

基于一种起落架随动加载侧向加载装置强度分析与评估

张颖慈¹ 杨 龙² 刘 阳¹

1. 西安远方航空技术发展有限公司 陕西 西安 710089

2. 西安宏钛航空科技有限公司 陕西 西安 710089

摘要：起落架是飞机起飞和着陆阶段安全性和可靠性的重要保障。因此，起落架连接区强度考核是飞机地面验证试验中重要和关键的考核项目之一^[1]。本文针对一种摇臂式双轮起落架随动加载试验装置的侧向加载装置，开展了全面的强度分析与评估研究。首先阐述了起落架随动加载试验中的侧向加载装置的工作原理及在飞机起落架系统中的重要性，接着通过理论分析建立了力学模型，结合有限元分析方法对侧向加载装置进行分析，模拟典型工况下的受力情况。同时，对侧向加载装置的强度进行评估，判断其是否满足设计要求。研究结果为起落架随动侧向加载装置的优化设计和安全使用提供了重要依据，有助于提高起落架系统的可靠性和稳定性。

关键词：双轮摇臂式起落架；随动侧向加载装置；强度分析；有限元分析

1 起落架加载系统的重要组成部分

作为飞机研制过程中的一项重要试验项目，起落架加载系统是起落架控制系统地面模拟试验中不可缺少的设备^[2]。起落架是飞机的重要部件，在飞机的起飞、着陆、滑行等过程中起着支撑、减震和制动等关键作用。摇臂式双轮起落架作为一种新型起落架结构，通过独特的设计能够更好地适应复杂的地面运动工况，提高飞机的地面操控性能和乘坐舒适性。侧向加载装置作为起落架随动加载装置的关键组成部分，主要承受飞机在滑行、转弯以及遭遇侧风等情况下产生的侧向力，其强度直接关系到起落架系统的安全性和可靠性。

随着飞机性能要求的不断提高，对起落架侧向加载装置的承载能力和可靠性提出了更高的标^[3]。因此，开展起落架侧向加载随动装置的强度分析与评估研究具有重要的工程意义和实用价值。本文通过理论分析与数值模拟相结合的方法，对起落架随动侧向加载装置进行强度分析与评估，旨在为其设计优化和安全运行提供技术支持。

2 随动侧向加载装置工作原理及结构特点

2.1 工作原理

起落架随动侧向加载装置的工作原理基于飞机在地面运动时的受力特性，通过特殊的结构设计，将这些侧向力有效地传递和分散，同时能够根据侧向力的大小和方向自动调整自身的工作状态，以保证起落架在侧向力作用下的稳定性和安全性。

该侧向加载装置通过双轮摇臂结构的起落架机轮结构在载荷力作用下，随着航向和垂向组合工况的随动载荷加载试验，同步进行侧向的随动载荷加载试验。

2.2 结构特点

本文中的起落架随动加载的侧向加载装置主要包括连接结构、传动机构和承载部件等。连接结构用于将侧向加载装置与起落架的假机轮部分可靠连接，确保力的有效传递；传动机构则负责将侧向力进行转换和传递，使承载部件能够准确地承受和分散力；承载部件是侧向加载装置的核心部分，直接承受侧向力的作用，其结构强度和刚度对整个侧向加载装置的性能起着决定性作用，假机轮替代机轮进行起落架载荷加载试验。

与以往的结构相比，该侧向加载装置具有更高的灵活性和适应性。采用了新的设计理念，能够在航向、垂向组合工况下更好的实现侧向随动加载时的力学性能匹配，有效提高载荷试验的效能。

3 随动侧向加载装置力学模型建立

3.1 结构设计分析

文中进行载荷试验的摇臂双轮式样结构的起落架，在随动加载过程中，该侧向加载装置主要承受侧向力、垂向力以及航向力。在航、侧和垂向力同时作用时，会对装置的结构强度提出更高的要求。思路是随着摇臂式双轮起落架垂向载荷和航向载荷的施加，起落架的摇臂式机构带动左右假机轮同步动作，与此同时该侧向加载装置随着摇臂式机构的运动同步施加侧向载荷。该型起落架载荷加载随动机构原理示意图如下图所示。

试验中为保证假机轮及连接点加载时载荷方向与校准载荷要求一致，组成自平衡加载连接件。由双耳座和单耳杆组成连接结构与作动筒根部侧假轮连接，一端通过承载部件与作动筒传感器和另一侧的假机轮连接。依据最大加载载荷选用合适的作动器作为传动机构实现其加载。加载作动器的前端安装载荷传感器实时测量试验过程中的载

荷大小；为尽可能模拟原机状态，防止组合工况加载过程中，摇臂结构对侧向加载装置的不规则转动的影响，将侧向加载装置两端的单双耳连接结构进行90°的交错安装，同时在连接结构的单耳组件孔内安装关节轴承，使加载过程中随动侧向加载装置的自由度受控。

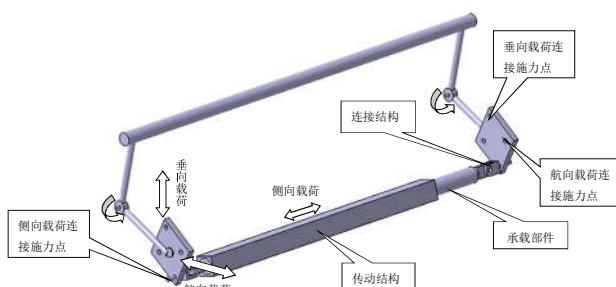


图1 载荷加载随动机构示意图

3.2 力学模型建立

根据受力分析，采用理论力学和材料力学的方法建立该型起落架随动侧向加载装置的力学模型。将侧向加载装置简化为一个多自由度的力学系统，考虑各部件之间的连接关系和约束条件。对于承载部件，将其视为梁结构，根据力学理论建立相应的应力—应变关系方程。

假设侧向加载装置在某一工况下，受到侧向力 F_z 、航向力 F_x 、垂向力 F_y 的作用，同时考虑各部件之间的摩擦力 f 。以承载部件为例，根据梁的弯曲理论，其在侧向力作用下的弯矩 M 和剪力 V 可以通过以下公式计算：

$$M = \int_0^l F_z(z) dz$$

$$V = \frac{dM}{dz}$$

其中， l 为承载部件的长度， $F_z(z)$ 为沿承载部件长度方向分布的侧向力。

根据材料力学中的胡克定律，承载部件的应力 σ 和应变 ϵ 关系为：

$$\sigma = E\epsilon$$

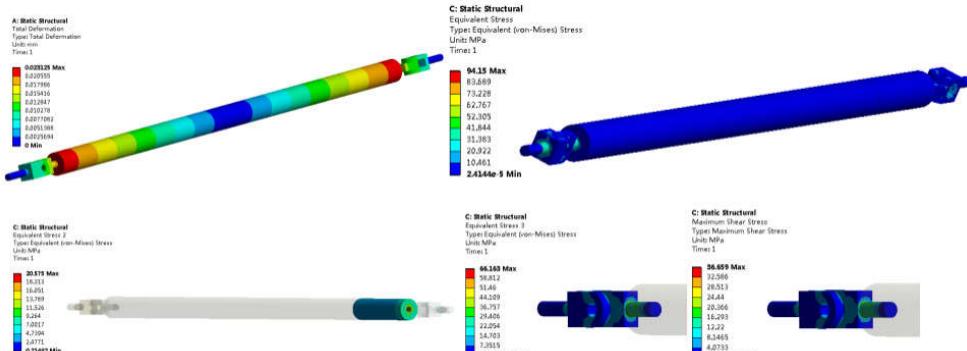


图2 随动侧向加载装置强度计算结果

其中， E 为材料的弹性模量。通过上述理论公式，可以初步计算出侧向加载装置在极限工况下的力学响应。

单双耳连接结构在侧向压力作用下的强度分析，连接件两端施加50kN的压力，设计中间连接螺栓直径为30mm，则螺栓的切应力计算如下：

剪切截面有两面， $R = 30/2 = 15\text{mm}$ ，故 $A = 2 \times \pi \times 15^2 = 1413.72\text{mm}^2$

$$\text{参考切应力公式: } \tau = W_s/A$$

W_s ：剪切力载荷，单位N； A ：截面积，单位 m^2 。

将 $W_s = 50000\text{N}$ 代入公式得：

$$\tau = 50000/1413.72 = 35.38\text{MPa}$$

以性能等级为10.9级的M30螺栓进行计算，计算螺栓能够施加的最大载荷。其抗拉强度为1000 MPa，屈服强度为900 MPa，取许用切应力 $\tau = 900/2.5 = 360\text{ MPa}$ 。

在许用切应力 $\tau = 900/2.5 = 360\text{ MPa}$ 时，

$$\text{剪切载荷 } W_s = \tau A = 360 \times 2 \times \pi \times 15^2 = 5.089 \times 10^5 \text{ N} = 5.09 \times 10^2 \text{ kN}$$

4 有限元分析

4.1 有限元模型建立

单双耳连接结构材料45#钢，承载部件材料30CrMnSiNi2A。30CrMnSiNi2A屈服强度等于835MPa，抗拉强度等于1080MPa， E 为210GPa；45#屈服强度355MPa，抗拉强度600MPa， E 为203GPa。

利用有限元软件对起落架随动侧向加载装置进行有限元模型建立。首先，对侧向加载装置的三维几何模型进行简化，对简化后的模型进行网格划分。将随动侧向加载装置两端与假机轮连接的双耳座接触面施加固定约束，按航向35kN，侧、垂向50kN，通过假机轮施加载荷。

随动侧向加载装置静强度计算结果如下图所示，最大变形位于承载部件尖端，最大等效应力为94.15MPa，承载部件最大等效应力为20.58MPa；单双耳连接部件最大等效应力为66.16MPa，最大剪切应力为36.66MPa。

4.2 结果分析

通过对典型组合工况进行有限元模拟分析,得到起落架随动侧向加载装置的应力云图、应变云图和位移云图等。可以看出,在该装置的连接部位、承载部件的连接等位置容易出现应力集中现象,这些部位的应力值明显高于其他区域,变形较大的区域主要集中在承载部件的中部和连接结构的薄弱环节,并直观地反映了装置在受力后的整体位移趋势。

通过对有限元分析结果的详细分析,结合材料的许用应力和变形要求,可以判断侧向加载装置在不同工况下是满足强度和刚度要求。即可评估在这种复杂受力情况下的力学分析其强度和可靠性均满足试验要求。

5 强度评估

5.1 评估标准与规范

在对随动侧向加载装置进行强度评估时,主要参考以下几个方面的标准:材料的力学性能指标、结构的许用应力和变形要求和安全系数等。

5.2 强度评估方法

采用以下方法对起落架随动侧向加载装置进行强度评估:

5.2.1 应力评估:将有限元分析得到的各部位应力值与材料的许用应力进行比较。如果某部位的应力值小于许用应力,则认为该部位在应力方面满足强度要求;反之,则需要对该部位进行结构改进或更换材料。

5.2.2 变形评估:根据设计要求,确定侧向加载装置的许用变形量。将有限元分析得到的各部位变形量与许用变形量进行对比,若变形量在允许范围内,则说明装置的刚度满足要求;若变形量过大,可能会影响起落架的正常工作性能,需要采取措施提高装置的刚度。

5.3 评估结果

通过上述强度评估方法,对起落架随动侧向加载装置在典型工况下的强度进行了较为全面的评估。评估结果表明,在航侧垂组合载荷工况下,侧向加载装置的应力和变形均在允许范围内。

6 结论与展望

6.1 结论

本文通过理论分析和有限元模拟相结合的方法,对起落架随动侧向加载装置进行了强度分析与评估,得出以下主要结论:

6.1.1 建立力学模型,通过理论分析得到该型装置在航侧垂典型组合工况下的静强度计算,为有限元分析提供了理论基础。

6.1.2 利用有限元分析软件对侧向加载装置进行了建模和模拟分析,得到了装置在典型工况下的应力、应变和变形分布情况,找出了应力集中区域和薄弱环节。

6.1.3 依据相关标准和规范,对侧向加载装置进行了强度评估,明确了装置在典型工况下的强度状况,为结构优化设计提供了依据。

6.2 展望

本文对起落架随动侧向加载装置的强度分析与评估进行了较为全面的研究,但仍存在一些问题:

6.2.1 本文在有限元分析中对模型进行了一定的简化,后续可以考虑建立更加精确的三维实体模型,以提高分析结果的准确性。

6.2.2 对于侧向加载装置的疲劳寿命评估缺失,后续可以先结合较为简单的理论方法,采用疲劳分析理论(如S-N曲线法),结合有限元分析计算侧向加载装置的疲劳寿命。

6.2.3 结合单位载荷加载项目可继续开展起落架随动侧向加载装置的试验研究,通过加载试验验证理论分析和有限元模拟结果的准确性,为装置的设计和优化提供更可靠的依据。

通过不断的研究和改进,进一步提高随动侧向加载装置的性能和可靠性,为起落架载荷试验的安全运行提供更有力的保障。

参考文献

[1]中国飞机强度研究所.航空结构强度技术[M].北京:航空工业出版社,2013

[2]俞兴民.起落架电液伺服加载系统的设计与实现[J].液压与气动,2012,

[3]全机结构试验起落架位移补偿加载技术研究[J].2021.