陆滑跑响应的综合分析, 在充分了解系统动力学行为的基础上, 对飞机滑跑系统的结构参数、滑跑时起落架的受载情况做

出预估, 提升了飞机起落架开发水平并降低了研制成本。如采用统计线性化方法和随机系统最优控制理论设计起落架主动控制缓冲器, 对比飞机的各性能指标, 以提高飞机滑跑的舒适性和减振性能; 建立不平整跑道的仿真评价系统, 计算飞机滑行通过时的振动响应量, 为机场道面维护决策建立提供参考。随着飞机滑跑系统设计和环境复杂度的不断提升, 如何运用先进的动力学理论准确分析飞机滑跑系统的动力学行为具有重要意义。

研究飞机滑跑系统动力学的前提是建立精确合理的动力学模型。机身作为飞机的载重主体, 具有体积大、质量大的特点并且有一定的弹性, 是飞机振动响应问题所研究的主要构件; 起落架作为飞机结构系统的重要组成部分^[10-11], 在着陆滑跑阶段抵消了部分来自地面的冲击和动能, 使飞机的振动减弱, 同时路面激励也是通过起落架传递到机身^[12]。除了飞机的自身结构外, 研究中还要考虑跑道不平整度等外部因素给系统所带来的复杂影响。因此, 在研究飞机滑跑问题时, 需要在准确刻画各类激励的基础上, 建立合

收稿日期: 2024-03-22; 退修日期: 2024-06-27; 录用日期: 2024-09-03

基金项目: 国家自然科学基金 (12172286, 11872306); 航空科学基金 (201941053004)

引用格式: Zhang Ying, Qin Ruobing, Jin Zhengrong, et al. Review of dynamic model of aircraft taxiing on uneven runways[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(11): 1-12. 张莹, 秦若冰, 金峥嵘, 等. 基于不平整跑道的飞机滑跑动力学模型研究综述[J]. 航空科学技术, 2024, 35(11): 1-12.

理的动力学模型对飞机地面运动进行动力学分析,并对系统的性能做出及时预测与评估,以保证飞机安全。

本文梳理了飞机滑跑系统的动力学模型,总结了几类常用非线性模型的优缺点,分析了不平整跑道的描述方法,探讨了飞机滑跑系统在不平整跑道激励下动力学分析的常用方法及其适用性,并结合未来飞机滑跑系统的发展,对飞机滑跑动力学建模与分析未来发展进行了展望。

1 飞机滑跑系统动力学模型

20世纪40年代在建立飞机滑跑动力学模型时,飞机起落架结构通常被简化为一个线性阻尼弹簧振子^[13],且忽略轮胎质量对于系统动力学响应的影响,将轮胎简化为一个线性弹簧^[14],研究结果通常难以全面反映飞机滑跑系统的动力学行为。

随着动力学理论和研究方法的不断发展,在起落架线性模型的基础上,学者们逐步引入非线性因素来对模型进行优化。由于起落架结构间隙、摩擦等非线性因素对起落架摆振有显著影响,在飞机起落架摆振动力学研究中,学者们采用了非线性动力学理论对系统进行建模,并通过非线性系统的分岔分析,阐明了重要参数对系统动力学行为的影响^[15]。Schlaefke等^[16]利用非线性弹簧阻尼系统建立系统微分方程组,拓宽了飞机滑跑系统建模的研究范围。吴卫国等^[17]为研究飞机着陆及滑跑过程中缓冲支柱各部位的弹性变形,将弹簧质量块模型延伸为杆件模型,对杆件模型进行离散插值,并在随机振动激励的基础上通过数值仿真得出了支柱各部位的位移及应力情况。Yin Qiaozhi等^[18]建立了完整的轮滑式飞机地面滑行非线性动力学模型,考虑了轮胎力和滑板力的精确模型,为所提出的轮滑式主起落架方向控制系统设计和性能研究奠定了基础。

可见,针对不同系统有效引入非线性因素,均使得飞机滑跑系统动力学模型的建立和动力学行为的分析更加深入。下面将依据飞机滑跑的非线性模型的发展,依次梳理二质量块模型、多自由度模型以及多体系统模型。

1.1 二质量块模型

考虑到飞机结构的复杂性,最初在飞机滑跑系统建模时,研究者们通常采用二质量块模型来描述飞机起落架滑跑系统,如图1(a)所示。上部质量为机体等效质量与起落架上支柱质量之和,下部质量为起落架下部质量与机轮、轮胎质量之和,其受力情况如图1(b)所示,上部质量块 m_1 为机体等效质量与起落架上支柱质量之和,主要受到空气弹簧力 F_a 、油液阻尼力 F_l 和缓冲器中的活塞与汽缸之间的摩擦

力 F_f 以及自身重力的作用,下部质量块 m_2 为起落架下部质量与机轮、轮胎质量之和,主要受到轮胎的支撑力 F_t 、空气弹簧力 F_a 、油液阻尼力 F_l 和缓冲器中的活塞与汽缸之间的摩擦力 F_f 以及自身重力的作用,两质量块之间的相互作用考虑为线性(非线性)弹簧^[17]。由于机场道面的不均匀变形问题日益凸显,程国勇等^[19]基于飞机二自由度飞机道面振动简化模型,建立了飞机-道面振动方程,考虑飞机在不均匀变形道面上滑行时将会产生垂向振动响应。袁心等^[20]在飞机二质量块模型的基础上,研究面向民航机起降阶段的飞行事故仿真建模,系统地推导了含扰动风的近地面飞行动力学模型,建立了用于飞机异常接地过程仿真的起落架模型。齐浩等^[21]针对某无人机机型的起落架系统,在经典二质量块起落架落震微分方程的基础上,建立更加真实模拟起落架落震运动过程的动力学模型,并将建立的起落架CAD模型导入进行落震动力学仿真。张国健^[22]设计了飞机起落架油气缓冲器的二质量块落震动力学模型,深入研究飞机的油气缓冲器特性,降低落震载荷,提升缓冲性能,对飞机起落架油气缓冲器进行仿真与优化设计。Liu Shifu等^[23]给出非均匀激励下飞机二自由度模型的动力学微分方程,采用飞机-跑道耦合系统,分析了跑道粗糙度的激励效应,该耦合系统由两自由度飞机模型和跑道粗糙度随机激励下的典型沥青跑道结构模型组成。

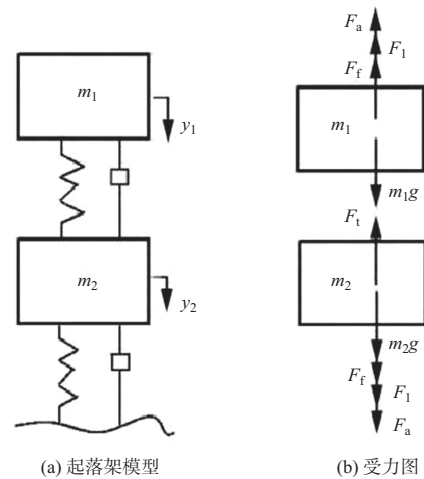


图1 起落架二质量简化模型及受力图^[17]

Fig.1 Simplified two-mass model and force diagram of landing gear^[17]

通过构建飞机起落架系统的二质量块模型可以看出,起落架支柱是按照刚性质量进行建模的,其中并未考虑其动态过程中的弹性特性,同时也未考虑缓冲器的弹性特性。机体与起落架之间依靠起落架缓冲器连接,其对飞机的振

动响应会产生重要的影响,是建模时不可忽略的因素。由此可见,二质量块模型形式简洁,适合两个质量块的运动分析,但因其忽略了机身的运动和弹性,其结果无法准确反映飞机的运动状态,并不适合结构的应力应变分析以及疲劳分析。

1.2 多自由度模型

因为传统的二质量块模型过于简化,无法充分反映结构内部应力变化及其弹性变形情况,而这些结构的弹性特性对飞机起落架着陆动态性能和疲劳寿命分析具有至关重要的作用。因此在起落架经典二质量块动力学模型的基础上,学者们考虑更为复杂的动力学模型,如三自由度、四自由度、五自由度和六自由度动力学模型。

Liang Taotao 等^[24]针对滑轮飞机更容易产生航向失稳这一问题建立了地面飞行器三自由度动力学模型,对滑轮飞行器的滑行安全进行了探讨,轮胎侧滑分析模型如图2所示,模型相较二质量块模型,额外地考虑了轮胎受到的横向力 f_n 及纵向力 Q_n ,这些力会使轮胎发生侧滑,产生侧滑角 β_n 。董倩等^[25]基于飞机-道面耦合分析,建立了飞机主起落架(MLG)四自由度模型,如图3所示。除考虑飞机模型的机身质量 M_0 外,该模型还对起落架的结构进行了深入分析:首选,分别考虑了左、右起落架的非簧载质量 M_1 、 M_2 ,簧载质量的竖向位移 Z_0 ;后起落架簧载质量的刚度、阻尼 K_{xHZ} 、 C_{xHZ} ;后起落架非簧载质量的刚度、阻尼 K_{LHZ} 、 C_{LHZ} ;左右主起落架处的机身位移 Z_1 、 Z_2 ,左右主起落架非簧载质量的位移 Z_3 、 Z_4 ;飞机机体的侧翻刚度 J_z ,得出飞机在不同平整度道面激励下的随机载荷。刘艳^[26]建立起落架系统主要结构的数学模型,以此为依据得到了两种前起落架动力学模型并推导了系统非线性动力学方程。其次,将机身视为刚性平板,建立了前起落架系统四自由度弹簧平板模型,在研究飞机滑跑过程中前起落架系统在道面随机激励作用下的振动响应时,对比分析四自由度弹簧平板模型和已有的主起落架弹簧质量块模型下主起落架的动力学响应,验证

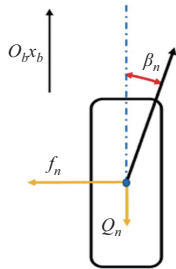


图2 轮胎侧滑角示意图^[24]

Fig.2 Diagram of the tire side slip angle^[24]

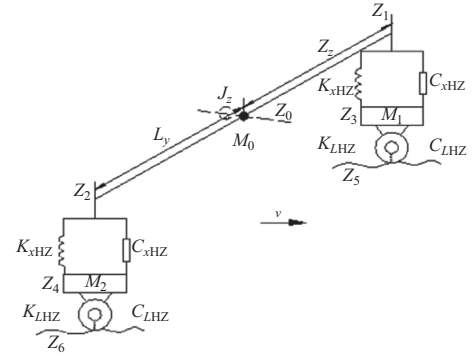


图3 四自由度的飞机主起落架振动模型^[25]

Fig.3 Vibration model of aircraft main landing gear with 4-DOF^[25]

了该弹簧平板模型的正确性。Hu Guizhang 等^[27]采用简化的四自由度飞机-跑道耦合振动模型,以跑道路面粗糙度为载荷激励源,应用状态空间法快速准确地计算出飞机滑行时的动载荷。Wang Yong 等^[28]提出了非线性角速度反馈(NAVF)控制来改善前起落架(NLG)的摆振性能,在旋转和横向动力学模型以及轮胎张线模型的基础上,建立了具有NAVF控制的NLG的五维动力学模型,采用数值延拓和分岔分析方法研究了NLG的摆振性能。刘诗福等^[29]综合考虑飞机的竖向运动、俯仰和侧倾转动,建立六自由度的飞机整机动力学模型及振动平衡方程,如图4所示。除了飞机的竖向运动进一步考虑了飞机的转动性能,如俯仰转动和侧倾转动, I_x 、 I_y 为飞机模型绕 x 轴、 y 轴的转动惯量, a 、 b 分别为前后起落架到 x 轴的垂直距离, d 、 e 分别为左后、右后起落架到 y 轴的垂直距离; Φ 、 Ψ 为簧载质量的俯仰转动和侧倾转动位移,其余参数见参考文献[29]。程国勇等^[30]采用六自由度模型,建立了道面-飞机振动方程,基于振动方程构建了不均匀变形道面的仿真评价系统。Huang Mingyang 等^[31]建立了考虑六自由度飞机机体和柔性支柱的飞机地面

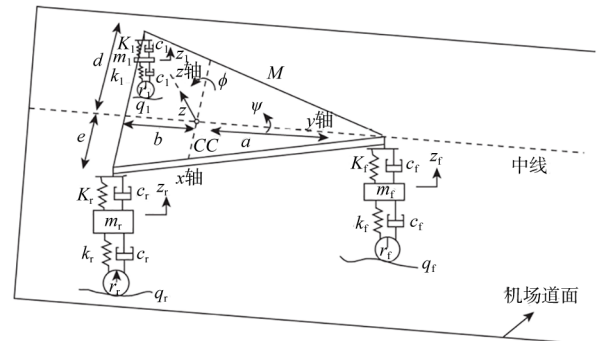


图4 六自由度的飞机整机动力学模型^[29]

Fig.4 Aircraft kinetic model with 6-DOF^[29]

机动数学模型。采用准稳态法计算轮胎侧向力和弯矩,确定飞机侧滑响应。利用某仿真平台对电动滑翔机的地面转向响应进行了仿真。Yang Liuchuan 等^[32]建立了“五点接触”飞行器的六自由度数学模型和力学平衡方程。该模型和方程用于研究机场跑道下隧道结构的安全性和稳定性,特别是当飞机在跑道上滑行或移动时。

1.3 多体系统模型

多自由度模型着重于系统内部各自由度的动态行为,而多体系统模型更关注由多个刚体或柔性体通过约束连接(如铰链、滑块、弹簧、阻尼器等)形成的整体动态特性。从应用领域来看,多自由度模型通常用于研究系统振动特性的分析中,多体系统分析在处理复杂机械系统设计和运动控制方面应用得更为广泛。

飞机起落架系统由许多机械和结构部件组成,如NLG、MLG等。在每个组件中都有各种子组件机制,可以实现各种功能。例如,与主支柱相连的缓冲器充当弹簧阻尼器,以减轻着陆过程中所经历的垂直载荷。扭力连杆组件为起落架提供扭转刚度,以防止主支柱和下轮组件之间的扭转。起落架通过侧架和拖拽支柱以及各种执行器等组件实现收放,存储在机身或机翼内。每个机制独立的动力学都被很好地理解,但多个机制之间的耦合和相互作用在建模和分析中较为复杂,因此多体系统模型也广泛地应用于飞机起落架动力学模型的建立中。多自由度系统建模需要考虑广义坐标的变化、动力学模型推导以及速度、加速度等状态变量,而利用多体商软构建动力学模型,通常考虑运动副、约束等,模型构建效率提高。

Jiang Yiyao 等^[33]通过建立包括NLG、MLG、机身、相关力单元和运动副在内的飞机滑行多体动力学模型(MBD),NLG的MBD模型如图5所示,研究了NLG扭转阻尼对飞机航向稳定性的影响,得到了飞机在不稳定方向滑行时的关键滑行参数。Wong 等^[34]将高保真的多学科设计优化技术应用于商用起落架组件,通过考虑结构和动态行为来评估重量、成本和结构性能,使用真实的输入运动信号进行MBD分析,以模拟物理系统的动态行为。

综上所述,随着考虑因素复杂程度的增加,起落架模型由最初的两质量块逐步完善为多自由度模型,以及更为复杂的多体系统模型,这些现有模型已经可以普遍描述实际模型,较为全面地反映飞机滑跑系统的实际结构。但这些模型在处理起落架与复杂外部环境的交互时仍然存在一些局限性,很少涉及飞机滑跑系统与外界不平整路面的复杂作用。

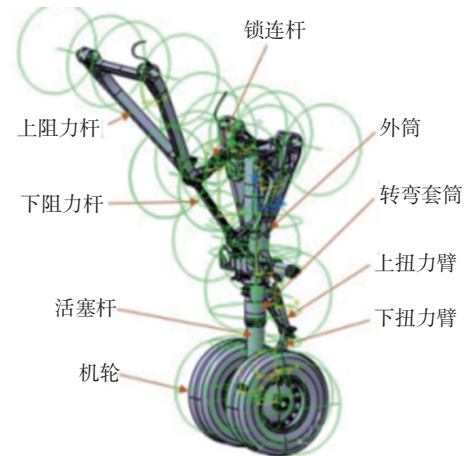


图5 NLG的MBD模型^[33]

Fig.5 MBD model of the NLG^[33]

2 不平整跑道的描述及其对飞机滑跑系统的影响分析

上述关于飞机滑跑系统动力学的建模均为确定性情形,然而,当飞机在地面滑跑时,飞机系统不可避免地会受到来自不平整跑道的随机激励的影响,因此在确定性基础上结合路况,研究随机激励对飞机滑跑系统的动力学行为是非常必要的。考虑不平整跑道在飞机滑跑系统中的描述方法,通常分为随机激励的模拟方法和道路实测的试验方法。在这两种方法的基础上,一些学者将不平整跑道的激励进行再处理,得到合理的外部载荷,以适应不同类型的问题,并从频域和时域方法的角度出发,将噪声输入系统,进而分析不平整跑道对飞机滑跑系统的影响。主要分为频域的功率谱方法和时域的谐波叠加法,前者把来自不平整跑道的随机激励以功率谱形式考虑在系统内,后者把跑道不平整度的表达形式从功率谱转化到时域的时间序列上。

2.1 不平整跑道的描述方法

2.1.1 随机激励模拟

在20世纪60年代,学者用简单的随机过程描述路面不平整度。Tung^[35]假设跑道不平度为一个均值为零的平稳高斯过程,采用摄动法和等效线性化法对非线性二自由度飞机滑跑模型的响应进行了数值计算;张明等^[36-37]建立了考虑飞机机体俯仰运动的非线性随机动力学模型,采取形状滤波器,用高斯随机过程描述跑道不平度,并利用等效线性化方法以及随机最优控制理论分析了飞机匀速和非匀速状态的响应,采用蒙特卡罗方法对白噪声进行建模,得到飞机响应随时间的变化,如图6所示,图中显示了被动与主动控制缓冲器作用下,飞机各参数的动响应对比曲线。

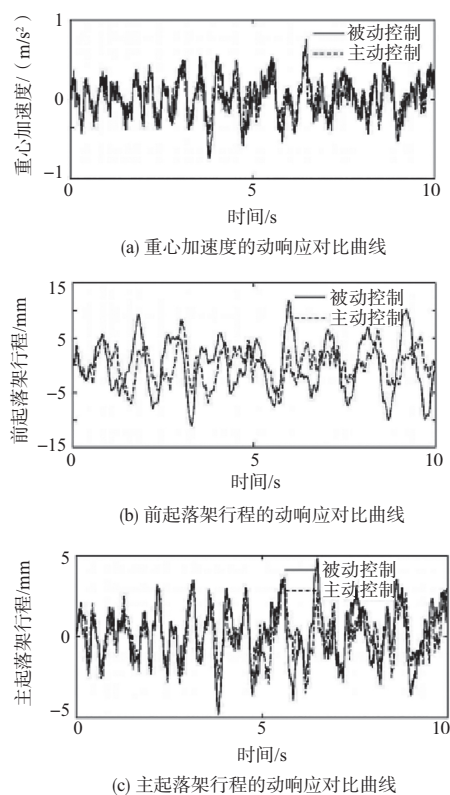


图6 被动与主动控制飞机机动响应比较^[36]
Fig.6 Comparison between dynamic responses of passive and active control aircraft^[36]

Lee 等^[38]论述了半主动控制方法用于改善乘机感觉的验证过程,采用磁流变阻尼器起落架模型和控制方法,它是一种油气式阻尼器,填充的流体在受到磁场作用时具有增加屈服应力的特性,仿真中路面采用考虑跑道特性的 Sinozuka(野冢)白噪声模型,通过该模型得到的不平整跑道路面具有随机性。

2.1.2 道路实测

随着对飞机滑跑系统研究的不断深入,研究人员更加关注对平整度的表征和分析,通过关注更符合实际跑道的道路谱,对实际道路进行详细测量,以获取更真实的不平整跑道数据。此外,由于机场跑道的平整度直接影响着飞机的起降稳定性以及飞行安全性,如何表征机场跑道的平整度的问题变得越发重要。

Qi Lin 等^[39]针对机场跑道粗糙度测量仪器无法准确测量大波长的不平整信息的问题,提出了一种准确高效的飞机跑道路面粗糙度测量方法:利用数据采集器和数据传输单元控制机器人全站仪跟踪和捕捉棱镜,记录棱镜与机器人全站仪之间的高程,得到跑道表面轮廓曲线,为飞机路面动力响应研究提供依据。

张冠超等^[40]建立了考虑非线性空气弹簧力、油液阻尼力和支柱杆摩擦力在内的二质量块起落架模型,将实测数据作为路面不平度输入,采用时域确定性方法,对飞机在不平整跑道上滑行的响应进行了探究;秦飞^[41]采用 San Francisco 28R 跑道对机体结构在起落架力作用下的动态响应进行了研究,该跑道修建于 20 世纪 60 年代前期,能较真实地模拟实际跑道。

Liu Shifu 等^[42]提出了主起落架累积冲程 (MLGCS) 指数,以评估机场跑道粗糙度。首先利用某仿真软件开发并验证了波音 737-800 飞机的虚拟样机模型,然后利用该模型预测了飞机在不平整跑道上的动态响应,并将其与用于评估道路粗糙度的国际粗糙度指数 (IRI) 进行比较,建立了起落架累积冲程 (LGCS) 模型来表示跑道粗糙度,基于跑道的实测数据,对常用的粗糙度指数进行比较,见表 1,结果表明提出的 MLGCS 指数优于波音凹凸指数和 IRI。

表 1 Pearson 系数和负相关比率^[42]
Table 1 Pearson coefficients and negative correlation ratios^[42]

评估指标		IRI	BBI	MLGCS
Pearson 系数	MGDLC	0.70	0.80	0.97
	PSA_RMS	0.69	0.82	0.90
	CGA_RMS	0.66	0.81	0.96
负相关比率/%	MGDLC	11	0	0
	PSA_RMS	14	0	0
	CGA_RMS	11	0	0

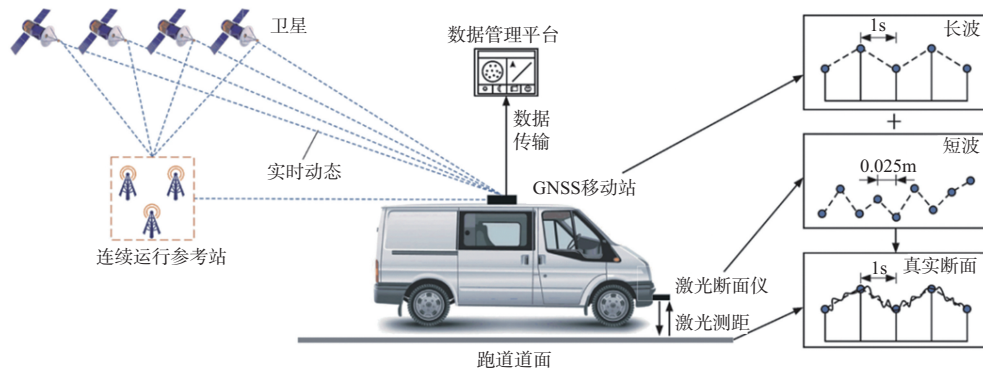
钱劲松等^[43]结合车载式激光断面仪与全球导航卫星移动定位系统,提出了一种机场跑道全波段不平整测试方法,工作原理如图 7 所示,并在济南遥墙国际机场进行了现场测试,采用重复试验与水准仪对该测试方法进行了可靠性验证;建立了波音 737-800 虚拟样机模型,进行了实测跑道不平整数据下的飞机滑跑仿真,探究了不同检测方法、滑跑速度、飞机位置下实测道面数据特征对飞机振动响应的影响,研究结果表明,所提出的测试方法可获得道面全波段不平整数据,说明仅考虑道面长波或短波不平整将低估飞机在实际不平整条件下的振动响应。

通过道路实测来描述跑道不平整度具有准确性高的优点,但这种方法获取试验数据的成本高且实施难度大,尤其是在极端或非规范条件下获取数据更为困难。

2.2 不平整跑道对飞机滑跑系统影响的动力学分析方法

2.2.1 功率谱方法

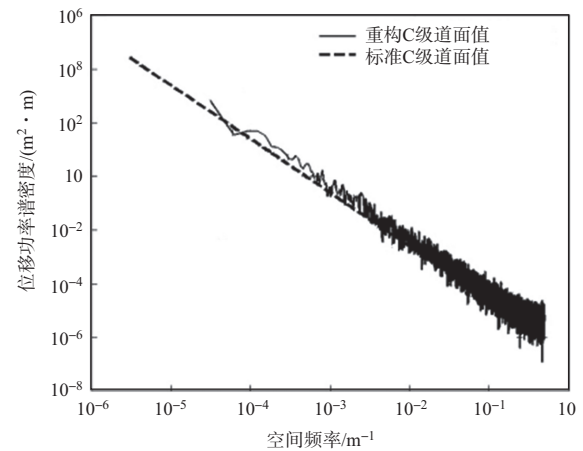
对道路进行实测的方法准确度较高,但不具有普遍性。

图7 全波段检测方法的工作原理^[43]Fig.7 Working principle of all-wave measuring method^[43]

功率谱方法将随机激励表达为功率谱形式,在作出随机过程的平稳性、阻尼当量化和刚度线性化等假定下,列出运动微分方程式,在频域内求解各响应参数,由于飞机具有其固定频率,可以以功率谱曲线表征跑道不平度并推导滑行随机载荷谱。功率谱密度函数通过不同波长下高程的方差来表征道面断面的平均不平度^[6],进行起落架结构相关研究,如寿命分析等。

刘锐琛^[5]从理论上验证利用功率谱曲线刻画跑道的不平度是合理的,并运用功率谱方法对线性飞机滑跑模型的响应进行了讨论;刘莉^[44]基于二自由度弹簧质量块线性飞机模型,将跑道不平度认为是符合正态分布的平稳随机过程,利用功率谱方法对起落架各参数对飞机地面滑跑的影响进行了探究;杨国柱等^[45]将跑道不平度假设为平稳随机过程,对飞机滑跑中的非线性特性进行线性化处理,利用谱分析方法讨论了飞机系统的滑行响应问题;Shi Xudong等^[46]引入路面功率谱密度和离散傅里叶反变换来模拟跑道表面粗糙度作为激励输入,通过与某机场跑道表面粗糙度测量数据的对比,验证了所建立模型的合理性。

学者们对道路谱进行了改进,使其更能符合实际跑道状况。聂宏^[47]提出了基于频域的功率谱密度法,对起落架缓冲器的非线性参数进行线性化,分析了不同滑跑速度下飞机重心过载响应的变化规律;魏保立等^[48]采用振动理论,建立飞机-道面结构的耦合振动分析模型,对飞机滑行载荷所产生的振动作用力进行了计算,并对道面-基础结构在飞机滑行载荷作用下的工况进行了随机振动响应分析,其中通过功率谱密度函数进行时域信号重构,并与C级标准路面功率谱进行对比,如图8所示;冷小磊等^[49]将跑道不平度的输入视为符合正态分布的随机过程,通过演变谱分析法对二质量块飞机起落架线性模型的地面滑跑响应进行了探究。

图8 C级道面不平度功率谱图^[48]Fig.8 C grade pavement roughness PSD^[48]

2.2.2 谐波叠加法

功率谱密度方法是从频域角度出发,分析系统的动力学响应,并且是对非线性因素进行线性化处理,但这种处理方法在一定程度上忽略了非线性因素对系统的影响。之后有学者采用了谐波叠加法,将一系列相位不同的正弦波进行叠加,把路面不平度表达形式从功率谱转化到时域的时间序列上。基于此,进一步对飞机在不平整跑道上的滑跑响应和机场道面平整度评价方面进行了大量的研究^[50-57]。

旷刚^[50]针对现代飞机滑跑跑道特性,从空间功率谱密度函数出发,基于某仿真平台,采用谐波叠加法和逆傅里叶变换法构建了一种三维跑道,如图9所示,随后进行了飞机着陆的适坠仿真,结果验证了起落架整体布局的参数的合理性。贾腾^[51]针对非线性二自由度飞机滑跑模型,利用谐波叠加法对路面不平度在时域上的变化进行描述,对系统的响应均值、均方值、自相关函数进行了分析。颜光锋^[52]采用表征路面不平整程度的不同等级公路的功率谱密度函

数,通过时域随机微分方程对路面不平度进行刻画,分析了不同等级路面粗糙度对系统响应的影响。以上学者的研究通过结合谐波叠加法和其他特定方法,重点分析了飞机滑跑系统的各项指标对不平整跑道的响应方式,进一步细化了非线性因素的影响。

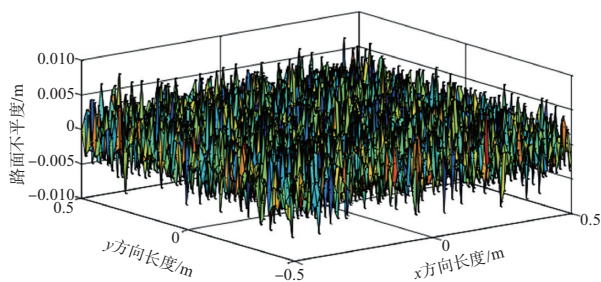


图9 谐波叠加法模拟的三维跑道模型^[50]

Fig.9 Three-dimensional runway model simulated by the harmonic superposition method^[50]

郝丙飞等^[53]根据经典谱分析理论,基于谐波叠加法建立了随机路面模型,并对各种典型随机路面环境进行了模拟(E级路面模型见图10),结果验证了该模型的可靠性。张艳红^[54]在考虑跑道长波和短波组成的基础上,提出了一种新的跑道不平度指标,即机场道面不平度指数(APRI)。然后结合谐波叠加法编制了不同等级跑道的三维模型(简单叠加原理见图11),用于仿真模拟,分析结果展示了新的不平度指标APRI较传统指标IRI的优越性。潘慧^[55]考虑在飞机起落架受到跑道非一致激励的条件下,提出了一种新的跑道平整度指标,即驾驶舱综合振动总值。然后基于跑道横向平整度不一致的现实情况,利用谐波叠加法构造出了不同等级的三维非一致激励跑道,最后着重分析了柔性飞机模型对该跑道的动力学响应。解镇州^[56]利用谐波叠加原理构建了参数化跑道轮廓数据集,求解振动方程及飞机重心处垂向加速度均方根,提出了一套在不同滑行速度下,基于波长的振幅评价标准,最后通过判断飞机超越安全区间的边界,对跑道平整度做出迅速且精准的评价。由此可见,利用谐波叠加法可以描述出不同类型的跑道特征,并基于此进行模拟仿真,从而验证新的不平度指标的可靠性与优越性。

时域角度的方法可以弥补功率谱方法的一些缺陷,如平稳性、等效阻尼、线性刚度等假设的不足,它将跑道不平度作为隐函数输入,通过严格的解析方法求解飞机滑行的自由模态方程,包括非线性系统。但也存在局限性,该方法适用于计算地面运动(如着陆冲击、滑行、转弯和起飞)

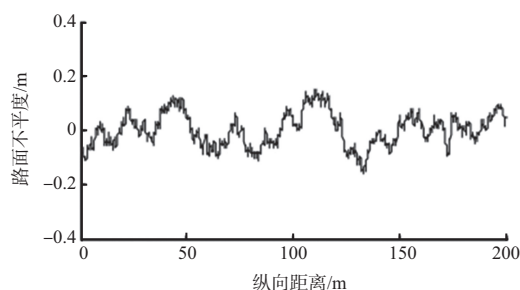


图10 E级路面模型^[53]

Fig.10 Class E road model^[53]

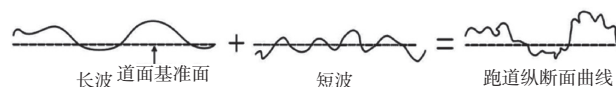


图11 谐波叠加法模拟道面不平状态示意图^[54]

Fig.11 Schematic diagram of simulating the road surface unevenness using the harmonic superposition method^[54]

的峰值响应,每次计算相当于一个子样本,需要大量采样才能得出统计结果。因此,其计算量远远超过功率谱方法^[57]。

3 结论及展望

本文以不平整跑道激励下飞机滑跑系统为研究对象,首先介绍飞机滑跑动力学的确定性模型,而后考虑在不平整路面上飞机所受激励特性,梳理了描述路面不平度的方法,为适应高性能起落架研制要求,应更深入地开展飞机滑跑动力学建模等相关研究工作。

在飞机滑跑系统的本体模型的构建方面,二质量块模型、多自由度模型以及多体系统模型已被广泛应用于飞机滑跑系统的研究,这三种确定性模型各有优势,二质量块模型简化了飞机起落架结构,适合两个质量块的运动分析;多自由度模型考虑机身的动态性能和弹性形变,适合进行飞机起落架结构的应力应变分析以及疲劳分析;多体系统模型侧重研究飞机起落架系统结构部件之间的耦合和相互作用,适合分析起落架结构和动态行为。

在考虑不平整跑道对于飞机滑跑系统的激励方面,学者们通常通过随机激励的模拟方法和道路实测的试验方法对不平整路面进行描述,而后通过解析分析、数值计算和仿真分析等手段对起落架着陆滑跑阶段的动力学特性进行了研究。频域角度的功率谱方法和时域角度的谐波叠加法的应用较为广泛。功率谱方法对于刻画跑道的不平度具有普遍性,但在一定程度上会忽略非线性因素对系统的影响,谐波叠加法把跑道不平度的表达形式从功率谱转化到时域

的时间序列上,可以考虑非线性系统,弥补了功率谱方法的缺陷,但是计算量较大。

二质量块模型、多自由度模型以及多体系统模型大多对模型进行了简化。朱晨辰等^[58]认为接下来的研究应该细化飞机滑跑模型,考虑温度对起落架缓冲系统的影响,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;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。强国彦等^[59]研究起落架机构在上述极端气候条件下的环境适应能力,基于仿真平台建立民机起落架多体动力学模型,考虑重力、冰层黏滞力、摩擦力对机构运动的影响,仿真分析了不同温度、不同冰型下的起落架机构的驱动力矩。

由于飞机性能的不断发展(速度更快,质量更大),董成^[60]考虑起落架系统轮胎非线性特性以及时滞因素,利用非线性振动理论和时滞主动控制技术来设计起落架的减振结构和优化减振性能,认为未来可以设计一种多用途时滞控制非线性起落架缓冲器,在飞机起降滑行时起落架作为隔振器进行垂向减振和水平减摆。牛泽岷等^[61]在多体动力学软件中建立了轮撬式起落架飞机全机着陆滑跑动力学模型,基于高斯白噪声经典随机过程建立随机道面激励模型,研究了飞机在模糊PID半主动控制缓冲器控制下的滑行振动特性,发现该控制律能够有效减小机体垂向振动位移和垂向载荷。因此,发展更精确的轮胎分析模型,在起落架滑跑动力学建模中引入非线性动力学分析方法、基于数据的智能学习方法,研制新概念缓冲与减振系统是适应起落架动力学发展需求的研究方向。

飞行器在大气中的飞行过程因为大气中风速风向、自身结构尺寸等各种复杂不确定因素的相互作用而相互影响,其对于飞行器飞行中的状态参数有很大的不确定性关系。陈伟^[62]分析了飞行器六自由度模型全局敏感性,认为各个不确定性参数在一定范围内处于均匀分布的状态。因此,除了不平整跑道的外部随机干扰,飞机滑跑系统内在的结构参数的不确定性也可加以考虑。

因此建议飞机滑跑动力学模型分析研究关注方向如下:(1)发展完善飞机滑跑动力学模型,考虑温度、侧风、湿滑跑道等地面环境影响。(2)将非线性动力学分析方法(时滞影响、分叉分析、跑道非线性模型及指标构建等)、基于数据的智能学习方法应用于起落架滑跑动力学分析,研制新概念缓冲与减振系统,提高起落架动力学品质。(3)研究环境、机体、起落架耦合不确定性影响,分析飞机起降系统全

局动力学特性,提高起落架地面滑跑安全性与可靠性。综上所述,飞机滑跑问题的研究具有广阔的发展和应用前景,值得学者更加深入地开展相关研究工作。

AST

参考文献

- [1] Mangili A, Gendreau M A. Transmission of infectious diseases during commercial air travel[J]. *Lancet*, 2005, 365(9463): 989-996.
- [2] Sheikhpour H, Shirazian G, Safa E. An approach on take-off and landing related aircraft accidents involving new considerations[C]. *International Conference on Traffic and Transportation Engineering*, 2012.
- [3] Van Es G. Running out of runway: Analysis of 35 Years of landing-overrun accidents[C]. *Joint Meeting of the FSF 58th Annual International Air Safety Seminar, IASS and IFA 35th International Conference and IATA*, 2005:149-165.
- [4] 方同. 工程随机振动[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
Fang Tong. *Engineering random vibrations*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [5] 刘锐琛. 飞机地面滑行动力响应分析[J]. *航空学报*, 1987, 8(12): 601-609.
Liu Ruichen. The analysis for dynamic response during airplane taxiing[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1987, 8(12): 601-609. (in Chinese)
- [6] 袁捷, 吴逸凡, 张哲恺, 等. 不平整激励下飞机滑跑动力响应的影响因素[J]. *中国民航大学学报*, 2021, 39(1): 34-39.
Yuan Jie, Wu Yifan, Zhang Zhekai, et al. Influencing factors of aircraft dynamic response under unevenness excitation[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2021, 39(1): 34-39. (in Chinese)
- [7] 王旭亮, 聂宏, 薛彩军, 等. 飞机起落架疲劳与可靠性技术研究综述[C]. *大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会2007年学术年会*, 2007: 125-130.
Wang Xuliang, Nie Hong, Xue Caijun, et al. A review of aircraft landing gear fatigue and reliability technology research [C]. *High-level Forum on Key Technologies for Large Aircraft and the 2007 Annual Conference of the Aviation Society of China*, 2007: 125-130. (in Chinese)
- [8] Zhou Z, Griffin M J. Response of the seated human body to whole-body vertical vibration: discomfort caused by sinusoidal vibration[J]. *Ergonomics*, 2014, 57(5): 714-732.

- [9] Zhou Z, Griffin M J. Response of the seated human body to whole-body vertical vibration: discomfort caused by mechanical shocks[J]. *Ergonomics*, 2017, 60(3): 347-357.
- [10] 贾玉红, 何庆芝, 杨国柱. 主动控制起落架滑行性能分析[J]. *航空学报*, 1999(6): 545-548.
- Jia Yuhong, He Qingzhi, Yang Guozhu. Taxiing performance analysis of active control of landing gear[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1999(6): 545-548. (in Chinese)
- [11] 郭丞皓, 于劲松, 宋悦, 等. 基于数字孪生的飞机起落架健康管理技术[J]. *航空学报*, 2023, 44(11): 180-198.
- Guo Chenghao, Yu Jinsong, Song Yue, et al. Application of digital twin-based aircraft landing gear health management technology[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(11): 180-198. (in Chinese)
- [12] 陈虎. 飞机地面滑跑随机振动响应分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- Chen Hu. Random vibration response analysis of aircraft ground sliding[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [13] Schlaefke K. Buffered and unbuffered impact on landing gear [J]. *Technische Berichte*, 1943, 10: 129-133.
- [14] Kochanowsky W. Landing and taxiing impacts on oleo shock struts[J]. *Deutsche Luftfahrt Forschung*, 1944, 32(7): 465-473.
- [15] 刘小川, 刘冲冲, 牟让科. 飞机起落架系统摆振动力学研究进展[J]. *航空学报*, 2022, 43(6): 106-121.
- Liu Xiaochuan, Liu Chongchong, Mou Rangke. Research progress on shimmy dynamics of aircraft landing gear systems [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(6): 106-121. (in Chinese)
- [16] Schlaefke K. On force-deflection diagrams of airplane shock absorber struts: first, second, and third partial reports[R]. NACA-TM-1373, 1954.
- [17] 吴卫国, 孙建桥, 冷永刚, 等. 飞机起落架动力学建模及着陆随机响应分析[J]. *航空学报*, 2016, 37(4): 1228-1239.
- Wu Weiguo, Sun Jianqiao, Leng Yonggang, et al. Dynamic modeling of landing gear and its random response analysis[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(4): 1228-1239. (in Chinese)
- [18] Yin Q Z, Sun H, Li T, et al. Design and performance of directional rectification control system in an aircraft with a novel type of wheel-ski landing gear[J]. *Aeronautical Journal*, 2023, 127(1310): 651-675.
- [19] 程国勇, 侯栋文, 黄旭栋. 基于动荷载系数限值的道面平整度分析技术[J]. *中国民航大学学报*, 2016, 34(4): 59-64.
- Cheng Guoyong, Hou Dongwen, Huang Xudong. Analysing technology of pavement roughness based on dynamic load factor limits[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2016, 34(4): 59-64. (in Chinese)
- [20] 袁心, 高振兴. 民机近地面飞行建模与起降阶段事故复现研究[J]. *飞行力学*, 2015, 33(3): 269-273+279.
- Yuan Xin, Gao Zhenxing. Research on civil aircraft near-ground flight modeling and accident recurrence during takeoff and landing[J]. *Flight Dynamics*, 2015, 33(3): 269-273+279. (in Chinese)
- [21] 齐浩, 王泽河, 朱华娟, 等. 飞机起落架落震动力学建模及仿真分析[J]. *机床与液压*, 2021, 49(8): 141-146.
- Qi Hao, Wang Zehe, Zhu Huajuan, et al. Modeling and simulation analysis of landing motion of aircraft landing gear [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2021, 49(8): 141-146. (in Chinese)
- [22] 张国健. 飞机起落架建模理论和仿真方法的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- Zhang Guojian. Study on the modeling theory and simulation method of aircraft landing gear[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [23] Liu Shifu, Ling Jianming, Tian Yu, et al. Random vibration analysis of a coupled aircraft/runway modeled system for runway evaluation[J]. *Sustainability*, 2022, 14(5): 2815.
- [24] Liang Taotao, Yin Qiaozhi, Fang Wuguan, et al. The maximum taxiing safe set of the wheel-skid aircraft under optimal control of rudder[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2021, 235(15): 2274-2287.
- [25] 董倩, 王建华, 张献民. 飞机-跑道耦合作用下刚性跑道振动响应研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(13): 64-72.
- Dong Qian, Wang Jianhua, Zhang Xianmin. Vibration response of rigid runway under aircraft-runway coupling[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(13): 64-72. (in Chinese)
- [26] 刘艳. 飞机起落架系统动力学建模及分析[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.

- Liu Yan. Dynamic modeling and analysis of aircraft landing gear system[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020. (in Chinese)
- [27] Hu Guizhang, Li Peigen, Xia Haiting, et al. Study of the dynamic response of a rigid runway with different void states during aircraft taxiing[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(15): 7465.
- [28] Wang Yong, Jin Xianyu, Yin Yin. Using nonlinear feedback control to improve aircraft nose landing gear shimmy performance[J]. *Meccanica*, 2022, 57(9): 2395-2411.
- [29] 刘诗福, 凌建明, 袁捷, 等. 基于竖向加速度响应的机场道面平整度评价及 IRI 标准反演[J]. *公路交通科技*, 2017, 34(5): 57-64.
- Liu Shifu, Ling Jianming, Yuan Jie, et al. Evaluation and IRI criteria inversion of airport pavement roughness based on vertical acceleration response[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2017, 34(5): 57-64. (in Chinese)
- [30] 程国勇, 侯栋文, 黄旭栋. 基于飞机竖向加速度的道面不平度限值标准研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(9): 166-171.
- Cheng Guoyong, Hou Dongwen, Huang Xudong. Pavement roughness limit value standard based on aircraft vertical acceleration[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(9): 166-171. (in Chinese)
- [31] Huang Mingyang, Nie Hong, Zhang Ming. Analysis of ground handling characteristic of aircraft with electric taxi system[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2019, 233(6): 1546-1561.
- [32] Yang Liuchuan, Wei Xiaogang, Fa Jingyu, et al. Numerical study of influencing factors of safety and stability of tunnel structure under airport runway[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(20): 10432.
- [33] Jiang Yiyao, Feng Guang, Liu Panglun, et al. Influence of nose landing gear torsional damping on the stability of aircraft taxiing direction[J]. *Aerospace*, 2022, 9(11): 729.
- [34] Wong J, Ryan L, Kim I Y. Design optimization of aircraft landing gear assembly under dynamic loading[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2018, 57: 1357-1375.
- [35] Tung C. The effects of runway roughness on the dynamic response of airplanes[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1967, 5(1): 164-172.
- [36] 张明, 聂宏. 弹性飞机地面滑行随机最优控制[J]. *航空学报*, 2009, 30(8): 1405-1412.
- Zhang Ming, Nie Hong. Stochastic optimal control of flexible aircraft taxiing[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(8): 1405-1412. (in Chinese)
- [37] Zhang Ming, Nie Hong, Zhu Rupeng. Stochastic optimal control of flexible aircraft taxiing at constant or variable velocity[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2010, 62(1): 485-497.
- [38] Lee H S, Jang D S, Hwang J H. Monte Carlo simulation of MR damper landing gear taxiing mode under nonstationary random excitation[J]. *Journal of Aerospace System Engineering*, 2020, 14(4): 10-17.
- [39] Qi Lin, Xie Zhenzhou, Liu Chunmei, et al. Accurate and efficient surface profile measurement of the airport runway[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2022, 24(2): 1-11.
- [40] 张冠超, 贾玉红. 飞机滑行动态响应分析[J]. *飞机设计*, 2005(4): 14-17.
- Zhang Guanchao, Jia Yuhong. Analysis of dynamic in responses of aircraft in landing rolling[J]. *Aircraft Design*, 2005(4): 14-17. (in Chinese)
- [41] 秦飞. 飞机着陆滑跑响应分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- Qin Fei. Analytical dynamic responses of aeroplane in landing and taxiing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [42] Liu Shifu, Ling Jianming, Tian Yu, et al. Assessment of aircraft landing gear cumulative stroke to develop a new runway roughness evaluation index[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2022, 23(10): 3609-3620.
- [43] 钱劲松, 岑业波, 刘东亮, 等. 机场跑道全波段不平整测试方法[J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21(5): 84-93.
- Qian Jinsong, Cen Yebo, Liu Dongliang, et al. Measurement method of all-wave airport runway roughness[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2021, 21(5): 84-93. (in Chinese)
- [44] 刘莉, 杨国柱, 何庆芝. 起落架缓冲系统参数对飞机滑行动态响应的影响[J]. *航空学报*, 1992, 13(6): 8.
- Liu Li, Yang Guozhu, He Qingzhi. Influences of landing gear system on dynamic response in aircraft during taxiing[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1992, 13(6): 8. (in Chinese)

- [45] 刘莉, 杨国柱, 何庆芝. 飞机地面滑行随机振动分析[J]. 航空学报, 1993, 14(4): 126-132.
- Liu Li, Yang Guozhu, He Qingzhi. Analysis of statistical vibration in aircraft during taxiing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1993, 14(4): 126-132. (in Chinese)
- [46] Shi Xudong, Shi Shouwen, Li Jianli, et al. Research on modeling method of runway frictional coefficient measuring vehicle based on impedance diagrams[J]. Advanced Materials Research, 2011, 214: 133-137.
- [47] 聂宏. 基于功率谱密度法飞机地面变速滑跑动力学分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2000(1): 64-70.
- Nie Hong. Analysis for aircraft taxiing at variable velocity on unevenness runway by the power spectral density method[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2000(1): 64-70. (in Chinese)
- [48] 魏保立, 郭成超, 崔璨. 飞机滑行载荷对机场道面的随机振动效应分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(16): 101-106.
- Wei Baoli, Guo Chengchao, Cui Can. Analysis of random vibration effect of aircraft taxiing load on airport pavement [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(16): 101-106. (in Chinese)
- [49] 赵莹芳, 冷小磊. 飞机地面变速滑跑演变随机响应分析[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 91-95.
- Zhao Yingfang, Leng Xiaolei. Evolutionary random analysis for aircraft taxiing at variable velocity on unevenness runway[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2017, 45(3): 91-95. (in Chinese)
- [50] 旷刚. 飞机适坠性与滑跑响应研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- Kuang Gang. The research on crashworthiness simulation and taxiing-induced dynamic response of the aircraft[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [51] 贾腾. 飞机起落架随机动力响应的数值分析[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- Jia Teng. Numerical analysis of random dynamics response of landing gear of the aircraft[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [52] 颜光锋. 强非线性坦克模型随机振动的随机最优控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- Yan Guangfeng. Stochastic optimal control of random vibration of strongly nonlinear tank model[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)
- [53] 郝丙飞, 王红岩, 芮强, 等. 坦克多体系统动力学建模及模型试验验证[J]. 中国机械工程, 2018, 29(4): 429-433+440.
- Hao Bingfei, Wang Hongyan, Rui Qiang, et al. Dynamics modeling and model test verification of tank multi-body systems[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(4): 429-433+440. (in Chinese)
- [54] 张艳红. 基于飞机长轴距的道面不平整度的研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2019.
- Zhang Yanhong. Research on the unevenness of the pavement based on the long wheelbase of the aircraft[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2019. (in Chinese)
- [55] 潘慧. 基于非一致激励飞机动力模型的跑道平整度指标研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2022.
- Pan Hui. Research on the roughness index of runway based on non-uniform excitation of aircraft dynamics model[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2022. (in Chinese)
- [56] 解镇州. 基于时频分析的机场道面平整度评价标准研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2022.
- Xie Zhenzhou. Research on airport runway roughness evaluation standards based on time-frequency analysis[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2022. (in Chinese)
- [57] Zhang Hao, Jiao Zongxia, Shang Yaoxing, et al. Ground maneuver for front-wheel drive aircraft via deep reinforcement learning [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(10): 166-176.
- [58] 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(1): 1-11.
- 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(1): 1-11. (in Chinese)
- [59] 强国彦, 薛小锋, 冯蕴雯. 民机起落架机构破冰动力学仿真分析方法[J]. 航空科学技术, 2023, 34(8): 44-50.
- Qiang Guoyan, Xue Xiaofeng, Feng Yunwen. Dynamic simulation analysis method for icebreaking of landing gear mechanism of civil aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(8): 44-50. (in Chinese)
- [60] 董成. 非线性与时滞反馈控制理论在起落架上的应用[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.

- Dong Cheng. Application of nonlinear and delayed feedback control theory on landing gear structure[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019. (in Chinese)
- [61] 牛泽岷, 尹乔之, 孙浩, 等. 模糊PID控制对轮橇式起落架飞机滑行减振的影响研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(10): 74-83.
- Niu Zemin, Yin Qiaozhi, Sun Hao, et al. Research on the influence of fuzzy-PID control on taxiing vibration suppression of Wheel-ski landing gear aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(10): 74-83. (in Chinese)
- [62] 陈伟. 基于混沌多项式展开的飞行器飞行力学参数不确定性分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.
- Chen Wei. Uncertainty analysis of aircraft flight mechanics parameters based on chaotic polynomial expansion[D]. Hunan: Hunan University, 2022. (in Chinese)

Review of Dynamic Model of Aircraft Taxiing on Uneven Runways

Zhang Ying^{1,2}, Qin Ruobing^{1,2}, Jin Zhengrong^{1,2}, Liu Chongchong³, Shi Xuecheng^{1,2}, Jia Wantao^{1,2}

1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China

2. MOE Key Laboratory for Complexity Science in Aerospace, Xi'an 710072, China

3. National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China

Abstract: The random vibration caused by the unevenness of the runway will not only affect the comfort of passengers during the landing, but also cause the damage of the landing gear structure and bring safety risks. Therefore, it is of great theoretical value and practical significance to study the dynamic behavior of the aircraft running system on the uneven runway. Based on the structural characteristics of the dynamic model of the aircraft skid system, this paper focuses on the development of the nonlinear aircraft skid system from the two-mass model, the multi-degree of freedom model to the multi-body model. Considering the influence of the uneven runway on the system, the description method of the uneven runway is sorted out in detail. Then, in order to obtain reasonable external load, the influence of the uneven runway on the aircraft skid system is analyzed from the power spectrum method in the frequency domain and the harmonic superposition method in the time domain. Finally, based on the development of aircraft skid system and the problems faced in the process of skid, the future research direction of complex structure and environment on aircraft skid dynamics modeling and analysis is summarized.

Key Words: aircraft taxiing; landing gear; stochastic dynamics; random vibration; power spectral density

Received: 2024-03-22; **Revised:** 2024-06-27; **Accepted:** 2024-09-03

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (12172286, 11872306); Aeronautical Science Foundation of China (201941053004)