

# 平面四杆机构在舰载垂直发射装置 舱口盖系统中的应用分析

刘永亮, 任克亮, 马旭轮, 张基明

(中国船舶重工集团公司第七一三研究所, 郑州 450015)

**摘要:** **目的** 研究在舰载垂直发射装置舱口盖系统中设计平面四杆机构的方案的可行性与可靠性。**方法** 提出舱口盖开盖系统设计方案, 建立平面四杆机构开盖模型, 进行理论分析与计算, 建立 ADAMS 动力学仿真模型, 对曲柄摇杆机构进行仿真分析, 并与理论计算值进行对比。进行 30~90 kg 负载试验, 计算舱口盖开盖的角度和时间。**结果** 舱口盖开盖解锁机构各构件的长度及电机的开盖扭矩应不小于 569 N·m, 转速应小于 10 r/min。电机的开盖扭矩值应不小于 509 N·m, 复核复算结果基本一致。舱口盖开盖的角度应大于 93°, 开盖时间为 2.8 s, 满足要求。**结论** 验证了方案的可行性, 为其他垂直发射装置的舱口盖设计提供了工程经验。

**关键词:** 平面四杆机构; 舱口盖开盖系统; 舱口盖开盖解锁机构; 曲柄摇杆机构; 舰载垂直发射装置

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2019.05.004

**中图分类号:** TJ393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2019)05-0013-05

## Application of Plane Four Poles Mechanism in Hatch Opening System of Ship Vertical Launcher

LIU Yong-liang, REN Ke-liang, MA Xu-lun, ZHANG Ji-ming  
(713 Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Zhengzhou 450015, China)

**ABSTRACT: Objective** To research the feasibility and reliability of scheme for designing plane four poles mechanism for hatch system of ship vertical launcher. **Methods** The hatch opening system scheme was proposed according to the opening angle and time index in ship vertical launcher. The four poles mechanism model was built for theoretical analysis and calculation. An ADAMS dynamic model was built to simulate the crank and rocker mechanism and compare with the calculated value. The 30-90 kg load test was carried out to calculate the angle and time of hatch opening. **Results** The hatch torque should not be less than 569 N·m, and speed should be less than 10 r/min. The cover opening torque of the motor should not be less than 509 N·m. The review result was basically consistent. The opening angel should be larger than 93° and the opening time should be 2.8 s. The requirements were met. **Conclusion** The scheme feasibility is verified. It provides engineering experiences for design of hatch for vertical launcher.

**KEY WORDS:** plane four poles mechanism; hatch opening system; hatch opening and unlocking mechanism; brace and rocker mechanism; ship vertical launcher

舱口盖系统是舰载垂直发装置的重要组成部分, 既要满足开关盖的技术性能要求, 又要在波浪等外载

荷的作用下满足刚强度要求<sup>[1]</sup>。新型超音速导弹要求垂直发射装置有高的贮弹密度和机动性、快的瞬时反应能力，客观上要求舱口盖系统开关盖时间短、反应快、耗能小、可靠性高。

目前垂直发射装置的舱口盖系统主要分为液压式和机电式两大类。其中液压式舱口盖系统受航区、季节、气候、海况的影响，对液压启闭系统的可靠性要求非常高<sup>[2]</sup>。在极端情况下，液压系统存在脉动冲击、液压油泄漏等不利因素，影响到舱口盖系统密封的安全性。

平面四杆机构作为一种常见的机械式传动机构，可以方便地实现较复杂的运动。在连杆机构中，可以传递较大的动力。可以得到不同的传动比，实现不同运动规律的要求，便于加工，且生产成本低。

作为一项关键技术，文中提出采用平面四杆机构电动开盖的方式，来实现舱口盖的快速开启和关闭，并通过计算、仿真和试验对舱口盖的技术性能进行摸底。

### 1 主要性能指标

舰载垂直发射装置带有发控设备，对舱口盖系统发出操控指令，完成舱口盖动作。有以下主要性能指标：

- 1) 自收到发控设备“舱口盖打开”指令到控制设备给出“舱口盖打开好”信号，时间不超过 3 s。
- 2) 舱口盖开启角度（甲板面夹角）应大于 93°。

### 2 理论计算

舱口盖开盖解锁机构分为开盖机构和解锁机构两部分<sup>[3-10]</sup>：开盖机构为平面四杆机构中的曲柄摇杆机构，解锁机构为平面四杆机构的曲柄滑块机构。两机构通过凸轮拨盘实现联动，其动力由一台低速大扭矩电机提供，弹舱盖开盖解锁机构循环完成的动作顺序是：解锁、开盖、关盖、上锁。

根据舱口盖功能要求，确定开盖机构曲柄摇杆机构各构件的长度及其传动比，进行负载分析，完成电机的转速及输出转矩计算。然后运用机械系统仿真软件 ADAMS 进行计算机仿真。

#### 2.1 确定各构件的长度及传动比

考虑装置上所提供的安装空间，最终选用下面的曲柄摇杆机构来实现传动，其运动分析如图 1 所示。机构中两个死点位置位于同一直线上，即图 1 中所示的  $C_1$  和  $C_2$  点。其中，曲柄为杆  $CD$ ；摇杆为杆  $AB$ ；机构中  $AB_1C_1D$  位置表示舱口盖关闭到位； $AB_2C_2D$  位置表示舱口盖开启到位。曲柄  $CD$  转动幅度为  $180^\circ$ ，摇杆  $AB$  转动幅度为  $95^\circ$ 。

四杆机构的主要设计参数分别为： $AB=94.85\text{ mm}$ ,

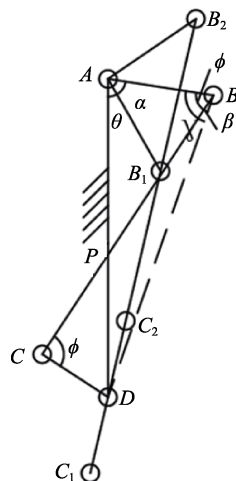


图 1 四杆机构运动分析

$BC=241.88\text{ mm}$  ,  $CD=70\text{ mm}$  ,  $AD=250.2\text{ mm}$  ,  $\theta=28.78^\circ$  ,  $CD+AD < AB+BC$  , 满足杆长条件。

随着舱口盖开启角度  $\alpha$  的改变，舱口盖连杆机构瞬时传动比也在改变。用 C 语言编制相应的计算程序，可以计算出舱口盖开启角度  $\alpha$  所对应连杆机构瞬时传动比的数值解，如图 2 所示。

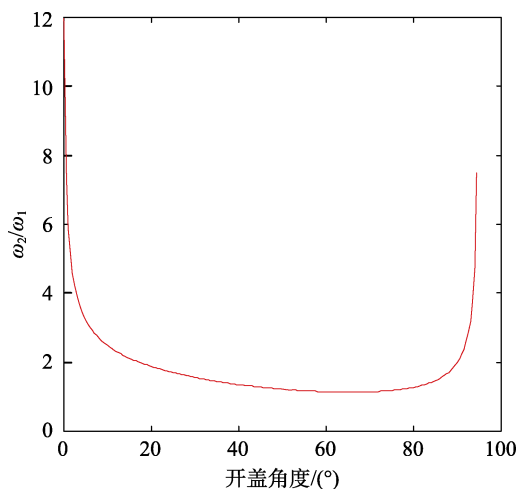


图 2 舱口盖连杆机构瞬时传动比曲线

由曲线可以看出，在接近两个死点位置附近，传动比非常大，在中间位置最小。根据工程应用实际情况，假设曲柄作匀速转动，其角速度为常数。则摇杆即舱口盖的转动角速度的变化趋势为：启动时角速度从 0 加速到最大，然后减速至终点时为 0。在初始位置和终点位置的速度均近似为 0，这种变化对开盖是有利的。

#### 2.2 负载分析

由开盖过程可以看出：负载转矩随开启角度的变化而变化，如图 3 所示。

负载转矩计算：

$$M_l = F_z \cdot L \cos \alpha + (F_y + P_w) \cdot L \cdot \sin \alpha$$

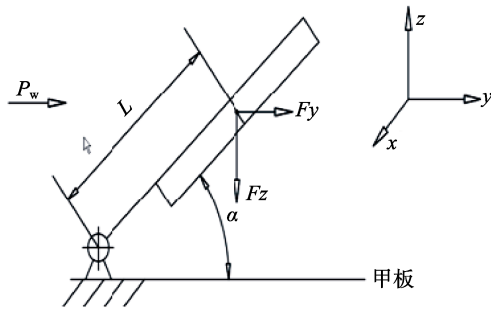


图 3 舱口盖受力

式中： $P_w$  为风载荷，N； $F_y$  为  $y$  方向摇摆过载力； $F_z$  为  $z$  方向摇摆过载力。

由此可见，负载转矩随舱口盖开启角度的变化而变化，不是常数。

利用计算机编程求解出舱口盖开启角度负载转矩的数值解。由数值解可以看出，负载转矩在弹舱盖开启约  $5^\circ$  时，达到其最大值  $M_{\max} = 812.7 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，如图 4 所示。

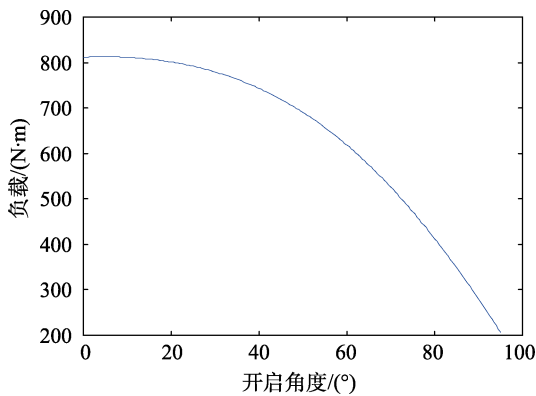


图 4 舱口盖负载转矩曲线

### 2.3 确定所选用电机输出扭矩和转速

1) 电机输出扭矩。因为动能的增量必须  $\geq 0$ ，从能量角度来说，必须满足  $W_{\text{驱}} \geq W_{\text{负}}$  (不考虑摩擦、机械损失)，即：

$$M_1 \omega_2 t \leq M \omega_1 t$$

$$M \geq \frac{\omega_2}{\omega_1} M_1$$

式中： $M$  为电机输出扭矩， $\text{N}\cdot\text{m}$ ； $M_1$  为负载转

矩， $\text{N}\cdot\text{m}$ ； $\frac{\omega_2}{\omega_1}$  为机构传动比。

电机输出扭矩不小于机构传动比与负载转矩的乘积，用 C 语言编制相应的计算程序进行计算，电机转矩  $M$  应满足： $M \geq 569 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

2) 电机转速。电机转速主要由开盖时间和机构传动比确定。开盖时间小于 3 s，电机转动  $180^\circ$  后弹舱盖开启到位，电机转速  $n$  应满足： $n \geq 10 \text{ r/min}$ 。

## 3 仿真分析

### 3.1 模型假设

通过对四杆机构的运动分析，作出如下假设：

- 1) 按机构运行情况对各构件分配质量及转动惯量。
- 2) 各构件之间可以相互转动。
- 3) 各杆件连接处在传动过程中，运动副无相对运动。
- 4) 忽略各杆件连接处在传动过程中的摩擦力和磨损情况。
- 5) 忽略各部件之间的装配误差，不考虑其他因素对系统的影响。

### 3.2 结构描述

四杆机构的拓扑关系如图 5 所示。机架通过  $f_1$  转动副与曲柄一端联接，曲柄一端通过  $f_2$  转动副与连杆一端联接，连杆一端通过  $f_3$  转动副与摇杆联接，摇杆一端通过  $f_4$  转动副与机架联接。整个系统可以进行平面运动，共 9 个自由度。

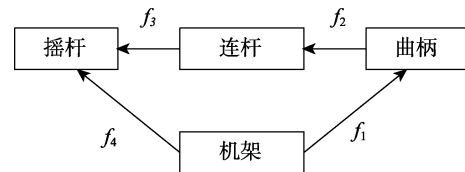


图 5 结构拓扑图

### 3.3 动力学模型

根据动力学模型可导出系统总动能  $T$ ，总势能  $V$ ，总耗散能  $D$ ，它们均为系统的结构参数与广义坐标的函数。由拉格朗日方程得：

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}} = Q$$

$x = x(x_1, x_2, x_3, \dots)$  最后得系统运动微分方程：

$$[M] \{\ddot{X}\} + [C] \{\dot{X}\} + [K] \{X\} = \{Q\}$$

式中： $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$  分别为 994 阶质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵； $X$ 、 $\dot{X}$ 、 $\ddot{X}$  分别是广义坐标的位移向量、速度向量和加速度向量； $\{Q\}$  为广义力向量。

### 3.4 仿真过程及结果分析

本次仿真环境是在软件 ADAMS/View 环境中进行的<sup>[11]</sup>，在驱动连杆的旋转副上加角速度驱动。在作用对象的连杆上加上负载。仿真模型及开盖所需扭矩如图 6 和图 7 所示。从图 5 中可以看出，开盖所需的扭矩大于  $550 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，与理论计算值所得的扭矩不小于  $569 \text{ N}\cdot\text{m}$  基本一致，只要电机输出扭矩大于  $569 \text{ N}\cdot\text{m}$  就能满足开盖所需动力要求。

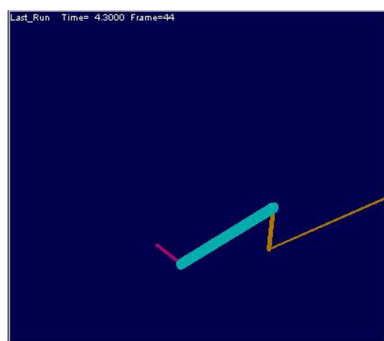


图6 舱口盖开盖机构仿真模型

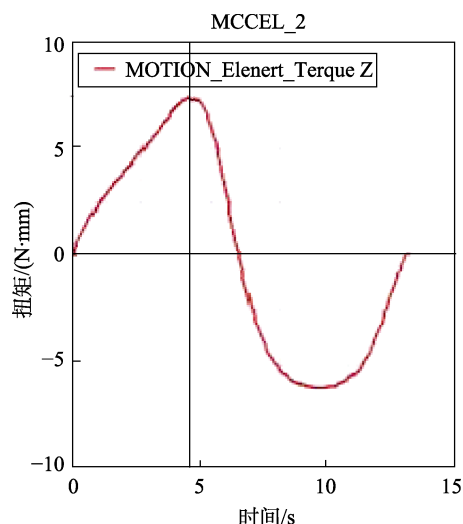


图7 舱口盖开盖机构所需扭矩

## 4 试验及结果

对机构进行开盖试验,试验过程中,反复执行开盖动作数次,记录下每次开盖时间和开盖角度以及机构运行情况,见表1—4。为验证所选用电机的功率是否满足要求,通过加配重块来模拟风载荷及摇摆载荷,每个配重块质量为30 kg,共3块,每加一块配重块做10次。从表1—4中可以看出,配重块对每

次开盖时间和开盖角度影响不大,每次开盖时间均小于3 s,开盖角度均大于93°,且机构运行正常<sup>[12-15]</sup>。因此开盖时间和开盖角度均满足舱口盖系统主要性能要求。

表1 不加负载开盖情况

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
开盖角度	94°31'	94°28'	94°21'	94°21'	94°20'	94°21'	94°24'	94°19'	94°19'	94°24'
开盖时间/s	2.84	2.84	2.84	2.83	2.83	2.83	2.84	2.84	2.83	2.84

表2 30 kg 负载开盖情况

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
开盖角度	94°22'	94°20'	94°17'	94°16'	94°41'	94°42'	94°37'	94°34'	94°40'	94°37'
开盖时间/s	2.85	2.85	2.85	2.84	2.87	2.88	2.87	2.86	2.84	2.85

表3 60 kg 负载开盖情况

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
开盖角度	94°50'	94°40'	94°35'	94°38'	94°32'	94°32'	94°35'	94°35'	94°34'	94°34'
开盖时间/s	2.83	2.84	2.83	2.83	2.80	2.82	2.82	2.82	2.82	2.82

表4 90 kg 负载开盖情况

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
开盖角度	94°43'	93°22'	93°25'	93°24'	93°23'	93°26'	93°27'	93°25'	93°27'	93°24'
开盖时间/s	2.83	2.78	2.80	2.79	2.789	2.79	2.78	2.79	2.79	2.78

## 5 结论

四杆机构的设计满足舱口盖系统的主要技术指标要求。通过试验验证了舱口盖系统方案设计可行,运行可靠,实现了快速开盖的战术指标要求,可为其他垂直发射装置的舱口盖设计提供工程经验。

## 参考文献:

- [1] 国庆见,程栋,张剑.提高某型导弹发射装置筒盖系统开盖平稳性研究[J].舰船科学与技术,2004,26(6):33-37.
- [2] 秦严明.船舶舱口盖液压启闭系统的同步性能分析与比较[J].机械工程师,2018(2):77-78.

- [3] 赵世田, 付莹莹, 曾勇, 等. 基于 Simulink 的四杆机构及连杆点的运动学仿真研究[J]. 煤矿机械, 2017, 38(5): 183-186.
- [4] 刘峰, 余武斌. 基于 VB 的舰船某开盖机构模拟装置数学模型仿真[J]. 舰船科学与技术, 2004(26): 59-61.
- [5] 柯扬明, 蓝兆辉. 基于数值方法的四杆翻转机构动力学分析[J]. 信息技术, 2018, 34(1): 122-125.
- [6] 孔凡臣, 孙建伟, 张邦成, 等. 基于四杆曲柄滑块机构的可展机构设计[J]. 长春工业大学学报, 2018, 39(1): 1-7.
- [7] 王琦, 何仁. 平面四杆机构运动轨迹多目标综合优化及误差仿真研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(9): 55-58.
- [8] 祖文明, 李华. 三次 B 样条曲线的四杆机构形状优化与仿真[J]. 中国工程机械学报, 2017, 15(2): 125-129.
- [9] 车林山, 程志红. 液压支架直线四杆机构综合的差分进化算法 [J]. 机械设计, 2017, 34(6): 65-70.
- [10] 王良诣, 姜礼杰, 王勇. 基于遗传拟牛顿混合算法的四杆机构优化 [J]. 合肥工业大学学报, 2018, 41(2): 150-153.
- [11] 王新梅, 陈志华. 基于 ADAMS 的平面四连杆机构仿真分析[J]. 机械工程师, 2018(6): 17-19.
- [12] 王曦. 多用途船舱口盖强度直接计算研究[J]. 中国水运, 2016, 37(7): 49-50.
- [13] 余武斌, 徐国华, 刘义成, 等. 舰艇导弹发射筒开盖机构模拟装置数学模型研究[J]. 舰船科学与技术, 2002, 24(6): 34-38.
- [14] 罗欣健, 王辉, 乐贵高. 某导弹垂直发射装置的机构设计与强度校核[J]. 机械制造, 2013, 4(4): 59-62.
- [15] 王君, 牛克佳, 聂良益, 等. 单自由度复杂平面连杆机构的奇异性分析[J]. 中国机械工程, 2018, 29(1): 36-40.