2016年6月

## 文章编号: 2095-4980(2016)03-0365-07

# 毫米波与静电复合定向探测与目标识别技术

刘东芳,陈若飞

(上海无线电设备研究所,上海 200090)

摘 要:为实现高精确度的脱靶方位探测,分析了静电探测矢量测角算法原理并推导出探测 方程。提出了毫米波与静电复合探测目标识别方法和起爆控制方法,通过试验验证了毫米波与静 电复合定向探测技术的可行性。试验结果表明毫米波与静电复合探测技术具有良好的定位精确度 和较强的抗干扰性能,可满足定向引战系统的高精确度起爆控制要求。

关键词:目标带电特性;毫米波与静电复合探测;目标识别方法

中图分类号: TN911.7 文献标识码: A doi:10.11805/TKYDA201603.0365

# Target position and identification with millimeter wave and electrostatic compound detection

LIU Dongfang, CHEN Ruofei

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** To achieve a high accuracy detection for the target missing in azimuth, the principle of angle vector measurement with electrostatic detection system is studied thoroughly and the equations for rolling angle detection are derived. Furthermore, the methods of target identification and detonation control are given after the mechanism of target and disturbance identification. In the end, the feasibility of the position and identification with millimeter wave and electrostatic compound detection is verified by a test. Result shows that millimeter wave and electrostatic compound directional detection technique has high positioning accuracy and strong anti-jamming performance. It can meet the requirements of high accuracy detonation control for directional fuze-warhead system.

Key words: characteristic of electrostatic target; millimeter wave and electrostatic compound detection; technique of target identification

定向引战技术采取引信精确识别目标方位与战斗部飞散角控制技术相结合,引信精确控制战斗部起爆时刻、 方式、方向,实现战斗部大部分爆炸破片指向目标,极大地增加了战斗部的杀伤威力。毫米波探测体制由于毫米 波频带极宽,可用扩谱方式工作,毫米波天线可实现很窄的波束设计,天线增益高,定角精确度高,抗干扰能力 强。静电探测技术是近几十年才发展起来的一种新体制探测技术,飞机上带静电电量达 10<sup>-6</sup> C~10<sup>-4</sup> C,产生的感 生电压可达到几十千伏甚至几百千伏,在目标周围产生很强的静电场,采用静电阵列探测技术可获取目标的方位 信息,静电探测采取被动式探测,隐蔽性好,抗电磁干扰能力强,具有较强的反隐身能力<sup>[1-3]</sup>。毫米波与静电复 合探测技术同时具有毫米波探测技术和静电探测技术的优点,而且毫米波探测技术和静电探测技术复合后优缺点 可以相互弥补,可实现高精确度的脱靶方位探测。

## 1 目标带电特性分析

# 1.1 电场极低频变化

由于目标在运动过程中同时存在充电和放电现象,因此运动目标电场总是时刻变化,这种电场不是严格意义 上的静电场,而是一种准静电场。目标带电量受气候影响比较大,在一定的气候条件下,目标最大带电量由目标 曲率最大处的电晕放电阈值决定,目标在运动过程中不断地充电,当目标电势超过曲率最大处的电晕放电阈值时, 产生电晕放电,运动目标的带电量迅速下降,电势随之下降,同时目标不停地充电,当目标电势又一次超过曲率 最大处的电晕放电阈值时又开始放电,运动目标就是这样以极低的频率周而复始地充放电。

#### 1.2 目标带电量大,无法彻底消除

由于电荷产生的固有机理,现有技术条件下无法彻底消除运动目标的静电。对于高速飞行的飞机目标,虽然 研究人员采取了各种技术手段,仍然无法彻底消除所产生的静电,目前飞机带电量仍然十分巨大,据资料调研, 直升机带电量达 10<sup>-6</sup> C~10<sup>-4</sup> C,喷气式飞机带电量可达 10<sup>-3</sup> C,电势可达几万伏甚至几十万伏,足以让几百米外 的静电探测器探测到<sup>[1-2]</sup>。

#### 1.3 目标带电体积大于实际体积,带电中心不在几何中心

研究表明飞行目标带电体的体积远大于目标的实际体积。对于喷气式飞机,由于发动机喷出的尾焰带有大量的带电粒子,在飞机尾部形成几米甚至几十米长的带电带,从而使飞机的带电中心处于尾部而不是几何中心。对于直升机,由于旋翼高速旋转,与空气高速撞击,使得直升机有 50%的电荷分布在旋翼上<sup>[4]</sup>。

#### 1.4 目标上离带电中心最远处以外区域可将目标电场近似为点电荷电场

采用 MATLAB 的 PDETool(偏微分方程工具箱)对椭圆形带电目标进行仿真<sup>[5]</sup>,设分布区域为带电体几何中心 为圆心,半径为 200 的圆形区域,边界条件为 0,带电目标是长轴为 50,短轴为 5 的椭球形目标,带电密度分别 设为 πε<sub>0</sub> 和 16πε<sub>0</sub>,仿真得到目标电场在不同带电密度时的电场分布如图 1 所示,由仿真结果可以看出,在离带 电中心最远处以外区域,电力线放射状均匀分布,等势线为以带电中心为圆心的同心圆分布,带电密度大的目标 比带电密度小的目标电场分布均匀性更好,目标电场边沿的电场分布均匀性比较差。因此,以目标最大尺寸为半 径的球面以外的区域,目标电场可近似认为是点电荷电场,因而在中近程探测时目标电场完全可看作点电荷电场。



图 1 带电目标电场仿真结果

#### 2 方位探测算法原理

毫米波与静电复合定向探测引信(简称定向探测引信)由 毫米波探测器负责探测目标俯仰角,静电探测器负责探测目 标方位角。毫米波探测器的每根接收天线由2个子天线组成, 子天线1波束设计成窄波束,波束倾角与所要探测的俯仰角 相同,子天线2设计成宽波束天线,当子天线1接收到的信 号回波功率超过子天线2时,目标的俯仰角即与子天线1的 波束倾角相等,这样就实现了目标俯仰角探测。静电探测器 的电极阵列由4个沿圆周均匀分布的电极组成,导弹与目标 交会时,由于每个电极与带电目标的夹角不同,因此每个电 极中感应出电荷量不一样,导致每个电极在导弹与目标交会



过程中的电荷变化率也不一样,与静电探测器电极相连的传感器电路将每个电极的电荷变化转换成电压信号,然 后根据静电探测矢量测角算法得出目标的方位角<sup>[6-8]</sup>。定向探测引信的电极阵列和天线阵列分布示意图 如图 2 所示。 设空间存在带电目标 T(如飞机),其带电量为 q,由于目标的带电量非常大,导弹飞行自身所带的电荷远小于目标带电量,距离带电目标几米到几十米,导弹相对带电目标来说体积小得多,因此可把导弹与目标交会期间的目标电场看成点电荷电场,电场强度为 E,导弹本身所带静电远小于目标电场,其对目标电场的影响可忽略不计。静电探测器电极在目标静电场的作用下,每对探测电极间产生不同的电势差,设每对电极的电势差分别为 U<sub>AB</sub>和 U<sub>CD</sub>,弹体半径为 r,定向探测引信距离目标距离

为 R,每对极板间的距离分别为  $L_{AB}$ 和  $L_{CD}$ ,且  $L_{AB}=L_{CD}=2r$ ,则  $U_{AB}$ 和  $U_{CD}$ 大小分别为:

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{AB}} = \boldsymbol{E}_{\mathrm{AB}} \boldsymbol{L}_{\mathrm{AB}} = \boldsymbol{E}_{\mathrm{AB}} \times 2r \tag{1}$$

$$\boldsymbol{U}_{\rm CD} = \boldsymbol{E}_{\rm CD} \boldsymbol{L}_{\rm CD} = \boldsymbol{E}_{\rm CD} \times 2r \tag{2}$$

由于目标电场在静电探测器电极处的场强分别为:

$$\boldsymbol{E}_{\rm AB} = -\frac{q}{4\pi\varepsilon R^2}\cos\alpha \tag{3}$$

$$\boldsymbol{E}_{\rm CD} = -\frac{q}{4\pi\varepsilon R^2}\sin\alpha \qquad (4)$$

式中: ε 为电极绝缘材料介电常数; α 为带电目标在引信 坐标系中以电极 A 为基准的方位角。

将式(3)和式(4)分别代入式(1)和式(2),得:

$$\cos\alpha = -\frac{2\pi\varepsilon R^2 U_{AB}}{qr} \tag{5}$$

$$\sin \alpha = -\frac{2\pi\varepsilon R^2 U_{\rm CD}}{ar} \tag{6}$$



antenna

将式(6)除以式(5)后变换得:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{U_{\rm CD}}{U_{\rm AB}}\right) \tag{7}$$

根据图 3 中目标与定向探测引信电极的三角函数关系,可得目标在脱靶点时方位角α、俯仰角β和脱靶方位 角 γ 的关系为:

$$\sin \gamma = \frac{\tan \beta}{\sqrt{(\tan \alpha)^2 + (\sin \beta)^2}}$$
(8)

变化式(8)可得到脱靶方位角 y为:

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{\tan\beta}{\sqrt{(\tan\alpha)^2 + (\sin\beta)^2}}\right) \tag{9}$$

由于不同极性的目标电场在电极对上感应出的电势差 不同,可以根据2对电极的电势差判断目标所在的坐标象 限,如表1所示,根据式(7)得到的目标在定向探测引信坐 标系下的方位角α在0°~360°范围内具有唯一性。

# 3 目标识别与起爆控制方法

#### 3.1 目标识别

导弹与目标交会时,定向探测引信的静电探测器输出 的电压波形类似一个周期的正弦波形,如图 4 所示,电压 信号的波峰是由静电探测器接近目标电场时形成的,波谷 则是由静电探测器远离目标电场形成的,电压信号的过零 点是在导弹处于脱靶点时形成。当静电探测器接近目标电



Fig.4 Voltage signals relation to the pole when electrostatic detector rendezvous with target 图 4 静电探测器与目标交会时每个电极对应的输出电压信号

场时,静电探测器的电极上的感应电荷从零开始逐渐增大,当电极位于脱靶点时电荷达到最大,静电探测器飞过 脱靶点后,目标电场在电极上的感应电荷逐渐减小,与此同时,由于电极感应电荷变化率取决于电极所在位置电 场的变化率,因此电极上感应电荷的变化率从零开始逐渐正向增大,然后逐渐减小,在静电传感电路输出端形成 波峰电压信号,当电极上电荷达到最大时,电极法线与目标电场方向平行电荷变化率为零,静电探测器飞过脱靶 点后,电极上电荷变化率负向增加,达到负的最大值后逐渐减小为零,在静电传感电路输出端形成波谷电压信号, 导弹飞过目标电场示意图如图 5 所示。

Table1 Potential difference of the dual pole relation with the charge polarity of target and target position electrostatic target with positive charge electrostatic target with negative charge location quadrant of electrostatic target  $U_{\rm AB}$  $U_{\rm CD}$  $U_{AB}$  $U_{\rm CD}$ positive positive first quadrant negative negative second quadrant positive negative negative positive positive third quadrant positive negative negative fourth quadrant negative positive positive negative

表1 电极对电势差与目标所带电荷极性、位置关系

定向探测引信通过毫米波探测器获取导弹与目标交会速度,分析 静电探测器各个电极对应的输出电压信号波形,可将目标与背景干扰 区分出来。静电探测器输出电压信号从波峰变化到波谷的时间由交会 速度和目标尺寸决定,当交会速度已知时,目标的尺寸越大,静电探 测器输出电压信号从波峰变化到波谷的时间越长,即信号频率越低; 当目标尺寸已知时,交会速度越大,静电探测器输出电压信号从波峰 变化到波谷的时间越短,即信号频率越高。值得注意的是当目标尺寸 和电场一定时,交会速度越大,在探测器电极上感应出的电荷变化率 越大,静电探测器输出的电压信号也越大,信噪比随之增大,静电探 测的探测距离也会随之增大。由于带电云团等带电背景目标尺寸远大 于目标尺寸,而且导弹与目标交会速度比导弹与背景交会速度大得 多,因此背景目标在静电探测阵列形成的电压信号频率比真实的带电 目标形成的电压信号频率低,采用数字信号处理技术可将真实的目标 信号提取出来。





考虑到毫米波探测器对带电背景目标干扰不敏感,而且具有良好的距离截止特性,将静电探测目标识别算法 与毫米波探测目标识别算法相结合,可有效地将目标从背景干扰中识别出来。若毫米波探测器没有回波信号,而 静电探测器存在感应信号,则可认为静电探测器探测到的感应信号为背景目标干扰信号;若毫米波探测器存在回 波信号时,静电探测器也探测到感应信号,则可认为此时探测到的是真实目标;若毫米波探测器探测到回波信号 而静电探测器没有探测到感应信号,则可认为毫米波探测器遭到电磁干扰。

#### 3.2 起爆控制

目标电场在静电探测器电极中感应出变化的静电荷的过 程就是导弹与目标的交会过程,如图 6 所示,静电探测器输 出的因电荷变化而形成的电压信号与导弹接近或飞离目标电 场相对应,导弹接近目标电场时静电探测器输出的电压信号 幅度从零开始正或负增加,电压信号幅度达到正或负的最大 值后开始减小,到达脱靶点时电压信号幅度处于过零点,然 后达到负或正的最大值,导弹飞离目标电场时,电压信号逐 步减小到零。

由图 6 可以看出,静电探测器的起爆点必须处于电压信 号波形存在的这段时间内,由于导弹与目标交会的时间很短, 若要等静电探测器产生完整的电压波形信号后再发出起爆信 号,导弹已经开始飞离目标电场,这时毁伤效果会大大降低 甚至脱靶。因此,必须在静电探测器产生的电压波形信号时 间范围内发出起爆信号。由前述目标带电特性分析可知,由



Fig.6 Sketch of voltage signal change when electrostatic detector rendezvous with target
 图 6 静电探测器与目标交会时输出电压信号变化示意图

于带电目标的电荷中心一般不与几何中心重合,导弹迎头攻击和尾追攻击目标时,根据静电探测器输出的电压波 形信号来产生起爆信号的炸点不同,由于目标尾焰喷射产生的静电导致目标电荷中心位于目标尾部附近甚至离开 目标本身,迎头攻击时,静电探测器的炸点必须位于静电探测器输出电压信号的电压过零点之前,尾追攻击时, 静电探测器的炸点必须位于静电探测器输出电压信号的电压过零点之后,所以静电探测器的起爆控制精确度差, 脱靶的概率较大。采用毫米波与静电复合探测的方法可以很好地解决这个问题,只要毫米波探测器和静电探测器 同时探测到目标时才产生起爆信号,由于毫米波探测器具有良好的距离截止特性,因此毫米波与静电复合定向探 测引信具有较高的起爆控制精确度。

# 4 毫米波与静电复合定向探测引信工程实现

毫米波与静电复合定向探测引信系统主要由毫米波收发天 线、毫米波收发组件、静电探测电极阵列、静电阵列转换器、信 号预处理器和数字信号处理器等组成,如图 7 所示。

对于定向探测引信的静电探测器,每个静电探测电极在目标 电场中飞行时因感应目标电场而产生变化的感应电荷从而产生 电流信号,该电流信号经静电阵列信号转换器处理后形成相应的 微弱电压信号,该电压信号经信号预处理器滤波、放大等处理后 形成较强的随静电探测电极上感应电荷变化率大小变化而变化 的电压信号,信号处理器对静电探测器的4路电压信号进行处理 可得到目标的方位角信息。对于定向探测引信的毫米波探测器, 毫米波收发器产生的毫米波信号经发射天线发射后,部分信号由 目标反射到接收天线并转换成微弱的毫米波信号,该信号经毫米 波收发器处理后形成目标回波视频信号,然后由信号预处理器处 理后形成目标回波多普勒信号,信号处理器对信号预处理器输出 的目标回波多普勒信号处理后可对目标进行识别和定角,毫米波 探测器接收天线倾角与所探测的俯仰角相同,只要探测到目标, 这时目标的俯仰角即为接收天线的倾角。由于毫米波接收天线波 束宽度可达 2°, 毫米波探测器的定角精确度不超过 3°, 故毫米 波与静电复合定向探测引信可实现较高的起爆控制精确度。

# 5 毫米波与静电复合定向探测试验

定向探测引信对带电飞机模型的定向探测试验如图 8 所示,定向探测引信固定在沿轨道运动的小车上,并 沿轨道以 15 m/s 的速度运动,带电飞机模型悬挂在绝缘 支架上,通过高压电缆与直流高压发生器连接,调节直 流高压发生器输出电压可以改变带电飞机模型的电场强 度,定向探测引信与带电飞机模型交会时,输出包含有 方位角和俯仰角信息的数据,信号处理器对该数据进行 处理即可得到精确的目标方位信息。对于方位角探测, 试验得到带电飞机模型方位角分别为-10°,-60°和 70°时 的静电探测器输出的试验曲线和处理结果如图 9~图 11 所示,图中上一个子图为采集到的每个电极对应的输出 电压信号,下一个子图为聚集到的每个电极对应的输出 电压信号,下一个子图为数字信号处理器处理 4 个 电极对应的输出电压信号得到的角度数据。试验数 据处理后得到定向探测引信实测的飞机模型方位角 数据如表 2 所示。

对于俯仰角探测,毫米波探测器输出报警信号



Fig.7 Block of millimeter wave and electrostatic compound directional detection system
 图 7 毫米波与静电复合定向探测引信系统框图



Fig.8 Test of millimeter wave and electrostatic compound detection 图 8 毫米波与静电复合探测试验

	Table2 Results of test			
No.	rolling angle/(°)	pitching angle/(°)	measured value/(°)	
1	-60	65	(-54)-(-67)	
2	-10	65	(-3)-(-15)	
3	70	65	61-77	

时飞机模型的俯仰角即为毫米波探测器接收天线的倾角。

由试验结果可以看出,毫米波与静电复合定向探测引信对飞机模型目标方位角的测角精确度优于 11°, 远优 于单一的无线电定向探测引信 60°的测角精确度,能满足定向引战系统的高精确度起爆控制要求。



# 6 结论

毫米波与静电复合探测技术具有良好的定位精确度和较强的抗干扰性能,可以解决单一的静电探测器在带电 背景目标干扰环境下不能正确识别真实目标和单一的无线电定向探测引信测角精确度差等技术难题,用于定向引 信具有良好的应用前景。

# 参考文献:

- [1] 贺柳良.静电探测系统定位的研究及其实现[D].北京:北京理工大学, 2009. (HE Liuliang. Research and implementation on object location for electrostatic detection system[D]. Beijing:Master Dissertation of Beijing Institute of Technology, 2009.)
- [2] 韩磊.静电探测机理与应用[M].北京:国防工业出版社, 2012. (HAN Lei. Static Detection Mechanism and Application[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2012.)
- [3] 李兴国,李跃华. 毫米波近感技术基础[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2009. (LI Xingguo,LI Yuehua. The Base of Millimeter Wave Proximity Detection Technology[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press, 2009.)
- [4] 郝晓辉,虞健飞,崔占忠. 直升机静电场研究[J]. 兵工学报, 2012,33(5):583-587. (HAO Xiaohui,YU Jianfei,CUI Zhanzhong. Research on electrostatic field of helicopter[J]. Acta Armamentarii, 2012,33(5):583-587.)
- [5] 张志涌. 精通 MATLAB6.5 版[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2003. (ZHANG Zhiyong. Master MATLAB6.5[M].
  Beijing:Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2003.)
- [6] 李彦旭,陈曦,徐立新,等. 双电极静电引信起爆控制技术研究[J]. 弹箭与制导学报, 2013,33(1):97-99. (LI Yanxu, CHEN Xi, XU Lixin, et al. The research on double electrode electrostatic fuze burst control technique[J]. Journal of Ballistic, 2013,33(1):97-99.)
- [7] 李彦旭,徐立新,赵不贿. 基于主动式静电探测技术的目标定位方法[J]. 传感器与微系统, 2012,31(4):4-6. (LI Yanxu, XU Lixin,ZHAO Buhui. Method of target localization based on active electrostatic detection technique[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012,31(4):4-6.)
- [8] 毕军建,崔占忠,陈曦. 空中目标静电场矢量定位方法研究[J]. 探测与控制学报, 2005,27(1):16-18. (BI Junjian, CUI Zhanzhong, CHEN Xi. Research on aerial object location method using electrostatic vector measurement[J]. Journal of Detection & Control, 2005,27(1):16-18.)

#### 作者简介:



**刘东芳**(1978-),男,江西省高安市人,硕 士,高级工程师,主要研究方向为引信技术、 高度表技术.email:liudf168@sina.com. 陈若飞(1978-), 女,浙江省瑞安市人,高级工程师,主要研究方向为目标探测与信息处理技术.

# 

中国生物特征识别学术会议(Chinese Conference on Biometric Recognition)是由中国人工智能学会(CAAI)主办, CAAI模式识别专业委员会协办的国内生物特征识别领域的学术盛会。自2000年始,CCBR已经在北京、杭州、西安、 广州、济南、沈阳和天津等地成功举办了10届,为生物特征识别领域的学生、老师和工业界研究人员提供了一个活跃 的学科互动和信息交流平台,有力促进了国内本领域的学术和技术发展。

2016年中国生物特征识别学术会议(CCBR2016)将于 2016年10月14—16日在成都举行,由四川川大智胜软件股份有限公司和四川大学联合承办。这是中国生物特征识别大会首次来到西南地区。本届会议将汇聚国内从事生物特征 识别理论与应用研究的广大科研工作者,并邀请国际同行,共同分享我国生物特征识别研究的最新理论和技术成果, 为大家提供精彩的学术盛宴。

现向广大科技工作者公开征集优秀学术论文(英文),大会录用的稿件将由 Springer 出版社的 Lecture Notes in Computer Sciences(LNCS)图书系列出版,并被 EI 和 ISTP 检索。欢迎学术界和工业界的同仁踊跃投稿、积极参会! 有关本届大会的更多信息请参见大会网站: http://www.wisesoft.com.cn/ccbr2016/。