

文章编号: 100026893(2003)022016203

双栅极空气计数器系统参数优化设计方法

史仪凯

(西北工业大学 机电工程学院, 陕西 西安 710072)

New Design Method for Sensor System Parameter of Double Grid Air Counter

SHI Yikai

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 基于金属材料微裂纹检测传感器系统放电脉冲的形成过程, 建立了离散化放电的数学模型, 提出了传感器系统参数优化设计的一种新方法。实验结果表明, 采用该理论设计的传感器系统参数, 避免了经验公式设计的片面性, 保证了传感器系统无损检测的可靠性和精确性。

关键词: 传感器系统; 无损检测; 低能电子; 工作电压

中图分类号: TN140 文献标识码: A

Abstract: A discrete discharging model is built up, based on analyzing the discharging course of a double grid air counter (DGAC). A new optimization method of DGAC parameter design is developed. The study shows that the working voltage is closely related to the geometric parameter of DGAC, the sensitivity of the circuit and the number of discharges. Experiment shows that the novel method can be used in parameter design of DGAC; not only can it effectively avoid on2sidedness by the traditional design, but also the hardware circuit design of control systems is very easy and trustworthy.

Key words: sensor system; non2destructive testing; low energy electron; working voltage

双栅极空气计数器(DGAC)其工作原理是对气体放电产生脉冲进行计数, 利用脉冲数目检测金属构件中微裂纹的形成和扩展^[1, 2]。为获得较强电场, DGAC 的计数管设计为同心圆柱型, 中心处阳极和外侧阴极为圆柱体。因此, 传感器检测系统的工作性能、放电脉冲数精度均与阳极直径、阴极圆柱体内径、阳极和阴极工作电压等主要参数有关^[3]。以往这些参数的设计由经验公式计算获得, 易形成放电量过大和阴极二次电子发射, 严重影响系统的检测精度和稳定性。本文基于 DGAC 放电脉冲形成过程, 建立了离散化数学模型, 提出了一种 DGAC 参数优化设计方法。实验结果表明, 该方法对有效提高 DGAC 传感器系统检测精确度和稳定性具有一定的理论与应用价值。

1 DGAC 放电形成过程

DGAC 检测系统如图 1 所示。D 为阴极圆柱内半径; r 为阳极(丝状)半径; S 为金属试件。阳极通过电阻 R 接高压 U_0 的正端。

DGAC 中电场可视为无限长同轴电缆中的电场分布。假设 DGAC 等效电路的等效电阻为

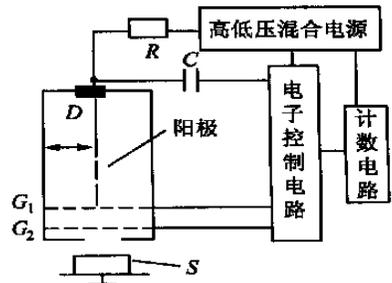


图 1 DGAC 系统框图

Fig1 The structure diagram of the DGAC

R_0 ; 等效电容为 C_0 ^[4]; t_0 时刻距阳极中心 d_0 处因电离产生 N_0 对正离子和电子, 其电荷分别为 N_0e 和 $-N_0e$, 且速度 V^+ 和 V^- 向阳极和阴极漂移, t 时刻所处的位置分别距阳极中心 G_1 和 G_2 为 $d^+ = d_0 + V^+ t$ 和 $d^- = d_0 - V^- t$ 。时间常数 $R_0 C_0$ 趋于无穷大时, 电容 C_0 上的电压为

$$U(t) = \frac{Q^+(t) - Q^-(t)}{C_0} = \frac{N_0 e}{U_0 C_0} [V(d^+) - V(d^-)] \quad (1)$$

式中: $Q^+(t)$, $Q^-(t)$ 为 t 时刻正离子和电子在电容 C_0 极板上感应电荷量; $V(d^+)$, $V(d^-)$ 为 d^+ 和 d^- 处的电位; e 为电子电量。

电子运动速度 $V^- \sim 10^6$ cm/s, 正离子运动速度 $V^+ \sim 10^3$ cm/s。电子运动到阳极时间 T^- 内, 正

收稿日期: 20020205; 修订日期: 20020820
基金项目: 航空科学基金(00153085)和自然科学基金(50275125)资助项目
文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2003/02/0167/>

离子基本没有移动,即在 $t \in [T^-, T^+]$ 时 $V^+ \approx U_0/d_0$, 在 $T^- < t < T^+$ 时电子被阳极吸收, $Q^-(t) = -N_0 e$, 故放电脉冲为

$$U(t) = \begin{cases} -\frac{N_0 e \ln(d_0/d^-)}{C_0 \ln(D/r)} & t \in [T^-, T^+] \\ -\frac{N_0 e \ln(d^+/r)}{C_0 \ln(D/r)} & T^- < t < T^+ \\ -\frac{N_0 e}{C_0} & t > T^+ \end{cases} \quad (2)$$

脉冲宽度由 $R_0 C_0$ 决定。若选择合适的 $R_0 C_0$ 约为 T^- 的几倍, $T^+ \approx R_0 C_0$, 脉冲的宽度变窄, 但脉冲的幅度也极大地减小。此时, DGAC 记录的放电脉冲主要由电子漂移形成, 则放电脉冲幅度为

$$U^-(t) = -\frac{N_0 e \ln(d/r)}{C_0 \ln(D/r)} \quad (3)$$

2 雪崩放电离散化模型

(1) DGAC 雪崩放电

根据上述分析可知, 放电发生在从 r_0 处到阳极整个路程上, 脉冲应是所有电子作用之和。由于 DGAC 工作环境为空气, 一次雪崩放电的电子正离子全部由入射电子电离产生。电场强度足够大时, 电子向阳极运动的过程中, 引起电离碰撞而形成电子雪崩^[4], 如图 2 所示。

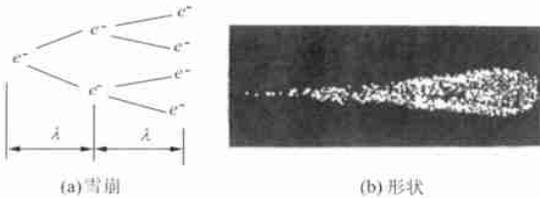


图2 雪崩放电

Fig2 The avalanche discharge

一个入射电子经过 n 次电离碰撞, 共产生的电子为

$$N = 2^n \text{ 或 } n = \ln N / \ln 2 \quad (4)$$

开始电离处的半径为 d_0 , 电子经过 n 次电离碰撞, 故

$$d_0 = r + \sum_{i=1}^n K_i \quad (5)$$

式中: K_i 为第 i 段长度。

(2) 离散化数学模型

假设整个放电过程产生的电子数目为 N , 电子在空气中的平均电离自由程为 K , 是位置的函数。设在一个较小范围内 K 不变, 将 DGAC 放电路

程分为若干段, 每段为一个平均电离自由程, 如图 3 所示。 K_1 是阳极表面电场强度为基准平均自

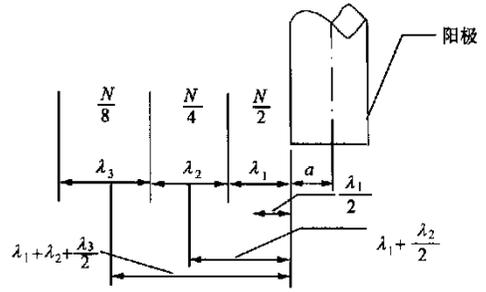


图3 DGAC 放电发展的离散化模型

Fig3 The discrete discharging model of DGAC

由程; K_2 是距阳极表面为 K_1 处的电场强度为基准计算的平均自由程。根据电子雪崩模型, 所有 N 个电子中, 有 $1/2$ 是在最后一个平均自由程 K_n 内产生电子, 有 $1/4$ 在倒数第 2 个平均自由程 K_{n-1} 产生电子。由式(3) 可计算出放电脉冲的总合为

$$U^-(t) = \sum_{i=1}^n U_i^-(t) = \frac{Ne}{C_0 \ln(D/r)} \sum_{i=1}^n \frac{\ln\left(\frac{r + K_i + K_{i-1} + K/2}{r}\right)}{2^i} = \frac{Ne}{C_0 \ln(D/r)} \sum_{i=1}^n \frac{\ln(d_i/r)}{2^i} = \frac{Nek}{C_0 \ln(D/r)} \quad (6)$$

式中: d_i 为第 i 段中心到阳极中心的距离; n 为总电离碰撞次数。则

$$d_i = r + K_i + K_{i-1} + K/2$$

$$k = \sum_{i=1}^n \frac{\ln(d_i/r)}{2^i}$$

3 DGAC 参数的优化设计

DGAC 中放电脉冲经前置放大电路进入控制电路, 设整个电路的输入灵敏度为 U_{min} , 若一次放电产生一个计数脉冲, 则 DGAC 参数与电路灵敏度的关系为

$$N \geq \frac{U_{min} C_0 \ln(D/r)}{ke} \quad (7)$$

空气的平均电离能为 E_i , 电子在一个平均自由程获得的能量应不小于 E_i 以电子伏为能量单位, 设圆柱型计数管开始电离半径 d_0 处的电场强度为 $E(d_0)$, 则

$$E(d_0) = \frac{U_0}{d_0 \ln(D/r)} \quad (8)$$

式中: U_0 是阳极与阴极间电位差。将其代入式(8), 可得

$$U_0 = \frac{Ei_0 \ln(D/r)}{K_n} \quad (9)$$

上述式(7)、式(9)建立了 DGAC 工作电压与几何参数之间的相互关系。

根据上述分析可见, 距阳极较近的电离自由程电子数目愈多, 且成倍数递增。实际系统设计计算 k 值时, 只需考虑 10 个电离自由程, 即 $i = 10$, 因为第 10 段时电子数是第 1 段的 $1/2^{10} = 1/1024$ 。DGAC 计数管参数优化设计中还应考虑以下因素: 因阳极一端悬空, 固定困难, 则阳极半径 r 不宜过细; 阴极半径 D 过小, 低能电子不易进入计数管, 计数误差大; 为保证 DGAC 测量精度 U_0 应有适当余量。

4 算例和结论

用此算法, 取 $e = 11062 @ 10^{-19} C$; $E = 3610 ? 014 eV$; $C_0 = 10LF$ 。机器可按一定步长给出相应的阳极半径 r 、阴极半径和阳极半径比 D/r 、放电电量 N 和工作电压 U_0 。计算结果如表 1 所示。

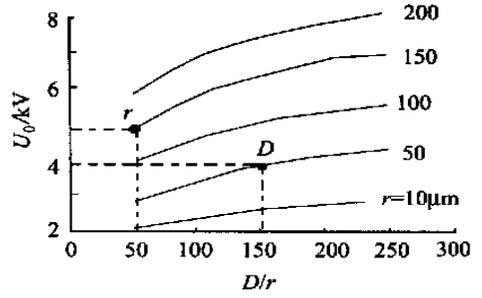
表 1 计算结果

Table 1 Compute results

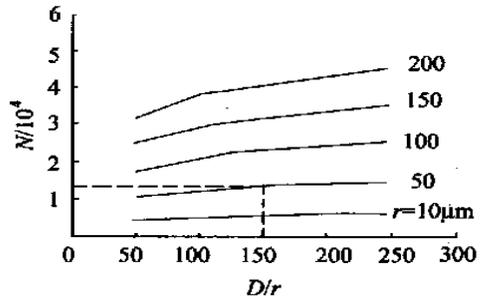
阳极半径 r/Lm	阴阳极半径比 D/r	放电电量 N	工作电压 U_0/V
50	100	$11.3 @ 10^5$	3440
	150	$11.4 @ 10^5$	3923
	200	$11.5 @ 10^5$	4149
100	100	$21.1 @ 10^5$	4642
	150	$21.3 @ 10^5$	5051
	200	$21.5 @ 10^5$	5341
150	100	$31.2 @ 10^5$	5844
	150	$31.4 @ 10^5$	6358
	200	$31.6 @ 10^5$	6724

为了获得同样的放电脉冲幅度, 阳极半径相同时, 阴极与阳极半径之比较大, 则工作电压愈高, 放电电量也愈大; 阴极与阳极半径之比相同时, 阳极半径愈大, 则工作电压愈高, 放电电量也愈大。在 DGAC 参数的设计中, 若给定阳极半径 r 、阴极与阳极半径之比 D/r , 即可得到相应的放电电量 N 和电压 U_0 。如表 1 中 $r = 50Lm$, $D/r = 150$, $U_0 = 3923V$, $N = 114 @ 10^5$ 。而在准确检测出放电脉冲时, 实际工作电压 $U_0 = 4015V$, 与计算结果是比较接近。DGAC 设计中几个主要参数, 如工作电压、放电电量、各电极尺寸等之间相互关系, 如图 4 所示。因此, 本文提出的传感器系统参数的优化理论和设计方法, 完全可用 DGAC 的设计。

(1) DGAC 参数优化设计对改善传感器系统在复杂环境下检测中有着极其广泛的应用前景。



(a) 工作电压与阴阳极半径比变化



(b) 放电量与阴阳极半径比变化

图 4 主要参数特性曲线

Fig 4 The characteristic of main parameter

(2) 依本文参数优化理论和方法, 放电脉冲完全可控, 且正比例按规律发展。

(3) 提出的参数优化设计方法, 对其它气体计数器设计具有一定的理论和实际应用价值。

参 考 文 献

[1] 史仪凯, 等. 双栅极空气计数器猝熄脉宽算法[J]. 西北工业大学学报, 2001, 18(2): 183- 185.
(Shi Y K, et al. A new algorithm for computing quenching pulse width of double grid air counter[J]. Journal of North western Polytechnical University, 2001, 18(2): 183- 185.)

[2] 史仪凯, 等. 新型电子传感器在微裂纹检测中的应用[J]. 航空学报, 1997, 18(4): 505- 508.
(Shi Y K, et al. Application of a new type electron sensor on microcracks detection[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1997, 18(4): 505- 508.)

[3] Keynote A S. Paper on Exoelectron Emission Research[J]. Osaka: 1985, 24: 6- 10.

[4] 杨津基. 气体放电[M]. 北京: 科学出版社. 1983.
(Yang J J. The gas discharge[M]. Beijing: China Science Press, 1983.)

作者简介:



史仪凯(1952-) 男, 陕西省兴平市人, 西北工业大学教授。主要从事电工电子技术、机电控制及自动化、机械电子工程等方面研究工作。Tel: 029- 8494893; Email: ykshi@nwpu.edu.cn

(责任编辑: 俞 敏)