

文章编号: 1674-8190(2022)03-086-10

# 飞机起落架结构间隙对摆振稳定性影响研究进展

向宗威<sup>1</sup>, 冯广<sup>1,2</sup>, 姜义尧<sup>1</sup>, 丁建宾<sup>1</sup>, 董彦灼<sup>1</sup>, 蒋炳炎<sup>1</sup>

(1. 中南大学 高性能复杂制造国家重点实验室, 长沙 410083)

(2. 中航飞机起落架有限责任公司, 长沙 410200)

**摘要:** 起落架结构间隙作为影响飞机高速滑跑摆振稳定性的主要因素之一, 决定着飞机滑跑的安全性与舒适性。本文归纳了起落架结构间隙存在形式, 分析了起落架结构间隙对摆振的形成原因; 详细阐述了现有起落架摆振间隙分析模型, 并指出其中的局限性及今后建模方向; 通过文献分析进一步总结了含间隙摆振模型求解方法, 说明了不同方法的适用性; 对起落架结构间隙今后的研究方向进行了展望。

**关键词:** 起落架; 结构间隙; 摆振; 分析模型; 求解方法

中图分类号: V226<sup>+</sup>.1

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.03.10

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research Progress on the Effect of Structural Clearance of Aircraft Landing Gear on Shimmy Stability

XIANG Zongwei<sup>1</sup>, FENG Guang<sup>1,2</sup>, JIANG Yiyao<sup>1</sup>, DING Jianbin<sup>1</sup>,  
DONG Yanzhuo<sup>1</sup>, JIANG Bingyan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of High-Performance Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China)

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

**Abstract:** As one of the main factors affecting the shimmy stability of aircraft in high speed rolling, the structural clearance of landing gear determines the safety and comfort of aircraft rolling. In this paper, the existing form of landing gear structural clearance is summarized, and the formation reasons of landing gear structural clearance on shimmy are analyzed. The existing landing gear shimmy clearance analysis models are described in detail, and the limitations of the models and future modeling direction are pointed out. Furthermore, the solving methods of the shimmy model with clearance are summarized through literature analysis, and the applicability of different methods is illustrated. The future research direction is prospected.

**Key words:** landing gear; structural clearance; shimmy; analysis model; solution method

收稿日期: 2021-07-02; 修回日期: 2021-10-28

基金项目: 工信部民机专项(JZ025-XY-003); 湖南省研究生科研创新项目资助(CX20210221)

通信作者: 蒋炳炎, jby@csu.edu.cn

引用格式: 向宗威, 冯广, 姜义尧, 等. 飞机起落架结构间隙对摆振稳定性影响研究进展[J]. 航空工程进展, 2022, 13(3): 86-95.

XIANG Zongwei, FENG Guang, JIANG Yiyao, et al. Research progress on the effect of structural clearance of aircraft landing gear on shimmy stability[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(3): 86-95. (in Chinese)

## 0 引言

随着我国经济的增长与人口的增加,中国将成为世界最大的航空运输市场之一。波音公司2009年度预测在未来20年内,中国将新增3 770架飞机,价值提高约4 000亿美元<sup>[1]</sup>。起落架是飞机不可或缺的一部分,其未来市场需求也是巨大的。目前国际上起落架专业化制造商主要有法国赛峰名下的梅西埃一道蒂(Messier Dowty)、美国UTC航空航天系统公司下的古德里奇(Goodrich)、德国的利勃—海尔(Liebherr)和加拿大的Héroux-Devtek等公司。而国内起落架专业化制造商仅有中航飞机起落架有限责任公司,总体上国内的起落架自主设计与制造能力有较大提升空间。

飞机摆振指的是飞机滑跑过程中,由于外部地面激励的作用,引起前轮产生偏离其中立位置的剧烈侧向摆动,通过机轮、活塞杆、扭力臂逐渐向上传递,从而导致起落架支柱和机身晃动,严重时会造成起落架结构破坏,从而引起重大事故。国内外许多型号飞机都在研制或使用过程中发生过摆振问题,如波音公司的B737-500,空客公司的A300-B4,我国的歼-8、运-11、运-12等。

关于摆振理论及防摆措施的研究最早开始于19世纪40年代,目前已有众多研究者对起落架摆振影响因素进行研究,如稳定距<sup>[2]</sup>,结构刚度<sup>[3]</sup>,结构间隙<sup>[4]</sup>,其他非线性因素(库伦摩擦,速度平方阻尼等)<sup>[5-6]</sup>,减摆器阻尼<sup>[7]</sup>,轮胎充气压力<sup>[8]</sup>,滑跑速度<sup>[9-10]</sup>,着陆冲击力<sup>[11]</sup>等。其中间隙因素,早在1987年,诸德培<sup>[12]</sup>将由于长期使用磨损、产品加工不当或维护修理不当造成的间隙而导致的摆振,定义为“间隙型”摆振,到目前为止一直都是研究重点之一。同时结构间隙在起落架设计和维修中起着至关重要的作用。

本文针对起落架结构间隙对摆振稳定性研究现状进行综述,分析起落架结构间隙形式及其影响机理,归纳总结飞机起落架结构间隙模型与求解方法,以期为间隙对飞机起落架摆振稳定性影响的进一步研究提供参考。

## 1 起落架结构间隙存在形式及其影响机理

### 1.1 起落架结构间隙存在形式

根据参考文献[13]中对某型飞机起落架前轮摆振分析,对摆振影响较大的间隙主要为各连接处间隙,如传动机构间、轮叉与前起落架支柱间、旋转臂与支柱间等。随着研究者对起落架具体连接位置的研究,发现起落架结构间运动副多数为轴销与轴套的圆柱副形式,由于间隙存在,轴销和轴套间存在完全分离、两点接触、单点接触和线接触等接触模式<sup>[14]</sup>。以目前常见支柱式起落架为例,某型飞机前起落架原理示意图如图1所示,主要零部件间以旋转副连接。对应旋转副间隙示意图如图2(a)所示,由于制造和装配误差等原因,实际旋转副间隙既存在径向间隙又存在轴向间隙,是一种空间三维间隙<sup>[15]</sup>。考虑一般情况下,轴向接触和径向接触互不干扰,分析得到转动副空间三维间隙的十三种工况,如图2(b)所示。

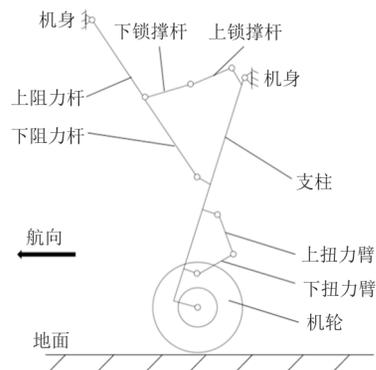
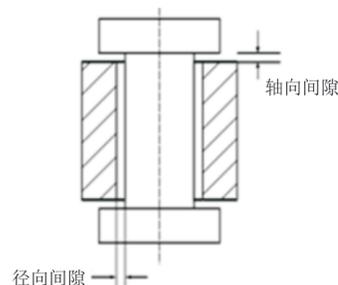


图1 间隙空间位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of clearance space location



(a) 旋转副间隙示意图<sup>[15]</sup>

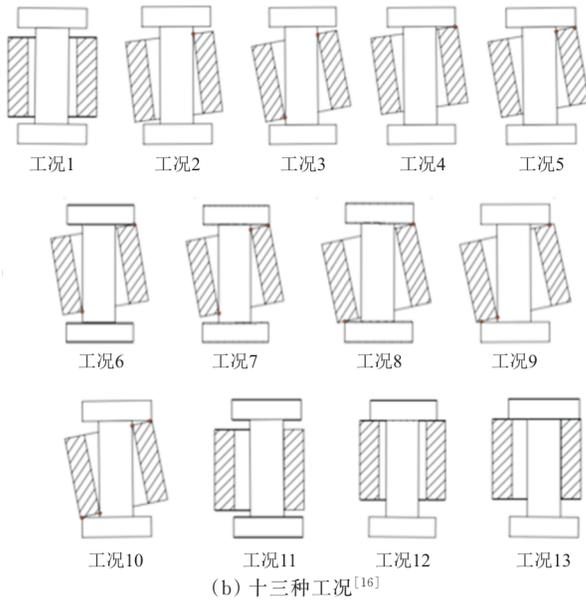


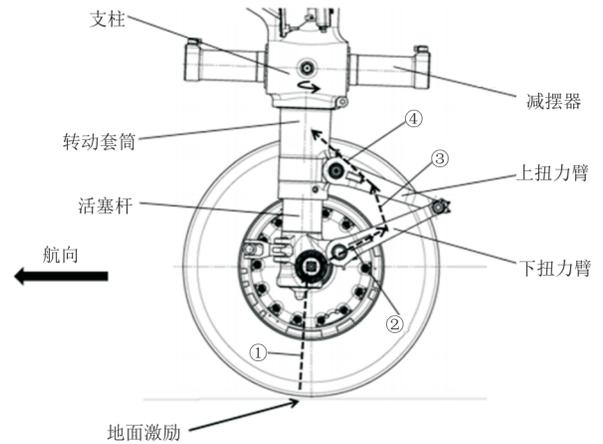
图2 旋转副间隙与工况示意图

Fig. 2 Diagram of clearance and working conditions of rotating pairs

起落架间隙以轴向间隙与径向间隙耦合的复杂形式存在,单纯考虑扭转间隙角对摆振的影响仅能宽泛研究影响规律,而深入研究需要从具体连接位置的具体空间间隙数值进行考虑。此外,由于连接处受力并非均匀的,受力较严重部位,磨损较严重,其实际工况将比简单旋转副间隙更加复杂。空间间隙及非均匀磨损是间隙因素研究的难点。

## 1.2 起落架结构间隙对摆振稳定性影响机理

摆振产生的主要原因是前轮受外部地面激励,产生偏离其中立位置的剧烈侧向摆动,通过机轮、活塞杆、扭力臂逐渐向上传递<sup>[17]</sup>,从而导致起落架支柱和机身晃动,示意图如图3所示。在存在相对运动的刚性零件间,必然存在间隙,各零件间间隙对摆振稳定性的影响,在传递过程中逐渐叠加,从而影响摆振稳定性<sup>[18]</sup>。且多次起落后,由于使用中不可避免地产生磨损和挤压变形,导致间隙值超过摆振发生的临界间隙值,从而发生摆振事故<sup>[19]</sup>。

图3 前起落架摆振产生原理示意图<sup>[17]</sup>Fig. 3 Schematic diagram of the shimmy generation principle of the nose landing gear of civil aircraft<sup>[17]</sup>

结构间隙存在于起落架相对运动的零部件间,且由于长期使用产生的磨损等原因,逐渐放大对起落架摆振稳定性的影响,因此,在起落架的设计和制造、以及使用维修阶段,间隙因素都将是不可忽略的因素之一。

## 2 起落架结构间隙模型

### 2.1 数学模型

在起落架的研究中,结构间隙最初主要在起落架收放问题中给予考虑,但随着摆振问题的逐渐深入,从1980年开始,众多研究者逐渐针对不同起落架对象,构建含结构间隙的起落架高速滑跑数学模型<sup>[20-22]</sup>或多体动力学模型<sup>[23]</sup>,开展其对起落架摆振稳定性影响的研究。

1980年,McDonnell-Douglas公司D. T. Grossman<sup>[24]</sup>针对F-15战斗机前起落架(单轮)扭转间隙对摆振稳定性影响进行研究,构建摆振分析数学模型,扭转分析模型示意图如图4所示。引入扭转间隙参数 $\theta_0$ ,判断前轮围绕支柱轴线的摆动角 $\theta$ 和减摆器围绕支柱轴线的扭转角 $\theta_1$ 之间的相对运动,当两角度存在差异时,存在扭转间隙弹性恢复力矩,无差异时则不存在。结果显示滑跑速度降低,允许最小间隙值增加,与滑跑试验结果

较为吻合。

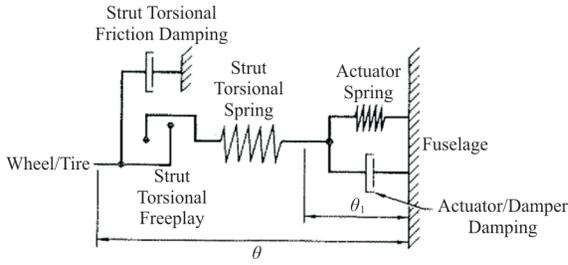


图 4 文献[24]的扭转间隙模型示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of torsion clearance model in reference [24]

1993年,Heroux Inc公司的G. X. Li<sup>[25]</sup>,针对双轮式起落架,考虑非线性因素如扭转间隙、非线性阻尼、活塞和气缸之间的干摩擦等,起落架模型示意图如图5所示。

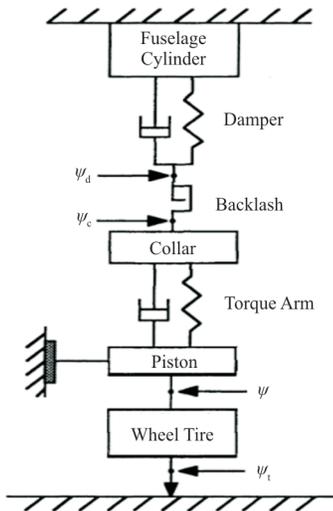


图 5 文献[25]的起落架模型示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of the landing gear model in reference [25]

引入外筒相对中心轴线旋转角 $\psi_d$ 和转弯套筒相对中心轴线旋转角 $\psi_c$ ,明确定义扭转间隙参数 $\delta$ ,规定当外筒和转弯套筒间旋转角度差小于间隙,阻尼器和环之间没有扭矩传递,从而实现间隙施加,但文献[25]仅设定扭转间隙为 $0.25^\circ$ ,未深入研究其对摆振稳定性的影响;2009年,印度理工学院B. Sateesh等<sup>[26]</sup>基于文献[25]建立了包含扭转间隙的非线性摆振动力学模型,结果表明扭转间隙将降低前起落架摆振的临界发散速度。2018年,南京航空航天大学张严等<sup>[27]</sup>,引入含间隙的支柱扭转刚度项,当前轮摆角的振幅小于或等于间隙值时,支柱的扭转刚度不起作用,只能依靠支柱

的扭转阻尼力矩和轮胎与地面间的阻尼力矩来抑制摆振的发生,当前轮摆角的振幅大于间隙值时,支柱的扭转刚度和防摆阻尼共同作用来抑制摆振的发生,结果表明出现间隙时会大幅降低摆振的临界稳定速度,但间隙值的改变不影响摆振的临界稳定速度。

上述起落架结构间隙模型均以扭转间隙的形式构建,未能具体到实际位置。为更加直观体现实际位置的结构间隙对起落摆振稳定性影响,2013年,英国布里斯托大学C. Howcroft<sup>[28]</sup>与空客公司合作,考虑了陀螺耦合、非线性轮胎特性、几何非线性和流体冲击阻尼等各种影响,建立了系统的非线性运动模型,如图6所示。在不同缓冲器行程下,距离支柱轴线距离 $r_{tik}(\eta)$ 随之变化,通过弧长公式(弧长等于弧度乘以半径),引入上下扭力臂间结构间隙 $y_{fp}$ ,当上下扭力臂间实际间隙值大于 $y_{fp}$ ,才产生扭转刚度,从而实现间隙的施加。

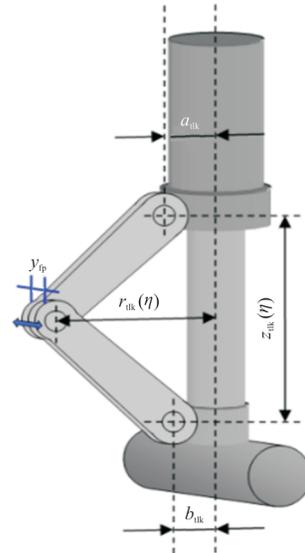


图 6 文献[28]的起落架间隙模型示意图  
Fig. 6 Diagram of landing gear clearance model in reference [28]

文献[28]研究表明,对于无间隙情况下,系统在其物理工作范围内是稳定的,只有在极端载荷和速度下才会出现摆振,当存在间隙时,在更典型的工作条件下可以观察到摆振,并发现由此产生的振荡与间隙幅度成线性关系。

2018年,加拿大多伦多大学M. Rahmani等<sup>[29]</sup>利用Simscape Multibody,采用与文献[28]相似的处理办法(如图7所示),认为上扭力臂和下扭力臂

与支柱连接位置距离支柱转轴轴线相等,通过弧长公式,直接以上下扭力臂间间隙 $\varepsilon$ 转换成扭转间隙,构建含间隙的前起落架模型,结果表明,增加间隙会降低前起落架系统的稳定性。并于2020年,在相同间隙模型下,考虑库伦摩擦因素时,研究不同间隙对前起落架摆振稳定性影响趋势同文献[29],发现增加库伦摩擦因素,会减小由扭转主导的摆振区域<sup>[4]</sup>。这表明在研究间隙因素时,考虑库伦摩擦因素的模型将更加准确。

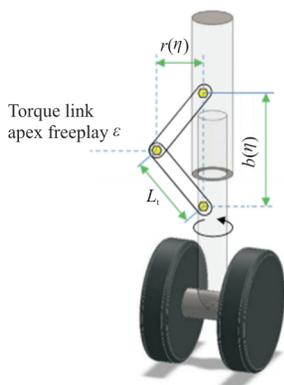


图7 文献[29]的起落架间隙模型示意图  
Fig. 7 Diagram of landing gear clearance model in reference [29]

综上所述是基于数学模型构建的间隙模型,可以归纳为两种方式:一种通过在外筒和转弯套筒间的扭转角增加扭转间隙角,当扭转角超出允许扭转间隙角时,就会引入扭转间隙刚度,从而表征扭转间隙;另一种则是通过弧长定理,针对具体上下扭力臂间结构间隙,映射至扭转间隙角,从而表征结构间隙,进而研究扭转间隙对前起落架高速滑跑稳定性的影响。后者较前者更能表征具体位置间隙,但仅应用于上下扭力臂间的间隙,针对其他易对前起落架摆振稳定性造成影响的位置,该方法是否可行,仍需进一步探讨。

## 2.2 多体动力学模型

多体动力学模型方法是将多个部分组成的机械系统,建模成彼此相互连接的若干刚体或柔性体构成的系统,然后施加与实际过程相应的力元和约束等,进而仿真研究其运动规律<sup>[30]</sup>。随着计算机技术飞速发展和多体动力学领域研究的不断深入,多体动力学仿真方法可以获得起落架的时域响应和频域响应,解决测试平台无法真实模拟

实际飞行工况,成本大、周期长的问题,其已成为摆振稳定性研究必不可少的方法<sup>[31]</sup>。

2000年,荷兰埃因霍温理工大学 I. Besselink<sup>[32]</sup>针对双轮飞机主起落架的摆振稳定性,使用非线性有限元软件 MECANO,构建考虑非线性因素间隙、库伦摩擦和速度平方阻尼的摆振仿真模型,如图8所示,其中在轮轴水平上的间隙集中在两个位置,侧向间隙引入非线性法向刚度的侧撑,扭转间隙集中在扭力臂间连接处,使得轮轴水平间隙成为减振器偏转的函数,从而实现间隙的表征。该模型在飞机上进行全尺寸试验,对比仿真与实测结果,两者吻合较好。但该方式用简化梁模型,未能真实反映起落架的三维结构。

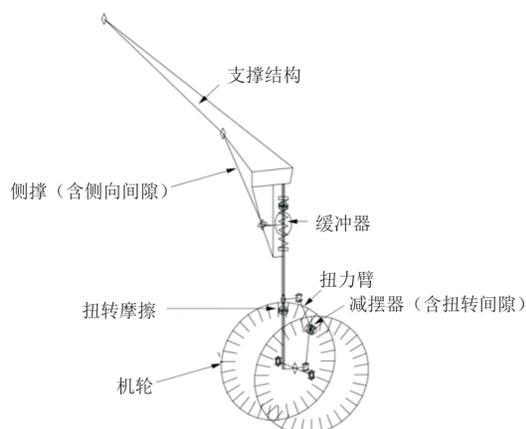


图8 起落架间隙仿真分析模型示意图<sup>[32]</sup>  
Fig. 8 Diagram of landing gear clearance simulation and analysis model<sup>[32]</sup>

2010年,南京航空航天大学张明等<sup>[33]</sup>,采用 ADAMS/Aircraft软件,结合 PATRAN/NASTRAN软件,构建前起落架刚柔混合模型、主起落架刚体模型和机身模型组成全机模型,并采用落震与静力试验的结果校核模型。对比相同阻尼系数时,无间隙、1°间隙和2°间隙情况下机轮摆角幅值,结果表明随着间隙的增大,机轮摆振的幅值逐渐增大。但文献[33]中并未说明间隙施加方式。

为了更深入研究具体零件和零件间连接间隙对飞机摆振稳定性影响,2016年,南京航空航天大学蔡佳圻<sup>[34]</sup>采用 LMS Virtual. Lab Motion软件针对轮轴轮毂与上下扭力臂间的结构间隙,采用多个点面接触模拟,研究单间隙、多间隙以及不同间隙数值(0.1 mm、1 mm)对摆振稳定性影响,间隙模型如图9所示,通过在下扭力臂上沿着旋转铰布

置若干半径为  $R_i$  的接触点模拟销轴半径,并将其与上扭力臂轴套的半径  $R_s$  的差值表征径向间隙;同时在上扭力臂构建两个虚拟的  $AA'$  平面、 $BB'$  平面,将其与下扭力臂轴心位置处的接触点表征轴向间隙。仿真结果显示多间隙情况较单间隙,更加恶化起落架系统的防摆性能。该方式基于三维实体模型,考虑间隙接触力模型,探明轮轴轮毂与上下扭力臂间的结构间隙对前起落架摆振稳定性的影响,对起落架设计和维修具有一定指导意义,但未对间隙施加方式进行相关验证,其准确性有待商榷。

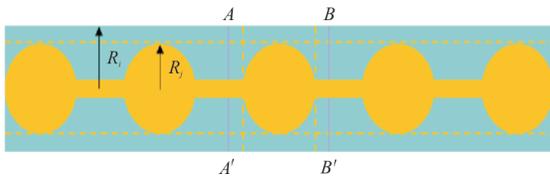


图 9 文献[34]的间隙模型  
Fig. 9 The freeplay model of reference [34]

2020年,南京航空航天大学常泳涛<sup>[35]</sup>,针对刚性起落架模型,利用 Amesim 与 LMS Virtual. Lab Motion 软件联合仿真,针对上下扭力臂位置为球铰副,通过建立限位板与上扭力臂轴套,设置四个球对拉伸面接触来限制球的三维空间移动,实现间隙施加,如图 10 所示。针对轮轴轮毂位置为转动副,采用点一曲面约束,限制轮轴质心坐标原点在轮毂质心坐标系  $xz$  平面内运动,然后针对轴两端建立两个球与拉伸面接触,实现轮轴轮毂间间隙施加,如图 11 所示。通过初步分析轮轴轮毂间和上下扭力臂间接触力,验证其代理模型的准确性。

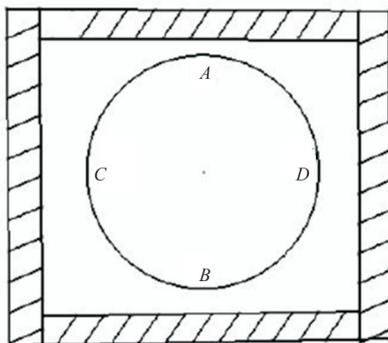


图 10 文献[35]的扭力臂间间隙模型  
Fig. 10 The freeplay model of reference [35]

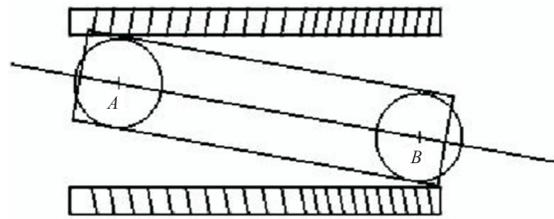


图 11 文献[35]的轮轴轮辋间间隙模型  
Fig. 11 The freeplay model of reference [35]

文献[35]指出间隙与机轮摆角幅值呈现非线性关系,并分析 0.3 和 2 mm 时仅上下扭力臂间间隙与仅轮轴轮毂间间隙对摆振影响,结果显示轮轴轮毂间间隙较扭力臂间间隙对起落架摆振影响大,同时针对球对拉伸面接触中构件 1 和构件 2 的杨氏模量来改变材料的刚度,对比分析弹性模量为 19 和 100 GPa 时对起落架摆振影响,结果表明,随着运动副元素弹性模量变大,即材料刚度变大,机轮摆角的振幅显著变小,而且频率也有所降低<sup>[35]</sup>。

2020年,南京航空航天大学闫宇飞等<sup>[36]</sup>,针对柔性外筒、支柱、上下扭力臂,采用多个 L-N 接触模型的球面接触模拟轮轴轮毂间、转环与上扭力臂间、支柱与下扭力臂间间隙、球面副间隙模拟扭力臂间间隙,建立柔性起落架摆振模型。对比仿真与实际试验的轮胎侧向最大载荷,验证了模型准确性。研究结果显示,转环与上扭力臂间、扭力臂间、支柱与下扭力臂间间隙会影响低频摆振振幅,而轮毂轮辋影响高频摆振振幅,且起落架整体摆振是机轮低频摆振与高频摆振的耦合而成。

综上,目前关于起落架摆振稳定性研究问题中,结构间隙模型已从含扭转间隙的数学模型发展至多体动力学的三维模型,并初步研究了上下扭力臂间和轮轴间间隙对起落架摆振稳定性影响,但所构建的三维间隙模型未得到摆振试验验证,未能对间隙影响摆振机理进行深入研究,无法突出不同位置间隙对起落架摆振稳定性的影响显著性,对起落架设计和维修提供的参考价值有限。因此,针对结构间隙模型的研究,应进一步深入区分轴向间隙与径向间隙,以及起落架各个连接处间隙。

### 3 含间隙摆振模型求解方法

起落架作为一个复杂的非线性系统,引起众

多研究者的关注。研究者针对起落架摆振问题中的非线性问题进行研究,并提出求解方法,如 D. T. Grossman<sup>[24]</sup>提出能量等效原理、王学军等<sup>[37]</sup>提出描述函数法、Zhou J X 等<sup>[38]</sup>提出增量谐波平衡(IHB)方法等。间隙作为非线性因素,最早由 D. T. Grossman 等引入摆振数学模型,其解决方法随着研究者对非线性因素的研究不断更迭。

1980年,D. T. Grossman 等<sup>[24]</sup>利用能量等效的原理对间隙的非线性项准线性化,从而研究其对摆振稳定性的影响,结果与滑跑试验结果较为吻合。

1991年,南京航空航天大学王学军等<sup>[37]</sup>,分析利用能量等效原理求出的带有间隙的平方阻尼等效线性阻尼系数不符合常理<sup>[24]</sup>,提出采用描述函数法对非线性项进行准线性化处理,将准线性化的方程组代入状态空间方程,利用优化特征值实部的方法确定摆振系统的极限环幅值、摆振频率以及临界参数曲线,避免了摆振稳定性分析时冗长的代数推导,并经过试验验证,较符合试验结果。

2002年,波音公司 J. T. Gordon<sup>[39]</sup>采用多重尺度法,得到了极限环幅值和频率作为地面速度函数的一般表达式,进而分析飞机起落架的非线性摆振,结果表明,当存在扭转间隙时,形成一个稳定的极限循环,并将该方法应用于一个简单的摆振模型,分析得到的结果与数值积分得到的结果较为吻合。2009年,印度理工学院 B. Sateesh 等<sup>[26]</sup>,基于文献[25]建立了包含扭转间隙的非线性摆振动力学模型,并采用基于 Newmark- $\beta$  的数值方法得到了系统的时域响应,结果表明扭转间隙使飞机的临界发散速度显著降低,减弱前起落架的稳定性。

上述关于含间隙摆振模型求解方法,是基于非线性动力学的定量方法,可以更好地研究非线性系统动力学的本质特征。随着分岔理论在非线性动力学研究中的出现,研究者开始将其应用于摆振稳定性的研究<sup>[40]</sup>。

2013年,英国布里斯托大学 C. Howcroft<sup>[28]</sup>,采用 AUTO 软件包进行了分岔分析,研究了考虑间隙时,主起落架航向速度和载荷作用下的摆振问题;2014年,南京航空航天大学冯飞<sup>[41]</sup>采用分岔分

析方法,研究扭转间隙对摆振的影响,结果表明扭转间隙的存在,会极大扩大扭转摆振区域,但扭转间隙值的大小对摆振区域并无影响;2018年,南京航空航天大学张严等<sup>[27]</sup>建立含间隙参数的数学模型,采用分岔理论,分析间隙对摆振临界稳定速度、摆振稳定性区域和扭转角振幅的影响,结果表明间隙存在会大幅降低摆振的临界稳定速度和稳定区域,增加扭转角振幅;同年,加拿大多伦多大学 M. Rahmani 等<sup>[29]</sup>,同样采用分岔理论对比分析了不含间隙与含 0.001 m 间隙下摆振稳定性,及摆振区域中侧向主导摆振和扭转主导摆振分布情况,结果表明间隙对于摆振稳定性区域无较大影响,但摆振区域中旋转主导摆振区域会扩大。

分岔理论在间隙因素的研究中,起到了极大的推进作用,并且其结合计算机技术,能快速得到考虑因素的任意工况下是否摆振,以及因素对摆振的影响是侧向主导还是扭转主导。分岔方法为目前考虑间隙等非线性因素对起落架摆振稳定性研究的主要方法。

为了更真实研究起落架摆振问题,众多研究者开始对其展开多体动力学研究<sup>[42-44]</sup>,其中关于间隙问题的求解方式,主要使用的多体动力学软件(ADAMS<sup>[33]</sup>、LMS Virtual. Lab<sup>[34]</sup>等)自带的求解算法。目前针对该方面研究未见报道。

综上,由于结构间隙是不可忽略的非线性因素,针对结构间隙数学模型,早期求解办法是采用线性化方法,主要有能量等效法、描述函数法、多重尺度法等,求解速度快,适用于简单摆振模型。后来由于分岔理论在解决非线性问题中的优越性,开始被广泛应用于研究起落架摆振问题,其能更深入探明结构间隙对侧向主导摆振和扭转摆振影响情况,适用于复杂摆振模型。而针对多体动力学研究中的结构间隙模型,虽然已经逐步向具体位置间隙方向展开研究,但其求解方法为软件自带求解算法,目前并没有公认的计算摆振的多体动力学软件,该求解方法暂时得不到普及,还需要进行相关验证试验,成为今后结构间隙模型的重点研究方向之一。

## 4 展 望

经历了几十年的发展,飞机高速滑跑稳定性

研究中的结构间隙模型,已由广义扭转间隙发展到某些精确位置间隙(如上下扭力臂间间隙、轮轴轮毂间间隙等),模型求解方法也由能量等效法、描述函数法、多尺度法等线性化方法求解,发展至采用分岔方法求解,并逐渐深入探明结构间隙对侧向主导摆振和扭转主导摆振的稳定区域影响情况,从而推广至更加复杂的摆振数学模型。但关于摆振的多体动力学研究中,如何真实等效间隙,以及各精确位置处间隙影响程度的理论体系尚未完善,有待研究者对其进行探索。在总结和分析已有研究成果的基础上,提出以下三点展望:

(1) 结构间隙对摆振稳定性的影响程度研究,应细化至轴向间隙和径向间隙、具体位置间隙及非对称磨损间隙,同时不能仅停留在单因素分析,应朝着耦合其他影响因素,探明多因素下结构间隙因素的影响显著性方向发展,如结构刚度、稳定距、轮胎刚度等,从而对起落架设计和维修提出实际指导意义。

(2) 起落架结构间隙模型的构建,除需贴合起落架的实际位置间隙外,还要考虑间隙表征形式的准确性,如现有的摆振数学模型中引入含扭转间隙的扭转刚度,摆振动力学模型中采用点面接触模拟径向间隙等。同时,需将起落架结构间隙求解方法与模型相结合,针对不同结构间隙模型,采用恰当求解方法,并尽可能结合摆振试验,验证及校核相应间隙模型,构建完整理论体系。

(3) 针对起落架结构间隙对摆振稳定性的影响研究,最终都应落实到防摆中,深入到起落架传动机构的细节上,如上下扭力臂间连接销轴与衬套的材料性能,构建相应间隙参数(接触刚度、摩擦系数等),分析产生的接触力大小及振动强度,并结合材料受力下磨损情况,从而预测使用过程中摆振现象,对预防起落架使用过程中摆振的发生起到实质性作用。

## 5 结束语

飞机起落架结构间隙作为影响摆振稳定性的重要非线性因素之一,研究模型不再是宽泛的扭转间隙,而是不断深入到起落架具体位置,以及考虑三维间隙和非对称磨损间隙,求解方法也将随非线性动力学研究的深入不断优化,将对起落架设计与制造初期的装配间隙数值提供参考意见,

同时预测使用过程中的磨损间隙情况,对使用安全及维修提供理论基础。

## 参考文献

- [1] 户海印. 中国民用航空制造业目标定位及发展路径研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.  
HU Haiyin. The targeting and development strategy of China's civil aviation industry [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [2] 周进雄, 诸德培. 起落架结构参数对飞机机轮摆振的影响[J]. 应用力学学报, 2001, 18(1): 121-124.  
ZHOU Jinxiong, ZHU Depei. The influence of landing gear structural parameters on aircraft wheel shimmy [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2001, 18(1): 121-124. (in Chinese)
- [3] 陈勇, 黄华阳, 张健. 基于有限元法的飞机前起落架防摆刚度设计[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2018, 37(4): 85-87.  
CHEN Yong, HUANG Huayang, ZHANG Jian. Stiffness design of preventing front wheel shimmy based on FEM [J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2018, 37(4): 85-87. (in Chinese)
- [4] RAHMANI M, BEHDINAN K. Interaction of torque link freeplay and Coulomb friction nonlinearities in nose landing gear shimmy scenarios [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2020, 119: 103338.
- [5] 王光颖. 起落架非线性结构对飞机前轮摆振的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2004, 23(5): 644-646.  
WANG Guangying. Influence of landing gear structural nonlinear on aircraft wheel shimmy [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2004, 23(5): 644-646. (in Chinese)
- [6] 冯飞, 罗波, 张策, 等. 轮间距与双轮共转对飞机起落架摆振的影响分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(6): 212-217.  
FENG Fei, LUO Bo, ZHANG Ce, et al. Effect of wheel-distance and corotating wheels on aircraft shimmy [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(6): 212-217. (in Chinese)
- [7] 郝新琛. 基于磁流变原理的前起落架摆振特性研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.  
HAO Xinchun. Research on lose landing gear shimmy with magnetorheological principle [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020. (in Chinese)
- [8] 张健, 陈玉红, 郑华, 等. 某型飞机前起落架摆振性能研究[J]. 飞机设计, 2019, 39(2): 32-36.  
ZHANG Jian, CHEN Yuhong, ZHENG Hua, et al. Research on the shimmy performance of the nose landing gear of a certain aircraft [J]. Aircraft Design, 2019, 39(2): 32-36. (in Chinese)

- [9] 马千里. 考虑结构因素的起落架摆振适航审定技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.  
MA Qianli. Research on airworthiness certification technology for shimmy of aircraft landing gear considering with structural factors[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [10] 于秀伟, 常正, 金秀芬. 基于 Matlab/Simulink 的前起落架摆振动力学模型分析[J]. 航空工程进展, 2013, 4(3): 312-318.  
YU Xiwei, CHANG Zheng, JIN Xiufen. Analysis of aircraft nose landing gear shimmy dynamic model based on Matlab/Simulink[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2013, 4(3): 312-318. (in Chinese)
- [11] 王文选, 王安强, 白斌. 着陆冲击力对起落架摆振的影响[J]. 应用力学学报, 2013, 20(5): 647-651.  
WANG Wenxuan, WANG An'qiang, BAI Bin. Influence of landing impact force on landing gear shimmy[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013, 20(5): 647-651. (in Chinese)
- [12] 诸德培. 飞机前轮摆振及减摆器的若干问题[J]. 航空学报, 1987, 8(12): 557-562.  
ZHU Depei. Some aspects of nose-wheel shimmy and shimmy damper of the aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1987, 8(12): 557-562. (in Chinese)
- [13] 骆存琪. 机轮摆振及轮胎动力学分析研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.  
LUO Cunqi. Study on analyses of nose-wheel shimmy and tire dynamics[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [14] 印寅. 起落架收放动力学及可靠性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.  
YIN Yin. Dynamics and reliability analysis of retraction of landing gear[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [15] YAN S, XIANG W, ZHANG L. A comprehensive model for 3D revolute joints with clearances in mechanical systems[J]. Nonlinear Dynamics, 2015, 80: 309-328.
- [16] 李金玉. 考虑混合间隙的机构动力学研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
LI Jinyu. Research on dynamic characteristics of mechanism with mixed joint clearances[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [17] 王杰. 前起摆振适航审查中轮胎因素影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.  
WANG Jie. The tire factors research on airworthiness certification on nose landing gear shimmy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [18] 贾银军. 铰链间隙对机构动态性能影响分析与某空间展开机构结构动力学响应分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.  
JIA Yinjun. Analysis of joints clearance's influence on dynamic performance of mechanism and analysis of dynamic response of a space deployable mechanism[D]. Xi'an: Xidian University, 2008. (in Chinese)
- [19] 李华杰, 刘宏昭. 考虑磨损影响的含间隙机构仿真与试验研究[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(4): 539-546.  
LI Huajie, LIU Hongzhao. Simulation and experimental study of clearance joint considering wear effect[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(4): 539-546. (in Chinese)
- [20] 寇明龙. 支柱式前起落架摆振性能研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25(9): 19-23.  
KOU Minglong. Study on the shimmy of nose landing gear[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(9): 19-23. (in Chinese)
- [21] GORDON J T. Perturbation analysis of nonlinear wheel shimmy[J]. Journal of Aircraft, 2002, 39(2): 305-316.
- [22] ATABAY E, OZKOL I. Application of a magnetorheological damper modeled using the current-dependent Bouc-Wen model for shimmy suppression in a torsional nose landing gear with and without freerplay[J]. Journal of Vibration and Control, 2014, 20(11): 1622-1644.
- [23] 常正, 聂宏, 冯飞, 等. 飞机柔性前起落架摆振仿真分析[J]. 航空工程进展, 2011, 2(4): 432-436, 484.  
CHANG Zheng, NIE Hong, FENG Fei, et al. Shimmy simulation analysis of aircraft flexible nose landing gear[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2011, 2(4): 432-436, 484. (in Chinese)
- [24] GROSSMAN D T. F-15 nose landing gear shimmy, taxi test and correlative analyses[R]. US: SAE, 1980.
- [25] LI G X. Modelling and analysis of a dual-wheel nose gear: shimmy instability and impact motions[C]// Aerospace Atlantic Conference & Exposition. [S.l.]: IEEE, 1993: 1-6.
- [26] SATEESH B, MAITI D K. Non-linear analysis of a typical nose landing gear model with torsional free play[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2009, 223(6): 627-641.
- [27] 张严, 陈大伟, 喻浩文. 考虑间隙特性的起落架摆振非线性分岔分析[J]. 航空计算技术, 2018, 48(1): 53-57.  
ZHANG Yan, CHEN Dawei, YU Haowen. Nonlinear bifurcation analysis of landing gear shimmy considering freeplay[J]. Aeronautical Computing Technique, 2018, 48(1): 53-57. (in Chinese)
- [28] HOWCROFT C. Effects of freeplay on dynamic stability of an aircraft main landing gear[J]. Journal of Aircraft, 2013, 50(6): 1908-1922.
- [29] RAHMANI M, BEHDINAN K. Studying the effect of freeplay on nose landing gear shimmy using a fully nonlinear model[C]// ASME 2018 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. US: ASME, 2018: 148-151.
- [30] 李东, 杨云飞, 胡鹏翔, 等. 运载火箭多体动力学建模与仿

- 真技术研究[J]. 宇航学报, 2021, 42(2): 141-149.
- LI Dong, YANG Yunfei, HU Pengxiang, et al. Research on multibody dynamic modeling and simulation technology for launch vehicles [J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(2): 141-149. (in Chinese)
- [31] KRÜGER W R, MORANDINI M. Recent developments at the numerical simulation of landing gear dynamics [J]. CEAS Aeronautical Journal, 2011, 1(1/4): 55-68.
- [32] BESSELINK I. Shimmy of aircraft main landing gears [J]. Mechanical Maritime & Materials Engineering, 2000(9): 9.
- [33] 张明, 聂宏, 朱如鹏, 等. 基于虚拟样机技术的飞机地面运动多学科协同仿真[J]. 中国机械工程, 2010(10): 64-69.
- ZHANG Ming, NIE Hong, ZHU Rupeng, et al. Multi-disciplinary collaborative simulation of aircraft ground maneuvers based on virtual prototype technology [J]. China Mechanical Engineering, 2010(10): 64-69. (in Chinese)
- [34] 蔡佳圻. 飞机起落架摆振动力学分析及其非线性问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- CAI Jiaqi. Dynamic analysis and nonlinear characteristic research on landing gear shimmy [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [35] 常泳涛. 含间隙起落架摆振动力学特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- CHANG Yongtao. Dynamic analysis of gap induced landing gear shimmy [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)
- [36] 闫宇飞, 汪瑞, 许锋. 柔性起落架间隙型摆振动力学分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 21(14): 6057-6062.
- YAN Yufei, WANG Rui, XU Feng. Dynamic analysis of clearance shimmy of flexible landing gear [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 21(14): 6057-6062. (in Chinese)
- [37] 王学军, 乔新. 前轮非线性摆振稳定性分析[J]. 南京航空学院学报, 1992, 24(1): 9-18.
- WANG Xuejun, QIAO Xin. The stability analysis of the nonlinear shimmy [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1992, 24(1): 9-18. (in Chinese)
- [38] ZHOU J X, ZHANG L. Incremental harmonic balance method for predicting amplitudes of a multi-D. O. F. nonlinear wheel shimmy system with combined Coulomb and quadratic damping [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 279(1/2): 403-416.
- [39] GORDON J T. Perturbation analysis of nonlinear wheel shimmy [J]. Journal of Aircraft, 2002, 39(2): 305-317.
- [40] 陈大伟, 顾宏斌, 刘晖. 起落架摆振主动控制分岔研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(7): 38-42.
- CHEN Dawei, GU Hongbin, LIU Hui. Active control on landing gear shimmy with bifurcation theories [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(7): 38-42. (in Chinese)
- [41] 冯飞. 起落架非线性摆振分岔分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- FENG Fei. Bifurcation analysis of nonlinear shimmy of landing gear [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [42] 谢帅, 舒成辉, 贾天娇, 等. 起落架摆振多体动力学建模及其在摆振飞行试验中的应用[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(1): 148-151.
- XIE Shuai, SHU Chenghui, JIA Tianjiao, et al. Multi-body dynamics modeling of landing gear shimmy and application in shimmy flight test based on model [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 37(1): 148-151. (in Chinese)
- [43] 杜进, 魏小辉, 蔡佳圻, 等. 油液压缩性对飞机摆振特性的影响[J]. 航空工程进展, 2015, 6(2): 171-176.
- DU Jin, WEI Xiaohui, CAI Jiaqi, et al. Effects of oil compressibility on landing gear shimmy [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2015, 6(2): 171-176. (in Chinese)
- [44] 刘伟, 贾玉红. 大型飞机前起落架摆振仿真分析[J]. 飞机设计, 2017, 37(3): 36-41.
- LIU Wei, JIA Yuhong. Shimmy simulation of large aircraft nose landing gear [J]. Aircraft Design, 2017, 37(3): 36-41. (in Chinese)

#### 作者简介:

向宗威(1997—),男,硕士研究生。主要研究方向:起落架稳定性分析与设计。

冯广(1982—),男,博士研究生,高级工程师。主要研究方向:起落架稳定性分析与设计。

姜义尧(1992—),男,博士研究生。主要研究方向:起落架稳定性分析与设计。

丁建宾(1998—),男,硕士研究生。主要研究方向:起落架稳定性分析与设计。

董彦灼(1993—),男,博士研究生。主要研究方向:起落架稳定性分析与设计。

蒋炳炎(1963—),男,博士,教授。主要研究方向:大型飞机起落架设计及虚拟样机仿真技术。

(编辑:丛艳娟)