

# 转管炮身管组内倾角对炮口扰动的影响分析

曹 渊,邱志明,崔东华,肖玉杰

(海军装备研究院,北京 100161)

**摘要:**建立了基于身管柔性的转管炮刚柔耦合数值仿真模型,对身管组内倾角为 $0^\circ$ 、 $0.2^\circ$ 、 $0.4^\circ$ 、 $0.6^\circ$ 和 $0.8^\circ$ 五种情况进行了连发射击仿真试验。仿真试验结果表明:随着转管炮身管组内倾角增大,炮膛合力竖直分量和水平分量增大,但身管组的等效刚强度增强;炮膛合力分量和等效刚强度对炮口扰动的影响相反。

**关键词:**转管炮;炮口扰动;内倾角;动力学仿真

**本文引用格式:**曹渊,邱志明,崔东华,等.转管炮身管组内倾角对炮口扰动的影响分析[J].兵器装备工程学报,2018(1):1-5.

**Citation format:**CAO Yuan, QIU Zhiming, CUI Donghua, et al. Influence of Leaning Angle of Barrels Effect on Muzzle Disturbance in Gatling Guns[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018(1):1-5.

中图分类号:TJ303

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2018)01-0001-05

## Influence of Leaning Angle of Barrels Effect on Muzzle Disturbance in Gatling Guns

CAO Yuan, QIU Zhiming, CUI Donghua, XIAO Yujie

(Naval Academy of Armament of PLA, Beijing 100161, China)

**Abstract:** A rigid-flexible coupling simulation model based on flexible barrels is proposed. An automatic firing simulation experiments based on the proposed model is carried out, and 5 barrels leaning angle of  $0^\circ$ ,  $0.2^\circ$ ,  $0.4^\circ$ ,  $0.6^\circ$ ,  $0.8^\circ$  is considered. With leaning angle of barrels increased, the vertical and horizontal components of bore resultant force is increased that is bad for muzzle disturbance, but the equivalent rigidity of barrels is increased that is good for muzzle disturbance.

**Key words:** gatling guns; muzzle disturbance; leaning angle; dynamics simulation

转管炮由多根身管组成,每根身管都有对应的炮闩,炮闩由炮膛外壳体内表面的凸轮槽带动作前后滑动,完成装弹、推弹入膛、击发、抽壳和抛壳的动作。转管炮结构件较多,受力和运动情况复杂,对转管炮自动机结构的研究也比较多。张海洋等基于I-DEAS软件的Mechanism Design模块,完成了某转管炮凸轮曲线槽约束下的闩体在曲线槽约束下的运动学分析<sup>[1]</sup>。景银萍等对某外能源转管机枪击发机构参数进行了优化设计,利用动力学分析软件ADAMS对某转管机枪的击发机构进行参数化建模,对多个重要的参数进

行了敏感度分析,得到各参数最优设计值组合,为武器的改进设计起到指导作用<sup>[2]</sup>。徐健等对转管炮机心体导轨倾角进行了参数化研究<sup>[3]</sup>。李强等对转管炮旋转发射惯性对弹丸起始扰动进行了建模分析<sup>[4]</sup>。转管炮自动机设计时,身管组通常设计有内倾角,但内倾角对炮口扰动的影响规律尚无深入研究。本文基于adams动力学软件和Ansys有限元分析软件,建立了身管柔性的转管炮刚柔耦合动力学模型,进行了火炮连发射击仿真试验,通过对炮膛合力和身管组等效刚强度的分析,发现了身管组内倾角对竖直和水平方向炮口扰

收稿日期:2017-08-25;修回日期:2017-09-25

基金项目:第58批中国博士后科学基金面上项目(2015M582870)

作者简介:曹渊(1985—),男,本刊审稿专家,博士,主要从事舰载武器系统研究,E-mail:303880958@qq.com。

通讯作者:邱志明(1961—),男,本刊顾问,中国工程院院士。

动的影响规律。

## 1 刚柔耦合模型

### 1.1 物理假设

以某中口径转管炮为研究对象,作如下假设:

- 1) 火炮与大地固连,不考虑与外界接触;
- 2) 全炮结构中身管为柔性体,与炮箱固连,其余均为刚体。身管组由前、中套箍相连,均为固定约束。
- 3) 考虑自动机炮匣导轨与摇架之间、中套箍与支撑炮架之间的接触/碰撞;
- 4) 反后坐装置为液压弹簧系统,提供的弹簧力和液压阻力分别为摇架和自动机相对位移和相对速度的函数;
- 5) 在炮匣与炮箱之间添加旋转驱动,模拟火炮转速。

### 1.2 模型设置

考虑身管组内倾角为 $0^\circ$ 、 $0.2^\circ$ 、 $0.4^\circ$ 、 $0.6^\circ$ 和 $0.8^\circ$ 五种情况,自动机其余部分结构保持不变。自动机部分模型如图1所示,忽略了供弹、上架和基座等部分。建立整体坐标系,自动机轴线指向尾部方向为 $z$ 轴,竖直向上为 $y$ 轴,水平方向为 $x$ 轴,取右手系。

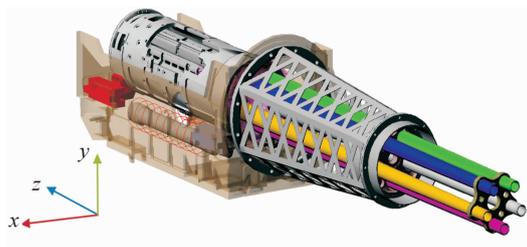


图1 自动机部分

图2和图3给出了自动机身管组内倾角为 $0^\circ$ 和 $0.8^\circ$ 的正视图和侧视图。火炮射速为600发/min,击发位置点在图2中所示正视图炮箱平面的约5点钟位置。进行2s,20连发长连射模拟仿真试验。

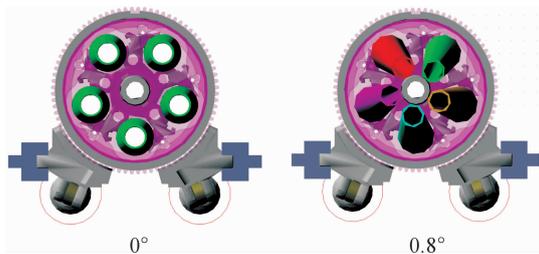


图2 自动机身管组正视图

### 1.3 载荷设置

#### 1) 炮膛合力

转管炮将多根身管在圆周方向均匀排列,若有 $n$ 根身管,则相邻身管之间在圆周上的夹角为 $360^\circ/n$ ,也就是说前一根身管在击发位置击发后,转过 $360^\circ/n$ ,下一相邻的身管

击发,身管组旋转1周,发射 $n$ 发弹药。击发起始时刻可以写成旋转角度的函数。

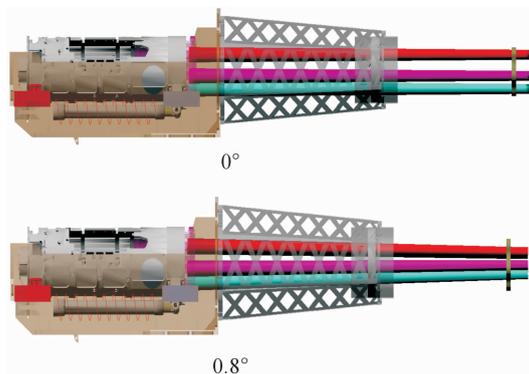


图3 自动机身管组侧视图

沿着身管组的旋转方向,将身管依次进行编号,建立第 $i$ 根身管与击发位置点的相对角位移测量,记为:MEA\_ANGLE,第 $i$ 根身管与第1根身管在圆周方向相差 $(i-1)360^\circ/n$ ,根据转速即可得到每根身管与上一次击发时刻的时间差,结合ADAMS中的AINT()和AKISPL()函数<sup>[5]</sup>,炮膛合力的表达式为:

$$F_{pt} = \pi r^2 AKISPL\left(\left((MEA\_ANGLE + 360 \times \frac{(i-1)}{n}) - AINT\left(\frac{(MEA\_ANGLE + 360 \times \frac{(i-1)}{n})}{360} \times 360\right) / DV, 0, p_t, 0\right)\right) \quad (1)$$

式中: $r$ 为膛底半径; $DV$ 为转速参数化变量; $i$ 为身管编号; $n$ 为身管总数; $p_t$ 为膛压曲线,可以通过内弹道计算程序以及装填条件计算获得,也可以通过射击试验测得,本炮的膛底压力随时间变化的曲线如图4所示。

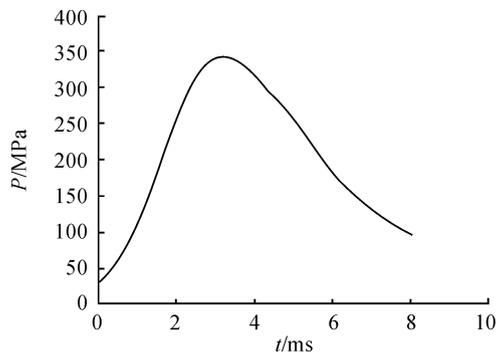


图4 膛底压力随时间变化的曲线

#### 2) 接触力

当两个构件的表面之间发生接触时,这两个构件就会在接触的位置产生接触力。在中口径转管炮系统虚拟样机仿真中,接触力的设定是重要部分,因为自动机的炮匣导轨与摇架之间,以及身管组中套箍与支撑炮架的接触都是产生和影响炮口扰动的重要原因。在火炮武器射击过程中,接触件之间的相对运动较为激烈,因此在模型中选择ADAMS的冲

击函数法 (Impact) 来计算接触力,模型计算公式<sup>[5]</sup>为:

$$F = \begin{cases} 0 & \delta < 0 \\ K\delta^e + C\Delta^2(3-2\Delta)\dot{\delta} & 0 < \delta < d_0 \\ K\delta^e + C\dot{\delta} & \delta > d_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $F$  为法向接触力;  $K$  为 Hertz 接触刚度;  $C$  为阻尼系数;  $\delta$  为接触点法向穿透距离;  $d_0$  为阻尼力过渡区间;  $\Delta = \delta/d_0$ ;  $e$  为不小于 1 的指数。

## 2 模拟结果分析

### 2.1 内倾角对炮膛合力的影响

当身管组内倾角为  $0^\circ$  时,炮膛合力沿着  $Z$  轴方向,与身管轴线重合,水平  $x$  轴和竖直  $y$  轴方向的分量为 0。当身管组内倾角不为  $0^\circ$  时,炮膛合力的方向随内倾角的改变而改变,且与身管轴线重合,此时在水平  $x$  轴和竖直  $y$  轴方向的分量不为 0。

图 5 给出了内倾角为  $0.8^\circ$  时,炮膛合力  $z$  轴方向分量的峰值约为  $1.463 \times 10^6$  N。图 6 给出了内倾角为  $0.8^\circ$  时,炮膛合力  $x$  轴方向分量的峰值约为 12 912 N。图 7 给出了内倾角为  $0.8^\circ$  时,炮膛合力  $y$  轴方向分量的峰值约为 25 615 N。随着内倾角增大, $z$  轴方向分量减小, $x$  轴和  $y$  轴方向分量增大。

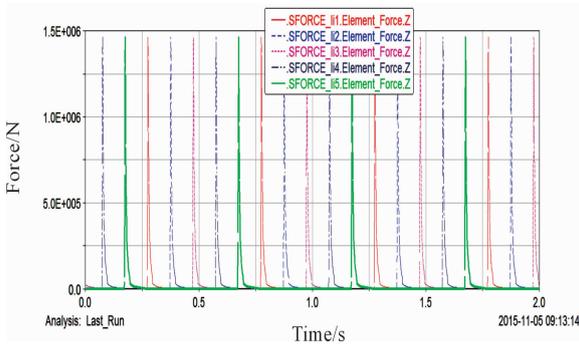


图 5 内倾角为  $0.8^\circ$  时,炮膛合力沿  $z$  轴方向的分量

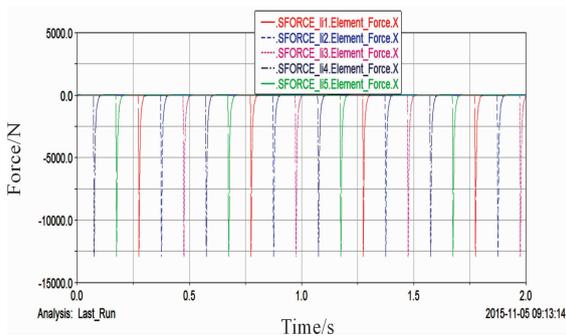


图 6 内倾角为  $0.8^\circ$  时,炮膛合力沿  $x$  轴方向的分量

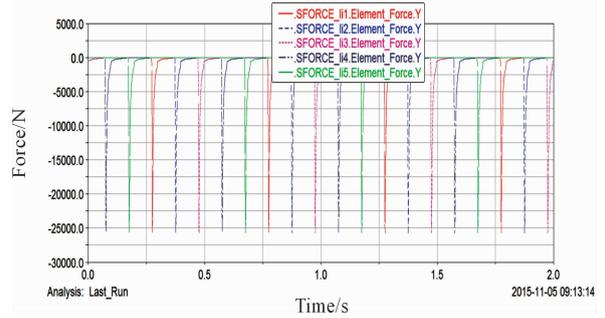


图 7 内倾角为  $0.8^\circ$  时,炮膛合力沿  $y$  轴方向的分量

### 2.2 内倾角对炮口扰动的影响

身管炮口扰动体现了火力系统结构对射击精度的影响,身管在发射过程中会发生变形,因此,以身管前 endpoint 相对与后 endpoint 的形变位移量来表征炮口扰动。

#### 2.2.1 $y$ 轴方向的炮口扰动

图 8、图 9 和图 10 分别给出了内倾角为  $0^\circ$ 、 $0.4^\circ$  和  $0.8^\circ$  时,转管炮其中 1 根身管沿  $y$  轴方向炮口扰动变化曲线和 5 个身管炮膛合力变化曲线的组合图。图 11 给出了 5 种内倾角条件下的炮口扰动  $y$  轴方向分量的变化曲线。分析结果可得:

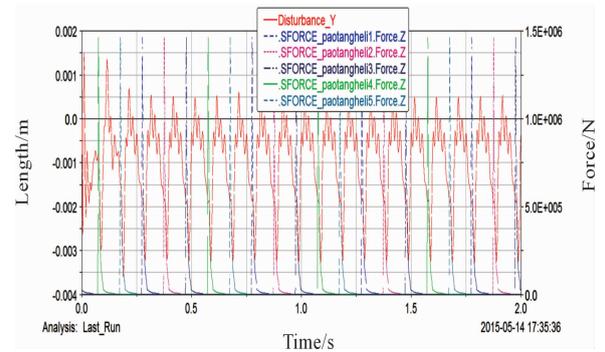


图 8 内倾角为  $0^\circ$  时,炮口扰动沿  $y$  轴方向变化曲线和 5 个身管炮膛合力变化曲线的组合图

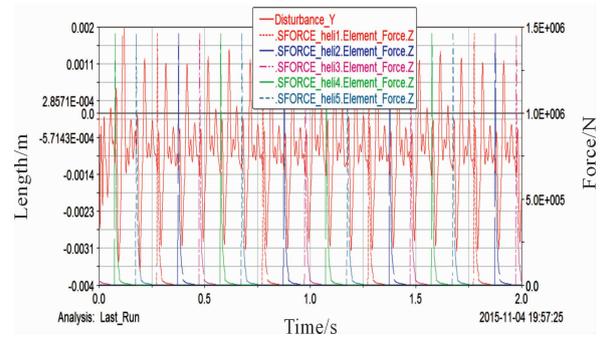


图 9 内倾角为  $0.4^\circ$  时,炮口扰动沿  $y$  轴方向变化曲线和 5 个身管炮膛合力变化曲线的组合图

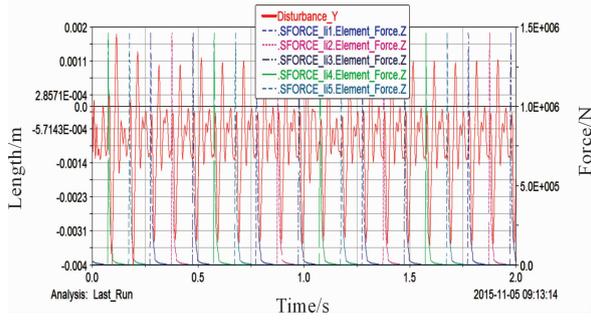


图 10 内倾角为  $0.8^\circ$  时,炮口扰动沿  $y$  轴方向变化曲线和 5 个身管炮膛合力变化曲线的组合图

1) 炮口扰动的极值点紧随炮膛合力的极值点出现,表明炮膛合力是引起炮口扰动的外部激励。

2) 极值点过后,在相邻两条炮膛合力的峰值之间,炮口扰动曲线逐步收敛。随着内倾角的增大,扰动收敛的速度先减小后增大。

3) 从图 11 看出,内倾角为  $0^\circ$ 、 $0.2^\circ$ 、 $0.4^\circ$ 、 $0.6^\circ$  和  $0.8^\circ$  时,炮口扰动的变化幅值分别约为 3.7 mm、4.5 mm、4 mm、5 mm 和 4.5 mm。随着内倾角的增大,扰动幅值也呈现先减小后增大的趋势。

这是由于影响炮口扰动的原因可以分为外部因素和内部因素。外部因素为炮膛合力,随着内倾角增大,炮膛合力

沿  $y$  轴方向的分量增大,使得身管  $y$  轴方向的扰动幅度增大,收敛速度变慢;内部因素为身管组本身的等效刚度,身管组由前、中套箍固定,并与炮箱固连,可以认为身管组是一体的,运动是同步的,随着内倾角增大,整体的等效刚度增大,使得身管的扰动幅度减小,收敛速度变快。基于上述两个因素对身管扰动的影响是相反的,在内倾角增大的过程中,首先内部因素(等效刚度)占主导作用,扰动减弱,随着内倾角进一步增大,外部因素(炮膛合力的分量)占主要作用,使得扰动增强。因此,随着内倾角增大,炮口扰动先减小后增大。

### 2.2.2 $x$ 轴方向的炮口扰动

图 12 和图 13 给出了内倾角为  $0^\circ$  和  $0.8^\circ$  时,转管炮其中 1 根身管沿  $x$  轴方向炮口扰动变化曲线和 5 个身管炮膛合力变化曲线的组合图。图 14 给出了 5 种内倾角条件下的炮口扰动  $x$  轴方向分量的变化曲线。分析结果如下:

1)  $x$  轴方向(水平方向)明显小于  $y$  轴方向(竖直方向)的扰动幅值,这与火炮射击竖直方向散布大于水平方向散布的规律是一致的。

2) 随身管组内倾角的变化, $x$  轴方向的幅值变化不大。这是由于本身  $x$  轴方向的扰动就比较小,而且,在 5 点钟方向的击发位置点,炮膛合力的  $y$  轴分量较大, $x$  轴分量较小,所以导致水平方向的扰动变化不是很明显。

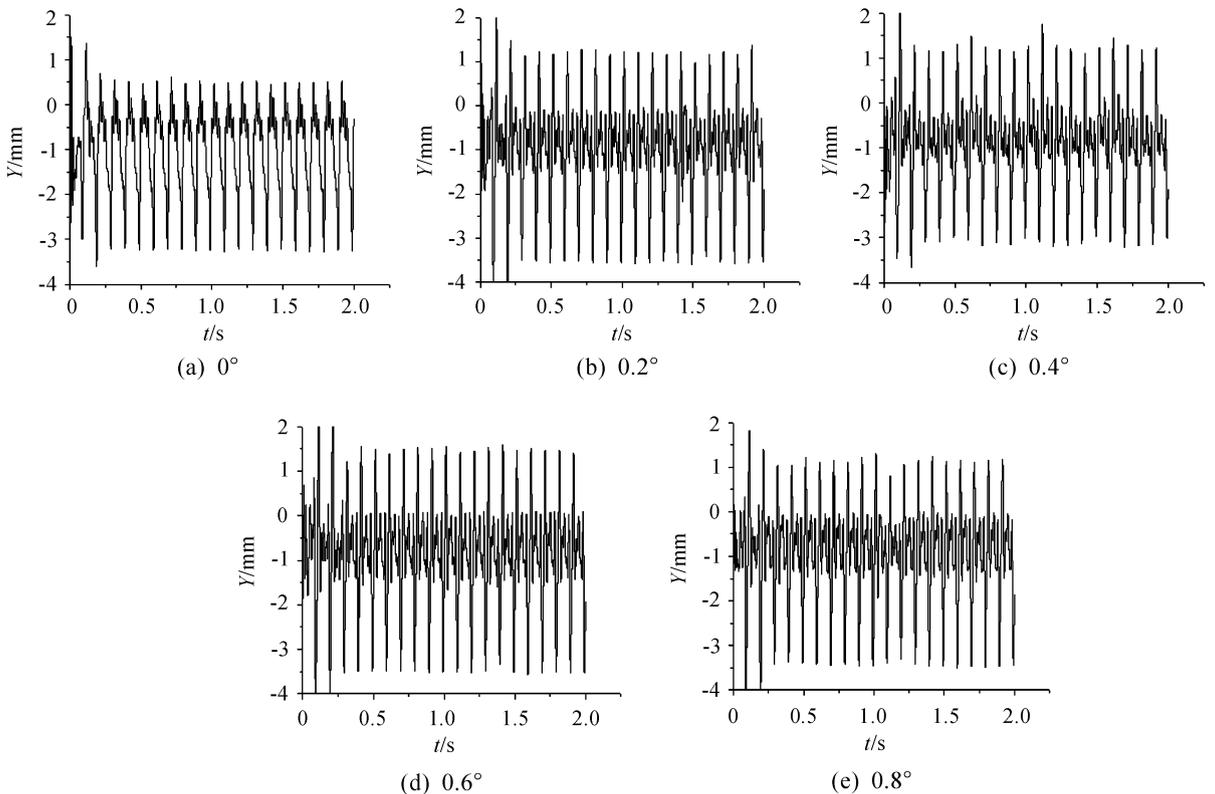


图 11 内倾角为  $0^\circ$ 、 $0.2^\circ$ 、 $0.4^\circ$ 、 $0.6^\circ$  和  $0.8^\circ$  时, $y$  轴方向的炮口扰动

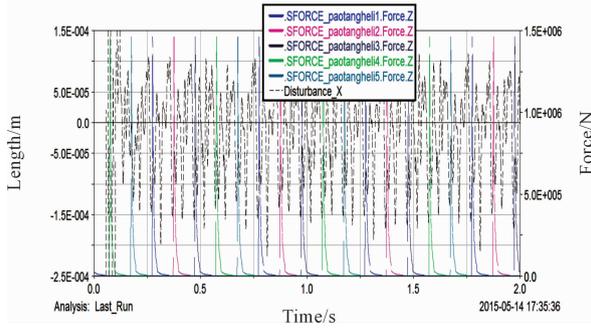


图12 倾角为 $0^\circ$ 时,炮口扰动沿 $x$ 轴方向变化曲线和5个身管炮膛合力变化曲线的组合图

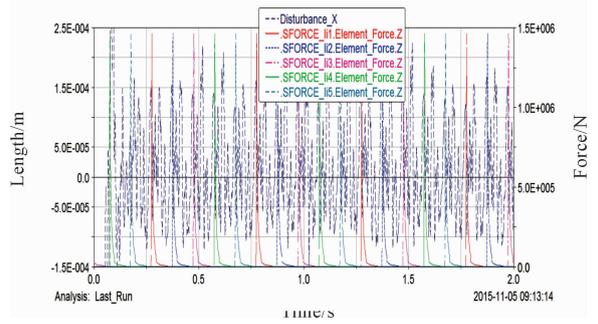


图13 倾角为 $0.8^\circ$ 时,炮口扰动沿 $x$ 轴方向变化曲线和5个身管炮膛合力变化曲线的组合图

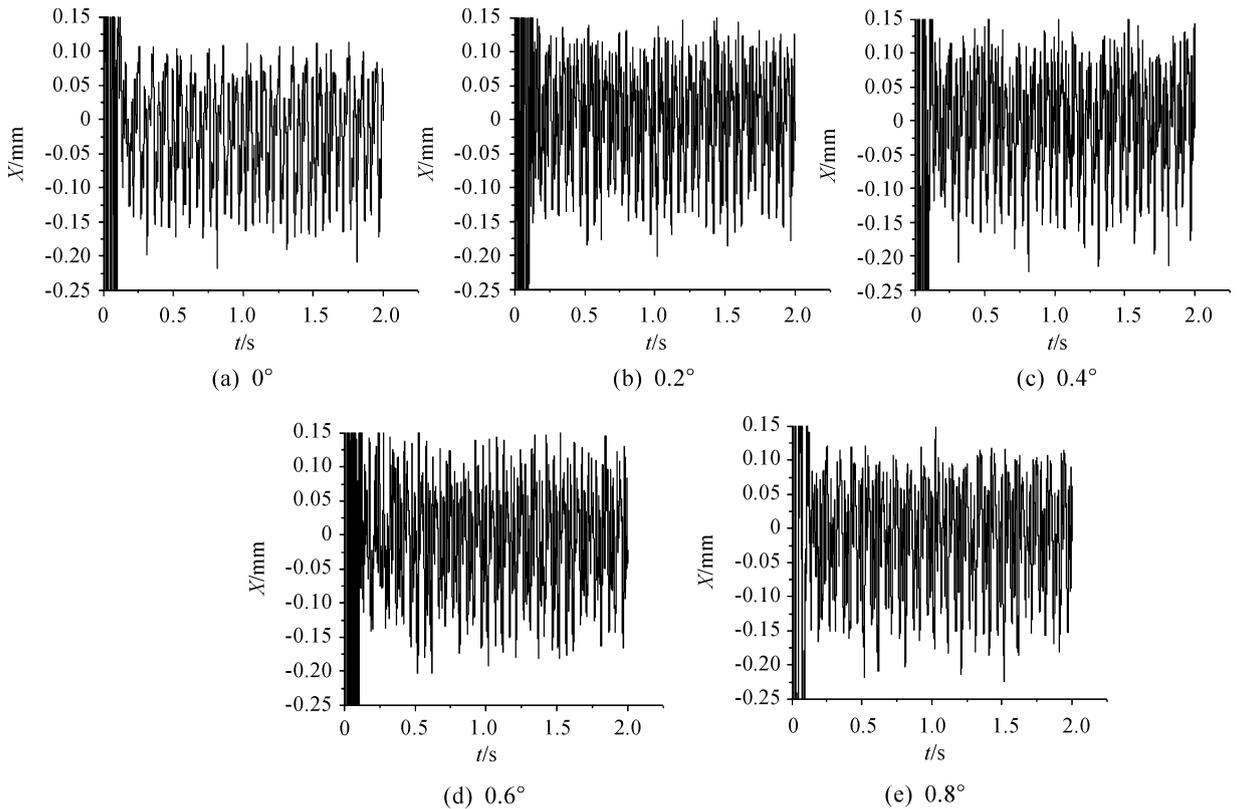


图14 内倾角为 $0^\circ$ 、 $0.2^\circ$ 、 $0.4^\circ$ 、 $0.6^\circ$ 和 $0.8^\circ$ 时, $x$ 轴方向的炮口扰动

### 3 结论

1) 随着身管组内倾角增大,身管组等效刚强度增大,炮口扰动减小;炮膛合力的水平和竖直分量增大,炮口扰动增强。二者对炮口扰动的影响相反。

2) 在不同身管组内倾角条件下,炮口扰动都是竖直分量较大,水平方向较小,与射弹散布的规律一致。

### 参考文献:

[1] 张海洋,吕志民,杨宏亮.某型转管炮凸轮曲线槽约束下

的闩体运动分析[J].舰船科学技术,2007,29(A01):64-66.

[2] 景银萍,杨臻,李强,等.某外能源转管机枪击发机构参数优化设计[J].振动与冲击,2010,29(12):153-157.

[3] 徐健,薄玉成.转管炮机心体导轨倾角的参数化研究[J].弹道学报,2010(3):26-29.

[4] LI Qiang,BO Yucheng,DUO Yinxian. Influence of Rotating Effect on Initial Bullet Disturbance In Gatling Guns[J]. Journal of Ballistics,2005,17(4):88-92.

[5] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M].北京:国防工业出版社,2014.

(责任编辑 周江川)