

基于固体火箭组合吊运的一种方案设计

张洪亮 解超

(巨力索具股份有限公司 河北 保定 072550)

摘要: 对于运载火箭从立项设计、组装、模态试验直至装载卫星发射前,整个过程都需要对火箭进行多次拆卸组装转运。针对运载火箭的反复装载转运,根据某箭的参数和现场条件要求,设计了一种组合吊运方案。方案用于大直径、大吨位固体运载火箭的全箭吊运及各级发动机的独立吊运。通过改变吊点与主梁体的连接方式,实现吊具功能的切换,吊具具备安全、通用、操作方便的特点。特制宽体吊带解决了吊运全箭的连接问题。经过有限元分析计算,验证了吊具的强度、刚度。通过组合吊运方案的设计,拓展了固体火箭的吊运方式。

关键词: 固体; 火箭; 转运; 组合; 吊运

0 引言

目前,随着我国航天产业的快速发展,运载火箭成为通往太空的快速列车,现有的运载火箭以燃料类型分类主要分为固体火箭和液体火箭两类。固体火箭发动机具有结构简单、可靠性强、机动性好等特点,在降低重力损失、提升质量比方面具有较大优势^[1],已广泛应用于航天运载领域。为满足运载能力的需求,火箭直径、吨位越做越大。受运载器产品差异的限制,转运过程中吊装工具繁琐多样,现场操作人员专业度要求高,操作复杂,吊运过程中易对人员和产品产生安全隐患。为解决这一问题,本文提出一种对固体火箭组合吊运的方案。通过调整吊具主吊点结构及位置,适应不同产品不同工况的吊运。

1 技术要求

固体火箭组合吊运的方案设计需满足以下要求:固体火箭箭体一般主要由高强中模碳纤维/环氧树脂复合材料缠绕而成^[2],复合材料壳体外涂防热涂层,内有燃料及燃烧室,为易损高危产品,大推力固体发动机如图1所示,固体火箭吊运过程中需保护其表面涂层,发动机表面未设计起吊连接点,且要求箭体表面接触面压不得损坏壳体结构。受防静电车间行车最大起升高度限制,吊具需尽量减小整体起吊高度。吊具强度、刚度、稳定性需符合行业设计标准。某固体火箭组合吊具主要技术参数见表1。

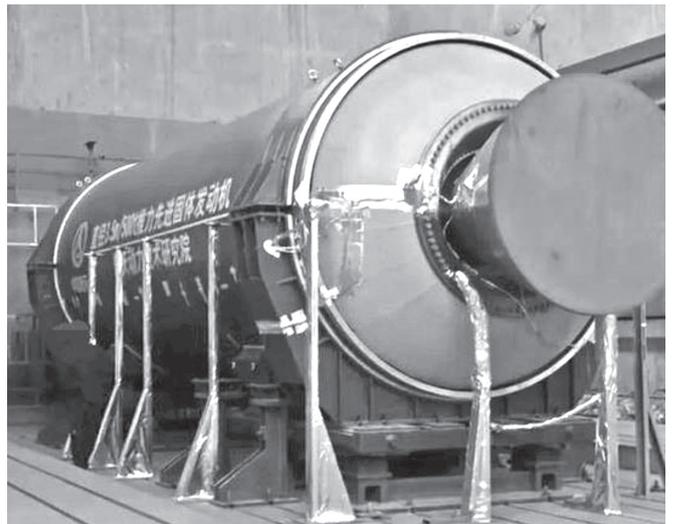


图1 大推力固体发动机

表1 某固体火箭组合吊具主要技术参数

参数	数值
一级发动机 /t	80
二级发动机 /t	40
全箭 /t	160
箭体的极限面压 /MPa	≤ 0.44
箭体轴线高低点差 /mm	≤ 100
起吊高度 /m	≤ 6
行车 /台	2

2 总体方案设计

方案采用全箭组合吊运方式,以各级发动机和全箭吊具通用为设计依据,考虑了现场作业条件等因素,设计了一整套吊具,经过计算分析和载荷试验证明,符合火箭转运吊装要求,并已成功应用于某

箭的吊运，方案介绍如下。

受防静电车间条件限制，吊具主要分为两部分：各级发动机吊具、全箭前端吊具。全箭吊运状态如图2所示。

定包角，此设计可有效地防止吊运过程中箭体的滚转运动，提高了吊运的安全性。

受发动机结构限制，宽体吊带连接处为固定区域。各级发动机吊具还需兼备多种发动机状态吊运。发

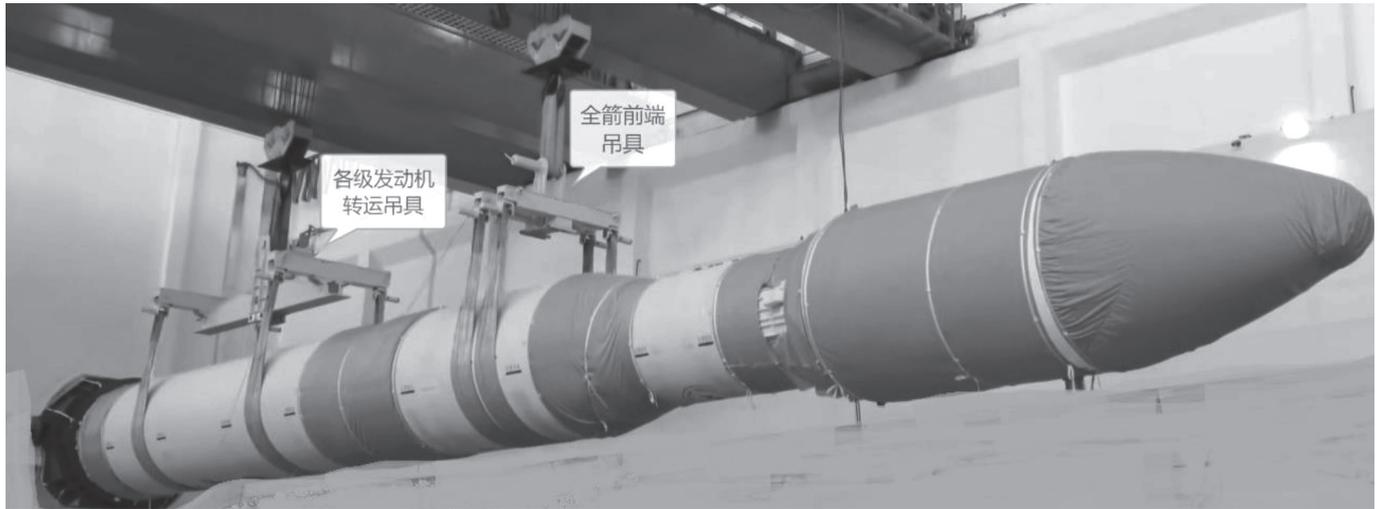


图2 全箭吊运状态

2.1 各级发动机吊具设计

各级发动机吊具需兼顾各级发动机独立吊运和全箭吊运的功能，一级发动机吊运如图3所示。吊具需具有良好的力学性能和稳定性。其结构主要包括主梁、副梁、活动主吊点、平移轴、转动轴、宽体扁平吊带及其他辅助配件等，如图4所示。

动机状态主要包括发动机空药、满药、发动机与不同级间段连接等状态，每种状态被吊物的质心都会发生变化。为了解决吊具能够适应不同质心位置的问题，吊具设计有活动主吊点的结构，拆卸转动轴保留主梁下端的两根平移轴，此时，吊具主吊点具备沿主梁长度方向活动的自由度，吊具主吊点可通过减速机带动丝杠及丝杠螺母轻松地将活动主吊点沿主梁长度方向进行调节，以满足被吊物的不同质心位置状态水平起吊。

2.1.1 梁体结构设计

考虑到吊具的运输与允许吊高要求，梁体采用主副梁分体可拆卸连接设计，主梁设计为变截面形式，副梁担于主梁上端平面，副梁在主梁箱体内部设有防脱铰接。此方案在减小了梁体自重的同时也最大限度降低了吊具的高度。主副梁分体可拆卸设计节省了运输成本，提高了生产效率。

吊具还考虑到箭体吊运过程中的滚转问题，副梁的设计长度小于箭体直径，宽体扁平吊带与箭体接触面大于箭体周长的1/2。宽体扁平吊带与箭体包裹连接后，箭体上端吊带有一

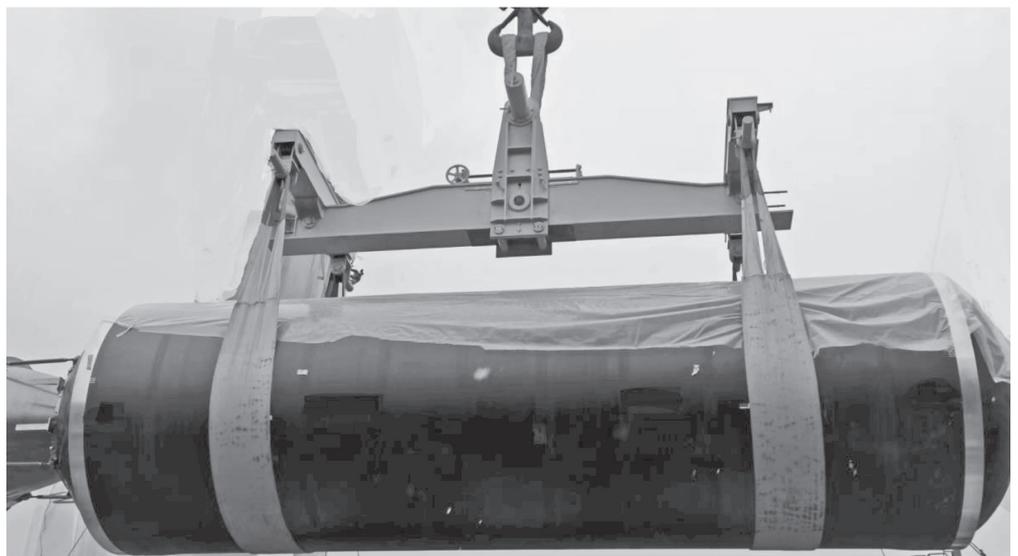


图3 各级发动机起吊状态

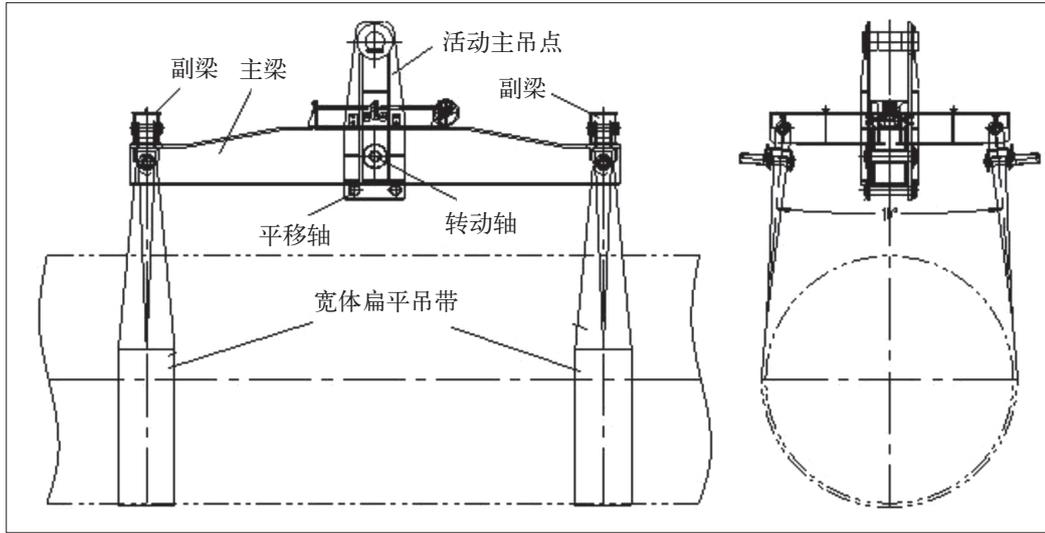


图4 各级发动机吊具结构组成

各级发动机吊具作为多功能吊具还需满足全箭的吊运功能，改变吊具活动吊耳处连接轴状态，旋转轴穿过主梁中间孔和主吊点连接板，同时拆除两根平移轴，释放梁体旋转方向的自由度，实现梁体的偏摆功能，满足全箭的双钩起吊。各级发动机吊具连接全箭的末端，全箭前端吊具连接箭体的前端位置。全箭前端吊具与各级发动机吊具结构相似。两行车同步作业通过激光水平仪定位确保全箭起吊处于水平状态不发生倾斜。

2.1.2 宽体扁平吊带设计

对于大吨位大直径固体发动机吊运，方案采用柔性宽体吊带包裹箭体起吊，常规宽体吊带对折使用最大额载 24t，近似宽度 300mm，采用常规宽体吊带不能满足大吨位发动机的吊运。为此设计一种特制宽体扁平吊带，其采用超高分子量聚乙烯纤维制作，具有伸长率小、耐冲击、耐酸碱腐蚀、不导电、抗静电、使用寿命长的优点。带体采用5层分层设计，中间两层为受力本体，受力本体外层为连接带，为了保护箭体表面涂层，扁平吊带内侧铺有 2mm 厚的毛毡。通过以上方案的优化，提高带体额载的同时，带体的宽度也得到了延展，达到了对折使用额载 60t，宽度 600mm。

考虑到全箭起吊过程中两行车不同步因素，对吊带内侧与箭

体接触表面摩擦因数进行了厂内模拟实验，得出带体与光滑金属杆摩擦因数不小于 0.2，箭体理论允许最大倾斜角度可达到 10°，有效地保障了箭体的滑落风险。

2.2 主要结构受力计算

吊具梁体等主要结构采用低合金高强度结构钢焊接而成，轴类采用合金结构钢热处理加工。在吊运火箭过程中，

吊具承受着被吊物的重力、吊具的自重、行车的动载和其他环境因素，吊具的强度至关重要，因此通过有限元对极限载荷进行校核。

模型采用 SolidWorks 软件进行建模，简化处理并导入 ANSYS 软件 Workbench 工作平台进行仿真分析前处理和运算。将各级发动机吊具离散化为一个有限元分析模型。分析模型采用弹性模型，单元类型采用实体四面体单元或者六面体单元划分网格。单元数 56922 个，节点数 114187 个。所有结构间接触类型为绑定接触。

各级发动机起吊应力分布如图 5 所示，各级发动机起吊变形分布如图 6 所示。从整个分析结果可以看出，吊具在负载状态下强度和刚度可以满足设

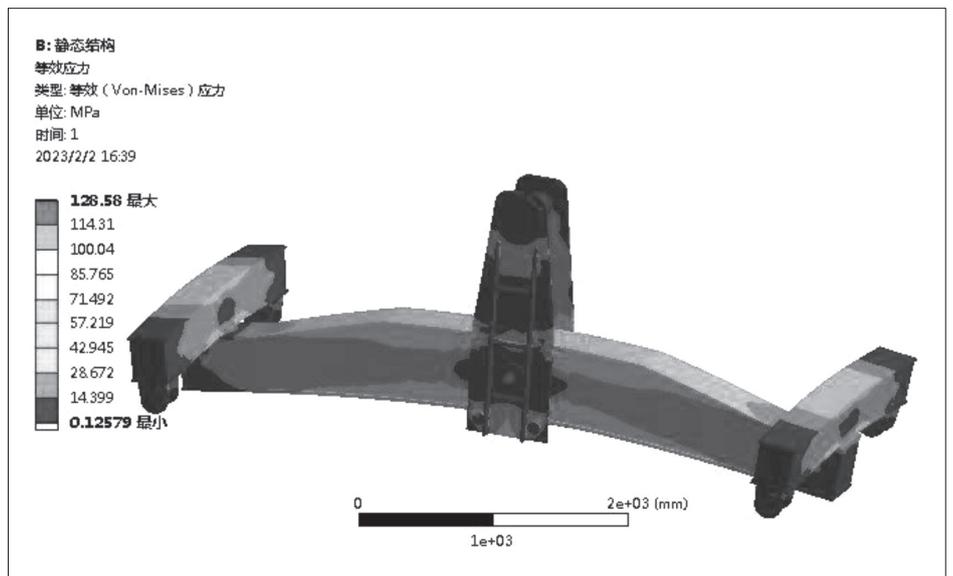


图5 各级发动机起吊应力分布图

计标准。最大应力在主梁最大弯矩处为 128.6MPa，最大变形为 3.81mm。

2.3 扁平吊带与箭体接触面压计算

扁平带与箭体表面为面接触，接触面以沿箭体圆柱面弧长分布，箭体重力传递给扁平带，在箭体表面相互作用产生面压，压力 P 沿弧长按正弦曲线分布，如图 7 所示。根据结构受力特点，在竖直中间截面和水平中间截面上没有剪力。

$$P = P_{\max} \cdot \sin \varphi \quad (1)$$

$$G = 2 \int_0^{\pi/2} P \cdot \sigma \cdot d\varphi \cdot \sin \varphi \quad (2)$$

$$G = 2P_{\max} \cdot \gamma \cdot \sigma \cdot \int_0^{\pi/2} \sin \varphi \cdot \sin \varphi d\varphi \quad (3)$$

积分得出：

$$G = 0.5 \cdot \sigma \cdot \pi \cdot \gamma \cdot P_{\max} \quad (4)$$

$$P = \frac{G \cdot \sin \varphi}{0.5 \cdot \sigma \cdot \pi \cdot \gamma} \quad (5)$$

通过以上计算得出，宽体扁平吊带增大了带体宽度，加大了接触面积，面压满足设计要求。

3 结语

本文设计了一种固体火箭组合吊具的方案，给出了该吊具的设计原理及结构形式，对吊具与箭体的连接方式，吊具的使用功能及计算过程进行了详细描述，并对吊具的使用工况进行有限元分析，验证了吊具的强度和刚度，保证了吊具的实用性、安全性和可靠性。通过组合吊运方案的设计，拓展了固体火箭的吊运方式。

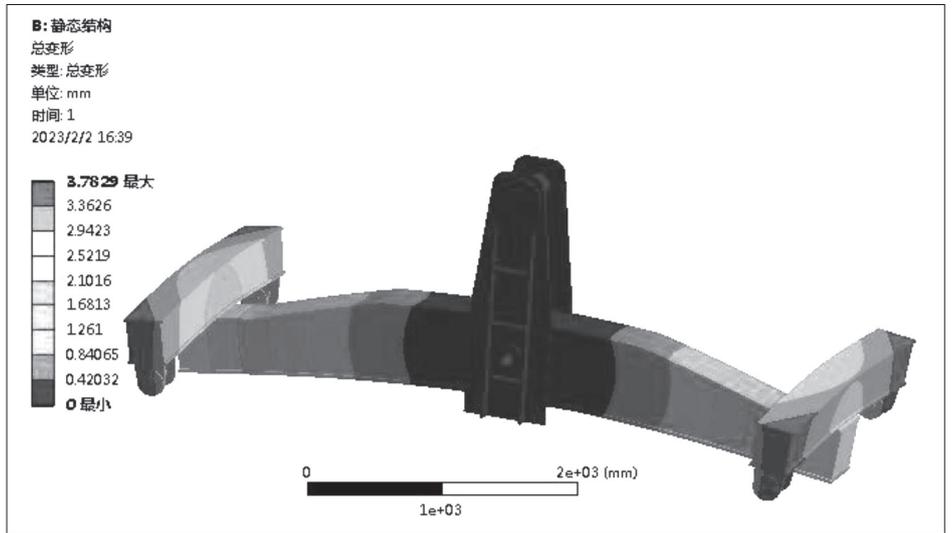


图 6 各级发动机起吊变形分布图

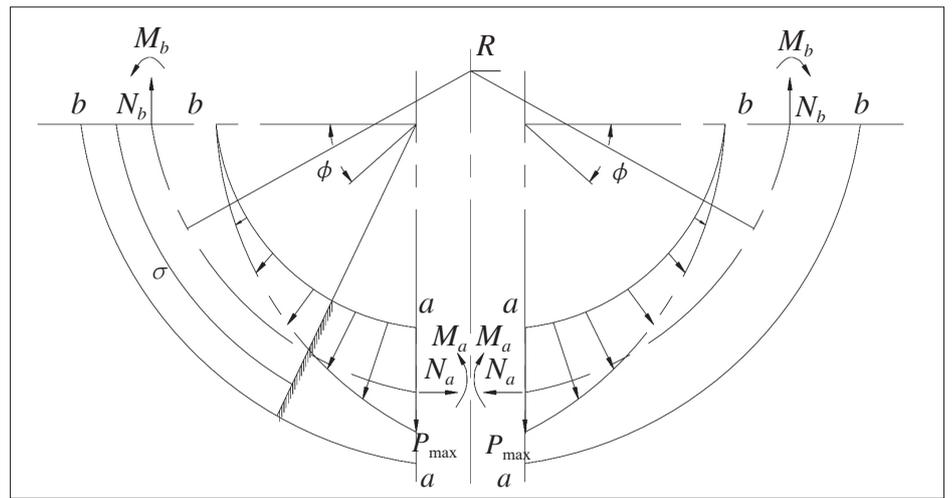


图 7 面压分布示意图

参考文献：

[1] 武丹, 陈文杰, 司学龙, 等. 大型固体火箭发动机发展趋势及关键技术分析 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2021, 54(02): 102-107.

[2] 冯彬彬, 袁金, 胡旭辉, 等. 大长径比固体火箭发动机壳体轻量化设计 [J]. 复合材料科学与工程, 2021(05): 43-48.

作者简介: 张洪亮 (1988.05-), 男, 汉族, 河北保定人, 本科, 工程师, 研究方向: 吊具研发设计。