

# 静电引信探测的主要影响因素分析

熊波<sup>1</sup>,董云龙<sup>1</sup>,王栋<sup>2</sup>,李伟昕<sup>3</sup>

(1. 海军航空大学,山东烟台 264001;2. 72687部队,山东青岛 266100;3. 上海无线电设备研究所,上海 200090)

**摘要:**文章采用电磁场数值仿真的方法对影响静电引信探测的主要因素进行了分析。首先,在导弹壳体不存在的理想情况下验证了仿真模型的准确性;然后,分析了导弹壳体存在时,导弹壳体对探测结果的影响以及壳体带电、海/地平面对探测结果的影响。仿真结果表明,导弹壳体导致电极板上的感应电荷和感应电流比理论值大,而壳体带电、海/地平面对探测电流基本没有影响。

**关键词:**静电引信;影响因素;电磁场仿真

**中图分类号:**TJ434

**文献标志码:**A

静电引信通过弹目交会时感应电流的变化来对目标进行探测。因此,分析弹目交会时产生的感应电流是静电引信探测的关键。理论分析的方法一般假设目标电荷分布为点电荷,采用理论计算对探测电流进行分析,这种方法对于电荷分布比较集中的理想情况是适用的<sup>[1-5]</sup>。但实际情况是,引信探测属于近程探测,目标不能简单看作点目标,而应该看作面目标<sup>[6-11]</sup>。这种情况下,按照理想的点电荷分布计算出来的结果会与实际情况相差甚远。因此,必须采用数值仿真或实验的方法来确定。

文献[12-13]中提出在Maxwell平台上采用参数化建模的方法对静电引信探测进行电磁场仿真分析,解决了弹目交会情况下静电引信探测的动态电流仿真问题。静电引信在实际作战应用中,会遇到各种不同的环境条件,比如,拦截导弹自身是否带电、导弹带电量多少、电压高低对探测电流会产生什么样的影响;导弹拦截低空/超低空飞行的目标时,海/地平面对静电探测会产生什么影响等等。这些问题是静电引信作战应用必须首先解决的<sup>[14-16]</sup>。本文在前期工作的基础上,进一步采用带电金属小球作为探测目标,对影响静电引信探测的诸多因素进行了比较全面的仿真分析。

## 1 静电引信探测机理

假设静电引信的探测极板面积为 $S$ ,引信所处位置的电场强度为 $E$ ,则电极板上的感应电荷为<sup>[17-18]</sup>:

$$Q = \int \epsilon_0 E \cdot dS = \epsilon_0 ES \sin \theta, \quad (1)$$

式中, $\theta$ 为电场强度与探测极板之间的夹角。

显然,当目标处于极板正上方,即 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 时,极板上的感应电荷量最大。

弹目交会条件下,假设理想的带电目标为小球,小球带电量为 $Q_0$ ,小球初始位置位于 $-x_0$ ,以相对运动速度 $v$ 沿水平方向运动,带电小球的高度为 $h$ ,探测极板的面积为 $S$ ,弹目交会过程如图1所示。

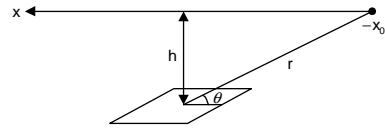


图1 弹目交会过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of missile-target encounter process

假设引信极板的电位为0,则电极板上感应电荷量为:

$$Q = -\epsilon_0 ES \sin \theta = -\frac{Q_0 Sh}{4\pi r^3} = -\frac{Q_0 Sh}{4\pi(h^2 + x^2)^{3/2}}; \quad (2)$$

$$x = -x_0 + vt. \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)得到:

$$Q = -\frac{Q_0 Sh}{4\pi(h^2 + (-x_0 + vt)^2)^{3/2}}. \quad (4)$$

进一步得到极板上的感应电流为:

$$i = \frac{dQ}{dt} = -\frac{3Q_0 Shv(x_0 - vt)}{4\pi(h^2 + (x_0 - vt)^2)^{5/2}}. \quad (5)$$

从探测电流的变化即可对目标进行探测。

### 2 静电引信探测的电磁场仿真

为了对理想目标的探测电流进行仿真分析,采用金属小球作为目标。为了分析导弹壳体对探测电流产生的影响,仿真分为导弹壳体不存在和存在2种情形。导弹壳体存在的情况下,又进一步对导弹壳体带电与否、导弹在自由空间和超低空拦截的情况进行对比分析。

假设金属小球带电量为  $1.1 \times 10^{-5} \text{C}$ , 小球运动区间位于  $x = -10 \sim 10 \text{m}$ , 小球半径为  $10 \text{cm}$ , 弹目交会速度为  $v = 1000 \text{m/s}$ , 脱靶量  $h = 5 \text{m}$ , 电极板探测面积为  $S = 0.02 \text{m}^2$ , 极板中心位于  $x = 0 \text{m}$  处。

#### 2.1 导弹壳体不存在的理想情况

当导弹壳体不存在、只存在探测极板时,仿真模型如图2所示,探测电荷的理论计算和仿真结果对比如图3所示。

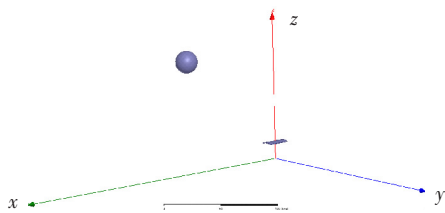


图2 只有探测极板的仿真模型

Fig.2 Simulation model of detection plate alone

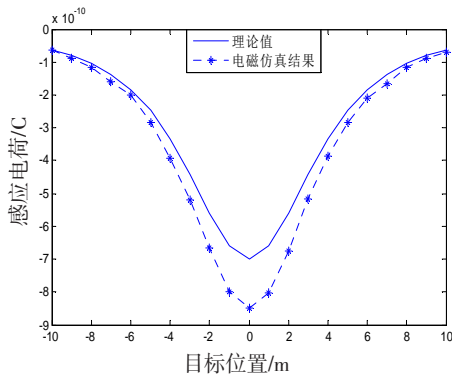


图3 只有探测极板时的感应电荷

Fig.3 Induction charge of detection plate alone

从图3可以看出,目标水平位置较远时,感应电荷量接近于0;目标水平距离为0时,感应电荷量最大,仿真结果为  $-8 \times 10^{-10} \text{C}$ , 而理论值约为  $-7 \times 10^{-10} \text{C}$ 。

探测电流的理论计算/仿真结果对比如图4所示。从图4可以看出,仿真得到的感应电流变化与理论值基本一致,但比理论值略大。

从仿真结果来看,不管是感应电荷还是感应电流的仿真结果与理论值都吻合得比较好,但与理论值比较其绝对值都略偏大。

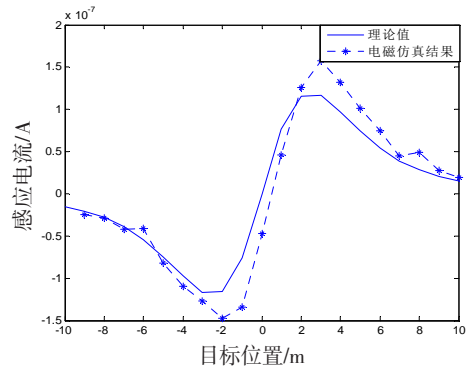


图4 只有探测极板时的感应电流

Fig.4 Induction current of detection plate alone

#### 2.2 导弹壳体存在的情况

在导弹壳体存在的情况下,导弹壳体为等电位体,仿真模型如图5所示。

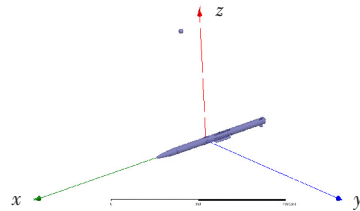


图5 存在导弹壳体时的仿真模型

Fig.5 Simulation model with missile shell

1) 导弹不带电的情况。感应电荷的理论计算/仿真结果对比如图6所示,感应电流的理论计算/仿真结果对比如图7所示。

在导弹壳体存在的情况下,感应电荷量及感应电流明显大于只有电极板时的仿真结果,这是由于导弹壳体是等电位体,电场在壳体附近变成与壳体垂直,因而极板上的电场强度增大,所以感应电荷量也增加。

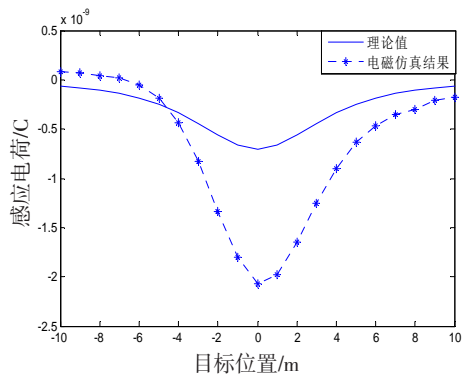


图6 存在导弹壳体时的感应电荷

Fig.6 Induction charge with missile shell

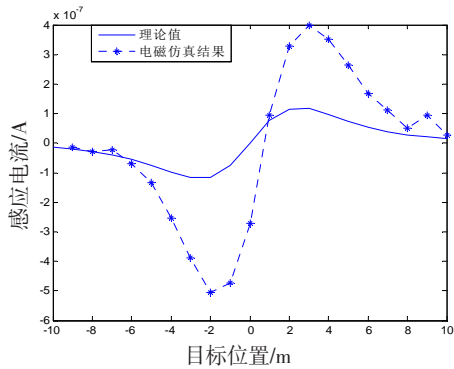


图7 存在导弹壳体时的感应电流

Fig.7 Induction current with missile shell

2)导弹带电的情况。导弹设置为等电位体,电压为1 000 V,仿真得到感应电荷如图8所示。

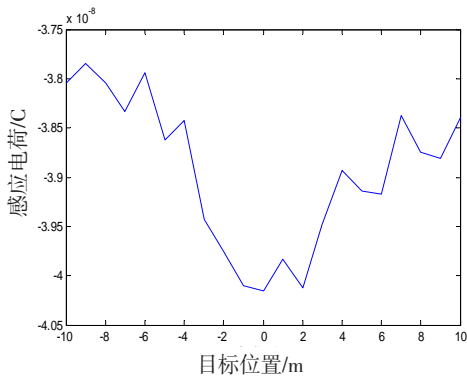


图8 导弹带电时的感应电荷

Fig.8 Induction charge of missile when charged

从图8可以看出,弹目水平距离较远时,感应电荷量约为 $-3.8 \times 10^{-8} \text{C}$ ;水平距离为0时,感应电荷量为 $-4.0 \times 10^{-8} \text{C}$ ,电荷的变化量约为 $2 \times 10^{-9} \text{C}$ ,与图6中仿真得到的电荷变化范围基本相同,但电荷变化曲线不太平滑,有较大的起伏。

对感应电荷进行微分并进行滤波后得到感应电流如图9所示。

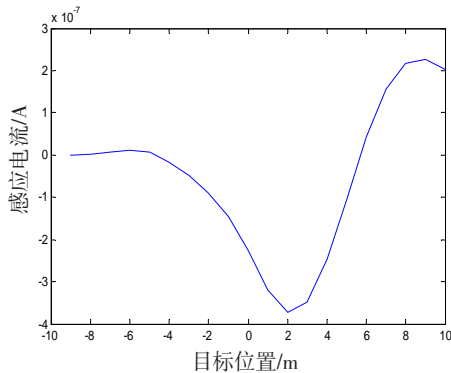


图9 导弹带电时的感应电流

Fig.9 Induction current of missile when charged

图9与图7比较,感应电流仿真结果基本一致,有差异可能是由于滤波造成的。

比较导弹壳体带电和不带电的情况可以看出,感应电荷的变化范围基本相同,感应电流也基本是相同的。分析其原因是导弹带电会在极板上产生感应电荷,但这个感应电荷是固定不变的,所以计算得到的感应电流与导弹不带电的情况相同。

3)低空探测的情况。在低空飞行的情况下,设置region区域的下底面为零电位面,导弹离地面高度为5 m,仿真得到感应电荷的变化如图10所示,仿真得到感应电流的变化如图11所示。

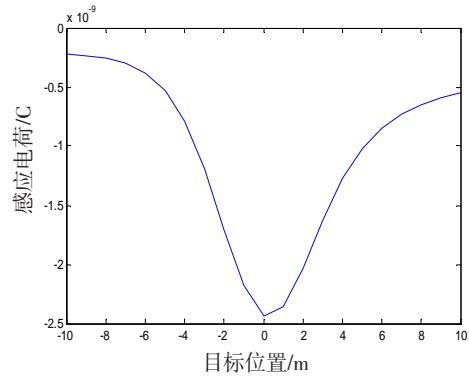


图10 低空时的感应电荷

Fig.10 Induction charge of low altitude

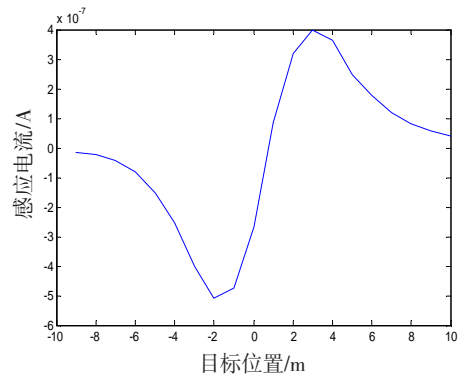


图11 低空时的感应电流

Fig.11 Induction current of low altitude

比较图10、11与图6、7,仿真结果基本完全一致,说明海/地平面对感应电荷和感应电流基本没有影响。这是由于导弹已经是等电位体,电场垂直于导弹表面,海/地平面也是等电位体,电场同样垂直于海/地平面。海/地平面会对其附近的电场会产生影响,在导弹壳体附近,电场主要受壳体影响,海/地平面的影响基本可以忽略。

### 3 仿真结果分析

为了验证仿真模型的准确性,本文首先对只有探

测电极板存在的情况进行了仿真分析。只有电极板存在时,感应电荷量、感应电流的仿真结果与理论值非常接近,说明仿真建模的方法是正确的。

然后,对导弹壳体存在的情况进行了仿真,导弹壳体存在时,极板上感应的电荷量、感应电流比理论值大几倍。显然,导弹壳体对目标电场有影响,分析其原因是导弹壳体为等电位体,电场垂直于导弹壳体,与自由空间的电场分布比较,电场强度增大,造成感应电荷量和感应电流增加。

接着,对导弹带电的情况进行仿真分析,导弹带电的情况下,极板上的感应电荷量会发生改变,但电荷量的变化趋势和变化范围与导弹不带电时基本一致,感应电流也基本相同。分析其原因在于导弹上的电压会在极板上产生感应电荷,但由于感应电荷量保持恒定,所以对感应电流基本不会产生影响。

最后,对导弹超低空飞行的情况进行了仿真分析,在导弹超低空飞行的情况下,极板上的感应电荷和感应电流基本不变。分析其原因在于海/地平面会对其附近的电场会产生影响,在探测极板附近,电场主要受壳体影响,海/地平面的影响相比较而言基本可以忽略。

#### 4 结论

本文提出在Maxwell平台上采用参数化建模的方法对静电引信探测进行电磁场仿真分析,解决了弹目交会情况下静电引信探测的动态电流仿真问题,并对影响静电探测的各种因素进行了仿真分析,可以得出如下结论:

- 1) 导弹壳体会影响到目标电场的分布,使电场增大,从而造成感应电极板上感应电荷量和电流增大;
- 2) 导弹自身带电会在极板上产生感应电荷,但由于电压不变感应电荷也一直保持恒定,因而对弹目交会时的探测电流没有影响;
- 3) 导弹超低空飞行的情况下,海/地平面对电场分布的影响与导弹壳体比较可以忽略,因而海/地平面对感应电荷及感应电流基本没有影响。

#### 参考文献:

- [1] 马龙,崔占忠. 静电目标场源特性分析[J]. 探测与控制学报,2004,26(1):24-26.  
MA LONG, CUI ZHANZHONG. The field source character analysis of electrostatic target[J]. Journal of Detection & Control, 2004, 26(1): 24-26. (in Chinese)
- [2] 付巍,陈曦,崔占忠. 静电引信目标电场建模[J]. 探测与控制学报,2008,30(5):7-10.  
FU WEI, CHEN XI, CUI ZHANZHONG. Target electric field modeling of electrostatic fuze[J]. Journal of Detection & Control, 2008, 30(5): 7-10. (in Chinese)
- [3] 郝晓辉,冯渊,崔占忠. 基于正交静电探测阵列空中目标测速定向[J]. 仪器仪表学报,2014,35(3):566-571.  
HAO XIAOHUI, FENG YUAN, CUI ZHANZHONG. Determination of velocity and direction of air targets based on orthogonal electrostatic detection array[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3): 566-571. (in Chinese)
- [4] LAW S E. Electrostatic induction instrumentation for tracking and charge measurement of airborne agricultural particulates[J]. Transactions of ASAE, 1975, 18(1): 40-45.
- [5] GAJEWSKI J B. Non-contact electrostatic flow probes for measuring the flow rate and charge in the two-phase gas-solids flows[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(7): 2262-2270.
- [6] 陈曦,崔占忠,陈方. 空中静电目标特性分析[J]. 北京理工大学学报,2005,25(S):169-172.  
CHEN XI, CUI ZHANZHONG, CHEN FANG. Analysis on the properties of electrostatic target[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2005, 25(S): 169-172. (in Chinese)
- [7] RIEHL P S, SCOFF KL, MULLER R S, et al. Electrostatic charge and field sensors based on micromechanical resonators[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2003, 12(5): 577-589.
- [8] 徐一鸣,左洪福,詹志娟,等. 基于灵敏度分析的静电传感器优化设计[J]. 仪器仪表学报,2012,33(5):1084-1089.  
XU YIMING, ZUO HONGFU, ZHAN ZHIJUAN, et al. Optimal design of electrostatic sensor based on sensitivity analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(5): 1084-1089. (in Chinese)
- [9] 白玉贤. 静电引信探测模型的建立与分析[J]. 探测与控制学报,2002,24(2):45-48.  
BAI YUXIAN. The establishment and analysis for detecting model of electrostatic fuze[J]. Journal of Detection & Control, 2002, 24(2): 45-48. (in Chinese)
- [10] MURNANE S N, BARNES R N, WOODHEAD S R, et al. Electrostatic modelling and measurement of airborne particle concentration[J]. IEEE Transactions on Instru-

- mentation and Measurement, 1996, 45(2):488-492.
- [11] MACIEJ A NORAS. Electric field sensor based on varactor Diode/MIS/MOS structure[C]//IEEE Industry Application Society Annual Meeting. New York: IEEE, 2010: 1-3.
- [12] 王栋,熊波,李伟昕. 静电探测影响因素仿真分析[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(12):272-277.  
WANG DONG, XIONG BO, LI WEIXIN. Simulation analysis of influencing factors of electrostatic detection [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(12):272-277. (in Chinese)
- [13] 王栋,熊波. 运动目标的静电场探测仿真分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2017, 32(4):411-415.  
WANG DONG, XIONG BO. Simulation analysis of electrostatic field detection of moving target[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2017, 32(4):411-415. (in Chinese)
- [14] 李银林,崔占忠,白玉贤,等. 感应式静电引信探测技术[J]. 北京理工大学学报, 1999, 19(S1):47-50.  
LI YINLIN, CUI ZHANZHONG, BAI YUXIAN, et al. Charge-inducing electrostatic fuse detecting technology [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1999, 19(S1):47-50. (in Chinese)
- [15] 毕军建. 对空弹药引信用静电矢量探测技术研究[D]. 北京:北京理工大学, 2005: 13-40.  
BI JUNJIAN. Research on the technology of electrostatic vector detection for anti-aircraft ammunition fuze[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2005: 13-40. (in Chinese)
- [16] 陈曦. 被动式地面静电探测器研究[D]. 北京:北京理工大学, 2003:63-78.  
CHEN XI. Research on the technology of passive ground electrostatic detection[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2003:63-78. (in Chinese)
- [17] DAVID K CHENG. 电磁场与电磁波[M]. 北京:清华大学出版社, 2013:52.  
DAVID K CHENG. Field and wave electromagnetics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 52. (in Chinese)
- [18] YAN Y. Guide to the flow measurement of particulate solids in pipelines, part 1: fundamentals and principles[J]. Powder Handling & Processing, 2001, 13(4):343-352.

## Analysis of Main Influence Factors on Electrostatic Fuse Detection

XIONG Bo<sup>1</sup>, DONG Yunlong<sup>1</sup>, WANG Dong<sup>2</sup>, LI Weixin<sup>3</sup>

(1. Naval Aviation University, Yantai Shandong 264001, China;

2. The 72687<sup>th</sup> Unit of PLA, Qingdao Shandong 266100, China;

3. Shanghai Institute of Radio Equipment, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** To analyze main influence factors on electrostatic fuse, electromagnetic simulation method was first applied to build simulation model under the perfect condition without missile shell and the result was in accordance with theoretical analysis. Then, influence of the missile shell, the shell voltage and the sea or ground level to detection result was analyzed. Simulation results show that, the missile shell will make the induced charge and induced current larger than the theoretical value, but the shell voltage and the sea or ground level has almost no influence to the induced current.

**Key words:** electrostatic fuse; influence factors; electromagnetic simulation