

# 直流电压下复合绝缘子的自然积污试验

李震宇, 梁曦东, 王 彬, 周远翔

(清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084)

## Natural Pollution Deposit Test of Polymeric Insulators Operated under DC Voltage

LI Zhen-yu, LIANG Xi-dong, WANG Bin, ZHOU Yuan-xiang

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

**ABSTRACT:** By use of self-built natural pollution test station, the experimental investigation of natural pollution deposit (NPD) features of polymeric insulators operated under DC voltage in northern China's inland areas for two contaminated seasons is carried out. In this paper, the surface pollution deposit law of DC insulator shed, the influence of rainfall on pollution deposit (equivalent salt deposit density, ESDD) and non-soluble deposit density (NSDD), unevenness of pollution between top and bottom surface, dust to salt ratio of insulator surface, the orthogonal ratio of ESDD to NSDD and so on are analyzed. Research results show that not all rainfall achieves obvious purging efficiency on pollution deposited on insulator surface; both the amount of precipitation and rainfall intensity are important factors influencing purging effect; the maximum pollution degree of polymeric insulator occurs before rainy season in the summer, but not before spring rain. It is recommended that these features of pollution deposit should be adequately considered in the DC outdoor insulation design.

**KEY WORDS:** DC polymeric insulator; natural pollution deposit; equivalent salt deposit density; non-soluble deposit density; rainfall; high voltage and insulation technology

**摘要:** 利用自建的自然污秽试验站, 对自然条件下带直流电压运行 2 个积污季节的复合绝缘子的积污特点进行了试验研究, 分析了直流绝缘子的伞裙表面积污规律、降水对积污(等值附盐密度(equivalent salt deposit density, ESDD)和不溶性污秽物质密度(non-soluble deposit density, NSDD))的影响, 表面积污不均匀度、表面灰盐比、ESDD 和 NSDD 的直交比等。研究表明: 并不是所有降水都会对绝缘子表面污秽产生明显的清洗效果; 降水量和雨强均为清洗效率的重要影响因素; 复合绝缘子最大污秽度出现在夏季多雨季节来临前。建议直流外绝缘设计中充分考虑这些积污特点。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50437030)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50437030).

**关键词:** 直流复合绝缘子; 自然积污; 等值附盐密度; 不溶性污秽物质密度; 降水; 高电压与绝缘技术

## 0 引言

绝缘子积污特性的研究是电力系统外绝缘研究的一项基础工作, 对外绝缘的设计、运行和维护均有重要意义<sup>[1-5]</sup>。因此, 在国际标准、国家标准及行业标准中绝缘子积污特性占有重要地位<sup>[6-9]</sup>。直流电压下, 绝缘子积污更为突出, 致使国内外直流工程在投运后不断发生污闪事故。自复合绝缘子应用到直流线路以后, 直流线路污闪事故大为降低, 复合绝缘子也成为污秽地区直流外绝缘的最佳选择<sup>[10]</sup>; 但对于直流复合绝缘子的选择和使用, 国际标准和国内标准都很少涉及, 有关直流复合绝缘子的标准也不多<sup>[11]</sup>。IEC TC36 自 1997 年开始对 IEC 815-1986 进行修订, 并将直流复合绝缘子作为一个独立的部分, 即 IEC 60815-5<sup>[9]</sup>。2004 年后, 我国开始关注 IEC 60815 的修订, 结合国内的研究成果对 GB/T 16434-1996 进行修订<sup>[4,6,12]</sup>, 也将把直流复合绝缘子作为独立的部分。

国内外的科研工作者对在线路上挂网运行和自然污秽试验站运行的绝缘子的积污特性进行了大量研究, 总结出了一系列绝缘子的积污规律和爬距选择经验<sup>[1,3-5,6-19]</sup>, 但这些研究工作主要是在交流电压下进行的, 且对瓷和玻璃绝缘子研究较多。近 10 年来, 国内外对交流复合绝缘子的积污规律也进行了大量的研究<sup>[13-15]</sup>。2002 年国内在黄渡和郭家岗建立了自然积污站, 研究了直流复合绝缘子的积污特性<sup>[20]</sup>, 但目前尚无公开发表的文献。国外对直流复合绝缘子积污规律的研究也并不多见<sup>[5,14]</sup>, 这使得相关标准的修订缺少基础数据。

本文利用清华大学自建的自然污秽试验站,对自然条件下带直流电压运行2年的复合绝缘子的积污特点进行了试验研究,研究结果可为相关标准的修订和外绝缘的选择提供参考。

## 1 自然污秽试验站的试验条件与试品

### 1.1 气候环境条件

试验站位于北京市西北部,北纬 $39.9^{\circ}$ 、东经 $116.5^{\circ}$ 附近。试验站东侧紧邻某110kV变电站,附近约200m范围内有公路、铁路、建筑工地,试验站南约200m处有一锅炉房,锅炉房在冬季供暖期排放大量烟尘。在积污期该地区主导风向为西北风向;受周围建筑和树木的影响,测得试验站局部区域的主导风向为东南风向,风速一般不超过3m/s。

北京处于暖温带半干旱半湿润大陆性季风气候区,春季短,干旱多风,冬季长,雨雪稀少。降水年际变化大,各季降水不均;夏季降水集中,降水量占75%,秋季降水量占13.8%,春季降水量占10%,冬季降水量占1.2%;雨季一般在每年的5—8月,在这期间降雨量占全年的80%~90%,降水强度较大<sup>[21]</sup>。该地区大气中的主要污染物为可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>),其次是SO<sub>2</sub>。2003—2005年北京大气污染指数在III级以上的天数约占总天数的40%<sup>[22]</sup>,该地区的大气污染具有明显的季节性差异,春季和冬季大气污染较重,夏季污染较轻。试验站周围大致处于III级污区。

### 1.2 试验站设备

试验站建在4m高的平房顶上,绝缘子悬挂点离地面约6m,离房顶约2m。交流试验电源为25kV/50kVA变压器,利用直流电容器和硅堆将交流高压经半波整流后提供直流试验电源。试验站配有气象监测系统,能对温度、湿度、风向、风速、太阳辐射强度和雨量等气象参数进行实时监测。本文中提及的降雨量是指月内日降雨量的累积值,单位mm;雨强是指不间断降雨过程中降雨量与降雨时间的比值,单位mm/h。

### 1.3 试品

试验站悬挂的绝缘子均为硅橡胶复合绝缘子,直/交流电压下各15支。所有绝缘子的结构高度均为66cm,爬电距离88cm,大小伞结构(5大伞4小伞,大伞直径10cm,小伞直径8cm)。直流运行电压为-28.6kV,直流爬电比距30.8mm/kV;交流运行电压为20.2kV,交流统一爬电比距43.6mm/kV

(相对地),换算到习惯使用的额定线电压下的交流爬电比距为25.2mm/kV(线电压),基本相当于III级污区的外绝缘配置水平<sup>[6]</sup>。直/交流绝缘子的开始运行时间分别为2004年9月底和2004年6月中旬。从高压端起仅对绝缘子大伞进行编号。

## 2 污秽测量方法

### 2.1 试验数据

直流复合绝缘子投运时已是秋季少雨期,第1次污秽测量时间是2004年12月初,距投运时间约60d。此后每月底或月初测量1次污秽度,每次测量1、3和5号伞裙的污秽度,取平均值作为测量污秽度。本文给出的数据截至2006年2月底。

### 2.2 等值附盐密度的测量方法

等值附盐密度(equivalent salt deposit density, ESDD)的测量参照文献[6,23-24]进行。任何一次测量中均采用100ml去离子水(20℃下其电导率小于 $2\mu\text{S}/\text{cm}$ ),测量面积大约 $80\text{cm}^2$ 。

### 2.3 不溶性污秽物质密度的测量方法

不溶性污秽物质密度(non-soluble deposit density, NSDD)的测量方法是:将已测量ESDD的含有污秽的水使用漏斗和预先干燥且已称重(质量 $m_0$ )的滤纸过滤;将含有污秽的滤纸干燥,然后称重(质量 $m_1$ )。NSDD即为 $1000(m_1-m_0)/A$ ,其中 $A$ 为收集污秽的绝缘子伞裙表面积,单位为 $\text{cm}^2$ 。

需要特别指出的是,烘干滤纸的温度和时间长短及干燥后的称量时间间隔直接影响到 $m_0$ 和 $m_1$ 。对于污秽较轻,即 $m_0$ 与 $m_1$ 相差不大时,影响至关重要。经长期试验探索,形成了一套成熟的测量流程:将清洁的单张滤纸置于干燥箱中干燥5~10min后,立即用镊子取出置于数字天平上,读取1min时的读数作为 $m_0$ ;将含有污秽的滤纸干燥10min后,读取1min时的天平示数作为 $m_1$ 。试验中干燥箱温度保持在100~110℃。

过滤前5min的干燥时间已能使滤纸充分干燥;过滤后因滤纸被污液浸湿,需干燥的时间稍长,试验表明,10min的干燥时间能保证过滤后的滤纸充分干燥。

## 3 直流复合绝缘子表面积污状况

### 3.1 绝缘子伞裙积污

图1和图2分别为直流复合绝缘子表面污秽度ESDD和NSDD随时间变化的情况,绝缘子刚投运时表面清洁,污秽度为0。

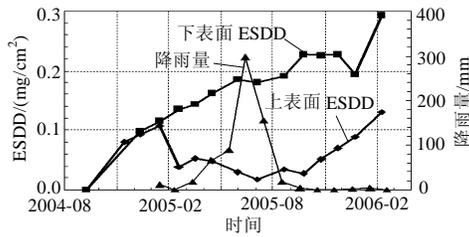


图1 直流复合绝缘子 ESDD 及降雨量随时间的变化

Fig. 1 Waveforms of ESDD on surfaces of DC composite insulators and rainfall varying with time

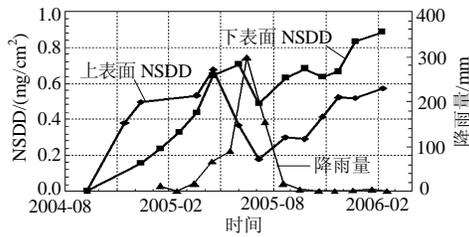


图2 直流复合绝缘子 NSDD 及降雨量随时间的变化

Fig. 2 Waveforms of NSDD on surfaces of DC composite insulators and rainfall varying with time

绝缘子在秋季(9月底)投入试验,北京已进入少雨季节,上、下表面污秽度都呈增长的趋势;因沉降作用,上表面污秽度高于下表面。经秋冬及初春积污期后,绝缘子表面污秽度已较高,在2005年5月初(多雨季节来临前)测得的全表面污秽度 NSDD 和 ESDD 分别为  $0.66 \text{ mg/cm}^2$  和  $0.11 \text{ mg/cm}^2$ , 相当于 III 级污秽区的污秽水平<sup>[6]</sup>。在该污秽水平下,直流复合绝缘子的爬电比距仅为  $30.8 \text{ mm/kV}$ , 与额定线电压下的交流爬电比距  $17.8 \text{ mm/kV}$  相当,运行比距相当低,但运行性能较好。

### 3.2 降水对污秽的影响

对绝缘子表面污秽的清洗主要依靠降水。2005年2月中下旬曾有较大降雪,融雪水使得绝缘子上表面可溶盐流失,在2005年2月底至3月初绝缘子上表面 ESDD 略降低。3月后因可溶性盐分易流失,零星降水对上表面 ESDD 的降低也有一定的作用。雨季5—10月上表面 ESDD 一直较低,10月后降水减少,上表面 ESDD 又开始增加。

试验中发现并不是所有降水都对绝缘子表面污秽产生明显的清洗效果,降水量和雨强是重要的影响因素。由图1和图2可见,在2005年5月前虽有降水,但月降水量不大(小于  $20 \text{ mm}$ ),且都是零星的小雨,雨强也不大(小于  $2 \text{ mm/h}$ )。零星降水对下表面 ESDD 和 NSDD 及上表面的 NSDD 的降低效果都是有限的。3月后,强度不大的春雨并不会导致污秽明显下降,有限的雨水冲洗效果与每月绝缘

子表面的积污量相比,积污仍然是主导因素。因此,一直到5月初雨季来临前,仍然是下表面 ESDD 和 NSDD 及上表面的 NSDD 污秽增长的过程。

相对而言,降水对下表面污秽的清洗效果更弱,上表面 NSDD 在5月后开始下降,但下表面 NSDD 和 ESDD 在6月后才开始出现下降。6—8月,月降水量从不足  $20 \text{ mm}$  增加到  $100 \text{ mm}$  以上,7月降水量最大,达  $296.8 \text{ mm}$ ,且暴雨频繁,雨强增大(约  $10 \text{ mm/h}$  以上);而下表面污秽在这3个月基本无增长。9月后,月降水量降到不足  $20 \text{ mm}$ ,污秽又开始增长。2006年初,距试验站不到  $100 \text{ m}$  处道路施工产生大量粉尘,使得绝缘子表面污秽上升明显。2006年2月下旬测得的全表面 NSDD 和 ESDD 分别为  $0.72 \text{ mg/cm}^2$  和  $0.21 \text{ mg/cm}^2$ 。

### 3.3 污秽不均匀度与灰盐比的分析

图3为上下表面污秽不均匀度(上表面污秽与下表面污秽的比值)。可以看出,在雨季上下表面污秽不均匀度增大,这是因为降水对上表面污秽的清洗作用明显高于下表面。上下表面污秽 ESDD 和 NSDD 不均匀度最大值分别为  $10.3$  和  $2.7$ ,均在雨季(7月下旬)测得。上下表面污秽 ESDD 和 NSDD 不均匀度平均值分别为  $4.5$  和  $1.6$ 。上下表面 ESDD 不均匀度一般是 NSDD 不均匀度的  $1.3\sim 4.5$  倍。

图4为上、下表面及全表面的灰盐比 NSDD/ESDD。上表面灰盐比均大于5,冬季积污期灰盐比逐渐升高,上表面最大灰盐比为  $14.0$ (雨季前5月初测得)。5月雨季来临后灰盐比逐渐降低;下表面灰

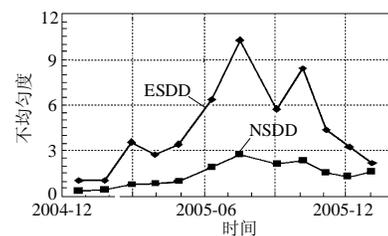


图3 污秽 ESDD 和 NSDD 的上下表面不均匀度

Fig. 3 Ratio of contamination on top surface to that on bottom surface in terms of ESDD and NSDD

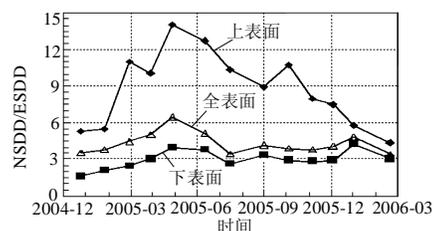


图4 灰盐比随时间的变化

Fig. 4 Ratio of NSDD to ESDD varying with time

盐比一般约为 3，降雨对下表面灰盐比的影响不如对上表面的明显，下表面最大灰盐比为 4.3；全表面灰盐比在 3~6 之间，全表面最高灰盐比为 6.4(5月初测得)。

### 3.4 复合绝缘子的直流交流积污比

在测量直流复合绝缘子污秽度的同时，还测量了站内交流复合绝缘子的污秽度。图 5 为直流和交流绝缘子的 ESDD 比值及 NSDD 的比值。直、交流绝缘子的上表面污秽度差异不大，ESDD 和 NSDD 的直交比均约为 1.0；下表面直交流绝缘子的 NSDD 差异大些，直交比一般大于 2.0，最大值 3.3；下表面 ESDD 的直交比一般大于 1.0，且随时间的增长呈上升的趋势。根据本文的试验条件，交流爬电比距是直流爬电比距的 1.4 倍，交流电压相对低些，这可能使得直交比偏高。

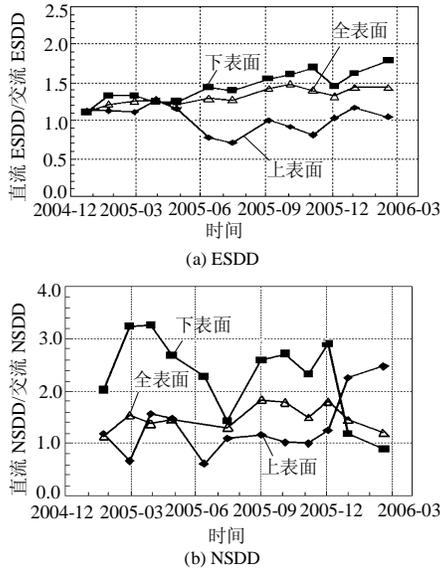


图 5 ESDD 和 NSDD 的直交比  
Fig. 5 Ratio of DC composite insulator's ESDD or NSDD to that of AC composite insulator

上表面 NSDD 和 ESDD 的直交比平均值分别为 1.20 和 1.02；下表面 NSDD 和 ESDD 的直交比平均值分别为 2.42 和 1.44；全表面 NSDD 和 ESDD 的直交比平均值分别为 1.46 和 1.32。电压形式对 NSDD 的影响比对 ESDD 的影响更明显。

根据图 1、2 的测量结果及图 5 的直交比，得出图 6 所示的上、下表面及全表面 ESDD 和 NSDD 的直交比与交流污秽度的关系。可以看出，ESDD 的直交比随交流 ESDD 的增加而增加；而 NSDD 的直交比随交流 NSDD 的增加而降低。

本文中，复合绝缘子表面污秽的直交比低于瓷

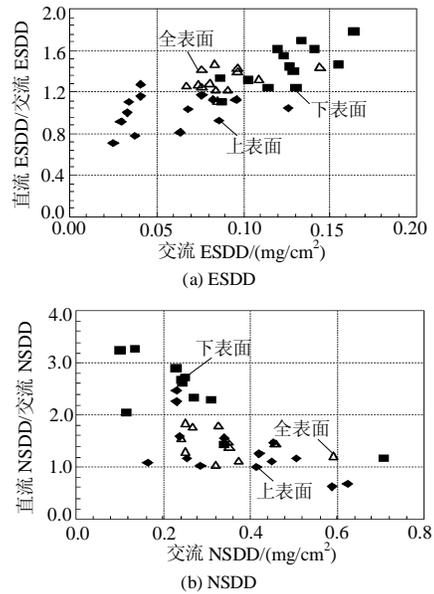


图 6 直交比与交流污秽度的关系  
Fig. 6 Relation between ratio of DC contamination to AC contamination and AC pollution degree

绝缘子的 ESDD 直交比<sup>[12]</sup>。此外，图 6 中直交比随交流污秽度的变化关系也与文献[12]介绍的日本研究者的试验结果有较大差异。笔者认为，在目前缺少对直流复合绝缘子积污特性研究的情况下，这些差异需要更多的研究来确认。

## 4 结论

(1) 并不是所有降水都会对绝缘子表面污秽产生明显的清洗效果。降水量和雨强均是清洗效率的重要影响因素。月降水量低于 20mm、雨强不大时，降水对绝缘子表面污秽的清洗作用有限。

(2) 复合绝缘子的最大污秽度出现在夏季多雨季节来临前。

(3) 上下表面污秽 ESDD 和 NSDD 不均匀度最大值分别为 10.3 和 2.7，ESDD 不均匀度约为 NSDD 不均匀度的 1.3~4.5 倍；全表面灰盐比基本在 3~6 之间，全表面最高灰盐比为 6.4。

(4) 全表面 ESDD 和 NSDD 的直交比平均值分别为 1.32 和 1.46。直流有机外绝缘设计中应该充分考虑这些积污特点。

## 参考文献

- [1] CIGRE TF 33.04.01. Polluted insulators: a review of current knowledge[R]. CIGRE brochure 158, 2000.
- [2] 吴东. 特高压直流输电外绝缘设计[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 7-8.  
Wu Dong. Outdoor insulation design of UHVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 7-8(in Chinese).

- [3] Su Z Y, Liang X D, Yin Y, et al. Outdoor insulation selection method of HVDC lines[C]. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing, 2005.
- [4] 宿志一. 用饱和盐密确定污秽等级及绘制污区分布图的探讨[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 16-19.  
Su Zhiyi. Study on defining pollution classes and mapping pollution areas by saturated equal salt deposit density[J]. Power System Technology, 2004, 28(8): 16-19(in Chinese).
- [5] 汤存燕, 梁曦东. 国外直流合成绝缘子运行及自然污秽试验[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 50-53.  
Tang Cunyan, Liang Xidong. A brief introduction to service performance and natural contamination test on abroad DC polymeric insulators[J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 50-53(in Chinese).
- [6] GB/T 16434-1996, 高压架空线路和发电厂、变电所环境污区分级及外绝缘选择标准[S].
- [7] GB/T 5582-1993, 高压电力设备外绝缘污秽等级[S].
- [8] JB/T 5895-1991, 污秽地区绝缘子使用导则[S].
- [9] IEC 60815-1-2002, Selection and dimensioning of high voltage for polluted conditions Part I: definitions, information and general principles[S].
- [10] Liang X D, Su Z Y, Ye T L, et al. Selection and application of  $\pm 500$  kV HVDC composite insulators[C]. Proceeding of the 4<sup>th</sup> International Conference on Power Transmission & Distribution Technology, Changsha, 2003.
- [11] DL/T 810-2002,  $\pm 500$  kV 直流复合绝缘子技术条件[S].
- [12] 宿志一, 刘燕生. 我国北方内陆地区线路与变电站用绝缘子的直、交流自然积污试验结果的比较[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 13-17.  
Su Zhiyi, Liu Yansheng. Comparison of natural contaminants accumulated on surfaces of suspension and post insulators with DC and AC stress in northern China's inland areas[J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 13-17(in Chinese).
- [13] Wang S W, Liang X D, Guan Z C. Investigation on hydrophobicity and pollution status of composite insulators in contaminated areas [C]. 2001 Annual Report of CEIDP, Kitchener, 2001.
- [14] Gubanski S M, Wankowicz G J. Distribution of natural pollution surface layers on silicone rubber insulators and their UV absorption [J]. IEEE Trans on Electrical Insulation, 1989, 24(4): 689-697.
- [15] Vosloo W L. A comparison of the performance of high-voltage insulator materials in a severely polluted coastal environment [D]. South Africa: University of Stellenbosch, 2002.
- [16] Mizuno Y, Nakamura H, Naito K. Dynamic simulation of risk of flashover of contaminated ceramic insulators[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(3): 1292-1298.
- [17] 谭捷华, 肖勇, 蔡炜, 等. 直流线路绝缘子串自然污秽盐密测量方法[J]. 高电压技术, 2003, 29(9): 52-53.  
Tan Jiehua, Xiao Yong, Cai Wei, et al. Salt density measurement method for natural polluted insulator string used on DC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(9): 52-53(in Chinese).
- [18] Shariati M R, Moradian A R, Ghaemi M R, et al. Pollution measurement based on DDG method for different type of insulator profile[C]. 2004 CIGRE Session, Paris, 2004.
- [19] Su Z Y, Liang X D, Yin Y, et al. Important correction factors in HVDC line insulation selection[C]. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing, 2005.
- [20] Su Z Y, Ma W M, Wu D, et al. Measurement of site pollution severity under DC voltage by means of a portable test station [C]. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing, 2005.
- [21] 海淀区水利局. 海淀区旱灾[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [22] 国家环保总局. 重点城市空气质量日报[EB/OL]. <http://www.zhb.gov.cn>.
- [23] DL/T 859-2004, 高压交流系统用复合绝缘子人工污秽试验[S].
- [24] JB/T 6747-1993, 直流系统用高压绝缘子人工污秽试验方法 固体层法[S].

收稿日期: 2007-03-22.

作者简介:

李震宇(1979—), 男, 博士, 研究方向为电力系统外绝缘, E-mail: [zhenyu-li@sgcc.com.cn](mailto:zhenyu-li@sgcc.com.cn);

梁曦东(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统外绝缘教学和科研工作, 研究领域涉及电工、材料等学科;

王 彬(1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统污秽外绝缘;  
周远翔(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电介质材料教学和科研工作。

(责任编辑 马晓华)

## 世界上最长、双回直流电压等级最高的特高压直流试验线段正式投运

2007年6月28日18时38分,世界上长度最长、双回直流电压等级最高的国家电网公司特高压直流试验基地试验线段提前两天正式投运。该试验线段全长1084 m,共6基塔,其中包括终端塔、换极性塔、两基门型塔和两基锚塔。门型塔高88 m、宽80 m,安装有两层活动横梁,试验导线可在垂直和水平方向调整。试验线段分为3档,中间测量档档距300 m。直流电源为 $\pm 1200$  kV、0.5 A。电源场接线系统采用了3种特殊用途塔,塔高均达到70多米,根据要求三种塔组合试验接线方案达到十几种。该试验线段可作同塔双回试验,双回直流电压等级最高达到 $\pm 1000$  kV,用于研究直流线路的电磁环境,包括电晕特性、合成电场、离子流密度、无线电干扰和可听噪声等。主要功能有:①对所选择的 $\pm 800$  kV直流输电线路的电磁环境进行考核;②与电晕笼试验相结合,确定适合我国国情的特高压直流输电线路电磁环境预测方法;③与电磁环境模拟试验场试验相结合,对超/特高压直流输电线路不同布置方式时的电磁环境进行研究。试验线段正式投运后,将为四川复龙至上海南汇特高压直流示范工程项目的建设和运行提供有力的技术支撑。

在国家电网公司科技部、特高压建设部和相关部门的积极协调和大力支持下,中国电力科学研究院和各设计、施工、监理单位密切配合、日夜奋战,相继完成了国家电网公司特高压直流试验基地户外试验场和试验线段的建设工作。该项目由北京国电华北电力工程有限公司设计,北京华联电力工程监理公司监理,合作单位包括北京电力公司、昌平供电公司 and 北京送变电工程公司、安徽省电力公司和安徽送变电工程公司、北京市地方党委、政府和中关村科技园区昌平园管委会、国网北京电力建设研究院、北京昌园建筑工程中心,河南卫华重型机械有限公司,北京国电同方电力建设工程有限公司,江苏雷宇高压设备有限公司、南京线路器材厂、北京华天机电研究所有限公司等。