

外挂式空射运载火箭发射可靠性试验剖面研究

尹子盟¹, 李紫光¹, 杨学印²

¹北京宇航系统工程研究所, 北京

²北京环境与强度研究所, 北京

收稿日期: 2023年5月19日; 录用日期: 2023年6月21日; 发布日期: 2023年6月28日

摘要

本文分析了空射运载火箭发射可靠性试验剖面的生成方法, 生成了空射运载火箭发射任务剖面和环境剖面, 分析了外挂式空射运载火箭在不同任务剖面下温度应力、振动应力、电应力和湿度应力等试验环境参数的确定方法, 最后本文以某电子产品为例, 结合实测数据对实验剖面进行了修正, 设计了可靠性综合环境试验剖面。

关键词

空射, 运载火箭, 可靠性, 试验剖面

Study on Reliability Test Profile of External Air-Launched Carrier Rocket

Zimeng Yin¹, Ziguang Li¹, Xueyin Yang²

¹Beijing Institute of Space System Engineering, Beijing

²Beijing Institute of Environment and Strength, Beijing

Received: May 19th, 2023; accepted: Jun. 21st, 2023; published: Jun. 28th, 2023

Abstract

In this paper, the generation method of the reliability test profile of air-launched rocket is analyzed. The mission profile and environmental profile are generated. By analyzing the temperature stress, vibration stress, electric stress and humidity stress under different task profiles, the profiles were corrected and the reliability comprehensive environmental test profile was de-

signed.

Keywords

Air-Launched, Carrier Rocket, Reliability, Test Profile

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

空射运载火箭是利用载机将运载火箭携带至离地面一定高度的空中进行发射的运载火箭，是现代高度发展的航天、航空工业相结合的产物，是对传统地面发射运载火箭的一种革新。具有“机动、灵活、高效、廉价”等特点，其基本不受天气和发射地点的影响，如遇恶劣天气，载机可飞离该区域进行规避，具有快速响应能力。这些优势决定了空射运载火箭是一个重要发展方向。就运载火箭与载机的安装关系而言可分为内装式和外挂式，外挂式又分为背驼式和吊挂式。外挂式空射运载火箭由于暴露在大气环境中，其力热环境都较为恶劣，对发射可靠性有重要影响。并且外挂式空射运载火箭相对于其他机载外挂物而言，体积大、质量重，不仅在设计过程中严重受限于载机的性能和运输能力，还要在随载机飞行及发射过程中保证飞机的安全，这就对外挂式空射运载火箭的可靠性提出了很高的要求。本文分析了外挂式空射运载火箭特有的发射可靠性试验剖面的生成方法，生成了外挂式空射运载火箭发射任务剖面和环境剖面，分析了外挂式空射运载火箭在不同任务剖面下温度应力、振动应力、电应力和湿度等应力环境参数的确定方法，最后本文以某产品为例，结合实测数据对试验剖面进行了修正，给出了可靠性综合环境试验剖面。

2. 发射可靠性试验剖面的生成方法

2.1. 可靠性试验剖面生成的一般方法

可靠性试验剖面的生成一般包含三部分内容。

首先，根据用户要求确定任务剖面。任务剖面是指产品在完成规定任务的全寿命周期内所要经历的全部重要事件和状态的一种时序描述，是确定产品执行任务过程中所经历的全寿命周期环境剖面的基础，它取决于用户对产品的使用要求，通常采用任务剖面特性参数图或特性参数表的形式来描述。对于外挂式空射运载火箭而言，任务剖面特性参数主要有 3 个：任务阶段高度(载机平台飞行高度)、任务阶段马赫数(载机平台飞行速度)和任务阶段持续时间。

其次，根据任务剖面确定环境剖面。环境剖面是指产品在实际使用中将会遇到的环境应力和时间的关系，主要包括温度应力、力学(振动)应力、湿度应力和电应力，环境应力的量值与任务剖面中的特性参数密切相关。可靠性试验的目的是暴露产品故障和设计缺陷，所以环境剖面的构建应尽可能模拟实际使用所经历的环境，其优选顺序为实测应力、估计应力、参考应力。

最后，根据环境剖面进行工程化处理得到试验剖面，应该说明的是，尽管包括 GJB899A《可靠性鉴定和验收试验》在内的相关标准强调实测应力的重要性，但是很多情况下，全部采用实测应力往往无法实现。在工程实践中，为了使试验剖面既符合标准要求，又能够使得产品的在尽可能贴近实际环境应力中进行试验，可根据经验数据进行初步设计，后续根据实测应力数据进行剖面修正[1]-[6]。

2.2. 空射运载火箭发射可靠试验剖面

外挂式空射运载火箭一般安装于飞机机腹下或者机翼内侧下方, 主要由有效载荷、动力系统、控制系统、测量系统、弹体结构等组成。其中控制系统的电子产品的发射可靠性水平直接关系到发射的成败, 但是由于空射运载火箭的规模大, 吨位重, 很难对空射运载火箭进行全箭试验, 只能对电子产品进行单机级试验。依据 GJB899 附录 B 及空射运载火箭的任务剖面可以初步构建出空射运载火箭的可靠性试验剖面。由于 GJB899 附录 B 中所提到的方法是适用于某类型的产品设备(组合式外挂和空中发射类)的一般性方法, 需依据受试产品实际情况, 比如实际安装位置和是否有减震、调温等, 对试验剖面进行修正。

3. 发射任务剖面和环境剖面生成

3.1. 任务剖面

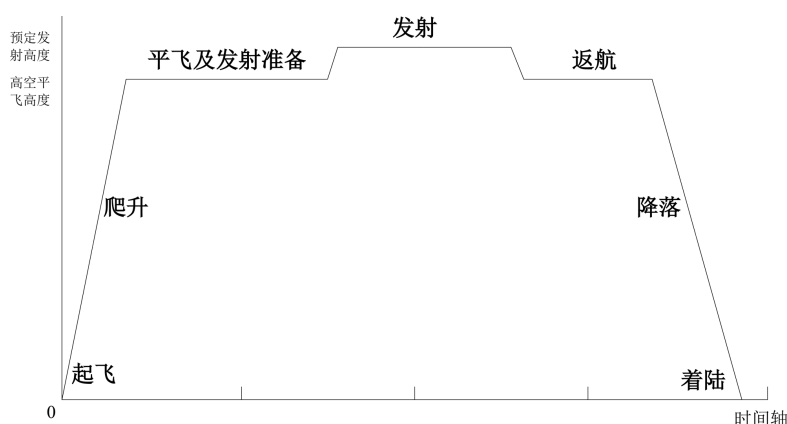


Figure 1. High-altitude level flight high-altitude launch mission profile
图 1. 高空平飞高空发射任务剖面

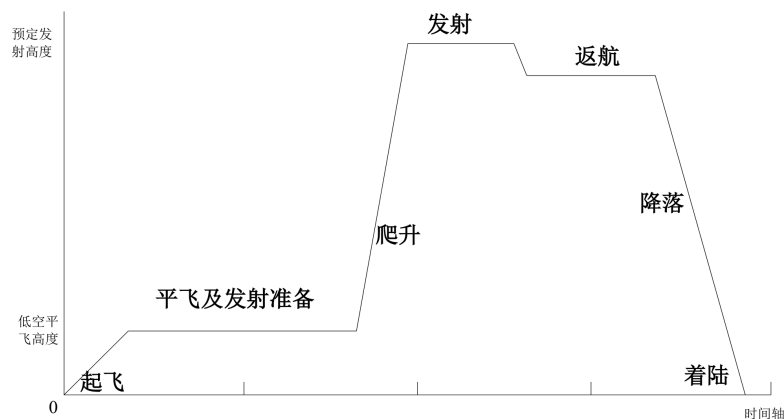


Figure 2. Low-altitude level flight and high-altitude launch mission profile
图 2. 低空平飞高空发射任务剖面

外挂式空射运载火箭的典型任务可大致分为高高发射和低高发射两种。高高发射是指空射运载火箭随载机起飞后, 爬升至高空后平飞, 并在高空完成发射准备后发射, 若发射中止, 则随载机返航、下降并着陆的任务过程。低高发射是指空射运载火箭随载机起飞后, 在低空平飞, 随后爬升至高空并完成发射准备后发射, 若发射中止, 则随载机返航、下降并着陆的任务过程。本文以典型空射运载火箭某电子产品为例进行说明。该产品高高发射任务剖面如图 1, 低高发射任务剖面如图 2。

3.2. 环境剖面

3.2.1. 温度剖面

目前，对温度的认识基本一致，即温度是高度和马赫数的函数。根据图 1，图 2 的任务剖面，可经理论计算得出高高发射的温度剖面，见表 1，低高发射的温度剖面，见表 2。

Table 1. Low and high emission temperature profiles

表 1. 低高发射温度剖面

动作	起飞	平飞及发射准备	爬升	发射	返航	降落		
每段时间(min)	0	10	82	10	20	80	16	—
累计时间(min)	0	10	92	102	122	202	218	—
发射场气温	15	12	12	-22	-51	-49	-49	15
温度应力	15	25.72	32.13	-9.91	-33.79	-33.17	-37.37	15

Table 2. High and high emission temperature profiles

表 2. 高高发射温度剖面

动作	起飞	爬升	平飞及发射准备	发射	返航	降落	
每段时间(min)	0	10	82	20	80	16	—
累计时间(min)	0	102	92	122	202	218	—
发射场气温	15	-25	-49	-51	-49	-49	15
温度应力	15	-13.06	-33.17	-33.79	-33.17	-37.37	15

3.2.2. 振动剖面

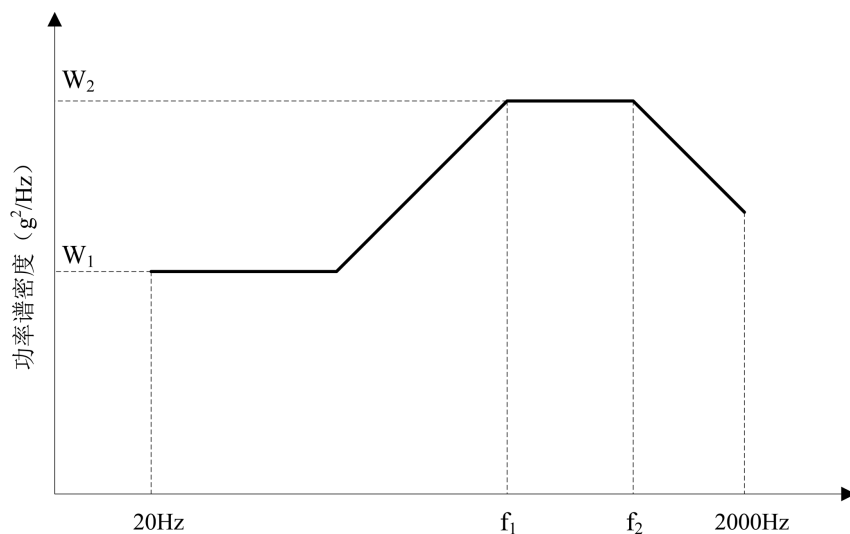


Figure 3. Launch reliability vibration profile

图 3. 发射可靠性振动剖面

空射运载火箭随载机平台水平飞行时，振动主要的产生因素有两方面。其一是由载机平台通过挂架

向空射运载火箭传递的振动响应，以低频为主；其二是由气动噪声激励产生的振动响应，以高频为主。普通机载外挂物振动剖面可依据自身结构参数和任务剖面，按照 GJB899A 附录 B 推荐的公式计算确定频率范围为 20 Hz~2000 Hz 的随机振动谱。而对于空射运载火箭，其体积和重量与载机在同一量级水平，挂机状态下与载机存在动力学耦合，频率通常低于 20 Hz，且各部分振动差异较大，不能用同一条件来描述其振动响应。因此需通过仿真计算和实测数据对振动剖面进行修正(图 3)。

3.2.3. 湿度与电应力

在发射可靠性剖面中，相对湿度可取 60%，第一个循环施加电压上限，第二个循环施加标称电压，第三个循环施加电压下限，三个电压变化构成一个完整的电应力循环，整个试验过程中重复这一电应力循环，本文以某产品为例，标称电压 28 V。

4. 基于实测数据对试验剖面进行工程修正

4.1. 温度剖面的修正

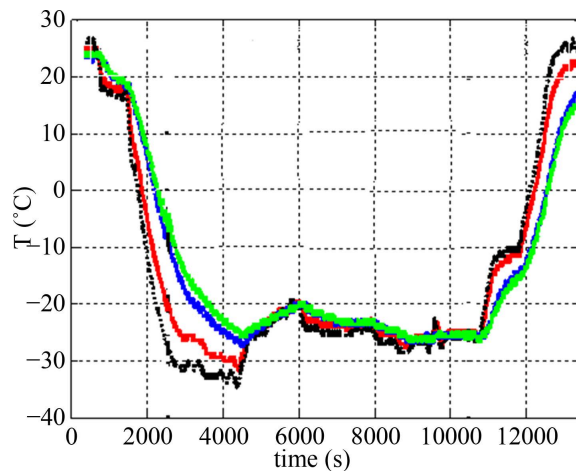


Figure 4. The measured temperature of the high-high launch mission
图 4. 高高发射任务实测温度

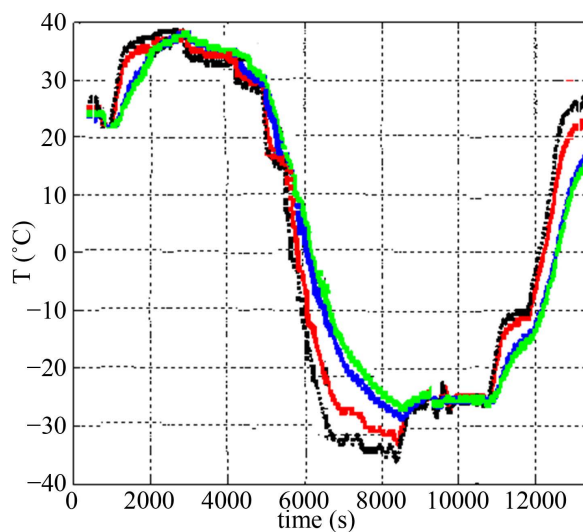


Figure 5. The measured temperature of the low-high launch mission
图 5. 低高发射任务实测温度

基于实测数据来对环境条件进行修订,最好能够得到实际任务剖面中受试产品直接的环境应力信息。在空射运载火箭的实际不同的发射任务过程中,一般在运载火箭结构内部的典型位置安装传感器进行测量,将实测数据经过处理后得到曲线。本文选取4个典型位置测量其温度变化,其中高高发射温度剖面如图4所示,低高发射温度剖面如图5所示。

可以看出,四个温度测点所测量的实测数据与理论计算的趋势吻合的比较好,但与理论模型对比后作两处修正:

- 1) 在高高发射任务中,空中最冷温度由-37.37度修正到-35度;
- 2) 在低高发射任务中,空中最热温度由32.13度修正到40度。

原因是空射运载火箭体积较大导致热熔较大,外界温度虽然较低,但不会快速传入运载火箭内部;且运载火箭随载机飞行过程中与空气摩擦效应与空气在运载火箭表面发生的制止效应,导致实测数据与理论计算数据相比普遍高2~3摄氏度。

4.2. 振动剖面的修正

振动剖面的修正首先要获取实测数据,即开展空射运载火箭外挂飞行试验。在运载火箭各部位安装低频振动和高频振动传感器,测量各任务剖面(不同飞行高度,飞行速度,飞行时长)下各部位的实际随机振动数据处理得到功率谱密度曲线。对频域数据进行概率统计处理(本文采用正态单边容差上限统计方法),得到统计期望功率谱密度曲线,并进行平滑处理。依据实测统计包络曲线对振动剖面进行修正,得到最终的振动剖面。本文研究的典型位置振动响应如下图6、图7所示:

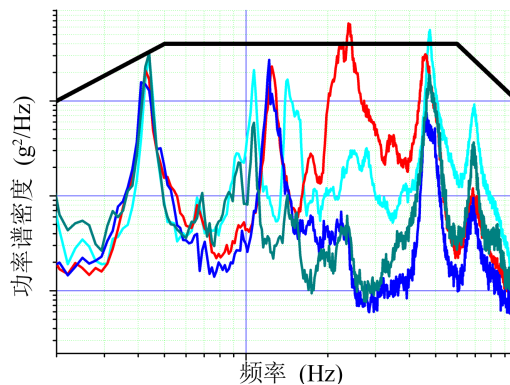


Figure 6. Vibration response in the low frequency range
图6. 低频范围振动响应

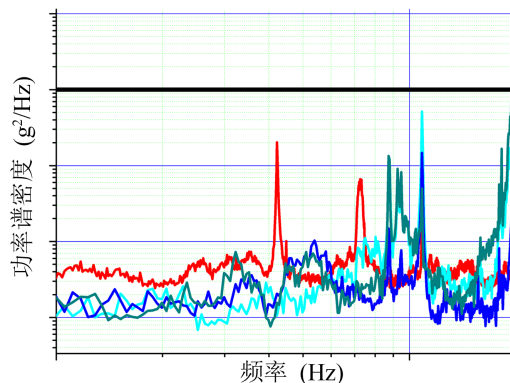


Figure 7. Vibration response in high frequency range
图7. 高频范围振动响应

4.3. 工程综合剖面

经过工程上实测数据修正，以及低高任务与高高任务比，计算得出空射运载火箭电子设备可靠性综合剖面，如图 8 所示。

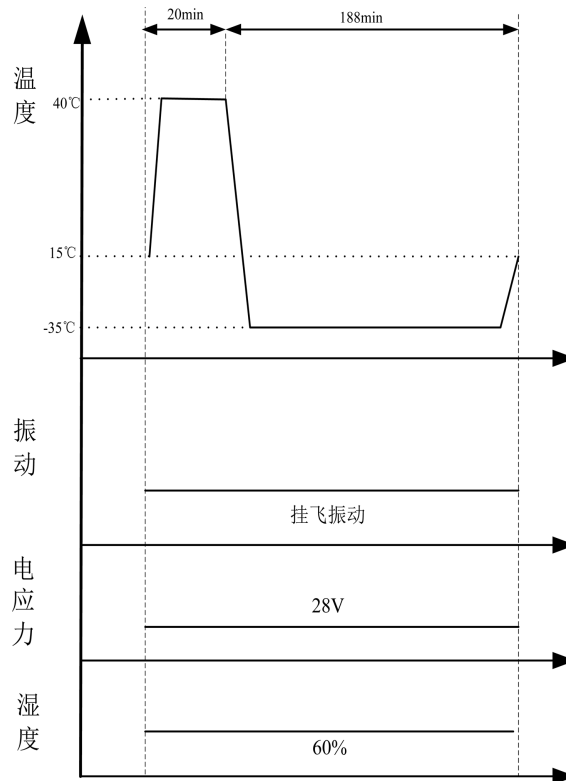


Figure 8. Comprehensive test profile
图 8. 综合试验剖面

5. 结束语

本文分析了外挂式空射运载火箭发射可靠性试验剖面的生成方法，生成了外挂式空射运载火箭发射任务剖面和环境剖面，分析了外挂式空射运载火箭在不同任务剖面下试验环境中温度应力、振动应力、电应力和湿度等环境参数的确定方法，最后本文以某电子产品为例，结合实测数据对实验剖面进行了修正，给出了可靠性综合试验剖面。

参考文献

- [1] 程德斌, 王丽霞, 阳川. 一种根据部分实测数据进行修正的可靠性试验剖面设计方法[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2002(2): 36-38.
- [2] 王晓青, 王小军, 王国辉. 空射运载火箭方案研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2008(3): 1-5.
- [3] GJB899A-2009 可靠性鉴定和验收试验[S].
- [4] 王光芦, 李维宝. 美军 V/STOL 飞机机载设备可靠性试验剖面研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(5): 56-61+76.
- [5] 陈万创, 李爱国. 空空导弹综合环境可靠性试验剖面研究[J]. 上海航天, 2005(4): 41-44.
- [6] MIL-HDBK-781A. 工程、研制、鉴定和生产可靠性试验方法、方案和环境[S].