

doi: 10.7690/bgzd.2018.10.005

## 水下摆动模拟发射试验装置结构设计

王叶奔儒, 谈乐斌, 潘孝斌

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 为满足武器水下发射的特殊环境与特殊要求, 对水下摆动模拟发射试验装置结构进行设计。对于在研的某水下摆动模拟发射试验平台, 根据给定技术参数, 运用 3 维建模软件设计了水下摆动模拟发射试验装置, 对传动系统的结构进行了设计和不同运动模式计算分析, 并对试验装置可能受到的各种阻力进行了分析计算。分析结果表明: 该设计具有一定的实用性, 满足设计要求, 可为后续设计提供铺垫。

**关键词:** 水下发射; 模拟试验; 结构设计; 强度分析

**中图分类号:** TJ6   **文献标志码:** B

## Structure Design of Underwater Swaying Simulated Launching Test Device

Wang Yeberu, Tan Lebin, Pan Xiaobin

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science &amp; Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to meet the special environment and special requirements of underwater launch of weapons, the structure of underwater swing simulated launch test device is designed. For a certain in the research of underwater launch simulation test platform, according to the given technical parameters, using three-dimensional modeling software to design the underwater launch simulation test device, the structure of transmission system for the design and calculating and analyzing the different movement patterns and the test device can be all kinds of resistance is used for calculation. The analysis results show that this design has certain practicability, meets the design requirements, and can provide a foundation for the subsequent design.

**Keywords:** underwater launching; simulation test; structure design; strength analysis

## 0 引言

现代海战中, 武器水下发射的比重越来越大, 武器水下发射的重要性以及对战争走势的影响力也越大。为了满足水下发射的特殊环境与特殊要求, 笔者根据某研究所的要求, 设计了一种水下摆动发射机构<sup>[1-2]</sup>。

## 1 主要技术指标

## 1) 管筒。

直径:  $\Phi 312$  mm; 有效长度: 2 245 mm;

总长度: 2 300 mm。

## 2) 俯仰机构。

工作角度:  $0^\circ \sim 100^\circ$ ;

等速运动时: 最大动态工作角度:  $40^\circ$ ; 角速度:  $1 \sim 30$  ( $^\circ$ )/s;

正弦运动时: 摆动中心角:  $90^\circ$ ; 摆动角度最大幅值:  $5^\circ$ ; 频宽: 0.5 Hz。

## 2 总体结构

水下发射装置总体结构如图 1 所示, 主要由底

座、摇架、发射管、燃气发生器、驱动装置等构成, 由伺服电机、减速器驱动, 可绕旋转轴在工作角度范围内摆动, 实现等速运动和正弦运动。运动过程中, 点火信号使燃气发生器工作, 产生一定压力燃气, 实现模拟弹发射。

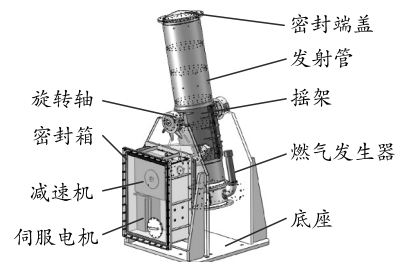


图 1 水下发射装置总体结构

## 2.1 发射筒体

发射筒体装配结构如图 2 所示, 主要由发射管外筒体、3 段内筒体、凸模、初容腔、燃气发生器等组成, 总长约 1 900 mm, 外筒体外径  $\Phi 354$  mm, 壁厚 8 mm, 主体部件均为 0Cr18Ni9 不锈钢材质, 摇架夹持段外径  $\Phi 356$ , 摇架夹持在外筒体偏底部, 使回转中心与重心位置靠近, 偏差不超过 50 mm。

收稿日期: 2018-08-06; 修回日期: 2018-09-07

作者简介: 王叶奔儒(1993—), 男, 安徽人, 硕士研究生, 从事机械结构设计研究。

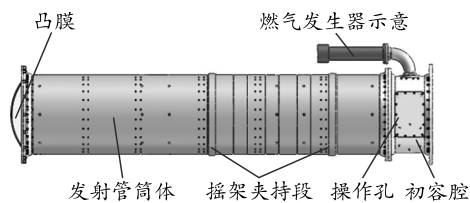


图 2 发射管装配结构



图 6 部分结构装配实物

## 2.2 底座结构

底座结构如图 3 所示，主要由底板、侧板、轴承支座等焊接构成，底板平面 1 000 mm×1 000 mm，能够满足现场安装要求，旋转轴承中心高度 1 250 mm。底座主要起支撑摆动部件作用，同时在侧板上安装驱动系统、电气接线和限位结构等。

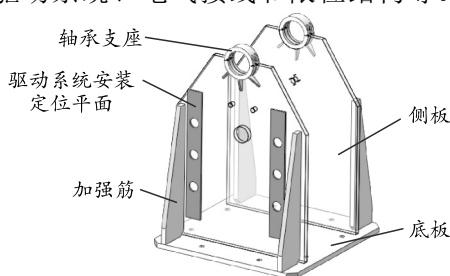


图 3 底座结构

## 2.3 摇架结构

摇架结构如图 4 所示，主要由筒体、旋转轴、密封轴套、齿弧、机械限位块等组成。摇架主要作用为定位发射管，在驱动作用下使发射绕旋转中心摆动。齿弧与旋转轴同轴心，与焊接在摇架上的连接件螺纹连接，由圆弧端面进行定位，极限工作角度为 40°~110°，由机械限位块限位。

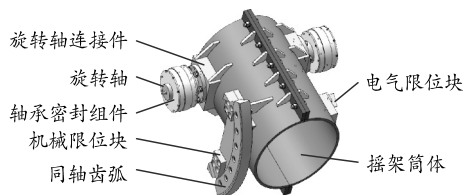


图 4 摇架结构装配

在旋转轴处选用内径为 60 mm 的深沟球轴承，采用骨架密封件进行旋转密封，密封工作压力为 0.3 MPa，轴承处的密封结构如图 5 所示。部分结构装配实物如图 6 所示。

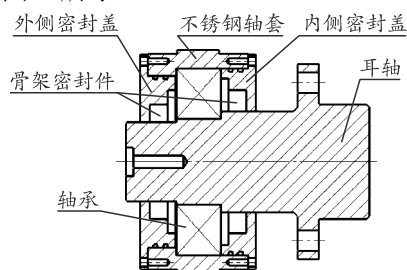


图 5 耳轴装配结构

## 3 传动系统结构

### 3.1 匀速运动模式分析

最大角速度 30(°)/s(5 r/min)，运动范围 45°~105°，加速段角位移 10°(匀加速)，匀速段角位移 40°，减速段角位移 10°(匀减速)，共 60°。匀速运动时的速度分布如图 7 所示。

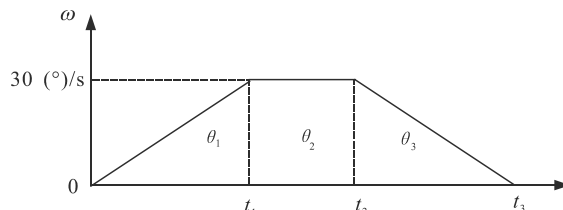


图 7 匀速运动时的速度分布

计算参数如下：

匀加速阶段，运动角位移  $\theta_1=10^\circ$ ，加速至角速度  $\omega=0.523\ 6\ \text{rad/s}(30\ (^\circ)/\text{s})$ ， $t_1=0.667\ \text{s}$ ，角加速度  $\varepsilon_1=0.786\ \text{rad/s}^2(45\ (^\circ)/\text{s}^2)$ ；

匀速阶段， $\theta_2=40^\circ$ ，角速度  $\omega=0.523\ 6\ \text{rad/s}(30\ (^\circ)/\text{s})$ ， $t_2=t_1+1.333=2\ \text{s}$ ；

匀减速阶段， $\theta_3=10^\circ$ ，由角速度  $\omega=0.523\ 6\ \text{rad/s}(30\ (^\circ)/\text{s})$  开始减速， $t_3=t_2+0.667=2.667\ \text{s}$ ，角加速度  $\varepsilon_3=-0.786\ \text{rad/s}^2(-45\ (^\circ)/\text{s}^2)$ 。

所以， $\omega_{\max}=0.523\ 6\ \text{rad/s}(30\ (^\circ)/\text{s})$ ， $\varepsilon_{\max}=0.786\ \text{rad/s}^2(45\ (^\circ)/\text{s}^2)$ 。

### 3.2 正弦运动模式分析

角位移运动方程为

$$\theta = \frac{5\pi}{180} \sin(\pi t - \frac{\pi}{2}) = -\frac{5\pi}{180} \cos(\pi t), \quad \theta_{t=0} = -\frac{5\pi}{180}. \quad (1)$$

对式(1)求导后可得角速度  $\omega$ 、角加速度  $\varepsilon$  函数：

$$\begin{aligned} \omega &= \theta' = \frac{5\pi^2}{180} \sin(\pi t), \quad \omega_{t=0} = 0, \\ \varepsilon &= \theta'' = \frac{5\pi^3}{180} \cos(\pi t), \quad \varepsilon_{t=0} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

角度、角速度、角加速度变化过程如图 8—10 所示。所以， $\omega_{\max}=0.274\ 2\ \text{rad/s}$ ， $\varepsilon_{\max}=0.861\ 3\ \text{rad/s}^2$ 。

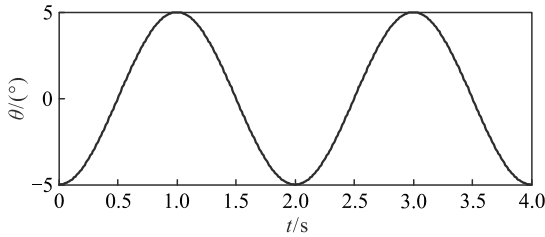


图 8 角度变化过程

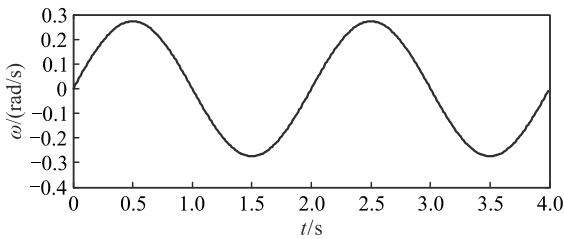


图 9 角速度变化过程

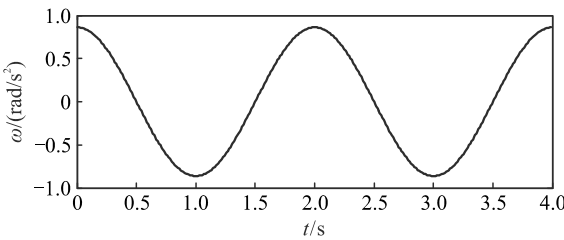


图 10 角加速度变化过程

### 3.3 运动负载分析

#### 1) 科氏加速度产生的运动负载。

由于发生过程中发射管的牵连运动为转动，必然产生科氏加速度，科氏加速度位置及方向如图 11 所示。

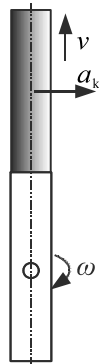


图 11 科氏加速度

科氏加速度计算式为

$$a_k = 2\omega v_r \tag{3}$$

式中： $a_k$  为科氏加速度； $\omega$  为发射管转速； $v_r$  为模拟弹在发射管内的相对运动速度<sup>[3]</sup>。

按最大加载情况考虑，当模拟弹运动至发射管口部时，匀速运动时发射管最大转速为  $\omega_{\max}=0.523\ 6\ \text{rad/s}$ ，正弦运动时的转速相对较低，模拟弹出口相对运动速度取为  $v_r=15\ \text{m/s}$ ，发射管口部到旋转轴距离为  $L=2\ 000\ \text{mm}$ ，模拟弹质量为  $m=135\ \text{kg}$ ，由于科氏加速度产生的负载扭矩计算式如下：

$$T_{ak\_max} = m(2\omega_{\max} v_r)L \tag{4}$$

将上述数据计算代入得  $T_{ak\_max}=4\ 241\ \text{N}\cdot\text{m}$ 。

#### 2) 不平衡力矩负载。

根据试验要求<sup>[4-6]</sup>，对匀速运动而言，发射管的工作范围为  $75^\circ\pm 30^\circ$ ，即  $45^\circ\sim 105^\circ$ 。由于  $45^\circ\sim 55^\circ$  为加速阶段，并且科氏加速度产生的阻力转矩较大，在驱动计算中可忽略  $45^\circ\sim 55^\circ$  范围内不平衡力矩的作用，由于重力产生的最大不平衡力可以按发射角为  $55^\circ$  时进行计算。根据力矩平衡关系，可得最大不平衡力矩为

$$T_g = (mL + m_1 L_1)g \sin \theta_{\max} \tag{5}$$

式中： $m$ 、 $L$  与科氏加速度计算中相同取值； $m_1$ 、 $L_1$  分别为发射管质量和质心至旋转轴距离，取  $m_1=350\ \text{kg}$ ， $L_1=0.1\ \text{m}$ ， $\theta_{\max}=(90-55)^\circ=35^\circ$ ，可计算得  $T_g=1\ 680\ \text{N}\cdot\text{m}$ 。

在计算中未考虑弹体发射后浮力的影响，实际重力不平衡力矩小于计算值。

#### 3) 水阻力矩负载。

由流体力学可知，水阻力与水流相对速度平方成正比，在最大载荷状态下，发射管及模拟弹的载荷强度如图 12(a)所示，呈二次曲线变化规律。为了简化计算，将其载荷强度考虑成线性关系，并且保证最大载荷强度相等，简化成图 12(b)所示，由此计算得到的水阻转矩应大于实际情况。

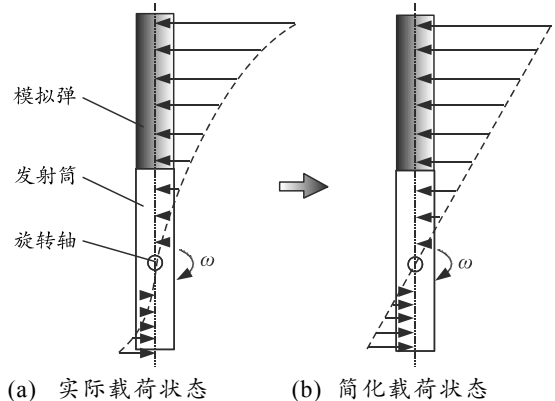


图 12 水阻转矩简化计算模型

取发射管外径 350 mm，长度 2 400 mm，旋转

轴处于中间位置, 根据上述运动分析, 匀速运动和正弦运动模式下的最大角速度分别为 0.523 6 和 0.274 2 rad/s, 当模拟弹运动至发射管口部时, 模拟弹末端相对水流速度分别约为 1.676 和 0.878 m/s, 计算模型中取水流速度取为 1.8 和 1 m/s。

为了获取最大水流速度下模型末端的载荷作用强度<sup>[7]</sup>, 采用如下方法计算。水流以 2 m/s 速度垂直扰流直径 350 mm, 长 1 000 mm 的圆柱, 如图 13 所示, 以圆柱壁面受到的合力除以圆柱长度得到载荷强度, 积分得到旋转水阻扭矩载荷<sup>[8-9]</sup>。

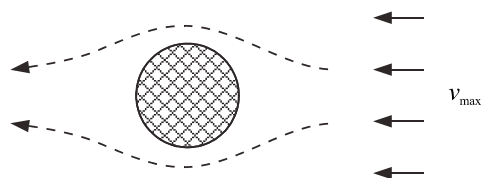


图 13 载荷强度分析模型

通过流场仿真分析, 计算得到的水绕流圆柱速度场分布如图 14 所示, 通过软件计算得到的圆柱壁面合力约为 330 N; 因此, 当水流速度为 1.8 m/s 时, 圆柱表面载荷作用强度为 260 N/m。可得载荷强度分布规律为

$$y = \frac{260}{3.2} h \quad (6)$$

式中  $h$  为距旋转轴垂直距离, m。

因此, 可积分计算得水阻力转矩

$$T_r = \int_{-1.2}^{3.2} \frac{260}{3.2} h^2 dh \quad (7)$$

由积分计算得, 水阻力转矩为 935 N·m。考虑到发射管及摇架表面实际结构, 按 1.2 倍取值, 水流阻力转矩为 1 122 N·m, 该值应大于实际旋转运

动阻力, 且具有一定余量。

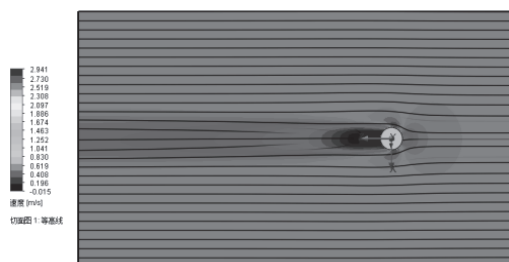


图 14 水绕流圆柱速度流场

## 4 结束语

按照给定参数, 笔者设计实现了满足要求的一套试验装置。通过数值计算确定了该装置能够满足功能要求以及强度要求, 并为后续的电机选型等工作进行了一系列铺垫。

## 参考文献:

- [1] H. 克里尔, M. 萨默菲尔德. 火炮内弹道学[M]. 南京: 华东工程学院弹道研究所, 1981: 10-80.
- [2] 马震宇. 美法潜射飞航导弹运载器及其发展[J]. 飞航导弹, 2008, 38(5): 9-12.
- [3] 严金坤. 液压动力控制[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1986: 22-98.
- [4] 李田科, 沙卫晓, 刘炜, 等. 某型发射装备伴随保障系统[J]. 兵工自动化, 2017, 36(2): 27-29.
- [5] 田艳云. 机械产品安全设计及评价研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2014.
- [6] 李悦, 周儒荣. 燃气发生器喷喉面积对导弹发射动力的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(3): 353-357.
- [7] 谈乐斌, 潘孝斌, 顾辉. 火炮人-机-环境系统工程[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2010: 32-76.
- [8] 肖虎斌, 赵世平. 燃气蒸汽式发射动力装置复杂内流场数值模拟[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(4): 392-395.
- [9] 赵承庆, 姜毅. 气体射流动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998: 12-90.