第 52 卷 第 4 期：1813-1826 高电压技术 Vol.52, No.4: 1813-1826
2026 年 4 月 30 日 High Voltage Engineering April 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250255

特高压直流工字型支柱复合绝缘子截面选择与力学性能

赵天放[1]，周松松[2]，周　军[2]，赵帅超[3]，刘云鹏[1]，李　乐[1]
（1. 河北省绿色高效电工新材料与设备重点实验室，保定 071003；
2. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192；3. 河南平高电气股份有限公司，平顶山 467000）

摘　要：支柱复合绝缘子是超特高压电力设备支撑绝缘的重要组件，然而随着电压等级不断升高，芯体直径不断增大，“大直径”支柱面临因固化不均、易开裂等导致成品率低的问题。该文从减少支柱截面积、优化结构的角度出发，进行工字型截面支柱研发以期替代“大直径”圆柱型支柱。首先，该文提出了一种基于网络分析法和变异系数法的综合评价算法，通过仿真 4 种工字型截面在压、弯、扭工况下的应力与位移特性指标确定最优方案；然后，对优选方案开展弯曲和扭转试验的样机验证并与传统圆柱型绝缘子进行对比。结果表明：该文优选的 320 mm×250 mm 截面不仅通过了额定弯曲负荷试验，其弯曲破坏负荷(约 60 kN)远超标准 2.75 倍，相应的变形量小于直径 Φ=220 mm 的圆柱型支柱 0.5 倍，具有良好的弯曲刚度和强度；优选截面在相同扭力下大于 Φ=220 mm 的圆柱型支柱 3~4 倍，但工字型支柱残余角度在 0.1°~0.5°之间，具有良好的弹性恢复能力；仿真表明在抗弯性能中至少可以替代 Φ=240 mm 圆柱型支柱。该研究为支柱复合绝缘子成型质量提高及性能提升提供理论指导和实践依据。

关键词：特高压；支柱复合绝缘子；工字型截面；有限元分析；弯曲破坏试验

Section Selection and Mechanical Behavior of UHV DC I-shaped Composite Post Insulator

ZHAO Tianfang[1], ZHOU Songsong[2], ZHOU Jun[2], ZHAO Shuaichao[3], LIU Yunpeng[1], LI Le[1]
(1. Hebei Key Laboratory of Green and Efficient New Electrical Materials and Equipment, Baoding 071003, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Pingdingshan 467000, China)

Abstract: Post composite insulators are essential components for supporting insulation in ultra-high voltage power equipment. However, as voltage levels and core diameters increase, large-diameter cylindrical posts face issues such as uneven curing and cracking, resulting in low production yields. To address these issues, an I-shaped cross-section design was proposed to reduce the cross-sectional area and optimize structural performance. A comprehensive evaluation algorithm, integrating network analysis and coefficient of variation methods, was developed to simulate stress and displacement under compression, bending, and torsion conditions. Four I-shaped cross-sections were evaluated, and the optimal 320 mm×250 mm design was selected. Prototype tests demonstrate that the I-shaped post not only meets the rated bending load requirements but also achieves a bending failure load of approximately 60 kN, which is 2.75 times the value in China's relative standard;meanwhile, the deformation is half that of a Φ=220 mm cylindrical post. Under torsion, the I-shaped post exhibits 3~4 times greater resistance and excellent elastic recovery, with residual angles ranging from 0.1° to 0.5°. Finite element simulations confirm that the I-shaped post can replace Φ=240 mm cylindrical posts in bending performance. This research provides theoretical guidance and practical insights for improving the molding quality and mechanical performance of post composite insulators.

Key words: ultra-high voltage; composite post insulator; I-shaped section; finite element analysis; bending failure test

0　引言

特高压输电的大规模能源互联与跨区电能调配能力是实现“碳达峰、碳中和”能源建设与环境保护目标的关键途径[1]。作为特高压工程中的核心机械支撑部件，支柱复合绝缘子对换流变压器、大容量换流阀等关键设备提供了重要的机械支撑和电气绝缘作用[2-3]。随着输电电压不断提升，支柱复合绝缘子的力学核心部件——玻璃纤维增强聚合物

基金资助项目：国家电网公司总部科技项目(5500-202255114A-1-1-ZN)。
Project supported by Science and Technology Project of the Headquarters of SGCC(5500-202255114A-1-1-ZN).

(glass fiber reinforced plastic, GFRP)芯体的规格尺寸需相应增大，以满足更高等级的运行需[4-5]。目前，特高压绝缘子芯体直径普遍≥220 mm[6]，但此类“大尺寸”芯体在生产制造和实际运行中面临诸多挑战：1）实心拉挤成型工艺中，内部固化应力较大，界面较多，易导致开裂风险[7]；2）空心缠绕成型芯体存在密封泄漏与凝露聚集问题[8]。针对实心芯体，在保证机械性能和电气强度的前提下，减小支柱芯体截面积是克服固化不均等工艺问题的有效方法。因此，本文从芯体结构优化角度出发，对支柱复合绝缘子进行截面优化设计，旨在实现特高压“大尺寸”芯体的高质量成型生产，同时优化其综合性能。

在工程结构设计中，更易于固化的工字型薄壁结构因其优异的抗压弯性能和材料利用率，可作为传统圆柱型截面的有效替代方案，目前在工业与建筑等领域获得广泛应用[9-10]。研究表明，工字型截面的几何参数对其力学性能具有显著影响：郝增明等通过实验研究精确定位了双腹板工字型腰梁机械连接的应力集中区域[11]，为结构优化提供了理论依据；范重等采用数值模拟方法系统分析了腹宽比对工字型截面压弯承载力和变形控制能力的影响规律[12]；邓夕胜等则通过实验验证了宽翼缘设计可有效提升工字型截面支柱的整体性能[13]。然而，现有研究多集中于金属材料工字型结构，针对复合支柱绝缘子的工字型 GFRP 芯体的结构设计、力学性能测试及优化研究仍较为缺乏，亟需进一步探索。

工字型支柱复合绝缘子在实际运行中需承受静态载荷(如设备自重)、动态载荷(如开关操作冲击)以及环境载荷(如侧向风载)等多重载荷作用，其力学行为主要表现为压缩、弯曲和扭转的复合受力状态。因此，在截面设计优化过程中需综合考虑上述复杂工况的影响。近年来，基于数学模型的结构优化方法在复合绝缘子设计中取得了显著进展：朱金波等通过有限元仿真(finite element analysis，FEA)平台[14]，系统研究了不同材料支柱的静力学特性、模态响应及热学性能，并采用三标度层次分析法结合多层次模糊评价体系，实现了结构性能的综合评判与优选设计；罗楚养等引入灰关联度分析法[15]，建立了强度、刚度和稳定性的多目标优化模型，为工字梁结构的量化设计提供了理论依据；高国强则采用全因子试验设计方法[16]，对车顶绝缘子的关键结构参数进行敏感性分析，通过构建多项式代理模型，实现了最佳结构配置的快速定位。然而，针对工字型截面支柱复合绝缘子的结构设计仍缺乏系统化的优化方法，亟需构建包含数学模型选择、实际工况量化、权重指标确定等关键步骤的综合评估体系，以实现截面最优配置、确保结构合理可靠。

本文创新性地提出了一种工字型支柱复合绝缘子截面优化设计方法。该方法综合考虑压缩、弯曲和扭转等关键力学性能指标，通过网络分析法(analytic network process，ANP)与变异系数法(coefficient of variation method，CVM)相结合的综合评价算法，实现了工字型截面的多目标优化设计。基于优化结果制备芯体试样，系统开展了弯曲性能和扭转性能的试验研究，并通过与圆柱型支柱的力学性能对比验证了其替代可行性。研究采用工字型截面设计，突破了传统圆柱型结构因大直径导致的制备工艺瓶颈，为特高压支柱复合绝缘子的工程应用提供了理论依据和技术支撑。

1 工字型支柱力学 FEA 模型

FEA 是一种基于数值计算的力学仿真方法，通过将连续体离散化为有限数量的单元，利用数学近似求解复杂结构的力学行为。其优势在于能够精确模拟异形截面结构在不同工况下的的力学行为，并且提供可视化应力及变形分布，便于识别薄弱区域。因此本文采用 FEA 建立工字型截面支柱复合绝缘子模型、计算其各工况的力学性能，一方面结合工字型截面设计与评价算法实现截面的优选，另一方面探究工字型支柱对圆柱型支柱的替代可能性。

1.1 工字型截面设计

本文参考国内某特高压电气设备制造单位的±800 kV ZGW6-816 型号圆柱型支柱复合绝缘子的截面半径设计了 4 种面积相等的截面(如图 1(a)—1(d)所示)。各截面的规格尺寸如下：

1）方案 1：长×宽(a_1×b_1)为 250 mm×206 mm，腹板厚度 t_1 为 100 mm，翼缘半径 R_{11}、腹板过渡半径 R_{12} 分别为 33 mm 和 36 mm。

2）方案 2：长×宽(a_2×b_2)为 253 mm×209 mm，腹板厚度 t_2 为 85 mm，翼缘半径 R_{21}、腹板过渡半径 R_{22} 分别为 34 mm 和 50 mm。

3）方案 3：长×宽(a_3×b_3)为 260 mm×217 mm，腹板厚度 t_3 为 80 mm，翼缘半径 R_{31}、腹板过渡半径 R_{32} 分别为 38 mm 和 10 mm。

4）方案 4：长×宽(a_4×b_4)为 320 mm×250 mm，腹板厚度 t_3 为 50 mm，翼缘半径 R_{41}、腹板过渡半

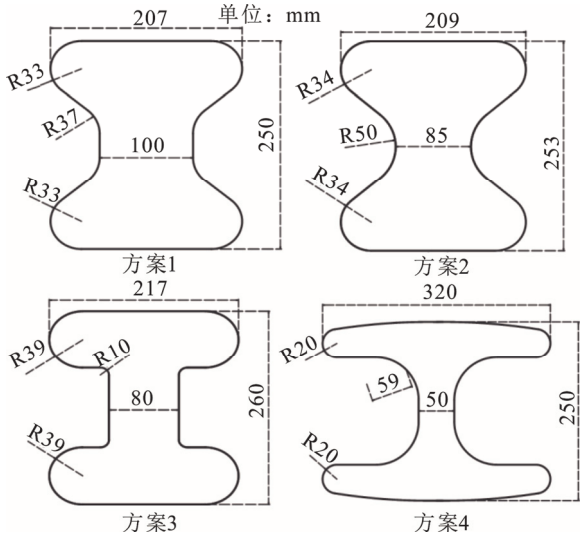


图 1　4 种尺寸工字型截面

Fig.1　Four sizes of I-section

径 R_{42} 分别为 20 mm 和 60 mm。

设计原则主要考虑优化电场分布并有效保证结构受力特性，具体如下：首先，对翼缘及其与腹板连接处进行圆润化处理(图 2，蓝色虚线)，以优化电场分布，避免直角区域场强集中、局部放电；其次，调整腹板厚度(t)和截面长×宽(a×b)，如增大腹板高度(方案 3)和翼缘宽度(方案 4)，提高截面惯性矩以提升抗弯刚度；增大腹板厚度(方案 1)以提升剪切强度，避免腹板过薄导致屈曲失效。通过以上设计优化以实现抗弯刚度与剪切强度的兼顾。

1.2　支柱模型建立

参考±800 kV ZGW6-816 圆柱型支柱复合绝缘子的结构尺寸，对工字型支柱高度、法兰结构以及材料选择进行等效标准化。通过拉伸截面生成高度为 5 650 mm 的 4 种工字型截面芯体、承担±800 kV 支柱的下节部分，同时也构建了不同直径的等高圆柱型支柱绝缘子作为对照组，如图 3 所示。

支柱上法兰套筒高度设定为 140 mm，下法兰为 160 mm。规定工字型截面中心点到翼缘圆弧半径中点的距离 l_{OA}(如图 4(a)所示)为等效半径，保证芯体等效直径 Φ 与法兰外径的比例同圆柱型绝缘子一致，得到工字型支柱上下法兰盘的尺寸见图 4。

芯体为玻璃纤维增强环氧树脂复合材料，法兰为 ZG310-570 铸钢材质，表 1 列出了包括玻璃钢和铸钢的弹性模量 E_b、E_z，泊松比 ν_b、ν_z 及密度 ρ_b、ρ_z 的材料力学参数。

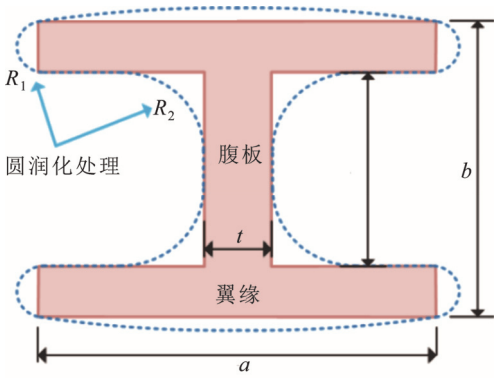


图 2　工字型截面设计依据

Fig.2　I-section design basis

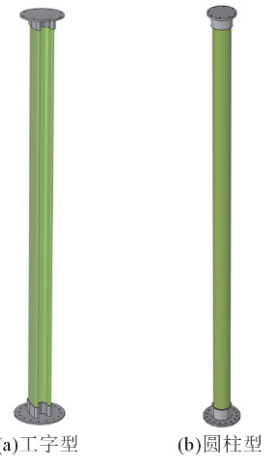


图 3　装配后工字型、圆柱型 GFRP 模型

Fig.3　Assembly I-shaped and cylindrical GFRP model

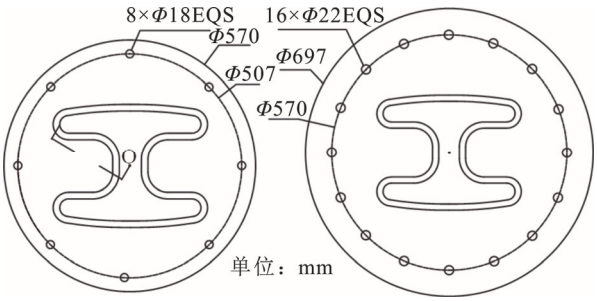


图 4　工字型上下法兰尺寸图

Fig.4　Size diagram of I-shaped upper and lower flanges

表 1　材料属性的设置

Table 1　Setting of material properties

参数	单位	数值
E_b	GPa	35
ν_b		0.33
ρ_b	kg/m³	2 100
E_z	GPa	210
ν_z		0.3
ρ_z	kg/m³	7 850

1.3 边界条件设置

考虑特高压支柱绝缘子实际受力特性，仿真时除常规侧向力外，还考虑扭矩影响[17-19]。通过 FEA 软件 Comsol 5.6 实施多工况仿真。

(1)压缩载荷：施加 200 kN 轴向压缩力，如图 5(a)所示。

(2)弯曲载荷：从垂直于翼缘到垂直于腹板，施加不同方向(如图 5(b)所示)的径向力，大小为规定弯曲破坏负荷(specified cantilever load，SCL)的 16 kN。

(3)扭转载荷：在两对角螺栓孔处施加大小相等、方向相反的额定扭矩(specified torsional load，SToL)的 10 kN·m，如图 5(c)所示。

2 工字型支柱试样制备及试验方法

2.1 试样制备

实心芯体常采用拉挤成型工艺[20]，利用履带式拉挤生产设备(NLL-7T 型)进行工字型支柱复合绝缘子芯体样品制备，具体制备工艺如下：

(1)树脂混合。树脂配方中引入一定质量比的促进剂乙酸苄基三苯基鏻(benzyltriphenylphosphonium acetate, BTPAC)和氯化苄基三苯基鏻(benzyltriphenylphosphonium chloride, BTPPC)调节树脂固化速度和固化放热，从而减少内应力和放热导致的开裂缺陷。具体步骤为：将 L1401 环氧树脂及固化剂、耐高温改性树脂、增韧剂改性恶唑烷酮、促进剂 BTPAC 和 BTPPC、脱模剂等按照一定质量比混合[21]，以转速 500 r/min 搅拌 40 min 后倒入拉挤生产线的树脂胶槽。

(2)拉挤固化。调节固化温度及牵引机传送速度以减少拉挤过程气泡的产生，再配合超声振动进一步排除气泡，以降低缺陷概率。首先，将纱线从纱架上整齐引到束纱架进行整理和束紧，浸渍树脂后经导向装置进行排布，纤维首先穿过预成型模，再进入加热模具以 120-140-150-165 ℃的梯度温度固化、并配合超声振动排除气泡。最后经牵引机传送(拉挤速度 0.8 cm/min)。

(3)切割成型。冷却、切割加工，得到特定高度的试样。为全面验证工字型芯体的特性，本研究制备、配装了 21 支高度 345 mm、截面积比 30:1 的工字型缩比试样，用于多次弯曲破坏试验、探究破坏形式；6 支高度 5 650 mm 的全尺寸试样，包含 4 支工字型支柱和 2 支 Φ=220 mm(简写为 Φ220 mm，其他以此类推)的圆柱型支柱，两者截面积相差 7.76%，具有可比性且便于模具加工。

缩比试样的尺寸确定基于以下：首先，设定截面积比为 30:1，确定缩比试样截面积为 1 515 mm²；其次，根据真型试样与缩比试样的弯曲强度等效公式(式(1))，在期望缩比试样承受真型 1/10 载荷达到破坏的目标下，计算得到缩比试样高度为 345 mm。

$$\sigma_{\max}=\frac{F_z h_z}{I_{zz}/Y_{\max z}}=\frac{\frac{1}{10}\times F_z h_s}{I_{zs}/Y_{\max s}} \tag{1}$$

式中：F 为施加顶端的力；h 为试样高度；I_z 为截面惯性矩；$Y_{\max}$ 为截面距中性轴最远距离；下标 z 代表真型试样、s 代表缩比试样。

(4)金具胶装。端部金具的装配采用适应异型结构的胶装法。金具使用前在 120 ℃的加热板上预热 60 min；完成间隙灌注后在加热板上固化 180 min。

2.2 试验方法

由于特高压支柱复合绝缘子多采用多斜柱并联结构，支柱复合绝缘子受设备自重、设备振动等载荷，在芯体内部、芯体与金具连接部位产生弯曲应力集中；加之纤维拉挤制备工艺和芯体各向异性的特点，其压缩强度较大(250 MPa 以上)，但层间剪切强度(抗扭转特性)相对薄弱。本文依据 GB/T 25096—2010、DL/T 1580—2016 等标准，试验评估工字型支柱芯体弯曲及扭转性能[22-25]，装置如图 6 所示。

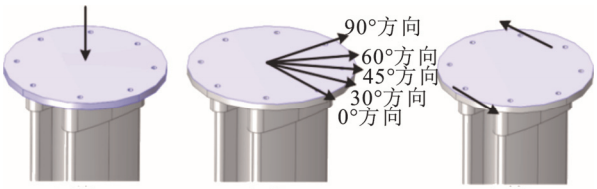


图 5 边界条件设置

Fig.5 Setting of boundary conditions

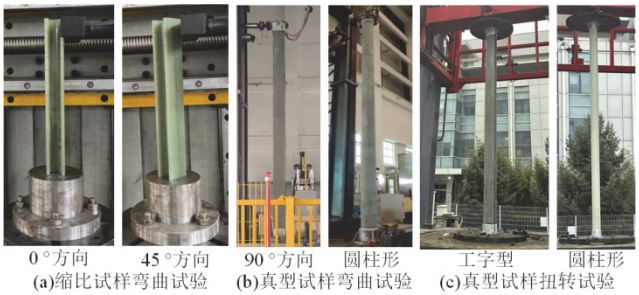


图 6 力学试验装置

Fig.6 Mechanical experiment arrangement

1）弯曲性能试验方面：针对缩比样品，对试样顶端以 0.5 kN/s 的速度线性增加水平力，直至芯体断裂。(1)在 0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°以上 7 个角度方向以 0.1 kN/s 的速度平稳施力至 12 kN(SCL 的 75%)，再逐渐达到满负荷 16 kN，保持 1 min。(2)在 0°、60°、90°对试样以 0.1 kN/s 的速度平稳施力至 12 kN，再继续施力直至破坏。

2）扭转性能试验方面：针对真型样品，以 0.25 (kN·m)/s 的速度分别施加 5.5、10、12、15、20 kN·m 的扭力并卸载。

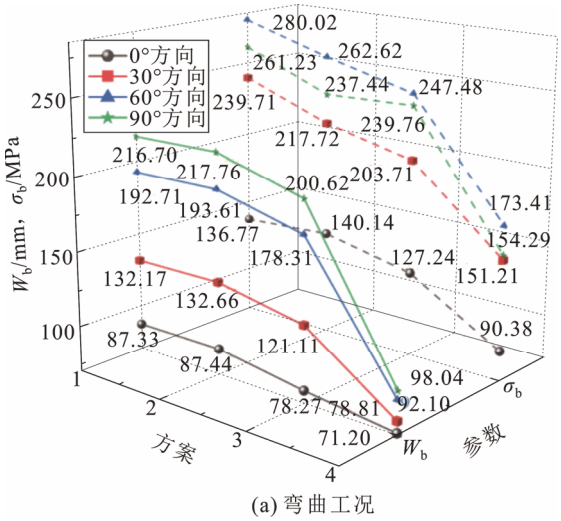
3　工字型支柱力学仿真结果与截面选择

3.1　仿真结果

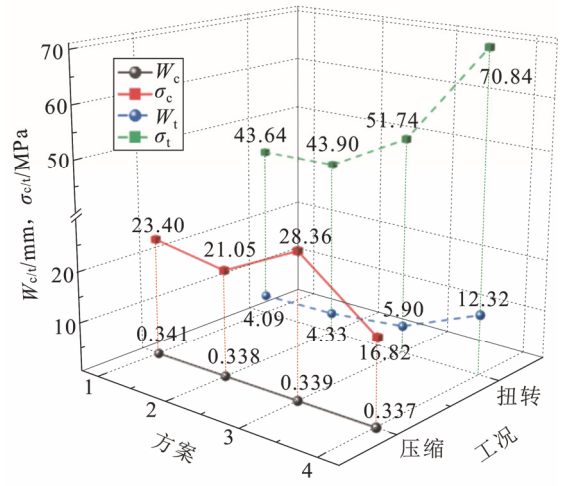
通过FEA得到在既定边界条件下4种工字型截面支柱的复合绝缘子的最大位移与最大 Von mises 应力(如图 7 所示)。整体来看方案 4 的抗弯性能优势显著(与最差方案比最大弯曲变形少 55%、最大应力少 38%)，随着施力方向由垂直翼缘至垂直腹板转换，于 90° 方向处具有最大弯曲变形(98.04 mm)、60° 方向处具有最大应力(173.41 MPa)；压缩工况下 4 个方案的水平较为一致(最大变形 0.337~0.441 mm、最大应力 16.82~28.36 MPa)；扭转工况下方案 1 表现优异(最大位移 4.09 mm)、方案 4 略逊(最大位移 12.32 mm)。

结合数据和应力分布云图(图 8—图 10)具体分析如下。如图 8 所示，在压缩载荷作用下应力分布规律一致，主要集中于支柱的下端，随高度增加逐渐减小。4 个方案的抗形变能力一致，最大压缩变形数值接近且维持在低水平；方案 4 由于翼缘更长、尺寸更宽、应力较为分散，最大压缩应力(16.82 MPa)显著小于方案 1 至 3(21.05~28.36 MPa)，展现了其良好的抵抗压缩破坏能力。

图 9 为 0° 方向弯曲工况(其他方向见附录 C)，尽管施力方向不同，均为翼缘区域存在显著的应力集中现象，而腹板区域的应力相对较小，因此仅考虑异型截面支柱的弹性弯曲变形时，翼缘为薄弱区域。结合图 7，方案 4 于 0°施力方向展现出最小的弯曲变形(71.20 mm)和最大应力(90.38 MPa)，即使处于劣势的 60° 方向拥有较大最大应力(173.41 MPa)、90° 方向拥有较大弯曲变形(98.04 mm)，也远低于其他方案。推测原因方案 4 材料微元远离各方向中性轴、惯性矩较大，抵抗弯曲的能力更佳[26]。



(a) 弯曲工况



(b) 压缩、扭转工况

图 7　4 种方案的最大位移量和最大应力

Fig.7　The maximum displacement and maximum stress of the four schemes

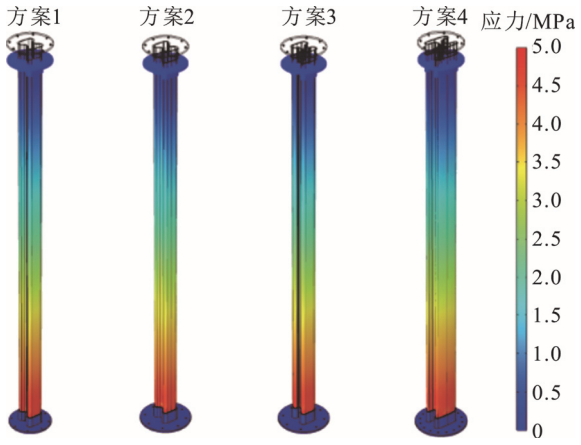


图 8　压缩工况应力分布云图

Fig.8　Von mises stress nephogram of compression condition

图 10 为扭转工况应力分布情况，与弯曲工况不同，在扭矩下腹板区域承受的应力远超翼缘，为

主要承力区域。统一标尺下比较，方案 4 的扭转应力集中区域明显，抗扭能力相对较弱。而方案 1 由于其较大的极惯性矩[27]，展现出最小的最大扭转位移(4.09 mm)与最大应力(43.64 MPa)水平，抗扭性能最佳。

根据上述 FEA 初步计算，4 种工字型截面支柱在压、弯、扭三工况下，应力均未超过玻璃钢材料的许用应力 569 MPa[28]，具有研究意义。通过比较，方案 1 具有更佳的抗扭性能，方案 4 具有更佳的抗压弯性能。

3.2 工字型截面综合评价与优选

为综合考虑工字型芯体受到的轴向压缩、横向弯曲与周向扭转复合载荷作用、评估不同工字型截面的力学响应，结合文献[14,29]整合 ANP 和 CVM 评价算法，构建了针对工字型芯体力学性能评估的综合赋权模型。

ANP 将系统所评估的元素划分成两大类，分别是控制层和网络层，利用超矩阵的原理计算指标权重值[30]。本文将工字型截面力学性能评估作为 ANP 控制层目标，ANP 控制层为指标体系中的一级指标(抗压指标 C、抗弯性能 B、抗扭性能 T)、对应一级权重为 w_{i1}，图 7 所示的各二级指标为 ANP 网络层元素 y，其中 W 单位为 mm、σ 单位为 MPa，对应二级权重为 w_i。具体计算步骤见附录 A，其中比较判断矩阵是综合专家意见和支柱绝缘子实际运行中的工况受力周次(仅隔离开关用支柱复合绝缘子进行开关闸时会有水平扭转力，超特高压应用场景下多柱并联结构消除了扭转对的机械性能的影响)，判定重要性为弯曲=压缩>扭转，计算结果如表 2 所示。

为平衡不同指标间的尺度影响，通过变异系数法(见附录 A)计算各子要素层的客观权重 v_i，分别为 8.13%，8.27%，8.16%，8.23%，8.27%，8.23%，8.39%，8.24%，8.42%，8.26%，9.09%，8.31%。此结果显示各方案数据变化相似，表明 FEA 数据质量较好。

综合评价指标计算式为：

$$P=\sum_{i=1}^{12}(y_{ij}w_iv_i),\ i=1,2,3,\cdots,12 \tag{2}$$

根据指标特征可知，P 越小表明该方案力学性能越好。结合各方案的压、弯、扭性能数据、主客观权重和式(2)得到各方案的综合评价数值为 5.75、5.53、5.47、3.92，由此得出方案 4 为最优方案。上述表明，方案 4 凭最小的压缩与弯曲应力及变形，

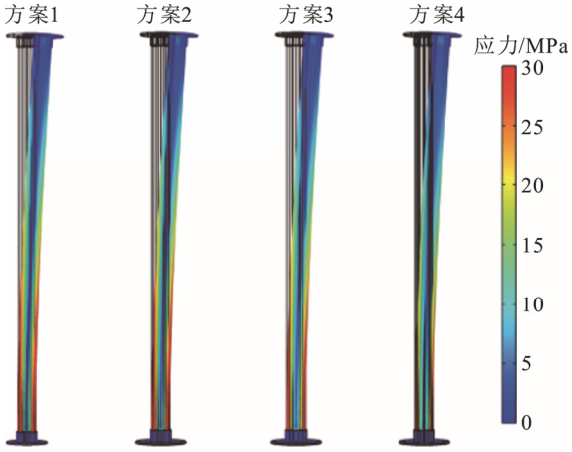


图 9 0°方向弯曲工况应力分布云图

Fig.9 Von mises stress nephogram of bending condition

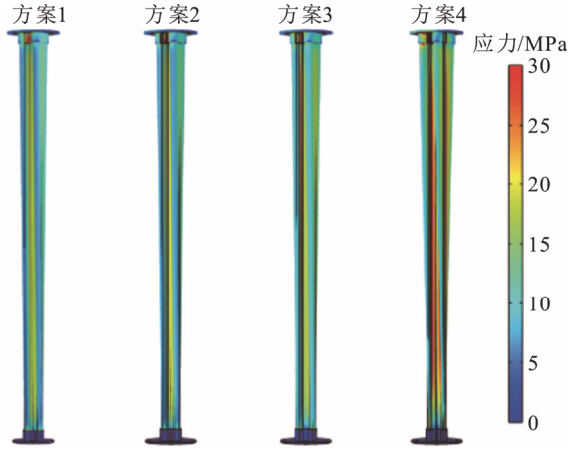


图 10 扭转工况应力分布云图

Fig.10 Von mises stress nephogram of torsion condition

表 2 主观权重分布

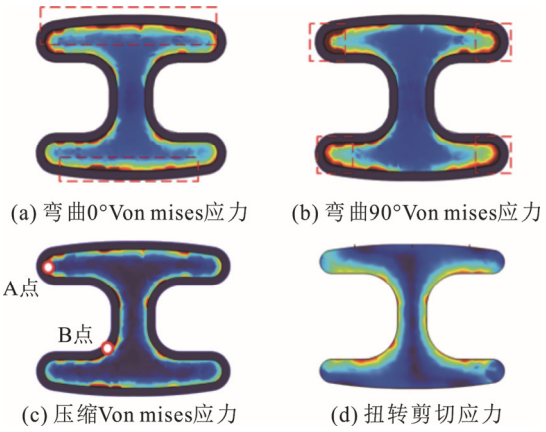
Table 2 Subjective weight distribution

控制层	w_{i1}	网络层 y	w_i
C	0.350	W_c	0.189
		σ_c	0.189
B	0.350	$W_{b,0°}$	0.023 6
		$\Sigma_{b,0°}$	0.023 6
		$W_{b,30°}$	0.023 6
		$\Sigma_{b,30°}$	0.023 6
		$W_{b,60°}$	0.047 25
		$\Sigma_{b,60°}$	0.047 25
		$W_{b,90°}$	0.047 25
		$\sigma_{b,90°}$	0.047 25
T	0.300	W_t	0.122
		σ_t	0.122

在芯体截面设计中成为优选方案。其力学优势源于宽翼缘与小腹宽比，致使截面惯性矩较大，能够增

强刚度、优化应力分布、减小因应力集中导致的破坏可能性。尽管极惯性矩较小致使其扭转性能优势不明显，但应力水平(70.84 MPa)仍维持低位，认为已可满足材料许用应力，综合性能最优。针对优选截面对其应力分布情况进行仿真分析如下。

如图 11 所示，不同载荷下应力分布特征不同：压缩载荷时，应力主要集中在翼缘四角和腹板与翼缘连接的圆弧处等曲率较大的位置，这些过渡区域的应力达到 16.82 MPa，是中间平坦区域 3.58 MPa 的 4.7 倍；弯曲载荷下，主要集中在距中性轴最远距离的部位，如 0°方向下集中在翼缘外沿，腹板几乎不承受高应力(最大应力仅为 9.78 MPa)；扭转工况主要承受剪切应力，主要集中在腹板直线及其与圆弧连接点。



(a) 弯曲0°Von mises应力　(b) 弯曲90°Von mises应力

(c) 压缩Von mises应力　(d) 扭转剪切应力

图 11　法兰固定处截面应力分布

Fig.11　Stress distribution in the cross-section of the flange

4　工字型支柱力学性能评估

4.1　试验结果

4.1.1　弯曲试验

1）弯曲额定负荷试验

弯曲额定负荷试验是评估复合材料芯体结构性能的关键测试方法，其通过量化载荷-变形响应特性，为材料的弹性模量力学参数计算提供了实验依据。本文基于该试验，分析了工字型芯体承载性能：首先，对工字型芯体施加不同方向弯曲载荷，获取力学响应特性；其次，与相同高度 Φ=220 mm 圆柱型芯体对比，分析最大变形量及加载-卸载曲线(如图 12、13 所示)差异。

图 12 展示了 3 支装配后的真型工字型芯体在不同载荷方向下的弯曲变形趋势及弹性模量计算结果。试验结果表明：首先，3 支工字型芯体在满负荷 16 kN 下均能保持 60 s 耐受，成功通过额定负荷耐久性能试验；其次，弹性模量统计均值为 41.6 GPa (如图 12 散点所示)，表明本文制备的工字型芯体具有优异的刚度特性；最后，工字型芯体在 SCL=16 kN 工况下的弯曲变形随施力角度(0°至 90°)的变化呈现整体增长趋势，即抗弯性能随推板从垂直翼缘转向垂直腹板逐渐降低。其中，90°方向弯曲变形约为 110 mm，而 0°和 15°方向弯曲变形仅为 80 mm 左右，此结果表明垂直于翼缘及 30°以内的低角度受力区域具有显著的承载优势。基于上述结果，实际运行中广泛采用的多并联结构[31]利用抗弯优势可合理配置不同方向的芯体组合、从而优化整体承载效率，充分发挥异形截面的角度特性。

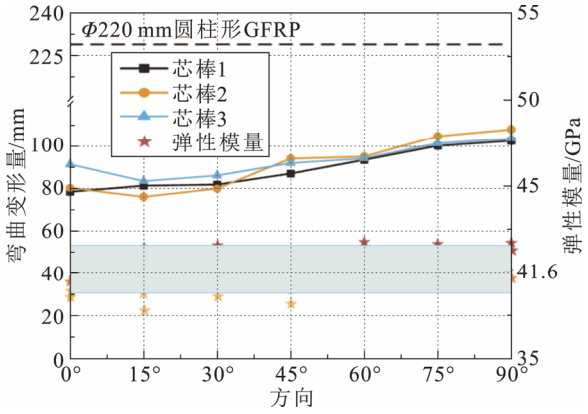


图 12　额定负荷试验变形结果

Fig.12　Deformation results of rated load test

图 13 展示了典型力的加载-卸载曲线，其中滞回环面积(即加载曲线与卸载曲线之间的区域)反映了材料在循环载荷下的能量耗散能力[32]。试验结果表明：(1)在抗弯性能方面，相同载荷下，工字型支柱在 90°劣势方向的弯曲变形量比 Φ=220 mm 的圆柱型支柱降低 50%，而其截面积仅增加 7.76%，体现了显著的抗弯性能优势；(2)在循环能量耗散方面，工字型支柱的加载-卸载曲线呈现轻微非线性波动，且滞回环面积较大，表明其能量耗散能力较强，适用于风载、抗震等动态载荷工况；而圆柱型支柱曲线平滑流畅，滞回环较小，表现出接近理想弹性行为的特点，具有更长的疲劳寿命。综上所述，工字型支柱在抗弯性能和循环能量耗散能力方面均优于传统圆柱型支柱，尤其适用于抗弯、抗震等工程场景。

2）弯曲破坏负荷试验

弯曲破坏试验是评估复合材料芯体极限承载

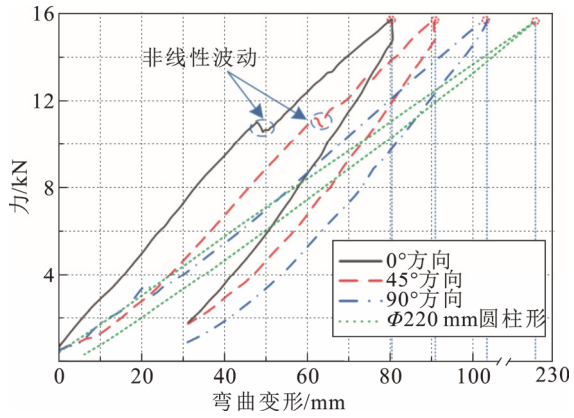


图 13 额定负荷试验加载-卸载曲线

Fig.13 Load-unload curve of rated load test

能力和失效模式的关键测试方法，其通过模拟极端载荷条件下的结构响应，为材料设计和工程应用提供重要依据。本文对 3 支真型工字型支柱进行了不同方向的弯曲破坏试验，并与 Φ220 mm 圆柱型支柱进行对比，破坏形式如图 14 所示。试验结果显示，部分支柱出现胶装开裂、法兰与芯体连接处破裂[33]；部分支柱表现为法兰螺丝滑丝、套筒与盘连接处开裂。

表 3 试验数据显示，工字型支柱在 0°、60°、90°方向下的破坏负荷 F_b 范围为 50~60 kN，对应的弯曲变形为 39~46 mm，且芯体未发生破坏，表明其在不同方向下均表现出较高的承载能力。相比之下，Φ220 mm 圆柱型支柱的破坏负荷为 53.85 kN，略高于工字型支柱的劣势方向但低于其优势方向，整体表现较为一致；而其弯曲变形达到 77.4 mm，显著大于工字型支柱。试验结果表明，工字型芯体与圆柱型芯体的破坏负荷均远超规定弯曲破坏负荷(SCL=16 kN)，说明弯曲破坏并非制约真型芯体质量的关键因素。相较于圆柱型芯体，工字型芯体在相同载荷下的弯曲变形更小，且承载效率更高，进一步验证了其结构优势。

由于真型芯体具有尺寸大、强度高的特点，导致其破坏难度大、试验周期长且成本高昂。为探究工字型截面芯体的破坏负荷规律与失效模式，本研究选取 30:1 缩比试样进行破坏试验分析，不同施力方向下的力-位移曲线如图 15 所示。

随着施力方向变化，破坏负荷与弯曲变形随施力方向变化呈现显著相关性，从 0°转向 90°方向，破坏负荷与弯曲变形总体呈上升趋势。随着弯矩增加，各方向破坏曲线呈现一致规律：初始阶段位移



(a) 胶状开裂、芯体拔出 (b) 法兰损坏

图 14 胶状部分、法兰损伤现场图

Fig.14 Diagram of colloidal part and flange damage scenes

表 3 真型试样破坏负荷试验结果

Table 3 Destructive load test results of true specimens

试验对象	F_b/kN	W/cm
工字型 0°	60.40	39.83
工字型 60°	54.76	42.20
工字型 90°	51.44	46.09
ϕ220 mm 圆柱型	53.85	77.40

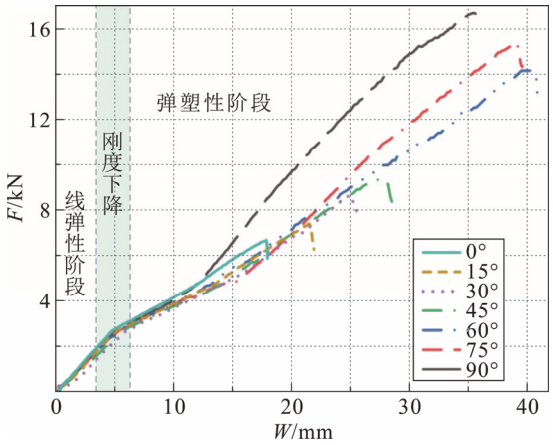


图 15 缩比试样弯曲破坏试验力-位移曲线

Fig.15 Force-displacement curves of bending failure test scaled specimens

与力呈线性关系，表现为弹性响应；约 5 kN 处，弹性模量显著降低，推测是由于异型截面受力不均，低角度施力时腹板侧出现微裂纹，虽未立即导致结构失效但引发刚度锐减，而高角度施力时损伤始于翼缘局部破裂，进而引发腹板全面开裂[33]；最终，缩比试样的破坏负荷在 6~17 kN 范围内，等效至真型试样为 60~170 kN，对比真型试验的破坏负荷为 50~60 kN，难以实现此高强度破坏实验条件。

图 16 展示了弯曲破坏试验中各缩比试样的破坏形式，共观察到 5 种典型的破坏模式，包括从单一腹板开裂(图 16(a))至 3 处翼缘同时开裂(图 16(e))的多种形态，其中腹板和翼缘开裂的侧视特征通过(图 16(f)—(g))展示。结果表明，施力角度与破坏模式间的显著相关性：低角度(0°、15°、30°)下，支柱

主要经历腹板单独开裂(图 16(a))；45°时，破坏转向翼缘，模式分化为腹板单独裂损(图 16(a))与腹板翼缘联合损伤(图 16(b)；60°时，出现单独翼缘裂纹(图 16(c))及腹板翼缘联合损伤(图 16(b))；至于 75°和 90°，破坏主要在翼缘上，表现形式包括单双侧裂纹的纯翼缘损伤(图 16(d)—(e))，与图 11 范式应力集中在四角翼缘处相对应。综上，腹板是低角度施力下易于开裂的部位，而翼缘与腹板交界处是高角度施力下的主要受力部位。基于上述结果，在设计和使用中需重点关注以下方面：(1)优化腹板与翼缘的连接设计[34]，提高交界处的抗裂性能；(2)针对不同施力方向，合理配置加强结构，以提升整体承载能力。

值得注意的是，图 15 显示破坏负荷在 60°时显著非线性增加；且图 11 得到静力学下 0°方向下范式应力集中于翼缘边缘，图 16 却显示 0°方向腹板开裂。推测低角度施力方向下(0°~45°)腹板过窄导致失稳屈曲现象，从而降低了破坏负荷。综上，缩比试样的低角度(0°)方向为抗破坏的劣势方向，而高角度(60°~90°)方向具有显著的强度优势。为提高结构的整体性能，必须合理控制腹板厚度，增强其抗剪能力[35]。

3）试验与仿真值对比验证

将典型工字型试样的弯曲负荷试验数据与仿真结果进行对比(见图 17)，结果表明两者具有良好的一致性，验证了所建立仿真模型的高精度和可靠性。其中，误差较大的 15°方向下最大弯曲变形的试验值为 81.5 mm、仿真值为 74.5 mm，相对误差为 9%；而误差最小的 60°方向试验值为 92.7 mm、仿真值为 92.1 mm，相对误差仅为 0.64%。所有测试方向的误差均控制在 0.64%~9.00%的工程可接受范围内，满足工程设计的精度要求，降低了产品开发周期和试验成本，同时为后文利用仿真模型进行系列化直径圆柱形支柱的评估提供合理性依据。

4.1.2　扭转试验

扭转试验是评估复合材料芯体抗扭性能及弹性恢复能力的关键测试方法。图 18 展示了不同扭矩下工字型试品和圆柱型试品的最大扭转角度及卸载后的残余角度。试验结果表明，工字型和圆柱型试品均表现出优异的抗扭转性能，未发生任何破坏或失效现象。在相同扭转负荷下，工字型试品的扭转角度较圆柱型试品高 3~4 倍，但其残余角度与圆柱型试品相近，均保持在较小范围内(0.1°~1.5°)，表明工字型试品具有良好的弹性恢复能力。基于上述结果，工字型试品在高压输电线路或变电站中可广泛应用于隔离开关等需要高疲劳耐久性的场景。

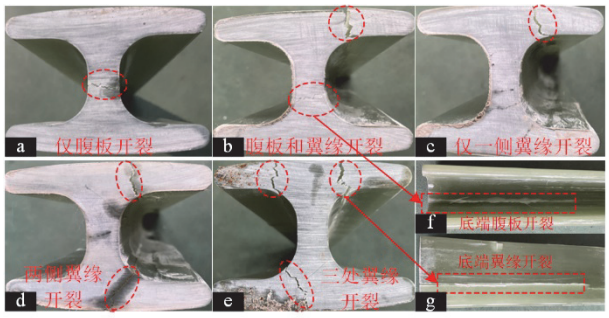


图 16　弯曲破坏试验的破坏形式

Fig.16　Failure mode of bending failure test

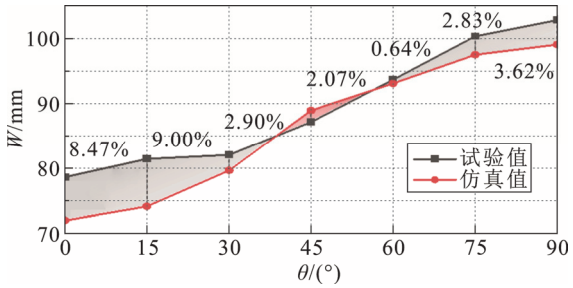


图 17　试验与仿真值对比

Fig.17　Comparison of experimental and simulation value

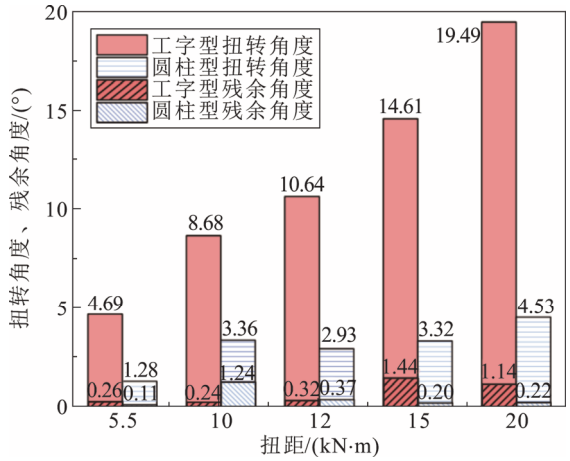


图 18　工字型和圆柱型扭转试验结果

Fig.18　Torsion test results of I-beam and cylindrical specimens

4.2　可替代性研究

基于仿真与试验验证，优选工字型截面支柱在额定弯曲、弯曲破坏及扭转试验中表现优异，部分指标优于 Φ=220 mm 圆柱型支柱，且符合标准。为降低成本并探究替代可行性，本研究采用仿真方法

对比工字型与 Φ230 mm-Φ260 mm 系列圆柱型支柱的力学性能，确定其替代上限。

图 19 对比了工字型支柱在 0°、60°、90°方向的弯曲变形、应力极值与 Φ230 mm—Φ260 mm 圆柱型支柱的性能。结果表明：(1)工字型支柱在 90°劣势方向的最大弯曲变形为 98 mm，与 Φ260 mm 圆柱型支柱接近；(2)工字型支柱在 60°劣势方向的最大应力为 173 MPa，介于 Φ240 mm 与 Φ250 mm 圆柱型支柱之间；(3)在 0°优势方向，工字型支柱的最大弯曲变形和应力均低于 Φ260 mm 圆柱型支柱。因此，在最不利弯曲载荷下，工字型支柱性能与 Φ240 mm 圆柱型支柱相当；在最有利方向下，其抗弯性能优于 Φ260 mm 圆柱型支柱，表明其至少具备替代 Φ240 mm 圆柱型支柱复合绝缘子的潜力。

5 结论

1）320 mm×250 mm 截面尺寸凭借宽翼缘与适中腹宽比，展现最优抗压弯性能，扭转性能略逊，但整体应力保持较低水平，成为最优截面。

2）额定弯矩下真型工字型支柱弯曲变形为 80~108 mm，垂直于翼缘及转 30°以内的低角度受力方向为工字型截面抗弯优势方向；破坏负荷在 50~60 kN 之间，远超规定弯曲破坏负荷(SCL=16 kN)。

3）工字型支柱的抗弯变形能力至少两倍于 Φ220 mm 圆柱型，且变形中耗能较大，抗弯、抗震更具优势；最大扭转角度较圆柱型多 3~4 倍，但残余角度均保持在较小范围(0.1°~1.5°)内，具有良好的弹性恢复力。

4）弯曲工况的劣势方向下，工字型与 Φ240 mm 圆柱型支柱性能接近，优势方向下较 Φ260 mm 圆柱型绝缘子更佳。

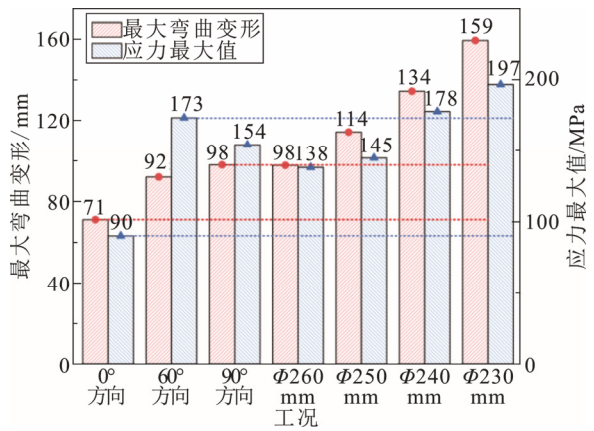


图 19 弯曲工况参数对比图

Fig.19 Comparison diagram of bending condition parameters

工字型支柱芯体由于其异形特性，不足主要源于纤维/基体滑移、脱黏及制造缺陷(气泡、裂缝等)，导致局部应力集中，降低强度和疲劳寿命。未来研究需聚焦：(1)优化成型工艺(配方、工艺参数等)；(2)强化结构薄弱区；(3)进一步完善抗震仿真与动态载荷试验。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 周远翔，陈健宁，张 灵，等. “双碳”与“新基建”背景下特高压输电技术的发展机遇[J]. 高电压技术，2021，47(7)：2396-2408.
ZHOU Yuanxiang, CHEN Jianning, ZHANG Ling, et al. Opportunity for developing ultra high voltage transmission technology under the emission peak, carbon neutrality and new infrastructure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2396-2408.

[2] 张文亮，吴维宁，吴光亚，等. 我国绝缘子的发展现状与应用前景[J]. 高电压技术，2004，30(1)：10-12.
ZHANG Wenliang, WU Weining, WU Guangya, et al. The insulators development and application of our country[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(1): 10-12.

[3] 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.

[4] 刘贺晨，魏利伟，张铭嘉，等. 可回收玄武岩纤维增强复合材料的制备及性能[J]. 高电压技术，2024，50(11)：5087-5097.
LIU Hechen, WEI Liwei, ZHANG Mingjia, et al. Preparation and properties of recyclable basalt fiber reinforced composites[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 5087-5097.

[5] 刘云鹏，张铭嘉，于 红，等. 复合绝缘材料用连续玄武岩纤维老化特性及机理[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3598-3606.
LIU Yunpeng, ZHANG Mingjia, YU Hong, et al. Aging characteristics and mechanism of continuous basalt fibers used in composite insulation materials[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3598-3606.

[6] 周松松，杜怡君，王 晰，等. 我国户外复合绝缘子用环氧树脂基复合材料的应用现状及问题讨论[J]. 中国标准化，2021(增刊 1)：222-228.
ZHOU Songsong, DU Yijun, WANG Xi, et al. Application status and problems of epoxy resin matrix composites for outdoor composite insulators in China[J]. China Standardization, 2021(Supplement1): 222-228.

[7] 张 强，赵卫生，李安睿. 特高压复合支柱绝缘子用内绝缘芯棒概况[J]. 玻璃钢/复合材料，2018(9)：102-105.
ZHANG Qiang, ZHAO Weisheng, LI Anrui. Status of internal insulating mandrel for insulators of UHV composite struts[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2018(9): 102-105.

[8] YI Y, SUN Y Y, WANG L M, et al. Impacts of moisture absorption on electrical properties of rigid polyurethane foam for composite post insulator of UHVDC transmission line[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 131: 107098.

[9] 杨绿峰，谭夏塘，韩晶晶. 工字型钢框架极限承载力分析的通用广义屈服函数[J]. 工程力学，2020，37(12)：114-123，137.
YANG Lufeng, TAN Xiayong, HAN Jingjing. A generalized yield function for the ultimate strength of steel frames with I-sections[J].

Engineering Mechanics, 2020, 37(12): 114-123, 137.

[10] 张　伟，吴文龙，屈建民，等. 工字型截面齐次广义屈服函数与薄壁结构极限承载力[J]. 应用基础与工程科学学报，2015，23(5)：902-913.
ZHANG Wei, WU Wenlong, QU Jianmin, et al. Homogeneous generalized yield function for I-shaped section and load bearing capacity of thin-walled structures[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(5): 902-913.

[11] 郝增明，王忠胜，白晓宇，等. 双腹板工字型 GFRP 腰梁机械连接力学性能试验研究[J]. 科学技术与工程，2024，24(4)：1433-1439.
HAO Zengming, WANG Zhongsheng, BAI Xiaoyu, et al. Mechanical properties test of double web I-beam GFRP girders with mechanical connection[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(4): 1433-1439.

[12] 范　重，陈宇辰，柴会娟，等. 雄安站工形钢管柱受力性能研究[J]. 建筑结构，2021，51(24)：26-34.
FAN Zhong, CHEN Yuchen, CHAI Huijuan, et al. Study on mechanical performance of concave box-section column in Xiong’an Railway Station[J]. Building Structure, 2021, 51(24): 26-34.

[13] 邓夕胜，董事尔，何东升. 基于 ANSYS 技术的双轴对称工字型截面梁优化设计[J]. 钢结构，2007，22(1)：34-36.
DENG Xisheng, DONG Shier, HE Dongsheng. Optimization design of I-twin axis symmetrical beam based on ANSYS[J]. Steel Construction, 2007, 22(1): 34-36.

[14] 闫群民，肖冬雪，王　磊，等. 计及终端模式差异的微电网可靠性评估方法[J]. 电力系统保护与控制，2025，53(2)：176-187.
YAN Qunmin, XIAO Dongxue, WANG Lei, et al. Microgrid reliability evaluation methods accounting for terminal mode differences[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(2): 176-187.

[15] 罗楚养，熊峻江，李伟东，等. 整体成型复合材料模型机翼设计方案优选与验证[J]. 复合材料学报，2014，31(4)：981-990.
LUO Chuyang, XIONG Junjiang, LI Weidong, et al. Optimization design and testing of composite wing model via integral forming process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(4): 981-990.

[16] 高国强，张　川，郭裕钧，等. 基于多项式代理模型的车顶绝缘子背风侧沿面压力优化研究[J]. 高电压技术，2024，50(7)：3172-3181.
GAO Guoqiang, ZHANG Chuan, GUO Yujun, et al. Study on optimization of surface pressure on leeward side of roof insulator based on polynomial surrogate model[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 3172-3181.

[17] 秦　征. 支持式管母线用支柱绝缘子抗弯强度校验[J]. 广西电力工程，2001(2)：36-37.
QIN Zheng. Verifying the bending resistance of support insulator for support type tubular busbar[J]. Guangxi Electric Power, 2001(2): 36-37.

[18] 郭跃东，郭丽华，郭小娴. 一起隔离开关支柱绝缘子断裂原因分析[J]. 电世界，2019，60(5)：28-29.
GUO Yuedong, GUO Lihua, GUO Xiaoxian. Analysis on the cause of a broken insulator of an isolation switch post[J]. Electrical World, 2019, 60(5): 28-29.

[19] 高　嵩，高　超，刘　洋，等. 新型平波电抗器复合支柱绝缘子力学性能分析[J]. 绝缘材料，2020，53(6)：77-83.
GAO Song, GAO Chao, LIU Yang, et al. Mechanical properties of composite post insulator for a new type smoothing reactor[J]. Insulating Materials, 2020, 53(6): 77-83.

[20] 赵新涛，姜　宁，王明道，等. 纤维增强热塑性复合材料拉挤成型工艺研究进展[J]. 材料导报，2024，38(1)：22050237.
ZHAO Xintao, JIANG Ning, WANG Mingdao, et al. Research progress of pultrusion molding process of fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Materials Reports, 2024, 38(1): 22050237.

[21] 路振华，周松松，周　军，等. 拉挤工字形复合绝缘子芯体工艺过程的热传递和固化模拟[J]. 复合材料科学与工程，2025(3)：121-129.
LU Zhenhua, ZHOU Songsong, ZHOU Jun, et al. Simulation of heat transfer and curing of pultruded H-shaped insulator core rod process[J]. Composites Science and Engineering, 2025(3): 121-129.

[22] 张福林. 复合绝缘子压接连接界面结构机械性能传递机理及其结构组装参数确定[J]. 电力建设，2001，22(10)：48-50.
ZHANG Fulin. Transition mechanism of mechanical properties for the compressed connected interfaces structure of compound insulators and determination of their structure assembling parameters[J]. Electric Power Construction, 2001, 22(10): 48-50.

[23] EPACKACHI S, DOLATSHAHI K M, OLIVETO N D, et al. Mechanical behavior of electrical hollow composite post insulators: experimental and analytical study[J]. Engineering Structures, 2015, 93: 129-141.

[24] 国家能源局. 架空输电线路复合横担杆塔设计规程：DL/T 5579—2020[S]. 北京：中国电力出版社，2021.
National Energy Administration. Specification for design of composite cross arm towers of overhead transmission line: DL/T 5579—2020[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2021.

[25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 交流电压高于 1 000 V 变电站用电站支柱复合绝缘子定义、试验方法及接收准则：GB/T 25096—2010[S]. 北京：中国标准出版社，2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China, Standardization Administration of the People’s Republic of China. Composite station post insulators for substations with AC voltages greater than 1000 V—Definitions, test methods and acceptance riteria: GB/T 25096—2010[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2011.

[26] 周　云，王廷彦，张军伟. CFRP 加固钢筋混凝土短梁抗弯刚度计算方法[J]. 土木工程学报，2020，53(11)：9-20，35.
ZHOU Yun, WANG Tingyan, ZHANG Junwei. Calculation method on flexural stiffness of reinforced concrete short beam strengthened by CFRP[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(11): 9-20, 35.

[27] 张元海，刘泽翔，王晨光. 带悬臂板薄壁箱梁极惯性矩的合理计算方法[J]. 铁道学报，2019，41(8)：94-99.
ZHANG Yuanhai, LIU Zexiang, WANG Chenguang. Rational method for computing polar inertia moment of thin-walled box girders with cantilever slab[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(8): 94-99.

[28] 李挺标，张广全，焦忠政，等. 特高压大直径支柱复合绝缘子静力分析报告[J]. 电器工业，2022(8)：29-32.
LI Tingbiao, ZHANG Guangquan, JIAO Zhongzheng, et al. Static analysis report on ultra high voltage large diameter post composite insulators[J]. China Electrical Equipment Industry, 2022(8): 29-32.

[29] 陈道君，钟　伟，杨　楠，等. 基于综合赋权的电磁环网开环方案评价方法研究[J]. 高压电器，2023，59(1)：77-85.
CHEN Daojun, ZHONG Wei, YANG Nan, et al. Research on evaluation method of open-loop scheme of electromagnetic loop network based on comprehensive weight[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(1): 77-85.

[30] 计　蓉，侯慧娟，盛戈皞，等. 基于组合赋权法和模糊综合评价的电力设备状态数据质量评估[J]. 高电压技术，2024，50(1)：274-281.
JI Rong, HOU Huijuan, SHENG Gehao, et al. Data quality assessment for power equipment condition based on combination weighing method and fuzzy synthetic evaluation[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 274-281.

[31] 朱　旺，任阿阳，薛志航，等. ±800 kV 干式平波电抗器抗震性能分析[J]. 四川电力技术，2022，45(6)：16-21，79.
ZHU Wang, REN Ayang, XUE Zhihang, et al. Seismic performance analysis of ±800 kV dry-type smoothing reactor[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2022, 45(6): 16-21, 79.
[32] 吴星霞，郑山锁，刘晓航，等. 变电站绝缘子抗震性能试验及数值模拟研究[J]. 振动与冲击，2023，42(5)：83-91.
WU Xingxia, ZHENG Shansuo, LIU Xiaohang, et al. Aseismic performance tests and numerical simulation of substation insulators[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(5): 83-91.
[33] SOUSA J M, CORREIA J R, CABRAL-FONSECA S, et al. Effects of thermal cycles on the mechanical response of pultruded GFRP profiles used in civil engineering applications[J]. Composite Structures, 2014, 116: 720-731.
[34] 陈　振，王俊华，高　翔，等. 起重机工字型截面梁结构优化设计探讨[J]. 港口装卸，2014(6)：17-20.
CHEN Zhen, WANG Junhua, GAO Xiang, et al. Discuss on structural optimal designing on crane's beam with I-cross section[J]. Port Operation, 2014(6): 17-20.
[35] 虞皓影，张伟欣，李瑜萍. 钢结构中工字钢梁腹板厚度的确定[J]. 洛阳工学院学报，2002，23(2)：96-98.
YU Haoying, ZHANG Weixin, LI Yuping. Determination of web width of steel beam on steel structure[J]. Journal of Luoyang Institute of Technology, 2002, 23(2): 96-98.



刘云鹏(通信作者)
1976—，男，博士(后)，教授，博导
主要研究方向为电气设备在线监测及故障诊断
E-meil: liuyunpeng@ncepu.edu.cn

LIU Yunpeng
Post-doctorate
Professor
Corresponding author



赵天放
2000—，女，硕士生
主要研究方向为复合绝缘材料及装备多尺度仿真模拟
E-mail: 1242772551@qq.com

ZHAO Tianfang

收稿日期　2025-02-25　在线出版日期　2025-07-16　　编辑　曹昭君

附录 A

1.ANP 算法：

1）建立工字型截面支柱复合绝缘子芯体力学评估评估 ANP 网络结构。如图 A1 所示。

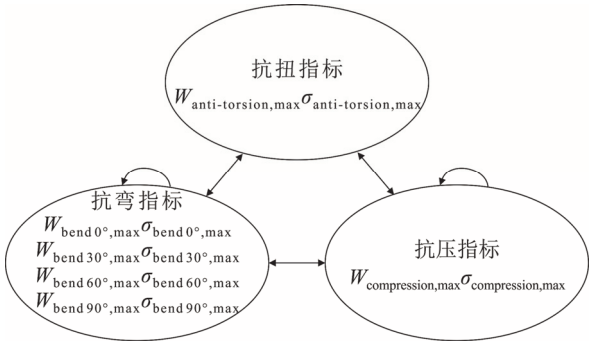


图 A1　网络拓扑图

Fig.A1　Network topology diagram

2）确定控制层加权矩阵 $\boldsymbol{W}$。首先调研支柱复合绝缘子受力特性，根据电力行业科研院所和绝缘子制造厂家的特高压输电专家的经验和运行过程中工况受力周次，利用九标度法(参照式(A1))，基于准则层各元素之间的关联性和优先级，构建了比较判断矩阵。随后，为确保判断矩阵的合理性，进行一致性检验。最终得到归一化特征向量，并组成加权矩阵 W。

$$b_{ij}=\begin{cases}1，\text{两元素相比，同等重要}\\3，\text{两元素相比，因素}i\text{ 稍微重要}\\5，\text{两元素相比，因素}i\text{ 明显重要}\\7，\text{两元素相比，因素}i\text{ 强烈重要}\\9，\text{两元素相比，因素}i\text{ 极端重要}\end{cases}\tag{A1}$$

其中：数 2，4，6，8 为上述判断 b_{ij} 的中值，当因数 j 比 i 重要时的比例标度元素 $b_{ji}=1/b_{ij}$。

3）基于网络层结构(如图 A1 所示)，首先分别计算同一网络层及不同网络层中各指标的权重系数向量。随后，结合网络层内各指标间的相互关系，构建初始超矩阵。通过将初始超矩阵中各指标权重块与加权矩阵的权重值相乘，最终得到加权超矩阵 $\boldsymbol{C}$。

4）确定加权极限矩阵并得到权重。通过式(A2)得到加权极限超矩阵 w_i，即主观权重。

$$w_i=\lim_{k\to\infty}(\frac{1}{N})\sum_{k=1}^{N}c^k\tag{A2}$$

其中 N 为指标个数、c 为加权超矩阵指标。

考虑到综合评价指标体系中的各项指标量纲与数量级不同，直接比较难以反映其差别程度。因此文中利用变异系数法计算各指标客观权重，以此反映各指标的重要程度。

2.CVM 算法：

1）对评价指标值进行标准化处理，求得标准矩阵 Y'，其元素表达式为

$$y'_{ij}=\frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n=3}y_{ij}^2}}\quad i=1,2,3,\cdots,m\tag{A3}$$

式中：y_{ij} 是仿真数值。

2）通过式(A4)、(A5)分别计算各指标均值 y^* 与标准差 si：

$$y^*=\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n=3}y'_{ij}\quad i=1,2,3,\cdots,m\tag{A4}$$

$$s_i=\sqrt{\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n=3}(y'_{ij}-y^*)^2}\quad i=1,2,3,\cdots,m\tag{A5}$$

3）计算变异系数 V_i，求解各指标的客观权值 w_i，具体计算见式(A6)、(A7)：

$$V_i=\frac{s_i}{\left|y^*\right|}\quad i=1,2,3,\cdots,m\tag{A6}$$

$$v_i=\frac{V_i}{\sum_{i=1}^{m}V_i}\quad i=1,2,3,\cdots,m\tag{A7}$$

附录 B

不同方向应力分布图，如下所示：

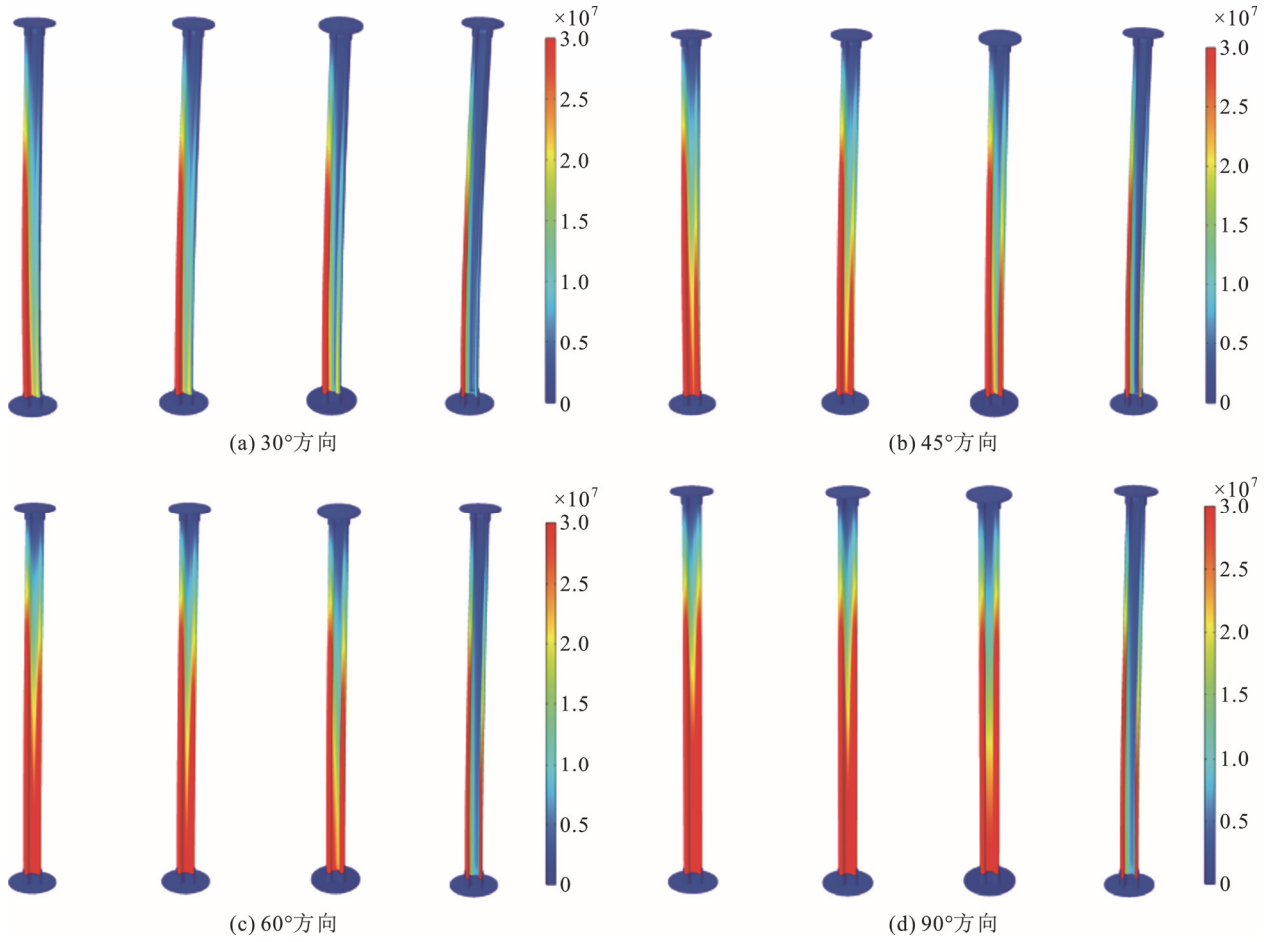


图 B1　不同方向应力分布图

Fig.B1　Stress distribution diagrams in different directions