

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201605091

网架模型日照非均匀温度场试验

王化杰^{1,2}, 陈 友^{2,3}, 钱宏亮^{1,2}, 金晓飞⁴, 来佳琪³

(1.哈尔滨工业大学(威海) 土木工程系, 山东 威海 264209; 2.哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090;
3.中国联合工程公司, 杭州 310052; 4.中建一局集团公司总承包公司, 北京 100161)

摘 要: 为得到日照下空间钢结构非均匀温度场分布规律, 给现有非均匀温度场模拟方法提供标准、可靠的试验验证依据, 设计并制作了标准的三角形平板网架模型, 对其均匀温度场试验进行了详细设计, 完成了不同环境下三角形平板网架非均匀温度场的连续测量, 得到了较为全面的网架结构非均匀温度场试验数据, 并对其进行了详细分析, 结果表明, 网架结构杆件水平放置时, 摆放角度对杆件温度变化影响不大, 非水平放置时, 摆放角度影响较大, 不同杆件间温差最大可达 13 ℃, 网架模型非均匀温度场效应明显; 最后建立了三角形平板网架非均匀温度场有限元分析模型, 采用考虑阴影的数值模拟方法对试验进行模拟分析, 并将模拟结果与实测结果进行对比, 试验结果与数值模拟结果基本相同, 全天平均误差率不超过 6%。考虑阴影遮挡的非均匀温度场模拟方法可用于结构非均匀温度场分析, 模型试验可为同类非均匀温度场模拟方法提供验证依据。

关键词: 钢结构; 网架模型; 试验研究; 非均匀温度场; 摆放角度

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)01-0191-08

Experimental study on non-uniform temperature field of grid structure model under solar radiation

WANG Huajie^{1,2}, CHEN You^{2,3}, QIAN Hongliang^{1,2}, JIN Xiaofei⁴, LAI Jiaqi³

(1.Department of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, Shandong, China;
2.School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3.China United Engineering Company, Hangzhou 310052, China; 4.China Construction First Engineering Division Co., Ltd., Beijing 100161, China)

Abstract: To obtain the temperature distribution rules of steel structures under solar radiation and offer standard reference and reliable basis for related numerical research, temperature field test of a specially designed triangle space truss model was carried out under various conditions. Through the continuous measurements, abundance experimental data and distribution rules were obtained and analyzed in detail. According to the comprehensive test results, solar temperature distribution rules under different conditions were summarized initially. Laying angle has a great influence on temperature field of members in non-horizontal location, while it has little influence on horizontal ones, and the maximum temperature difference between different members can reach 13 centigrade. Then numerical simulation for solar temperature field of the test model was conducted contrastively considering the shadow effect. The results show that test results and simulation results are almost the same, in which the average error rate is not more than 6%. The proposed simulation methods are effective for structural non-uniform temperature field analysis, and the experimental study and conclusions can provide valuable references for other similar analysis methods of temperature field.

Keywords: steel structure; truss model; experimental study; non-uniform temperature field; display angle

大跨空间钢结构具有跨度大、杆件多、结构形式复杂、高次超静定等特点, 对温度荷载较为敏感, 而现阶段规范^[1]对温度作用考虑主要是以 50 a 重现期的月平均最高气温与月平均最低气温, 按热工学原理确定结构的最高、最低以及初始平均温度为依据, 按均

匀温度作用进行计算, 没有考虑非均匀温度作用影响。而实际上, 随着结构跨度的增加, 非均匀温度场效应将越来越明显, 结构设计及施工过程中有必要考虑非均匀温度场的影响, 尤其是在露天施工过程中, 日照下不均匀温度荷载将成为施工合拢的主要控制因素^[2]。

目前, 国内外学者对于非均匀温度场的研究主要集中在桥梁^[3]、大坝^[4], 射电望远镜^[5]等结构, 对于体育场馆、会展中心以及航站楼等空间结构温度场研究则涉及较少, 只有少数学者对空间钢结构日照非均匀温度场做了数值模拟和实测研究, 如罗尧治等^[6]利用无线温度传感网络系统对国家体育场

收稿日期: 2016-05-21

基金项目: 中国建筑股份有限公司科技研发课题(CSCEC-2012-Z-07);
国家自然科学基金面上项目(51378149);
国家自然科学基金青年基金(51308154)

作者简介: 王化杰(1982—), 男, 副教授, 硕士生导师;
钱宏亮(1977—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 钱宏亮, qianhl@hit.edu.cn

钢结构屋盖温度场进行持续测量,得到了结构温度变化规律并将温度作用分为均匀温度场作用与非均匀温度场作用.王元清等^[7]对箱形、工字形两种截面钢构件进行了温度试验,得到了两种构件日间温度-时间变化规律.金晓飞等^[8]对山西三馆钢结构屋盖进行数值模拟,获得了一天各时刻结构的日照非均匀温度作用大小及分布.但是实际工程实测研究只能在局部进行温度场试验且测量精度难以保证,无法得到结构整体温度分布规律,而构件温度场试验则无法测量温度场边界条件,且不能体现整体结构的温度场效应规律,均无法对已有数值模拟方法进行良好的验证.因此有必要建立整体空间结构模型,对其非均匀温度场进行全面精细化测量,得到整体结构模型的非均匀温度场规律,为验证非均匀温度场模拟方法提供标准、可靠的试验依据.

本文建立了网架结构模型,并对其进行连续温度测量,得到了网架结构模型日照非均匀温度场分布规律,并采用所建立的 ANSYS 非均匀温度场数值模拟方法对试验进行数值模拟,以试验为依据对数值模拟方法的准确性进行了验证.

1 网架模型温度场试验

1.1 模型简介

网架模型为等边三角形平板网架,边长 4.5 m,厚度 0.7 m,网格尺寸 1.5 m,杆件选用圆钢管 $\phi 45 \times 3$,节点采用焊接球连接,焊接球大小为 WS160 $\times$ 6,网架结构尺寸见图 1.

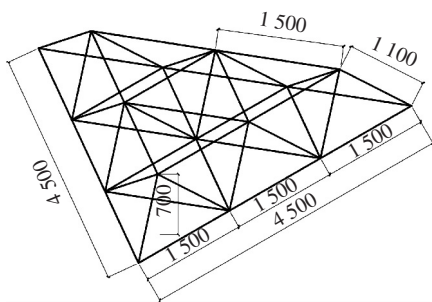


图 1 网架结构尺寸 (mm)

Fig.1 Size of grid structure (mm)

1.2 设备选型

试验测量内容包括网架结构各测点温度以及影响结构温度的大气温度、风速、太阳辐射强度等外界因素.温度测量采用 PT100A 级温度传感器,量程为 $-50 \sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量精度为 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$.风速风向测量采用三杯式风速风向仪,量程为 $0 \sim 30\text{ m/s}$,精度为 0.5 m/s .太阳辐射强度采用手持式 SM206 太阳能功率计测量,最大量程 $3\,999\text{ W/m}^2$,精度 $\pm 10\text{ W/m}^2$.温度数据采集采用 TST3826 静态采集仪,可同时满足 60 通道温度数据的定时自动采集.

1.3 测点布设及场地选取

网架结构温度场主要考虑以下因素进行测点布设:

1) 由于杆件众多且杆件沿长度方向温度不变,故相同方位角杆件选择其中一根杆件进行测量,测点布置位于杆件跨中截面.

2) 考虑到下弦与腹杆会受到阴影遮挡影响,因此选择受到阴影遮挡的杆件布置测点.

根据上述原则共选取 18 根杆件、36 个温度测点进行测量,其中上弦 3 根,腹杆 9 根,下弦 6 根,每个杆件又在顶面和底面布置温度测点,具体位置见图 2,图中 X1_1 表示下弦 1 号杆顶面测点.

试验场地选择日照不受遮挡,通风顺畅的空旷草坪进行.网架模型放置于自平衡反力架上,反力架上固定放置遮光板以防止反力架自身受热对试验构件产生温度影响,具体见图 3.

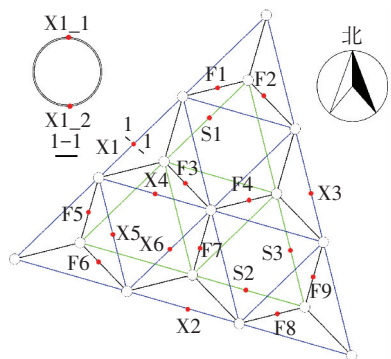


图 2 温度测点布设

Fig.2 Layout of temperature measuring points

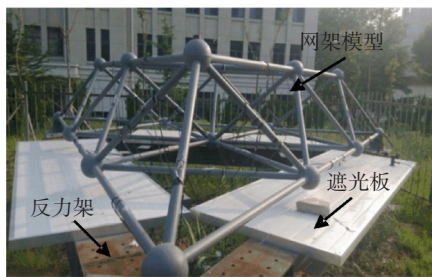


图 3 试验布置

Fig.3 Experimental layout

2 试验结果分析

2.1 典型日网架温度场分布

当天气晴朗无云、太阳辐射强烈、风速小、气温高时,网架结构杆件温度较高.故以 20 d 为一个时间段,将试验中杆件温度最高的一天称为典型日.以下以夏季较热的 8 月份典型日为例对网架非均匀温度场进行实验研究.

图 4 为典型日实测风速、太阳辐射强度时程曲线.由图可知:典型日全天实测风速很小,不超过 1 m/s ,后续数值模拟时取典型日日间平均风速 0.8 m/s ;典型日太阳辐射强度日间基本不变,约为 $1\,200\text{ W/m}^2$.

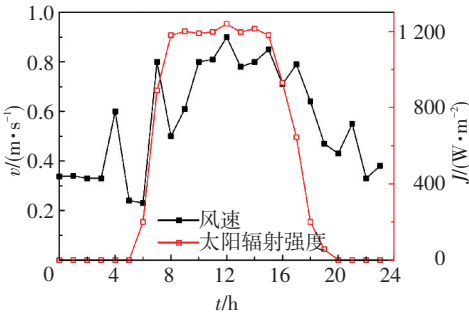


图 4 风速与太阳辐射强度时程曲线

Fig.4 Time history curve of wind speed and solar radiation intensity

图 5 为典型日网架杆件整体温度变化曲线,由图 5(a)、(b)可以看出:上弦和下弦杆件温度变化规律相同,温度最大值均出现在下午 13:00 点左右,下弦外圈杆件整体温度最大,温度最大可达到 47 ℃,最大温升达到 17 ℃,上弦与下弦内圈整体温

度变化基本相同,无不均匀温度场分布,温度最大均为 43 ℃,最大温升 13 ℃.下弦外圈杆件温度大于上弦与下弦内圈杆件温度,这是由于下弦外圈杆件下方放有遮光板,受到遮光板反射太阳辐射使杆件升温.图中 11:00 点时刻出现杆件温度波动,是由于云层遮挡了太阳,太阳辐射强度骤降引起.

由图 5(c)可以看出:腹杆各杆件整体温度变化规律不同,不同空间摆放角度的腹杆温度最大值出现时刻不同.其中 F1 杆件温度在下午 15 点达到最大,最大值为 41 ℃,最大温升 11 ℃,F2 杆件温度最大值出现 12 点左右,最大值为 37 ℃,最大温升 7 ℃,F7 杆件温度在温度 13 点达到最大,最大值为 42 ℃,最大温升 12 ℃.腹杆温度到达温度最大值时间与太阳光线直射腹杆面积有关,太阳光线直射腹杆面积越大时刻即为腹杆温度达到最大值时刻.

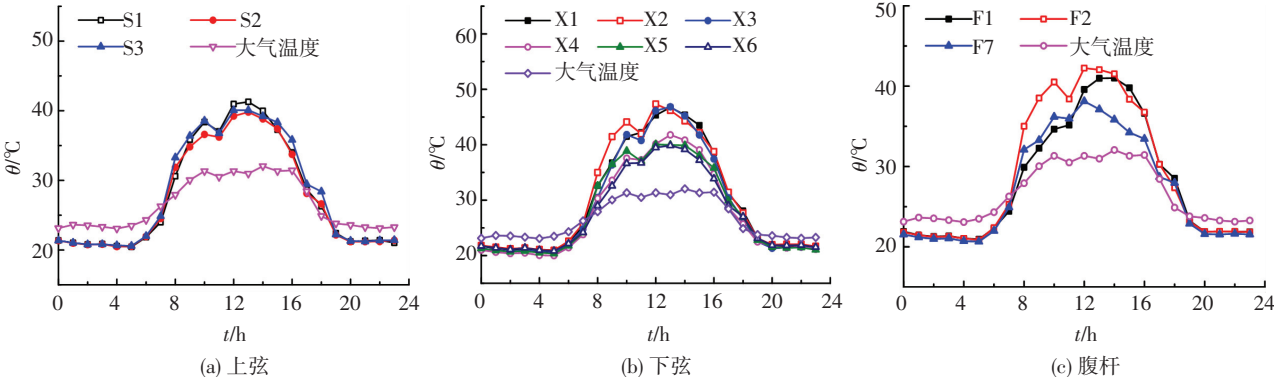


图 5 杆件整体温度时程曲线

Fig.5 Members temperature time history curve

2.2 杆件摆放角度对温度场分布影响

空间结构杆件摆放角度不同是造成结构不均匀温度场的主要因素之一.本文分别分析了弦杆与腹杆在相同摆放角度与不同摆放角度下的温度场分布规律.图 6 为典型日下网架不同摆放角度杆件顶面、底面温度变化曲线,可以看出:S1~S3 以及 X1~X3 杆件的顶面和底面测点温度变化曲线几乎吻合,除个别时刻温差超过 1 ℃,其他时刻不同摆放角度的杆件温差均小于 1 ℃.可以得出,在水平面内不同摆放角度杆件温度变化规律相同.

图 7 为相同摆放角度弦杆温度变化对比曲线,可以看出:相同摆放角度上下弦变化规律基本相同,但 X3 杆件温度大于 S3 与 X5 杆件温度,这是由于 X3 杆件下方放有遮光板,受到遮光板反射太阳辐射使杆件升温;S3 杆件与 X5 杆件的温升曲线几乎吻合,12~13 点时,S3 杆件顶面测点温度略大于 X5 杆件,其原因是此时 X5 杆件部分受到阴影遮挡.

图 8 为不同摆放角度腹杆顶面与底面温升对比曲线,可以看出:不同摆放角度腹杆温度随时间变化

规律不同且日间不同时刻,不同摆放角度腹杆间存在不均匀温度场,最大温差可达 12 ℃.

图 9 为相同摆放角度腹杆顶面与底面温度变化对比曲线,可以看出:相同摆放角度腹杆顶面测点温度变化曲线几乎吻合,底面测点温度变化规律大致相同,故相同摆放角度的腹杆温度相同.

由以上分析可以看出,杆件角度相同时其温度变化规律基本相同,与其空间位置无关,当构件水平放置时,其摆放角度对杆件温度变化影响不大,当杆件非水平放置时,其摆放角度对其温度影响较大.

3 网架模型温度场数值模拟

3.1 有限元模型建立

根据网架模型几何尺寸、截面特征、材料热物理特性^[9]等,采用有限元软件 ANSYS 建立网架结构温度场有限元模型,考虑了太阳直接辐射、日照阴影、空气对流换热、环境温度等复杂边界条件参数.其中大气温度、风速、直射太阳辐射强度边界参数根据实测数据输入建模单元选取见表 1,材料的热物理特征参数

见表 2,图 10 为网架结构温度场分析的有限元模型.

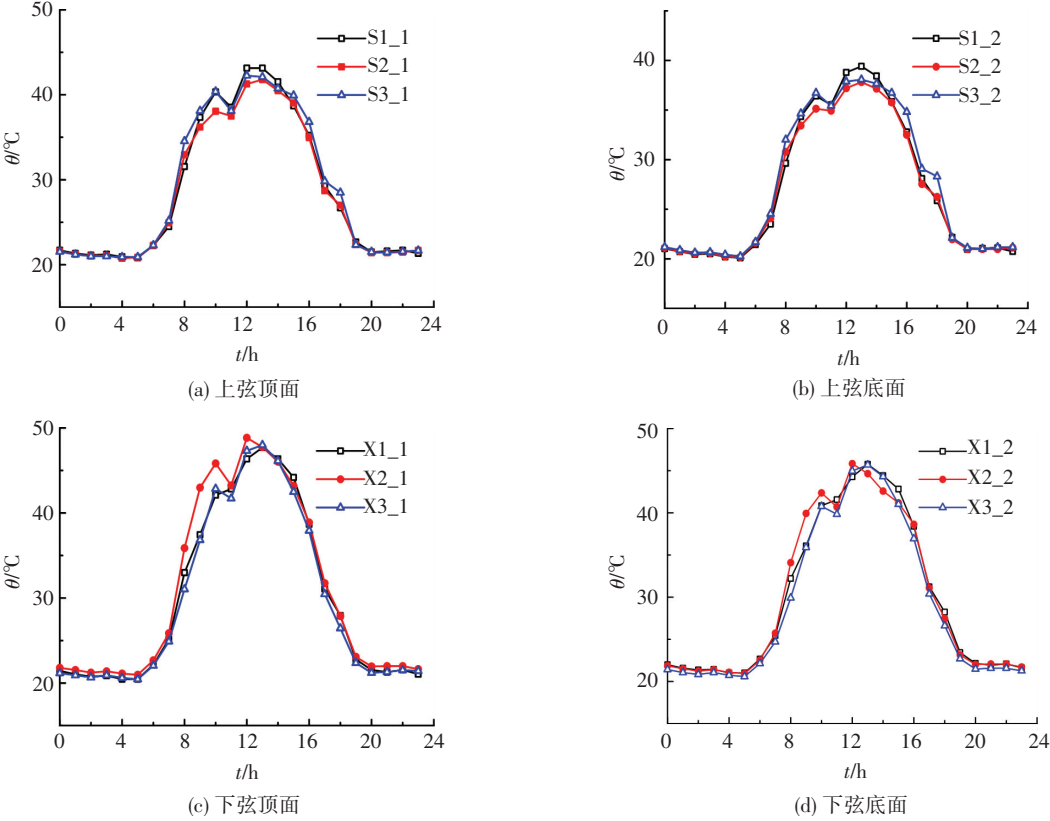


图 6 不同摆放角度弦杆温升曲线

Fig.6 Temperature rise curve of chord of different azimuth

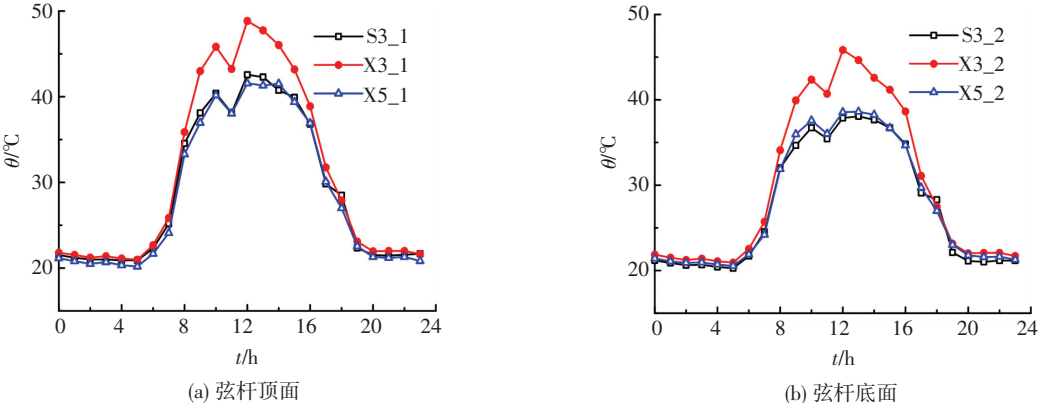


图 7 相同摆放角度弦杆温升曲线

Fig.7 Temperature rise curve of chord with the same azimuth

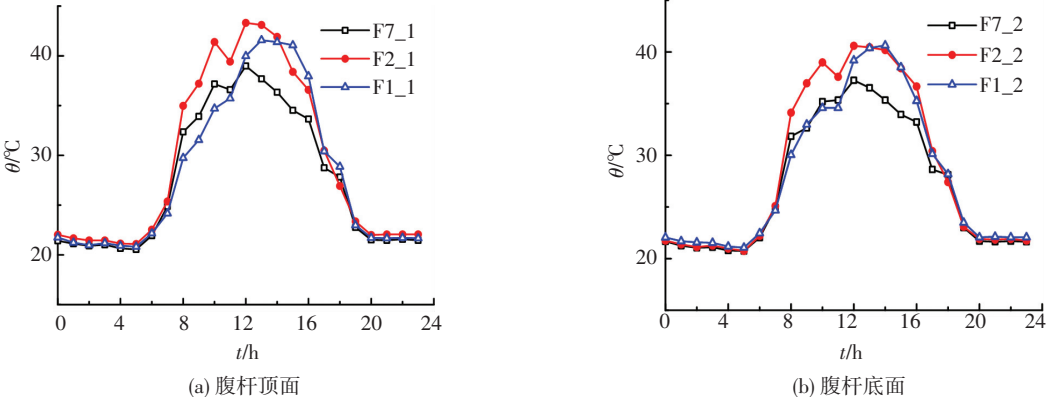


图 8 不同摆放角度腹杆温升曲线

Fig.8 Temperature rise curve of web with different azimuth

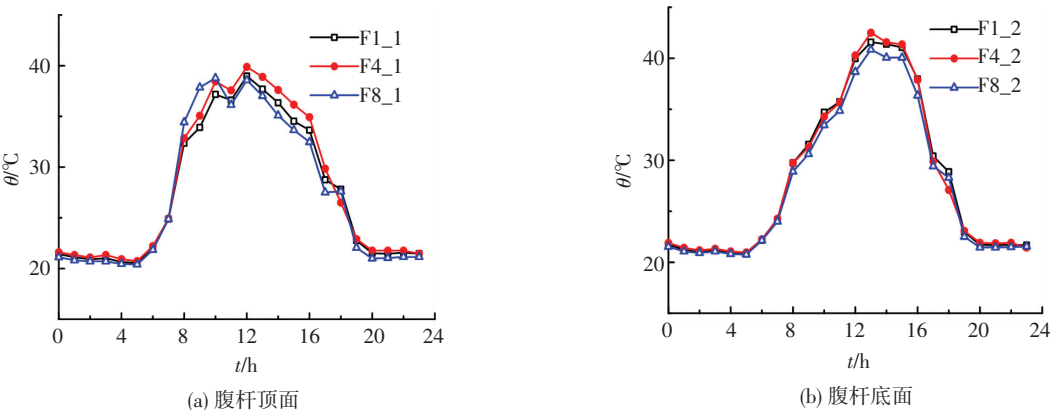


图 9 相同摆放角度腹杆温升曲线

Fig.9 Temperature rise curve of web with the same azimuth

表 1 ANSYS 模拟单元

Tab.1 ANSYS simulation elements

热传递方式	ANSYS 模拟单元
热传导	三维壳单元 SHELL57
热对流	表面效应单元 SURF152
热辐射	三维两节点热辐射单元 LINK31

表 2 材料热物理特征参数

Tab.2 Thermo-physical parameters of materials

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)
钢	7 850	465	45

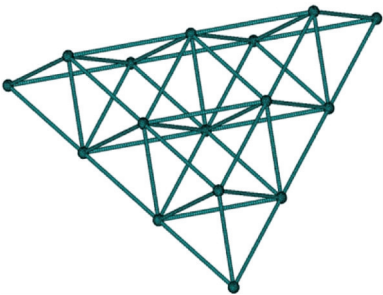


图 10 热分析有限元模型

Fig.10 Finite element model for thermal analysis

3.2 太阳辐射强度

太阳辐射强度是日照下空间结构主要热荷载,其包括太阳直射辐射、太阳反射辐射、太阳散射辐射,数值模拟时,太阳辐射强度模型选用 Dilger 模型^[10].

1) 杆件直射太阳辐射^[11]

$$S_a = S_d \cos \theta,$$
 (1)

式中: S_d 为太阳直接照射强度, θ 为太阳光线与杆件照射平面法线的夹角.

$$S_d = 0.90^{mp} S,$$
 (2)

式中: p 为大气浑浊度,取值为 1.8~3.3,夏季取偏低值, S 为太阳辐射强度,取 $1\,367\text{ W/m}^2$, m 为大气光学质量, $m = \frac{k_a}{\sin \beta_s}$, k_a 为不同海拔高度相对气压,本

试验取 $0.99, \beta_s$ 为太阳高度角.

2) 杆件散射太阳辐射

$$S_s = S_{sh} \frac{1 + \cos \alpha}{2},$$
 (3)

式中: α 为杆件照射表面与水平面的夹角, S_{sh} 为水平面上的太空散射强度.

$$S_{sh} = (0.271S - 0.294S_d) \sin \beta_s.$$
 (4)

3) 杆件反射太阳辐射

$$S_r = (S_a + S_s) R_s \frac{1 - \cos \alpha}{2},$$
 (5)

式中 R_s 为地面反射率,本试验中下弦外圈杆件受遮光板反射作用,反射率取 0.9,其他杆件受到草地反射,取 0.26.

日照阴影是影响结构表面上太阳直射辐射分布的主要因素.本试验网架模型日照阴影是由杆件自身遮挡以及其它杆件的遮挡.杆件自身阴影遮挡只需判断壳单元法线与太阳光线向量夹角即可.对于网架结构杆件相互遮挡的问题采用光线投影算法来解决,具体步骤:

1) 建立整体坐标系 $OXYZ$ 与分析坐标系 $oxyz$,用整体坐标系建立网架有限元模型,为得到精确结果,单元尺寸必须足够小,分析坐标系用来分析各杆件之间的遮挡关系.

2) 坐标变换.分析坐标系 z 轴平行与太阳光线,若此时太阳高度角为 θ ,太阳方位角为 φ ,则根据式(2),将整体坐标系中杆件任意点 $N(X, Y, Z)$ 变换为分析坐标系中的点 $n(x, y, z)$,从而实现模型的坐标变换:

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(90 - \theta) & 0 & \sin(90 - \theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(90 - \theta) & 0 & \cos(90 - \theta) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}.$$
 (6)

3) 由方位角与太阳高度角确定太阳光线矢量方程, 确定过网架各单元中心直线方程, 求得直线方程与投影面(既分析坐标系 $z=0$ 平面)交点, 以此交点在整体坐标系下建立新节点。

4) 求出可能被遮挡壳单元在投影面上的范围, 选出在此范围内步骤 3 建立的新节点, 若存在坐标转换后 Z 坐标大于此壳单元的新节点, 则此单元被遮挡, 反之不被遮挡, 图 11 为壳单元阴影检测示意图。

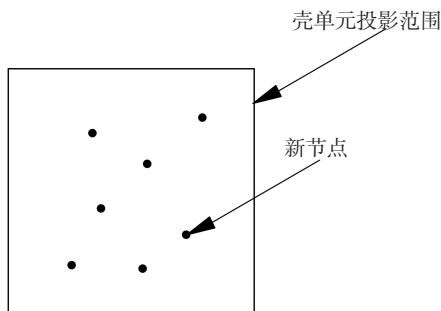


图 11 壳单元阴影检测示意

Fig.11 Schematic diagram of shadow detection of shell element

图 12 给出 12:00 点网架阴影遮挡分布情况, 红色表示被太阳照射, 蓝色表示被遮挡。

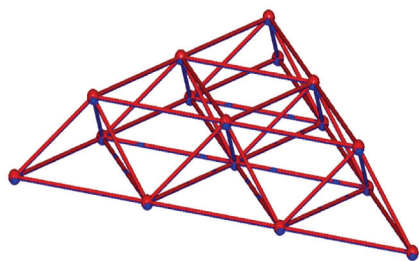


图 12 网架阴影分布

Fig.12 Shading distribution of the grid

3.3 对流换热作用

对流换热是一种流体与固体表面间的热量传递过程, 对流换热系数是影响热对流中热流量的主要参数, 受到诸如空气粘度、风速、管径等多种因素的影响, 考虑对流换热系数要计算 Prandtl 数、与流体流动速度有关的雷诺数。对于空气来说, Prandtl 常数取 0.71, 雷诺数如下式所示:

$$Re = vD/\nu, \quad (7)$$

式中: ν 为动力粘度, D 为杆件直径, v 为风速。

根据经验, 当流体的 Reynold 数小于 4×10^5 , 属于层流, 大于此值流体是紊流。流体处于不同流层时, 对流换热系数计算公式不同, 根据计算, 本试验中钢构件处于层流中, 对流换热系数的计算公式为

$$h_D = 0.3 (Re_D)^{1/1.66} P_r^{1/3} k/D, \quad (8)$$

式中 k 为空气导热系数, 取 $0.024 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

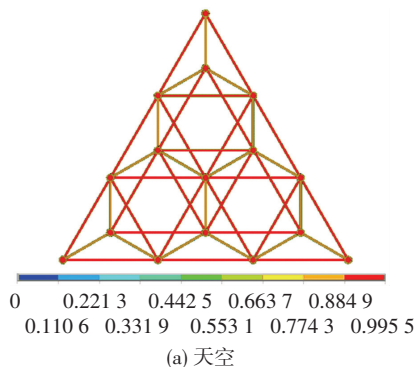
3.4 辐射换热作用

结构与环境发生的辐射换热包括: 结构与天空

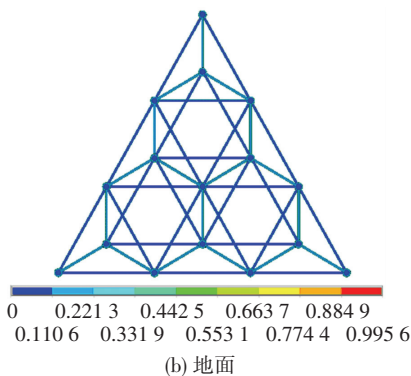
发生的辐射换热, 结构与地面发生的辐射换热。辐射换热角系数是影响结构与天空、地面辐射换热的主要因素, 计算时将天空、地面简化为无限大平面, 图 13 为本试验网架模型天空、地面辐射换热系数。辐射换热系数计算公式为

$$\varphi_{1,2} = (1/\pi A_{r1}) \iint_{A_{r1}A_{r2}} [\cos(\beta_1) \cos(\beta_2)/r^2] dA_{r1} dA_{r2}, \quad (9)$$

式中: β_1 、 β_2 为两个面的辐射角, A_{r1} 、 A_{r2} 为两个面的表面积。



(a) 天空



(b) 地面

图 13 辐射换热系数

Fig.13 Radiant heat transfer coefficient

3.5 实测值与模拟值对比

取典型日试验与模拟结果进行对比, 图 14 给出 14:00 点网架试验值与模拟值的温度场分布情况。可以看出: 日照下网架模型各时刻模拟值与实测值温度场分布规律基本相同。温度最大值出现在焊接球上, 这是由于焊接球面积比杆件截面大, 接收太阳辐射量多造成的; 受遮光板的反射作用, 网架下弦杆外圈温度较大; 同时由于受到上部杆件阴影遮挡, 网架下弦内圈杆件温度均低于外圈杆件与上弦杆件。不同摆放角度的腹杆温度变化规律不同, 与太阳光线夹角越大的杆件温度越高, 当杆件与太阳光线越趋于平行时, 温度越低。

图 15 为各测点模拟值与实测值温度随时间变化对比曲线, 限于篇幅, 本文仅给出部分测点结果。可以看出: 上弦杆件与下弦内圈杆件最大温度均出

现在 13:00 点,约为 43 ℃,下弦外圈杆件最大温度均出现在 14:00 点,约为 46 ℃,腹杆 F4 最大温度均出现在中午 12:00 点,约为 41 ℃.受阴影遮挡影响,X5_1 测点 14:00 时试验值与模拟值温度曲线均出

现较大拐点. 分析表明,19:00—24:00 及 0:00—5:00 之间数值模拟结果与试验值相差最小,不超过 2.5%,6:00 和 17:00 的数值模拟结果与试验值相差最大,达到 22%,全天平均误差率不超过 6%.

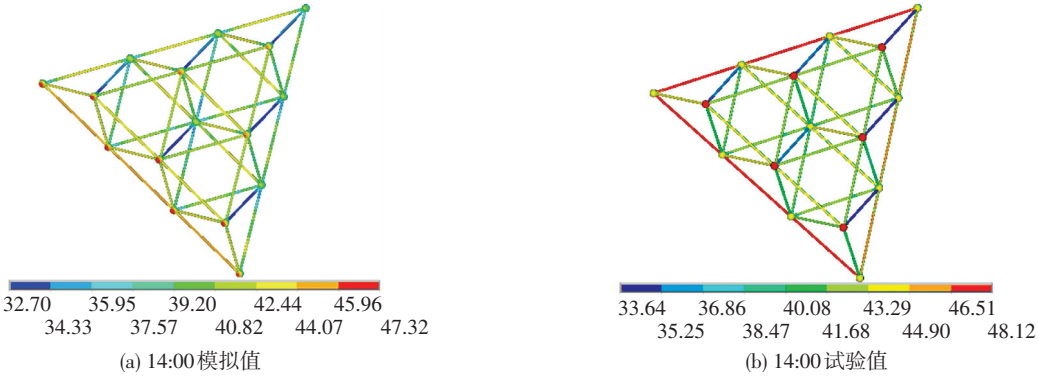


图 14 网架温度场分布

Fig.14 Temperature field distribution of grid

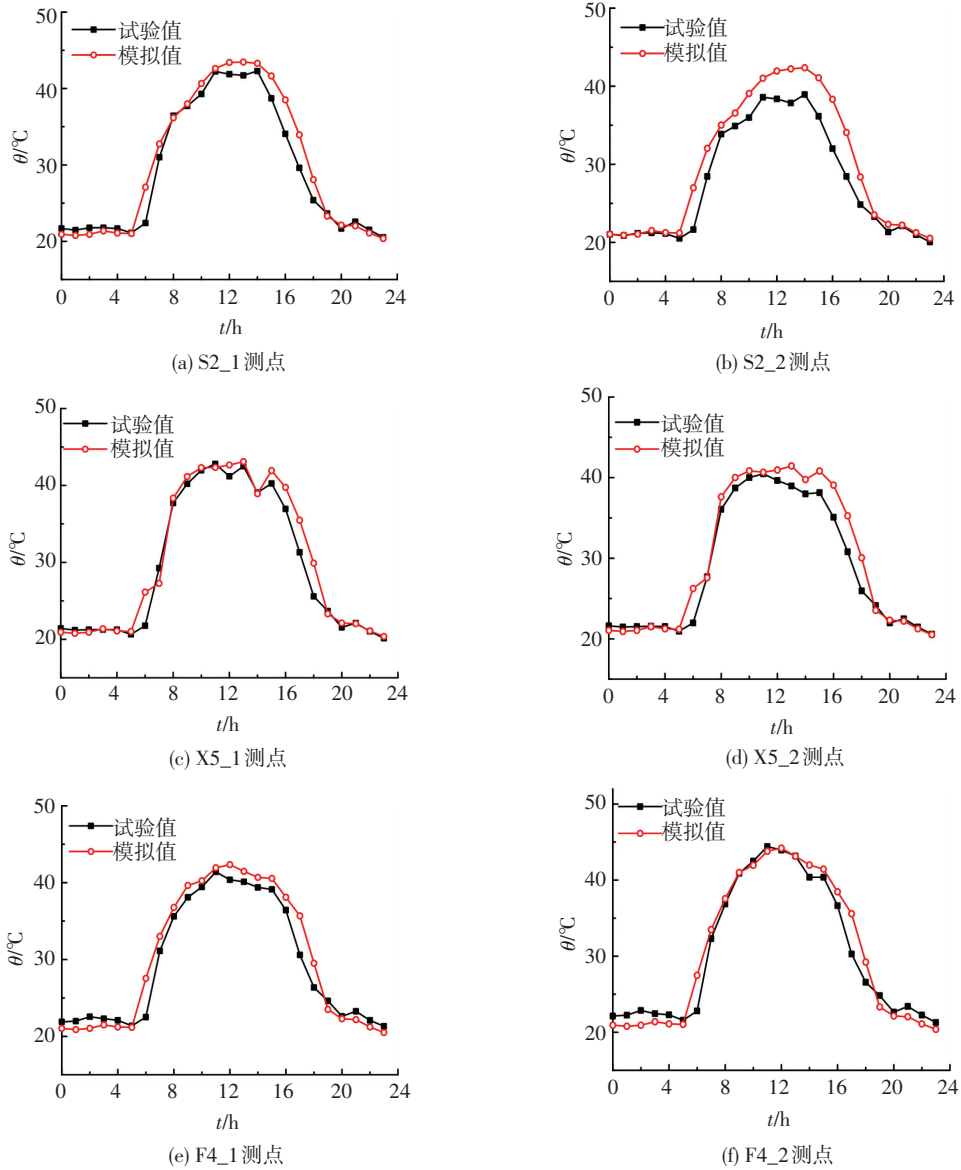


图 15 试验值与模拟值对比

Fig.15 Comparison between simulated and measured values

综上所述,数值模拟方法计算出的温度场分布与实测温度场分布基本相同,变化趋势与实测数据基本吻合,采用该数值模拟方法可以有效模拟网架结构日照非均匀温度场分布。

4 结 论

1)设计并建立了标准的平板网架模型,对其非均匀温度场进行了全面、连续化测量,得到了结构不同气候条件下的非均匀温度场试验数据及其分布规律,可为各种非均匀温度场模拟方法准确性验证,提供标准的、可靠的模型依据。

2)典型日网架日照非均匀温度场模型试验表明,本试验网架模型杆件最高温度可达 $48\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大温升 $17\text{ }^{\circ}\text{C}$,不同杆件间温差最大可达 $13\text{ }^{\circ}\text{C}$,非均匀温度场效应明显;空间网架结构杆件角度相同时其温度变化规律基本相同,与其空间位置无关,当构件水平放置时,其摆放角度对杆件温度变化影响不大,当杆件非水平放置时,其摆放角度对其温度影响较大。

3)采用考虑阴影遮挡的数值模拟方法对网架结构日照非均匀温度场试验进行了模拟,模拟结果与实测结果吻合良好,全天平均误差率不超过 6% ,采用该数值模拟方法可以有效的模拟网架结构日照非均匀温度场分布。

参考文献

- [1] 建筑结构荷载规范:GB 5009—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
Load Code for The Design of Building Structures: GB 5009—2012 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [2] 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. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2007.02.004.
FAN Zhong, WANG Zhe, TANG Jie. Analysis on temperature field and determination of temperature upon healing of large-span steel structure of the National Stadium[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(2): 32–40. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2007.02.004.

- [3] TONG M, THAM L G, AU F T K. Numerical modeling for temperature distribution in steel bridges[J]. Computers and Structures, 2000, 79: 583–593.
- [4] JIN Feng, CHEN Zheng, WANG Jinting, et al. Practical procedure for predicting non-uniform temperature on the exposed face of arch dams[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 20: 2146–2156.
- [5] Von HOERNER S. Design of large steerable antennas[J]. The Astro, 1967, 72: 35.
- [6] 罗尧治,梅宇佳,沈雁彬,等.国家体育场钢结构温度与应力实测及分析[J].建筑结构学报,2013,34(11):24–32. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.11.005.
LUO Yaozhi, MEI Yujia, SHEN Yanbin, et al. Field measurement of temperature and stress on steel structure of the National Stadium and analysis of temperature action[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(11): 24–32. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.11.005.
- [7] 王元清,林错错,石永久.露天日照条件下钢结构构件的温度试验分析[J].建筑结构学报,2010,31(增刊1):140–147. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2010.s1.026.
WANG Yuanqing, LIN Cuocuo, SHI Yongjiu. Experimental study on the temperature of steel members in sunshine[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(S1): 140–147. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2010.s1.026.
- [8] 金晓飞,范峰,李景芳.山西三馆日照非均匀温度作用分析[J].空间结构,2012,18(3):80–85.
JIN Xiaofei, FAN Feng, LI Jingfang. Study on the non-uniform temperature load by sunshine of Shanxi Three Gymnasiums[J]. Spatial Structure, 2012, 18(3): 80–85.
- [9] FAN F, JIN X F, SHEN S Z. Effect of non-uniform solar temperature field on cable-net structure of reflector of large radio telescope-FAST[J]. Advances in Structural Engineering, 2009, 12(4): 503–512.
- [10] SHEN C, HE Y L, LIU Y W, et al. Modelling and simulation of solar radiation data processing with Simulink[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2008, 16(7): 721–735.
- [11] 金晓飞.500 m 口径射电望远镜 FAST 结构安全及精度控制关键问题研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010:21–48.
JIN Xiaofei. Study of key issues of the structural safety and accuracy control of the five-hundred-meter aperture radio telescope[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 21–48.

(编辑 赵丽莹)