

## HI-13 串列加速器输电梯的研制

杨丙凡 周俊峰 关遐令 苏胜勇 秦久昌 张灿哲

(中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京, 102413)

输电梯是 HI-13 串列加速器的关键设备之一, 其主要部件尼龙绝缘子无油轴承等经反复试制, 性能已优于国外同类产品。研制过程中创立的输电梯组装工艺大大简化了调梯过程, 降低了横向摆度。3500 多小时的正式运行表明输电梯运行平稳, 高压性能良好。HI-13 串列加速器达到了非常良好的运行状态。

**关键词** 串列加速器 输电梯 尼龙绝缘子

HI-13 串列加速器充电系统的核心设备是美国 HVEC 生产的输电梯, 它是由 8000 多个金属部件和 1000 多个尼龙绝缘子组装成的一种软性环状梯。输电梯除了要源源不断地向高压头部输送电荷以建立头部静电高压外, 还被用作驱动头部发电机以满足头部设备(如: 充电电源、离子泵电源、四极透镜电源等)的供电要求。输电梯的性能好坏及运行的平稳与否, 对串列加速器的高压性能及运行效率起着非常关键的作用。由于没有输电梯备品, 而且输电梯价格昂贵(一条输电梯近百万元), 串列加速器实验室的科技人员自 80 年代末就开始了输电梯的国产化研制工作。

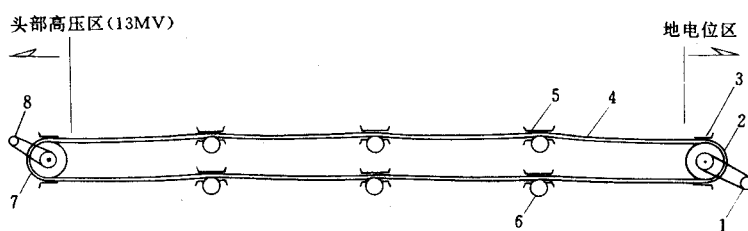


图 1 HI-13 串列加速器充电系统

Fig.1 HI-13 tandem accelerator charging system

- 1—驱动马达; 2—主动轮; 3—充电电极板; 4—输电梯;  
5—死区屏蔽板; 6—惰轮; 7—从动轮; 8—头部电机

收稿日期: 1995-02-20 收到修改稿日期: 1995-04-10

输电电梯总长 22.3 m, 环绕在两直径各为 51 cm、中心距为 10.3 m 的主从动轮上。其静态张力约为 5338 N(1200 磅)。输电电梯运行时由主动轮驱动, 以线速度 12.3 m/s 高速转动, 如图 1 所示。加速器正常工作时, 输电电梯处于高电压梯度区, 最大电压梯度达 1.84 MV/m。这就要求输电电梯必须运行平稳, 其横向摆度须在 1.5 mm 以下。组成输电电梯的主要部件之一——尼龙绝缘子必须具有很好的机械强度、耐磨损、耐高电压、抗击穿等。其转动轴承必须是特殊的无油轴承。

## 1 金属构件的研制

除尼龙绝缘子外, 组成输电电梯的金属构件有 5 种, 即: 圆筒、梯板、无油轴承、销轴和螺钉, 如图 2 所示。输电电梯的外形尺寸必须与美国产品相同, 以便与充电系统的其它设备相配。主要金属构件之一的圆筒是由不锈钢精密铸造而成, 在保证强度的情况下, 对其结构做了部分修改, 减轻了圆筒的重量。后来的对比破坏性试验表明, 新设计加工的国产圆筒, 其强度与美国产品相当。

无油轴承是输电电梯上一种要求特殊、容易磨损的构件。由于输电电梯在高电压梯度区高速运行, 故不允许使用油性润滑剂。吸取了无油轴承内部润滑材料易脱落造成无油轴承易磨损的教训, 采用了内表面压着一层细铜网以增加润滑剂(聚四氟乙烯加铅粉)的附着强度的钢板卷制轴承。几年的使用表明, 此种无油轴承优于美国产品, 价格不及美国产品的 1/20。

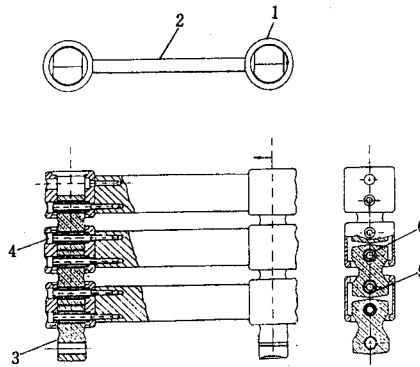


图 2 输电电梯主要部件及装配示意图

Fig. 2 Laddertron components

1——圆筒; 2——梯板; 3——尼龙绝缘子; 4——螺钉; 5——销轴; 6——无油轴承

## 2 尼龙绝缘子的研制

尼龙绝缘子是输电电梯的关键部件, 其研制难点在于, 尼龙绝缘子必须同时满足能耐高电压和有良好的机械强度。尼龙绝缘子两孔间距离只有 13.3 mm, 必须承受 52 kV 以上的电压, 其端部厚度只有 3.6 mm, 但要承受数百公斤的冲击力。在使用国外的两种尼龙绝缘子的过

程中我们发现,其性能都不太理想。其中一种韧性好、抗冲击、抗击穿,但硬度不够,易磨损、易拉长,这就使得输电梯易变形,摆度增大,从而使加速器的高电压性能变差;另一种尼龙子则强度高、硬度大、不易磨损和拉伸,因而梯不易变形,而且抗击穿,高压性能较好,但有一个重要缺点是“脆”,抗冲击能力差。HI-13 串列加速器的几次断梯事故均是由于这种尼龙子的断裂引起。为此,在研制尼龙绝缘子的过程中,我们力图能找到一种性能介于这两种尼龙子之间的材料,即:硬度大、不易磨损、抗拉伸、耐击穿,而又韧性好、抗冲击、不易断裂,经过与有关单位合作,对不同配方、不同工艺生产的多种 MC 尼龙材料进行了多次力学性能与电气性能的测定,终于找到了一种较为理想的材料,并用此材料做出成品与国外产品进行了性能对比试验。其结果列于表 1。

表 1 国产尼龙绝缘子(白色)与美国 HVEC 尼龙绝缘子(兰色)  
拉伸载荷与变形增量对比试验结果

Table 1 Stretch elonsation of nylon isulators

序号	不同载荷(kN)下的变形增量 $\Delta L$ /mm						最大载荷 /kN	最大 $\Delta L$ /mm	破坏部位
	10	2	4	6	8	9			
1	2.22	3.13	4.02	5.27	6.48	8.50	10.8	12.9	端面
2	2.09	3.02	4.02	5.22	7.40	9.73	10.3	12.7	端面
3	1.85	2.80	3.70	5.17	6.67	8.97	10.6	14.4	端面
4	1.82	2.73	3.63	4.90	6.17	8.33	10.6	12.5	端面
5	3.17	3.12	3.93	4.80	5.37	6.20	11.4	10.5	端面
6	2.07	2.90	3.77	4.60	5.07	5.80	11.3	9.43	端面
7	1.83	2.77	3.53	4.40	4.93	5.67	11.1	8.60	端面
8	1.57	2.60	3.40	4.40	5.40		9.4	6.80	端面
9	2.30	3.33	4.20	5.03	5.53	6.13	12.2	12.60	端面
10	2.12	3.15	3.93	4.67	5.17	5.90	11.2	9.17	端面

注:1-4号为国外尼龙绝缘子,5-10号为国内产品

从测试结果可明显看出:在相同拉力的情况下,美国尼龙绝缘子的变形增量(伸长值)明显大于国产尼龙绝缘子,在 10 kN 力作用下美国尼龙子的平均伸长值为 8.88 mm,而国产尼龙子的平均值仅为 5.94 mm,相当于美国产品伸长值的 67%;能承受最大载荷的平均值,美国尼龙子是 10.6 kN,国产尼龙子为 11.1 kN,比美国产品增大约 5%。从最大载荷时形变增量更可明显看出国产尼龙子的抗拉伸性能,其变形增量远小于美国尼龙子。

高电压试验表明,两种尼龙子的击穿电压均大于 20 kV/mm,完全满足了加速器的实际需要。由于尼龙材料的温度系数较大,为充分保证加工精度,尼龙绝缘子的加工要求在恒温车间进行;使用前需先进行真空干燥除湿除气。

### 3 输电梯的组装工艺

尽管输电梯的每个元部件都要严格按图纸加工,且其精度要求很高,但若随意组装,9000 多元件装在一起形成的输电梯累计误差将使梯无法实际运行,其横向摆度可能十几乃至几十

倍超标。为使输电梯横向摆度达到要求值 1.5 mm 而进行的输电梯摆度调整是一件十分劳累而耗时的的工作,1984 年加速器安装调试期间,第一次调整输电梯摆度,美国专家现场亲自参加,调整历时一个多月,只把摆度调到 60 格相当于 1.52 mm。为此,我们研究出了一种自己的组装新工艺<sup>[1]</sup>。利用此工艺在 1994 年 3 月组装了一条完全国产化输电梯。在未做任何调整的情况下,其横向摆度就好于要求值,达到了 1.2 mm,运行非常平稳,是串列加速器投入运行以来没有过的,达到了国际先进水平。图 3 是国产输电梯在加速器上测得的横向摆度曲线,1# 是初装上的曲线;2#、3#、4#、5# 是试运行过程中,35 h 内经不同的磨合时间后测出的曲线。图 4 为输电梯运行 800 h 后,第一次检修时横向摆度调整曲线。

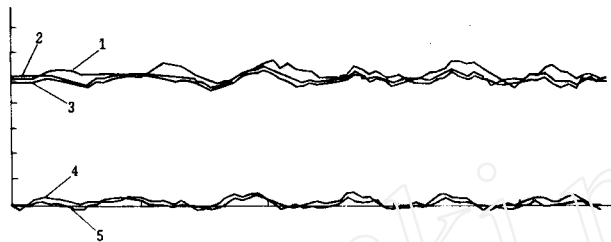


图 3 首次装上串列加速器的国产输电梯的横向摆度变化曲线

Fig. 3 Laddertron transverse runout curve without adjustment

1——初装未作任何调整;2、3、4、5——分别为运转 6、9.5、21.5 和 33.5 h 后测得的摆度曲线;

$\Delta_1 = 70$  格;  $\Delta_2 = 60$  格;  $\Delta_3 = 55$  格;  $\Delta_4 = 45$  格;  $\Delta_5 = 52$  格(1 格 =  $0.001'' = 0.0254$  mm)

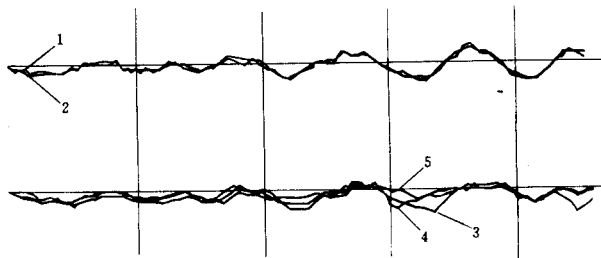


图 4 运行 800 h 后国产输电梯的横向摆度调整曲线

Fig. 4 Laddertron transverse runout curve after 800 h operation

1、2——开钢筒后未作任何调整;3、4、5——分别为调整三次后测得的摆度曲线;

$\Delta_1 = 90$  格;  $\Delta_2 = 95$  格;  $\Delta_3 = 75$  格;  $\Delta_4 = 70$  格;  $\Delta_5 = 50$  格(1 格 =  $0.001'' = 0.0254$  mm)

#### 4 输电梯运行状况

一条新的输电梯初次投入运行,有一个磨合过程。一则尼龙绝缘子在 5338 N(1200 磅)的张力下会有所伸长;其次,无油轴承与销轴之间的转动磨擦使轴承内壁上的聚四氟乙烯及铅粉更加平滑紧密,从而产生小小的间隙,输电梯也会慢慢伸长。运行初期伸长较快,而后便逐渐稳定。到 1994 年底,新梯已运行了 2900 h,其累计伸长约为 22 cm,相当于美国梯伸长值的 50% 左右。尼龙绝缘子两侧面磨损轻微,整梯未产生以前常出现的平行四边形变形,运行平

稳,加速器高压性能良好,最高头部电压锻炼到 12.62 MV,性能稳定。11月下旬开始,加速器基本载束运行在 11-12.32 MV,最高供束电压 12.32 MV,连续运行 21d 未出现任何打火现象,95年元月加速器在头部电压超过 12 MV(12.12-12.49 MV),连续运行 120 多小时未发生击穿,这都是以前从未有过的,充分说明输电梯仍处在良好工作状态。根据以往的经验,此梯仍可继续运行 3000-4000 h,预期寿命好于美国 HVEV 产品。

在输电梯运行了 2900 h 以后,专门进行了短路电流测试,以检查其电荷输送能力。HI-13 串列加速器采用的是静电感应充电法,头部和底部各有一对  $\pm 50$  kV 的充电电源。感应板与输电梯之间的距离为 5 mm 左右。底部充电为上行充电,即输电梯将正电荷由底部送到头部;头部充电为下行充电,即输电梯将负电荷由头部带到底部(见图 1)。两种充电方式可独立使用,但一般都是采用双向充电的方式。对于 HI-13 串列加速器,充电电流大于 200  $\mu$ A 即可满足加速器的需要。表 2 是国产输电梯短路电流实验的测量结果。

表 2 国产输电梯短路电流实验的测量数据

Table 2 Short circuit charging current

充电控制/格	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
上 充电电流/ $\mu$ A	20	45	72	97	122	145	172	193	212	223
下 充电电流/ $\mu$ A	18	40	60	82	102	123	144	162	175	

从测量结果可看出,底部最大充电电流可达 223  $\mu$ A,说明输电性能良好。而头部充电则在充电控制 900 格以后出现了充电电流不稳现象,其原因一般是充电板上有毛刺,因而产生对输电梯的放电,这只要将极板略加打磨便可解决,并非输电梯本身的原因。双向充电的测量结果与两单边充电测量结果相符,说明国产输电梯能充分满足 HI-13 串列加速器的运行要求。

国产梯自投入运行以后,经受了较为严格的考验,曾有一段时间,由于异物掉落在加速器钢筒底部未能及时发现,引起加速器横向击穿严重,在一个月左右的时间内打火达 200 多次,击穿时,端电压从 8.9MV 至 11MV、12MV 不等。但直到 1994 年底,只出现过二个尼龙子断裂和一个尼龙子有体击穿现象。经过进一步的观察分析认为,此尼龙子很可能是加工前未按要求严格选料,将尼龙浇注时容易产生气泡及密度不均的料头、料尾加工而成。更换这 2 个尼龙子后,加速器又运行了近 1000 h,到目前未发现异常情况。

## 5 小结

HI-13 串列加速器国产化输电梯研制的目的主要是为了提供备件,节省经费,提高运行效率。由于串列加速器上的输电梯是长期连续运行的设备,其主要部件为尼龙绝缘子,无油轴承,销轴等,是易损部件,平均寿命只有 6000 h 左右,若无备件,就只能将旧梯从加速器上撤下解体,清洗主要金属部件后与新购置的尼龙子,无油轴承等重新组装后再装入加速器,这一过程一般要一个月的时间,在这期间实验人员只能等待,大大影响了加速器的利用效率;若有备件,则只是个撤换过程,一天时间就能完成,其好处是明显的。

进口的整梯价格,目前已为百万元人民币以上,而国产梯的价格只有 27 万,可节省 70 万以上。重要的是易损部件尼龙绝缘子、无油轴承和销轴的国产化解决了历年靠进口的局面,就这 3 项更换一次就可节省人民币 44 万元,且性能已赶上甚至超过进口产品,这对长期运行的

HI-13 串列加速器及国内类似设备的运行维修有着重要意义。

### 参 考 文 献

- 1 Yang Bingfan, Guan Xialing. "Progress Report" Beijing National Tandem Accelerator Laboratory. 1990 - 1991. 144 - 146.

## LADDERTRON DEVELOPMENT IN BEIJING HI-13 TANDEM ACCELERATOR LAB

Yang Bingfan Zhou Junfeng Guan Xialing Qin Jiuchang

Zhang Canzhe Shu Shenyong

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275 - 52, Beijing, 102413)

### ABSTRACT

New laddertron is developed in Beijing HI-13 tandem accelerator lab. A special emphasis is put on making nylon link and bushings, and good results is achieved. The test operation of more than 3500 h has shown a very satisfactory performance of the laddertron. The predicted life time could be longer than ever before.

**Key words** Tandem accelerator Laddertron Nylon link

---

### 通用高纯锗 $\gamma$ -X 谱仪系统通过部级鉴定

由核技术应用所研制的“通用高纯锗  $\gamma$ -X 谱仪系统”通过了部级鉴定。对 2 套谱仪系统性能进行的现场测试表明:测试结果好于美国同类商品谱仪的性能指标。

该谱仪适用于核物理、放射化学与核化学研究,中子活化分析,放射性同位素活度测量,反应堆、核电厂、核爆破、环境监测,地质勘探及矿样分析等。

我国对此类谱仪的需求量很大,过去一直依赖进口。这项科研成果填补了国内空白,并在性能、价格等方面明显优于进口产品,在国内推广应用前景广阔。

中国原子能科学研究院科技信息部供稿