

基于方阵的旋叶式静电探测系统定位算法研究

贺柳良, 缪劲松, 黄 伟, 马黎君

(北京建筑工程学院 理学院, 北京 100044)

摘要: 采用旋叶式探测器布设成方阵获取空中目标信息, 并依据旋叶式探测器结构和静电感应原理, 推导出对空中目标的定位算法. 基于定位算法编写了定位程序, 能实现对目标的实时定位, 定位算法可行.

关键词: 静电探测; 定位算法; 方阵; 旋叶式探头

中图分类号: TN953.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2011)03-0059-03

静电探测是通过探测空中飞行目标的静电场来获取目标信息的一种探测技术. 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, 这种静电对空中目标尤为明显^[1]. 据测量, 喷气飞机的带电量可达 10^{-3} C, 直升机的带电量约为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ C^[2], 电位最大可达 500 kV. 为了保证飞行安全, 人们一直在寻找静电产生的原因和消除飞机静电的方法. 大量的研究表明, 现有的科学技术还不可能完全消除飞机的静电, 静电的产生是由很多因素共同作用的结果^[3-4]. 空中目标所带静电, 在其周围几百米范围内形成可探测的静电场. 对于被动式地面静电探测系统, 可利用多个探测器布设阵列来感应目标信号, 根据阵列中多个探测器的相对位置及探测器的输出与目标距离的关系, 对空中静电目标定位^[5]. 它具有结构简单、抗干扰性好等优点^[6].

1 探测原理及探测方程

传统的静电探测器探头有 4 种: 电极直感式、电极振动式、电极旋叶式、集电式^[7]. 本文研究具有旋叶式探头的静电探测系统对空中目标定位, 旋叶式探头的结构如图 1 所示.

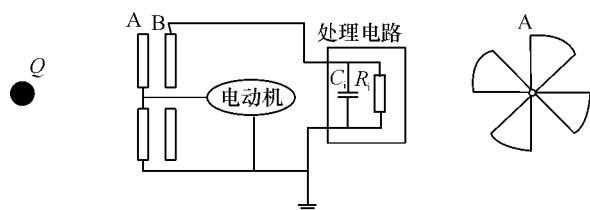


图 1 旋叶式探头结构示意图

图 1 中, A 为旋转电极, 其上有 4 个扇形叶片, 由微型电机带动旋转; B 为固定电极, 形状与 A 一样, A、B 可互补成整圆. 当接地电极 A 旋转时, 周期

性地遮盖或打开固定电极 B, 使电极 B 感应出持续的交流信号. 在 A 旋转时, 极板 A、B 之间的电容也周期性地变化^[8], 变化规律为

$$C = C_0 \sin p\omega t, \quad (1)$$

其中, C_0 是当 A、B 两极板完全重合时的电容, ω 是旋转电极 A 的角速度, p 是电极的叶片数, 此处 $p=4$.

设信号处理电路的输入电容为 C_i , 输入电阻为 R_i , 则输入阻抗

$$Z_i = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_i}\right)^2 + (n\omega C_i)^2}}, \quad (2)$$

式中 n 为电极转速.

设静电目标位于 (x, y, z) 处, 探头置于 $(0, 0, 0)$ 处. 探头两电极相距 L , 极板面积为 A . 静电目标与探头距离为 r , 则 $r = (x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}$.

极板上感应电荷的表达式为: $Q = C\Delta U$. ΔU 是两极板间的电势差. 当 $r \gg L$ 时, 空中目标可近似为点目标, 探测极板上的电场近似为匀强电场^[9]. 电场强度 E 可表示为

$$E = \frac{Q_0}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (3)$$

Q_0 为目标带电量. 静电探测时, 探测极板与地面平行放置, 设 E_n 为探测极板所在平面法线方向的电场强度. 探头上的感应电荷量 Q 为

$$Q = C\Delta U = CE_n L. \quad (4)$$

根据式 (1) 和式 (4), 得探测器上的感应电流

$$i = \frac{dQ}{dt} = pL\omega C_0 E_n \cos p\omega t, \quad (5)$$

将 $C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{L}$, $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ 代入式 (5) 得

$$i = \frac{\pi A n p \epsilon_0}{30} E_n \cos p\omega t, \quad (6)$$

收稿日期: 2011-05-03

基金项目: 北京建筑工程学院科研基金资助项目 (Z10069)

作者简介: 贺柳良 (1983-), 女, 讲师, 主要研究方向为静电探测.

探测系统所得的感应电压

$$U_i = iZ_i = \frac{\pi A n p \varepsilon_0 E_n}{30} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_i}\right)^2 + (n\omega C_i)^2}} \cos p\omega t. \quad (7)$$

设 γ 为电场线与探测电极平面法线之间的夹角

$$\cos \gamma = \frac{z}{r}, \quad (8)$$

$$E_n = E \cos \gamma = \frac{Q_0 z}{4 \pi \varepsilon_0 (x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (9)$$

将 E_n 的表达式代入式(7),得

$$U_i = iZ_i = \frac{Q_0 p A n}{120} \times \frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \times \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_i}\right)^2 + (n\omega C_i)^2}} \cos p\omega t. \quad (10)$$

式(10)即旋叶式静电探测系统获得的感应电压信号大小,输入信号呈正弦规律变化.从式(10)可知,探头输入电压与探头的结构参数 p 和 A 、目标的带电量 Q_0 、目标距探头距离 r 、信号处理电路的输入阻抗 Z_i 等因素有关.为了保证测量精确,必须保证 C_0 和 ω 稳定.

根据式(10),旋叶式系统所得的感应电压峰值

$$U_{i0} = \frac{Q_0 p A n}{120} \times \frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \times \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_i}\right)^2 + (n\omega C_i)^2}}, \quad (11)$$

系统所得的感应电流的峰值

$$i_0 = \frac{Q_0 p A n z}{120 (x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (12)$$

式(12)为探测器置于 $(0,0,0)$,目标位于 (x,y,z) 时,探测系统所得的感应电流峰值的探测方程.

联立式(9)和式(12),有

$$\frac{i_0}{E_n} = \frac{\pi \varepsilon_0 n p A}{30}. \quad (13)$$

由式(13)可知, i_0 与 E_n 的比值为一常量.式(13)即感应电流取峰值时,电场和电流的标定关系.

2 基于方阵的静电探测系统定位算法

下面研究旋叶式静电探测系统对空中目标的定位算法.如图2所示,设4个探头分别置于 X 轴和 Y 轴的 a 、 b 、 c 、 d 4点,布设成方阵.它们离坐标原点的距离均为 R ,并取 R 为10倍极板半径值.这样,4个探头之间既不相干扰,又能使探测距离尽可能远.探头 a 、 b 、 c 、 d 的坐标分别为 $(R,0)$ 、 $(0,-R)$ 、 $(-R,0)$ 、 $(0,R)$.

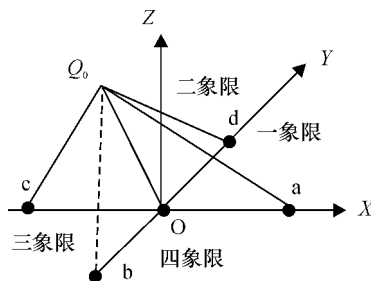


图2 三维直角坐标系探头阵列布设示意图

将探测器的叶片数 $p = 4$ 代入式(12)得 $i_0 =$

$\frac{Q_0 A n z}{30 (x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}$. 令 $K = \frac{nA}{30}$, 则4个探头上所得感应电流峰值为

$$i_a = \frac{K Q_0 z}{[x - R]^2 + y^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}}, \quad (14)$$

$$i_b = \frac{K Q_0 z}{[x^2 + (y + R)^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}}, \quad (15)$$

$$i_c = \frac{K Q_0 z}{[x + R]^2 + y^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}}, \quad (16)$$

$$i_d = \frac{K Q_0 z}{[x^2 + (y - R)^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}}. \quad (17)$$

经化简有如下关系

$$\frac{1}{(i_a)^{\frac{2}{3}}} - \frac{1}{(i_b)^{\frac{2}{3}}} + \frac{1}{(i_c)^{\frac{2}{3}}} - \frac{1}{(i_d)^{\frac{2}{3}}} = 0. \quad (18)$$

式(18)即成方阵布设的各探头上所得的感应电流的关系式.并得到

$$x = My, \quad (19)$$

$$\frac{2}{z^3} = Ny, \quad (20)$$

$$N^3 y^3 + (M^2 + 1) y^2 - (2R + \frac{N}{d^3}) y + R^2 = 0. \quad (21)$$

式(19)~(21)中 $M = \frac{\frac{1}{c^{\frac{2}{3}}} - \frac{1}{a^{\frac{2}{3}}}}{\frac{1}{b^{\frac{2}{3}}} - \frac{1}{d^{\frac{2}{3}}}}$, $N = \frac{4R}{\frac{1}{b^{\frac{2}{3}}} - \frac{1}{d^{\frac{2}{3}}}}$,

且 $a = \frac{i_a}{K Q_0}$, $b = \frac{i_b}{K Q_0}$, $c = \frac{i_c}{K Q_0}$, $d = \frac{i_d}{K Q_0}$.

式(19)~(21)即旋叶式静电探测系统对空中目标的定位算法.由于 i_a 、 i_b 、 i_c 、 i_d 已知,如果目标带电量 Q_0 已知,则 M 、 N 、 R 、 d 均为常量,对式(19)~(21)进行求解就可以得出 (x,y,z) 值,对空中目标进行定位.

3 静电目标的定位探测

假设空中目标带电量 $Q_0 = 10^{-3}$ C,电极转速 $n = 360$ r/min,探测极板半径为15 cm,4个探头距圆心的

距离 $R = 1.5 \text{ m}$, 旋叶式探测极板的面积为 $A = 3.532 \times 10^{-2} \text{ m}^2$. 利用定位方程组得到各探头上感应电流和目标位置的关系如图3所示.

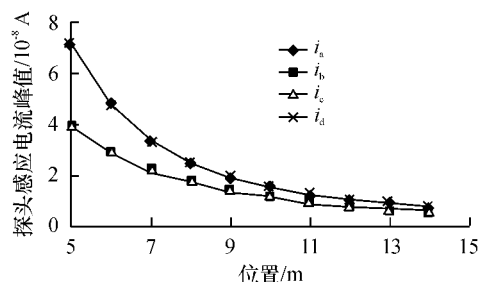


图3 探头感应电流峰值和目标位置的关系

由图3可知,目标离探头越近,各探头上所得的感应电流越大;离探头越远,各探头上所得的感应电流越小.目标离探头距离越近时,相等的位置变化会使探头上感应电流峰值变化幅度越大;目标离探头位置较远时,相等的位置变化会使探头上感应电流峰值变化幅度越小.

系统软件的设计是静电探测系统中非常关键的一个环节,它既和用户打交道,又从各种设备中获取信息,系统软件性能的好坏直接关系到探测系统的整体性能^[4].图4是基于定位算法编写的定位程序界面.



图4 定位程序界面

面. 探头上的电流被输入到电流发送界面后,点击“发送”按钮,目标位置界面实时显示目标的位置坐

标 (x, y, z) . 点击“自动发送”按钮,界面连续实时显示目标的位置坐标 (x, y, z) .

通过编写程序对定位算法进行验证,得到编写的定位算法能满足对空中目标实时定位的需要.

4 结论

探测器阵列设计在被动式静电探测系统的定位研究中非常重要. 通过对基于方阵的旋叶式静电探测系统定位方程的推导,得到了确定空中静电目标距离的定位算法. 基于定位算法编写定位软件对算法进行验证,发现所编写的定位算法能对目标进行实时定位.

参考文献:

- [1] David G Hoyt. Electrostatic passive proximity fuzing system: US, Patent 4972775 [P]. 1990-11-27.
- [2] Trinks H. Electric field detection and ranging of aircraft [J]. IEEE on Aerospace and Electronic System, 1982, AES-18(3): 268-273.
- [3] Boulay J L. Aircraft potential variations in flight [R]. Culham: Lighting and Static Electricity Conference, 1982.
- [4] Navenicz J E. Flight-test studies of static electrification on a supersonic aircraft [R]. Culham: Lighting and Static Electricity Conference, 1975.
- [5] 陈曦,徐立新,毕军建,等. 基于圆阵的被动式地面静电探测系统定位研究 [J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(2): 159-163.
- [6] 马龙. 阵列式被动静电探测器定位技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学机电工程学院, 2004.
- [7] 菅义夫, 鲍重光. 静电手册 [M]. 北京: 科技出版社, 1981.
- [8] 陆承祖, 王克超. 静电原理及防灾 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1991.
- [9] 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(增刊): 169-172.
- [10] 胡峪, 刘静. VC++ 编程技巧与示例 [M]. 西安: 电子科技大学出版社, 2000.

Location Algorithm of the Rolling-Vane-Electrostatic Detection System Based on Square Array

He Liu-liang, Miao Jin-song, Huang Wei, Ma Li-jun

(College of Science, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Rolling-vane-electrostatic detectors were arrayed as a square to obtain information about the aerial target. According to the structure of the rolling-vane-electrostatic detectors and the theory of electrostatic induction, the location algorithm for aerial target was derived. The orientation software and interface were compiled, based on the location algorithm. The location software can show the position of the aerial target in real time. The location algorithm proves to be feasible.

Key words: electrostatic detection; location algorithm; square array; rolling-vane-electrostatic detectors