

# 发动机安装车技术分析

赵长辉<sup>1</sup>,刘屹巍<sup>2</sup>,段洪伟<sup>3</sup>,王琦<sup>1</sup>,王猛<sup>1</sup>

(1. 中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司,沈阳,110850)

(2. 中国人民解放军驻沈阳飞机工业(集团)有限公司军事代表室,沈阳,110850)

(3. 中航工业沈飞民用飞机有限责任公司,沈阳,110850)

**[摘要]** 发动机安装车是一种重要的飞机保障设备及工艺装备,用于拆装发动机以及机体大部件承载运输等,在保障飞机使用和维护、总装试飞等方面有重要作用。现代喷气战斗机发动机安装车是较为复杂的机械设备,由多种机构和系统构成。建立在对国外众多战斗机发动机安装车产品实例进行充分研究的基础之上,首先概述发动机安装车的发展,然后重点总结和分析发动机安装车的相关技术,包括设计要求和协调设计,技术特点,结构组成,连杆系统关键技术,标准化、通用化、系列化设计,发展趋势等,接着分析先进发动机安装车实例,最后进行总结和展望。

**关键词:** 飞行器制造技术;飞机保障设备;发动机安装车;设计技术;技术分析

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2016.22.058



赵长辉

高级工程师,本科,毕业于西北工业大学飞行器制造工程专业。主要研究方向为飞机总体设计、保障设备设计等。毕业后一直在沈飞工作,先后从事干线飞机尾段联络工程、波音737NG飞机尾段装配工艺、通用飞机发展预研、飞机总体设计及保障设备设计等工作。发表论文约50篇。

发动机安装车(Engine Trailer, ET)是用于发动机的定位、安装和拆卸的无动力拖车,还用于飞机部件的运输和安装,是一种重要的飞机保障设备,也是必不可少的飞机(总装及试飞)生产工艺装备<sup>[1-3]</sup>。发动机安装车在保障战斗机使用和维护、战备完好性以及总装试飞等方面发挥着无可替代的作用。

现代喷气战斗机发动机安装车技术和产品随着战斗机而发展,并持续采用新技术和新设计改进升级来满足飞机的使用要求,基本上实现了与飞机同步发展。

美国的安装车技术和产品世界领先,值得学习和借鉴。研究和开发发动机安装车产品和技术意义较大。本文将对现代战斗机的安装车产品和技术进行总结和分析,希望能够对业界同仁有所启示。

## 发动机安装车发展概述

现代喷气战斗机在二次大战之后开始大发展,为满足其喷气动力的

保障需求,发动机安装车随之发展起来。美国一直引领世界喷气战斗机发动机安装车产品和技术的发展。

早期的高亚声速喷气战斗机(如F-86等)发动机安装保障作业采用移动式吊车,这种设计和作业方式效率低、工作量大,为了提高保障和生产作业效率,专用发动机安装车应运而生。

20世纪50年代中期,美国发展出液压助力多连杆升降系统的发动机安装车,成为现代战斗机发动机安装车的标准设计。典型产品有Air Logistics公司的4000等系列发动机安装车,如图1所示,是美国和其他国家的军队大量装备使用,用于F-100、F-4等第一代和第二代超声速喷气战斗机以及其他军用飞机。此外,安装车通过标准化、通用化设计,实现了与运输车、维修台架和试车台架等设备的协调配合使用,将相关保障工作很好地衔接起来,有效地提高了保障作业效率,如图2所示。针对舰载机的使用要求,发展了专用

的小型化发动机安装车。

20世纪70年代,与第三代战斗机配套的发动机安装车发展出来,有些是改进衍生的,有些是全新研制的。F-14舰载战斗机和F-15战斗机是使用改型的液压助力发动机安装车<sup>[4]</sup>,如图3所示。F-16采用在运输车基础上衍生的无液压助力安装车,采用手动丝杠-套筒装置调节。F-18舰载战斗机是采用全新的紧凑型液压助力安装车<sup>[5-6]</sup>。F-15战斗机的后期型安装车增加下层导轨,形成新的双层导轨结构。上层导轨基本保持不变,与滚轮装置配合,用于发动机在安装车和运输车等设备之间的转移,新的下层导轨用于连



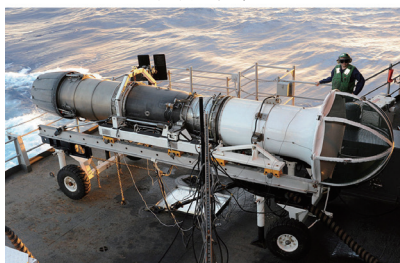
图1 Air Logistics 4000系列发动机安装车  
Fig.1 Air Logistics 4000 series engine trailer



(a) 安装车



(b) 运输车



(c) 试车台架



(d) 工作台架

图2 发动机安装车与相配套的保障设备  
Fig.2 Engine trailer and matching support equipments

接承载发动机。

20世纪90年代末以来,美国先后发展了F-22和F-35两款第四代战斗机,与之配套发展的两种发动机安装车分别用于安装F119和F135发动机。这两款发动机安装车采用全新的结构,主要特点是不采用液压助力系统,而是采用完全机械式作动筒<sup>[7-10]</sup>,F-35的安装车如图4所示。

除了美国外,法国、英国、瑞典、(前)苏联/俄罗斯等国也为战斗机配套发展了发动机安装车。

总体而言,美国等西方航空技术发达国家在战斗机发动机安装车设备研制和使用等方面一直走在世界前列。通过采用新技术、新原理实现安装车跨越发展,基本上实现一代飞机一代发动机安装车。安装车设备很早就实现标准化、通用化、小型化,并且是成体系、系列化发展。

(前)苏联/俄罗斯在飞机发动机安装车的研制能力也较强,较好地满足了机型配套的要求,安装车具有坚固耐用、实用可靠等优点,但尺寸和重量大,较笨重,在标准化、通用化、小型化、系列化等方面落后于美欧产品。

我国的发动机安装车技术还相对落后,相关工作不太受重视,这种状况需要改变。

## 发动机安装车技术分析

### 1 安装车基本设计要求和协调设计

现代喷气战斗机发动机安装车要满足比较苛刻的设计要求,主要有:功能和性能,使用操纵性/人机工效,可靠性、维修性和保障性,标准化、通用化、系列化和小型化,成本价格以及运输和存放等。要实现有效承载发动机载荷,与飞机精确定位和相对位置调整,可靠送进及退出(装卸)发动机。

发动机安装车设计要与适配的飞机及发动机的安装设计和发动机拆装方式-作业流程充分协调,贯彻和实现飞机的保障性、维修性等方面的要求,如发动机拆装时间等指标<sup>[11]</sup>。飞机方案设计阶段就应该考虑发动机安装车的设计,两者有效协调,进而获得最佳的发动机安装设计和安装方式-安装车设计的系统性解决方案。需要指出的是,合理的发



图3 F-15的发动机安装车  
Fig.3 Engine trailer of F-15 fighter



图4 F-35的发动机安装车  
Fig.4 Engine trailer of F-35 fighter

动机安装设计可以有效简化安装车设计,如易接近、可快速拆卸的连接装置,发动机舱辅助导轨,辅助定位装置,“干净的(裸露外凸的附件较少)”的发动机内壁设计等。另外,发动机设计上应尽量保证较好的安装特性/性能,如良好的承载结构和机械连接接口设计,表面尽可能“干净”等。发动机安装方式包括:钻洞式或半钻洞式,举升式和拉升式,以及脱开后机身敞开拆装等,目前以前两种为主,相应的发动机安装车主要为钻洞式和举升式,而欧洲国家目前多采用拉升式安装车。

## 2 安装车的技术特点概述

发动机安装车是一种较为复杂的机械装置,一般采用带牵引杆四轮拖车设计,四轮底盘-车架上安装机械或机械-液压助力承载-运动系统及调节和控制系统、发动机连接-固定系统。

四轮底盘保证安装车的地面移动和转运要求。安装车的四轮底盘无行走驱动系统,需要人力推动作业或转运,或者由牵引车牵引转运。最大牵引速度可达15~20km/h。大多数安装车可以通过导轨端部连接装

置串联,可以实现多车串联,由1台牵引车牵引。

承载-运动系统一般可实现多自由度运动(可达六自由度),包括较大行程的升降、纵移,以及较小行程的俯仰、滚转、横移和偏航(有限的姿态和位置调整或微调)。由于承受发动机等重载荷,使发动机上升的举升力和功耗都较大,因此广泛采用液压助力升降系统,手动液压泵为升降作动筒提供液压动力。承载-升降运动系统普遍采用七连杆+液压作动筒装置,少数发动机安装车采用简单的螺旋丝杠-套筒机械装置。最新的F-22和F-35战斗机发动机安装车采用完全机械式作动筒,省去了复杂的液压系统。

## 3 安装车的结构组成

典型现代(喷气战斗机)发动机安装车的基本结构可大致分为3个部分:(1)底部四轮底盘-基本承载框架;(2)中部承载-运动系统;(3)顶部发动机连接-运动系统。如图5所示。

底盘-承载框架上一般带有下述子系统/装置:(1)四轮底盘,包括底盘框架、车轮及其连接结构/系

统,前后两组车轮组件的方向可调(有些设计高度也可调);(2)牵引杆-转向系统,通过连杆机构驱动车轮转向;(3)四组地脚装置,用于将定位后的安装车稳定在地面上;(4)液压系统组件,包括液压油箱、手动液压泵(两个)、控制阀、液压锁等。美国安装车液压系统附件通常安装在底部结构框架内,利用内部空间,缩小外部尺寸;(5)工具箱等。顶部有与承载-运动系统多连杆系统的连接接头。美系安装车普遍采用车轮高度可调设计,车轮安装在可调支臂/连杆机构上,专用液压作动筒用于驱动连杆机构/支臂,使车轮组件相对底盘固定或偏转,偏转时使车体上升或下降,实际上是一级升降机构。该系统还有一定的缓冲功能,并能将机轮全部收起,缩小存放尺寸。俄罗斯的安装车一般不带车轮液压升降装置。

中部承载-运动系统一般包括:下部手动液压助力升降-俯仰运动空间多连杆系统,上部横移-偏航、滚转运动系统,可以实现五自由度运动。液压助力多连杆系统包括两组平面七连杆(两者之间有横向连杆)。七连杆系统由基本的六连杆结构加上一根稳定杆-支撑杆。六连杆系统包括上下两根纵向连杆和两侧四根主升降运动杆。运动杆两两一组,两杆之间安装液压作动筒,可相对运动,带动整个杆系运动。

上部横移-偏航、滚转运动系统主要结构部件包括:顶部两根平行布置的纵向导轨,两根连接导轨的横向弧形钢管横梁,底座组件等。两弧形钢管顶部端头与导轨之间可以安装转接立柱,用于改变导轨-安装车的高度。弧形钢管安装底座的槽形底座内部有能相对其移动的横移底座(可称“摇篮组件”),并有钢管承载滚轮和限位器,实现弧形钢管及其连接的双导轨的横移、偏航和滚转运动。

整体上承载-运动系统/举升

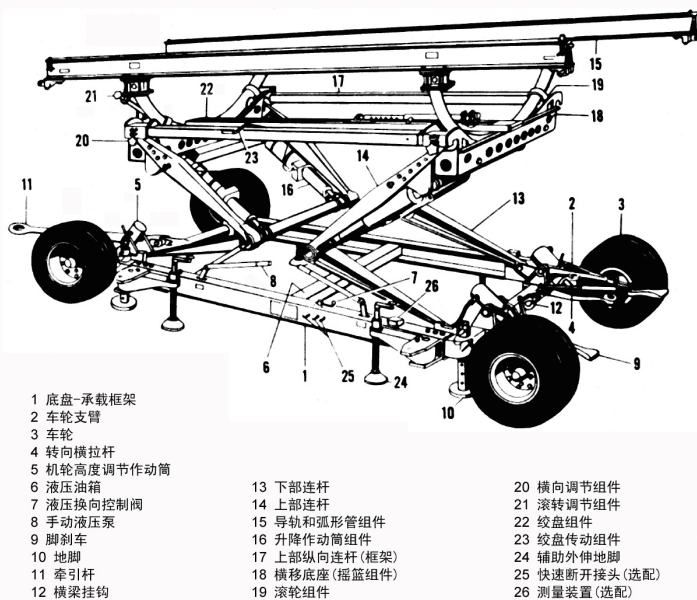


图5 典型发动机安装车的结构组成 (Air Logistics T4100)

Fig.5 Structure composition of a typical engine trailers (Air Logistics T4100)

机构实现五自由度运动或调解能力,包括:较大行程的升降,较小行程的俯仰、滚转、横移和偏航,并能进行姿态和位置调整或微调。运动系统/举升机构具有防卡滞能力,在送进-调解作业过程中不使发动机发生摆动。最大举升行程约 1.0~2.0m。俯仰姿态角和滚转姿态角调节范围一般达到  $\pm 10^\circ$ ,偏航姿态角调节范围一般约  $\pm 3^\circ$ ,横向移动行程约 200mm<sup>[2,12]</sup>。

顶部发动机连接-运动系统能实现纵向进给,美系发动机安装车主要采用滚轮装置+上部连接框架设计。连接框架有简单框架和吊笼式设计,前者适用于单层导轨设计,后者适用于双层导轨设计。早期安装车普遍采用简单框架设计,框架直接与发动机连接(主要是发动机下部两侧的前后两组安装边上的机械接口),框架底部的两组四套滚轮装置与导轨配合实现纵向滑动,纵向进给行程约 2.0~3.0m。轻型发动机直接使用人力推动,重型发动机增加连接结构和送进绞盘,增加中央纵向槽形梁,连接在两根弧形钢管中央顶部位置。槽形梁内部有手动绞盘系统,绞盘通过连接机构带动发动机实现纵移,绞盘系统有自锁功能,在大坡度角情况下能够承受发动机沿滑轨方向的分力。

双层导轨安装车在前面所述的中部承载-运动系统的顶部增加一组下层导轨,下层导轨由弧形横梁等结构提供支撑,导轨与发动机的底部支撑框架配合,框架沿导轨滑动实现发动机的送进和退出。吊笼框架主要用于发动机在不同设备之间的转移,以及在安装车上的长时间存放(驻车)和转运。发动机被吊笼定位固定在安装车上后,可与下层导轨连接,发动机安装时,整个吊笼框架拆下。吊笼框架外形像一个扣在发动机中段上方的方形笼子,采用钢制型材-管材焊接框架结构,框架与发动

机之间有两侧和顶部的多组连接接口,分别与发动机两侧推力销和安装边连接。

(前)苏联/俄罗斯和我国的发动机安装车顶部设计不同于西方国家,主要为四轮滑车+滑车轨道框架系统,“U”形截面型材焊接构成矩形的滑车轨道框架。四轮滑车的滑轮与纵向轨道框架配合沿纵向送进或后退,一般采用钢索-绞盘驱动装置。这种设计的缺点是滑轮与轨道之间的摩擦力较大,存在磨损问题,操纵力较大。优点是轨道可以设计成特定形状,滑车-轨道配合可以实现进给-后退过程中复杂的姿态和路径变化,苏-27飞机发动机安装车顶部就采用这种设计,如图6所示。此外,其滑车顶部发动机连接系统具有小行程横移自由度,四根均布的竖向丝杆具有多自由度微调功能,整体上结构较为复杂和特殊。

除了上述结构外,安装车还设计有定位装置,用于安装车-发动机相对于飞机的准确定位,在保证拆装作业效率方面往往起着关键性作用。定位装置通常为机械式结构,通过与飞机结构基准或转接装置对准实现定位,今后定位装置将采用光电系统等新技术。

#### 4 液压助力多连杆承载-运动系统技术关键

发动机安装车的中部承载-运动系统的下部手动液压助力升降-俯仰运动空间多连杆系统是技术关键。多连杆系统包括两组平面七连杆(两者之间有横向连杆),如图7所示。七连杆系统由基本的六连杆结构(图7中的杆AB、GBC、CD、DE、EF和AF)加上一根稳定杆-支撑杆(GH)。地面固定杆AH与AF合计为一根。六连杆系统包括上下两根纵向连杆(CD、AF)和两侧四根主升降运动杆(AB、GBC、DE、EF)。运动杆两两一组,两杆之间安装液压作动筒,可相对运动,带动整个杆系



图6 苏-27系列飞机发动机安装车  
Fig.6 Engine trailer of Su-27 series fighter

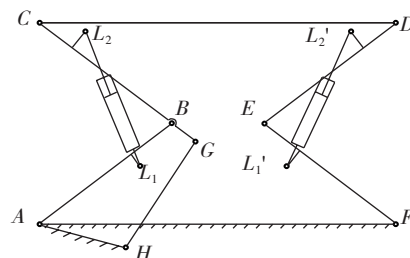


图7 七连杆系统简图  
Fig.7 Schematic diagram of 7-link mechanism

运动。升降运动杆主要承受垂直方向的发动机载荷和上部结构(及自身结构)重量载荷。在液压作动筒工作的情况下,六连杆结构中的两组升降运动杆AB和GBC、DE和EF分别等效于一根杆,这样整个杆系成为不具有稳定性的四连杆系统,因此需要稳定杆。在两侧升降运动杆高度不同时,顶部发动机等载荷有俯仰姿态角,产生重力的侧向分量,需要稳定杆-支撑杆平衡。

六连杆系统C点的运动轨迹是沿竖直方向的直线(在一定范围内),由四连杆ABGH来实现。四连杆ABGH需要有特定的长度组合,其中一种组合是 $AB=BC+GH=2AH$ ,通过研究和设计可以得到其他多种组合。C点直线运动行程有一个最大值 $S_{max}$ ,此时 $\angle ABC$ 达到最大。 $S_{max}$ 实际上决定安装车升降行程,因此四连杆机构设计要尽量实现大的 $S_{max}$ 值。

四连杆ABGH中的杆BG和GH在六连杆机构升高的整个过程中,载荷需要在一个适当的范围。对于

$AB=BG+GH=2AH$ 的四连杆系统,杆  $BG$  和  $GH$  需要根据受载情况,选取  $BG$  和  $GH$  之间适当的长度组合。

升降运动杆  $AB$  和  $GBC$ 、 $DE$  和  $EF$  在液压作动筒作用下分别绕  $B$  点和  $E$  点展开,液压作动筒分别主要承受  $C$  点和  $D$  点传入的发动机载荷和顶部结构重量载荷。计算  $C$  点和  $D$  点载荷对于铰链点  $B$  和  $E$  的力矩,该力矩分别由两侧作动筒平衡。 $B$  和  $E$  点到两侧作动筒轴线的距离即为力臂,将力矩除以力臂得到作动筒的载荷。连杆系统升起过程中,液压作动筒的力臂和载荷不断变化。设计时,需选取合适的作动筒连接点  $L_1$  和  $L_2$ 、 $L_1'$  和  $L_2'$ ,以控制最大载荷。

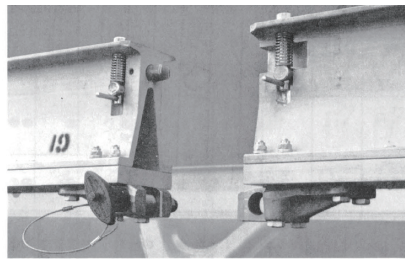
为了解算杆系升降过程中复杂的运动参数和载荷的变化过程,设计上采用 CATIA 的动态仿真功能进行仿真分析,或采用 Matlab、Adams 等软件进行仿真分析。整个系统要进行多约束条件下的优化设计,这样才能得到满意的结果。

## 5 安装车的标准化、通用化、系列化设计

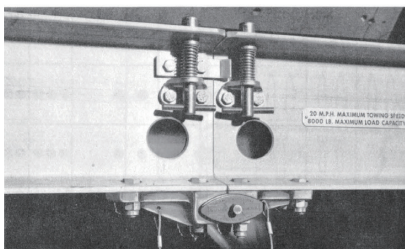
美欧的发动机安装车充分进行标准化、通用化、系列化设计。安装车上部采用标准平行双导轨系统,导轨为铝制标准型材,有普通和重载两种规格,前者为 I 形截面,后者为 A 形截面。导轨间距有几种规格,对应不同规格的安装车,导轨端部有快速拆卸连接装置,可以实现双导轨-安装车的连接,如图 8 所示。通过快接双导轨设计,发动机安装车实现与配套相同标准双导轨的发动机运输车、维修台架和试车台架连接,实现相互配合工作。专门设计的滚轮装置与导轨配合使用能沿其滑动,滚轮装置顶部的连接装置连接固定发动机,滚轮装置如图 9 所示。滚轮装置连接的发动机可沿连接的导轨系统滑动,实现在不同车/架之间的转移,使用非常方便。

比较有代表性的是 Air Logistics

公司的发动机安装车,有通用型、中等承载的 4000 系列,轻载的 1000 系列和重载的 6000 系列,除了 1030 型以外的所有安装车的机轮都有  $90^\circ$  的最大偏转角,可以使安装车具有横向移动和绕中心旋转的功能,所有型号都可配装中央绞盘组件(纵向送进-拖拽装置),在导轨倾斜的情况下可确保重载的移动,6000 系列



(a) 分离状态



(b) 对接状态

图8 标准导轨及其端部连接和限位装置  
Fig.8 Standard rails and tip end connecting and stopping devices



(a) 单滚轮外置夹器型



(b) 双滚轮内置夹器型

图9 滚轮装置

Fig.9 Roller adapters

带有(电力)慢速驱动装置和综合动力套件。

Air Logistics 公司系列发动机安装车设计实现标准化,主要尺寸和技术数据见表 1。

## 6 发动机安装车技术发展趋势

发动机安装车产品和技术的发展趋势将是实现更高层次的通用化、标准化、系列化、小型化,并实现一定程度自动化和智能化,新一代安装车可能呈现完全不同的技术面貌。

材料、结构、工艺、系统将可能全面更新,整体布局和细节结构将更加优化。应用新材料,全新的升降运动系统,采用精密制造技术,配装新的作动系统和测控系统。作动系统方面,将可能从手动液压作动系统、机械作动系统发展到电力作动系统,可能进一步配装伺服控制系统和精密测量系统,使安装车实现自动而精确的进给和姿态-位置调整。更精密的定位装置,采用现代光电探测技术,实现安装车与飞机之间的快速精确定位,大幅度提高作业效率。安装车发动机承载装置增加载荷传感器,随时监控安装过程中发动机载荷的变化。采用分布式智能化视频监控系統,具有一定的干涉自动识别能力,有效避免安装作业过程中飞机和发动机受损伤。

## 先进安装车实例分析

### 1 F-18的发动机安装车

F-18 系列舰载战斗机配装两台 F404/F414 发动机,发动机舱下部可完全打开,发动机采用举升式安装方式。作为一种专用舰载机发动机安装车,该车非常值得研究。

该安装车根据舰载使用要求和 F-18 飞机发动机安装设计特点进行设计,实现了小型化、轻量化,结构紧凑,如图 10 所示。主要特点:(1)底盘部分有 4 个横向轮组件,用于安装作业时安装车对称轴线/面与飞机

表 1 Air Logistics系列发动机安装车的尺寸和技术数据<sup>[2]</sup>

参数	型号								
	1030	4000A、4000B	4060	4072	4100、4100B	4120、4120B	4160、4160B	4172	6200
额定承载 /kg	1361	3629	3629	3629	4536	4536	4536	4536	6804
单车重量 /kg	590	1179	1134	1361	1542	1678	1338		3175
导轨最大高度 <sup>1</sup> /m		2.26	2.29		2.92		3.00		
导轨最大高度 <sup>2</sup> /m	1.45	2.08	2.16	2.31	2.79	3.11	2.87	2.92	2.16
导轨最小高度 <sup>1</sup> /m		0.80	0.83		0.86		0.94		
导轨最小高度 <sup>2</sup> /m	0.56	0.62	0.70	0.86	0.74	0.95	0.81	0.86	0.74
运输高度 <sup>2</sup> /m	0.84	0.90	0.98	1.14	1.00	1.21	1.08	1.13	0.94
车架最大离地高度 /m	0.13	0.28	0.28	0.28	0.27	0.32	0.27	0.27	0.21
坡度角余量 / (°)		不适用	不适用	不适用	不适用	不适用	不适用	不适用	20
俯仰角(导轨) / (°)	± 10	± 10	± 10	± 10	± 10	± 10	± 10	± 10	± 7.5
滚转角(导轨) / (°)	± 7	± 10	± 10	± 10	± 10	± 15	± 8	± 10	± 5
偏航角(导轨) / (°)	± 3	± 2.25	± 2.5	± 2.25	± 1.75	± 1.75	± 1.75	± 1.75	± 2
横移 /m	± 0.05	± 0.08	± 0.08	± 0.08	± 0.08	± 0.08	± 0.08	± 0.08	± 0.10
导轨间距 /m	1.22	1.22	1.52	1.83	1.22	2.29	1.52	1.83	1.22
最大宽度 /m	1.55	1.98	1.98	2.04	1.98	2.44	1.98	2.13	2.40
最大长度 <sup>3</sup> /m	2.97	3.86	3.86	3.86	4.42	4.42	4.42	4.42	4.72
导轨长度 /m	2.16	3.86	3.86	3.86	4.42	4.42	4.42	4.42	4.72
前后轮距 /m	2.41	3.20	3.20	3.20	3.76	3.76	3.76	3.76	3.91
左右轮距 /m	1.37	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	2.16
导轨上缘以下最大 径向或垂直尺寸 /m	0.47	0.42~0.60	0.58	0.65	0.42~0.55	0.65	0.58~0.71	0.42	0.46
牵引杆(最小)/m	1.22	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.83
牵引杆(最大)/m	1.22	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	3.05
轮胎规格 /cm	10.2 × 20.8	15.2 × 22.9	15.2 × 22.9	15.2 × 22.9	15.2 × 22.9	19.0 × 25.4	15.2 × 22.9	15.2 × 22.9	61.0 × 19.6
轮胎压力 /MPa	5.51	6.89	6.89	6.89	6.89	6.89	6.89	6.89	10.3
牵引速度 / (km · h <sup>-1</sup> )	32	32	32	32	32	32	32	32	32

注: <sup>1</sup>带转接柱, <sup>2</sup>不带转接柱, <sup>3</sup>不带牵引杆。

发动机理论轴线 / 面对正。横向轮和底盘框架采用快速拆装系统, 横向轮组件的矩形截面连接管与底盘上的矩形截面立柱(两侧框架四角各一, 焊接)套合, 两者之间有配合的螺栓孔, 使用螺栓连接。横向轮组件不使用时, 挂装在底盘左侧框架有 4 个立柱上(与安装立柱基本相同, 但方向相差 90°); 底盘上有车轮高度调节液压作动筒系统, 用于增大举升作业行程。(2) 中部承载 - 运动系统采用小尺寸、紧凑设计, 顶部双导轨采用窄轨距设计, 液压作动筒布置在上下主升降运动杆之间(三者轴线共面), 有效降低了收放尺寸。双导轨的弧形连接横杆采用矩形截面, 并采用小尺寸限位 - 承载销, 取消了横移运动机构。(3) 顶部采用单独的

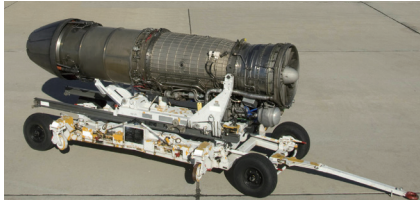
发动机连接平台设计, 该平台用于末段送进和调整(在下部底盘和运动系统将发动机举升到接近安装高度之后)。平台上还有发动机推力销和涡轮机匣顶部插耳的连接装置, 可将发动机可靠的固定, 实现发动机在安装车上短期贮存和转运。平台上部有 3 组发动机顶托连接装置, 包括:(1) 中部靠近发动机重心附近的大尺寸调节丝杠, 用于发动机举升送进阶段的高度调整, 带 4 根均布的手动调节杆, 具有较好的可达性。(2) 前部两个连接装置与中介机匣下部接头连接。(3) 后部叉形辅助连接 - 安全装置。顶托连接装置采用快接设计, 在发动机安装到位后, 可方便实现分离。平台上前后各有一根横向位置调节丝杠装置, 实现横移和偏航微调。

两台发动机各有一套辅助定位装置, 左右对称布置。每套包括前后两个定位标尺, 都为精密机加件, 分别精确固定在靠近飞机对称中心面的发动机机舱内侧框结构上, 标尺结构大部分伸出机舱外表面。发动机举升送进时, 安装人员观察标尺确定发动机位置/姿态偏差, 进而进行修正。

## 2 F-22的发动机安装车

F-22 配装两台 F119 发动机, 采用钻洞式安装方式, 编号 A/M32M-34 的安装车由波音公司设计。

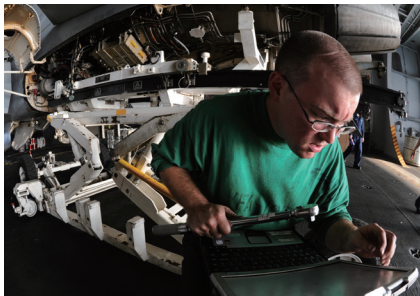
A/M32M-34 沿用以前安装车的基本布局, 主要改进是采用机械式作动系统<sup>[6]</sup>, 如图 11 所示。使用手轮组件驱动的机械螺旋作动筒, 前后两组 4 个主驱动手轮, 每组中的左右两侧手轮之间有机连接, 能实现同



(a) 总体图



(b) 发动机安装作业图 1



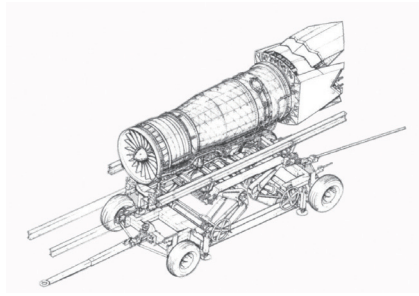
(c) 发动机安装作业图 2



(d) 发动机安装作业图 3

图10 F-18飞机的发动机安装车  
Fig.10 Engine trailer of F-18 fighter

步操作。双层导轨设计,下层导轨与发动机后部结构连接。在发动机安装作业时,下层导轨连接-承载结构使发动机前部处于悬臂状态,发动机和飞机对正后,发动机从安装滑轨直接滑动到布置在发动机舱内部的一组相似的延长滑轨上,发动机滑动到



(a) 总体图(发动机安装状态)



(b) 安装车图 1 (发动机及运输装置-安装架安装状态)



(c) 安装车图 2 (发动机及运输装置-安装架安装状态)

图11 F-22的发动机安装车

Fig.11 Engine trailer of F-22 fighter

位后,进行安装连接。发动机短舱隔框下部可以向下打开,以便于发动机安装。发动机与安装车下层导轨连接装置之间使用快卸接头,发动机到达安装位置后,可以快速分离。单台发动机和飞机之间有8个主要接口,打开连接装置后,维护人员可以拆卸和更换发动机,用时大约75min。安装车主要参数:车长约4.3m,宽1.83m,高度0.97~1.52m。空重约1542kg,最大承载3402kg。

### 3 F-35的发动机安装车

F-35战斗机配装1台F135大推力发动机,采用钻洞式安装方式,安装车由澳大利亚马兰德精密工程公司设计和制造。

该安装车进行精细化设计并采用精密制造技术。结构进行全面的



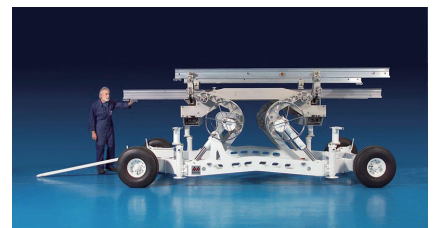
(a) 发动机安装作业图 1



(b) 发动机安装作业图 2



(c) 总体图(收起状态)



(d) 总体图(展开状态)

图12 F-35发动机安装车细节图

Fig.12 Details of engine trailer of F-35 fighter

优化减重设计,大量使用高性能材料、高精度机加件,很多构件采用新的结构形式。调节装置设计成各种规格的手轮,类似机床设备,进行了较好的人机工程学设计。机械作动筒有两组超大尺寸驱动手轮,发动机后部连接支架系统等零件经过特别设计,一些运动部件设计有外罩,全机零件数量达12000多项,结构零件之间广泛使用机械连接件,较少采用焊接。因此,该安装车整体上看如同

精密机床,如图 12 所示。

比较特殊的设计是上层导轨设计成两段,其中一段可以拆卸,用作定位-对接装置的一部分。定位-对接装置主体为多根连杆构成的 H 形支架,其顶部与飞机发动机舱后部隔框的基准连接,下部支撑在地面上,两根拆下的导轨安装固定在 H 形支架垂直方向,平行于地面。安装车两侧导轨与定位-对接装置导轨对正实现安装车定位,与 F-22 发动机安装车相比,尽管细节上差别很大,但从基本布局看,两者仍相似,包括双层导轨设计、多连杆升降系统等,但是升降连杆-机械传动系统采用了全新的设计,还有待深入分析和研究。F-35 发动机安装车广泛采用新技术和新设计,因此性能上达到较高的水平,但存在的不足是造价高达 300 万美元。

### 未来展望

喷气战斗机发动机安装车产品和技术作为重要保障设备和工艺装备,在过去的 60 年里,获得了较大发展,基本实现了与战斗机的同步发展,今后将会有更大的发展空间。新

一代安装车可综合采用各种新技术,呈现新面貌,自动化和智能化方面可达达到一个新水平。

美国等西方国家在这一领域处于世界领先水平,俄罗斯的产品也有自己的特色,我国在这方面相对较弱。我国应该根据战斗机的发展需求,充分借鉴国外先进设计和成功做法,开展高性能发动机安装车产品发展和技术研究工作。

### 参考文献

- [1] T3000/T4000 engine trailers[EB/OL]. 2015 [2015-08-21]. [http://en.wikipedia.org/wiki/T3000\\_/T4000\\_Engine\\_Trailers](http://en.wikipedia.org/wiki/T3000_/T4000_Engine_Trailers).
- [2] Air log systems and equipment brochure original[EB/OL]. 2015 [2015-08-21]. <http://airlog.com/Mech%20Web%20Site/images/docs/Air%20Log%20Systems%20and%20Equipment%20Brochure%20Original.pdf>.
- [3] 吴正勇. 飞机设计手册第 21 分册: 产品综合保障 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
- [4] WU Zhengyong. Aircraft design manual, volume 21-product: integrated logistics[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000.
- [5] Category: pratt & whitney F100[EB/OL]. 2015 [2015-08-21]. [https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Pratt\\_%26\\_Whitney\\_F100?uselang=en](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Pratt_%26_Whitney_F100?uselang=en).
- [6] Category: general electric F404[EB/OL]. 2015 [2015-08-21]. [http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:General\\_Electric\\_F404](http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:General_Electric_F404).
- [7] Category: general electric F414[EB/OL]. 2015 [2015-08-21]. [http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:General\\_Electric\\_F414](http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:General_Electric_F414).
- [8] F-22 raptor F119-PW-100 engine[EB/OL]. 2015 [2015-08-21]. <http://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/f-22-f119.htm>.
- [9] F-35 engine trailer[EB/OL]. 2015 [2015-08-21]. <http://www.lockheedmartin.com/us/products/f35/f35-sustainment/about-us.html>.
- [10] Australian company helps achieve critical JSF milestone[EB/OL]. 2015 [2015-08-21]. <http://www.marand.com.au/press/item/78-australian-company-helps-achieve-critical-jsf-milestone>.
- [11] Complex assembly[EB/OL]. 2015 [2015-08-21]. <http://www.marand.com.au/solutions/complex-assembly>.
- [12] 陈崇禄. 飞机设计手册第 13 分册: 动力装置系统设计 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2006.
- [13] CHEN Chonglu. Aircraft design manual, Volume 13-product: powerplant system design [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2006.
- [14] US aeroteam aircraft ground support equipment[EB/OL]. 2015 [2015-08-21]. <http://www.usaeroteam.com/>.

## Analysis of Engine Trailer Technology

ZHAO Changhui<sup>1</sup>, LIU Yiwei<sup>2</sup>, DUAN Hongwei<sup>3</sup>, WANG Qi<sup>1</sup>, WANG Meng<sup>1</sup>

- (1. AVIC Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110850, China;
2. Representative Office of the PLA of China to Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110850, China;
3. Shenyang Aircraft Corporation Commercial Aircraft Company, Shenyang 110850, China)

**[ABSTRACT]** Engine trailers are important aircraft support equipments and process equipments, which are used to install & remove engines and load & transport large aircraft components. They play very important roles in aircraft maintenance & flight test. Engine trailers of modern jet fighters are complicated equipments, which are made of some mechanisms and system. This article is based on elaborate study of massive foreign engine trailer samples. Development of engine trailers is reviewed firstly. Then engine trailer technology is summarized and analyzed prominently, the included content as follows: design requirement & coordinated design, design feature, structure composition, link mechanism key technology, standardization universalization & serialization, trend of technology development. Advance engine trailer design samples are analyzed subsequently. Finally, summary and forecast are given.

**Keywords:** Aircraft manufacturing technology; Aircraft support equipment; Engine trailer; Design technology; Analysis of technology

(责编 古系)