

高压静电除尘器供电最优控制

张 平

(上海第二工业大学电子电气工程系, 200020)

摘 要

本文从静电除尘器(ESP)供电的基本方程出发,导出了高压供电的最优控制方程。通过参数辨识和求解该方程,可对最优控制电压作出估计,在此估计值下,能使ESP获得最大收尘效率。实验结果证明,由最优控制方程解出的控制电压与实际的最优操作电压完全吻合。

关键词: 高压静电除尘器供电,最大平均电晕功率,最优控制。

高压静电除尘器(简称ESP)通常由除尘设备和供电装置组成,如何使供电性能与投资庞大的除尘设备相匹配是提高收尘效率和经济效益的关键所在。

一、电除尘供电的最优控制方程

评价电除尘效果的一个最重要的指标就是电收尘效率。根据电除尘理论^[1,2],在电除尘通常使用的操作电压,即接近火花放电的电压范围内,电能与收尘效率存在着如下的基本关系:

$$\eta = 1 - e^{-(k_1/V_g) \cdot P_c} \quad (1)$$

式中, P_c 为电晕功率, k_1 为一与除尘设计有关的参数,而 V_g 代表气体流量。可见,收尘效率随电晕功率的增加而提高。另外,从图1所示的电场伏安特性得知,电晕电流随操作电压的增加而迅速增加,从而使电晕功率迅速增加。因此,为了获得最大的收尘效率,操作电压应尽可能高。

然而,电除尘的操作电压总要受到电晕电极和收尘电极间的火花放电影响而不可能任意提高。随着操作电压的提高,每分钟的火花放电次数迅速增加。火花放电现象将导致平均电压下降,使收尘效率降低。火花放电率遵循着如下的指数规律^[3]:

$$S = e^{b(V-V_1)} \quad (2)$$

式中, V 为操作电压, V_1 为始发火花放电电压,在此电压下的火花放电率被确定为每分钟一次。 b 为火花率指数,是一由ESP多因素确定的数量级为1的常数。

设操作电压为 V , 在此电压下的电晕电流为 I , 火花放电率为 S 。供电开始时,操作电压以 $V/\Delta T_0$ 的上升率增压,经 ΔT_0 达到恒值 V 。发生火花放电后,停止供电 ΔT_1 时

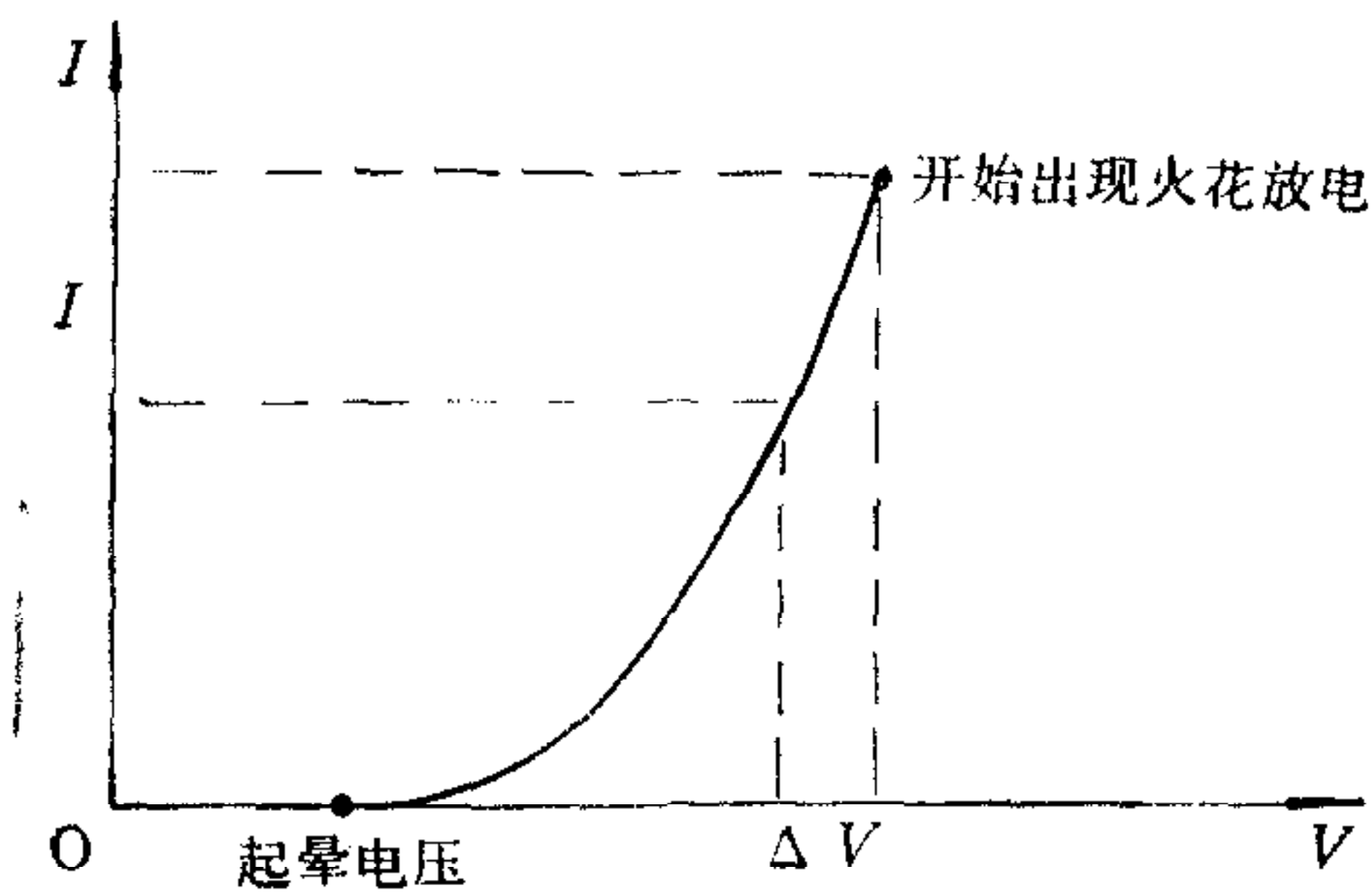


图 1 电场伏安特性

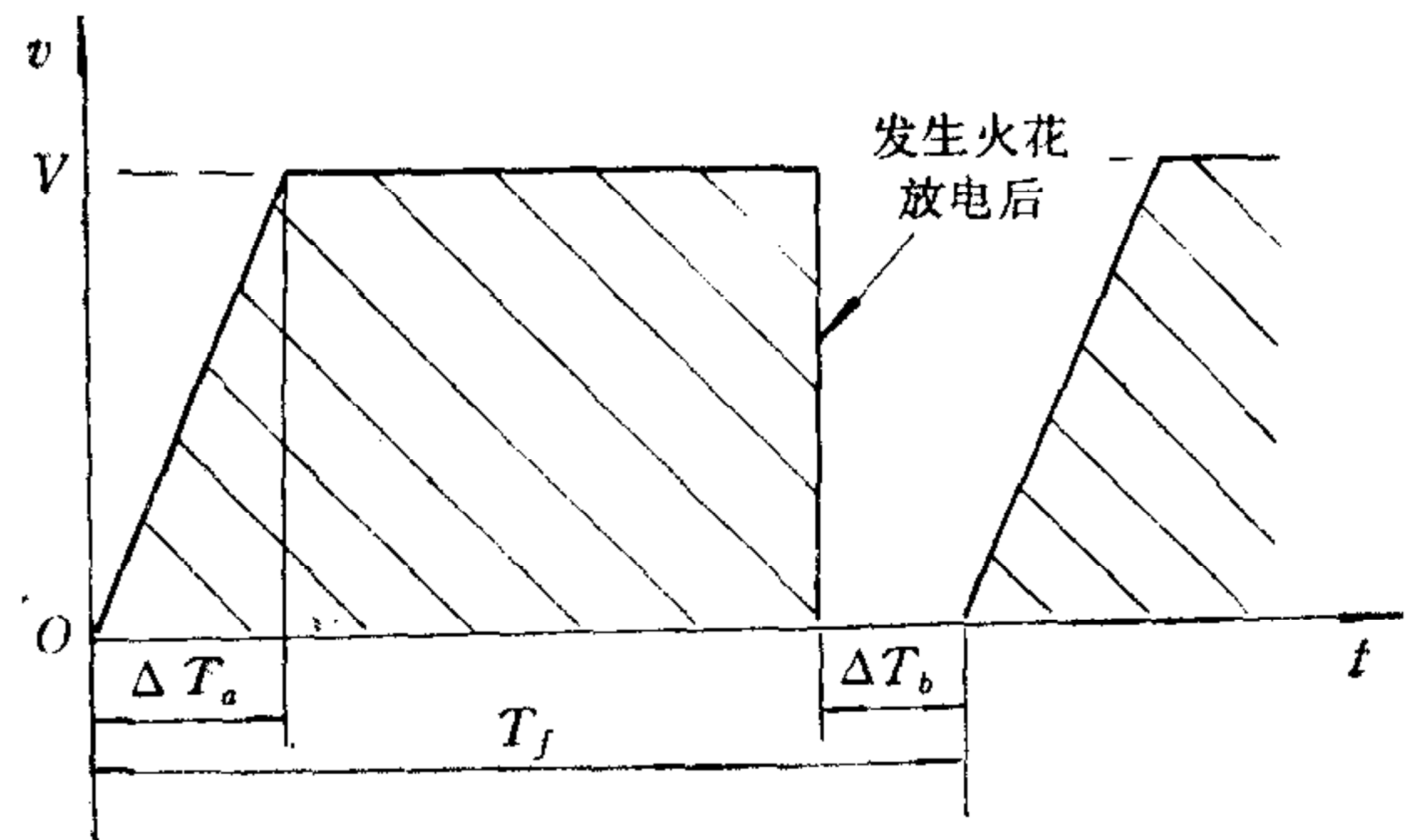


图 2 供电电压波形

间,以熄灭电火花,然后又以同样的上升率增压至 V 。图 2 为其中一个周期过程的电压波形^[3]。

在一个周期中的供电能量为

$$E_f = \int_0^{T_f} P_c dt = \int_0^{\Delta T_a} \left(\frac{V}{\Delta T_a} \cdot t \right) \left(\frac{I}{\Delta T_a} \cdot t \right) dt + \int_{\Delta T_a}^{T_f - \Delta T_b} V \cdot I dt + \int_{T_f - \Delta T_b}^{T_f} 0 \cdot dt = VI \cdot T_f - VI \cdot \left(\frac{2}{3} \Delta T_a + \Delta T_b \right). \quad (3)$$

那么,在一段时间 T 内,当火花放电率为 S 时,平均电晕功率为

$$\bar{P}_c = VI \cdot (1 - S \cdot \Delta T_p), \quad (4)$$

式中,

$$\Delta T_p = \frac{2}{3} \Delta T_a + \Delta T_b. \quad (5)$$

同时,由电场伏安特性知,电晕电流 I 是 V 的函数

$$I = I(V). \quad (6)$$

将式(2)与式(6)代入式(4),得

$$\bar{P}_c(V) = V \cdot I(V) \cdot [1 - e^{b(V-v_1)} \cdot \Delta T_p]. \quad (7)$$

求 \bar{P}_c 对 V 的导数并令其为零,得取得最大平均电晕功率的控制电压方程

$$\left(1 + \frac{b}{1 + \frac{V}{I} \frac{dV}{dI}} \cdot V \right) = \frac{1}{\Delta T_p} \cdot e^{-b(V-v_1)}. \quad (8)$$

引入电场特性系数

$$\theta = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{V}{I} \frac{dV}{dI} \right) \cong \frac{1}{2} \left(1 + \frac{V}{I} \frac{dV}{dI} \right). \quad (9)$$

式中, ΔV 、 ΔI 为 V 和 I 的变化值。于是,式(8)可写成

$$1 + \frac{b}{2\theta} \cdot V = \frac{1}{\Delta T_p} \cdot e^{-b(V-v_1)}. \quad (10)$$

可见,取得最大平均电晕功率的控制电压是直线 $(1 + bV/2\theta)$ 与衰减指数曲线 $\Delta T_p^{-1} \cdot e^{-b(V-v_1)}$ 的交点解 V_p^* 。

$$V_p^* = V(b, V_1, \theta) |_{\bar{P}_c = \text{Max}} \quad (11)$$

用同样的方法,可导出获得最大平均电晕电压(简称平均电压)的最优控制方程

$$1 + b \cdot V = \frac{1}{\Delta T_v} \cdot e^{-b(V-V_1)} \quad (12)$$

其中,

$$\Delta T_v = \frac{1}{2} \Delta T_a + \Delta T_b \quad (13)$$

式(12)与式(10)具有非常类似的解形式。

二、供电最优控制的实验结果

为了验证上述方程的正确性,构成由双 CPU 微机控制系统、可控硅升压整流装置和收尘电场^[1,2,4]组成的高压静电除尘器。在微机控制系统中,控制环 CPU 负责供电的闭环定值电压控制和反馈量的采集,而主机系统的 CPU 则进行数据处理、参数辨识和求解最优控制方程。收尘电场由二块平行的收尘电极(面积为 120cm × 200cm)和位于其中间的网刺形电晕电极组成,收尘电极与电晕电极间距为 16cm。

保持其他条件不变,改变电晕电极的网刺形状和大小,可观察到不同电场特性或负荷下的控制关系^[5]。通过测量得到在不同电晕电极下的火花放电率 S 、平均电晕功率 \bar{P}_c 、平均电压 \bar{V} 和电晕电流 \bar{I} 随操作电压 V 变化的实际数据。表 1 列出的是其中的二组数据。

表 1 实测数据 ($\Delta T_a = 1.92 \times 10^{-3}$ 分钟, $\Delta T_b = 1.67 \times 10^{-4}$ 分钟)

序号	第一组数据				第二组数据			
	操作电压 $V(\text{KV})$	火花率 S (次/分)	平均电晕功 率 $\bar{P}_c(\text{W})$	平均电压 $\bar{V}(\text{KV})$	操作电压 $V(\text{KV})$	火花率 S (次/分)	平均电晕功 率 $\bar{P}_c(\text{W})$	平均电压 $\bar{V}(\text{KV})$
1	20.31	0	20.60	20.31	23.25	0	10.49	23.25
2	21.30	0	23.73	21.30	38.02	0	95.90	38.02
3	22.18	0	29.74	22.18	40.74	0	108.86	40.74
4	22.27	4	30.24	22.18	41.61	0	113.62	41.61
5	22.36	32	33.93	21.67	42.45	2	115.14	42.39
6	22.37	8	35.06	22.20	42.95	0	118.69	42.95
7	22.41	6	35.06	22.28*	43.04	18	128.56	42.48
8	22.47	20	35.15	22.03	43.15	4	132.95*	43.02*
9	22.60	18	35.43	22.21	43.32	14	129.58	42.87
10	22.64	24	35.49*	22.11	43.36	92	114.59	39.45
11	22.73	50	30.98	21.37	43.81	114	113.64	39.17
12	23.01	92	19.91	20.63	43.96	214	94.32	35.06

根据第一、二列所示的 V 与 S 的实测值,按式(2)的模型结构,用单纯形搜索法进行非线性系统的参数辨识,可得火花率指数估计值 \hat{b} 和始发火花放电电压的估计值 \hat{V}_1 。又根据所测得的各点电压 V 和电晕电流 I 以及式(9),可得电场特性系数的估计值 $\hat{\theta}$ 。如表 2 的前三行所示。

将 \hat{b} 、 \hat{V}_1 和 $\hat{\theta}$ 代入式(10)和式(12),用牛顿-拉夫逊迭代法可求得获得最大平均电晕功率的最优控制电压估计值 \hat{V}_p^* 以及获得最大平均电压的最优控制电压估计值 \hat{V}^* 。从

表 2 被辨识的参数及最优控制电压

	第一组数据	第二组数据
$\hat{b}(1/KV)$	2.9	1.9
$\hat{V}_1(KV)$	21.5	41.3
$\hat{\theta}$	2.6	1.7
$\hat{V}_P^*(KV)$	22.85	43.17
$V_P^*(KV)$	22.64	43.15
$\hat{V}_V^*(KV)$	22.40	42.69
$V_V^*(KV)$	22.41	43.15

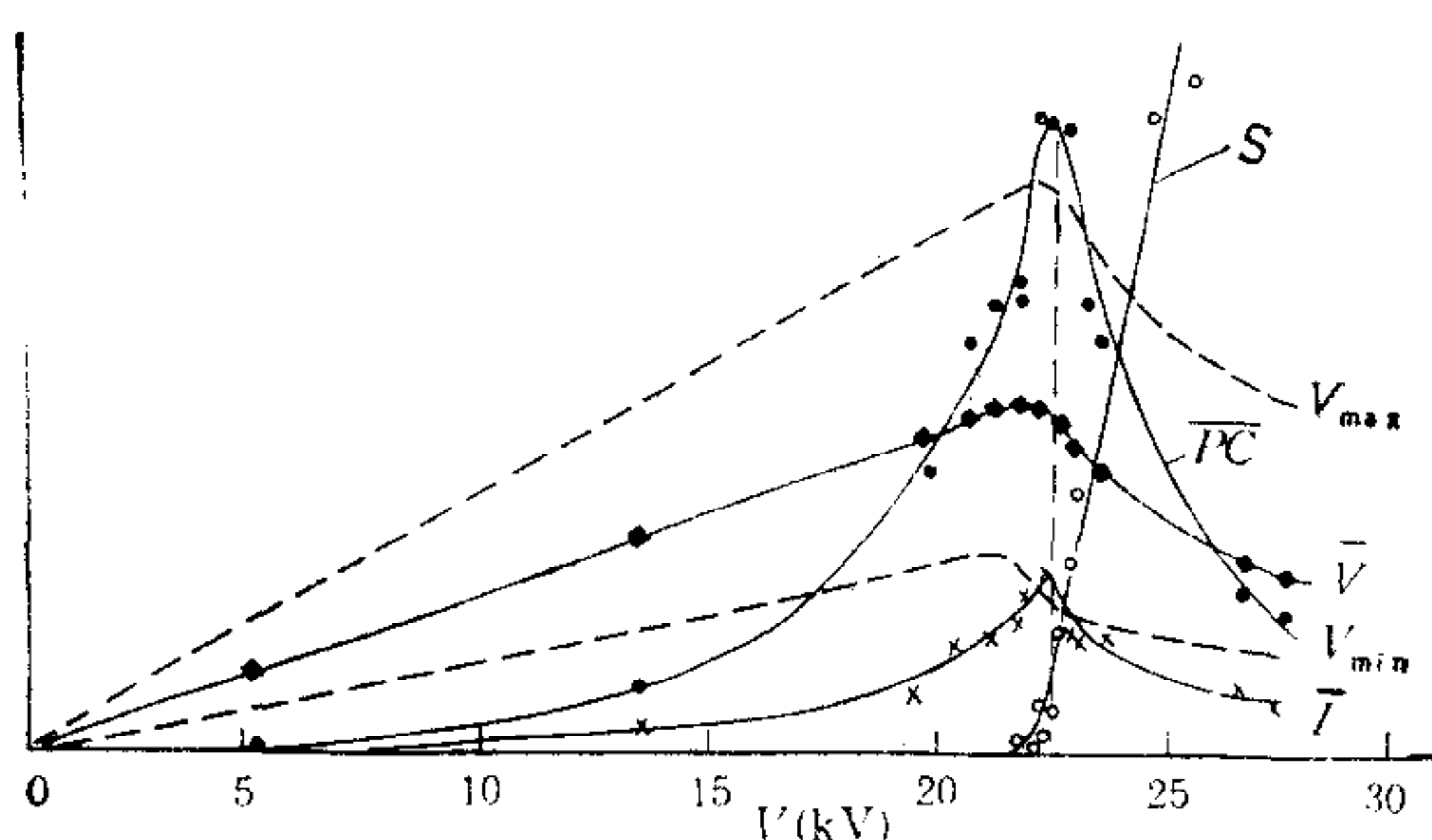
图 3 实测的 \bar{P}_c 、 \bar{V} 、 \bar{I} 、 S 与操作电压 V 的关系曲线

表 1 的第三、四列的实测 \bar{P}_c 和 \bar{V} 数据中, 不难找出实际的 V_P^* 和 V_V^* 。可见, \hat{V}_P^* 非常逼近 V_P^* , 而 \hat{V}_V^* 也非常逼近 V_V^* 。

图 3 所示的曲线为在第一组电晕电极条件下各实测值与操作电压的对应关系曲线。显然, 电晕功率和平均电压出现了明显的最大值。其中, 电晕功率呈现出锐利的峰值, 在峰值附近, 电晕功率增加率是操作电压增加率的 5 倍左右。

三、结 论

由理论推导和实验证实, 可得出以下对电除尘有用的结论:

- 1) 由最优控制方程得出的最优控制电压估计值与实际的最优操作电压非常吻合。
- 2) 电场或负荷的变化会引起参数 b 、 V_1 和 θ 的较大变化。在实际的电除尘供电中, 为了保证收尘效率最高, 必须根据变化的电场或负荷随时调整最优控制值, 即应采用自适应控制。

- 3) 获得最大平均电晕功率的操作电压与获得最大平均电压的操作电压非常接近。这说明在一定范围的电场下, 取得最大平均电压时, 可以近似获得最大平均电晕功率。这一点特别有实用价值, 因为前者的实现算法多而又较简洁。

参 考 文 献

- [1] White, H. J., Industrial Electrostatic Precipitation, Addison-Wesley, Reading, Mass., (1963), Chapter 7.2—7.3.

- [2] Oglesby, Jr., S., Nichols, G. B., *Electrostatic Precipitation*, Marcel Dekker, Inc., New York, (1978), 87—92, 119—123.
- [3] Lanese, P. M., *High Voltage Control of an Electrostatic Precipitator System*, U. S. Patent [19] 4290003, 1981.
- [4] Van Hoesen, H. E., White, H. J., *Automatic Control of Electric Precipitation Rectifiers*, AIEE Winter General Meeting, New York, (1958).
- [5] Watanabe, T., et al., *DC Corona Discharge Characteristics and Ion-Flow Distribution for Several Types of Rods under Low Pressure*, *IEEE Trans. Indus App.*, **IA-22**, (1986), 547—553.

POWER SUPPLY OPTIMAL CONTROL OF ELECTROSTATIC PRECIPITATORS

ZHANG PING

(Dept. of E. E. Engineering, Shanghai Second Polytechnic University, 200020)

ABSTRACT

From the fundamental relations in the power supply of Electrostatic Precipitators (*ESP*), an optimal control equation of power supply is deduced. By identifying parameters and solving the optimal control equation, the optimal power supply which will enable *ESP* to achieve and maintain the highest collection efficiencies can be calculated. Experiments have confirmed that the estimated optimal power supply is very close to the actual one.

Key words : Power supply of electrostatic precipitators; the greatest average of corona power; optimal control