

小型飞机无杆牵引车车架动力学仿真及优化设计

祝恒佳,王欣悦

(中国民航大学航空工程学院,天津 300300)

摘要: 牵引车车架作为飞机无杆牵引车的核心承载结构,其强度和刚度直接决定了飞机牵引滑行系统的安全性。本文设计了一款针对小型飞机牵引需求的牵引车车架结构,并构建了相应的动力学仿真模型,深入探讨牵引速度与路面障碍凸起高度对车架受力的影响。通过有限元仿真分析、结构优化设计及实验验证发现:当牵引车后轮接触障碍凸起时,车架左、右侧梁将产生对称且相等的最大作用力,且该作用力随牵引速度的提升而显著增大;在牵引速度达到30 km/h、障碍凸起高度为30 mm的工况下,车架受力与应力水平达到峰值,导致局部应力值超出材料许用应力范围;经过结构优化,车架在未超过许用应力的前提下,承载能力提升了86.31%,并通过实验数据验证了优化后模型的准确性。本文可为牵引车车架的后续设计与优化提供重要的理论依据和实践参考。

关键词: 飞机牵引滑行;无杆牵引车;Adams仿真;有限元模型;车辆动力学

中图分类号: V351.34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2026)01-0073-07

Dynamic simulation and optimization design of the frame for a small aircraft towbarless towing vehicle

ZHU Hengjia, WANG Xinyue

(College of Aeronautical Engineering, CAUC, Tianjin 300300, China)

Abstract: The frame of the towing vehicle, as the core load-bearing structure of the aircraft towbarless towing vehicle, directly determines the safety of the aircraft towing and taxiing system through its strength and stiffness. This paper designs a frame structure for the towing vehicle tailored to the towing requirements of small aircraft and develops a corresponding dynamic simulation model to thoroughly investigate the effects of towing speed and road obstacle bump height on frame loading. Finite element simulation, structural optimization design, and experimental validation reveal that when the rear wheels of the towing vehicle encounter an obstacle bump, symmetric and equal maximum forces are generated on the left and right side beams of the frame, and these forces increase significantly with increasing towing speed. Under the condition of a towing speed of 30 km/h and an obstacle bump height of 30 mm, the frame loading and stress level reach their peaks, causing local stress values to exceed the material's allowable stress limit. After structural optimization, the frame's load-carrying capacity is improved by 86.31% without exceeding the allowable stress, and the accuracy of the optimized model is validated by experimental data. This paper can provide important theoretical basis and practical reference for the subsequent design and optimization of towing vehicle frames.

Key words: aircraft towing and taxiing; towbarless towing vehicle; Adams simulation; finite element model; vehicle dynamics

车架是飞机无杆牵引车的核心骨架,也是其主要的承重结构。与传统的有杆牵引方式不同,无杆牵引车通过抱轮机构直接连接飞机前机轮,不仅要承受自身重量,还要承担飞机的部分载荷。这种工作模式对车架提出了更高的要求:其不仅要能承载垂向载荷,

还需要具备足够的纵向牵引能力。当无杆牵引车经过路面凸起或凹陷时,路面产生的垂向激励会通过抱轮机构传递至机轮,可能对飞机前起落架造成损坏^[1]。此外,在制动过程中,飞机质量较大,惯性作用会产生显著的纵向力,可能导致车架断裂。因此,车架在重载和

高速工况下具备足够的强度和刚度,这是确保飞机安全滑行和机场正常运行的关键。

目前,国内外许多学者对牵引车辆车架进行了广泛研究。在无杆牵引车设计方面,王志等^[2]设计了一款步行式电动牵引车,对其行驶速度和牵引力进行了计算与实验验证。安喜平等^[3]基于滚柱和滑杆约束优化了车架结构,通过静强度分析和实验验证缩短了制造流程并降低了制造成本。孙书蕾等^[4]建立了牵引车车架的三维模型,通过有限元静力学分析验证了其在有杆压力、顶推力和下压力作用下的可靠性。然而,上述研究主要针对 B737-800 等大型飞机牵引车,缺少对小型飞机牵引车的设计探索。高雪^[5]设计了一款适用于舰载机的无杆牵引车车架,验证了其在举升载荷下的静强度。在实际工作中,无杆牵引车的工作方式与重型挂车类似,需承受较大的垂向动载荷和静载荷。李播博^[6]通过瞬态动力学分析,研究了阻尼对重型牵引车车架结构的影响。但是,作为主要的承重结构,车架的力学性能需要在牵引车设计的基础阶段进行重点研究分析,以保证车架强度满足实际工作要求^[7]。Chen 等^[8]通过扭转刚度、弯曲刚度和振动频率分析车架强度,优化了车架尺寸,在保证强度的同时实现了轻量化设计。Dizo 等^[9]通过有限元分析验证了重载挂车车架在静载后倾和侧倾工况下的可靠性。文献[10-11]分别从静力学和材料的角度研究了车架的承载能力以及相关车架轻量化的设计。杨扬^[12]通过模态仿真优化了矿用半挂车的车架结构。然而,上述研究多集中于车架静力学和模态分析,缺乏对车架动力学的深入探讨。

在牵引滑行动力学研究方面,Mu 等^[13]建立了无杆牵引车动力学模型,分析了转向和制动工况下飞机下阻力臂与起落架支柱的力学关系。Coetzee^[14]则研究了牵引过程中车架系统的垂向稳定性。Lu 等^[15]通过建立考虑前起落架垂直约束的动力学模型,分析牵引车抱轮机构的抱紧行为对飞机前起落架在牵引过程中的力学性能影响。然而,这些研究多关注牵引系统整体和飞机前起落架的动力学响应,忽视了滑行牵引对车架结构动力学性能的影响。

综上,当前国内外研究主要聚焦于大型飞机无杆牵引车车架结构设计及其静力学特性分析,同时深入探讨了牵引滑行对飞机前起落架结构的影响。然而,针对小型飞机无杆牵引车车架结构及其在低速和高速工况下动力学性能的研究仍较少。考虑到小型飞机特有的结构紧凑、高负载等特点,本文设计了一款适用于小型飞机的无杆牵引车车架结构。通过动力学仿

真方法系统分析了高速牵引滑行过障工况下车架的力学性能,验证了其结构强度。针对初始设计结构强度不足的问题,通过改进车架结构,使其承载能力显著提升,满足高速牵引滑行的实际需求。本文的研究成果填补了小型飞机无杆牵引车车架相关研究的部分空白,为小型飞机无杆牵引车的研究提供了理论依据和参考。

1 小型飞机无杆牵引车系统建模

1.1 模型描述

飞机无杆牵引车的设计关键在于要保证牵引系统的稳定性和可靠性,作为牵引车的核心部件,车架的设计需要满足:有足够的空间安装抱轮机构及驱动系统;能够精确完成抱紧飞机前起落架并安全举升的操作,确保牵引作业的顺利进行。车架整体结构主要由结构钢焊接而成^[16]。本文以小型飞机空中国王 350(简称国王 350)为牵引对象,设计了一款适用于小型飞机的无杆牵引车车架结构。国王 350 的参数如表 1 所示;小型飞机无杆牵引车车架模型的参数如表 2 所示。

表 1 国王 350 参数

Tab.1 Parameters of King Air 350

参数	数值	参数	数值
最大质量/kg	6 849.24	尾翼高度/mm	4 368.8
机身总长/mm	140 355.2	主起落架与前起落架轮距/mm	4 953
机头垂直高度/mm	2 794		

表 2 小型飞机无杆牵引车车架模型参数

Tab.2 Frame model parameters of the small aircraft towbarless towing vehicle

参数	数值	参数	数值
质量/kg	139.08	后车车轮距/mm	950
长×宽×高/mm	1 530×1 200×335	轴距/mm	1 230
前车车轮距/mm	810	—	—

设计的小型飞机无杆牵引车车架模型如图 1 所示。牵引车车架与抱轮机构通过 A、B、C、D 4 点的液压缸连接,如图 2 所示,抱轮机构夹持并抱紧飞机前起落架后,通过 A、B、C、D 4 点的液压缸将前起落架机轮举升脱离地面,形成飞机-牵引车牵引系统结构。此时,飞机的质量通过液压缸传递至车架处,这 4 点为车架的主要受力位置。在设计中将牵引车电池箱、前轮、后轮的位置安排至车架左侧和右侧,使结构紧凑。牵引车前轮为随动万向轮,牵引动力由电池箱提供至后轮,控制牵引速度和行驶方向。由车架的两侧梁

承载 A、D 2 处液压缸的压力,中间梁承载 B、C 2 处液压缸传递的压力,这 4 个点也是后续车架仿真分析中的主要施加载荷位置。

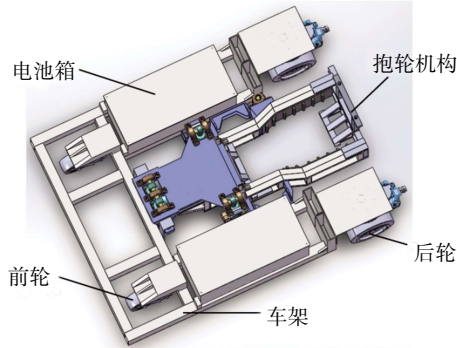


图 1 小型飞机无杆牵引车车架模型

Fig.1 Frame model of the small aircraft towbarless towing vehicle

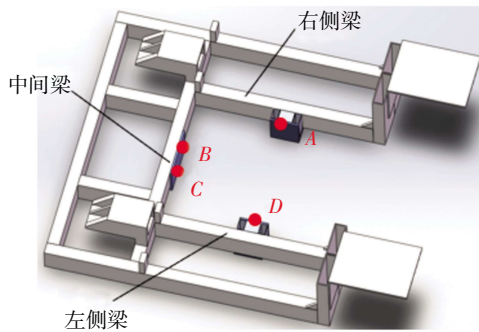


图 2 液压缸位置示意图

Fig.2 Schematic illustration of hydraulic cylinder position

1.2 牵引路面建模

为了模拟机场路面可能存在的凹凸不平情况,在 Adams 软件中建立路面模型,设定路面宽度为 1520 mm,障碍凸起高度分别为 10、20、30 mm。设置除障碍以外的路面为不平度 $1.26 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 的随机混凝土路面^[17],如图 3 所示。

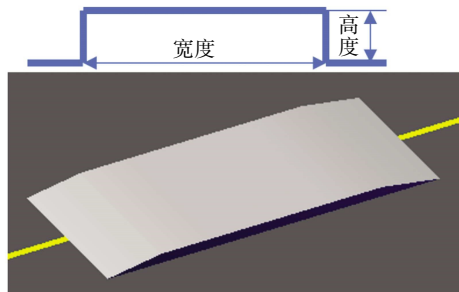


图 3 凸起路面模型

Fig.3 Road surface model with a bump

1.3 飞机-牵引车牵引系统建模

基于动力学仿真需求,研究通过 Adams 软件建立了飞机-牵引车牵引系统模型^[18-19]。为提升仿真计算效率,在保证结果准确性的基础上,对系统模型进行合

理简化:①刚体假设,除轮胎外,整车各部件视为刚体;②约束设定,考虑到牵引工况为直线匀速行驶,采用绑定约束模拟抱轮机构与前起落架的连接关系,有效避免牵引过程中前起落架可能产生的转动问题;③结构简化,为提升计算效率,在不影响力学特性的前提下,将车架梁的圆角结构简化为直角结构,其余结构保持不变。经上述操作建立牵引系统模型,如图 4 所示。

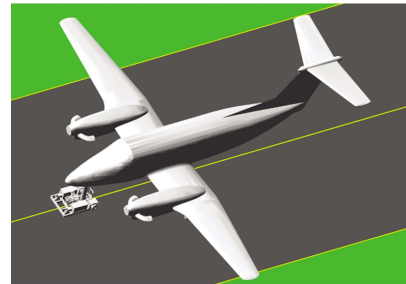


图 4 牵引系统模型

Fig.4 Model of the towing system

2 飞机牵引系统动力学仿真分析

设置牵引系统以 10、30 km/h 速度匀速分别以右侧单侧、左右双侧经过障碍凸起高度为 10~30 mm 的路面,得到牵引车车架 D 点在不同速度、障碍条件下的动力学响应数据。基于上述实验数据,通过有限元仿真方法,验证车架在实际工况下的动力学性能^[20]。

2.1 牵引系统 Adams 动力学分析

2.1.1 单侧经过凸起障碍工况

设置牵引系统匀速、右侧单侧经过凸起障碍路面,由于 A、B、C、D 4 点中 D 点受力最大,因此,仅根据 D 点进行分析,得到牵引车车架 D 点垂向受力图,如图 5 所示。

从图 5 可以看出,牵引系统单侧经过凸起障碍路面的工况下,车速和障碍高度的增加均会导致车架受力的增加,车轮与障碍接触时两者之间产生了较大的冲击力,同时惯性原因导致车架受力增大,车架受力有 4 次峰值出现,分别为前轮经过障碍右侧边缘、后轮经过障碍右侧边缘、前轮经过障碍左侧边缘、后轮经过障碍左侧边缘时产生的力,其中最大值出现在后轮经过障碍边缘的瞬间,并在小幅度波动后趋于水平。牵引速度为 10、30 km/h,障碍凸起高度为 10 mm 时,车架垂向最大受力值分别为 21.64、30.06 kN,随着速度的增加,车架受力增长了 38.91%;障碍凸起高度为 20 mm 时,车架垂向最大受力值分别为 32.06、55.64 kN,受力增长了 73.55%;障碍凸起高度为 30 mm 时,车架垂向最大受力值分别为 53.68、56.81 kN,增长了 5.83%,具

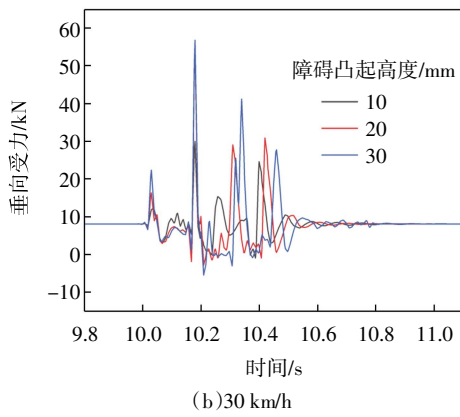
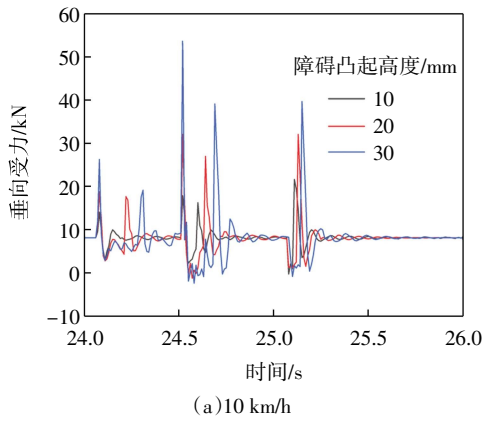


图5 不同速度下牵引车车架受力(单侧)

Fig.5 Force on the towing vehicle frame at different speeds (single side)

体结果如表3所示。结果表明,单侧过障工况下,路面障碍凸起高度是影响车架垂向受力的主要因素,而牵引速度变化对车架受力的影响相对较小。当障碍凸起高度为30 mm时,不同牵引速度对车架受力的影响差异显著减小,呈现出数值趋于接近的趋势。

表3 单侧过障车架D点最大受力

Tab.3 Maximum force at point D on the frame during single-side traversal of a road bump

障碍凸起高度/mm	速度/(km·h ⁻¹)	D点最大受力/kN	增长率/%
10	10	21.64	38.91
	30	30.06	
20	10	32.06	73.55
	30	55.64	
30	10	53.68	5.83
	30	56.81	

2.1.2 双侧经过凸起障碍工况

设定牵引系统匀速、双侧同时经过障碍路面,得到车架D点受力变化,如图6所示。

从图6中可以看出,车架双侧经过凸起障碍的力学性能与单侧相同,均在车轮经过障碍边缘时产生较大的力,但是与单侧过障不同,当障碍凸起高度为

10 mm时,牵引速度越慢则车架垂向受力越大,这是由于障碍凸起高度较低,车架主要受自身及飞机产生的重力作用,受惯性影响明显。当障碍凸起高度逐渐提高至20 mm和30 mm时,轮胎与障碍接触夹角变大,牵引速度达到30 km/h时,车架垂向受力受障碍凸起高度及牵引速度共同作用影响,导致车架垂向受力呈正弦振动式的往复变化,最大受力峰值已达到单侧工况的约2.5倍,具体结果如表4所示。这种振动式应力变化对车架的影响十分严重,可能会造成车架断裂破坏,存在严重的安全隐患。

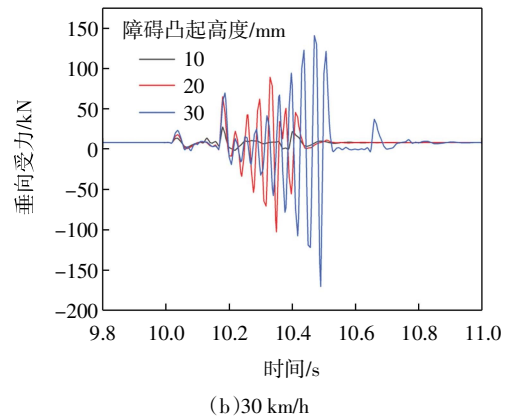
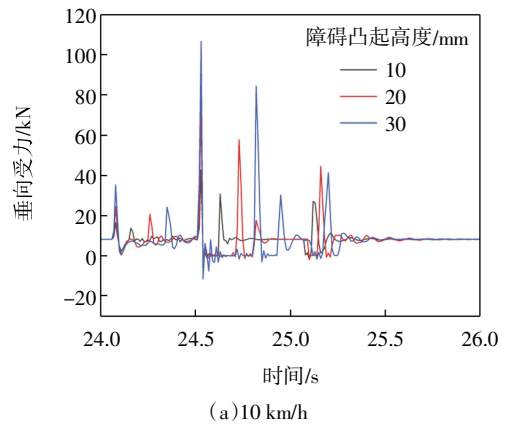


图6 不同速度下牵引车车架受力(双侧)

Fig.6 Force on the towing vehicle frame at different speeds (both sides)

表4 双侧过障车架D点最大受力

Tab.4 Maximum force at point D on the frame during both-side traversal of a road bump

障碍凸起高度/mm	速度/(km·h ⁻¹)	D点最大受力/kN	增长率/%
10	10	42.77	-33.46
	30	28.46	
20	10	77.34	15.61
	30	89.41	
30	10	106.63	32.04
	30	140.79	

为了进一步验证车架的安全性、可靠性,需要对

车架进行有限元动力学分析,验证车架在设定工况下的应力性能表现。

2.2 车架有限元分析

2.2.1 车架有限元模型建立

将建立的牵引车车架模型导入 ABAQUS 有限元软件中,为了提升计算效率,简化车架设计的圆角倒角结构,采用绑定约束处理整车零件的连接,并通过耦合约束将应力施加点与车架实际受力点关联,确保载荷传递符合实际^[21]。具体车架固定约束位置、应力施加位置、网格划分如图 7 所示,整体网格划分为六面体网格,共 44 070 个,设置牵引车车架材料属性为 Q235 钢,其性能参数^[22]如表 5 所示。

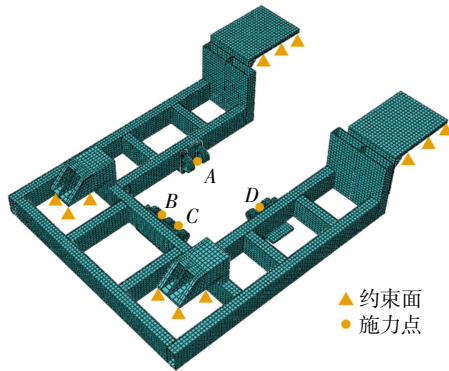


图 7 车架有限元模型

Fig.7 Finite element model of the frame

表 5 Q235 钢的材料属性

Tab.5 Material properties of Q235 steel

参数	数值	参数	数值
拉伸强度/MPa	375	泊松比	0.30
屈服强度/MPa	235	密度/(g·cm ⁻³)	7.85
杨氏模量/GPa	210	伸长率/%	25

2.2.2 车架有限元动力学分析

基于牵引系统以 30 km/h 速度双侧跨越 30 mm 凸起障碍的力学数据,对车架结构进行有限元动力学分析,在仿真到第 25 分析步时,车架应力分布显著集中^[23],如图 8 所示,最大应力值已经达到 298.50 MPa,主要

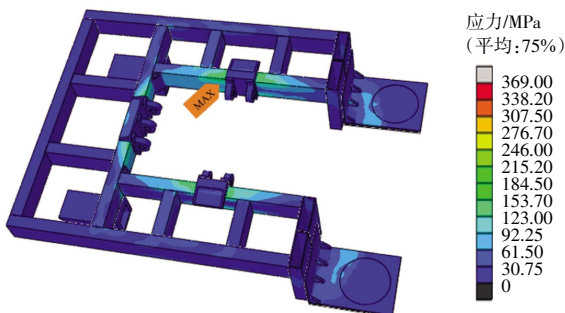


图 8 有限元动力学分析结果

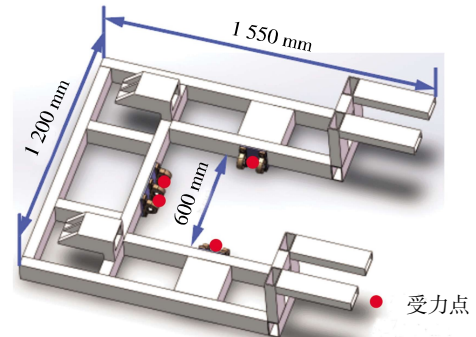
Fig.8 Results of finite element dynamic analysis

分布在车架左侧纵梁区域,已超出 Q235 钢材料的许用应力值,表明当前车架结构在特定的工况下存在失效的风险,无法满足安全牵引的要求。因此,后续需要针对车架结构开展优化设计,以提升其承载性能。

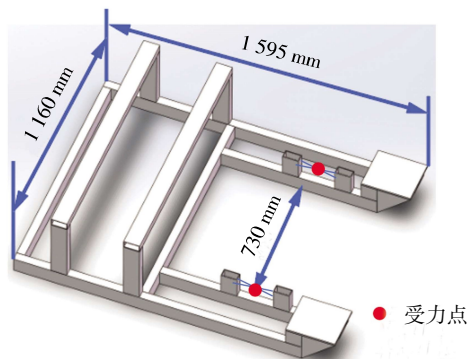
3 车架优化设计

3.1 结构优化

目前多采用拓扑优化的方法提升结构力学性能,通过添加车架材料、结构等方法实现提高车架强度的目的。但是经过多次拓扑优化发现,单纯对车架结构进行局部调整难以显著提升其整体性能,并且会导致加工困难^[24]。在此,对车架结构提出了 2 种改进设计方案:方案 1 聚焦于结构强化,通过优化后轮连接板结构以增强后轮承载能力,同时在左右纵梁增设受力肋板,提升整体结构刚性和承载性能;方案 2 采用结构重构的思路,通过调整前后轮连接布局,改为前轮驱动,后轮随动的模式,并改变支撑结构设计,取消中间承重梁,采用双梁支撑,同时扩大左侧和右侧梁承重部分的面积,优化载荷分布路径,如图 9 所示。



(a) 方案 1



(b) 方案 2

图 9 车架优化方案

Fig.9 Optimization scheme of the frame

3.2 优化结构有限元对比分析

为评估 2 种优化方案,将牵引系统以 30 km/h 的速

度双侧经过 30 mm 凸起高度障碍路面的动力学数据作为输入条件,采用有限元方法对优化后的牵引车车架进行动力学分析,得到的有限元结果如图 10 所示。从图 10 中可以看出:方案 1 的最大应力值为 127.83 MPa,较原始方案降低了 57.18%;方案 2 的最大应力值降低至 40.85 MPa,相比原始方案减少了 86.31%,表现出更为显著的改进效果。具体数据及对比分析结果如表 6 所示,这为后续方案的综合评估提供了数据参考。

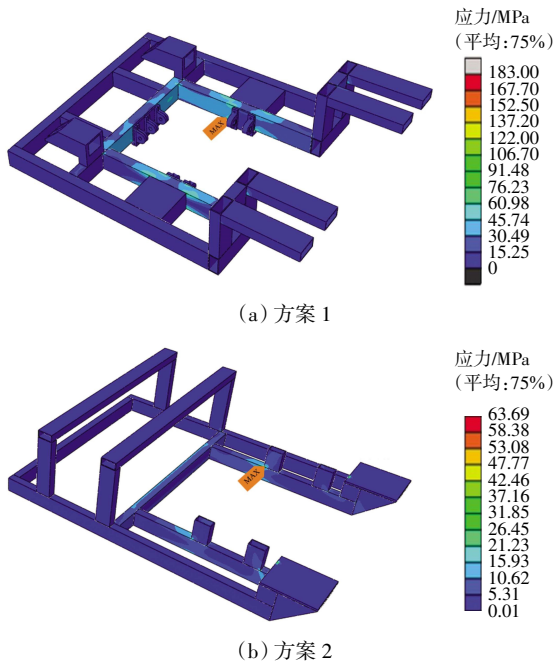


图 10 优化车架有限元结果云图

Fig.10 Cloud map of finite element results for optimized frame

表 6 优化前后车架最大应力对比

Tab.6 Comparison of maximum stress before and after optimization

设计方案	应力最大值/MPa	增长率/%
原始模型	298.50	—
方案 1	127.83	-57.18
方案 2	40.85	-86.31

4 车架静载实验验证

为验证优化后车架结构的力学性能,以方案 2 为基础,构建了小型飞机无杆牵引车的实体结构模型,并开展受载实验以验证车架模型的准确性。具体试验方案如下:在牵引车静止状态下,对车架施加固定外载荷,在车架梁上表面处粘贴应变片,连接程控静态电阻应变仪 XL2101G 进行应变测量,将实测应力值与有限元仿真结果进行对比分析^[29]。考虑到优化后车架结构的左右对称性,实验仅采集牵引车左侧梁的应变,基于胡克定律计算测量点的应力值,即

$$\sigma = E\varepsilon \tag{1}$$

式中: ε 为实验平均测量应变; E 为弹性模量。

应变片布置如图 11 所示,具体布置如下:应变片之间水平间隔为 25 mm,与车架梁之间的水平间隔为 30 mm。其中,应变片 6 布置于车架梁内侧,其余应变片粘贴位置为梁上表面。实验在牵引车静止状态下进行,测试平台为平坦无高度差地面,在抱轮机构处施加质量 60 kg 的集中外载荷,通过数据采集系统获取 10 s 内的连续应变数据。为确保测量结果的可靠性,对采集数据进行滤波处理后取平均值,并依据胡克定律计算得到实验应力值,最终与有限元仿真结果进行对比分析,具体数据如表 7 所示。

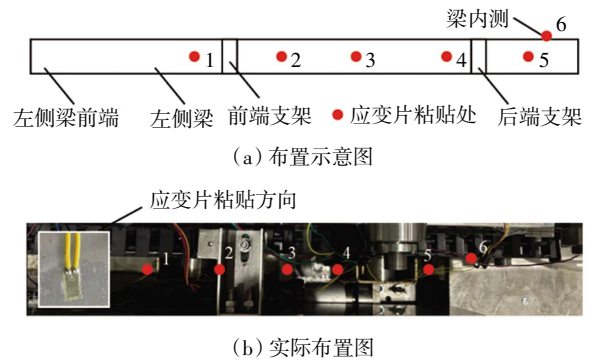


图 11 应变片布置图

Fig.11 Arrangement of strain gauges

表 7 车架静载受力结果

Tab.7 Results of frame forces under static loading

应变片序号	仿真应力值/MPa	实验应力值/MPa	变化率/%
1	3.71	3.37	-9.16
2	1.22	1.10	-9.84
3	1.12	1.23	9.82
4	0.67	0.72	7.46
5	1.18	1.32	11.86
6	1.99	1.81	-9.05

实验结果表明,在施加 60 kg 外载荷条件下,车架各测量点的实验值与有限元仿真结果间的最大误差为 11.86%,经分析,产生误差的原因包括:①有限元模型中对车架梁的圆角进行了理想化处理,与实际焊接结构存在差异;②牵引系统模型搭建时未考虑实际车架的安装误差;③实验中轮胎产生的弹性变形未在仿真模型中予以充分考虑。为消除实验误差,可采取以下措施:①在有限元仿真时,避免改动模型,保留真实结构;②提升车架装配精度;③在实验过程中将车架整体安装至实验平台,避免轮胎变形产生影响。尽管存在上述差异,但实验结果与仿真数据的吻合度仍

在可接受范围内^[20],这表明优化后的车架模型具有较好的有效性和准确性。通过此次实验验证获得了较高可信度的车架模型,可为后续优化设计和工程应用提供重要参考。

5 结语

本文提出了一种小型飞机无杆牵引车车架结构,并对改进后的车架结构进行了系统的性能分析与优化设计,得出如下研究成果。

(1)提出一种小型飞机无杆牵引车车架模型,基于安全性考虑对牵引车车架的性能进行了动力学仿真分析和有限元分析,结果表明,在通过凸起障碍路面时,车架承受的力主要受障碍凸起高度影响而受牵引速度的影响相对较小。车架主要受力集中在车架左侧和右侧梁处,且初始设计存在强度不足的问题。

(2)针对车架强度不足的问题提出了2种牵引车车架优化方案,并进行有限元对比分析,方案1在修改车辆后轮的连接方式后,车架应力性能提升了57.18%,方案2在改变车架承重方式后,车架应力性能提升了86.31%,方案2更满足牵引安全性能要求的设计方案。

(3)通过实验数据与仿真结果对比,验证了模型的准确性。研究成果为小型飞机无杆牵引车车架的后续研究提供了可靠的理论依据和实验参考,并可为同类设备的研发提供参考。

参考文献:

- [1] CHEN S W, LIU H, LI F H. Analysis of Boeing 737 aircraft towing accidents[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 80: 234-240.
- [2] 王志,陈文科,闫洪峰,等.电动无杆飞机牵引车设计[J]. *液压气动与密封*, 2006, 26(3): 8-10.
- [3] 安喜平,王志,齐向阳,等.飞机牵引车车架的改进设计与有限元分析[J]. *起重运输机械*, 2018(9): 120-123.
- [4] 孙书蕾,雷玉勇,汤积仁,等.飞机牵引车车架三维有限元静态分析[J]. *机械设计与制造*, 2010(4): 119-121.
- [5] 高雪.舰载机牵引车的结构与举升机构的分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2018.
- [6] 李播博.某重型牵引车动力学特性与疲劳可靠性及稳健性优化研究[D].沈阳:东北大学,2018.
- [7] SZCZĘŚNIAK G, NOGOWCZYK P, BURDZIK R. Some basic tips in vehicle chassis and frame design[J]. *Journal of Measurements in Engineering*, 2014, 2(4): 208-214.
- [8] CHEN W, ZUO W. Component sensitivity analysis of conceptual vehicle body for lightweight design under static and dynamic stiffness demands[J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2015, 66: 107.
- [9] DIZO J, BLATNICKY M, SEMENOV S, et al. Static analysis of single-

- axle tractor trailer frame[C]//*Engineering for Rural Development, 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development Proceedings*. Latvia University of Life Sciences and Technologies, Faculty of Engineering, 2021.
- [10] 王若平,过丰,郭孔吉.基于HyperMesh的重型牵引车车架强度分析[J]. *机械制造*, 2016, 54(12): 31-35.
- [11] SEYFRIED P, TAISS E J M, CALIJORNE A C, et al. Light weighting opportunities and material choice for commercial vehicle frame structures from a design point of view[J]. *Advances in Manufacturing*, 2015, 3(1): 19-26.
- [12] 杨扬.某型号矿用半挂牵引车车架的有限元分析[J]. *内燃机与配件*, 2020(24): 64-67.
- [13] MU M X, LIU H, CHEN D W. Analysis of effects on the load of nose landing gear by towbarless traction[C]//2020 IEEE 2nd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology(ICCA-SIT), October 14-16, 2020, Weihai, China. IEEE, 2020: 762-768.
- [14] COETZEE E. Modelling and nonlinear analysis of aircraft ground manoeuvres[D]. Bristol, South West England, UK: University of Bristol, 2011.
- [15] LU X, SUN Y N, TANG J, et al. Dynamic analysis of an aircraft towing slip-out system considering vertical wheel constraints [J]. *Transportation Safety and Environment*, 2024, 6(4): 87-94.
- [16] 孟子皓,王登峰,张小朋,等.车架与电池舱一体化结构轻量化与疲劳寿命集成优化设计[J]. *汽车工程*, 2024, 46(12): 2143-2153.
- [17] 李福海.飞机地面牵引移动与停放安全技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.
- [18] KUSHAIRI S, SCHMIDT R, OMAR A R, et al. Tractor-trailer modelling and validation[J]. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 2014, 21(1): 64.
- [19] 吕晓.高速无杆飞机牵引系统振动特性研究[D].天津:中国民航大学,2022.
- [20] TRANGSRUD C, LAW E H, JANAJREH I. Ride dynamics and pavement loading of tractor semi-trailers on randomly rough roads[C]//SAE Technical Paper Series. SAE International, 2004: 174-197.
- [21] LUQUE P, GUTIERREZ A, RODRÍGUEZ E, et al. Design and analysis of a cross car frame. proposal of a three-level appraisal methodology[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 2023, 237(3): 213-223.
- [22] 吕胜权,钟飞.水泥破碎车驾驶室安装车架有限元分析优化[J]. *机械设计*, 2024, 41(6): 85-89.
- [23] CHEN L W, WU H, FANG Q, et al. Numerical analysis of collision between a tractor-trailer and bridge pier[J]. *International Journal of Protective Structures*, 2018, 9(4): 484-503.
- [24] 邹晔,沈保山,钟兵,等.基于用户使用工况的某牵引车车架结构优化[J]. *机械设计*, 2023, 40(9): 108-114.
- [25] SAEVARSDOTTIR T, ERLINGSSON S, CARLSSON H. Instrumentation and performance modelling of heavy vehicle simulator tests[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2016, 17(2): 148-165.
- [26] 李励.微型电动汽车车架结构优化及动力性能实验研究[D].唐山:华北理工大学,2018.

(责任编辑:刘雅婷)