

静电译丛

第一辑

上海物理学会静电专业委员会

一九八三年二月

静电译丛

目 录

序言		
第四届国际静电会议序言.....	许德荣编	2
可燃液体的带电及其事故预防措施.....	沈怡常编	11
聚乙 电荷散射模型.....	范莘耕译	21
西尔沙加 空间中电荷有限电流与热驻极状态 的研究.....	孙可平译	30
计算机模拟确定在载油仓灌注过程中静电引 燃的危险性.....	俞大忠译	44
刷形放电点火功率——临界电荷密度的试验	沈三立译	62
固体的带电机构.....	徐时杰译	70
装有高度绝缘液体的运输油轮在高装载时所 造成的静电危害：为达到最小危害对流 速的限定.....	李云生译	83
高效驻极体空气过滤器.....	陈 留译	96
抗静电剂及其使用.....	浦长高译	107
在“聚合板——变压器油”绝缘系统中试验 静电起电现象.....	黄赛清译	121
易燃场合服装静电特性的测定.....	王经编译	125
气—固态管中流动的粒子的静电起电.....	洪国雄译	133
绝缘液体中传导电流和空间电荷的形成.....	刘争炯译	138
投稿须知.....		142

序 言

随着工业生产的发展，静电已经与工业、交通运输以及人们的日常生活发生了越来越密切的联系。静电可以给工业生产、人身安全带来极大的危害，但是只要利用恰当，它又可以大大地造福于人类。我们对静电研究的目的在于分析静电的起因和造成危害的条件，然后提出防范的措施和消除的方法，并根据静电的一些特点而在工业中加以利用。

国外对于静电的研究已有相当长的历史，运用电动力学和固体能带理论，对于静电的起因进行了广泛的探讨。但是，由于静电事故的猝发性、静电放电的易燃、易爆等特点，现场的直接测量是相当困难的，因此不得不借助于模拟技术。为了介绍国外静电研究的情况、国外的现场测试技术和模拟技术，防止静电事故的安全规范以及静电应用的新技术、新工艺，我们组织出版了《静电译丛》，本期译丛我们从英、俄、日、法等文种的静电资料中选了十篇，内容有静电起电机理、计算机模拟技术、防燃、防爆的操作规范等等。

由于时间仓促，此次未能征求各方面的意见。以后我们将根据各方面的要求，尽早、尽快地编译各国静电研究动态、各学派的理论专著，静电检测技术、静电危害的防范与消除、静电应用技术等等，也可针对国内实际要求编译各种特集或专集。以便能使《译丛》成为了解世界各国静电研究的一个窗口，使我国的科技工作者和劳动防护部门能够博采百家之长，为我所用。

本期所选译文，均系译者在业余时间加班加点完成的，又加上未能仔细予以校正，因而在选材方面、技术方面以及翻译技巧方面肯定有不少不妥之处。我们恳请广大读者不吝指教，以便把《静电译丛》办得更好。

上海物理学会静电专业委员会

第四届国际静电学会议序言

于荷兰海牙5月6日至8日1984年

A. Klinkenberg 克林肯伯

在接受邀请为第四届国际静电学会议作序，这对我来说是一个冒险的承担。诚然，这个学科是和很多科学领域都有有关的基础，并在很多技术部门都得到应用——但不要忘记这种气氛——一个人可以从别人的观点得到教益，特别是从他们的错误观点获得。

1. 会议名称具有什么意义？

首先我很乐意地考虑会议所用的名称“静电学”的意义。有的人怀疑用这个名称会不会像对玫瑰花改用别的名称仍然还是香的呢？

(1) 这个说法涉及两个爱好者对名称的看法。虽然玫瑰花和静电都同样具有刺（后者在50mJ范围内〔3〕），但不管怎样，用技术语言来说，我们必需争取能够最大限度地提供这个学科的信息和性质。

有时“静电学”也称为“摩擦起电学”，这个古老名称是从摩擦两种不同固体起电得来的。但这个名称要避免用它，因为摩擦起电实质上是两个物体相互接触并相对运动的结果。由于这种共同的原因，在流体中也有类似的现象，这在以后还会谈及。

有的论文作者强调和静电学的密切科学本质的联系而用这个标题“在石油工业中的静电学”，如一本书所用的那样〔2〕。在这次会议上我们也乐意地抱有同样的意图。当然，这个名称不可能包括所有有关领域，但它已包括有关的基础领域在内。物理学会就是用这个名称“静电学”作为这次会议的名称的。

这个名称的字根“静力学”，表明我们是从事静力平衡状态的研究，事实上，我们是在研究静止不动的状态，（即当 $\frac{\partial \dots}{\partial t} = 0$ ）

当没有瞬变的过程存在时。

电荷的产生和消失过程绝不能说是“静力平衡”，（但我要解释这个常用的表达词“产生”只不过是说明两种相反极性的电荷的分离过程而已），这就引出这样一个问题：“静电学”的正确含意是什么？

2. 基础理论: 麦克斯韦方程组 (Maxwell's equations) 最基本的电学理论是用麦克斯韦方程组表达的。用现代数学符号和国际有理化单位 (SI) 这些方程组可写成:

$$\operatorname{div} D = \rho \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} H = \dot{D} + J \quad (2)$$

$$\operatorname{div} B = 0 \quad (3)$$

$$\operatorname{rot} E = -\dot{B} \quad (4)$$

式中 E = 电场强度 (V/m); H = 磁场强度 (A/m);
 D = 位移矢量 (AS/m^2); B = 磁通量密度 (VS/m^2);
 ρ = 电荷体密度 (AS/m^3); J = 电流密度 (A/m^2).

对天然的介质 (设为各向同性的), 由现象学方程组表达:

$$J = KE \quad (5)$$

$$D = \epsilon \epsilon_0 E \quad (6)$$

$$B = \mu \mu_0 H \quad (7)$$

其中 K = 电导率 (A/Vm); ϵ = 相对介电常数

ϵ_0 = 自由空间的介电常数 ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} AS/Vm$)

μ = 相对磁导率, μ_0 = 自由空间的磁导率 ($\mu_0 = 1.256 \times 10^{-6} VS/A^2m$)

我们可以消去伏特 V 而用 $1 VAS = 1 kg \cdot m^2 / S^2$ 来代换, 但从理论和单位的结构来说, 不代换会更清楚些。

在方程 (2) 中是两项之和, 位移电流和传导电流。两者都与 E 有关 (由方程 (5) 和 (6) 可知), 由此得

$$\operatorname{rot} H = \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + KE \quad (8)$$

现在 E 的比率 $\frac{\partial E}{\partial t}$, 决定相对速率的变化, 对一个按指数律

变化过程, 电荷的衰减与时间常数 τ 有以下关系:

$$\tau = \frac{\epsilon \epsilon_0}{K}$$

(9)

如果 τ 比其它过程的时间为小时，我们得到极限情况，电动力学过程。如果比其它过程的时间大时，则可得到近似情况，“纯”静电学过程。

在这里还应指出，如果对方程(2)用微分法求出常用的连续性方程，那末，梯形的旋度就消失了。

3. 时间常数 τ

虽然化学工程师有时对静电学也进行了重点的了解和谈论，但对过程的衰减时间还必需加以注意。

在热量的传导和扩散过程中，瞬变过程的时间是和传递的持续时间的平方成比例的。如果你在煮一只鸵鸟蛋时，也必需记住这一点。

在静电学中，虽然时间是与容器的大小无关的，但有效的电位差是和容器的大小的平方成比例的，因为

$$\rho = \text{div} D = -\epsilon \epsilon_0 \text{div grad } V \quad (10)$$

也就是电位的二阶导数是一个常量。

4. 电荷和电位

与上述有所不同，在热量扩散和传导时，密度的迁移和驱动力是借助于浓度或者用热容量和温度的线性关系来表示的。

与此相反， ρ 与 V 的关系，方程(10)，是完全不同的。

例如，它可以是高电荷在零电位处，或者是无电荷在高电位处。

这一点在与外界的人讨论时，他们可能不知道，是静电中的电荷或者是电位使他们感到有危险。

作为上述情况的一个实际应用：建议用一大油桶，把它分隔成很多间，降低它的电位而不减少它的电荷，就可以感觉到这一点。

5. 麦克斯韦方程组的应用

虽然我们所需要的都包括在麦克斯韦方程组内，但在实际应用它时，还会遇到很多困难，这就要依靠研究者的技巧，找出最简明的方式和最合适的数学技术来表达。

我想简要地列举这些出现的困难和利用这些结果来联系一些实际观察的现象。

这就会使述评更加生动，但必然存在一些不完整的观点在这些已经做过的大量工作中。

(a) 电荷的初始数据

初始数据可以从空间电荷的分布获得。

真空空间：解释很多场强的测量

完全填满空间：在可放宽的桶中

空间电荷在电荷云中的测量（参阅 [16]）

部分填满空间：在部分填满的油桶的电场中；在储电瓶周围；在球形电荷云周围。参阅 Schon 和 Kramer [4]

起始点可以是引入的电流。

如果这电流是随着碳化氢液体注入，则必须在入口处测量。

如果这电流是由喷射导电液体注入的，则必需注意这个合成的电场可能由于感应作用，降低甚至停止流入电流。这种效应在 Vos [5] 文中有叙述“用海水清洗时的模拟油轮的实验”。

(b) 持续时间的独立变量数目

形状只有一个参量的，如球体，无限长圆柱体（内部，中间或外部）和平行板，常用它的第一次近似值求出。

但不能忽视它的突出部分，否则将引起火花放电。

在一些研究场合，米尺的应用常会引起测量电场时的畸变（加强），内部的不慎如在桶内插入东西，同样会引起电场的增加。电场测量表有时也设计表示插入物体时的增强量（辐射场测量表，(2) P123. 应用和举例 Smit [6] 在蒸汽云中。）

(c) “常数”的可变性

在现象的方程组 (5) — (7) 中，常数是随着地点和时间而变化的。

在装油入油桶的过程中，在分界面处，介电常数和电导率是不连续的，这些地方的不连续性由装入的时间来决定。

对不良导体的充电过程，如精细的碳化氢，电荷的进入和取出

数目，必需不少于平衡时的数目。电荷的衰减并不遵从指数规律，也就是没有一定的衰减时间。另外，在充电和放电后，电导率也需要一定时间才能恢复。〔7—9〕

这些情况在设计测量电导率的装置中，必须记在心中〔9—11〕如果你想等到电流恒定不变时再测量，那末，你就违反了测量的神圣原则，测量的时候不能不适当地妨碍当时的实际情况。

还有一个情况，电晕会引起导电，一个极端情况是导电的管道受火花的冲击。

(d) 边界条件

要求细心地思考，方程(1) $\text{div} D = \rho$ 表明电力线是从正电荷发出和止于负电荷的。

应用这个方程于无限薄片的分界面周围时，则有

$$D_{n1} - D_{n2} = \delta_{12}$$

式中 D_{n1} 和 D_{n2} 是 D 在两边的法向分量， δ_{12} 是电荷面密度。

如果这个表面原来没有电，电荷会聚集在它上面。这个过程可能进行很迅速（如带电流体进入金属容器 $D_{n2} = 0$ ）；也可能是缓慢的（带电流体与空气对冲）

如果容器没有迅速地接地，那是很危险的。简单的计算表明，容器对地的电容为 300PF，电流为 1 μ A 时，电压会升高到 3300V/S，电荷衰减的时间不包括在内。陆上的油桶和飞机在装油之前必需先接好地线。

(d1) 法拉第笼子 (Faraday's cage)

方程(1)的结果就是一个法拉第笼子。这个原理不能错误地解释为“在导电盒子内没有电荷存在”，而应当说“在导电盒子内没有净电荷”（这样才能计算容器内表面和容器的电荷量）

因此，在 Richter〔12〕文中，认为石油在油桶里没有危险，但是 Dolozalek〔13〕则指出石油（或苯）还保留它的“电荷容量”，并且说，是水减少它的充电量。

再有在 1955 年 d'Este〔14〕，建议仔细地把接地线焊好。

当时 *Klinkenberg* (15) 曾考虑这个必要性但不必充分地去考察液体的空间电荷，而是把充油的油桶沉入水中去考察。

(B2) 时间效应

在考虑方程组的边界条件时，我们必须记住液体的表面电荷的聚积，需要一定的时间，而且表面可能受到原有电力的作用而变形（在液体表面的尖端处，煤气泡等等）

6. 感应带电

感应带电很容易被忽视，而且它很难捉摸地把电荷感应在不想要的地方。让我们举些例子。

(a) 电荷由于电场的变化而逸走

在一个种植房内，用六只浮动的油桶作屋架，当邻近的天线被雷电击中时，同时着了火（火出现在浮动屋架的边缘）。在电场突然变化时，需要一个感应电荷的突然变化，但是浮动的接地油桶不能满足这一要求。

(b) 当带电体离开电场时电荷逸走

在 *Wm. Thomson's (Lord Kelvin)* 文中提到，当水滴受到强电场作用时分裂出自由电荷，它在几种情况下产生：

(b1) 当水箱与地绝缘，这就要求有高电位的电场（用电位补偿器，静电研究 *Schuringa et al. (16)*）

(b2) 当水箱接地，而接受水的容器与地绝缘。一个高电位放置在水滴析出的周围金属环上，这时接受容器带电。

(b3) 如 (b2) 的两个容器，由接受容器和交叉金属环组成一个自激起电装置。我曾从 *Sheu's Amsterdam* 实验室的 *Mr. Douloes* 处看到这种玩具。他并不知道 *Wm Thomson's* 的研究工作，与这情况相同的工作者，认为抗静电剂能解决这种伤害。我不能抑制地惊奇自来水可以起电到几千伏特。这使我更认识 *Wimshurst* 装置的原理。它指出应该仔细考虑才不会让静电逸走（如阴极保护电流和杂散电流）

可以用人代替水滴：一个人站在绝缘台上，暴露在电场中（如在喷棘蒸汽旁），慢慢与地面接触，但如果走出电场外面那是危险。

的。

感应效应在很多方面的研究都必需加以考虑，如雷电的云，对超级油轮在洗舱时由于旋转的喷汽流所引起的火花。让我举一个例证：由喷嘴射出的水所产生的电场，是不会强到产生危险的火花（最大的电位30—40KV），但是当一根50cm长的管从喷汽口折断时（这种情况很容易发生，因为舱里有很多障碍物）将在各处引起火花。如在Van de Weerd(17)文中所述，他测量出能量为1—1.7mJ

7. 摩擦和流体的充电

我只能简要地介绍一个重要事实，它在水力学和理论化学中常遇到。

一个类似的情况是压出的水滴和电流都是和层流的速度成一次方的比例，而近似地和湍流的二次方成比例。

一个著名的经验公式由Schon(18)找出电流和伴随在管道内的湍流的关系， $i = Cv^2 d^2$ 。为了解释充电现象Schon(19)引入充电电流密度，由于这个量与V无关，所以在层流层漫射的电流的速率受到限制(20)，实验和理论研究由Gavis和Koszman(21)继续进行，而对综合的Helmholtz和Gouy层流理论则由Klinkenberg在尝试(22)。这些研究只能得出一般的趋向而不能得出定量的关系，因为理论化学对电荷在低电介常数的流体中的性质还不能作出贡献。理论化学家的担忧在Parsons(23)文中谈及。

作为一个例证，我要提到有关Shell的抗静电剂(Shell ASA-3)，附带说一下，这也是Gavis和Koszman对电解的研究工作。这个抗静电剂包含有铬盐作为一种激活成份和其它两种成份组成，由于这些成份的渗入，使电导率增加10倍并使它稳定。对于铬盐和组成物，Van Os Vos和Strawson(24)报导，电导率和浓度严格地成 $2\frac{1}{2}$ 数量级的比例。由二个不同的论证得到离子的半径为6nm，但不能假设离子能很强烈地溶解于溶剂中如七价元素那样，由此可知这个离子包含几千个分子在内如所测的

胶束分子团。

根据 Gemant (25) 所说电导率和浓度的直接比例关系，提出二个不带电粒子一次产生二个电荷，这可能是交换一个正电荷或负电荷（参阅 (8)）。有理由相信反应时产生的热量是很轻微的。由此得出这一事实，即电导率只是由于内摩擦时的温度而变化的。

应该指出起电和摩擦的相类似是很重要的。Strawson 和 Johnson (26) 在研究装入油罐车的油时，观察到起电量是和管道内的流量准确地成二次方的关系，而近似地和流入张力器的流量成一次方关系。同时，他们观察到所有夹具都增加流动阻力（弯管压缩器，张力器），增加电流。只有一个半封闭的张力器是违反这一情况的。

为了使叙述更能容易理解，我也负责说明为什么它还有很多困难问题没有解决。

让我在叙述各项感兴趣的内容之后——结尾提出一个著名的引起争论的问题，这问题得出极不平常的结果。

8. 关于发光导体的争论问题

Franklin 发明了发光棒将应用到王官，国王 George 三世对这件事很感兴趣，问产生在这些发光点要多么尖锐或者钝铊。

对于小范围的应用（如电晕的放电），发光点必需很尖锐，但对大范围的应用（照明），放电必需在各个方向都有，这样争论就不存在了。当然还有这个导体必需不会熔化。

国王对钝铊导体很赞同，他的对手包括 Pringle 王国的总理，相信他后来签署是不大愿意的。

由 Green (27) 提供的这一消息，我也来对它写一首有争论的诗：

当你，伟大的 George 国王，只懂得打猎。

把尖锐的导体换成钝铊。

国家变成不团结

Franklin 一个智慧者追随着进行

但所有你的雷声都是无用的见解

还是保持在点上吧。

对于即将到来到的会议，我只能说这么一点点，在“会议的名称具有什么意义”一节里，我建议用“静电学”作为一个科学研究的名称。为了实现这一研究工作，演讲者和讨论者都必须像Benjamin Franklin所说的，保持在这一点上。

许锡祺 译自

Journal of electrostatics

11(1982) 299-307

可燃性液体的带电及其事故预防措施

上海劳动保护科学研究所 沈伯常译

一、前言

可燃性液体多为电阻率高的有机液体。谈到它们的带电问题，很容易与灾害事故联系起来，其原因有二，一是带电后的放电，往往成为火灾和爆炸的点火源，二是人若处在放电电路中，就有遭到电击的危险。

然而，静电事故的发生，必须具备下列条件：由于某种原因产生带电现象，电荷还要能在某一段时间内在特定的地方积蓄起来，然后能以某种形式放电，且放电能量要大于最小点火能量；除此之外，在放电的空间里，还必须要有浓度在爆炸极限范围内的混合气体。因此，要防止静电事故，只需完全消除上述条件中的任何一条。为达此目的，往往从两个方面来做工作：在设计和建造时，要使每个操作环节中避免上述条件的形成；使用可燃液体的单位或运输部门，在操作中要防止上述条件的出现。

对于以前的爆炸事故，可以推定有些是由于静电放电所造成的。但是，静电事故与其它火源引起的事故相比，有它的特殊性，即在静电放出具有一点火能量的火花之前，是难以察觉到它的危险性的，而且在事故发生后也无法根据其痕迹来确认是否由静电所造成。因此，为了避免发生静电事故，必须事先知道各操作岗位上能产生的各种静电现象，并采取必要的防范措施。然而，产生静电的条件是多种多样的，这给我们的工作带来了困难。现在在一定的条件下虽有一些防止静电事故的有效办法。但遗憾的是，还不能事先确切地，即从定量上予以预测。不过，确有许多研究人员正在从事这方面的研究，不久的将来，有关静电事故的研究部门还会不断增加。目前，虽然只有一些定性预防措施，但只要我们做好工作，还是能够有效地防止静电事故的。重要的是从事现场操作的人员，自己要掌握有关静电和防止静电事故的知识。

下面就可燃性液体的带电和防止静电事故的措施作些简单地叙述，

仅供参考。

三 关于带电现象

在使用可燃性液体的场合，具有危险性的带电现象，较多的是由于液体的流动而产生的。这种能产生流动带电的液体，多为电阻率高的有机液体。例如石油行业中的轻质油。

与这种流动带电有关的带电现象，有水珠在石油之类的液体中沉降时使这种液体带电的沉降带电。在用海绵体吸取废油，然后再把油挤出时的带电现象，亦属此类型。

另外还要注意，当有机液体从容器顶部注入时，往往形成雾状的液粒。该液粒会带电并悬浮在空中。在液面上的气泡破裂时，也有类似的液滴带电现象。

4. 输送中的液体的流动带电

电阻率高的可燃性液体（电阻率大约在 $10^{12} \Omega \cdot m$ 以上），在输送的时候，由于液体在管内流动与管壁摩擦而带电，并带着电荷被送入贮槽等容器内。由于塑料管和橡胶管的大量使用，这种流动带电更具有危险性。在金属管中流动的有机液体的带电量，远比在塑料管和橡胶管中要小。有人曾用煤油作过实验，用氯乙烯管时的带电量为用铁管时的100倍。

有机液体在输送管中流动时的带电问题，除了与管子的材质有关系外，还与液体的流速有关。通过各种各样的实验证明，液体的带电量，随着流速的增加可以指数函数的形式增加。因此，限制流速也是防止静电事故的办法之一。

通常，液体的输送是用泵来完成的。输送管道若为铁管时，在管道中的带电量是很小的。液体所带电量的大部分，应该看作是在泵以及流程中的过滤器、流量计、阀门等部位生成的。只是目前尚无法定量计算在这些部位所产生的电荷量，也无法寻到一个定量的预防措施。尽管如此，在这些部位确有大量的带电现象，因此，必须考虑预防的措施。

泵通常位于输出方的贮槽附近。如果输送管道采用铁管，那么从泵中出来的带了电荷的油，要经过较长的接地铁管才能到达接受

容器，此处的铁管就成了带电液体向大地放电的电路。其放电程度大体可根据后面所讲的那种液体的半衰期 (Half value time) 和从泵流到接受容器的停留时间作出估计。

过滤器也像泵那样使液体大量带电，亦不可忽视。曾有过这样的报导，过滤器出口处的带电量为入口处带电量的100倍以上。和泵一样，要根据防止事故的要求来考虑过滤器的安装位置。

对于石油液体，如果油中混有水份，带电量就会增加。油输送时静电所造成的爆炸事故，多数是在输送作业开始阶段发生的，其原因就在于此，这是因为清洗管道的水一直残留在管道的滞留处，在下次输油作业的初期混入油中致使油的带电量急剧增加。Klin kenberg曾作过这样的实验，在汽油中加入6%的水，并让其流过实验槽，此时，槽内的电场从5 KV/m上升到100 KV/m。基于这种原因，美国石油学会 (A. P. I) 建议含水量较高的石油类，用泵输送时的流速应控制在3 f/s以内。另外也有实验表明：电阻率相当低的油类，即使油中的水份增高，电荷发生量增加，但油槽内油面电位却没有大的变化。

关于它们的带电机理，通常认为是由于双电子层的外力分离使高电阻率的物质带电。但是，目前尚未得到证实，是物理学中一个还没有解决的课题。虽然有人发表了关于带电量的理论计算式，但还不能实用于防止静电事故的措施。或者说，由于实际情况很复杂，有很多条件交织在一起，要用简化条件所得出的实用计算式来算出带电量，那是极困难的。

2 水份沉降所引起的带电

如上所述，石油类液体一旦混有水份，随着流动会增加其带电量。同样，油槽内水珠沉降时，也会使油等产生带电现象。此时，尽管由各小水珠所产生的电荷量很微小，但是，把无数多的小水珠所产生的电荷量合起来，作为整体来看，那就不可忽视了。总之，石油等液体中混有水份之后，随着流动其带电量就会上升，同时带来使油槽内电荷的缓和时间延长的不良后果。

3 由海绵体中挤出时的带电

在使用高温速率液体的场所，当将残留在油槽或容器底部的液体吸入海绵状物质内，再将其挤出时，挤出液往往会产生危险的带电现象。

挤压和过滤的程序是不同的，但液体的带电现象却是一致的，带电的多少同样也是能够予料的。实验的结果表明，只要把吸入海绵体的汽油一次挤压到集油用的封闭罐内（对地电容164PF），罐上就有0.4毫焦以上的静电能量积蓄。这能量显然超过了石油气的最小点火能量（0.2毫焦）。因此，必须考虑到重复进行这种挤压作业的危险性。

另外，在从事这种作业时，如果操作者处在绝缘状态下，每挤压一次，人体电位可高达2000V。通常认为，当人体带电为1000V时，其放电能量就可以达到最小点火能量（人体的静电容量约为300PF）。因此，这种情况下也是非常危险的。

总之，从静电的角度来看，这种简单而容易的挤压作业，也是极其危险的。然而，经常装卸油的内航油轮等，常常会有这种挤压作业。而且，由于近来使用了绝缘性极高的涂料，使这种作业更增加了上述的危险性。因此，必须加以注意。

4. 液体喷出时的带电

众所周知，当蒸汽喷出时，会产生很强的带电现象。此时，蒸汽中的水粒带着电荷，而且随着蒸汽分压的增加，带电量也增加。

同样，如果使液体喷出，喷出液分裂成的雾粒就会带上电。在往贮槽内注入液体时，如果注入口在贮槽的顶部，这种喷出带电再加上流动带电，带了更多电荷的液体就注入贮槽内，那是非常危险的。当然，如果喷出带电的极性和流动带电相反，对安全则是有利的。但是，谁也无法保证它们的极性相反，所以，还是应该避免从事产生喷出带电的作业。在往油槽、油车、油轮等注入油时，最好不要在其顶部开口，应该用落管引至容器底部注入，而且实验证明，落管端部做成45度切口的形状，所产生的电荷比其他的形状要小，液面的电位也低。

5. 液面上的气泡破裂引起的液粒带电

如果注入贮槽的油中有气泡，那么，这些气泡在油中上升并在液面破裂时，飞溅出的微粒会带有电荷。对于油贮槽而言，这是常见的现象。但是，当液体中有大量的气泡存在时，这种带电现象就不能忽视了，因为油粒产生大量的电荷，并能把此电荷转移给油槽壁或其它金属结构物，这就有可能在气泡层和油槽壁之间发生火花放电。

这种带电现象亦多发生在将油从顶部喷射到液面时。从这一点来看，也应该避免采用从贮槽顶部落下注入的方式。

6. 带电液体的感应所产生的带电

如果在带电液面上有处于绝缘状态的导体，那么，这个导体会因静电感应而呈带电状态。这对防止事故来说，也是一个非常重要的现象。感应所生成的电荷量是由液体中的电荷总量所决定的。即使液体本身电荷密度不大，几乎没有什么危险，但是，由于液体所带的总电量，感应所产生的电荷量却能呈现非常危险的状态。因为这种绝缘导体一旦和容器壁或其它结构物接近，就有可能发生火花放电。而且，在容器上部的空间里，石油气之类的可燃性气体的浓度往往是在爆炸极限的范围之内。在实地操作中，例如用尼龙绳吊着检验棒放入容器的時候，或处于绝缘状态下的人体，用钢卷尺进行测量时，都曾发生过感应带电引起的爆炸事故。

三、关于电荷的衰减

液体中的电荷，在液体中沿电场的方向移动，所以，电荷量是随着时间的流逝而衰减。如果我们设最初的电荷量为 Q_0 ，液体的电阻率为 ρ ，真空中的介电系数和液体中的介电系数分别为 ϵ_0 和 ϵ_s ，则经过时间 t 后的电荷量 Q 为：

$$Q = Q_0 \exp\left(-\frac{t}{\epsilon_s \epsilon_0 \rho}\right)$$

从上式可知，电荷 Q 按指数函数减少。当 $\epsilon_s \epsilon_0 \rho = t$ ， t 为时间常数，这个时间常数 t ，就是前面所称的电荷的緩和时间。因为 ϵ_0 是恒定不变的， $\epsilon_0 = 1 / 36\pi \times 10^9 \text{ F/m}$ ，所以，緩和时间 t ，只随着液体的介电系数 ϵ_s 和电阻率 ρ 的变化而变化，与几何构造也