

文章编号: 1674-8190(2023)06-056-07

轮胎参数对双轮式起落架刹车耦合振动影响研究

冯广^{1,2}, 尹乔之^{3,4}, 杨乐¹, 张颂旻^{3,4}, 宋佳翼^{3,4}

(1. 中航飞机起落架有限责任公司, 长沙 410200)

(2. 中南大学机电工程学院, 长沙 410083)

(3. 南京航空航天大学 航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016)

(4. 南京航空航天大学 飞行器先进设计技术国防重点学科实验室, 南京 210016)

摘要: 目前对飞机起落架低频刹车耦合振动问题的研究主要停留在考虑轮胎参数影响的起落架纵向单自由度振动特性分析, 对于多自由度低频刹车耦合振动的特性研究不足。基于 Simcenter 3D 动力学分析软件建立双轮支柱式起落架刚柔耦合整机滑跑刹车分析模型, 研究轮胎竖向刚度和侧偏刚度对双轮支柱式起落架低频刹车纵向、横向和扭转的多自由度耦合振动的影响。结果表明: 轮胎的竖向刚度对起落架横向和扭转方向上的振动影响较大, 轮胎竖向刚度变化 33%, 横向和扭转方向上的振动变化 5% 左右; 轮胎的侧偏刚度对起落架低频刹车横向上的振动影响较大, 轮胎侧偏刚度变化 33%, 横向上的振动变化 15% 左右。

关键词: 双轮起落架; 刚柔耦合模型; 耦合振动; 非对称刹车

中图分类号: V226

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.06.06

Research on the influence of tire parameters on coupled brake-induced vibration of telescopic landing gear with two wheels

FENG Guang^{1,2}, YIN Qiaozhi^{3,4}, YANG Le¹, ZHANG Songyang^{3,4}, SONG Jiayi^{3,4}

(1. AVIC Landing-gear Advanced Manufacturing Co., Changsha 410200, China)

(2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

(3. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(4. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-Advanced Design Technology of Flight Vehicle, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Currently, the research on the low-frequency brake coupling vibration of aircraft landing gear mainly focuses on the analysis of the longitudinal single degree of freedom vibration characteristics of landing gear considering the influence of tire parameters, but the research on the multi-degree-of-freedom low-frequency brake coupling vibration characteristic is relatively lacking. A taxiing and braking analysis model for rigid-flexible coupling of two-wheel strut landing gear is established in the Simcenter 3D dynamics analysis software. The effect of wheel vertical stiffness and cornering stiffness on multi-freedom coupling vibration of telescopic landing gear with two wheels is studied. The results show that the vertical stiffness of the tire is of a great influence on the vibration of the landing gear in the lateral and torsional direction. The vertical stiffness of the tire changes by 33% and the vibration in the lateral and torsional direction changes by about 5%. The cornering stiffness of the tire is of a great influence on the vibration of the landing gear in the lateral. The cornering stiffness of the tire changes by 33% and the vibration in the lateral direction changes by about 15%.

Key words: landing gear with two wheels; rigid-flexible coupling model; coupled vibration; asymmetric brake

收稿日期: 2022-09-20; 修回日期: 2022-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(52375102); 航空科学基金(202000410520002); 中国博士后科学基金(2021M691565); 中央高校基本科研业务费专项资金(NS2023005); 南京航空航天大学前瞻布局科研专项资金; 江苏高校优势学科建设工程资助项目

通信作者: 尹乔之, yinqiaozhi@nuaa.edu.cn

引用格式: 冯广, 尹乔之, 杨乐, 等. 轮胎参数对双轮式起落架刹车耦合振动影响研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(6): 56-62.

FENG Guang, YIN Qiaozhi, YANG Le, et al. Research on the influence of tire parameters on coupled brake-induced vibration of telescopic landing gear with two wheels[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(6): 56-62. (in Chinese)

0 引言

飞机起落架刹车诱导振动现象常出现于飞机滑跑刹车过程中,根据振动频率的不同可将其划分为低频振动、中高频振动和高频振动^[1]。对于双轮支柱式起落架在非对称刹车的情况下,除了在纵向是会出现起落架抖振现象,还会出现与前起落架摆振现象类似的横向和扭转的耦合振动。

陈帅等^[2]通过双轮支柱式起落架多体动力学模型,研究了起落架结构参数和刹车参数对起落架多自由度耦合振动的影响;杜晓琼等^[3]建立了用于振动响应的双轮支柱式起落架刚柔耦合精确模型,研究了不同刹车控制律下的刹车效果和起落架振动特性。纵向、横向和扭转三个自由度上的振动相互耦合形成了起落架低频刹车耦合振动,这些振动不仅会影响起落架支柱的疲劳寿命、结构强度和飞机的刹车效率^[4-5],还会造成飞机爆胎、起落架折断等意外发生^[6]。因此,针对飞机起落架低频刹车耦合振动的研究十分必要,研究结果可为飞机初始设计时选择刹车机轮参数提供参考,提高飞机刹车机轮设计的效率。

对于飞机主起落架纵向振动特性的研究,张陵等^[7-8]通过建立双轮支柱式起落架动力学分析模型,研究缓冲器结构参数和轮胎变形对起落架纵向抖振动态特性的影响;库玉鳌^[9]通过建立起落架结构参数、轮胎参数以及刹车参数之间的关系表达式,分析飞机刹车与振动的相互影响,从整体上进行优化以抑制起落架的抖振现象;K. Balasubramanian等^[10]采用等尺度缩小的起落架(Reduced Scale Landing Gear,简称RSLG)模型研究了起落架结构参数对抖振现象的影响;K. V. Bagrov^[11]将起落架支柱和缓冲器模型简化为梁模型来描述其弹性特性和缓冲特性,并通过该模型研究起落架抖振现象;尹乔之等^[12-13]建立了半轴支柱式起落架刚柔耦合模型,对不同防滑刹车系统参数、起落架结构参数和轮胎参数进行参数敏感性分析,探究不同参数对主起落架纵向振动的影响,指出起落架抖振与刹车效率存在一定的平衡关系。对于双轮支柱式起落架由于非对称刹车引起的类似于摆振形式的横向和扭转方向振动,可以参考前人对起落架摆振的研究成果。周进雄等^[14-15]通过数学模型分析了机轮转动惯量、起落架支柱侧倾刚度等参数对飞机摆振特性的影响;冯广等^[16-17]通过建

立柱式前起落架摆振非线性模型,分析了轮胎侧弯刚度、扭转刚度以及系统刚度对前起落架摆振的影响规律。上述文献主要针对起落架纵向振动特性和起落架摆振特性进行了研究,鲜有关于轮胎参数对双轮支柱式起落架多自由度低频刹车耦合振动的研究。

本文基于Simcenter 3D动力学分析软件^[18]建立双轮支柱式起落架飞机地面滑跑刹车模型,基于此模型对起落架的左右轮施加非对称刹车力矩,研究轮胎参数对双轮支柱式起落架低频刹车耦合振动特性的影响。

1 飞机滑跑刹车动力学模型

在Simcenter 3D动力学分析软件中建立了考虑起落架缓冲力、轮胎力、飞机机身重力和刹车力矩的双轮支柱式起落架六自由度模型,其中起落架缓冲器模型为油气式缓冲器,缓冲力主要有油液阻尼力、空气弹簧力和结构限制力^[19]。起落架轮胎模型为考虑轮胎侧偏特性的基本轮胎模型,轮胎力主要包括轮胎纵向力、横向力和竖向力。刹车力矩根据刹车电流的大小进行变化并施加在机轮上,飞机机身重力则集中施加在飞机重心处。主起落架模型主要包括:侧撑杆、锁撑杆、起落架缓冲器、活塞杆、扭力臂等部件。将建立的主起落架模型、前起落架模型组合,形成飞机滑跑刹车模型,如图1所示,主起落架和前起落架与飞机重心通过固定副进行连接。为研究双轮支柱式起落架低频刹车耦合振动,还需对起落架缓冲器外筒、活塞杆、侧撑杆以及扭力臂进行柔性化处理,以提高仿真的真实性。

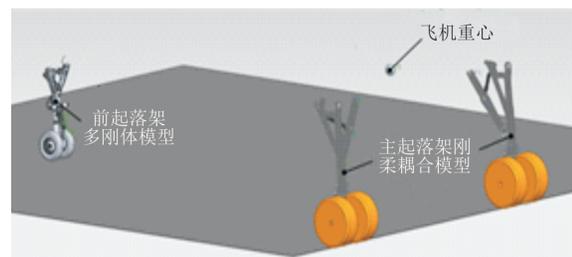


图1 飞机滑跑刹车动力学模型

Fig. 1 Dynamic model of aircraft braking

1.1 飞机机轮模型

本文利用Simcenter 3D中的基本轮胎模型建立仿真所需的轮胎模型,轮胎的基本属性如滚转

半径、轮胎摩擦系数、竖向刚度、竖向阻尼以及侧偏刚度均可通过 Simcenter 3D 中的车辆组件模块进行自定义。通过改变上述部分参数以研究轮胎参数对双轮支柱式起落架多自由度耦合振动特性的影响。

在飞机滑跑刹车的过程中,机轮的受力如图 2 所示,机轮与滑跑路面之间会产生摩擦力 F_f ,摩擦力又会产生结合力矩 M_f ,机轮内部的刹车盘会根据刹车电流 I_b 的大小控制液压作动筒将动静盘进行不同程度的压紧,动静盘之间摩擦产生飞机刹车所需的刹车力矩 M_b ,刹车力矩将直接作用在机轮与轮轴间的旋转运动副上,相关计算如式(1)~式(6)所示。

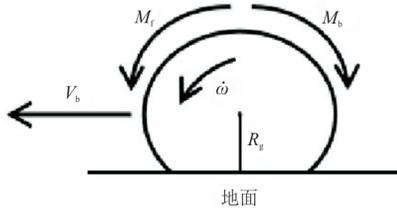


图 2 机轮转动力矩示意图

Fig. 2 Diagram of tire rotation moment

$$\dot{\omega} = (M_f - M_b) / J \quad (1)$$

$$M_f = F_f \cdot R_g \quad (2)$$

$$F_f = N \cdot \mu_f \quad (3)$$

$$F_b = I_b \cdot k \quad (4)$$

$$M_b = F_b \cdot \mu_b \cdot R_{\text{等效}} \quad (5)$$

$$R_{\text{等效}} = \frac{1}{2} \cdot (R_{\text{动}} + R_{\text{静}}) \quad (6)$$

式中: $\dot{\omega}$ 为机轮的角加速度; M_f 为结合力矩; M_b 为刹车力矩; J 为机轮的转动惯量; F_f 为地面摩擦力; R_g 为机轮的滚动半径; N 为地面支持力; μ_f 为地面与轮胎之间的结合系数; F_b 为刹车盘内液压作动筒产生的动静盘压紧力; I_b 为刹车电流; k 为将刹车电流转化为液压作动筒压力的转换系数; μ_b 为刹车盘动盘与静盘之间的摩擦系数,本文取 0.4; $R_{\text{等效}}$ 为等效摩擦半径; $R_{\text{动}}$ 和 $R_{\text{静}}$ 分别为刹车盘的动盘和静盘半径。

考虑到飞机在着陆初期,起落架会产生“起转回弹”的现象^[20],刹车装置将在飞机着陆 2 s 后激活并产生正弦的刹车电流,刹车电流会根据仿真时间进行正弦变化,其变化公式如式(7)所示。

$$I_b = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - 4\pi \cdot f) + I_0 \quad (7)$$

式中: A 为刹车电流幅值; f 为正弦刹车电流的频率; t 为仿真时间; I_0 为刹车装置启动时的刹车电流,本文取 30 mA。

1.2 起落架刚柔耦合模型

将简化的起落架主体部件模型如侧撑杆、锁撑杆、起落架缓冲器、活塞杆以及扭力臂等导入 Simcenter 3D 中进行装配和运动副约束,以建立主起落架刚体模型,机轮模型则简化为与实际轮胎大小规格相同的圆柱体,并在圆柱体的基础上根据 1.1 节建立机轮模型。扭力臂与轮轴和缓冲器外筒均通过旋转副连接,左右两侧机轮均与轮轴通过旋转副连接,轮轴与活塞杆之间采用固定副进行连接,侧撑杆、锁撑杆和缓冲器外筒之间采用旋转副进行连接。在活塞杆与缓冲器外筒之间的运动路径上建立节点,使用点线运动副对活塞杆和缓冲器外筒间的节点进行约束以模拟缓冲器的运动效果。

Simcenter 3D 中的柔性体以运动体为基础,将需要柔性化的部件划分好网格并赋予其材料属性,并将有限元网格与运动体进行关联,调用求解器进行柔性体模态计算。在运动环境下打开柔性体设置,选择每个部件对应的有限元网格文件与部件运动体进行关联。建立好的起落架刚柔耦合模型如图 3 所示。

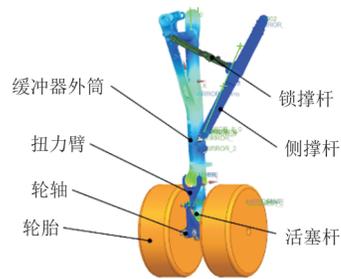


图 3 起落架刚柔耦合模型

Fig. 3 Rigid-flexible coupling model of landing gear

2 起落架轮胎参数对起落架多自由度耦合振动特性影响分析

轮胎的竖向刚度与轮胎的竖向变形有关,轮胎竖向变形可以吸收飞机落地时产生的能量,侧偏刚度关系到轮胎的侧偏特性,轮胎的制动力也会影响轮胎的侧偏性能,并对起落架横向和扭转

方向上的振动产生一定程度的影响, 应将上述两个变量分离, 研究单一变量对起落架多自由度耦合振动的特性影响。控制变量法可将多因素的问题转化为多个单因素的问题, 因此本文采用控制变量法, 分别研究轮胎的竖向刚度和侧偏刚度两个参数对起落架多自由度振动特性的影响。当双轮支柱式起落架的刹车机轮出现刹车力矩不对称的情况时, 起落架会产生多自由度耦合振动, 故对起落架的左右轮施加非对称刹车力矩, 对左轮施

加幅值为 20 mA、频率为 2 Hz 的正弦刹车电流, 对右轮施加幅值为 20 mA、频率为 4 Hz 的正弦刹车电流, 并对飞机重心施加 70 m/s 的初始航向运动速度, 设置起落架机轮初始接地点与地面的距离为 1×10^{-4} mm, 用于模拟飞机着陆滑跑刹车过程。

2.1 轮胎竖向刚度影响

轮胎的竖向刚度分别取 4 080、3 060、2 040 N/m, 仿真结果如图 4 所示。

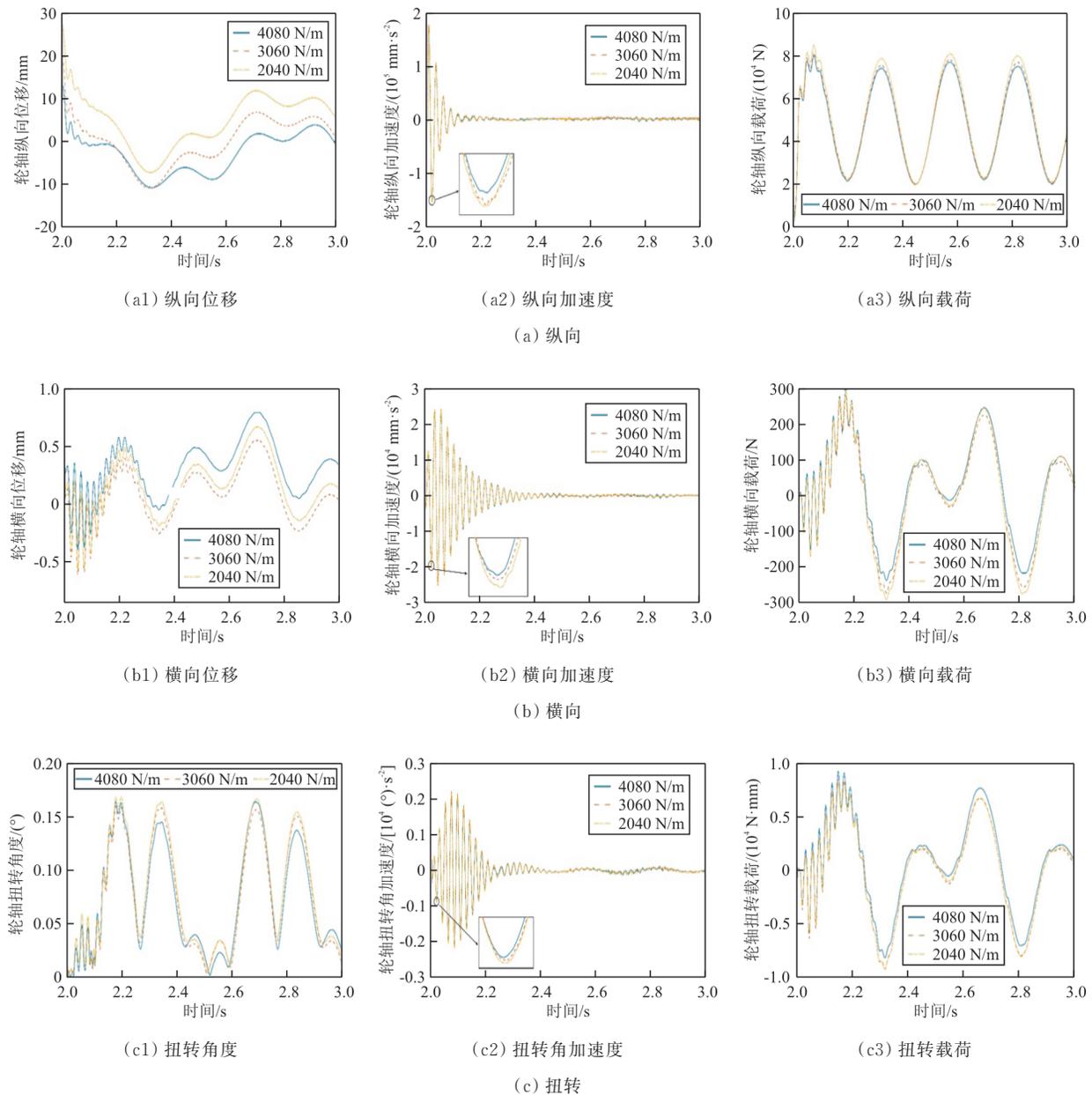


图 4 轮胎竖向刚度对耦合振动的影响

Fig. 4 Influence of tire vertical stiffness on coupled vibration

从图4可以看出:当刹车系统启动时,起落架纵向、横向和扭转方向上的振动位移都会经历一段频率约为50 Hz振幅逐渐下降的振动,0.3 s后各个方向上的较高频率振动逐渐消失,变成较低频率的振动;扭转方向上稳定之后的低频振动是由两个幅值不同的振动组成的,这与横向和纵向上的振动形式有所区别;起落架纵向振动加速度与纵向振动位移的变化相同,振动的幅值逐渐下降,并最终趋于平稳,起落架横向振动加速度和载荷与扭转方向上的变化相同,加速度的振幅先增大后减小,一段时间后振幅逐渐稳定;随着轮胎竖向刚度的增加,刹车系统启动时的初始振动位移变小,纵向加速度和载荷均有所减小,横向和扭转方

向上的振动也同样受到抑制效果。

2.2 轮胎侧偏刚度影响

轮胎的侧偏刚度取1 920、1 440、960 N/(°),仿真结果如图5所示,各方向上振动曲线变化规律与2.1节的规律基本一致,可以看出:在不同侧偏刚度下的起落架纵向振动曲线几乎重合,轮胎侧偏刚度对纵向振动的影响较小,而横向和扭转的振动曲线变化较大,轮胎侧偏刚度对纵向振动的影响较大;随着轮胎侧偏刚度增大,刹车系统启动时的横向初始振动位移变小,横向和扭转方向上的振动载荷明显增大,轮胎侧偏刚度的改变对横向和扭转方向上的振动载荷影响较大。

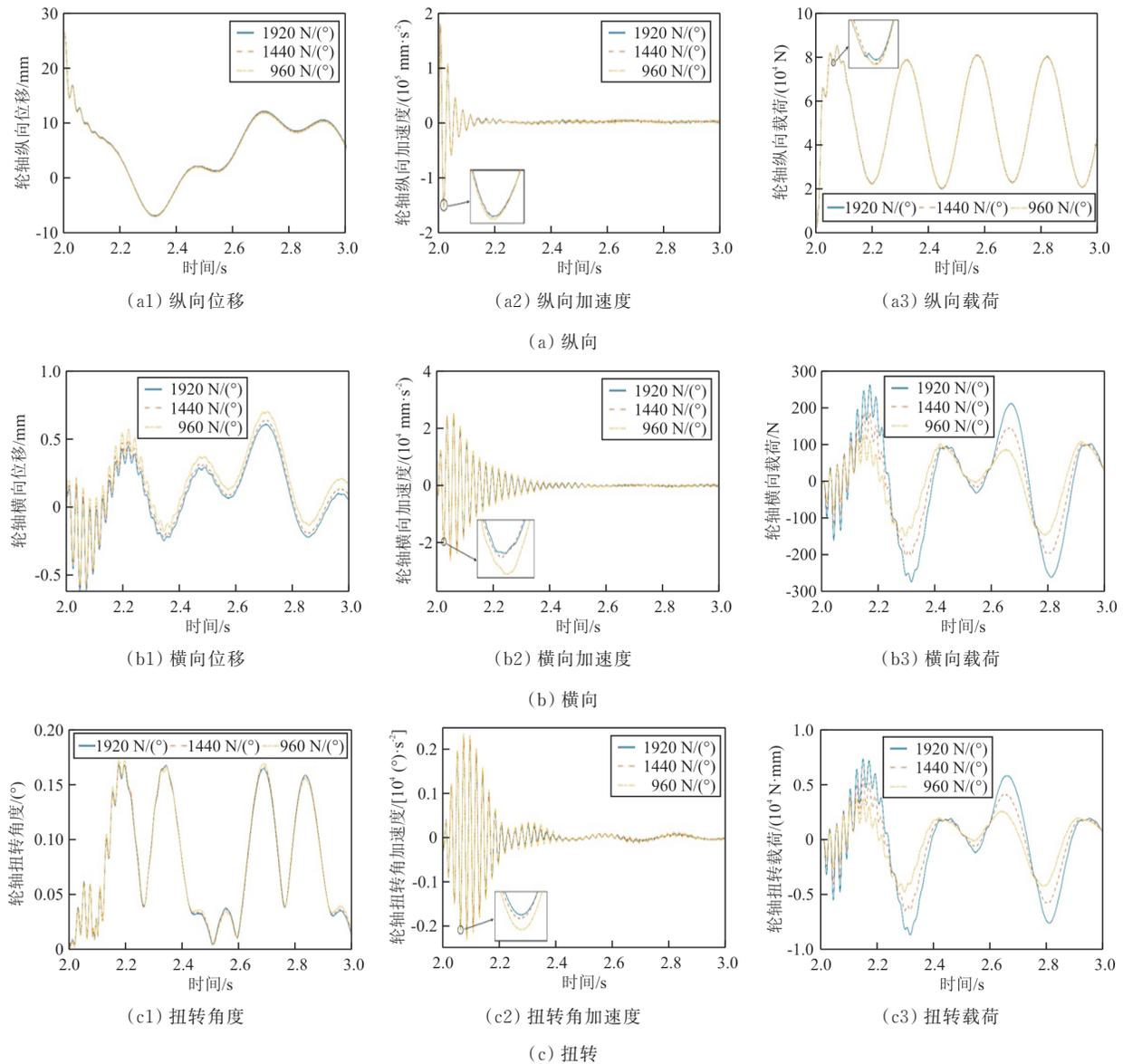


图5 轮胎侧偏刚度对耦合振动的影响

Fig. 5 Influence of tire cornering stiffness on coupled vibration

2.3 轮胎参数影响分析

参考2.1和2.2节的仿真结果,轮胎竖向刚度和侧偏刚度对起落架多自由度耦合振动特性影响分析结果如表1~表2所示。

表1 轮胎竖向刚度影响分析

Table 1 Analysis of the influence of the tire vertical stiffness

振动方向	竖向刚度变化/%	位移变化/%	加速度变化/%	载荷变化/%
纵向	±33	-0.31	-1.69	-2.02
		1.92	3.47	4.25
横向	±33	-3.50	-17.14	-23.39
		2.86	10.98	28.06
扭转	±33	-6.60	-1.09	12.37
		12.26	0.09	-12.76

表2 轮胎侧偏刚度影响分析

Table 2 Analysis of the influence of the tire cornering stiffness

振动方向	侧偏刚度变化/%	位移变化/%	加速度变化/%	载荷变化/%
纵向	±33	0.33	0.52	0.04
		-0.93	-0.94	-0.30
横向	±33	-11.47	-11.49	27.09
		16.73	16.60	-31.68
扭转	±33	-0.70	-17.63	10.50
		1.91	17.81	-14.55

从表1可以看出:当飞机轮胎的竖向刚度增大33%时,纵向、横向位移和扭转角度均有所减少,纵向位移减少了0.31%,横向位移减少了3.50%,扭转角度减少了6.60%,各个方向上的加速度也随之减少。轮胎竖向刚度的变化对起落架横向和扭转方向振动的影响较大,对纵向振动的影响较小。轮胎的竖向刚度与轮胎的竖向变形密切相关,当竖向刚度较小时,轮胎的竖向变形增加,轮胎更易产生不稳定变形。适当增加轮胎的竖向刚度可以减少轮胎的竖向变形,抑制双轮支柱式起落架的低频刹车多自由度耦合振动,使飞机降落滑跑刹车的过程更加平缓。

从表2可以看出:当飞机轮胎侧偏刚度增大33%时,起落架纵向位移增加0.33%,横向位移减少11.47%,扭转角度减少0.70%。轮胎侧偏刚度的增加会加剧起落架纵向振动,抑制横向和扭转振动,尤其是横向振动的抑制效果更加明显。轮胎的侧偏刚度关系到轮胎的侧偏特性,轮胎受到的制动力也会影响轮胎的侧偏性能,并对起落架

横向和扭转方向上的振动产生一定程度的影响。轮胎侧偏刚度对起落架纵向载荷影响较小,对横向和扭转载荷影响较大。轮胎的侧偏刚度增加,轮胎更不易发生侧偏现象,从而抑制了起落架的横向和扭转振动。适当增大轮胎的侧偏刚度可以抑制双轮支柱式起落架横向和扭转方向的振动,避免飞机在滑跑刹车过程中,由于轮胎的侧向力使轮胎产生变形导致机轮过度倾斜发生偏航现象而冲出跑道。

3 结论

1) 适当增加轮胎的竖向刚度可以减少轮胎的竖向变形,抑制双轮支柱式起落架的低频刹车多自由度耦合振动,使飞机降落滑跑刹车的过程更加平缓,提高降落过程的安全性及舒适性。

2) 适当增大轮胎的侧偏刚度可以抑制双轮支柱式起落架横向和扭转方向的振动,避免飞机在滑跑刹车过程中,由于轮胎的侧向力使轮胎产生变形导致车轮倾斜发生偏航现象而冲出跑道,提高飞机降落滑跑刹车的稳定性。

3) 研究轮胎的竖向刚度和侧偏刚度对双轮支柱式起落架低频刹车多自由度耦合振动的影响,为飞机起落架设计选择轮胎参数时提供参考,选择合适的轮胎参数,提高飞机起落架的设计效率。

参考文献

- [1] KHAPANE P D. Simulation of landing gear dynamics using flexible multi-body methods[C]// 25th International Congress of the Aeronautical Sciences. Hamburg: ICAS, 2006: 3698-3707.
- [2] 陈帅,尹乔之,宋佳翼,等. 双轮支柱式起落架低频刹车耦合振动性能研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(5): 69-77, 94.
CHEN Shuai, YIN Qiaozhi, SONG Jiayi, et al. Research on low frequency coupled brake-induced vibration of telescopic landing gear with two wheels[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(5): 69-77, 94. (in Chinese)
- [3] 杜晓琼,李斌,罗琳胤. 水陆两栖飞机高支柱起落架的刹车振动行为[J]. 航空学报, 2022, 43(6): 382-396.
DU Xiaoqiong, LI Bin, LUO Linyin. Braking vibration behavior of high strut landing gear of amphibious aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(6): 382-396. (in Chinese)
- [4] 张振华,李巍,谢彦,等. 基于小车式起落架地面滑跑振动仿真分析[J]. 计算机仿真, 2022, 39(8): 59-63, 97.
ZHANG Zhenhua, LI Wei, XIE Yan, et al. Simulation analysis of grand rolling vibration based on frame landing gear

- [J]. Computer Simulation, 2022, 39(8): 59-63, 97. (in Chinese)
- [5] 周旭, 胡奎福, 郭祥云. 大型运输机起落架摆振影响因素及故障分析[J]. 航空维修与工程, 2022(4): 39-43.
ZHOU Xu, HU Kuifu, GUO Xiangyun. Influencing factors and fault analysis of landing gear shimmy of large transport aircraft [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2022(4): 39-43. (in Chinese)
- [6] KHAPANE P D. Gear walk instability studies using flexible multibody dynamics simulation methods in SIMPACK [J]. Aerospace Science and Technology, 2006, 10(1): 19-25.
- [7] 张陵, 诸德培. 主起落架纵向抖振的动态特性研究[J]. 航空学报, 1996, 17(3): 292-296.
ZHANG Ling, ZHU Depei. On the dynamic properties of landing gear walking [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1996, 17(3): 292-296. (in Chinese)
- [8] 张陵, 诸德培. 缓冲器支柱特性对主起落架纵向抖振的影响[J]. 西北工业大学学报, 1996, 14(2): 244-248.
ZHANG Ling, ZHU Depei. Effect of properties of absorbing strut on gear walking [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1996, 14(2): 244-248. (in Chinese)
- [9] 库玉鳌. 刹车与起落架抖动的相互影响[J]. 航空学报, 1997, 18(2): 101-103.
KU Yu'ao. Interaction between braking and landing gear vibration [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1997, 18(2): 101-103. (in Chinese)
- [10] BALASUBRAMANIAN K, FARHANG K. Gear walk instability studies using a vibration model of a reduced scale landing gear system[C]// ASME 2002 International Design Engineering Technical, and Computers and Information in Engineering Conference. Canada: ASME, 2002: 243-251.
- [11] BAGROV K V. Numerical simulation of planar oscillations of a landing gear leg along the longitudinal axis of an aircraft during the landing impact [J]. Journal of Applied and Industrial Mathematics, 2019, 13(3): 385-389.
- [12] 尹乔之, 聂宏, 张明, 等. 某半轴支柱式起落架低频刹车诱导振动特性研究[J]. 振动工程学报, 2016, 29(6): 954-962.
YIN Qiaozhi, NIE Hong, ZHANG Ming, et al. Vibration characteristics of gear walk on half-axle landing gear [J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(6): 954-962. (in Chinese)
- [13] YIN Q Z, JIANG Z J, NEILD S A, et al. Investigation of gear walk suppression while maintaining braking performance in a main landing gear [J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 91: 122-135.
- [14] 周进雄, 诸德培. 轮胎偏滚特性模型及其在飞机机轮摆振中的应用[J]. 西北工业大学学报, 1999, 17(1): 12-14.
ZHOU Jinxiong, ZHU Depei. An approximate tire cornering characteristics model and its application in aircraft wheel shimmy [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1999, 17(1): 12-14. (in Chinese)
- [15] 周进雄, 诸德培. 飞机机轮参数摆振稳定性及其若干影响因素[J]. 振动与冲击, 1998, 17(4): 26-29.
ZHOU Jinxiong, ZHU Depei. The influence of landing gear structural parameters on frequency characteristics of aircraft wheel shimmy [J]. Journal of Vibration and Shock, 1998, 17(4): 26-29. (in Chinese)
- [16] 冯广, 丁建宾, 姜义尧, 等. 轮胎刚度特性对大型民机前起落架摆振影响研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(2): 55-64.
FENG Guang, DING Jianbin, JIANG Yiyao, et al. Influence of tire stiffness characteristics on shimmy of large civil aircraft nose landing gear [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(2): 55-64. (in Chinese)
- [17] 冯广, 向宗威, 姜义尧, 等. 支柱式前起落架系统刚度与摆振稳定性研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(1): 65-72.
FENG Guang, XIANG Zongwei, JIANG Yiyao, et al. Study on stiffness and shimmy stability of strut-type nose landing gear system [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(1): 65-72. (in Chinese)
- [18] 刘学文. 车辆结构动力学——基于 NX/Simcenter 3D 的仿真实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2020.
LIU Xuewen. Dynamics of vehicle structures: simulation based on NX/Simcenter 3D [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2020. (in Chinese)
- [19] 飞机设计手册总编委会. 飞机设计手册: 第 14 册——起飞着陆系统设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
General Editorial Board of *Aircraft Design Manual*. Aircraft design manual: Vol 14—takeoff and landing system design [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [20] FLUGGE W, COALE C W. The influence of wheel spin-up on landing-gear impact [R]. Washington: NACA, 1954.
- 作者简介:**
冯广(1982—),男,博士研究生,高级工程师。主要研究方向:起落架系统设计。
尹乔之(1990—),女,博士,副研究员。主要研究方向:飞行器地面滑跑非线性动力学与控制。
杨乐(1992—),男,博士,工程师。主要研究方向:起落系统设计。
张颂旻(1999—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器起落架刹车诱导振动。
宋佳翼(1998—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器起落装置设计技术。

(编辑:丛艳娟)