

330kV 紧凑型线路 V 型合成绝缘子的荷载性能研究

乐波¹, 侯镭¹, 王黎明¹, 朱普轩²

(1. 清华大学深圳研究生院, 广东省 深圳市 518055; 2. 甘肃省电力设计院, 甘肃省 兰州市 730050)

STUDY ON LOADING CHARACTERISTICS OF V TYPE COMPOSITE INSULATOR USED IN 330KV COMPACT LINE

YUE Bo¹, HOU Lei¹, WANG Li-ming¹, Zhu Pu-xuan²

(1. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, Guangdong Province, China;

2. Gansu Provincial Electrical Power Design Institute, Lanzhou 730050, Gansu Province, China)

ABSTRACT: V type composite insulator string, which has advantages of light weight, easy cleaning, high tensile strength and stable post buckling, is a key component of compact line. The main destination of this paper is to study the loading characteristics of V type composite insulator used in 330kV compact line. Firstly, the mechanical characteristics of compressed composite insulator are studied based on the large flexivity theory, and the compression amplitude is measured in the large flexivity experiment. Therefore the destruction stress of composite insulator is calculated based on large flexivity theory and the compression amplitude responding to destruction. Secondly, displacement along x and y direction, axial compression amplitude and stress with loading ratio and included angle are studied in mechanical loading experiment. In addition, the preferred included angle of V type composite insulator string is suggested so as to guide the design of compact line. Finally, the composite insulator string with 65° included angle is adopted in the design of Tian-Cheng 330kV compact line based on theoretical analysis and experiment presented in the paper.

KEY WORDS: Composite insulator; Compact line; V type string; Loading characteristics

摘要: V 型合成绝缘子串是紧凑型线路的重要组成部分, 具有重量轻、易清洗、抗拉强度高的优点以及稳定的后屈曲抗压能力。文中主要目的是研究 330kV 紧凑型线路中 V 型合成绝缘子串的力学荷载特性。首先基于大挠度理论分析了受压 V 型合成绝缘子的力学特性, 并根据大屈曲试验确定了合成绝缘子破坏时对应的轴向压缩量以及对应该压缩量的破坏应力, 然后进行 V 型合成绝缘子串的力学荷载试验, 研究了夹角变化过程中, 位移、轴向压缩量以及最大应力随载荷比的变化关系, 确定了紧凑型线路设计时优先选用的 V

型串夹角, 为紧凑型线路设计提供理论指导。最后, 基于文中的理论分析和试验结果, 确定天成 330kV 紧凑型线路设计中选用 65° 作为 V 型合成绝缘子串夹角。

关键词: 合成绝缘子; 紧凑型线路; V 型串; 荷载特性

1 引言

随着电力工业的发展, 输电容量逐步增大, 线路走廊及大型电站的出线等问题日益严峻。采用紧凑型线路可以有效地改善输电线路日趋突出的走廊拥挤问题, 同时提高输电能力, 改善电磁环境, 而且不必大量增加线路投资, 降低输电成本, 提高我国输电技术的整体水平, 促进我国电力工业的发展^[1-4]。因此, 采用紧凑型输电线路输电具有重大的现实意义, 如我国已建成 2316km 的 220kV 紧凑型输电线路, 其自然输送功率提高 60%, 走廊利用率提高一倍^[1]。

紧凑型线路中为减小走廊宽度, 必须大大减小相间距离, 为保证紧凑型线路在恶劣的气象条件时相间和线塔之间的安全距离, 必须有效控制导线的摆动^[5-6]。由于 V 型合成绝缘子串具有良好的抗拉和抗压屈曲特性, 在紧凑型线路中采用 V 型合成绝缘子串可以有效地控制导线的摆动, 保证输电线路在运行中具有安全的相间和线塔距离。同时 V 型合成绝缘子串具有重量轻、自清洗和不易积污等优点, 所以在紧凑型线路中选用 V 型合成绝缘子串^[7], 研究 V 型合成绝缘子串的荷载力学性能成为紧凑型线路设计和运行中的重要课题^[8-10]。

本文从理论和试验分析了典型 V 型串在不同夹角情况下的位移、轴向压缩量和应力随模拟载荷变

化的情况，比较了理论分析与实际测量值的误差，提出了设计紧凑型线路时优先采用的V型串夹角。

2 理论分析

导线在风力或电磁力作用下发生的不同期摆动会对V型串施加水平载荷^[11]，V型串中两支绝缘子的受力状况将发生变化。水平载荷较大时，带电部分将会发生位移，其中一支绝缘子承受压力，一支承受拉力。实验表明，合成绝缘子可以看作大柔度细长杆^[12-13]（本文试验所用绝缘子结构高度3240mm，直径24mm，两端铰接，柔度为540），当载荷大于临界载荷后，具有稳定的屈曲平衡形态，可以继续承受载荷，这和欧拉公式得到的临界后屈曲性态不稳定的结论完全相反，所以线性理论不适用于合成绝缘子^[14]。事实上，由于合成绝缘子稳定的屈曲机械特性，可以承受一定的压力和发生一定的压缩形变。基于此考虑，在保证导线摆动幅度以及受压绝缘子的最大应力限制在允许范围的前提下，可以减小V型串的夹角，从而进一步减小塔头尺寸和线路走廊，提高线路的输电能力^[15-17]。

初始后屈曲与大挠度理论的分析表明^[12]，当载荷大于临界载荷时，合成绝缘子仍具有承载能力，并且随着侧向挠度和轴向压缩量的增加，承载能力相应增加。所以，V型串的受压串可以承受很大的压应力和轴向压缩，而保持稳定的大屈曲状态^[7]。因此，有必要通过理论分析和试验研究确定V型合成绝缘子串受压过程中的挠度、轴向压缩和位移与载荷的关系，为紧凑型输电线路的优化设计和安全运行提供理论指导。

初始后屈曲理论证明了“长细比”较大的合成绝缘子的后屈曲特性是稳定的，但初始后屈曲理论在屈曲幅值较大时得到的载荷与屈曲幅值的关系曲线和实验曲线误差较大，为了研究载荷与屈曲幅值关系的精确解，本文通过非线性大挠度微分方程对受压合成绝缘子串的屈曲特性进行分析^[8]。本文做以下假定：合成绝缘子是圆形截面且直径处处相等的匀质细长杆；绝缘子仅承受重力及其两端的力和弯矩；同一截面上，弹性模量均匀分布，处处相等；仅考虑正应力和正应变，不考虑剪应力和剪应变对正应力和正应变的影响。绝缘子整体受力模型如图1所示。

图1中，设绝缘子原长为L，自重为G。将合成绝缘子分为N个单元段，为了计算方便和简化模型，采用等分的方式，即各单元段长度： $L_i=L/N$ ，

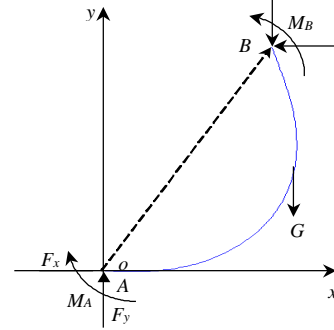


图1 合成绝缘子整体受力模型
Fig.1 The stress model of composite insulator

($i=1,2,\dots,N$)。假设绝缘子截面为直径处处相等的圆形，直径为D，截面积 $A=\pi D^2/4$ ，截面惯性矩 $I=\pi D^4/64$ 。各单元段的自重为 G_i ($i=1,2,\dots,N$)，且 $\sum G_i=G$ 。假设各单元段的弹性模量为 E_i ($i=1,2,\dots,N$)，相邻单元段联接处的弹性模量为 E_{i+1} ($i=1,2,\dots,N-1$)，各单元段的位置角为 q_i ($i=1,2,\dots,N-1$)。则第i单元段的受力如图2所示。

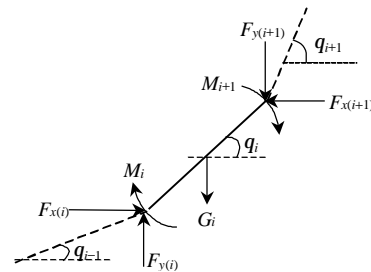


图2 第i单元段的局部受力分析
Fig.2 The partial stress of unit i

由图2可以得到第i段的局部平衡条件：

$$F_{x(i)}=F_{x(i+1)} \tag{1}$$

$$F_{y(i)}=F_{y(i+1)}+G_i \tag{2}$$

$$M_i + F_{y(i)} \frac{L}{2} \cos q_i + F_{y(i+1)} \frac{L}{2} \cos q_i = M_{i+1} + F_{x(i)} \frac{L}{2} \sin q_i + F_{x(i+1)} \frac{L}{2} \sin q_i \tag{3}$$

采用Newton迭代法对模型求解之后，得到各截面的最大拉应力和压应力

$$\begin{cases} S_{\max(i)}^+ = \frac{M_i D}{2I} - \frac{P_i}{A} \\ S_{\max(i)}^- = -\frac{M_i D}{2I} - \frac{P_i}{A} \end{cases} \tag{4}$$

其中 $i=1,2,\dots,N+1$

$$P_i = \begin{cases} F_{x(1)} \cos q_1 + F_{y(1)} \sin q_1 & i=1 \\ F_{x(i)} \cos \left(\frac{q_{i-1} + q_i}{2} \right) + F_{y(i)} \sin \left(\frac{q_{i-1} + q_i}{2} \right) & i=2,3,\dots,N \\ F_{x(N+1)} \cos q_{N+1} + F_{y(N+1)} \sin q_{N+1} & i=N+1 \end{cases} \tag{5}$$

在图 1 所示的坐标系中, 以 A 为坐标原点 (即 $x_A=y_A=0$), 其余各点的坐标如式(6)所示

$$\begin{cases} x_i = \sum_{j=1}^{i-1} L'_j \cos q_j \\ y_i = \sum_{j=1}^{i-1} L'_j \sin q_j \end{cases} \quad i=1,2,\dots,N+1 \quad (6)$$

本文试样的结构高度 3240mm, 直径 24mm, 根据上述受力模型计算得到轴向压缩量 ΔL 与最大应力 s_{\max} 的关系如图 3 所示。

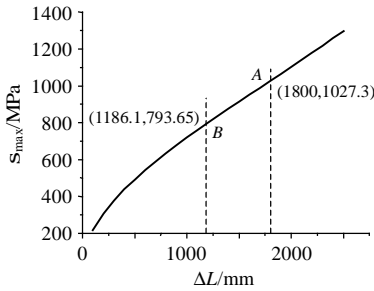


图 3 合成绝缘子 (直径 24mm, 结构高度 3240mm) 的轴向压缩与最大应力关系

Fig.3 Relation of axial compressive amplitude vs maximum stress of composite insulator with diameter of 24mm and structural height of 3240mm

在绝缘子的屈曲破坏试验中, 24mm 直径芯棒绝缘子达屈曲破坏的最大轴向压缩距离为 1800mm, 查图 3 可知达到试验中屈曲破坏时的轴向压缩量 1800mm 时对应的最大应力值为 1027MPa (A 点), 因此取 1027MPa 作为合成绝缘子的屈曲破坏应力。

3 试验装置及结果

将待试 V 型串悬挂于天车上固定, 然后施加水平载荷 P_h 和垂直载荷 P_v 。试验过程中, 保持垂直载荷 (8544kN) 不变, 然后逐渐增加水平载荷模拟绝缘子受水平力时横向和纵向的位移情况。通过水平和垂直定位仪测量绝缘子的水平和垂直位移, 同时在绝缘子的中部和端部贴应变片测量中部和端部的变形。

试验过程中, 通过增加铁饼的数量来增加水平载荷和垂直载荷, 每个铁饼的重量约为 160kN。在实际的紧凑型线路中, V 型串的垂直载荷基本保持不变, 不受水平载荷的作用。在大风吹到导线上时, V 型串受到水平载荷的作用, 所以为模拟实际运行中水平载荷的作用, 保持垂直载荷不变 (8454kN), 通过增加水平载荷来改变系统的载荷比, 研究载荷比变化时 V 型串的变形和受力情况。

试验装置经过简化后如图 4 示。图中黑色粗线

表示未施加荷载时绝缘子和联板的状态, 浅色粗线表示施加载荷后绝缘子串的状态, 浅色粗虚线表示受压串的弦长, 细虚线为延长线。

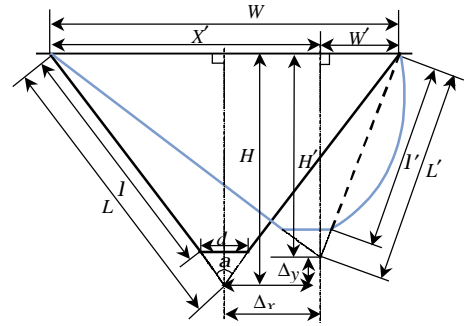


图 4 试验装置简化图

Fig.4 Simplified schedule of experiment setup

L 表示绝缘子与金具组合后的长度, 本试验中绝缘子和金具 (由上向下) 组合后的总串长 $L=U$ 型挂环 (U-7)+U 型挂环 (U-7)+球头挂环 (QP-16)+合成绝缘子+碗头挂板 (WS-16)=60+60+60+3240+95=3515mm; 联板长度 $d=100$ mm; a 为初始状态下绝缘子的夹角; I' 为受压串的弦长; L' 为受压串的弦延长后的长度; H 为初始状态下三角形的高度; H' 为施加载荷后三角形的高度; W 为两挂点之间的距离; W' 的含义如图 4 所示; Δx 和 Δy 分别表示施加载荷后绝缘子串的水平 and 垂直位移, 由于联板为钢板, 所以试验过程中假设联板始终保持平行且长度不变。合成绝缘子有良好的抗拉性能, 所以假设试验过程中受拉串的串长保持不变, 且受拉串的载荷远小于抗拉强度。根据图 4, 可以得到以下关系

$$\begin{cases} L = l + (d/2)/\sin(a/2) \\ W = 2L \sin(a/2) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} H = L \cos(a/2) \\ H' = H - \Delta y \end{cases} \quad (8)$$

$$X' = W/2 + \Delta x \quad (9)$$

$$W' = W - X' \quad (10)$$

$$L' = \sqrt{W'^2 + H'^2} \quad (11)$$

由于联板与挂点之间的连线平行, 根据相似三角形关系, 可以得到

$$\frac{L' - I'}{L'} = \frac{d}{W} \quad (12)$$

求解上面的方程, 可以得到受压串的轴向压缩量

$$\Delta L = l - \left[1 - \frac{50}{L \sin(a/2)} \right] \cdot \sqrt{L^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 - 2L[\Delta x \sin(a/2) + \Delta y \cos(a/2)]} \quad (13)$$

其中 L 由式(7)计算。

由于绝缘子的两个端部都由金具固定（上部两个 U 型挂环和一个球头挂环，下部一个腕头挂板）。由于这些连接金具是铰连接，所以当 V 型串受到水平载荷发生移动时，这些金具首先移动到极限位置，然后合成绝缘子才开始被压缩，所以在计算合成绝缘子的有效压缩时应该从 Δx 和 Δy 中减去金具移动距离，这些距离对绝缘子的压缩没有贡献。考虑到上端的球头挂环和下端的腕头挂板都只能转动一定的角度，所以金具沿 x 和 y 方向的移动量近似按 3 个挂环的结构高度估算，即 $3 \times 60\text{mm} = 180\text{mm}$ 。应用式(13)计算中会出现负值，表明虽然 V 型串发生了位移，但由于联结金具的转动，导致绝缘子并没有发生实际的压缩。所以，当结果为负值时，认为轴向压缩量为 0。

由图 5 可以看出，当夹角为 60° 时，水平方向的位移远大于其它角度，这是因为在较小的角度，绝缘子沿水平方向的分力较小，在沿水平方向移动过程中，不断增大受拉串沿水平方向的分力，才能保持 V 型串的平衡状态。随着夹角的增大，水平位移逐渐减小，当夹角增大到 100° 时，对应 1.7 载荷比的最大水平位移仅为 322mm，几乎可以忽略不计。由图 6 可以看出，垂直位移在夹角增大过程中逐渐减小，当达到 100° 夹角时，载荷比 1.7 时的垂直位移也仅为 322mm，也可以忽略不计。所以，不管水平还是垂直位移，当角度增大时，开始发生位移的临界载荷比都随夹角的增大而增大。

由图 7 可以看出，轴向压缩随载荷比的变化情况类似于水平和垂直位移，发生压缩的临界载荷都随角度的增大而增加， 100° 时对应最大载荷比的轴向压缩量为 87mm，表明绝缘子几乎不受压。

从图 8 可以看到在载荷比一定时轴向压缩随角度的增加近似成线性关系下降，而且随着夹角的增大趋于一致，可以作为紧凑型输电线路设计时的参

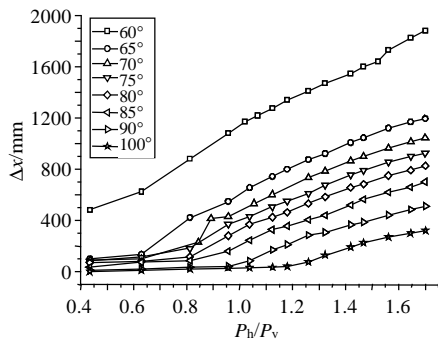


图 5 水平位移与载荷比的关系
Fig.5 Horizontal displacement vs loading ratio

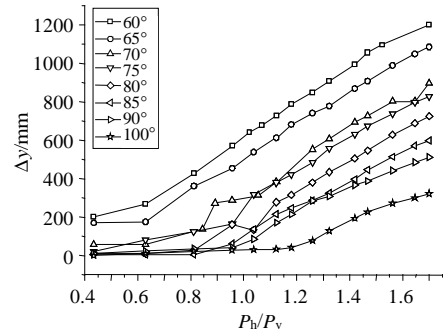


图 6 垂直位移与载荷比的关系
Fig.6 Vertical displacement vs loading ratio

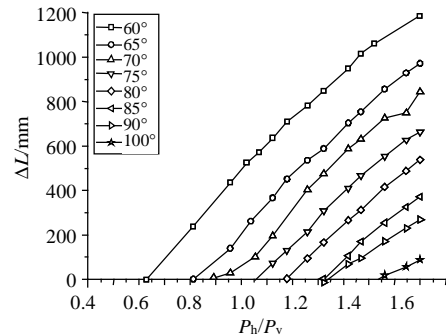


图 7 轴向压缩量与载荷比的关系
Fig.7 Axial compressive amplitude vs loading ratio

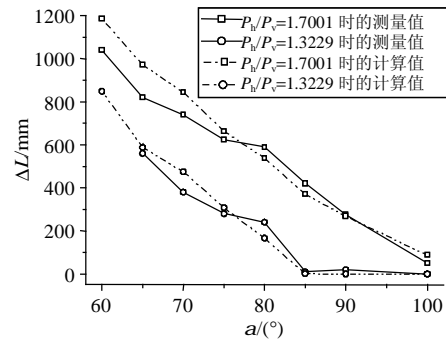


图 8 轴向压缩的测量值和计算值的关系
Fig.8 The theoretical value and measured value of axial compressive amplitude vs angle at certain loading ratio

考，通过拟合得到不同夹角时的压缩量。

根据对 60° 时轴向压缩量与载荷比的拟和关系， $\Delta L_{60^\circ} = 1106P_h/P_v - 626.24$ ，可以得到轴向压缩达到 1800mm 的破坏极限时，对应的载荷比 $(P_h/P_v)_{\max} = 2.194$ ； 60° 时载荷比为 1.7 时，对应的轴向压缩为 1186.1mm，其对应的应力为 793.65MPa（如图 3 所示），远小于破坏应力。当角度大于 60° 时，绝缘子破坏时对应的载荷比更大。所以进行紧凑型线路设计时，当考虑风载荷导致的载荷比小于 2.194 时（实际运行中载荷比小于此值），则绝缘子夹角大于 60° 时即可满足强度要求，安全运行。因此，可以根据施加载荷比估算不同夹角时的水平和垂直位移，取满足安全位移要求的最小夹角作为 V

型串夹角。考虑一定的安全裕度, 330kV 输电线路可优先选择 $65^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 之间的 V 型串夹角。基于本文的理论分析和试验结果, 在天成 330kV 紧凑型线路设计中首次选用了 65° 作为 V 型合成绝缘子串夹角。

4 结论

(1) 试验表明, 合成绝缘子可以看作大挠度细长杆, 具有稳定的后屈曲平衡状态, 可以用后屈曲和大挠度理论对合成绝缘子的受力进行分析。理论分析表明, 在绝缘子的屈曲破坏试验中, 芯棒直径 24mm 的绝缘子屈曲破坏的最大轴向压缩距离为 1800mm, 相应的最大应力值为 1027MPa, 因此取 1027MPa 作为 24mm 直径合成绝缘子的屈曲破坏应力。

(2) 试验结果表明, 水平位移和垂直位移随夹角的增大逐渐减小。不管水平还是垂直位移, 当角度增大时, 开始发生位移的临界载荷都随夹角的增大而增大。在载荷比一定时, 轴向压缩量随角度的增加近似成线性关系减小。

(3) 60° 夹角对应的破坏载荷比为 2.194。当夹角大于 60° 时, 绝缘子的破坏载荷比更大。所以, 当载荷比小于 2.194 时, 大于 60° 夹角的 V 型合成绝缘子串都可以安全运行。

(4) 考虑一定的安全裕度, 330kV 紧凑型输电线路可优选 $65^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 作为 V 型合成绝缘子串夹角。基于本文的理论分析和试验结果, 天成 330kV 紧凑型线路设计中首次选用 65° 作为 V 型合成绝缘子串夹角。

参考文献

- [1] 王秀丽, 宋永华, 王海军. 新型交流输电技术现状与展望[J]. 中国电力, 2003, 36(8): 40-46.
Wang Xiuli, Song Yonghua, Wang Haijun. Development and application of advanced transmission systems[J]. Electric Power, 2003, 36(8): 40-46.
- [2] 项立人. 紧凑型线路发展现状及在我国应用的前景[J]. 电网技术, 1996, 20(2): 1-5.
Xiang Liren. The present situation of compact line development and its application prospect in china[J]. Power System Technology, 1996, 20(2): 1-5.
- [3] 于幼文, 赵丞华. 500kV 输电线路紧凑化技术的研究与实施[J]. 中国电力, 1997, 30(10): 40-43.
Yu Youwen, Zhao Chenghua. Study and implementation of 500kV compact transmission [J]. Electric Power, 1997, 30(10): 40-43.
- [4] 舒印彪, 赵丞华. 研究实施中的 500kV 同塔双回紧凑型输电线路[J]. 电网技术, 2002, 26(4): 49-51.
Shu Yinbiao, Zhao Chenghua. Study and implementation of 500kV compact power transmission line with double circuits on a same tower in china [J]. Power System Technology, 2002, 26(4): 49-51.
- [5] Huang Weigang. Study on conductor configuration of 500-kV chang-fang compact line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 1002-1008.
- [6] 扈从凤. 220kV 紧凑型输电线路的设计经验及对 500kV 紧凑型线路的探讨[J]. 电网技术, 1994, 18(4): 5-8.
Hu Congfeng. Experience in design of 220kV compact transmission line and investigation on feasibility of compact line for 500kv power system[J]. Power System Technology, 1994, 18(4): 5-8.
- [7] 司马文霞, 蒋兴良, 武利会, 等. 低气压下覆冰染污 10kV 合成绝缘子直流电气特性[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 122-126.
Sima Wenxia, Jiang Xingliang, Wu Lihui *et al.* DC electrical performance of icing and polluted 10kV composite insulator at low atmospheric pressures [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 122-126.
- [8] 王黎明. 相间合成绝缘间隔棒的研究[D]. 北京: 清华大学, 1993.
Wang Liming. Research on the phase to phase composite spacer[D]. Beijing: Tsinghua University, 1993.
- [9] 王绍德, 李耀玲. 昌房 500kV 紧凑型线路运行特性分析[J]. 电网技术, 2000, 24(2): 10-13.
Wang Shaode, Li Yaoling. Analysis on operation characteristics of 500kV changping—fangshan compact transmission line[J]. Power System Technology, 2000, 24(2): 10-13.
- [10] 陈在铁, 范钦珊, 吴宏宇. 500 kV 紧凑型线路导线非线性运动分析[J]. 清华大学学报, 1999, 39(12): 101-104.
Chen Zaitie, Fan Qinshan, Wu Hongyu. Non linear motion analysis on 500kV compact line conductor[J]. Journal of Tsinghua University, 1999, 39(12): 101-104.
- [11] 何锴, 赵高煜, 李上明. 大跨越分裂导线的静力求解[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 34-37.
He Zeng, Zhao Gaoyu, Li Shangming. Static analysis and computation of long-span multi-conductor transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(11): 34-37.
- [12] 范钦珊. 工程力学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [13] 林毓铨, 陈瀚, 楼志文. 材料力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994.
- [14] Wang Liming, Liang Xidong, Guan Zhicheng *et al.* Research on 500kV phase to phase composite spacer for compact lines [C]. Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Xi'an, China, 2000: 346-349.
- [15] 刘亚芳, 袁亦超, 王惠仁, 等. 500kV 紧凑型输电技术的研究[J]. 电网技术, 1999, 23(2): 55-58.
Liu Yafang, Yuan Yichao, Wang Huiren *et al.* Study of 500kV compact transmission technology[J]. Power System Technology, 1999, 23(2): 55-58.
- [16] 于幼文, 金永纯. 昌房 500kV 紧凑型输电线路中的关键技术[J]. 电网技术, 2003, 27(7): 75-77.
Yu Youwen, Jin Yongchun. Key technologies for 500kV compact transmission line from changping to fangshan[J]. Power System Technology, 2003, 27(7): 75-77.
- [17] 周孝信, 郭剑波, 胡学浩, 等. 提高交流 500kV 线路输电能力的实用化技术和措施[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 1-6.
Zhou Xiaoxin, Guo Jianbo, Hu Xuehao *et al.* Engineering technologies and measures for improving the transmitting capability of 500kV transmission lines[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 1-6.

收稿日期: 2005-02-20.

作者简介:

乐 波 (1976-), 男, 博士, 从事绝缘诊断和高电压新技术的研究。