

固体火箭发动机全寿命环境载荷分析

李高春¹, 黄卫东², 董可海¹, 高山¹, 王玉峰¹

(1. 海军航空大学 岸防兵学院, 山东 烟台 264001; 2. 航天工程大学, 北京 101416)

摘要: **目的** 对固体火箭发动机全寿命环境载荷情况进行分析, 掌握其特性和变化规律。**方法** 在分析固体火箭发动机使用环节主要环境载荷因素基础上, 对实测获取的典型固体火箭发动机服役区域的环境载荷数据进行分析。依据固体火箭发动机全寿命服役历程情况, 给出全寿命环境载荷的编制方法。**结果** 根据发动机典型服役历程环境载荷特点和服役历程, 可以有效掌握发动机全寿命周期内的环境载荷情况。**结论** 该方法具有较好的可操作性, 从而为固体火箭发动机结构完整性评价和寿命试验评估提供基础数据。

关键词: 固体火箭发动机; 环境载荷; 全寿命

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.03.021

中图分类号: V512 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)03-0101-05

Environmental Load in Total Life Cycle of Solid Rocket Motor

LI Gao-chun¹, HUANG Wei-dong², DONG Ke-hai¹, GAO Shan¹, WANG Yu-feng¹

(1. Coast Defense College, Naval Aviation University, Yantai, 264001, China; 2. University of Space Engineering, Beijing 101416, China)

ABSTRACT: Objective To analyze environmental load spectrum in total life cycle of solid rocket motor and obtain its characteristics and change rules. **Methods** Based on the analysis of the main factors of environmental load during the using of solid rocket motor, the typical environmental load data in the service area of the typical solid rocket motor were obtained. On the basis of the service history in the whole life circle of the solid rocket motor, methods for preparing environmental load in the whole life circle were proposed. **Results** According to environmental load characteristics in typical services of the motor and its service history, the environmental load in the whole life circle of the motor could be obtained. **Conclusion** The method has good operability. It provides a basis for structural integrity assessment and life prediction of solid rocket motor.

KEY WORDS: Solid rocket motor; environmental load; life cycle

固体火箭发动机自生产之日起将会经历贮存、运输和使用环境载荷的考验, 各个过程中存在自然环境因素(温度、湿度等)、诱导环境因素(振动、冲击等)和复合环境因素^[1-2]。上述环境载荷因素使固体火箭发动机装药出现老化、裂纹和脱粘, 从而显著地影响固体火箭发动机的内弹道性能和结构完整性。收集和分析固体火箭发动机服役环境载荷条件, 准确地分析全寿命环境载荷情况, 为发动机设计和评估提供基础数据, 为发动机寿命精确预估和减少发动机全寿

命费用提供基础。

在使用环境监测和监测参数处理方面, Richard 开发了使用环境参数记录仪数据处理软件 MLAD, 利用该软件对英国 89 个导弹使用环境温度记录仪温度数据进行了提取和分析。美军国防弹药中心(DMC)等机构对美军弹药在科威特贮存环境进行了监测, 研究了弹药贮存环境的温度和湿度变化, 并对其相应的载荷情况进行了分析。国内海军航空工程学院等单位在固体发动机使用环境监测方面开展了相关研究, 研

制了固体发动机使用环境监测系统。结合训练任务,进行了使用环境实测,获得了大量的使用环境温湿度和振动加速度等数据^[3-4]。

分析固体火箭发动机全寿命周期内所经受的环境载荷作用,编制恰当的环境载荷谱是进行固体火箭发动机设计和寿命试验的首要工作,它对试验工作效果有重大影响。由于我国地域广阔,装备使用平台多样性,活动区域随机性以及环境载荷谱编制的复杂性,掌握固体火箭发动机环境载荷特点及全寿命载荷编制方法仍是需要解决的基础性问题之一。

1 全寿命环境载荷需求

对于固体火箭发动机来讲,在全寿命周期内的各个使用环节,发动机经历的自然环境和诱导环境均不相同,如图1所示。为了建立较为完整的固体火箭发动机全寿命周期环境载荷谱,需要对各个阶段分别进行研究。另外,固体火箭发动机对不同环境因素的敏感程度不同,因而环境因素的选取也不尽相同。需要根据固体火箭发动机使用环节,分析其所受的环境载荷,以及各种环境载荷对固体火箭发动机性能的影响,确定其主要的的环境载荷因素。

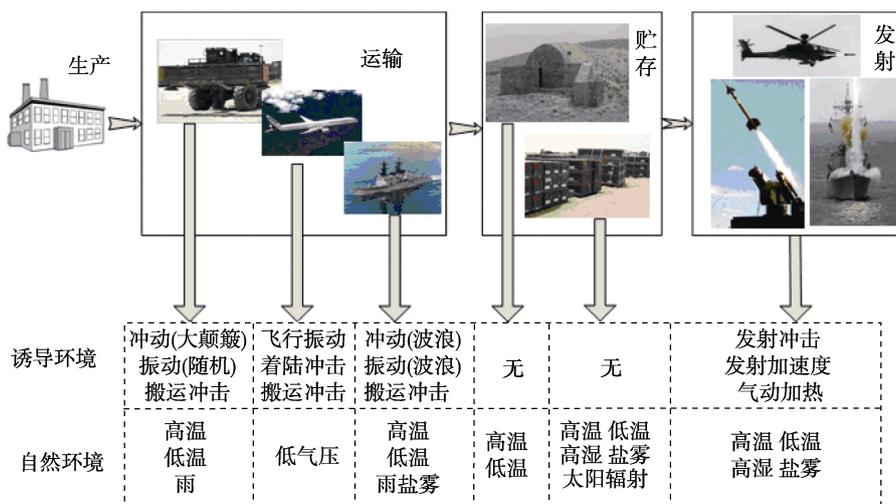


图1 全寿命周期内主要环境应力

2 典型使用环节的环境载荷

2.1 贮存环境

贮存环境是指发动机在贮存期间所受的环境-时间历程,包括贮存的环境因素和各种因素的强度和作用时间等。贮存过程中主要环境因素有温度、湿度、腐蚀等,其中以温度、湿度的影响最大。可以认为,温度和湿度是贮存环境中的主要环境因素。对于贮存环境中环境因素作用时间,可以根据发动机的履历数据进行确定。贮存分为有供暖调节和没有温度调节的库房。从先前收集的数据来看,发动机贮存在有温度和湿度调节的洞库内,湿度和温度条件较好,贮存温度为16~21℃,相对湿度小于70%。

通过实测获得没有温度调节的某沿海城市发动机贮存库房的测试数据如图2所示。对实测温度数据进行分析可知,年平均温度为15℃,年温度变化范围为-2.5~32.5℃,日温度平均变化幅值范围为0.2~2.3℃,如图3和图4所示。温度具有季节和日变化,并且由于受局部气候影响,具有一定的随机性,这样对发动机的影响具有随机性。由于世界各地温度、湿度和太阳辐射各不相同,要完全掌握不同地点的温度、湿度等情况不太现实,通常的做法是将全球化分为若干

典型的区域,再考虑年平均温度和极限环境情况。

2.2 运输载荷

固体火箭发动机在运输过程中所受到的机械应力主要来自运输工具,由于路面不平以及交通工具本

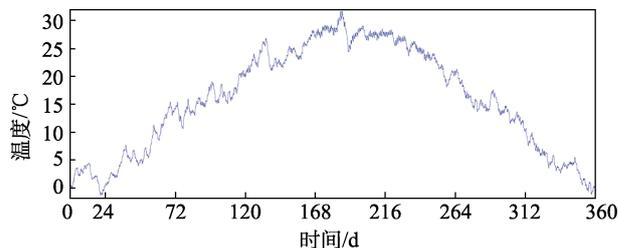


图2 实测温度

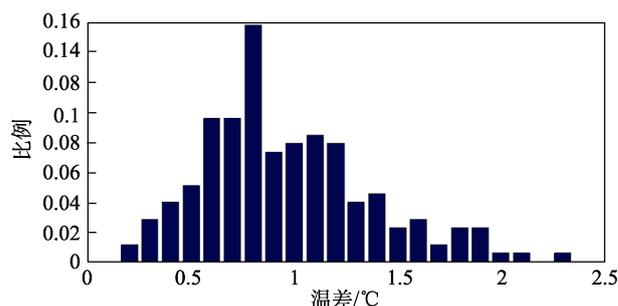


图3 日温差概率分布

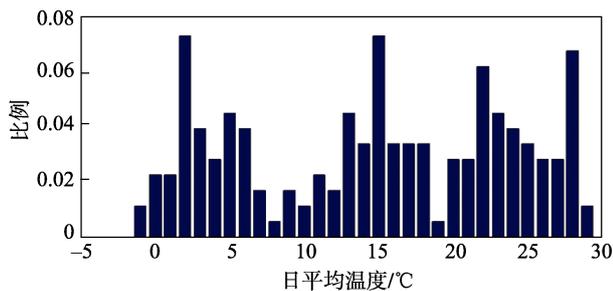


图 4 日平均温度概率分布

身启动、制动、转向等原因，产生振动、冲击，使发动机及其内部零件、装药等受到直线惯性力。温度、湿度对发动机也有一定的影响，但与贮存过程相比，运输所用的时间相对短得多，因而温、湿度不构成运输过程中的主要环境^[5]。

选取解放牌卡车作为研究对象，将加速度传感器固定于卡车货斗中部，对 A 级路面条件下的车载振动载荷进行了实际测量。图 5 给出了卡车从静止加速至 10 m/s 后减速至静止的整个过程中，沿车辆行驶方向 (x 向) 和垂直方向 (y 向) 的加速度载荷变化及其频域分布。

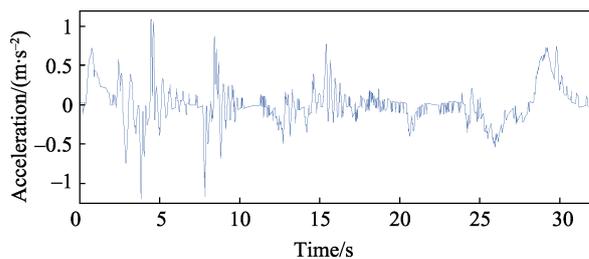
在卡车行驶方向 (x 方向) 的加速度载荷时域图中，可以观察到车辆起动、减速和停止的加速度载荷峰在 0.5~1 m/s² 之间。在车辆行驶过程中，由于车辆颠簸导致的加速度载荷在 0.1~0.2 m/s² 之间。由频域图可知，振动主要集中在 0.1~6 Hz 的区间内，且幅值随着频率的增加逐渐降低，这是由于 x 方向的加速度同时受到车速变化和路况的控制，没有明显的振动特征频率。

在垂直方向 (y 方向) 加速度载荷时域图中，可以发现该方向的加速度载荷幅值受车速的影响明显。在车速从 0 加速至 10 m/s 的过程中，加速度载荷的幅值从 0.1 m/s² 逐渐增加至 1 m/s² 左右，而且振动频率具有明显的特征，主要集中在 0.5~4 Hz 之间。这是卡车垂直方向的固有振动频率，由车体质量和悬挂系统决定。另外在 10~15 Hz 之间有幅值较小的振动存在，这是由发动机振动导致的车体振动。

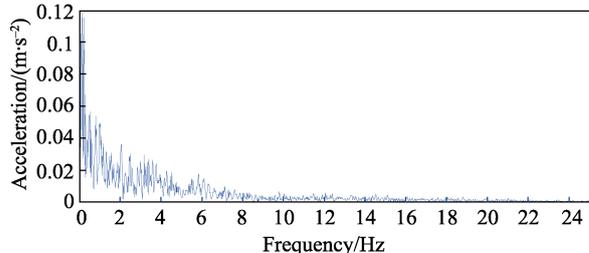
运输时的振动加速度值与运输车行驶速度、路面的好坏相关，车速越高，振动越大。运输时，在横向、纵向和垂直方向上存在不同的振动加速度值。对发动机各点振动测量数据作功率谱分析可知，所有水平 x, z 向的响应都比垂直 y 向小 1~2 个数量级。

2.3 值班环境载荷

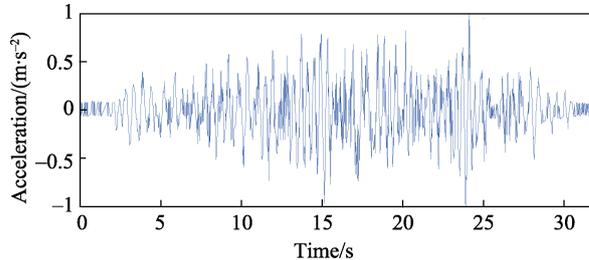
在值班中，发动机受到的自然环境有温度、湿度、太阳辐射。另外，发动机受舰船摇摆运动的影响。舰船在海洋运动中，包括 6 个自由度的运动：进退、升降、横漂、偏转、纵摇和横摇^[6]。其中进退、偏转和横漂可以通过舰船的操纵系统进行控制；而升沉、纵摇和横摇运动很大程度上决定于海况和舰船结构参数^[7]。



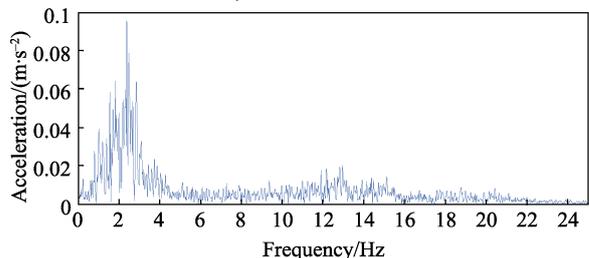
a x 方向时域振动信号



b x 方向频域振动信号



c y 方向时域振动信号



d y 方向频域振动信号

图 5 实测车载加速度载荷时域频域结果

利用监测设备对四联装贮运发射箱环境进行监测。由于贮存发射箱为四联装，在每一个贮运箱内安装一个温度传感器，其中 A、B 箱位于上层，C、D 箱位于下层。图 6 反映了上、下层贮运箱内日最高温度、日最低温度、日平均温度、日温度差的情况。由图 6a 可见，上层贮运箱总体温度在 -7~40.1 °C 之间。日温度差大部分在 5~10 °C 之间，在 50 天左右波动较大。上层总体温度在 -4.8~40.3 °C 之间，下层贮运箱总体温度在 -5.1~36.8 °C 之间，日温度差大部分在 1~10 °C 之间。处于上层的贮运箱日温度差明显大于下层的贮运箱。

上、下层贮运箱监测温度的频数分布如图 7 所示。可以看出，该箱温度统计数据中，5、15、30 °C 附近的频数最高。

为了分析舰船的振动情况，对在北海航行的某大型舰船振动环境进行了监测试验。测试当日海上气候条件较好，风浪较小，测试过程中该船以 15 节速度

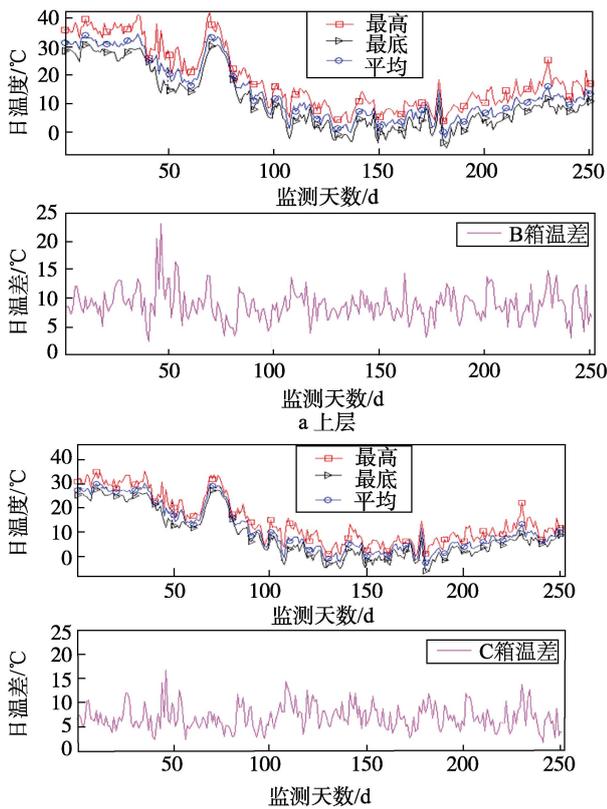


图6 实测温度与温差变化

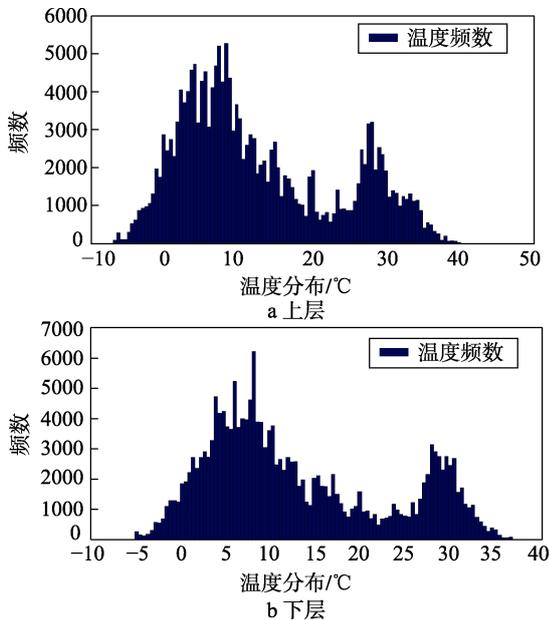


图7 实测温度分布情况

匀速航行。振动加速度测试点选在船体上层第二层甲板中央处,采样频率预先设为30 Hz。经消除趋势项和平滑处理后,加速度时域、频域如图8所示。

由时域可知,平滑后 x 、 y 方向的加速度幅值小于 $0.05 g$, z 方向的加速度幅值小于 $0.1 g$ 。由频域图可知,在风浪作用下,舰船 x 方向加速度载荷频率分布在 $0.2\sim 1\text{ Hz}$ 之间, y 方向加速度载荷频率分布在 $0.1\sim 0.8\text{ Hz}$

之间, z 方向加速度载荷频率分布在 $0.1\sim 1\text{ Hz}$ 之间。

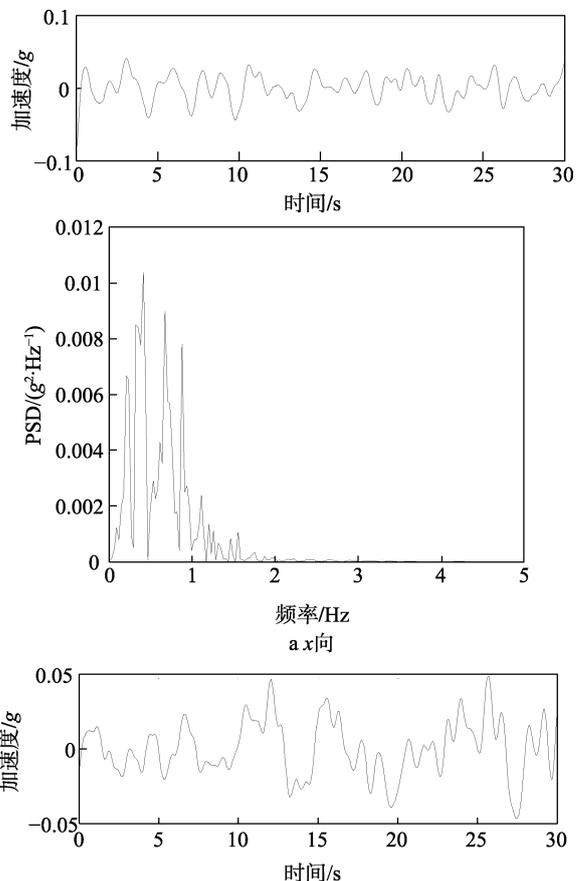
2.4 发射过程载荷

发射时间较短,其自然环境影响可以忽略,主要考虑发射过程的载荷情况。发射时受到以下载荷:一是加速度载荷,在推力作用下,很短的时间内增加到很大的速度,所以发动机各部件要承受一定的轴向加速度载荷;二是发动机工作时的内压载荷,在燃气内压力作用下,装药内表面会产生较大的应力和应变。

通过分析导弹发射过程,建立导弹发射过程动力学和发动机内弹道计算方程,计算固体火箭发动机在发射过程中所受的加速度和内压载荷。

2.5 全寿命周期环境载荷

发动机实际使用过程中是贮存、运输、值班、贮存的反复交替过程,如图9所示。该过程所对应的环境载荷就是全寿命环境载荷,它能更真实地反映发动机各种使用环境的实际情况。对于整个寿命周期内,其环境载荷-时间历程太复杂,只能抓住最本质的因素对它进行简化后,作近似的描述。全寿命环境载荷编制过程如下:根据发动机服役情况,建立发动机的典型服役历程及各历程时间,如图10所示。依据发动机典型服役历程以及典型服役历程的环境载荷特点,给出发动机在全寿命周期内的环境载荷。



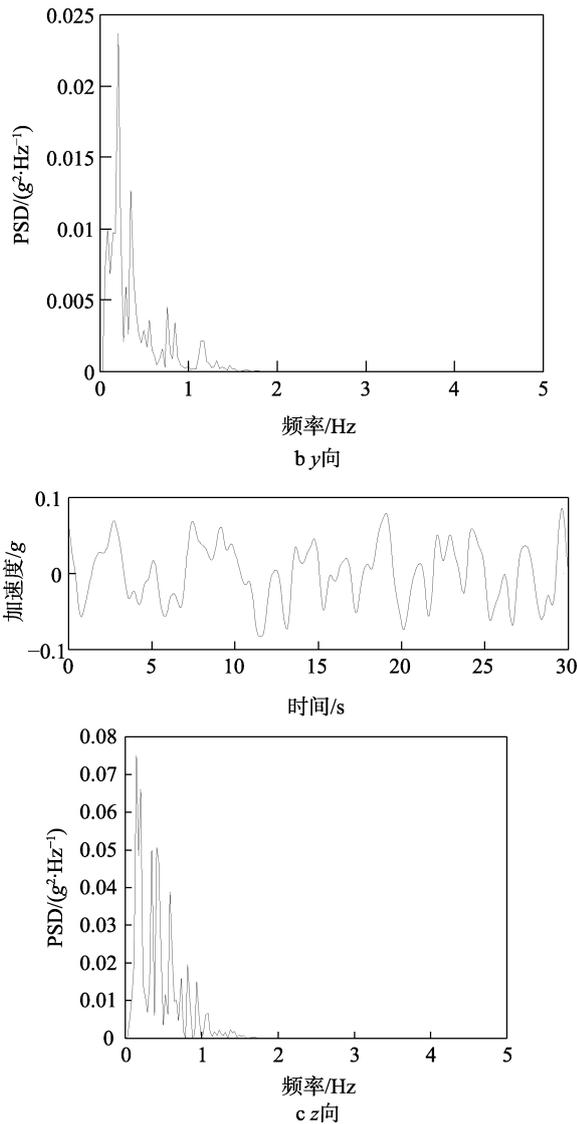


图 8 平滑处理后的加速度时域、频域

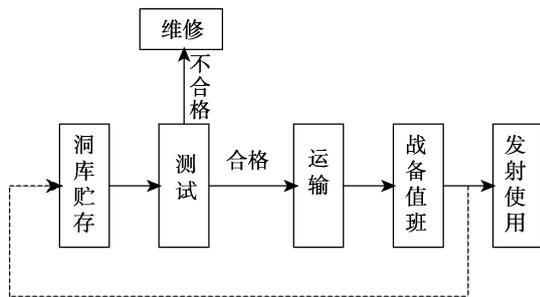


图 9 全寿命剖面

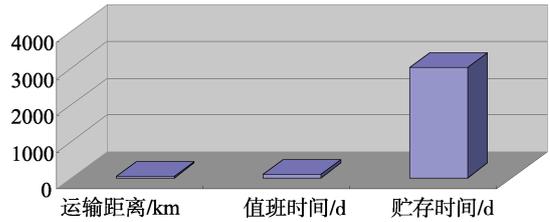


图 10 典型导弹服役历程

3 结语

文中分析了固体火箭发动机全寿命周期内的环境载荷情况，给出了典型环境载荷特征和变化规律。根据固体火箭发动机的服役情况，对其履历进行了统计分析，建立其典型任务剖面，根据各任务剖面的环境载荷情况，给出了固体火箭发动机在全寿命周期内的环境载荷。该固体火箭发动机全寿命环境载荷分析方法，有利于掌握固体火箭发动机全寿命载荷情况，具有较好的可操作性，从而为固体火箭发动机结构完整性评价、寿命试验和评估提供基础数据。

参考文献：

- [1] 罗天元, 吴波, 但渝霞. 弹药环境适应性设计需要考虑的几个问题[J]. 装备环境工程, 2007: 4(1): 62-66.
- [2] 吴勋, 任宁莉, 冯翔, 等. 固体发动机典型环境载荷分析[J]. 装备环境工程, 2010(12): 103-106.
- [3] 展亮. 长期舰载固体火箭发动机使用环境监测系统研究[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2009.
- [4] 李高春, 韩永恒, 黄卫东, 等. 装药累积损伤评估及参数敏感性分析[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(3): 17-20.
- [5] 李明伦, 李东阳, 郑波. 弹药储存可靠性[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [6] 戴遗山. 船舶在波浪中运动的势流理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [7] SCOTT M. VANDEN B. Non-linear Rolling of Ships in Large Sea Waves[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2007.