

文章编号: 1671-7449(2026)01-0079-09

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(1): 79-87.

自保障型飞机荷载模拟加载车设计

张俊^{1*}, 许巍¹, 苏立海¹, 李磊², 王江², 安澍华³, 柴伦磊¹, 张奔¹

(1. 空军工程大学 航空工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 空军后勤部, 北京 100009;
3. 93055部队, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 针对机场道面研究中对飞机荷载模拟加载的迫切需求, 以及已建设飞机荷载模拟加载车在操作便易性、加载荷载稳定性和自保障能力等方面存在的问题, 提出了一种自保障型飞机荷载模拟加载车设计。由于已建设加载车存在无自行动力、重心过高以及辅助轮过多等设计缺陷, 导致其在使用中存在过轮辙时加载荷载不稳定、转弯半径大、对牵引车保障要求高、转场及准备试验难度大、机轮更换繁琐等问题。所设计的自保障型加载车自带单轴牵引车, 两个弹簧辅助轮同加载轮轴线重合, 配置有三向力传感器、吊机、爬梯、随车叉车等设备, 使得该加载车无需借助其他机械设备即可上下平板拖车及装卸载配重块, 运行时转弯半径小于10 m, 过深度为150 mm的轮辙时加载轮上承担荷载不小于150 kN, 并可实时采集加载轮三向荷载。此加载车自我保障能力强, 可满足野外恶劣条件下的加载试验需求。

关键词: 机场道面; 飞机荷载; 模拟加载; 专用车辆; 足尺试验

中图分类号: U273.94

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026007

引用格式: 张俊, 许巍, 苏立海, 等. 自保障型飞机荷载模拟加载车设计[J]. 测试技术学报, 2026, 40(1): 79-87.

ZHANG Jun, XU Wei, SU Lihai, et al. Design of self-supporting aircraft simulation loading vehicle [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(1): 79-87.

Design of Self-Supporting Aircraft Simulation Loading Vehicle

ZHANG Jun^{1*}, XU Wei¹, SU Lihai¹, LI Lei², WANG Jiang², AN Shuhua³,

CHAI Lunlei¹, ZHANG Ben¹

(1. School of Aviation Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. Air Force Logistics Department, Beijing 100009, China; 3. PLA Unit 93055, Shenyang 110000, China)

Abstract: In response to the urgent need for aircraft load simulation in airport pavement research and the issues of existing aircraft load simulation vehicles in terms of operational convenience, load stability, and self-sufficiency, a self-sufficient aircraft simulation loading vehicle design is proposed. Existing vehicles have different design flaws such as no self-propulsion, a high center of gravity, and too many auxiliary wheels. These flaws can result in unstable loading when crossing ruts, a large turning radius, high dependence on tractor support, difficulties in relocation and test preparation, and complicated wheel replacement. The self-sufficient aircraft simulation loading vehicle designed in this paper is equipped with a single-axle tractor and two spring-loaded auxiliary wheels that share the same axle as the loading wheels.

【收稿日期】2025-01-18

【基金项目】国家自然科学基金资助项目(52308470); 国家重点研发计划资助项目(“海洋环境安全保障与岛礁可持续发展”重点专项2022-3.2); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2023-JC-YB-375)

*【通信作者】张俊(1989—), 男, 副教授, 博士, 主要从事机场道面工程和机场抢修抢建研究。E-mail: zhangjun_afeu@sina.com。

This vehicle also includes triaxial force sensors, a crane, a ladder, and an onboard forklift, which enables the vehicle to load and unload from flatbed trailers and handle counterweights without other mechanical equipment. During operation, its turning radius is less than 10 m. When passing over 150 mm-deep ruts, the loading wheels can bear a load of no less than 150 kN. Moreover, it can collect real-time triaxial load data. With strong self-sufficiency, the vehicle can meet the requirements of loading tests under harsh outdoor conditions.

Key words: airfield pavement; aircraft loading; simulation loading; special vehicle; full scale test

0 引言

永备机场道面的疲劳寿命、机场抢修道面的保障运行次数、简易机场无铺装道面的劣化规律,以及简易机场铺装道面的结构响应规律等道面研究课题都需要飞机荷载的反复作用来实现^[1-7]。因此,如何高效且经济地对道面施加飞机往复荷载是机场道面研究中广受关注且意义重大的问题。综合考虑试验造价、操作难度、试验安全、场地限制等因素,直接使用真实飞机进行道面加载试验是不现实的,因此,目前在机场道面研究中,飞机荷载的施加一般都采用模拟替代的方式实施^[8]。

飞机荷载模拟施加设备主要有固定场地式和移动式两种。固定场地式指其可运行的场地是固定的,一般有固定的运行轨道,轨道可以做成圆形的,比如原美军水道试验站的环形加速加载设备;也可以做成直线形的,比如美国国家航天局兰利研究中心的飞机着陆动力学设施和美国联邦航空管理局的国家机场道面测试设施。固定场地式设备的优点是无需考虑移动性,加载能力可以做到很高,通过增加运行轨道长度,速度也可以提到很高,但缺点也很显著,比如建设和运行成本较高,且仅能对固定运行场地建设的道面进行加载试验,对异地建设或已存在的道面无法进行试验^[9-10]。移动式目前主要有基于重型车辆模拟器(Heavy Vehicle Simulator, HVS)的飞机荷载加载设备及飞机荷载模拟加载车。基于HVS的加载设备典型代表是美国联邦航空管理局和美军工程师研发中心(Engineer Research and Development Center, ERDC)的HVS-A和HVS-Titan,这类设备加载效率较高,全自动加载,加载区域还可封闭进行环境控制;但由于设备长度和宽度限制,可加载试验段长度有限,不超过23 m,最多可安装机轮不超过2个,无法模拟2个以上的多机轮飞机荷载,而且此类设备建设和运行成本都很高。飞机荷载模拟加载车的典型代表是美军建设的多型

飞机荷载模拟加载车,这类设备制作难度很低、操作简单、运行灵活、仿真程度非常高,加载能力几乎无限制,比如美军C-17飞机荷载模拟加载车加载轮直接按照真实飞机主起落架构型布置,配重也按主起落架真实最大荷载配置,达到1 160 kN。需要说明的是,这类设备无法模拟飞机的冲击荷载,但从道面研究的角度来看,飞机正常降落时为飘落接地,尚有较大升力,飞机对道面的作用小于静载,只有当飞机粗暴着陆时才会有较大的冲击荷载,但粗暴着陆在飞机操作中是严格禁止的,因此,在道面研究中不考虑粗暴着陆引起的冲击荷载,对于飞机滑行过程中由于道面不平等原因引起的动荷载一般是用动载系数将静荷载放大进行考虑的^[9]。综合来看,考虑到建设与运行造价、操作难度、加载能力、仿真程度、试验灵活性等多种因素,特别是针对机场抢修道面及简易机场道面等仅需数百次(最多数千次)飞机加载需求的试验场景,飞机荷载模拟加载车是最为适宜的实现飞机对道面往复加载效果的设备^[11-12]。

为此,空军工程大学设计制作了一型飞机荷载模拟加载车,该加载车最大加载能力为500 kN,最多可安装4个机轮,因此,可模拟现役主起落架为单轮、双轮和四轮构型的飞机加载效果,在机场道面相关研究中发挥了重要作用^[13]。但使用中也发现此型加载车在操作便易性、灵活性、加载荷载稳定性、加载效率及自保障能力等方面还存在一些问题。为更好地满足机场道面研究对飞机荷载加载需求,特别是对于需经常变换加载场地的抢修道面和简易机场道面试验场景,本文设计并制作了新型的自保障型飞机荷载模拟加载车,以期进一步推动机场道面研究中飞机荷载模拟加载技术的进步。

1 加载车投用现状

1.1 已投用加载车简介

图1所示为已投用加载车示意图,以及加载轮为单轮、双轮和四轮构型时的状态。



图 1 已投用的飞机荷载模拟加载车

Fig. 1 Built aircraft load simulation loading vehicle

此型加载车主要由载重系统、车架系统、升降液压系统、电子检测系统、牵引转向系统、辅助轮和加载轮等构成。使用时,通过向载重系统中吊运配重块来为其配重,载重系统通过轮胎转接架将荷载传递给加载轮,并通过导向柱同车架系统连接,当加载轮和辅助轮水平时,载重系统在导向柱中可上下自由活动。因此,加载轮承担了加载系统的全部竖向荷载,辅助轮受力很小,连同载重系统自重,通过增加配重块,加载轮上最大可施加荷载为 500 kN。当需要更换加载轮时,先将所有配重块卸下,使用升降液压系统将载重系统提升,卸掉轮胎安装架和加载轮,再更换新的轮胎转接架和加载轮。加载试验时,由于此加载车无动力,需通过牵引轴使用牵引车来拖拽加载车通行,为加快加载效率,一般会使用两台牵引车前后同时拖拽。目前,此加载车已开展过主起落架单轮构型战斗机和运输机、双轮构型运输机,以及四轮构型运输机的飞机荷载模拟加载试验,取得了不少成果,但使用中也发现此型加载车存在一些问题亟待优化。

1.2 存在的主要问题

1.2.1 结构设计方面

第一,该加载车设计重心过高,载重系统高

3.036 m,配重块完全装满后整车高度达到 3.156 m,造成此加载车稳定性和安全性有一定不足,且此高度过高,一般叉车装载配重块有一定困难,需要使用吊车进行配重块装载。第二,此加载车设置了 4 个辅助轮,理论上当道面较为平整时,载重系统通过 4 个导向柱可上下自由活动,能够将加载荷载完全传递到加载轮上,4 个辅助轮承担的荷载很小。但在实际加载试验中,被加载道面(特别是抢修道面和简易机场道面)往往存在轮辙、坑槽等不平整处,当加载车运行至此处时,容易发生 4 个导向柱不同步运动,造成加载车箱体发生倾斜,此时辅助轮承担的荷载会显著增大,而加载轮上承担的荷载相应会减小,不满足设计加载需求。而且,当道面轮辙或坑槽深度较大时,还会出现加载车载重系统卡滞现象,即使加载车驶离轮辙区域,到达平整道面,加载车载重系统仍无法恢复水平,严重影响试验效果。第三,此加载车自身为三轴结构(前后辅助轮各为一轴,中间加载轮为一轴),由于加载车不带动力,还需要装载机机械进行牵引运行,加上牵引车的两轴,整个系统共五轴,且整体长度很长(不算牵引轴,加载车长度已达 5.2 m,加上牵引轴和牵引车,长度可超 10 m),造成其转弯半径巨大(超过 15 m),对加载场地限制较大。第四,此加载车通过前后两个牵引轴同牵引车连接,其中前轴有转向功能,能在不需要

转向时锁紧,但由于牵引轴同牵引车的连接并非完全固定,造成加载车难以在倒行时保持直线,因此,一般在加载时需前后各配合一台牵引车。第五,此加载车加载轮设置在载重系统的下方,如需更换加载轮需先将所有配重块卸除,使用升降液压系统沿导向柱将载重系统提升到最顶端,让加载轮悬空,然后卸下加载轮以更换其他加载轮。但即使将载重系统提升到最顶端,其下方更换加载轮的空间仍然较小,加载轮及其配套的转接架很重,可达几百公斤,必须有叉车等机械配合操作,会造成狭窄空间更换加载轮的工作十分繁琐困难,且具有一定的危险性。

1.2.2 使用便利性方面

在开展道面加载试验时,特别是针对抢修道面和简易机场道面,试验场地经常在野外,意味着保障条件较差,各种大型机械设备协调难度较大。首先,此加载车由于自身无动力,开展加载试验时需要为其配备两台装载机等牵引车,在有些试验地点协调两台牵引车的难度较大,且成本较高。而且,不同型号的牵引车其后部同加载车牵引轴连接的结构高度不同,经常会出现高度较低造成牵引轴不水平,这样会增大加载车的牵引难度。其次,由于试验地点可能遍布全国,此加载车需经常进行转运,转运时必须借助吊车上下平板拖车,这就要求在装车和卸车时分别协调吊车。此外,在装卸配重块时同样需要协调吊车,给试验带来很大难度和成本。最后,此加载车仅在加载轮上方转接架同载重系统连接处安装了4个竖向压力传感器,仅能采集试验过程中的竖向荷载。但在轮辙深度较大的简易机场无铺装道面试验中,加载轮还会受到较大的水平阻力,而且此水平力对于道面结构响应分析具有重要意义。

2 自保障型加载车研制过程

针对上述加载车存在的问题,本文提出了一种新型的自保障型飞机荷载模拟加载车设计,为满足军用机场道面研究使用需求,该新加载车需满足以下技术指标要求:①按照我军现役要求,最高机型确定可安装最大直径不小于1.2 m的单个机轮,最大配重不小于18 000 kg,加载轮更换方便;②可安装辅助轮以保证加载车平衡,但总数不超过2个;③当被加载道面产生最大150 mm

的纵向轮辙或不平整时,加载车应能安全运行且加载轮上的荷载不低于150 kN;④加载过程中能够实时采集加载轮承担的水平、竖向和侧向力;⑤加载车具备自行动力,总轴数不超过2个,最小转弯半径不大于10 m;⑥需要更换试验场地时,可使用平板拖车进行非超高、超限公路运输,且在转运过程中及转运后试验过程中(加载车及配重块上下平板拖车、配重块上下加载车)不依赖非随车叉车、吊车等其他机械,完全依赖自身设备或方便随车携行的设备进行保障。因此,其自我保障能力主要体现在转运过程中仅依靠自身携带设备即可自行上下平板拖车并转移配重块,无需借助吊车,以及试验过程中可依靠自行动力完成加载试验,无需借助牵引车,并可依靠自带设备完成配重块装卸载。

2.1 总体方案

2.1.1 加载车主体

本文设计的自保障型飞机荷载模拟加载车模型图如图2所示。

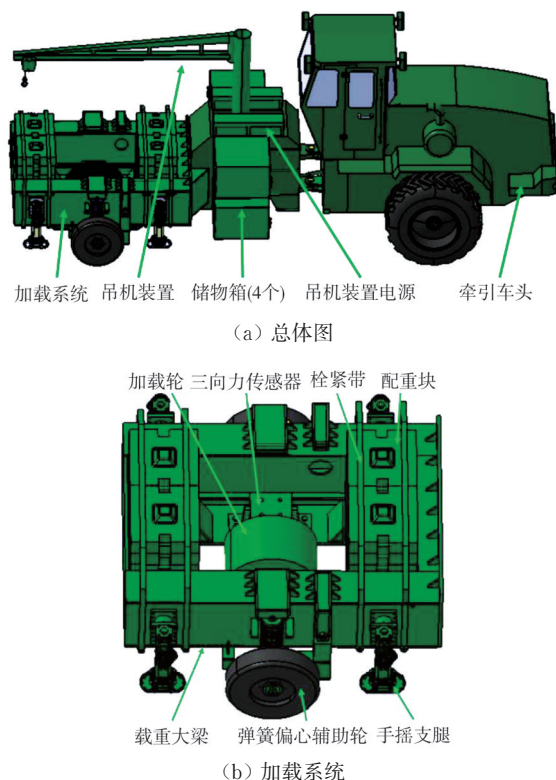


图2 新加载车模型图

Fig. 2 Model diagram of new aircraft load simulation loading vehicle

此加载车总长度为 8 466 mm, 宽度为 2 882 mm, 高度为 3 440 mm(此高度为牵引车头高度, 加载系统高度仅有 1 588 mm, 稳定性远高于原加载车)。加载车主要由牵引车头、加载系统、吊机装置、储物箱等组成, 其中加载系统包括载重大梁、加载轮、配重块、三向力传感器、弹簧偏心辅助轮、手摇支腿等。

1) 牵引车头和吊机

加载车尺寸非超高超限, 可使用平板拖车进行公路运输, 牵引车头由现有成熟牵引车改装而来, 主要是拆除了原牵引车的后轮, 并在后轮上方加装了 4 个储物箱, 以携带试验中会用到的小型发电机、常用工具和劳保用品等。在原牵引车后轮上方还加装了一个随车吊机, 吊机额定载荷为 600 kg, 安全系数为 1.5, 吊机起吊能力超过配重块重量(配重块单块最大重量为 400 kg), 有效起吊高度为 1.2 m, 吊臂长度为 3.3 m, 可保障有效吊取范围为 0.2~3.2 m。吊机的旋转和吊取范围的移动由蓄电池或小型发电机供电给液压电机驱动完成, 起升速度为 8 m/min, 水平移动速度为 20 m/min, 旋转速度为 15~40°/min。

2) 加载轮

加载系统长度为 2 760 mm, 宽度为 2 882 mm, 高度为 1 588 mm, 重心很低, 设置辅助轮 2 个, 加载轮 1 个, 辅助轮和加载轮轴线重合。安装加载轮且吊装设计配重后, 两个辅助轮不接触地面, 离地面有些许间隔, 只有当加载车发生偏转或有轮辙产生时, 辅助轮才会接触地面以确保试验安全。设计可安装加载轮直径超过 1.2 m, 满足预期模拟最大飞机主轮加载需求。加载轮采用真实飞机主轮, 胎压最高即为真实飞机主轮最高胎压, 需要低胎压时可通过放气来进行调整。同时考虑了多种机轮安装需求, 由于不同飞机的机轮尺寸相差较大, 为保证安装不同加载轮时辅助轮都能保持离地状态, 需在加载轮两侧同载重大梁连接部位(三向力传感器下方)放置或撤掉垫块, 如图 3 所示。加载轮更换方式安全方便, 如需更换加载轮, 仅需用千斤顶将加载系统顶起, 使得加载轮悬空, 卸掉三向力传感器连接盖板, 取出加载轮及其连接轴即可方便更换。

3) 配重块

当按照最大 18 kN 的加载能力进行配重时, 加载车共装载两排配重块。设计有两种配重块, 重量

分别为 400 kg 和 200 kg, 尺寸分别为 620 mm×600 mm×213 mm 和 620 mm×600 mm×132 mm, 以便精确达到所要求的加载轮荷载。400 kg 和 200 kg 配重块数量分别为 24 个和 4 个, 连同加载车自身给加载轮分配的重量, 可保证加载轮上荷载大于 180 kN。如图 4 所示, 配重块侧边设计有两个连接把手, 便于起吊, 顶部有凸起块, 底部有凹陷孔, 凸起/凹陷高度尺寸为 50 mm, 便于配重块固定。配重块吊装到位后, 再使用绑带进行加强固定, 以确保试验安全。

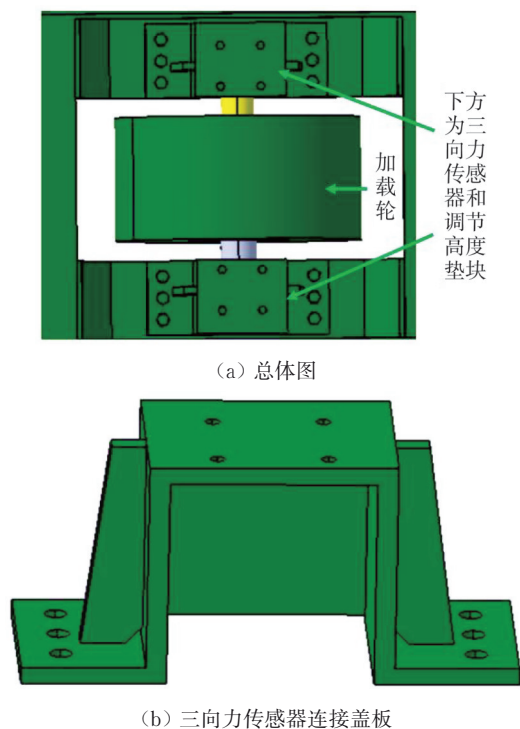


图 3 加载轮及力传感器位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of loading wheel and force sensor position

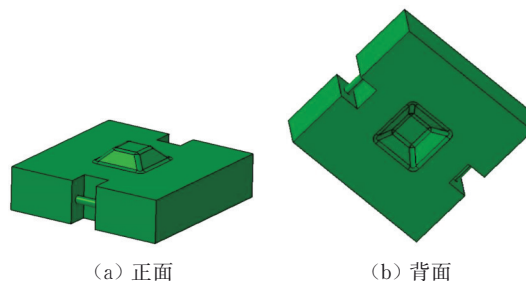


图 4 配重块示意图

Fig. 4 Schematic diagram of counterweight block

4) 辅助轮

2 个辅助轮外径为 814 mm, 断面宽 208 mm, 速度 10 km/h 状态下, 承载质量为 5 085 kg。2 个辅助轮轴线同加载轮重合, 配合单轴牵引车头,

可将转弯半径控制在10 m以内。为保证当加载车发生侧偏时的安全,设置了由悬架弹簧、辅助轮支架和挡板等组成的辅助轮组件,如图5所示。

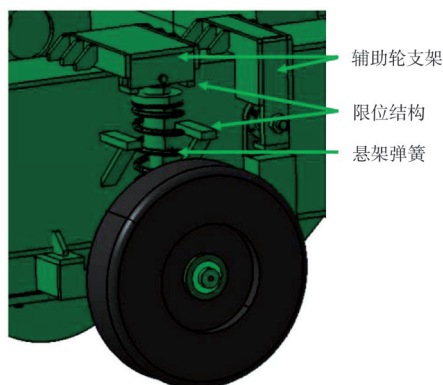


图5 辅助轮组件示意图

Fig. 5 Schematic diagram of auxiliary wheel components

悬架弹簧自由高度为500 mm,压缩行程为200 mm,最低压缩高度为300 mm,螺旋弹簧刚度为120 N/mm,可满足加载轮过150 mm深轮辙的恶劣工况要求,且能保证加载轮承担荷载仍然大

于150 kN。当加载车过大于150 mm轮辙时,为防止辅助轮的悬架弹簧被压坏,设置了机械限位对辅助轮的悬架弹簧进行保护。

5) 监测装置

三向力传感器可实时采集加载轮受到的水平、竖直及侧向的力值大小,并通过导线同牵引车头驾驶室的无纸记录仪连接,在驾驶室即可实时掌握加载轮受力情况。在后排手摇支腿正中间的加载系统部位设置有监控摄像头,正对加载轮,可将加载轮影像实时传至驾驶室,以便试验中精确控制加载轮迹线。此外,在牵引车头车轮上设置有速度传感器,可在驾驶室实时看到加载车行驶速度。

2.1.2 辅助装置

为保障加载车自行上下平板拖车,配套设计了3个爬梯,分别放置在牵引车头/辅助轮和加载轮的轮迹带,如图6所示。

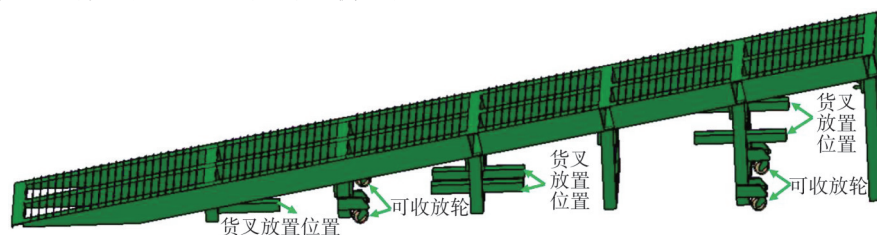


图6 爬梯示意图

Fig. 6 Schematic diagram of ladder

爬梯的高度为1 m,长度为5.76 m,坡度为 10° ,与常见的平板拖车高度相同。为保证加载车上下平板拖车安全,爬梯用料较为扎实,单个爬梯重量约为1 000 kg,移动不便,为此,在爬梯支腿处设置了4个可收放的万向轮。当需要调整爬梯位置至平板拖车尾部以供加载车自行上下平板拖车时,将轮子放下,单人即可推动爬梯调整位置,爬梯位置调整到位后,再将轮子收起,让爬梯支腿接地,以确保加载车通过时爬梯的稳固。

当加载车通过爬梯驶上平板拖车后或转运到指定地点需将加载车驶离平板拖车时,需要将爬梯转移至平板拖车上或从平板拖车上转移至平板拖车尾部,还需要叉车进行配合。为达到自保障目的,叉车选用了2台电动随车型叉车^[14-15],如图7所示,单台最大载重1 000 kg,最大举升高度1.6 m。其最大的特点是将货物叉至平板拖车后还能自行上下拖车,两台叉车配合通过货叉将爬梯提升至平板拖车后降低货叉同平板拖车接触,之后将前脚轮和支腿抽出,

就可以将门架连同前脚轮和支腿提升至平板拖车,再将前脚轮和支腿推回,叉车即可随加载车一起运输,卸载爬梯时则反向操作即可。



图7 随车叉车

Fig. 7 Truck mounted forklift

2.2 设计计算

2.2.1 加载车上平板拖车

使用需求为当加载车空载时可依托自身动力

及爬梯自行上下平板拖车。加载车空载质量为 22 300 kg, 牵引车最大牵引力为 150 kN, 考虑 1.2 倍的安全系数, 则加载车上平板拖车的最大能提供牵引力为 125 kN, 可得

$$F = \mu mg \cos \theta + mg \sin \theta, \quad (1)$$

式中: μ 为滚动摩擦系数, 取 $\mu=0.3$; m 为空载加载车总重量, $m=22\,300\text{ kg}$; g 为重力加速度, $g=10\text{ m/s}^2$; θ 为爬梯坡度倾角; F 为牵引力, $F=125\text{ kN}$ 。

计算可得 $\theta < 15^\circ$, 说明当爬梯坡度倾角小于 15° 时, 加载车可依托自身动力上平板拖车, 本文设计坡度为 10° 。

2.2.2 极限工况下试验轮承载力

1) 加载车侧倾

正常行驶时, 单侧螺旋弹簧的压缩量为 41.67 mm, 提供支撑力为 5 kN, 当加载车发生侧倾且侧倾角度低于 1.79° 时, 弹簧增加或减少的数值为 41.67 mm。因此, 当整车发生侧倾且侧倾角度低于 1.79° 时, 单侧螺旋弹簧的压缩量增加, 另一侧螺旋弹簧的压缩量减少, 且增加量和减少量相等, 即单侧螺旋弹簧增加的支撑力与另一侧螺旋弹簧减少的支撑力相等, 此时, 试验轮的承载力为恒定值。

加载系统受到 $0.1g$ 的横向加速度, 当出现辅助轮弹簧一侧完全压缩到位, 一侧辅助轮完全悬空极限工况时, 分析此工况下试验轮和辅助轮的受力情况, 如图 8 所示。

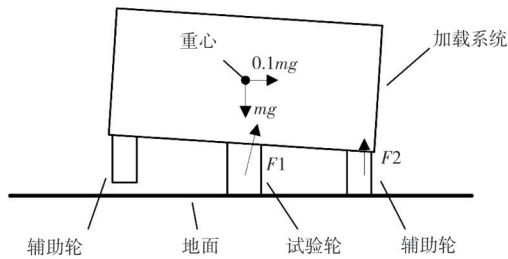


图 8 加载车侧倾时计算简图

Fig. 8 Schematic diagram of aircraft load simulation loading vehicle during roll

从图 8 可得,

$$\frac{F_1}{\cos \theta} + \frac{F_2}{\cos \theta} = mg, \quad (2)$$

$$mg L_2 \sin \theta + 0.1mg L_2 \cos \theta = F_2 L_1, \quad (3)$$

$$\sin \theta = L_3 / L_1, \quad (4)$$

式中: F_1 为试验轮的承载力, N; F_2 为辅助轮的弹力, N; m 为加载系统承受的质量, $m=20\,334.27\text{ kg}$; L_1 为试验轮到辅助轮的中心距, $L_1=1\,334\text{ mm}$; L_2 为加

载车重心到地面的高度, $L_2=954\text{ mm}$; L_3 为辅助轮上的弹簧压缩量, $L_3=200\text{ mm}$ 。

计算可得 $F_1=164\,866.2\text{ N}$, $F_2=36\,175.9\text{ N}$, 一侧的辅助轮弹簧完全压缩, 另一侧的辅助轮弹簧完全悬空, 试验轮承受 $16\,486.62\text{ kg}$ 的力, 满足在极限工况下试验轮承载 150 kN 荷载的要求。

2) 加载车过 150 mm 轮辙

当加载车过 150 mm 轮辙时, 由于加载车是静定结构且辅助轮弹簧有效行程超过 150 mm, 加载车能顺利通过, 计算此极限工况下试验轮承载力, 计算简图如图 9 所示。

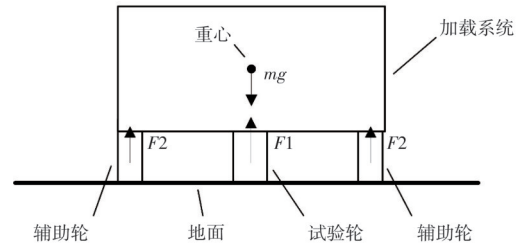


图 9 加载车过轮辙时计算简图

Fig. 9 Schematic diagram of aircraft load simulation loading vehicle traversing ruts

由图 9 可得,

$$F_1 = mg - 2F_2, \quad (5)$$

$$F_2 = 5\,000 + kx, \quad (6)$$

式中: k 为弹簧刚度, $k=120\text{ N/mm}$; x 为最大行程, $x=150\text{ mm}$ 。

据此计算可得 $F_1=157\,342.7\text{ N}$, $F_2=23\,000\text{ N}$, 即当加载车过 150 mm 轮辙时, 此工况下试验轮承担荷载大于 150 kN , 满足设计要求。

3 使用步骤

3.1 装车与转运

首先, 利用爬梯下方的轮子将爬梯移至平板拖车的尾部, 到位后使用随车叉车将爬梯提起, 将轮子收起, 再将爬梯放下, 让爬梯支腿直接同地面接触, 3 个爬梯按照先中间后两边的顺序操作。爬梯就位后, 驾驶加载车自行移动至平板拖车, 使用随车叉车和加载车上的吊机将所有配重块转移至平板拖车。之后, 再利用随车叉车将 3 个爬梯转移至平板拖车, 最后将所有设备固定后即可发车转运。

3.2 卸车与试验

当平板拖车将加载车运至拟开展试验地点后, 首先, 使用随车叉车将 3 个爬梯卸至平板拖车后部, 同样按照先中间后两边的顺序, 爬梯就位

后,启动加载车驾驶其至地面。之后,利用随车叉车及加载车上的吊机将配重块按照试验所需求的配重吊至加载车内,通过驾驶室的无纸记录仪可实时观察加载轮所承担的荷载。达到所需配重后,即可驾驶加载车按照试验所需求的加载模式开展往复通行加载试验,通过加载车后部的摄像头可实时观察加载轮的轮迹线以及时纠偏。

3.3 加载轮更换

如需更换加载轮,先用千斤顶将加载系统顶起,为确保安全,可将手摇支腿摇下,使其接触地面或用垫木受力,之后卸掉三向力传感器连接盖板,使用吊机可将加载轮、轮轴和三向力传感器一并吊出,最后依次卸掉三向力传感器、轮轴到加载轮限位装置,即可卸掉加载轮以更换其他加载轮。

经现场测试,发现此加载车自保障能力强,无需借助其他机械设备即可完成加载试验,试验轮能够承担超过 150 kN 的荷载,达到了设计参数及指标要求。图 10 所示为机场抢修道面加载试验现场情景。



(a) 侧视图



(b) 后视图

图 10 机场抢修道面加载试验

Fig. 10 Airfield rapid repair pavement loading test

4 结 论

1) 已投用飞机荷载模拟加载车在结构设计和使用的便利性方面存在一些问题,难以完全达到试验要求,比如设计重心偏高,降低了设备稳定性和安全性;共设置 4 个辅助轮且同加载轮不同轴,造成加载车过轮辙时加载轮荷载不稳定且会产生卡滞现象而引起荷载减小较多;多轴结构造成加载车转弯困难,对加载场地限制大;自身无动力,无法自行上下平板拖车及装卸配重块;试验中需借助其他牵引车拖挂前进,后退时方向较难控制,一般需两台牵引车配合试验;对装载配重块方式限制多,且加载轮处于配重下方,造成换轮工作十分繁琐困难等。自保障能力弱的限制使此加载车无法很好地满足机场抢修道面和抢建简易道面等典型野外试验场景保障条件差情况下的试验需求。

2) 本文设计的自保障型飞机荷载模拟加载车做了针对性改进,比如加载系统重心低,设备稳定性和安全性较高;仅设置弹簧辅助轮 2 个,且和加载轮轴线重合,可确保加载轮过深度为 150 mm 的轮辙时加载车平稳安全,且加载轮上承担荷载不小于 150 kN;自行移动灵活,转弯便捷,转弯半径在 10 m 以内;自带牵引车头且为单轴牵引车,自带爬梯、吊机和随车叉车,可自行上下平板拖车和装卸配重块;配重块不遮挡加载轮,加载轮更换方便快捷;设置有三向力传感器和摄像头,可实时监测加载轮承载的水平、竖直、侧向力以及加载轮轮迹线。

3) 使用时,利用随车叉车可将爬梯装卸及摆放到位,利用吊机可将配重块在平板拖车和加载车间进行转移,之后加载车利用自行动力即可上下平板拖车及开展往复加载试验,利用三向力传感器可实时采集试验中加载轮的受力情况。经验证,该自保障型飞机荷载模拟加载车自我保障能力强,可满足野外恶劣条件下的加载试验需求。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

[1] HU C, WENG X Z, ZHANG J, et al. Experimental

- study on fatigue strength of airport concrete pavement slab[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 270: 121493.
- [2] NAM B H. In-situ super accelerated pavement test for the fatigue evaluation of in-service airfield rigid pavement-a case study at meham airport [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 353: 129115.
- [3] TINGLE J S, WILLIAMS C E, CARRUTH W D, et al. Materials and methods used for the expedient repair of concrete pavements[J]. *Engineering Proceedings*. 2023, 36: 43.
- [4] 张俊, 许巍, 王江, 等. 机场道面抢修中测试技术的对比分析[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2023, 40(6): 696-704.
ZHANG Jun, XU Wei, WANG Jiang, et al. Comparative analysis of testing technologies in airfield pavement emergency repair[J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2023, 40(6): 696-704. (in Chinese)
- [5] ZHANG J, XU W, GAO P, et al. Compressive strength characteristics of hybrid fiber-reinforced cemented soil[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2023, 24(2): 2104843.
- [6] TINGLE J S, GROGAN W P. Behavior of unsurfaced airfields supporting operations of C-17 aircraft [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1999, 125(1): 75-84.
- [7] 周少辉, 蔡良才, 许巍, 等. 拼装式铝道面板下土基变形预测模型[J]. *西南交通大学学报*, 2016, 51(4): 684-689.
ZHOU Shaohui, CAI Liangcai, XU Wei, et al. Predictive model of subgrade deformation beneath aluminum sandwich panel [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, 51(4): 684-689. (in Chinese)
- [8] GARCIA L, HOWARD I L. Full-scale instrumented testing of multiple airfield matting systems on soft soil to characterize permanent deformation[J]. *Transportation Geotechnics*, 2016, 9: 80-95.
- [9] 张俊, 许巍, 全泽群, 等. 飞机荷载模拟加载车设计与应用[J]. *实验技术与管理*, 2023, 40(8): 141-148.
ZHANG Jun, XU Wei, QUAN Zequn, et al. Design and application of aircraft load simulation loading vehicle [J]. *Experimental Technology and Management*, 2023, 40(8): 141-148. (in Chinese)
- [10] STEYN W J V. Future APT - thoughts on future evolution of APT [M]//*Accelerated Pavement Testing to Transport Infrastructure Innovation*. Cham: Springer International Publishing, 2020: 708-717.
- [11] STACHE J M, GONZALEZ C R. Use of heavy vehicle simulator-aircraft in the development of the CBR-beta procedure [M]//*Accelerated Pavement Testing to Transport Infrastructure Innovation*. Cham: Springer International Publishing, 2020: 458-466.
- [12] RUSHING T W. The evolution of accelerated pavement testing for U. S. military airfield pavements at the waterways experiment station[M]//*Accelerated Pavement Testing to Transport Infrastructure Innovation*. Cham: Springer International Publishing, 2020: 238-247.
- [13] 张俊, 许巍, 翁兴中, 等. 一种模拟飞机加载车: CN113232885A [P]. 2022-08-26.
- [14] 张红涛, 张家宁, 张家帅, 等. 随车叉车: CN113501467A [P]. 2024-11-22.
- [15] 于艺侨, 吴红岩, 曲有名, 等. 一种随车叉车: CN218950956U [P]. 2023-05-02.