

武器装备

# 章动力下引信安全与解除隔离时间的动力学分析

张银环<sup>1,2</sup>, 薛静云<sup>1,2</sup>, 韦永全<sup>3\*</sup>

(1.渭南职业技术学院 建筑工程学院, 陕西 渭南 714000; 2.西安工业大学 机电工程学院, 西安 710021; 3.陕西铁路工程职业技术学院 铁道工程学院, 陕西 渭南 714026)

**摘要:** **目的** 研究弹丸章动对引信 S&A 时间的影响。**方法** 基于多刚体动力学及外弹道飞行理论, 建立章动作用下引信安全与 S&A 延期解除隔离时间的数学模型。通过 ADAMS 仿真得到不同章动力矩对引信 S&A 延期解除隔离时间关系曲线。**结果** 弹丸章动运动使得水平转子的合力矩增大, 章动与引信 S&A 延期解除隔离时间成反比。弹丸出炮口速度为 450 m/s, 章动力为 0.35 N 时, S&A 延期解除隔离时间为 65 ms, 与其他文献的延期解除隔离时间 69 ms 相差 6%。**结论** 本文所建立的 S&A 数学模型准确性较高, 可为引信精准解除隔离、分析膛炸问题提供理论依据。

**关键词:** 机械引信; 章动; 多刚体动力学; 延期解除隔离时间; 安全解除隔离

中图分类号: TJ43.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)12-0001-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.12.001

## Kinetic Analysis of S&A Time for Fuze under Nutation Forces

ZHANG Yinhan<sup>1,2</sup>, XUE Jingyun<sup>1,2</sup>, WEI Yongquan<sup>3\*</sup>

(1. School of Construction Engineering, Weinan Vocational & Technical College, Shaanxi Weinan 714000, China;

2. School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

3. Railway Power College, Shaanxi Railway Institute, Shaanxi Weinan 714026, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effect of projectile nutation on the S&A time of fuze. A mathematical model for the delayed arming time of the fuze S&A under nutation motion was established based on the multi rigid body dynamics and the external ballistic flight theory. The relationship curve between different nutation torques and the delayed arming time of the fuze S&A was obtained through ADAMS simulation. The results showed that the nutation motion made the combined moment of the horizontal rotor increase, and the nutation motion was inversely related to the delayed arming time. The velocity of the projectile out of the muzzle was 450 m/s, the nutation force was 0.35 N, and the delayed arming time was 65 ms, which was 6% different from the delay arming time of 69 ms in other reference. This result verifies that the S&A mathematical model established in this

收稿日期: 2024-08-06; 修订日期: 2024-10-11

Received: 2024-08-06; Revised: 2024-10-11

基金项目: 智能建造与人工智能(青年)科技团队(WZYQNKJTD202309); 陕西省教育科学规划项目(SGH23Y3178); 陕西省教育厅项目(SJS2023YB115)

Fund: Intelligent Construction and Artificial Intelligence (Youth) Technology Team (WZYQNKJTD202309); Shaanxi Provincial Education Science Planning Project (SGH23Y3178); Project of Shaanxi Provincial Department of Education (SJS2023YB115)

引文格式: 张银环, 薛静云, 韦永全. 章动力下引信安全与解除隔离时间的动力学分析[J]. 装备环境工程, 2024, 21(12): 1-8.

ZHANG Yinhan, XUE Jingyun, WEI Yongquan. Kinetic Analysis of S&A Time for Fuze under Nutation Forces[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(12): 1-8.

\*通信作者 (Corresponding author)

paper has high accuracy, and can provide a theoretical basis for accurately arming fuze and analyzing chamber explosion problems.

**KEY WORDS:** mechanical fuze; nutation; multi-rigid dynamics; delayed arming time; S&A

延期解除隔离时间作为考核机械引信安全性能的关键指标,受到国内外相关学者的密切关注<sup>[1-2]</sup>。引信能否在设定时间内准确解除隔离,关系到弹丸毁伤效果及工作人员的生命安全。引信无返回力矩钟表机构亦称安全解除隔离装置(Safety & Arming, S&A),起到引信延期解除隔离的作用。研究S&A延期解除隔离时间的影响因素,对于优化引信内部零件及外观尺寸等参数,解决引信瞎火、膛炸及晚炸等故障具有重要意义。然而,S&A安全解除隔离装置结构复杂,解除隔离过程将在极短的时间内(几十毫秒)完成一系列动作,同时该过程受到弹道环境力的影响,可能导致S&A内部件的运动速度、荷载发生变化,从而影响整个过程的时效性和准确性。可见,研究S&A延期解除隔离的影响因素是一项极具挑战性的工作<sup>[3]</sup>。

依据GJB 373A—1997《引信安全性设计准则》,引信安全系统至少应该包括2个利用不同的环境信息的保险件,章动作为引信外弹道主要力学环境,研究其对延期解除隔离的作用机理具有重要的理论意义和实用价值<sup>[4-5]</sup>。研究S&A延期解除隔离时间的传统方法为制造多个物理样机之后反复测试、试验及改进,研制周期长、成本高。针对此问题,陈瑾等<sup>[6]</sup>采用虚拟样技术,对S&A运动过程进行动态仿真,直观地展现机构解除隔离的全过程。刑宇飞等<sup>[7]</sup>建立了榴弹发射动力学模型,通过ADAMS技术模拟弹丸在膛内运动过程,得到了弹丸膛内运动的部分参数,并仿真得到了离心保险机构解除隔离时间,为延期解除隔离的研究提供了理论基础,但尚未研究外弹道对其影响。Jeong等<sup>[8]</sup>通过弹丸后效期环境力的分析,提出了一种用于实际弹药射击的微型机械安全机构并进行了仿真,得到章动对S&A机构在外弹道飞行过程中产生的影响。项帆<sup>[9]</sup>分析了引信外弹道受力情况,将章动角理论变化规律同改进六自由度刚体运动方程计算出的章动角变化规律进行了对比分析,得到了章动角在炮口附近为幅值减小的正弦曲线。辛思宇<sup>[10]</sup>、Zheng等<sup>[11]</sup>通过分析引信全弹道受力情况,建立了擒纵机构启动特性的数学模型,但未讨论擒纵轮驱动力矩对延期解除隔离时间的影响。艾志远等<sup>[12]</sup>建立了S&A延期解除隔离时间的数学模型,并通过仿真方法验证了模型的正确性。黄成等<sup>[13]</sup>、袁备等<sup>[14]</sup>建立了机械触发引信对应不同章动角的虚拟样机,并对其进行了动力学和运动学的联合仿真分析,得出章动运动会影响S&A触发,但未建立二者相互耦合的理论模型。文献[15-16]建立了弹丸对应不同初始扰动下的

虚拟样机模型,并进行了动力学仿真,得出弹丸在离开炮口处存在较大的章动力,揭示了章动力的作用机理,但未讨论章动对延期解锁时间的影响。Qian等<sup>[17]</sup>基于拓扑描述方法,建立了弹丸飞行和弹炮耦合系统射击全过程的运动学和动力学方程,分析了章动对弹丸炸点位置的作用机理,为章动影响引信S&A延期解除隔离时间提供了初步思路。丁树奎等<sup>[18]</sup>、Zhao等<sup>[19]</sup>为研究远程火炮射击时弹丸起始扰动的形成机理,基于凯恩方程,建立了火炮运动环境下的弹丸动力学模型,给出弹与炮相互作用力和力矩的表达式。彭启蒙等<sup>[20]</sup>建立并解算了大中口径弹丸刚体外弹道六自由度微分方程组,得到章动在弹丸出炮口后20 ms内达到最大。目前,针对章动对S&A延期解除隔离时间作用机理的研究较少,而且S&A延期解除隔离时间正处于弹丸出炮口到转子转正的时间段,因此,研究章动对S&A延期解锁时间的影响具有重要的理论意义和实际应用价值。

基于此,本文研究了弹丸章动对S&A延期解除隔离时间的作用机理。采用多刚体动力学理论,通过力矩传递过程,建立章动扰动下延期解除隔离时间的数学模型。结合ADAMS虚拟样机技术,分析并讨论章动对S&A延期解除隔离时间的影响规律。

## 1 引信 S&A 结构及工作原理

S&A为本文的研究对象,整体结构,如图1所示。S&A包括水平转子、第一过渡轮、第二过渡轮、卡摆和擒纵轮等核心部件。其中,水平转子作为动力源,传动系统由第一、二过渡轮组成,擒纵机构由擒纵轮和卡摆组成,卡摆作为计时机构。S&A是机械时间引信的重要组成部分,其工作原理:S&A采用水平转子作为隔爆机构,保险状态时,爆炸序列中的直列顿感原件与隔爆机构中的敏感原件错位。当弹丸出炮口时,在离心力的作用下,水平转子转动,带动过渡轮及擒纵机构运动,表现为卡摆在擒纵轮上做骑马运动,从而达到计时效果。经过一定时间延迟后,水平转子转正到位S&A解除隔离,引信处于待发状态,从而实现工作状态的成功转换。结合GJB/Z 135《引信工程设计手册》及图1中的S&A内部结构,得到了机构的主要技术参数,见表1。

## 2 数学模型

当S&A自身结构参数固定时,其所受环境激励直接影响延期解除隔离时间。由于延期解除隔离过程

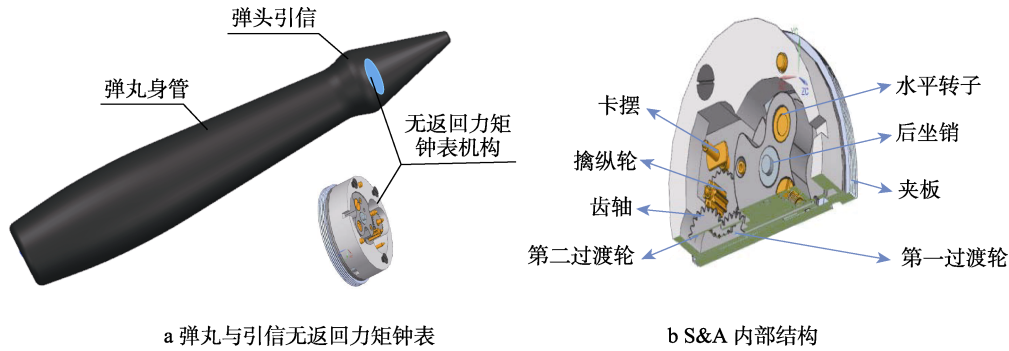


图 1 弹丸及引信无返回力矩钟表机构部分三维模型

Fig.1 Three-dimensional model of projectile and fuze S&A: a) projectiles and fuses with no return torque clock; b) S&A internal structure

表 1 无返回力矩钟表机构设计参数  
Tab.1 Design parameters of no-return moment clock mechanism

参数	取值
卡摆转动惯量 $J_b$	$3.5876 \times 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
卡摆旋转半径 $r_b$	$3.24 \times 10^{-3} \text{ m}$
擒纵轮齿顶圆半径 $r_1$	$3.69 \times 10^{-3} \text{ m}$
卡摆擒纵轮中心距 $L$	$4.79 \times 10^{-3} \text{ m}$
卡摆半径 $r$	$0.38 \times 10^{-3} \text{ m}$
钟表机构质量 $M_p$	$1.99 \times 10^{-2} \text{ kg}$
卡摆出瓦与进瓦角度 $H$	$105.37^\circ$
水平转子旋转角度 $\alpha$	$142^\circ$
传动比 $K$	5.5
擒纵轮齿数 $Z$	24
齿轮传动系数 $\eta$	0.95
钟表机构质量 $m_z$	$6.35 \times 10^{-2} \text{ kg}$
擒纵机构旋转半径 $r_w$	$2.56 \times 10^{-3} \text{ m}$
赤道与极转动惯量比 $I_p/I_b$	8.56
弹丸与引信质心距 $l$	45.35 cm
离心转子的质量	22.53 g
转子半径	8 mm
转子转动惯量	$5.426 \times 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

发生在弹丸出炮口处, 此阶段 S&A 受到弹丸章动的影响较大<sup>[22]</sup>。为建立 S&A 延期解除隔离时间的动力学模型, 首先应得到卡摆振动 1 个周期所需的时间, 包括传冲阶段时间和自由运动阶段时间。

### 2.1 延期解除隔离时间

假设卡摆的振动周期  $T$  均相同, 则延期解除隔离  $t_d = nT$ , 振动次数  $n$  容易获得。因此, 本文重点讨论卡摆振动周期  $T$  的计算问题。按照分段法得卡摆周期:

$$T = 2(t_1 + t_2) \quad (1)$$

式中:  $t_1$  为传冲阶段时间;  $t_2$  为自由运动阶段时间。

1) 传冲阶段时间  $t_1$ 。S&A 机构原动机的输入力矩  $M_D$ , 克服摩擦阻力矩之后的剩余力矩为输出力矩

$M_0$ 。一部分为驱动轮提供动力矩; 另一部分则用于克服齿轮传动时的阻力矩——工作阻力矩, 即:

$$M_D = M_0 f_0 + J_0 \theta_0 + M_0 \quad (2)$$

式中:  $M_0 f_0$  为驱动轮的摩擦力矩;  $J_0$  为与驱动轮固连系统的转动惯量;  $\theta_0$  为系统的角加速度。由式 (2) 可知, S&A 传动轮系各件的工作力矩为:

$$\begin{cases} M_0 = M_D - M_0 f_0 - J_0 \theta_0 \\ M_1 = M'_1 - M_0 f_1 - J_1 \theta_1 \\ M_2 = M'_2 - M_0 f_2 - J_2 \theta_2 \\ M_e = M'_e - M_0 f_e - J_e \theta_e \\ M_k = M'_k - M_0 f_k - J_k \theta_k \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $M_1$  为第一传动轮的工作力矩;  $M_2$  为第二传动轮的工作力矩;  $M_e$  为擒纵轮的工作力矩;  $M_k$  为卡摆的工作力矩。

$$M'_k = \frac{\eta}{i} M_{\pm} \quad (4)$$

式中:  $\eta$  为传动效率;  $i$  为从动件与主动件的角速度之比。

同理, 得  $\omega_{\text{从}} = i \omega_{\text{主}}$ , 将该式对时间求导, 得:

$$\frac{\theta_{\text{从}}}{\theta_{\text{主}}} = i。其中, \theta_{\text{从}} 为从动件的角加速度; \theta_{\text{主}} 为主动$$

件的角加速度, 易得:

$$\frac{\theta_1}{\theta_0} = i_0 \quad \frac{\theta_2}{\theta_1} = i_1 \quad \frac{\theta_e}{\theta_2} = i_2 \quad \frac{\theta_k}{\theta_e} = i_e \quad (5)$$

将式子 (3)、(4)、(5) 联立, 可得:

$$\begin{aligned} & J_k \theta_k + J_e \theta_e \frac{\eta_e}{i_e} + J_2 \theta_2 \frac{\eta_2 \eta_e}{i_2 i_e} + J_1 \theta_1 \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_e}{i_1 i_2 i_e} + \\ & J_0 \theta_0 \frac{\eta_0 \eta_1 \eta_2 \eta_e}{i_0 i_1 i_2 i_e} = M_D \frac{\eta_0 \eta_1 \eta_2 \eta_e}{i_0 i_1 i_2 i_e} + M_D \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_e}{i_1 i_2 i_e} + \\ & M_D \frac{\eta_2 \eta_e}{i_2 i_e} + M_D \frac{\eta_0}{i_0} + M_D - J_k i_0 i_1 i_2 i_e \theta_0 - \\ & J_e i_1 i_2 i_e \theta_0 - J_2 i_2 i_e \theta_0 - J_1 i_0 \theta_0 - J_0 \theta_0 - [Mf_k + \\ & Mf_e \frac{\eta_e}{i_e} + Mf_2 \frac{\eta_2 \eta_e}{i_2 i_e} + Mf_1 \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_e}{i_1 i_2 i_e} + Mf_0 \frac{\eta_0 \eta_1 \eta_2 \eta_e}{i_0 i_1 i_2 i_e}] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{令: } J'_k &= J_k + J_e \frac{\eta_e}{i_e^2} + J_2 \frac{\eta_2 \eta_e}{(i_2 i_e)^2} + J_1 \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_e}{(i_1 i_2 i_e)^2} + \\ J_0 \frac{\eta_0 \eta_1 \eta_2 \eta_e}{(i_0 i_1 i_2 i_e)^2} \quad J'_k &= J_k + J_e \frac{\eta_e}{i_e^2} + J_2 \frac{\eta_2 \eta_e}{(i_2 i_e)^2} + J_1 \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_e}{(i_1 i_2 i_e)^2} + \\ J_0 \frac{\eta_0 \eta_1 \eta_2 \eta_e}{(i_0 i_1 i_2 i_e)^2}, \text{可得:} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Mf'_k &= Mf_k + Mf_e \frac{\eta_e}{i_e} + Mf_2 \frac{\eta_2 \eta_e}{i_2 i_e} + Mf_1 \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_e}{i_1 i_2 i_e} + \\ Mf_0 \frac{\eta_0 \eta_1 \eta_2 \eta_e}{i_0 i_1 i_2 i_e} \end{aligned} \quad (7)$$

则式(6)可化简为:

$$M_k = M_D \frac{\eta_e \eta_2 \eta_1 \eta_0}{i_e i_2 i_1 i_0} - Mf'_k = J'_k \theta \quad (8)$$

对卡摆的运动方程(8)积分,设初始条件为  $t=0$ ,

$$\frac{d\theta}{dt} = 0 \text{ 可得:}$$

$$J'_k \frac{d\theta}{dt} = M_k t \quad (9)$$

再对式(9)进行积分,积分上下限为  $t=0 \sim t_1$ ,

$\theta=0 \sim \beta$  化简可得:

$$t_1 = \sqrt{\frac{2J'_k \beta}{M_k}} \quad (10)$$

式中:  $J'_k$  为卡摆的导出转动惯量,又称为折合转动惯量,由系统参数决定;  $M_k$  为不考虑惯性时,卡摆的驱动力矩;  $\beta$  为卡摆的振幅,即最大摆动角度。

2) 自由运动阶段时间  $t_2$ 。视自由运动段卡摆的运动为匀速转动,以冲击段末  $t_1$  的角速度  $\theta_b$  作为自由运动段的平均角速度。同理可得,传冲时间  $t_2$

$$t_2 = \tau \sqrt{\frac{J'_k}{2M_k \beta}} \quad (11)$$

联合公式(1)、(9)和(11),可得:

$$T = 2 \sqrt{\frac{2J'_k \beta}{M_k}} \left( 1 + \frac{\tau}{2\beta} \right) \quad (12)$$

式中:  $M_k$  由折合转动惯量及卡摆传冲阶段的角速度  $\theta_k$  决定;  $\tau$  为自由运动阶段卡摆的摆动角度;  $J'_k$  为折合到卡摆上的转动惯量。

由式(12)可得,影响延期解除隔离时间振动周期  $T$  的因素与  $M_k$  有关。

$$M_k = M_D \frac{\eta_0 \eta_1 \eta_2 \eta_e}{i_0 i_1 i_2 i_e}, \quad T = f(M_k) \quad (13)$$

结合式(2)(3)可得,  $T$  的影响因素为水平转子的输入力矩  $M_D$ ,即可表示为:  $T=f(M_D)$ 。

## 2.2 水平转子合力矩 $M_b$

由文献[16]可得,弹丸出炮口后所受的压力如图2所示,主要集中在弹丸头部。

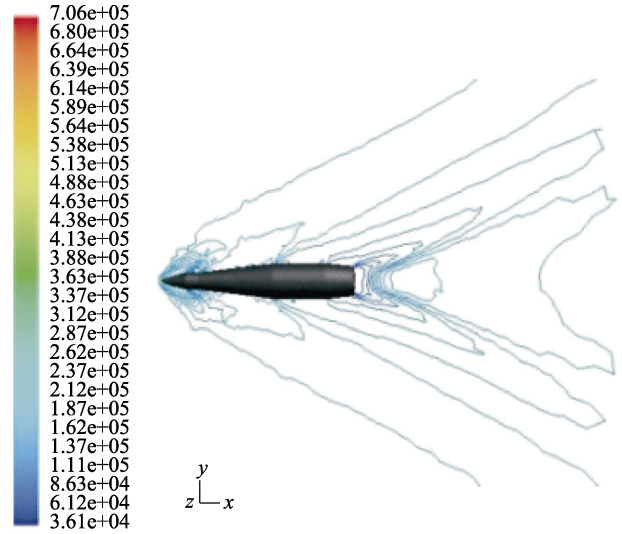


图2 弹丸飞行中压力等值线

Fig.2 Pressure contour lines during projectile flight

本文的研究对象 S&A 处于引信头部,因此需迫切研究章动对延期解除隔离时间的影响。根据弹道飞行理论,绘制出弹丸出炮口时的运动曲线,如图3所示。定义地面坐标系为  $O_d(x_d, y_d, z_d)$ 。

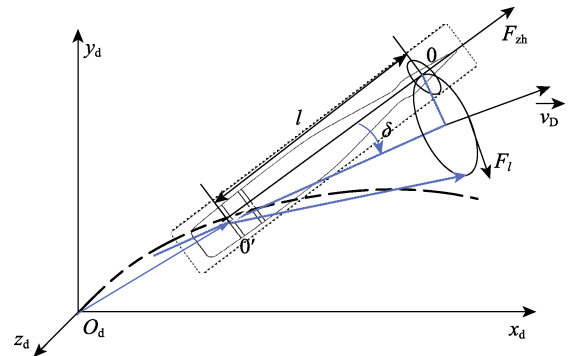


图3 章动作用下弹丸炮口运动曲线

Fig.3 Motion curve of projectile muzzle under nutation action

弹丸出炮口瞬间,受章动的影响,由图1可得,章动力及章动角的计算如下:

$$\begin{cases} F_{z_d} = ml\Omega^2 \\ \Omega = \frac{\omega_g}{2} \frac{I_p}{I_b} \delta \end{cases} \quad (14)$$

由图3分析可得,弹丸章动在其飞行速度方向产生的力矩  $M_{z_d}$  为:

$$M_{z_d} = r \cdot F_{z_d} \cos \delta = r \cdot ml \frac{\omega_g}{2} \frac{I_p}{I_b} \delta \cos \delta \quad (15)$$

式中:  $l$  为弹丸质心到引信质心的距离;  $\delta$  为引信章动角;  $M'_D$  为不考虑章动情况下,弹丸做离心运动产生的力矩;  $M_{z_d}$  为弹丸章动力矩对卡摆转动力矩的贡献量。

$$M_D = M'_D + M_{z_d} = m\omega^2 r + \cos \delta ml \frac{\omega_g}{2} \frac{I_p}{I_b} \delta \quad (16)$$

将式 (16) 代入式 (13), 可得:

$$M_k = \left( m\omega^2 r + \cos \delta ml \frac{\omega_g I_p}{2 I_b} \delta \right) \frac{\eta_0 \eta_1 \eta_2 \eta_e}{i_0 i_1 i_2 i_e} \quad (17)$$

其中, 弹丸出炮口时转速为常数, 且等于炮口处弹丸角速度, 即  $\omega = \omega_g$ ,  $I_p$ 、 $I_b$  分别为弹丸的极和赤道转动惯量;  $l$  为弹丸质心到引信质心之间的距离。由此可得, 当机构给定时, 其他参数均固定, 弹丸的章动角  $\delta$  大小, 影响水平转子的和力矩  $M_D$ , 进而影响卡摆振动周期  $T$  及延期解除隔离时间。

综上所述, 本文通过对弹丸后效期弹道环境力分析, 建立了章动影响下卡摆振动周期的数学模型, 为 S&A 延期解除隔离时间仿真验证提供理论依据。

### 3 仿真及结果分析

为研究章动对 S&A 延期解除隔离时间的影响, 通过 ADAMS 虚拟仿真技术展开。将三维机械绘图软件(UG)中建立的 S&A 模型以 .x\_t 格式导入 ADAMS 软件, 根据零件位置关系完成机构装配。建立 S&A 机构的三维仿真模型, 对 S&A 机构添加约束、碰撞接触、摩擦力和离心力之后, 方可进行仿真分析。

#### 3.1 仿真准备

1) 构件约束。在 ADAMS 运动学仿真中, 首先根据 S&A 机构的运动原理, 需定义运动部件接触副及固定副, 添加不同构件之间的约束关系<sup>[23]</sup>, 如图 4 所示。转子和中心轴之间添加固定副, 中心轴和下夹板之间添加旋转副; 齿轮与下夹板之间添加旋转副; 在第一过渡轮、第二过渡轮、擒纵轮之间添加旋转副。S&A 模型含有 6 个零件, 2 个固定副, 5 个旋转副, 4 个实体接触。为了使仿真结果更接近系统实际运行特性, 应考虑摩擦和阻尼对系统运动造成的影响。因此, 在不同构件之间还应添加摩擦、碰撞等关系。

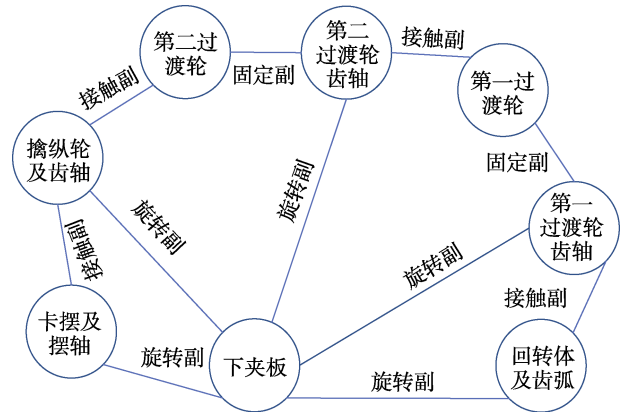


图 4 S&A 驱动模型结构  
Fig.4 S&A driven model

2) 接触力和碰撞力。为保证仿真的真实性, S&A 仿真之前引入接触、碰撞关系可使系统接近实际的物理模型。本文选择基于阻尼系数和刚度系数的接触力计算 IMPACT 函数, 摩擦力采用库仑摩擦模型<sup>[21]</sup>。

综上, S&A 添加了构件之间的约束关系、摩擦力及实体碰撞, 为该机构的运动学和动力学仿真提供充分准备。

#### 3.2 结果分析

在 ADAMS 中设置弹丸初速为 450 m/s, 射角为 15°, 最佳仿真步长采用  $10^{-5}$  s<sup>[22]</sup>。将通过仿真获得的弹丸在章动力下的各项气动力及力矩函数加载到弹丸模型上, 得到弹丸动力学模型。

1) 驱动力矩与延期解除隔离时间的关系。由式 (18) 可知, 章动对卡摆延期解除隔离时间的影响表现为水平转子的驱动力矩  $M_D$ 。同时, 为了验证驱动力矩与延期解除隔离时间的关系, 由公式 (18) 及表 1, 计算得到水平转子驱动力矩  $0.378 \times 10^{-3}$  N·m 作为仿真驱动, 采用 ADAMS 进行仿真得到水平转子及卡摆运动曲线, 如图 5 所示。

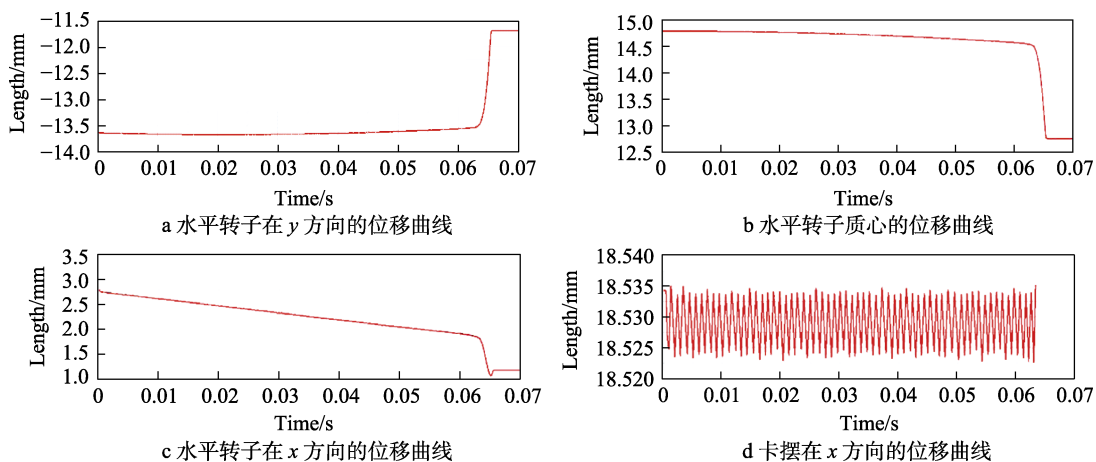


图 5 水平转子驱动力矩与延期解除隔离时间关系

Fig.5 Relationship between horizontal rotor driving torque and delayed arming time: a) displacement curve of horizontal rotor in y direction; b) displacement curve of horizontal rotor center of mass; c) displacement curve of horizontal rotor in x direction; d) displacement curve of card pendulum in x direction

由图 5 可得, 在  $t=65$  ms 时, 随着时间的推移, 水平转子在  $x$ 、 $y$  方向的位移均不再变化, 说明该转子已经转正到位。在系统坐标系下, 水平转子起始坐标由图 5a、c 可得为  $(3.0, -13.62)$ 。在延期解除隔离位置时, 其终止位置为  $(1.5, -11.75)$ , 从而解算出水平转子从开始启动到延期解除隔离一共转动的角度为:

$$\theta = \arctan \frac{\Delta y}{\Delta x} = \arctan \frac{-11.75 - (-13.63)}{1.5 - 3.0} = 141.34^\circ$$

由此可得, 水平转子在 S&A 运动过程中转动共转动  $141.34^\circ$ , 与表 1 中水平转子转动实际测量转动角度  $142^\circ$  吻合, 验证了仿真过程及结果的有效性。图 5b 显示, 水平转子质心角位移随着时间的变化不断减小, 表明质心不断靠近转子转轴。在  $t=66$  ms 时, 质心不再随着时间的变化而变化, 说明转子已转正到位。同时, 由图 5d 卡摆的运动曲线可得, 在整个运动过程中, 卡摆呈周期振动, 无尖峰, 即卡摆受力均恒, 延期解除隔离时间为 64 ms, 与文献[25]中的延期解除保险时间 69 ms 接近, 说明本文建立的数学模型的准确性及仿真过程的科学性。

2) 章动力对解锁时间的影响。为了进一步研究章动力对 S&A 延期解除隔离时间的影响, 当弹丸出炮口时, 水平转子的力矩为 297 N, 根据式 (15) 求解章动力分别为 0.12、0.35、0.83 N, 二者之和作为仿真的输入力, 得到章动力对 S&A 延期解除隔离时间结果, 如图 6 所示。

由图 6b 可得, 章动力  $F_{zd}$  与引信 S&A 机构延期解除隔离时间  $t_d$  成反比关系, 与式 (12) 获得的引信振动周期与章动力结论相契合。弹丸出炮口前, 章动力逐渐增加, 转子的初始力矩出现较大波动。在  $t=9$  ms 时, 弹丸刚出炮口瞬间, 章动力达到最大, 此时摩擦力不断增加, 转子转动角速度急剧增大。说明在延期解除隔离的初始阶段, 章动力对 S&A 延期解除隔离时间的影响较明显。无齿轮啮合的时间减小, 占整个解除隔离时间的比例较小。随着仿真时间的继续增加, 不同章动力下, 卡摆的角速度呈现固定周期振动并趋于稳定。同时图 6b 表明, S&A 在转正过程中延期解除隔离时间与卡摆角速度之间的关系, 在转动初期存在较大的摩擦力, 但卡摆很快进入稳定计时阶段。

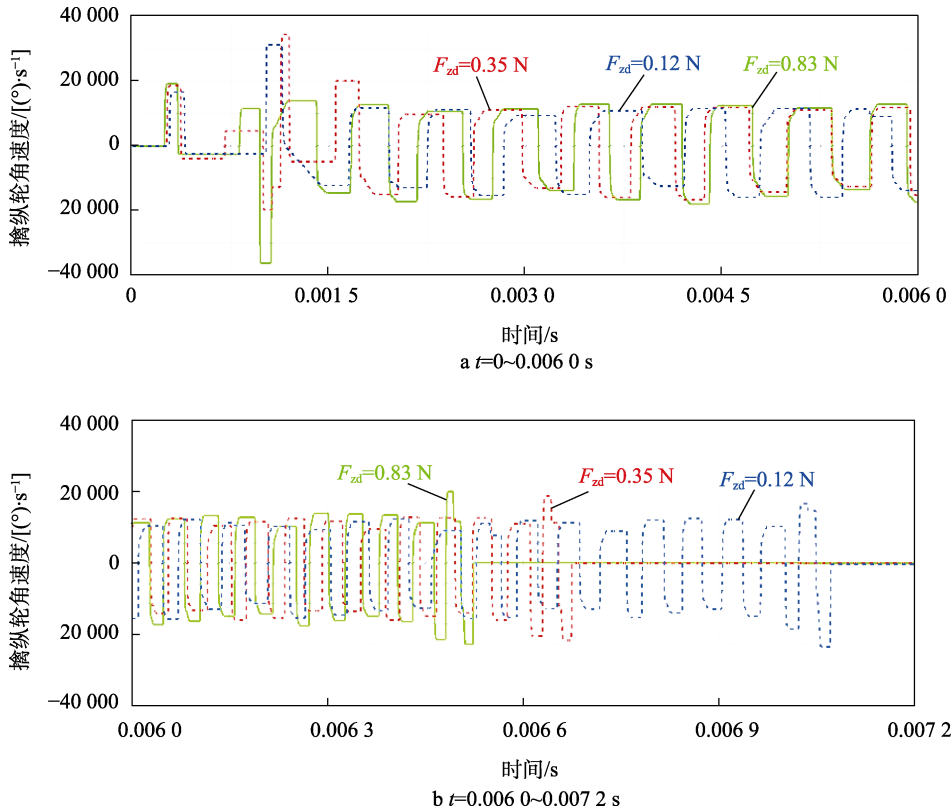


图 6 不同时刻不同章动力矩对解锁时间的影响

Fig.6 Influence of different nutation force on arming time at different time

其余参数不变, 在 3 种不同章动力下, 延期解除隔离时间分别为 0.064、0.067、0.071 s, 说明章动力与 S&A 延期解除隔离时间成反比关系。在章动力  $F_{zd} = 0.12$  N 时, 延期解除隔离时间  $t_d = 71$  ms, 与文献[25]解除隔离时间 69.3 ms 非常接近。最大章动力

$F_{zd} = 0.83$  N 时,  $t_d = 64$  ms, 与文献[25]相比, 延期解除保险时间缩短了 7.25%, 说明章动使得 S&A 的延期解除隔离时间减少。分析主要原因: 首先, 考虑角度不同, 本文考虑了弹丸出炮口时章动力对延期解除隔离时间的影响, 而文献[25]尚未考虑; 其次, 2 种

方法对碰撞、接触和摩擦的处理不同, 在 ADAMS 仿真中利用 Impact 函数, 理论计算中使用恢复系数法求解接触力; 最后, 摩擦力矩在理论计算中定义为仅由摩擦力产生, 而在 ADAMS 仿真中摩擦力矩求解还考虑由负弯矩对其影响, 这也是计算结果出现偏差的原因。

综上所述, 本文考虑章动存在下建立的 S&A 延期解除隔离时间的动力学模型的准确性高, 能较真实可视地反映 S&A 的运行过程。

## 4 结论

本文主要研究章动对无返回力矩钟表机构延期解除隔离时间的影响。基于多刚体动力学及外弹道飞行理论, 建立了章动作用下延期解除隔离时间的数学模型。通过研究可得以下结论:

1) 弹丸出炮口瞬间合力矩受章动较大, 通过理论及仿真计算可得, 当弹丸出炮口速度不变时, 不同章动力与 S&A 延期解除隔离时间成反比。

2) 弹丸出炮口速度为 450 m/s, 章动力为 0.35 N, S&A 延期解除隔离时间为 65 ms, 与文献[25]实验结果基本吻合, 验证本文所建立的 S&A 数学模型合理, 仿真结果可靠性高。

因此, 本文研究考虑了章动作用下, 延期解除隔离时间的作用机理, 为引信精准解除隔离, 弹丸精准打击提供了理论依据。同时, 擒纵轮与卡摆间距对 S&A 延期解除隔离时间的影响研究至关重要。本文的数学模型及数值模拟方法为其进一步深入研究提供理论支撑/思路方向。

### 参考文献:

- [1] 王雨时, 纪永祥. 引信安全性现状分析与试验考核建议[J]. 探测与控制学报, 2021, 43(4): 1-8.  
WANG Y S, JI Y X. Situation Analysis and Qualification Test Advice on Fuze Safety[J]. Journal of Detection & Control, 2021, 43(4): 1-8.
- [2] 李占雄. GJB/Z135-2002《引信工程设计手册》主要技术内容分析(四)[J]. 国防技术基础, 2005(7): 11-13.  
LI Z X. Analysis of Main Technical Contents of GJB/Z135-2002 Fuze Engineering Design Manual (IV)[J]. Technology Foundation of National Defence, 2005(7): 11-13.
- [3] 张世伟, 李波, 王亚斌, 等. 引信安全与解除隔离装置的仿真模型构建[J]. 探测与控制学报, 2023, 45(2): 20-25.  
ZHANG S W, LI B, WANG Y B, et al. Fuze S & a Device Simulation Model Construction Method[J]. Journal of Detection & Control, 2023, 45(2): 20-25.
- [4] 赵振海. 对 GJB 373A—1997《引信安全性设计准则》的理解与探讨[J]. 国防技术基础, 2004(5): 35-38.
- [5] ZHAO Z H. Understanding and Discussion on GJB 373A—1997 Fuze Safety Design Criteria[J]. Technology Foundation of National Defence, 2004(5): 35-38.
- [6] QIAN L F, CHEN G S, TONG M H, et al. General Design Principle of Artillery for Firing Accuracy[J]. Defence Technology, 2022, 18(12): 2125-2140.
- [7] JEONG J H, EOM J, LEE S S, et al. Miniature Mechanical Safety and Arming Device with Runaway Escapement Arming Delay Mechanism for Artillery Fuze[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 279: 518-524.
- [8] 陈瑾, 彭志凌, 段昊言, 等. 基于 ADAMS 的引信保险机构运动学建模仿真分析[J]. 兵工自动化, 2023, 42(10): 51-54.  
CHEN J, PENG Z L, DUAN H Y, et al. Kinematics Modeling and Simulation Analysis of Fuze Safety Mechanism Based on ADAMS[J]. Ordnance Industry Automation, 2023, 42(10): 51-54.
- [9] 邢宇飞, 王利. 基于 ADAMS 的枪榴弹发射环境研究[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(6): 161-165.  
XING Y F, WANG L. Research on the Launching Environment of Gun Grenades Based on ADAMS[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(6): 161-165.
- [10] 项帆. 引信弹道炸外弹道力学环境研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.  
XIANG F. Research on the External Ballistic Mechanics Environment of Fuze Ballistic Explosion[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [11] 辛思宇. 引信惯性机构全弹道动态响应模拟仿真分析[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2022.  
XIN S Y. Simulation Analysis of Full Ballistic Dynamic Response of Fuze Inertia Mechanism[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2022.
- [12] ZHENG J J, LI Y C, HU M, et al. Feasibility Study of a Miniaturized Magnetorhological Grease Timing Trigger as Safety and Arming Device for Spinning Projectile[J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(11): 115030.
- [13] 艾志远, 李世中, 杨超, 等. 极低过载引信无返回力矩擒纵后坐保险机构[J]. 探测与控制学报, 2023, 45(1): 44-49.  
AI Z Y, LI S Z, YANG C, et al. Runaway Escapement Recoil Safety Mechanism for very Low Overload Fuze[J]. Journal of Detection & Control, 2023, 45(1): 44-49.
- [14] 黄成, 王中原, 常思江. 旋转稳定弹动力学弹道特性分析[J]. 北京理工大学学报, 2024, 44(9): 904-912.  
HUANG C, WANG Z Y, CHANG S J. Dynamic Ballistic Characteristics of Spin-Stabilized Projectiles[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2024, 44(9): 904-912.
- [15] 袁备, 段智敏, 郝永平, 等. 机械触发引信的章动运动仿真研究[J]. 成组技术与生产现代化, 2015, 32(3): 12-14.  
YUAN B, DUAN Z M, HAO Y P, et al. Research and Simulation on the Nutation of the Mechanical Fuse[J]. Group Technology & Production Modernization, 2015, 32(3): 12-14.

- [15] ROCHA Á, FAJARDO-TORO C H, RIOLA J M. Smart Innovation, Systems and Technologies[M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 347-357.
- [16] 宋芮德, 刘双杰, 郝永平, 等. 弹丸运动章动力对引信惯性机构作用的影响[J]. 弹箭与制导学报, 2019, 39(5): 5-8.  
SONG R D, LIU S J, HAO Y P, et al. Study on the Influence of Projectile Nutation Force on Fuze Inertia Mechanism[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2019, 39(5): 5-8.
- [17] QIAN L F, CHEN G S, TONG M H, et al. General Design Principle of Artillery for Firing Accuracy[J]. Defence Technology, 2022, 18(12): 2125-2140.
- [18] 丁树奎, 王良明, 杨志伟, 等. 远程火炮弹丸起始扰动的动力学特性[J]. 兵工学报, 2021, 42(4): 673-683.  
DING S K, WANG L M, YANG Z W, et al. Dynamic Property of the Initial Disturbance of Projectile for the Long-Range Artillery Howitzer[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(4): 673-683.
- [19] ZHAO L, YUE S, DU Z H, et al. Dynamics Analysis of Separation Mechanism for Rotating Projectiles at the End of Trajectory[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2024, 2024: 3713958.
- [20] 彭启蒙, 王雨时, 项帆, 等. 基于刚体外弹道学仿真的中大口径旋转炮弹引信力学环境[J]. 探测与控制学报, 2023, 45(2): 37-44.  
PENG Q M, WANG Y S, XIANG F, et al. Medium and Large Caliber Rotating Projectile Fuze Mechanical Environment Research Based on Rigid Body Exterior Ballistics Simulation[J]. Journal of Detection & Control, 2023, 45(2): 37-44.
- [21] ZHANG K B, LI W B, ZHENG Y, et al. The Dynamic Response of a High-Density Polyethylene Slow-Release Structure under Launching Overload[J]. Defence Technology, 2023, 26: 143-156.
- [22] 张银环, 肖秦琨, 刘星, 等. 章动对无返回力矩钟表机构延迟解锁时间的数值分析[J/OL]. 火炮发射与控制学报, 2024, 45: 1-8[2024-08]. <https://doi.org/10.19323/j.issn.1673-6524.202403002>  
ZHANG Y H, XIAO Q K, LIU X, et al. Numerical Analysis between the Nutation Wheel and Unlocking Time of the Fuze Runaway Escapement Clockwork[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2024, 45: 1-8[2024-08]. <https://doi.org/10.19323/j.issn.1673-6524.202403002>
- [23] 李增刚, 李保国. ADAMS 入门详解与实例[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2021.  
LI Z G, LI B G. Detailed Introduction and Examples of ADAMS[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2021.
- [24] OHOL R B, PARSHURAMKAR T N, THAKUR D G. Investigating the Effect of Abrupt Change in Geometry on Structural Failure of Artillery Projectile 155 mm[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2024, 24(2): 674-684.
- [25] 王立新. 引信无返回力矩钟表机构虚拟样机技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.  
WANG L X. Research on Virtual Prototyping Technology of Clock Mechanism without Return Moment of Fuze[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.