第 38 卷 第 5 期
2021 年 9 月

建筑科学与工程学报
Journal of Architecture and Civil Engineering

Vol. 38 No. 5
Sept. 2021

引用本文:韩 石,刘永健,王振华,等.高寒地区组合梁斜拉桥施工阶段温度效应研究[J].建筑科学与工程学报,2021,38(5):107-117.
HAN Shi,LIU Yong-jian,WANG Zhen-hua,et al. Study on Temperature Effect of Composite Girder Cable-stayed Bridge During Construction in Alpine Region[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2021,38(5):107-117.

DOI:10.19815/j.jace.2021.04004

高寒地区组合梁斜拉桥施工阶段温度效应研究

韩 石[1,2],刘永健[2],王振华[3],白永新[2],刘 江[2],王志祥[4]

(1. 青海省交通工程技术服务中心,青海 西宁 810003;2. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064;
3. 鄂尔多斯市交通运输工程质量监测鉴定服务中心,内蒙古 鄂尔多斯 017000;
4. 安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司,安徽 合肥 610213)

摘要:以青海地区主跨 560 m 的海黄大桥为依托工程,基于桥位附近气象站近 5 年气象数据,采用热传导原理对海黄大桥的钢梁、混凝土桥面板、斜拉索和桥塔温度场进行模拟,提取并分析了不同部件温度作用。基于此,采用杆系模型计算了组合梁斜拉桥在最大双悬臂和最大单悬臂 2 个关键工况下的温度效应。结合施工误差控制范围,给出了各部件施工控制的最佳时间段。研究结果表明:不同季节太阳辐射作用下,钢梁、桥面板、斜拉索和桥塔的有效温度和等效竖向线性温差变化规律相似,但数值相差较大,夏季最高,冬季最低;部件温差较大,混凝土桥面板与与斜拉索最大温差为 10.8 ℃,在斜拉桥设计细则规定的范围内;拉索与主塔的最大温差为 10.2 ℃,大于规范建议的温差值;组合梁的等效竖向线性温差可达 14.9 ℃,超过中国规范取值;温度作用下,主梁位移日变化最大可达 87 mm,主梁标高控制宜在 19:00—6:00 进行;塔顶偏位可达 54 mm,塔顶偏位监测宜选择凌晨 2:00—10:00;索力变化值达施工控制索力的 4.4%,在施工控制中应当避开 8:00—20:00;在海黄大桥施工控制过程中,充分考虑了温度作用的影响,取得了良好的施工控制效果。

关键词:斜拉桥;组合梁;施工阶段;热传导分析;温度效应;高寒地区

中图分类号:TU375 **文献标志码**:A **文章编号**:1673-2049(2021)05-0107-11

Study on Temperature Effect of Composite Girder Cable-stayed Bridge During Construction in Alpine Region

HAN Shi[1,2], LIU Yong-jian[2], WANG Zhen-hua[3], BAI Yong-xin[2], LIU Jiang[2], WANG Zhi-xiang[4]

(1. Qinghai Transportation Engineering Technical Service Center, Xining 810003, Qinghai, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. Ordos Transportation Engineering Quality Monitoring and Appraisal Service Center, Ordos 017000, Inner Mongolia, China; 4. Anhui Transport Consulting and Design Institute Co., Ltd, Hefei 610213, Anhui, China)

Abstract: Taking the Haihuang Bridge with a main span of 560 m in Qinghai as the supporting project, based on the meteorological data analysis of the weather station near the bridge in recent 5 years, the temperature fields of steel girder, concrete deck, stay cable and tower of Haihuang Bridge were simulated by using the heat conduction principle, and the temperature action of different components were extracted and analyzed. Based on this, the temperature effect of

收稿日期:2021-04-01
基金项目:国家自然科学基金项目(51978061);交通运输部建设科技项目(2014318363230)
作者简介:韩 石(1980-),男,青海西宁人,高级工程师,工学博士研究生,E-mail:6469388@qq.com。
通信作者:刘永健(1966-),男,江西玉山人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:liuyongjian@chd.edu.cn。

composite girder cable-stayed bridge under two key construction stages, the maximum double cantilever and the maximum single cantilever, was calculated by using the frame model. Combined with the control range of construction error, the reasonable time for construction control of each component was given. The results show that under the action of solar radiation in different seasons, the variation laws of effective temperature and equivalent vertical linear temperature difference of steel girder, bridge deck, stay cable and bridge tower are similar, but the values are quite different as the highest value in summer and the lowest value in winter. The maximum temperature difference between concrete bridge deck and stay cable is 10.8 ℃ within the scope specified in the design code of cable-stayed bridge. The maximum temperature difference between stay cable and main tower is 10.2 ℃, which is greater than the temperature difference recommended by the specification. The equivalent vertical linear temperature difference of composite girder can reach 14.9 ℃, which exceeds the value of specification. Under the action of temperature, the daily variation of main girder displacement can reach 87 mm, and the elevation control of main girder should be carried out from 19:00 to 6:00. The tower top deviation can reach 54 mm, and the monitoring of the tower top deviation should be selected from 2:00 to 10:00 in the morning. The variation value of cable force reaches 4.4% of the construction control cable force, which should be avoided from 8:00 to 20:00 in the construction control. In the construction control process of the Haihuang Bridge, the influence of temperature was fully considered, and well construction control effect is achieved.

Key words: cable-stayed bridge; composite girder; construction stage; heat conduction analysis; temperature effect; alpine region

0 引 言

日照作用下钢-混凝土组合梁斜拉桥温度分布复杂,钢梁、混凝土桥面板、斜拉索和桥塔由于材料传导率、比热容和结构形式不同,温度变化速率也各不相同,在各部件之间易形成整体温差,在各部件内部形成温度梯度。组合梁斜拉桥为多次超静定结构,施工周期长,影响因素多,各部件的有效温度和温度梯度会对其施工过程产生重要影响。

美国学者 William[1-2] 认为风、气温、太阳辐射和材料种类都会影响桥梁结构的温度场,并提出以气象资料为基础估计钢-混凝土组合梁温度场的分布。Emerson[3-4] 也提出了一种根据桥址遮荫气温来估算混凝土梁桥、钢梁桥和钢-混凝土组合梁桥有效温度的方法。刘兴法[5] 指出年温差、日照温差和骤然降温对桥梁结构有不同影响,其中日照温差的影响最为复杂。同时,国内在桥梁施工过程中也进行了较多的温度场实测研究[6-8],但仅能反映测点位置的温度情况,难以全面反映结构的温度分布。因而,采用热传导理论,结合有限元方法对桥梁各部件的温度场进行精细化模拟成为准确分析斜拉桥施工阶段温度效应的重要方法[9]。部分学者[10-13] 针对施工阶段温度作用下斜拉桥主梁、桥塔和拉索的温致响应进行了深入研究,把握了温度作用下斜拉桥各部件位移和内力的基本变化规律,但未提出具体的温度效应施工控制措施。西北极寒地区温度作用取值较规范更为不利,桥梁运营阶段会产生更大的温度效应[14-17]。对于地处中国西北高寒地区的组合梁斜拉桥,在太阳辐射更强、昼夜温差更大的气候环境下,温度效应对桥梁施工的影响则更为显著。

本文针对海黄大桥桥位区特有的高原高寒气候特点,以热传导理论为基础,搜集桥位处近5年的气象数据,对海黄大桥的钢梁、混凝土桥面板、斜拉索和桥塔等部件进行温度场精细化模拟。建立桥梁杆系模型,以有效温度和等效线性温差作为温度荷载,分析施工过程中温度作用对结构的影响,给出桥梁施工控制的最佳时间段,为同类桥梁施工控制提供参考和依据。

1 工程概况

海黄大桥位于青海省黄南藏族自治州,属青藏高原大陆性气候,气温垂直分布差异明显,太阳辐射强,日照时间长,日温差大。

海黄大桥主桥为双塔双索面半漂浮体系钢-混

凝土组合梁斜拉桥，全长1 000 m，边跨设辅助墩，跨径布置为 104 m+116 m+560 m+116 m+104 m，总体布置见图 1。图 2 为主梁标准横截面，桥面全宽 28 m，主梁采用双边“上”字形钢-混凝土组合结构。2 片“上”字形钢梁与小纵梁通过横梁连接，横梁间距为 4 m，连接形式采用摩擦型高强螺栓。“上”字形钢梁梁高 3.5 m。混凝土桥面板厚度分 280 mm 与 800 mm 两种，与钢梁的连接采用剪力钉连接，桥面铺装采用 9 cm 沥青混凝土。钢主梁采用对称悬臂吊装施工，预制桥面板通过现浇湿接缝连接成整体。桥塔为“H”形混凝土桥塔，20 号桥塔塔高 186.2 m，21 号桥塔塔高 193.6 m。斜拉索扇形布置，采用热挤聚乙烯成品钢索和低松弛镀锌高强钢丝，直径 7 mm，张拉控制应力 f_{pk}=1 770 MPa。

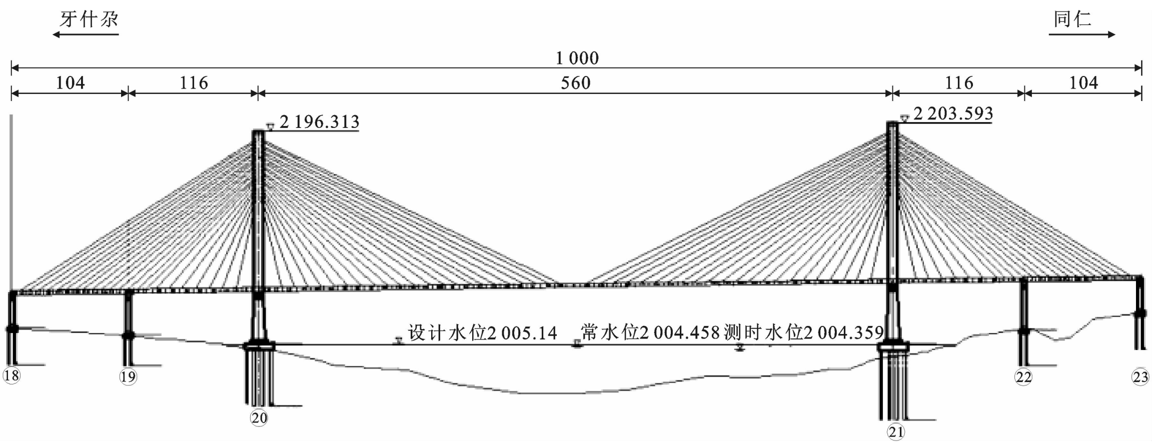


图 1　海黄大桥总体布置(单位:m)

Fig. 1　General Layout of Haihuang Bridge (Unit:m)

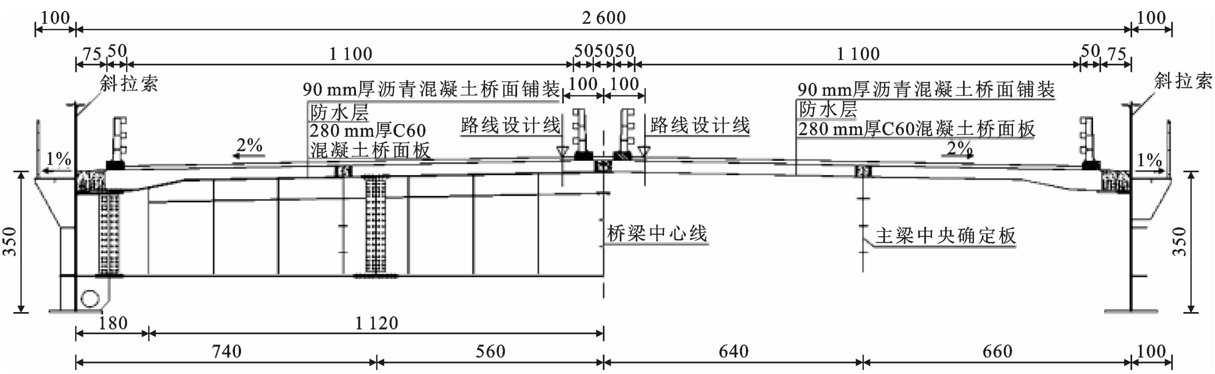


图 2　钢-混凝土组合梁标准横断面(单位:cm)

Fig. 2　Standard Cross Section of Steel-concrete Composite Girder (Unit:cm)

2　温度作用分析与计算

2.1　温度作用分析

桥梁结构温度场为三维热传导问题，但实测结果表明桥梁沿顺桥向的温差可以忽略[18]。因此，本文采用二维非稳态无内热源导热微分方程进行各部件的温度场分析。二维热传导微分方程为

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial \tau}=\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \tag{1}$$

式中：T 为温度函数；ρ 为密度；c 为比热容；λ 为导热系数；τ 为时间；x，y 为结构坐标。

桥梁各部件边界上的热交换方式如图 3 所示，主要包括太阳辐射、空气的对流换热及辐射换热 3 种方式[16]。结构表面总热流密度 q 可通过式(2)计算。

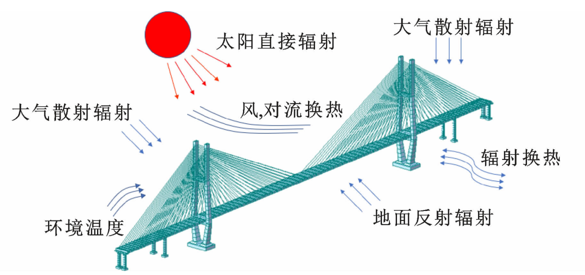


图 3　桥梁与环境的热交换方式

Fig. 3　Heat Exchange Manners Between Bridge and Environment

$$q=q_s+q_c+q_r \tag{2}$$

式中：q_s 为结构表面所吸收的太阳辐射热流密度；q_c 为结构表面与周围环境的对流换热热流密度；q_r 为结构表面与周围环境的辐射换热热流密度。

结构表面吸收的太阳辐射热流密度为

$$q_s=\alpha I_s \tag{3}$$

$$I_s=I_{bn}\cos(\theta)+I_{dh}\frac{1+\cos(\omega)}{2}+\xi(I_{bh}+I_{dh})\frac{1-\cos(\omega)}{2} \tag{4}$$

式中：α 为结构表面的短波吸收率；I_s 为结构表面的太阳辐射强度；I_{bn}，I_{bh} 分别为法向和水平面的太阳直接辐射强度；θ 为太阳入射角；I_{dh} 为水平面上的散射辐射强度；ω 为结构表面的倾角；ξ 为地面对太阳辐射的反射率。

结构表面与周围环境的对流换热热流密度为

$$q_c=h_c(T_s-T_a) \tag{5}$$

$$h_c=\begin{cases}4v+5.6 & v\leqslant 5\\ 7.15v^{0.78} & v>5\end{cases} \tag{6}$$

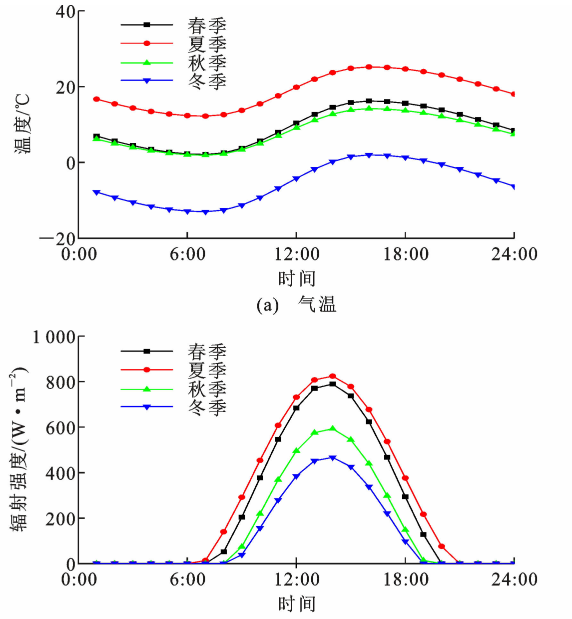
式中：T_s，T_a 分别为结构表面温度和大气温度；h_c 为对流换热系数，包含自然对流和风速产生的强制对流[19]；v 为风速。

结构表面与周围环境的辐射换热热流密度为

$$q_r=eC_s[(T_a+273)^4-(T_s+273)^4] \tag{7}$$

式中：e 为结构表面辐射率；C_s 为 Stefan-Boltzmann 常量，取 $5.67\times10^{-8}\ \mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot K^{-4}}$。

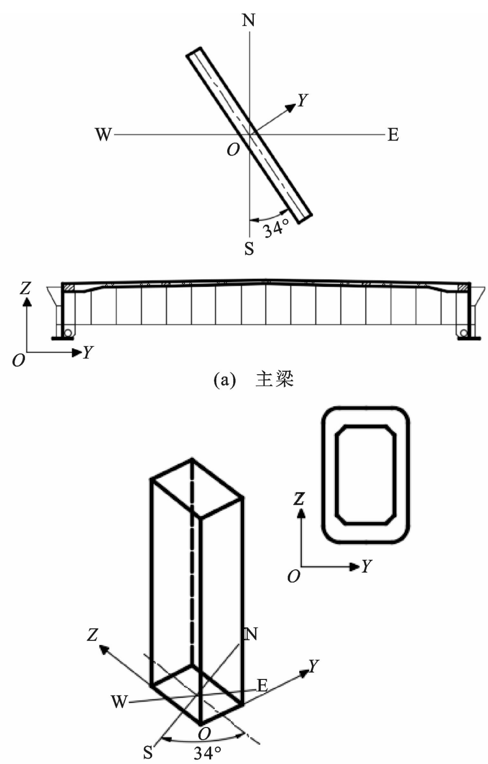
为分析高原高寒地区组合梁斜拉桥各构件温度作用的最不利时刻，选取桥位附近气象站点 5 年实测气象数据中各季节气象参数平均值作为典型气象参数，对桥梁各部件的温度场进行模拟。四季典型气象参数见表 1。各季节典型气象参数计算的气温和太阳辐射的日变化情况见图 4，风速取日平均风速这一定值。图 5 给出了主梁与桥塔截面的方位角，并规定了计算采用的局部坐标。



(a) 气温 (b) 太阳辐射

图 4 气象参数边界条件

Fig. 4 Boundary Conditions of Meteorological Parameters



(a) 主梁 (b) 桥塔

图 5 方位角及局部坐标

Fig. 5 Azimuth and Local Coordinates

表 1 气象数据

Table 1 Meteorological Data

季节	最高气温/℃	最低气温/℃	日太阳总辐射/(MJ·m^{-2})	平均风速/(m·s^{-1})
春	16.2	2.1	20.6	1.7
夏	25.2	12.2	23.6	1.5
秋	14.2	1.9	13.7	1.3
冬	2.0	−13.0	10.4	1.6

采用大型通用软件 ABAQUS 建立组合梁斜拉桥各部件的温度场二维分析模型，对各部件温度场进行一日 24 h 模拟。主梁选择 280 mm 与 800 mm 桥面板 2 种断面，斜拉索选择 LPES7-121，LPES7-211 和 LPES7-313 三种规格的拉索，桥塔选择上塔柱及下塔柱 2 种断面。各部件均采用四节点线性传热四边形单元(DC2D4)进行模拟。

材料的热工参数均选自文献[20]，[21]，[22]，其中钢梁及斜拉索外层的热挤聚乙烯套管均为白色

涂层，辐射吸收率一般采用 0.3。对于斜拉索，由于索股之间存在间隙被空气填满，因此在计算热工参数时应考虑拉索孔隙中的空气，通过体积加权的方式求得斜拉索的热工参数。各部件材料热工参数见表 2，有限元模型见图 6。初始时刻选取早上 6:00，此时刻截面温度最为均匀[23]。为避免初始温度选取的误差，对结构温度场同一日的温度进行反复迭代计算，选取一日首次温度闭合的计算结果，作为部件温度场计算的初始值。

表 2　材料热工参数

Table 2　Thermal Parameters of Material

热工参数	钢材	斜拉索	混凝土	HDPE 套管
密度 ρ/($\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$)	7 850	6 450	2 500	960
比热容 c/[$\mathrm{J \cdot (kg \cdot ℃)^{-1}}$]	480	560	860	2 300
热传导系数 k/[$\mathrm{W \cdot (m \cdot ℃)^{-1}}$]	54.00	44.00	2.20	0.33
线膨胀系数/10^{-5}	1.2	1.2	1.0	
吸收率	0.35		0.56	0.30
辐射率	0.80		0.80	0.80

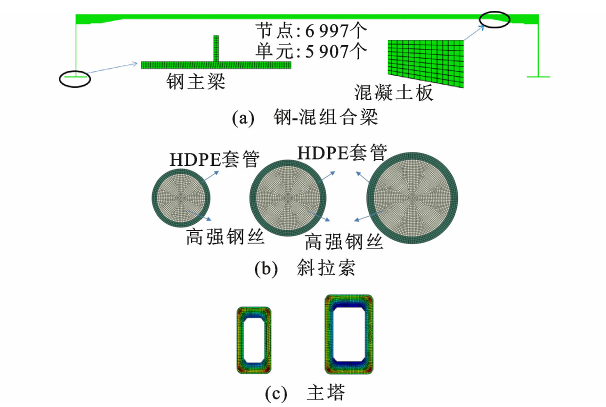


图 6　组合梁斜拉桥各部件有限元模型

Fig. 6　Finite Element Models of Different Parts of Composite Girder Cable-stayed Bridge

2.2　温度作用计算结果

组合梁斜拉桥在日照作用下将产生 2 种温度作用：一种是钢梁、桥面板、斜拉索、桥塔之间的部件温差，源于各部件材料与构造形式的差异；另外一种是各部件内部产生的温度梯度，源于各部件不同部分导热滞后性。桥梁各部件间温差采用有效温度计算，各部件的温度梯度采用等效的线性温差计算。等效线性温差是与截面非线性温度分布产生相同截面曲率的一种假想截面线性温差，能够反映截面非线性温度分布产生的温度变形大小[24-25]。竖向和横向的等效线性温差分别采用式(8)和式(9)进行计算。

$$\Delta T_z = \frac{\varphi_y H}{\alpha'} = \frac{H}{I_y}\iint T(y,z) z \mathrm{d}y\mathrm{d}z \tag{8}$$

$$\Delta T_y = \frac{\varphi_z B}{\alpha'} = \frac{B}{I_z}\iint T(y,z) y \mathrm{d}y\mathrm{d}z \tag{9}$$

式中：y，z 为结构坐标；φ_y，φ_z 分别为截面对 y 轴、z 轴的曲率；I_y，I_z 分别为截面绕 y 轴、z 轴的惯性矩；$T(y,z)$ 为截面温度分布函数；α' 为热膨胀系数；H，B 分别为截面高度和宽度；ΔT_y，ΔT_z 分别为横向和竖向的等效线性温差。

图 7 给出了夏季和冬季典型日斜拉桥各部件的有效温度随时间的变化情况。从图 7 可以看出，钢构件温度较混凝土构件更接近于环境气温，这是由于钢材导热速率远大于混凝土，且斜拉索较钢梁体积小，因此斜拉索温度变化较钢梁更快。钢梁、桥面板和斜拉索有效温度变化明显，而桥塔有效温度变化非常小，在各部件之间存在明显温差，且随时间不断变化。最大温差均出现于气温较高的下午时分，夏季和冬季最大温差分别出现于 16:00 和 15:00。钢梁与斜拉索温差相对较小，最大温差在夏季与冬季分别为 1.9 ℃和 1.8 ℃。桥面板与斜拉索的温差较大，夏季可达 10.8 ℃，冬季为 7.3 ℃，桥塔与斜拉索温差夏季为 10.2 ℃，冬季为 8.3 ℃。不同季节组合梁斜拉桥各部件有效温度的最大、最小值见表 3。

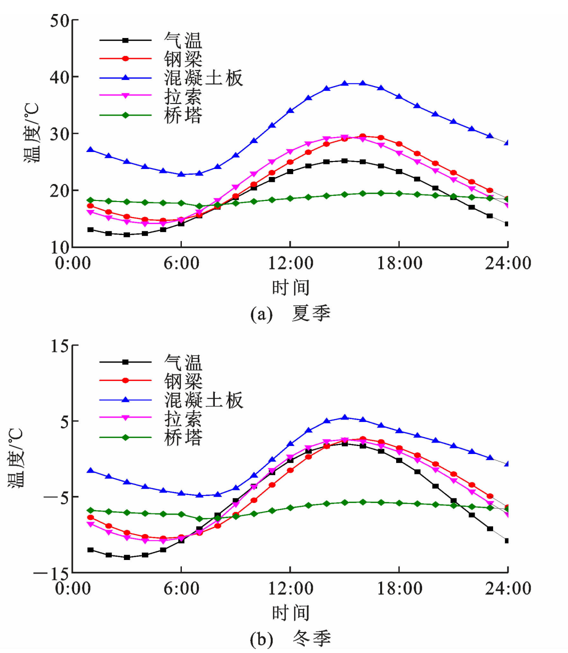


图 7　各部件有效温度

Fig. 7　Effective Temperature of Different Parts

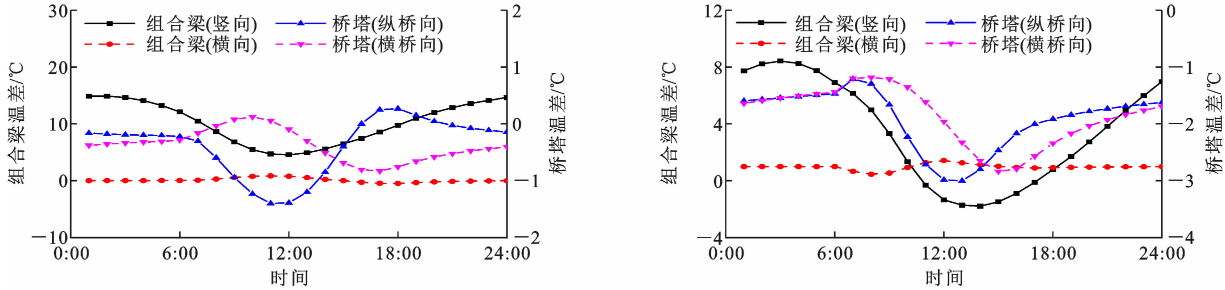
图 8 给出了夏季、冬季主梁与桥塔截面 2 个方向的等效线性温差。可以看出，组合梁以竖向温差

表 3 组合梁斜拉桥各部件有效温度最大、最小值

Table 3 Maximum and Minimum Effective Temperature of Different Parts of Composite Cable-stayed Bridge

季节	钢梁		混凝土板		拉索		桥塔	
	$T_{e,max}$/℃	$T_{e,min}$/℃	$T_{e,max}$/℃	$T_{e,min}$/℃	$T_{e,max}$/℃	$T_{e,min}$/℃	$T_{e,max}$/℃	$T_{e,min}$/℃
春	20.4	4.6	28.0	12.3	19.7	4.1	9.7	7.3
夏	29.5	14.7	38.8	22.8	29.4	14.1	19.5	17.2
秋	17.4	4.2	22.8	10.3	16.4	3.8	8.5	6.4
冬	2.6	−10.5	5.4	−4.9	2.6	−10.8	−5.7	−7.9

注：$T_{e,max}$，$T_{e,min}$分别为各部件有效温度最大值、最小值。



(a) 夏季 (b) 冬季

图 8 组合梁与桥塔等效线性温差

Fig. 8 Equivalent Linear Temperature Differences of Composite Girder and Tower

为主，横向温差则很小，其夏季与冬季变化规律相似，在无太阳辐射的夜晚，变化平缓，白天有太阳辐射时，大部分钢梁受到太阳直接照射，升温较混凝土板更快，使得组合梁竖向温差有所减小。桥塔纵向、横向温差相对较小，随太阳辐射强度增强，纵桥向和横桥向等效线性温差增大。各季节主梁与桥塔的等效线性温差的最大、最小值见表 4。可以看出，组合梁温差夏季最大，而桥塔最大温差出现在冬季。

3 施工阶段温度效应分析

极端天气一般发生在夏季和冬季，由第 2 节的分析可以看出，部件的有效温度及等效线性温差在夏季和冬季最为不利，以下将主要对组合梁斜拉桥在夏季和冬季施工时的温度效应进行分析。

本文采用 MIDAS/Civil 建立的杆系有限元模型，如图 9 所示。钢梁、桥面板和桥塔均采用梁单元模拟，斜拉索采用桁架单元模拟，采用双单元法模拟钢梁和桥面板的组合作用，斜拉索与桥塔和主梁之间的锚固作用采用刚性连接模拟。施工期间塔梁间采取临时固接措施，桥塔处边界条件约束主梁竖向与纵、横向位移，辅助墩处仅约束主梁竖向位移。为充分体现施工阶段温度作用对斜拉桥的不利影响，选取施工阶段最大双悬臂状态和最大单悬臂状态 2 个典型工况进行温度效应分析。将夏季和冬季温度荷载施加于杆系模型上，有效温度采用单元温度施加，等效线性温差采用截面温度梯度施加[26]。温度作用取值见图 7 和图 8，结构初始计算温度在夏季和冬季分别取 25 ℃和 0 ℃。

3.1 最大双悬臂工况温度效应分析

3.1.1 塔梁位移分析

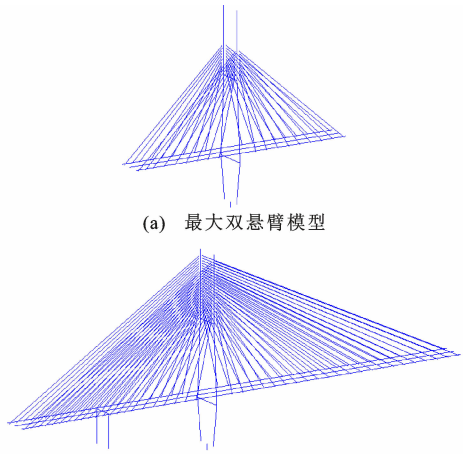
最大双悬臂状态下斜拉桥整体刚度较弱，温度对主梁位移的影响较显著。图 10 给出了温度作用下塔梁位移日变化情况，其中 δ_1 为主梁岸侧位移，δ_2 为主梁河心侧位移，δ_3 为塔顶偏位，δ_1，δ_2 向上为

表 4 组合梁与桥塔等效线性温差最大、最小值

Table 4 Maximum and Minimum Equivalent Linear Temperature Differences of Composite Girder and Tower

季节	组合梁(竖向)		组合梁(横向)		桥塔(纵向)		桥塔(横向)	
	$T_{l,max}$/℃	$T_{l,min}$/℃	$T_{l,max}$/℃	$T_{l,min}$/℃	$T_{l,max}$/℃	$T_{l,min}$/℃	$T_{l,max}$/℃	$T_{l,min}$/℃
春	14.4	2.0	0.8	−0.3	−0.4	−1.6	−0.3	−1.2
夏	14.9	4.6	0.9	−0.5	0.3	−1.4	0.1	−0.8
秋	11.2	0.8	0.9	0.1	−0.7	−1.9	−0.7	−1.8
冬	8.4	−1.8	1.4	0.5	−1.2	−3.0	−1.2	−2.8

注：$T_{l,max}$，$T_{l,min}$分别为塔梁等效线性温差最大值、最小值。

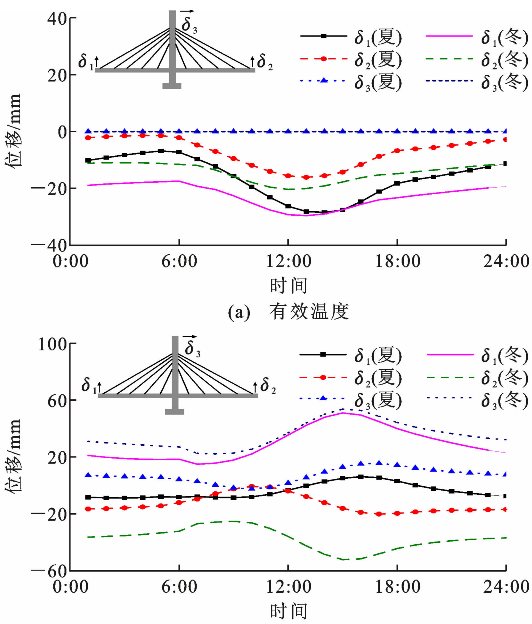


(a)　最大双悬臂模型

(b)　最大单悬臂模型

图 9　斜拉桥施工阶段有限元模型

Fig. 9　Construction Stage Finite Element Models of Cable-stayed Bridge



(a)　有效温度

(b)　温度梯度

图 10　最大双悬臂工况塔梁位移

Fig. 10　Displacement of Pylon and Girder Under Maximum Double Cantilever Stage

正，δ_3 偏向河心侧为正。可以看出，温度梯度对塔梁位移的影响明显大于有效温度，且夏季与冬季的规律是一致的。在有效温度的作用下，河岸侧向下位移值 δ_1 在 6:00—13:00 迅速增大，在 14:00—24:00逐渐减小，夏季变化幅度为 21 mm，冬季变化幅度为 12 mm。河心侧位移 δ_2 与 δ_1 的变化规律相同，夏季变化幅度为 14 mm，冬季变化幅度为 9 mm。有效温度作用下塔顶偏移量 δ_3 不变。在温度梯度作用下，δ_1 与 δ_2 的变化规律相反，冬季变化幅度大于夏季，冬季 δ_1 和 δ_2 分别为 27，36 mm。塔顶偏移量受温度梯度影响显著，冬季比夏季更为突出，日变化幅度达到 31 mm。最大双悬臂工况下塔梁最大位移如表 5 所示。

表 5　最大双悬臂工况塔梁最大位移

Table 5　Maximum Displacement of Pylon and Girder Under Maximum Double Cantilever Stage

季节	作用类型	悬臂端竖向位移/mm		塔顶水平位移/mm
		河心侧	河岸侧	
夏	有效温度	−16.0	−28.0	0.0
	温度梯度	−20.0	−8.8	15.0
冬	有效温度	−20.0	−29.0	0.0
	温度梯度	−52.0	50.0	53.0

3.1.2　斜拉索索力分析

温度作用下，主梁与主塔位移的变化会导致斜拉索索力的变化。S1，M1，S9，M9 施工控制索力分别为 3 425，3 390，2 899，3 489 kN。温度作用对斜拉索索力变化的影响如图 11 所示。可以看出，夏季与冬季拉索索力变化规律相似，拉索受温度梯度作用影响更为显著。有效温度作用下，短索 S1 和 M1 索力变幅值夏季较大，分别为 109，110 kN，均为施工控制索力的 3.2%。长索 S9 和 M9 索力变化幅值冬季较大，分别为 65，72 kN，为施工控制索力的 2.2%，2.1%。温度梯度作用下，S1，M1 索力变化幅值夏季较大，分别为施工控制索力的 3.1%，3.2%，S9 和 M9 索力变化幅值冬季较大，分别为施工控制索力的 3.4%，3.2%。温度作用下索力绝对值最大的变化值（变化最值）如表 6 所示，除夏季有效温度作用外，温度作用下长索变化最值均大于短索，温度梯度作用下 S9 索力变化值可达施工控制索力的 4.4%。

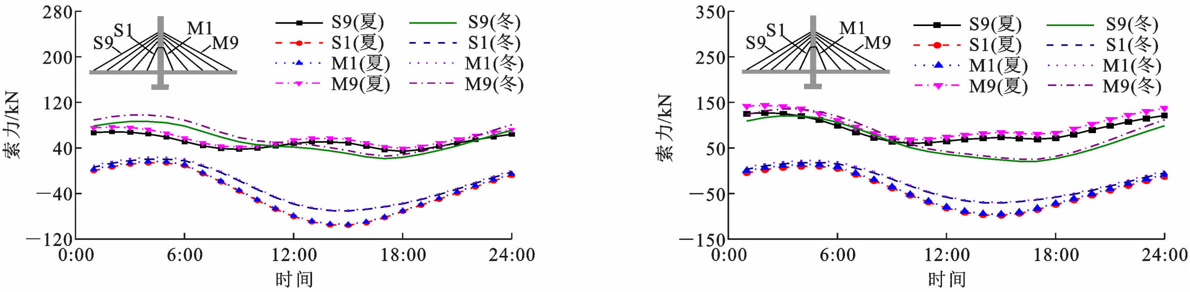
3.2　最大单悬臂工况温度效应分析

3.2.1　塔梁位移分析

最大单悬臂状态是主梁河心侧达到最大悬臂，河岸侧跨过辅助墩但未与过渡墩连接时的状态，主梁端部仍自由。此时温度效应将对边跨、中跨的合龙产生较大影响。

最大单悬臂状态是主梁河心侧达到最大悬臂，河岸侧跨过辅助墩但未与过渡墩连接时的状态，主梁端部仍自由。此时温度效应将对边跨、中跨的合龙产生较大影响。

在最大单悬臂状态下，塔梁位移在温度作用下的变化如图 12 所示。有效温度作用下，δ_1 变化幅值夏季为 29 mm，冬季为 30 mm；δ_2 变化幅值最大，夏季为 87 mm，冬季为 81 mm；塔顶偏移量 δ_3 的变化可忽略不计。在温度梯度作用下，塔梁位移变化



(a) 有效温度 (b) 温度梯度

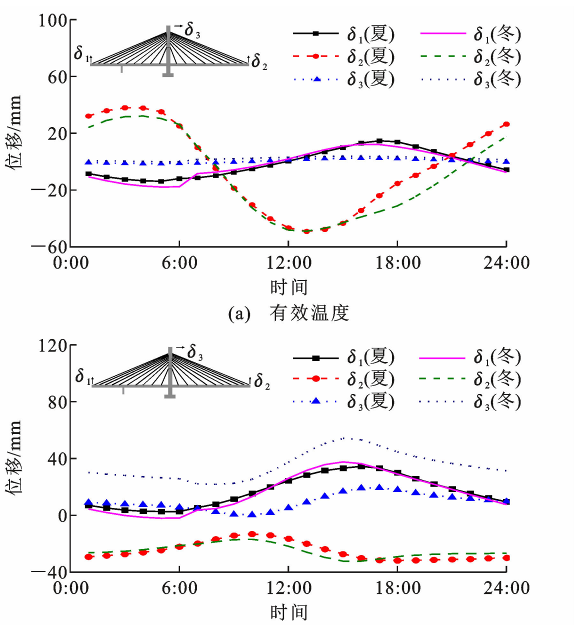
图 11 最大双悬臂工况斜拉索索力

Fig. 11 Cable Force of Stay Cable Under Maximum Double Cantilever Stage

表 6 最大双悬臂工况索力变化最值

Table 6 Maximum Variation Values of Cable Force Under Maximum Double Cantilever Stage

季节	索力参数	有效温度				温度梯度			
		S1	M1	S9	M9	S1	M1	S9	M9
夏	索力变化最值/kN	−95	−94	68	76	−98	−95	127	143
	索力变化百分比/%	−2.8	−2.8	2.4	2.2	−2.9	−2.8	4.4	4.1
冬	索力变化最值/kN	−70	−70	86	98	−70	−69	120	135
	索力变化百分比/%	−2.0	−2.1	3.0	2.8	−2.0	−2.0	4.1	3.9



(a) 有效温度

(b) 温度梯度

图 12 最大单悬臂工况塔梁位移

Fig. 12 Displacements of Pylon and Girder Under Maximum Single Cantilever Stage

表 7 最大单悬臂工况塔梁最大位移

Table 7 Maximum Displacement of Pylon and Girder Under Maximum Single Cantilever Stage

季节	作用类型	悬臂端竖向位移/mm		塔顶水平位移/mm
		河心侧	河岸侧	
夏	有效温度	−48	15	0
	温度梯度	−32	34	19
冬	有效温度	−48	12	0
	温度梯度	−33	37	54

较为显著，δ_1 夏、冬季日变化幅值分别为 32，39 mm，δ_2 夏、冬季日变化幅值分别为 19，15 mm，冬季塔顶偏位最大为 54 mm，日变化幅值为 32 mm。最大单悬臂工况下塔梁最大位移如表 7 所示。

3.2.2 斜拉索索力分析

拉索索力在温度作用下的变化如图 13 所示。可以看出，有效温度对短索索力的影响更为显著，而温度梯度则对长索索力影响更大。在有效温度作用下，短索 S1 索力夏季变化幅度为 147 kN，达施工控制索力的 4.4%；长索 S22 冬季索力变化幅度为 149 kN，占施工控制索力的 2.2%。温度梯度作用下，短索索力日变化值很小，可忽略不计，长索 S22 冬季索力日变化值为 96 kN，为施工控制索力的 1.4%。拉索索力在冬季的变化趋势与夏季一致，索力日变化值相对较小。温度作用下拉索索力变化的最大值见表 8。

4 施工控制建议

本文依托工程海黄大桥塔高 H_0 为 186.2 m，主梁标准节段长 12 m。根据《公路斜拉桥设计细则》(JTG/T 3365-01—2020)[27]中对施工阶段控制精度的要求，相邻节段相对高程误差不应超过节段长度的±0.3%，索塔的倾斜度应控制在 H_0/3 000 以内，且不大于 30 mm，斜拉索索力允许相对误差不宜大于 5%。即主梁控制精度应为±36 mm，索

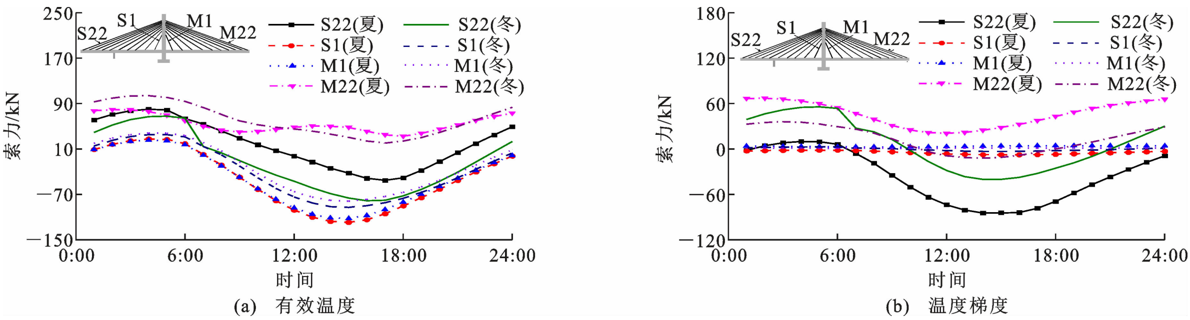


图 13　最大单悬臂工况斜拉索索力

Fig. 13　Cable Force of Stay Cable Under Maximum Single Cantilever Stage

表 8　最大单悬臂工况索力变化最值

Table 8　Maximum Variation Value of Cable Force Under Maximum Single Cantilever Stage

季节	索力参数	有效温度				温度梯度			
		S1	M1	S22	M22	S1	M1	S22	M22
夏	索力变化最值/kN	－119	－112	80	79	－93	－81	－81	103
	索力变化百分比/％	－3.5	－3.3	2.8	2.3	－2.7	－2.4	－2.8	3.0
冬	索力变化最值/kN	－8.0	4.0	－84.0	67.0	－3.3	1.3	55.0	36.0
	索力变化百分比/％	－0.20	0.10	－2.90	1.90	－0.10	0.04	1.90	1.00

塔偏位不应超过 30 mm，斜拉索索力允许误差不宜超过 5％。为保证上述施工控制精度目标，可通过合理安排梁段匹配、安装时间及索塔偏位和索力监测时间，减小由温度造成的施工误差，使成桥后线形和内力满足设计目标。

施工过程中由有效温度和温度梯度引起的总温度效应如图 14 所示。通过与规范限值对比得出的主梁标高、塔顶偏位及斜拉索索力的合理施工控制时间如表 9 所示。斜拉索索力变化值在规范允许范围内，但应避开对索力影响较大的 8:00—20:00。

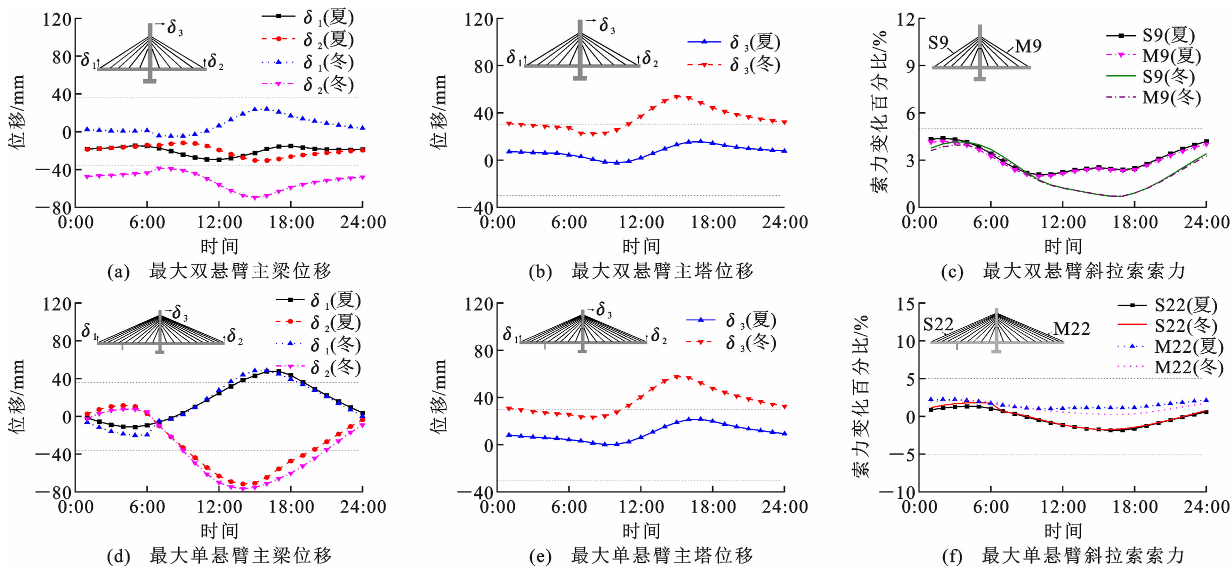


图 14　温度效应

Fig. 14　Temperature Effect

表 9　合理施工控制时间

Table 9　Reasonable Construction Control Time

季节	最大双悬臂				最大单悬臂			
	河心侧	河岸侧	塔顶	拉索	河心侧	河岸侧	塔顶	拉索
夏	全天	全天	全天	全天	20:00—9:00	21:00—13:00	全天	全天
冬	无	全天	2:00—10:00	全天	21:00—9:00	19:00—12:00	2:00—10:00	全天

根据该施工控制时间对海黄大桥进行施工控制，将成桥状态主梁标高、塔顶偏位、斜拉索索力实测值与理论值对比发现：主梁标高平均误差仅 24 mm，塔顶偏位误差为 13.5 mm，斜拉索索力平均相对误差为 2.4%，各项误差远小于施工误差允许值，保证了海黄大桥在高原高寒环境下的建设质量。

5 结 语

(1)春夏秋冬四季太阳辐射作用下，钢梁、桥面板、斜拉索和桥塔的有效温度与温度梯度变化规律相似，但数值相差较大，夏季最高，冬季最低。

(2)部件温差较大，混凝土桥面板与与斜拉索之间温差为 10.8 ℃，在斜拉桥设计细则规定的范围内；拉索与主塔的温差最大为 10.2 ℃，大于规范建议的温差值；组合梁的竖向线性温差为 14.9 ℃，超过中国规范取值。

(3)温度作用下，主梁标高、塔顶偏位、拉索索力等影响施工质量的主要参数日变化显著。主梁竖向位移日变化幅值最大为 87 mm，塔顶偏移量最大幅值为 54 mm，索力变化值达施工控制索力的 4.4%。

(4)在钢-混凝土组合梁斜拉桥的施工控制中主梁标高控制宜选择 19:00—6:00 进行，塔顶偏位监测宜选择凌晨 2:00—10:00，拉索索力控制应避开 8:00—20:00，各控制指标应考虑其日变化规律进行温度效应修正。

参考文献：

References:

[1] WILLIAM Z. Thermal Behavior of Composite Bridges-insulated and Uninsulated[J]. Highway Research Record, 1965(76): 231-253.

[2] WILLIAM Z. Simplified Design Check of Thermal Stresses in Composite Highway Bridges[J]. Highway Research Record, 1965(103): 10-13.

[3] EMERSON M. Bridge Temperatures Estimated from the Shade Temperature[R]. Wokingham: TRRL, 1976.

[4] EMERSON M. The Calculation of the Distribution of Temperature in Bridges[R]. Wokingham: TRRL, 1973.

[5] 刘兴法. 混凝土结构的温度应力分析[M]. 北京：人民交通出版社，1991.
LIU Xing-fa. Analysis on the Temperature Stress of Concrete Structure[M]. Beijing: China Communications Press, 1991.

[6] 郝 超. 大跨度钢斜拉桥施工阶段非线性温度影响研究[J]. 公路交通科技，2003，20(1)：63-66.
HAO Chao. Study on the Nonlinear Influence of Temperature on Long-span Steel Cable-stayed Bridge During Construction[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(1): 63-66.

[7] 何 翔，方诗圣，方 飞，等. 不同梯度温度作用下曲线桥梁的温度效应分析[J]. 合肥工业大学学报：自然科学版，2012，35(8)：1088-1092.
HE Xiang, FANG Shi-sheng, FANG Fei, et al. Analysis of Temperature Effects of Curved Bridge Under Different Gradient Temperature Load[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2012, 35(8): 1088-1092.

[8] 周 浩，易岳林，叶仲韬，等. 大跨度结合梁斜拉桥温度场及温度效应分析[J]. 桥梁建设，2020，50(5)：50-55.
ZHOU Hao, YI Yue-lin, YE Zhong-tao, et al. Analysis of Temperature Field and Thermal Effect in Long-span Composite Girder Cable-stayed Bridge[J]. Bridge Construction, 2020, 50(5): 50-55.

[9] 刘永健，刘 江，张 宁. 桥梁结构日照温度作用研究综述[J]. 土木工程学报，2019，52(5)：59-78.
LIU Yong-jian, LIU Jiang, ZHANG Ning. Review on Solar Thermal Actions of Bridge Structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(5): 59-78.

[10] 季德钧，刘 江，张瑑芳，等. 高原高寒地区钢-混凝土组合梁斜拉桥温度效应分析[J]. 建筑科学与工程学报，2016，33(1)：113-119.
JI De-jun, LIU Jiang, ZHANG Zhuan-fang, et al. Temperature Effect Analysis of Steel-concrete Composite Girder Cable-stayed Bridge in Arctic-alpine Region[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(1): 113-119.

[11] 蒲黔辉，熊 赳，王文东. 高低塔斜拉桥施工阶段温度效应分析[J]. 桥梁建设，2018，48(5)：21-26.
PU Qian-hui, XIONG Jiu, WANG Wen-dong. Analysis of Temperature Effect of Cable-stayed Bridge with Unequal Height Pylons at Construction Stage[J]. Bridge Construction, 2018, 48(5): 21-26.

[12] 李 伟. 独塔混合梁斜拉桥施工及运营阶段温度影响分析[J]. 中外公路，2020，40(6)：166-170.
LI Wei. Temperature Effect Analysis of Single Pylon Hybrid Girder Cable-stayed Bridge During Construction and Operation[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(6): 166-170.

[13] 曾 洋，冯仲仁. 混合梁斜拉桥塔梁同步施工中主塔偏位影响因素分析[J]. 中外公路，2017，37(6)：205-

209.
ZENG Yang, FENG Zhong-ren. Influence Factor Analysis on the Pylon Deviation During the Simultaneous Construction of Pylon and Girder of Hybrid Girder Cable-stayed Bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2017,37(6):205-209.

[14] 刘广龙,刘　江,刘永健,等.西北极寒地区混凝土箱梁温度场实测与仿真分析[J].公路交通科技,2018,35(3):64-71.
LIU Guang-long, LIU Jiang, LIU Yong-jian, et al. Measurement and Simulation of Temperature Field of Concrete Box Girder in Northwest Severe Cold Area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2018,35(3):64-71.

[15] 刘永健,刘　江.钢-混凝土组合梁桥温度作用及效应研究综述[J].交通运输工程学报,2020,20(1):42-59.
LIU Yong-jian, LIU Jiang. Review on Temperature Action and Effect of Steel-concrete Composite Girder Bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2020,20(1):42-59.

[16] 刘　江,刘永健,白永新,等.混凝土箱梁温度梯度模式的地域差异性及分区研究[J].中国公路学报,2020,33(3):73-84.
LIU Jiang, LIU Yong-jian, BAI Yong-xin, et al. Regional Variation and Zoning of the Temperature Gradient Pattern of Concrete Box Girder[J]. China Journal of Highway and Transport,2020,33(3):73-84.

[17] 刘　江,刘永健,房建宏,等.高原高寒地区"上"形钢-混凝土组合梁的竖向温度梯度模式[J].交通运输工程学报,2017,17(4):32-44.
LIU Jiang, LIU Yong-jian, FANG Jian-hong, et al. Vertical Temperature Gradient Patterns of 上-shaped Steel-concrete Composite Girder in Arctic-alpine Region[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2017,17(4):32-44.

[18] LIU J,LIU Y J,JIANG L,et al. Long-term Field Test of Temperature Gradients on the Composite Girder of a Long-span Cable-stayed Bridge [J]. Advances in Structural Engineering,2019,22(13):2785-2798.

[19] 张　宁,刘永健,刘　江,等.高原高寒地区 H 形混凝土桥塔日照温度效应[J].交通运输工程学报,2017,17(4):66-77.
ZHANG Ning,LIU Yong-jian,LIU Jiang,et al. Temperature Effects of H-shaped Concrete Pylon in Arctic-alpine Plateau Region[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2017,17(4):66-77.

[20] LIU J,LIU Y J,ZHANG Z J. Numerical Simulation on Thermo-mechanical Coupling Behavior of Early-age Concrete in the Large-scale Steel-concrete Connecting Segment of a Hybrid Girder Cable-stayed Bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25 (11):05020009.

[21] DILGER W H,GHALI A,CHAN M,et al. Temperature Stresses in Composite Box Girder Bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1983, 109 (6): 1460-1478.

[22] 闫　雯.钢管混凝土拱肋截面温度场及温度效应分析[D].西安:长安大学,2008.
YAN Wen. Analysis on Temperature Field and Its Effect of Concrete Filled Steel Tubular Rib Section [D]. Xi'an:Chang'an University,2008.

[23] LIU J,LIU Y J,ZHANG N,et al. Research on Temperature Action and Cracking Risk of Steel-concrete Composite Girder During the Hydration Process[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering,2020,20(2):47.

[24] 刘来君,贺拴海,宋一凡.大跨径桥梁施工控制温度应力分析[J].中国公路学报,2004,17(1):53-56.
LIU Lai-jun, HE Shuan-hai, SONG Yi-fan. Analysis of Temperature Stress in Control of Long-span Bridge Construction [J]. China Journal of Highway and Transport,2004,17(1):53-56.

[25] 张元海,李　乔.桥梁结构日照温差二次力及温度应力计算方法研究[J].中国公路学报,2004,17(1):49-52.
ZHANG Yuan-hai,LI Qiao. Study of the Method for Calculation of the Thermal Stress and Secondary Force of Bridge Structure by Solar Radiation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17 (1):49-52.

[26] 徐　达,王定文. MIDAS/Civil 桥梁结构分析技巧与实例[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
XU Da,WANG Ding-wen. Bridge Structure Analysis Skills and Examples Based on MIDAS/Civil[M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2015.

[27] JTG/T 3365-01—2020,公路斜拉桥设计规范[S].
JTG/T 3365-01—2020, Specifications for Design of Highway Cable-stayed Bridge[S].