文章编号：1006-1355(2019)03-0118-04

运载火箭前端测控设备减振隔噪技术研究

潘玉竹[1]，贾学军[1]，张国栋[1]，范 虹[1]，郭金刚[2]

（1. 北京航天发射技术研究所，北京 100076； 2. 北京宇航系统工程研究所，北京 100076）

摘 要：为适应新一代运载火箭“三垂”的测发模式，前端测控设备被置于发射平台台体内部房间。在火箭起飞阶段，发射平台内部的这些测控设备需要承受严酷的振动、噪声环境。为保证测控设备在发射过程中能够正常工作，提出一种减振、隔噪的设计思路，通过型号飞行任务证明这种设计方法减振、隔噪效果的有效性。

关键词：振动与波；运载火箭，减振，隔噪，前端设备

中图分类号：TJ7；TB535+.1；TU112.3 **文献标志码**：A **DOI编码**：10.3969/j.issn.1006-1355.2019.03.023

Study on the Vibration Absorption and Noise Insulation of Measurement and Control Equipment of Launch Vehicles

PAN Yuzhu[1], *JIA Xuejun*[1], *ZHANG Guodong*[1], *FAN Hong*[1], *GUO Jingang*[2]

（1. Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing 100076, China;
2. Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076, China）

Abstract : To adapt for the three-verticalness mode of the new-generation launch vehicles, the front measurement and control equipment is put in the launch pad. In the takeoff stage of the launch vehicle, the equipment needs to bear crucial vibration and noise environment. To make sure that this equipment can work normally during the launch process, an idea of vibration absorption and noise insulation is presented for design. The validity and efficiency of the design idea in vibration absorption and noise insulation is verified by means of the prototype test in a flying mission.

Keywords : vibration and wave; launch vehicle; vibration absorption; noise insulation; front equipment

为提升我国航天运载能力而研制的新一代运载火箭，采用了“三垂”的测试发射模式，火箭在技术厂房完成垂直组装、垂直测试之后，借助可移动的发射平台，整体垂直运输至发射阵地，在运输过程中火箭与地面设备连接状态保持不变，到达发射区后经过简单的测试检查后即可进行加注、发射。为了适应新一代运载火箭的这种测发流程，将测量系统、控制系统、动力系统和发射平台自身电气、液压、驱动控制等各种前端测控设备，集成在发射平台台体内部的工作间。发射平台台体共设有4个前端设备工作间，分别分布在台体上表面的4个角。

火箭发射过程中，发动机喷射出高温高速燃气流，使发射平台处于一定量级的振动及噪声环境中，会给这些前端设备带来不利影响。为确保工作间内部的设备在火箭发射时能够正常工作，需要采取有效的减振、降噪技术手段，改善工作间内部环境。

1 减振隔噪性能的设计方法

影响振动与噪声环境的主要因素是火箭发射时的噪声和发射平台振动，根据振动和噪声机理以及实际工况分析，工作间采用整体隔噪、个体减振的方案，如图1所示，减振隔噪总体方案为：

1）发射平台台体采用封闭的钢结构，以保护前端设备工作间并起到一定的隔噪作用；

2）在发射平台台体内部布置整体隔噪工作间，前端设备放置在工作间内，控制室内的噪声环境，有效降低噪声强度，避免强噪声引起前端设备振动；

3）每台前端设备底部安装独立的减振平台，衰减火箭发射时发射平台振动带给前端设备的影响。

收稿日期：2018-07-14

作者简介：潘玉竹（1985-），女，湖北省襄阳市人，博士，主要研究方向为发射装置减震技术研究。
E-mail: 279353561@qq.com

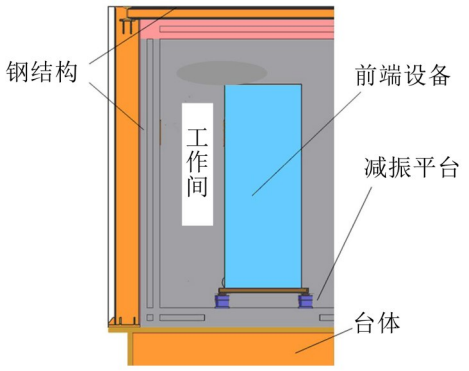


图1 减振隔噪总体方案

1.1 前端设备间的隔噪设计

前端设备间的隔噪功能是通过发射平台台体封闭的钢结构和其内部专业的隔噪工作间实现的。

钢结构是发射平台上层台体的一部分，在钢架结构框架周围用3 mm厚的钢板形成封闭空间，作为隔离噪声的第一道屏障，有效隔离火箭发射过程中的部分噪声，同时能够阻挡燃气流的冲刷，保证内部工作间热环境。

隔噪工作间由吸隔声墙体、隔声地板及自身的骨架组成，如图2所示。

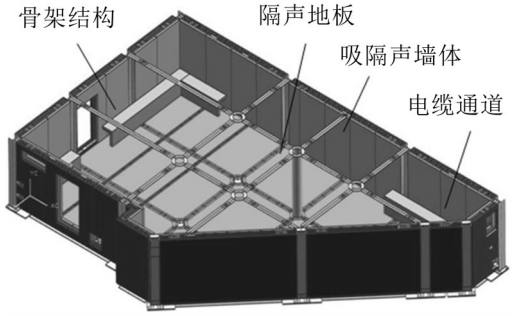


图2 隔噪设计

其中，骨架结构主要由地板主梁、地板次梁、屋顶主梁、屋顶次梁和立柱组成；吸隔声墙体是由多块三层复合隔声结构依附骨架结构拼接而成；隔声地板由两层复合隔声结构依附骨架结构拼接而成。根据前端设备的安装位置，对地板局部骨架结构进行加强，并预埋螺栓以便安装减振平台，地板铺设防静电防滑板。

隔声工作间内设计有电缆通道，在所有通道进出位置设置有消声筒（图3），消声筒设计长度与弯曲形状根据通道位置、功能和尺寸来设计。

在所有通道外安装隔声弹性密封套，同时考虑耐高温、耐腐蚀性，密封套采用高分子阻燃的聚氨酯材料。

为满足声学要求，防止孔洞和缝隙透声，采用双层双密封隔声门，且在门与门框的碰头缝处采用海绵乳胶条密封。隔噪工作间顶部设计为可拆卸的结构，便于设备吊装，吊装口四周边框作吸声处理，防止漏声。隔声间的各种管线通过墙体需打孔时，在孔洞周围用柔软材料包扎封紧。隔声间的通风换气口装有消声装置。

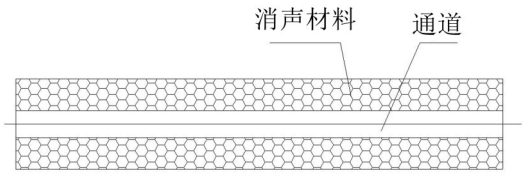


图3 消声筒结构示意图

1.2 前端设备间的减振设计

发射平台前端设备减振采用被动减振措施，如图4所示。

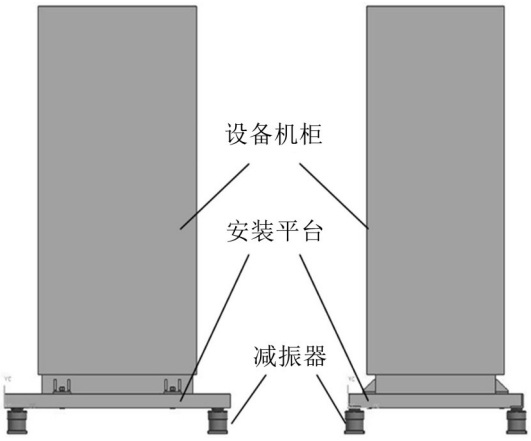


图4 减振设计

为了减少外来振动对前端设备的影响，在振源和前端设备之间加隔振器件，减小振动的输入。发射平台前端设备种类、数量繁多，不同前端设备的固有频率、允许的振动量级等特性存在差别，因此采取对每台设备单独进行减振。

根据每台前端设备的重量、尺寸、质心位置、固有频率等参数，选取合适的减振器进行模块化减振平台设计。减振平台主要由1个安装平台和4个底部减振器组成。安装平台主要由角钢焊接而成，安装平台上表面通过螺栓与前端设备固连，安装平台下表面四角位置通过螺栓与减振器固连。同时在满足减振要求情况下，减振器选型规格应尽量少，且同种规格减振器可以进行互换。

2 减振隔噪性能的计算方法

2.1 隔噪工作间隔声量计算

隔噪工作间的实际隔声量由隔声板、隔声门、隔声窗户、缝隙等多个因素的隔声量综合决定。隔声板的隔声结构组成为：3 mm钢板、60 mm硅酸铝棉、

2 mm钢板、80 mm硅酸铝棉、1.5 mm钢板、60 mm玻璃棉、1 mm钢板。根据隔声质量定律[1]，可以计算出这种结构隔声板对500 Hz声波的隔声量为40.1 dB。根据经验，计权隔声量和500 Hz的隔声量大致相等，因此该结构的计权隔声量为40.1 dB。另外，3块钢板中共夹杂两块硅酸铝棉吸声材料，根据经验和相同材料的现场实测结果，60 mm厚硅酸铝棉产生的附加隔声量约为8 dB，80 mm厚的硅酸铝棉产生的附加隔声量约为10 dB。综合上述，三层复合隔声板的理论隔声量为58.1 dB。

隔噪工作间理论综合隔声量[2]为

$$R_{理}=10\lg\frac{\sum S_i}{\sum 10^{-\frac{R_i}{10}}S_i} \tag{1}$$

根据上式，计算得到隔噪工作间的综合理论隔声量为56.5 dB。

考虑到内部混响对隔声量的影响，隔声工作间的综合实际隔声量为

$$R_{实}=R_{理}+10\lg\alpha \tag{2}$$

其中：α为隔声结构内表面的平均吸声系数。

隔声结构中玻璃棉主要起吸声作用，60 mm玻璃棉在500 Hz倍频程中心频率处的平均吸声系数约为0.75[3]，因此隔声工作间的实际隔声量为55.3 dB。

2.2 减振器的隔振效果计算

每个前端设备底部安装有4个隔振器，在隔振器选型时可将减振系统简化成一个单自由度体系，选型步骤如下：

1）根据隔振效率β的要求，计算振动传递率η、隔振器的垂直刚度k_z

$$\eta=1-\beta\ k_z=\frac{\omega^2 m}{\frac{1}{\eta}+1} \tag{3}$$

2）计算需要隔振的前端设备重量W；

3）每个设备采用四点支承，计算每个隔振器应满足的刚度和应承受的载荷

$$k_{z0}=\frac{k_z}{4}\ W_0=\frac{W}{4} \tag{4}$$

4）根据刚度和载荷计算结果以及允许安装空间大小，选择合适型号的隔振器。

根据上述计算，所有前端设备均采用无谐振峰减振器进行隔振，它是一种在规定的振动量级下无共振放大并可在冲击（功能性冲击和坠撞安全冲击）、碰撞（颠振）、摇摆横加速度、声振和强冲击等综合力学环境下对电子设备进行有效保护的新型隔振器，在强冲击下环境下能有效抑制共振，有效隔离连续冲击，自身无有害的永久变形，主要动态特性指标无明显下降[4–5]。

3 减振隔噪性能的验证方法

3.1 隔噪性能验证

在某运载火箭型号某次飞行试验任务中，通过在前端设备工作间内、外布置噪声传感器，验证工作间的隔噪效果。表1为前端设备间噪声瞬态声压级测试数据。

表1 前端设备间内外噪声测试数据/dB

中心频率/Hz	实测外噪声环境	实测内噪声环境
31.5	155.8	119.2
63	164.7	128.0
125	166.6	125.8
250	165.7	117.2
500	166.9	112.0
1 000	165.2	108.5
2 000	162.5	105.2
4 000	157.5	102.3
8 000	149.7	99.4

总声压级计算公式

$$L=10\lg\left(10^{\frac{L_1}{10}}+10^{\frac{L_2}{10}}+\cdots+10^{\frac{L_3}{10}}\right) \tag{5}$$

其中：L为总声压级，单位dB；$L1$、$L2$、…、$L9$为各中心频率下的声压，单位dB。

根据上式可计算出前端设备间内、外总声压级分别为173.5 dB、130.7 dB。因此，前置设备间的实际降噪效果约42.8 dB。与理论计算的隔声量55.3 dB相比，偏小22.6 %。造成这种误差的原因，主要是设备间外部噪声测点位置的选取，导致未能获得外部噪声峰值数据。在后续型号飞行试验中，应适当增加测点数量，并将设备间外部噪声测点布置在理论预测噪声最大位置。

3.2 减振性能验证

在某运载火箭型号某次飞行试验任务中，选取前端设备间内部4个机柜测量了减振前后的高频振动、低频振动。减振前测点安装在机柜减振器与地面连接的转接板上，减振后测点安装在经减振器减振后的机柜上，如图5所示。



图5 振动测点安装照片

参试机柜减振前后的高频振动均方根（RMS）如表2所示。

表 2 机柜减振前后RMS值

机柜编号	测点方向	减振前	减振后
机柜1	*X*	1.43	0.34
	Y	0.50	0.31
	Z	0.43	0.25
机柜2	*X*	1.72	0.40
	Y	0.55	0.24
	Z	0.64	0.19
机柜3	*X*	4.12	0.63
	Y	1.11	0.33
	Z	0.86	0.30
机柜4	*X*	1.21	0.30
	Y	0.43	0.26
	Z	0.45	0.25

从表中可以看出，*X*向减振效果最明显，减振后的RMS值约是减振前的25 %；*Y*、*Z*向也有明显的减振效果，减振后的RMS值约是减振前的50 %。验证了减振器对机柜的减振效果明显。

4 结 语

前端设备间通过发射平台封闭钢结构和其内部专业的减振隔噪工作间实现隔噪功能，在噪声的传播途径上采取控制措施，综合运用了隔声技术、吸声技术、消声技术。前端设备减振采用被动减振措施，在每台设备底部安装独立的减振平台，衰减火箭发射时发射平台振动带来影响。这种减振、隔噪的设计过程、计算思路及试验方法，为后续同类型结构产品的研制、生产及试验提供帮助和借鉴。

参考文献：

[1] 马大猷. 噪声与振动控制工程手册[M]. 北京：机械工业出版社，2002.

[2] 盛美萍，王敏庆，孙进才. 噪声与振动控制技术基础[M]. 北京：科学出版社，2007.

[3] 吕玉恒，王庭佛. 噪声与振动控制设备及材料选用手册[M]. 北京：机械工业出版社，1999.

[4] 骆号，陈建松，颜肖龙. GWF型隔振器性能分析与实验验证[J]. **噪声与振动控制**，2012，32(4)：178-182.

[5] 蒋美华，苏俊刚，陈欣，等. 钢丝绳隔振器减振性能分析与试验验证[J]. **军事交通学院学报**，2013，15(9)：57-60.

（上接第117页）

(3) 根据低频段冲击响应理论解法，提出通过舱段冲击环境来预报整船响应的组合方法，并将该方法所得结果与舱段和整船的冲击环境进行对比，发现具有较好的拟合精度，证明了该方法的可信度以及在工程应用中的可行性；

(4) 本文提出的冲击环境预报方法适用于包括水面舰船和水下圆柱壳的细长体结构。当所选舱段位于船中时，预报效果较好，舱段位于船首或船尾时，效果有所下降。

参考文献：

[1] GREENHORN J. The assessment of surface ship vulnerability to underwater attack[R]. Transaction of the royal institution of naval architects, 1989.

[2] 钱安其，嵇春艳，王自力. 水下爆炸荷载作用下水面舰船设备冲击环境预报方法研究[J]. **舰船科学技术**，2006，28（4）：43-47.

[3] 冯麟涵，姚熊亮，汪玉，等. 基于本征函数的舰船冲击环境工程化预报方法[J]. **中国造船**. 2010，51(3)：65-76.

[4] 崔杰，李烨，陈莹玉，等. 舰船全船冲击环境数值预报方法研究[J]. **振动与冲击**，2015，34(17)：88-93.

[5] 陈崧，王军，郭君. 水下爆炸冲击波作用下船体舱段刚体运动试验研究[J]. **船海工程**，2014，43(2)：27-34.

[6] NAVSEA 0908-LP-000-3010, Rev. 1. Shock design criteria for surface ships. Naval Sea Systems Command, Sep. 1998.

[7] NORDEN E HUANG, SHEN ZHENG, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[C]. Proceedings of the Royal Society, 1998, 454(1971): 903-995.

[8] 邓拥军，王伟. EMD方法及Hilbert变换中边界问题的处理[J]. **科学通报**，2011，46(3)：257-263.

[9] 郭建军. 船体水下爆炸冲击动弯矩理论与试验研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2016：21-27.