

高原日照辐射对大跨异形钢结构温度场的影响研究

古松¹, 蒋广¹, 林晓宇², 吕勇康³, 顾颖^{1*}

(1. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010; 2. 中建八局装饰工程有限公司, 上海 200135; 3. 宜宾市天宜锂业科创有限公司, 四川 宜宾 644000)

摘要: 为研究高原地区大型空间结构的日照温度场分布规律, 基于实测高原地区气象参数与传热学理论, 阐明了高原日照温度场仿真的边界条件计算方法, 并以某大跨异形钢结构为工程背景, 采用光线追踪算法, 编写了考虑杆件间遮蔽效应的瞬态温度场计算程序, 结合结构温度监测数据, 分析了结构日照温度场的时变规律与空间分布特征。结果表明: 基于光线追踪的阴影识别方法能够准确反映结构实际阴影分布, 结构日照温度场模拟值与监测值基本吻合; 遮蔽效应对结构温度分布的时变性与不均匀性影响显著, 被遮蔽区域最大降温幅度为33.5%; 在14时, 杆件表面被遮蔽区域相较于阳光直射区域温度降低了53.7%; 从整体上看, 杆件间的遮蔽效应对结构温度分布影响显著, 在日照温度场仿真中不可忽略。本文研究成果可为高原地区大型空间结构日照温度场及温度效应研究提供依据和参考。

关键词: 大型空间结构; 高原地区; 非均匀温度场; 边界条件; 日照阴影; 光线追踪算法; 杆件间遮蔽效应

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)12-0041-10

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240715001

Study on the Influence of Solar Radiation on the Temperature Field of Large-Span Special-Shaped Steel Structures in High-Altitude Areas

GU Song¹, JIANG Guang¹, LIN Xiaoyu², LYU Yongkang³, GU Ying^{1*}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. China Construction Eighth Engineering Bureau Decoration Engineering Co., Ltd., Shanghai 200135, China; 3. Yibin Tyeeli Lithium Technology Innovation Co., Ltd., Yibin 644000, China)

*Corresponding author: 2538732182@qq.com

Abstract: In order to study the distribution patterns of solar temperature field for large-scale spatial structures in plateau areas, based on measured meteorological parameters of plateau areas and heat transfer theories, the boundary condition calculation method for simulating the solar temperature field in plateaus was elucidated. Taking a large-span special-shaped steel structure as an engineering background, a transient temperature field calculation program considering inter-element occlusion effects was developed using ray tracing algorithms. By combining with structural temperature monitoring data, the temporal variation patterns and spatial distribution characteristics of the solar temperature field in the structure were analyzed. The results show that the shadow recognition method based on ray tracing can accurately

收稿日期: 2024-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(52108385, 51708467)

作者简介:

古松(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事结构抗震与加固、大跨结构检测与施工监控方面的研究。E-mail: 203978604@qq.com。

蒋广(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事钢结构设计理论与施工技术方面的研究。

通信作者:

顾颖(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事钢结构设计理论与施工技术方面的研究。E-mail: 2538732182@qq.com。

reflect the actual shadow distribution of the structure, and the simulated values of the structure's solar temperature field are basically consistent with the monitored values. The shadow effect has a significant impact on the time-varying and non-uniformity of the structure's temperature distribution, with a maximum cooling rate of 33.5% in the shadowed area. At 14 o'clock, the temperature in the shadowed area on the surface of the rod member decreased by 53.7% compared to the direct sunlight area. For the whole structure, the occlusion effects between elements reduce the temperature difference between the sun-facing and back-facing sides of the structure. This effect significantly influences the distribution of structural temperatures and cannot be ignored in simulating solar temperature fields. The findings of this study provide a basis and reference for researching the solar temperature field and temperature effects of large-scale spatial structures in high-altitude regions.

Keywords: large-scale spatial structure; plateau area; non-uniform temperature field; boundary condition; sunlight shadow; ray tracing algorithm; inter-element occlusion effect

大型空间结构在施工阶段通常在露天环境中,在太阳辐射作用下,结构温度呈非均匀分布^[1-2],由于大型空间结构通过众多杆件连接而成,属于高次超静定结构,非均匀温度分布会导致结构产生较大的温度变形与温度应力,甚至引起结构焊缝开裂、坍塌等工程事故^[3]。由于钢结构具有较好的导热性能,不均匀温度分布产生的温度效应对大跨异形钢结构施工与使用阶段的安全性均具有很大的影响。我国西部高原高寒地区较于低海拔地区有着明显的区别,年平均气温低、空气稀薄,全年太阳辐射强且日照时间长。针对高原地区的大型空间结构,强太阳辐射引起的结构温度效应比中低海拔地区更显著。

由于大型空间结构规模大、杆件多,通过实测的方式只能得到结构部分杆件的温度变化规律,无法反映出整体结构在任意时刻的温度分布情况,随着仿真分析软件的发展与计算机性能的提高,三维温度场数值模拟逐渐成为研究结构温度场的主要方式。ZHAO等^[4]对某大型网壳结构开展了长期温度监测,模拟分析了结构的日照温度场,并进一步研究了结构的温度效应。王化杰等^[5]设计制作了标准三角形平板网架模型,并对其开展了温度监测试验与数值模拟研究,分析了结构日照温度分布情况。周勳等^[6]以北京大兴国际机场钢网架结构为对象,采用杆单元建立了结构热分析有限元模型,并通过结构日照阴影系数考虑杆件间的遮蔽关系,模拟分析了结构的日照温度场,研究结果表明杆件遮蔽对温度场计算结果影响显著,不可忽略。王锦涛等^[7]以资阳市某大跨斜腿钢管桁架结构为研究对象,采用温度监测与数值模拟相结合的方式,对结构日照温度场与施工阶段受力情况开展了研究,结果表明结构施工阶段的受力主要来源于温度效应。

从现有研究中可以看出,温度效应对钢结构施工和使用安全的影响不容忽视,甚至可能成为影响钢结构安全的主要因素。日照温度场是分析结构温度效应的基础,但目前相关研究多集中于中低海拔地区,高原地区大型空间结构的日照温度场研究相对匮乏,尤其对于高原地区温度场仿真的边界条件计算缺少可供参考的数据基

础。随着我国西部地区大型空间结构数量的增加与规模的增大,明确结构日照温度场仿真中相关参数的计算方法,确保温度场分析结果的准确性,对我国西部地区大型基础设施建设具有重大意义,因此亟需开展相关研究工作。

本文依托拉萨某大型医院建设项目,对一座大跨异形钢结构关键杆件的温度进行实时监测,并通过实测高原地区的气象参数修正温度场仿真的边界条件。编写考虑遮蔽效应的大跨异形钢结构瞬态温度场计算程序,实现高原地区大跨异形钢结构日照温度场的精确仿真,得到结构日照温度场的时变规律与空间分布特征。

1 研究对象及温度测点布置

1.1 大跨异形钢结构

拉萨某大型医院建设项目的附属结构屋盖为异形曲面钢网架结构,采用箱形截面杆件,屋盖主桁架跨度57.90 m,最大宽度16.60 m,支撑体系由花瓶形钢柱、钢管混凝土柱组成,两者高度分别为18.95 m、19.40 m,花瓶形钢柱采用圆截面钢管焊接而成,如图1所示。结构呈西北-东南走向,与东西向夹角约为15°。整体结构造型复杂,杆件数量大,杆件间的相互遮蔽效应显著。杆件材质均采用Q355B钢,所有杆件均喷涂面漆,主要热工参数如表1所示。

表1 材料热工参数

Table 1 Thermal parameters of materials

参数	钢材各参数的值
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 850
比热容/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)	465
导热系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)	49.8
太阳辐射吸收率	0.7
长波辐射发射率	0.8

1.2 温度测点布置

开展温度监测时整体结构已完成合龙,但还未进行

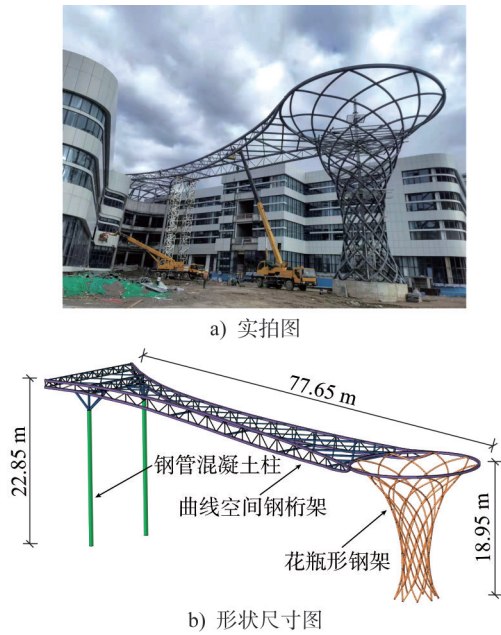


图1 大跨异形钢结构

Fig. 1 Large-span special-shaped steel structure

屋面板安装施工,结构四周无其他高大建筑物,不受地形环境遮蔽影响。

温度监测采用采集范围为 $-200\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)的K型贴片式热电偶传感器进行自动监测,每30 min采集一次杆件温度数据。根据温度场仿真模拟结果确定了3个温度测区,测区A位于花瓶形钢柱与屋盖主桁架的交界处,测区B位于屋盖主桁架的跨中位置,测区C位于屋盖主桁架与钢管混凝土柱的交界处。每个测区均布置4个温度测点,来监测测区内关键杆件的温度,测点放置于杆件上表面,如图2所示。

2 温度场边界条件修正

求解结构在任意时刻的瞬态温度场,首先需要分析定解的边界条件。根据传热学基本原理可知,导热问题常见的边界条件可分为3类,分别为:已知边界上温度值的第一类边界条件;已知边界上热流密度值的第二类边界条件;已知物体与周围流体间的表面传热系数及周围流体温度的第三类边界条件^[8]。

暴露在自然环境中,大跨异形钢结构表面不仅受到太阳辐射作用,还受到周围环境的长波辐射作用,并且还不断与周围大气发生对流换热。因此,大跨异形钢结构温度场定解的边界条件为第二类与第三类边界条件的综合,可以表示为:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\Gamma} = h[T - T_a(t)] + q(t) \quad (1)$$

式中: Γ 为物体边界; λ 为物体导热系数; n 为物体边界的外法线方向; h 为物体的表面传热系数; t 为时间; T_a 为物

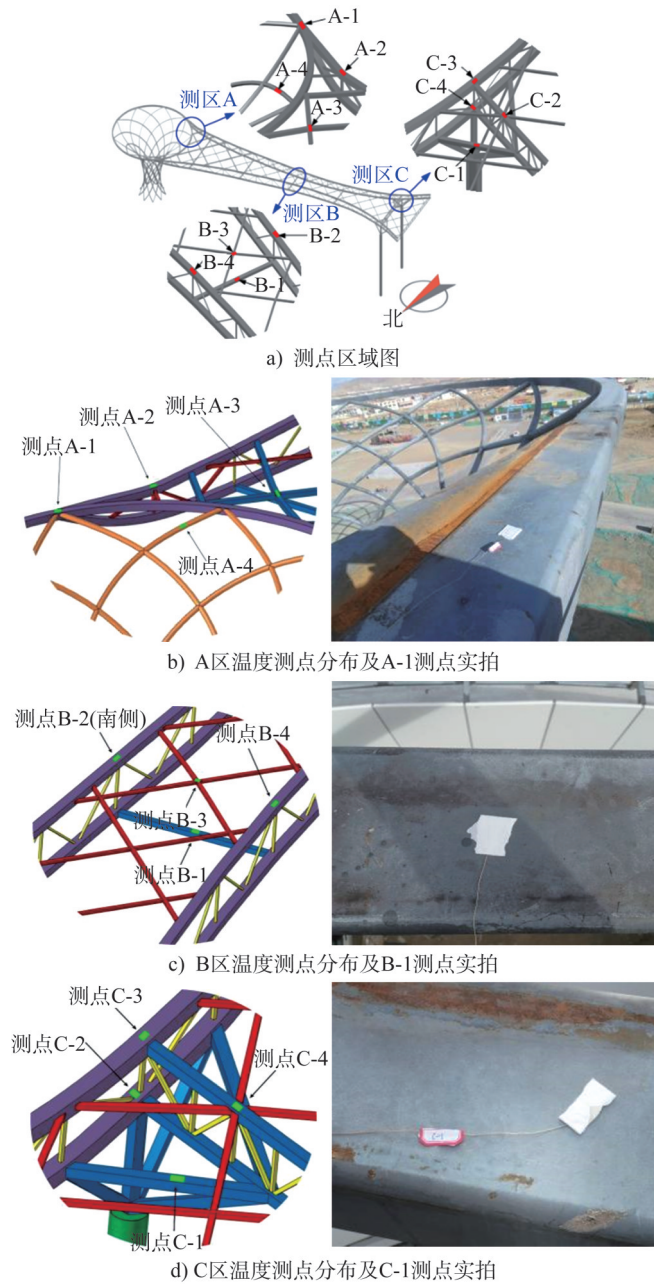


图2 测区及测点布置

Fig. 2 Survey area and arrangement of measuring points

体周围流体的温度; q 为物体边界上的热流密度,包含太阳辐射的热流密度与长波辐射的热流密度。

由于高原地区的气候独特,温度场边界条件的取值与中低海拔地区有较大差异,为得到大跨异形钢结构的精确温度分布与变化规律,需要适当修正温度场边界条件的计算公式和取值。据统计,2022年3月13~14日上午9:00太阳辐射强度超过 $1\ 000.0\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,11:30超过了 $1\ 400.0\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,18:00太阳辐射强度仍有 $1\ 468.3\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,且整个太阳辐射强度增长阶段具有明显的指数变化特征,变化规律与低海拔地区太阳辐射强度的变化规律有明显差别^[9]。通过对拉萨地区2022

年2~3月的大气温度监测数据进行处理分析,选取了2022年3月13日的监测数据作为温度场边界条件修正的数据基础。

2.1 太阳辐射

2.1.1 太阳位置的计算

太阳位置参数是计算太阳辐射强度的基础,也是确定结构日照阴影分布的关键因素。太阳位置与地球公转、自转以及观测点的经纬度有关,地球公转会引起太阳赤纬角实时变化,地球自转则会引起太阳时角实时变化,在太阳位置的计算中通常以这两者为变量,利用球面三角公式计算太阳位置的地平坐标,即太阳高度角与方位角,计算方法^[10]如下:

$$h_s = \sin^{-1}(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega) \quad (2)$$

$$\gamma_s = \sin^{-1}\left(\frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h_s}\right) \quad (3)$$

式中: h_s 为太阳高度角; γ_s 为太阳方位角; φ 为地理纬度; δ 为太阳赤纬角; ω 为太阳时角。

可以看出,太阳时角与太阳赤纬角的计算精度直接决定了太阳位置的准确性。其中,太阳时角由真太阳时 t_a 计算得出,计算方法如下:

$$\omega = (12 - t_a) \times 15^\circ \quad (4)$$

对于太阳赤纬角,大量学者通过长期观测提出了不同的近似计算方法,本文采用简易测量装置^[11]观测了拉萨地区一天中太阳高度角与方位角的变化情况,并基于SPENCER^[12]、COOPER^[13]和王炳忠等^[14]提出的太阳赤纬角近似算法计算了太阳高度角,观测值与计算值如图3所示。从图中可以看出,基于SPENCER^[12]提出的太阳赤纬角算法计算的太阳高度角与实际情况误差最小,平均误差为-10.1%,最大误差为-22.2%,出现在16时;而基于王炳忠等^[14]提出的太阳赤纬角算法计算的太阳高度角整体误差最大,平均误差达-23.2%,最大误差达-45.3%,与拉萨地区的观测值相差过大。

将基于SPENCER^[12]算法计算的太阳赤纬角与高度

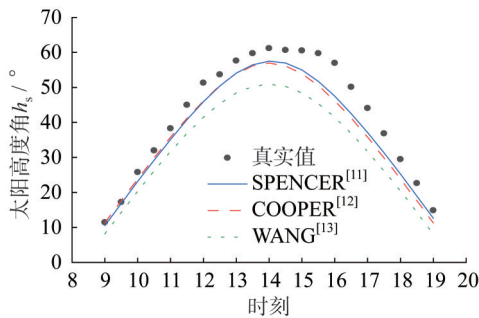


图3 太阳高度角实测值与计算值对比

Fig. 3 Comparison of the measured and calculated values of solar altitude

角带入式(3)计算太阳方位角,得到的计算值与观测值对比如图4所示,可以看出两者的相差较小,计算的平均误差为4.3%,因此本文采用SPENCER^[12]提出的太阳赤纬角算法计算高原地区的太阳高度角与方位角。

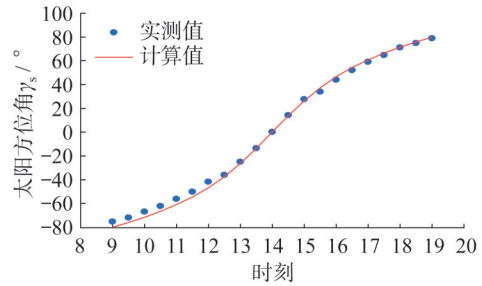


图4 太阳方位角实测值与计算值对比

Fig. 4 Comparison of the measured and calculated values of solar azimuth

2.1.2 太阳辐射模型

太阳辐射穿过大气层后,到达地面的辐射可分为两种:一是太阳直射辐射,二是穿过大气、水滴、灰尘等的散射辐射。本文采用SM206手持式太阳能功率计测量了拉萨地区的逐小时太阳辐射强度,该仪器测得的太阳辐射强度近似为法向太阳直射辐射与散射辐射的总和。

基于Bouguer-Lambert定律提出的幂指数晴空指数模型考虑了海拔高度以及大气透明度等太阳短波辐射的影响,理论上更加适合空气稀薄的高原地区,法向太阳直射辐射与散射辐射强度的计算方法如下:

$$\begin{cases} I_0 = I_c [1 + 0.033 \cos(360N/365)] \\ I_{ND} = I_0 P^m \\ I_{NS} = 0.271 I_0 - 0.294 I_{ND} \end{cases} \quad (5)$$

式中: I_{ND} 与 I_{NS} 分别为法向太阳直射辐射与法向太阳散射辐射; I_0 为初始太阳辐射,定义为某天垂直于太阳光线的大气层外切平面单位时间单位面积所接收的太阳辐射能; I_c 为太阳常数,取 $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; N 为日序数,取 $N=73$; P 为大气透明度系数,与海拔高度等因素有关,采用极值气象条件推出的理论计算式^[15]计算,取 $P=0.839$; m 为大气质量, $m = 1 / \sin h_s$ 。

将计算的太阳高度角代入幂指数模型计算太阳辐射强度,计算结果如图5所示,可以看出幂指数模型计算的太阳辐射强度小于拉萨实测的太阳辐射强度,全天实测值比幂指数模型计算值约高出21.9%(不考虑云层遮蔽影响)。根据诺桑等^[16]的研究发现,拉萨地区一年中有18.6%的太阳辐射强度超出了太阳常数 $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,其瞬时最大值更是达到了 $1756 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的超强值。结合本文实测的拉萨地区太阳辐射强度数据,依据初始太阳辐射强度 I_0 的定义,可以看出现有的初始太阳辐射强度

理论计算值偏小,因此采用提高初始太阳辐射强度 I_0 的方式对幂指数晴空模型进行修正。将 I_0 提高至 $1750\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 后,修正的幂指数模型计算值与实测值变化规律基本一致,全天平均误差约为 -1.0% (不考虑云层遮蔽影响)。

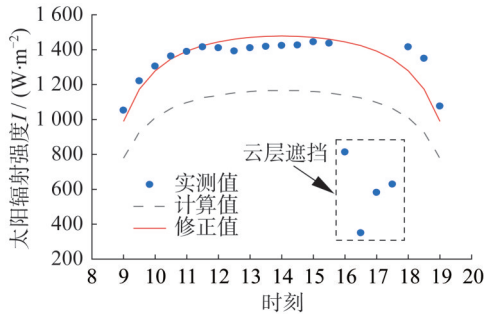


图5 太阳辐射强度实测值与计算值对比

Fig. 5 Comparison of the measured and calculated values of solar radiation intensity

2.1.3 太阳辐射热流密度

太阳辐射作用于结构表面的热流密度包含直射辐射、散射辐射以及环境反射辐射产生的热流密度。对于任意倾斜表面,直射辐射的实际强度需要根据光线入射角进行折减,散射辐射与环境反射辐射的实际强度需要根据表面角系数进行折减。因此,太阳辐射作用于结构任意倾斜表面的热流密度可以通过下式计算:

$$q_s = I_{ND} \cos \theta + 0.5(1 + \cos \alpha) I_{NS} \sin h_s + 0.5(1 - \cos \alpha) \rho_r (I_{ND} \sin h_s + I_{NS}) \quad (6)$$

式中: θ 为太阳光线入射角,即结构表面法向与太阳光线的夹角,取值范围为 $0\sim 180^\circ$,当 $\theta > 90^\circ$ 时表面处于背阳面,太阳直射辐射强度为0; α 为表面倾角,即结构表面法向与水平地面的夹角,取值范围为 $0\sim 180^\circ$; ρ_r 为环境反射率,取0.38。

2.2 对流换热

对流换热系数是影响构件热对流的主要参数,和风速、构件形状及表面粗糙度等众多因素有关。热对流的换热方式包含自由对流与强制对流,前者指构件表面空气自然流动引起的对流换热现象,后者指构件表面空气受到动力驱动时引起的对流换热现象。对拉萨地区2~3月的风速进行观测后发现,该地区白天的空气对流较强,表现在风速的波动性大且无连续无风情况,平均风速为 $4.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,因此大跨异形钢结构与空气间以强制对流换热为主,自然对流换热的作用很小,忽略其影响。

强制对流换热系数与流体的动力特性有关,需计算流体的雷诺数,计算方法如下:

$$Re = vD\rho/\mu \quad (7)$$

式中: v 为风速; D 为杆件直径; ρ 为拉萨地区的空气密度;

μ 为气体的绝对黏度, 20°C 时空气的绝对黏度为 $1.81 \times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

根据气体状态方程可计算拉萨地区的空气密度:

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{\tau H}{T_0}\right)^{4.26} \quad (8)$$

式中: ρ_0 为 20°C 标准大气压下的空气密度; τ 为空气温度梯度; H 为海拔高度,取 3640 m ; T_0 为绝对温度。

当流体雷诺数 $Re \leq 4 \times 10^5$ 时,流体属于层流,否则属于紊流。经过计算,大跨异形钢结构处于层流中,假设风向与结构各杆件轴线方向垂直,采用Nusselt经验公式计算对流换热系数^[17]:

$$h_c = C_g Re^n Pr^{1/3} k/D \quad (9)$$

式中: C_g 与 n 为经验系数,与雷诺数、杆件截面形式有关; Pr 为Prandtl常数,取0.71; k 为空气导热系数,取 $0.024\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

确定对流换热系数后,根据牛顿冷却定律可计算对流换热热流密度:

$$q_c = h_c (T_a - T) \quad (10)$$

式中: T_a 与 T 分别为大气温度与结构表面温度。

2.3 长波辐射换热

结构表面的长波辐射主要来自地面与大气,热流密度与表面倾角、表面温度及环境温度有关,计算时考虑结构表面角系数进行折减,采用Stefan-Boltzmann定律计算:

$$q_r = \varepsilon \sigma \left[0.5(1 - \cos \alpha) (T_g^4 - T^4) + 0.5(1 + \cos \alpha) (T_a^4 - T^4) \right] \quad (11)$$

式中: ε 为结构表面长波发射率; σ 为Stefan-Boltzmann常数,取 $5.67 \times 10^{-8}\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$; T 为结构表面的绝对温度; T_g 与 T_a 分别为地面与大气的绝对温度。

3 考虑遮蔽效应的温度场仿真分析

3.1 有限元模型建立

根据大跨异形钢结构的几何特征建立结构热分析有限元模型,建模方法如图6所示,整体模型如图7所示,结构整体采用Shell131热分析板壳单元模拟,并在板壳单元表面覆盖Surf152表面效应单元用于施加太阳辐射、长波辐射以及对流换热的热流密度。基于结构实际方位角与修正后的日照温度场边界条件,使用ANSYS APDL语言编写太阳辐射瞬态温度场计算程序,求解高原地区大跨异形钢结构的瞬态温度场。

3.2 结构日照阴影识别

由于大跨异形钢结构主桁架与花瓶柱的杆件密度较大,日照下杆件间的相互遮蔽效应显著,杆件被遮蔽的区

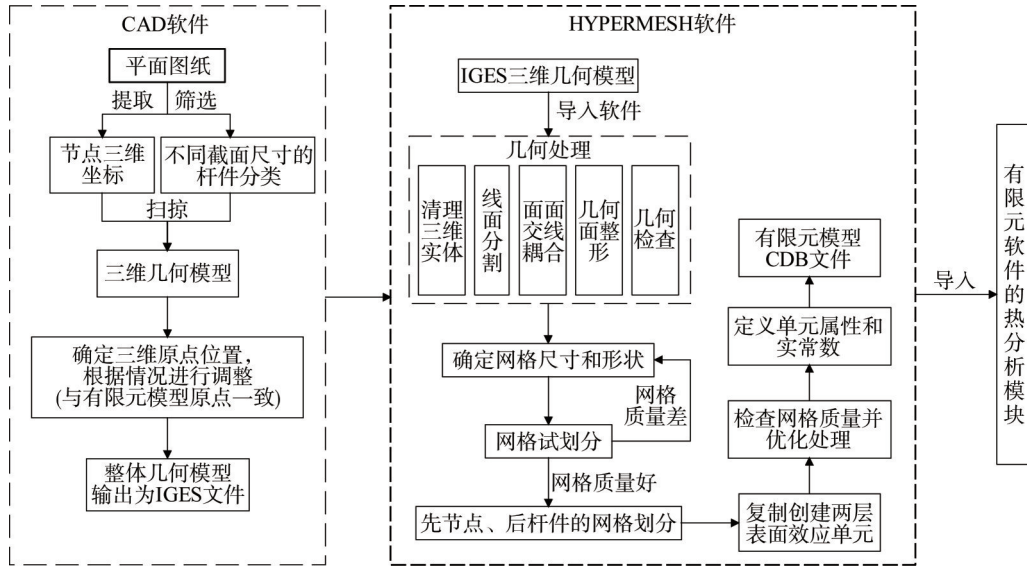


图6 复杂钢结构板壳单元有限元模型建模方法

Fig. 6 Finite element modeling method of complex steel structure plate shell element

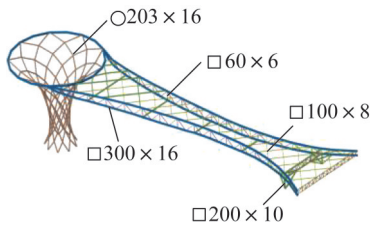


图7 大跨异形钢结构有限元模型

Fig. 7 Finite element model of large-span special-shaped steel structure

域属于阴影区域,不受太阳辐射作用,其表面的热流密度会显著降低。现有研究表明^[6,18],杆件间的相互遮蔽效应会明显改变结构的温度分布,不可忽略其影响。

3.2.1 基于光线追踪的阴影识别方法

为精确识别大跨异形钢结构的日照阴影区域,本文基于计算机图形学中的光线追踪算法,使用MATLAB编写了大跨异形钢结构日照阴影识别程序,通过ANSYS与MATLAB软件的联合仿真,实现了考虑遮蔽效应的大跨异形钢结构瞬态温度场求解,计算流程如图8所示。

光线追踪的核心是光线与场景相交的可见性查询,又被称作“光线遍历”,其基本原理如图9所示。有限元模型建立后,可以确定所有单元的质心坐标与单元法向量,进而可确定单元所在平面的方程。太阳光线可视为平行光,在同一时刻,所有单元接收到的太阳光线均来自同一方向,通过太阳高度角与方位角可对太阳位置进行追踪。图9中E为待识别日照单元,从单元质心Q向太阳发出一条射线 \vec{QS} ,联立该射线方程与任意单元 E_0 的平

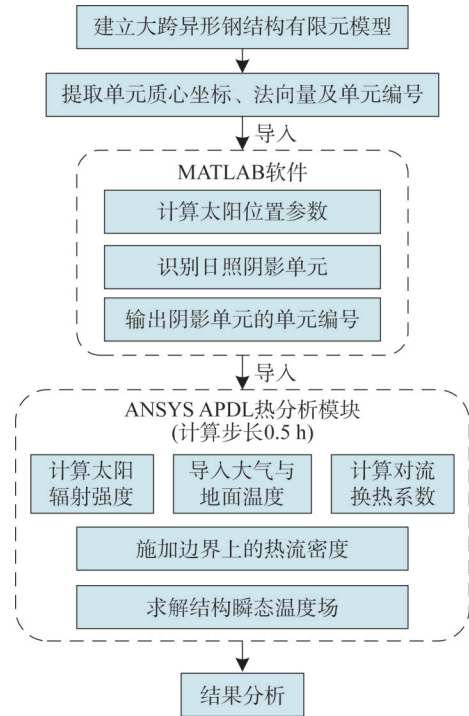


图8 结构瞬态温度场计算流程

Fig. 8 Calculation flow chart of structural transient temperature field

面方程可得下式:

$$\xi = \frac{\vec{N} \cdot (D - Q)}{\vec{N} \cdot \vec{L}} \quad (12)$$

式中: \vec{N} 为单元 E_0 的法向量; D 为单元 E_0 的质心坐标; \vec{L} 为射线 \vec{QS} 的方向向量。参数 ξ 可用于判断射线与平面的交点J与单元E的空间位置关系,若 $\xi < 0$,则交点J位于单元E的后方,即单元E不被单元 E_0 遮蔽;若 $\xi > 0$,则

交点 J 位于单元 E 的前方, 即单元 E 有可能被单元 E_0 遮蔽, 通过进一步计算 $|JD|$ 即可判断单元 E 的可见性。

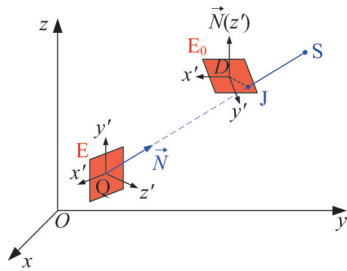


图 9 光线追踪原理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of ray tracing principle

3.2.2 光线追踪加速技术

光线追踪是一种计算密集型算法, 每个单元在判断遮蔽时需要计算其与其余所有单元的交点位置, 随着单元数量增多, 计算次数呈几何倍数增长。本文所建立的大跨异形钢结构有限元模型共 262 269 个单元, “光线遍历”的做法会使计算机处理器做大量无效计算, 造成算力浪费, 徒增计算时间。因此, 采用空间分割与并行计算技术对光线追踪算法进行加速。

有限元模型空间分割的基本原理如图 10 所示, 首先提取有限元模型 x 、 y 、 z 坐标的最大值与最小值, 确定有限元模型的空间大小, 通过 4 个平面将有限元模型空间分割为 12 个区块, 形成 12 个区块数组, 每个区块数组中存有相应区块内的节点坐标信息。先计算区块内部单元的遮蔽关系, 剔除被遮蔽的阴影单元后, 再计算其余单元与光线穿过区块内部单元的遮蔽关系。例如单元 E 在区块 Z_1 内部不被遮蔽, 照射在其表面的太阳光线经过区块 Z_2 、 Z_5 、 Z_{11} 、 Z_{12} , 因此只需再次判断单元 E 是否被上述 4 个区块中的单元遮蔽即可。进行空间分割后, 各区块间可相互独立地进行光线追踪计算, 通过调用 MATLAB 并行计算工具能够进一步提高计算效率。

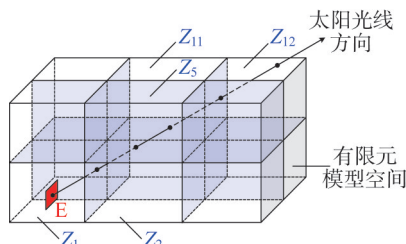


图 10 空间分割示意图

Fig. 10 Spatial segmentation diagram

经测试, 未采用加速技术时, 识别模型的日照阴影区域需要耗费 10 h 38 min, 采用加速技术后, 将时间缩短至 40 min 以内, 加速效果显著。以 11:00 结构的日照阴影

分布为例, 计算结果与实际情况如图 11 所示, 图 11a) 中蓝色为阴影区域, 红色为日照区域, 可以看出基于光线追踪的阴影识别精确性较高, 能够准确反映结构的实际阴影分布。

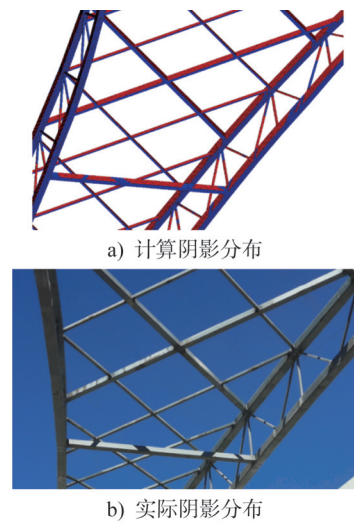


图 11 日照阴影分布对比

Fig. 11 Comparison of sunlight shadow distribution

4 结构日照温度场分布特征

4.1 温度时间分布特征

提取各测点位置的温度场模拟结果与实测值进行对比, 如图 12 所示, 可以看出, 3 个测区内各测点的模拟温度与实测温度变化规律基本相同, 模拟值与实测值的平均误差约为 -2.7% 。从 B-1、C-1 测点温度时程曲线可以看出, 由于日照阴影的影响, 考虑遮蔽效应的测点会出现降温现象。

图 12a) 中, A-1 测点位于花瓶柱与主桁架的交界处, A-2 测点位于主桁架南侧上弦杆, 两者距离较近, 温度差别较小, 均在 16:30 达到最大温度, 分别为 $46.4\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $43.9\text{ }^\circ\text{C}$, 由于花瓶柱与主桁架的连接处面积较大, 在太阳直射时接收到的辐射量较多, 因此最大温度略高于主桁架南侧上弦杆的最大温度。A-3 测点位于屋盖网格结构杆件相交处, A-4 测点位于花瓶柱顶端杆件的内侧, 两者在 13:00 达到最大温度, 分别为 $42.7\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $33.6\text{ }^\circ\text{C}$, 13:00 后 A-4 测点受遮蔽效应影响有明显降温现象, 平均降温幅度约为 6.4% 。

图 12b) 中, B-1 测点位于横向连系杆中部, 在 12:30 达到最大温度 $45.3\text{ }^\circ\text{C}$ 后温度变化较小, 受遮蔽效应影响, 在 14:30 后开始迅速降温, 平均降温幅度约为 11.7% , 在 16:00 降至 $26.8\text{ }^\circ\text{C}$ 后再次受到太阳照射, 温度回升。B-2、B-4 测点分别位于主桁架南、北侧上弦杆, 于 15:00 达到最大温度 $48.0\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $45.7\text{ }^\circ\text{C}$, 两测点温度变化规律基本相同, 最大温差仅为 $2.7\text{ }^\circ\text{C}$, 该现象表明结构的横向温差

较小。

从图12c)中可以看出位于下弦杆的C-1与C-4测点受遮蔽效应影响显著,其中C-1测点有两次明显的降温现象,在14:30降低了19.4%,在16:30降低了33.5%,但两次遮蔽的时间较短,仅在30 min后温度就出现回升,数值模拟结果也准确反映了该现象。测区最高温度出现在位于主桁架上弦杆的C-3测点,在15:30达到44.8℃。

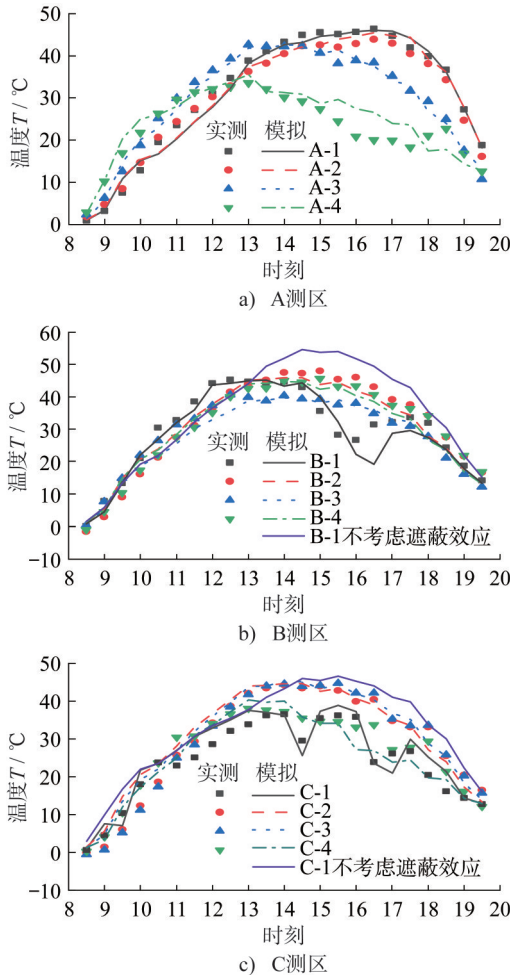


图12 测点温度时程曲线

Fig. 12 Temperature time-history curves of measuring points

图13给出了结构温度与大气温度的时程曲线,结构在15:30达到最高温度51.4℃,在太阳辐射作用下,结构温度分布的非均匀性显著,结构最高与最低温度差值的平均值达28.5℃,14:00的最大温差可达35.7℃。结构最低温度比大气温度平均高出1.2℃,最低温度的变化规律与大气温度基本一致。

4.2 温度空间分布特征

太阳辐射作用下,结构受到阳光直射的区域温度迅速上升,而阴影区域温度变化相对缓慢,导致结构温度分

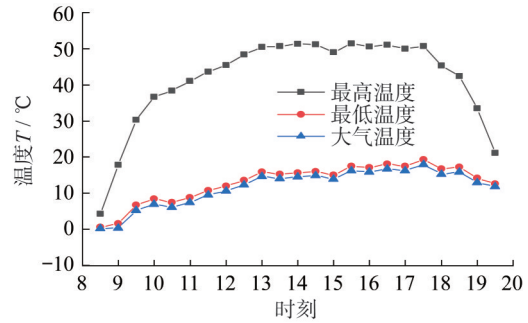


图13 结构与大气温度时程曲线

Fig. 13 Temperature time-history curves of structure and atmospheric

布不均匀。由于高原地区太阳辐射强、大气温度低,因此结构的非均匀温度效应要强于在中低海拔地区结构的非均匀温度效应。由大跨异形钢结构温度场的时间分布特征可知,结构最大温差出现在14:00,图14所示为该时刻结构的温度分布情况。

由图14可知,结构最高温度出现在南侧锥形支座的横向斜杆上表面,通过计算太阳位置参数可知,此时太阳光线与该杆件表面的夹角接近90°,杆件表面的太阳辐射热流密度达到最大水平,因此温度最高。结构最低温度出现在北侧主桁架斜腹杆处,由于腹杆尺寸较小,故对流换热系数较大,受遮蔽后温度很快降低至大气温度。由于该杆件位于结构下部,受遮蔽效应影响,表面温度分布极不均匀,被遮蔽区域的温度相较于太阳直射区域降低了53.7%,降幅远大于其他杆件,其原因是该时刻下,该杆件所处的阴影区域主要由主桁架的上、下弦杆遮蔽产生,阴影面积较大,故阴影区域温度有明显降低。

从整体上看,结构顶部杆件的向阳面与背阳面温度差异很大,而结构下部杆件由于受遮蔽效应影响,向阳与背阳面温差有所减小,例如南侧上弦杆向阳与背阳面的平均温差达19.5℃,而下弦杆的平均温差为15.1℃。对于杆件密度大的花瓶形钢柱,遮蔽效应的影响更为显著,其向阳与背阳面的平均温差仅有7.5℃。由此可见,遮蔽效应会减小结构向阳面与背阳面的温差,尤其针对杆件密度较大的结构,若不考虑杆件间的遮蔽效应,将导致温度场模拟结果严重失真。网架杆件内部空间封闭,导致空气流动缓慢,因此杆件内壁与内部空气间的热交换极少,可忽略不计。

对于此类高次超静定结构,非均匀温度场会导致结构内部产生温度自应力。参考2021年拉萨年平均气温,基于热-结构间接耦合法,利用APDL求解得到结构最低温度为在8:30出现的-15℃左右,对应的最大等效应力为157 MPa;随着太阳辐射强度的增加,结构的最大等效应力先减小再增大,经过一定的积累,结构在17:30达到最大等效应力206 MPa,是Q355B钢材设计强度的

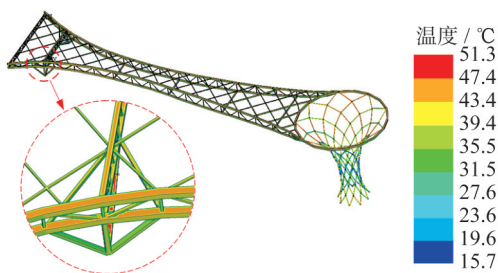


图14 14时结构温度分布

Fig. 14 Temperature distribution of the structure at 14:00

70%,且最大等效应力均出现在大跨度钢结构内侧的锥形支座处,该时刻滞后于最高日照温度时刻2 h。图15为17:30结构最大等效应力云图。

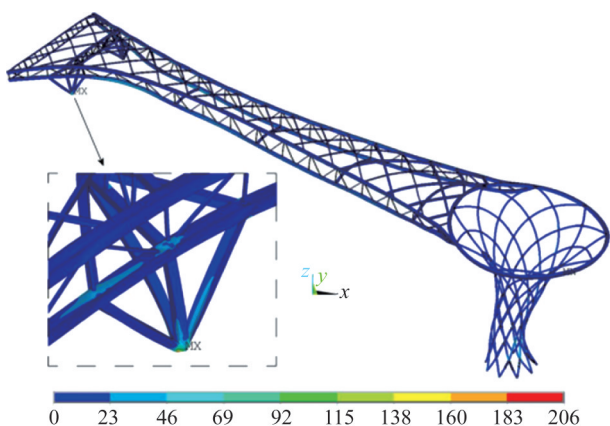


图15 17时30分结构最大等效应力云图(单位:MPa)

Fig. 15 Maximum equivalent stress contour of structure at 17:30 (unit:MPa)

由于高原地区的太阳辐射强、大气温度较低,对于规模较大、造型复杂的钢结构在设计及施工阶段都需要重视非均匀温度场的影响。若结构采用大面积透光性屋面,则可能进一步加剧温度场的非均匀性,因此还需要关注结构服役阶段的耐久性问题。

5 结论

本文提出了适用于高原地区大型空间结构的日照温度场仿真方法,以某大跨异形钢结构为研究对象,考虑杆件间的遮蔽效应,进行了结构瞬态温度场仿真分析,得到的主要结论如下:

(1) 基于光线追踪算法提出的有限元模型日照阴影识别方法识别精度较高,能够准确地反映结构的日照阴影分布,并采用加速技术,有效解决了光线追踪计算效率差的问题。

(2) 进行大型空间结构的温度场仿真时,需结合实际情况修正太阳辐射强度、对流换热系数等温度场定解所需的边界条件,高原地区太阳辐射强度的实测值比太

阳辐射模型的计算值高出约21.9%,采用提高初始太阳辐射强度的方式对太阳辐射模型进行修正,修正后的模型能够准确地模拟高原地区太阳辐射强度的变化情况。

(3) 太阳辐射具有方向性,这是导致钢结构升温的主要能量来源。太阳位置的变化会改变入射角,当太阳光线与杆件表面垂直,杆件表面的太阳辐射热流密度最大,温度也随之达到最高。在太阳辐射作用下,结构温度分布呈现显著的非均匀性,整个结构的最高与最低温差均值达28.5℃,而在14:00这一温差高达35.7℃。值得注意的是,结构的最低温度仍比大气温度平均高出1.2℃,而其变化规律与大气温度基本一致。

(4) 日照温度场仿真分析得到的关键杆件测点处温度与监测温度基本吻合,模拟值与监测值的平均误差约为-2.7%,在杆件间的遮蔽效应影响下,位于结构下部的测点温度变化较大,测点区域被遮蔽后,表面温度最大降幅为33.5%。

(5) 日照温度场仿真结果表明,结构位于南侧锥形支座的横向斜杆在15:30达到最高温度51.4℃。由于高原地区太阳辐射强、大气温度低,结构温度分布的非均匀性强于中低海拔地区结构温度分布的非均匀性,日间结构最高与最低温差的平均值为28.5℃,14:00的最大差值达35.7℃。

(6) 对于大型复杂空间结构,遮蔽效应会显著改变杆件的温度分布,从而影响整体结构的温度场。被遮蔽区域结构的最大降温幅度可达33.5%;而在14:00,被遮蔽区域杆件表面温度相较于阳光直射区域杆件表面温度降低了53.7%。遮蔽效应在一定程度上能够减小结构向阳面与背阳面的温差,因此其影响不可忽略。

参考文献:

- [1] LIU H B, CHEN Z H, HAN Q H, et al. Study on the thermal behavior of aluminum reticulated shell structures considering solar radiation[J]. Thin-Walled Structures, 2014, 85: 15-24. DOI:10.1016/j.tws.2014.07.007.
- [2] CHEN D S, XU W C, QIAN H L, et al. Thermal behavior of beam string structure: Experimental study and numerical analysis [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 40: 102724. DOI:10.1016/j.job.2021.102724.
- [3] 刘红波, 应皎洁, 陈志华. 空间结构太阳辐射非均匀温度问题的研究进展[J]. 建筑结构, 2017, 47(16): 59-63. DOI:10.19701/j.jzjg.2017.16.011.
LIU Hongbo, YING Jiaojie, CHEN Zhihua. Study overviews of non-uniform thermal behavior of spatial structures under solar radiation[J]. Building Structure, 2017, 47(16): 59-63. DOI:10.19701/j.jzjg.2017.16.011. (in Chinese)
- [4] ZHAO Z W, LIU H B, CHEN Z H. Thermal behavior of large-span reticulated domes covered by ETFE membrane

- roofs under solar radiation[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 115: 1-11. DOI:10.1016/j.tws.2017.01.025.
- [5] 王化杰,陈友,钱宏亮,等.网架模型日照非均匀温度场试验[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(1):191-198. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201605091.
WANG Huajie, CHEN You, QIAN Hongliang, et al. Experimental study on non-uniform temperature field of grid structure model under solar radiation [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50 (1) : 191-198. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201605091. (in Chinese)
- [6] 周勐,樊健生,刘宇飞,等.北京大兴国际机场航站楼核心区钢网架结构日照非均匀温度场研究[J].工程力学,2020,37(5):46-54,73. DOI:10.6052/i.issn.1000-4750.2019.07.0374.
ZHOU Meng, FAN Jiansheng, LIU Yufei, et al. Analysis on non-uniform temperature field of steel grids of Beijing Daxing International Airport terminal building core area considering solar radiation [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37 (5) : 46-54, 73. DOI: 10.6052/i.issn.1000-4750.2019.07.0374. (in Chinese)
- [7] 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. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2022.03.0248.
WANG Jintao, LIU Yufei, FAN Jiansheng, et al. Analysis on non-uniform temperature field of large-span steel truss structure with inclined leg [J]. *Engineering Mechanics*, 2024, 41 (1) : 208-218. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.03.0248. (in Chinese)
- [8] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].4版.北京:高等教育出版社,2006.
YANG Shiming, TAO Wenquan. *Heat transfer* [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [9] 吕勇康.高原高寒地区大跨度钢结构日照温度场及温度效应研究[D].绵阳:西南科技大学,2023.
LYU Yongkang. Study on solar radiation temperature field and temperature effect of long-span steel structure in frigid plateau region [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [10] 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.
LIU Hongbo. Study on the construction control theory and temperature effect of suspen-dome structure [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)
- [11] 张闯,吕东辉,项超静.太阳实时位置计算及在图像光照方向中的应用[J].电子测量技术,2010,33(11):87-89,93. DOI:10.19651/j.cnki.emt.2010.11.023.
ZHANG Chuang, LYU Donghui, XU Chaojing. Computation for solar real-time position and its application in illuminant direction of image [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2010, 33 (11) : 87-89, 93. DOI: 10.19651/j.cnki.emt.2010.11.023. (in Chinese)
- [12] SPENCER J W. Fourier series representation of the position of the sun [J]. *Search*, 1971, 2(5):165-172.
- [13] COOPER P I. Some factors affecting the absorption of solar radiation in solar stills [J]. *Solar Energy*, 1972, 13(4):373-381. DOI:10.1016/0038-092X(72)90003-5.
- [14] 王炳忠,刘庚山.日射观测中常用天文参数的再计算[J].太阳能学报,1991,12(1):27-32. DOI:10.19912/j.0254-0096.1991.01.005.
WANG Bingzhong, LIU Gengshan. Improvement in the astronomical parameters computation for solar radiation observation [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 1991, 12 (1) : 27-32. DOI:10.19912/j.0254-0096.1991.01.005. (in Chinese)
- [15] 陈胜利,苏永华,班新林,等.高海拔地区钢-混凝土组合梁日照温度场研究[J].铁道建筑,2021,61(4):12-16. DOI:10.3969/j.issn.1003-1995.2021.04.03.
CHEN Shengli, SU Yonghua, BAN Xinlin, et al. Study on solar radiation temperature field of steel-concrete composite girder in high altitude area [J]. *Railway Engineering*, 2021, 61 (4) : 12-16. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2021.04.03. (in Chinese)
- [16] 诺桑,晋亚铭,措加旺姆,等.西藏地面太阳总辐射与紫外线的观测[J].光谱学与光谱分析,2019,39(6):1683-1688. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2019)06-1683-06.
NORSANG Gelsor, JIN Yaming, TSOJA Wangmu, et al. Ground-based measurements of global solar radiation and UV radiation in Tibet [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39 (6) : 1683-1688. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)06-1683-06. (in Chinese)
- [17] GIBSON R D. Theory and problems of heat transfer [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1979, 22(6),985. DOI:10.1016/0017-9310(79)90047-4.
- [18] LIU C, XIAO J C, MA K J, et al. Experimental and numerical investigation on the temperature field and effects of a large-span gymnasium under solar radiation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 225: 120169. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120169.