

静电除尘器电源装置节能技术研究

岳建华

(神华国华(北京)电力研究院有限公司, 北京 100025)

摘要:通过开展静电除尘器电源装置机理的研究,对静电除尘器不同电源装置的减排和节电性能有了清晰的认识,提出了即减排效果好、又节电的**节能电源**;通过调研不同电源的应用情况,分析出脉冲电源使用效果不佳的原因。根据烟尘比电阻特性不同提出了采用不同电源的组合方案。

关键词: 柔性电源、脉冲电源; 荷电阻; 位移电阻; 节能型电源

Study on energy saving technology of electrostatic precipitator power supply device

YUE Jian-hua

(Shenhua Guohua (Beijing) Electric Power Research Institute Co Ltd, Beijing 100025)

Abstract: Through the study of electrostatic precipitator power supply device mechanism, different power supply device for electrostatic precipitator of emission reduction and energy-saving performance have the clear understanding of the proposed that emission reduction effect is good, and power-saving energy-saving power; through the research of different power supply application, analysis of the pulse voltage source with the reasons for the ineffective. According to the characteristics of dust and soot ratio, a combination scheme of different power supply is proposed.

Keywords: flexible power supply; pulse power supply; Corona resistance; displacement resistance; energy saving power supply

0. 引言

中国经济快速发展,带来的环境问题日趋严重,近年来京津冀、珠三角、长三角大面积雾霾使人民深受危害,也深深促动政府和企业治理环境的动力。不同研究机构的研究成果表明,造成雾霾的主要原因是工业烟尘和汽车尾气的排放。工业烟尘排放主要由火电行业、冶金行业和建材行业产生,为此国家发布了《火电厂大气污染物排放标准》^[1](GB13223-2011),此标准从2014年7月1日开始执行,要求一般地区排放的烟尘浓度 $\leq 30\text{mg}/\text{Nm}^3$ 、重点地区排放的烟尘浓度 $\leq 20\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。更加严厉的政策已经出台:2014年9月12日国家发展改革委、环境保护部、国家能源局三部委下达了《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020年)》^[2]发改能源[2014]2093号文,行动目标:全国新建燃煤发电机组平均供电煤耗低于 $300\text{g}/\text{kWh}$;东部地区新建燃煤发电机组大气污染物排放浓度基本达到燃气轮机组排放限值(排放的烟尘浓度 $\leq 5\text{mg}/\text{Nm}^3$),中部地区新建机组原则上接近或达到燃气轮机组排放限值,鼓励西部地区新建机组接近或达到燃气轮机组排放限值。

静电除尘器是捕捉烟气固体颗粒烟尘的主要设备,其配套电源性能直接影响着排放和除尘电能消耗水平。鉴于目前静电除尘器电源市场种类繁多、技术差异大的现状,通过开展静电除尘器电源机理的研究,有助于提高我们甄别产品优劣的能力。

1. 静电除尘器的电源装置

静电除尘器由除尘器本体和专用除尘器电源装置构成,目前市场上静电除尘器主要有以下五种电源。

1) 单相电源

静电除尘器单相整流电源采用单相380V交流输入、工频变压器升压、高压硅堆整流成100Hz的脉动直

流电源（如 72KV），用于电场的除尘电源。由于单相电源输入功率因数低、谐波大、输出脉动成分大（理论为 57.11%），除尘效果差、电能消耗高，逐步被淘汰，如图 1-1 所示。

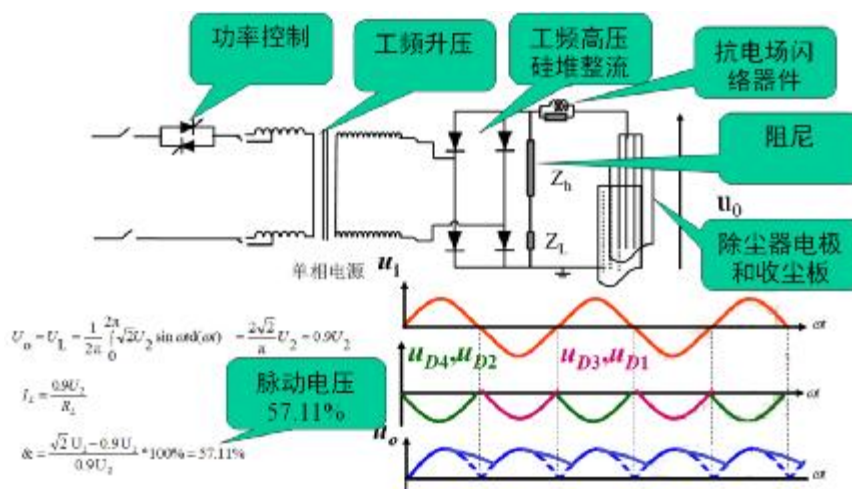


图 1-1 单相静电除尘器电源

Fig. 1-1 Single-phase electrostatic precipitator power supply

2) 三相电源

静电除尘器三相整流电源是采用三相 380V 交流输入、工频变压器升压、高压硅堆整流成 300Hz 的脉动直流电源（如 72KV），用于静电除尘器电场的除尘。其优点是输出电流大、电压脉动小（最高电压时理论为 4.74%），适用于烟尘为中比电阻的系统，如图 1-2 所示。

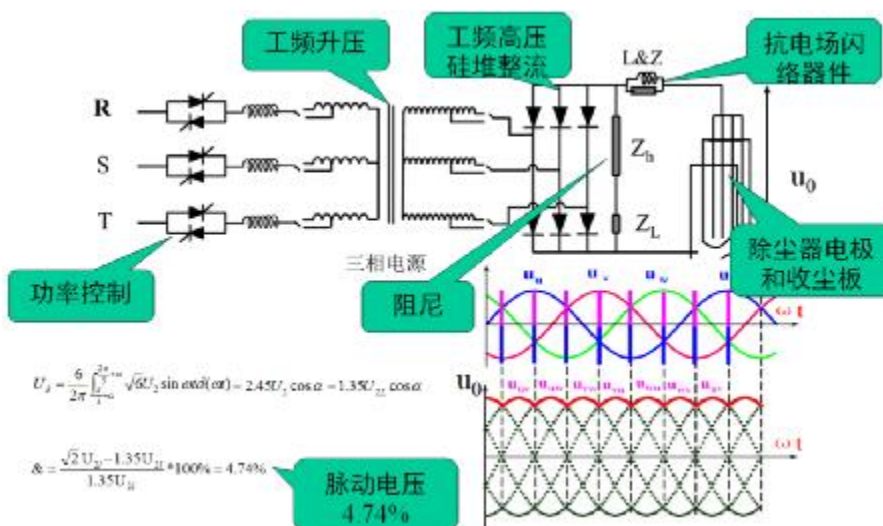


图 1-2 三相静电除尘器电源

Fig. 1-2 Three-phase electrostatic precipitator power supply

3) 高频电源

静电除尘器高频电源（开关电源）是采用三相 380V 交流输入、工频整流—滤波、高频逆变（20~50kHz）、高频变压器升压、高频高压硅堆整流成稳定的直流电源（如 72kV），用于静电除尘器电场除尘。采用高频电源的好处是电源效率高、电场击穿后恢复快、控制方式灵活、体积小、重量轻。原理如图 1-3 所示，电源输出波形如图 1-4 所示。

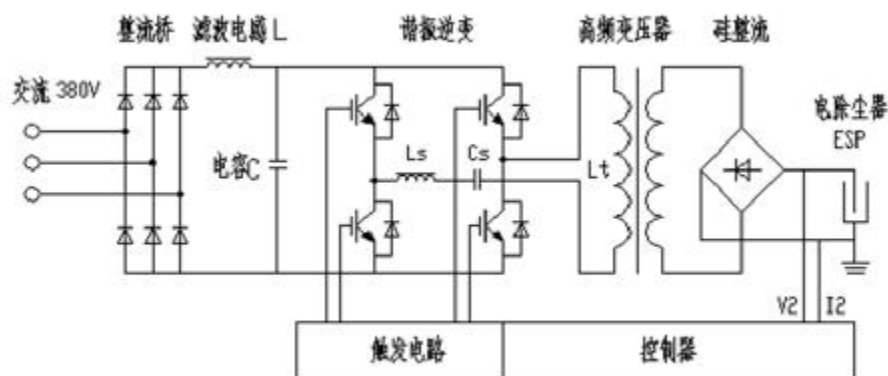


图 1-3 高频静电除尘器电源

Fig. 1-3 The high-frequency electrostatic precipitator power supply

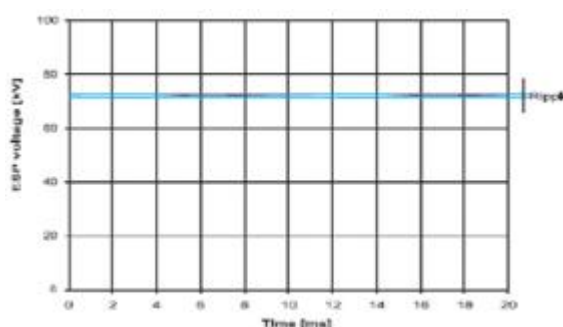


图 1-4 高频电源输出波形

Fig. 1-4 The power supply output waveform

图 1-5 所示的是工频和高压电源在电场击穿和恢复过程中的情况，工频电源从电场击穿到电场恢复约需要 80ms，高频电源从电场击穿到电场恢复约需要 20ms。

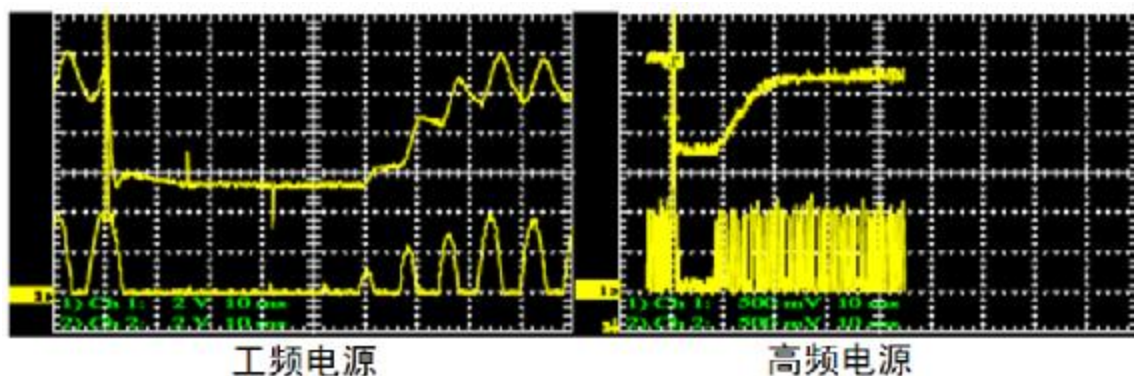


图 1-5 静电除尘器工频电源与高频电源电场击穿后特性

Fig. 1-5 The recovery time of electrostatic precipitator power frequency and high frequency power supply electric breakdown

4) 柔性电源

静电除尘器柔性电源实质上是高频电源的一种，采用三相 380V 交流输入、工频整流—滤波、高频逆变（20~50kHz）、高频变压器升压、高频高压硅堆整流成稳定的直流电源（如 100kV），此电源通过柔性功率模块处理后输出到静电除尘器的电场除尘。采用柔性功率模块将有效的改变电源的输出特性，满足静电除尘器减排和降低电能消耗的目的。原理如图 1-6 所示，电源输出波形如图 1-7 所示。

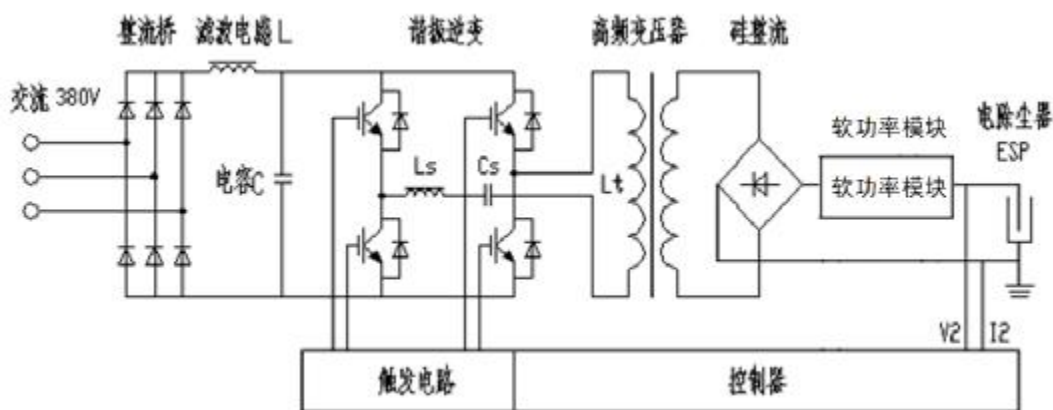


图 1-6 静电除尘器柔性电源

Fig. 1-6 Electrostatic precipitator flexible and stable power supply

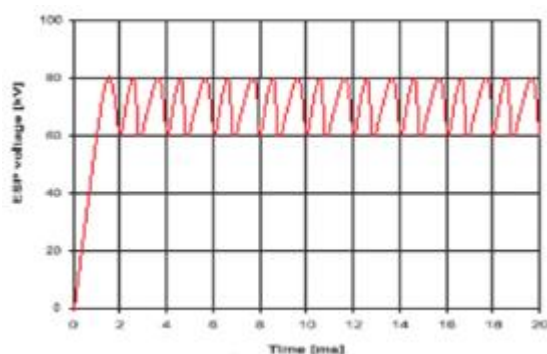


图 1-7 柔性电源输出波形

Fig. 1-7 Flexible and stable power output waveform

5) 脉冲电源

静电除尘器脉冲电源是在高频电源基础上、叠加可控脉冲的电源。其原理是采用三相 380V 交流输入、工频整流—滤波、高频逆变（20~50kHz）、高频变压器升压、高频高压硅堆整流成稳定的基础直流电源（如 60kV）；由脉冲电路构成的脉冲电源通过耦合电容一同输出到静电除尘器的电场进行除尘。脉冲电源主要是利用电场击穿电压的高低与电压波形有关的特征（波形窄、击穿电压高，波形宽、击穿电压低）来实现瞬间高电压输出，从而提高了电场场强、强化了电晕功率，这样不仅提高了除尘效率，也降低了除尘时电能消耗。原理如图 1-8 所示，电源输出波形如图 1-9 所示。

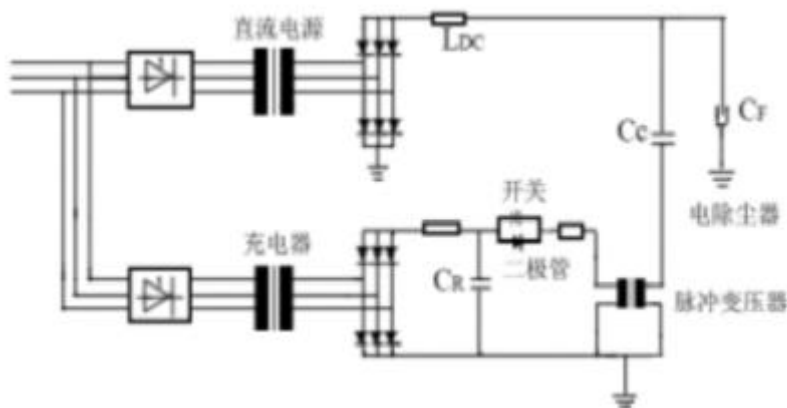


图 1-8 静电除尘器脉冲电源

Fig. 1-8 Electrostatic precipitator Pulse power supply

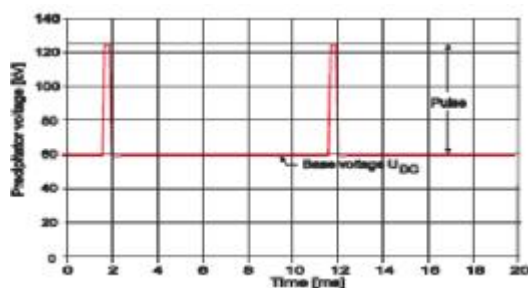


图 1-9 脉冲电源输出波形

Fig. 1-9 Pulse power output waveform

以上对静电除尘器五种电源的原理进行了解读。前二种属于工频电源，后三种属于高频电源，这些电源由于减排能力和电能消耗相差较大，产品价格也有较大的差异。

2. 静电除尘器除尘机理

静电除尘器是由本体和电源装置等构成，图 2-1 是大型静电除尘器的结构图，由阴极线、阳极板、阴极框架、阳极框架、极板吊装装置、振打系统、烟气均流、外壳、电源装置和供电系统等部件构成。

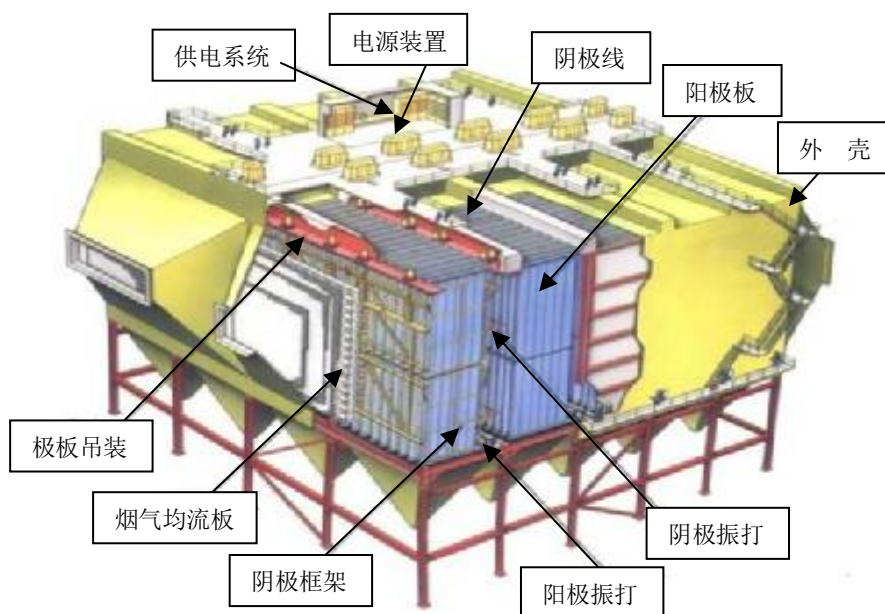


图 2-1 静电除尘器结构

Fig. 2-1 Electrostatic precipitator structure

除尘过程：

- ① 利用高压直流电源使电场内的空气电离产生电晕；
- ② 产生电晕的负电子与电场内的烟尘耦合形成带电子子；
- ③ 带电子子在电场力的作用下将烟尘吸附在收尘板上；
- ④ 通过振打系统将灰从收尘板上收集到灰斗从而完成对烟尘的除尘。

静电除尘器效率与除尘器电压关系：

电除尘效率—多依奇公式^[3]

• 式中 η —电除尘器的效率

- ω —驱进速度, m / s
- A—收尘板的收尘面积, m²
- Q——烟气量 (m³/s)

其中

$$\omega = \frac{PE_p E_c a^2}{6\pi\mu}$$

式中: ω —烟尘驱进速度

- P—电场的介电常数
- E_p —收尘板的电场强度
- E_c —荷电电场强度
- a—尘粒半径
- μ —气体粘度

从以上公式看出, 在除尘器本体结构确定后 (A、Q 确定), 要提高除尘器效率, 就需要提高收尘板的电场强度和荷电电场强度。

3. 静电除尘器电源装置节能机理

前面已经论证要提高静电除尘器除尘效果, 应提高 E_p 和 E_c 的电压, 由于常规静电除尘器荷电电场和除尘电场的电源为一个 ($E_p=E_c$)、无法解耦成独立的控制, 故单相、三相和高频电源在提高荷电电压的同时提高了收尘电压, 带来的问题是电能消耗增加较多。下面就如何提高除尘能力、降低电能消耗进行分析。

3.1 空气放电特性

研究静电除尘器的节能机理首先要研究空气放电特性^[4], 如图 3-1 是空气放电的伏—安特性, 从伏—安特性中可以认识空气放电过程, 静电除尘器电场特性与空气放电的伏—安特性在 F~I 区域类同。静电除尘器采用阴极尖端放电, 工作在 F-H、H-I 二个区域, 下面对二个区域工作特性分析如下:

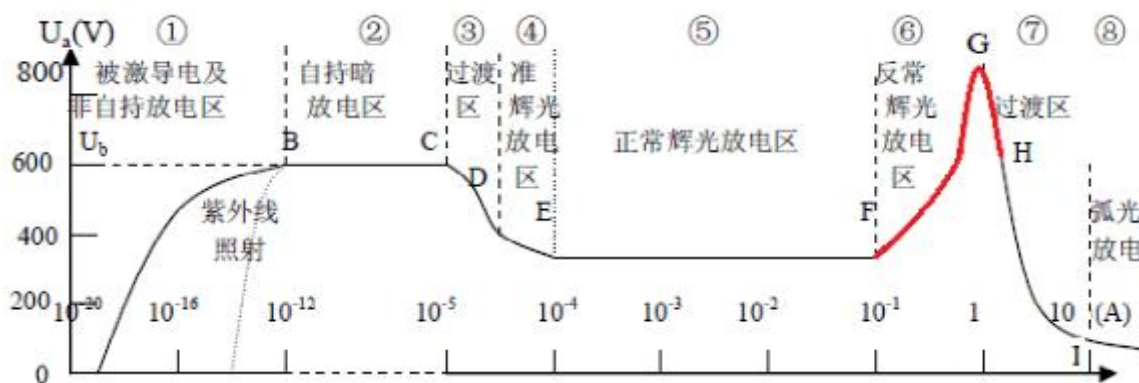


图 3-1 空气放电的伏—安特性

Fig. 3-1 The air discharge V—A characteristic

F-H 区域: 在 F-H 区域, 随着电场电压的提高, 在电晕极 (阴极线) 周围产生电晕放电, 外加电压 (场强) 越高, 电晕强度 (电流) 越大, 当外加电压达到最高点 (G-击穿电压) 时, 如果再增加电压将产生较大的电晕电流且电场为负阻特性, 到 H 点, 将产生火花放电; 工作在 G-H 区域将产生大量的空间 (电晕) 电荷并附着在烟尘上, 在电场力的作用下将烟尘收集在收尘板 (阳极板) 上。

H-I 区域: 当工作到 H-I 区, 在电晕极与收尘板的空气产生有限的等离子通道产生很大的电流形成弧光放电, 这个区域电流只在等离子通道通过, 很少产生空间电荷故基本无除尘效果, 同时弧光放电浪费大量的电能, 也易将电晕极或收尘板烧坏, 为此静电除尘器电源禁止工作在这个区域。

3.2 空气放电的伏—秒特性

图 3-1 是空气放电典型的伏—安特性^[5]，影响空气放电伏—安特性的有空气的温度、湿度、气压、流速等，同时空气放电也与加在电场的激励电压波形有关，图 3-2 是空气放电的伏-秒特性，从图 3-2 中看出，空气击穿电压的高低与加载电压的波形有关，窄脉冲的电源电场击穿电压高，宽脉冲的电源电场击穿电压低，图 3-2 曲线中的 1~5 脉宽 $t_1 > t_2 > t_3 > t_4 > t_5$ 。通过试验，当供电电源采用 10~100us 脉冲供电时、电场击穿电压是常规直流电压（稳定）的 2~1.5 倍，脉冲电源的原理就来自此。

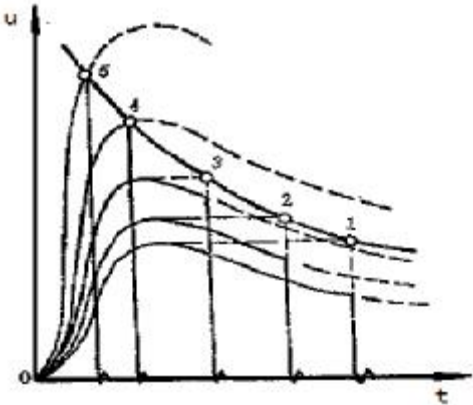


图 3-2 空气放电的伏—秒特性
Fig. 3-2 The air discharge V—s characteristic

3.3 静电除尘器电场模型

1) 工业烟尘导电方式

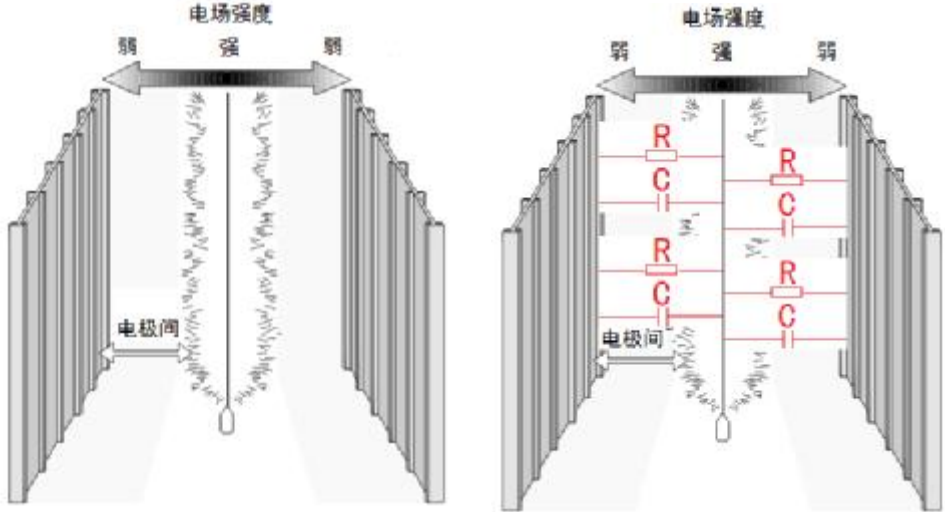
工业烟尘（粉尘）在除尘器内部由本体导电和表面导电两部分构成，原理如下：

本体导电^[6]：取决于烟尘和气体的温度及组成。在高温时（约大于 200℃），导电主要通过烟尘本体内部的电子或离子进行，此时的导电通道等效电阻称荷电电阻。流过荷电电阻的电流是有效的除尘电流。

表面导电^[6]：在较低温度下，导电主要是沿尘粒表面所吸附的水分和化学膜进行的，此时的导电通道等效电阻称位移电阻。流过位移电阻的电流是无效的除尘电流。

2) 静电除尘器电场模型

静电除尘器主要由电晕极（阴极）和收尘板（阳极）构成，如图 3-3（a）所示，电晕极和收尘板之间通过烟气并加上直流电压，根据相应的本体结构，除尘器本体等效成三个电流通道。



(a) 静电除尘器电晕极和收尘板示意 (b) 静电除尘器电晕极和收尘板分布参数示意

图 3-3 静电除尘器和分布参数示意

Fig. 3-3 Schematic electric field electrostatic precipitator and distribution parameters

工业烟尘温度在 90~300℃，除尘器电晕极和收尘板导电通道等效为三个，一是由沿尘粒表面所吸附的水分和化学膜构成的位移电阻、支持电极的绝缘瓷套等泄漏电流两部分构成分布电阻 nR 的第一个导电通

道；电晕极和收尘板之间的分布电容 nC 构成第二个导电通道；由电晕极和收尘板构成的荷电电阻 r 构成第三个导电通道，如图 3-4 所示。其中通过分布电阻 nR 的电流无除尘作用、浪费电能（电能消耗与外加电压的平方成正比），应设法减少这部分能耗；分布电容 nC 起到平滑电场电压作用、本身不耗能，如图 3-3（b）所示。

流过荷电电阻 r 的电流是真正起到除尘作用的，其特点是外加电压越高等效电阻越小、外加电压宽度越小等效电阻越大，所加电压超过电场击穿电压后为负阻特性（非线性）。要提高静电除尘器除尘效果、降低除尘系统自身电能消耗，就应提高流过荷电电阻的电流比例，降低流过分布电阻的电流比例。

由于一般的静电除尘器的荷电电场和除尘电场是一个电源提供的，要提高除尘效果，就应提高电晕电阻 I_r 的电流，即提高电场电压；从降低除尘系统无效的电能消耗考虑，应降低供电电压，降低流过分布电阻 nR 的电流。从而看出：从提高除尘效果和降低除尘系统的电能消耗看，这两方面对供电电源的要求是矛盾的。为此现有的单相、三相和高压电源为提高除尘效果而提高除尘器电压，造成电除尘系统电能消耗很大（是单相工频电源能耗的 1.5~2.5 倍）。

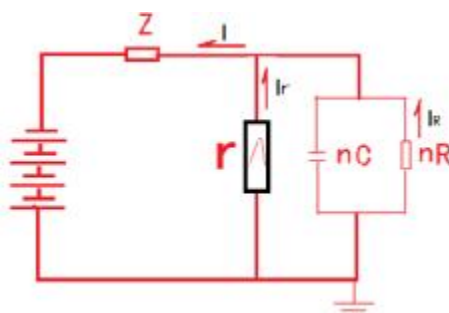


图 3-4 静电除尘器等效电路

Fig. 3-4 Equivalent circuit of electrostatic precipitator

图 3-4 中， r 为荷电电流的等效电阻、 nR 为分布电阻，这两部分随烟尘浓度、颗粒大小、烟尘性质、化学成分、温度、湿度等变化，同时与电除尘器类型、结构、大小、风速等都有关系，变化范围很大在 $20k\Omega \sim 10M\Omega$ [7]。 nC 是电极间的等值电容 [7]，一般较为恒定，大小随极间距离、极板面积和级间烟尘而有不同，一般范围是 $5000pF \sim 100000pF$ 。

3.4 静电除尘器电源装置节能分析

前面已经说明通过提高电晕电阻 r 的电流是提高除尘效果的有效手段，如图 3-4 所示，要提高静电除尘器除尘效果、降低自身电能消耗，就应提高电晕电流 I_r 的分量。

提高电压对除尘有益，但提高电压在提高除尘效果的同时、通过分布电阻 nR 上的电流也增加，造成除尘系统耗电大，这是除尘器由单相电源改为三相电源或高频电源后，除尘系统电能消耗增加的原因所在。

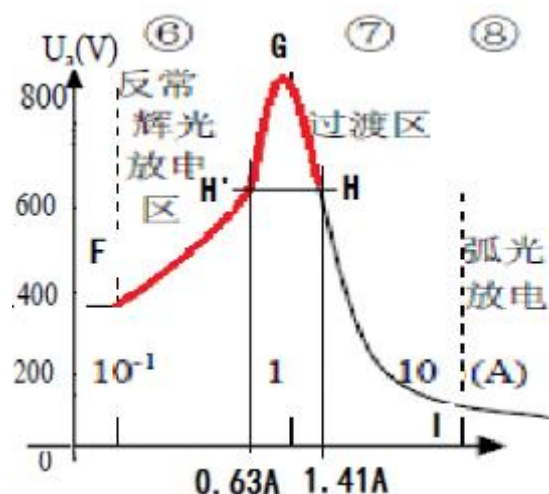


图 3-5 静电除尘器电源工作点

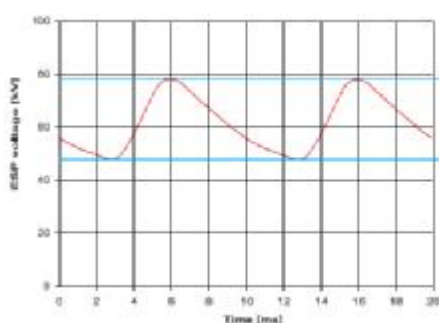
Fig. 3-5 Electrostatic precipitator power supply

图 3-5 是简化后的空气放电特性曲线（指数），图中 H' 和 H 点的电压相同，但对应的电晕电流分别是 0.63A（当量电流一下同）和 1.41A；相当于在同样电场电压下，H 点的电晕电流是 H' 的 2.24 倍（1.41/0.63），电晕电流增加 1.24 倍，有效的提高了对烟尘的荷电能力、特别是对末级电场细微颗粒烟尘的荷电能力，提高了除尘效果；由于 H' 和 H 点的电压相同、损失在分布电阻 nR 的能量相同，这样在提高有效电晕电流（除尘电流）又不增加无效的电能消耗。这就是不同特性除尘器电源除尘效果和电能消耗相差较大的原因。

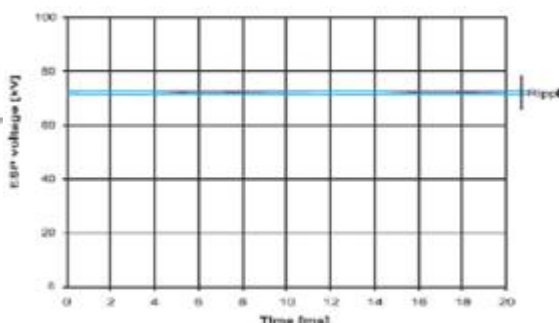
常规的单相、三相和高频电源一般工作在 H' 的左侧（目的是减少电场击穿），这样的电源减排效果一般、相对电能消耗较大。

完全工作在 H 点的电源实际很难实现，采用特殊控制技术可使电源工作在 H' 和 H 点之间、实际平均电压略高于 H 点的电压。现在只有柔性电源基本能控制在 H' 和 H 点之间工作，故采用柔性电源不仅能够提高减排能力、同时节约电能。

脉冲电源是利用电场击穿电压与电压波形有关的特性（图 3-2）实现的，其中基础电压较低（目的是降低 nR 的无效电流），利用高脉冲电压强化电场荷电能力、从而提高除尘效果。即低的基础电压降低无效能耗、高的脉冲电压提高了荷电能力，总体实现了除尘效果好、节约电能。



(a) 单相电源波形图



(b) 三相电源波形图

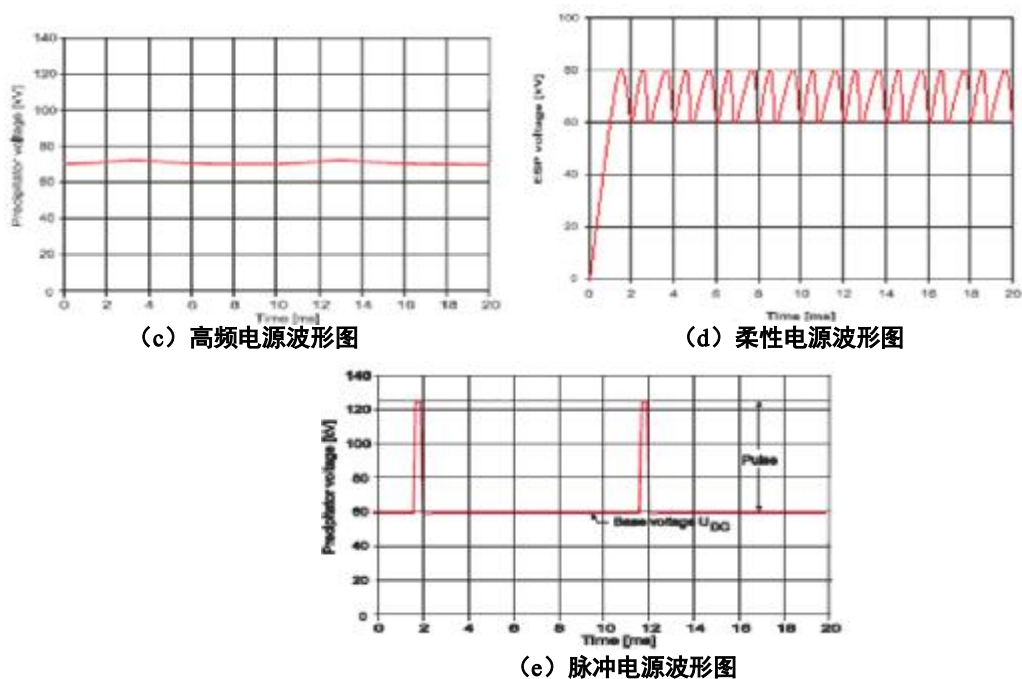


图 3-6 五种静电除尘器电源电压波形图

Fig. 3-6 Five kinds of electrostatic precipitator power supply voltage waveforms

图 3-6 是五种电源常见的输出电压波形。从图中看出，柔性和脉冲电源均是在基于恒定直流电源的基础上增加了脉动或脉冲电压而形成。柔性电源工作在 H' 和 H 点之间，而脉冲电源由的脉冲部分进行荷电（电场不击穿）、基础电压用于收尘。这两种电源实际是将荷电和收尘电场进行了分离，分别进行控制，从而实现了良好的减排、同时降低减排的电能消耗。从除尘系统耗电角度出发，柔性电源和脉冲电源可称为**节能型电源**，柔性电源和脉冲电源是现阶段最好的除尘器电源装置。

脉冲电源是一种优良的电源，由于国内除尘器本体采用大分区从而增加了电场分布电容、脉冲电源优势不明显；除尘器本体由于相关金属构件刚度差、在脉冲电流（ $>150A$ ）的扰动下，电晕级、收尘板振动改变了电场参数，使电源经常工作在大电流状态，电源故障率高；脉冲电源过高的价格也影响了其推广应用。

综合以上情况，现阶段即考虑减排效果好、又考虑节电效果好的电源应以柔性电源为主。

4. 静电除尘器电源装置配置

不同电源装置的价格不同（高频电源一般 20~30 万元/台、柔性电源一般 50 万元/台、脉冲电源一般 100 万元/台），结合前面电源特性分析和经济考虑，针对典型的五电场除尘器，电源配置如下：

4.1 烟尘比电阻适中的电源分配

图 4-1 是烟尘比电阻适中除尘器电源分配示意，其中第一、二电场优先采用高频电源（经济考虑），第三、四、五电场优先采用柔性电源，这样即达到基本的减排和能耗要求，也降低了一次投入成本。如从节能和长期经济性考虑全部采用柔性电源效果更好，增加的投资（相对高频）火电行业 2~3 年就回收成本，在水泥、钢铁行业由于电价高、增加的投资基本一年内收回。

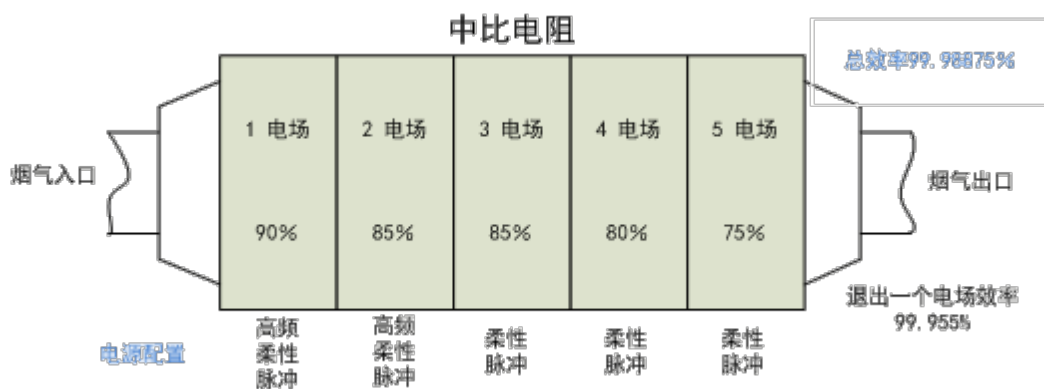


图 4-1 五电场静电除尘器电源配置（中比电阻）

Fig. 4-1 Five electrostatic precipitator power configuration (than resistance)

4.2 烟尘比电阻高的电源分配

图 4-2 是烟尘比电阻高除尘器电源分配示意，由于比电阻高的灰容易产生反电晕，三相、高频电源（工作在间歇供电方式减排达不到要求）不适应，从有效的减排和投资考虑，推荐全部采用柔性电源方案。

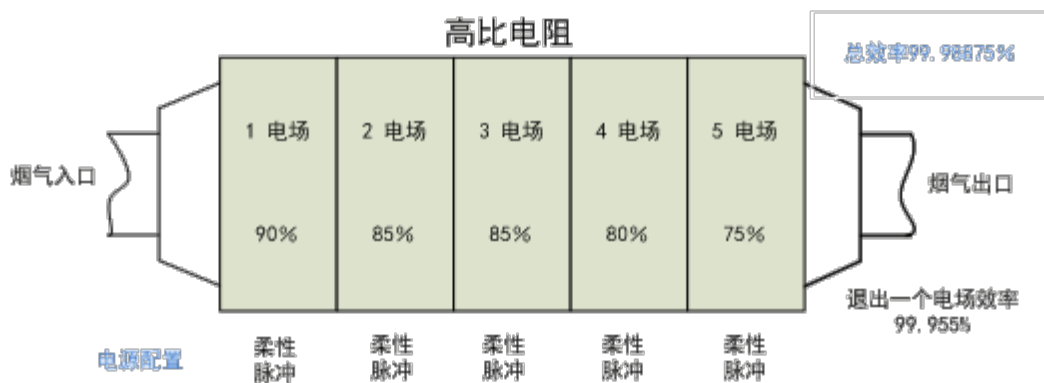


图 4-2 五电场静电除尘器电源配置（高比电阻）

Fig. 4-2 Five electrostatic precipitator power configuration (high resistance)

5. 结语

通过开展静电除尘器电源装置机理的研究，对静电除尘器不同电源装置的减排和节电性能有了清晰的认识，其中柔性和脉冲电源减排效果好、又节电称为**节能电源**；通过调研不同电源的应用情况，分析出脉冲电源使用效果不佳的原因。根据烟尘比电阻特性不同提出了采用不同电源的组合方案。表 5-1 是五种电源主要指标对比，供工程技术人员参考。

表 5-1 静电除尘器不同电源主要性能

Table 5-1. Electrostatic precipitator power main performance

电源种类	单相	三相	高频（国产）	柔性	脉冲
电源自身效率	低	中	高	高	高
电源重量	重	重	轻	轻	最重
除尘效率	低	中	中	高	高
比电阻高的灰	适应	不适应	适应	适应	适应
比电阻适中的灰	适应	适应	适应	适应	适应
除尘系统电能消耗	高	高	中	低	低
投资	=0.4 基准	=1.1 基准	基准	=2.5 基准	=5 基准

参考文献：

- [1] 《煤电节能减排升级与改造行动计划 (2014-2020 年)》的通知 发改能源[2014]2093 号
- [2] 《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2011)
- [3] 胡满银, 雷应奇, 尹琦等.电除尘器提效节能除尘效率公式的研究.环境工程. 2009, 27(3)
Hu Manyin Lei Yingqi Yin Qi .STUDY ON EP EFFICIENCY ENHANCING AND ENERGY-SAVING DUST
REMOVAL EFFICIENCY FORMULA . ENVIRONMENTAL ENGINEERING.2009, 27(3)
- [4] 王昊.针板间雾化电晕放电特性分析.河北大学硕士学位论文, 2011-05

作者简介：

岳建华(1961-2-1), 男, 河北张家口, 高级工程师, 从事电站电气和热控控制系统的研究和技术支持工作, 并承担电力驱动、电源技术等应用方面的研究。Email: yanjiaoyjh@vip.sina.com