

高速旋转弹丸弹道修正原理分析及仿真

解增辉, 刘占辰, 黄吉传
(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:解决由于高速旋转弹丸的旋转特性导致难以采用常规方案对其进行弹道修正的技术难点。提出基于压电陶瓷智能材料的弹道修正原理技术方案,依据弹头可能动作的思路,设计弹头修正机构,通过探知弹头旋转频率,以此调整压电陶瓷杆的加电模式,利用压电陶瓷的逆压电效应,从而调整相应陶瓷杆的伸缩动作,保证在旋转条件下弹头可以向固定方向偏转,解决了修正旋转弹丸的难题。详细阐述了修正弹丸的系统组成和工作原理,同时建立了修正弹丸理想条件下的外弹道数学模型,并通过仿真计算得到一定条件下修正弹丸的弹道曲线和详细修正数据,仿真结果验证了该方案的有效性和可行性。

关键词:高速旋转弹丸;弹头;压电陶瓷;弹道修正

中图分类号: TJ765 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)02-0046-05

目前世界各国的智能杀伤武器库中鲜有供小口径火炮使用的智能炮弹^[1-2],这也是现代军事所关注的一个方向。尤其对于旋转稳定的小口径弹丸,要使其在飞行过程中完成弹道偏离、自动寻的、准确命中目标等任务,首先必须解决的就是高速旋转问题,而且控制系统要高度紧凑而简单,能够装配到炮弹中,同时还应能承受射击时产生的巨大过载。这样,采用传统的小型弹翼和气体动力学舵面设计方案都是不合适的,只能考虑弹丸上有可能动的部分,基于此,本文设计了基于压电陶瓷智能材料的弹头修正机构,建立修正弹丸的外弹道模型,并通过仿真说明其有效性。

1 修正原理方案

压电陶瓷材料是一种多晶体结构的特殊电介质,在电场中时,陶瓷中各晶胞的自发极化沿着电场方向排列起来,于是从整体上看,压电陶瓷在电场方向上就出现伸长,在垂直电场方向上出现缩短,这就是逆压电效应。参考文献[3],可以得到薄长条片压电陶瓷的压电方程完整形式。在本文中,根据实际需要只要求压电陶瓷薄片在厚度方向上有较大的变化,因此选择合适压电陶瓷材料,压电方程简写为:

$$S = dE \quad (1)$$

式中: S 为位移; d 为压电常数; E 为电场强度。

基于逆压电效应提出高速旋转弹丸的弹道修正方案:在弹头石英窗内安置一个自动寻找信号并控制弹丸的传感器,利用压电陶瓷杆作为修正机构传动装置,通过控制压电陶瓷杆的伸缩使弹头偏转,从而修正弹丸弹道。其机构示意图见图1,在弹头内部均匀配置压电陶瓷杆,弹头通过球窝与弹体连结,通过压电陶瓷杆来固定。当对一侧压电陶瓷杆施加电压时,陶瓷杆变长,同时对另一侧施加反电压,陶瓷杆变短,这样弹头就会产生偏转,不同的信号控制不同陶瓷杆的伸缩,弹头就可以向不同的方向偏转。

考虑弹丸高速旋转,飞行过程中由于摩擦作用,弹体会带动弹头旋转,要实现偏转还必须解决旋转的问

* 收稿日期:2008-03-12

基金项目:国防预研基金资助项目(51405030605JB3201)

作者简介:解增辉(1979-),男,山西运城人,博士生,主要从事航空军械技术、导弹制导控制与仿真研究;

E-mail: xzhjx@126.com

刘占辰(1962-),男,河北赞皇人,教授,主要从事航空武器装备、弹药引信等研究。

题。对此可以根据弹头的旋转速率来确定压电陶瓷杆的加电频率,使得弹头的偏转以相同速率向相反方向旋转,只要压电陶瓷材料的反应时间足够短,就可以保证弹头相对迎面气流稳定的向某个方向偏转。文献表明^[1,3],只要反应时间不大于 10 ms,即弹头的旋转速率不大于 100 r/s,问题便可以解决。弹头偏转改变弹丸受力,从而改变弹丸飞行姿态,达到修正弹道的目的。

另外,要获得一定偏转角度,压电陶瓷杆就必须要有相当的伸长量,但是一般压电陶瓷材料的压电常数 d 都很小,约为 $(70 - 1\ 000) \times 10^{-12}$ C/N,所以单片压电陶瓷是不实用的,为了获得较大位移,可采用多片级联的方法构成压电陶瓷迭堆,使每片位移叠加。各层在电学上并联,在位移方面串联叠加,这样应变位移公式就成为:

$$S = dEn \tag{2}$$

式中 n 表示压电陶瓷的片数。

多层结构可使压电陶瓷的位移随层数增加而增加,根据目前的最新研究,其位移行程已经可以达到几十微米级。当修正机构开始工作时,对应的弹头偏转见图 2,设陶瓷杆位移为 S ,弹丸半径为 R ,弹头转过的角度为 α' ,由几何学知识可知 $\alpha' = \theta'$ 。

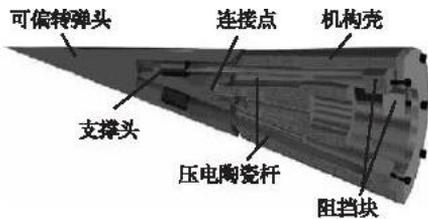


图 1 弹头修正机构示意图

Fig. 1 Sketch of warhead correction mechanism

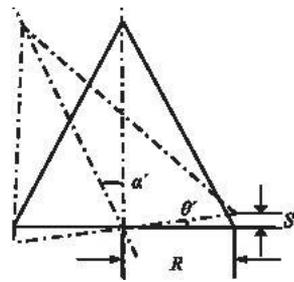


图 2 弹头偏转示意图

ig. 2 Sketch of warhead deflexion

由于位移很小,所以:

$$\tan\theta' \approx \frac{S}{R} \quad \theta' \approx \arctan \frac{S}{R} \tag{3}$$

当弹丸以超音速飞行时,只要弹头能够获得一定的偏转角度,就可以产生较大的横向空气动力,从而改变弹丸弹道。

2 外弹道数学模型

高速旋转的弹丸,弹轴必按照所受外力矩的矢量方向运动,这种运动就是弹轴和质心速度矢量 V 构成的阻力面围绕 V 的转动,即所谓的进动,这也是高速旋转弹丸不翻转的物理原因。弹丸的运动包括质心运动和绕心运动两部分,绕心运动又包括弹丸的自转、进动和章动。

建立弹丸运动方程组,作如下假设:

- 1) 弹丸外形和质量分布都是轴对称,且理想情况下,弹轴与速度方向始终重合;
- 2) 气象条件符合标准气象条件;
- 3) 不考虑地球曲率和重力加速度随高度和纬度的变化;
- 4) 不考虑哥氏惯性力的影响;
- 5) 认为夹角 δ 约等于弹体轴与速度方向之间的夹角,即攻角。

综合 1) 和 5) 可知,虽然修正弹丸存在夹角,但由于弹头并不高速旋转,而弹轴又与速度方向保持一致,所以这时不存在马格努斯力和马格努斯力矩。

分别建立地面坐标系 $oxyz$, 速度坐标系 $ox_1y_1z_1$, 第一弹轴坐标系 $o\xi\eta_1\zeta_1$, 第二弹轴坐标系 $o\xi\eta_2\zeta_2$, 弹体坐标系, 它们的空间坐标关系见图 3。

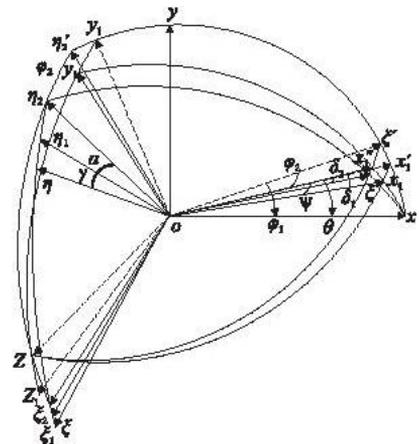


图 3 空间坐标关系示意图

Fig. 3 Sketch of spatial coordinates relation

通过分析修正弹丸所受力和力矩,参考文献论述^[4-8],同时考虑弹道解算实际,忽略方程中对质心运动影响不大的小振幅高频率项以及高阶小量,建立理想条件下修正弹丸的质心运动方程组:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= -\frac{R_x}{m} \frac{v_x}{v} - \frac{R_y}{m \sin \delta} (\sin \delta_1 \cos \delta_2 \sin \theta + \sin \delta_2 \sin \psi \cos \theta) \\ \frac{dv_y}{dt} &= -\frac{R_x}{m} \frac{v_y}{v} + \frac{R_y}{m \sin \delta} (\sin \delta_1 \cos \delta_2 \cos \theta - \sin \delta_2 \sin \psi \sin \theta) - g \\ \frac{dv_z}{dt} &= -\frac{R_x}{m} \frac{v_z}{v} + \frac{R_y}{m \sin \delta} \sin \delta_2 \cos \psi \\ \frac{d\varphi_2}{dt} &= \frac{1}{C\dot{\gamma}} \left[\frac{M_z}{\sin \delta} (\sin \delta_1 \cos \alpha + \cos \delta_1 \sin \delta_2 \sin \alpha) \right] \\ \frac{d\varphi_1}{dt} &= \frac{1}{C\dot{\gamma} \cos \varphi_2} \left[-\frac{M_z}{\sin \delta} (\cos \delta_1 \sin \delta_2 \cos \alpha - \sin \delta_1 \sin \alpha) \right] \\ \frac{d\dot{\gamma}}{dt} &= -k_{XD} (\dot{\gamma} + \dot{\varphi}_1 \sin \varphi_2) v \\ \frac{dx}{dt} &= v_x \\ \frac{dy}{dt} &= v_y \\ \frac{dz}{dt} &= v_z \end{aligned} \right. \quad (4)$$

需用下列关系式:

$$\begin{aligned} \psi &= \arcsin(v_z/v) & \theta &= \arcsin(v_y/v \cos \psi) & v &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \\ \delta_2 &= \arcsin[\sin \varphi_2 \cos \psi - \sin \psi \cos \varphi_2 \cos(\varphi_1 - \theta)] & \delta_1 &= \arcsin[\sin(\varphi_1 - \theta) \cos \varphi_2 / \cos \delta_2] \\ \alpha &= \arcsin[\sin(\varphi_1 - \theta) \sin \psi / \cos \delta_2] & \delta &= \arccos(\cos \delta_1 / \cos \delta_2) \end{aligned}$$

式中: v 为弹丸速度; φ_1 为俯仰角; φ_2 为偏航角; γ 为滚转角; ψ 为弹道偏角; θ 为弹道倾角; R_x 为阻力; R_y 为升力; M_z 为静力矩; δ 为攻角; α 为第一弹轴系到第二弹轴系的旋转角。

3 仿真分析

以某型弹丸为例, $m = 14.6 \text{ kg}$, 直径 $d' = 105 \text{ mm}$, 弹道系数 $C = 0.2326 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。在相同初速 $V_0 = 460 \text{ m/s}$ 、相同修正机构工作时机(约为弹丸全飞行时间的76%)的条件下,对不同射角,不同弹头偏转角度的弹丸弹道进行仿真计算^[9-10],弹道曲线见图4。

由图4可以看出,在弹道末端当弹头修正机构开始工作后,弹丸弹道发生了明显的偏移。具体计算数据结果见表1-表3(注:在偏转角度一栏中,“-”表示下偏,“+”表示上偏;在修正量一栏中,“-”表示减少,“+”表示增加。)

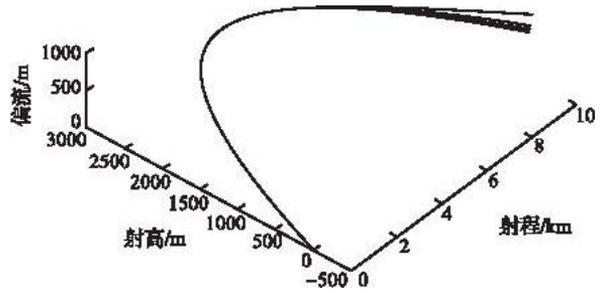


图4 弹道仿真曲线

Fig. 4 Simulation curve of trajectory

表1 30°射角下射程、偏流随弹头偏转角度的变化

Tab.1 Change of range and windage follows warhead deflexion in condition 30° angle of fire

	偏转角度/(°)				
	-0.25	-0.15	0	+0.12	+0.22
射程/m	8 626.10	8 626.20	8 626.90	8 628.50	8 633.20
射程修正量/m	-1.50	-0.70	0	+1.60	+6.30
偏流/m	369.35	381.88	389.62	399.22	414.96
偏流修正量/m	-20.27	-7.74	0	+9.6	+25.34

表2 45°射角下射程、偏流随弹头偏转角度的变化

Tab.2 Change of range and windage follows warhead deflexion in condition 45° angle of fire

	偏转角度/(°)				
	-0.25	-0.15	0	+0.12	+0.22
射程/m	9 655.40	9 653.40	9 652.80	9 653.10	9 655.70
射程修正量/m	+2.60	+0.60	0	+0.30	+2.90
偏流/m	741.40	760.65	772.57	787.41	811.84
偏流修正量/m	-31.17	-11.92	0	+14.84	+39.27

表3 60°射角下射程、偏流随弹头偏转角度的变化

Tab.3 Change of range and windage follows warhead deflexion in condition 60° angle of fire

	偏转角度/(°)				
	-0.25	-0.15	0	+0.12	+0.22
射程/m	8 480.00	8 477.80	8 475.00	8 477.00	8 478.90
射程修正量/m	+8.20	+2.80	0	+2.00	+3.90
偏流/m	1 194.00	1 214.50	1 227.30	1 243.40	1 275.60
偏流修正量/m	-33.30	-12.80	0	+16.10	+48.30

通过对表中数据分析,可以得到以下结论:

- 1) 在同初速,同修正机构工作时机(约为弹丸全飞行时间的76%)的条件下,弹丸射程在45°射角时达到最大,这与常规弹丸射程的变化规律是一样的;
- 2) 弹头上偏,则偏流增大,弹头下偏则偏流减小,且修正距离随弹头偏转角度的增大而增大,可以达到几十米,但弹丸的射程变化不大;
- 3) 在同初速、同修正角度、同修正机构工作时机(约为弹丸全飞行时间的76%)的条件下,偏流修正距离亦随射角的增大而增大。

4 结束语

本文所研究的修正方案目前在国内还未见有报道,国外也是停留在实验室研究阶段,但这是弹药发展的一个趋势。文章在建立理想条件下修正弹丸外弹道数学模型的基础上,进行了仿真计算,验证了此方案的有效性,说明小口径智能炮弹能适应空气动力学变化,调整弹道,从而增大射击范围,提高作战实力,具有非常光明的前景。

参考文献:

- [1] 韩秀荣,王泉水. 灵巧炮弹的发展[J]. 舰载武器, 1997,4(4):24-28.
HAN Xiurong, WANG Quanshui. The Development of Smart Cannonball[J]. Warship Weapon, 1997,4(4):24-28. (in Chinese)
- [2] 林海. 美军研制智能型小口径自导贫铀弹药[EB/OL]. [2004-06-08]. <http://army.tom.com>.
LIN Hai. America Developed Intelligent Small-caliber Self-guidance Uranium Ammunition[EB/OL]. [2004-06-08]. <http://army.tom.com>. (in Chinese)
- [3] 曲远方. 功能陶瓷及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
QU Yuanfang. Function Pottery and Application[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [4] 宋丕极. 枪炮与火箭外弹道学[M]. 北京:兵器工业出版社,1993.
SONG Piji. Firearm and Rocket Outer Ballistics[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1993. (in Chinese)
- [5] 王雨时. 旋转弹丸外弹道自转角速度衰减规律半经验公式[J]. 探测与控制学报, 2003, 25(1):1-6.
WANG Yushi. Half-experiential Formulas for Calculating Decreasing Angular Velocity of Projectile in Trajectory[J]. Journal of Detection & Control, 2003, 25(1):1-6. (in Chinese)

- [6] Geoffrey Frost, Mark Costello. Stability and Control of A Projectile with An Internal Rotating Disk[C]//Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit. Texas: AIAA, 2003:1 - 10.
- [7] 沈仲书,刘亚飞. 弹丸空气动力学[M]. 北京:国防工业出版社,1984.
SHEN Zhongshu, LIU Yafei. Projectile Aerodynamics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984. (in Chinese)
- [8] 解增辉,刘占辰,郭 佳. 高速旋转弹丸外弹道修正分析及数学模型的建立[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(4): 233 - 236.
XIE Zenghui, LIU Zhanchen, GUO Jia. Analyze Exterior Trajectory Correction and Build Arithmetic Model about High - speed Rotary Pill[J]. Journal of Projectiles Rocket Missile and Guidance, 2006, 26(4): 233 - 236. (in Chinese)
- [9] 王智杰,陈伟芳,李 洁. 旋转弹丸空气动力特性数值解法[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(4): 15 - 19.
WANG Zhijie, CHEN Weifang, LI Jie. Numerical Solution of the Aerodynamic Properties of the Rotating Projectiles[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2003, 25(4): 15 - 19. (in Chinese)
- [10] Gonc L O, Tuncer I H, Aksel M H. Computation of Turbulent Flows around Rotating Bodies Using Unstructured Grids[C]//24th Applied Aerodynamics Conference. California: AIAA, 2006:13 - 16.

(编辑:田新华)

Trajectory Correction Principle Analysis and Simulation Research of High - speed Rotating Projectile

XIE Zeng - hui, LIU Zhan - chen, HUANG Ji - chuan

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, 710038, China)

Abstract: It is very difficult to make trajectory correction for high - speed rotating projectile because of rotating characteristic, which can not be solved by adopting the traditional correction projects. Aimed at this technology nodus, a new type of trajectory correction technology project is presented based on piezoelectricity pottery intelligent material. According to the idea that the warhead can act, the warhead correction mechanism is designed. The adding electricity mode of piezoelectricity pottery pole is regulated by detecting rotating frequency of warhead. Consequently, the flexions of the relevant pottery poles are controlled to ensure that the warhead should keep fixed directional deflection in rotating condition. Thus the rotating problem is solved. The system composition and work principle of correction projectile are also discussed amply. Simultaneously, the exterior trajectory mathematic model of correction projectile in ideal condition is founded, and the trajectory curve and detailed data are gained by simulation and calculation. The result shows that the correction project is effective and feasible.

Key words: high - speed rotating projectile; warhead; piezoelectricity pottery; trajectory correction