

现代静电科学技术研究

A RESEARCH OF MODERN ELECTROSTATIC
SCIENCE AND TECHNOLOGY

马 峰 刘 勇 张捷民 主编

083

9

西 安 出 版 社

PDG

前 言

中国物理学会第八届静电学术年会于 1999 年 8 月在文化古都西安隆重召开。作为本世纪最后一次全国性的静电学术盛会,它既是对过去我国静电科技发展的全面回顾,又是对新世纪我国静电事业辉煌前景的美好展望。正因为如此,本次会议受到静电科技工作者的广泛关注、热情支持和积极参与。我们特从会议收到的论文中,选择 82 篇编辑出版,以飨读者,并以此作为本届学术会议的重要文献资料,永久保存。

本书所收集的论文涉及到现代静电科学技术的各个领域,诸如静电基础理论、静电应用技术、静电安全技术、静电测试技术和新型材料等,全面反映了我国静电工作者在这些领域的研究进展和最新成就,在一定程度上代表了我国静电科学研究的当前水平。

本书选编的论文具有以下特点:**学术水平较高**。有些论文的研究涉及到静电学科的前沿课题,如生命技术和信息技术;还有些论文的研究是国家自然科学基金项目或国家级重点攻关项目。**研究方法新**。一些论文引进了当代自然科学最新的理论和方法;至于计算机和网络技术也开始越来越多地应用于静电研究中。**密切联系生产实际**。本书收编的许多论文都是旨在解决工农业生产和国民经济建设中的一些具体问题,有些已付诸应用,取得良好的社会 and 经济效益,有些则具有潜在的应用价值。此外,本书还注意收入各种不同学术观点的文章,提倡百花齐放、百家争鸣,以活跃学术气氛、促进学科发展。

值得指出的是,本书收入的青年科技工作者的论文较三年前的大连会议又有所增加。这批后起之秀脱颖而出,在静电科学技术研究中取得了突出的成绩,他们的论文大多体现了敢于创新的学术思想和较高的学术水平,充分反映了我国静电事业兴旺发达、后继有人。

值此世纪之交胜利召开的第八届静电学术年会在我国静电事业的发展中具有重要意义。我们殷切期望广大的静电工作者,能够以本次会议为契机,再接再厉,把我国静电科研工作推上一个新台阶,以更加优异的成绩迎接新世纪的到来。

本书在论文审查和编辑过程中,在保持原文风格和特色的基础上,作了一定修改。因时间关系,未能与原作者一一商榷,敬希鉴谅。

本书的编辑出版,除得到中国物理学会静电专业委员会的指导外,还得到协办单位陕西谱脉技术有限公司和西安西特防静电技术有限公司的大力支持。纺织高校基础科学学报副主编皇甫练真编审对全书进行了审校。我们向所有支持、帮助该书出版的单位和同志致以衷心的感谢。

由于时间短促,加之水平有限,书中缺点、谬误之处在所难免,敬请读者指正。

编 者

1999 年 7 月于西安

目 次

A 静电基础

我国静电防护研究的进展和存在的问题与建议	刘尚合 魏 明	(1)
静电学中的混沌现象研究初探	袁云华 刘尚合 武占成	(4)
强电介质球颗粒填充质的静电特性分析	王寅平	(8)
超扭曲向列相液晶盒中的电势和场强分布	张志东 孙玉宝	(13)
一种运动球导体产生电磁场的映像	姜 洪	(16)
空气击穿电压的试验研究	王晓平	(19)
高分子聚合物板面静电放电的研究	罗来龙	(23)
高频沿面放电特点的研究	易正湘	(26)
静电放电辐射场研究的进展	谭 伟 王 谨 刘尚合	(30)
静电放电波形和辐射场的实验研究	陈砚桥 刘尚合 武占成	(34)
淀积尘层数学物理模型研究	孙可平 陈 留	(38)
淀积尘层时间常数对除尘效率的影响	孙可平	(41)
静电、惯性、截留同时作用下单球效率的理论分析	荣伟东 王英敏 张国权	(44)
气动输送管内二相流的起电电流	罗来龙	(47)
Internet 网上静电信息资源简介	李春萍 黄久生	(51)

B 静电应用技术

负脉冲流注电晕放电的颗粒荷电规律及其应用	翟景升 许德玄 武占成	(55)
脉冲电晕放电过程中火花放电的研究	李国锋 唐本峰 吴 彦	(58)
脉冲高压下的电晕放电和粒子荷电的研究	周玉龙 郭秀娟 徐明华	(61)
水雾静电复合除尘技术的研究	秦好泉 徐尔列 曾斌武 郭永胜 徐绍曾	(65)
单元式煤尘抑制装置的实验研究	胡又平	(69)
静电法捕集柴油机尾气的研究	刘祖文 赵 江 唐敏康	(72)
静电捕焦油器的应用研究	李 庆 刘志强 陈志中 董国义	(76)
客车、客船用复合型空气净化装置的研制	徐晓英 韩庆奎	(79)

超强电场脱硫镀盐回收研究	张芝涛	白敏冬	白希尧	(83)
直流基压收集产物对脉冲放电脱硫的影响	姜雨泽	吴彦	张彦彬	(87)
脉冲放电烟气脱硫中氨活化作用的实验研究	李杰	吴彦	王宁会	张彦彬 (91)
用脉冲电晕法进行燃煤烟气脱硫过程的测控	唐本峰	李国锋	吴彦	王宁会 (95)
高效率高浓度臭氧的产生及技术	白希尧	白敏冬	张芝涛	(99)
对臭氧应用技术中几个问题的讨论			易正湘	(103)
常压气体放电合成 NH_3 的研究	白敏冬	张芝涛	白希尧	(106)
烃燃料的静电雾化	苏永宏	金太东	高秀文	(110)
电晕放电对化纤织物改性的研究	吴国君	刘钟阳	孙大伟	(114)
纳秒脉冲电晕放电成像的实验研究	葛自良	马宁生	吴於人	章昌奕 (117)

C 静电安全技术

轻质油品输送过程静电安全系统的研究	何明俊	(120)
海岸输油不导电短管的安全性评价及推广	吴秀敏	(124)
静电放电对电火工品发火性能影响的研究	魏光辉	刘尚合 (128)
雷电电磁脉冲对电爆装置损伤模式的研究	陈亚洲	魏光辉 魏 明 (132)
用物理方法控制推进剂组份在加料中的静电·····	陆福一 耿兴国 李恩普	田荫棠
	李葆莹 吴玉全 周 克 崔端禧	孟宪东 (136)
雷电报警地面电场的阈值初探	刘彦民	黄柳宾 (139)
瑞士、德国等粉体静电爆炸与防护研究的考察	谭凤贵	周本谋 (142)
人体静电是微电子器件损伤的主要原因	王万禄	梁礼海 (145)
电子装联生产中的 ESD 危害及其防护	周耀文	马 峰 (149)
微波 T/R 组件生产中的静电防护技术·····	刘 刚 汤 俊 孙 迪	姜 红 (153)
计算机操作中静电放电的电磁干扰问题的研究	黄久生	(157)
ZnO _w /聚丙烯—阻燃物质复合材料防静电的研究	马 峰	周耀文 (161)
精纺毛涤织物抗静电防污整理的研究	苏开第	杨定国 (165)
接地与接零保护	刘 聰	(168)
防静电阻燃棉毛织物的应用研究	张捷民	(172)
实验室的静电污染与防治	周光茜	(175)
表面活性剂类防静电剂对聚乙烯改性的研究	薛 兵	(179)

D 静电生物效应

静电场对成纤维细胞生长的调控研究	江键	崔黎丽	宋诚荣	方影 (182)
------------------------	----	-----	-----	----------

用静电高压对中药灭菌的研究	徐明华 周玉龙 郭秀娟 王锡录 张 瑛	(185)
静电种子处理三定律及其在农业上的应用	徐绍曾 秦好泉 郭永胜 徐 匆 徐 兰	(188)
静电处理水稻种子失效特性的研究	沈永安 朱伟民 秦好泉 徐 兰 徐绍曾	(191)
中、俄种子处理技术在吉林省示范结果的报告	徐绍曾 秦好泉 郭永胜 徐 匆 徐 兰	(193)
电场处理小麦种子对发芽期抗盐性的影响	杨体强 征 荣 李梦莲 苏恩光	(197)
用水雾媒质电晕等离子体处理大豆种子和植株	许德玄 孙 明 刘钟阳 许 月	(199)
高压静电植物速成栽培技术的研究	邓鸿模 虞锦岚 周艾民 张石峻	(202)
静电场对黄瓜与蕃茄生长及产量的影响	龚 龙	(206)
物理方法果蔬保鲜的比较	范美华 平慧敏 包德修	(210)
静电生物效应的特性分析	胡玉才 汪 静	(214)

E 静电测试、电源和材料

高压窄脉冲分压器的研制	王宁会 王培清 黄 耀 戚 栋	(217)
系统辨识应用于静电放电辐射场测量的探讨	王 瑾 陈政新 刘尚合	(221)
摩擦起电量的一种近似测量方法	李恩普 耿兴国 赵鹏涛 朱 茵 田荫棠 陆福一	(224)
具有极性判别功能的旋转叶片式静电电位计的研制	张 雷 郎殿永 王士海	(226)
接触式静电电压表的输入电容对测量值的影响	周 克 崔端禧 孟宪东 耿兴国 李恩普 田荫棠 李葆萱 陆福一	(230)
静电电阻测量标准装置的建立	郭战军	(232)
油品电导率在线测量系统	张庆祥	(235)
四电极电阻率测试仪初探	陈政新 王 瑾 魏光辉	(239)
用高频测量静电容的方法	戚 栋 黄 耀 张 刚	(242)
阻隔材料静电衰减性能评估方法的研究	谭志良 刘尚合 陈砚桥	(245)
最小点燃能测定值的讨论	耿兴国 李恩普 田荫棠 李葆萱 陆福一 周 克 崔端禧 孟宪东	(249)
SX—2000 μ A 直流数显微安表的研制及在高压试验中的应用	饶国才	(252)
电源新技术在静电除尘器中的应用	罗 龙	(254)

准直流高压静电除尘器电源的研究	龚 龙	(258)
窄脉冲高压电源的实验研究	翟景升 许德玄 武占成	(260)
恒流高压直流电源的智能化	刘志强 李 庆 陈志中 董国义	(264)
超微晶合金在静电式油烟净化器高压电源中的应用		
.....	柴荔英 张向红 王 伟 周桃生	(266)
压电陶瓷变压器在雷达终端电源中的应用	柴荔英 周桃生 张向红 邝安祥	(270)
电晕放电等离子体化纤织物改性处理实验装置的电源设计		
.....	王培清 黄 耀 王宁会 黎锦斌	(273)
永久性抗静电聚合物合金	张广成 李 剑 杨青芳 陈立新 左瑞霖	(277)
可热封柔韧性防静电阻隔材料	王万禄 梁礼海	(282)

* A 静电基础 *

我国静电防护研究的进展和存在的问题与建议

刘尚合 魏 明

(军械工程学院静电技术研究所,石家庄,050003)

摘要 作者结合多年从事静电防护研究的实际情况,简要总结归纳了我国静电防护研究的进展和成绩,并指出发展中存在的问题,最后提出了推动我国静电防护事业发展的建议。

关键词 静电防护 进展 问题 建议

0 引言

随着现代化工业生产水平的不断提高,高分子材料、微电子器件、电爆装置广泛应用于各个领域,静电放电造成的危害受到人们的普遍关注,静电防护工程研究已成为有关部门的重要工作之一。结合作者多年从事静电防护研究工作的感受和遇到的问题,作者对我国静电防护的情况略加分析、概括,提出自己的观点和建议,以供同志们参考。

改革开放以来,随着我国国民经济的全面增长,我国静电防护研究工作在许多方面都有很大进展,取得了显著成绩^[1]。但是,随着知识经济时代的到来,信息化高速公路的开通,数字化、信息化已成为社会的普遍要求,面对蓬勃发展的高新技术和市场经济的发展形势,回顾过去,展望未来,我国静电防护研究工作已经取得很大成绩,但仍存在着许多问题,需要采取相应对策加以解决。

1 主要进展与成绩

70年代后,特别是近10年我国静电防护领域的主要进展和成绩可概括为:

(1) 在静电防护理论与技术研究方面,取得了突破性进展,有些研究成果接近或达到国际先进水平,获得国家发明奖或国家科技进步奖及国家发明专利,并取得了重要的社会效益、军事效益和经济效益,学术研究日趋深入,我国科技工作者出版的有关静电防护方面的著作在10部以上。

(2) 在防静电产品和防静电工程配套方面,已初步形成以防静电设施、防静电地坪、防静电包装、静电消除器、人体静电防护器材为主的多门类、多品种的产业格局。据报道,我国生产的防静电地板、防静电鞋、防静电腕带等人体静电防护产品已基本能满足国内市场的需要,有些产品已打入国际市场^[2]。

(3) 与静电防护工作配套的静电检测手段已比较先进、比较齐全,大多数仪器设备国内可以生产,在静电计量和量值传递与电源方面逐步和国际接轨,我国已建立了静电计量标准装置和静电计量测试站。

(4) 在静电防护管理方面,我国已制定了数十种相关标准规范,使静电防护工作有章

可循,管理工作开始走上标准化、规范化的轨道。

(5) 从事静电防护工作的专业性研究室、研究所和经销公司日益增多并日趋完善。在人才培养方面,由过去的培训班、本科班发展到硕士研究生、博士研究生和博士后研究人员,一支高水平的技术队伍初步形成。

2 发展中存在的主要问题

我国静电防护事业虽有较大发展,取得了显著的成绩,但是,在发展中也有着一些不容忽视的问题:

(1) 防静电产品生产规模小,高科技含量低,产品结构不合理,缺少与国际接轨的标准化实验方法和仪器设备,技术监督机制不够健全,致使许多部门的静电防护工作没有可靠的保障。1997年12月29日光明日报在报道我国防静电装备行业存在的问题时就指出:“生产规模小,产业结构不合理,技术含量低的产品出现了一哄而上的情况。比如全国有三百多家防静电地板生产厂家,相当多的处于手工作坊式生产,质量问题突出。”^[2]

(2) 静电防护理论与技术研究不够普遍和深入,静电防护专业术语有待统一和科学规范。

(3) 随着科学技术的高速发展,“静电”已不仅仅是原来意义上的静止电荷激发的静电场的问题,而是与静电放电相关的电磁环境问题。静电防护问题已发展成为利用系统工程理论对静电起电—放电规律、静电作用机理、能量传导模式、ESD模型、静电测试技术和防护理论与技术进行全面研究的新学科。今天,在静电防护方面,传统的静电学已形成静电安全工程^[3]。许多工业发达国家都建立了国家级静电学术机构,美国于1982年还专门建立了静电放电(ESD)学会。我国直到今天还没有国家级静电学会,跨行业的静电学术交流很少,许多用户找不到静电研究单位,找不到防静电产品,静电研究单位和生产厂家找不到市场。如某国防单位和某工程急需静电防护研究人员配合进行技术攻关,查遍了国家级学会名单,未找到中国静电学会,查寻搜索各种学术期刊却未发现中国的“静电”杂志,致使工作受到了不应有的损失。又如,静电学术界都知道,具有国际先进水平的人体动态电位测试仪、ESD模拟器等中高档仪器在我国早就研制成功,并已成功地应用于许多部门。但是,中国电子仪器行业协会在1997年12月29日的光明日报上报道:“国内市场急需的人体静电测量仪、ESD模拟试验设备、集成电路包装测试仪等许多中高档产品急待开发生产。”一处过剩,一处急需,在当今信息化时代,出现上述情况,实在让人难以理解。

(4) 我国在静电防护研究方面,过去侧重于静电造成的燃烧、爆炸等灾害事故,对静电放电引发的电磁辐射或电磁脉冲效应研究不够。随着信息化时代的到来,以计算机控制为中心的各种电子装备、智能化仪表,对静电放电的电磁脉冲非常敏感。因此,研究静电放电电磁脉冲的防护,已成为静电防护研究中的一个核心问题^[4]。美国1991年的政府工作报告(AD-A243367)^[5]和英国军械局备忘录(OBS/04/91)都在电磁环境中首先提到静电放电、电磁脉冲、电磁辐射的问题。甚至有的报道把静电放电及其电磁脉冲的危害与雷电电磁脉冲和核电电磁脉冲的危害相提并论^[6]。图1说明了静电放电与雷电电磁脉冲(LEMP)、核电电磁脉冲(NEMP)、开关电脉冲(STP)之间的关系。可见,静电放电作为近场电磁辐射源,给现代化设备造成的危害是十分严重的、我们必须进行深入研究。

(5) 静电起电、放电和静电防护的基本知识在我国未进行过普及教育,这方面的普及

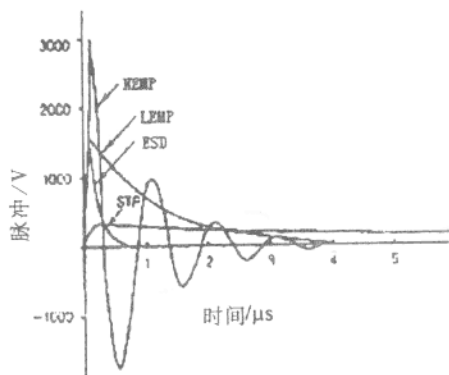


图1 ESD与典型电磁脉冲的关系

性著作也没有,使一般公众在日常生活和工作中遇到静电放电问题束手无策。如北京某公司房管部门,由于住户对其自身产生的人体静电不了解,误认为是楼房供电线路和接地系统有问题,要求换房,几乎闹出民事纠纷,造成了人为的经济损失。

3 几点建议

针对上述各种问题,提出以下建议 and 对策:

(1) 广大静电科技工作者应向上级有关部门积极建议尽快批准建立中国静电学会,出版“中国静电”学术期刊,促进国内外学术交流和静电研究成果转化为商品,并为年轻一代静电科技工作者成长创造良好条件,指导和推动我国静电防护工作顺利开展。

(2) 建立完善的防静电产品技术监督机制,鼓励研究院、所和院校与企业、公司联合,逐步形成研、产、销一条龙的高科技经济实体。努力提高我国防静电产品质量,形成结构合理的、有实力和特色的产业格局。

(3) 加强专题性研究和交流,尤其是应加强静电放电电磁脉冲效应研究和ESD辐射场测试研究,以适应信息化时代的要求。同时,提高从事静电防护研究工作者的理论水平,为培养跨世纪优秀人才创造条件。

(4) 建议教育部门在中学生或大学生教材中适当增加现代静电知识和静电放电危害及其防护的基本知识,并组织编著、出版通俗易懂的静电防护丛书,使静电起电与防护知识尽快在我国得到普及。

参考文献

- 1 刘尚合.十年来防静电危害的研究成果.静电,1995,10(4):1~6
- 2 刘路沙.我国防静电装备行业初具规模.光明日报,1997-12-29
- 3 Mass J S, Pratt D J, Boxleitner W. Furniture ESD - the forgotten parameter in ESD testing. IEEE trans. on EMC, 1991:248-252
- 4 刘尚合等.静电理论与防护.北京:兵器工业出版社,1999:4~5
- 5 AD-A243(1991), Integrated Logistic Support Coeerns Electrereg11etic Environmental Effects Program
- 6 Laurin J, Zaky G, Keith G Balmain. On the prediction of digital circuit susceptibility to radiated EMI. IEEE Trans. on EMC, 1995, 37(4):528-535

* A 静电基础 *

静电学中的混沌现象研究初探

袁云华 刘尚合 武占成

(机械工程学院静电技术研究所, 石家庄, 050003)

摘要 简要介绍了混沌的一般理论。揭示了在静电摩擦起电过程中可能存在的混沌现象, 并解释了摩擦起电出现各种现象的原因。

关键词 静电 起电放电 混沌

0 引言

E. Lorentz 在 1963 年研究两无限平面间流体的运动时, 用计算机求数值解时, 发现了耗散系统的混沌运动, 此后, 混沌现象的研究成为科学界的热点问题, 引起了物理、数学、力学等科学工作者的注意。到 80 年代末, 混沌在理论和实验诸方面都取得了进展。^[1,2] 随着高科技的发展, 静电理论与技术已经开始被人们普遍关注。静电学从原来经典物理学的一部分发展成为现代的静电工程学。但是, 静电工程学中仍有许多问题需要研究解决, 利用混沌理论来研究并解释静电工程学中一些理论和实验现象就是一种尝试。

1 混沌理论及其研究方法

混沌, 至今虽然没有一个统一的定义, 但是人们却能运用混沌的特征来理解和揭示某些实验规律。通俗地讲, 混沌是一种并非随机而貌似随机的运动^[3]。它可以理解为一种由确定性系统产生的、对初始条件具有敏感性、永不重复的回复性的周期运动^{[1][2]}, 因此, 混沌有时也称为决定性混沌。对混沌的定义有许多种, 影响较大的是由 Li-Yorke 在《周期 3 蕴涵混沌》的论文中提出的数学定义, 它是从 Li-Yorke 定理出发, 形成了混沌的数学定义。Li-Yorke 定理是这样表述的: 设 $f(x)$ 是闭区间 I 上的连续自映射, 若 $f(x)$ 有 3 周期点, 则对任意正整数 n , $f(x)$ 有 n 周期点。

据此混沌定义为: 闭区间 I 上的连续自映射 $f(x)$ 如果满足下列条件, 便可确定有混沌现象:

- (1) f 的周期点的周期无上界;
- (2) 闭区间 I 上存在不可数子集 S , 满足
 - (i) 对任意 $x, y \in S$, 当 $x \neq y$ 时, 有 $\limsup_{n \rightarrow \infty} |f^n(x) - f^n(y)| > 0$
 - (ii) 对任意 $x, y \in S$, 有 $\liminf_{n \rightarrow \infty} |f^n(x) - f^n(y)| > 0$
 - (iii) 对任意 $x \in S$ 和 f 的任一周期点, 有 $\limsup_{n \rightarrow \infty} |f^n(x) - f^n(y)| > 0$

根据上述定理和定义, 对闭区间 I 上的连续函数 $f(x)$, 如果存在一个周期为 3 的周期点时, 就一定存在任何正整数的周期点即一定会出现混沌现象。

混沌定性的特征一般可归结为三点^[4]:

(1) 内随机性:在一定的条件下,如果系统的某个状态既可能出现,也可能不出现,该系统就被认为具有随机性,而人们习惯于把随机性的根源归结为来自系统外部的或某些尚不清楚的原因的干扰作用,认为如果一个确定性系统不受外来干扰,它自身是不会出现随机性的,这称为外随机性。人们在不断的研究过程中发现,在完全确定的系统(可用确定的微分方程描述)内部竟产生了随机性,与外来干扰无关,这种随机性,则称为内随机性。譬如 Lorentz 方程组,虽然是从大气热对流中简化得来,但是,这个方程组在数学意义上揭示了确定性系统中的内随机性现象。

(2) 分维性:混沌态具有分维性质,但其非整数维不是用来描述系统的几何外形,而是用来描述系统的运动轨道在相空间的行为特征。混沌运动在空间中的轨迹一般很难用常用的整数维(0,1,2,3 维)来描述,这也表明混沌运动的一种复杂性。

(3) 普适性:混沌是一种无周期性的“高级”有序运动。在数值的或实验的分辨率足够高时,可以发现在小尺度混沌中的有序运动花样。所谓普适性,是指在趋向混沌时所表现出来的共同特征,它不依赖于具体的系数以及系统的运动方程而变。普适性可分为两类,结构的普适性和测度的普适性,结构的普适性是指系统在趋于混沌过程中轨线的分岔情况与定量特征不依赖于该过程的具体内容,而只与它的数学结构有关;测度的普适性是指同一映象或迭代在不同测度层次之间嵌套结构的相同,结构的性态只依赖于非线性函数幂级数展开式的幂次。

由于混沌运动具有普适性,我们可以认为一切运动都蕴涵着混沌运动,至于为何没有表现出来,则主要取决于系统的非线性程度及其相互作用。譬如,对于自由落体运动,一张纸片的下落和一块石头的下落其运动轨迹是不相同的,而且纸片的下落轨迹也无法预测。有人研究认为,纸片的自由落体运动是一种混沌运动^[5]。

人们在研究定量刻画混沌运动的过程中,已经形成了一些研究方法,大致可分为三类:

(1) 数值法:主要包括 Poincare 映射和 Poincare 截面法、功率谱方法等。

(2) 解析法:在给定动力学方程的前提下,通过判断混沌吸引子(或称为奇怪吸引子)来确定混沌运动,并研究其性质。

(3) 统计描述法:统计描述方法主要有分数维(分维)、Uyapunov 指数、测度熵等。

2 摩擦起电中的混沌现象

在静电工程学的研究中,如何定量地描述和模拟静电起电和静电放电的规律,有些问题,一直困扰着人们。例如,人们用 ESD 模拟器定量模拟非接触式静电放电时,遇到的最大困难就是难于确定放电的规律性。但是,在研究这个问题时,我们会发现静电放电中的许多现象类似于混沌的一些特征。例如,在摩擦起电后放电过程中,放电规律对电压初始值的敏感性(cross-over 效应),静电起电和放电对温湿度的敏感性^[6,7]等。

为了研究静电起电放电中可能存在的混沌现象,我们对摩擦起电过程作了分析。物体摩擦带电时的等效电路如图 1 所示,设带电体表面所能积累的饱和电量为 q_{∞} ,物体在某一时刻带电量为 q ,由此可得,带电体电量 q 的变化率可以写为下式:

$$\frac{dq}{dt} = I(t) - \frac{q}{RC} \quad (1)$$

方程(1)可改写为

$$\frac{dq}{dt} = I(t) - f(q). \quad (2)$$

下面分几种情况进行讨论

(1) 当 $f(q) = \beta q$, $I(t) = I_0$ (常数) 时, $\beta = I/RC$ 为常数, 可得

$$q = (I_0/\beta)[1 - \exp(-\beta t)].$$

因此, $t \rightarrow \infty$, $q_\infty = I_0/\beta$ 。由此可以看出, 物体的带电量随着摩擦次数增多, 物体的带电量逐渐达到一个稳定值。如图 2 所示。

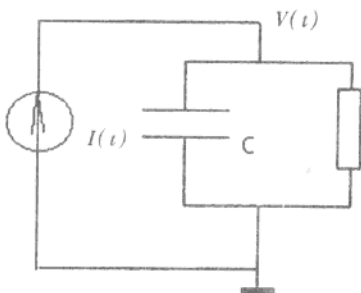


图 1 物体摩擦起电等效电路图

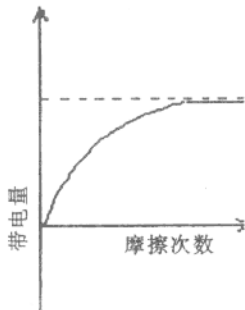


图 2 摩擦带电量与摩擦次数的关系

(2) 考虑到物体带上一定数量电荷时会抑制物体的起电率, 设 $I(t) = \alpha - \gamma q$, $f(q)$

同(1)中所设, 得 $q = \frac{\alpha}{\gamma + \beta} \{1 - \exp[-(\gamma + \beta)t]\}$ 。

当摩擦次数增多时, 即 $t \rightarrow \infty$, $q_\infty = \alpha/(\gamma + \beta)$, 由此可以看出, 物体的带电量最终会稳定在饱和电量值附近。物体带电示意图也如图 2 所示, 只不过此时的饱和带电量小于(1)中的带电量。

(3) 当物体电量增加时, 物体对地电位增高, 使物体对地的泄漏电阻值下降, 泄漏电流 $f(q)$ 与 q 不成线性关系, 设 $f(q) = \beta q^2$, β 为常数。 $I(t)$ 同(2)。即

$$\frac{dq}{dt} = \alpha - \gamma q + \beta q^2. \quad (3)$$

令 $dq/dt = 0$, 可得 $\alpha - \gamma q - \beta q^2 = 0$, 解此方程, 得

$$q_{1,2} = [-\gamma \pm (\gamma^2 + 4\alpha\beta)^{1/2}]/2\beta. \quad (4)$$

设 $F(q) = \alpha - \gamma q - \beta q^2$, 由 $F(q)$ 对 q 求导, $F'(q) = -\gamma - 2\beta q$, $|F'(q)|_{q=q_\infty} = (\gamma^2 + 4\alpha\beta)^{1/2}$, 当 $\gamma^2 + 4\alpha\beta < 1$ 时, $|F'(q)| < 1$, 由微分方程稳定性处理, 方程(3)的解是稳定的。

为了进一步对非线性较强的摩擦起电过程进行讨论, 对方程(3)作归一化处理, 并将方程予以离散化, 考察前后两次摩擦起电的关系。

对方程(3)进行归一化, 令 $x = q/Q$, $Q = \{-\gamma + [\gamma^2 + 4\alpha\beta]^{1/2}\}/2\beta$ 离散化, 得

$$x(n+1) = \alpha q - (\gamma - 1)x(n) - (\beta/Q)x(n)^2. \quad (5)$$

对方程(5)进行坐标变换和平移, 即令 $x(n+1) = cx'(n+1) + k$, 化简得

$$x'(n+1) = r(1 - x'(n)^2). \quad (6)$$

此时, $r = \beta^2/Q$, $k = Q(1 - \gamma)/(2\beta)$, $c = [Q/2\beta](\gamma^2 + 4\alpha\beta - 1)^{1/2}$ 。

方程(6)是典型的抛物线映射, 考虑到此时物体在摩擦起电的过程的复杂性, 某些物体的带

电量能够在正极性和负极性之间取值,即方程(6)可视为在闭区间 $[-1,1]$ 之间的一种自迭代映射,此时,方程便成为典型的 Logistic 映射。在文献[8]中,对此映射有详细研究,业以

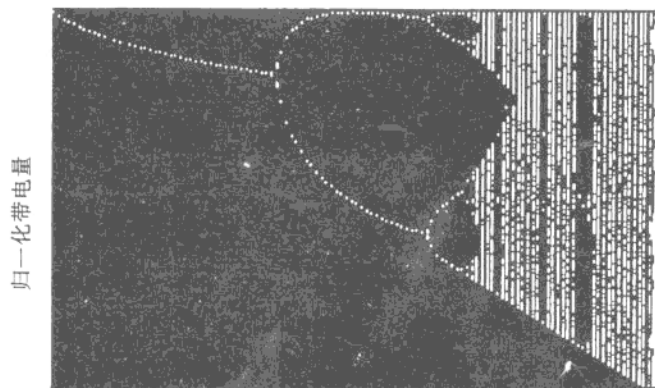


图3 无量纲化参量 r

证明,在参量 r 的某一取值范围内,系统呈现混沌态。图3是由方程(6)画出的分岔示意图。

由分岔示意图可见,当参量 r 达到某一临界值时,即物体材料的性质符合条件时,物体摩擦起电带电量能导致混沌现象的出现。

3 结束语

在静电摩擦起电过程中蕴涵着混沌现象,正是静电起电放电中非线性规律的表现。静电起电-放电中许多现象都类似于混沌的一些特征,譬如,空气放电是一个典型的分形,空气放电中等离子的混沌现象^[10]等等。清晰地揭示静电中的一些疑难问题,相信能更好地促进静电工程学的发展。

我们对静电起电和放电中的非线性本质的研究也只是刚刚起步,相信不久以后,许多人参加到这项工作中来,能很好地促进静电工程学的发展。

参考文献

- 1 李忠,毛宗源.混沌控制综述.电路与系统学报,1989,3(1):259~364
- 2 陈立群,刘延柱.混沌的抑制研究进展综述.力学进展,1998,.28(3):299~308
- 3 [美]洛伦兹 E N 著.混沌的本质.刘式达,刘式适,严伟译.北京:气象出版社,1997
- 4 吴祥兴,陈忠等编著.混沌学导论,上海:上海科学技术出版社,1996
- 5 [英]伊恩斯图尔特著.上帝掷骰子吗.潘铸译.上海:远东出版社,1995
- 6 刘尚合等编著.静电理论与防护.北京:兵器工业出版社,1991
- 7 武占成.静电起电理论及 ESD 对人体生理影响的研究[学位论文].石家庄:军械工程学院,1997
- 8 郝柏林.从抛物线谈起——混沌动力学引论.上海:上海科技教育出版社,1997
- 9 张济忠.分形.北京:清华大学出版社,1995
- 10 Papayan V O, Grigoryan Yu I. Chaotization of ionization waves in a discharge plasma. International Journal of Bifurcation and Chaos, 1994, 4(6): 1495~1509

* A 静电基础 *

强电介质球颗粒填充质的静电特性分析

王寅平

(昆明陆军学院,昆明,650207)

摘要 在静电场中,介质之间的静电相互作用能有效增强介质球之间的局部电场。本文对均匀电场下由强电介质球颗粒形成的填充质从静电能量的介质-真空分配以及沿电场方向的电势与电场的关系两个方面去分析、估算填充质中缝隙间电场平均增强以及电场强度分布。由此得出填充质的颗粒特征因素对实际应用方面所涉及的参量如除尘过滤效率和非平衡放电体积的影响的关系式。

关键词 填充质 电场增强 除尘效率 放电体积

0 引言

由电介质特别是强电介质(介电常数 $\epsilon_r \gg 1$)球形颗粒形成的填充质在静电场或交变场下,颗粒之间缝隙的电场可获得有效增强,该特性使此类填充质有广泛的实际应用:(1)在静电场中,通过颗粒之间缝隙的局部电场增强和收尘表面积增大,可有效提高除尘效率,应用于高效除尘过滤器^[1];(2)在交变电场下,通过颗粒之间的放电产生臭氧,使除尘过滤器具有杀菌功能,可应用于生物医疗领域;(3)在高频电场下,产生非平衡放电,可应用于非平衡等离子体化学过程等等^[2]。然而此类填充质中颗粒的几何特征和分布特征对其静电特性的影响却不曾做过较为有效的分析和计算。本文分别通过分析填充质中静电能量的介质-真空分配以及沿电场方向电势与电场的关系式,估算出颗粒球之间缝隙的平均场强以及场强分布,由此得出填充质的颗粒特征因素对实际应用方面所涉及的参量如除尘过滤效率和非平衡放电体积的影响的关系式。

1 颗粒球之间缝隙的平均场强

填充质中的平均电场是外电场与填充质表面极化电荷在填充质中的退极化场叠加形成。然而,由于填充质是由大量介质球颗粒填充而成,就其内部局部区域而言,介质球表面产生的极化电荷在介质球内部产生退极化场,而在介质球外产生增强极化场,使球内电场减弱而使球外电场增强。每个介质球处在平均电场与其它极化颗粒的附加场叠加所形成的有效电场之中。在均匀电场下,填充质中的平均电场 E_0 就是沿电场方向两点的电势差 U 除两点间距 d ,即 U/d 。而填充质中的介质球所处的外场则由于其它介质球的极化而得到增强,即大于 U/d 。

对于由介质球尤其是大小大致相同的介质球颗粒形成的填充质在静电场中的基本特性可作如下假设:(i)在均匀外场下,颗粒均匀分布的填充质内部电场近似为均匀电场。每个颗粒产生偶极化,其外场是填充质中的平均电场和其它偶极极化颗粒在该处所产生附加

场的叠加,而其内部电场则是其外场和该颗粒的偶极极化在其内部产生的退极化场的叠加;
(ii)由于极化所产生附加场强与极化强度即单位体积内的偶极矩呈线性关系,用等效极化率联系极化强度与填充质中平均场强的线性关系;(iii)总静电能与填充质中平均场强的平方成正比,总静电能量是介质球内的静电能与介质球外缝隙中的静电能之和。

设 E_e 为填充质的平均电场, E_{in} 为介质内电场, E_{ou} 介质球所处电场, E_g 为介质球之间缝隙中的电场, p 为介质球极化强度, P 为填充质的极化强度。 V 为填充质的体积, v_i 为第 i 个介质球的体积, V' 为所有介质球的总体积,即 $V' = \sum V_i$, ϵ 为介质球的介电常数, ϵ' 为填充质的有效介电常数。可知^[3]

$$p = 3\epsilon_0 \left[\frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon + 2\epsilon_0} \right] E_{ou} = 3\epsilon_e \alpha E_{ou}, \quad E_{ou} = E_e + \frac{P}{3\epsilon_0}. \quad (1)$$

其中 $\alpha = \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon + 2\epsilon_0}$, $P = \frac{\sum p v_i}{V} = \frac{V'}{V} p$ 。由(1)式得

$$p = \frac{3\epsilon_0 \alpha}{1 - \left(\frac{V'}{V} \right) \alpha} E_e; \quad E_{in} = \frac{3\epsilon_0}{\epsilon + 2\epsilon_0} E_{ou} = \frac{3\epsilon_0}{\epsilon + 2\epsilon_0} \frac{E_e}{1 - \left(\frac{V'}{V} \right) \alpha}. \quad (2)$$

$$\text{由 } P = (\epsilon', \epsilon_0) E_e \text{ 式以及(1)式得 } \epsilon'_r = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} = \frac{1 + 2 \left(\frac{V'}{V} \right) \alpha}{1 - \left(\frac{V'}{V} \right) \alpha}. \quad (3)$$

$$\text{球外缝隙的电场能量密度 } w = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_g^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{\epsilon'_r E_g^2 - \epsilon_r E_{in}^2 \left(\frac{V'}{V} \right)}{1 - \frac{V'}{V}}.$$

上式在强电介质($\alpha \approx 1$)情况下,忽略(V'/V)的高次方项后可得

$$E_g = E_e \left[1 + 2 \frac{V'}{V} + \frac{3}{2} \left(\frac{V'}{V} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

均匀电场中,填充质中均匀分布的介质球其极化可近似为偶极极化,该假设合理性可以通过比较填充质有效介电常数的实验测量值与计算值的一致性得以证实。由一对相距 20 mm 面积为 10 cm×10 cm 薄铝片构成平行板电容器,测量有填充质和无填充质两种情况下的电容之比(C/C_0)即为实验测得填充质的有效介电常数。填充质由半径为 1.5 mm,相对介电常数 ϵ_{r1} 很大的 BaTiO₃ 介质球组成。填充质充满电容空间。介质球密度用相对介电常数 ϵ_{r1} 在 2~5 之间的聚乙烯碎末均匀掺入其中而调整,由于 $\epsilon_{r1} \gg \epsilon_{r2}$,聚乙烯碎末对电容值的贡献可忽略不计。图(1)中曲线(a)是实验测得的 $\epsilon_{r1} = C/C_0$ 随 V'/V 的变化关系。曲线(b)是(3)式在 $\alpha \approx 1$ 的情况下得出的曲线。从图中可以看出实验值与计算值基本吻合。

2 颗粒球之间缝隙的电场分布

在均匀电场中相邻的介质球存在静电相互作用,对于强电介质球,则存在强烈的静电相互作用,其结果是使电介质球表面极化电荷不再具有孤立球情况下的偶极对称性分布。因此,就近场而言,不能将介质球等效为一个偶极子。沿电场方向相邻两介质球的静电相互作用使它们之间缝隙中的电场增强,而垂直于电场方向的两介质球静电相互作用使其缝隙间电场有所减弱。设介质球均匀分布的填充质内沿电场方向两点电压为 U 。两点的空间线

度为 $V^{1/3}$, 而被填充质充实的线度为 $V'^{1/3}$ 如图(2)所示, 沿一定路径 1, 球外电场为 $E_g(\theta)$, 球内电场 E_{in} 。球内外电场作均匀电场近似, 则沿路径方向电场的积分得

$$\overline{E_g(\theta)}(\sqrt[3]{V} - \sqrt[3]{V'} \overline{\cos\theta}) + E_{in} \sqrt[3]{V'} \overline{\cos\theta} = U。$$

可得

$$\overline{E_g(\theta)} = \frac{E_e}{1 - \sqrt[3]{\frac{V'}{V}} \overline{\cos\theta}} - \frac{E_{in} \overline{\cos\theta}}{1 - \sqrt[3]{\frac{V'}{V}} \overline{\cos\theta}}。$$

其中 $\overline{\cos\theta} = \frac{1}{N} \sum_i \cos\theta_i$; $E_e = \frac{U}{\sqrt[3]{V}}$ N 为路径经过的介质球数目。当 $\epsilon \gg 1$ 时, $E_{in} \ll E_e$, 可得

$$\overline{E_g(\theta)} = \frac{E_e}{1 - \sqrt[3]{\frac{V'}{V}} \overline{\cos\theta}}。 \quad (5)$$

在介质球整齐排列的特殊情况下有最大电场 $E_{\max} = \frac{E_e}{1 - \sqrt[3]{\frac{V'}{V}}}$, 最小场强 $E_{\min} = E_e$ 。

(5)式给出了沿电场方向介质球缝隙间的平均场强分布。就一对具体介质球而言, 其缝隙间的场强由于间距大小不同, 可以大于或小于 $E_{\max}$ 。理论上, 当沿电场方向的充实线度 $V'^{1/3}$ 接近于 $V^{1/3}$ 时, $E_{\min}$ 可以大于 E_e 。

3 静电场中填充质的除尘过滤效率

填充质中介质球表面通过电场的库仑力吸引作用吸附尘埃, 而介质球面电场非均匀且不垂直于表面, 因而球表面各部分收尘的能力是不同的。电场小或电场极性与尘埃荷电相同的球表面部分可以认为收尘能力小甚至没有收尘能力。作为平均电场考虑, 一个球的有效收尘面积可以近似为沿电场方向球的投影面积。设介质球半径 R , 均匀分布且球颗粒数密度为 n 。有关系式 $(4/3)n\pi R^3 = V'/V$ 。单球的有效面积 $s = \pi R^2$ 。总有效面积 $A = n\pi R^2 V = 0.75 V'/R$ 。

带电尘粒受到库仑力 qE_g 牵引, 以较快的速度向介质球表面迁移并被吸附, 另一方面尘粒受到气体的粘性阻力 F_w 的作用, 此力与尘粒的速度 W 成比例, 有 $F_w = 6\pi\mu a W$ 。速度大到一定值时, 阻力与迁移力平衡。设尘粒的平均带电量为 q 、半径为 a , 气体的粘性系数为 μ , 尘粒的质量为 m 。由尘粒的运动方程 $m \frac{dw}{dt} - qE_g - F_w = 0$ 解得

$$w = \frac{qE_g}{6\pi\mu a} [1 - e^{-\frac{6\pi\mu a t}{m}}]。$$

忽略第二项得

$$w = \frac{qE_g}{6\pi\mu a}。 \quad (6)$$

根据 Deutsch - Anderson 公式^[4], 收尘效率

$$\eta = 1 - \exp(-wA/Q), \quad (7)$$

其中 Q 是尘埃气体流量。设尘埃气流方向填充质的厚度为 h , 气流速度 v , 则 $Q = vV/h$ 。

由(4)、(6)以及(7)式得

$$\eta = 1 - \exp\left[-0.04\left[\frac{V'}{V} + 2\left(\frac{V'}{V}\right)^2 + \frac{3}{2}\left(\frac{V'}{V}\right)^3\right]\left(\frac{h}{R} \frac{qE_e}{\mu\alpha v}\right)\right]. \quad (8)$$

分析:由(8)式可知,电介质球填充质对除尘过滤效率的主要影响表现在:(i)增大电介质的介电常数可增强收尘区电场强度,从而提高收尘效率。所以一般要求用介电常数很大的强电介质材料如钛陶等作过滤器中的介质球。还可用电介质球和金属球混合或用表面经过绝缘处理过的金属球作过滤介质球来实现收尘区域电场增强。(ii)增大填充层厚度与球半径之比 h/R 或增大填充质的充实参数 V'/V 可有效提高收尘效率。(iii)增大 h/R 或增大 V'/V ,将会增大气流的阻力,减少单位时间的换气量,影响过滤器的整体效率。因此应根据实际情况,对电介质填充质过滤器的参数作相应设计。(iv)高频电场(kHz)由于电场波长大于颗粒球半径,基于极化而增强局部电场的计算与静电场的情况相同。

4 高频电场下填充质中非平衡放电体积

高频(kHz)交流电压作用下,介质球缝隙之间产生流注放电而形成非平衡等离子体,这是由于局部电场增强效应形成的纳秒伏特数量级电压脉冲所产生的独特效应。在窄脉冲高频电场作用下,电子可在一个平均自由程内获得足以使气体分子电离的能量(5~20 eV),而与此同时离子还得不到有效加速,形成流注放电。实验发现对流注放电产生主要影响的参量有电压的上升沿速率、峰值电压和气体的组成。脉冲电压下的放电存在统计时延,脉冲电压上升沿越陡峭,流注放电的起始电压和击穿电压越高,供给电子的能量密度也越大。高频电场下,介质球之间缝隙的电场极不均匀,局部区域能获得极大的场强峰值和极高的电场上升沿速率,这正是产生非平衡放电的主要原因。填充质中能否产生有效的非平衡等离子体,主要衡量标准就是是否具有有效的放电区域体积。一定的外场和一定的电介质球分布下,填充质中的放电空间可有明显的增大,从而产生有效的非平衡放电。

设气体分子的电离能为 ϵ_e (eV),电子的平均自由程为 λ_e 。在不考虑电场脉冲上沿时间因素的影响下,要求电子必须在不小于 ϵ_e/λ_e 的电场下,可在一次碰撞之前获得气体分子电离所需的能量 ϵ_e 。考虑以下情况填充质中放电空间的体积问题。一平行板电容器两端交流电压为 U ,两板间距 d ,电容器空间充满填充质。填充质的颗粒特征同前。根据(5)式得

$$\frac{\epsilon_e}{\lambda_e} = \frac{U}{d(1 - 2R\sqrt[3]{n}\cos\theta)}. \quad (9)$$

沿电场方向相邻两介质球缝间的放电体积 $\Delta V_d \approx 2\pi R(1 - \cos\theta)\left(\frac{1}{\sqrt[3]{n}} - 2R\right)$ 。总放电体积

$$\begin{aligned} V_d &= nV\Delta V_d = \pi R\sqrt[3]{n}V\left(\frac{U\lambda_e}{d\epsilon_e} - 1 + 2R\sqrt[3]{n}\right)(1 - 2R\sqrt[3]{n}) \\ &= 1.95V\sqrt[3]{\left(\frac{V'}{V}\right)}\left(\frac{U\lambda_e}{d\epsilon_e} - 1 + 1.24\sqrt[3]{\left(\frac{V'}{V}\right)}\right)\left(1 - 1.24\sqrt[3]{\left(\frac{V'}{V}\right)}\right). \end{aligned} \quad (10)$$

在实际应用情况下, U/d 与 ϵ_e/λ_e 相比较相对较小。对(10)式求极值,得最佳填充几何参数 $\sqrt[3]{\left(\frac{V'}{V}\right)} = 0.8\left(1 - \frac{1}{2}\frac{U\lambda_e}{d\epsilon_e}\right)$ 。对应最大总放电体积

$$V_{d\max} = 0.39V\left(1 - \frac{U\lambda_e}{d\epsilon_e}\right)\left(\frac{U\lambda_e}{d\epsilon_e}\right)^2. \quad (11)$$