引用格式：闫翔宇，陈程，于越，等．百米高交叉钢拱结构日照非均匀温度场分析[J]．工业建筑，2026，56(1)：61-69．YAN Xiangyu，CHEN Cheng，YU Yue，et al. Analysis of Non-Uniform Temperature Field of a 100-Meter-High Crossed Steel Arch Structure Under Solar Radiation[J]. Industrial Construction，2026，56(1)：61-69 (in Chinese)．DOI：10.3724/j.gyjzG25090601

百米高交叉钢拱结构日照非均匀温度场分析

闫翔宇[1,2]　陈　程[1]　于　越[2]　陈志华[2]　张锡治[2,3]

（1. 天津理工大学海洋能源学院，天津　300384；2. 天津大学建筑工程学院，天津　300072；
3. 天津大学建筑设计规划研究总院有限公司，天津　300073）

摘　要　长期日照下，建筑结构温度场因太阳辐射角度变化、建筑遮挡和风速影响，呈现出明显的时空非均匀特征。为研究百米高大矢跨比交叉钢拱结构在太阳辐射下的温度场分布规律，在ANSYS Fluent Meshing模块中建立大矢跨比交叉钢拱结构的实体模型及流体域，模拟分析结构的瞬态温度场，对季节、太阳辐射强度、风速和两侧建筑物阴影遮挡等因素对结构瞬态非均匀温度场的影响规律进行参数化分析。结果表明：钢拱表面最高温度出现在14：00，变化趋势近似正弦函数，构件温度沿高度方向差异显著；较低辐射强度下表面最高温度相比高辐射强度下降21.4%；风速增大会降低表面温度，冬季降温效果明显高于夏季；建筑物阴影不会改变温度分布模式，但可使结构表面与环境温差减小11.99%~22.13%；结构温度场时变性与空间不均匀性显著。

关键词　交叉钢拱；大矢跨比；温度效应；太阳辐射；非均匀温度场

Analysis of Non-Uniform Temperature Field of a 100-Meter-High Crossed Steel Arch Structure Under Solar Radiation

YAN Xiangyu[1,2]　CHEN Cheng[1]　YU Yue[2]　CHEN Zhihua[2]　ZHANG Xizhi[2,3]

(1. *School of Ocean Energy*, *Tianjin University of Technology*, *Tianjin* 300384, *China*; 2. *School of Civil Engineering*, *Tianjin University*, *Tianjin* 300372, *China*; 3. *Tianjin University Research Institute of Architectural Design and Urban Planning Co.*, *Ltd.*, *Tianjin* 300073, *China*)

Abstract: Under long-term solar radiation, the temperature field of building structures exhibits significant spatiotemporal non-uniform characteristics due to changes in the solar radiation angle, building shading, and wind speed. To study the temperature field distribution of a 100-meter-high crossed steel arch structure large-rise-span under solar radiation, a solid model and fluid domain of the crossed steel arch structure large-rise-span were established in the ANSYS Fluent Meshing module. The transient temperature field of the structure was simulated and analyzed, and the effects of factors such as season, solar radiation intensity, wind speed, and shading from buildings on both sides on the transient non-uniform temperature field of the structure were parametrically analyzed. The results show: the highest temperature on the steel arch surface occurs at 14: 00, with a variation trend approximately following a sine function, and the temperature of the components varies significantly along the height direction; under lower radiation intensity, the maximum surface temperature decreases by 21.4% compared with high radiation intensity; increasing wind speed lowers the surface temperature, with the cooling effect in winter being significantly greater than in summer; building shadows do not change the temperature distribution pattern, but they can reduce the temperature difference between the structure surface and the environment by approximately 11.99% to 22.13%. The structure′s temperature field

第一作者：闫翔宇，博士，主要从事预应力结构和空间结构方面的研究。

电子信箱：yanxy@email.tjut.edu.cn

收稿日期：2025-09-06

© 2026 工业建筑

exhibits significant temporal variability and spatial non-uniformity.

Keywords: cross steel arch; large rise-span ratio; temperature effect; solar radiation; non-uniform temperature field

0 引 言

大跨度钢拱结构具有跨越能力大、刚度大、承载能力强、材料利用率高等优点，广泛应用于大跨度空间结构和桥梁结构中。近年来，针对各种类型钢拱结构的研究成果也越来越多[1-5]。而长期暴露在日照环境中的钢拱结构受环境温度和太阳辐射影响很大，太阳辐射角度以及构件遮挡产生的阴影位置随时间发生变化，会使结构表面产生非均匀的温度场分布。现有的钢结构设计规范仅给出均匀温度作用的相关规定，但近年来，随着夏季气温的不断升高，太阳辐射下钢结构的非均匀温度场分布引起的温度效应越来越不容忽视。许多专家和学者针对钢结构太阳辐射下的非均匀温度场开展了大量的模拟分析和试验验证。

王锦涛等[6]模拟了某大跨斜腿钢管桁架的瞬态温度场，发现结构施工阶段的受力主要来源于温度效应，结构在施工阶段的温度效应不可忽略；于洋等[7]探究了考虑太阳辐射的系杆拱桥箱形钢拱肋温度场分布，发现拱肋高度的提高会导致钢箱出现最大温度的时间提前，并提出了最大钢箱竖向温差的预测公式；Qiu等[8]分析了季节和拱肋方向对钢箱形拱肋日照温度场的影响以及非线性温度作用下钢箱形拱肋的应力和变形；Huang等[9]通过试验监测发现，钢管在太阳辐射影响下的非均匀温度场对其倾斜和方向具有显著的敏感性；Zhu等[10]监测并评估了大跨度钢桁架拱桥在太阳辐射下的极端温度；Yan等[11]发现增大直径会使钢管混凝土拱的非均匀温度场更加均匀，而构件倾角通过影响太阳入射角和强度影响温度场；Liu等[12]提出了预测任意倾角混凝土填充钢管日最大温差的经验公式，并利用拱桥进行验证；Zhou等[13-14]发现大跨度钢管混凝土拱桥的径向温度场呈不对称的三段折线分布，太阳辐射吸收系数和环境温度对非均匀温度场的影响要大于风速。

尽管针对钢拱结构在太阳辐射下的温度效应已有较多研究，但多数集中于常规跨度、单拱或简支拱形式，且多侧重于单一因素（如季节或风速）的影响。对于百米级大矢跨比交叉钢拱结构，其空间形态复杂，受阴影遮挡效应显著，加之高度带来的竖向温度梯度变化更为明显，目前尚缺乏系统考虑多因素作用（如太阳辐射强度、风速、季节变化与相邻建筑遮挡）下的非均匀温度场研究。因此，以山东省临沂市某百米高交叉钢拱为实际工程背景，建立ANSYS数值分析模型，研究百米高大矢跨比交叉钢拱结构在太阳辐射强度、风速和两侧建筑物遮挡等因素影响下的非均匀瞬态温度场的分布规律。

1 结构模型建立

1.1 非均匀温度场模型

1.1.1 太阳辐射强度模型的选择

目前太阳辐射计算模型中较为常用的有ASHRAE晴空模型[15]、Hottel模型[16]、Dilger模型[17]，其中，在结构工程领域较为常用的是ASHRAE晴空模型，这也是美国供暖、制冷和空气调节工程师协会推荐的模型。根据ASHRAE晴空模型，建筑物接受的太阳辐射由太阳直射辐射、太阳散射辐射和地面与建筑物反射辐射组成，辐射示意如图1所示。

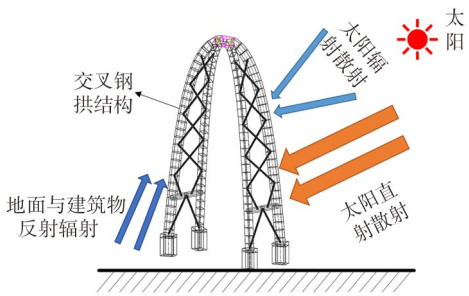


图1 太阳辐射示意

Fig. 1 Solar radiation diagram

1.1.2 大气气温模型及参数

外界气温受自然界多种因素的影响，但晴天的气温日变化过程却具有较好的规律性，如最高气温一般出现在14:00左右，最低气温一般在4:00—6:00之间，晴天条件下空气温度的变化接近正弦曲线，日气温变化曲线可根据式(1)确定[18]。

$$T_{a(t)} = T_{av} + T_{am}\sin\frac{(t - t_0)\pi}{12} \tag{1}$$

其中 $T_{am} = \dfrac{T_{max} - T_{min}}{2}$，$T_{av} = \dfrac{T_{max} + T_{min}}{2}$

式中：T_{av}为日平均气温；T_{am}为气温变化幅度日平均气温；t_0取 8，根据山东省气象台近五年临沂市气象资料，选取夏季加载日期为 6 月 9 日，冬季加载日期为 1 月 6 日；T_{max}夏季取 38 ℃，冬季取 1 ℃；T_{min}夏季取 19 ℃，冬季取−15 ℃；计算可得日气温如表 1 所示。

表 1　日气温取值

Table 1　Daily temperature　　℃

季节	6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
夏季	23.75	28.50	33.25	36.73	38.0	36.73	33.25	28.50
冬季	−11.00	−7.00	−3.00	−0.07	1.00	−0.07	−3.00	—

1.1.3　辐射模型参数

FLUENT 流体分析软件中的辐射模型有 p−1 模型、DTRM 模型、Rosseland 模型以及 DO 模型。由于钢管和大跨度空间结构的光学深度较大，考虑太阳辐射下散射和辐射，并结合大跨空间结构温度场的特点，根据计算机的运行效率，选用 p−1 辐射模型。由流体基本方程与 p−1 辐射模型方程可以求解温度分布。在工程计算中，p−1 的辐射模型[19]为：

$$q_r = -\frac{1}{3(a+\sigma_s)-C\sigma_s}\nabla G \tag{2}$$

式中：q_r为辐射热流；a为吸收系数，取 0.8；σ_s为散射系数，取 0；C为入射散射，取值 0，表示散射为各向同性。定义Γ：

$$\Gamma = \frac{1}{3a} \tag{3}$$

化简式(2)可得：

$$q_r = -\Gamma\nabla G \tag{4}$$

G的运输方程为：

$$\nabla(\Gamma\nabla G) - aG + 4an^2\delta T^4 = S_G \tag{5}$$

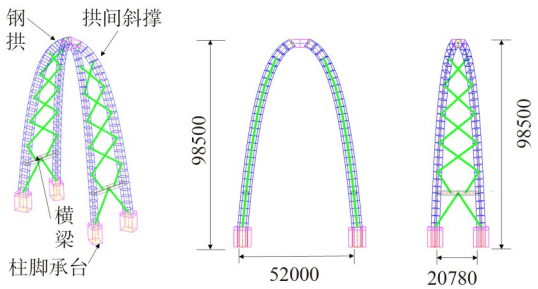
式中：G为辐射强度，取 1423 W/m²；n为折射率，默认为 1；δ为 Stefan−Boltzmann 常数，为 5.67×10^{-8} W/(m²·K⁴)；S_G为辐射源项，默认为 0；p−1 模型通过该方法计算辐射强度。合并式(5)可得：

$$-\nabla q_r = aG - 4a\delta T^4 \tag{6}$$

将∇q_r代入到流体能量方程中，就可计算出辐射产生的热量值。

1.2　结构基本布置

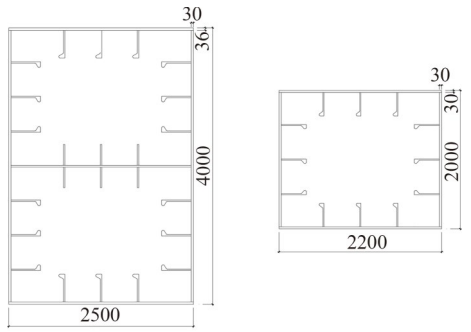
交叉钢拱结构如图 2 所示，主要由钢拱、横梁、拱间斜撑和拱脚承台组成，拱脚距离长向 52 m，短向 20.78 m，钢拱高度约 98.5 m；钢拱和横梁均采用箱型截面，截面尺寸分别为 2500 mm×4000 mm×36 mm×30 mm 和 2200 mm×2000 mm×30 mm×30 mm，如图 3 所示，横梁以上的斜撑采用 ϕ750×30 圆钢管，横梁以下的斜撑采用 ϕ750×20 圆钢管。钢拱及拱间斜撑采用 Q390GJC 钢，横梁采用 Q355B 钢，其中，Q390GJC 钢热导率为 50 W/(m·K)，Q355 钢热导率为 46.6 W/(m·K)，两者的线膨胀系数为 12×10^{-6}/℃，比热容为 480 J/(kg·℃)。拱脚承台采用 C45 混凝土。



（a）三维示意　（b）正立面　（c）侧面

图 2　大跨度交叉钢拱结构模型　mm

Fig. 2　Model of a long-span crossed steel arch structure



（a）钢拱截面　（a）横梁截面

图 3　钢拱主要构件截面　mm

Fig. 3　Main components section of steel arch

1.3　模型建立及网格划分

采用 SpaceClaim 建立几何模型，钢拱结构的外壳即固体域，按 1∶1 的比例建立。为降低流体域边界对固体域计算结果的影响，设定流体域尺寸为 934 m×237 m×521 m。由于斜撑尺寸与流体域尺寸相差过大，网格无法划分，因此去掉斜撑，仅模拟钢拱部分。采用 Fluent Meshing 进行网格划分，固体域进行局部尺寸加密，最大面网格尺寸为 0.9 m，流体域面网格尺寸最大为 15 m，交界处通过添加 smooth-transition 边界层保持网格连续性，体网格选用六面体，交叉钢拱结构的模型及网格划分情况如图 4 所示，流体场的建立及网格划分如图 5 所示。

1.4　边界条件及参数设置

流体域边界条件相关参数如表 2 所示。湍流模型选取同时具备 $k-\omega$ 模型及 $k-\varepsilon$ 模型优点的 SST $k-\omega$ 模型。

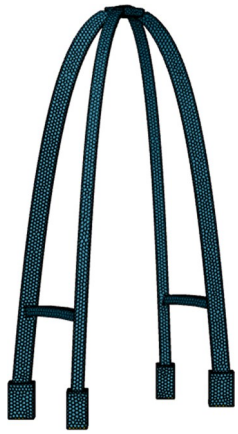


图 4 交叉钢拱网格划分

Fig. 4 Crossed steel arch meshing

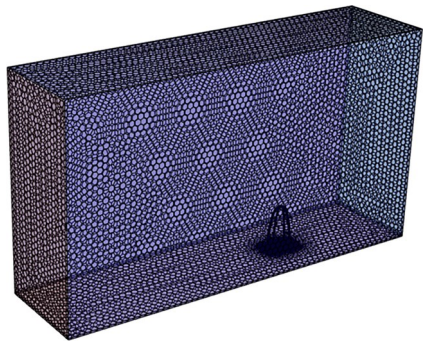


图 5 流体域网格划分

Fig. 5 Fluid domain meshing

表 2 边界条件及参数设置

Table 2 Boundary conditions and parameter settings

边界条件	边界类型	边界参数
入口边界	velocity-inlet	夏季平均风速 3.1 m/s, 冬季平均风速 2.75 m/s
底面边界	wall	底面材料为混凝土
空气边界	symmetry	
出口边界	pressure outlet	气体温度,取环境温度

2 太阳辐射下钢拱非均匀温度场分析

2.1 夏季钢拱结构不同时刻温度场

夏季太阳辐射下不同时刻钢拱结构温度场分布如图 6 所示,拱的东西方向标志如图 6(a)所示,后续图片均采用同一方向示意。夏季不同时刻环境温度与钢拱表面最高温度对比如图 7 和表 3 所示。

由图 6 可知:随着太阳东升西落,太阳辐射角产生明显变化,钢拱结构东西两侧产生明显非均匀温度场,钢拱表面最高温度由东侧逐渐向西侧移动。

由图 7 和表 3 可知:一日内环境温度和钢拱表面最高温度随时间的变化都近似呈正弦曲线;6:00—18:00时,钢拱与周围环境发生热交换,包括空气对流换热、天空长波辐射、太阳直射及散射辐射、地面

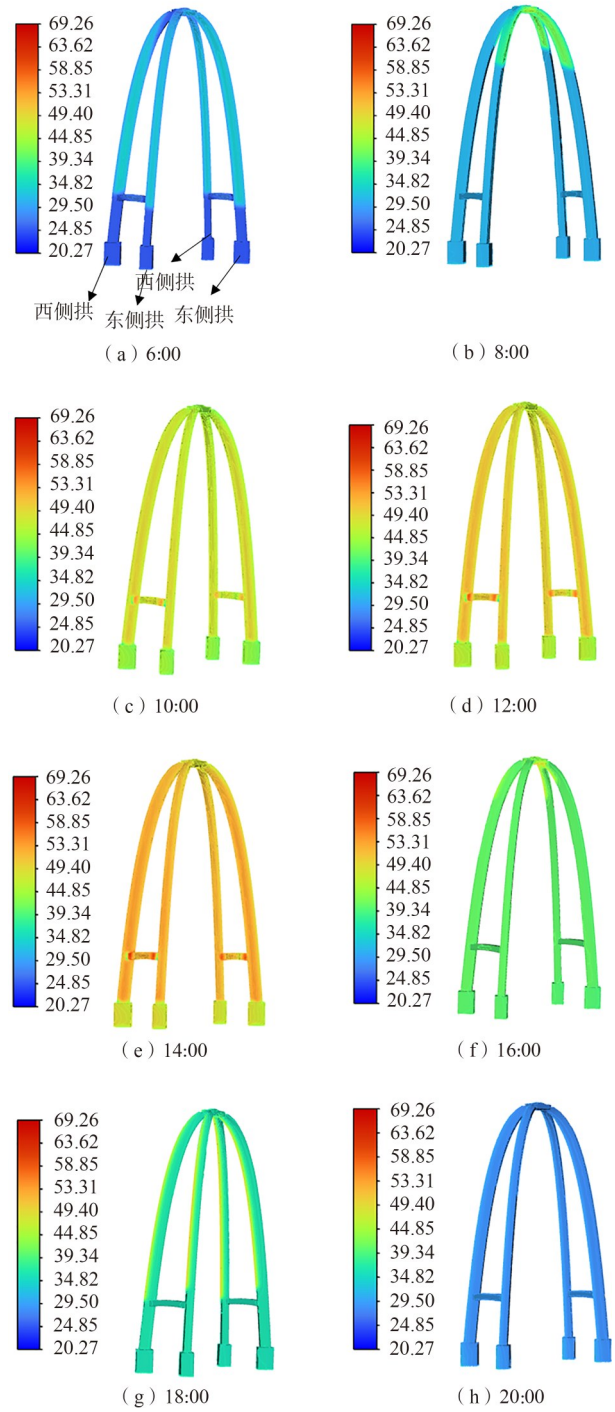


图 6 夏季太阳辐射下不同时刻钢拱结构温度场 ℃

Fig. 6 The temperature field of the steel arch structure under solar radiation at different times in summer

长波及太阳反射辐射,导致钢拱表面温度与环境温度产生差异,20:00为太阳落山不久后,白天太阳照射产生的升温需要在一定时间内下降,因此仍具有一定温差;随着太阳高度角的变化,钢拱表面最高温度与环境温度的差值在6:00—10:00时迅速升高,在12:00—14:00时趋于平缓,在16:00—18:00时迅速

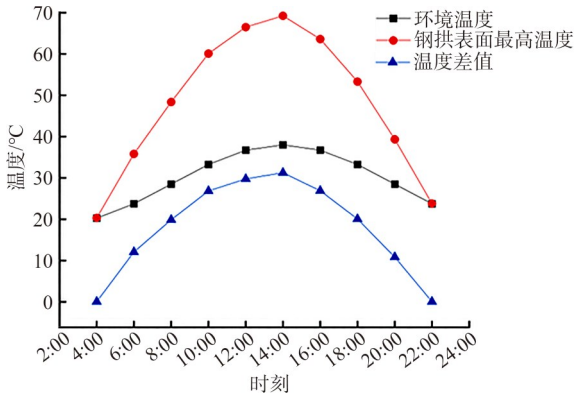


图 7　夏季不同时刻钢拱表面最高温度与环境温度对比

Fig. 7　Comparison of the maximum temperature of the steel arch surface and ambient temperature at different times in summer

下降，最大温差 31.26 ℃发生在 14:00 时，位置在钢拱横梁处，这是因为钢结构的导热及热量的累积与太阳辐射相比具有一定的滞后性，由此可以认为夏季太阳辐射对钢拱结构的最不利影响发生在 14:00。

表 3　夏季各时刻环境温度与钢拱最高温度

Table 3　Ambient temperature and the maximum temperature of the steel arch surface at different times in summer　℃

温度	6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00
环境温度	23.75	28.5	33.25	36.73	38.00	36.73	33.25
钢拱最高温度	35.82	48.38	60.10	66.50	69.26	63.62	53.31
温度差值	12.07	19.88	26.85	29.77	31.26	26.89	20.06

从图 6 还可以看出：钢拱表面高温与低温所在的区域在高度上有明显的区分，由于 6:00 和 18:00、8:00 和 16:00、10:00 和 14:00 的温度场分布对称，因此以 6:00、8:00、10:00 为例，列出不同时刻钢拱在不同高度区间的温度，如表 4 所示。

表 4　6:00—10:00 钢拱不同高度区间的温度

Table 4　The temperature of different height ranges of steel arches from 6:00–10:00　℃

高度区间/m	6:00 东侧拱平均温度	6:00 西侧拱平均温度	8:00 东侧拱平均温度	8:00 西侧拱平均温度	10:00 东侧拱平均温度	10:00 西侧拱平均温度
0~10	26.23	25.98	32.01	32.07	43.21	42.83
10~20	32.72	29.25	32.13		48.12	45.86
20~30	33.81	33.53	32.20		48.5	46.23
30~40	34.69	34.19	32.34		48.88	49.26
40~50	33.96	34.31	32.47	32.27	49.25	49.63
50~60	33.83	34.07	35.21		49.63	49.15
60~70	33.52	33.92	38.44	32.47	48.88	45.86
70~80	33.22	33.58	42.21	41.22	48.12	46.48
80~90	32.05	32.56	43.81	43.11	47.36	44.72
90~95	30.39	30.14	46.19	45.20	46.99	43.21

由表 4 可以看出：6:00 高度分界线位于高度约 15 m 处（东侧拱）、20 m 处（西侧拱），18:00 时相反；8:00 高度分界线位于高度约 70 m（东侧拱）、80 m（西侧拱）处，16:00 时相反，这是由于钢拱的高度较大，太阳在斜射时无法完全覆盖建筑表面；而 10:00—14:00 时太阳接近垂直照射，钢拱表面温度仅在拱底附近存在明显变化，在其余高度上无明显区分。

2.2　冬季钢拱结构不同时刻温度场

冬季太阳辐射下不同时刻钢拱结构温度场分布如图 8 所示，拱的东西方向标志如图 8(a)所示，后续图片均采用同一方向示意。冬季不同时刻环境温度与钢拱表面最高温度对比如图 9 和表 5 所示。

从图 8 可以看出：冬季太阳辐射下，钢拱结构在东西两侧同样产生非均匀温度场，但钢拱表面最高温度产生的位置却在同一时刻有所不同，这是因为太阳照射角度会随着季节的改变而发生变化。

从图 9 和表 5 可以看出：冬季钢拱表面最高温度随时间的变化趋势与夏季相同；由于冬季日照时间变短，6:00 和 18:00 时钢拱表面温度与环境温度几乎相同，10:00—16:00 时钢拱表面温度与环境温度产生差异，但差值与夏季相比有所减小，这是因为冬季太阳直射南半球，太阳照射角度与夏季相比有所减小，太阳辐射强度也有所减小；最大温差 10.47 ℃同样出现在 14:00 时，与夏季相比，冬季受太阳辐射影响产生的最大温差减小了 66.5%。

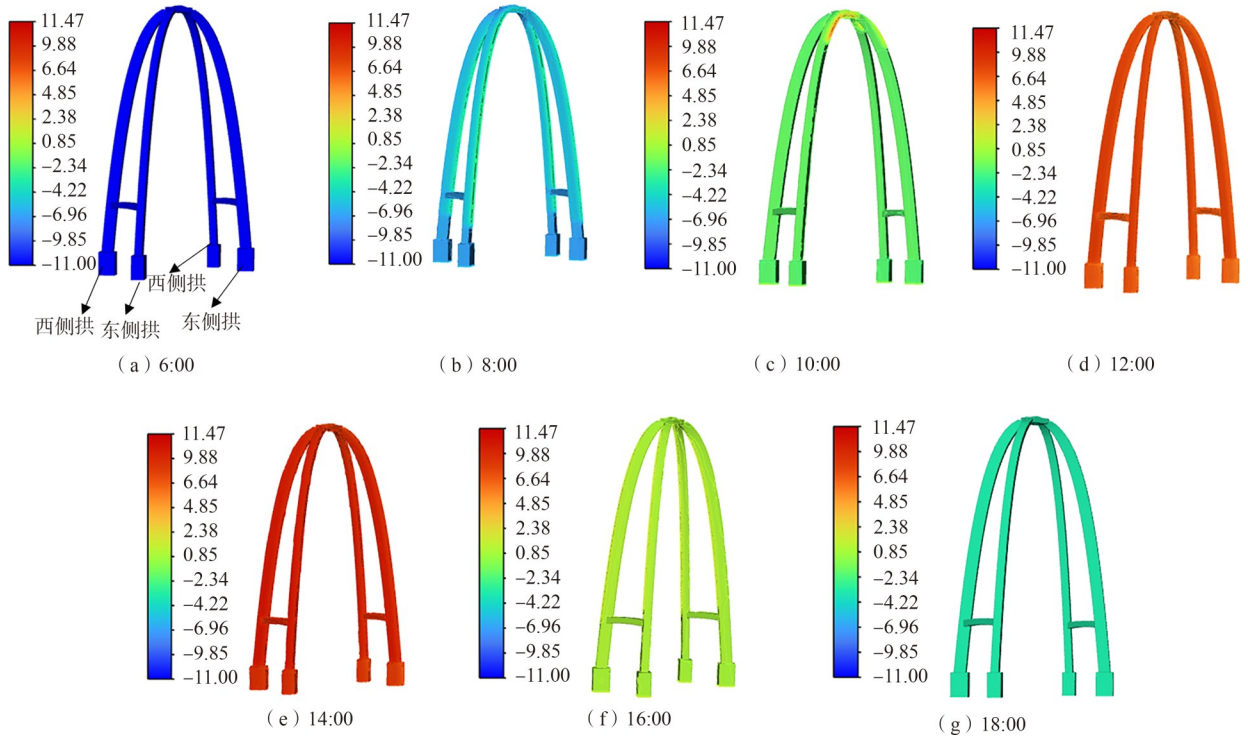


图 8 冬季太阳辐射下不同时刻钢拱结构温度场 ℃

Fig. 8 The temperature field of the steel arch structure under solar radiation at different times in winter

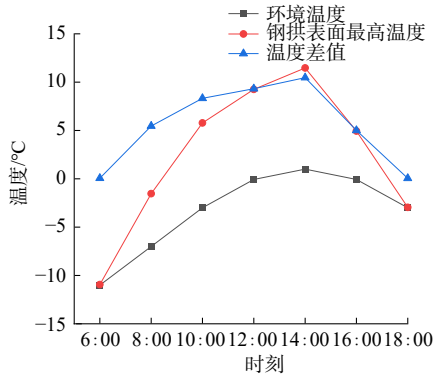


图 9 冬季不同时刻钢拱表面最高温度与环境温度对比

Fig. 9 Comparison of the maximum temperature of the steel arch surface and ambient temperature at different times in winter

3 钢拱非均匀温度场参数化分析

3.1 太阳辐射强度的影响

从前文可以看出,季节变化引起的太阳辐射强度的变化会导致非均匀温度场不同,除了季节以外,天气状况也是影响太阳辐射强度的因素之一,多云、阴天等天气状况会导致结构受到的太阳辐射强度不同,从而导致温度场不同。分别选取夏季四种太阳辐射强度来模拟不同的天气状况,以探究太阳辐射强度对非均匀温度场的影响规律。

夏季不同太阳辐射强度下不同时刻钢拱表面最高温度如图 10 和表 6 所示。可知:太阳辐射强度越小,钢拱表面整体温度越低;以晴朗天气太阳辐射强度 1423 W/m²为基准,当太阳辐射强度分别减小到 1050,700,350 W/m²时,不同时刻钢拱表面最高温度分别减小约 8.6%、16.0%、21.4%;钢拱表面温度随太阳辐射强度的增加呈非线性增长。以 14:00 为例,辐射强度从 350 W/m²增至 700 W/m²(增幅 350 W/m²)时,表面最高温度升高了 4.99 ℃;而当辐射强度从 1050 W/m² 增至 1423 W/m²(增幅 373 W/m²)时,温度升高幅度为 6.82 ℃。即在更高的辐射强度基数下,单位数量的辐射增量引起了更

表 5 冬季各时刻环境温度与钢拱最高温度

Table 5 The maximum temperature of the steel arch surface and ambient temperature at different times in winter ℃

温度	6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00
环境温度	−11.00	−7.00	−3.00	−0.10	1.00	−0.10	−3.00
钢拱最高温度	−10.94	−1.54	5.33	9.25	11.47	4.94	−2.95
温度差值	0.06	5.46	8.33	9.32	10.47	5.01	0.05

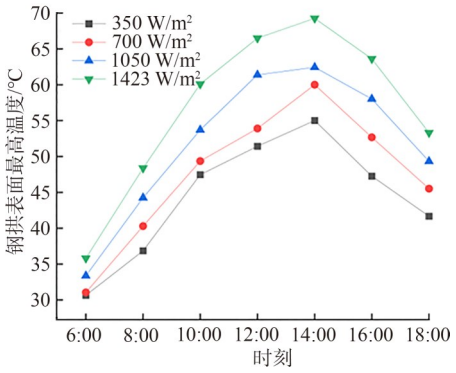


图 10　夏季不同太阳辐射强度下钢拱表面最高温度

Fig. 10　The maximum temperature of the steel arch surface under different solar radiation intensities in summer

表 6　夏季不同太阳辐射强度下不同时刻钢拱表面最高温度

Table 6　The maximum temperature of the steel arch surface at different times under different solar radiation in summer

辐射强度/(W·m⁻²)	不同时刻下的最高温度/℃					
	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00
350	36.86	47.46	51.43	55.02	47.26	41.67
700	40.30	49.36	53.91	60.01	52.68	45.52
1050	44.24	53.71	61.38	62.44	58.02	49.32
1423	48.38	60.10	66.50	69.26	63.62	53.31

大幅的单位温升，表明结构的热响应在强辐射环境下更为敏感。

3.2　风速的影响

钢结构表面的温度一部分来源于与空气的对流换热，因此风速会影响温度场的分布。根据山东临沂近五年的气象资料，分别选取夏季和冬季的日最低风速、月平均风速、日最高风速、五十年一遇风速四种工况，探究风速对非均匀温度场的影响规律。

夏季不同风速下不同时刻钢拱表面最高温度如图 11 和表 7 所示。可知：风速越大，钢拱表面整体温度越低；以夏季月平均风速 3.1 m/s 为基准，当风速减小到 1.5 m/s 时，对流散热不足，钢拱表面最高温度增大约 4.6%，当风速增大到 7.9 m/s 时，钢拱表面最高温度减小约 7.1%，当风速增大到 25.3 m/s 时，钢拱表面最高温度减小约 12.9%，这是因为风的流动可以带走钢构件表面的热量，流速越快，构件散热速度越快，构件表面温度越低；当风速从 1.5 m/s 增大到 7.9 m/s 时，钢拱表面最高温度减小约 6.09 ℃，单位风速的温度减小值为 0.95 ℃/(m·s⁻¹)，当风速从 7.9 m/s 增大到 25.3 m/s 时，钢拱表面最高温度仅减小约 3.34 ℃，

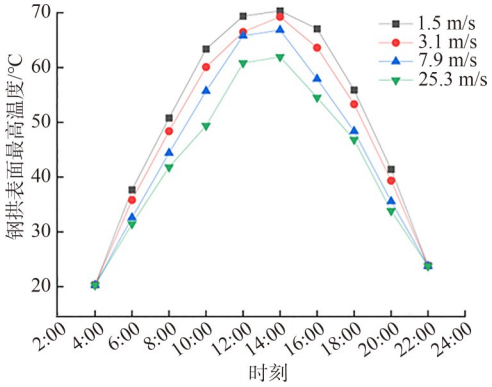


图 11　夏季不同风速下钢拱表面最高温度

Fig. 11　The maximum temperature of the steel arch surface under different wind speeds in summer

表 7　夏季不同风速下不同时刻钢拱表面最高温度

Table 7　The maximum temperature of the steel arch surface at different times under different wind speeds in summer

工况	风速/(m·s⁻¹)	不同时刻下表面最高温度/℃					
		8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00
最低风速	1.5	50.8	63.38	69.38	70.35	67.07	55.9
最高风速	7.9	44.4	55.72	65.8	66.85	57.92	48.39
平均风速	3.1	48.75	60.1	66.5	69.26	63.62	53.31
五十年一遇	25.3	41.81	49.37	60.82	61.95	54.52	46.82

单位风速的温度减小值为 0.19 ℃/(m·s⁻¹)。这说明当风速达到一定程度时，风速越大，构件表面温度下降速率越低，温度场降低的幅度越小。

冬季不同风速下不同时刻钢拱表面最高温度如图 12 和表 8 所示。可知：与夏季相比，冬季风速越大，钢拱表面整体温度同样越低，但影响程度有所不同；以冬季月平均风速 2.75 m/s 为基准，当风速减小到 1.3 m/s 时，钢拱表面最高温度增大约 25.2%，当风速增大到 10.7 m/s 时，钢拱表面最高温度减小约 46.4%，当风速增大到 25.3 m/s 时，钢拱表

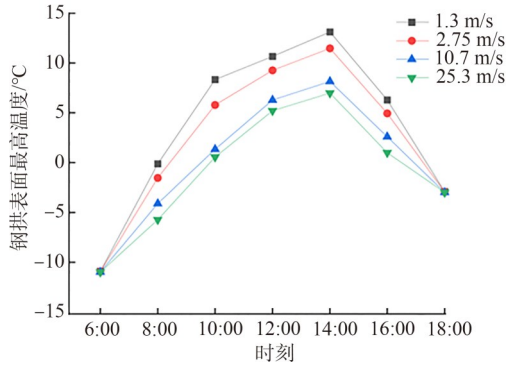


图 12　冬季不同风速下钢拱表面最高温度

Fig. 12　The maximum temperature of the steel arch surface under different wind speeds in winter

表 8　冬季不同风速下不同时刻钢拱表面最高温度

Table 8　The maximum temperature of the steel arch surface at different times under different wind speeds in winter

工况	风速/(m·s^{-1})	不同时刻下表面最高温度/℃					
		8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00
日最低风速	1.3	−0.12	8.33	10.66	13.11	6.29	−2.94
日最高风速	10.7	−4.11	1.34	6.28	8.15	2.59	−3.11
月平均风速	2.75	−1.54	5.78	9.26	11.47	4.94	−3.07
五十年一遇	25.3	−5.73	0.55	5.21	6.98	1.00	−3.15

面最高温度减小约 63.3%,这是因为冬季气温的基数较小,风速对表面温度的影响幅度更大;当风速从 1.3 m/s 增大到 10.7 m/s 时,钢拱表面最高温度减小约 4.80 ℃,单位风速的温度减小值为 0.51 ℃/(m·s^{-1}),当风速从 10.7 m/s 增大到 25.3 m/s 时,钢拱表面最高温度仅减小约 1.25 ℃,单位风速的温度减小值为 0.08 ℃/(m·s^{-1}),说明与夏季相同,风速越大,对表面温度的影响幅度越小。

综上,无论是夏季还是冬季,在计算钢拱结构的非均匀温度场时都要考虑风速的影响。

3.3　建筑物遮挡的影响

钢拱结构两侧还存在其他建筑物,为了探究两侧建筑及附属结构遮挡对钢拱结构非均匀温度场的影响,建立如图 13 所示整体模型,边界条件及参数参照前文进行设置。

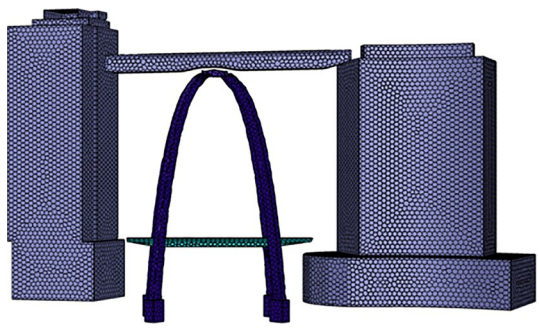


图 13　整体结构模型

Fig. 13　Integral structural model

夏季整体结构中不同时刻钢拱结构温度场如图 14 所示,有无两侧建筑及附属结构的钢拱表面最高温度与环境温度对比如图 15 和表 9 所示。

可以看出,两侧建筑及附属结构基本不会改变钢拱结构温度场的分布模式,但会使钢拱表面的温度整体下降,这是因为两侧建筑及附属结构在太阳辐射下对钢拱结构产生的阴影遮挡具有冷却效果,与太阳直射相比,受太阳辐射的影响有所减弱,且有

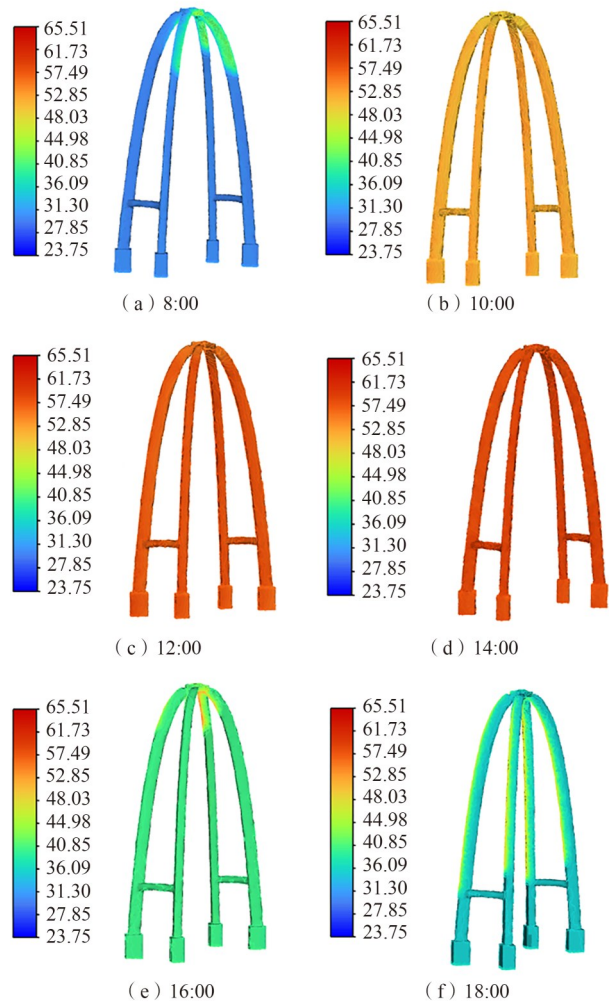


图 14　夏季整体结构中不同时刻钢拱结构温度场　℃

Fig. 14　The temperature field of the steel arch structure under solar radiation at different times in summer

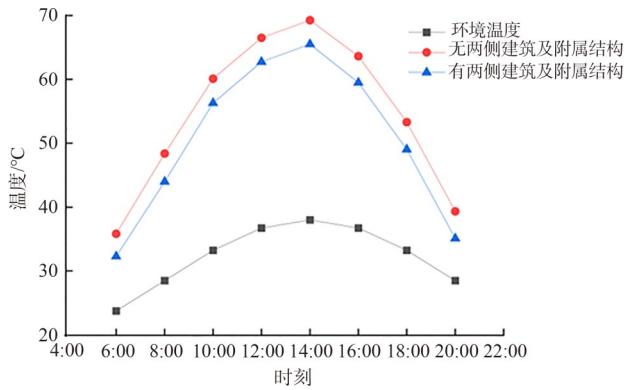


图 15　有无两侧建筑及附属结构的钢拱表面最高温度与环境温度对比

Fig. 15　Comparison of the maximum temperature of the steel arch surface and ambient temperature at different times in summer

阴影遮挡的钢拱表面温度与环境温度差值相比无阴影遮挡时最小减小约 11.99%,最大减小约 22.13%。

表 9　夏季钢拱表面最高温度与环境温度差值

Table 9　The difference between the maximum temperature of the steel arch surface and the ambient temperature in summer

工况	不同时刻下的温度差值/℃					
	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00
无两侧建筑	19.88	26.85	29.77	31.26	26.89	20.06
有两侧建筑	15.48	23.04	26.01	27.51	22.76	15.78
温差减小幅度/%	22.13	14.18	12.63	11.99	15.35	21.33

4　结　论

1)太阳辐射下钢拱结构产生具有非均匀性和时变性的温度场,一日内钢拱表面最高温度随时间的变化近似为正弦曲线,不同季节最大温差均发生在 14:00,夏季最大温差为 31.26 ℃,冬季最大温差为 10.47 ℃。

2)太阳辐射强度较低的阴天与太阳辐射强度较大的晴朗无云天气相比,钢拱表面最大温度下降了 21.4%。风速可以通过增强对流换热降低钢拱表面温度,当风速从月平均风速增大到五十年一遇风速时,钢拱表面最高温度夏季降低约 12.9%,冬季降低约 63.3%,但随着风速增大,单位风速的最大温度减小量逐渐减小,且夏季单位风速减小量大于冬季。

3)两侧建筑及附属结构基本不会改变钢拱结构温度场的分布模式,但会由于阴影遮挡的冷却效果使钢拱表面的温度整体下降,且有阴影遮挡的钢拱表面温度与环境温差相比无阴影遮挡时最小减小约 11.99%,最大减少约 22.13%。

参　考　文　献

[1] 芦燕,王明威,宋浩然. 热弯残余应力对 H 型钢拱结构平面内稳定承载力的影响[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2022,55(5):441-450.

[2] 严仁章,万里源,周建庭,等. 索拱桁架-单层网壳复合空间结构的结构设计与稳定性分析[J]. 工业建筑,2020, 50(4):103-110.

[3] 何海玉,袁波,马信欣,等. 倒三角形截面板管连接式钢圆弧拱在平面内的稳定承载力研究[J]. 应用力学学报,2021,38(1):216-224.

[4] 王树,黄季阳,刘鑫刚,等. 大跨度煤场封闭结构预应力体系研究[J]. 建筑结构学报,2022,43(5):51-61.

[5] 刘哲,丁阳,宗亮. 环境温度对圆拱形钢结构模态频率的影响研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2019,52(2):183-190.

[6] 王锦涛, 刘宇飞, 樊健生,等. 大跨斜腿钢管桁架结构日照非均匀温度场研究[J]. 工程力学, 2024, 41(1): 208-218.

[7] 于洋,高磊,高华睿,等. 中承式系杆拱桥箱形钢拱肋温度场[J]. 建筑结构,2022,52(增刊 1):1271-1277.

[8] QIU H S, WU K K, AYASRAH M, et al. Study on sunlight temperature field of steel box arch ribs in irregular arch bridges [J]. Symmetry, 2024, 16(4): 413-438.

[9] HUANG S J, CAI C Z, ZOU Y F, et al. Non-uniform temperature fields in steel tubes with different inclinations under solar radiation [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 217: 108-125.

[10] ZHU Q X, WANG H, XU Z D, et al. Mapping temperature contours for a long-span steel truss arch bridge based on field monitoring data [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2021, 11(3): 725-743.

[11] YAN X, LIU Y, LIU J, et al. Experimental and numerical investigation on vertical temperature gradient of concrete-filled steel tubular arch under sunlight [J]. Structures, 2024, 70: 107550.

[12] LIU J, LIU Y, ZHANG G, et al. Prediction formula for temperature gradient of concrete-filled steel tubular member with an arbitrary inclination [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(10):1-4.

[13] ZHOU Q, ZHOU J, FENG P, et al. Full-scale experimental study on temperature field of large-diameter CFST arch bridges under strong radiation and large daily ambient temperature difference [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2022, 12(5): 1247-1263.

[14] ZHOU Q, FENG P, ZHOU J T, et al. Temperature field of concrete-filled steel tubular arch bridges and its application [J]. Advances in Civil Engineering, 2022, 2022(1): 1-19.

[15] MCQUISTON F C, PARKER J D, SPITLER J D. Heating, ventilating and air conditioning: analysis and design[M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005.

[16] DUFFIE J A, BECKMAN W A. Solar energy of thermal process [M]. New York: John Wiley & Sons, 1991.

[17] DILGER W H, GHALI A, CHAN M. Temperature stresses in composite box girder bridges [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1983, 109(6): 1460-1478.

[18] LIU H B, HAN Q H, CHEN Z H, et al. Precision control method for pre-stressing construction of suspen-dome structures [J]. Advanced Steel Construction, 2014, 10(4): 404-425.

[19] 王海花. 乌鲁木齐站大跨度网架结构的温度场及其温度效应分析[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2020.