

2 × 2MV 串列静电加速器金属梯 感应输电系统的机械性能的研究

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 2 × 2 MV 串列静电加速器的金属梯感应输电系统的结构、受力分析、拖动功率、绝缘子的张力计算、梯元件设计、解决梯子两边周长不等所带来的拖动问题及对振动的研究。

关键词 金属梯, 机械性能, 结构分析, 拖动功率, 绝缘子张力, 风阻损耗。

一、前言

在已往的静电加速器和串列静电加速器中, 多用皮带电晕输电系统输电, 它在很多方面不能令人满意。为此, 人们又研制出金属链^[1,2]、金属梯感应输电系统^[3,4]。它们和皮带相比具有很多优点^[5]。目前, 世界上新生产的串列静电加速器多用金属梯、链输电系统。原来采用皮带输电的加速器有的也改用金属梯输电。我们曾系统研究过金属梯、金属链感应输电系统^[5]。1983年为我所 2 × 2 MV 串列静电加速器设计了金属梯感应输电系统。结果是, 直流电压梯度达 2.06 MV/m, 速度 v 为 10—15 m/s, 短路电流高达 440 μ A ($v=10$ m/s 时), 下面简要叙述对它的机械性能的研究。

二、结构分析

金属梯感应输电系统是在金属链的基础上发展起来的。一条链子所带的电荷太少, 若用多条链系统又较复杂。用两条链子, 并在对应的两圆筒之间用一扁平的横档连接起来, 即成金属梯, 可带较多的电荷。出于电的和机械的两方面要求, 梯圆筒必须是分节的, 圆筒间由绝缘子和销钉轴进行连接。为减少梯元件在轮子上转动时销轴和绝缘子间的磨损, 它们间加放了干磨无油润滑轴承——DU 轴承。圆筒间的间隙叫火花隙, 各火花隙起电容分压的作用, 且能耐很强的纵向电场。梯元件就是综合了电性能和机械性能两方面要求的产物。

三、对金属梯机械性能方面的要求

由上所述, 金属梯在机械性能方面必须满足如下要求:

1. 重量要轻;
2. 梯的机械强度必须足够大, 以承受得住最大驱动力;
3. 绝缘子的机械强度也要足够大, 且不过分伸长;

4. 梯子要由相同的单元段组成, 以满足运行稳定、电流稳定性的要求;
5. 无油润滑轴承的寿命要长;
6. 风阻损耗要尽量低。

四、拖动功率和绝缘子张力的计算

1. 初始条件

2×2 MV 串列静电加速器采用的金属梯具有如下参数: 梯件总宽度为 199.6 mm, 节距为 42.5 mm, 每米梯子的质量为 $x=5.41$ kg/m, 线速度 $v=10$ m/s, 上下轮心距为 2.1 m, 加速器对输电电流的要求为 $I=320$ μ A。

2. 拖动功率

它由四部分组成:

(1) 反抗高压电极的电场运输电荷所需功率 W_1 。

高压电极的电压为 $V_0=2.3$ MV, 则

$$W_1 = V_0 I = 0.74 \text{ kW}$$

(2) 克服梯在高气压中运转受到的风阻所花的功率 W_2 。

对金属梯这一特定结构, 还没有现成公式对风阻进行计算, 一般是通过实验进行测量。这里借用皮带的风阻公式^[6]进行估算:

$$W_2 = 1.1 \times 10^{-9} P A v^3$$

$$A = n A_1, \quad n \text{——梯件个数}(=120)$$

$$A_1 = 1.58 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

\therefore

$$W_2 = 260 \text{ W}$$

(3) 拖动高压电极内发电机所需功率 W_3 。

$$W_3 \approx 275 \text{ W}$$

(4) 克服其它摩擦力所需功率 W_4 。

它包括滚轮、皮带轮和电动机风叶等摩擦力的贡献, 估计为 1 kW。

所以, 总功率为:

$$W_{\text{总}} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 \approx 2.5 \text{ kW}$$

由此, 选取 3 kW 的电磁调速异步电动机。

在实验中, 将一支电流表接在电机的电源回路中测量一相的电流。当梯不带电荷时, 相电流为 4 A。梯带电荷时, 相电流为 5.4 A, 根据电动机功率公式 $W'_{\text{总}} = \sqrt{3} U I_1 \cos\varphi$ (U ——线电压, I_1 ——相电流), 可得梯在所给条件下工作时的 $W'_{\text{总}} = 2.84$ kW ($\cos\varphi = 0.8$)。

实验值高出计算值 $W_{\text{总}}$ 的原因主要在于对金属梯的风阻效应估计不准。加速器的一般工作电压最高不过 2 MV, 选 3 kW 电机余量少。

3. 绝缘子张力

绝缘子的张力由以下几部分组成:

(1) 为使梯子运行所必须花的拖动力 F 。

$$F = 102 \frac{W_{\text{总}}}{v} \approx 250 \text{ N} \quad (3.1)$$

(2) 为使拖动轮上产生必要的摩擦力所施的预紧力 F_0 。

金属梯的工作条件和三角皮带的运行相似，故借用三角皮带拖动的关系式：

$$\ln T_1/T_2 = \mu \theta / \sin \alpha \quad (3.2)$$

其中： T_1 ——驱动边的张力； T_2 ——松边的张力； μ ——圆筒和滚轮的摩擦系数(=0.33)；
 θ ——梯绕滚轮的接触角(= π)； α ——圆筒和轮槽的接触半角(= 50°)。

圆筒在滚轮上的情况示于图 1。

所以

$$\ln(T_1/T_2) = 1.35$$

$$T_1/T_2 = 3.87$$

令

$$k = T_1/T_2$$

所以

$$F_0 = \frac{1}{2}(T_1 + T_2)$$

$$= \frac{(k+1)}{2(k-1)} \cdot 102 \cdot \frac{W_{\text{总}}}{v} \quad (3.3)$$

得

$$F_0 \approx 212 \text{ N}$$

所以

$$T_1 = 102 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \frac{W_{\text{总}}}{v}$$

$$= 337 \text{ N}$$

$$T_2 = \frac{102}{k-1} \cdot \frac{W_{\text{总}}}{v} \approx 87 \text{ N}$$

为了运行稳定，实际上取 $F_0 = 216 \text{ N}$ 。

(3) 梯绕轮子运动所产生的离心力 F_r 。

$$F_r = \frac{xv^2}{g} = 539 \text{ N} \quad (3.6)$$

g ——重力加速度(= 9.8 m/s^2)

(4) 梯子的重量引起的张力 F_G 。

它由底部为零到顶部最大成线性变化，每个梯元件重 230 g，共 120 件。

所以

$$F_G = 270.5/2 \approx 136 \text{ N}$$

所以

$$F'_{\text{max}} = F + F_0 + F_r + F_G \approx 1137 \text{ N}$$

每个梯元件有两个绝缘子，所以，每个绝缘子所受的最大张力为

$$F_{\text{max}} = \frac{1}{2} F'_{\text{max}} \approx 569 \text{ N}。$$

当金属梯在加速器上循环运转时，每个圆筒和绝缘子的张力成周期性地变化（图 2）。A，B 两点在紧边，C，D 两点在松边。其中受力最大的是 B 点，其次是 C 点，D 点受力最小。

根据 F_{max} 可选择绝缘子材料并决定绝缘子的危险截面和金属梯圆筒壁的厚度。

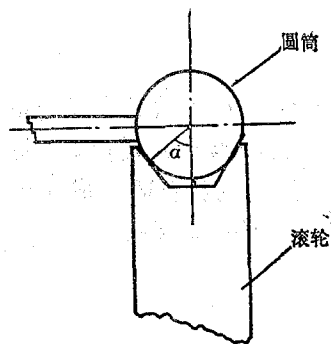


图 1 圆筒在滚轮上

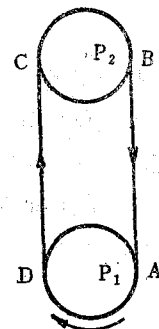


图 2 金属梯的循环运动
P₁, P₂——上、下滚轮。

五、金属梯的设计考虑

1. 圆筒和横档

考虑到梯元件的受力，又要尽量减少它的质量以减少梯振动时所积蓄的能量。取圆筒壁厚为 0.75 mm。从电的和机械拖动两方面要求出发，其直径定为 $\phi 38$ 。横档为中空扁管，壁厚为 0.5 mm，材料选不锈钢(1Gr 18Ni 9Ti)，它不仅能耐火花腐蚀，还有较大的电子逸出功。

所做的圆筒拉伸实验表明，每个圆筒在拉力为 6860 N 时才出现变形，强度足够。

横档和圆筒间是靠真空炉中的钎焊连在一起的，每个焊缝在 3920 N 的拉力时才被拉开。所设计的金属梯标准段示于图 3。图中仅给出主要尺寸。

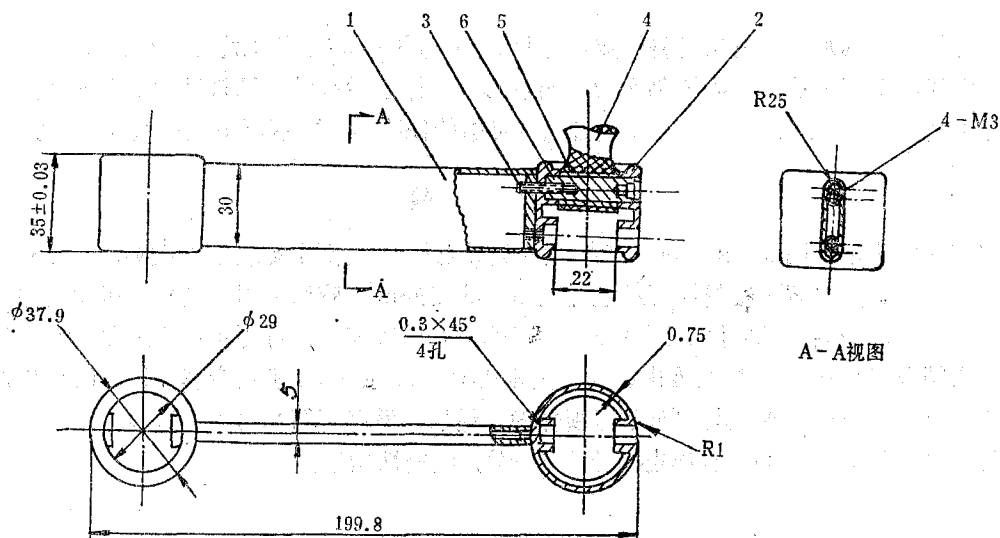


图 3 金属梯标准段

1——梯横档；2——梯圆筒；3——小螺栓；4——绝缘子；5——DU 轴承；6——销轴。

2. 绝 缘 子

曾先后对聚砜、尼龙 66、尼龙 1010、聚酰亚胺和 MC 尼龙进行了一系列机械拉伸实验，并在高压绝缘气体中和变压器油中进行了直流耐压试验。最后选 MC 尼龙作绝缘子材料。其抗拉强度 $\sigma_b = 8.8 \times 10^3 \text{N/cm}^2$ ，伸长率为 10%，材料合适，成本又低。所设计的绝缘子(图 4)，其危险截面是 $2 \times 0.88 \text{cm}^2$ ，具有足够的安全系数。它的中间向里凹是为了避免沿绝缘子表面放电。

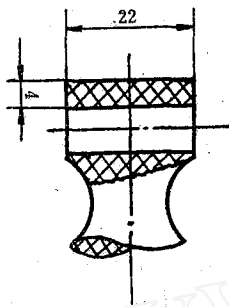


图 4 绝缘子

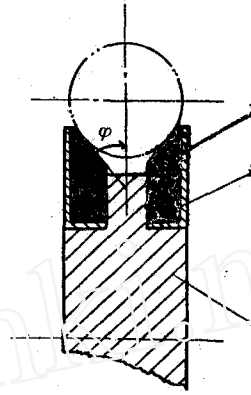


图 5 滚轮结构

1——帮圈；2——导电橡胶；3——骨架。

3. 销 钉 和 轴 承

销钉轴材料选 45 号钢，淬火。直径为 $\phi 8$ ，有十多倍的安全因子，表面光洁度大于 $\nabla 10$ ，装在里面的一端有一个 M3 孔，通过一个 M3 螺栓利用双螺母自锁原理将销钉轴固定。

无油润滑轴承是由三层材料做成：底材为 10 号钢板，在其上烧上一层紫铜，最外一层是含铅的聚四氟乙烯。润滑剂实为聚四氟乙烯。梯子运行时，销钉轴主要受剪切力，它本身不转。在 F_{max} 的作用下， $\phi 8$ 销钉轴有足够的保险系数。这已被拉伸实验所证实。

4. 滚 轮

滚轮结构示于图 5，和梯圆筒相接触的是导电橡胶，采用橡胶是出于拖动的要求，它的摩擦系数大，也有一定弹性可起缓冲作用。将配好的橡胶原料用模具加热压制成型——具有一定厚度的圈。把圈固定到事先加工好的铝合金底座上，再与轴进行装配，而后放到车床上精车出轮槽，轮槽角度由拖动的要求得 $\varphi = 40^\circ$ 。因轮子是金属梯运行时产生振动的来源之一，所以，加工装配时都必须仔细。最后，做静平衡和动平衡试验。结果，轮槽的径向跳动为 0.02mm ，轮圈电阻小于 $1 \text{M}\Omega$ ，耐磨性能好。

六、调节架的设计

为避免梯元件加工公差的累积，装配时先把每四个元件装在一起为一组，测量它们在

拉直情况下的两边长度，再将各组取长补短连在一起，检验整梯两边之差，结果仅为 0.06 mm。

但这样小的两边之差的存在，也会给梯子运行带来困难。若从动轮同轴，梯子运转时，周长长的一边必落后于周长短的一边，导致梯子的一边相对于另一边的滑跳，使梯两边受力不均，短的一边受力过大，这不仅使梯子运行不稳，而且使绝缘子很快疲劳。

为克服这一困难，设计了上自动调节架(图 6)。当边 A_1B_1 , C_1D_1 绕中点 O_1 , O_2 旋转角度 θ 时，矩形 $A_1B_1C_1D_1$ 变为平行四边形 $A_2B_2C_2D_2$ ，点 A_1, B_1 产生位移 $(A_2E + B_2F)$ ，称为调节量。同时， A_1D_1 和 B_2C_2 产生横向位移 A_1E 和 B_1F ，当调节量为 4 mm 时， A_1E 仅 0.01 mm。把大小相等的两块调节板分别放入平面 $A_1A_1'D_1D_1$ 和 $B_1B_1'C_1C_1$ 内，两从动轮的轴分别装在两调节板中心 O_3, O_3' ，使梯两边周长相等时两轴中心线重合。其中 O_1, O_1', O_2, O_2' 为支点。 $A_1, A_1', B_1, C_1, C_1', D_1, D_1'$ 为肩轴，放上滑动轴承，组成调节架经支点 O_1, O_1', O_2, O_2' 与底架相联。底架和基础座之间放有软橡胶做的十六个减震器，以隔离梯子的振动。

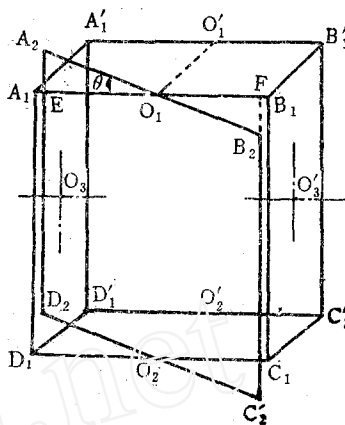


图 6 平行四边形调节原理

加速器芯柱的绝缘支柱是四根 $\phi 80$ 的有机玻璃，外加不锈钢均压环和骨架，梯子上下轮心距为 2.1 m，当 $v=10$ m/s 时，高压电极的振动不过 0.07 mm。梯子至今已安全运行三千多小时，证明调节架实用可靠。这台器已通过院级鉴定。

我们的工作曾得到英国 Daresbury 实验室 R.G.P.Voss 博士和 T.W.Aitken 博士，中国原子能科学研究所的余觉先同志、上海原子核所的张仲木同志和兰州化物所的有关同志的指点和热情帮助，在此向他们表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] Herb, R. G., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-18, No. 3, 71(1971).
- [2] Isoya, A., Proc. Int. Conf. on Thechnology of Electrostatic Accelerators (1973), section 4 Charging Systems.
- [3] Aitken, T. W. et al., DL/NSF/TM1 3. Daresbury Laboratory, The Design of a Laddertron Inductive Charging System.
- [4] 王玉洪等, 核物理动态, 1(1), 9(1979).
- [5] 王玉洪等, 原子能科学技术, 20(3), 262(1986).
- [6] 叶铭汉等, 静电加速器, 科学出版社, 北京, 1965年, 126 页。

(编辑部收到日期: 1986 年 11 月 26 日)

**STUDIES OF MECHANICAL PROPERTIES OF
THE LADDERTRON CHARGING SYSTEM
FOR 2×2 MV TANDEM ELECTRO-
STATIC ACCELERATOR**

WANG YUHUNG HAO JUNYUAN DENG
MINGJU PU QINGYU

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou)

ABSTRACT

The structure, the force of the laddertron, the drive power, the calculation of the insulator's mechanical tension and the design of the elements, as well as the problems of drive and vibration are described.

Key words Metal-ladder, Mechanical properties, Structure analyses, Driving power, Insulator's tension, Loss of wind resistance.