

快速发射运载火箭测发控方舱列装化设计研究

高飞¹, 徐玮¹, 汪灏², 欧阳李青¹, 徐昕^{1,3}, 王有春¹, 闻新³

(1. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109; 2. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109;

3. 南京航空航天大学 航天学院, 南京 210016)

摘要: 列装化是运载火箭地面装备的重要发展趋势; 作为快速发射运载火箭的典型地面装备, 测发控方舱既要满足性能指标、完成试验任务, 还要考虑指标、接口、性能的统一, 操作简单可靠, 维修保养方便, 具备型号之间通用化程度高, 状态固化等列装化需求; 通过以蓝箭航天 ZQ-2 和 XX-6 运载火箭列装套方舱为研究对象, 对快速发射运载火箭测发控方舱的列装化设计技术开展分析与研究, 从方舱舱体设计、前后端布局设计、舱外布局设计等多方面梳理方舱列装化设计的具体思路, 研究了不同方舱装卸模式的优缺点和适用性, 并根据方舱实际使用环境选择适用于方舱快速机动的装卸设计; 通过对各方面设计要素的总结, 为快速发射运载火箭列装化方舱的工程实践提供技术参考。

关键词: 机动快速发射; 测发控方舱; 列装化设计; 装卸模式; 布局设计

Study on Fitting Out Design of Fast Launch Vehicle Measurement-Launch and Control Shelter

GAO Fei¹, XU Wei¹, WANG Hao², OUYANG Liqing¹, XU Xin^{1,3}, WANG Youchun¹, WEN Xin³

(1. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China;

2. Shanghai Aerospace System Engineering Institute, Shanghai 201109, China;

3. School of Astronautics NUA, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Fitting out designing is an important development trend of launch vehicle ground equipment. As a typical ground equipment of fast launch vehicle, the measurement-launch and control shelter should not only meet the performance indicators and complete the test tasks, but also consider the unity of indicators, interfaces and performance, simple and reliable operation, convenient maintenance and repair, and meet the train loading requirements such as high degree of universality between models and solid state. Taking the ZQ-2 of Landspace Aerospace and XX-6 launch vehicles as the research objects, this paper analyzes and studies the train loading design technology of the measurement-launch and control shelter of the rapid launch vehicle, combs the specific ideas of the train loading design of the shelter from many aspects, such as the shelter body design, front and rear end layout design, and the layout design outside the shelter, and studies the advantages, disadvantages and applicability of different shelter loading and unloading modes. The loading and unloading design suitable for the rapid mobility of the shelter is selected according to the actual use environment of the shelter. Through the summary of various design elements, it provides a technical reference for the engineering practice of the packed shelter of the rapid launch vehicle.

Keywords: fast launch vehicle; measurement-launch and control shelter; fitting out design; loading and unloading modes; layout design

0 引言

装备列装化, 即装备列入用户的装备序列。装备需要充分验证其可靠性和可操作性, 才具备装备用户的条件^[1]。随着我国航天力量建设需求紧迫, 对于运载火箭装备的需求日益旺盛, 尽快列装技术成熟、质量稳定、操作便捷的运载火箭地面装备已是大势所趋^[2]。立足于向使用方提供实用、好用的装备, 同时提高快速发射运载火箭的市场竞争力^[3], 以蓝箭航天 ZQ-2 运载火箭测发控系统方舱、航天八院 XX-6 运载火箭测发控系统方舱为研究对象, 对快速发

射运载火箭测发控方舱的列装化设计技术开展分析与研究。主要分析了快速发射运载火箭测发控方舱列装的设计原则, 介绍了方舱舱体设计和布局设计思路, 分析研究了不同方舱装卸模式的优缺点和适用性。

1 列装化测发控方舱设计原则

1.1 舱体减重和结构设计优化

方舱舱体采用高强度低密度新型材料能有效减少方舱舱体本身的重量, 提高舱体结构各项性能指标。通过优化方舱孔口结构设计改善方舱的抗电磁干扰性能。

收稿日期: 2022-03-02; 修回日期: 2022-03-24。

作者简介: 高飞(1993-), 男, 江苏淮安人, 工学硕士, 助理工程师, 主要从事方舱集成设计方向的研究。

通讯作者: 徐昕(1981-), 男, 江苏南京人, 博士研究生, 研究员, 主要从事飞行器测试与发射控制方向的研究。

引用格式: 高飞, 徐玮, 汪灏, 等. 快速发射运载火箭测发控方舱列装化设计研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(5): 62-68.

1.2 操作便捷舒适,易于维护

测发控方舱的布局安排要合理,需考虑人机交互以及备件存放、运输和搬运的便捷^[4];简化结构件设计,减少设计品种,结构设计实现标准化、系列化、通用化;使用互换性、通用性强的零部件^[5];各种标识尽可能齐全,给用户尽量多的提示等。

1.3 操作工位安排合理,空间利用率高

要按照某种原则进行优化、合理布局舱内设备,优先考虑使用频率较高设备的人机交互性,保证舱内人员具有合适的操作空间^[5]。设备故障需要维护时要留有合理的维护空间^[6]。

1.4 具有良好的自主生存性,无依托能力强

测发控方舱的运输不依赖于吊车、铲车,方舱可通过配置电动或手动自拆卸机构提高方舱的自主生存性和机动性,实现方舱的快速展开、恢复和撤收。

2 方舱舱体设计

方舱采用大板结构形式,由两块侧板、两块端板、一块顶板、一块底板通过包角、角件用铆接和胶接的方法拼接而成。传统的方舱大板内外蒙皮为1.2 mm厚的铝合金板,内有铝合金型材骨架和硬质聚氨酯泡沫材料与骨架蒙皮粘接而成,舱壁厚50 mm。为解决方舱结构强度和重量之间的矛盾,方舱大板采用蜂窝复合材料代替传统的合金骨架和泡沫材料,既能提高结构强度,又可以减轻方舱重量^[7]。蜂窝结构具有隔音隔热、减振、高抗压强度、高比强度以及高比刚度等特点,是优异的轻质高强结构材料。蜂窝状夹芯板如图1所示。

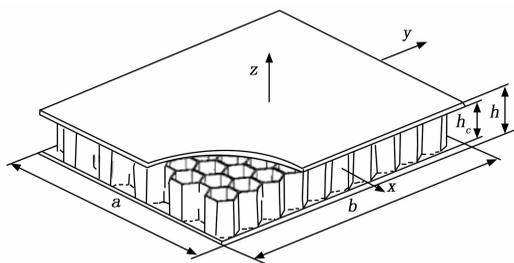


图1 蜂窝状夹芯板

文献[8]研究了不同蜂窝结构对蜂窝纸板力学性能的影响,研究表明,当蜂窝边长一定时,随着蜂窝高度的增加,屈曲强度迅速下降,共振频率先下降后升高;当蜂窝高度一定时,随着蜂窝边长的增加,屈曲强度逐渐下降,但共振频率变化不大,且会在其右侧出现小峰,当蜂窝的边长与高度比在1:1附近时,共振频率最低。

文献[9]中对方舱用蜂窝吸波材料的吸波性能进行了研究,采用聚脲弹性体作为抗冲击层,研究了聚脲厚度与抗冲击性能之间的关系。研究发现在满足抗冲击性能的前提下,对蜂窝材料的单层和双层吸波性能进行了研究。结果表明,0.5 mm厚玻璃钢板喷涂1 mm厚聚脲,可以满足抗冲击要求。研究还发现双层结构吸波材料的吸波性能明显优于单层结构^[10]。

蜂窝复合材料在国外已经作为方舱大板的替代品。目前国内采用蜂窝结构的方舱生产厂家数量不多,预计在不久的将来,蜂窝型方舱将会应用到更多的方舱设计中。

为保证系统在实际工作全过程中各项性能、指标能够正常、稳定、可靠地工作,方舱的电磁屏蔽和电磁兼容设计对舱内设备正常运行也很重要。电磁屏蔽需要解决的问题就是门、窗、孔、口、盖、缝隙等的电气连续性。门与门框周边间隙的调整,实际是在调整门与门框之间的导电材料对门与门框的接触程度。缝隙处增加螺钉或铆钉的数量,缩短缝隙长度,可防止天线效应的产生。其它窗、孔、口、盖电磁屏蔽效能的提高,也是通过安装缝隙的办法来实现^[11]。

目前方舱主要的电磁兼容设计方法有电缆布线和集中屏蔽处理,舱体上窗玻璃选用铅化玻璃,敷设防静电与屏蔽功能地板,使用铜材丝网弹性材料对孔口、缝隙充填处理,对舱体空调口设计专用波导管等^[12]。

3 方舱布局设计

军用车载方舱作为电子设备和操作人员的载体,其结构布局尤为关键。结构布局是个综合性的问题,必须反复比较,找出最佳方案^[13]。要理顺电子设备的关系,使走线距离短、布局合理、散热好、相互干扰小、重心低,就需要合理分配载荷,以满足公路运输要求,便于操作和维修,符合人机工程学要求。

3.1 舱内布局

测发控方舱舱内设备是要按照某种原则进行优化、合理的布局安排,才能达到舱内环境的协调、良好舒适的效果。人机交互最密切的地方应优先布置,尽可能把空间留给操作者及其周边,然后再考虑布置安装设备的机柜,接下来再去考虑辅助设备布置。对于空调器室外机、发电机等噪声源设备应尽可能远离操作区域。

在方舱高度无法改变的现状下,通过合理布局来增加舱内空间感。布置时同排机柜类型、风格尽量相同,尽量避免混装。安装的同排机柜级设备高度和宽度一致,避免产生“豁口”效应。当同排机柜宽度不能相同时,同宽度的机柜尽量紧邻布置或在舱内对称布置。舱内机柜底部设置合适的减震器能有效抑制共振,尤其是高度方向的减振效果最为明显^[14]。

常用的模块化机柜宽度分为19"、24" (面板尺寸482.6 mm、609.6 mm)两个系列;高度分为1 400 mm、1 600 mm、1 800 mm共3个系列;深度为600 mm和800 mm共2个系列,参见表1。

表1 常用模块化机柜系列 mm

宽度系列	高度	宽度	深度
19"	1 400	567.8	600/800
19"	1 600	567.8	600/800
19"	1 800	567.8	600/800
24"	1 400	694.8	600/800
24"	1 600	694.8	600/800
24"	1 800	694.8	600/800

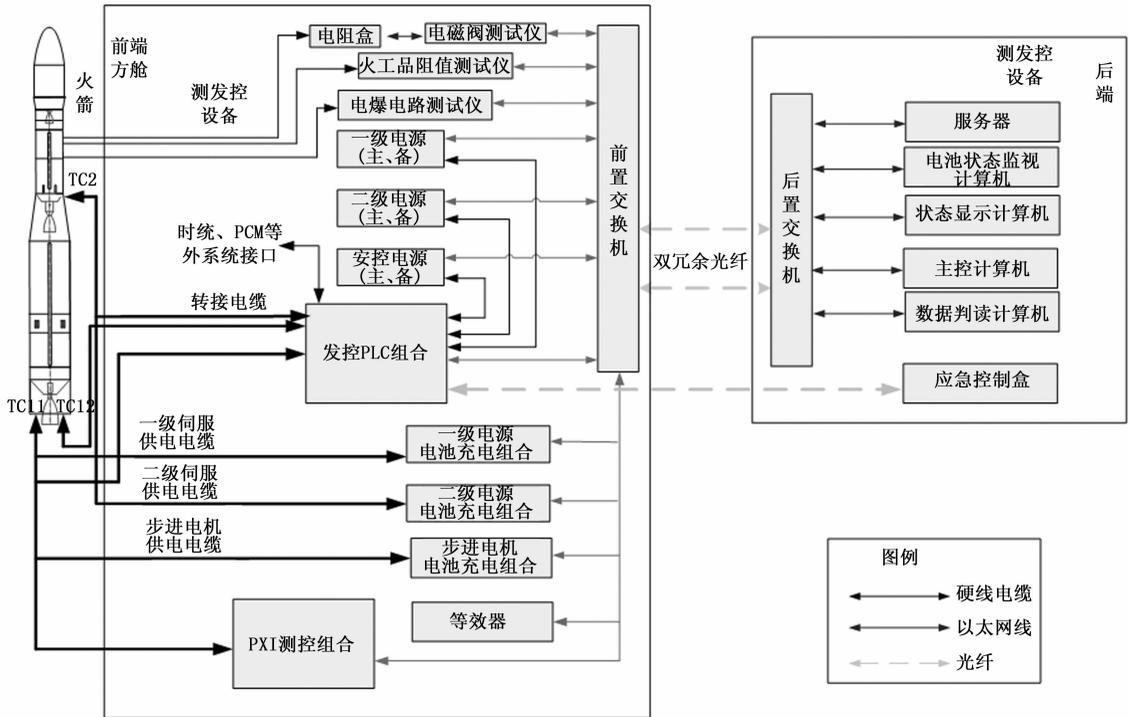


图 2 ZQ-2 测发控系统主要设备连接关系图

由于测发控方舱内安装了较多复杂的电子设备，为了保证其可靠地工作，必须保证方舱内的操作、维修空间。操作者坐姿操作机柜内设备时，需考虑操作者的最佳操控范围。机柜前部应给操作者留出不小于 900 mm 的操作空间，如果身后允许其它人员通过时，则考虑留 400 mm 左右的通行空间。机柜后部的维修空间不应小于 800 mm。

3.1.1 ZQ-2 运载火箭前端方舱舱内布局设计

ZQ-2 运载火箭测发控系统分为前端、后两大部分，前端为测发控系统的执行载体，后端为测发控系统的指挥、判读机构。前后端之间通过光纤连接。前端包括方舱、锂电池智能充放电装置、PXI 测控组合、发控 PLC 组合、前置交换机、安控电源、一级电源、二级电源、等效器、电爆电路测试仪、电磁阀测试仪、火工品阻值测试仪、电阻盒、一套地面电缆网。后端包括应急控制盒、后置交换机、服务器、主控计算机、状态显示计算机、数据判读计算机、电池状态监视计算机等。系统架构及其互联关系如图 2 所示。

ZQ-2 测发控方舱舱内后端可设置最多 4 个高 35 U、深 700 mm、宽 525 mm 的机柜。为便于走线，机柜底部高出舱底 200 mm。机柜顶部设置 1 个摄像头，用于观察机柜内设备运行情况。方舱舱内前端设置设备架 1 件，设备架高 2 000 mm、深 500 mm、宽 2 000 mm。设备架两侧挡板可拆卸，方便架上设备取用。方舱内部布局如图 3 所示。

方舱的顶部设置 LED 照明灯和顶置空调，方舱右侧板居中设置出入口，门上设置应急灯和接地桩，门的左右两侧各设置飞利浦面包机、电源网络插座、通风孔口，门的左侧设置照明开关、风扇开关、空调控制盒等。方舱左侧板设置液晶电视、室内电采暖器、电源网络插座、通风孔



图 3 ZQ-2 测发控方舱内部布局

口、折叠工作台、折叠椅和衣帽钩。

方舱底部装防静电地板，地板上表面距舱底高 150 mm，地板下安装地板架、走线槽、汇流条等，并且在机柜的后部各设置一条明线槽，便于后期走线。舱体的线缆布置上采取强、弱电线电缆分开且分别走入电缆金属线槽内，且进行有效固定，线槽上方加盖金属槽盖，上、下槽连接并接通舱体地端，这样使整个强、弱电线电缆索与外部空间起到了良好屏蔽作用。

3.1.2 XX-6 运载火箭前端方舱舱内布局设计

XX-6 火箭地面测发控方舱由前端方舱、后端方舱二个方舱构成。前端方舱为测发控系统的执行机构，后端方舱为测发控系统的指挥控制机构。火箭在基地执行任务时，前端方舱、后端方舱首先随箭体在技术阵地进行水平测试，测试完毕后，前端方舱随箭体转运至发射阵地前端设备间内，后端方舱转运至发射场后端的指挥场坪，进行临射功能检查和发射工作。系统框图如图 4 所示。

XX-6 运载火箭前端方舱为测发控系统执行机构载体，舱内设置有发控组合、地面电源等设备，具有布局精简的特点，舱内安装全景摄像头，为前端设备无人值守提供支持。方舱内部布局如图 5 所示。

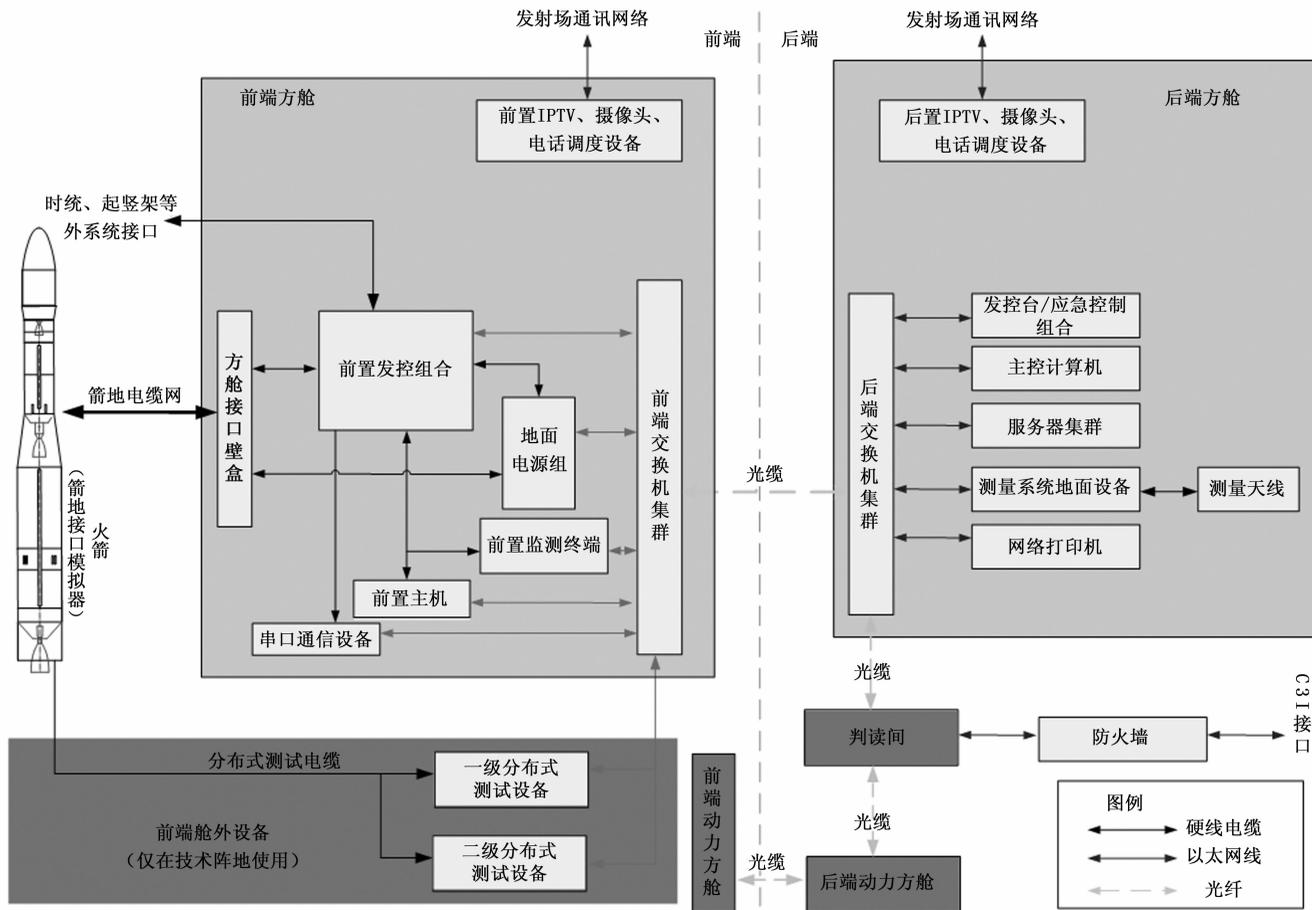


图 4 XX-6 运载火箭地面测发控方舱框图



图 5 XX-6 运载火箭测发控前舱内部布局

前端方舱前部为 4 个功能机柜, 后部为中频主机、副机柜与货架。机柜后部为维修区域, 在方舱运输时可以作为备护件存放区, 存放的包装箱通过舱底设置的拉绳环

固定, 货架一侧开门为双开门, 机柜维护区一侧开门为单开门, 在便于物品进出的同时最大程度保证方舱结构的稳定性。

方舱中部为操作区, 舱内安装一台显示屏, 用于显示 IPTV。测发控系统对箭电缆从方舱右上部的壁盒孔口引出, 前端方舱的供电、网络光纤通讯从方舱右下部的壁盒孔口引出。舱内侧壁绑扎折叠椅, IPTV 屏下设置有一个翻转台板, 用于前舱人员会议、设备应急维修, 台板下方设置有防水壁盒孔口, 用于连接外部天线。在方舱运输时, 操作区的空间同样可作为设备存放区域, 地板上设置有拉绳环, 方舱进门采用双开大门形式, 便于设备的搬入搬出。

整个前舱用于存放设备的空间较多, 包括双层货架、前后维护区、中部操作区等, 可放置等效器、分布式测试设备、电缆网、工具、备护件等。设备和电缆在转运期间均以铝合金包装箱的形式存放于方舱内, 使用时从舱内搬出。

前端电气方舱安装军用顶置空调, 通过风道设计保证对直流电源、中频电源等需要散热的设备进行降温。舱顶设置 360°旋转高清摄像头, 监控人员可以实时无死角的对舱内设备工作状态进行观察, 为前端设备无人值守提供支持。

3.1.3 XX-6 运载火箭后端方舱舱内布局设计

后端方舱为测发控指挥、判读机构、遥测地面设备的载体。后端方舱舱内设有显示发射控制台、电气操作工位、测量操作工位等,考虑到后舱内人员操作舒适度,方舱采用可扩展形式,扩展方舱在收拢状态下为标准 CAF90 尺寸,展开后内部面积可从 18 m^2 扩展到约 27 m^2 ,可以保证舱内 14 名岗位人员就坐的情况下操作空间充裕、人员可以较为自由的进出。方舱的扩展机构采用 UPS 供电,在不外接电源的情况下,可以保证后舱展开、收拢。方舱收拢状态和展开状态如图 6 所示。



(a) 方舱收拢状态



(b) 方舱展开状态

图 6 方舱收拢状态和展开状态

舱前侧设置 70 寸显示器,用于显示测试流程、箭上关键参数信息状态、IPTV 等,显示内容切换由指挥岗位控制。大屏幕显示器下方为暗藏式双开门,内部小隔间可放置服务器集群、UPS、配电箱等设备,隔间采用静音材质和内耗因子较大的隔音涂料^[15],确保设备运行时的噪音不会进入工作间。隔间后部设置维护门,整个后舱的加电控制在隔间维护区内操作,可避免误动作。维护区内还设置有货架,在后端方舱转运时可作为备护件存放区。方舱透视图如图 7 所示。



图 7 方舱透视图

扩展舱角落放置矮机柜,用于收纳图纸、资料,机柜上方放置打印机、饮水机。方舱后部设置有机柜和小工作桌,用于测量系统地面设备操作。同样采用后维护方式,设备在方舱运输时放置在维护区内。维护区舱壁设置有防雨孔口,用于连接测量地面设备与舱外的设备和天线。

由于后端方舱舱顶已经安装天线,无空间安装顶置空调,因此后端方舱采用分体式空调,外机放置于测量设备机柜维护门之外。为保证设备的散热良好,单台方舱设置两台空调。舱内设置踢脚线式加热带,配合方舱空调,可确保舱内温度快速提升,保证人员、设备工作在良好的温度环境中。

方舱底部安装防静电地板,地板上表面距舱底高 150 mm,地板下安装地板架、走线槽、汇流条等,机柜的后部设置了一条明线槽,便于后期增加线缆走线。舱体的线缆布置上采取强、弱电线缆分开且分别走入电缆金属线槽内,并进行有效固定,线槽上方加盖金属槽盖,上、下槽连接并接通舱体地端,这样使整个强、弱电线缆索与外部空间起到了良好屏蔽作用,同时有效固定了电缆缆索^[16]。

3.2 舱外布局

XX-6 运载火箭测发控方舱外观喷涂根据基地自然环境条件,采用北方绿色数码迷彩。方舱运输车可统一采用使用地广泛配置的品牌,便于使用方统一保养维修。前端电气方舱和后端可扩展电气方舱外形如图 8 所示。



(a) 前端方舱

(b) 后端方舱

图 8 前、后端电气方舱外形图

方舱舱外一般布置空调外机、工具箱(系吊组件)、登舱梯、通风窗口、转接窗口、升降结构、滑橇、方舱调平机构、天线等物件。后舱顶部安装遥测天线和转台,设备恢复时,抬起天线抛物面,竖起天线架,抛物面安装在天线支架上^[17]。

4 机动性设计

传统的军用车载方舱与载车的装卸、方舱在阵地上或库房内短距离的移动都需要使用吊车等设备,增加了军用装备的配套设备数量。近几年,根据型号方舱列装化的需要,进一步发展了方舱的机动能力^[18]。为了提高方舱的机动性,在方舱设计时对装载方舱的载车平台进行改进,设计了各式各样的自装卸机构,如随车吊装结构、升降结构、半吊装拖动结构等。

4.1 吊装结构

吊装结构是指方舱装卸作业的过程中采用吊装的方式移动方舱,如图 9 所示。载车的结构特点是在装载平台前、后端各安装一台可侧向伸展的随车吊,装卸时通过链条吊

装方舱前、后端的下包角, 将方舱整体吊起, 在载车侧面实现方舱装卸。装卸时需要载车在侧向具有很好的支撑稳定性, 载车还需要配置大跨距的侧向支撑装置。



图 9 随车吊装结构

随车吊装结构的优点是载车既可以自装卸, 又可以为其其他载车装卸。该结构适用于方舱成组运输, 方舱成组运输时只需配一台随车吊装结构载车, 其他载车可不具备装卸能力。

随车吊装结构要求载车平台具有极好的刚度条件, 同时配备两台随车吊和侧向支撑装置, 导致载车重量太大, 降低了车辆运输的有效载荷能力。方舱装卸作业时吊装点位于舱体的前后两端, 要求舱体在前后两端不允许有凸出的附加物。若方舱配置空调机安装在舱外前端或后端或在舱外安装天线杆等附属物, 则不适合使用随车吊装结构载车。

4.2 升降结构

当受各种环境限制且无法采用吊车或铲车对方舱进行起吊, 方舱升降结构可以方便地把方舱从载车上装卸, 使得方舱摆脱了吊车或铲车配套使用的限制, 在场地狭小, 吊车、铲车无法开进的情况下, 升降结构是一个必不可少的装卸工具, 因此升降结构大大地提高了测发控方舱的机动性和适应性, 但为保证安装在车厢内的设备正常工作, 需配置支撑调平系统。调平系统可用于车厢的支撑并自动调整至一定的水平精度, 升降结构如图 10 所示。

升降结构采用独特的梯形丝杆机械传动方式, 经过优化设计, 具有结构轻巧省力, 安装简单, 使用可靠, 维护简便, 外形美观等特点, 而且由于采用了自锁型丝杆传动, 故可在任意位置自锁工作。该机构利用角件孔、支座等构件可与方舱构成了一个稳固的结构, 稳定性好。球型底盘在使用中允许方舱具有一定的倾斜能力 (1.5°), 在野外地面环境下亦可以正常工作。工作时手动将升降结构旋转至工作位置并固定后, 方可进行升降工作, 整套机构操作简单、方便。

升降结构可根据方舱的重量进行选型, 电动模式是通过按动线控盒上的按钮来实现, 线控盒配备连接电缆, 操作者可根据现场状况选择操作位置, 并保证操作时能观测到整个系统的动作情况。当系统断电或其他紧急情况需要使用升降系统动作时, 可进行手动操作。电动/手动一体化升降机构实物如下图 11 所示。

目前, 国内外生产方舱升降行走机构的结构形式主要有二种: 1) 升降装置和行走轮是分离的; 2) 升降装置和

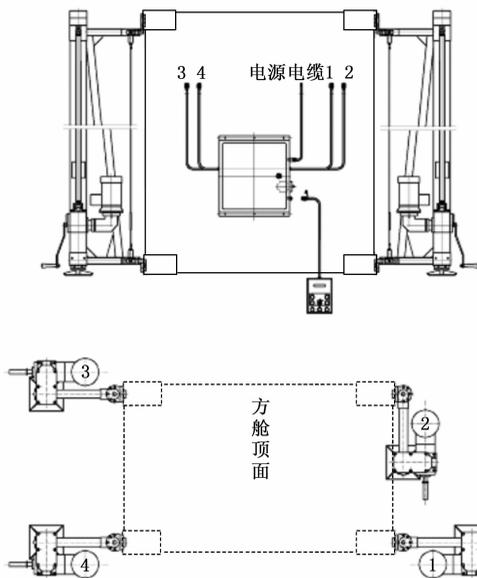


图 10 升降结构的外形尺寸和安装尺寸



图 11 测发控系统方舱升降结构实物图

行走轮是一体化的。分离式结构的升降行走机构把升降装置装在方舱角件的侧面, 行走轮装在方舱角件的下面, 具有设备自重较轻, 安装操作较方便等优点。一体化结构的升降行走机构把升降装置和行走轮合为一体, 直接装在方舱的角件的侧面, 优点是安装工作量大、时间短, 不需再开辟运输时的放置空间, 升降和行走操作简便^[19]。一体式升降结构示意图如图 12 所示。

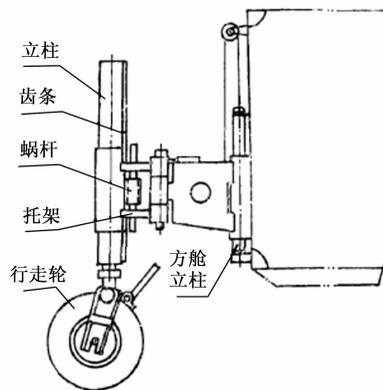


图 12 一体式升降结构示意图

4.3 半吊装拖动结构

半吊装拖动结构是指方舱在装卸过程中将方舱前部吊

离地面,方舱后部以拖动方式随动^[20]。半吊装拖动结构可分为龙门架式和托盘式,如图 13 所示。龙门架式装卸结构需在方舱前部安装一个龙门式吊架,载车上需装备一个可伸缩倾转的 L 形拉臂。装卸开始时拉臂处于收缩状态,拉臂通过钩住龙门架倾转将方舱前部抬起,搭到载车后部,然后吊钩反向倾转将方舱拖上载车,最后拉臂将方舱拖到固定位置。托盘式结构是先将方舱固定在托盘上,通过吊装托盘前端吊架进行装卸,吊装过程与龙门架式基本一致。



(a) 龙门架式机构

(b) 托盘式机构

图 13 半吊装拖动结构

半吊装拖动结构载车装卸时对拉臂钩与吊装点的对接要求较高,优点是卸载速度快,单人即可完成装卸。装卸时吊起方舱前部,舱体尾部接触地面时,前部舱底已搭上车平台,此时需保证装卸倾角不能太大,一般不超过 30° ,否则会对方舱内装设备产生不利影响,半吊装拖动结构适用于长度尺寸较大的方舱。

龙门架式结构载车通用性差,运输时依靠锁紧机构锁定方舱滑橇的特定开口部位,需要方舱滑橇作特殊设计以适应该特定结构。载车只能装卸特定结构方舱,而无法装卸普通结构方舱。方舱通常通过固定包角的方式运输,龙门架式锁紧机构锁定方舱滑橇特定开口部位,不符合方舱承载结构预设的受力状态,会缩短方舱的使用寿命。

托盘式结构在龙门架式基础上加装了托盘,解决了方舱装卸锁固不合理的问题,但托盘质量较大,限制了载车装载能力,同时还增加了制造成本,通用性较差。为了保证具备随时装卸能力,托盘需固定在方舱下面,无托盘的普通方舱则无法装卸。

根据 XX-6 运载火箭测发控系统在靶场的实际使用环境看,无论在技术阵地还是发射阵地,方舱落地使用更有利于设备使用和人员进出,也有利于厂房内卫生状态的控制。

ZQ-2 测发控方舱和 XX-6 运载火箭第二批方舱配置电动升降结构,可方便地把方舱从载车上装卸,使得方舱摆脱了吊车配套使用的限制,在场地狭小,吊车无法开进的情况下,升降结构是一个必不可少的装卸工具,因此升降结构大大地提高了方舱的机动性和适应性。

5 结束语

本文提出了快速发射运载火箭测发控方舱列装化设计思路。首先从测发控方舱舱体设计入手,介绍了蜂窝结构应用于测发控方舱时的优势以及方舱的电磁屏蔽和电磁兼容设计思路;接着介绍了舱内外布局原则,方舱布局和装饰要合理,便于操作和维修,符合人机工程学要求等^[21];最后对比分析了不同装卸结构对方舱机动性的影响,采用

电动升降结构的方舱装卸机动性更好。通过以上一系列的设计和实现,可极大提高方舱的各项性能、指标和功能。以上设计思路已经在蓝箭航天 ZQ-2 运载火箭测发控方舱、航天八院 XX-6 运载火箭测发控方舱中得到工程应用,取得了良好的效果。

参考文献:

- [1] 蔡远文,王 华,彭明伟. 测试发射技术及其在军事航天中的应用与发展 [J]. 航天控制, 2003 (1): 59-64.
- [2] 张卫东,梁建国,陈 健,等. 快速发射运载火箭发展及展望 [C] // 中国宇航学会运载专业委员会 2012 年科技年会论文集, 2012, 8.
- [3] 徐 昕,高 飞,韩秀丽,等. 快速机动发射运载火箭测发控系统的设计分析与展望 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (10): 120-124.
- [4] 徐 昕,徐 玮,于大海,等. 快速机动测发控技术在智慧火箭中的应用 [J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 9: 6-11.
- [5] 张学英,易 航,汪 洋,等. 运载火箭测发控系统通用化设计 [J]. 导弹与航天运载技术, 2012 (4): 15-19.
- [6] 任月慧,张宏德,彭 越,等. 运载火箭测发控技术未来发展与展望 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (6): 1-4.
- [7] 刘跃军,江太君,曾广胜,等. 不同蜂窝结构对蜂窝纸板力学性能的影响 [J]. 包装学报, 2010, 2 (1): 21-23.
- [8] 金志强. 蜂窝夹芯减振板结构参数优化设计 [D]. 沈阳: 东北大学, 2007.
- [9] 刘文言,信云鹏,吴文桢. 方舱用蜂窝吸波材料的吸波性能研究 [J]. 安全与电磁兼容, 2016 (6): 51-53.
- [10] 袁企乡,徐 昕. 测发控系统方舱结构研究 [J]. 计算机测量与控制. 2016, 24 (2): 190-192, 194.
- [11] 崔麦苗,鲁锋涛,何天洋,等. 电磁屏蔽方舱的设计 [J]. 装备制造技术, 2017 (1): 64-66.
- [12] 袁企乡,李国民,花伟峰,等. 方舱电磁兼容技术研究与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (4): 265-267.
- [13] 杨会越. 雷达方舱的布局设计探讨 [J]. 电子机械工程, 2008, 24 (6): 14-17.
- [14] 潘玉竹,贾学军,张国栋,等. 运载火箭前端测控设备减振隔噪技术研究 [J]. 噪声与振动控制, 2019, 39 (3): 118-121.
- [15] 刘贻芳. 指挥控制系统方舱噪声分析及降噪设计 [J]. 企业技术开发, 2017, 36 (10): 42-44.
- [16] 孙长胜,赵宏旭,王家林. 飞机电缆屏蔽层接地可靠性测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (9): 8-11.
- [17] 霍建华,刘 丹. 双波段遥测天线设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (8): 159-161, 182.
- [18] 袁企乡,王海奇,向 军,等. 集成智能化测试系统技术研究应用 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (4): 48-50.
- [19] 黄 亚. 标准通用方舱升降行走机构结构分析 [J]. 电子机械工程, 2010, 26 (6): 9-10.
- [20] 王 健,付 群. 国内方舱自装卸运载车结构的分类和比较分析 [J]. 专用汽车, 2010 (5): 52-54.
- [21] 张晨光,杨 华,杨 军. 运载火箭新型地面测试发控系统构想 [J]. 宇航学报, 2005, 26 (3): 249-252.