

# Study on Gyro-Stability of a Spinning Projectile Using ADAMS

Jisheng Ma

Artillery Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang Hebei  
Email: mjs\_jxy@163.com

Received: Mar. 2<sup>nd</sup>, 2017; accepted: Mar. 16<sup>th</sup>, 2017; published: Mar. 22<sup>nd</sup>, 2017

---

## Abstract

A simulation model of a spinning projectile is created using ADAMS. The component formulas of the overturning moment vector in global system are derived from the perpendicular relationship between the overturning moment vector and the resistance side of the projectile, and a FORTRAN subroutine is used to implement the overturning moment action. The gyro stability of the spinning projectile is simulated in ADAMS while the projectile under several different rotational speeds and overturning moments. The study results have reference value for the design and research on projectile stability.

## Keywords

Spinning Projectile, Gyro-Stability, ADAMS, Simulation

---

# 基于ADAMS的旋转弹丸陀螺稳定性研究

马吉胜

军械工程学院火炮工程系, 河北 石家庄  
Email: mjs\_jxy@163.com

收稿日期: 2017年3月2日; 录用日期: 2017年3月16日; 发布日期: 2017年3月22日

---

## 摘要

用ADAMS软件建立旋转弹丸的仿真模型, 基于翻转力矩矢量垂直于阻力面的特性给出了惯性坐标系中翻转力矩矢量分量的表达式, 通过FORTRAN子程序实现了翻转力矩的作用。然后用仿真模型对各种转速和各种翻转力矩幅值情况下的弹丸陀螺稳定性进行了仿真实验, 研究结果对弹丸的稳定性设计和研究具有参考价值。

## 关键词

旋转弹丸, 陀螺稳定性, ADAMS, 仿真

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

弹丸的稳定飞行具有极其重要意义, 要研究这个问题需要建立 6 自由度的弹丸运动方程组[1]-[6], 并进行数值求解, 过程复杂而不直观。ADAMS 是著名的机械系统动力学仿真软件, 可以方便快捷地建立复杂机械系统的动力学模型, 直观清晰地展示机械系统的动力学行为, 在各行各业获得日益广泛的应用。本文希望将这一先进的动力学仿真工具用于弹丸陀螺稳定性的仿真研究, 为弹丸飞行力学研究提供一种新的途径。旋转弹丸的模型建立比较简单, 但弹丸上的翻转力矩的施加是一个难点, 因为翻转力矩垂直于弹轴和弹丸质心速度矢量的平面, 即阻力面, 由于弹丸进动, 阻力面不断旋转, 因此, 翻转力矩的方向是不断变化的, 既不固定在弹丸上, 又不固定在空间某一点。本文基于矢量叉乘公式得出了在惯性坐标系中翻转力矩矢量的分量表达式, 通过 FORTRAN 语言编程, 实现了翻转力矩的施加。最后应用 ADAMS2010 建立了旋转弹丸的仿真模型, 进行了多工况仿真实验。研究结果对弹丸的稳定性设计和基于 ADAMS 的弹道仿真具有一定的参考价值。

## 2. 翻转力矩的施加

翻转力矩幅值的表达式如下[1] [2] [7]:

$$M_z = \frac{\rho v^2}{2} \cdot S l m'_z \delta \quad (1)$$

其中  $\rho$  为空气密度,  $v$  为弹丸飞行速度,  $S$  为弹丸最大横断面积,  $l$  为弹丸特征长度,  $m'_z$  为翻转力矩系数导数,  $\delta$  为攻角。在攻角较小时(保持弹丸陀螺稳定性的攻角即为小攻角),  $m'_z$  只与  $v$  有关。在小攻角时(1)式可以简化为:

$$M_z = k_v \delta \quad (2)$$

显然上式中的  $k_v$  在小攻角时只与  $v$  有关。

在图 1 所示的弹丸模型中, 翻转力矩方向的单位矢量表达式为:

$$\mathbf{n}_f = \mathbf{n}_d \times \mathbf{n}_v \quad (3)$$

其中是  $\mathbf{n}_f$  是翻转力矩方向的单位矢量,  $\mathbf{n}_d$  是弹轴上的单位矢量,  $\mathbf{n}_v$  是弹丸质心速度方向的单位矢量。坐标系  $oxyz$  是惯性坐标系,  $\mathbf{n}_v$ 、 $\mathbf{n}_d$  构成的平面即为阻力面,  $\mathbf{n}_f$ 、 $\mathbf{n}_d$ 、 $\mathbf{n}_v$  在惯性系中的分量分别是:

$\mathbf{n}_f = (n_{fx} \ n_{fy} \ n_{fz})$ 、 $\mathbf{n}_d = (n_{dx} \ n_{dy} \ n_{dz})$ 、 $\mathbf{n}_v = (n_{vx} \ n_{vy} \ n_{vz})$ , 则有

$$\begin{cases} n_{fx} = n_{dy} n_{vz} - n_{dz} n_{vy} \\ n_{fy} = n_{dz} n_{vx} - n_{dx} n_{vz} \\ n_{fz} = n_{dx} n_{vy} - n_{dy} n_{vx} \end{cases} \quad (4)$$

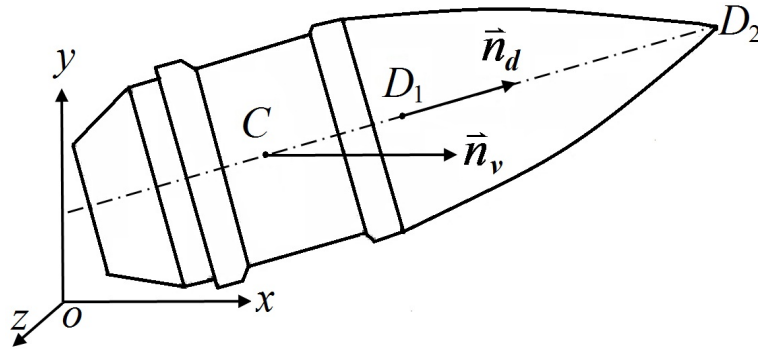


Figure 1. A projectile model  
图 1. 弹丸模型

$D_1$ 、 $D_2$  是弹轴上两点，其在惯性系中的坐标分别是  $(x_{D1} \ y_{D1} \ z_{D1})$ 、 $(x_{D2} \ y_{D2} \ z_{D2})$ ，则

$$\begin{cases} n_{dx} = (x_{D2} - x_{D1})/L \\ n_{dy} = (y_{D2} - y_{D1})/L \\ n_{dz} = (z_{D2} - z_{D1})/L \end{cases} \quad (5)$$

其中  $L = \sqrt{(x_{D2} - x_{D1})^2 + (y_{D2} - y_{D1})^2 + (z_{D2} - z_{D1})^2}$  是两点间的距离。

在仅考虑弹丸的陀螺稳定性时，可以认为速度矢量的方向不变，即  $\vec{n}_v$  是常矢量。在图 1 所示的弹丸上，质心速度矢量与惯性系  $x$  轴平行，则  $\vec{n}_v = (1 \ 0 \ 0)$ ，这样(4)式简化为：

$$\begin{cases} n_{fx} = 0 \\ n_{fy} = n_{dz} \\ n_{fz} = -n_{dy} \end{cases} \quad (6)$$

根据(2)、(6)式可以在弹丸上施加有三个分量的翻转力矩矢量，由于用到弹轴上两点  $D_1$ 、 $D_2$  的位置坐标，且弹轴的方位是不断变化的，需要调用 ADAMS 的位置坐标提取函数。通过 FORTRAN 子程序结合 ADAMS 的自定义函数，应用(2)、(6)式实现翻转力矩的施加。

### 3. 翻转力矩幅值为定值时的仿真

为了研究方便，先考虑翻转力矩幅值为定值时的情况，且在本文的仿真实验中，弹轴与弹丸质心速度矢量的夹角(即攻角)的初始值均设定为  $10^\circ$ 。弹丸转速为 10 转/秒，翻转力矩幅值为 0.3 牛顿米，弹尖上一点(D2)在垂直弹丸质心速度矢量的平面内的轨迹如图 2 所示，攻角变化如图 3 所示。

图 2 表明弹丸做进动和章动合成运动，图 3 表明弹丸攻角不断减小，体现了弹丸运动的陀螺稳定性。对于一个给定的转速，通过大量仿真计算可以确定常数翻转力矩的稳定阈值，超过该阈值，弹丸就会失去旋转稳定性。为了揭示弹丸攻角的变化规律，将弹丸运动过程的仿真时间延长至 250 秒，如图 4 所示，显然攻角最终达到稳定值，弹丸转化为规则进动。

弹丸转速为定值 10 转/秒时，翻转力矩幅值分别取 0.1 牛顿米~0.5 牛顿米的 5 个定值进行 5 次仿真，得到的弹丸进动周期和章动周期随翻转力矩幅值的变化曲线如图 5 所示。翻转力矩幅值为定值 0.3 牛顿米时，弹丸进动周期和章动周期随弹丸转速的变化曲线如图 6 所示。

### 4. 翻转力矩幅值随时间变化时的仿真

实际上翻转力矩随攻角和弹丸飞行速度变化，在研究弹丸陀螺稳定性时，可以认为在一个时间区间

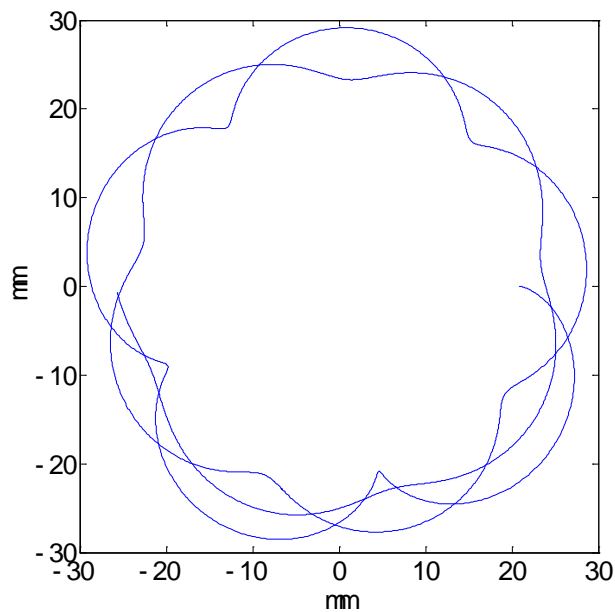


Figure 2. The Meplat track in a plane

图 2. 弹尖点在平面内的轨迹

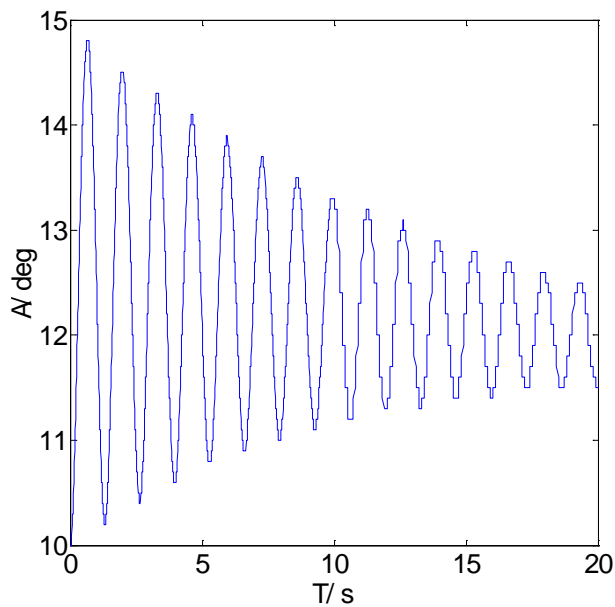


Figure 3. The attack angle curve

图 3. 攻角变化曲线

内，弹丸的飞行速度变化较小，因此(2)式中的  $k_v$  可视为常数，这样翻转力矩只是攻角的线性函数：

$$M_z = k\delta \quad (7)$$

为了便于与上面的仿真结果做对比，将攻角为  $10^\circ$  时的翻转力矩幅值设定为 0.1 牛顿米，则翻转力矩幅值的表达式为：

$$M_z = 0.1 \cdot \frac{\delta}{10} \quad (8)$$

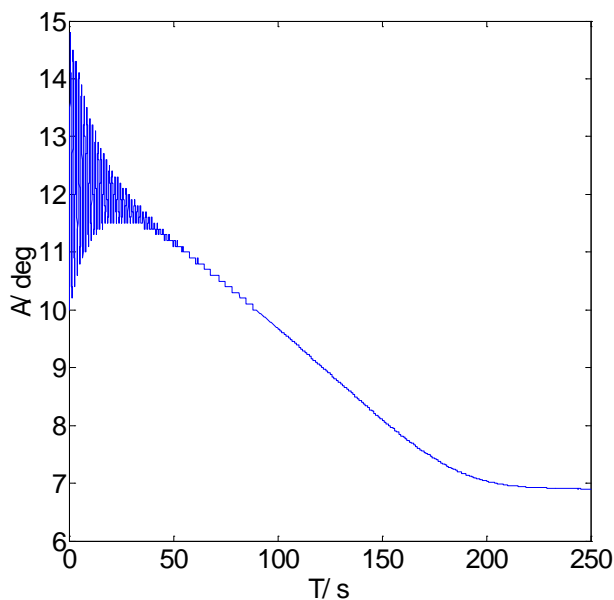


Figure 4. The varying curve of the attack angle  
图 4. 攻角变化曲线

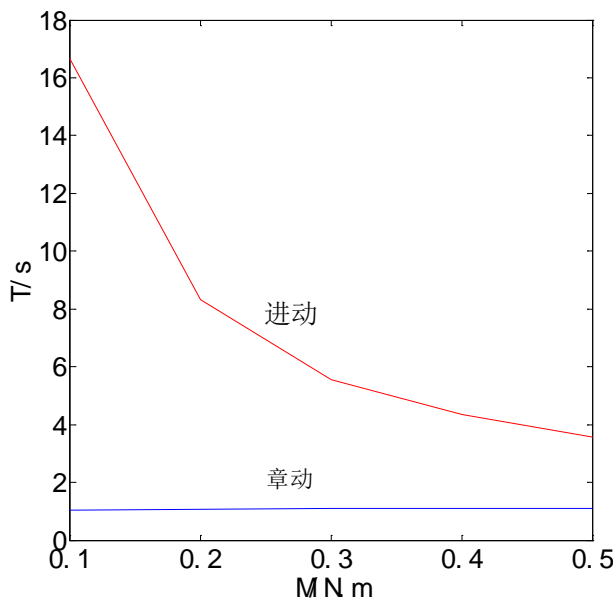
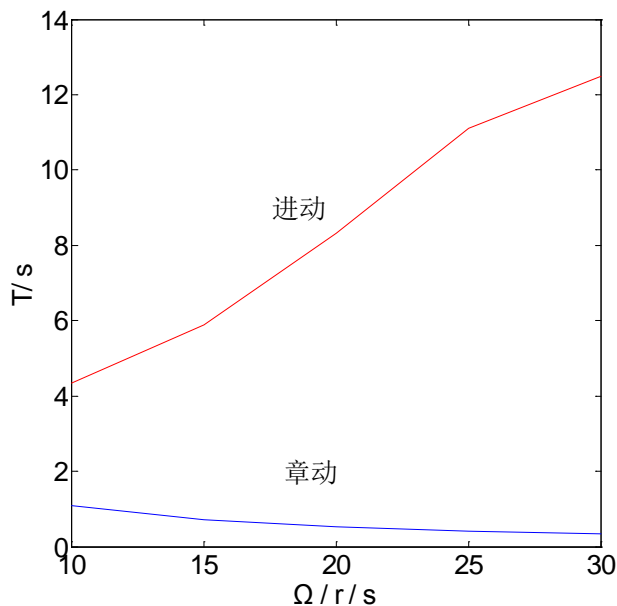


Figure 5. The variations of precession and nutation with turning torque  
图 5. 进动与章动周期随力矩变化

弹丸转速为 10 转/秒(r/s)，弹尖点运动轨迹如图 7 (50 s 仿真)，攻角变化如图 8。

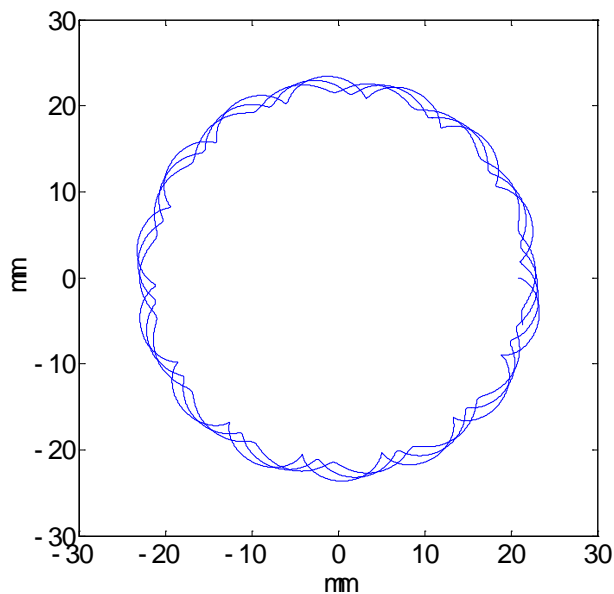
## 5. 结论

- 1) 只要弹丸保持旋转稳定，翻转力矩幅值不变与变的情况下，弹丸最终都能达到规则进动状态(图 4、图 8)。
- 2) 弹丸转速一定时，弹丸进动周期随翻转力矩幅值增大而减小，章动周期基本不变(图 5)。



**Figure 6.** The variations of precession and nutation with revolving speed

**图 6.** 进动与章动周期随转速变化



**Figure 7.** The Meplat track in a plane

**图 7.** 弹尖点在平面内的轨迹

3) 翻转力矩幅值一定时, 弹丸进动周期随转速增大而增大, 章动周期随转速增大而少许减小(图 6)。

4) 弹丸的实际自转角可以高达 100 转/秒左右, 本文仿真的弹丸转速最高为 50 转/秒, 二者有较大差距, 这样做的原因一方面是出于应用 ADAMS 进行弹丸陀螺稳定性的规律性和可行性探索, 另一方面则是出于仿真效率的考虑, 弹丸每转一周, ADAMS 积分器至少需要积分 50 次才能保证仿真精度。

5) ADAMS 可以实现弹丸的陀螺稳定性仿真, 可以进行弹丸转速、翻转力矩和稳定性之间的关系研究。可以将上述弹丸陀螺稳定性的研究方法推广应用于弹丸追随稳定性研究, 从而将 ADAMS 软件应用

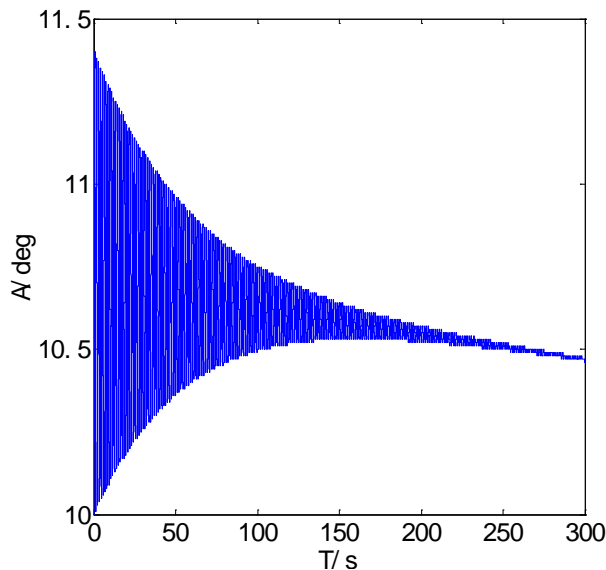


Figure 8. The varying curve of the attack angle  
图 8. 攻角变化曲线

于弹丸飞行的全弹道仿真研究，为外弹道学研究开辟一条新途径。

### 参考文献 (References)

- [1] 陈永才, 狄长春, 李鹏. 火炮结构原理概论[M]. 石家庄: 军械工程学院, 2007.
- [2] 宋丕极. 枪炮与火箭外弹道学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1993.
- [3] 揭涛, 施坤林. 旋转稳定弹弹道修正引信减旋装置研究[J]. 探测与控制学报, 2007, 29(5): 9-12.
- [4] 王中原, 周卫平. 外弹道设计理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [5] 张福学, 张伟. 旋转体自旋角速度不稳定对陀螺稳定性的影响[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(5): 585-588.
- [6] 王志刚, 李伟, 张振宁. 双旋制导火箭弹动力学建模[J]. 兵工学报, 2013, 34(7): 910-915.
- [7] 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学(II) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.

### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ijm@hanspub.org](mailto:ijm@hanspub.org)