

# 静电除尘\*

黄 骥 华 有 年

(北京工业大学物理教研组)

## 前 言

在毛主席的革命路线指引下,我国社会主义建设事业正在迅猛地向前发展。

然而工业的发展也向我们提出了处理三废 and 环境保护问题。

在资本主义国家,资本家为了牟取暴利,根本不顾工人死活,也不管人民群众的身体健康,任凭大气污染,污水横流,眼看着亿万劳动人民惨死在污水废气造成的职业病下,而他们却乘坐飞机汽车到海滨别墅避暑消夏去了。

解放前,中国工人阶级身受三座大山的重重压榨,死于矽肺等职业病的就不计其数。解放后,党和人民政府非常重视人民的身体健康,进行消烟除尘,采取一切措施与“三废”公害作斗争,静电除尘器就是一种非常有力的武器。由于静电除尘具有除尘效率高、耗功率小、适用范围广等一系列优点,所以这一先进技术正在得到日益广泛的使用。下面就对静电除尘作些介绍:

## 一、空气中的烟尘和雾气

烟尘和雾气是我们日常生活中经常接触到的,但为了和它作斗争,进行消烟除尘除雾,对它们作深入的研究还是必要的。

从物理化学的角度看问题,把固体分散在气体中的系统,通通称为烟;把液体分散在气体中的系统,通通称为雾。总起来说,以气体为分散介质的分散体系,称为气溶胶,而一般情况下,我们研究的对象都是以空气为分散介质的,故又称之为空气溶胶。细微的炭颗粒(粒子半径约 $12-50\mu$ )分散在空气中就形成青烟和黑烟;细微的土颗粒或水泥粉末(粒子半径约 $4-300\mu$ )分散在空气中就形成尘;细小的水颗粒(粒子半径约 $0.25\mu$ )分散在空气中就形成雾。

空气中这些固体或液体物质,虽然比重大于空气,但因分散成细微颗粒,吸附了空气分子,本身结构也变得松散,因而实际测得密度比它作为整体状态存在时小得多,所以分散在空气中不易沉降。粒子在空气中的沉降速度可用斯笃克斯定律进行分析:球形质点在流体(包括液体和气体)中以速度 $u$ 运动时,所受到的阻力为

$$F_{阻} = f \cdot u = 6\pi\eta r u,$$

式中 $f$ 为阻力系数, $\eta$ 是液体的粘滞系数, $r$ 是质点半径。球形质点自由下降时受到的阻力就是流体对它的浮力( $F_{浮}$ )。

$$F_{浮} = (M - M_0)g = (\rho - \rho_0)Vg = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \rho_0)g,$$

由 $F_{浮} = F_{阻}$ 可得

$$6\pi\eta r u = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \rho_0)g,$$

$$u = \frac{2r^2(\rho - \rho_0)g}{9\eta}.$$

由此可见,当 $r$ 越小, $\rho$ 越接近 $\rho_0$ 时,沉降速度 $u$ 就越小。再加上布朗运动空气分子的无规撞击,气流的扰动,气体密度按高度分布及静电力的作用(这部分放在后面叙述)因而构成气溶胶粒子的动力稳定性,使粒子不易沉降。

从电的角度来考虑,空气中的烟尘因气流扰动与空气分子摩擦而带电;由于放射性物质的作用, $x$ 射线、紫外线、宇宙射线的照射,也能使气体电离而带电;凡是凝结或聚集在离子周围而生成的液体或固体颗粒都带有电荷,同种分散粒子带同种电荷。根据电荷同性相斥的原理,空气中这些烟尘或雾气的粒子彼此互相排斥,不能聚集沉降,而且分布在较低部位的带电颗粒对于上面的带电颗粒继续下降有静电排斥力,也就是由于带电颗粒的粒子数随高度分布而形成了自下向上的电场力,阻碍带电粒子的继续沉降,所以空气

\* 1975年4月22日收到。

中的烟尘,尤其是颗粒较小的烟尘是很难聚结沉降的。这样大量烟尘雾气散布弥漫在空气中,会对人民的身体健康带来极大的危害,对农作物生长造成恶劣的影响,对于气象和航行也会带来不良后果,对工业生产来说也是一大浪费。在有些生产过程中还非进行除尘不可。例如煤气的生产过程中产生大量煤焦油颗粒分散在煤气中,若不把煤焦油除掉,则会造成管道堵塞,机器粘滞等危险,因而必须进行静电除焦。又如在蔗糖、淀粉、硫磺等粉末状物质的生产过程中,因为空气中含有大量这些物质的细微颗粒,它们的表面能很大,而且和氧气的界面很大,再加上固有的化学能,很容易产生剧烈的反应而燃烧甚至爆炸,这种车间仓库也必须进行除尘。对于含有有害气体(如有机溶剂苯、丙酮等)的车间和含有毒性物质(如汞、铅、砷、铍等)直接危害工人身体健康的单位,更应该将这些毒性物质的烟、尘、雾除掉。

当然可以用喷水的办法,可以用活性炭、泡沫材料、毛毡与纸浆等物质过滤,也可以用旋风分离器将空气中的粒子分离。但这些方法对于不同的烟雾和不同大小的颗粒都有一定的局限性。而静电除尘能够捕集颗粒半径从  $0.1\mu$  到  $100\mu$  范围内的各种烟尘雾气,烟尘浓度从  $0.5$  克/米<sup>3</sup> 到  $50$  克/米<sup>3</sup> 范围内也能很好净化,收尘效率可达  $99.9\%$ ,而且技术较为先进,操作比较简便。若将静电除尘和其它几种方法联合使用则效率更高。

## 二、静电除尘的原理

### 1. 电荷的相互作用

实践证明,电荷之间存在相互作用力,同号电荷之间的作用力是斥力,异号电荷之间的作用力是引力。对于点电荷而言,作用力的大小与带电量的乘积成正比,与其距离平方成反比,用公式表示如下:

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

由此可见,带电量越大,距离越近,作用力越大。

带有电荷或带有不等量正负电荷的物体称为带电体,由于电荷之间存在相互作用力,所以带电体之间也存在相互作用力。一般情况下,电荷的相互作用是通过带电体之间的相互作用体现出来的。

### 2. 电场对电荷的作用

带电体的周围空间存在着电场,带电体之间的相互作用是通过电场的作用来实现的。带电体在电场中要受到电场力的作用,电场力的大小与电场强度  $E$  成正比,与带电体所带电量  $q$  成正比,公式如下:

$$F = q \cdot E$$

由此可见,带电体所带电荷越多,电场强度越强,带电

体受到的电场力就越大。所以,为了增大对带电体的作用力,往往通过增大电场强度和增加带电体的带电量这两条途径来实现。

### 3. 匀强电场下带电粒子的运动

电场强度处处相等的电场称为匀强电场。例如一对大面积的平行板,一个极板带正电,另一个极板带负电,在这两块平行极板的中间部分,就可看作是一匀强电场,如图 1 所示。电场强度的方向如电力线箭头方

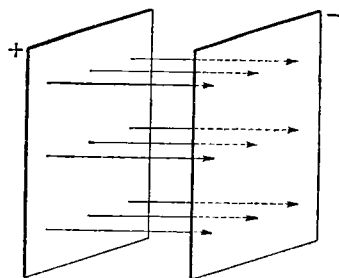


图 1 平行板匀强电场

向,从正极板指向负极板。带正电的粒子在电场中受力方向与电场强度方向一致;带负电的粒子在电场中受力方向与电场强度方向相反。电场强度在数值上与加在极板上的电压成正比,与极板距离  $l$  成反比:

$$E = \frac{U}{l}$$

带电粒子在匀强电场中受力如下

$$F = q \cdot E = q \cdot \frac{U}{l}$$

若带电粒子质量为  $m$ ,则受力产生加速度

$$a = \frac{F}{m} = \frac{q}{m} \cdot E = \frac{q \cdot U}{m \cdot l}$$

由此可见,带电量越多,电压越高,极板距离越近,带电粒子质量越小,则产生加速度越大。

### 4. 非均匀电场下带电粒子的运动

对于非均匀电场而言,电场中各点电场强度不相等。有的地方电场强,有的地方电场弱,可以有各种各样的分布。经常用的是以一长直圆筒和它的轴线为正负极形成的非均匀电场,如图 2(a) 所示(静电除焦中多用这种电场),还有就是以一金属平板和与它相距一定距离且互相平行的金属丝为正负极构成的非均匀电场,如图 2(b) 所示(静电除尘中多用这种电场)。

在非均匀电场中每一点,电场强度都有一定的大小和方向,只不过彼此不相等罢了。所以在非均匀电场中每一点,带电体也要受到电场力的作用,受力的大小方向也不相同。对圆筒形的非均匀电场,其电场强度的方向呈轴对称分布,其中各点电场强度的数值可

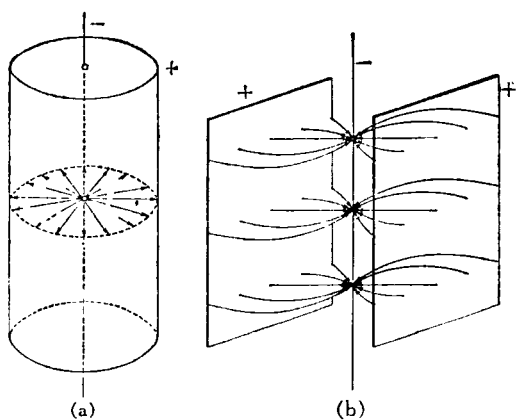


图 2 非均匀电场

用高斯定理近似求得。设圆筒高为  $h$ ，所求之点距中心距离为  $r$ ，中心电极丝为均匀带电直线，电荷密度为  $\lambda$ ，而电场强度具有轴对称性，所以通过圆柱面的电通量为  $2\pi r h D$ 。圆柱面所包围的电荷量为  $\lambda h$ 。根据高斯定理，忽略某些次要因素可以得到下列方程

$$2\pi r h D = \lambda h,$$

$$D = \frac{\lambda}{2\pi r}.$$

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon r}.$$

由此可见，电场强度和距离  $r$  呈双曲线函数关系。对于这样一个圆筒形电容器，设其电容量为  $C$ ，所加电压为  $U_R - U_0$ ，则其带电量为  $Q = C(U_R - U_0)$ 。再根据电场强度和电位梯度的关系

$$E = -\frac{dU}{dr}.$$

移项得

$$dU = -E \cdot dr = -\frac{\lambda}{2\pi\epsilon r} dr,$$

积分得

$$\int_{U_0}^{U_R} dU = -\frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \int_{R_0}^R \frac{dr}{r},$$

$$U_R - U_0 = -\frac{\lambda}{2\pi\epsilon} (\ln R - \ln R_0),$$

$$\lambda = -\frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)} (U_R - U_0),$$

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon r} = -\frac{U_R - U_0}{r(\ln R - \ln R_0)}.$$

由此可见，圆筒状非均匀电场中，电场强度与所加电压成正比距中心电极越近，电场强度越强，对带电粒子的作用力也越大；距中心电极越远，电场强度越弱，对带电粒子的作用力也越小，如图 3 所示。在中心电极带负电，周围圆筒带正电的非均匀电场中，带正电的粒子

将向中心电极运动，作用力越来越大；带负电的粒子将向周围筒壁运动，作用力越来越弱。

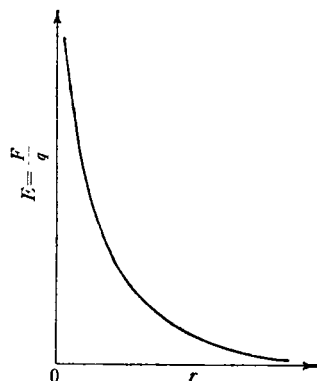
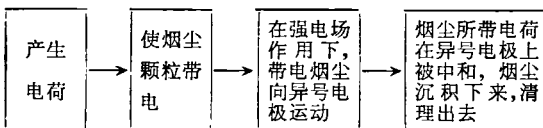


图 3 圆筒形电场  $E$  与距离  $r$  的关系曲线

从上节分析知，空气中的烟尘颗粒一般都带有电荷，因此在强电场作用下就要向异号极板移动，并在那里沉积下来。但空气中的烟尘在自然状态下所带的电荷很少，有的可能不带电，对于这些烟尘就要想办法强迫它们带电，而且希望它们带上较多的电荷，然后在电场作用下向异号电极运动，最后沉积下来，这就是静电除尘的工作原理和主要过程，用方框图表示如下



### 三、气体的电离放电和烟尘的带电运动过程

用什么方法使气体中的烟尘带上大量电荷呢？自然状况下的电离剂（如紫外线、X射线、宇宙射线、高温火焰等）是远远不够用的。但我们知道气体在高压电场作用下是要放电的，在放电过程中将有大量电荷产生，这些电荷就可用来使烟尘带电。

气体在常压下一般来说是不导电的，因为气体多是中性分子，但是如果受到电离剂的作用，使气体电离，产生了电子和离子，气体就能导电了。在气体电离的同时，又存在离子的复合过程，这两种过程同时存在，达到动态平衡，即单位时间内电离的分子数和复合的分子数相等，如果没有外加电压，仍然没有电流。当被电离的气体受到外加电场的作用，正离子向负电极运动，负离子（电子附着在中性分子上即构成负离子）向正电极运动，这样，气体中便有电流流过，就开始了气体的放电过程。放电过程中电流随电压的增长曲线如图 4 所示。当外加电压很小时，电场强度很小，电离剂产生的离子和电子的运动速度很慢，只有很少的离

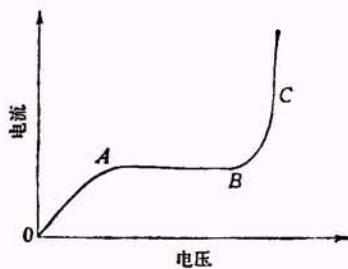


图4 电晕过程中电流电压关系曲线

子能达到电极,大部分离子都复合了,所以相应的电流很小。逐渐升高电压,电场强度增大,离子的运动速度加快,单位时间内就有较多的电子和离子到达电极表面。复合的离子减少了,相应的电流就增大,这相当于图4曲线中的OA部分。

继续升高电极间的电压,电场强度足够大时,电离剂所产生的离子全部移向电极,再继续提高电压,气体中的电流也不再增加,这个恒定不变的电流称为饱和电流。饱和电流的大小取决于电离剂产生的离子和电子的多少,而与外加电压无关,这相当于图4曲线中的AB段。

如再升高电压,电场强度随之增大,电荷运动速度也不断增大,因而具有较大的动能。当电场强度大到一定程度,离子和电子具有足够的动能,当它们和中性原子碰撞时,就能将原子中的电子轰出产生新的离子,新离子在强电场作用下加速,既具有较高的动能,又可以使其它中性原子电离,这样气体中的离子迅速增加,相应的电流也迅速增加,这相当于图4曲线中的BC段。这种电离称之为碰撞电离。这时,即使没有电离剂,也能维持碰撞电离和放电,这种不需外加电离剂的放电,称为自持性放电,那种需要外加电离剂的放电,称为非自持性放电。

在匀强电场中发生碰撞电离时,因为电极间电场强度处处相等,所以在所有点上同时出现大量的离子和电子,结果使电流突然剧增,整个电场空间突然导电,气体很快就被击穿,形成火花放电。匀强电场中,发生碰撞电离过程时,电流和电压的关系曲线如图5(a)所示,可以看出,从饱和电流区进入碰撞电离区,电流的变化是很陡的。

在非均匀电场下,气体放电的过程则另一样,它的击穿过程是比较缓慢的,其电流随电压上升曲线如图5(b)所示。

当我们在非均匀电场的两极间增加电压时,电场强度随着增加,并使气体电离,这时由于电场的非均匀性,不是在两极间所有区域内同时发生电离,而是首先在电极丝表面附近电场强度最强处发生。电压再升高,电极丝表面附近一层气体被击穿,外层气体并未被击穿,因为距电极丝较远处电场强度显著下

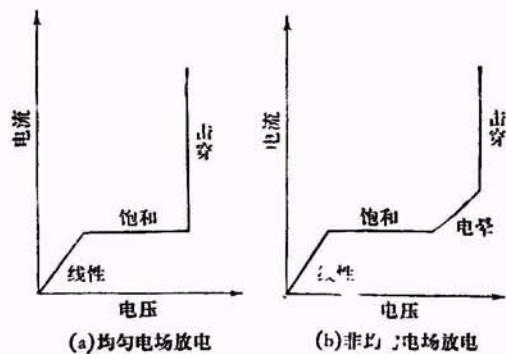


图5 不同电场的放电过程

降,离子速度减小,距离再远,则气体不再产生碰撞电离。这样,在中心电极丝附近因为电场强度很强而产生碰撞电离,同时产生局部击穿。这时气体分子中的电子跃迁,从低能级跳到高能级,当它们从不稳定的高能级退回到稳定的低能级时,就要释放出能量形成光。因此,在电极附近会出现一层光晕,与此同时还发出热,使气体局部膨胀、撕裂、振动而发声。这种现象称为电晕放电,发生气体放电的区域称为电晕区。在圆筒形电极和中心电极丝之间加上高压时,电极丝外围就形成一层电晕套,同时发出嘶嘶声和轻微爆裂声。在这一层电晕区中能产生大量电子和离子,是使烟尘带电的电荷源,所以电晕放电在整个静电除尘中是相当重要的一环,要使电晕区尽早尽多地产生电荷,供给烟尘载荷,除尘效果也就越好。

在非均匀电场中,一般是一个电极电晕另一个电极不电晕。在圆筒形电场中,中央电极丝就是电晕电极。电晕电极上加正电位则为正电晕,电晕电极上加负电位则为负电晕,加在电晕电极上电压越高则电晕区越大。

电晕放电只有在电晕电极上所加电压高到一定程度,使电晕电极表面电场强度能使气体碰撞电离时才能产生,这个电压称为临界电压,它的大小决定于电极的大小、气体的温度、压力、湿度等一系列因素。电晕放电刚开始时,能听到嘶嘶的放电声而没有显著的电晕光套,将电压继续升高,可看到电晕光套,当电晕电极加负电位时(负电晕),电晕套差不多是圆柱形的,颜色是蓝紫色,如图6(a)所示。当电晕电极加正电位时(正电晕),电晕套不是圆柱状而是带有锯齿状毛刺,颜色接近紫色,如图6(b)所示。这时电晕区产生大量电子和离子,使烟尘颗粒带上电荷,在电场作用下向另一电极(沉淀极)移动,并在那里进行电中和而沉降下来。

如果再继续增大电压,电晕区就逐渐扩大,产生的电荷加多。再升高电压,就在电极间产生火花,出现火花放电。在火花放电时,瞬间电流很大,因而引起电位的重新分布而使电压降低,放电马上终止。等到电位再升高,又开始火花放电。所以火花放电不是连续的而

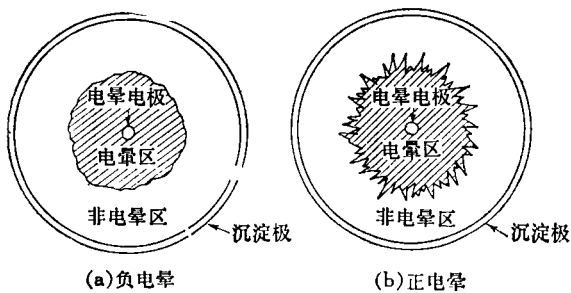


图 6 电晕示意图

是间歇的,象闪电一样,故又称闪络。

如果两极间距离较近,火花放电强度足够大,电源有足够的功率或放电电容有足够的电容量时,能使电极之间的气体电离,并使正离子轰击电晕极。电晕极被灼热便能放出大量电子使气体电离,这时气体的电离主要是靠灼热电子而不仅仅依靠离子本身的碰撞,结果使电流增大许多倍,这种放电称为弧光放电,又称拉弧。

闪络和弧光放电(拉弧)是静电除尘过程中可能出现而又必须设法抑制和防止的现象。

静电除尘一般都用上述两种非均匀电场作为电晕器,并使极间电压保持在电晕放电的电压范围内,有时还保持在即将发生火花放电或少量火花放电(即闪络)的范围内,这样电极间能产生大量离子,使烟尘带电而又不会引起电极间整个击穿,这称为闪络运行。

一般情况下负电晕比正电晕具有更高的除尘净化效率,原因有以下三点:

1. 负电晕时,正离子向电晕电极运动,这种正离子除了在运动过程中电离气体,还能使电晕电极释放电子;若是正电晕,则电晕电极不能释放电荷,所以在同一电压下,负电晕效果比正电晕好。

2. 在相同的电场中,负离子运动速度比正离子快,例如在空气中,电场强度为 1 伏特/厘米时,负离子运动速度为 2.1 厘米/秒,正离子运动速度为 1.4 厘米/秒,这就使负电晕情况下,负离子向沉淀极运动并碰撞电离时效率较高。

3. 负电晕时,起始电压比正电晕低,而击穿电压却比正电晕高,这样就有较宽的电晕范围,并能得到较高的电场强度和较好的电晕效果。

为了使较小的烟尘(半径小于  $10\mu$ )带上较多的电荷,必须有较大的电荷密度和较高的运动速度,这就要求电晕电流尽量大;对于较大的烟尘(半径大于  $10\mu$ ),它的比表面(即表面积与体积之比)相对来说比较小,因此其荷质比就比较小,为了使其受电场力作用较大就必须提高电场强度。所以总的说来,烟尘颗粒的运动速度与烟尘所载的电荷多少、电场强度大小成正比,与颗粒质量成反比。

## 四、静电高压的产生

静电高压的产生方法很多,用感应起电机、感应圈、小型范德格拉夫起电机都能产生高压,但功率都较小。利用电磁振荡产生高频高压再经倍压整流产生直流高压,可作一般使用。在使用功率比较大的场合,多利用动力电经高压变压器升压,然后整流得到高压直流电来模拟高压静电。整流方式有机械整流机整流、高压整流管整流和高压硅堆整流等,其中以雪崩高压硅堆整流较为先进。调压方式有用调压变压器进行调压,用磁放大器(磁饱和电抗器)进行调压和利用可控硅调压几种,其中以可控硅调压较为先进。

由于生产的需要,前一阶段我们和北京第二通用机械厂动力科电工班的师傅一起将五台古老的业已报废的机械整流机改装成具有多种保护通道并能自动跟踪闪络电压的可控硅自动控制高压硅整流装置,在一年多的连续运转中经受了生产实践的考验,效果良好。

在改装过程中我们坚持自力更生,修旧利废,将原来的 18kVA, 72kV, 200mA 的高压变压器用上了,把原来的调压器改装成电抗器;利用原来的控制柜、仪表和原来的零部件,只增加了一对可控硅作反并联交流调压;用 24 个高压硅堆作桥式整流,利用安全变压器改绕成控制变压器;利用线间变压器改绕成脉冲变压器,再用三十多个晶体管组成自动控制线路,实现了自动控制和自动保护,包括下列通道:

### 1. 稳流和电流极限通道

可以在除尘过程中稳定工作电流,使之不随电场变化而起伏,并能钳制工作电流不超过给定值。

### 2. 过流保护和延时跳闸通道

当电场发生故障(如高压磁瓶破裂漏电,电晕电极断丝对地短路,塌灰结焦等)产生大电流时,可自动降压封锁可控硅,若在 4 秒钟内故障未被排除,则延时低压跳闸,保证可控硅和高压硅堆不受冲击。

### 3. 过压保护和开路保护

当电场开路或由于其它原因引起高压突然升高时,过压保护通道的单稳态触发器立即翻转,迫使高压下降,然后切断电源。

### 4. 闪络和拉弧保护通道

当电场发生闪络(火花放电)时,单稳态触发器动作。根据闪络的大小和频率适当降低电压,使闪络淬灭。然后电压缓慢上升,当电场发生严重闪络甚至拉弧(弧光放电)时,单稳态触发器持续翻转,迫使电压降到零,封锁住可控硅,待电场灭弧后再逐渐升高电压。

## 5. 自动跟踪闪络电压通道

为了提高除尘效率,需要有最大的离子浓度和最高的电场强度,所以希望电滤器工作在火花放电(闪络)的边缘,而又要防止短路和拉弧。所以需要自动调整工作点使输出高压处在火花放电的临界状态既保证了最高的除尘效率,又确保安全生产。

## 6. 软启动和软停车装置

为了确保生产过程中操作方便和安全,我们采用了软启动和软停车装置,只要一按启动按钮,就对电容充电,使电压自动缓慢上升到给定值。同理,只要一按停机按钮,电压就自动缓慢下降到零,然后自动切断总电源。

为了适应生产过程中电感性负载的需要和调压过程中波形对称的需要,我们采用了振荡输入、斜率移相、脉冲列触发的新型触发线路,确保可控硅在不同负载和不同移相角下都能可靠地触发工作,而且波形幅度总是对称的,以消除直流分量和高次谐波。这样,机器就能在 70kV 200mA 条件下昼夜 24 小时连续运转,变压器温升约 20℃。整机电路和控制电路的方框图分别如图 7、图 8 所示。

我们还和有关工厂工人师傅一起定型生产了 KGGJ-1A/40kV 可控硅自动控制高压硅整流装置,用

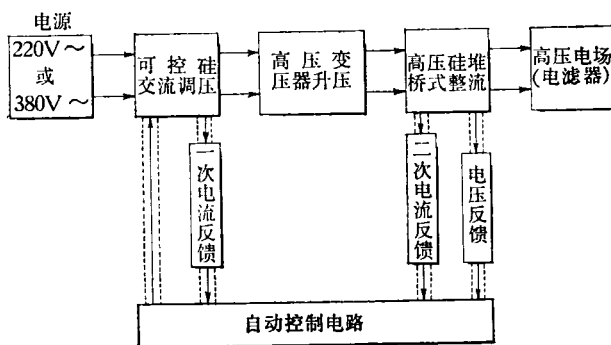


图 7 整机电路方框图

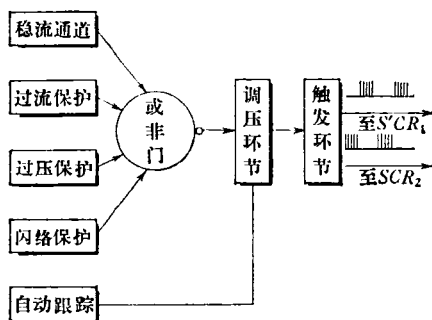


图 8 控制电路方框图

在大港油田的石油脱水自动化中,取得较好的效果,现已成批投产。

## 五、静电除尘原理的推广应用

随着科学技术的不断发展,静电除尘不仅可用于烟道除尘净化空气,对礼堂、会议室、住宅进行空气调节;用于粉尘车间、舰艇轮机舱的消烟除尘;用于精密车间、高级实验室、器件、组件生产的无尘室的净化;汽车、机车废气中有害气体的消除;水泥粉尘和氧化铝粉尘的回收;化工废气、有害气体的清除等等,而且其原理还可推广应用于以下几个领域:

### 1. 静电脱焦

可以将煤气中的煤焦油、萘、沥青等杂质清除以免管道堵塞,净化率达 99%。

### 2. 石油脱水

可将原油中以乳状液方式存在的水分清除,便于原油的集输、炼制和出口,静电脱水后的原油含水率低于 0.02%,达到并超过出口标准。

### 3. 静电喷漆

利用静电场的作用使油漆颗粒雾化,同时均匀吸附到加工工件的表面上,不但能提高喷漆质量,而且能防止苯、丙酮、稀料等有机溶剂在空间弥漫毒害,还能节约原料。

### 5. 木材纤维的静电分层和定向排列

在纤维板和刨花板的制作过程中,利用高压静电场使纤维和刨花极化,取向排列,纵横交错,可以使纤维板或刨花板的强度大大提高,可以达到甚至超过木板和层压板的结构强度,在很多方面可以和塑料竞争比美,在木材加工中应用静电场还可以防止木屑纤维飞扬,并能对粗细纤维分层铺装,使表面颗粒很细,制出高质量的装饰板。

### 6. 静电分选

利用静电场的作用,可以使颗粒大小不同、轻重不同、含水率不同、质量优劣不同的产品分选归类,如用在选矿、木材粗细纤维的分选、茶叶和茶叶梗的分选等。

此外,象静电植绒、静电喷砂、静电涂层、静电梳理等有关静电的应用正在开拓日益广阔的天地,我们相信在学习无产阶级专政理论大于社会主义的高潮中,古老的静电将为社会主义建设作出更多新的贡献。