

- Amer. Chem. Soc.*, **77**(1955),3701.
- [2] J. G. Victor and J. M. Torkelson, *Macromolecules*, **21**(1988), 3490.
- [3] W. C. Yu and C. S. P. Sung, *Macromolecules*, **21**(1988),365.
- [4] R. J. Samuels, *J. Polym. Sci. A*, **6**(1968), 1101.
- [5] Y. C. Jean, *Microchem. J.*, **42**(1990), 72.
- [6] W. Brandt and A. D. upasquier (ed.), *Positron Solid-State Physics*, North-Holland, Amsterdam, (1983),1.
- [7] 王少阶,物理, **14**(1985),205.
- [8] S. J. Tao, *J. Chem. Phys.*, **56**(1972),5499.
- [9] H. Nakanishi, S. J. Wang and Y. C. Jean, *Positron Annihilation Studies of Fluids*, World Scientific, Singapore, (1988),292.
- [10] 王少阶,高能物理, No. 3(1981), 22.
- [11] Kirkegaard et al., *Comp. Phys. Commun.*, **23**(1981),307.
- [12] R. B. Qregory, *J. Appl. Phys.*, **70**(1991), 4665.
- [13] Z. Tang and S. J. Wang, The 10th Int. Conf. on Positron Annihilation (ICPA-10), Beijing, May 23—29, Trans. Tech. Publications, (1994).
- [14] D. Lin and S. J. Wang, *J. Phys: Condens. Matter*, **4**(1992),3331.
- [15] S. J. Wang, H. Nakanishi and Y. C. Jean, *J. Phys.: Condens. Matter*, **3**(1991), 2167.
- [16] P. G. de Gennes, *Scaling Concepts in Polymer Physics*, Cornell Univ., Ithaca, (1979),265—315.
- [17] C. L. Wang and S. J. Wang, The 10th Int. Conf. on Positron Annihilation (ICPA-10), Beijing, May 23—29, Trans. Tech. Publications, (1994).
- [18] T. S. Chow, *J. Chem. Phys.*, **79**(1983), 4602; *Adv. Polym. Sci.*, **103**(1992),149.
- [19] C. L. Wang, B. Wang, S. Q. Li and S. J. Wang, *J. Phys.: Condens. Matter*, **5**(1993), 7515.
- [20] S. J. Wang, C. L. Wang and B. Wang, *J. Physique IV*, **3**(1993), 275.
- [21] C. L. Wang and S. J. Wang, *J. Phys.: Condens. Matter*, **6**(1994),3593.
- [22] C. L. Wang, S. J. Wang, W. G. Zheng et al., *J. Physique IV*, **3**(1993), 261.
- [23] S. J. Wang, C. L. Wang, X. G. Zhu et al., *Phys. Status Solidi (a)*, **142**(1994),275.
- [24] Z. L. Peng et al., *Synthetic Metal*, **64**(1994), 33.
- [25] Z. L. Peng et al., *J. Appl. Phys.*, **75**-1(1994), in press.

静电电位测量的现状与发展¹⁾

刘尚合 魏光辉

(机械工程学院静电研究所,石家庄 050003)

摘要 静电电位是最重要的静电参数之一,其测量方法可分为接触式和非接触式两大类。“信号自屏蔽-电荷耦合”原理克服了传统的“接地屏蔽-电压输入”原理的缺点,其仪器具有输入电阻高(大于 $10^{14}\ \Omega$)、动态特性好、抗干扰能力强等特点。利用激光、光导纤维和现代电子技术研究新的测试原理和系统,是该领域当前的发展趋势。

关键词 静电电位,测量,信号自屏蔽,原理

早在本世纪40年代,有人就报道过,在西伯利亚的冬天,会遇到少数身上带电的“怪人”,与他握手会使你受到电击,严重时看到放电的火花,打得你针刺般的疼痛。随着科学技术的飞速发展,高分子材料广泛应用,在干燥的环境中这种“怪人”到处可见。近代静电测试技术已经证实,这种所谓的“怪人”并不奇怪,它是人体静电在作怪。今天采用静电电位动态测试仪可以直接观测到人在走路或与其他物体接触、

分离时,人体静电电位的变化情况。如果人穿绝缘鞋或站在绝缘地面上,这时人体会带上几千V甚至几万V的高电位(以大地作为零电位参考点)。人与大地之间相当于一个充电的电容器,两个人握手时之所以产生电击,是因为他们的静电电位不同。显然,两人之间的电位差越大,释放的静电能量就越大,电击程度越严

1) 1994年5月3日收到。

重,在静电危险场所造成静电引起燃烧、爆炸事故的概率也越大。因此,准确地测定带电体的静电电位,是近代静电安全工程中一项重要工作。另外,在静电应用技术(如静电除尘、静电分选、静电喷漆、静电植绒、静电复印、静电生物效应等)的研究和发展中,也离不开静电电位的测量。静电电位的测量是各种静电参数测量中最重要和最常用的一种测试手段。

由于积累静电的物体电位高、电量小,与大地之间一般有很高的绝缘电阻,而且影响带电过程的因素复杂,因此,静电测量的方法和仪器与常规电测量不同。它要求测量仪器有很高的输入电阻和较小的输入电容、较强的抗干扰能力和小的高电压非线性失真,另外还必须具有较好的低通动态特性。

目前,静电电位的测量方法和仪表种类很多,按测试方法可分为接触式和非接触式两大类。按仪器传感器(探头)的工作原理可分为“阻容分压、接地屏蔽-电压输入”式和“信号自屏蔽-电荷耦合”式两大类^[1]。

1 接触式测量方法

接触式测量方法是将测量仪器的探头直接与带电体相连接,根据等电位原理由仪表显示带电体的电位,这种测试方法只适用于静电导体的电位测量。仪表的工作原理如图1所示。

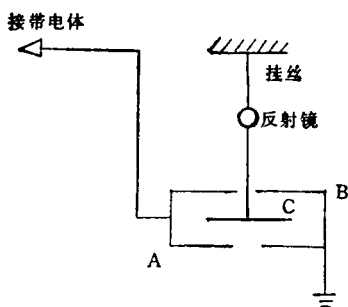


图1 接触式静电电位表工作原理

当被测带电体与仪表的固定电极A相连时,在固定电极A与B之间建立起静电场,可动电极C在静电力作用下将发生偏转,带动接收光信物理

号的反射镜偏转。当静电力矩与挂丝的反力矩平衡时,反射镜停止在某一位置,光标信号也停留在仪器标尺的相应位置上。根据静电力与固定电极A与B之间电压的平方成正比的关系,可确定被测带电体的电位值。所以,这种仪表只能测量电位值的大小,无法判断电位的正负极性。

当仪表与被测带电体接触时,仪表的输入电容 C_2 和输入电阻 R 与带电体并联。设被测带电体对地电容为 C_1 ,在测量过程中电量不变,则测量得到的电位值 U_2 和测量前被测带电体的电位值 U_1 有如下关系:

$$U_2 = \frac{C_1 U_1}{C_1 + C_2} e^{-\frac{t}{R(C_1 + C_2)}} \quad (1)$$

从(1)式可以看出,为了减小测量误差,应尽量减小仪器的输入电容 C_2 ,使 $C_2 \ll C_1$,同时仪表的输入电阻 R 要尽量地大,这样才能保证测试过程中测量值随时间 t 衰减缓慢。以这种测试原理为基础的代表性仪表是 Q-V 系列静电电压表,目前使用的比较广泛。但是,这种仪表对静电非导体的电位无法测试,受光标偏转阻尼的限制,也不能对静电的动态电位进行测试。

2 非接触式测量方法

为了克服接触式测量方法的缺点,对绝缘体带电也可以进行某种平均电位的测试,人们研制了非接触式静电测量方法和仪表。这些仪表按照工作原理可分为直接感应式、交流调制式和集电式等三类^[2]。

2.1 直接感应式测量方法

这种测量方法采用接地屏蔽-电容分压原理,如图2所示。图中T是仪表的测量探头,L是等效电路, C_1 是探头与被测带电体之间的电容。由于静电感应探头T上出现感应电荷, C_1 与仪器输入电容 C_2 串联;在测量过程中, C_2 上的电荷通过仪器输入电阻 R_2 对地泄漏,探头T上的电位 U_2 与被测带电体表面电位 U_1 的关系是

题。为此，我国科技工作者于1989年提出了“信号自屏蔽-电荷耦合”原理。所谓“信号自屏蔽”是根据静电电位测试的特点，利用静电信号高压电极本身作为传感器的屏蔽电极，屏蔽深度与仪器灵敏度的要求相一致，使灵敏度与抗干扰能力同步提高。所谓“电荷耦合”是指仪器输入端接收的是电荷量，此电荷量与被测电位成正比关系，通过电荷量的测量得到被测电位的数值。

该测试原理的传感器主要是半径为 R_2 的金属球壳内包一半径为 R_1 的导体小球（两球的偏心距为 $l, l \ll R_2$ ），球壳作为传感器的高压电极，它既是被测信号的接收电极，又是内部小球的屏蔽电极。在正常使用时，球壳与小球之间介质内的自由电荷密度为零，电位 U 满足拉普拉斯方程

$$\nabla^2 U = 0 \quad (5)$$

考虑到测量过程中小球电位为零(虚地)，解方程(5)得

$$U(r) = \frac{R_2 U_1}{R_2 - R_1} \left\{ 1 + \frac{-R_1}{r} + \left[\frac{R_1^3 l}{(R_2^3 - R_1^3) r^2} - \frac{R_1 r l}{(R_2^3 - R_1^3)} \right] \cos \theta \right\}$$

则小球表面的电场强度值为

$$E_r \Big|_{r=R_1} = - \frac{\partial U(r)}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = - \frac{R_1 R_2 U_1}{R_2 - R_1} \times \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{3l}{R_2^3 - R_1^3} \cos \theta \right)$$

当被测电位 U_1 加在高压电极金属球壳上时，内导体小球上感应的电荷量为

$$Q = \int_0^\pi \epsilon E_r 2\pi R_1^2 \sin \theta d\theta = - \frac{4\pi \epsilon R_1 R_2}{R_2 - R_1} \times U_1 \quad (6)$$

(6)式表明，仪器输入端接收的电荷量 Q 与被测电位 U 成正比关系，只要两球半径 R_1 、 R_2 和球间介质给定后，比例系数就是确定的，它与两球的偏心距 l 无关，与观测时间 t 无关。也就

是说，仪器测量的电荷量 Q 值，唯一地由球壳的电位(被测电位)所决定。高压电极电位 U 以外的任何干扰信号都不会直接影响电量 Q 的值，因此对测量结果无影响。

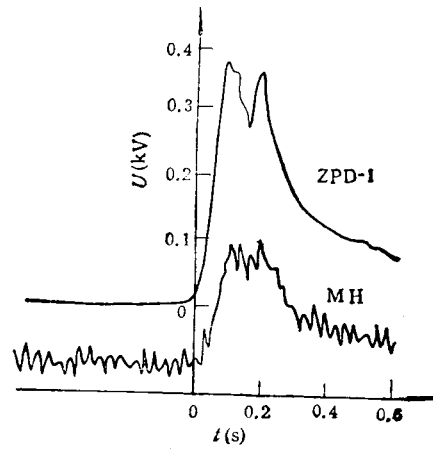


图3 仪器测试波形对比

图3是以“信号自屏蔽-电荷耦合”原理为基础研制的 ZPD-1 型静电电位动态测试仪与以“接地屏蔽电容耦合”为基础的 MH 型静电仪同时对同一带电体进行测量的结果。从图3中可以看出，在抗干扰和动态响应方面，ZPD-1 型仪器明显优于 MH 型静电仪。理论计算和大量的实验结果都表明^[4]，新原理吸收了接触式测量和非接触式测量的共同优点，使屏蔽电极与高压电极合二为一，在增加屏蔽深度的同时，也提高了仪器的灵敏度和抗干扰能力。高压电极不接触仪器的电路输入端，仪器的输入电阻可达到 $10^{14} \Omega$ 以上，高电压非线性失真小于 1%，是目前静电电位测试中性能最好的仪器。

4 发展趋势与研究动态

上面介绍的各种静电电位测试方法和仪器，多数是通过测量畸变的静电场来确定带电体的电位的^[5]。目前在静电电位(或场强)测试方面，国内外主要在以下几个方面开展研究工作^[2,6]。

(1) 利用激光、射频发射等非静电物理量确定静电场强或电位, 例如利用晶体的电光效应测量场强, 这种测量系统主要由激光器、起偏器、1/4波片、波可尔斯(Pockels)元件、检偏器、光检测器等组成; 又例如利用无线电发射系统进行无接触长距离静电测试或监测。

(2) 研制超小型高灵敏度的探头, 并使用光导纤维进行电隔离, 组成静电电位(或场强)测试系统。

(3) 研究新的测试原理和动态电位测试仪器, 准确地测量并记录静电起电放电的动态波形, 为静电安全工作和静电应用提供可靠的数据。

(4) 利用激光定位或距离补偿放大器等技术, 对现有非接触式静电电位测试仪器进行改造, 以提高测量精度。

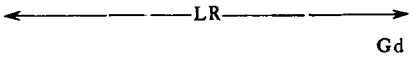
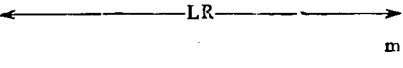
测试技术被人们称之为“洞察未知, 探索前

沿”的科学眼睛, 静电电位测试技术的发展, 也必将为静电技术的广泛应用和防静电危害工作的深入开展, 提供探索前沿的有效手段。同时, 随着科学技术的飞速发展和现代静电工程学的逐步兴起, 必然从理论和实验技术两方面为静电电位测量技术赋予新的生命力。

参 考 文 献

- [1] 刘尚合、智敦旺、刘直承等, 静电, 4-4(1989), 22.
 [2] 杨有启, 静电安全技术, 化学工业出版社, (1983), 237.
 [3] Ruinian Li, Applied Electrostatics Proceedings of the 2nd International Conference, Beijing, Institute of Technology Press, (1993), 468.
 [4] 魏光辉、智敦旺、刘直承等, 雷电与静电, 4-4(1989), 46.
 [5] P.E. Secker and J.N. Chubb, J. Electrostat., 16-1(1984), 1.
 [6] 鲍重光, 电子工业防静电危害, 北京工业学院出版社, (1987), 115.

1994年第8期《永磁学进展》一文勘误表

页	栏	行	误	正
449	题注		«电子合金»	«电工合金»
449	右	倒 2	36	30
450	图 1, 右边纵坐标		$F(p)$	$f(p)$
452	表 3			
453	右	3	自旋为取向	自旋再取向
455	左	13	$\alpha_{B_r} = 1.0\alpha_{M_s}$	$\alpha_{B_r} = 1.06\alpha_{M_s}$
456	左	倒 3	$D > D_c$ (二单畴...)	$D > D_c$ (=单畴...)
456	右	18	排列为等	排列再等
457	右	倒 17	κ 表示微	κ 表征
460	右	7	不能大块	不能得大块
460	参考文献[3]		... <i>Magnetic IEEE</i> <i>Magnetic Materials, IEEE</i> ...
460	参考文献[19][22]		same as [8]	same as [7]