

2 × 2MV 串列静电加速器金属梯感应 输电系统某些电性能的研究

王玉洪 郝俊源 邓明菊 蒲庆玉

(中国科学院近代物理研究所, 兰州)

文章着重介绍对金属梯的高压电极内拾压方法、短路电流计算和测量、感应电极、火花隙的设计及对直流电压梯度等电性能的研究, 并给出结果。

关键词 金属梯, 电性能, 短路电流, 感应电极, 火花隙, 直流电压梯度。

一、前言

金属梯、金属链是串列静电加速器的关键部件, 国际上早有研究^[1,2]。从七十年代以来, 我们对它们进行了全面研究^[3,4]。最近, 又为我所 2 × 2 MV 串列静电加速器^[5]研制了金属梯感应输电系统。在此, 简要叙述对它的某些电性能的研究。

二、对金属梯电性能的要求

金属梯的任务是把电荷从地端源源不断地输送到高压电极上去, 并使高压电极维持所需的电位。因此, 设计金属梯时, 在电性能方面应考虑以下几个问题:

1. 每个梯元件必须携带足够的电荷, 因此, 它的金属表面应足够大, 圆筒半径要尽可能长, 以使圆筒表面电荷密度低。圆筒外表面的光洁度要足够高, 以保证在电场很强时不放电。
2. 梯的运行速度应足够高, 以使单位时间内输送到高压电极的电荷足够多。
3. 圆筒间的火花隙要能耐很强的电场。设计时要保证沿梯的纵向电场低于芯柱的电场, 使梯子不是加速器放电的主要通道。
4. 选择圆筒材料时必须考虑这种材料要能耐火花腐蚀。
5. 绝缘子的表面造型要合理, 以防止沿绝缘子表面发生跨火花隙的弧放电和闪烁。
6. 轴承和销钉轴的端部应光滑。
7. 感应电极的设计要合理, 以减少梯元件对滚轮的火花击穿, 并防止梯元件所带的电荷在离开感应区时瞬间丢失。

设计时, 要把以上几方面的要求和机械性能方面的要求一起进行综合考虑。

三、高压电极内的拾压

由金属梯的工作原理^[6]可知, 若在高压电极内金属梯的下行侧再放一个加正电压的感

应电极 G_2 (图 1), 则在与上行侧相似的工作条件下, 金属梯的输电电流可以加倍。 G_2 上的电位是靠图 1 中所示的办法拾得的。

当梯元件带电荷进入高压电极后, 在等电位空间运行, 这时它相对于高压电极有一个电位。到达 P_3 时, 若没有电极 D , 元件上的电荷通过 P_3 会自动跑到 G_2 上去。这时, G_2 就相当于一个小高压电极, 随电荷的积累其电位很快升高, 它同下行的元件间就会发生火花放电。为此, 在与 P_3 相接的梯元件处放上与高压电极同电位的 D 。这样, 元件和 G_2 间的电荷分配就受到元件和 D 间电场的约束, G_2 的电位可控制为 Φ 。实际调节要麻烦得多, 因梯子运行时产生振动, 给调节带来困难。经验表明, 先令 G_1 和 G_2 与梯元件间的间距为 $\delta_1 = \delta_2$, 再调节 D 和梯元件的距离 δ_3 , 直到 G_2 不放电时为止。

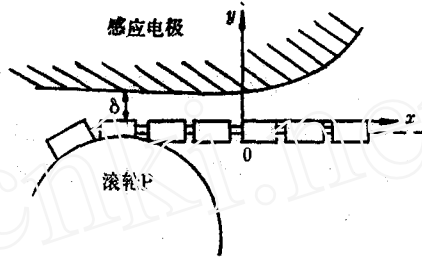
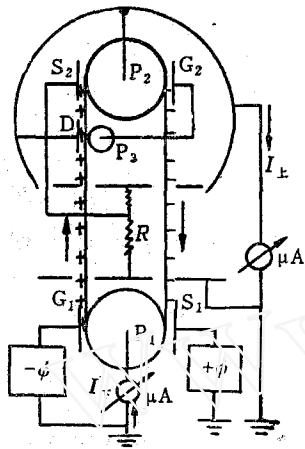


图 1 金属梯短路电流实验原理

图 2 电极剖面图示

G_1, G_2 ——感应电极; S_1, S_2, D ——抑制电极; P_1, P_2 ——上、下滚轮; P_3 ——拾压轮; R ——加速器芯柱分压电阻; μA ——直流微安表。

四、感应电极

感应电极 G 的造型, 特别是 G 出口处的造型十分重要。在感应区内, G 的内表面要和梯元件外表有相似的形状。梯元件携电荷在离开感应区的瞬间, 它和 G 之间的电容急剧减少。电容的这一变化是非线性的, 会立刻导致它们间的电场急剧增加, 引起放电, 使梯不能正常工作。故必须把 G 的出口形状设计得能抑制火花放电才行。

据以上分析, 在 G 的出口处内表面应是一个三维空间指数型的喇叭口^[7]。若用剖面图表示(示于图 2), G 的内表面随着沿金属梯的距离的增加成指数规律变化。

若 y 是从电极到元件的距离, x 是沿梯表面方向的距离, 座标原点选在感应区的终点 0, 则 G 和元件间的电容 C 的变化随 x 应是线性关系, 即

$$dC/C = k dx \quad (k \text{——常数})$$

因为 $C = k'/y$

所以 $dC/C = -dy/y$

则 $dy/y = k'' dx$

(k' , k'' ——常数), 积分得:

$$y = \exp(ax + b) \quad (4.1)$$

a , b 是决定于起始和边界条件的常数。对于我们的梯子

$$y = \exp(0.023x - 1.79) \quad (4.2)$$

当按指数要求严格加工 G 时, 受到经济条件的限制。经验表明, G 的形状只要近似地成指数形状就可以了。对抑制电极也进行了同样的处理。并注意了内、外电极的位置的匹配及间隙的调正, 终于消除了火花放电, 为金属梯输电能力的提高创造了关键条件。

五、短路电流

短路电流表征着金属梯的极限输电能力, 它是金属梯的关键指标之一。把高压电极通过一个电流表接地(图 1), 就可测其单位时间内输送到高压电极上的电荷——短路电流 I 。

当梯运行时, 每秒过 G_1 的感应区的节数为:

$$n = \frac{v}{g+l} \quad (5.1)$$

g , l 分别为相邻两圆筒间的间隙和圆筒的长度; v 为梯的线速度。

由于感应电极 G 同梯元件表面有相似的形状, 所以, G 和圆筒间形成一个同心圆筒柱电容, 由下式给出:

$$C_T = \frac{\epsilon l}{2.3 \ln D \cdot d^{-1}} \quad (5.2)$$

其中: D ——电极的直径($D = d + 2\delta_1$); d ——圆筒的直径; ϵ ——介电常数。

电极 G_1 同梯元件横档组成平板电容:

$$C_h = 0.0795 \frac{\epsilon l' h}{\delta_1'} \quad (5.3)$$

其中 l' ——横档宽度; h ——横档长度; δ_1' —— G_1 同横档的间隙。

每个圆筒只有一半面积带电, 一个梯元件上两圆筒所带电荷为 $q_T = C_T \Phi$; 每个横档可两面带电, $q_h = 2 C_h \Phi$; 每个梯元件一次带电为 $q_1 = q_T + q_h$ 。由此可得到金属梯单侧输电的短路电流:

$$I_{\text{单}} = n \Phi (C_T + 2 C_h) \\ = \frac{v \Phi \epsilon}{9(g+l)} \left(\frac{l}{2.3 \ln(d+2\delta_1) \cdot d^{-1}} + \frac{0.159 l' h}{\delta_1'} \right) \times 10^{-11} \quad (\text{A}) \quad (5.4)$$

公式中的长度单位为 cm, 电压单位为 V。当双侧带电时:

$$I_{\text{双}} = 2 I_{\text{单}} \quad (5.5)$$

对于我们这台加速器, 绝缘气体为 25% 的 CO_2 + 75% 的 N_2 , $P = 12.3 \times 10^5 \text{Pa}$, $\epsilon = 1$, 而 $l = 3.5 \text{ cm}$, $g = 0.75 \text{ cm}$, $l' = 3 \text{ cm}$, $h = 12.4 \text{ cm}$, $\delta_1 = \delta_1' = 0.6 \text{ cm}$, $v = 10 \text{ m/s}$, $\Phi = 40 \text{ kV}$, $d = 3.8 \text{ cm}$, 代入式(5.5)得 $I_{\text{双}} = 322 \mu\text{A}$, 和在同样条件下由实验所得结果 ($I_{\text{双实验}} = 315 \mu\text{A}$) 相比, 数值很接近。它们间的差别主要是计算时把内、外 C_h 看作相等引起的。内、外电极在横档处的复盖面是有差异的。这可在式(5.4)、(5.5)中乘一修正系数 $\xi \approx 95\%$ 。此外, 还有测量误差的贡献。用原式计算略偏高。

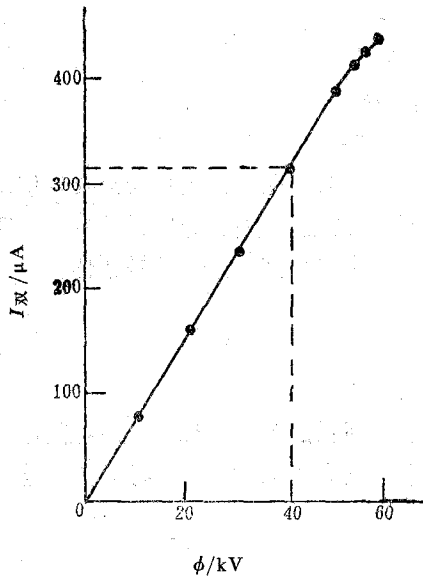


图 3 I 同 ϕ 的关系(实验结果)

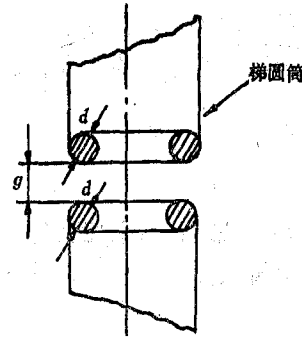


图 4 火花隙剖面图

通过实验测量了 I 同 v , Φ 及 P 间的关系, 部分结果示于图 3, 由此可见, 在 $\Phi \leq 50$ kV 时 I 同 Φ 成正比例。实验上所得到的最大短路电流 $I_{短}$ 为 $440 \mu\text{A}$ 。在单侧输电的情况下, 地端送的和高压电极收到的短路电流分别为 $I_{短下} = 299 \mu\text{A}$, $I_{短上} \approx 199 \mu\text{A}$ 。所以, 金属梯的电荷传输效率为 $\eta = I_{短上} / I_{短下} \approx 99.5\%$ 。

六、输电电流的稳定性和端电压纹波

金属梯是分节的, 这种分节效应可导致输电电流的不稳定, 从而引起高压电极电压纹波。设由高压电极到地之间共有 N 节梯元件, 梯运行时, 对高压电极来说元件进一节出一节, 元件总数不会变成 $(N+1)$ 节。于是, 输电电流的纹波^[8]为:

$$\Delta I / I = 1 / N \quad (6.1)$$

或

$$\Delta I = I / N$$

则高压电极电压纹波振幅为:

$$\begin{aligned} \Delta V &= \Delta I / C \omega, \quad (\omega = 2\pi n) \\ &= I(g+l) / 2\pi C N v \end{aligned} \quad (6.2)$$

对于近物所串列静电加速器, $C = 120 \text{ pF}$, $I = 400 \mu\text{A}$, 所以 $\Delta I \approx 3 \mu\text{A}$, $n = v / (g+l) = 235.3$, 则 $\Delta V = 19 \text{ V}$ 。可见, 金属梯输电时, 由于分节效应引起的高压电极电压纹波很小(约 1×10^{-5}), 比皮带的约小两个数量级。原因是高压电极对地的电容 C 对这一频率 ($n = 235.3$) 上的电流波动从而也是对电压波动有很好的滤波作用。但对慢漂移, 高压电极的 C 就无能为力了, 这可通过电晕三极管系统给予补偿。

七、火花隙的设计

每对相邻圆筒间组成一个火花隙, 起电容分压作用。根据静电加速器均压环的设计原

理^[9], 把每个圆筒端部做成圆环, 则相邻圆筒内的电场可按圆环对圆环的情形考虑(图4)。小直径 d 和圆筒间的间隙 g 有一最佳比例关系。由于 $(g+d)$ 等于常数, 当

$$r = g/d = 1.925 \quad (7.1)$$

时, 气隙间的电场最小。

但实际上, 在最佳比例 r 附近, 电场变化不大。所以, 选取 $g=7.5$ mm, $d=4.5$ mm, 即 $r=1.67$, 圆筒外径定为 $\phi 38$ 。

圆筒材料要求一方面它能耐火花腐蚀, 另外, 它的电子冷发射的逸出功较大。结果采用了来源方便的不锈钢(1 Cr 18 Ni 9 Ti)来铸造圆筒。

因为火花隙中存在电场, 为尽量避免沿绝缘子表面放电, 把绝缘子中间做成向里凹的。

在二高(高气压, 高电压)系统中进行了金属梯的直流耐压实验, 绝缘气体为 20% 的 $\text{CO}_2 + 80\%$ 的 N_2 混合气体, 气压 $P=12.67 \times 10^5$ Pa。结果, 一个火花隙可耐 125 kV, 若不计全电压效应, 电压梯度可达 2.8 MV/m。实际电压梯度已达到 2.06 MV/m 以上。这条梯子已在器上安全运行了三千多小时。

我们感谢英国 Daresbury 实验室 R. G. P. Voss 博士和 T. W. Aitken 博士, 原子能研究院余觉先同志, 上海原子核所张仲木等同志对本工作的热情帮助和指点。

参 考 文 献

- [1] Herb, R. G., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-18, No. 3, 71(1971).
- [2] Allen, W. D., Joyce, N. G., *Journal of Electrostatics*, 1, 71(1975).
- [3] 王玉洪等, 中国科学院近代物理所年报, 1982年, 172页。
- [4] 王玉洪等, 核物理动态, 1(1), 9(1979)。
- [5] Presented by Wang Yuhong, A Brief Report on 2 MV Tandem Project at I. M. P., Proc. of the Second China-Japan Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications. Lanzhou, 95(1983).
- [6] 王玉洪等, 原子能科学技术, 20(3), 262(1986)。
- [7] Aitken, T. W., Charlesworth, T. R., DL/NSF/TM 13. (1975).
- [8] Herb, R. G., *Nucl. Instrum. Methods*, 122, 267(1974).
- [9] 叶铭汉等, 静电加速器, 科学出版社, 北京, 1965年, 82页。

(编辑部收到日期: 86年11月26日)

STUDIES OF ELECTRIC PROPERTIES OF LADDERTRON CHARGING SYSTEM FOR THE 2×2 MV TANDEM ELECTROSTATIC ACCELERATOR

WANG YUHONG HAO JUNYUAN DENG MINGJU
(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou)

ABSTRACT

the voltage picking technique in the terminal electrode, the short circuit current, the design of the inductive electrodes, the spark gap and the voltage gradient are introduced. A method of calculating short current is given.

Key words metal-ladder, Electric properties, Short circuit current, Inductive electrodes, Spark gap, Direct-current voltage gradient.