嫦娥三号着陆器结构分系统设计与实现

柴洪友, 邓宇华*, 盛聪

北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094

* E-mail: curain_deng@hotmail.com

收稿日期: 2014-01-20; 接受日期: 2014-03-12

摘要 嫦娥三号着陆器结构根据实际任务需求, 在国内首先采用了十字支撑构型, 将 4 个大容量贮箱直接安装在对接环上, 使得该构型具有重心低、传力路径短的特点. 同时在设计上采用了梁板复合式新型主承力构件等多种手段, 最终取得了很高结构承载效率, 结构与整器重量比仅为 5.28%. 本文从分系统组成与功能、分系统设计、分析与试验验证等方面介绍了嫦娥三号着陆器结构分系统的设计与实现情况.

关键词

嫦娥三号

构型

十字支撑结构

梁板复合结构

1 引言

嫦娥三号着陆器结构在整个任务过程中需要承受大容量贮箱过载及着陆冲击载荷等集中载荷, 需要经历温度环境特殊, 整器质量资源分配紧张. 嫦娥三号着陆器结构分系统根据任务需求进行研制, 采用了十字支撑结构构型, 同时采用了梁板复合式新型主承力构件等多种手段, 最终取得了很高的结构效率. 分系统历经方案设计、初样研制、正样研制以及发射、在轨运行和月球着陆, 圆满完成了各项任务.

本文从分系统组成与功能、分系统设计、分析与试验验证等方面介绍了嫦娥三号着陆器结构分系统的设计与实现情况.

2 着陆器结构分系统分功能及组成简述

着陆器结构分系统的主要功能是为探测器提供安装平台和主承力平台. 也就是为探测器上的设备提供安装面和安装空间, 保证设备的安装面精度, 保证探测器在地面、发射、着陆和在月面工作期间本体

构形的完整性, 在组装、停放、起吊、运输、总装、测试、发射、飞行、着陆和在月面工作期间承受相应的载荷条件.

着陆器结构主要由主承力结构、顶板、-Y 舱、+Y 舱、-Z 舱、+Z 侧组件等组成(图 1). 主承力结构主要由对接环、底板、十字支撑结构、上框及斜侧板构成(图 2); 十字支撑结构由 4 块隔板和中心接头组装而成, 中部的大开孔为 7500 N 发动机预留, 隔板为梁板复合结构, 起主要的承力作用. 4 个贮箱并联布置, 其下部直接安装在对接环上.

3 着陆器结构设计

3.1 任务分析

与以往的空间飞行器结构不同, 着陆器结构除了承受发射载荷外, 还将承受着陆载荷, 而着陆载荷通过着陆缓冲机构作用在结构上的集中点, 这就要求着陆器结构与传统的卫星和飞船的结构形式上很大不同.

引用格式: 柴洪友, 邓宇华, 盛聪. 嫦娥三号着陆器结构分系统设计与实现. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 391-397

Chai H Y, Deng Y H, Sheng C. Design and realization of structure subsystem for the Chang'E-3 lunar lander (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 391-397, doi: 10.1360/092014-45

图1 着陆器结构组成示意图

图2 着陆器主承力结构示意图

为提高着陆稳定性,着陆器宜采用扁平的结构构型以满足降低探测器重心的需求。

为了变轨和减速,着陆器携带了大量推进剂,推进剂重量约占整器发射重量 $2/3$,比例很大,因此整器需要安装大型贮箱;与此同时着陆器还配置了与大型贮箱相适应的 7500 N 发动机,其占用相应空间很大。

着陆器结构重量要求苛刻,一般航天器结构重量占整器重量的百分比较大,而嫦娥三号探测器用 CZ-3B 运载发射,重量非常紧张,要求着陆器结构为整个探测器减重做出贡献。

着陆时,着陆器结构已经历了飞行过程中恶劣的环境(主要是热环境),着陆时结构的温度范围也很大,需要注意适应特殊的温度环境。

3.2 结构构型设计

根据任务分析,结构构型设计时,首先需要着重考虑4个大型贮箱和 7500 N 变推力发动机的安装位置和安装空间(贮箱位置基本决定了探测器的质心位置)。

研究国外月球探测器结构和桁架式卫星结构,以及国内研究的桁架式卫星主承力结构,其构型的共同特点是多个贮箱并联布置,贮箱下部直接安装在对接环或短梁上,此类构型具备传力路径短、重心低的特点。着陆器结构分系统根据探测器任务要求,提出十字支撑着陆器结构构型方案。从力学上看,该结构构型为含有桁架的较为封闭的箱体结构,箱体尺寸为 2500 mm (长) $\times 2500\text{ mm}$ (宽) $\times 1240\text{ mm}$ (高),由位于结构中心的十字支撑结构以及对接环、侧板、底板、顶板组成,如图3所示。十字支撑结构由4块隔板和中心接头组装而成,中部的大开孔为 7500 N 发动机预留空间。为了适应十字承载构型,特将隔板设计为梁板复合结构^[1]。其中梁为高模量碳纤维缠绕的矩形梁,预埋于隔板内侧位置,起主要的承力作用;板为碳纤维蒙皮铝蜂窝板,起辅助支撑作用,并可用于安装设备、电缆和管路。同时此种形式的结构板比单纯的桁架结构更易于安装。箱体侧面的四棱削去,以满足运载整流罩的包络要求,并可用于安装姿控发动机。与运载接口采用包带连接,对接环柱段中径 1750 mm ,高 200 mm 。对接环高度较高主要是考虑:1) 避免包带解锁时包带与贮箱管嘴干涉;2) 对扩散集中载荷有利。

3.3 传力路径分析

3.3.1 发射载荷

横向载荷。贮箱引起的横向载荷分为上下两路,上路通过贮箱拉杆传到十字支撑结构,再传到对接环,下路直接传到对接环。其他设备(包括巡视器)主要安装在侧板和顶板,侧板上载荷通过十字支撑结构和底板传到对接环,顶板上载荷通过十字支撑结构传到对接环。对接环上的载荷再传到运载火箭。

纵向载荷。贮箱的纵向载荷直接传到对接环,其他设备的纵向载荷通过十字支撑结构传到对接环。对接环上的载荷再传到运载火箭。

3.3.2 着陆载荷

横向载荷。横向载荷一部分传递到十字支撑结

图 3 (网络版彩图)十字支撑着陆器结构构型方案

构,通过着陆器缓冲器支架传到着陆缓冲机构,然后再由主缓冲器传到月面;另一部分传递到底板后,通过底板传到着陆缓冲机构的辅助缓冲器,然后再由主缓冲器传到月面。

纵向载荷.贮箱的纵向载荷(此时推进剂已所剩无几,载荷较小)通过对接环传到十字支撑结构.其他设备的纵向载荷直接传到十字支撑结构.十字支撑结构上的载荷通过缓冲器支架再传到着陆缓冲机构的主缓冲器,最后传到月面。

3.3.3 起吊载荷

吊点共 4 个,安排在缓冲器支架上,共用与着陆缓冲机构主支柱接头,与着陆载荷纵向载荷传力路径相同,但须注意此时推进剂为发射时的状态,载荷较大。

3.3.4 停放及运输载荷

停放及运输载荷传力路径与发射状态相同.综上所述,对接环、十字支撑结构和缓冲器支架是最主要的承力结构,在设计、生产、验收、试验中需要特别关注。

3.4 结构主要部件设计

3.4.1 对接环

对接环是整器的基础和装配基准,起到承受、传递整器停放、运输、发射载荷的作用。

对接环为铝合金一体机加件,材料为 2A14T6 锻铝,最大外形尺寸为 $\phi 1910\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ (图 4)。对接环下法兰是着陆器装配的基础,用于同运载对接,并

图 4 (网络版彩图)对接环

为卫星提供支撑,经与运载协调截面形状与 1194A 型接口保持一致。

对于着陆器结构,对接环与十字支撑结构连接处的载荷以及贮箱安装处的载荷很大且为集中载荷.为了使对接环能够承受上述集中载荷,上法兰在接头处的厚度增加,柱段在接头处的厚度增加并在贮箱对应位置设计加强筋;对接环高度设计为 200 mm,以有效的分散来自上法兰的集中载荷,同时为贮箱管嘴及包带压紧解锁提供了足够的空间。

3.4.2 十字支撑隔板

4 块隔板组成的十字支撑结构为结构平台的关键承力部件(图 5)。隔板主体为蜂窝夹层结构,为了形成稳定的桁架结构,强化传力路径,将其设计为梁板复合结构,截面如图 6 所示。隔板中的梁预埋于隔板内侧位置,构成四棱锥,保证了平台刚度;蜂窝板

图 5 (网络版彩图)隔板构型

图6 梁板复合结构

可分散载荷, 并可提供设备安装面。

由于板内埋梁, 受力情况复杂, 面板材料选用高强度碳纤维/氰酸酯复合材料, 可以较好的协调面板与内埋梁间的刚度梯度, 同时兼顾较好地承受着陆冲击载荷。板中的梁为预埋缠绕矩形空心梁, 材料为高模量碳纤维复合材料, 用以提高整器刚度。

隔板在下接头附近受力较大, 对隔板下接头附近采取内埋梁外侧蜂窝格填充发泡胶、局部区域面板铺层加倍的加强措施。为防止梁板结合处的边缘剥离, 在隔板内侧边缘加碳纤维编织布包裹, 局部板厚有所增加。

隔板上部和下部各设有一个传递较大集中载荷的接头。具体方法是在预埋梁端部的梁内粘接垫块, 梁外填充泡沫胶。部装时在垫块上打孔与其他结构件连接。

隔板与缓冲器支架连接处受到从缓冲器传来的着陆冲击载荷, 隔板与巡视器支架连接处受到从巡视器传来的载荷, 需要在对应的位置周围区域进行加贴碳布和填充泡沫胶加强。

3.4.3 缓冲器支架

缓冲器支架是着陆缓冲分系统的缓冲腿主缓冲器与着陆器侧板连接的接口。缓冲器支架受到载荷大, 对刚度基本无要求, 其设计主要是强度设计。缓冲器支架共2种, +Z方向与其他三方向的略有不同。

+Z 缓冲器支架结构由缓冲立板(垂直三角板)和缓冲平板(水平三角板)组成, 由角条连接, 如图7所示。主缓冲器上接头与缓冲器支架连接, 主缓冲腿上的集中载荷直接作用其上。缓冲立板主要用于将着陆载荷的垂直分量和 Z 向水平分量传递到着陆器本体结构, 缓冲平板主要用于将着陆载荷的 Y 向水平分量传递到着陆器本体结构。

为改善受力, 缓冲立板也是梁板复合结构, 其形式与着陆器隔板一样, 只是所埋梁的截面缩小, 铺层

图7 (网络版彩图)缓冲器支架构型图

和材料不变。考虑到内埋梁的两端需要传递的载荷较大, 进行了加强处理, 包括3个措施。1) 在内埋梁端部的梁内粘接垫块; 2) 立板与平板连接角条外端和立板与侧板连接角条下端扩大, 与立板胶接, 并完全盖住垫块, 最后一起打孔螺接; 3) 内埋梁下端垫块通过平片与底板连接。

垫块设计为热胀系数相近的三维编织复合材料垫块, 防止高温导致金属材料与碳纤维材料热变形协调问题, 另一方面也减轻了结构重量。

平板位于立板上方, 呈等腰梯形。水平三角板采用碳蒙皮铝蜂窝夹心结构。

+Y, -Y, -Z 侧缓冲器支架结构借用仪器舱底板代替平板, 立板与仪器舱底板通过角条连接。

平板与立板连接线的左右两端, 会在侧板上施加较大的面外载荷, 立板的上下两端, 会在隔板上施加较大的面内载荷, 侧板、隔板、底板和结构连接设计时进行了相应的考虑。

3.4.4 +Y, -Y 侧仪器舱结构

+Y, -Y 侧的外挂仪器舱构形如图8。缓冲器支架结构用仪器舱底板代替水平三角板, 垂直三角板与仪器舱底板通过角条连接。仪器舱底板的设计参照水平三角板, 在与着陆缓冲机构主接头对应位置增加特殊设计埋件, 以提高其局部承载能力。

由于有传热的要求, +Y, -Y 侧板为铝合金面板铝蜂窝板, 内埋热管, 并且热管与散热板是一体的, 散热板与侧板夹角 110°。侧板成型时需要设计特殊的工艺模板。

图 8 (网络版彩图)+Y, -Y 舱构型图

3.5 结构连接设计

着陆器结构中, 隔板间连接、隔板与侧板的连接、隔板与对接环的连接、缓冲器支架与着陆器结构本体的连接将传递较大载荷, 需要特别设计, 其中缓冲器支架的连接前文已描述。

3.5.1 隔板间连接

4 块隔板通过中心接头连接为十字支撑结构, 中心接头由 4 个相同的角盒组成, 如图 9 所示。

中心接头角盒的侧面通过常温固化胶和螺钉与隔板连接, 胶接和螺接都可承载全部载荷。中心接头侧面的孔连接时以隔板上的孔为模孔配打。连接孔安装抗剪钉, 通过内埋梁中的垫块连接隔板内埋梁, 传递较大载荷, 其余孔与板内通用预埋件对应。

4 个中心接头角盒底面在一个平面上, 构成与 7500 N 变推力发动机的连接界面, 通过 8 个螺钉连接。

图 9 (网络版彩图)中心接头

中心接头角盒中间双耳通过销钉与贮箱上端拉杆连接。

3.5.2 隔板与对接环的连接

为了装配方便, 每块隔板与对接环的连接通过 2 个对称的铝合金机加角盒实现。角盒上的连接孔以隔板上的孔为模孔配打。角盒通过常温固化胶和抗剪销钉与隔板连接, 以销钉为主, 销钉通过垫块连接隔板内埋梁, 传递较大载荷。角盒通过 5 个 M6 螺钉与对接环上法兰连接, 为了提高各螺钉载荷的均匀性, 角盒上设计有保证局部刚度的加强筋(图 10)。

3.6 结构热设计

由于缓冲器支架和中心接头区域的温度环境特殊, 相应结构需要特别进行热设计。

缓冲器支架的连接设计以螺接为主, 支架由热控包覆层包覆, 可以满足温度条件, 部装连接其他部位与此处相同。

隔板与中心接头直接连接, 作为主承力结构的隔板等部件的成型, 包括加强铺层以及包裹布的粘接, 以及梁板复合结构内部的加强垫块的粘接均使用耐温较好的 J133 胶, 确保其在+100℃仍然具备承载能力。

3.7 与推进分系统大部件的总装适应设计

推进分系统的大部件包括 4 个贮箱、2 个气瓶和 1 个 7500 N 变推力发动机。

贮箱直接安装在对接环上法兰上, 采用上下连

图 10 (网络版彩图)隔板与对接环的连接

接的方式安装贮箱(图 11)。贮箱上下各有 1 个法兰。其上部通过贮箱拉杆组件与结构中心接头和吊点接头连接。贮箱上端法兰连接 1 个转接接头, 再通过 3 个拉杆与结构连接。转接接头通过 8 个均布的 M8 螺钉与贮箱上端连接, 如图 11 所示。这种连接形式仅限制横向位移而不限纵向位移, 可以很好地适应贮箱的轴向变形(贮箱内压及温度引起的轴向变形), 同时通过转接接头和拉杆将贮箱及燃料重量形成的横向载荷传递到主结构上。贮箱下部通过法兰与对接环上法兰连接, 液体出口导管向对接环外倾斜。这种连接形式直接将贮箱及燃料重量形成的纵向及横向载荷传到对接环上。该连接方式传力路径设计合理, 并且便于贮箱的安装。

2 个气瓶的外部机械状态一致, 采用上下连接的方式安装。气瓶在 $+Z+Y$ 、 $+Z-Y$ 侧板各安装 1 个, 下部通过支架连接, 上部通过两道包带连接。

7500 N 发动机从结构底部中央进入, 安装在十字支撑结构下部的锥形空间内, 发动机顶部与中心接头通过螺钉连接。另外, 为了保证发动机产生的热不至于影响舱内温度环境, 在发动机与舱体之间安装了隔热屏, 其安装接口设置在对接环下法兰内缘。

小发动机通过支架安装在斜侧板上。管路安装在底板、斜侧板、十字支撑结构上。

着陆器主承力结构通过上述总装适应设计使推进系统总装完成后形成了一个相对独立的整体。

4 结构分析与试验

着陆器结构在方案阶段通过分析来指导主承力结构构形设计, 并初步确定了主承力结构部件的初始设计参数。着陆器结构在方案阶段进行了整器静力试验, 验证了主承力结构在发射工况的承载能力。

在方案分析的基础上, 着陆器结构的初样阶段分析进一步预示了构形细化后的结构刚度指标满足总体要求, 通过静力分析及频率响应分析等手段指导了大设备安装区域的结构局部加强设计。在后续进行的鉴定级整器噪声及振动试验全面验证了结构承载能力。

另外, 在初样阶段通过对局部结构的静力分析, 指导了主缓支撑结构及辅缓支撑结构等局部结构设计, 并通过局部结构静力试验, 验证了相应结构在着陆工况的承载能力。相应局部结构试验方案采用了

图 11 贮箱、气瓶的连接方式示意图

试验预分析的手段确定了试验载荷及试验边界条件。

正样阶段的力学分析根据着陆器正样设计的最终状态, 全面地预示验证了着陆器结构正样最终设计状态在发射、着陆、起吊等工况的设计合理性。

最终正样阶段的整器噪声及振动试验, 验证了整器结构的承受力学环境的能力, 排除了正样的产品材料及制造过程中发生的缺陷。

各项试验前均对试验进行了预示分析, 通过预示分析, 合理地选择了试验工况并简化了相应载荷。

进行了器箭耦合载荷分析, 为正弦振动试验的下凹控制提供了依据。

5 结论

着陆器结构设计采用贮箱并联并直接与对接环连接的安装方案, 满足了 4 个大容量贮箱的安装要求, 在此基准上形成了十字支撑隔板的承载体系, 该构形具有重心低、传力路径短、结构效率高的特点。结构与整器重量比值仅为 5.28%。

采用了梁板复合结构板作为主承力结构, 利用其具备的桁架式的承载特点解决了对接环、贮箱、隔板等主传力路径上的集中大载荷的承载问题; 利用板式结构搭接方便的特点, 显著简化了着陆器结构的部装实现过程, 避免了桁架结构多自由度安装工艺复杂的问题; 同时着陆器结构还具备了与板式结构相同的设备、管路、电缆安装表面。

采用梁板复合结构设计了抗冲击载荷支架, 并

将支架结构板与外挂小舱舱板有机融为一体. 在解决了面外集中载荷在蜂窝板结构上有效扩散. 满足了月球冲击载荷的承载需求.

使用新材料氰酸酯作为碳纤维面板基体, 并应用在主承力结构板上, 获得了比以往碳纤维结构板更高的承载能力.

参考文献

- 1 盛聪, 柴洪友, 高峰, 等. 一种梁板复合结构的设计. 航天器工程, 2009, 18: 62–67

Design and realization of structure subsystem for the Chang'E-3 lunar lander

CHAI HongYou, DENG YuHua & SHENG Cong

Beijing Institute of Spacecraft system Engineering, Beijing 100094, China

A cross shape configuration of primary structure was applied in the Chang'E-3 lunar lander. This kind of configuration has 2 advantages, lower gravity center and shorter loading paths, because all of the heavy propellant tanks take most mass of whole spacecraft mounting on the adapterring. Several combined structures with beam and plate were applied in primary structure members too. By the means of improving structure efficiency, the ratio of mass between the structure and the whole spacecraft was achieved at 5.28%.

Chang'E-3, configuration, cross shape configuration of primary structure, combined structure with beam and plate

doi: 10.1360/092014-45