DOI：10.13849/j.issn.1006-6578.2025.01.080

# 大型五塔合一钢结构冷却塔结构设计研究

刘嘉磊[1,2]，李甲伟[3]，张　红[3]，汪建平[4]，余　喆[4]，程春阳[4]，马　明[1,2]

（1. 国家建筑工程技术研究中心，北京 100013；2. 中国建筑科学研究院有限公司，北京 100013；
3. 华能陇东能源有限责任公司正宁电厂，甘肃 庆阳 745000；4. 双良节能系统股份有限公司，江苏 江阴 214431）

**摘　要：**近年来，大型钢结构冷却塔在国内迅速发展. 以华能陇东能源有限责任公司正宁电厂新建冷却塔为例，对大型五塔合一钢结构冷却塔的结构体系、荷载取值、结构设计等关键技术问题进行了说明. 该塔是世界上首座集主机冷却塔、辅机冷却塔、脱硫吸收塔、CCUS 系统原烟道、烟囱于一体的钢结构冷却塔，采用加强环外置、蒙皮内置的直筒-锥段塔型，高度达到 190.5 m，为目前世界在建最高的钢结构冷却塔. 对该塔的结构受力特性进行了分析，并对比了该塔与加强环内置、蒙皮外置的传统钢结构冷却塔在受力特点上的异同. 对钢结构冷却塔围护结构的设计问题进行了介绍，为今后该类钢结构冷却塔的设计与研究工作提供了参考.

**关键词：**钢结构冷却塔；五塔合一；直筒-锥段型；围护结构

**中图分类号：**TU393.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1006-6578(2025)01-0080-10

# Study on structural design of large multi-purpose steel cooling tower

LIU Jia-lei[1,2], LI Jia-wei[3], ZHANG Hong[3], WANG Jian-ping[4], YU Zhe[4], CHENG Chun-yang[4], MA Ming[1,2]

(1. *National Engineering Research Center of Building Technology*, *Beijing* 100013, *China*;
2. *China Academy of Building Research*, *Beijing* 100013, *China*;
3. *Huaneng Zhengning Power Plant*, *Qingyang* 745000, *China*;
4. *Shuangliang Eco-Energy Systems Co.*, *Ltd.*, *Jiangyin* 214431, *China*)

**Abstract:** In recent years, large steel structure cooling towers have developed rapidly in China. Taking the newly built cooling tower of Huaneng Zhengning Power Plant as an example, the key technical problems such as structural system, design load value and structure design of large multi-purpose steel cooling tower are explained. It is the first tower in the world that integrates main cooling tower, auxiliary cooling tower, desulfurization absorption tower, CCUS system original flue and chimney in one tower. The tower is also the highest steel cooling tower under construction with the height of 190.5 m. It adopts cylinder-cone form with reinforced ring outside the structure and skin inside the structure. The mechanical characteristics of the traditional steel cooling tower with reinforced ring inside and skin outside are compared. The design of enclosure structure of steel cooling tower is introduced, which provides a reference for the design and research of this kind of steel cooling tower in the future.

**Key words:** steel cooling tower; multi-purpose tower; cylinder-cone form; enclosure structure

**收稿日期：**2023-08-28.

**作者简介：**刘嘉磊(1993—)，男，河北保定人，硕士，工程师，主要从事大跨空间结构的研究. E-mail：liujialei@cabrtech.com

https://www.academax.com/doi/10.13849/j.issn.1006-6578.2025.01.080

近年来，有关学者对钢结构冷却塔风进行了大量研究工作[1-5]，并在多个项目中得到了成功应用，促进了国内大型钢结构冷却塔的快速发展. 华能陇东能源有限责任公司正宁电厂新建大型钢结构冷却塔项目是世界上首座将主机冷却塔、辅机冷却塔、脱硫吸收塔、CCUS 系统原烟道、烟囱集于一体的钢结构冷却塔. 为满足各项工艺的要求，区别于传统加强环内置、蒙皮外置的钢结构冷却塔形式，该冷却塔采用了加强环外置、蒙皮内置的直筒-锥段塔型，结构布置如图 1 所示.

本工程位于甘肃省正宁县，钢结构冷却塔采用直筒-锥段塔型，塔体主结构及加强环采用四肢角钢格构式构件，如图 2 所示，在节点区由节点板连接形成单层曲面空间网格结构. 底部结构轴线直径 127 m，顶部出口蒙皮直径 90 m（结构轴线直径 92 m），蒙皮顶高 190.5 m（结构轴线高度 189.5 m），为目前世界在建高度最高的钢结构冷却塔，其中锥段共 6 层高 61.1 m，直筒段共 12 层高 128.4 m，在第 6、10、14、17 层共设置 4 道加强环，加强环位于塔体主结构外侧. 钢塔沿环向分格数为 28，即每层结构由 28 个钢三角单元组成. 展宽平台采用桁架结构，桁架内侧与主体结构第 4 层环向构件相连，外侧通过钢柱与主体结构第 3 层环向构件相连. 钢塔以檩条支撑的铝板作为围护结构，檩条及铝板位于钢塔内侧. 沿塔体底部周边布置有冷却三角，冷却三角底部支撑于基础，顶部支撑于展宽平台，仅向主体结构传递径向水平力.

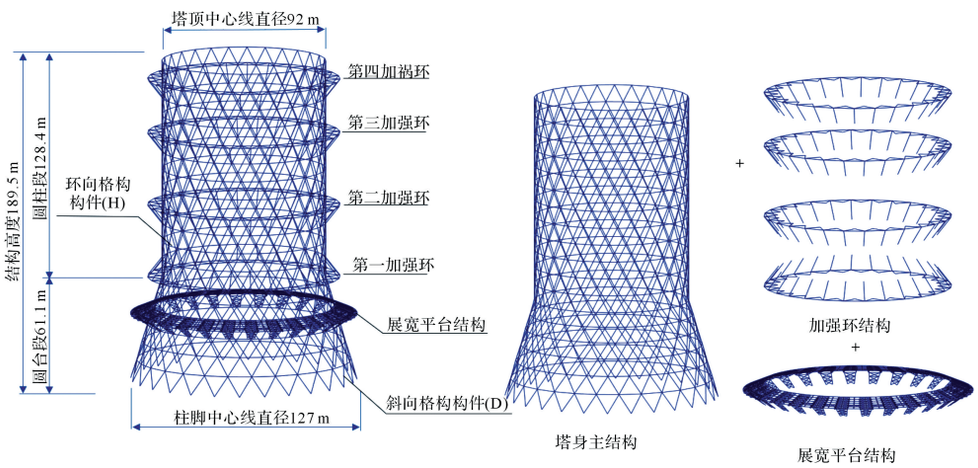



**图 1　整体结构布置图**

Fig. 1　Diagram of overall structure arrangement

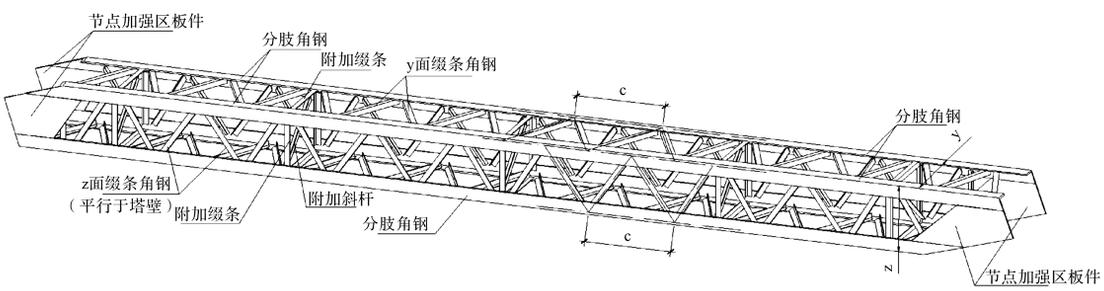



**图 2　钢结构冷却塔格构构件示意图**

Fig. 2　Diagram of lattice member

钢结构冷却塔结构设计使用年限为 50 年，安全等级为二级，结构重要性系数为 1.0，建筑抗震设防类别为乙类，地基基础等级为甲级. 主要荷载有恒载、雪荷载、屋面活荷载、风荷载、温度与地震作用. 钢结构冷却塔的恒载主要包括主体结构与围护结构的自重，主体结构的自重由程序根据构件截面尺寸与材料密度自动计算，围护结构的自重取 0.2 kN/m$^2$；基本雪压 0.25 kN/m$^2$，雪荷载主要分布在展宽平台屋面上，冷却塔处于工作状态时，塔内温度较高，即使降雪时也会较快消融；展宽平台屋面活荷载按不

https://www.academax.com/doi/10.13849/j.issn.1006-6578.2025.01.080

上人屋面取 0.5 kN/m²；温度作用根据当地极端最高、最低气温和冷却塔的正常工作温度确定，升温作用取＋53℃，降温作用取－43℃；风荷载是钢结构冷却塔的控制性荷载，当地 50 年一遇基本风压为 0.35 kN/m²，地面粗糙度类别为 B 类，根据 GB/T50102-2014《工业循环水冷却设计规范》[6]，风振系数取 1.9，由于采用蒙皮内置的结构形式，主体钢结构可作为蒙皮的“肋”，风压系数可按 K1.0 曲线（如图 3所示）确定，塔间干扰系数根据冷却塔间距取为 1.147，由此确定冷却塔的内风压及外风压分布；根据地震安评报告，本工程的抗震设防烈度为 6 度，场地类别属 III 类，基本地震动峰值加速度值为 0.065 g，多遇地震作用下场地特征周期 $T_g$＝0.65 s，水平地震影响系数最大值为 0.052.

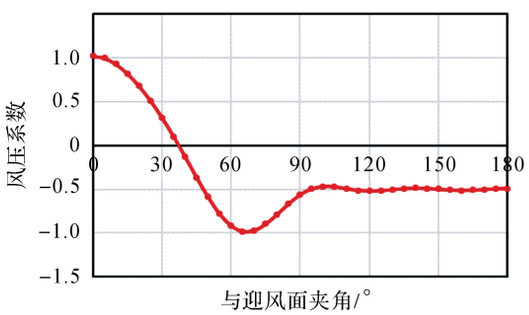



**图 3 K1.0 外表面风压曲线**

Fig. 3 K1.0 coefficient of wind load

# 1 主体结构设计要点

## 1.1 等效计算模型

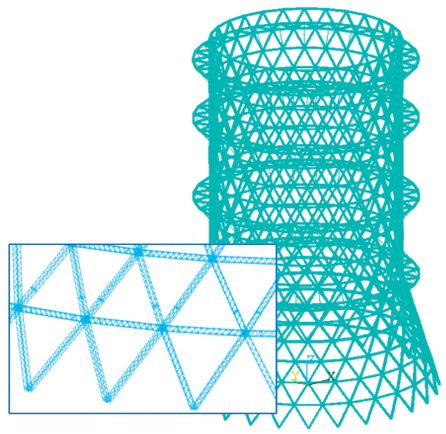
塔体主结构及加强环采用四肢角钢格构式构件，若在计算模型中精确地模拟所有格构构件的分肢和缀条，计算单元将达到约 49 万个，如图 4(a)所示，会导致计算效率大大降低. 因此，在设计计算中主要采用简化等效模型，根据每根格构式构件轴向刚度、抗弯刚度、抗剪刚度，将其等效为一个单元，等效原则如下：

$$S_A = EA = 4EA_c \tag{1}$$

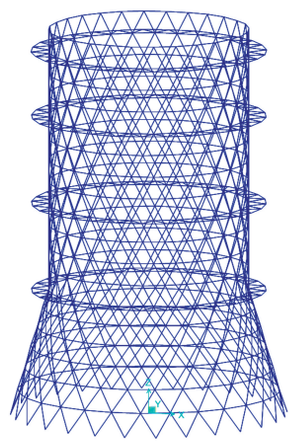
$$S_M = EI = 4E[I_c + A_c\,(a/2)^2] \tag{2}$$

$$S_V = GA_V = 2EA_b\,\sin^2\alpha\cos\alpha \tag{3}$$

其中：$A_c$ 为格构构件分肢角钢的面积；$I_c$ 为格构构件分肢角钢的惯性矩；$a$ 为格构构件抗剪平面内分肢形心的间距；$A_b$ 为格构构件一个节间内一侧斜缀条的面积；$\alpha$ 为格构构件抗剪平面内斜缀条与分肢角钢的角度.



(a) 精细模型



(b) 等效模型

**图 4 精细分析模型与等效分析模型**

Fig. 4 Fine analysis model and equivalent analysis model

主体结构简化等效计算模型单元数量仅 1 848 个，如图 4(b)所示，计算效率大大提高.

通过对比精细模型与简化等效模型的计算分析结果，两种模型的周期、变形指标、主要构件的内力差异很小，如图 5～6 所示. 这表明简化等效模型可以较好地模拟格构式构件的刚度和结构在荷载作用下的受力特点，通过简化等效模型得到的构件内力可以用来进行设计. 精细模型用于计算对比和整体稳定性分析，共同保证结构安全可靠.

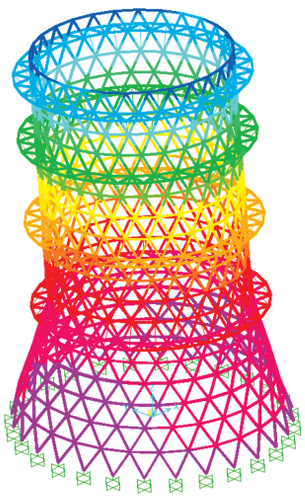
## 1.2 受力特征分析

设计阶段采用简化等效模型，分析得到结构的振型、变形和构件内力等，主要分析结果如下：

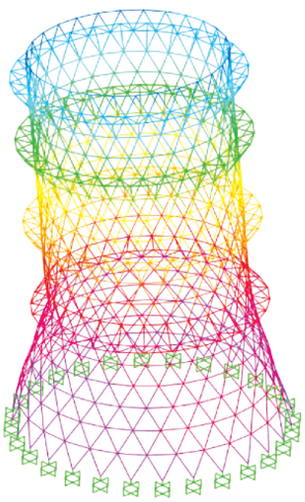
1）通过模态分析，得到钢结构冷却塔主体结构一阶平动周期为 1.10 s，一阶振型如图 5 所示.

2）对结构进行正常使用极限状态分析，风荷载作用下冷却塔顶部最大变形为 390 mm＜$H$/250＝758 mm，变形如图 6 所示，结构整体刚度较好.

https://www.academax.com/doi/10.13849/j.issn.1006-6578.2025.01.080



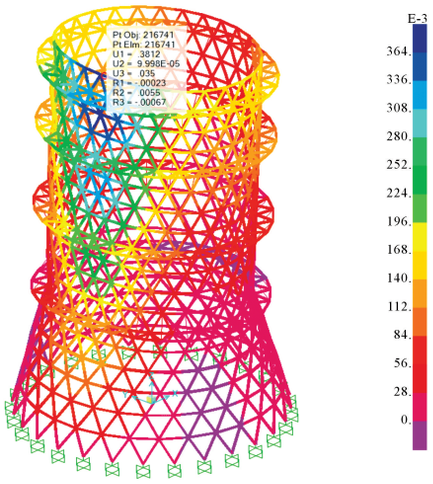
(a) 精细计算模型（$T_1$=1.11 s）



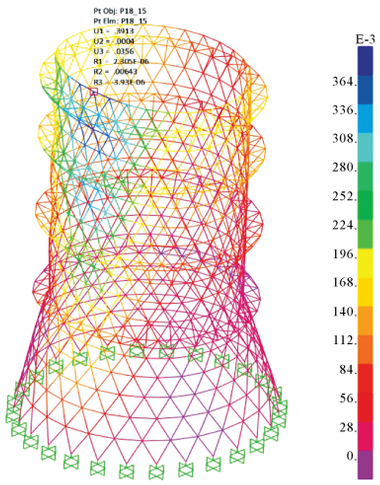
(b) 等效计算模型（$T_1$=1.10 s）

**图 5　一阶振型**

Fig. 5　The first order mode




(a) 精细计算模型




(b) 等效计算模型

**图 6　风荷载作用下结构变形(单位:m)**

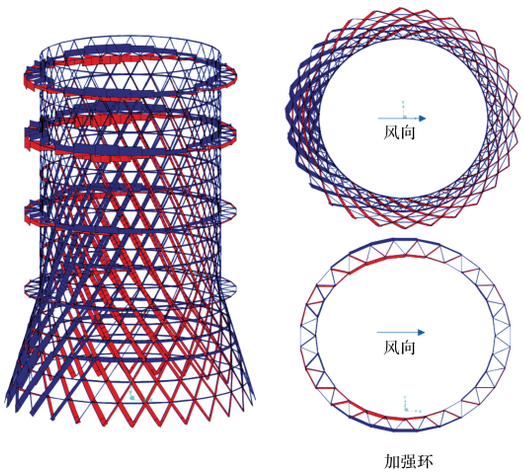
Fig. 6　Structure deformation under wind load(Unit:m)

3)对结构进行承载能力极限状态分析，风荷载下各构件内力如图 7(a)所示，迎风面斜向构件以受拉为主(图中为蓝色)，环向构件以受压为主(图中为红色)；背风面及侧风面斜向构件以受压为主，环向构件以受拉为主；加强环迎风面、背风面环向构件以受压为主，对应位置处主体结构环向构件以受拉为主，加强环侧风面环向构件以受拉为主，对应位置处主体结构环向构件以受压为主. 对比传统加强环内置、蒙皮外置的钢结构冷却塔的受力特点(如图 7(b)所示)可以发现，非加强环区域两种形式冷却塔构件受力特点基本一致，加强环处迎风面、背风面均为外侧环向构件以受压为主，内侧环向构件以受拉为主，侧缝面均为外侧环向构件以受拉为主，内侧环向构件以受压为主. 通过设计计算，设计荷载组合下钢结构冷却塔构件应力比控制在 0.95 以内，关键构件应力比控制在 0.85 以内.

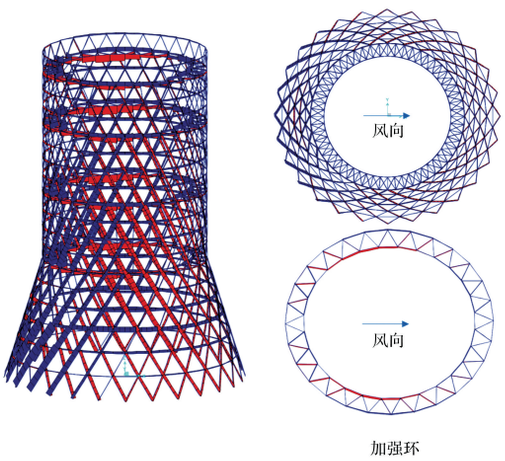
4)采用振型分解反应谱法对结构进行多遇地震与罕遇地震作用下的分析. 多遇地震作用下，塔顶水平变形仅为 20 mm(如图 8(a)所示)，基底水平剪力仅为 2 455 kN，仅为风荷载作用下基底水平剪力 16 280 kN的 1/15，对于钢结构冷却塔来说，地震作用不是结构的控制因素. 罕遇地震作用下，塔顶水平变形为 147 mm(如图 8(b)所示)，基底水平剪力为 17 487 kN，经验算钢结构冷却塔主体结构构件可满足大震不屈服的性能目标.

5)对结构进行特征值屈曲分析，风荷载作用下，一阶屈曲模态为第三道加强环迎风面环向构件屈曲，如图9(a)所示，从前文受力特点中可以发现，加

https://www.academax.com/doi/10.13849/j.issn.1006-6578.2025.01.080



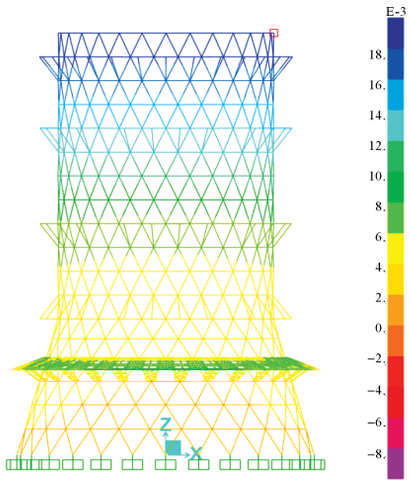

(a) 加强环外置冷却塔



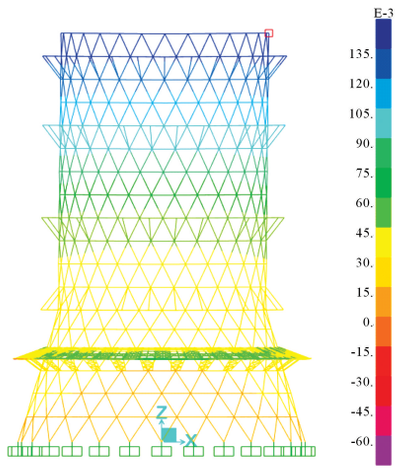

(b) 加强环内置冷却塔

**图 7 风荷载下结构构件轴力分布**

Fig. 7 Member axial force under wind load




(a) 多遇地震




(b) 罕遇地震

**图 8 地震作用下结构变形(单位:m)**

Fig. 8 Structure deformation under earthquake(Unit:m)

强环迎风面环向构件受压明显,且由于加强环外置,加强环环向构件长度较长,应对其予以加强.对比传统加强环内置、蒙皮外置的钢结构冷却塔,其一阶屈曲模态往往为锥段背风面或侧风面构件屈曲,如图9(b)所示,这是由于传统形式冷却塔在迎风面受压的主体环向构件受到斜向构件的较强约束且长度较短,而锥段背风面或侧风面构件处于受压状态且长度较长率先发生屈曲.

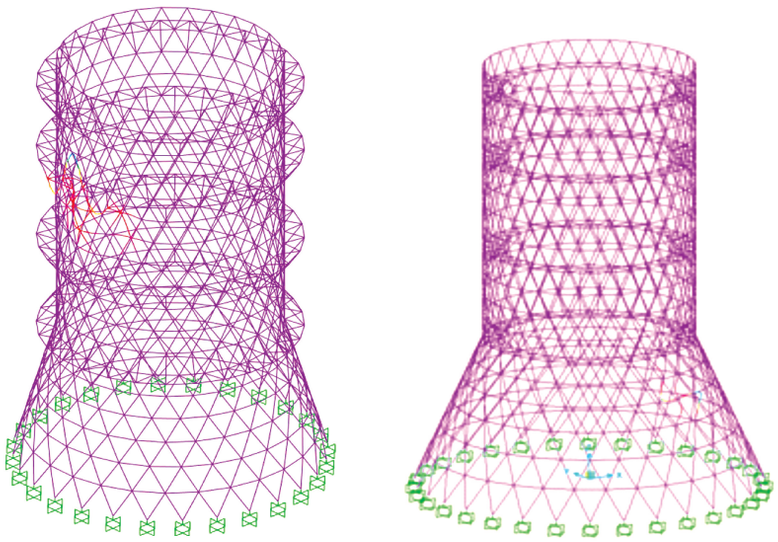
6)根据特征值屈曲分析最低阶屈曲模态,按失稳构件长度的 1/300 考虑初始缺陷,同时考虑几何非线性,进行简化等效模型和精细模型全过程分析,分析得到结构安全系数大于 4.2,如图 10 所示,满足 JGJ 7-2010《空间网格结构技术规程》[7]中的要求.采用精细模型进行考虑几何非线性和材料非线性的全过程分析,得到结构安全系数为2.5>[2.0],破坏位置出现在结构顶部迎风面区域,如图 11 所示,构件多进入塑性,为强度破坏.

7)考虑材料非线性,对典型节点进行分析,得到该节点应力分布如图 12 所示.从分析结果易知,格构构件的内力可通过节点连接板有效传递,除刚性约束处或尖角处各别节点处出现应力集中外,节点各构件强度均小于其屈服强度.

### 1.3 局部取消构件设计

本钢结构冷却塔采用单层曲面空间网格结构,在荷载作用下有多条传力路径,结构冗余度高.为实现五塔合一的工艺需求,原计划在冷却塔二层取消两根斜向构件以布置烟道,并通过对周边构件进行补强,减小局部取消构件引起的对结构整体刚度的削弱,结构布置如图 13 所示.同时由于局部取消构件,造成结构不再中心对称.为保证结构安全,需考虑多风向的风荷载工况对结构的影响.

https://www.academax.com/doi/10.13849/j.issn.1006-6578.2025.01.080



(a) 加强环外置冷却塔　　(b) 加强环内置冷却塔

**图 9　特征值屈曲一阶模态**

Fig. 9　The first order buckling mode

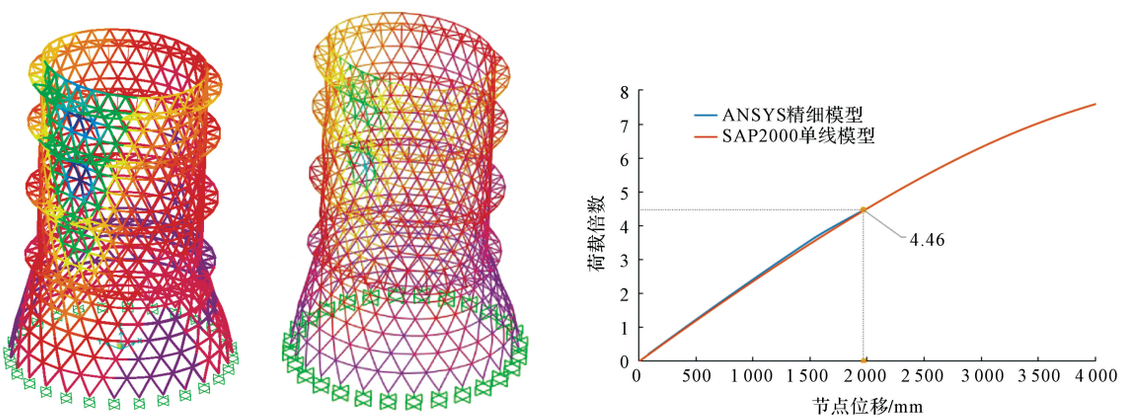



**图 10　单非线性分析结构变形及荷载-位移曲线**

Fig. 10　Deformation of single nonlinear analysis and load-displacement curve

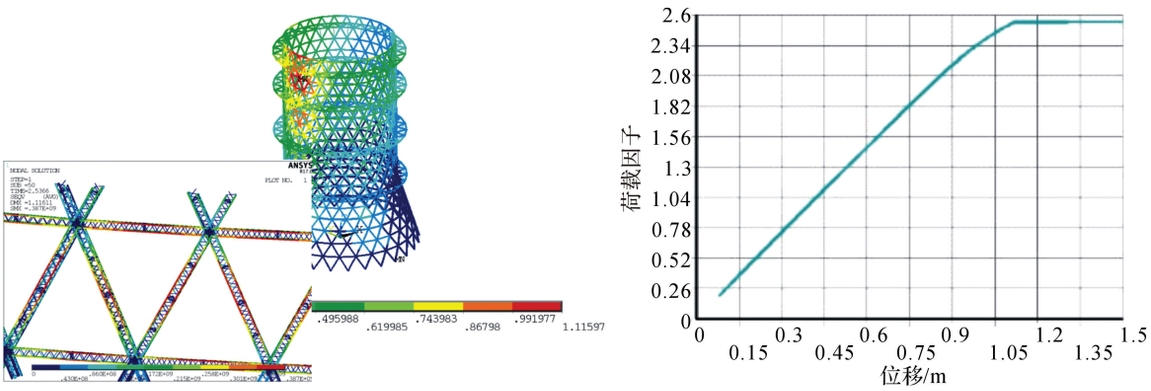



**图 11　双非线性分析结构变形及荷载-位移曲线**

Fig. 11　Deformation of double nonlinear analysis and load-displacement curve

https://www.academax.com/doi/10.13849/j.issn.1006-6578.2025.01.080

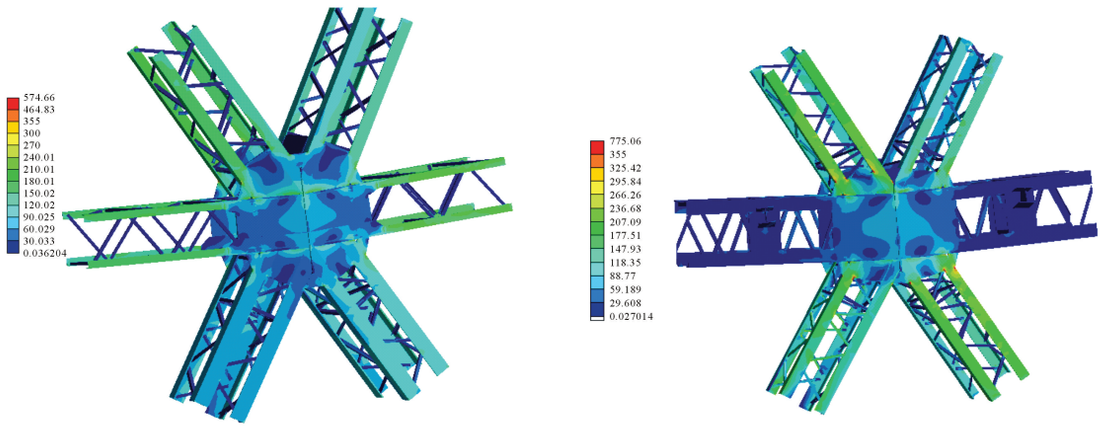



**图 12 典型节点应力云图(单位:MPa)**

Fig. 12 Stress nephogram of typical joint(Unit:MPa)

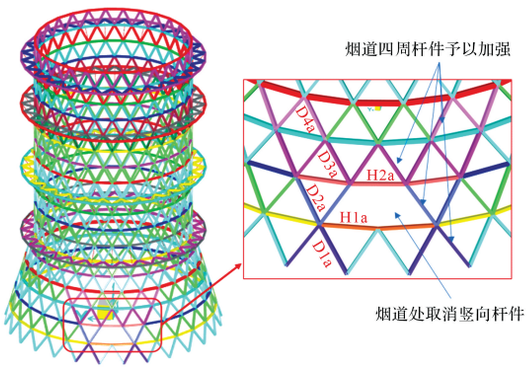



**图 13 冷却塔局部取消构件布置图**

Fig. 13 Structural arrangement with hole

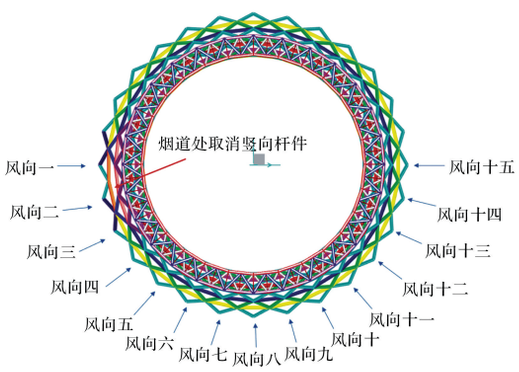



**图 14 多风向角风荷载工况示意图**

Fig. 14 Wind load in multiple directions

通过对周边构件进行补强,结构一阶周期仍为1.10 s,如图 15 所示.风荷载作用下结构顶部变形最大值为 397 mm,如图 16 所示,与完整结构模型差别仅为 1%.综上可以看出,局部取消构件引起的结构刚度削弱很小,取消构件区域四周构件内力增长亦在可控范围内.

考虑初始缺陷和几何非线性,考虑多风向风荷载作用,对补强后结构模型进行全过程分析,分析结

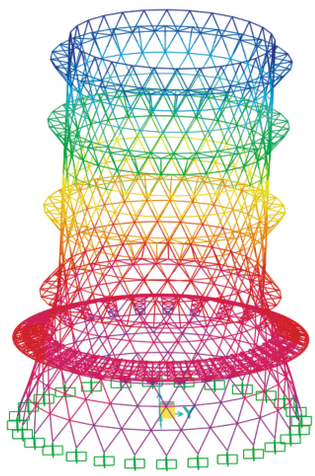


**图 15 补强后结构一阶振型图($T_1$=1.10 s)**

Fig. 15 The first order mode of structure with a hole ($T_1$=1.10 s)

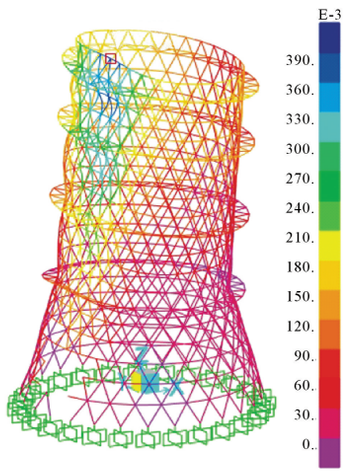



**图 16 风荷载作用下补强后结构变形图(单位:m)**

Fig. 16 Deformation of structure with a hole under wind load(Unit: m)

https://www.academax.com/doi/10.13849/j.issn.1006-6578.2025.01.080

果与完整结构模型分析结果一致，破坏仍出现在结构顶部迎风面区域，未出现在局部取消构件区域，亦从另一方面证明经过补强的结构已可以较好地满足受力需求. 后续经与烟道工艺专业沟通协调，该方案最终未被采纳，转为通过调整烟道布置解决工艺需求.

## 2　围护结构设计要点

钢结构冷却塔的围护结构主要包括檩条与铝板，其中压型铝板及其与檩条的连接的设计与其他工程相关设计无异，本文不再进行赘述，以下主要介绍檩条设计. 常规檩条的设计，往往不考虑檩条与主体结构的整体作用，仅假定檩条具有理想边界条件如两端铰接，在此基础上对檩条施加荷载进行设计分析. 实际上，由于檩条与主体结构构件牢固连接变形协调，主体结构在荷载作用下产生变形，会导致檩条产生协调变形，进而导致檩条内产生相应内力，此时，传统设计方法不能保证檩条设计安全可靠.

为保证檩条设计安全可靠，建立檩条与主体结构整体分析模型进行协同分析，如图 17 所示. 檩条位于主体结构内部，通过连接杆与主体结构环向构件或斜向构件相连. 以第 3 加强环对应位置处檩条为例，如图 18 所示，分析檩条的受力特点.

风荷载作用下，檩条与主体结构变形如图 19 所示，檩条随主体结构发生协调变形，其内力除因风荷载产生的弯矩外，还有因变形产生的较大轴力，如图 20 所示，其轴力分布特点与其连接的主体结构环向构件基本一致，且其内力亦随檩条构件截面尺寸的增加而增长.

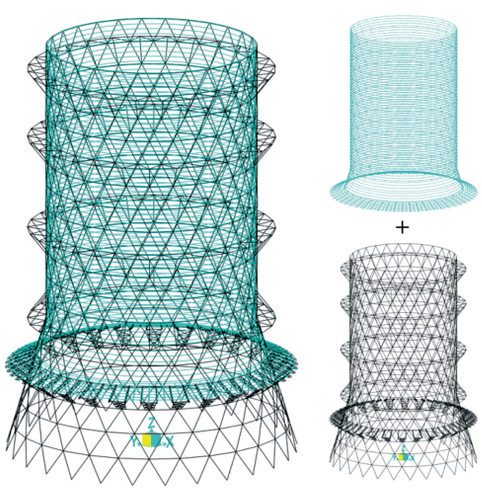



**图 17　檩条与主体结构整体分析模型**

Fig. 17　Integrated analysis model of main structure with purlins

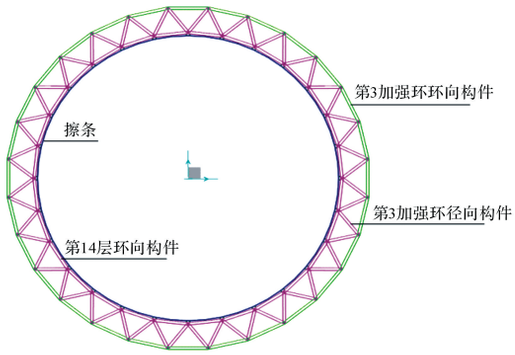



**图 18　檩条分析定位**

Fig. 18　Position of purlins in the anolysis

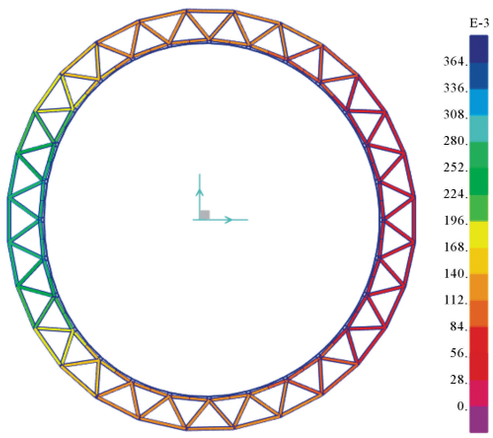



**图 19　风荷载作用下整体结构变形(单位:m)**

Fig. 19　Structure deformation under wind load (Unit:m)

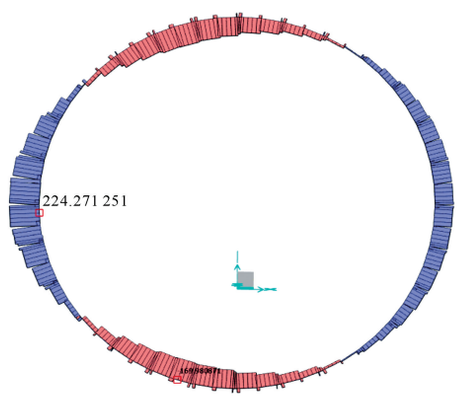



**图 20　风荷载作用下檩条轴力(单位:kN)**

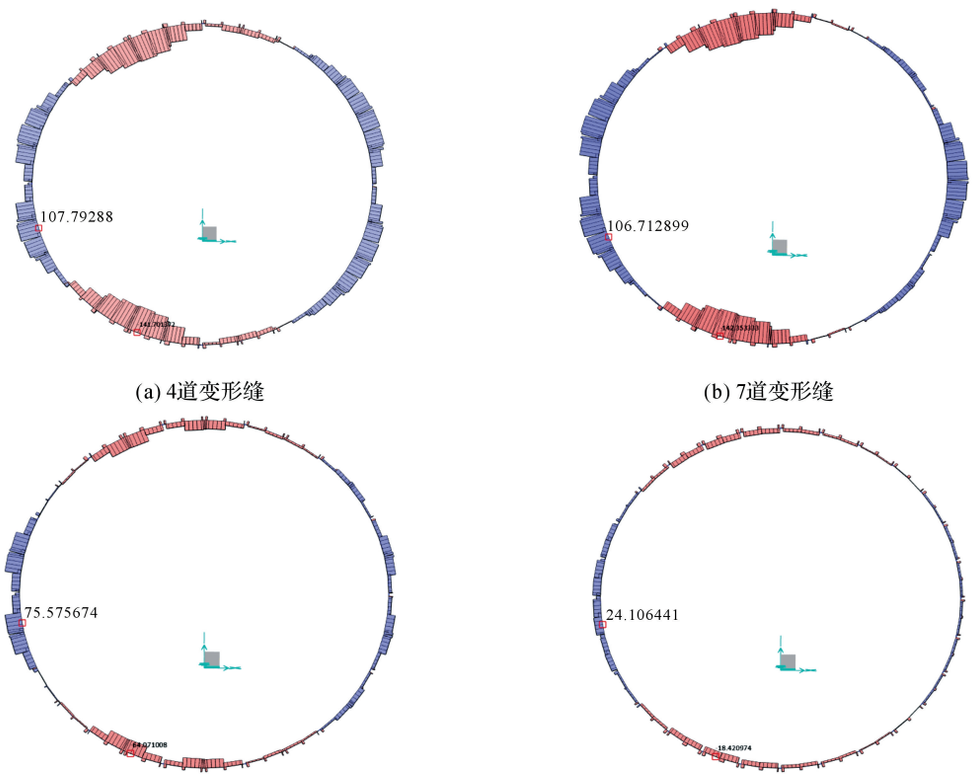
Fig. 20　Axial force of purlin under wind load(Unit:kN)

为解决檩条随主体结构协调变形产生较大轴力的问题，对比分析了沿檩条周圈设置不同数量滑动连接变形缝时的受力特点. 由于主体结构环向分格数为 28，对比变形缝数量定为 4、7、14、28，各方案风荷载作用下檩条轴力如图 21 所示.

可以看出，随着滑动连接变形缝设置数量的增

https://www.academax.com/doi/10.13849/j.issn.1006-6578.2025.01.080

多，檩条轴力大大减小，当设置 28 道变形缝时，檩条内轴力仅为未设置变形缝时檩条内轴力的 10%左右. 但同时也要注意，设置变形缝后，对于与主体结构斜向构件连接的檩条，在变形缝两侧的檩条悬挑端风荷载作用产生弯矩对其影响较大，往往需要进行加强. 经过综合对比分析，最终确定檩条变形缝设置原则为：加强环对应位置处檩条沿周圈设置 28 道变形缝，其他位置处檩条沿周圈设置 7 道变形缝，如图 22 所示. 经过截面设计，檩条可较好地满足正常使用极限状态和承载能力极限状态下的受力需求.




(a) 4道变形缝 (b) 7道变形缝

(c) 14道变形缝 (d) 28道变形缝

**图 21 各分缝方案风荷载作用下檩条轴力图(单位:kN)**

Fig. 21 Axial force of purlin with deformation joints under wind load (Unit: kN)

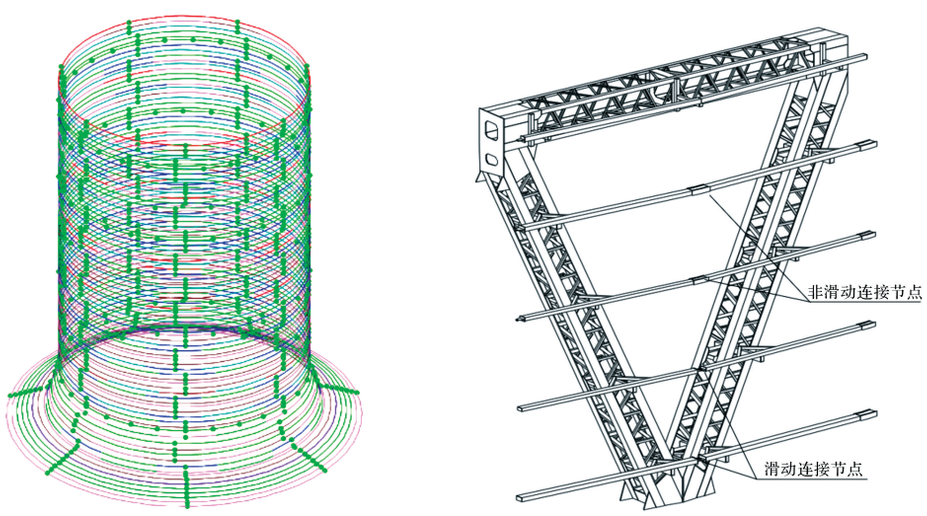



**图 22 檩条变形缝布置图**

Fig. 22 Arrangemen of deformation joints of purlin

https://www.academax.com/doi/10.13849/j.issn.1006-6578.2025.01.080

## 3 结　论

本文以华能陇东能源有限责任公司正宁电厂新建冷却塔为例，对大型五塔合一钢结构冷却塔的设计进行了介绍. 为实现将主机冷却塔、辅机冷却塔、脱硫吸收塔、CCUS 系统原烟道、烟囱集于一体，该冷却塔采用了加强环外置、蒙皮内置的直筒-锥段型塔型. 经过设计计算，采用四肢格构式构件组成的单层曲面网格结构形式可较好地满足正常使用极限状态和承载能力极限状态下的受力需求，在地震作用下主体结构构件可以满足大震不屈服的性能目标，主体结构稳定性满足空间结构的稳定性要求. 对于围护结构，通过合理设计檩条间滑动连接变形缝，可以大大降低檩条因随主体结构协调变形而产生的内部轴力，实现檩条的优化设计.

## 参考文献


[1] 张强，薛海君，王永，等. 华能宁夏大坝钢结构空冷塔结构设计研究[C]//土木工程新材料、新技术及其工程应用交流会论文集(下册)，北京，2019：767-771.
ZHANG Qiang, XUE Hai-jun, Wang Yong, et al. Structure design of steel cooling tower of Ningxia DABA powerplant[C] // Proceedings of the Civil Engineering Symposium on New Materials, New Technologies and Their Engineering Applications (Part II), Beijing, 2019: 767-771.

[2] 马明，薛海君，余喆，等. 大型钢结构空冷塔的发展与应用研究[C]//土木工程新材料、新技术及其工程应用交流会论文集(下册). 北京，2019：761-766.
MA Ming, XUE Hai-jun, YU Zhe, et al. Development and application of large scale steel cooling tower [C] // Proceedings of the Civil Engineering Symposium on New Materials, New Technologies and Their Engineering Applications (Part II), Beijing, 2019: 767-771.

[3] 朱俊颖，吴杰，张其林. 双曲线型钢结构冷却塔缺陷敏感性分析[J]. 东华大学学报(自然科学版)，2017，43(4)：585-591.
ZHU Jun-ying, WU Jie, ZHANG Qi-lin. Imperfection sensitivity of hyperbolic steel cooling towers[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2017, 43(4): 585-591.

[4] 张永飞，孙文，石东旭，等. 圆柱-截锥型与双曲线型钢冷却塔静力对比分析[J/OL]. 工业建筑，2024，5：1-14.
ZHANG Yong-fei, SUN Wen, SHI Dong-xu, et al. Comparative analysis of static behavior between cylinder-frustum and hyperbolic steel cooling towers[J/OL]. Industrial Construction, 2024, 5: 1-14.

[5] 陈朝，赖韩，陈璐. 钢结构冷却塔设计研究[J]. 电力勘测设计，2021，(S1)：79-89.
CHEN Chao, LAI Han, CHEN Lu. Research on steel structure cooling tower design [J]. Electric Power Survey & Design, 2021, (S1): 79-89.

[6] GB/T 50102-2014. 工业循环水冷却设计规范[S]. 北京：中国计划出版社，2014.
GB/T 50102-2014. Code for design of cooling for industrial recirculating water [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.

[7] JGJ 7-2010. 空间网格结构技术规程[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2010.
JGJ 7-2010. Technical specification for space frame structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.


## 致谢 2024 年审稿专家

《空间结构》杂志 2024 年出版发行工作已圆满结束. 诸位审稿专家在百忙中认真负责地完成了审稿任务，保证了本刊的稿件质量和学术水平. 衷心感谢专家、学者、编委在 2024 年对《空间结构》的关心、帮助和稿件评审. 祝各位 2025 年蛇年愉快！

2024 年度审稿专家(以姓氏笔划为序)

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 王　星 | 王振华 | 邓　华 | 白光波 | 冯若强 | 邢　丽 | 朱谢联 | 向新岸 | 刘红波 |
| 刘宏创 | 关富玲 | 许　贤 | 孙建恒 | 苏　亮 | 杜文风 | 李国强 | 杨庆山 | 肖建春 |
| 吴明儿 | 吴　晓 | 沈雁彬 | 完海鹰 | 张志宏 | 张其林 | 陈务军 | 陈伟刚 | 陈志华 |
| 陈荣毅 | 武　岳 | 范　重 | 金　睿 | 周观根 | 周　岱 | 周晓峰 | 周德良 | 段元锋 |
| 袁行飞 | 顾　磊 | 钱基宏 | 高博青 | 郭佳民 | 曹正罡 | 楼文娟 | 蔺　军 | 魏德敏 |

《空间结构》杂志编辑部
2025 年 3 月

https://www.academax.com/doi/10.13849/j.issn.1006-6578.2025.01.080