

# 同心筒发展现状及陆态发射地面支撑安全性分析

程运江,丛彦超,周晓和,司世才,黄燕璐

(中国运载火箭技术研究院,北京 100076)

**摘要:**介绍同心筒垂直发射的发展现状,完成同心筒发射装置地面支撑及发射系统的设计方案,采用 Abaqus 软件和理论方法对舰载导弹同心筒陆态发射过程中的地面支撑安全性进行分析,结果表明同心筒支撑和发射安全。该设计方案及分析过程可为后续舰载导弹武器陆态发射试验方案提供思路与参考。

**关键词:**舰载导弹;同心筒;地面支撑;发射系统;安全性

**中图分类号:**TJ768 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)02-0075-04

## Development of Con-centric Canister Launcher and Safety Analysis of Launcher Ground-support-launch

CHENG Yunjiang, CONG Yanchao, ZHOU Xiaohe, SI Shicai, HUANG Yanjun  
(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The development of con-centric canister launcher is introduced. The designing scheme and composition of con-centric canister launcher ground-support-launch system are accomplished. The ground-support-launch safety in the process of ship-based missile con-centric canister launcher ground-support-launch is analyzed by Abaqus software and theoretical calculation. The result show that con-centric canister launcher support and launch are safe, which proves that the designing scheme and analysis process can provide thinking and reference for the testing program of ship-based missile con-centric canister launcher ground-support-launch.

**Keywords:** ship-based missile; con-centric canister launcher; ground-support; launch system; safety

## 0 引言

随着科学技术发展,世界各军事强国都在重点加强海军力量建设,不断发展和更新海军舰载武器装备,以确保其海军处于领先地位,在未来战争和局部冲突中发挥重要作用。舰载武器更新换代的同时,导弹发射装置也得到了快速发展,其功能和性能直接影响到舰载导弹武器系统的作战能力<sup>[1]</sup>。导弹的垂直发射技术最早应用在潜艇上,后来才逐渐应用到水面舰艇上<sup>[2]</sup>。1968年,英国首先在护卫舰上以垂直发射方式成功地发射了一枚“海狼”舰空导弹。1980年,原苏联在“基洛夫”号巡洋舰上率先装备了SA-N-6舰对空导弹垂直发射系统。之后,美国的MK41、以色列的“巴拉克”-1、英国的“海狼”、北约联合研制的“轻型海麻雀”等导弹垂直发射系统相继装舰。随着大型水面舰艇和潜艇平台上垂直发射系统的应用,且垂直发射系统可适装不同类型的战术导弹,目前大型巡洋舰、驱护舰和潜艇已具备发射多种、多枚战术导弹的作战能力,大大推动了作战平台、发射系统和战术导弹的高速发展,提高了舰船武器系统的作战能力<sup>[3]</sup>。舰载/潜基导弹垂直发射装置具有发射率高、储弹量大、全方位发射、布局空间小、通用化程度高、兼容性强、成本低、可靠性高等特点,已成为各国海军武器系统的重要组成部分。

同心筒发射装置是垂直发射系统的一个重要发展方

向,主要包括“内外同圆”式、“外方内圆”式等类型<sup>[4-5]</sup>。在研制舰载导弹武器系统过程中,为验证导弹武器与同心筒发射装置的匹配性,一般而言,在论证阶段择机开展陆态演示验证试验。在陆态演示验证试验中,导弹发射过程中的燃气流及发动机推力将对整个支撑及发射系统产生较大的振动与冲击,影响其动态响应特性,可能对支撑及发射系统各构件和关键结构连接部位造成破坏,甚至影响导弹安全出筒<sup>[6-7]</sup>。因此,有必要开展同心筒发射装置地面支撑及发射系统方案设计,进行支撑安全性研究,这将对同心筒发射装置的工程应用具有重要意义。

## 1 同心筒发展现状

同心筒垂直发射装置(con-centric canister launcher, CCL)是美国研制的一种全新概念的水面舰艇导弹发射装置,后续美国海军可能用它代替MK41舰载导弹垂直发射系统。同心筒垂直发射装置采用类似英国“海狼”舰空导弹发射箱同心排导的原理,而非原有MK41垂直发射系统的公共燃气排导方式。英国“海狼”航空导弹垂直发射系统见图1。

同心筒垂直发射装置主要由同心发射筒、分布式电气设备、舰载武器模块等组成,关键技术包括同心筒结构技术、自主折转燃气流排导与防护技术、分布式“即插即用”

式电子控制技术。同心筒结构包括内筒、外筒、端盖、底板、内筒支撑结构、导流结构等。内筒主要实现对导弹支撑和发射导向的功能;外筒主要用于提供接口以安装同心筒至舰船平台;内外筒之间间隙用于导弹燃气射流排导通道。导弹发射过程中,导弹燃气流经底部导流结构、端盖后转弯 180°反流向上,进入内外筒间隙并向上排出。同心筒发射具有以下特点:1)燃气流与相邻导弹隔离,垂直发射系统热环境得到有效改善;2)同心筒结构简单、尺寸小、质量轻、占用空间小,可提高舰船空间利用率;3)可执行标准化,提高通用化水平,适装性强;4)可实现垂直、水平、任意角度发射<sup>[8]</sup>。



图1 英国“海狼”舰空导弹垂直发射

目前,国内主要对同心筒发射装置进行了大量的发射安全性仿真分析及相应的地面试验研究。

## 2 同心筒发射装置地面支撑及发射系统方案

### 2.1 系统要求

同心筒发射采用近垂直热发射方案,与传统的垂直裸弹发射方案相比,导弹发射过程中燃气流排导受到同心筒内筒的空间约束,发动机推力偏斜等初始偏差会对同心筒施加较大的载荷影响。因此,在同心筒热发射过程中,导弹的燃气流与发动机推力将对同心筒、地面支撑系统带来较大的振动与冲击。为确保发射试验的安全性,需要对同心筒地面支撑及发射系统进行方案设计与安全性研究,以确保满足发射前及发射过程中的强度和安全性要求,不会发生倾覆及局部结构失效等安全性问题。

相比于传统垂直裸弹发射采用安装固定导流锥的方式即可安全发射,同心筒发射除考虑自身结构的燃气流排导性能外,还要较多地考虑同心筒与地面的匹配性以及如何在陆地上模拟舰船平台实现同心筒的固定安装。此外,考虑导弹发射后出现异常垂直下落带来的风险,要根据舰船平台特性和导弹发射条件,将同心筒发射装置固定在具有一定倾斜角度的地面斜坡上,以减小导弹发射后异常垂直下落的不利影响。

综上,在进行同心筒发射装置地面支撑及发射系统设计过程中,要充分考虑地面支撑及发射系统相比与舰船平台的真实模拟性、地面支撑及发射系统的支撑安全性和试验风险及试验成本。

### 2.2 系统组成

同心筒地面支撑及发射系统主要由同心筒、支撑底座、侧向支撑梁和辅助吊拉钢绳等组成(图2)。

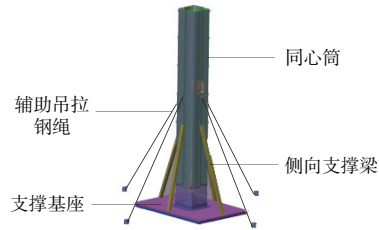


图2 同心筒地面支撑及发射系统示意图

同心筒除在导弹发射过程中进行发射导向和燃气射流排导之外,还用于导弹的储存、运输和发射前竖直支撑。同心筒外部设置有环向加强筋,增加同心筒结构的强度与刚度,并可在试验中与支撑系统相连,提高支撑及发射系统的安全性。

考虑试验成本和建造周期,兼顾舰船平台特性和导弹发射条件,支撑底座由钢板和具有 5°斜角的地面斜坡组成,主要实现导弹发射前对导弹及同心筒的纵向支撑、发射过程中对同心筒的纵向支撑,并通过钢板较大的面积将导弹发射过程中的燃气流冲击力较小地将燃气流冲击压强分解到地面斜坡上,确保该传递的压强在斜坡承受范围以内。地面斜坡则提供同心筒发射的初始高低射角,承受导弹发射前导弹及整个支撑及发射系统的质量和导弹发射过程中燃气射流的冲击力。5°初始高低发射角可以确保导弹在发射异常后,不会垂直下落,避免对试验场地造成较大的安全风险。考虑水分对地面抗剪强度的影响,将地面斜坡选在较为干燥的地方,确保地面有较高的抗剪强度。钢板与地面斜坡之间采用钢板四边钢钎固定方式。同心筒底部有翻边结构,周边设置一圈安装螺钉孔,与支撑底座之间采用螺钉螺接安装固定方式。

侧向支撑梁采用 Q345 回型截面方钢,通过焊接的形式与同心筒外部环向加强筋处、支撑底座钢板进行固连,主要实现导弹发射过程中燃气流与发动机偏斜推力等对同心筒的横向载荷减振与支撑,是支撑系统的横向主要稳定性支撑。

辅助吊拉钢绳采用标准钢丝绳,一侧连接同心筒环向加强筋处的吊耳,另一侧选用钢钎或地桩进行捆绑连接,提高筒架一体(同心筒与钢板底座一体)的防倾覆和辅助支撑同心筒横向稳定性。

## 3 陆态发射地面支撑安全性分析

导弹在发射过程中,燃气流会对支撑及发射系统造成较大的冲击与振动,发动机推力的偏斜、导弹出筒时刻的低头现象会对支撑及发射系统带来更多的横向载荷和倾覆力矩,将影响整个地面支撑及发射系统的安全性。从两方面危险模式对支撑及发射系统进行安全性分析,包括导弹动力学对支撑及发射系统结构件的安全性有限元分析、极限工况下防倾

覆吊拉钢绳的强度校核及场坪承压能力校核。

### 3.1 支撑及发射系统的安全性有限元分析

在分析导弹动力学对支撑及发射系统结构件安全性过程中,主要考虑极限工况下,导弹动力学对同心筒、同心筒与支撑基座的接触面及侧向支撑梁的破坏情况。在去除防倾覆吊拉钢绳、冲击载荷处于最大的情况下,对支撑及发射系统的安全性进行有限元分析。

对同心筒结构简化,采用 Patran 软件建立有限元模型,网格采用壳单元,材料选择 Q345 钢,材料密度取  $7.85 \text{ g/m}^3$ ,弹性模量取 210 GPa,泊松比取 0.3,有限元模型如图 3(a) 所示。同心筒承受的载荷按照发动机推力极大值进行分析,并选取一定发动机推力偏斜矢量以分布匀力方式加载在同心筒顶部 I、III 象限位置上。经分析,同心筒支撑及发射系统所受到的最大应力主要分布在位于 I、III 象限位置的侧向支撑梁上、靠近支撑基座位置处,其最大应力值达到 219 MPa,小于 Q345 钢的屈服强度,由此可知同心筒支撑及发射系统在极限工况下受到的应力符合设计要求,满足支撑及发射系统各结构件的强度。同心筒支撑及发射系统的最大位移量位于 I、III 象限位的发射筒顶端处,其最大位移量达到了 49.8 mm,位移量与筒体的长度比约为 0.007 14,在该筒体许用挠度的范围之内,符合设计要求。同心筒应力分布图、位移云图如图 3(b)、图 3(c) 所示。

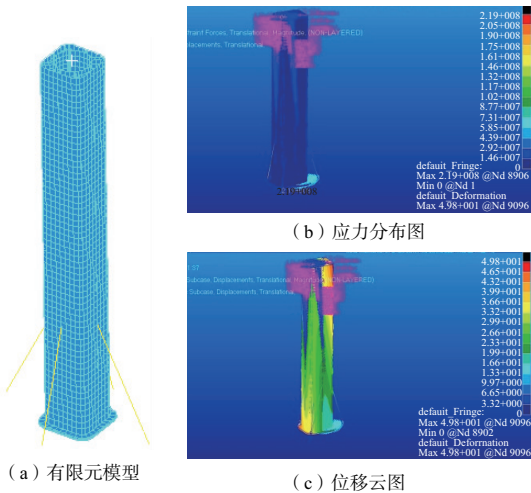


图 3 同心筒有限元模型、应力分布、位移云图

### 3.2 防倾覆吊拉钢绳的安全性计算

在计算防倾覆吊拉钢绳的安全性过程中,采用工程计算方法。首先,假设筒架(同心筒与支撑梁及钢板)为一个整体,防倾覆吊拉钢绳与地面斜坡采用钢钎固定,连接牢靠,不会遭到冲击受到破坏而导致其连接失效;考虑极限情况下仅对筒架在一根防倾覆吊拉钢绳拉紧受力的情况进行强度校核分析。导弹发射过程中,影响导弹姿态较大的初始扰动主要包括发动机推力偏斜和低头现象两种因素,如图 4 所示。在分析过程中,将发动机推力偏斜和低头现象处理为同一方向的扰动,形成导弹更大倾斜的角度,对筒架造成更大的倾覆力矩。

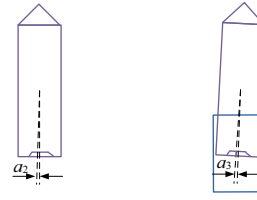


图 4 发动机推力偏斜、导弹低头现象

以支撑基座与地面斜坡接触面的中心处为原点,建立发射装置的参考坐标系  $x-y$ ,通过筒架结构获取支撑基座质心坐标  $O$ ,根据已知质量质心计算推出筒架质心坐标  $O_1$ 。 $O_2$  为钢绳与同心筒加强筋固连点,  $O_3$  为同心筒顶端中心点,并假定将发动机推力极大值作用在该点形成极限倾覆工况。导弹发射出筒瞬间的筒架受力情况如图 5 所示,其中几何参数如表 1 所示。

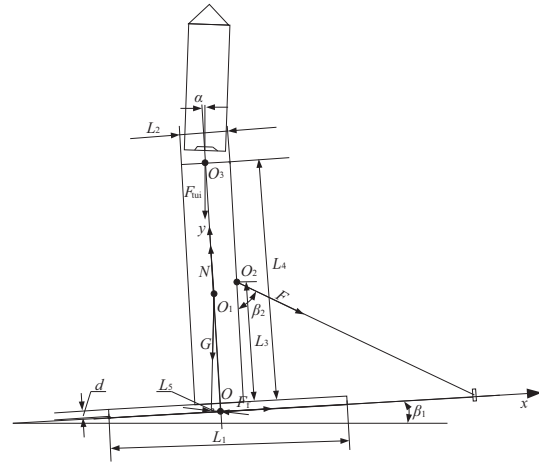


图 5 同心筒支撑及发射系统的整体受力示意图

表 1 支撑及发射系统的几何特性参数

参数	符号及单位	参数	符号及单位
筒架重力	$G/N$	发动机推力角	$\alpha/(\circ)$
钢绳拉力	$F/N$	支撑基座厚度	$d/mm$
发动机推力	$F_{tui}/N$	支撑基座长度	$L_1/mm$
地面斜坡支撑力	$N/N$	同心筒外筒宽度	$L_2/mm$
地面斜坡阻力	$F_t/N$	钢绳固连点距支撑基座距离	$L_3/mm$
地面初始角	$\beta_1/(\circ)$	同心筒高度	$L_4/mm$
钢绳与筒垂直角	$\beta_2/(\circ)$	筒架质心与坐标系原点的距离	$L_5/mm$

对发射装置整体进行受力分析,由  $x$ 、 $y$  轴受力平衡和力矩平衡得到:

$$N - F \cos \beta_2 - F_{tui} \cos \alpha - G \cos \beta_1 = 0$$

$$F_t + F \sin \beta_2 - F_{tui} \sin \alpha - G \sin \beta_1 = 0$$

$$F \left[ (L_3 + d) \sin \beta_2 + \frac{L_2}{2} \cos \beta_2 \right] - GL_5 - F_{tui} (L_4 + d) \sin \alpha = 0$$

带入发动机极大推力值,得到

$$F = 8\,250 \text{ N}; N = 237\,600 \text{ N}; F_t = 1\,900 \text{ N}.$$

选用的防倾覆吊拉钢绳标准拉断力为 20 kN, > 8 250 N,安全系数 > 2.4,满足抗拉强度要求,能够实现地对

面及发射系统的防倾覆作用。

### 3.3 发射场坪安全性计算

由上可知,导弹在发射过程中支撑基座受到的场坪正压力与地面斜坡支撑力大小相同,为 237 600 N。根据支撑基座钢板面积大小计算得出地面斜坡受到的正面压强为 33.76 kPa。假设场地的土壤含水量为 10%,依据文献可知地面斜坡所能够承受的标准压强值为 80 kPa,大于导弹发射过程中地面斜坡受到的正压强 33.76 kPa,场地不会受到破坏、损伤,场坪强度裕度充分。

### 3.4 小结

经过支撑及发射系统的安全性有限元分析、防倾覆吊拉钢绳的安全性计算以及发射场坪安全性计算,结果表明:地面支撑及发射系统可满足导弹发射前及发射过程中的强度及安全性要求,不会发生结构失效、筒架倾覆、地面斜坡场地受到破坏和损伤,设计余量充分,满足安全性要求。

## 4 结语

同心筒垂直发射装置是舰面垂直发射系统重要的发展方向之一,陆态演示验证试验是完成导弹与同心筒之间匹配性验证的重要措施。本文提出的同心筒发射装置地

面支撑及发射系统设计方案,经过地面支撑安全性有限元分析、防倾覆与发射场坪安全性计算,表明同心筒陆态地面支撑及发射系统安全可靠,可为后续开展同心筒陆态发射试验设计支撑及发射系统提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 王富宾,方立恭. 舰载导弹共架垂直发射技术现状及发展趋势[J]. 飞航导弹,2003(10):27-29.
- [2] 谷荣亮,杜江,时继庆. 战术导弹垂直发射系统的现状及发展趋势[J]. 上海航天,2003,20(3):28-32.
- [3] 金钊,陈思达. 舰空导弹垂直发射系统发展概况[J]. 飞航导弹,2006(1):23-27.
- [4] 边金尧,徐松林,钱海鹰. 同心发射筒研究现状[J]. 舰船科学技术,2012,34(11):3-7,51.
- [5] 姜毅,郝继光,傅德彬,等. 新型“引射同心筒”垂直发射装置理论及试验研究[J]. 宇航学报,2008,29(1):236-241.
- [6] 程运江. 导弹倾斜热发射动态响应与出箱安全性研究[D]. 南京:南京理工大学,2015.
- [7] 王熙,王守城,段俊勇,等. 导弹发射车起竖装置负载模拟系统设计研究[J]. 机械制造与自动化,2019,48(1):190-192.
- [8] 杨风波,马大为,乐贵高,等. 新型优化同心筒自力发射流场机理与降温效果[J]. 火力与指挥控制,2015,40(5):79-82,86.

收稿日期:2020-12-28

(上接第 71 页)

#### 4) 振动工装复振试验

复振试验的目的是为了验证工装在经过两次预振试

验及一次鉴定级正弦振动试验后结构本身有无受到影响,见图 10,  $x, y, z$  3 个方向的控制曲线全部都在容差范围内且平稳波动,可证明工装结构无损坏。

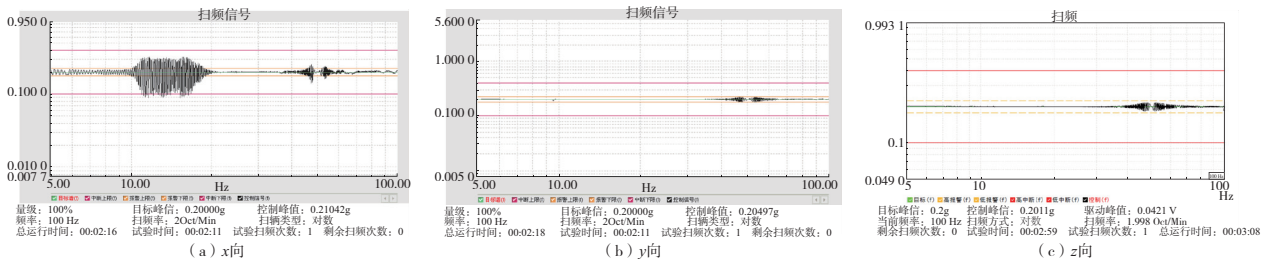


图 10 复振试验控制点曲线

### 4.3 工装鉴定试验结果分析

振动工装鉴定试验每个方向都进行了 4 次试验,可归纳如下:扫工装基频—验证工装传递率—模拟正式试验—验证工装结构稳定性。流程综合考虑整个试验过程,涵盖了工装工艺鉴定时各方面的情况,且 4 次试验的振动控制曲线都在设定的±10%的容差范围内波动,满足“对于正弦扫频或定频振动,保持在规定振幅的±10%以内<sup>[6-7]</sup>”的工装判定标准,可认定该工装结构合理,可进行带载试验。

## 5 结语

通过设计适用于大型天线的振动工装,分析工装设计过程中的关键点,用有限元仿真对方案阶段的工装结构进行分析,提前了解工装的基频和薄弱点并对其进行完善。工装投产后,用试验验证的方式逆向证明了此大型振动工装设计方案阶段关键点把握的准确性、仿真数据的正确

性,可为后续大型振动工装的设计提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 高喆,张玉方,刘宁宁,等. 机载光电吊舱垂向振动工装设计[J]. 电视技术,2019,43(5):98-102.
- [2] 熊伟华. 某大尺寸 LCD 振动试验工装设计及固有频率分析[J]. 环境技术,2019,37(6):181-184.
- [3] 初永志,陆振玉,刘昌儒,等. 航天产品振动工装设计[J]. 机电工程技术,2020,49(3):167-169.
- [4] 胡志强. 随机振动试验应用技术[M]. 北京:中国计量出版社,1996.
- [5] 孙现忠,杨正才,彭振国,等. ANSYS 软件在热电池随机振动工装设计中的应用[J]. 电源技术,2020,44(1):132-134.
- [6] GJB 899A—2009 可靠性鉴定和验收试验[S].
- [7] GJB 150.16A—2009 军用设备环境试验方法 第 16 部分振动试验[S].

收稿日期:2020-12-28