

# 探讨钢结构变电站提升檩条节点连接稳定性的工作实践

叶锐 陈杰 牛韡 盛兴中

上海新泰建筑工程有限公司

**摘要:** 为了提高钢结构变电站的抗震能力以及结构整体强度,可以采用高强螺栓连接的带加劲肋顶底角钢连接节点的施工工艺。带加劲肋的顶底角钢连接节点可以依靠节点的变形吸收能量达到增加耗能的目的,使得钢结构框架的脆性破坏现象得到很大改善。同时,为了确保该工艺的合理性,应该对该工艺进行数值模拟、作业策划、定制试件、对比研究,确保该工艺符合行业规范要求再进行合理应用,进而有效避免传统刚性连接节点的脆性破坏,保证钢结构变电站的安全性和稳定性。

**关键词:** 钢结构; 变电站; 檩条节点; 连接稳定性

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.05.066

## 前言

多年装配式钢结构工程的探索,已经形成了比较成熟的钢结构施工工艺流程和技术方案,但在部分工程细节上仍存在优化空间,如钢结构檩条连接节点形式等。传统钢框架结构中的檩条连接一般被设计为刚接,在檩条之间进行焊接,其焊接工艺复杂、施工质量难以保证、施工周期长、不易后期维护与修复。本文主要研究采用高强螺栓连接的带加劲肋顶底角钢连接节点的施工工艺,以提高钢结构变电站的抗震能力以及结构整体强度,保证钢结构变电站的安全性和稳定性。

## 一、实施背景

习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上发言,提出中国二氧化碳排放力争在2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。其中,建筑业作为能源消耗和碳排放较高的传统行业,更应积极采取转型升级措施,降低能源消耗和碳排放。同时,钢结构具有轻质高强、施工周期短、绿色环保等优点,属于典型的绿色环保节能型结构,符合我国循环经济和可持续发展的要求,因此推进钢结构的应用与发展已经成为建筑结构技术发展的重要方向标。

上海新泰建筑工程有限公司积极响应国家“双碳”目标政策和国网上海公司的节能绿色发展战略,找准“双碳”背景下的土建市场切入点和发力点,形成和提升新泰公司的核心竞争力,树立新泰公司的“土建专业”公司品牌,为国网上海公司提供“定制化”精准服务,助力实现“双碳”目标意义重大。同时,国网上海公司经过多年装配式钢结构工程的探索,已经形成了比较成熟的钢结构施工工艺流程和技术方案,但在部分工程细节上仍存在需要改进优化的工艺细节,如钢结构檩条连接节点形式等。并且,传统钢框架结构中的檩条连接一般被设计为刚接,在檩条之间进行焊接,其焊接工艺复杂、施工质量难以保证、施工周期长、不易后期维护与修复。新泰公司为提高钢结构变电站的抗震能力以及结构整体强度,通过大量调研以及阅读相关科研文献,最终通过数值模拟研究对带加劲肋顶底角钢连接节点性能有了充分的了解与掌握,并在110kV仁建变电站钢结构应用,有效提高了结构檩条连接节点的承载力和

抗变形能力,使得钢结构框架的脆性破坏现象得到很大改善<sup>[1]</sup>。

## 二、钢结构变电站的概述分析

近年来,随着城市化发展速度的加快,用电需求与日俱增,而变电站的建设也在不断升级,朝着节能环保、抗震和标准化的目标迈进。其中在变电站的建设之中,钢结构是一种高效且环保的有效材料,在目前应用也较为广泛,而且凭借其重要的优势特点,目前已经成为变电站建筑建设的一个重要方向。同时,市场内已经有诸多企业载体和行业再向变电站钢结构施工工艺进军,希望能够为变电站的建设提供应有的技术支撑。而旧钢结构变电站的设计和应用中主体主要为钢结构,地下的电缆层则为钢筋混凝土结构以提升整体变电站稳定性,这样所建设而成的典型钢结构变电站,自然而然的能够符合新时代变电站的用电需求,具有极其优越的特性。细致说来,在钢结构变电站的钢结构部分设计中要遵循较多设计要点,以保证钢结构焊接的整体牢固性。一方面钢结构在设计过程中,要将上部钢框架结构嵌固部位,尽量保持在地下室的顶板上,这样才能最大限度的发挥其稳固作用。并且,在钢结构的建设过程中还要注意基础螺栓的质量控制工作。另一方面,钢结构在安装和牢固过程中,一定要保证连接部位的稳定性,尤其对于集中檩条节点的焊接,要积极采用合理且高效的焊接工艺,保证焊接节点的稳固性,不易脱落,美观大方<sup>[2]</sup>。

## 三、钢结构设计要点檩条的作用

钢结构发展的迅猛,使得钢结构稳定性逐渐成为研究的关键要素,而在钢结构建筑中檩条是极为重要的一个节点,是提升钢结构稳定性和承载力的重要部分。檩条主要分为主领和次领之分,每一个部位的檩条有不同结构区别,功能区别。而主檩条主要用于连接结构柱梁,而次檩条则主要连接基础结构在当下钢结构的建筑设计中,主次檩条的应用都较为常见。相较于以往的钢结构连接而言,借助檩条展开连接,有助于提升截面性能,并且强度更高。而且钢檩条包含Z形和C形是最为常见的两类钢型檩条,在变电站钢结构的建筑中应用也较为广泛。但就钢电站在建设过程中,钢檩条还会受到温度影响,容易产生冷弯效应,因此在钢结构变电站的设计过程中,檩条的应用极为关键,一定要结合具体结构选择或设计良好的檩条类型,从而达到固定和稳固的作用。具体说来,一般在当下一些建筑结构中,畸形钢筋条承受力更加应用也较为广泛,这种新型建材是经过热卷板冷弯加工而成的,壁薄自重轻,截面性能优良。就檩条与实际钢结构进行关联时,要考虑整体的设计方案,还要选择实际的尺寸和安装位置,这样才能使整体钢结构实现稳定焊接。另外不同檩条钢结构支撑中,主体钢结构决定着檩条的尺寸和位置。理论公式进行验算,其中会涉及相关参数指标,影响檩条的稳定性。在此基础上,无论是钢梁还是檩条,都是钢结构变电厂的支撑作用能够保证钢结构,变电站不变形,维持良好的

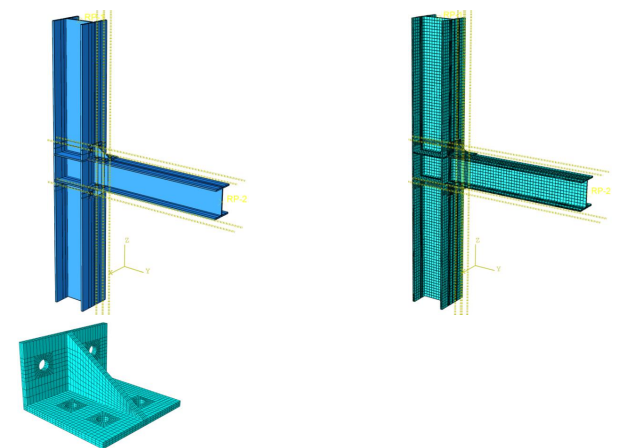
稳定基础。

#### 四、檩条稳定性影响要素分析

就钢结构中檩条，这一关键结构在施工建设过程中，考量其稳定性是必然的，也是极为重要的一大关键要素。一般说来，檩条的稳定性会受到受压翼缘的弯曲影响，尤其当檩条的下半部分受到挤压时，整体檩条的稳定性极易受到影响，而上半部分由于固定在面板上面，能够自然而然的增强对檩条的侧向支撑作用，这时所造成的稳定性问题并不明显。就目前国内所应用的冷弯臂，钢型结构技术中，檩条侧向支撑作用更为明显。在计算稳定性的过程中，则可以引用欧洲规范来强化整体刚度的计算准确度。另外在国内对于檩条稳定性的计算过程中，还会受到风吸力的作用，影响整体计算公式的方式方法，相较于国外的计算公式而言，檩条作用力的计算路径单单依靠套用公式是不够稳妥的，还会受到具体材料版型构造以及连接构造等多元元素的影响。就当下，檩条稳定性的计算仍然存在一些不足之处，需要积极结合相应应用场景和具体承载需求针对性设计檩条的连接方式和焊接方式，从而提升和改进檩条焊接的稳定性和承载力。一般说来，为了提升整体连接的稳定性，加大承载力度，需要采用加檩托板螺栓连接的方式，以减少檩条局部复板压区和整体倾覆的问题。当然无论是钢结构的行架，还是檩条对整体钢结构，变电站的支撑作用都极为关键，必须要积极做好整体的坚固稳定工作，确保檩条能够有效提升钢结构变电站的稳定性。另外，在钢结构整体的设计应用中，带加劲肋顶底角钢连接节点的应用，是极为常见的一种钢连接节点模式，也是提升钢结构檩条稳定性的一个重要切入点<sup>[3]</sup>。

#### 五、实施过程和措施

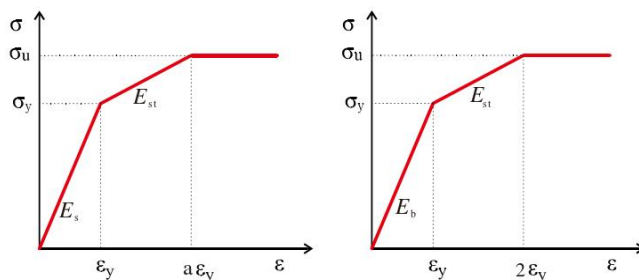
结合以上基础分析，为了研究带加劲肋顶底角钢连接节点受弯性能与抗震性能，新泰公司筹备成立科研攻关小组，应用有限元分析软件ABAQUS建模分析。在分析模型建立过程中，新泰公司严格遵循《钢结构设计规范》(GB50017-2003)、《钢结构高强螺栓连接的设计、施工及验收规程》等国家标准规范。通过数值模拟分析方法来验证掌握带加劲肋顶底角钢连接节点受力性能，为了验证带加劲肋顶底角钢连接节点的优越性，同时建立无加劲肋顶底角钢连接节点模型进行对比分析，所建立的分析模型如图1-1所示。



(a) 梁柱模型 (b) 梁柱网格划分图 (c) 带加劲肋的角钢网格图  
图1-1 ABAQUS建立的顶底角钢檩条连接节点有限元模型

在分析模型网格划分过程中，在数据变化梯度较大的部位（如应力集中处），采用比较密集的网格，有助于较好的反应各项数据的变化规律。本文主要研究对象是带加劲肋的顶底角钢梁柱节点，因此需要对其区域进行加密划分。

所建立对比分析模型是在原模型的基础上去除加劲肋，模型的钢材板件采用Q345，高强螺栓采用10.9级别的高强螺栓，材料的应力应变曲线分别如图1-2所示，模型的初始边界条件如图1-3所示。



(a) 钢材板件的应力-应变本构关系 (b) 高强螺栓的应力-应变本构曲线  
图1-2 ABAQUS有限元模型材料应力-应变本构关系

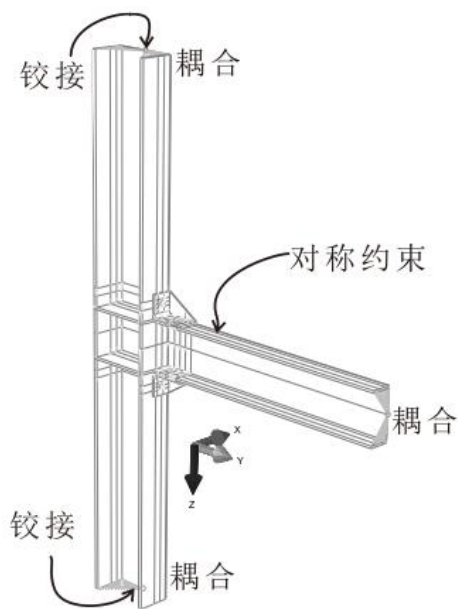


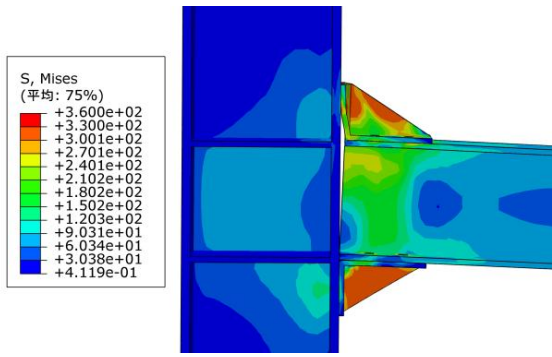
图1-3 ABAQUS有限元模型的边界条件

通过对两种模型施加静载进行模拟分析。结果表明，带加劲肋的顶底角钢连接节点相比于无加劲肋的顶底角钢连接节点，其初始转动刚度和承载力都有较大提高，可以增加结构整体稳定性和抗变形能力<sup>[4]</sup>。

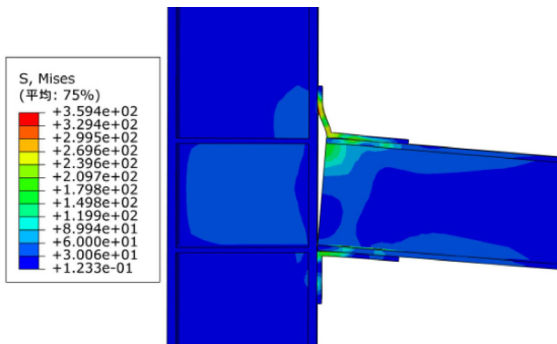
#### 六、工作成效和经验

通过数值模型分析檩条连接节点区域各连接件的应力分布和变形情况，观察节点破坏模式，并给出两种节点的弯矩-转角曲线，从而得到各节点的初始转动刚度以及极限承载力，主要分析结果见图1-4以及图1-5。

从不同檩条节点应力云图分析结果可知，在相同荷载下，带加劲肋的檩条节点应力集中分布在上下加劲肋上，而无加劲肋的檩条节点主要集中在角钢上，应力结果表面加劲肋可以承担顶底角钢的集中应力。同样由图1-4可以观察到在相同静载作用下，无加劲肋的檩条节



(a) 带加劲肋的檩条应力云图



(b) 无加劲肋的檩条应力云图

图1-4 不同檩条节点应力云图

点顶底角钢变形明显，顶角钢与梁翼缘相连的角钢横肢趾跟处产生拱起现象，与柱翼缘相连的角钢竖肢被拉离柱翼缘表面，角钢竖肢趾跟处产生塑性铰，而带加劲肋的檩条节点变形较小，仅在加劲肋处角钢竖肢被拉离柱翼缘表面。

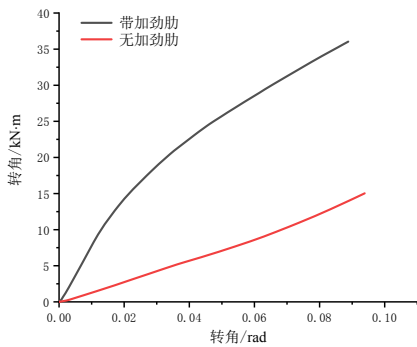


图1-5 檩条节点弯矩-转角曲线

由图1-5可以看出两种顶底角钢连接节点都具有明显的非线性，而无加劲肋的檩条节点的初始转动刚度和承载力都比较小，这是由应力的传递路径决定的。两种连接节点的传力路径见图1-6，无加劲肋的檩条节点沿原传递路径传递，而带加劲肋的檩条节点拉力会抄近路传递，由于加劲肋的平面内受拉刚度和承载力要比角钢竖肢的平面外刚度和承载力大很多，所以与无加劲肋的檩条节点相比，带加劲肋的节点初始转动刚度和承载力都会有很大的提高。

对于本次提升檩条节点连接稳定性的实践工作，我们通过数值模拟、作业策划、定制试件、对比研究，确保该工艺符合行业规范要求，总结出该方案的可行性和推广性。带加劲肋的顶底角钢连接节点可以在不损失结

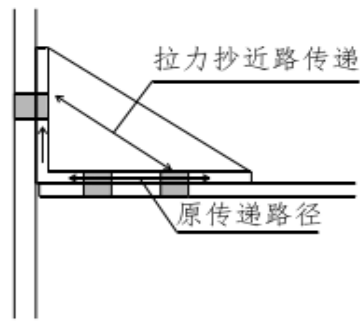


图1-6 檩条节点传力路径

构延性的基础上，大幅度增加结构的刚度和承载力，从而可以提高钢结构整体强度。钢结构檩条节点强度的增加可以有效提高结构在受到外部震动影响时的抗变形能力，可以有效减少外立面变形程度。在施工过程中可以避免金属烟尘、有毒气体、电弧光辐射等危害，施工工艺简单，并且施工质量和施工人员安全更有保障，达到绿色环保节能的施工目标。

### 七、解析点评

在“双碳”目标政策和国网上海公司的节能绿色发展战略的背景下，钢结构变电站因其独特优势得到广泛推广，其结构安全性和稳定性也愈发受到重视，带加劲肋的顶底角钢连接节点可以依靠节点的变形吸收能量达到增加耗能的目的，使得钢结构框架的脆性破坏现象得到很大改善。此外，通过科学的数值模拟研究对比，全面分析了带加劲肋的顶底角钢连接节点的优越性，总结认为采用带加劲肋的顶底角钢连接节点可以提高钢结构整体强度，避免脆性破坏。同时螺栓连接施工工艺简单、工艺质量可靠，可以避免金属烟尘、有毒气体、电弧光辐射等危害，在进一步保证工程建设的的质量的同时，又能提高工程作业效率、安全可靠、文明施工等各方面需求，具有很好的推广价值<sup>[5]</sup>。

### 总结

综上所述，在钢结构变电站的建设过程中尤其要加强内部结构的研究和设计，尽量提升其安全性和稳定性，为国民提供良好的供电服务。其中影响钢结构稳定性的重要要素之一，檩条是极为关键的一个影响元素，变电站建设应积极采用高强螺栓连接的带加劲肋顶底角钢连接节点的施工工艺，提升钢结构变电站的稳定性，为钢结构变电站的发展和服务做出基础保障。

### 参考文献

[1] 郑宇. 钢结构装配式变电站建筑设计研讨[J]. 低碳世界, 2014 (14): 260-260, 261.  
 [2] 黄振喜, 徐光彬, 熊川羽, 等. 变电站装配式钢结构建筑防火措施选择[J]. 湖北电力, 2018, 42 (5): 44-48.  
 [3] 荣嵘, 吕征宇, 高振婷, 李奕婵, 秦旷宇. 基于欧特克建筑信息模型技术的变电站钢结构节点建模技术[J]. 电力与能源, 2023, 44 (01): 38-43.  
 [4] 陈轩, 程方圆, 吴波, 杨思荻, 华坤. 耐火钢在钢结构变电站防火设计中的应用研究[J]. 建筑结构, 2022, 52 (S1): 1256-1259.  
 [5] 吴俊, 黄俊, 张璐, 陈亮. “钢结构+装配式”变电站建设过程中存在的问题及对策[J]. 中国建筑装饰装修, 2023, (04): 168-170.