

矩形截面空间钢桁架的次应力及竖腹杆稳定的研究

文 鹤, 张树生, 吴 勇, 洪嘉伟

(中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410205)

摘要: 矩形空间桁架是工业建筑中常用的结构形式, 传统设计常将节点简化为铰接并忽略杆件次应力, 且对风荷载下封闭式桁架竖腹杆稳定性的研究不足。文章以工程中常见的一榀钢桁架为研究对象, 对比分析了次应力对上、下弦杆稳定性的影响, 以及风荷载对竖腹杆稳定性的影响, 并研究了扭转屈曲对竖腹杆(双角钢组合截面)的影响。研究表明: 钢桁架中的次应力对结构稳定性的影响不容忽视; 风荷载对桁架竖腹杆的稳定性影响显著, 工程设计时其截面不宜过小。本文结果可为相关研究提供参考。

关键词: 次应力; 竖腹杆; 荷载组合; 杆件扭转屈曲

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)03-0018-09

doi: 10.13402/j.gcjs.2026.03.026

Research on secondary stress and stability of vertical web members in rectangular section spatial steel trusses

WEN He, ZHANG Shusheng, WU Yong, HONG Jiawei

(Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: Rectangular space truss is a common structural form in industrial buildings. The traditional design often simplifies the nodes into hinges and ignores the secondary stress of, and there is insufficient research on the stability of the vertical web members of the enclosed truss under wind load. This paper takes a steel truss commonly used in engineering as research object, and compares and analyzes the influence of secondary stress on the stability of the upper and lower chords, and the influence of wind load on the stability of the vertical web, and studies the influence of torsional buckling on the vertical web members (double angle steel combined section). The results of this study show that the secondary stress in the truss has an impact on the stability of the structure that cannot be ignored; the wind load has a significant impact on the stability of the truss vertical web member, and its should not be too small during engineering design.

Key words: secondary stress; vertical webmember; load combinations; torsional buckling of members

钢通廊是工业建筑中为完成各种原料运输的通道, 桁架式钢通廊, 以其跨度大、自重轻、施工速度快、受季节影响小等诸多优点, 被越来越多的单位采用。随着国民经济的发展, 国家对环保的要求越来越严格, 不仅以前的敞开式钢通廊需要大量围闭, 新建的工程更要求采用封闭式钢通廊。封闭式钢通廊在满足环保要求的同时, 也

带来了更复杂的受力状态: 桁架竖腹杆因其外挂墙皮檩条, 需同时承受竖向荷载和水平风荷载, 成为典型的压弯构件。然而很多结构工程师认为风荷载对钢桁架的稳定性影响较小, 往往忽略风荷载对杆件的稳定性影响, 导致工程中存在安全隐患。本文采用同一榀桁架, 运用结构设计中常用的计算软件 PKPM 对钢桁架上、下弦是否考虑

收稿日期: 2025-01-19

作者简介: 文 鹤(1981—), 女, 工程师, 从事结构设计工作。

通信作者: 张树生(1967—), 男, 正高级工程师, 从事结构设计管理工作。

次应力, 进行了对比分析; 并对风荷载作用下的不同工况组合, 是否考虑杆件的扭转屈曲, 风载对竖腹杆的稳定性影响进行了多面对比分析。

钢桁架的次应力国内很多学者做过研究。但泽义等^[1]全面分析了屋架、托架、吊车梁、桥梁等代表性桁架的次应力分布规律, 认为在众多影响桁架次应力的参数中, 起主要作用的是杆件线刚度, 并进一步探讨了忽略桁架杆件次应力的控制范围问题。陈绍蕃^[2]通过桁架承载能力极限状态的分析, 认为强度计算宜利用塑性铰后的内力重分布, 但稳定计算由于不能利用内力重分布的好处而必须考虑次应力的影响, 同时指出以 20% 次应力作为强度计算的分界点比按杆件长高比进行划分更为合理。鲍永涛等^[3]分析了焊接平行弦钢桁架的次应力, 认为轴力可按理想桁架计算, 剪力可忽略不计; 不宜轻易改变上下弦杆截面, 普通桁架上下弦杆采用等截面设计时, 可按理想桁架模式计算, 其误差在 20% 以内; 建议加强支座腹杆, 桁架支座腹杆次应力较大, 截面选择要留有余地, 也可通过加强第二根腹杆来减少第一根腹杆的次应力。王燕等^[4]对无节点板连接的冷弯薄壁型钢桁架次应力研究表明: 无节点板连接的冷弯薄壁型钢桁架由于构造原因使节点处各杆件的轴线不能汇交于一点, 在杆件中产生了较大的次应力。桁架中次应力对斜腹杆的影响显著, 多数斜腹杆次应力的影响在 50% 以上, 上、下弦杆的次应力影响占最大组合应力的 10% 以上; 无节点板连接的桁架的上、下弦杆靠近支座处存在较大剪力。

《钢结构设计规范》(GB 50017—2003) 中 8.4.5 条表述: “对用节点板连接的桁架, 当杆件为 H 形、箱形等刚度较大的截面, 且在桁架平面内的杆件截面高度与其几何长度(节点中心间的距离)之比大于 1/10(对弦杆)或大于 1/15(对腹杆)时, 应考虑节点刚性所引起的次弯矩。”该条条文说明指出: “对杆件为单角钢、双角钢或 T 型截面的桁架结构且为节点荷载时, 可忽略次应力的影响”, 根据此条款, 桁架杆件当采用刚度较大 H 形或箱形截面时, 只要控制截面的高度, 就可以不计算桁架的次弯矩, 忽略次应力的影响。

随着计算机技术的发展, 次应力的计算越来越方便。因此《钢结构设计标准》(GB 50017—2017) 5.1.5 条表述: “采用节点板连接的桁架腹杆及荷载作用于节点的弦杆, 其杆件截面为单角钢、双角钢或 T 形钢时, 可不考虑节点刚性引起的次弯矩”。8.5.1 条表述: “杆件截面为 H 形或箱形桁架, 应计算节点刚性引起的弯矩”。根据此条款, 新钢标下设计的桁架杆件当采用刚度较大的 H 形或箱形截面时, 再也不能用控制截面高度的办法忽略杆件的次应力了。

然而风荷载作用下对钢桁架的竖腹杆的稳定影响, 国内的学者研究较少。国忠岩等^[5]认为在不考虑风荷载的情况下, 把竖腹杆的应力比控制在 0.6 以下就能满足稳定要求。

本文以典型的封闭式钢通廊为例, 针对其常见截面形式, 系统性地开展以下研究: ① 分别建立铰接与刚接模型, 分析次应力对上、下弦杆稳定性的影响; ② 通过多工况对比, 分析风荷载对竖腹杆稳定性的影响; ③ 特别考查杆件扭转屈曲对竖腹杆稳定性结果的影响。本研究旨在弥补当前设计对上述复杂因素考虑不足的问题, 为封闭式钢桁架通廊的设计提供依据。

1 计算模型

桁架式钢通廊是由桁架、端门架、上下弦水平支撑、检修走道及屋面结构、墙体结构等组成的空间结构。工程中为了结构美观的需要, 桁架的上下弦采用 H 钢, 腹杆采用角钢。

钢桁架计算杆件的内力时, 杆件计算长度(节间长度与长度系数的乘积)的确定对杆件应力的影响较大, 合理确定杆件的计算长度系数尤为重要。理论分析和试验证明阻碍节点转动的主要因数是拉杆, 节点上的拉杆数量越多, 拉力和拉杆的刚度越大, 则嵌固程度越大。

桁架的支座竖杆及端杆的两端节点上压杆多, 拉杆少, 杆件本身线刚度大, 节点的嵌固程度较弱, 可偏安全视为两端铰接, 因而计算长度系数取 1.0; 其它腹杆, 由于一端与上弦杆相连, 嵌固作用不大, 可视为铰接, 另一端与下弦杆相连的节点, 拉杆数量多、拉力大、拉杆刚度也大, 所

以嵌固程度也大,此时腹杆可视为一端铰接,一端嵌固,故长度系数取 0.8。

本研究模型参照实际工程,关键参数设定如下:几何尺寸方面,钢铁企业胶带机钢通廊的高度通常为 3 m 左右,并根据《钢铁企业胶带机钢通廊设计规范》中关于“直腹杆与斜腹杆相交的夹角宜为 $35^{\circ} \sim 55^{\circ}$ ”的规定,将标准节间长度同样确定为 3 m 左右。荷载取值严格依据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)及同类工程的设计文件(如图 2),确保了模型边界条件的普遍性与可比性。

2 钢桁架的次应力

在计算桁架内力时,所有节点均假设为完全铰接,计算出的杆件内力只有轴力。实际上桁架结构,除轴力外,还有次应力:弯矩和剪力。引

起桁架次应力的主要原因是:节点刚性、节点偏心、杆件自重、横向荷载等。采用节点板焊接连接的钢桁架节点,限制了杆件之间的相对转动,无法达到完全铰接的效果。一般认为,杆件截面较小时,可以不考虑桁架的次应力,在这种条件下,杆件节点可以设置为铰接。下面以同一榀钢桁架(材质 Q235)为例,运用 PKPM 软件,采用不同的计算模型分析次应力对桁架上、下弦的影响。

2.1 常规计算模型

在桁架力学模型中,所有节点均设置为铰接(图 1~5),这是工程中常用的计算模型,此模型未考虑桁架上、下弦的弯矩及杆件的次应力。

钢结构应力比图说明:柱左的强度计算应力比;右上的平面内稳定应力比(对应长细比);右下的平面外稳定应力比(对应长细比)。

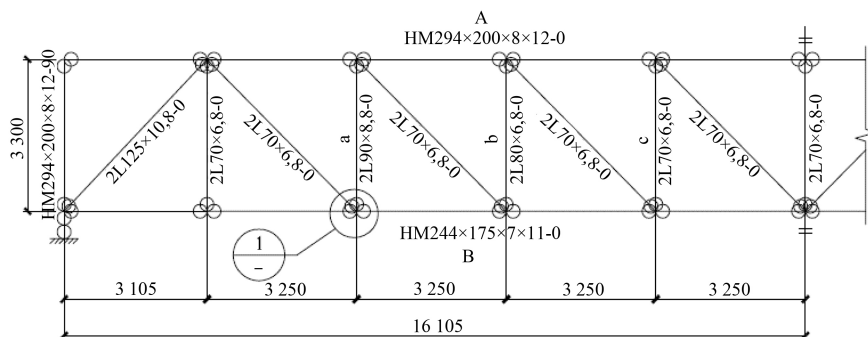


图 1 桁架立面

mm

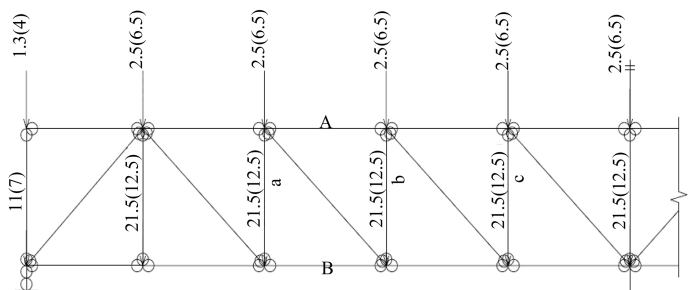


图 2 恒载图(活载图)

kN

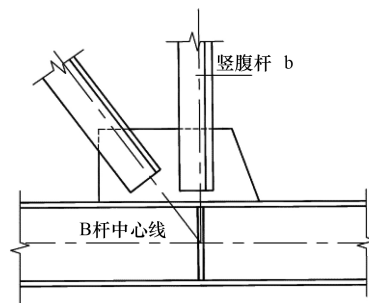


图 3 竖腹杆与桁架下弦连接大样

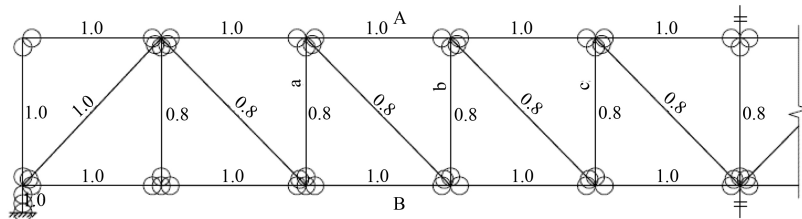


图 4 构件平面内长度系数(杆件平面外计算长度系数均取 1.0)

kN · m

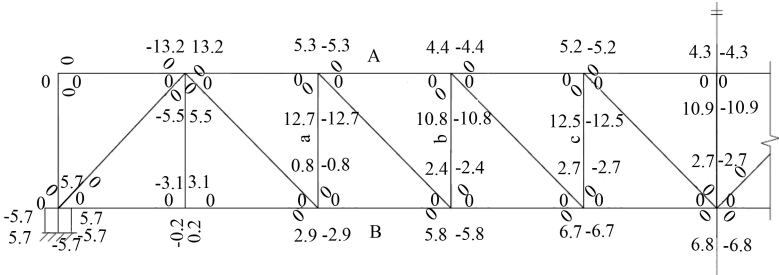


图10 弯矩设计值包络 kN·m

提取图5和图 7 中上、下弦杆件的最大应力比进行对比,对比结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出:考虑次弯矩后,桁架上弦杆件按压弯构件计算,其强度最大应力比增加了 19%,最大稳定应力比增加了 15%;桁架下弦杆件按拉弯构件计算,最大强度应力比增加了 14%。该分析可通用覆盖平面桁架与空间桁架,静力荷载及动力荷载作用下的钢桁架结构,可参考以上分析结果选取合适的杆件截面。

3 风荷载作用下钢桁架竖腹杆的稳定分析

工程设计中绝大部分设计人员认为风荷载不大,对竖腹杆的稳定性影响很小,设计时只要稍留富余即能保证安全。

桁架的竖腹杆外挂墙皮檩条,在风荷载作用下,桁架竖腹杆承受风荷载产生的弯矩,同时桁架的竖腹杆又在竖向荷载作用下产生压力,所以桁架的竖腹杆必须按压弯构件进行稳定计算。计算桁架竖腹杆时按 GB 50009—2012 要求,必须分别验算竖腹杆考虑风荷载起控制作用和竖向活荷载起控制作用时这两种工况的结果。荷载组合如下。

组合一: 1.3 恒 + 1.5 风 + 0.7 × 1.5 活 (风荷载起控制时)。

组合二: 1.3 恒 + 1.5 活 + 0.6 × 1.5 风 (活荷

载起控制时)。

其中 1.3 为恒载分项系数,1.5 为活载分项系数,0.7 为活荷载组合系数,0.6 为风载组合系数。

3.1 风荷载作用下竖腹杆弯矩值的确定

钢桁架竖腹杆外挂墙皮檩条位置见图 11 并结合图 1,风荷载作用下,将竖腹杆按简支梁计算,基本风压标准值 w_0 ,计算桁架竖腹杆弯矩时,不考虑阵风系数。

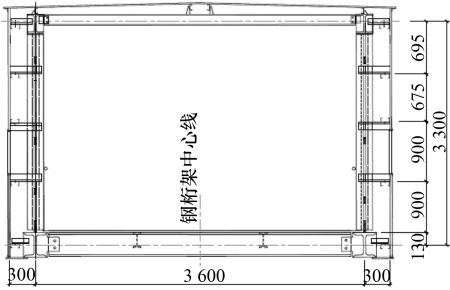


图 11 桁架断面图 mm

假定:基本风压 $w_0 = 0.4 (kN/m^2)$;选取风压计算高度 20 m;地面粗糙度为 B 类。

根据 GB 50009—2012 得知:风荷载体形系数 $\mu_s = 0.8$,风压高度变化系数 $\mu_z = 1.23$,阵风系数 $\beta_z = 1.0$ 。

修正后的风压: $W_k = \beta_s \mu_s \mu_z w_0$ 。

计算得出:竖腹杆的最大弯矩 $M = 2.511 kN \cdot m$ 。

表 1 上弦杆(压弯)、下弦杆(拉弯)在不考虑及考虑次应力影响下(对比图 5、7)的结果分析

杆件	不考虑次应力影响			考虑次应力影响			增量		
	最大强度应力比	最大平面内稳定应力比	最大平面外稳定应力比	最大强度应力比	最大平面内稳定应力比	最大平面外稳定应力比	最大强度应力比/%	最大平面内稳定应力比/%	最大平面外稳定应力比/%
上弦杆(压弯)	0.52	0.53	0.68	0.62	0.61	0.75	19	15	10
下弦杆(拉弯)	0.64	—	—	0.73	—	—	14	—	—

准附录 D 取值为 0.2; φ_b 为均匀弯曲的受弯构件整体稳定系数, 按标准附录 C 计算: $\varphi_b = 1 - \frac{(0.0017\lambda_y)}{(\varepsilon_k)} (C0.5 - 3)$; η 为截面影响系数, 闭口截面 0.7, 其他截面 1.0。 β_{mx} 为等效弯矩系数, 按规范计算:

$$\beta_{mx} = 1 - 0.36 N/N_{cr} \quad (4)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2} \quad (5)$$

β_{tx} 为等效弯矩系数, 按规范取值 1.0。

表 2 荷载组合一(风荷载起控制作用)竖腹杆应力比[1.3 恒+0.7×1.5 活+1.5 风(双 T 形角钢)原长细比]

规格	L/cm	i_y/cm	i_x/cm	A/mm^2	W_x/mm^3	$N_{\text{恒}}/\text{N}$	$N_{\text{活}}/\text{N}$	$N_{1.3\text{恒}+0.7\times1.5\text{活}}/\text{N}$	λ_y	λ_x	$M_x(1.5 \text{ 倍风荷载标准值产生})/(\text{N}\cdot\text{mm})$
2L90X8	330	2.76	4.02	2 789	47 900	72 200	51 400	147 830	96	82	2 511 000
2L80X6	330	2.47	3.58	1 879	28 690	47 600	35 100	98 735	107	92	2 511 000
2L70X6	330	2.15	3.18	1 632	22 360	18 900	15 800	41 160	123	104	2 511 000

规格	E	N'_{Ex}/mm	φ_x	β_{mx}	φ_y	φ_b	$\frac{\sigma_1 M}{f}$	$\frac{\sigma_2 M}{f}$	$\frac{\sigma_1 N}{f}$	$\frac{\sigma_2 N}{f}$	$\frac{\sigma_1}{f}$	$\frac{\sigma_2}{f}$
2L90X8	206 000	764 199	0.674	0.937	0.581	0.837	0.225	0.291	0.366	0.424	0.591	0.715
2L80X6	206 000	408 318	0.607	0.921	0.511	0.818	0.387	0.497	0.403	0.478	0.790	0.976
2L70X6	206 000	279 821	0.529	0.952	0.421	0.791	0.470	0.660	0.222	0.279	0.691	0.939

注: 表中构件 2L90X8、2L80X6、2L70X6 分别对应桁架构件 a、b、c; L 为杆件几何长度, cm; i_y 、 i_x 分别为截面对 y 轴和 x 轴的回转半径, cm; A 为截面面积, mm^2 ; W_x 为 x 轴弹性截面模量, mm^3 ; λ_y 、 λ_x 分别为整个构件对 y 轴和 x 轴的长细比; E 为钢材弹性模量, N/mm^2 ; 表中 $\frac{\sigma_1 M}{f}$ 为平面内风荷载产生的应力比; $\frac{\sigma_1 N}{f}$ 为平面内轴力产生的应力比; $\frac{\sigma_2 M}{f}$ 为平面外风荷载产生的应力比; $\frac{\sigma_2 N}{f}$ 为平面外轴力产生的应力比; $\frac{\sigma_1}{f} = \frac{\sigma_1 M}{f} + \frac{\sigma_1 N}{f}$; $\frac{\sigma_2}{f} = \frac{\sigma_2 M}{f} + \frac{\sigma_2 N}{f}$; 表 3、4、5 同注。

表 3 荷载组合二(活荷载起控制作用)竖腹杆应力比[1.3 恒+1.5 活+0.6×1.5 风(双 T 形角钢)原长细比]

规格	L/cm	i_y/cm	i_x/cm	A/mm^2	W_x/mm^3	$N_{1.3\text{恒}+1.5\text{活}}/\text{N}$	λ_y	λ_x	$M_x(1.5 \text{ 倍风荷载标准值产生})/(\text{N}\cdot\text{mm})$	$0.6 \times M_x/(\text{N}\cdot\text{mm})$	$E/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$
2L90X8	330	2.76	4.02	2 789	47 900	171 000	96	82	2 511 000	1 506 600	206 000
2L80X6	330	2.47	3.58	1 879	28 690	114 500	107	92	2 511 000	1 506 600	206 000
2L70X6	330	2.15	3.18	1 632	22 360	48 400	123	104	2 511 000	1 506 600	206 000

规格	N'_{Ex}/mm	φ_x	β_{my}	φ_y	φ_b	$\frac{\sigma_1 M}{f}$	$\frac{\sigma_2 M}{f}$	$\frac{\sigma_1 N}{f}$	$\frac{\sigma_2 N}{f}$	$\frac{\sigma_1}{f}$	$\frac{\sigma_2}{f}$
2L90X8	764 199	0.674	0.927	0.581	0.837	0.138	0.175	0.423	0.491	0.561	0.666
2L80X6	408 318	0.607	0.908	0.511	0.818	0.238	0.298	0.467	0.555	0.705	0.853
2L70X6	279 821	0.529	0.944	0.421	0.791	0.286	0.386	0.261	0.328	0.547	0.724

注: 表中构件 2L90X8、2L80X6、2L70X6 分别对应桁架构件 a、b、c;

式中, 平面内、平面外与图 1 ~ 11 桁架中的杆件平面内、外相反。杆件弯矩作用平面外计算长度系数取 0.8(端腹杆取 1.0), 弯矩作用平面内计算长度系数取 1.0。

上述公式适用于弯矩作用在对称轴平面内的实腹式压弯构件。本文中的弯矩是作用在非对称平面, 现有的标准及文献均未有相关的计算公式。本文借用弯矩作用在对称轴平面的计算公式进行分析, 这种处理方式跟目前国内现有的计算软件一致。计算过程略, 计算结果如表 2、3 所示。

3.4 考虑竖腹杆的扭转屈曲时的稳定计算

选取选取图 16 中竖腹杆 a 、 b 、 c 进行计算, 计算杆件平面内、外的长细比时, 考虑竖腹杆的扭转屈曲。此处计算 φx 时考虑了杆件的扭转屈曲, 采用换算长细比 λ_{xz} 计算。 λ_z 为扭转屈曲换算长细比, λ_{xz} 为构件绕对称轴的换算长细比。

$$\lambda_z = 3.9 \frac{b}{t} \tag{6}$$

当 $\lambda_x \geq \lambda_z$ 时

$$\lambda_{xz} = \lambda_x \left[1 + 0.16 \left(\frac{\lambda_z}{\lambda_x} \right)^2 \right] \tag{7}$$

计算以表 4、5 中 2L90X8 为例: $\lambda_x = \frac{L}{i_x} = \frac{330}{4.02} = 82$ 。

$$\lambda_z = 3.9 \frac{b}{t} = 3.9 \times \frac{90}{8} = 43.88$$

因为 $\lambda_x > \lambda_z$,

$$\lambda_{xz} = \lambda_x \left[1 + 0.16 \left(\frac{\lambda_z}{\lambda_x} \right)^2 \right] = 82 \times \left[1 + 0.16 \times \left(\frac{43.88}{82} \right)^2 \right] = 85.76 \text{ (表 4、5 中取 86)}。$$

其余杆件计算过程略, 计算结果如表 4、5 所示。

3.5 按双轴对称公式计算竖腹杆的稳定

按钢结构设计标准, 具体计算公式及参数如下。本文忽略了檩条对竖腹杆偏心产生的弯矩, 所以此处的 $M_y = 0$ 。公式还原到单轴对称的计算公式。计算结果如表 2~5 所示。

按钢结构设计标准(GB 50017—2017), 平面内稳定性计算:

表 4 荷载组合一(风荷载起控制作用)竖腹杆应力比[1.3 恒+0.7×1.5 活+1.5 风(双 T 形角钢)换算长细比]

规格	L/cm	i_y/cm	i_x/cm	A/mm^2	W_x/mm^2	$N_{\text{恒}}/\text{N}$	$N_{\text{活}}/\text{N}$	$N_{1.3\text{恒}+0.7\times1.5\text{活}}/\text{N}$	λ_y	λ_x	$M_x(1.5 \text{ 倍风荷载标准值产生})/(\text{N}\cdot\text{mm})$
2L90X8	330	2.76	4.02	2 789	47 900	72 200	51 400	147 830	96	86	2 511 000
2L80X6	330	2.47	3.58	1 879	28 690	47 600	35 100	98 735	107	97	2 511 000
2L70X6	330	2.15	3.18	1 632	22 360	18 900	15 800	41 160	123	107	2 511 000

规格	$E/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	N'_{Ex}/mm	φ_x	β_{mx}	φ_y	φ_b	$\frac{\sigma_1 M}{f}$	$\frac{\sigma_2 M}{f}$	$\frac{\sigma_1 N}{f}$	$\frac{\sigma_2 N}{f}$	$\frac{\sigma_1}{f}$	$\frac{\sigma_2}{f}$
2L90X8	206 000	698 848	0.648	0.937	0.581	0.837	0.229	0.291	0.380	0.424	0.610	0.715
2L80X6	206 000	369 712	0.574	0.921	0.511	0.818	0.397	0.497	0.426	0.478	0.823	0.976
2L70X6	206 000	263 368	0.51	0.952	0.421	0.791	0.474	0.660	0.230	0.279	0.703	0.939

注: 表中构件 2L90X8、2L80X6、2L70X6 分别对应桁架构件 a、b、c。

表 5 荷载组合二(活荷载起控制作用)竖腹杆应力比[1.3 恒+1.5 活+0.6×1.5 风(双 T 形角钢)换算长细比]

规格	L/cm	i_y/cm	i_x/cm	A/mm^2	W_x/mm^2	$N_{1.3\text{恒}+1.5\text{活}}/\text{N}$	λ_y	λ_{xz}	$M_x(1.5 \text{ 倍风荷载标准值产生})/(\text{N}\cdot\text{mm})$	$0.6 \times M_x/(\text{N}\cdot\text{mm})$	$E/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$
2L90X8	330	2.76	4.02	2 789	47 900	171 000	96	86	2 511 000	1 506 600	206 000
2L80X6	330	2.47	3.58	1 879	28 690	114 500	107	97	2 511 000	1 506 600	206 000
2L70X6	330	2.15	3.18	1 632	22 360	48 400	123	107	2 511 000	1 506 600	206 000

规格	N'_{Ex}/mm	φ_x	β_{my}	φ_y	φ_b	$\frac{\sigma_1 M}{f}$	$\frac{\sigma_2 M}{f}$	$\frac{\sigma_1 N}{f}$	$\frac{\sigma_2 N}{f}$	$\frac{\sigma_1}{f}$	$\frac{\sigma_2}{f}$
2L90X8	698 848	0.648	0.927	0.581	0.837	0.140	0.175	0.440	0.491	0.581	0.666
2L80X6	369 712	0.574	0.908	0.511	0.818	0.246	0.298	0.494	0.555	0.740	0.853
2L70X6	263 368	0.511	0.944	0.421	0.791	0.289	0.396	0.270	0.328	0.559	0.724

注: 表中构件 2L90X8、2L80X6、2L70X6 分别对应桁架构件 a、b、c。

$$\frac{N}{\varphi_x A f} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_x (1 - \frac{0.8 N}{N'_{Ex}}) f} + \eta \frac{\beta_{ty} M_y}{\varphi_{by} W_y f} < 1.0 \quad (6)$$

平面外稳定性计算:

$$\frac{N}{\varphi_y A f} + \eta \frac{\beta_{tx} M_x}{\varphi_{lx} W_x f} + \frac{\beta_{my} M_y}{\gamma_y W_y (1 - \frac{0.8 N}{N'_{Ey}}) f} < 1.0 \quad (7)$$

3.6 桁架竖腹杆的稳定分析结果对比

提取图 7 及表 2、4 中各杆件计算数据进行对比, 对比结果如表 6 所示。

根据表 6 的数据分析, 风荷载在竖腹杆中引发了显著的附加应力。对于截面规格较小的竖腹杆(如 c 杆), 风荷载致使其应力比相较仅承受竖向荷载时最大增量约 185%; 而对于截面规格较大的竖腹杆(如 a 杆), 该增幅则降至 46%。这一结果表明, 竖腹杆的抗弯刚度越小, 其对风荷载的敏感性越高。因此, 在桁架设计, 特别是针对直腹杆的设计中, 必须严格验算风荷载效应。同时, 考虑扭转屈曲情况下, 杆件平面内应力比增量小于 5%, 对竖腹杆最终应力结果的影响较小。

4 结论及建议

(1) PKPM 软件(二维模块)在计算钢桁架竖腹杆时(图 5、图 7), 其算法未自动考虑杆件的扭转屈曲。设计人员需意识到这一软件默认设置。

在特殊情况下, 处理更大长细比或更弱截面抗扭性能的杆件时, 建议进行专项复核, 以弥补通用设计软件的局限。

(2) 对于上、下弦杆件截面为 H 形或箱形的钢桁架, 其次应力不可忽略, 以往基于理想铰接假定的设计模型将低估结构真实应力, 因此设计时须采用考虑节点刚性的模型。

(3) 风荷载对钢桁架竖腹杆的影响较大, 因此竖腹杆的选取不宜过小。二维计算和手工计算时, 应复核竖腹杆的稳定应力。部分计算软件对弯矩作用在构件非对称轴平面时, 由于没有相应计算公式, 所以不进行计算, 需要设计人员手工复核。

(4) 竖腹杆考虑扭转屈曲和不考虑扭转屈曲时影响不大。

参考文献:

- [1] 但泽义, 赵熙元. 钢桁架杆件次应力的分布规律及设计建议[J]. 工业建筑, 1984(1): 30-37.
- [2] 陈绍蕃. 钢桁架的次应力和极限状态[J]. 钢结构, 2005(4): 1-4.
- [3] 鲍永涛, 陆萍. 焊接平行弦钢桁架的次应力分析[J]. 武汉化工学院学报, 2003(9): 53-55.
- [4] 王燕, 赵长伟. 冷弯薄壁型钢桁架次应力影响研究[J]. 工业建筑, 2008(4): 84-87.
- [5] 国忠岩, 成维根, 刘明文. 钢铁企业封闭式钢结构走廊设计要点[J]. 工业建筑 2014(4): 458-461.

表 6 杆件在荷载组合一方式下(对比图 7、表 2、4)的结果分析

杆件 编号	不考虑风荷载 作用下应力比		考虑风荷载、不考虑 杆件扭转屈曲作用下应力比				考虑风荷载、考虑杆 件扭转屈曲作用下应力比			
	平面内	平面外	平面内	增量/%	平面外	增量/%	平面内	增量/%	平面外	增量/%
2L90X8(a 杆)	0.42	0.49	0.591	41	0.715	46	0.610	42	0.715	46
2L80X6(b 杆)	0.47	0.55	0.790	68	0.976	77	0.823	75	0.976	77
2L70X6(c 杆)	0.26	0.33	0.691	165	0.939	185	0.703	170	0.939	185