

Research on Ultimate Bearing Capacity of Composit Space Joint with Spatial Tubular Joint and Junction Plate

Qun Gu¹, Meng Shi², Xiaobiao Lei¹, Yuming Zhang¹, Ling Zhang^{2†}

1. Power Grid Branch Office, Northwest Electric Power Design Institute Co., LTD. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an, 710075, China

2. State Key laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China

†Email: zhangl@mail.xjtu.edu.cn

Abstract

According to the design of one 750kV transformer substation structure, this paper proposes a new kind of composit space joint with spatial tubular joint and junction plate. To prove the strength and the ultimate bearing capacity of the new type of joint, some joints are selected as the representative ones from the transformer substation structure, then the numerical simulations for them are carried out using the FEM software ANSYS. Meanwhile, the affections of different geometric parameters of composit space joint to the ultimate bearing capacity are analysed and illustrated. According to all the work we have done, some proposals to improve and modify the Chinese standards will be given in the conclusions.

Keywords: Tubular Joint; Composit Space Joint; Ultimate Bearing Capacity; Finite Element Analysis

半相贯半连接板复合空间节点承载力研究

顾群¹, 史猛², 雷晓标¹, 张玉明¹, 张陵²

1. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075

2. 西安交通大学 机械强度与振动国家重点实验室, 陕西 西安 710049

摘要: 依托某 750kV 变电站工程, 本文提出部分相贯部分连接板新型节点连接形式, 选取变电构架中具有代表性位置的节点, 使用有限元分析软件 ANSYS 进行新型相贯节点强度验算以及极限承载力求解, 分析节点构造措施对其承载力的影响程度, 考察新形式节点的强度和实用性, 依据综合分析的结果进行结论总结同时还提出对我国规范的完善和修改建议。

关键词: 相贯节点; 复合空间节点; 极限承载力; 有限元分析

引言

随着我国经济社会的高速发展, 输变电工程中对于线路输送电压等级的要求越来越高, 相应的对于构架强度的要求也就越高。钢管格构式变电构架, 作为应用最为广泛的构架型式, 其出色的结构强度和对于钢材用量的节约使其能够广泛的应用于输变电工程当中, 但以往的变电构架工程当中, 各杆件间的连接方式主要为连接板螺栓连接, 这种连接形式虽然便于运输, 但节点板的用钢量较大, 在现场需要较长的安装时间、费时费力, 并且连接板节点连接形式结构迎风面积较大, 使结构承受更大的风荷载作用而不利于结构承载。为改善钢管格构式变电构架施工周期长、风荷载作用较大等劣势, 以及为了进一步节约钢材, 本文在变电构架中引入更具优势的相贯节点形式^[1], 提出半相贯半连接板的复合空间节点新构型, 并依托某 750kV 变电构架工程进行有限元数值分析, 对新形式节点的极限承载力及构造措施进行了相应研究。

目前对于相贯节点的研究以平面节点形式为主，对于节点的研究内容主要为节点的承载力、刚度以及加强措施等方面^[2]。相贯节点的相关研究内容最早是 1948 年由前西德实施的钢管节点极限强度试验；William 提出了应用有限元方法拟合结构极限承载力的方法^[3]；2004 年，Y.S.Choo 等人通过对 X 型相贯节点平面内弯曲强度的试验与有限元研究，建立了 X 型节点平面内弯曲预估公式^[4]。我国对于相贯节点的研究由上世纪 80 年代开始广泛，1988 年，同济大学对 X 形方管节点极限承载力进行了试验研究，在此基础上提出了极限承载力的分析方法；2011 年，李海旺等采用有限元分析软件 ANSYS 对 4 种节点模型的力学性能进行分析，表明套管加强方法对相贯节点承载力有较大幅度提高^[5]；王萌等采用有限元软件 ABAQUS 建立非线性杆系、实体有限元模型，深入探讨了不同相贯形式节点在复合作用下的复杂应力和变形分布^[6]。我国现行规范以及各国钢管结构设计规范中，对于相贯节点的承载力研究多集中于平面节点形式，而对空间节点形式的研究较少，为此本文以现有研究成果为依据，在为我国现行规范提供部分依据的同时，对我国现行规范的完善和修改提供部分建议。

1 典型节点选取及模型建立

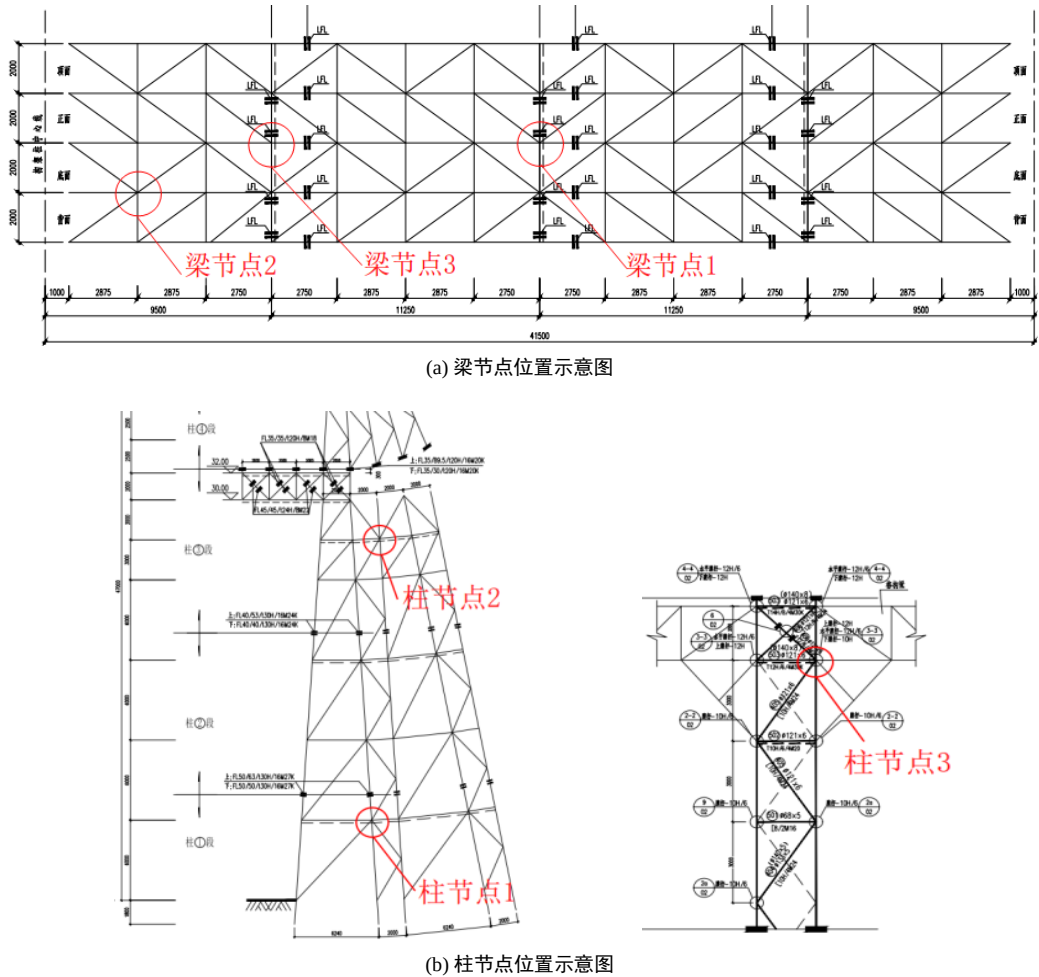


图 1 六个典型节点所处构架中位置示意图

由于组成变电构架结构的节点形式复杂且种类较多，若要对结构进行整体构架试验模型以及全节点试验验证，既费时费力又会造成大量的资源浪费，因此本文选取形式具有代表性、位置较为关键且受力情况较为复杂的 6 个典型节点进行数值模拟研究，节点在构架中所处位置如图 1 所示，对每个节点分别选取两种工况条件进行有限元数值模拟分析，以两种工况判定节点极限承载力的最终结果。各个节点的具体形式使用与结构实际构造设计相同尺寸，其形式如图 2 所示。

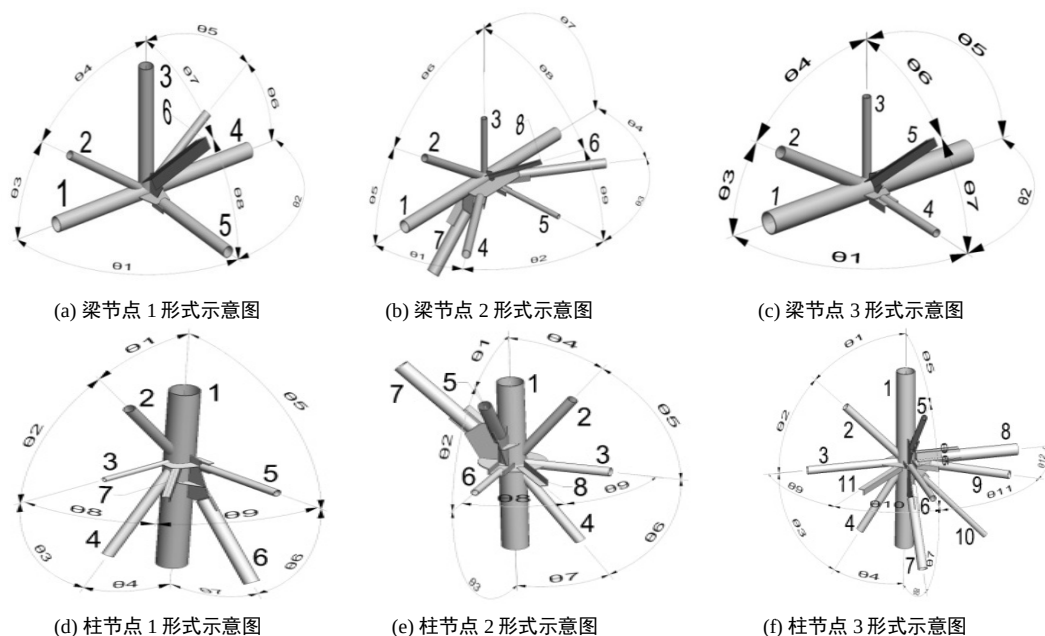


图 2 六个典型节点形式示意图

有限元数值分析是目前应用最广泛、最高效、准确度最高且最为简便的数值模拟研究方法^[7]。并且通过研究表明，有限元数值模拟结果与真型试验的分析结果非常接近，具有较高的计算精度^[8, 9]，因此本文应用大型商业有限元分析软件 ANSYS 进行数值分析研究，采用理想弹塑性作为钢材本构关系。结合节点各管件及板材均为薄壁结构，模型建立使用壳单元 SHELL281，该单元类型可较好模拟薄壁结构模型，并且支持材料非线性、几何非线性，便于结构极限承载力的求解以及构造要素等对承载力影响的后续研究，单元形式如图 3 所示。

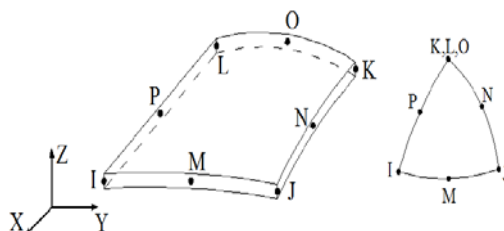


图 3 壳单元 SHELL281 单元形式

为排除模拟过程中螺栓、焊缝模型对结构强度计算以及收敛造成的干扰，需在建模过程中进行简化，将螺栓模型用刚性单元代替并去除焊缝模型，模型建立过程中，通过布尔运算进行相贯支管、连接板与主管连接以及优化网格划分所进行的切割，本文选取梁节点一为例进行计算研究，节点有限元分析模型网格划分形式如图 4 所示。

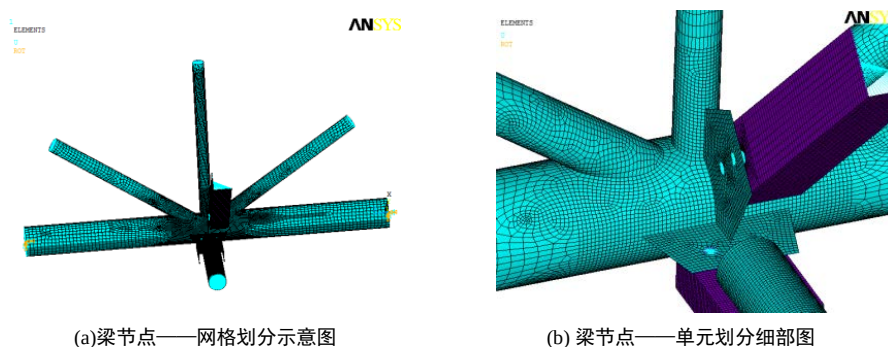


图 4 节点有限元网格划分示意图

2 极限承载力的研究

2.1 边界条件的确定

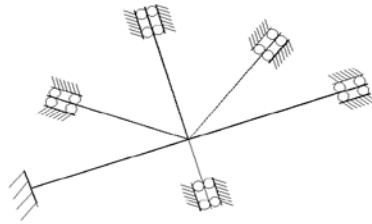


图 5 节点边界约束形式示意图

有限元模拟分析研究中各节点均使用与原结构相同大小比例，材料与结构设计中选取材料相同，主管采用 Q345 钢，各支管即连接板采用 Q235 钢。为更好的模拟节点在构架中真实的受力状况，采取主管一端全约束，主管的另一端与其余支管均在全约束前提下释放一个轴向自由度以施加荷载，各杆件约束如图 5 所示，各节点中杆件施加的荷载，用电力结构分析经常使用的软件 STAAD/CHINA 以构架整体建模在结合覆冰、有风等多种受荷条件下进行整体分析，求得各节点在各工况条件下所承受荷载的较大值作为节点加载的初始值进行极限承载力研究。

2.2 极限承载力的判定标准

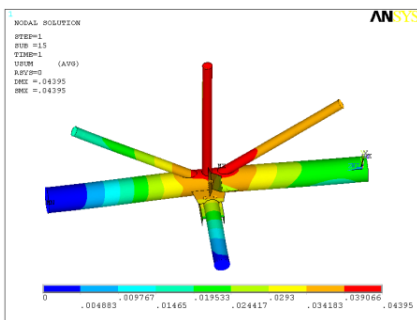
对于节点的极限承载力，由于其影响因素复杂，目前无论是国内还是国外都没有给出较明确的判定标准，皆为结合试验结果与数值模拟结果所给出的判定标准。本文选取两项标准作为极限承载力的判定准则：

1>极限强度准则试验选取结构最终加载至破坏所对应的荷载值，有限元模拟选取结构最终由于达到极限强度而发生不收敛时所对应的荷载值；

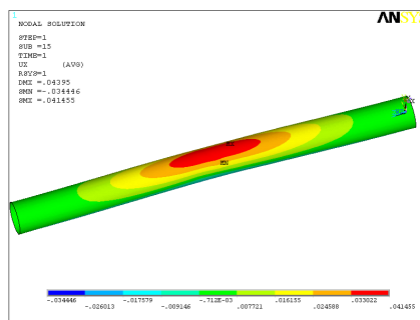
2>极限变形准则试验与有限元均取主管径向变形最大处达到主管管径 2%时所对应的荷载值^[10]。

最终选取以上两种判定标准下所对应荷载值的较小值作为结构的极限承载力。

2.3 节点极限承载力的求解



(a) 梁节点-等效应力云图



(b) 梁节点-主材径向位移云图

图 6 数值模拟结果

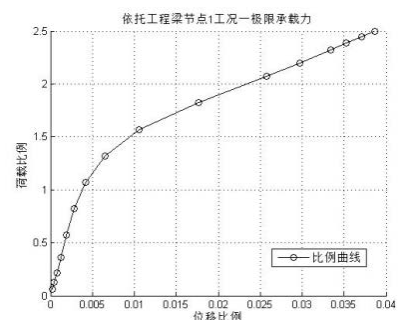


图 7 荷载-位移比例曲线图

依据 2.1 节方式计算所求得的节点各管件受荷情况，以该荷载作为荷载标准值，在求解结构的极限承载力时，每一荷载均乘相应的放大系数，施加于节点中进行求解，本文计算模型以 5 作为放大系数，计算至结果不收敛为止。为判定是否为极限变形准则控制极限承载力，需提取计算模型的位移结果进行相应分析，单独选取出结构主管的 x 向位移云图，变换节点坐标为柱坐标，则主管 x 向位移云图变为各节点在主管径向位移云图，如图 6 所示，依次判定此坐标条件下主管上沿管径方向位移最大点，取不同子步时此节点和与此点沿主管圆心中心对称节点，求得主管在相应荷载比例条件下的结构位移变化比例，以荷载的时间加载比

例为荷载比例，作结构的荷载-位移比例曲线图，如图 7 所示，拟合节点的荷载-位移比例曲线，判定结构在发生破坏，荷载位移曲线达到峰值时是否超过 2%管径的限制，经计算，各节点在两工况条件下的极限承载力大小及相应的判定准则如表 1 所示。

表 1 因素水平表

节点编号	荷载工况	极限承载力	破坏准则
梁节点1	工况一	1.89	极限变形
	工况二	3.12	极限变形
梁节点2	工况一	2.53	极限变形
	工况二	3.52	极限变形
梁节点3	工况一	3.62	极限变形
	工况二	5.83	极限变形
柱节点1	工况一	2.35	极限强度
	工况二	4.49	极限强度
柱节点2	工况一	1.57	极限强度
	工况二	1.72	极限强度
柱节点3	工况一	2.19	极限强度
	工况二	4.64	极限强度

3 构造要素对承载力影响研究

相贯节点本身可提取多种无量纲化构造要素，包括支主管厚度比(t/T)、主管径厚比($D/2T$)、支主管直径比(d/D)以及支管间夹角(θ)等，在本文的研究过程中，通过研究不同构造要素逐渐变化的条件下节点极限承载力的变化，得出在相贯节点结构设计时各构造要素的影响程度。

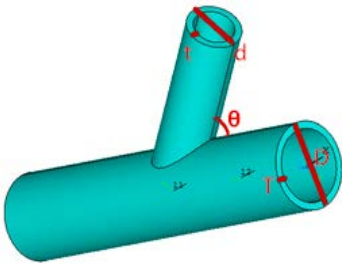


图 8 节点构造要素示意图

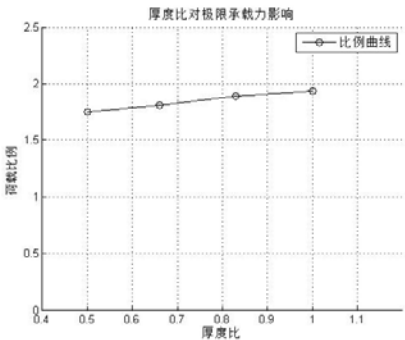


图 9 支主管厚度比对承载力影响

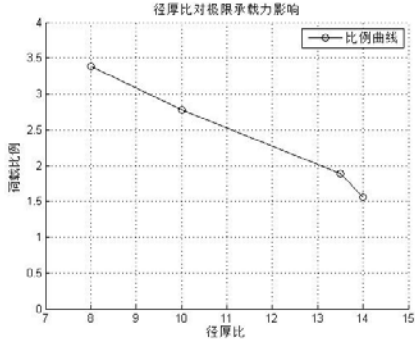


图 10 主管径厚比对承载力影响

3.1 支主管厚度比

通过改变支管厚度以变换节点支主管厚度比，求解不同节点尺寸条件下结构的极限承载力，通过极限承载力影响趋势图的观察可知，随着支主管厚度比的增大，结构承载力整体呈变大的趋势，但变化不明显，可知支、主管厚度比变化对结构强度影响程度较低。

3.2 主管径厚比

主管径厚比通过仅改变主管厚度实现，通过不同主管厚度情况下对结构极限承载力的研究分析，结构极限承载力变化的分析可知，结构的极限承载力随着主管径厚比的增大而减小，且变化趋势明显，几乎呈比例减小，表明主管径厚比对节点强度的影响程度较大。

3.3 支主管直径比

支、主管直径比（又称宽度比）的变化通过改变支管管径来实现，通过对改变支主管宽度比情况下，结构极限承载力变化的分析可知，结构的极限承载力随着支主管直径比的增大而减小，变化趋势随着直径比的增大而越发明显，承载力变化趋势接近于二次曲线，对节点强度的影响程度较大。

3.4 支主管角度

支、主管角度通过仅改变支管与主管之间的角度实现，通过对改变支管角度情况下，结构极限承载力变化的分析可知，结构的极限承载力随着支管角度的增大而减小，但相较可知，支管角度对结构极限承载力的影响程度降低，并且随着角度的增大，角度对荷载比例的影响程度逐步降低。

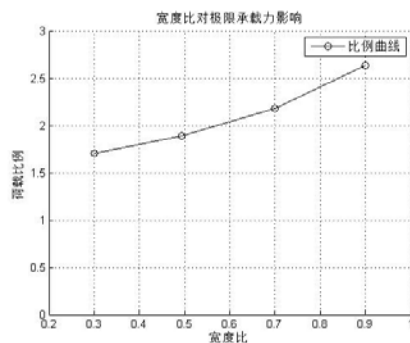


图 11 支主管宽度比对承载力影响

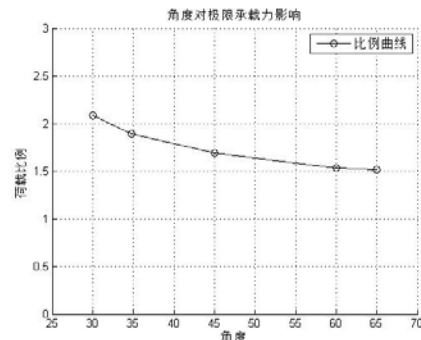


图 12 支主管角度对承载力影响

4 结论

- 1、通过有限元模拟极限承载力结果可知，新形式节点能够较好的承受节点各种工况条件下的荷载，并且具有较好的安全裕度，相较原节点形式优势明显；
- 2、对各节点结果后处理分析观察，表明节点主管径向强度是决定节点强度的重要因素，而各相贯线的冠点位置，作为应力集中发生最为严重的区域，应加以注意，必要时可采取部分补强措施；
- 3、目前国内外对于空间相贯节点以及复合空间节点的设计内容较少，建议增加相应部分内容的研究，为规范的完善提供依据。

REFERENCES

- [1] Changdong Wu, Yunbo Chen. Application of Steel Tube Structure on Engineerings [J]. Industrial Construction, 1997(02): 11-16
- [2] Yiyi Chen, Yangji Chen. The Current Research Status of Directed Welded Tubular Joints[J]. Building Structure, 2002(07): 52-55
- [3] Cofer W F, Will K M. A FINITE ELEMENT TECHNIQUE FOR THE ULTIMATE STRENGTH ANALYSIS OF TUBULAR JOINTS[J]. Engineering Computations, 1992(9): 345-358
- [4] Choo Y S, Liang J X, van der Vegte G J. Static strength of collar plate reinforced CHS X-joints loaded by in-plane bending[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004: 1745-1760
- [5] Haiwang Li, Kai Li, Jing Liu, et al. Mechanical Property Study on Three Ways to Enhance The Steel Tube Arc Truss:Consturcture Safety, Better Life, The first China Civil Engineering Academic Conference in The Midwest, Zhengzhou Henan China, 2011
- [6] Meng Wang, Yongjiu Shi, Yuanqing Wang et al. Finite Element Analysis on Behavior of Latticed Mutually Intersecting Connections [J]. Building Structure, 2013(21): 9-13
- [7] Mashiri F R, Ma X. Plastic mechanism analysis of welded thin-walled T-joints made up of circular braces and square chords under in-plane bending[J]. Thin-Walled Structures, 2004(42): 759-783
- [8] Choo Y S, van der Vegte G J, Zettlemoyer N. Static Strength of T-Joints Reinforced with Doubler or Collar Plates. I: Experimental Investigations[J]. Journal of Structural Engineering-Asce, 2005(131): 119-128

- [9] van der Vegte G J, Choo Y S, Liang J X. Static Strength of T-Joints Reinforced with Doubler or Collar Plates. II: Numerical Simulations[J]. Journal Of Structural Engineering-Asce, 2005(131):129-138
- [10] Shizhe Zhu, Yaozhi Luo, Rong Lou. Experimental Investigation of X-joint in Double-arch Structure [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008(01):99-104

【作者简介】



¹ 顾群（1970-），女，大学本科，工业与民用建筑专业，1992年毕业于西安建筑科技大学。

Email: guqun@nwepdi.com

² 史猛（1990-），男，汉族，硕士，结构工程专业，现就读于西安交通大学人居环境与建筑工程学院。

Email: samooning@stu.edu.cn

³ 雷晓标（1981-），男，汉族，硕士，结构工程专业，从事变电土建设计与研究工作。

⁴ 张玉明（1964-），男，汉族，大学本科，教授级高级工程师，国家一级注册结构工程师，从事变电土建设计和研究工作。

⁵ 张陵（1957-），男，教授，博士生导师，西安交通大学，机械结构强度与振动国家重点实验室，本文通讯作者。

Email: zhangl@mail.xjtu.edu.cn