

文章编号: 2097-096X(2023)-04-0396-07

## 影响支柱绝缘子弹性模量测量精度的因素分析

张立红<sup>1,2</sup>, 吕 玮<sup>1,2</sup>, 张艳红<sup>1,2</sup>, 胡 晓<sup>1</sup>, 王茂华<sup>1,2</sup>, 许亮华<sup>1,2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 工程抗震研究中心, 北京 100048;

2. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** 支柱绝缘子是大多数电力设备中的关键部件, 在其中起绝缘和支撑的作用。弹性模量是绝缘子一个十分重要且关键的物理量, 其测量的准确性和便捷性对绝缘子的工业生产和科学研究十分重要。本文首先总结了文献中报道的支柱绝缘子弹性模量的测量方法, 主要包括准静态法和动态法两大类。从试验过程的经济性和便捷性考虑, 结合弯曲负荷试验同时开展弹性模量的测量是较为合适的做法。本文采用数值模拟技术, 对比分析了应变片竖向位置、应变片环向位置、绝缘子长径比和重力因素对直立固定的支柱绝缘子弹性模量测量结果精度的影响。结果表明应变片竖向位置和环向位置对弹性模量测量结果的影响较大, 绝缘子长径比和重力因素影响较小。所得结果与结论对提高支柱绝缘子弹性模量测量精度具有重要的指导意义。

**关键词:** 支柱绝缘子; 弹性模量; 应变片位置; 长径比; 重力

**中图分类号:** TM216

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.20220371

### 1 研究背景

支柱绝缘子广泛应用于变电站、换流站中的各类电气设备, 主要起电气绝缘和机械支撑的作用<sup>[1]</sup>。在对支柱绝缘子机械性能进行分析时, 弹性模量是十分重要的物理量。比如电气设备的抗震性能试验中, 最关心的设备关键部位的应力值是无法直接测量的, 需要通过测量的应变值乘以弹性模量得到, 可见弹性模量对计算应力值十分重要。弹性模量同时也是数值模拟中必需输入的材料参数。因此, 弹性模量测量的准确性和便捷性对绝缘子的工业生产和科学研究都很重要<sup>[2]</sup>。

弹性模量作为固体材料力学性能的关键参数, 其测量方法有很多, 大体可归为 3 大类, 即准静态法、共振法和波动法, 但目前普遍存在的问题是测量过程不够方便快捷<sup>[2-5]</sup>。对于支柱绝缘子, 目前虽然已有相关标准规定了出厂前需开展的弯曲负荷试验、拉伸负荷试验、扭转负荷试验和压缩负荷试验的具体程序, 但是并未对弹性模量的标定准则和测量方法的规定<sup>[6-7]</sup>。孙楚平、杨凡等通过试验发现绝缘子生产厂家提供的弹性模量参数偏差较大, 难以保证必要的精度<sup>[7-8]</sup>。鉴于弹性模量对支柱绝缘子及其构成的电气设备的力学性能具有重要影响, 许多学者开展了支柱绝缘子弹性模量的测量试验<sup>[7,9-15]</sup>。

现有文献中支柱绝缘子弹性模量的测量方法大致可归为准静态法和动态法两大类。其中准静态法包括以局部样品为研究对象开展的材料性能试验和以整体支柱绝缘子为对象开展的弹性弯曲试验。Wang Z 等对支柱复合绝缘子进行局部取样, 通过对切片形式的试品开展拉伸试验, 根据加载位移和荷载的斜率计算得到支柱绝缘子的弹性模量<sup>[9]</sup>。Mohamed A.Moustafa 等<sup>[10]</sup>利用力学试验机对局部取样的 6 个圆柱形瓷绝缘子试品开展拉伸和压缩试验, 获得其弹性模量、泊松比等材料参数。马艳枝<sup>[11]</sup>利用液压伺服电瓷弯曲试验机对多个支柱瓷绝缘子开展静力弯曲试验, 在绝缘子本体的根部和顶部设置应变片, 通过外加荷载得到应力时间曲线, 结合应变片的测量结果得到应力应变曲线, 最后根据曲线

收稿日期: 2022-10-13; 网络首发时间: 2023-04-07

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?urlId=10.1788.tv.20230406.0918.004>

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目(5419-202243054A-1-1-ZN)

作者简介: 张立红(1984-), 博士, 高级工程师, 主要从事水工建筑物、电气设备等抗震研究。E-mail: zhanglihong08@tsinghua.org.cn

的斜率确定弹性模量；孙楚平<sup>[7]</sup>分别研究比较了基于挠度、转角和应变的绝缘子拟静力弯曲试验方案，结论是基于挠度的试验方法相对比较直观，但是误差较大。而基于转角的试验方法虽然也相对比较直观，但试验需要额外的支杆、位移计等部件，且这些部件容易出现误差或失效导致结果精度大为降低。基于应变的试验方法结果最为准确，且试验过程不易出现故障，建议作为绝缘子弹性模量试验的优先考虑方案。刘海龙等<sup>[12]</sup>对6根同批次±1100 kV复合支柱绝缘子开展了弹性弯曲试验，得到的弹性模量值比较离散，介于(40.9–75.9) GPa；井谦等<sup>[13]</sup>对空心瓷支柱绝缘子开展弯曲负荷试验，测量结果表明瓷绝缘子的压缩弹性模量大于其拉伸弹性模量；张玥等<sup>[14]</sup>采用卧式准静态加载试验机，测量得到了特高压复合支柱绝缘子的弹性模量。

弹性模量的动态测量方法主要是利用共振法测得绝缘子的基频，然后根据动力方程反算得到弹性模量值<sup>[3]</sup>。比如张玥等<sup>[14]</sup>、Mohamed A.Moustafa等<sup>[10]</sup>采用锤击法、快速恢复法(snapback test)以及振动台白噪声扫频等动力方法测得了绝缘子的基频，杨陈等<sup>[15]</sup>对江苏神马股份有限公司生产的复合绝缘子首先利用弯扭试验机测得其弹性模量值，同时利用突然释放法测得绝缘子基频，反算得到弹性模量值，结果表明动力法测量的弹性模量比静力法测量的结果偏低，分析原因可能是动力法测量时绝缘子根部与底板连接不够紧密导致的。

综上所述，弹性模量一直是绝缘子领域中工程师和学者们关注的重要材料参数，其测量方法种类繁多。弯曲负荷试验是每种类型绝缘子出厂前必须开展的型式试验之一，因此在弯曲负荷试验过程中同时开展弹性模量的测量是较为经济和便捷的方法。但是目前没有统一的标准规定具体的测量准则，比如同样是基于应变的拟静力弯曲试验，不同试验人员在固定应变片时，可以选择绝缘子根部、中间、顶部等不同部位。

本文首先总结了文献中报道的支柱绝缘子弹性模量测量方法，然后考虑到试验过程的经济性和便捷性，结合弯曲负荷试验运用数值模拟方法分别研究了应变片竖向位置、应变片环向位置、绝缘子长径比和重力对弹性模量测量结果的影响。所得分析结果对提高支柱绝缘子弹性模量的测量精度具有重要的指导意义。

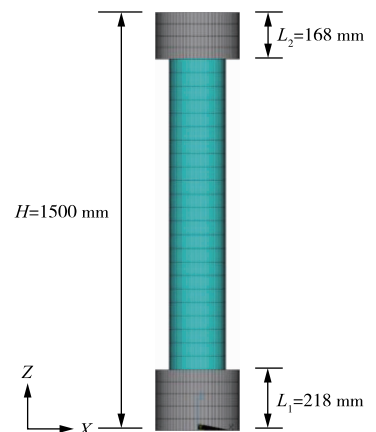


图1 支柱绝缘子示意图  
Fig.1 Sketch of post insulator

## 2 影响弹性模量结果的主要因素分析

**2.1 算例设计** 选择如图1所示的绝缘子三维模型开展数值仿真计算，并规定水平向右为坐标系的X方向，另一水平方向为Y方向，竖向为Z向。简便起见，模型中仅包括绝缘子本体和法兰两种材料(分别如图1中绿色和灰色区域所示)，绝缘子本体和法兰均采用三维实体单元模拟，两者之间通过共节点实现固定连接。材料参数和截面尺寸见表1。

表1 不同构件材料参数及截面尺寸

Table 1 Material parameters and sections of different components

构件名称	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	截面尺寸/mm
绝缘子本体	100	0.2	6000	实心圆 D=260
钢法兰	210	0.3	7800	圆环 d=260, D=300

**2.2 测点竖向位置的影响** 在绝缘子根部施加固支约束，顶部施加如图2所示的水平向右的集中力F，分别考虑加载力40 kN和20 kN两种工况。设测点到下法兰顶部的距离为h，绝缘子总高为H，定义距离比为h/H。考查绝缘子本体上不同高度处受压侧与受拉侧的弹性模量计算值与真实弹性模量的差异。弹性模量计算值的公式如式(1)所示。

$$E = \frac{32FL}{\pi D^3 \varepsilon} \quad (1)$$

式中： $F$  为加载力； $L$  为考查点到力加载点即绝缘子顶部的距离； $D$  为绝缘子本体直径； $\varepsilon$  为应变值。不同幅值加载力的计算结果如图 3 所示，加载力 40 kN 时的计算结果如表 2 所示。

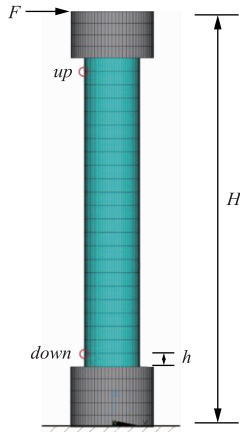


图 2 加载力及考查点示意图

Fig.2 Sketch of loading force and measuring points

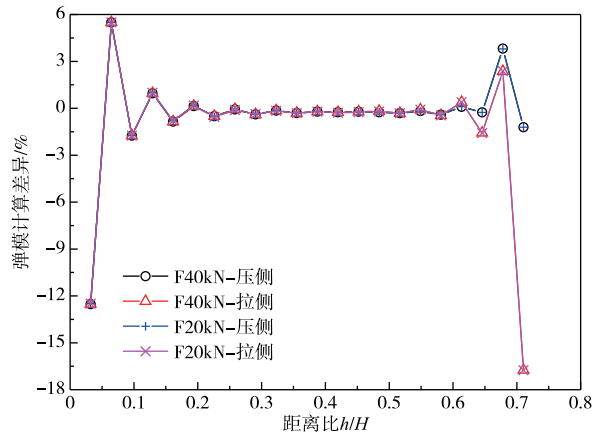


图 3 不同高度测点弹性模量计算误差

Fig.3 Calculation error of elastic modulus of measuring points at different heights

表 2 加载力 40kN 时不同高度测点处弹性模量结果

Table 2 Elastic modulus results of measuring points at different heights under 40kN loading force

高程 $Z/m$	$h/H$	受压侧		受拉侧		受压侧		受拉侧	
		应变值	应变值	弹模计算值/GPa	计算误差/%	弹模计算值/GPa	计算误差/%		
0.2664	0.032	$-3.27 \times 10^{-4}$	$3.27 \times 10^{-4}$	87.48	-12.52	87.48	-12.52		
0.3149	0.065	$-2.60 \times 10^{-4}$	$2.60 \times 10^{-4}$	105.50	5.50	105.50	5.50		
0.3633	0.097	$-2.68 \times 10^{-4}$	$2.68 \times 10^{-4}$	98.25	-1.75	98.25	-1.75		
0.4117	0.129	$-2.50 \times 10^{-4}$	$2.50 \times 10^{-4}$	100.95	0.95	100.95	0.95		
0.4602	0.161	$-2.43 \times 10^{-4}$	$2.43 \times 10^{-4}$	99.15	-0.85	99.15	-0.85		
0.5086	0.194	$-2.30 \times 10^{-4}$	$2.30 \times 10^{-4}$	100.14	0.14	100.14	0.14		
0.5570	0.226	$-2.20 \times 10^{-4}$	$2.20 \times 10^{-4}$	99.50	-0.50	99.50	-0.50		
0.6055	0.258	$-2.08 \times 10^{-4}$	$2.08 \times 10^{-4}$	99.93	-0.07	99.93	-0.07		
0.6539	0.291	$-1.97 \times 10^{-4}$	$1.97 \times 10^{-4}$	99.61	-0.39	99.61	-0.39		
0.7023	0.323	$-1.85 \times 10^{-4}$	$1.85 \times 10^{-4}$	99.85	-0.15	99.85	-0.15		
0.7508	0.355	$-1.74 \times 10^{-4}$	$1.74 \times 10^{-4}$	99.70	-0.30	99.70	-0.30		
0.7992	0.387	$-1.63 \times 10^{-4}$	$1.63 \times 10^{-4}$	99.79	-0.21	99.79	-0.21		
0.8477	0.420	$-1.52 \times 10^{-4}$	$1.52 \times 10^{-4}$	99.74	-0.26	99.74	-0.26		
0.8961	0.452	$-1.40 \times 10^{-4}$	$1.40 \times 10^{-4}$	99.78	-0.22	99.78	-0.22		
0.9445	0.484	$-1.29 \times 10^{-4}$	$1.29 \times 10^{-4}$	99.75	-0.25	99.82	-0.18		
0.9930	0.517	$-1.18 \times 10^{-4}$	$1.18 \times 10^{-4}$	99.69	-0.31	99.69	-0.31		
1.0414	0.549	$-1.07 \times 10^{-4}$	$1.06 \times 10^{-4}$	99.82	-0.18	99.92	-0.08		
1.0898	0.581	$-9.55 \times 10^{-5}$	$9.55 \times 10^{-5}$	99.59	-0.41	99.55	-0.45		
1.1383	0.614	$-8.38 \times 10^{-5}$	$8.35 \times 10^{-5}$	100.09	0.09	100.39	0.39		
1.1867	0.646	$-7.28 \times 10^{-5}$	$7.38 \times 10^{-5}$	99.74	-0.26	98.42	-1.58		
1.2351	0.678	$-5.92 \times 10^{-5}$	$6.00 \times 10^{-5}$	103.82	3.82	102.36	2.36		
1.2836	0.710	$-5.08 \times 10^{-5}$	$6.03 \times 10^{-5}$	98.79	-1.21	83.26	-16.74		

从表 2 和图 3 可以看出：距离比小于 0.6 时，绝缘子受压侧与受拉侧的应变和弹性模量计算值基本一致，当距离比大于 0.6，尤其是大于 0.7 时拉、压侧计算结果差异较大，这主要是由于该处距离加载点较近引起的。当距离比处于 0.1~0.6 之间时，弹性模量的误差很小，在 2% 以内。在距离比小于 0.1 和大于 0.6 的区域，由于底部法兰的局部约束作用以及顶部加载集中力的影响，弹性模量的计算误差较大。此外，对比不同幅值加载力的计算结果，可知加载力大小的改变不会引起上述规律的改变，因此在绝缘子弯曲试验中可以使用较小的力加载，以保证绝缘子处于弹性变形阶段。

**2.3 测点环向位置的影响** 绝缘子弯曲负荷试验时，通常是沿力加载方向的受拉侧和相对的受压侧粘贴应变片。实际试验中，应变片的位置可能与预期的位置有偏差。为了考查应变片在环向位置偏差对弹性模量计算值的影响，在竖向位置选择距离比处于 0.1~0.6 区间的 0.258 高程，在受压侧和受拉侧每隔 5° 选取 10 个考查点 (见图 4)。从图 5 所示的各考查点的弹性模量计算误差图可以看出：受压侧与受拉侧计算结果的规律一致，即考查点位置偏离力加载轴线的角度越大，误差越大。当环向角度偏差 10° 时，弹性模量计算误差约为 1.5%。

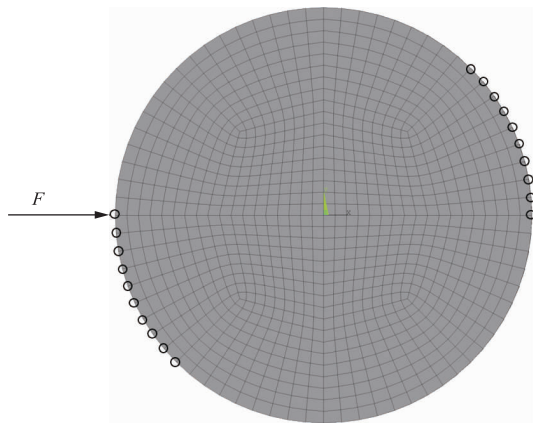


图 4 环向考查点示意图

Fig.4 Schematic diagram of circumferential measuring points

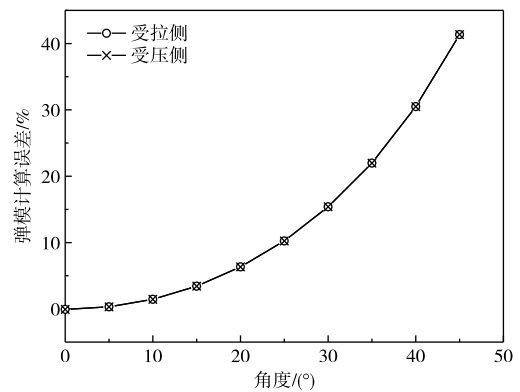


图 5 环向不同位置考查点计算结果

Fig.5 Results of measuring points at different positions in circumferential direction

**2.4 绝缘子长径比的影响** 实际工程中支柱绝缘子因电压等级不同、型号不同、甚至生产厂家不同，其直径和长度的可选范围很大。本小节通过改变绝缘子本体的直径，上下法兰的厚度和高度保持不变，考查绝缘子长径比对弹性模量的影响。计算时加载力取 40 kN。从图 6 所示弹性模量计算误差绝对值可以看出，绝缘子长径比越大，靠近根部测点的弹性模量计算结果误差越小。不同长径比绝缘子的结果均表明当距离比处于 0.1~0.6 区间时，误差很小，在 2% 以内。因此建议所有长径比的绝缘子在弯曲负荷试验中测量弹性模量时，应变片在高度上的位置均应布置在距离比 0.1~0.6 区间内。

**2.5 重力的影响** 以上算例均未考虑重力的影响，而在实际试验中重力是真实存在的。因此本小节考虑重力的影响，其他计算条件同 2.1 节所述。重点考查距离比处于 0.1~0.6

区间的弹性模量计算结果 (见表 3)，通过与表 2 对比可知：表 2 中受压侧应变与受拉侧应变基本一致，而表 3 中受压侧的应变普遍大于受拉侧的应变，这是由于重力的作用会产生一定的压应变，这也与文献 [7, 15] 中试验测得的压侧应变大于拉侧应变的规律相吻合。通过文献 [7] 和文献 [15] 的试验数据可知，绝缘子顶部的水平位移较大，尤其是复合绝缘子，顶部水平位移可达绝缘子总高度的 10%，在这种情况下，重力不仅直接产生压应变，还会产生弯矩效应，进一步加剧压侧应变与拉侧应变的差

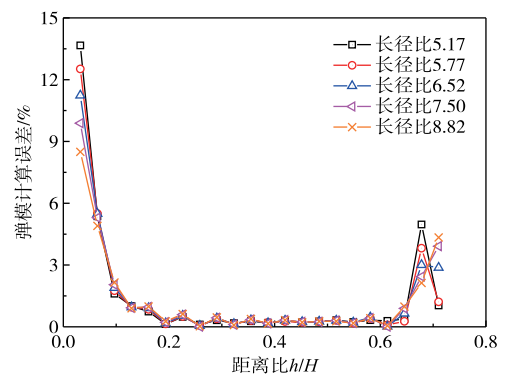


图 6 不同长径比绝缘子沿高度方向受压侧考查点结果

Fig.6 Results of measuring points of insulators with different length of diameter ratios under pressure along the height direction

距。从表 3 可知考虑重力影响时, 距离比 0.1~0.6 区间内考查点计算得到的弹性模量最大误差约 2%, 由此可见对于直立固定在试验机上的绝缘子试品, 重力的影响是可以忽略的。这也说明文献[6]中的规定“试品应直立地固定在试验机上(当试品自重可以忽略不计时, 允许水平安装)”是合理的。

表 3 考虑重力影响的弹性模量结果  
Table 3 Results of elastic modulus considering gravity

$h/H$	受压侧	受拉侧	受压侧		受拉侧	
	应变值	应变值	弹模计算值/GPa	计算误差/%	弹模计算值/GPa	计算误差/%
0.097	$-2.69 \times 10^{-4}$	$2.68 \times 10^{-4}$	97.96	-2.04	98.51	-1.49
0.129	$-2.51 \times 10^{-4}$	$2.49 \times 10^{-4}$	100.67	0.67	101.24	1.24
0.161	$-2.44 \times 10^{-4}$	$2.43 \times 10^{-4}$	98.87	-1.13	99.40	-0.60
0.194	$-2.30 \times 10^{-4}$	$2.29 \times 10^{-4}$	99.84	-0.16	100.40	0.40
0.226	$-2.20 \times 10^{-4}$	$2.19 \times 10^{-4}$	99.18	-0.82	99.73	-0.27
0.258	$-2.08 \times 10^{-4}$	$2.07 \times 10^{-4}$	99.60	-0.40	100.17	0.17
0.291	$-1.98 \times 10^{-4}$	$1.96 \times 10^{-4}$	99.31	-0.69	99.87	-0.13
0.323	$-1.86 \times 10^{-4}$	$1.85 \times 10^{-4}$	99.53	-0.47	100.06	0.06
0.355	$-1.75 \times 10^{-4}$	$1.74 \times 10^{-4}$	99.36	-0.64	99.93	-0.07
0.387	$-1.63 \times 10^{-4}$	$1.62 \times 10^{-4}$	99.48	-0.52	100.03	0.03
0.42	$-1.52 \times 10^{-4}$	$1.51 \times 10^{-4}$	99.42	-0.58	99.94	-0.06
0.452	$-1.41 \times 10^{-4}$	$1.40 \times 10^{-4}$	99.43	-0.57	99.99	-0.01
0.484	$-1.30 \times 10^{-4}$	$1.29 \times 10^{-4}$	99.44	-0.56	100.06	0.06
0.517	$-1.18 \times 10^{-4}$	$1.18 \times 10^{-4}$	99.35	-0.65	99.94	-0.06
0.549	$-1.07 \times 10^{-4}$	$1.06 \times 10^{-4}$	99.45	-0.55	100.10	0.10
0.581	$-9.58 \times 10^{-5}$	$9.53 \times 10^{-5}$	99.24	-0.76	99.77	-0.23
0.614	$-8.41 \times 10^{-5}$	$8.33 \times 10^{-5}$	99.73	-0.27	100.61	0.61
0.646	$-7.31 \times 10^{-5}$	$7.36 \times 10^{-5}$	99.35	-0.65	98.62	-1.38

### 3 结论

本文采用数值模拟技术, 分别研究了应变片竖向位置、应变片环向位置、绝缘子长径比和重力对直立固定的绝缘子弹性模量测量结果的影响。主要结论如下:

(1) 应变片竖向位置对弹性模量的测量结果影响较大, 当应变测点到下法兰顶部的距离与绝缘子总高的距离比值在 0.1~0.6 之间时, 弹性模量的计算误差很小, 在 2% 以内; 当距离比值小于 0.1 或大于 0.6 时, 弹性模量的计算误差较大, 这主要是由于底部法兰的局部约束作用以及顶部加载集中力的影响引起的。并且这一规律不会随着加载力大小的改变而变化。

(2) 应变片环向位置对弹性模量的测量结果影响也较大。对于同一高度的测点, 测点位置与力加载轴线的角度偏离越大, 误差越大。当环向角度偏差  $10^\circ$  时, 弹性模量计算误差约为 1.5%, 且受压侧与受拉侧计算结果的规律一致。

(3) 绝缘子长径比对弹性模量的测量结果影响较小, 离根部法兰最近的测点其弹性模量计算误差随着绝缘子长径比的减小而变大, 而对于竖向距离比处于 0.1~0.6 区间的测点, 不同长径比绝缘子的弹性模量计算误差均在 2% 以内。

(4) 重力对弹性模量的测量结果影响较小, 竖向距离比 0.1~0.6 区间内考查点弹性模量的最大误差约 2%, 由此可见对于直立固定在试验机上的绝缘子试品, 重力的影响是可以忽略的。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] SHENOI K, GORUR R S. Evaluating station post insulator performance from electric field calculations[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1731-1738.
- [ 2 ] 谢明宇, 李法新. 固体的弹性模量和内耗测量方法研究进展[J]. 力学进展, 2022, 52(1): 33-52. (XIE Mingyu, LI Faxin. Review of the measurement methods for elastic moduli and internal friction of solids[J]. Advances in Mechanics, 2022, 52(1): 33-52. (in Chinese))
- [ 3 ] 段阳, 杨浩林, 伍泓锦, 等. 杨氏弹性模量测量实验综述[J]. 物理与工程, 2020, 30(3): 89-102. (DUAN Yang, YANG Haolin, WU Hongjin, et al. Review of the experiments of Young's modulus measurement [J]. Physics and Engineering, 2020, 30(3): 89-102. (in Chinese))
- [ 4 ] 谢同, 黄耀英, 徐耀, 等. 基于质量检测与安全监测数据的补强拱坝弹性模量反馈[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(4): 400-410. (XIE Tong, HUANG Yaoying, XU Yao, et al. Development and application of impact elastic wave testing in hydraulic concrete structure[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(4): 400-410. (in Chinese))
- [ 5 ] 王荣鲁, 吕小彬, 李萌. 水工结构混凝土质量检测冲击弹性波技术的研发和应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(5): 472-478. (WANG Ronglu, LÜ Xiaobin, LI Meng. Development and application of impact elastic wave testing in hydraulic concrete structure[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(5): 472-478. (in Chinese))
- [ 6 ] 中国电工技术学会. T/CES 083-2021 绝缘子试验方法 第 3 部分: 机械试验方法[S]. 北京: 中国电工技术学会, 2021. (China Electrotechnical Society. T/CES 083-2021 Test method for insulators-Part 3: Mechanical test methods[S]. Beijing: China Electrotechnical Society, 2021. (in Chinese))
- [ 7 ] 孙楚平. 复合材料绝缘子抗震性能试验研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016. (SUN Chuping. Study on Seismic Performance of Composite Insulator[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2016. (in Chinese))
- [ 8 ] 杨凡. 特高压复合材料互感器地震响应分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018. (YANG Fan. Analysis of Seismic Response of Composite Material Transformer[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. (in Chinese))
- [ 9 ] WANG Z, ZHANG D, YANG M, et al. Study on bending stiffness of solid post composite insulator[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). USA: IEEE Conference Proceedings, 2020.
- [ 10 ] MOUSTAFA M A, MOSALAM K M. Structural performance of porcelain and polymer post insulators in high voltage electrical switches[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(5): 1-11.
- [ 11 ] 马艳枝. 支柱式瓷绝缘子承载性能的数值分析及实验研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2016. (MA Yangzhi. Numerical Analysis and Experimental Study on the Bearing Performance of Post Insulators[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2016. (in Chinese))
- [ 12 ] 刘海龙, 程永锋, 卢智成, 等.  $\pm 1100$  kV 复合支柱绝缘子抗弯性能试验研究[J]. 电瓷避雷器, 2018(5): 207-214. (LIU Hailong, CHENG Yongfeng, LU Zhicheng, et al. Study on the flexural behavior of  $\pm 1100$  kV composite post insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(5): 207-214. (in Chinese))
- [ 13 ] 井谦, 胡文歧, 张长征, 等. 空心瓷绝缘子机械特性的试验分析研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(4): 221-227, 244. (JING Qian, HU Wenqi, ZHANG Changzheng, et al. Experimental research on mechanical characteristic of hollow ceramic insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(4): 221-227, 244. (in Chinese))
- [ 14 ] 张玥, 谢强, 何畅, 等. 特高压复合支柱绝缘子力学性能试验研究[J]. 南方电网技术, 2017, 11(11): 27-33, 67. (ZHANG Yue, XIE Qiang, HE Chang, et al. Experimental study on mechanical properties of ultra-high voltage composite post insulators[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(11): 27-33, 67. (in Chinese))
- [ 15 ] 杨陈, 马艳枝, 谭立立, 等. 江苏省神马电力复合绝缘子试验报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015. (YANG Chen, MA Yanzhi, TAN Lili, et al. Jiangsu Province ShenMa Power Composite Insulator Experiment Report[R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015. (in Chinese))

## Analysis of factors affecting the measurement accuracy of elastic modulus of post insulator

ZHANG Lihong<sup>1,2</sup>, LÜ Wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Yanhong<sup>1,2</sup>, HU Xiao<sup>1</sup>,  
WANG Maohua<sup>1,2</sup>, XU Lianghua<sup>1,2</sup>

(1. Earthquake Engineering Research Center, IWHR, Beijing 100048, China;

2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Post insulators are key components of most electrical substation equipment and play the role of insulation and support. Elastic modulus is a very important and key physical quantity of insulators, and its measurement accuracy and convenience are very important for industrial production and scientific research of insulators. Firstly, this paper summarized the measurement methods of the elastic modulus of post insulator reported in the literature, including quasi-static method and dynamic method. Considering the economy and convenience of the test process, it is more appropriate to carry out the measurement of elastic modulus in combination with the bending load test. The influence of vertical position and circumferential position of strain gauge, length diameter ratio of insulator and gravity on the measurement accuracy of elastic modulus of upright fixed post insulators were analyzed by using numerical simulation method through comparison. Results show that the vertical and circumferential positions of strain gages have greater influence on the measurement results of elastic modulus, while insulator length diameter ratio and gravity have less influence. The results and conclusions obtained will have important guiding significance for improving the measurement accuracy of the elastic modulus of the post insulators.

**Key Words:** post insulator; elastic modulus; strain gauge position; length diameter ratio; gravity

(责任编辑: 祁 伟)

---

(上接第 395 页)

## High-performance simulation study of PCCP pipeline working behavior

SHANG Hailong<sup>1</sup>, MA Baolong<sup>2</sup>, TIAN Yifei<sup>1</sup>, ZHANG Yuefei<sup>1</sup>, ZHU Xinmin<sup>2</sup>

(1. Beijing Jianghe Zhongji Engineering Consulting Co., Ltd., Beijing 100073, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Large-diameter water pipelines in water diversion projects, including PCCP pipelines, prestressed concrete(PCP) pipelines, fiberglass sand pipes(RPMP), etc., will cause problems such as prestressed steel wire breakage, pipe wall cracking, leakage and even pipe burst damage during long-term operation, which seriously threatens water supply safety and public safety. This paper mainly introduces the method of safety assessment of pipeline structure status, uses the safety margin analysis method based on risk map recommended by the American Water Supply Engineering Association(AWWA) to simulate the working behavior of PCCP pipeline, quotes the pipeline engineering example of the ST irrigation area of the 38th Regiment Construction Management Bureau of the 2nd Agricultural Division of the Xinjiang Production and Construction Corps, lists the material parameters and typical working conditions of the pipeline structure safety assessment, and evaluates the safety status of the pipeline structure, and compares the AWWA recommended method and the pipe-soil joint action analysis method. It can be seen that adopting a safety margin risk map is easier to understand and manipulate. Finally, it is hoped that through the introduction of the method and the research results of this paper, it can provide a good reference for the safety assessment of the same type of pipeline engineering in China.

**Key Words:** PCCP tubes; safety assessment; finite elements; non-destructive testing; simulation analysis

(责任编辑: 祁 伟)