文章编号：1006-1355(2015)03-0186-03+203

水下爆炸作用下多层隔振系统动态特性分析

高浩鹏[1]，黄映云[2]，金 辉[1]，张姝红[1]

（1. 中国人民解放军91439部队，辽宁 大连 116041；
2. 海军工程大学 动力工程学院，武汉 430033）

摘 要：设计一种多层隔振系统用于水下爆炸试验时对电测设备的抗水下爆炸冲击防护。基于大质量法，依据计算多体动力学理论，构建空气弹簧与钢丝绳隔振器相结合的多层隔振系统的抗冲击动力学分析模型，并进行动态特性分析。结果表明设计的多层隔振系统在水下接触和近场爆炸条件下工作正常，满足试验需求；多层隔振系统对冲击载荷的缓冲效率较高，但在设计时要重点考虑系统的稳定性。

关键词：振动与波；多层隔振；钢丝绳隔振器；空气弹簧；水下爆炸

中图分类号：O38 **文献标示码：**A DOI编码：10.3969/j.issn.1006-1335.2015.03.040

Dynamic Analysis of Multi-layered Isolation System Subjected to Underwater Explosion

GAO Hao-peng[1], *HUANG Ying-yun*[2], *JIN Hui*[1], *ZHANG Shu-hong*[1]

（1. 91439 Unit, Dalian 116041, Liaoning China;
2. College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China）

Abstract : A multi-layered isolation system was designed for anti-shock protection of a electrical measurement system in underwater explosion test. Based on the large mass method and multi-body dynamic theory, the anti-shock model for dynamic analysis of multi-layered isolation system including an air spring and a wire rope isolator was built, and its dynamic characteristics were analyzed. The result shows that the multi-layered isolation system works normally in the underwater-contact and near-field explosion conditions. Its performance satisfies the needs of the test. The multi-layered isolation system has high cushioning efficiency for impact loads, but the system stability must be considered in the design.

Key words : vibration and wave ; multi-layered isolation ; wire rope isolator ; air spring ; underwater explosion

目前，通过加速度、应变、自由场压力、壁压等参数对水下爆炸作用下舰船毁伤、水中兵器战斗部爆炸威力、舰船冲击环境等评估是一种常用的方法[1]；其中加速度传感器及应变片主要布设于被试船及其设备上，自由场压力及壁压传感器主要布设于水中相应位置。根据这些测量参数的特点以及水下爆炸试验的实际工况，被试船或测量载体一般离爆源较近。电测系统作为一种常用的水下爆炸测量设备，在试验时一般安装于被试船或测量载体上；电测系统的核心部分主要由电子元器件组成，在接触或近距离水下爆炸时，其直接抗冲击性能较差，一般都是通过隔振系统对其进行防护，进而实现对特征参数的有效采集[2]。为了在水下接触和近场爆炸作用下实现电测系统的可靠工作，本文设计了一种多层隔振系统用于对电测设备的抗冲击防护，并对隔振系统的动态特性进行分析。

1 多层隔振系统设计

水下接触和近场爆炸作用下，安装于被试船或测量载体上的电测设备间接承受冲击波和气泡脉动两种载荷的作用。水下爆炸时冲击波的特点是：同等条件下初始压力比空气中大得多、爆源附近冲击波传播速度为音速的数倍、冲击波频率成分较为复

收稿日期：2014－10－09
基金项目：十二五国防预研项目(4010304030202)
作者简介：高浩鹏（1986－），男，陕西杨凌人，博士，工程师，主要研究方向：水下爆炸。
E-mail: gaohaopeng@126.com

杂等[3]。气泡脉动能量虽然小于冲击波能量，但是其脉动频率较低，容易与船体的低阶模态以及隔振系统发生共振，进而影响船体总纵强度及隔振系统工作的可靠性[4]。根据这些水下爆炸载荷的特点，本文设计了空气弹簧及钢丝绳隔器相结合的多层隔振系统。

1.1 空气弹簧隔振系统设计

空气弹簧隔振系统设计为三层，每个空气弹簧空载时外径为800 mm，高度为300 mm，空气弹簧之间使用多层六角钢板固定连接，其中每两个空气弹簧之间的六角钢板质量为45 kg，钢丝绳隔振器安装底板质量为80 kg，结构安装方式如图1所示。根据需隔振电测设备的质量及六角钢板的自重，三层空气弹簧自下向上编号为1号、2号、3号，表压分别是0.042 MPa、0.028 MPa、0.016 MPa。设空气弹簧在初始位置时为线性，结合气体状态方程，忽略初始位置高度对有效面积的影响，则空气弹簧刚度公式[5]可简化为式(1)，其中 p 为绝对压力，A 为有效承载面积，p_a 为标准大气压，m 为多变指数，x 为行程，p_0、V_0 为初始状态参数；根据该公式及有效承载面积、初始参数等计算三层空气弹簧自下向上的刚度分别为92.3 N/mm、83.2 N/mm、75.4 N/mm。

$$K=\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}x}=\frac{\mathrm{d}[(p-p_a)A]}{\mathrm{d}x}=mp_0\frac{A^2}{V_0} \tag{1}$$

1.2 钢丝绳隔振系统设计

钢丝绳隔振系统分顶板、钢丝绳隔振器和底板三部分，在空气弹簧隔振系统的基础上安装，如图1所示。顶板和底板尺寸为1 400 mm ×1 200 mm ×6 mm，需隔振的总质量约180 kg（含电测设备及顶板质量）。根据公式(2)进行冲击选型设计[6]。其中，f_s 为隔离系统的冲击固有频率（Hz），f_p 冲击脉冲的固有频率（Hz），$\ddot{x}_o$ 为响应加速度（m/s^2），$\ddot{x}_i$ 为输入加速度（m/s^2），K_s 为平均冲击刚度系数（N/m），T_p 半正弦脉冲持续时间，W 为隔振系统总质量（kg）。结合以往水下爆炸试验及仿真计算结果，设冲击脉冲主要频率为200 Hz～800 Hz，缓冲效率为96 %，计算得到隔振系统的刚度为 1.78×10^2 N/mm～2.85×10^3 N/mm。

$$\left.\begin{aligned} f_p&=\frac{1}{2T_p}\\ \ddot{x}_o&=1.6\ddot{x}_i\frac{f_s}{f_p}\\ f_s&=2\pi\sqrt{\frac{K_s}{W}} \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

2 多层隔振系统动力学建模方法研究

2.1 实体模型的建立

本文研究的重点是隔振系统的动态特性，对机械构件本身强度不做过多分析，文中基于计算多体动力学方法[7]进行建模。实体模型的建立是仿真计算的基础，模型的正确建立与否直接影响仿真计算的正确与否。文中运用三维建模软件对隔振系统及电测设备进行几何实体建模；利用三维建模与动力学分析软件之间的无缝接口软件传递模型数据信息，并对其进行仿真分析，建立的实体模型如图1所示。

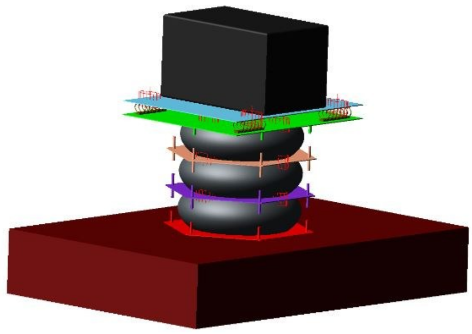


图1 多层隔振系统实体模型

2.2 计算多体动力学模型的建立

在实体模型建立的基础上，文中基于计算多体动力学理论对隔振系统进行动力学建模。文中通过衬套力来建立多层隔振系统。空气弹簧通过8个衬套力单元来模拟，取阻尼比为 ζ=0.1。根据计算得到的钢丝绳隔振系统的刚度，参照GJB 6412-2008进行选型；为了提高低频的隔振效率，选型时在允许范围内刚度尽量小，选取单个钢丝绳隔振器的刚度为60 N/mm，共4组；在多体动力学建模时通过4个衬套力单元模拟，取阻尼比为 ζ=0.12。

文中水下爆炸冲击环境根据联邦德国1985年颁布的BV043/1985标准[8]，对船体施加正—负半正弦的垂向加速度冲击来实现，负半波峰值为1 372 m/s^2，持续时间为4.58 ms，正半波峰值为603 m/s^2，持续时间为10.4 ms。基于大质量法[9]模拟水下爆炸冲击载荷对多层隔振系统产生的加速度输入；由于正—负半正弦波有三个时间点，使用三个IF函数添加时域冲击环境，其中施加冲击的开始时间是4 000 ms，施加的加速度时域曲线如图2所示。

3 水下爆炸作用下系统动态特性分析

在计算多体动力学建模的基础上，仿真计算得静态稳定时三层空气弹簧的变形自下而上为

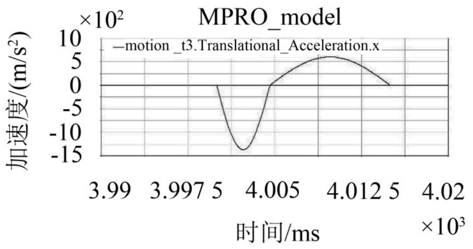


图2 冲击加速度曲线

35.1 mm、33.1 mm、32.5 mm；三层空气弹簧的变形量基本相等，约为弹簧高度的1/10，设计基本合理。钢丝绳隔振器的静态变形量为6.5 mm，在钢丝绳隔振器工作变形范围内(工作范围为20 mm)。上述分析结果表明，隔振系统在静态时工作正常。

正—负半正弦波作用下1号、2号、3号空气弹簧的最大动变形量分别为19.3 mm、11.4 mm、11.1 mm，钢丝绳隔振器最大动变形量为3.4 mm，时域曲线如图3所示(图中标注时间为各曲线峰值对应时刻)。由图中可以发现，所有隔振器动变形量都在其动态正常工作范围内；1号空气弹簧较其它两个空气弹簧变形量大，主要原因是其靠近甲板同时承受水下爆炸产生的低频和高频载荷的共同作用，而2号和3号空气弹簧主要受1号空气弹簧衰减后低频载荷作用；正—负半正弦波作用期间由于阻尼等因素，最大动位移出现的时间有一定的延迟，从其相位上分析，1号和2号空气弹簧一致，3号空气弹簧和钢丝绳隔振器基本一致。

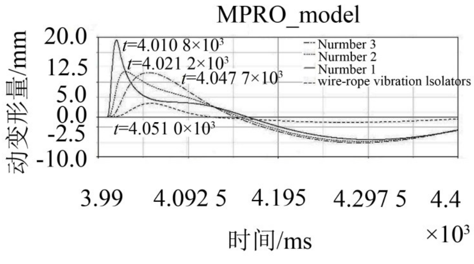
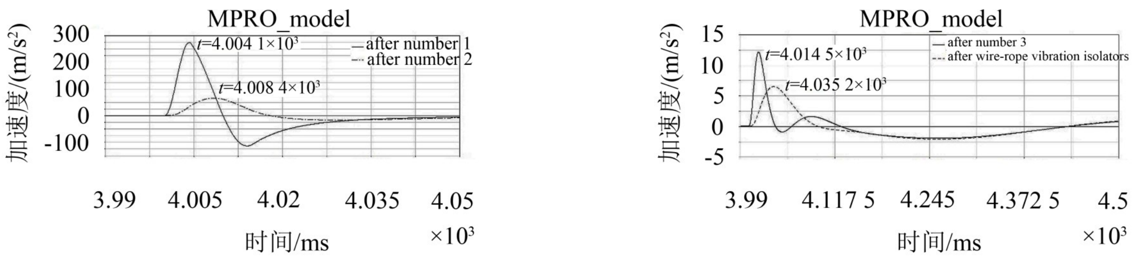


图3 空气弹簧及钢丝绳隔振器动变形量



(a) 1号和2号空气弹簧隔振系统衰减后

(b) 3号空气弹簧和钢丝绳隔振系统衰减后

图4 不同层隔振系统衰减后加速度对比

图4中(a)和(b)分别为正—负半正弦波作用下1号、2号、3号空气弹簧及钢丝绳隔振器隔振后的加速度时域曲线，图中标注时间为各曲线峰值对应时刻。由图中可以发现：自下向上各隔振系统衰减后的加速度峰值分别为275 m/s²、65.5 m/s²、12.2 m/s²、6.52 m/s²，与正—负半正弦波峰值相比整个多层隔振系统的衰减率约为99.5 %，即经过多层隔振系统缓冲之后电测设备所受冲击加速度峰值为6.52 m/s²，小于电测系统的抗冲击指标；从每个单层隔振系统的衰减率来分析，各空气弹簧衰减率基本一致，钢丝绳隔振器衰减率较空气弹簧小，主要原因是其固有频率大于空气弹簧固有频率；加速度峰值基本都出现在正—负半正弦波作用期间，但相位上有一定差异。

在多层隔振系统动态特性分析的基础上，为了分析隔振系统的稳定性，当电测设备的重心在水平面上与几何中心偏移100 mm时，计算得到三层空气弹簧中每层的对角衬套单元变形量差值自下而上分别为17.2 mm、16.8 mm、15.3 mm，钢丝绳隔振器对角衬套单元变形量差值为1.7 mm。可见在安装电测设备及隔振系统时必须保证重心与几何中心重合，否则由于隔振系统的承载不均匀影响隔振系统的稳定性及隔振效率，特别在冲击作用下容易将这种偏差放大。这点也说明：虽然隔振系统衰减率较高，但由于隔振级数较多、阻尼因素较为复杂、隔振系统固有频率相近、冲击载荷成分复杂等因素容易导致不同隔振系统之间产生共振或反向共振，所以在设计隔振系统时必须重视系统的稳定性且隔振级数不能太多。

4 结 语

本文基于水下爆炸试验需求，设计了一种多层隔振系统用于对电测设备的抗冲击防护，并对隔振系统的动态特性进行分析。结果表明由空气弹簧和钢丝绳隔振器组成的多层隔振系统对水下爆炸冲击载荷衰减率较高，设计的多层隔振系统在水下接触和近场爆炸条件下能正常工作，满足试验需求。对

(下转第203页)