

文章编号:2095-0411(2015)03-0035-04

## 输电铁塔受腐蚀节点蚀余力学性能的有限元分析

黄土君

(江苏省电力公司 电力经济技术研究院,江苏 南京 210008)

**摘要:**输电线路铁塔结构,由于直接暴露在大气环境中,极易因大气污染物、恶劣环境的作用而受到腐蚀,导致构件有效钢材厚度降低。对于受削弱铁塔构件力学性能的研究,目前尚显不足。本研究结合实际工程,对受到不同程度腐蚀的输电铁塔节点结构,建立有限元模型进行数值模拟计算,得到其刚度、强度的折减率。研究表明在节点锈蚀厚度不超过 0.2mm、构件锈蚀厚度不超过 1mm 的条件下,输电线路铁塔结构可以继续使用,本研究可为同类实际工程提供参考。

**关键词:**输电铁塔;大气腐蚀;节点损伤;蚀余力学性能;有限元模型

**中图分类号:**TM 753

**文献标志码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.2095-0411.2015.03.007

## The Finite Element Analysis of Corrosion-Joint Mechanical Properties in Steel Transmission Towers

HUANG Shijun

(Economic Research Institute, Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Steel transmission towers, which are exposed to atmosphere, are easily to be corroded. However researches on the mechanical properties caused by corrosion were rarely reported. This paper presents a numerical analysis on strength and stiffness reduction rate of a corroded steel joint in steel transmission towers. The research showed that given the node corrosion thickness is less than 0.2mm, the thickness of the corrosion of components is less than 1mm, the steel transmission tower structure can be kept for further use. The research provided reference for similar engineering.

**Key words:** steel transmission towers; atmospheric corrosion; remaining mechanical properties; finite element model

我国工业与民用等各领域对电力资源的需求日益增加。然而,由于我国独特的地理特征,电力资源充沛的地区与电力需求紧张的地区往往相隔甚远,这就使得大规模、长距离、跨越复杂环境区的高压、特高压输电线路,成为保障经济社会发展的必备基础设施,而输电铁塔结构的安全可靠,更是输电线路正常运行的基本保障。因此,维持输电铁塔结构的安全可靠十分重要。

我国现有的各条输电线路,大多跨越距离长、所处环境复杂,与此同时,存在大量运行时间达 20~30 年甚至更长的老旧线路,这使得我国输电铁塔结构存在严重的构件有效截面降低的问题。文献[1]对输电塔腐蚀及其防治对策进行了研究;文献[2]对输电铁塔损伤识别方法进行了研究;文献[3]对输电铁塔塔脚腐蚀的成因进行了分析,并提出了推荐处理对策。然而,上述各文献均未对损伤程度进行量

**收稿日期:**2015-01-18。

**作者简介:**黄土君(1974—),男,江苏南京人,高级工程师,主要从事输电线路基础、铁塔组立及架线施工技术研究。

化分析与评价,此外,我国钢结构规范<sup>[4]</sup>亦无针对该类问题的条文。因此,对受一定程度腐蚀的节点构件是否满足继续使用的条件,缺乏进行判定的研究依据。本文结合实际工程,建立了不同锈蚀厚度的输电铁塔节点模型,并对其蚀余强度、蚀余刚度进行了计算分析。在计算结果的基础上,进一步讨论了节点继续使用应满足的条件。研究可为同类工程提供理论依据,为实际工程提供参考。

### 1 实际工程概况

某跨越塔结构,位于长江两岸,塔高约 180m,跨越挡距 1 820m,耐张段长度约为 2 840m,是我国目前少有的几个 500kV 大跨越之一。塔身竣工已运行超过 26 年。现需对该线路进行换线升级改造,为确保该线路的运行安全,需对长江跨越南北两岸的主塔、耐张塔进行现场检测与评估分析。通过全面检测,找出薄弱环节,以期对全塔进行有针对性的结构评估,并提出处理建议,为该线路的改造提供重要依据。本工程两基跨越塔及各基耐张塔均为钢结构,如图 1 所示。



图 1 跨越塔整塔图

Fig.1 The whole figure of crossing tower

通过现场实际情况的考察分析发现,服役跨越塔及其锚塔结构的主要承重传力节点,均具有板厚大、螺栓密、刚度强、结构冗余多的特点,其在同等环境条件下,因腐蚀存在的强度削弱,远远低于普通节点。然而,对于非承重的连接型节点,则因结构简单、杆件较薄、螺栓较少等特点,在相同的腐蚀条件下,锈蚀深度占原结构板厚之比明显大于承重型节点,因此结构性能将会受到更为严重的削弱。本研究即以图 2 所示的耐张塔非承重连接型节点,为有限元结构强度建模研究对象。

### 2 有限元模型的建立

为更真实反映节点结构的力学特征,采用实体单元 SOLID185,建立节点角钢、节点板及螺栓模

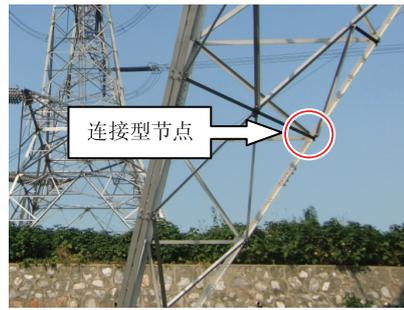


图 2 耐张塔整塔图

Fig.2 The whole figure of tension tower

型。SOLID185 单元用于构造三维固体结构单元通过 8 个节点来定义,每个节点有沿着  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向的平动自由度。SOLID185 单元具有超弹性应力钢化,蠕变大变形和大应变能力。对于节点结构的不同接触面,采用接触对模拟表面法向压力与切向摩擦力。由于节点的各接触面基材均为钢结构,其接触方式为“柔-柔”接触,故选择其中一接触表面定义接触单元,采用 CONTA174 进行模拟;选择另一接触表面定义目标单元,采用 TARGE170 进行模拟。模型中,角钢、螺栓、节点板原始尺寸,以现场实测数据为基础进行建模。

图 3 为节点有限元模型的加载简图。模型中,角钢(及节点板)与螺栓定义为 2 种材质。钢板材质中,弹性模量、屈服强度的取值,均通过材性试验进行确定。图 4 为通过材性试验得到的材性曲线。由图可以看出,试验试样均具有明显的屈服台阶,且具有强化阶段切线模量低、屈强比高的特点,其材质应采用理想弹塑性进行模拟。

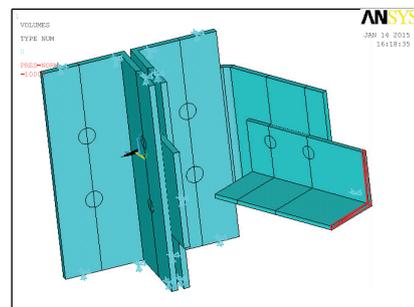


图 3 有限元网格划分

Fig.3 The finite element mesh

### 3 计算结果分析

#### 3.1 节点刚度曲线

考虑节点因腐蚀等原因受到的不同程度的削

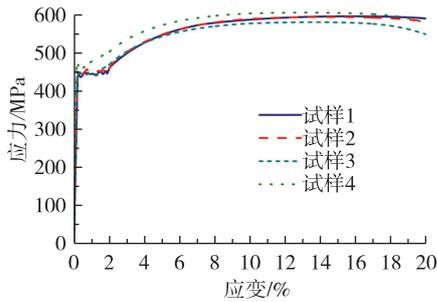


图4 试验材性曲线

Fig.4 The curve of test materials

弱,对 11 组模型进行了计算。其中,模型中考虑节点板削弱厚度范围  $\delta$  由 0.1mm 增至 1.0mm,每隔 0.1mm 计算一组模型,并将削弱后的节点力学性能与完好节点进行对比,研究跨越塔节点的力学性能因腐蚀而产生的变化。模型采用弧长法进行求解。将节点板所受的杆件轴力记为  $P$ ,同时定义节点板远端位移  $\Delta$ ,作为评价节点刚度的依据。

根据计算结果,将各模型的  $P - \Delta$  关系绘制关系曲线  $P$  为轴向荷载, $\Delta$  为名义位移。图 5 即为腐蚀厚度  $\delta = 0.2\text{mm}$  节点模型的荷载-位移曲线。可见,节点的荷载-位移曲线存在明显的拐点。在荷载较小的时候,刚度曲线较为陡峭,节点刚度较大;而当荷载超过一定限制时,曲线骤然平缓,在荷载  $P$  增量不大时,位移增长明显,节点刚度降低。

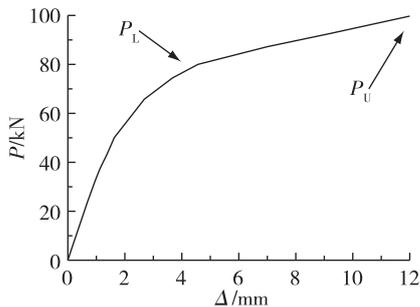


图5 模型  $\delta = 0.2\text{mm}$  荷载-位移曲线

Fig.5 Model  $\delta = 0.2\text{mm}$  load-displacement curve

值得注意的是,图 5 中曲线拐点处对应的节点荷载  $P_L$ ,仍明显低于节点极限荷载  $P_u$ ,即在节点刚度发生变化时,节点尚可继续承载。然而,当  $P > P_L$  时,节点将在外力作用下产生明显变形,节点结构力学性能将受到明显削弱,故将拐点荷载  $P_L$  定义为节点的许用荷载。实际工程中,节点的设计荷载,将在考虑安全度的情况下,对  $P_L$  进行进一步的折减。

建立具有不同锈蚀厚度  $\delta$  的节点模型,并进行求解,其刚度曲线见图 6。可以看出,在斜率较低的曲线后半段,节点刚度随荷载增量的变化很小,稳定

在最小刚度  $K_{\min}$ 。为充分利用节点强度,将节点刚度刚开始降低为  $K_{\min}$  时的节点荷载,定义为拐点荷载  $P_L$ ,并进一步定义为节点承载力  $P_{cr}$ 。

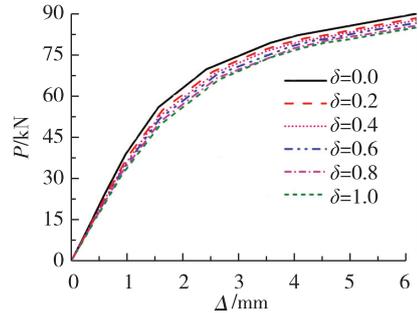


图6 不同锈蚀情况的节点刚度曲线

Fig.6 Different corrosion situation of node stiffness curve

### 3.2 节点残余性能分析

利用式(1),可求出其名义刚度  $K$ ;利用式(2)及式(3),可分别求出节点承载力  $P_{cr}$ 和刚度  $K$  的折减率。表 1 统计了各节点模型的极限荷载,及其相应名义变形情况。

表 1 中,

$$K_i = P_i / \Delta_i \quad (1)$$

式中: $i = 0, 1, 2, \dots, 11$ ,为模型序号; $i = 0$  表示完好节点。

$$\xi_{1i} = - \left( \frac{P_{Li}}{P_0} - 1 \right) \quad (2)$$

$$\xi_{2i} = - \left( \frac{K_i}{K_0} - 1 \right) \quad (3)$$

根据折减率  $\xi_1, \xi_2$  与  $\delta$  的变化关系,绘制折减系数-锈蚀厚度关系曲线,如图 7 所示。

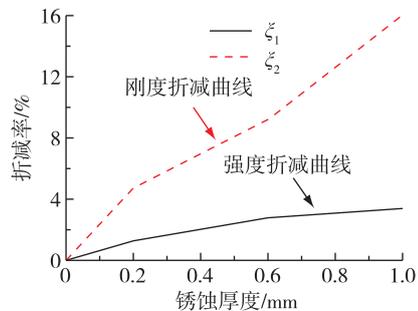


图7 强度与刚度随锈蚀厚度折减曲线

Fig.7 The strength and rigidity with the corrosion thickness reduction curve

由表 1 和图 7 可见,节点板锈蚀对节点强度的折减率均不足 5%,而对节点刚度的折减则十分明显。当锈蚀厚度  $\delta$  达到 0.2mm 时,刚度的折减率

已接近 5%，而当  $\delta = 1.0\text{mm}$  时，刚度折减则高达 16%，此时节点结构削弱明显。

表 1 有限元模型计算情况汇总表

Table 1 Summary form of finite element model calculation

序号	锈蚀厚度/mm	极限荷载/kN	名义位移/mm	名义刚度/(kN/mm)	极限荷载折减率/%	刚度折减率/%
0	$\delta_0 = 0$	81.98	4.07	20.14	—	—
1	0.1	81.46	4.14	19.68	0.64	2.37
2	0.2	80.94	4.21	19.23	1.28	4.77
3	0.3	80.67	4.24	19.03	1.63	5.87
4	0.4	80.40	4.27	18.83	1.97	6.98
5	0.5	80.12	4.30	18.63	2.32	8.10
6	0.6	79.85	4.33	18.44	2.67	9.23
7	0.7	79.72	4.39	18.16	2.84	10.93
8	0.8	79.58	4.45	17.88	3.02	12.63
9	0.9	79.45	4.51	17.62	3.19	14.35
10	1.0	79.31	4.57	17.35	3.37	16.07

锈蚀对节点刚度的影响,可通过图 8 及图 9 得到进一步印证。可以看出,对于不同节点锈蚀程度,节点刚度改变十分明显。

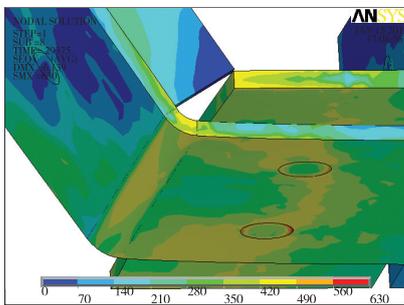


图 8  $\delta = 0.1\text{ mm}$  时节点模型局部变形图

Fig.8  $\delta = 0.1\text{ mm}$  local deformation diagram node model

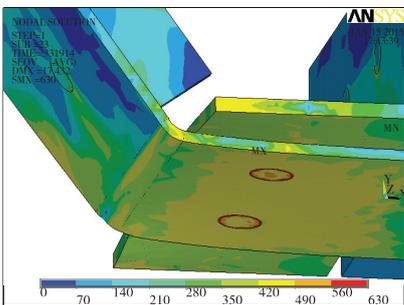


图 9  $\delta = 1.0\text{ mm}$  时节点模型局部变形图

Fig.9  $\delta = 1.0\text{ mm}$  local deformation diagram node model

虽然对于板件较厚的节点,锈蚀的影响将有所减轻,考虑到锈蚀对刚度的明显折减,并方便工程应用,综合考虑锈蚀对节点强度和刚度的影响,建议以锈蚀厚度  $\delta = 0.2\text{mm}$ ,为节点锈蚀评判控制条件。也即是说,当  $\delta \leq 0.2\text{mm}$  时,可判定为节点未锈蚀;当  $\delta > 0.2\text{mm}$  时,判定为节点锈蚀。

### 4 结 论

结合实际工程情况,对输电铁塔中对腐蚀敏感的薄弱节点,建立了有限元模型,分析了节点在不同锈蚀程度下,节点强度、节点刚度的变化规律,并得到如下结论:

1) 钢材腐蚀对输电铁塔节点强度的影响较为有限,当腐蚀厚度不超过 1.0mm 时,节点强度的折减率在 5% 以内。

2) 钢材腐蚀对输电铁塔节点刚度的影响较为严重,节点刚度对因腐蚀而产生的厚度折减十分敏感。

3) 建议实际工程中,以节点锈蚀厚度不超过 0.2mm 为评判标准。当锈蚀厚度在 0.2mm 以内时,可不替换构件;当锈蚀厚度超过 0.2mm 时,应采取替换或加固措施,进行及时处理。

### 参考文献:

[1] 默增禄,程志云. 输电线路杆塔的腐蚀与防治对策[J]. 电力建设, 2004, 25(1): 22-23, 36.

[2] YIN T, LAM H F, CHOW H M, et al. Dynamic reduction-based structural damage detection of transmission tower utilizing ambient vibration data[J]. Engineering Structures, 2009, 31(9): 2009-2019.

[3] 刘爽,胡新芳,高森,等. 500kV 输电线路铁塔塔脚腐蚀原因及处理方案[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(11): 1026-1029.

[4] 中华人民共和国建设部. GB50017—2003. 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.

(责任编辑:李艳)