

电路与控制

基于静电探测理论的对空探测技术研究

李 焜, 黄 韬

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

摘 要: 被动式静电探测设备通过探测空中运动目标周围的静电场, 获取目标的有关信息, 具有结构简单、隐蔽性强、抗干扰性好及反隐身的优点。基于静电探测理论的电场探测系统通过探测空中目标周围的静电场, 得到目标的信息, 通过阵列式摆放静电探测设备, 还可对空中目标的方位进行近似推算。文中开展了对空中运动物体静电信号的特性分析, 确定了静电探测的方法, 并进行了信号检测电路的原理设计, 最终通过计算仿真对静电探测器探测效果进行了验证。

关键词: 静电探测; 探测电路; 微弱信号检测

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-03-0054-05

Research on Air-sensing Technology Based on Electrostatic Detection Theory

LI Xuan, HUANG Tao

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

Abstract: Passive electrostatic detection system can capture target information by detecting the electrostatic field around air moving targets. It has the advantages of simple construction, good concealment, high anti-interference and anti-stealth ability. The target information is obtained by the electrostatic field detecting system based on electrostatic field detecting theory through detecting the electrostatic field around air moving targets. And approximately calculation of the azimuth of air targets is performed by electrostatic detection equipment array. The electrostatic signal characteristic analysis of the air moving targets is performed to determine electrostatic detection method and the principle design of the signal detection circuit is confirmed. And the detection effect of the electrostatic detector is validated through calculation simulation.

Key words: electrostatic detection; detection circuit; weak signal detection

1 静电探测技术原理及其优势

鉴于目前隐身技术主要针对利用雷达波、红外、声波、及光进行探测的探测体制, 目前反隐身探测系统除提高自身反隐身能力外, 还可借助其他的可探测场进行研究。空中飞行目标周围的静电场就是其中一种。

静电场产生的机理也很简单, 任何使用电源或移动的物体都有可能因不同的带电过程而带上静电, 飞行的飞机所携带的静电量是相当可观的。据

资料显示, 喷气式飞机的带电量可达 10^{-3} C, 直升机的带电量可达 10^{-6} ~ 10^{-4} C, 飞行弹丸带电量可达 10^{-12} ~ 10^{-6} C。飞机的电位一般为几十千伏。空中目标在飞行过程中产生的静电, 可在其周围空间几百米甚至上千米的较大范围内形成探测电场。

静电探测就是指通过探测目标周围空间的静电场来得到目标的有关信息的一种探测方法。静电探测的理论基础是静电场原理, 利用探测电极对空中目标的静电场感应获取目标的信息。截至到现在, 飞行目标产生的静电场是无法去除的, 因此

无法如同现有的隐身飞机对无线电波探测系统隐身一样对静电探测系统隐身,而这也是静电探测技术的优势所在。

2 静电探测工作原理及实现方法

2.1 空中目标带电特性分析

空中目标的带电特性分析如下:

(1) 频率极低的变化特性:变化的频率范围约为直流至几千赫兹;

(2) 带电体积大于实际体积:特别是发动机将大量的正电荷随喷流喷出,有时可能形成几十米长的电荷带,观测表明,这是飞机、导弹起电的主要作用因素,这样就造成了喷气式飞机实际带电中心往往位于其尾部而非飞机的几何中心;

(3) 带电数量大,难于去除。对于运动速度很高的飞机和导弹来说,由于电荷产生的固有原理,飞机的带电量是一个巨大的数目。

2.2 静电探测方法

静电探测原理框图如图1所示。

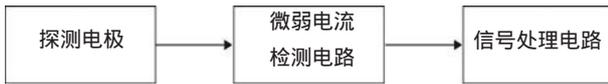


图1 静电探测器原理框图

静电探测器前端探测到信号,首先经过微弱电流检测电路放大,后续使用相应算法得出空中带电目标的具体信息(如带电量大小、目标方位信息)。一般来说,探测目标方位的方法可以分为两类:第一类是通过探测器某种形式的运动,依赖检测信号的变化进行方位的测定,一般称为搜索式定位;第二类是通过多个探测器接收到的信号进行比较处理来定向,对于第二种方式,可以通过采用探测极板的阵列来进行测量。总而言之,静电探测器设计的目的是通过对某种静电场物理量的测量来获取目标信息,因此必须首先确定所要测量的静电场参数,然后确定如何由该参数求解包含的目标信息,从而最终达到对静电目标探测的目的。

静电场信号探测常用的方法包括动态电容法和动态电荷法。

2.2.1 动态电容法

动态电容法测静电电压原理图和等效电路图如图2所示。

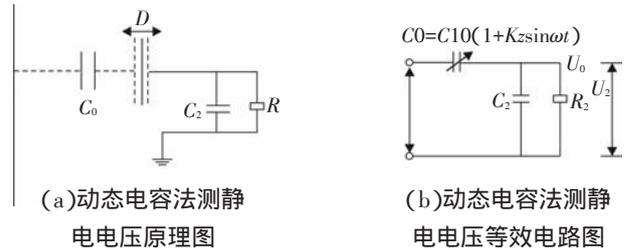


图2 动态电容法测静电电压原理图和等效电路图

测量极板 D 在水平方向周期振动。设探头电极与被测物体间电容 C_0 的变化规律 $C_0 = C(1 + k_2 \sin \omega t)$,其中, k_2 为调制系数,由于电机的振幅很小, $k_2 \leq 1$, C 为测量电极在平衡位置时的静态电容; ω 为测量电极的振动角频率。

分析动态电容法测量静电电压等效电路图可得,振动电容式仪表在暂态过程输入电压为

$$U_2 = \frac{i}{\sqrt{(1/R_2)^2 + \omega^2 C_2^2}} \quad (1)$$

$$i = \frac{dQ_0}{dt} \approx \frac{d(C_0 D_0)}{dt} = U_0 C k_2 \omega \cos \omega t \quad (2)$$

其中, $Q_0 = C_0(U_0 - U_2)$ 为探头电机上感应电荷,对静电测试而言, $U_2 \ll U_0$,所以有

$$i \approx U_0 \cdot \frac{dC_0}{dt} = U_0 C_{10} k_2 \omega \cos \omega t \quad (3)$$

则有

$$U_2 = U_0 \cdot \frac{C_{10} k_2 \omega}{\sqrt{(1/R_2)^2 + \omega^2 C_2^2}} \cos \omega t \quad (4)$$

动态电容法的输入为交流信号,即使输入电阻 R_2 为一有限值, U_2 也不随时间衰减,为一正比于被测电位 U_0 的稳定值。同时可以看出,为减小测试误差,必须保持耦合电容、调制系数和振动角频率的稳定。

2.2.2 动态电荷法

动态电荷法探测电极,类似于静电电压表的原理,如图2a所示。其中, D 为固定安装的感应电极,中心有圆孔,该电极与测试仪表的输入端相连。在它和被测物体之间是两个金属电极 P 和 N 。其中固定且接地的电极 P 上开有窗孔,电极 N 的形状与电极 P 的窗口互补成整圆。电动机的轴穿过感

应电极 D 的中心孔,可以带动电极 N 旋转。工作时,在被测带电体电场的作用下,随着旋转电极 N 的转动,感应电极上持续感应出交流信号,经过阻抗变换,放大,由表头显示被测电压。

该测量原理图的等效电路图如图 2b 所示。与动态电容法不同的是感应电极与被测带电体之间的电容为

$$C_0 = C(1 + \sin(\omega nt)) \quad (5)$$

即调制系数 $k_2=1$, 旋转角频率扩大了 n 倍,因此测得的电压变为

$$U = U_0 \left(\frac{WC}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \omega^2 C^2}} \cos(\omega t) \right) \quad (6)$$

式中, C 为电极 P 的窗口完全打开时,被测体与感应电极 D 之间的电容; R 、 C 为静电计的输入电阻和输入电容; ω 为电机的旋转角频率。显然,为保证测试准确度,必须保持 C 、 ω 的值为拟定。此外,在探测电极的制作过程中,要尽量注意 P 、 N 叶片等分的一致性,以免出现谐波分量。

动态电荷法测静电电压原理图如图 3 所示。

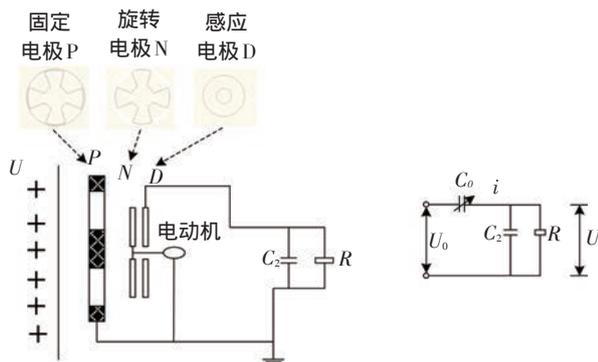


图3 动态电荷法测静电电压原理图

动态电荷法较动态电容法相比,调制系数稳定,减少了误差因子,只需保持耦合电容和振动角频率的稳定即可取得较好的测量效果,文中基于动态电荷法进行微弱电流检测电路的设计、分析以及计算仿真。

3 微弱电流检测电路设计

3.1 检测电路设计

与高输入阻抗的检测电路相比,低输入阻抗的电路耦合相对较少的干扰,为了实现对较远空中静

电目标的探测,检测电路要对 nA 级甚至 pA 级的电流进行处理,可采用微电流 I/V 变换电路,利用静电计超低偏置电流运算放大器 OPA128 可顺利实现高精度 I/V 变换。OPA128LM 的输入偏流小于 $0.075 pA$,典型值为 $0.04 pA$ 。具体电路如图 4 所示。

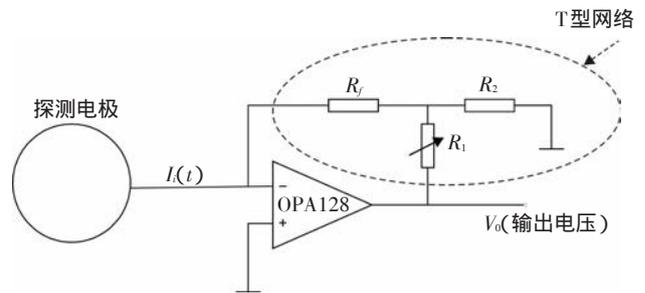


图4 微弱电流检测电路原理图

微弱信号检测电路实际上就是放大电路,由于待检测的电流信号极其微弱,这就要求放大电路首先要有极强的敏感性,其次要求放大电路本身有极低的噪声,这些都对运算放大电路提出了要求。放大电路噪声主要来自于两个方面,一是电路的内部噪声,一是来自外部的干扰噪声(环境噪声)。环境噪声主要通过电路外部的滤波器、隔离模块等设备解决,放大电路设计中主要考虑如何抑制内部固有噪声。 I/V 变换一个主要噪声源是反馈电阻上的热噪声,根据有关资料,反馈电阻上的约翰逊噪声为

$$\sigma_{nf}^2 = \frac{4KTf}{R_f} \quad (7)$$

式中, T 为绝对温度; K 为波尔茨曼常数,当频率 f 小于 $100 Hz$ 时,上式 I/V 变换的主要噪声源。为了减小低频噪声,必须加大反馈电阻值。电阻本身的热噪声的均方电压为

$$E_t = \sqrt{4KTR \cdot \Delta f} \quad (8)$$

其中, R 为电阻阻值; f 为频率变化量。由上式可以看出,电阻阻值越大其本身产生的热噪声就越大,这就和为了减小低频噪声而要加大反馈电阻值产生了矛盾,为了解决这一矛盾,反馈网络可以采用如图 4 所示的 T 型接法,其等效电阻为 $R_1 + R_2 + R_1 R_2 / R_1$ 。

在选择元器件时,考虑到反馈电阻较大,为减小增益误差,选择金属膜电阻等受外界环境影响较小的电阻作为反馈电阻;而减小频率响应误差的方法是在反馈电阻 R_f 上并联一个小电容,避免因寄生电容 C_p 的不确定性而导致信号不同频率分量时滞的不一致性。

3.2 检测电路分析

图4所示的微弱信号检测电路利用OPA128运算放大器,并将其接成深度的电压并联负反馈状态, R_f 为反馈电阻, R_1 为可调电阻,用于调节检测电路的放大倍数。对图4所示电路图建立等效模型如图5所示。

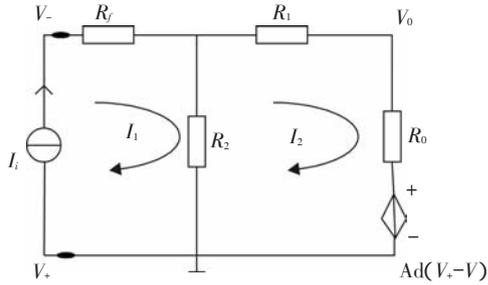


图5 微弱信号检测电路等效模型

列出电路等效模型的网络方程为

$$\begin{bmatrix} R_f + R_2 & -R_2 \\ -R_2 & R_1 + R_2 + R_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ A_d V_- \end{bmatrix} \quad (9)$$

由于

$$I_1 = I_i \quad (10)$$

$$V_0 = R_0 I_2 + A_d (V_+ - V_-) \quad (11)$$

因此

$$A_d V_- = R_0 I_2 - V_0 \quad (12)$$

将式(10)、式(11)代入式(9)得下式

$$\begin{bmatrix} R_f + R_2 & -R_2 \\ -R_2 & R_1 + R_2 + R_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ R_0 I_2 - V_0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

解得

$$V_0 = -(R_1 + R_f + \frac{R_1 R_f}{R_2}) I_i \quad (14)$$

式(14)为该电路的传输特性方程。

电路放大倍数为

$$A_f = \frac{V_0}{I_i} = -(R_1 + R_f + \frac{R_1 R_f}{R_2}) \quad (15)$$

电路输入阻抗为

$$R_{if} \approx \frac{R_f}{A_d} \quad (16)$$

电路输出阻抗为

$$R_{of} \approx \frac{R_0}{A_d} \quad (17)$$

由于运算放大器的 A_d 很大,由式(16)可以看出, R_{if} 很小,电路为低输入阻抗检测电路;由式(17)

可以看出, R_{of} 很低,电路的输出阻抗很低,因此该电路具有良好的输出特性,具有较强的带负载能力。与高输入阻抗的检测电路相比,低输入阻抗的电路耦合相对较少的干扰。

3.3 信号仿真分析

文中在 NI Multisim10 仿真环境下实现探测器检测电路的电路仿真。

根据静电场理论,当空中静电目标位于一定范围内,探测器导体电极上会感应电流。由于空中目标是运动的,探测电极感应的电流强度随目标距离变化而变化,即探测电极感应电流强度是目标距离的函数,从而也是时间 t 的函数。仿真的输入参数为模拟真实巡航导弹的输入电流,输出为随着时间 t 的变化,探测器感应电极上感应电荷的变化而产生的感应电流。

假设空中飞行目标为巡航导弹,其带电量为 10^{-6} C,以 200 m/s 速度飞行,飞行高度为 50 m。因此,设定电路的激励为电流源,幅值为 10 pA,频率为 20 Hz。当巡航导弹由远及近从上方经过静电探测时,静电系统探测电极感应到的电流应该有逐渐增大的趋势;同时,由于检测电路设计为低输入阻抗,电路输出应具有相对较少的耦合干扰。

检测电路的仿真结果如图6所示。

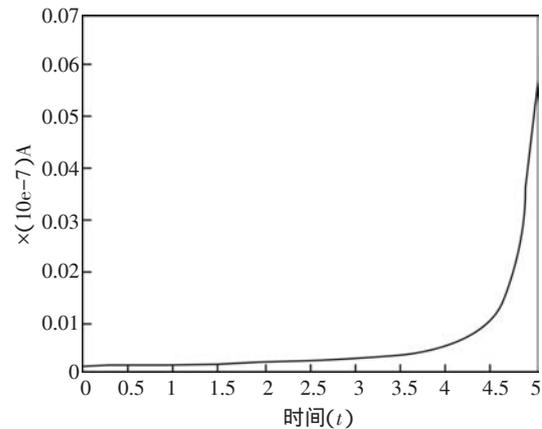


图6 地面静电探测器探测电极的感应电流波形图

由仿真分析结果可以看出,静电探测器的感应电流与时间 t 成正比,即与空中目标距离和探测电极的距离成正比;且检测电路输出电流曲线平滑,耦合干扰较少。

4 结论

设计了一种基于静电探测理论的微弱信号检测电路,该电路基于动态电荷检测法。仿真结果表明,该电路具有较好的信号放大功能和较高的灵敏度。检测电极感应到的电流经过后续电路的放大、处理,可以识别出空中飞过的带电目标。如果在一个位置不同方向上摆放多个静电探测电极,通过面向不同方向的探测电极上的感应电流强度,经过处理,还可以得到空中静电目标的位置信息。

参考文献

- [1] 董志鹏. 电子战和信息战技术与装备[M]. 北京: 原子能出版社, 航空工业出版社, 兵器工业出版社, 2003.
- [2] 陈曦. 被动式地面静电探测技术研究[D]. 北京: 北京理

- 工大学, 2005.
- [3] 白强, 夏善红, 陈绍凤, 等. 新型旋片式空中电场探测器及应用[J]. 电子与信息学报, 2004(4).
- [4] 代方震. 基于电极扫描原理的被动式静电探测技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2004.
- [5] 崔占忠, 宋世和, 徐立新. 近炸引信原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- [6] 孙可平. 工业静电[M]. 北京: 中国石化出版社, 1994.
- [7] 林蔚. 静电成像探测极其信息处理[D]. 北京: 北京理工大学, 2007.
- [8] 王秉中. 计算电磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] Chen X, Cui ZZ, Bi et al. Research on low input impedance measuring system in electrostatic field measurement[J]. ISTM/2003 5th International Symposium on Test and Measurement, 2003, 1:53-56.
- [10] 华成英, 童诗白. 模拟电子技术基础[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.

(上接第23页)

- ond-pulse Nd:glass laser system with high spatiotemporal beam quality[J]. High Power Laser Sci Eng, 2016, 4: e10.
- [17] Li S, Wang Y, Lu Z, et al. High-quality near-field beam

achieved in a high-power laser based on SLM adaptive beam-shaping system[J]. Opt Express, 2015, 23(2): 681-689.

(上接第48页)

3 结论

基于线结构光扫描法提出了一种RGB激光扫描方法,三基色激光合并成一束白光光源。相比于单个RGB分别扫描的方法,省去了依据三线间的距离进行计算再合成彩色的步骤。同时三束光合成后,光束能量增大、扫描速度快、效率高,可以实时获取并重建三维信息,颜色再现真实准确。

参考文献

- [1] Evans C, Doshir. Tale of two underwater lenses[J]. SPIE, 1991, 1537:203-214.
- [2] Jules S J. Underwater optical imaging: status and prospects, oceanography[J]. Eurasip Journal on Advances in Signal Processing, 2001, 14(3): 64-75.
- [3] Raimondo S, Silvia C. Underwater image processing: state of the art of restoration and image enhancement methods[J]. Eurasip Journal on Advances in Signal Processing 2010: 746052.
- [4] Woods AJ, Penrose J D. The development of a compact

- underwater stereoscopic video camera[J]. SPIE, 1997, 3012:92-95.
- [5] 杨宇, 于佳, 王添, 等. 基于激光扫描的人脸三维重建方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12).
- [6] 孙传东, 陈良益, 高立民, 等. 水的光学特性及其对水下成像的影响[J]. 应用光学, 2000, 21(4):39-46.
- [7] 张会霞, 朱文博. 三维激光扫描数据处理理论及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 26.
- [8] Davies E R. Computer & machine vision: theory, algorithms, practicalities[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 387-421.
- [9] Trimble G M. Area reconnaissance, object relocation, and classification using cooperating autonomous underwater vehicles[J]. SPIE, 1999, 3711:195-202.
- [10] 冀光强. 基于线结构光扫描的水下三维重建技术[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [11] Wang C C. Nonmetric camera calibration for underwater laser scanning system[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2007, 32(2): 383-399.
- [12] 杨宇, 阚凌雁, 于佳, 等. 水下环境的线结构光扫描和三维重建[J]. 光学学报, 2012, 32(s1):s111002.