

工业静电与雷电 防护手册



本书编委会 编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

工业静电与雷电防护手册

本书编委会 编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书全面、系统地介绍了工业生产中静电、雷电对人类生命安全、物资财产和生产技术的重大影响及其防护措施。第一篇介绍了工业静电基础理论、静电放电和引燃、静电测量等基本知识,对石油、船舶、电子、航空航天、纺织和化工等行业的静电现象、起电原因、所造成的危害及防护措施作了深入叙述,同时对与工业生产密切相关的人体静电和粉体静电作了详细分析。第二篇介绍了工业雷电灾害特征及其分布、现代防雷技术、防雷装置与器件、防雷接地与接地电阻的测量方法,在此基础上,对当前工业各领域典型设施的雷电防护方法作了较为完整的描述与分析,并介绍了当前国内外的雷电防护技术规范。

本书具有很强的实用性和可操作性,可供从事安全生产与管理的技术人员,特别是从事静电和雷电技术研究和应用的技术人员使用,亦可供从事安全技术工作的科研、教学、设计人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

工业静电与雷电防护手册 / 《工业静电与雷电防护手册》编委会编. —北京:中国石化出版社, 2016. 2
ISBN 978 - 7 - 5114 - 3739 - 6

I. ①工… II. ①工… III. ①工业生产 - 静电防护 - 手册 ②工业生产 - 防雷 - 手册 IV. ①TB4 - 62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 018608 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东郊区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

850 × 1168 毫米 32 开本 20.5 印张 497 千字

2016 年 3 月第 1 版 2016 年 3 月第 1 次印刷

定价:78.00 元

《工业静电与雷电防护手册》

编辑委员会

主 任 李勇武

顾 问 刘尚合

副主任 刘小江 周达超 刘进立 佟德安 李良福
李国清 邵予工 戚建国 胡迁林 孙晓波
刘全桢

主 审 施富强 王嘉麟 梁军胜

主 编 宋广成 郭在华 王东生

编 委 董 健 姜才兴 潘 森 王文生 杨成全
徐志敏 孙永忠 毕士君 宋 飞 郭鸿霖
李政烨 钱计兴 王雪颖 杨国华 徐海雄
冯 俊 刘 旭 姜克强 邵建人 赵思韬
罗先俊 包文科 余旭东 何华林 张校军
王红杰 赵录臻 于长一 崔天燕 王 杰
叶宏跃 庞 艺 刘豫栋 黄文章 卞直兵
孙吉庆 白殿武 曾 铮 靳 鹏 宋文娟
王 钰 施铭德 毕研峰 罗 皓 邓利民
傅峻松 董绍平 王占生 姜仁杰 戴丽平
郭丽丽 覃彬全 常 越 刘国民 刘清良
任卫东 李志强 张 军

前 言

雷电实质上就是大自然中一种强有力的静电放电现象，一千多年前人们就已发现静电、雷电现象，随着岁月的流逝，人们逐渐把它当成一个古老的学科，并未予以特别重视。

纵观古今，静电、雷电也因其难以驾驭的特性，给人类带来各种灾害。在我国，静电、雷电安全技术虽然是一门新崛起的应用边缘技术，但是静电、雷电学科却已成为国内外非常活跃的学科之一，成为许多工业部门、科研院所、大专院校的研究对象。

随着现代工业的发展和科技的进步，静电、雷电又逐渐闯入了石油、石化、化工、船舶、纺织、造纸、印刷、橡胶、塑料、制药、电子、国防等几乎每一个工业领域和易燃、易爆品的生产及储运等部门。正是因为这些领域和部门都不同程度地遭受了静电、雷电的危害，迫使人们不得不把注意力重新转向这一古老而又重要的学科。防静电、防雷电危害问题的研究就成了当代工业生产中安全技术的重要研究内容之一。

本书从静电灾害防治和雷电灾害防治两个方面出发，结合有关工业的实际情况，把国内外静电、雷电学科的最新研究成果及其防治措施介绍给读者，从而加深对各种静电现象、雷电现象的理解和防治，尽量减少静电灾害和雷电灾害，并利用其特性使之更好地为工业生产服务。

本书由中国石油石化静电专业委员会、成都信息工程大学雷电监测与防护技术研究所和广西地凯防雷工程有限公司组织编写。四川省安全科学技术研究院、中国石油安全环保技术研究院对全书进行了审阅。本书在编写过程中得到了各方面的关心和支持，中国工程院刘尚合院士在百忙之中提出了非常好的

建议,上海海事大学孙可平教授、中国石化青岛安全工程研究院刘全桢教授对编写工作给予了积极支持,并提供了大量的技术资料。此外,中国石油和化学工业联合会、中国石化销售有限公司华北分公司、河北省保温行业协会、四川中光防雷科技股份有限公司、四川桑莱特智能电气设备股份有限公司、福建南烽防火科技有限公司、上海海隆赛能新材料有限公司、武汉铁神化工有限公司、江苏金陵特种涂料有限公司、武汉爱劳高科技有限公司、天鹅涂料(武汉)科技股份有限公司、成都东方瀚易科技发展有限公司、深圳市深赛尔股份有限公司等对本书的编写也提出了不少宝贵的意见或建议。在此一并表示感谢!

工业静电、雷电是一门新型学科,其涉及面广,技术性强。静电参数、雷电参数均是些重复性、再现性较差的理化指标,在科研中难以记录和量化,因此许多技术仍在研究探讨之中。

鉴于以上原因,我国在工业静电、雷电安全技术研究方面的发展道路还很长,愿我们共同努力,为工业静电、雷电安全技术的研究和发展作出新的贡献。

由于编者水平有限,书中肯定会有错误或不足之处,敬请读者批评指正。

目 录

第一篇 工业静电防护

第1章 工业静电基础理论	1
1.1 静电现象及其基础理论	1
1.2 静电场中的导体和电介质	8
1.3 静电场的能量	11
1.4 静电的产生、流散和积累	12
第2章 静电放电和引燃	18
2.1 静电放电的有关因素	18
2.2 静电放电类型和特点	25
2.3 静电引燃	28
2.4 静电引燃安全界限	30
2.5 确认静电引燃的方法和实例	33
第3章 静电测量	36
3.1 静电测试的主要参数及特点	36
3.2 静电电位的测量	38
3.3 静电电量的测量	45
3.4 材料带电性能参数的测量	51
3.5 液体静电的测量	55
第4章 石油工业静电	62
4.1 石油静电现象及其规律	62
4.2 石油静电性能的评定	72
4.3 石油储运和使用中的静电	95
4.4 石油静电安全标准值	127
4.5 导静电涂料及其应用	147

4.6	石油静电危害及防护措施	167
4.7	石油静电标准综述	195
第5章	船舶工业静电	209
5.1	船舶静电起电机理	210
5.2	船舶静电事故经典案例	220
5.3	船舶静电综合防治措施	225
5.4	船-岸安全电气连接新技术	236
5.5	减少舱内危险性空间电位的措施	247
第6章	粉体工业静电	253
6.1	粉体工业静电危害	253
6.2	粉体料仓静电防护措施	257
6.3	国内外粉体静电学新进展	272
6.4	粉尘防爆措施	276
第7章	电子工业静电	282
7.1	集成电路生产中的静电危害及防护措施	282
7.2	静电噪声及防治措施	291
7.3	电子计算机的静电危害及防护措施	299
7.4	家用电器的静电危害及防护措施	302
第8章	航空航天工业静电	307
8.1	飞机起电机理	308
8.2	飞机的起电电流	311
8.3	飞机燃油系统的静电	314
8.4	飞机静电失火爆炸原因分析	328
8.5	飞机静电的危害及预防措施	340
8.6	航天工业中的静电危害及防护措施	347
第9章	人体静电	356
9.1	人体的充电与放电	356
9.2	人体静电的测量	360
9.3	人体静电危害	364

9.4 人体静电防护措施	368
第 10 章 其他行业的特殊静电	374
10.1 纺织工业中的静电	374
10.2 塑料、橡胶工业中的静电	384
10.3 印刷、造纸工业中的静电	391
10.4 黑色火药工业中的静电	393

第二篇 工业雷电防护

第 11 章 雷暴与闪电	400
11.1 雷云与雷暴	400
11.2 雷暴	402
11.3 雷暴云电荷结构	404
11.4 雷云的起电机理	406
11.5 闪电及其分类	407
11.6 雷云对地放电	413
11.7 地闪	414
11.8 大气电场的放电过程	424
11.9 云闪	428
第 12 章 雷电灾害对我国的影响	431
12.1 我国雷电活动及分布规律	431
12.2 我国雷电灾害分布特征	432
12.3 雷电灾害对我国工业的影响	438
第 13 章 雷电统计特性与物理效应	447
13.1 常用雷电参数	447
13.2 雷击的选择性	450
13.3 雷击大地的闪电密度	451
13.4 雷电的能量	452
13.5 雷电的物理效应	452
13.6 雷电流产生的几种不同感应效应	456

13.7	雷电对人体的伤害及伤害途径	458
第14章	现代防雷技术	461
14.1	防雷保护目的	461
14.2	防雷基本原则	462
14.3	防雷基本措施	463
14.4	建筑物防雷分区	466
14.5	建筑物防雷分级	468
14.6	计算机场地安全分类	476
14.7	建筑物防雷常用保护元件	477
第15章	典型工业设施雷电防护方法	482
15.1	油气管线雷电防护	482
15.2	储油罐雷电防护	488
15.3	输电线路雷电防护	498
15.4	变电站、配电所雷电防护	503
15.5	仪表雷电防护	510
15.6	通信、监控站雷电防护	517
15.7	钻井平台雷电防护	531
15.8	油气田雷电防护	536
15.9	油气运输车、船雷电防护	537
15.10	电子系统雷电防护	539
第16章	接地与接地电阻的测量	547
16.1	接地的概述	547
16.2	接地的分类及方法	550
16.3	工频接地电阻	555
16.4	冲击接地电阻	566
16.5	接地极附近的地表电位分布	571
16.6	接地网的地表电位分布	577
16.7	接地材质的相关规定	584
16.8	接地电阻的概述	586

16.9	接地电阻的测量方法	587
16.10	常用接地产品	592
第 17 章	土壤电阻率	598
17.1	土壤和水的电阻率参考值	598
17.2	影响土壤电阻率的因素	600
17.3	人工改善土壤电阻率的方法	604
17.4	土壤电阻率的测量方法	606
17.5	分层土壤电阻率在线监测系统与数据分析	609
第 18 章	雷电防护相关法规与标准	622
18.1	防雷标准的制定与应用	622
18.2	国内外防雷标准(部分)	626
参考文献		631

第一篇 工业静电防护

第 1 章 工业静电基础理论

1.1 静电现象及其基础理论

1.1.1 静电现象及物质带电

大约在 2500 年前，希腊人塔利斯就发现了琥珀被毛皮摩擦后具有能够吸引羽毛、头发等轻小物体的能力。后来发现，摩擦后能吸引轻小物体的现象并不是琥珀所特有的，像玻璃棒、火漆棒、硬橡胶棒、硫黄块或水晶块等，用毛皮或丝绸摩擦后，也都能吸引轻小物体。这种物理现象是静电基本现象之一。物体有了这种吸引轻小物体的性质，就说它带了电或说带有了电荷。把带电的物体称为带电体。把这个使物体带电的过程称为起电。上述的用摩擦方法使物体带电称为摩擦起电。使物体带电的方式可以说是多种多样的，而就摩擦起电来说也不局限于固体之间。细致地观察摩擦过程，其实质上是使两个物体发生接触位置的移动和电荷的分离。一些液体例如汽油在金属管道中的流动也会发生带电现象。液体的流动可以看成它与金属管壁的接触、分离又接触的接触位置的移动。当液体类物质与固体类物质接触时，在其接触的界面上形成了一个整体为中性的偶电层。当液体流动时，广义地说就是这两相物质作相对运动时，偶电层被分离，电中性受到破坏而出现了带电现象。固体与液体之间的这种摩擦起电，在工业静电中称为冲流起电或流

动起电。其他起电方式还可举出很多，在以后各章中将结合不同工业过程分别加以叙述。

1.1.2 物质的电结构与其导电、带电机理

起电现象，归根结底是与物质的分子结构有关。

物质是由分子、原子组成的，而原子又由带正电的原子核和带负电的电子组成。原子核中有质子和中子，中子不带电，质子带正电。一个电子所带的负电量与一个质子所带的正电量相等。正是物质内部固有地存在着的电子和质子这两类基本电荷才是物质带电过程的内在依据。由于在正常情况下，物体中任何一部分所包含的电子的总数和质子的总数是相等的，所以对外界不表现出电性。但是，如果在一定的外因作用下（例如摩擦），物体或物体中的某一部分得到或失去一定数量的电子，使得电子总数与质子总数不再相等，物体便显示了电性。以两个固体为例，通过摩擦，一个物体中有一些电子脱离原子核的束缚而跑到另一个物体上去，由于物体材料不同，一个物体失去了电子而显正电，另一个物体得到了电子而显负电。从而表明，物体带电的基础在于电子的转移。

根据物体得失电子的难易程度，可将物体分为导体和绝缘体。例如，金属就是良好的导体，金属原子的最外层电子容易脱离原子核的束缚，并可以在整个体内自由运动，称为自由电子。电解液也是导体，在其中发生电荷传导的不是电子，而是溶解在溶液中的酸、碱、盐等溶质分子离解成的正、负离子，这种正负离子称为自由电荷。电离的气体也是导体，起传导作用的自由电荷也是正、负离子，但负离子往往是电子。对于几乎不能传导电荷的物体称为绝缘体，电荷几乎只能停留在产生的地方，例如玻璃、橡胶、琥珀、瓷器、油类、未电离的气体等。在绝缘体中，绝大部分电荷都只能在一个原子或分子的范围作微小的位移，这种电荷称做束缚电荷。

这里要着重说明的是绝缘液体或气体，也包括粉尘，它们

在各种不同条件的作用下带电以后，虽然电荷在其内部不能移动，但液体、气体本身可以流动、扩散，粉尘也可以在管道内输送或在空间扩散。因此电荷也可以随之转移到其他地方，有时也可能带到危险场所，如带电荷的汽油被输送到油罐车，那么电荷也就带进油罐，成为一个可能造成灾害的危险源。这是工业静电中研究的重要课题之一。因为绝缘体带电后电荷难以泄漏，即使与大地用导体连接，电荷也不会像导体那样瞬间转移到大地上。这也是静电防灾问题中需要研究的问题之一。

1.1.3 静电场及其主要物理量

1. 静电荷及其电场

相对于观察者为静止的电荷即是静电荷。这种静电荷在其周围空间形成激发的、不随时间变化的电场称为静电场。静电场是电磁场的一种特殊情况。场是物质的一种形态。凡是有电荷的地方都在其周围空间激发电场。电场的基本性质是，对于处在其中的任何其他电荷都有作用力——电场力。电荷之间是通过各自的场相互作用的。静电场的对外表现主要有两点：

(1) 引入电场的任何带电体，都受到电场的作用力；

(2) 当带电体在电场中移动时，电场作用力对带电体做功，这表明电场具有能量。

2. 电场强度及高斯定理

为了定量描述静电场的性质，可以引入一个电量足够小、几何尺寸足够小的点电荷，它本身的电场对原来电场不至发生明显的影响。试验表明，这个点电荷 q_0 所受的力 F 与 q_0 成正比，即

$$E = \frac{F}{q_0}$$

我们就把二者的比值 E 定义为该电场在 q_0 位置处的电场强度，简称场强。把 q_0 放入电场不同地点时， q_0 所受力的大小和方向逐点不同。因此可以用场强描述电场的性质。

场强是矢量，它的方向定义为当试验电荷为正电荷时所受

力的方向。

由若干个点电荷所产生的电场在某一点的总场强，等于各个点电荷在这点各自产生的场强的矢量和。这就是场强叠加原理。利用该原理，可以计算任意带电体所产生的场强，因为任何带电体都可以看做是许多点电荷的集合。

通常可以利用假定的电力线形象地描绘电场中各点电场强的大小和方向，并规定电力线切线方向与该点的场强方向一致，以电力线的疏密程度表示场强的大小，即规定在任一点通过垂直于 E 的单位面积的电力线数目等于该点 E 的量值。图 1-1 给出了几种常见的电场电力线图。

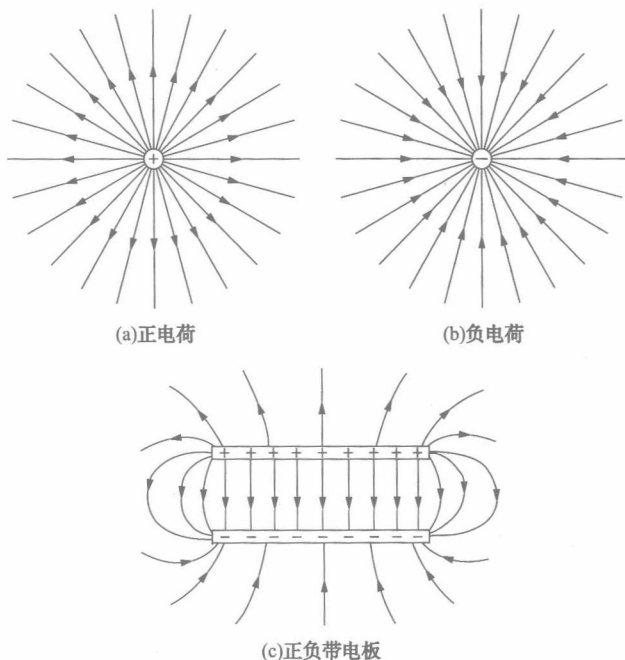


图 1-1 几种常见电场的电力线图

电场中通过某一给定面积的电力线总数称为电通量，用 ϕ 表示。

根据上述对电力线画法的规定可以找出场强与电通量的关系。

(1) 均匀电场且平面 S 与场强垂直时:

由于平面 S 上各处场强均等于 E , 所以

$$\phi = E \cdot S$$

(2) 均匀电场但平面 S 的法线与 E 有夹角 θ 时:

按规定作出与 E 相垂直的投影平面 S_n , 即 $S_n = S \cos \theta$, 则

$$\phi = S_n E = E S \cos \theta$$

(3) 不均匀电场且 S 为任意曲面时:

将 S 分解成无穷多个无限小的面积 ds , 它可看做为平面, 且其法线 n 与其上的场强 E 夹角为 θ , 则

$$d\phi = E \cos \theta ds$$

那么通过曲面 S 的电通量 ϕ 为:

$$\phi = \int d\phi = \int E \cos \theta ds$$

若 S 为封闭曲面则表示为:

$$\phi = \oint E \cos \theta ds$$

这里需要指出, 电通量 ϕ 可正可负。若 θ 是锐角, 则 ϕ 为正; 若 θ 为钝角, 则 ϕ 为负。

下面讨论通过任一封闭曲面的电通量与这封闭曲面内所包围电荷量的关系。经过推导和验证得出: 在真空中的静电场中, 通过任一封闭曲面的电通量等于该封闭曲面所包围的电荷的代数和除以 ε_0 (真空介电常数)。这个结论称为真空中静电场的高斯定理。用公式表示即为:

$$\phi = \oint_s E \cos \theta ds = \frac{\sum_i q_i}{\varepsilon_0} \quad (1-1)$$

通过高斯定理可对静电场有进一步的了解。当 q 为正电荷时, $\phi > 0$, 表示有电力线从 q 发出, 穿出封闭曲面, 所以正电

荷 q 称为静电场的源头。当 q 为负电荷时, $\phi < 0$, 表示电力线穿进封闭曲面而终止于 q , 所以负电荷 q 称为场的尾闾。这说明静电场是有源场。

如果用带电体的体电荷密度 ρ 来表示电量 q , 则高斯定理可表示为:

$$\oint_s E \cos \theta ds = \frac{\int_v \rho dv}{\epsilon_0} \quad (1-2)$$

它的微分形式是:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1-3)$$

应用高斯定理可以方便地计算几何形状对称的带电体周围或内部的电场强度。

3. 电位及静电场基本方程

在静电场中, 电荷在静电力推动下移动, 电场就对电荷做功。这与重力场中重力对重物做功相类似。为描述静电场这方面的性质, 可以类比重力场引入静电位能及电位的概念。位能是一个相对量。为了说明电荷在电场中某一点位能的大小, 必须有一个零位的参考点, 通常在电荷分布于有限区域内时, 规定电荷 q_0 在无限远处的静电位能为零, 即令 $W_\infty = 0$, 从而可以明确电荷 q_0 在电场中某一点 A 处的电位能, 在量值上等于 q_0 从 A 点移至无限远处电场力所做的功 $A_{a\infty}$ 。依据功与力的关系, $A_{a\infty}$ 可表示为:

$$A_{a\infty} = W_a = q_0 \int_a^\infty \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1-4)$$

由此可知, 若电荷 q_0 从 A 点移动到 B 点, 电场力所做的功 A_{ab} 为:

$$A_{ab} = W_a - W_b = q_0 \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1-5)$$

式(1-5)表明, 电荷在任何静电场中移动时, 电场力所做