引用格式：陈泓霏，任传辉，周婷，等．基于太阳辐射的某弱相关悬挂结构温度效应分析[J]．工业建筑，2026，56(1)：80-90．CHEN Hongfei，REN Chuanhui，ZHOU Ting，et al. Analysis of Temperature Effects on a Weakly Correlated Suspension Structure Based on Solar Radiation[J]. Industrial Construction，2026，56(1)：80-90 (in Chinese)．DOI：10.3724/j.gyjzG25022203

基于太阳辐射的某弱相关悬挂结构温度效应分析*

陈泓霏[1]　任传辉[2]　周　婷[3]　刘红波[4]　陈志华[4]　刘金员[4]

（1. 天津大学国际工程师学院，天津　300072；2. 中铁十八局集团建筑安装工程有限公司，天津　300308；3. 天津大学建筑学院，天津　300072；4. 天津大学建筑工程学院，天津　300072）

摘　要　某高层建筑采用了各层弱相关的悬挂结构，通过RHINO软件对该建筑物进行温度场分区，采用MIDAS软件计算了该建筑物的主要构件在温度变化作用下的内力和变形，分别分析了仅气温变化和太阳辐射与气温变化共同作用两种情况下的温度效应。主要结论为：相比于气温变化导致的均匀温度效应，太阳辐射引发的非均匀温度作用对结构的应力、支座反力及位移的影响更为显著；共同作用下的最大拉应力增长了53.6%，最大合反力与合反力矩分别增长了142%和16.8%，最大位移值增加了26.3%；同时最大拉应力、最大合反力及最大合反力矩作用位置均发生改变。因此，需要重点考虑在结构设计和使用过程中对太阳辐射引发的非均匀温度作用。

关键词　悬挂结构；钢结构；温度场；太阳辐射

Analysis of Temperature Effects on a Weakly Correlated Suspension Structure Based on Solar Radiation

CHEN Hongfei[1]　REN Chuanhui[2]　ZHOU Ting[3]　LIU Hongbo[4]　CHEN Zhihua[4]　LIU Jinyuan[4]

(1. *Tianjin International Engineering Institute*, *Tianjin University*, *Tianjin* 300072, *China*; 2. *China Railway* 18*th Bureau Group Construction and Installation Engineering Co.*, *Ltd.*, *Tianjin* 300308, *China*; 3. *School of Architecture*, *Tianjin University*, *Tianjin* 300072, *China*; 4. *School of Civil Engineering*, *Tianjin University*, *Tianjin* 300072, *China*)

Abstract: This study investigates a high-rise building featuring a weakly correlated suspended structure. The building's temperature field was zoned using Rhino, and the internal forces and deformations of key structural members under thermal loading were calculated using Midas software. The analysis compared the thermal effects under two scenarios: air temperature fluctuation alone and the combined action of solar radiation and air temperature. The results indicate that the non-uniform temperature effects induced by solar radiation exert a significantly greater influence on structural stress, support reactions, and displacements than the uniform effects caused solely by air temperature changes. Specifically, the maximum tensile stress increased by 53.6%, while the maximum resultant reaction force and moment increased by 142% and 16.8%, respectively; the maximum displacement increased by 26.3%. Furthermore, the locations of the maximum tensile stress, resultant reaction force, and resultant reaction moment shifted under the combined loading. Consequently, the non-uniform temperature actions arising from solar radiation warrant critical consideration during the structural design and operational phases.

Keywords: weakly correlated suspension structure; steel structure; temperature field; solar radiation

*国家重点研发计划(2023YFC3805202)。

第一作者：陈泓霏，硕士研究生，主要从事钢结构方面研究。

电子信箱：2022229119@tju.edu.cn

收稿日期：2025-02-22

0　引　言

随着建筑结构设计理论及施工技术的发展和进步，建筑物的造型以及结构形式越来越复杂多样，尤其是高层建筑近年来取得了很大的发展。而悬挂结构是高层建筑的一种结构形式，主要表现为将建筑物中的主要构件（如悬挂楼层）通过吊杆或吊索与主体结构相连，悬挂楼层的荷载通过吊杆传至转换结构，再由转换结构传至主体结构。悬挂结构利用吊杆传递荷载可以极大地发挥钢材的抗拉性能，同时避免了布置体积较大的钢柱，使建筑在空间布置上更加灵活，具有显著的社会效益[1]。

关于悬挂结构，目前已有大量的分析研究。潘文智等[2]开展了考虑时变因素的复杂高层悬挂结构施工过程模拟，结果表明考虑时变因素的施工模拟结果更加符合实际情况。王春林等[3]分析了半柔性悬挂减振结构体系的风振响应控制效果，结果表明该结构能够有效减小结构的风振响应和地震作用下的动力响应。张坤等[4]对巨型钢框架悬挂结构体系组合楼板开展了振动特性试验，对其进行了振动舒适度分析。

然而，目前针对悬挂结构体系的研究多为动力分析和抗震分析，同时相关的技术标准数量匮乏，有大量问题尚待研究。如温度效应对悬挂结构的影响。由于悬挂结构多采用钢结构，钢材受温度影响较大，产生的温度应力和温度变形可能会导致构件发生局部屈曲或焊缝开裂等问题，影响结构的使用。因此，本文以某高层悬挂结构建筑为研究对象，对其开展了太阳辐射和温度变化作用下的温度效应分析。

1　工程概况

本工程总建筑面积 141314.97 m^2，平面尺寸约 151.3 m×122.6 m，地上部分共计 16 层，屋面结构高度为 70.75 m，结构首层层高为 6.0 m，2、3 层层高为 4.8 m，4、5 层层高为 4.5 m，其余各层层高均为 4.2 m。采用钢筋混凝土框架-剪力墙结构。

9~16 层挑空部分为了达到通透的建筑效果，拟采用各层弱相关悬挂结构，在屋顶设置转换钢桁架，桁架下弦顶标高为 70.630 m，上弦顶标高为 78.650 m，各层重量均通过独立钢拉杆悬挂于屋顶桁架（图 1），屋顶桁架的受力与各楼层重量均相关，但悬挂各层不直接相连，其受力及变形相互影响较弱[5]。

本工程钢结构由裙楼与塔楼组成，塔楼主要由钢框架、屋顶桁架、悬挂结构组成，屋盖为屋顶桁架，桁架悬挑下方为 9~16 层悬挂结构，主要采用钢拉杆与屋顶桁架下弦独立固定，悬挂各层不直接相连，主要结构形式为钢框架+悬挑+悬挂结构[6-8]。

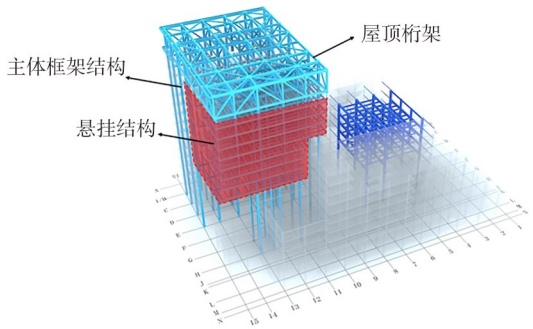


图 1　整体结构示意

Fig. 1　Schematic diagram of the overall structure

该工程以钢管混凝土结构、钢筋混凝土结构和钢结构为主，结构具有较高的气温变化敏感性，即气温变化对结构的影响较大。施工地点气候属于亚热带季风类型，夏季平均气温偏高，因此需要将温度对结构的影响纳入到影响因素内。

塔楼部位承重构件中，在非透光性现浇混凝土屋盖（太阳辐射吸收系数 α=0.85~0.92）的遮蔽作用下，框架梁柱体系的热边界条件呈现显著分区特性。根据 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》规定，当屋面材料辐射透射比低于 5% 时，遮蔽区构件可认为不受太阳辐射影响。因此，该区域温度作用计算可简化为仅考虑环境温度参数。

屋顶桁架及悬挂结构的边缘部分构件由于充分受到太阳光照射，太阳辐射强度较大，会受到显著的温度效应影响。本研究基于建筑物的结构特征和所在地区的气候条件，针对不同构件的温度场进行分区分析[9-11]，重点研究太阳辐射引起的非均匀温度效应对悬挂结构的影响[12-14]，以此为建筑结构的优化设计与稳定性评估提供科学依据与数据支撑。

2　悬挂结构温度场分布

利用 RHINO 软件的日照设置功能，结合周边建筑物对悬挂结构的遮挡作用（图 2），对整个建筑物进行温度场分区划分[15]，如图 3 所示。

根据当地历年的气象数据统计显示：冬夏气温差异显著，其中 7 月气温最高，平均气温范围为 28.8~31.4 ℃，极端最高气温达 41.3 ℃（1934 年



图 2 工程位置平面

Fig. 2 Site plan of the project



图 3 犀牛模型轴测

Fig. 3 Axonometric view of the Rhino model

8月10日）；1月气温最低，平均气温为2.6~4.6 ℃，极端最低气温为-18.1 ℃（1977年11月30日）。每年7—9月为高温时段，12月至翌年2月则为低温阶段，并伴有霜冻和降雪现象。根据每日气象数据显示，温度最高的时间段为12：00-16：00[16]。如图4所示。

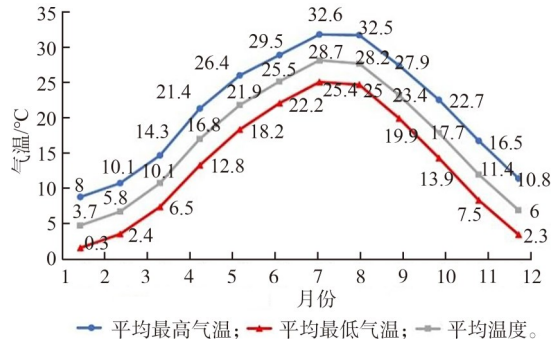


图 4 年度气温分布曲线

Fig. 4 Annual temperature distribution map

依据上述数据，在RHINO软件中将时间参数设定为7月15日14：00，以此来模拟悬挂结构于夏季所面临的日照环境状况。在此基础上，结合建筑图纸以及RHINO模型，精准筛选并确定出直接受到太阳辐射影响的构件[17-18]。而除此之外的其余构件，均可判定为仅受气温因素的影响，进而开展温度场的分区工作，以便为后续深入研究不同区域构件在温度作用下的性能表现奠定基础，使研究更具针对性与准确性，从而能更有效地揭示结构在复杂温度环境中的特性与规律。

直接暴露在太阳下的柱构件主要为建筑南侧朝向和西侧朝向的钢管混凝土柱，具体位置如图5所示，其中钢管的强度等级为Q345，内部填充混凝土强度等级为C35。钢管混凝土柱的截面均为800 mm×800 mm，钢管厚度为40 mm。

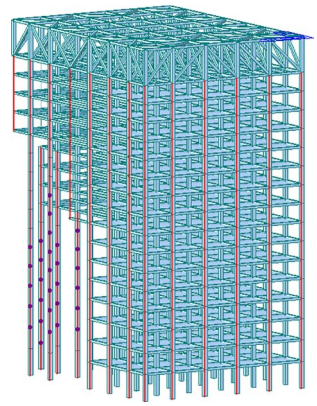


图 5 太阳辐射下的钢管混凝土柱

Fig. 5 Steel-concrete composite columns exposed directly to solar radiation

直接暴露在太阳下的悬挂楼层位于悬挂结构的西侧和北侧，具体位置如图6所示。悬挂结构的主要构件包括钢拉杆，H型钢梁以及箱型钢梁。钢材材质为Q355C和Q345GJC，钢拉杆采用GLG-650Ⅱ级合金钢，截面尺寸为D50、D60、D70，钢支撑采用焊接箱型，尺寸口400×400×12×12，提升钢梁尺寸为HN500×200×10×16，HM400×200×8×13，H700×600×20×60。

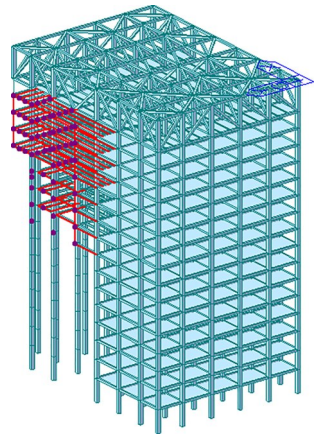


图 6 太阳辐射下的悬挂结构

Fig. 6 Suspended structure directly exposed to solar radiation

屋顶桁架全部直接暴露在太阳下，具体位置如图 7 所示，桁架材质主要为 Q355C 和 Q355GJC，屋顶桁架的尺寸为 HN800×300×14×26、HN500×400×20×20、HN500×500×20×20。

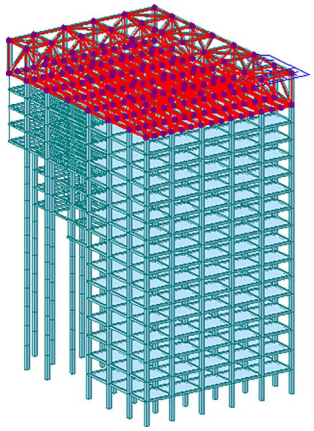


图 7　太阳辐射下的屋顶桁架

Fig. 7　Roof trusses directly exposed to solar radiation

直接暴露在太阳下的混凝土楼板位于西侧和南侧以及顶部，具体位置如图 8 所示，楼板所用混凝土的强度等级为 C30。

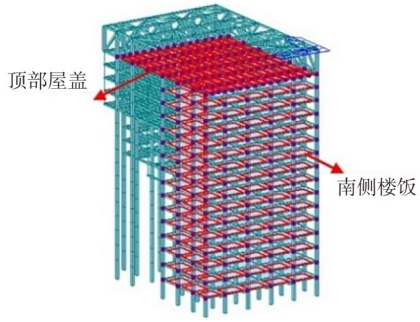


图 8　太阳辐射下的混凝土楼板

Fig. 8　Concrete floor slabs directly exposed to solar radiation

3　悬挂结构温度场分析

3.1　太阳辐射引起的悬挂结构非均匀温度作用

太阳照射入射角 α 由 RHINO 模型自动计算得出，其数值为 61.8°。查阅《工业建筑供暖通风与空气调节设计规范》附录 C 得知大气透明度等级为 5 级。构件在太阳辐射下的最高温度可通过式(1)进行计算。

$$T=[G+(\alpha_1+\alpha_2\cos\alpha)T_a^4\times10^{-8}+h(T_a-273)-203]/(h+5.8) \quad (1)$$

式中：T 为太阳辐射下构件表面的最高温度，℃；T_a 为室外气温峰值，K，取 33 ℃=306 K；G 为太阳辐射照度，W/m²，根据规范[19]中的相关规定，为保证安全，各构件太阳总辐射照度选取当天的最大值；h 为结构外表面对流热交换系数，W/(m²·K)，依据规范[19]取 14 W/(m²·℃)；α_1、α_2 为计算系数，可按表 1 插值取值。

表 1　α_1 和 α_2 取值

Table 1　Values of α_1 and α_2

k	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07
α_1	4.411	4.503	4.598	4.696	4.797	4.900	5.007	5.116
α_2	−0.129	−0.221	−0.361	−0.414	−0.515	−0.618	−0.725	−0.834
k	1.08	1.09	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15
α_1	5.229	5.345	5.464	5.587	5.713	5.842	5.975	6.111
α_2	−0.947	−1.063	−1.182	−1.305	−1.431	−1.560	−1.693	−1.829

注：k 为系数，k=[地面温度(℃)+273.15]/(室外峰值温度(℃)+273.15]。为简化分析并获得偏于安全的结果，按照理论计算方法，太阳辐射效应暂未区分构件的向阳面与背阴面，而是假设整个构件均匀受光照。

根据气象数据，夏季的系数 k 可取值为 1.10，进而得到 α_1=5.464，α_2=−1.182。

考虑到实际工程中太阳辐射强度与构件朝向密切相关，计算时还应依据 GB 50019—2015《工业建筑供暖通风与空气调节设计规范》附录 C 中的夏季太阳总辐射照度表，针对不同朝向的构件选取相应的辐射照度。其中，正西朝向的构件，辐射照度 G 统一取值为 535 W/m²，对于西北朝向的构件，其辐射照度 G 统一取值为 371 W/m²；而正北朝向的构件，相应辐射照度 G 设定为 165 W/m²；西南朝向的构件，所取辐射照度 G 为 483 W/m²；正南朝向的构件，辐射照度 G 则取值 244 W/m²。将其代入式(1)可得到：

1)朝西向的构件：

$$T=\frac{535+(5.464-1.182\cos61.8^\circ)\times306^4\times10^{-8}+14\times33-203}{14+5.8}=61.8\ ℃$$

2)朝西北向的构件：

$$T=\frac{371+(5.464-1.182\cos61.8^\circ)\times314^4\times10^{-8}+14\times41-203}{14+5.8}=53.5\ ℃$$

3)朝北向的构件：

$$T=\frac{165+(5.464-1.182\cos61.8^\circ)\times314^4\times10^{-8}+14\times41-203}{14+5.8}=43.1\ ℃$$

4）朝西南向的构件：

$$T=\frac{483+(5.464-1.182\cos 61.8^{\circ})\times 314^{4}\times 10^{-8}+14\times 41-203}{14+5.8}=59.2\ ^{\circ}\mathrm{C}$$

5）朝南向的构件：

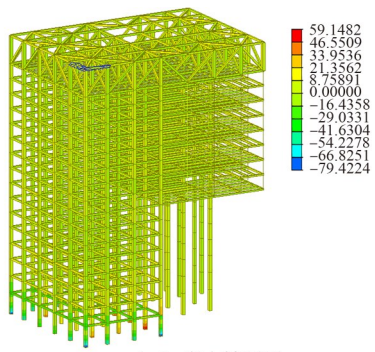
$$T=\frac{244+(5.464-1.182\cos 61.8^{\circ})\times 314^{4}\times 10^{-8}+14\times 41-203}{14+5.8}=47.1\ ^{\circ}\mathrm{C}$$

由上述计算结果能够发现，朝西向构件所受温度作用影响较大，温度达到61.8 ℃，相比之下，朝北向构件温度作用较为微弱，为43.1 ℃。

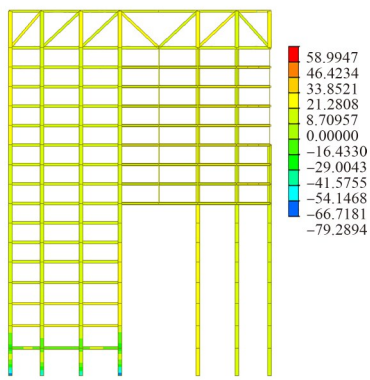
在所有受太阳辐射影响的构件中，朝西向的构件占据多数，由于其温度作用较为突出，故可参考后续的温度效应分析，以确定是否需要在设计环节或构造层面采取强化保护措施。

3.2 气温变化下的悬挂结构温度效应

基于气象数据，并考虑结构合拢温度介于23~30 ℃之间，设定在无太阳辐射条件下的分析温度为+30 ℃。本次计算仅施加温度荷载模型，模型中的参数均与基准模型保持一致。采用MIDAS软件进行模拟分析，所得温度应力分布情况参见图9。



（a）应力轴测图



（b）应力前视图

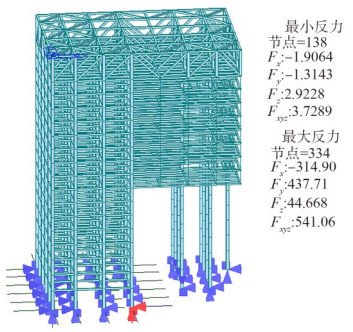
图9 仅气温变化作用下的应力 MPa

Fig. 9 Stress distribution due to temperature variation only

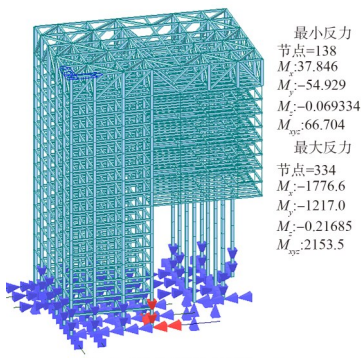
应力分析结果表明，仅考虑气温变化引起的温度效应下，该工程结构整体呈现出较低的应力水平，几乎可忽略不计。从计算结果来看，主体结构呈现出较低的应力水平。就拉应力而言，其于柱的底端呈现较大数值，继而沿柱向上逐步递减。其中，多数柱构件的柱底应力处于33.9 MPa之上，而最大拉应力可达59.1 MPa，出现于塔楼中部柱底部；最大压应力为−79.4 MPa，位于结构四个角柱底部。鉴于最大拉压应力相较于柱自身的屈服强度（345 MPa）明显偏小，故可判定结构处于安全状态。

图10显示了气温变化引起的温度效应对结构反力的影响。反力分析结果表明，仅考虑气温变化引起的温度作用，柱底反力普遍呈现较小的结果。其中，最大合反力的发生位置和最大合反力矩的发生位置均在结构东北角柱底，其数值为541.06 kN和2153.5 kN·m。最大反力的位置与最大压应力的位置一致。

仅气温变化下的位移如图11所示。分析位移结果能够发现，仅考虑气温变化引起的温度效应



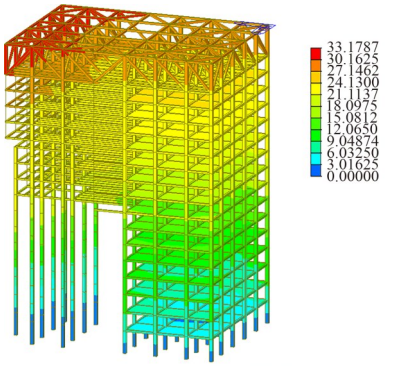
（a）反力轴测图，kN



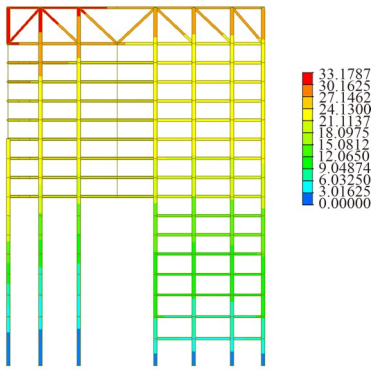
（b）反力矩轴测图，kN·m

图10 仅气温变化作用下的反力及反力矩轴测图

Fig. 10 Axonometric views of reaction forces and moments due to temperature variation only



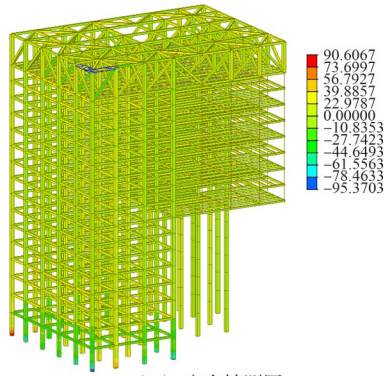
（a）位移轴测图



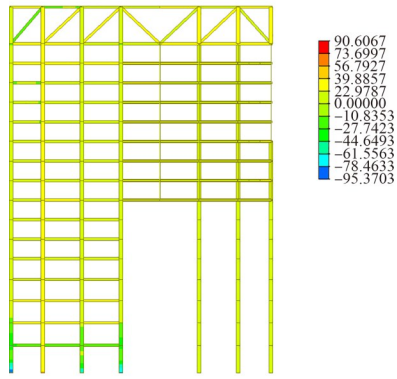
（b）位移前视图

图 11　仅气温变化作用下的位移　　mm

Fig. 11　Displacements due to temperature variation only



（a）应力轴测图



（b）应力前视图

图 12　太阳辐射和气温变化共同作用下的应力　　MPa

Fig. 12　Stress distribution due to the combined effects of solar radiation and temperature variation

时，结构构件的位移总体保持在较小范围内。柱底存在约束条件，柱底位移量为零，自下而上位移幅度逐步递增，于屋顶桁架结构处位移达到峰值。屋顶桁架的北侧部分的合位移量最大可达 33.1 mm，满足 GB 50017—2017《钢结构设计标准》[20]中规定的悬挑结构允许挠度值，处于安全范围。

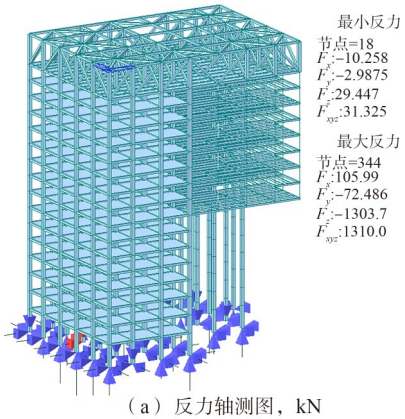
3.3　太阳辐射和气温变化下的悬挂结构温度效应

将第 3.1 节中计算的结果施加于受太阳辐射影响的相关构件上，并同时考虑第 3.2 节中的温度效应。其他设置保持第 3.2 节条件不变，利用 MIDAS 软件进行温度效应分析。在使用第 3.1 节的温度效应结果时，应减去初始参考温度。为确保安全，选择对应月份的平均最低气温（25.4 ℃）作为初始参考温度。

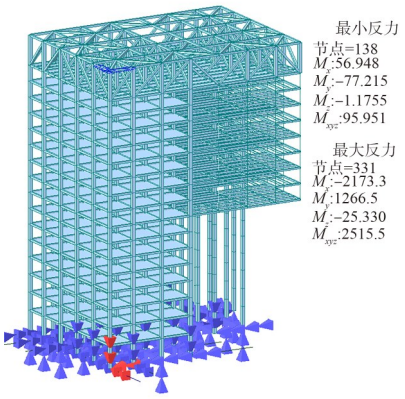
太阳辐射引起的非均匀温度作用和气温变化共同作用下应力如图 12 所示。与仅考虑气温变化时情况相同，在此共同作用下，该工程结构应力水平依旧处于较低状态。然而，在悬挂结构中，应力水平有了明显提升。就温度拉应力而言，其在柱底端的数值较大，随后沿柱向上逐渐减少。其中，多数柱构件的柱底应力超过 73.6 MPa，最大拉应力为 90.6 MPa，出现在结构西南角的角柱底部，相较于仅气温变化作用下的 59.1 MPa，增大了 53.6%；最大压应力为−95.4 MPa，出现在塔楼其余三个角柱底部，相较于仅气温变化时的−79.4 MPa，增大了 20.8%。应力虽然有所增加，然而，最大应力仍小于其本身的屈服强度（390 MPa），表明结构处于安全状态。

这表明非均匀温度效应对构件应力产生了较大影响，不仅增大了最大拉应力，还使其发生位置从中部柱底部转移至西南角柱底部。因此，在设计过程中需要特别关注。

图 13 显示了太阳辐射引起的非均匀温度效应与气温变化共同作用下的反力结果。结果表明，在多重温度作用下，大多数柱构件的柱底反力呈逐渐增大的趋势。其中，最大合反力出现在中部柱底，最大合反力矩则出现在结构东南角的柱底。最大合反力达到 1310.0 kN，最大合反力矩为 2515.5 kN·m，分别较气温变化下的 541.06 kN 和 2153.5 kN·m 增长了 142% 和 16.8%。这一结果表明，太阳辐射引起的非均匀温度效应对结构构件



（a）反力轴测图，kN



（b）反力矩轴测图，kN·m

图 13 太阳辐射和气温变化共同作用下的反力及反力矩图

Fig. 13 Reaction forces and moments due to the combined effects of solar radiation and temperature variation

反力的影响较气温变化引起的均匀温度效应更为显著。因此,在相关分析和设计中,需重点考虑太阳辐射的影响因素。

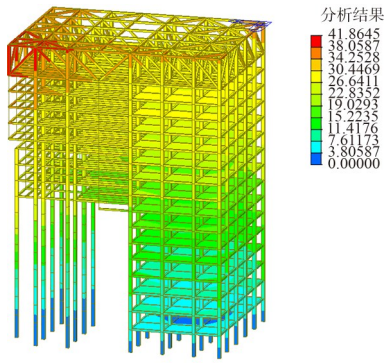
太阳辐射和气温变化共同作用下的位移如图 14 所示。结果表明,在多重温度效应下,结构构件的位移分布规律和最大合位移的位置均发生了变化,最大合位移位置从屋顶桁架的北侧移至西北侧,最大合位移量为 41.8 mm,相较于仅考虑气温变化时的 33.1 mm,增长了 26.3%,增长量较大。

这表明太阳辐射引起的非均匀温度效应对结构位移的影响,明显大于气温变化引起的均匀温度效应。因此,在设计过程中必须予以重视。

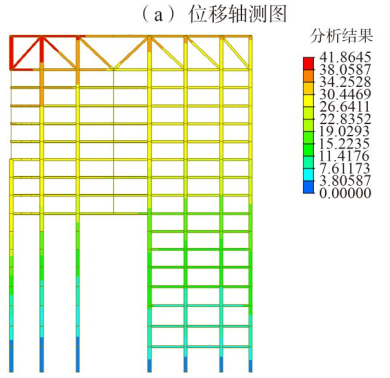
4 双重温度作用与竖向荷载工况下结构性能

4.1 恒、活荷载作用工况下结构响应

本文利用 MIDAS 有限元软件,对悬挂结构在不同荷载条件下的性能进行了计算,以明确温度作用的影响。首先,模拟了结构仅承受自重及 0.5 kN/m^2 活荷载时的状态。之后,在同样的恒、活荷载基础



（a）位移轴测图



（b）位移前视图

图 14 太阳辐射和气温变化共同作用下的位移 mm

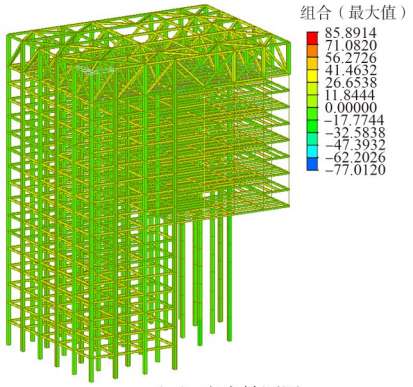
Fig. 14 Displacements due to the combined effects of solar radiation and temperature variation

上,引入双重温度作用进行二次计算。最终,通过对比分析前后两种工况的结果,判断温度效应对结构整体受力性能的影响程度。

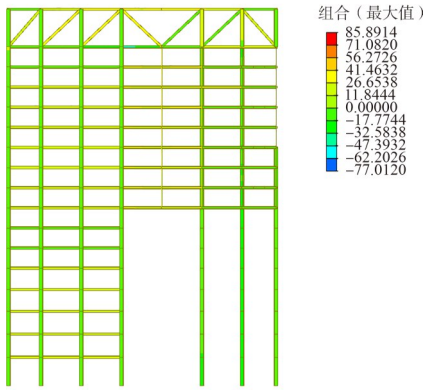
恒、活荷载工况下应力结果如图 15 所示。从应力结果可看出:恒、活荷载工况下,悬挂结构应力水平较低,应力较大的部位发生在悬挂楼层与主体核心筒连接处的钢梁,这是由于其传递了悬挂楼层平面的大部分荷载;最大拉应力 85.8 MPa,最大压应力−77.0 MPa;各梁柱的应力分布较为均匀。

恒、活荷载工况下反力轴测图和反力矩轴测图如图 16 所示。从反力结果可看出,恒、活荷载工况下,最大合反力和合反力矩均发生在北部的悬挂楼层与核心筒连接处柱子底端,分别为 4494.8 kN 和 81.2 kN·m。

恒、活荷载作用工况下位移结果如图 17 所示。看出,恒、活荷载工况下,由于柱底有约束,所以柱底位移为 0,从下往上位移逐渐增大,屋盖位移达到最大,且呈现出核心筒区域位移较小,悬挂结构区域位移较大的结果。最大位移发生在各层悬挂结构东北部外侧的构件,为 33.6 mm,这是由于该处的钢梁跨度较大,距离核心筒的距离较远,核心筒对其约束较弱。



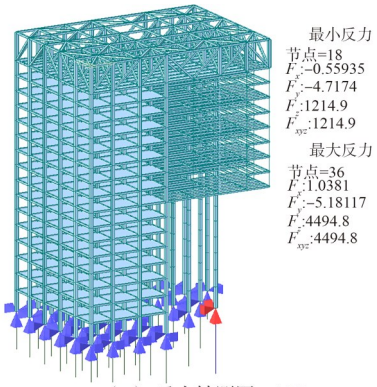
（a）应力轴测图



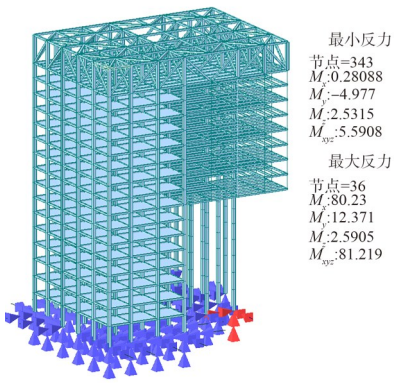
（b）应力前视图

图 15　恒、活荷载作用工况下应力　MPa

Fig. 15　Stress distribution under the action of dead and live load conditions



（a）反力轴测图，kN



（b）反力矩轴测图，kN·m

图 16　恒、活荷载作用工况下反力及反力矩

Fig. 16　Reaction forces and moments under the action of dead and live load conditions

4.2　双重温度作用与恒、活荷载作用工况下结构响应

双重温度作用与恒、活荷载作用工况下应力轴测图和前视图如图 18 所示。

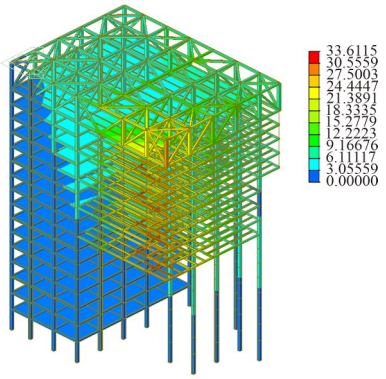
考虑双重温度与恒、活荷载的共同作用时，虽然梁柱应力分布仍比较均匀，但应力峰值显著提高。相较于无温度作用的工况，最大拉应力由 85.5 MPa 增加至 100.3 MPa，增加了 16.8%；最大压应力由 −77.0 MPa 增加至 −102.1 MPa，增加了 32.5%。同时，最大应力的位置除了悬挂楼层与核心筒结构连接处的钢梁外，柱底位置也出现了较大的应力。由上述结构可知，双重温度作用能显著提高构件的最大压应力，并改变最大拉应力的作用位置。这揭示了温度效应对构件受力的重要性，故设计阶段应将其作为关键因素考虑。

图 19 展示了计入双重温度作用后的反力及反力矩轴测图。分析反力结果可知，在此组合荷载作用下，最大合反力的位置相较于仅有恒、活荷载时并未发生变化。

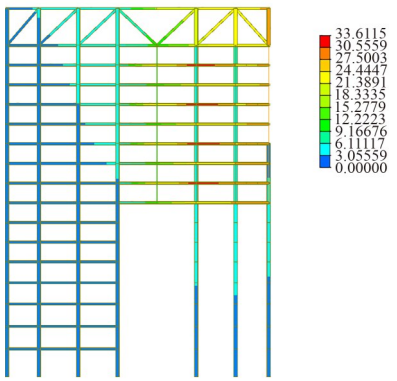
从反力结果可看出，双重温度作用与恒、活荷载作用工况下，最大合反力的位置未发生改变，最大合反力由 4494.8 kN 变为 4858.4 kN，增大了 8%，最大合反力矩的发生位置由悬挂结构北部柱底变为东南部角柱底部，最大合反力矩由 81.2 kN·m 变为 1578.7 kN·m，合力矩增大了几十倍。

由上述分析可知，双重温度作用增大了结构的整体反力与反力矩，其内在机制在于结构限制了因温度变化产生的扩张变形，此限制在角部尤为显著，从而引发更大的反作用力。不过，需要强调的是，虽然反力是重要的外部指标，但构件内部的应力状态更应该作为判断其是否满足设计要求的关键因素。

图 20 展示了计入双重温度效应（在恒、活荷载基础上）后的结构位移。结果清晰地显示了该工况下的位移模式：受底部约束影响，柱脚位移为零；位移沿结构高度向上递增，并在屋盖处达到最大值。与仅恒、活荷载作用工况对比，最大位移发生在悬挂结构顶部桁架的东北侧和西北侧，最大值为 39.0 mm，相比于仅恒、活荷载作用工况的 33.6 mm，增大了 16%，但仍小于规范[20]中规定的 $L/400$ 的限值。处于安全范围内；其中东北侧的位移是由于悬挂结构体系的传力特



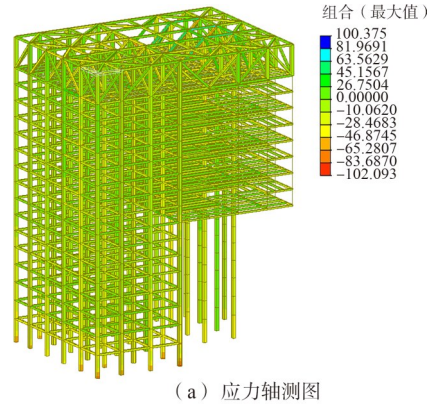
（a）位移轴测图



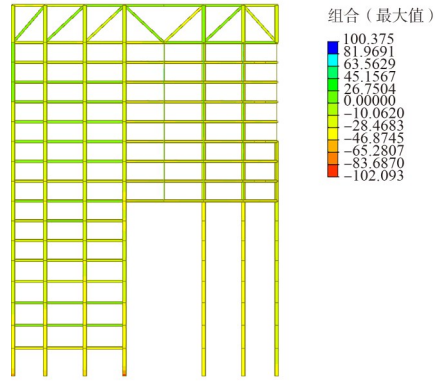
（b）位移前视图

图 17 恒、活荷载作用工况下位移结果 mm

Fig. 17 Displacements under the action of dead and live load conditions



（a）应力轴测图



（b）应力前视图

图 18 双重温度作用与恒、活荷载作用工况下应力 MPa

Fig. 18 Stress distribution under the combined action of dual temperature effects, dead load, and live load

点，该部分构件受核心筒的约束较弱；而西北侧的构件则是因为温度作用较为明显。以上结果表明温度作用对结构性能均有较大程度的影响，在设计时应重点考虑。

5 温度作用对悬挂结构的性能影响分析

根据上述分析结果，对比温度效应对结构性能的影响。

5.1 应力结果对比分析

仅考虑气温变化作用下，主体结构温度拉应力展现出规律性变化。柱底端的温度拉应力数值较大，而后沿着柱体向上，该数值逐步降低。基于这一现象，可以合理推测，温度效应引发的拉压应力主要与结构的约束条件相关。

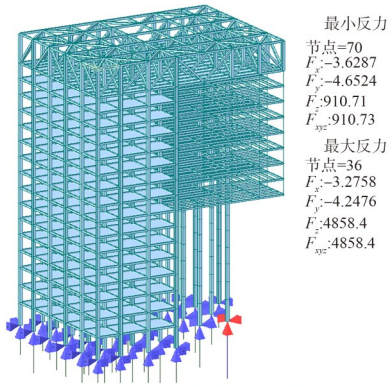
对比两种温度作用后发现，太阳辐射引起的非均匀温度效应的影响更加显著。其不但促使最大拉应力出现大幅增长，还导致最大拉应力的位置发生变动：原本处于中部柱底部的最大拉应力，在非均匀温度作用下，转移至西南角柱底部。

与仅考虑恒、活荷载的工况相比，叠加双重温度作用导致结构的最大拉应力与最大压应力均呈现增长趋势，此外，柱底区域的应力也出现了显著提高。这一变化在结构设计中较为重要，意味着在考虑非均匀温度作用时，需要重点关注关键部位的应力承载能力与结构稳定性，以确保主体结构在复杂温度环境下能够安全可靠地运行，避免因温度应力的集中对结构产生不利结果，保障结构的安全性与稳定性。

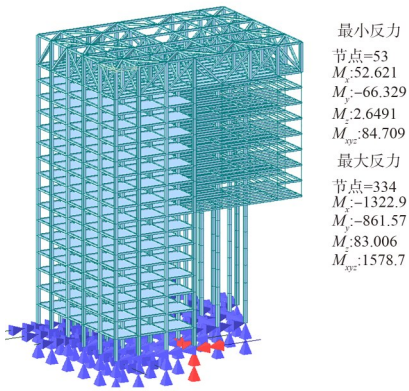
5.2 反力结果对比分析

对比两种独立的温度效应（不计其他荷载）发现，太阳辐射导致的非均匀温度场比均匀的气温变化更能显著提高结构构件的反力。其中最大合反力与合反力矩分别增长了 142% 和 16.8%。同时，最大合反力的位置从结构东北角柱底部转移至结构中部柱子底部，最大合反力矩的位置则由结构东北角柱底部变动为结构东南角柱底部。

再将恒、活荷载工况与增加双重温度作用后结果对比，原恒、活荷载工况下最大反力矩的作用位置均发生在北部的悬挂结构与核心筒连接的钢管混凝土柱处，当计入双重温度效应时，最大合反力



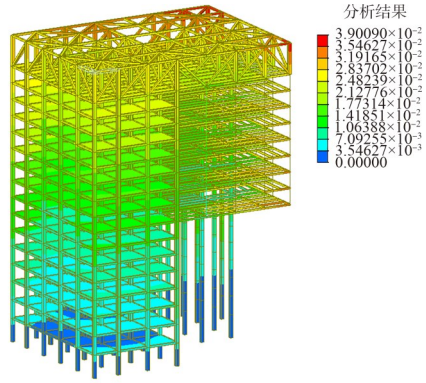
（a）反力轴测图，kN



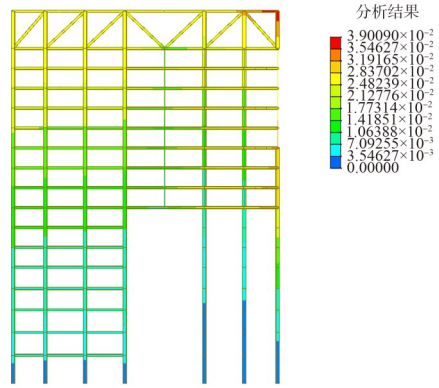
（b）反力矩轴测图，kN·m

图 19　双重温度作用与恒、活荷载作用工况下反力

Fig. 19　Reaction forces under the combined action of dual temperature effects, dead load, and live load



（a）位移轴测图



（b）位移前视图

图 20　双重温度作用与恒、活荷载作用工况下位移　mm

Fig. 20　Displacements under the combined action of dual temperature effects, dead load, and live load

矩出现在结构东南角，具体位于悬挂结构与核心筒连接处的柱子底部。且相比仅恒、活荷载工况的最大反力矩值，合力增大了 8%，但合力矩却有巨大的增大。

因此，在进行结构设计时，应当着重考层对太阳辐射引起的非均匀温度作用，以便在设计过程中能够充分预估并妥善应对其可能给结构构件反力带来的影响，从而确保结构设计的合理性与安全性。

5.3　位移结果对比分析

由位移结果能够看出，在仅考虑温度作用时，结构构件所产生的位移总体上处于较小的范围。这是因为柱底存在约束条件，使得柱底位移量为零，而位移量从下往上呈现出逐渐增大的趋势，在屋顶桁架处位移达到最大值。与此同时，最大位移值增加了 26.3%，结构构件的位移分布规律相比气温变化温度效应的工况有所不同，最大合位移位置也发生了改变，从屋顶桁架北侧转移到了屋顶桁架的西北侧。这说明太阳辐射引起的非均匀温度作用对结构构件位移的影响显著增大。

在叠加了双重温度作用后（与仅恒、活荷载工况相比），结构的位移特征为：柱底在约束下位移为零，位移值则自下而上逐渐累积增大，在屋盖处位移均达到最大。与仅恒、活荷载作用工况对比，最大位移发生位置由悬挂结构东北侧变为悬挂结构的东北侧和西北侧，最大位移值增大了 16%；其中东北侧的位移是由于悬挂结构体系的传力特点，该部分构件受核心筒的约束较弱；而西北侧的构件则是因为温度作用较为明显。

鉴于上述情况，在进行结构设计时，应当着重对太阳辐射引起的非均匀温度作用予以充分考虑，以便能够准确把握其对结构构件位移的影响，进而确保设计方案能够有效应对此类变化，保障结构的安全性与稳定性。

6　温度设计结果的评估和应对措施建议

1）根据温度作用计算结果可知，朝西向的构件的温度作用最强，温度值为 61.8 ℃；朝南向的温度作用最弱，温度值为 43.1 ℃。

2）从应力结果可以看出，温度作用对结构最大

应力的数值及其作用位置均有显著影响。因此,在结构设计过程中,必须充分考虑并进行相应处理。

3)从反力结果来看,在设计与使用过程中,应特别关注太阳辐射对最大合反力矩的影响。最大合反力矩的作用位置,即结构东南角柱底部,应作为重点关注部位。

4)由位移分析结果可知,最大位移值满足GB 50017—2017中规定的悬挑结构允许挠度值,处于安全范围。因此在设计和施工阶段可以优先考虑其他设计指标。

综上所述,太阳辐射引起的非均匀温度效应对结构受力的影响较为显著,因此在设计过程中应重点考虑这一因素。在设计时,应特别关注最大合反力矩作用位置,即结构东南角柱底部这一关键部位,并在该部位的强度等级上进行适当的预留处理,以增强其应对可能出现的不利受力条件的能力。鉴于通过应力分析所得到的结果尚处于合理范围之内,所以从更为经济、合理且有效的角度出发,建议采取一些间接的措施来降低太阳辐射,减小太阳辐射带来的影响:1)遮挡围护,以使温度作用降低。2)选用具有良好隔热性能的建筑材料。3)涂刷防晒涂料。防晒涂料能够有效阻挡太阳辐射产生的热量,同时通过辐射方式将物体自身的热量散发,从而达到降温效果。

参 考 文 献

[1] 张坤,王静峰,丁敬华,等. 巨型钢框架-上部悬挂下部支承结构体系施工全过程模拟与监测研究[J]. 施工技术,2020,49(14):46-50.

[2] 潘文智,石开荣,吕俊锋. 高层悬挂结构考虑时变因素的施工过程分析[C]//天津大学,天津市钢结构学会. 第十七届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 广州:2017.

[3] 王春林,吕志涛,涂永明. 半柔性悬挂结构体系的风振响应参数优化及阻尼控制[J]. 土木工程学报,2009,42(3):1-7.

[4] 张坤,王静峰,张贝贝,等. 巨型钢框架悬挂结构体系组合楼板振动性能试验及舒适度分析[J]. 工业建筑,2022,52(5):90-97.

[5] 温四清,向虎,邱剑,等. 某各层弱相关悬挂结构设计[J]. 建筑结构,2023,53(15):60-66.

[6] 向虎,邱剑,程畅,等. 某各层弱相关悬挂结构抗震设计[J]. 建筑结构,2023,53(15):73-77.

[7] 向虎,邱剑,阳帅,等. 某各层弱相关悬挂结构施工模拟分析[J]. 建筑结构,2023,53(15):78-83.

[8] 向虎,程畅,邱剑,等. 某各层弱相关悬挂结构转换桁架设计及关键节点分析[J]. 建筑结构,2023,53(15):67-72.

[9] 刘红波. 弦支穹顶结构施工控制理论与温度效应研究[D]. 天津:天津大学,2011.

[10] 张晨曦. 高海拔大坡度长大隧道洞内温度场规律研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2021.

[11] 范重,王喆,唐杰. 国家体育场大跨度钢结构温度场分析与合拢温度研究[J]. 建筑结构学报,2007,28(2):32-40.

[12] 杨怡昕,周婷,刘红波,等. 太阳辐射下LNG不锈钢储罐罐壁温度场和温度效应研究[J]. 工业建筑,2022,52(9):115-120.

[13] 边民,董庆,王栋,等. 基于太阳辐射效应校正的高原铁路廊道地热异常区识别研究[J]. 隧道建设(中英文),2022,42(8):1461-1472.

[14] 周婷,杨慧杰,刘红波,等. 超高层矩形钢管混凝土柱太阳辐射下截面温度场分析[J]. 工业建筑,2016,46(11):29-32.

[15] 刘金员,高修建,井司南,等. 大运城市综合交通枢纽温度场分析[C]//天津大学,天津市钢结构学会. 第二十三届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 天津:2023.

[16] 刘炜健. 湖北省地震观测与地震预警仪器测试基地项目选址必要性[J]. 河南科技,2021,40(16):144-146.

[17] 林错错,王元清,石永久. 露天日照条件下钢结构构件的温度场分析[J]. 钢结构,2010,25(8):38-43.

[18] 王元清,林错错,石永久. 露天日照条件下钢结构构件温度的试验研究[J]. 建筑结构学报,2010,31(增刊1):140-147.

[19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工业建筑供暖通风与空气调节设计规范:GB 50019—2015[S]. 北京:中国计划出版社,2016.

[20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.