

基于英特刚柔耦合多体动力学软件的全柔性体起落架落震仿真分析

郭春秋, 徐荣浩, 王 炎, 刘师玮

英特工程仿真技术(大连)有限公司 辽宁大连

【摘要】起落架落震仿真是起落架研制的关键环节, 全柔性体建模能更真实地复现关键承载部件在强冲击工况下的结构弹性效应。目前公开文献均以国外商业多体动力学软件为主, 国产软件在该场景下的功能适用性研究尚属空白。为此, 本文以英特刚柔耦合多体动力学软件 V1.0 为平台, 研究模态中性文件(MNF)模态柔性体建模、刚柔耦合、柔柔连接、轮胎-路面接触、部件初始速度驱动等功能的实现方法并完成某型起落架落震仿真。结果表明: 所建模型在首次接触时刻、力峰值时序、衰减趋势上与国外商业软件求解器一致, 左右双轮对称性良好, 缓冲器压缩量在两求解器上重合, 验证了该软件在强非线性瞬态落震问题上的功能完整性与工程适用性。

【关键词】全柔性体; 起落架; 落震仿真; MNF 模态柔性体; 刚柔耦合; 轮胎-路面接触; 国产多体动力学软件

【收稿日期】2026 年 6 月 12 日

【出刊日期】2026 年 7 月 15 日

【DOI】10.12208/j.jer.20260049

Drop simulation analysis of full-flexible landing gear based on Yingte Rigid-Flexible Coupled Multibody Dynamics Software

Chunqiu Guo, Ronghao Xu, Yan Wang, Shiwei Liu

Yingte Engineering Simulation Technology (Dalian) Co., Ltd., Dalian, Liaoning

【Abstract】Landing gear drop simulation is a key step in landing gear development. Full-flexible modeling more accurately reproduces the elastic effects and load distribution of key load-bearing components under strong impact. Most published studies rely on foreign commercial multibody dynamics software, and the functional applicability of domestic software in full-flexible drop simulation remains a gap. Based on Yingte Rigid-Flexible Coupled Multibody Dynamics Software V1.0, this work investigates the implementation of Modal Neutral File (MNF) modal flexible body, rigid-flexible coupling, flexible-flexible connection, tire-road contact, and initial velocity driving, and completes the drop simulation of a certain landing gear. Results agree with the foreign commercial software solver in first contact time, force peak timing, and decay trend. The dual-wheel symmetry is good and the buffer compression values coincide, verifying the functional completeness and engineering applicability of the software.

【Keywords】Full flexible body; Landing gear; Drop simulation; MNF modal flexible body; Rigid-flexible coupling; Tire-road contact; Domestic multibody dynamics software

1 绪论

起落架落震试验是起落架研制的强制性验证环节, CCAR-25 部第 723 条、FAR/CS25.723 等均对落震性能提出明确要求^[1]。自 Noll 等^[2]对落震动力学开展系统理论分析以来, 数值仿真已成为重要补充。型号研制阶段落震试验需消耗多套物理样机, 单次投放成本高、周期长, 样机通常不可重复使用。因此, 发展高保真度落震数值仿真方法以替代或部分替代物理试验, 成为国内

外研究重点。

落震仿真的难点在于: 起落架是典型多体-柔性耦合系统^[3], 缓冲器在极短时间内吸收巨大冲击能量, 关键承载部件(支柱、扭力臂、轮叉等)产生显著弹性变形; 轮胎-路面接触瞬态强非线性、缓冲器油气混合非线性、左右双轮载荷分配耦合进一步增加求解难度^[3]。主流刚柔耦合方法包括模态叠加、模态综合与全柔性三类, 其中基于 MNF (Modal Neutral File) 的模态柔

第一作者简介: 郭春秋(1995-)男, 汉族, 河南省长垣市人, 研究生, 主要从事多体动力学方向研究。

性体方法因建模流程规范、衔接有限元前处理顺畅,已在海外商业软件中成为标准做法^[4,5]。刘冲冲等^[6]同样对机体弹性对接地载荷影响开展过早期研究。

在工具链层面,落震仿真长期依赖国外商业软件,国内公开文献中尚未见到国产多体动力学软件在该全柔性落震场景下的工程应用报道。英特、索辰、DAP、Magicsim 等国产软件已在刚体机构运动学、简单刚柔耦合工况下积累工程案例,但在起落架强冲击全柔性场景下的功能验证仍属空白^[7-9]。

本文以英特刚柔耦合多体动力学软件 V1.0 为平台,针对某型起落架开展全柔性体落震仿真,验证 MNF 模态柔性体、刚柔耦合、柔柔连接、轮胎-路面接触、初始速度驱动等功能的实现,并与国外商业软件求解器做趋势对照。

2 全柔性建模理论与软件平台

2.1 MNF 模态柔性体方法

MNF (Modal Neutral File) 是一种以模态坐标为接口的多体-有限元耦合方法。有限元前处理将部件网格化并模态分析,导出包含模态振型、质量、刚度与残余柔度信息的 MNF 文件;多体求解器在装配时以模态坐标作为广义坐标参与系统动力学方程积分。该方法将节点自由度缩减为少量模态自由度,求解规模与刚体自由度相当,兼顾效率与结构弹性刻画。该方法隐含小变形线弹性假设,对落震瞬态下起落架关键部件的变形量级适用,本文研究范围限定在线弹性段。陈小龙等^[10]将该方法应用于起落架结构拓扑优化设计,验证了模态叠加法在工程实践中的有效性。

2.2 力元与缓冲器模型

起落架的弹性连接与缓冲器以力元形式建模。FORCE_BUSHING 力元通过 6×6 刚度-阻尼矩阵刻画两连接点间的扭转与平移耦合刚度,适用于扭力臂枢轴、轮叉铰接点等弹性铰链;FORCE_SPRING 力元通过非线性力-位移关系描述缓冲器油气混合特性,本构曲线可由试验数据导入。

2.3 轮胎-路面接触

轮胎与路面瞬态接触是落震求解的关键非线性源。轮胎模型刻画垂向压缩、回正力矩、侧向力与滑移率的关系;接触对通过算法求解法向与切向作用力。本模型中路面以刚性平面参与接触,摩擦系数随滑移率按典型曲线变化。

2.4 部件初始速度机制

落震工况的本质是给起落架一个初始下沉速度,模拟物理释放瞬间。在该软件的物体修改对话框中可

对任意部件任意方向施加初始速度与角速度。本模型对_MODEL_1_BASEPLATE 施加 Z 方向 2000mm/s 下沉初速度,驱动整个模型进入落震瞬态。

2.5 英特刚柔耦合多体动力学软件 V1.0 求解平台

本文仿真基于英特刚柔耦合多体动力学软件 V1.0 完成。该软件具备自主求解内核,支持 MNF 模态柔性体建模、刚柔耦合、柔柔连接、轮胎-路面接触与初始速度定义,可统一完成建模、模态缩减、接触求解与后处理。

3 全柔性落震模型与工况

3.1 模型拓扑与柔性化范围

起落架模型以 MODEL_1 树状结构组织。树根下挂 ground 惯性参考系、RIGID_BODY_4 质量等效刚体、4 个 MNF 模态柔性体(M_UDE_L/R、M_MI_L/R, 分别对应左右支柱与左右轮叉关键承载段),以及 BASE、BASEPLATE、main_fitting 等装配刚体;传力路径由 4 个 FORCE_BUSHING (扭力臂与轮叉枢轴弹性铰链)、1 个 FORCE_SPRING (缓冲器非线性力元) 及左右双轮 Tire 与路面的接触对构成。

3.2 工况与初始速度

本文工况为单工况落震演示:起落架从固定高度自由释放,仿真时长 0.5s。释放瞬态通过部件初始速度机制实现:对_MODEL_1_BASEPLATE 施加 Z 方向 2000mm/s 下沉初速度,驱动整个起落架进入落震瞬态。

采样设置:轮胎力曲线步长 2.5ms,弹簧压缩量曲线步长 1.0ms。国外商业软件对照模型采用相同初始速度与采样设置。

3.3 模型构成与功能配置

模型构成与连接关系:ground 为惯性参考基准;BASE、BASEPLATE、RIGID_BODY_4 等承担质量等效与初始速度施加对象的作用;main_fitting、lower/upper_dragbrace、lower/upper_toquelink 等按刚体处理,承担几何约束与导引。M_UDE_L/R、M_MI_L/R 共 4 个部件采用 MNF 模态柔性体建模,经 4 个 FORCE_BUSHING 与装配刚体相连,形成刚柔耦合与柔柔连接的传力网络;缓冲器由 1 个 FORCE_SPRING 描述。左右双 Tire 与路面构成接触对。

4 关键功能实现

全柔性落震仿真的功能实现涵盖以下 6 项:

4.1 功能实现清单

①MNF 模态柔性体: M_UDE_L/R、M_MI_L/R 共 4 个部件采用该方式;②刚柔耦合:由 4 个 FORCE_BUSHING 与 1 个 FORCE_SPRING 连接柔性

体与装配刚体; ③柔柔连接: 由上述力元构成柔性体间传力网络; ④Tire-路面接触: 左右双 Tire 与路面建立接触对, 曲线时序与峰值趋势与国外商业软件一致; ⑤部件初始速度驱动: 在物体修改对话框中指定初速度, 本模型对_MODEL_1_BASEPLATE 施加 Z 向 2000mm/s; ⑥求解与后处理: 采用隐式时间积分与接触求解完成 0.5s 瞬态求解, 输出时程趋势与国外商业软件一致。

4.2 功能链路的工程含义

本模型在该软件上实现了上述 6 项功能在全柔性落震场景下的贯通。6 项功能构成完整链路, 任一环节缺失都会导致链路断裂, 其完整性由轮胎力、弹簧压缩量两条曲线的趋势对照得到验证。

5 仿真结果与趋势分析

本章围绕轮胎垂向力与缓冲器压缩量两条曲线, 从时序特征、左右轮对称性、压缩量演化三个维度做趋势分析。对照基线为国外商业软件求解器在相同初始条件下的同模型结果。

5.1 轮胎垂向力时程

左右双轮垂向力时程表明: 0-0.0775s 区间轮胎与路面无接触, 垂向力为零, 模型处于自由下落阶段, 符合初始速度驱动机制下的物理预期。

0.0775s 时轮胎首次接触路面, 垂向力瞬时跃升; 至 0.0825s 达峰值, 本文软件左、右轮峰值分别为 1922.07N、1917.44N, 国外商业软件为 1915.59N、1913.82N, 左右轮差值均小于 0.5%。

0.0825s 后曲线呈衰减振荡, 符合典型落震后回弹特征, 两求解器衰减相位趋势一致。受采样步长影响, 国外商业软件 (1.0ms) 能更精细地捕捉首次接触跃升过程, 本文软件 (2.5ms) 记录的接触与峰值时刻存在 0.5-1.5ms 离散差, 属采样离散性, 不影响整体时序趋势。

5.2 缓冲器弹簧压缩量时程

缓冲器弹簧压缩量时程表明: $t=0$ 时弹簧长度为 122.87mm, 处于未压缩状态; 0-0.0775s 自由下落阶段保持不变, 0.0775s 起进入压缩行程, 长度单调下降。

至 $t=0.5$ s, 弹簧长度稳定在 91.79mm (本文软件) 与 91.80mm (国外商业软件), 最大压缩量约 31mm, 两曲线差异小于 0.01mm, 验证了 FORCE_SPRING 力元在 MNF 柔性体与装配刚体间传力路径的闭合。

5.3 趋势对照小结

综合上述对照可得: ①该软件能正确驱动全柔性模型完成 0.5s 瞬态求解; ②能准确捕捉首次接触、力

峰值、缓冲器压缩等关键时序节点; ③能稳定输出左右双轮独立力曲线。

本文以趋势一致性作为国产软件功能适用性的判据。需指出, 趋势一致性不等同于完全数值吻合——本文不追求曲线峰值的逐点误差, 转而关注时序、量级、左右对称、衰减趋势等物理含义层面的吻合。该判据足以支撑方案阶段选型评估, 不替代适航符合性验证所需试验数据。

6 结论

本文基于英特刚柔耦合多体动力学软件 V1.0, 针对全柔性体起落架落震工况, 开展了 MNF 模态柔性体、刚柔耦合、柔柔连接、轮胎-路面接触、初始速度驱动等功能的实现研究, 结论如下:

(1) 该软件可支持 MNF 模态柔性体、刚柔耦合、柔柔连接、轮胎-路面接触与部件初始速度驱动的全流程贯通, 能够完成全柔性起落架落震瞬态求解;

(2) 关键曲线在时序、量级与左右对称性上与国外商业软件求解器趋势一致, 缓冲器压缩量差异小于 0.01mm;

(3) 上述结果验证了该软件在强非线性瞬态落震问题上的功能完整性与工程适用性。

后续工作将扩展至主起+前起全机落震、刹车+侧风联合工况、缓冲器流固耦合等更复杂场景, 并与落震试验数据开展定量对比, 形成面向适航符合性验证的完整证据链。

参考文献

- [1] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011. (中国民用航空局令第 209 号, 第 25.723 条 减震试验)
- [2] Noll R B, McKay J M. Theoretical dynamic analysis of the landing loads on a vehicle with a tricycle landing gear[R]. NASA TN D-4075, Washington, DC: NASA, 1967.
- [3] Currey N S. Aircraft Landing Gear Design: Principles and Practices[M]. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1988.
- [4] Liu W B, Wang Y S. Improved multi-body dynamic simulation of landing gear drop test incorporating structural flexibility and bearing contact[J]. Aerospace, 2024, 11(7): 543.
- [5] Liu W B, Wang Y S, Ji Y C. Landing impact load analysis and validation of a civil aircraft nose landing gear[J]. Aerospace, 2023, 10(11): 953.

- [6] 刘冲冲, 牟让科, 马晓利, 等. 考虑机体弹性的起落架着陆仿真分析[J]. 航空工程进展, 2011, 2(2): 188-192.
- [7] 刘晶鑫, 董辉立, 马晓琛. 基于有限元柔性体理论的起落架落震仿真分析[J]. 机械设计与制造, 2024(3): 100-105+110.
- [8] 刘水不腐, 刘小川, 惠旭龙, 等. 机体柔性对飞机着陆载荷影响的试验与仿真研究[J]. 航空工程进展, 2026, 17(4): 96-107.
- [9] 陈小龙. 飞机起落架系统落震动力学建模与响应分析[D]. 汉中: 陕西理工大学, 2024.
- [10] 陈小龙, 赵知辛, 张瑞阳, 等. 飞机起落架结构拓扑优化设计及动态特性分析[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2024, 40(2): 1-8.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS