

# 严寒地区办公建筑中庭空间参数化节能设计

耿 耿<sup>1</sup>, 耿 静<sup>2</sup>, 尹红梅<sup>1</sup>, 王崇杰<sup>1</sup>, 朱 能<sup>3</sup>

(1. 山东建筑大学 山东省绿色建筑协同创新中心, 山东 济南 250101; 2. 中铁工程设计咨询集团 济南设计院, 山东 济南 250022;  
3. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津, 300072)

**摘要:** 基于进一步丰富公共建筑方案阶段空间节能设计指标之目的, 结合严寒地区设置有中庭空间的办公建筑的采暖系统形式及用能特征, 提出了以严寒地区办公建筑中庭空间节能设计指标参数: 跨度高度比 (SHR)、空间建筑面积比 (ABAR) 和朝向加权暴露边长比 (OWELSR) 为核心的中庭空间节能参数化设计理论。以空间节能设计指标参数为变量, 以双向、三向和四向贯通型与非贯通型中庭为研究对象, 利用建筑能耗模拟软件 Design Builder 进行了严寒地区设置有不同尺度中庭空间的办公建筑全年动态建筑能耗模拟, 建立了空间节能设计指标参数与建筑采暖用能密度之间的定量关系, 通过建筑采暖用能密度的归一化拟合及对比分析, 分别定义了各个空间参数设计优选区间, 指导严寒地区办公建筑中庭空间在方案阶段的节能设计。

**关键词:** 建筑用能; 参数化设计; 中庭; 严寒地区; 空间节能设计指标

**中图分类号:** TU 243. 1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2020)06-0895-10

## Parametric design of atrium space energy efficiency for office building in severe cold region

GENG Geng<sup>1</sup>, GENG Jing<sup>2</sup>, YIN Hongmei<sup>1</sup>, WANG Chongjie<sup>1</sup>, ZHU Neng<sup>3</sup>

(1. Shandong Co-innovation Center of Green Building, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;  
2. China Railway Engineering Consulting Group, Jinan Design Institute, Jinan 250022, China;  
3. School of Environmental Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The purpose of this research is to enrich the space energy efficiency indicators for public buildings in schematic stage. In combination with the heating system form and energy consumption characteristics of office buildings with atrium space in severe cold region of China, span height ratio (SHR), atrium building area ratio (ABAR) and orientation weighted exposed length of side ratio (OWELSR) were proposed as space energy efficiency indexes. Annual dynamic building energy consumption simulation of office building with atrium in severe cold region of China was conducted by building energy simulation software Design Builder, considering space energy efficiency indexes as variables. The research objects are two-sided atrium, three-sided atrium and four-sided atrium in the form of penetrating or non-penetrating. Then the quantitative relationships of space energy efficiency index and annual heating energy utilization intensity (EUI) were established. The optimizing ranges of the space energy efficiency indexes were defined by EUI normalization fitting and contrastive analysis for better guidance of energy efficiency design of office building with atrium in severe cold region of China in schematic stage.

**Key words:** energy consumption in building; parameterization; atrium; severe cold region; space energy efficiency index

我国严寒地区冬季寒冷, 建筑热负荷需求远大于冷负荷需求, 设有中庭空间的公共建筑受中庭空间采暖形式及建筑透明围护结构气密性等因素影响, 采暖系统普遍存在能耗较高的问题<sup>[1-3]</sup>。近年来, 超低能耗建筑技术在我国建筑节能领域蓬勃发展, 通过提升建筑围护结构保温隔热材料的热工性能、增强建筑整体气密性等方式对建筑能效提升的

节能贡献率潜力挖掘空间已非常有限。相关研究表明, 在建筑方案阶段以空间节能设计为切入点建筑的平面形式、空间形态、空间组合形式等进行相应的限制, 能够通过降低建筑负荷实现建筑用能的高效性和合理性, 是进一步降低建筑能耗, 提升热舒适环境水平的重要途径<sup>[4]</sup>。

我国现行公共建筑节能设计标准中关于建筑方

收稿日期: 2020-06-19

修改稿日期: 2020-11-11

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51778350); 山东建筑大学博士科研基金资助项目(X18098Z)

第一作者: 耿 耿(1987—), 博士, 讲师, 从事绿色建筑与建筑节能研究. E-mail: genggeng18@sdjzu.edu.cn

案设计阶段空间参数的节能要求主要是对建筑体型系数的控制,且未针对中庭空间节能设计做具体要求。而国内外针对公共建筑中庭空间节能设计的研究主要集中在平面形态方向,通过建立不同的中庭平面形式的建筑模型,利用模拟软件与数值分析方法找寻最佳节能方案<sup>[5-7]</sup>。Wang 等<sup>[8]</sup>采用遗传算法研究了绿色建筑设计过程中建筑平面形状对建筑节能性能的影响,通过建立建筑模型,讨论了由建筑平面具有的可变性产生的对建筑节能性能的变化方式。Ourghi 等<sup>[9]</sup>通过分析建筑空间形态等参量对建筑能耗的影响程度,提出了一种预测建筑空间形态对冷热负荷影响的简化算法,并定义了“相对密度”的概念,作为衡量建筑空间参数与建筑能耗关系的指标参量。宋德萱和张崢<sup>[10]</sup>从建筑体型系数的角度研究其与能耗的定量关系,得出了高度反比律、联列递减律、 $L/A$  替代律和正方极限律等四个规律。对建筑体型系数和建筑高度、建筑平面尺寸、建筑排列方式的关系进行了探索,总结了控制建筑体型系数的节能设计建议。此类结论虽有借鉴意义,但也在一定程度上限制了公共建筑空间设计的灵活性。因此,引入组合参数无量纲比值形式的空间节能设计指标能够有效解决公共建筑中庭空间方案设计灵活性与普适性的矛盾,既不限限制建筑本身形式与功能的设计需求,同时又能精确引导建筑中庭空间节能设计策略实施。

基于以上研究背景,在满足现有公共建筑节能设计规范的前提下,本文提出了针对以设置中庭空间的办公建筑为代表的严寒地区公共建筑的空间节能设计指标参数。利用建筑能耗模拟软件进行以空间节能设计指标参数为变量的建筑能耗模拟,研究其与建筑全年采暖能耗之间的定量关系,确定空间节能设计指标参数取值的优选区间,指导严寒地区办公建筑中庭空间方案阶段节能设计。

## 1 中庭研究对象的确定

基于对常见的设置有中庭空间的办公建筑形式的统计与整理<sup>[11]</sup>,本研究对模拟中庭空间的对象进行了筛选和简化,最终选取了以下具有代表性的中庭空间与建筑整体的空间组合方式作为建筑能耗模拟的研究对象。综合以上因素选取双向、三向及四向贯通与非贯通中庭空间的典型案例进行模拟分析,以正方形作为中庭平面形式的代表,交叉组合共计 6 组试验。典型案例中庭空间与建筑整体的空间组合示意图见图 1。

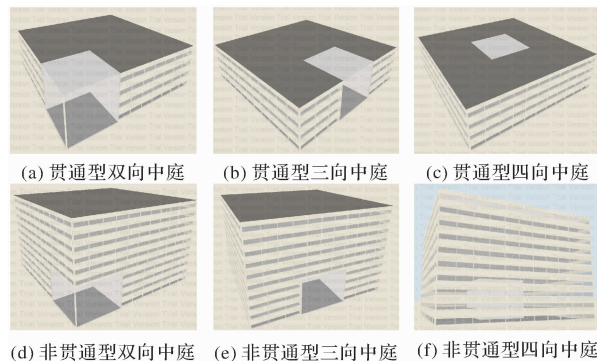


图 1 不同研究对象(中庭空间)分类

Fig. 1 Research subject (Atrium space) classification

## 2 建筑采暖能耗模拟边界条件设置

本研究着眼于空间指标参数变化时对建筑采暖能耗影响,这也是与建筑空间设计参数关系最为密切的、最不确定其变化规律的能耗,通过单位面积全年采暖能耗,即建筑采暖的用能密度(Energy Utilization Intensity, EUI)的形式展现。

Design Builder 软件模拟过程需手动输入边界条件,本文所建立的所有模型仅是建筑和中庭空间的形式不同,其他参数均相同。

(1)气象条件:以哈尔滨地区在中国标准气象数据库(Chinese Standard Weather Data, CSWD)中的典型气象年逐时气象数据作为模拟研究的气象输入参数。

(2)建筑围护结构基本信息:本研究的目的是为挖掘中庭空间设计的节能潜力,因此将建筑模型的围护结构热工性能及建造工艺设置为现有节能技术的最高标准,达到被动式超低能耗公共建筑的围护结构热工性能要求,中庭空间与室外接触的部分均设置为透明玻璃幕墙。模型建筑围护结构热工性能及构造方式及见表 1。

(3)建筑内扰及采暖系统信息:建筑内部信息包括人员、设备和灯光的密度、使用时间、散热方式等,实际运行中具有随机性,本文按照通常情况设置;建筑处于严寒地区,夏季不设集中空调系统,具体信息见表 2。

## 3 空间节能设计指标参数

目前写入公共建筑节能设计规范中的建筑空间指标参数仅有建筑体型系数一项,针对此指标参数对于建筑总体能耗的影响目前已经做过很多研究,但缺乏针对建筑内部特定空间设计参数对能耗影响的结论<sup>[13-15]</sup>。本文着眼于满足建筑空间设计功能和形式的角度提出一系列基于“尺度”概念的空间节能

设计指标参数,并在后文中进行由中庭空间全年动态负荷变化引起的建筑采暖 EUI 波动与空间节能设计指标参数之间相互关系的详尽研究,提出方案阶段建筑中庭空间节能参数化设计的合理建议.

表 1 模型建筑围护结构热工性能及构造方式<sup>[12]</sup>

Tab. 1 Building envelop configuration and thermal performance information				
围护结构名称	构造方式(由外到内)	厚度/mm	导热系数 $\lambda/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	传热系数/ $\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$
	建筑主体部分			
外墙	聚苯保温板 (EPS)	200	0.04	0.16
	加气混凝土砌块	250	0.22	
屋面	改性沥青防水	3	0.17	0.15
	挤塑聚苯板 (XPS)	200	0.03	
	钢筋混凝土板	100	1.74	
外窗	三玻两中空—LOW-E 玻璃			1.07
	窗墙面积比			0.4
	遮阳系数			0.3
玻璃顶棚	中庭空间			1.26
	三层中空夹胶玻璃			
玻璃幕墙	三玻两中空—LOW-E 玻璃			1.07
	窗墙面积比			1.0
	遮阳系数			0.15

表 2 建筑内扰及采暖系统信息<sup>[12]</sup>  
Tab. 2 Building internal disturbance and heating system information

参数类型	具体内容	设定值
人员	工作区人员密度/ $\text{人}\cdot\text{m}^{-2}$	0.15
	中庭空间人员密度/ $\text{人}\cdot\text{m}^{-2}$	0.04
	工作区人员活动类型	轻度劳动
	工作区人员散热量/ $\text{W}\cdot\text{人}^{-1}$	123
	中庭空间人员活动类型/ $\text{W}\cdot\text{人}^{-1}$	走路
	中庭空间人员散热量	180
设备	工作区设备密度/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	10
	中庭空间设备密度/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	0
照明	灯具类型	节能灯具
	工作区照明密度/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	9
	中庭空间照明密度/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	12
	工作区采暖设定温度/ $^{\circ}\text{C}$	20
采暖系统	中庭空间采暖设定温度/ $^{\circ}\text{C}$	18
	建筑采暖形式	地板辐射采暖
	建筑热源形式	市政热力网管
	采暖系统 EER	0.86
	采暖系统运行时间	10 月 15 日至次年 4 月 15 日
	采暖系统开启力度	工作日 早 8:00—18:00 (1), 节假日及其他 (0.5)

中庭空间跨度 (Span) 与空间高度 (Height) 的商,反映了中庭空间围合的空间形态特征<sup>[16]</sup>.

$$SHR=\text{span}/h \tag{1}$$

定义中庭空间自底面至顶面的垂直距离为高度,定义平面中垂直于正方向的最大水平距离为跨度.由于体形系数定义的建筑表面积与所围合体积之商中均含有建筑高度的一次项,因此其比值在抵消高度参量后仅剩余建筑进深和面宽之间带系数的倒数和.而 SHR 则表示了建筑中庭空间平面尺寸与立体高度之间的关系,从平面形式和空间形态两个角度阐述设计方案中的空间参数间的影响.与建筑体形系数不同,SHR 比在平面方向只有一个参量,因此设计师在确定设计平面形式之后,依然可以应用此指标参数找到最合适的空间节能设计取值区间.

为保证单一变量试验的原则,该指标只涉及非贯通型中庭(避免设置有贯通型中庭的办公建筑因建筑高度变化对建筑能耗产生的影响).为保证各指标参数模拟试验变量设置的前后一致性,将建筑层数设置为 10 层,层高统一设置为 4 m.中庭空间跨度与建筑平面跨度的比值设置为 2:5,中庭空间跨度取值范围为 20~40 m,步长设置为 4 m,共计 6 个数值;中庭空间高度为 12~22 m,步长设置为 2 m,共计 6 个数值.双向中庭空间均设置在建筑西南侧,三向中庭空间均设置在建筑南侧,四向中庭空间均设置在建筑平面几何中心.

(1) 跨度高度比 (SHR)

此指标参数代表了中庭空间自身的空间形式之间的关系.跨度高度比 (Height-Span Ratio, SHR) 是指

(2) 空间建筑面积比 (ABAR)

除了 SHR 这一比例关系外,中庭空间面积所占整体建筑面积的比例也是建筑方案设计过程中的

重要参数之一。空间建筑面积比 (Atrium Building Area Ratio, ABAR) 代表了中庭空间与建筑的空间组合形式的相互关系, 指的是处于建筑某方位的中庭空间所占平面面积与建筑整体所占平面面积的比值<sup>[17]</sup>。

$$ABAR = \frac{a_A}{a_B} \quad (2)$$

式中:  $a_A$  为中庭空间平面面积,  $m^2$ ;  $a_B$  为建筑整体平面面积,  $m^2$ 。

试验研究将建筑层高统一设置为 4 m, 设置贯通型中庭的建筑统一为 4 层; 设置非贯通型中庭的建筑统一为 10 层。将 ABAR 设置为 5 个水平, 分别为 0.44、0.25、0.16、0.11、0.08, 分别对应的中庭跨度与建筑跨度的比值为 2:3、1:2、2:5、1:3 和 2:7。中庭空间跨度取值范围设置为 20~40 m, 步长设置为 4 m, 共计 6 个数值。

### (3) 朝向加权暴露变长比 (OWELSR)

朝向加权暴露边长比 (Orientation Weighted Exposed Length of Side Ratio, OWELSR) 不同于以往相关研究中的单一变量参数指标, 该比值反映了加入朝向修正后的中庭空间暴露边长与建筑外围护结构暴露边长的比值。此指标参数将中庭空间的朝向量化, 使得空间朝向能够作为量化参数进行其与建筑采暖 EUI 的定量关系的讨论。

我国地域广阔, 热工气候分区较多, 很多学者针对具体城市, 特别是严寒地区城市基于冬季太阳辐射得热理论的朝向修正率进行了相关研究, 提供了比较合理的修正率取值范围<sup>[18]</sup>。为解决中庭空间朝向无法用量化参数定义的问题, 本研究依据现有相关严寒地区城市朝向太阳辐射得热对室内温度及建筑能耗影响的相关文献的总结<sup>[19-21]</sup>, 通过取算数平均值的方法推演出了哈尔滨地区办公建筑中庭空间各个朝向的修正补偿系数, 见表 3。

表 3 哈尔滨地区中庭朝向修正补偿系数

Tab. 3 Orientation compensation factor in Harbin

朝向	东向	南向	西向	北向
修正补偿系数 $\alpha$	0.27	0.40	0.23	0.10

根据朝向修正补偿系数定义了 OWELSR 的表达式:

$$OWELSR =$$

$$\frac{e_{East} \cdot \alpha_{East} + e_{West} \cdot \alpha_{West} + e_{South} \cdot \alpha_{South} + e_{North} \cdot \alpha_{North}}{E_{East} \cdot \alpha_{East} + E_{West} \cdot \alpha_{West} + E_{South} \cdot \alpha_{South} + E_{North} \cdot \alpha_{North}} \quad (3)$$

式中:  $e_{East}$ ,  $e_{West}$ ,  $e_{South}$ ,  $e_{North}$  为各朝向中庭空间暴露边长, m;  $E_{East}$ ,  $E_{West}$ ,  $E_{South}$ ,  $E_{North}$  为各朝向建

筑外围护结构暴露边长, m;  $\alpha_{East}$ ,  $\alpha_{West}$ ,  $\alpha_{South}$ ,  $\alpha_{North}$  为各朝向修正补偿系数。

通过此指标参数的提出及其与设置有中庭空间的建筑采暖 EUI 关系的研究, 可以将中庭空间的方位特征进行量化, 从而精确分析考虑中庭空间围护结构暴露面长在各个建筑朝向上对建筑能耗产生的影响。

试验研究将建筑层高统一为设置 4 m, 设置贯通型中庭的建筑统一为 4 层; 设置非贯通型中庭的建筑统一为 10 层。为保证单一变量试验的原则, 中庭空间跨度与建筑平面跨度的比值设置为 0.4, 中庭空间跨度区间为 20~40 m, 步长设置为 4 m, 共计 6 个数值; 相应的建筑总跨度取值范围为 50~100 m, 步长设置为 10 m, 共计 6 个数值。双向中庭空间有两个朝向暴露边, 位置分别设置为西南、西北、东南、东北 4 个朝向; 三向中庭有一个朝向暴露边, 位置分别设置为东、西、南、北 4 个朝向。

## 4 结果与讨论

### 4.1 空间节能设计指标参数与建筑采暖 EUI 的定量关系

#### 4.1.1 SHR 与建筑采暖 EUI 的定量关系

计算得出各组试验方案的 SHR 值见表 4。

表 4 跨度高度比计算表

Tab. 4 SHR calculation

中庭高度/m	中庭跨度/m					
	20/50	24/60	28/70	32/80	36/90	40/100
12	1.667	2	2.333	2.667	3	3.333
14	1.429	1.714	2	2.286	2.571	2.857
16	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5
18	1.111	1.333	1.556	1.778	2	2.222
20	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
22	0.909	1.091	1.273	1.455	1.636	1.818

以双向中庭为例, 双向中庭空间 6 组不同中庭跨度尺度下的建筑采暖 EUI 的试验研究结果如图 2 所示。由图可以得出 SHR 与建筑采暖 EUI 之间对应的 6 组定量关系, 经过散点图的曲线拟合均呈幂关系。为避免 SHR 相等但中庭跨度不同导致的 EUI 相同的结果, 将 SHR 与采暖 EUI 的定量关系式进行归一化处理, 引入中庭跨度  $S$  变量。将拟合方程系数  $a$  和  $b$  分别与  $S$  进行拟合回归可得: 系数  $a$  和  $b$  同  $S$  均呈线性关系。

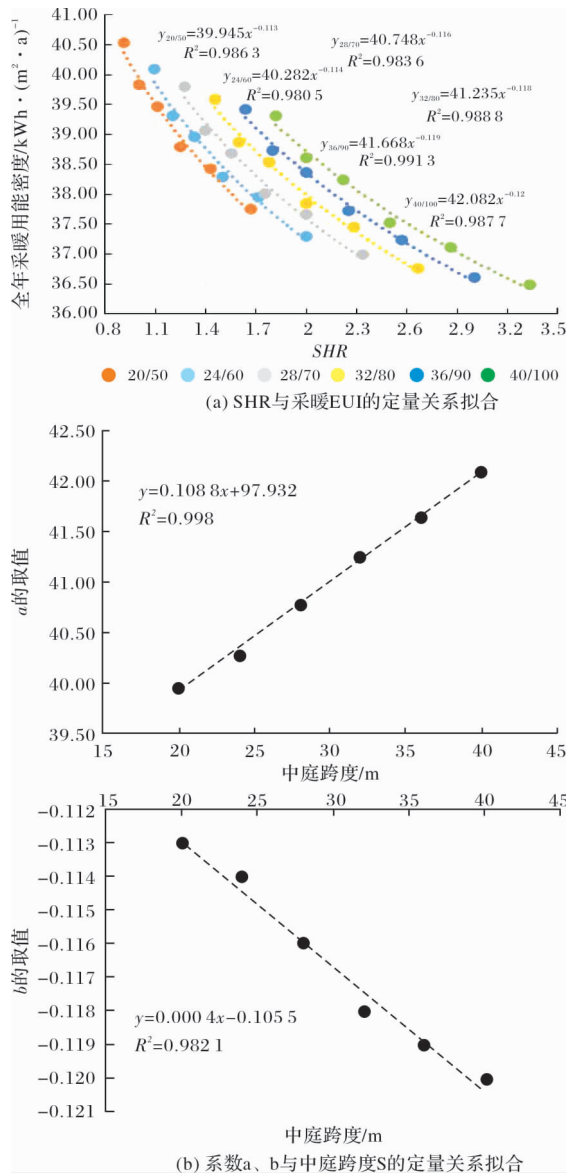


图 2 SHR 与建筑采暖 EUI 的定量关系

Fig. 2 Quantitative relationship of SHR and heating EUI

由此可以得出 SHR 与建筑采暖 EUI 的关系式, 为

$$\begin{cases} E_{\text{heating}} = a \text{SHR}^b \\ a = a_a S + b_a \\ b = a_b S + b_b \end{cases} \quad (4)$$

将  $a$ 、 $b$  两组表达式带入后, 可得

$$E_{\text{heating}} = (a_a S + b_a) \text{SHR}^{a_b S + b_b} \quad (5)$$

带入系数拟合值, 可得

$$E_{\text{heating}} = (0.1088S + 37.732) \text{SHR}^{-(0.0004S + 0.1055)} \quad (6)$$

在建筑空间设计的相关标准规范中, 实际工程情况通常将中庭空间的跨度高度比限定在 1~3 的范围内<sup>[22]</sup>, 因此在此条件下的任意尺寸的中庭空间均可以根据此关系式计算其建筑采暖 EUI, 以及边界范围(极大值和极小值)。因此, 此指标参数

可以指导任意建筑平面尺寸和高度的中庭空间节能设计。

按照上文方法计算得出三向中庭 SHR 与建筑采暖 EUI 的定量关系式为

$$E_{\text{heating}} = (0.1174S + 37.443) \text{SHR}^{-(0.0007S + 0.0959)} \quad (7)$$

四向中庭 SHR 与建筑采暖 EUI 的定量关系式为

$$E_{\text{heating}} = (0.1236S + 38.543) \text{SHR}^{-(0.0003S + 0.127)} \quad (8)$$

#### 4.1.2 ABAR 与建筑采暖 EUI 的定量关系

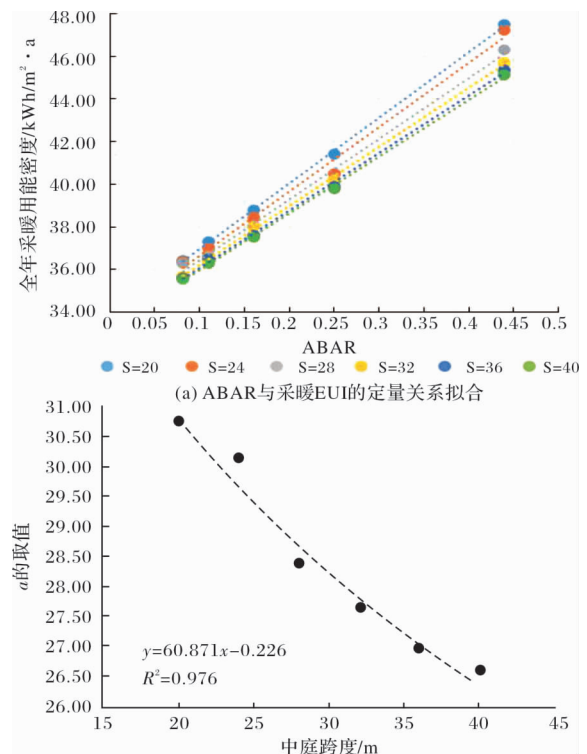
计算得出各组试验方案的 ABAR 值见表 5。

表 5 空间建筑面积比计算表

Tab. 5 ABAR calculation

ABAR	中庭跨度/m					
	20	24	28	32	36	40
建筑跨度/m						
0.44	30	36	42	48	54	60
0.25	40	48	56	64	72	80
0.16	50	60	70	80	90	100
0.11	60	72	84	96	108	120
0.08	70	84	98	112	126	140

以双向非贯通型中庭空间为例, 由图 3 可以得出双向非贯通型中庭空间 6 组试验研究中 ABAR 与建筑采暖 EUI 之间对应的 6 组定量关系, 经过散点图的曲线拟合均呈线性关系。将其中的系数  $a$  和  $b$  分别与中庭空间跨度  $S$  进行归一化分析可得: 系数  $a$  和  $b$  同  $S$  均呈乘幂关系。





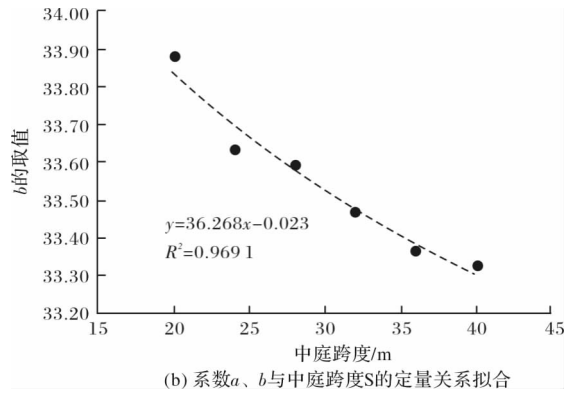


图3 ABAR与建筑采暖EUI的定量关系

Fig. 3 Quantitative relationship of ABAR and heating EUI

由此可以得出 ABAR 与建筑采暖 EUI 的关系式:

$$\begin{cases} E_{\text{heating}} = aABAR + b \\ a = a_a S^{b_a} \\ b = a_b S^{b_b} \end{cases} \quad (9)$$

将 a、b 两组表达式代入后可得

$$E_{\text{heating}} = a_a S^{b_a} \cdot ABAR + a_b S^{b_b} \quad (10)$$

带入系数拟合值可得:

$$E_{\text{heating}} = 60.871S^{-0.226} \cdot ABAR + 36.268S^{-0.023} \quad (11)$$

在相同的 ABAR 条件下,设计师可以设计不同的中庭空间跨度尺寸 S 以满足建筑的形式与功能需求,按照上文方法计算得出双向贯通型中庭空间 ABAR 与建筑采暖 EUI 的定量关系.

$$E_{\text{heating}} = 190.53S^{-0.015} \cdot ABAR + 29.236S^{-0.016} \quad (12)$$

三向非贯通型中庭空间 ABAR 与建筑采暖 EUI 的定量关系.

$$E_{\text{heating}} = 51.795S^{-0.182} \cdot ABAR + 36.545S^{-0.026} \quad (13)$$

三向贯通型中庭空间 ABAR 与建筑采暖 EUI 的定量关系.

$$E_{\text{heating}} = 192.75S^{-0.011} \cdot ABAR + 29.156S^{-0.018} \quad (14)$$

四向非贯通型中庭空间 ABAR 与建筑采暖 EUI 的定量关系.

$$E_{\text{heating}} = 83.289S^{-0.272} \cdot ABAR + 36.111S^{-0.023} \quad (15)$$

四向贯通型中庭空间 ABAR 与建筑采暖 EUI 的定量关系.

$$E_{\text{heating}} = 318.41S^{-0.124} \cdot ABAR + 22.757S^{0.0412} \quad (16)$$

#### 4.1.3 OWELSR 与建筑采暖 EUI 的定量关系

计算得出各组试验方案的 OWELSR 值见表 6.

表6 朝向加权暴露边长比计算表

Tab. 6 OWELSR calculation

双向中庭				三向中庭			
中庭暴露边长/建筑暴露边长				中庭暴露边长/建筑暴露边长			
东北	东南	西南	西北	东	北	西	南
0.148	0.268	0.252	0.132	0.216	0.08	0.184	0.32

在 OWELSR 指标参数的研究过程中,以不同方向的双向中庭和三向中庭空间的暴露边长 (Exposed Length of Side, ELS) 为试验变量,得到非贯通型中庭空间 6 组试验研究中 OWELSR 与建筑采暖 EUI 之间对应的 6 组定量关系(见图 4),经过散点图的曲线拟合均呈指数关系. 将其中的系数 a 和 b 分别与中庭空间暴露边长 ELS 进行归一化分析可得: 系数 a 和 b 的绝对值同 ELS 均呈乘幂关系.

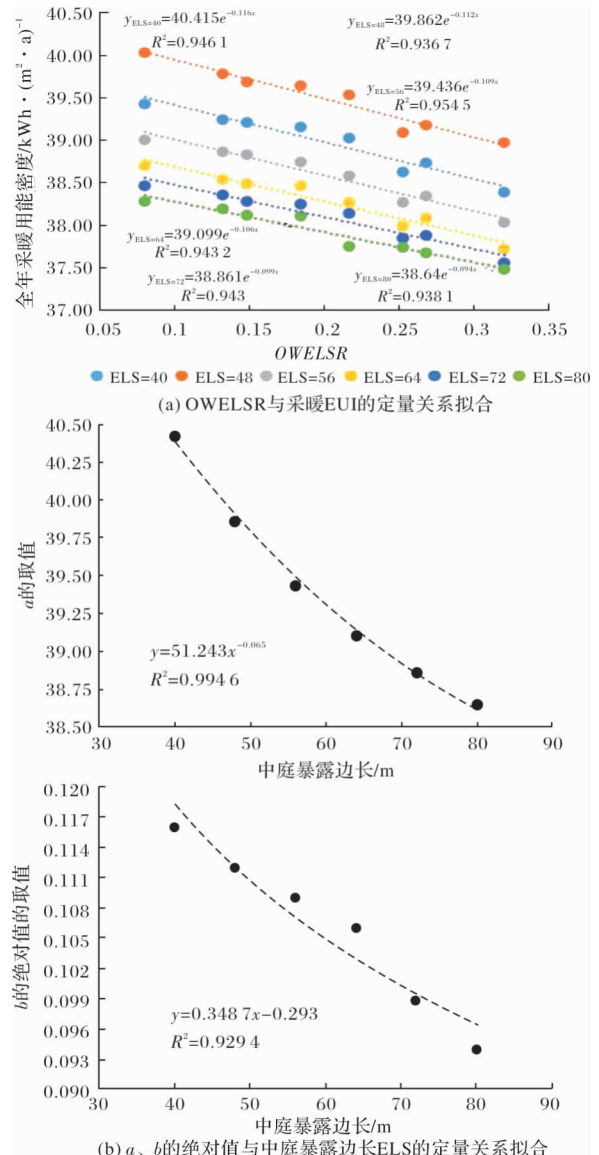


图4 OWELSR与建筑采暖EUI的定量关系

Fig. 4 Quantitative relationship of OWELSR and heating EUI

由此可以得出 OWELSR 同建筑采暖 EUI 的关系式.

$$\begin{cases} E_{\text{heating}} = ae^{-b\text{OWELSR}} \\ a = a_a ELS a^{-b} \\ b = a_b ELS b^{-b} \end{cases} \quad (17)$$

将 a、b 两组表达式代入后可得.

$$E_{\text{heating}} = (a_a ELS^{-b_a}) e^{-(a_b ELS^{-b_b}) \text{OWELSR}} \quad (18)$$

带入系数拟合值可得:

$$E_{\text{heating}} = (51.243 ELS^{-0.065}) e^{-(0.3487 ELS^{-0.293}) \text{OWELSR}} \quad (19)$$

在相同的 OWELSR 条件下, 设计师可以设计不同的中庭空间暴露边长 ELS 尺寸以满足建筑的形式与功能需求, 按照上文方法计算得出贯通型中庭空间 OWELSR 与建筑采暖 EUI 的定量关系.

$$E_{\text{heating}} = (69.75 ELS^{-0.043}) e^{-(1.1747 ELS^{-0.47}) \text{OWELSR}} \quad (20)$$

4.2 空间节能设计指标参数优选区间

4.2.1 SHR 优选区间

将三类不同的中庭空间 SHR 与建筑采暖 EUI 的定量关系进行相互比较分析, 结合建筑采暖 EUI 的极值计算结果(见表 7)可以得出以下结论: 中庭空间 SHR 与建筑采暖 EUI 定量关系的取值范围如表 7(图 5)所示. 如图 5 所示, 随着 SHR 的递增, 建筑采暖 EUI 呈下降趋势. 因此, 在实际工程中普遍应用的 SHR 取 1~3 范围内时, 从建筑节能角度上应尽量选择 SHR 较大的设计; 通过对三种中庭空间形式之间的相互比较能够得出, 四向核心中庭空间由于冬季无法直接获得太阳辐射透过玻璃幕墙的热量, 因此建筑采暖 EUI 最高, 双向中庭和三向中庭空间的建筑采暖 EUI 相近.

表 7 建筑采暖 EUI 极值与中庭跨度 S 和跨度高度比 SHR 的关系

Tab. 7 Maximum and minimum value of heating EUI with different

S and SHR of the atrium	中庭采暖 EUI/kWh · (m <sup>2</sup> · a) <sup>-1</sup>		
	双向中庭	三向中庭	四向中庭
S=20 m, SHR=1	39.91	39.79	41.02
S=40 m, SHR=1	42.08	42.14	43.49
S=20 m, SHR=3	35.01	35.27	35.44
S=40 m, SHR=3	36.83	36.78	37.33

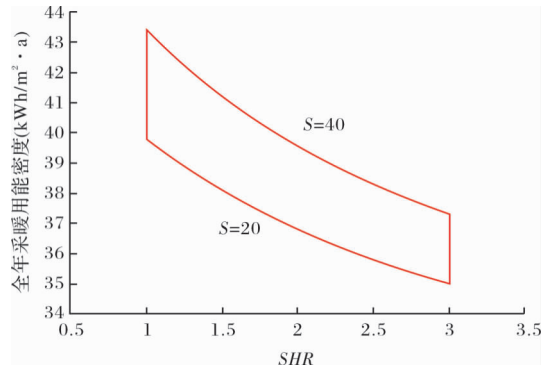


图 5 跨度高度比比优选区间

Fig. 5 Optimization range of SHR

4.2.2 ABAR 优选区间

非贯通型中庭空间的建筑采暖 EUI 较贯通型过渡空间有明显的节能优势, 这主要是因为围护结构蓄热性能的显著提升以及周边采暖房间的户间传热效应导致的. 因此在讨论 ABAR 的优选区间问题上, 选用非贯通型中庭空间的建筑采暖 EUI 极大值作为控制贯通型中庭空间 ABAR 的约束条件.

将本研究中的中庭跨度下限 S=20 与上限 S=40 分别带入贯通型与非贯通型中庭空间 ABAR 与建筑采暖 EUI 归一化处理后的定量关系表达式中, 可以得出各类型双向贯通型和双向非贯通型中庭空间的建筑采暖 EUI 的取值范围及相互关系.

表 8 建筑采暖 EUI 极值与中庭跨度 S 和空间建筑面积比 ABAR 的关系

Tab. 8 Maximum and minimum value of heating EUI with different S and ABAR of the atrium

	贯通型中庭采暖 EUI/kWh · (m <sup>2</sup> · a) <sup>-1</sup>			非贯通型中庭采暖 EUI/kWh · (m <sup>2</sup> · a) <sup>-1</sup>		
	双向中庭	三向中庭	四向中庭	双向中庭	三向中庭	四向中庭
S=20 m, ABAR=0	27.87	27.63	26.75	33.85	33.81	33.71
S=40 m, ABAR=0	27.56	27.29	26.57	33.32	33.20	33.17
S=20 m, ABAR=1	210.02	214.13	245.56	67.20	63.83	70.58
S=40 m, ABAR=1	207.83	212.37	228.10	59.76	59.67	63.71

如图 6 所示,无论贯通型中庭还是非贯通型中庭空间,建筑采暖 EUI 取值区域的上限均落在  $S=20$  时的曲线上,下限均落在  $S=40$  时的曲线上,说明在中庭平面面积与建筑平面面积比值相同时( $ABAR$  一定),优先选择尺寸较大的中庭空间.随着  $ABAR$  指标参数的递增,建筑采暖 EUI 呈现递增的趋势,因此从建筑节能角度出发尽量选取  $ABAR$  较小的中庭空间.

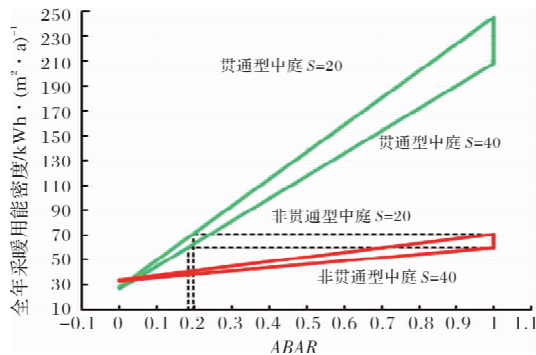


图 6 空间建筑面积比优选区间

Fig. 6 Optimization range of  $ABAR$

确定贯通型中庭空间  $ABAR$  取值上限的方法如下:以非贯通中庭空间  $ABAR=1$  时的建筑采暖 EUI 作为控制贯通型中庭空间  $ABAR$  取值的上限,分别以非贯通型中庭空间在  $ABAR=1$  时的建筑采暖 EUI 极大值和极小值( $S=20$  和  $S=40$ )为起点,作与  $X$  轴的平行线,于两平行线与贯通型中庭空间建筑采暖 EUI 的交点处分别作与  $X$  轴的垂线,两垂线与  $X$  轴的交点所对应的  $ABAR$  的取值即为贯通型中庭空间  $ABAR$  极大值的取值范围,在  $0.1826\sim0.1964$  之间.此结论为依据非贯通型中庭空间给出的贯通型中庭空间尺度设计的指导建议,推荐将贯通型中庭空间的  $ABAR$  控制在  $0.1826\sim0.1964$  (分别对应双向、三向及四向中庭空间形式)以下,能够有效降低建筑采暖 EUI.

4.2.3 OWELSR 优选区间

设置 OWELSR 指标参数的目的是将原本为朝向方位的定性概念进行合理量化,因此该参数的取值为非连续性的独立点.本研究将南、北、西、东、东北、西南、东南和西北 8 个中庭朝向用分别用 OWELSR 进行量化表示,即 OWELSR 共有 8 个取值.中庭空间暴露边长  $ELS$  的取值与其 OWELSR 相互独立,OWELSR 的大小表示的是中庭空间在相同的暴露边长  $ELS$  条件下设置在不同朝向上的等效暴露边长,暴露边长  $ELS$  本身不随该参数的变化而变化.

将本研究中的中庭跨度下限  $ELS=40$  与研究上限  $ELS=80$  分别带入贯通型与非贯通型中庭空间 OWELSR 与建筑采暖 EUI 的定量关系表达式中,可以得出贯通型和非贯通型中庭空间的建筑采暖 EUI 的区间范围及相互关系(见图 7).

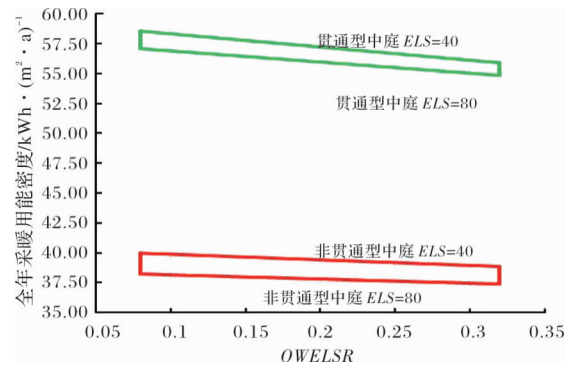


图 7 朝向加权暴露边长比控制的建筑采暖 EUI 取值区间

Fig. 7 Value range of heating EUI with OWELSR

无论在贯通型中庭空间还是非贯通型中庭空间中,能耗区域的上限均落在  $ELS=40$  时的曲线上,能耗区域的下限均落在  $ELS=80$  时的曲线上,说明在 OWELSR 取值一定时,优先选择尺寸较大的中庭空间.

随着 OWELSR 指标参数的递增,建筑采暖 EUI 呈现递减的趋势,因此从建筑节能角度出发尽量选取 OWELSR 较大的朝向设置中庭空间的位置,冬季有利于获得更长时间、更理想角度的太阳辐射得热的朝向更能够有效补偿其较大的热负荷,从而降低建筑采暖能耗.OWELSR 取值即代表对应的中庭空间朝向,因此推荐的严寒地区办公建筑中庭空间设置朝向次序见表 9.

表 9 中庭空间朝向设置推荐次序

Tab. 9 Recommendation on atrium orientation order of office building in severe cold region

1	2	3	4	5	6	7	8
南	东南	西南	东	西	东北	西北	北

5 结论

基于空间尺度概念提出严寒地区办公建筑中庭空间节能设计的三项指标参数:跨度高度比( $SHR$ )、空间建筑面积比( $ABAR$ )和朝向加权暴露边长比(OWELSR),通过数值模拟计算及归一化处理等方法,分别确定了节能设计指标参数  $SHR$ 、 $ABAR$  和 OWELSR 与建筑采暖 EUI 的定量关系的数学表达,给出了基于空间节能设计指标参数的严寒地区办公建筑中庭空间节能设计建议.



主要结论如下:

(1) 设置有四向中庭空间的办公建筑采暖 EUI 值最高, 设置有双向中庭和三向中庭空间的办公建筑采暖 EUI 水平相近, 略低于设置有四向中庭的办公建筑采暖 EUI 值。

(2) 在实际工程设计允许的范围内 ( $SHR$  取 1~3), 应优先选择  $SHR$  较大的设计方案。

(3) 优先选取  $ABAR$  较小的中庭空间设计方案; 贯通型中庭空间建筑采暖 EUI 值远高于非贯通型中庭空间建筑采暖 EUI 值; 贯通型中庭空间  $ABAR$  的节能设计极大值应控制在 0.182 6~0.196 4 之间。

(4) 严寒地区办公建筑中庭空间朝向设置推荐次序为: 南向、东南向、西南向、东向、西向、东北向、西北向、北向。

## 参考文献 References

- [1] ALDAWOUND A. The influence of the atrium geometry on the building energy performance[J]. Energy and Buildings, 2013, 57: 1-5.
- [2] TALENGHANI M, TENPIERIK M, DOBBELSTEEN A. Energy performance and thermal comfort of courtyard/atrium dwellings in the Netherlands in the light of climate change[J]. Renewable Energy, 2014, 63: 486-497.
- [3] DANIELSKI I, NAIR G, JOELSSON A, et al. Heated atrium in multi-storey apartment buildings, a design with potential to enhance energy efficiency and to facilitate social interactions[J]. Building and Environment, 2016, 106: 352-364.
- [4] 王南钰. 寒冷地区酒店中庭空间要素对物理环境及能耗的影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2016: 33-34.  
WANG Nanyu. Impact of space elements design on hotel atrium's physical environment and energy consumption[D]. Tianjin: Tianjin University 2016: 33-34.
- [5] WANG L, HUANG Q, ZHANG Q, et al. Role of atrium geometry in building energy consumption: The case of a fully air-conditioned enclosed atrium in cold climates, China [J]. Energy and Buildings, 2017, 151: 228-241.
- [6] NASROLLAHI N, ABDOLAHZADEH S, Litkohl S. Appropriate geometrical ratio modeling of atrium for energy efficiency in office buildings[J]. Journal of Building Performance Simulation, 2015(6): 95-104.
- [7] 杨延萍, 高旭聪, 杨素云. 广州地区高校图书馆中庭设计与节能[J]. 建筑节能, 2015, 43(4): 61-65.  
YANG Yanping, GAO Xucong, YANG Suyun. Library atrium building design and energy conservation in Guangzhou region[J]. Building Energy Efficiency, 2015, 43(4): 61-65.
- [8] WANG M, RIVARD H, ZMEUREANU R. Floor shape optimization for green building design[J]. Advanced Engineering Informatics, 2006(20): 363-378.
- [9] OURGHI R, AL-ANZI A, KRARTI M. A simplified analysis method to predict the impact of shape on annual energy use for office buildings[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(1): 300-305.
- [10] 宋德萱, 张峥. 建筑平面形体设计的节能分析[J]. 新建筑, 2000(3): 8-11.  
SONG Dexuan, ZHANG Zheng. Energy saving analysis of building plane shape design[J]. New Architecture, 2000 (3): 8-11.
- [11] MOOSAVI L, MAHYUDDIN N, GHAFAR N. Atrium cooling performance in low energy office building in tropics, a field study[J]. Building and Environment, 2015, 94: 384-394.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 近零能耗建筑技术标准: GB/T 51350-2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for nearly zero energy buildings: GB/T 51350-2019[S]. Beijing: China Architecture Publishing & Media Co. Ltd., 2019.
- [13] RUNDLE C A, LIGHTSTONE M F, OOSTHUIZEN P, et al. Validation of computational fluid dynamics simulation for atria geometries[J]. Building and Environment, 2011, 46: 1343-1353.
- [14] VUJOSEVIC M, FURUNDZIC A. The influence of atrium on energy performance of hotel building[J]. Energy and Buildings, 2017, 156: 140-150.
- [15] PAN Y Q, LI Y M, HUANG Z Z, et al. Study on simulation methods of atrium building cooling load in hot and humid regions[J]. Energy and Buildings, 2010, 42: 1654-1660.
- [16] 芦原义信, 外部空间的设计[M]. 尹培桐, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985: 25-26.  
Yoshinobu ASHIHARA, Exterior design in architecture [M]. YIN Peitong Translated. Beijing: China Building Industry Press, 1985: 25-26.
- [17] 余琼. 方案阶段建筑节能参数化设计方法研究[D]. 北京: 清华大学建筑学院, 2011: 34-35.  
YU Qiong. Study on building energy-saving parametric design method in schematic stage[D]. Beijing: School of Architecture, Tsinghua University, 2011: 34-35.
- [18] VUJOSEVIC M, POPOVIC M. The comparison of the energy performance of hotel buildings using PROMETHEE decision-making method[J]. Thermal Science, 2015(20): 1654-1660.

- [19] 贾倍煌. 供暖负荷朝向修正率的计算方法[J]. 暖通空调, 1992(4): 3-8.  
JIA Beihuang. Calculation method of heating load orientation correction rate[J]. Journal of HV & AC, 1992(4): 3-8.
- [20] 张方遒. 采暖热负荷朝向修正率的计算[J]. 煤气与热力, 2001, 21(1): 84-86.  
ZHANG Fangqiong. Calculation method of heating load orientation correction rate[J]. Journal of GAS & HEAT, 2001, 21(1): 84-86.
- [21] 吴继晨. 关于采暖热负荷朝向修正的研究[J]. 低温建筑技术, 2001(4): 40-42.  
WU Jichen. Research on heating load orientation correction [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2001(4): 40-42.
- [22] 耿耿. 基于温度分布的寒地办公建筑高大过渡空间节能设计研究[D]. 天津: 天津大学, 2016: 19-20.  
GENG Geng. Research on office building space energy efficiency design of large transitional space in severe cold area of China[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016: 19-20.

(编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 894 页)

- [10] 祁强, 张戎令, 胡锐鹏, 等. 系杆拱桥施工过程索力变化规律试验研究[J]. 铁道科学与工程报, 2017, 14(9): 1893-1898.  
QI Qiang, ZHANG Rongling, HU Ruipeng, et al. Experimental study on cable tension variation of tied arch bridge during construction process[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(9): 1893-1898.
- [11] 邓晓, 王起才, 张戎令, 等. 系杆拱桥吊杆索力张拉的模型试验研究[J]. 铁道建筑, 2015(6): 17-19.  
DENG Xiao, WANG Qicai, ZHANG Rongling, et al. Experimental study on cable tension of tied arch bridge model[J]. Railway Engineering, 2015(6): 17-19.
- [12] 沈锐利, 房凯, 官快. 单根吊索断裂时自锚式悬索桥强健性分析[J]. 桥梁建设, 2014, 44(6): 35-39.  
SHEN Ruili, FANG Kai, GUAN Kuai. Robustness analysis of self-anchored suspension bridge with loss of a single sling[J]. Bridge Construction, 2014, 44(6): 35-39.
- [13] STAROSSEK U, HABERLAND M. Approaches to measures of structural robustness[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011, 7(7-8): 625-631.
- [14] ZOLI T, WOODWARD R. Design of long span bridges for cable loss[J]. IABSE Symposium Report, 2005, 90(9): 17-25.
- [15] ZHANG K, LEI J Q, CAO S S. Influence of damage of suspenders on static performances of steel-box stacked arch bridge [J]. Advanced Materials Research, 2013, 655-657: 1864-1867.
- [16] 孙广俊, 李正嘉, 章世祥, 等. 结构损伤对系杆拱桥结构性能的影响研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(2): 61-66.  
SUN Guangjun, LI Zhengjia, ZHANG Shixiang, et al. Study of influences of structural damage on structural performance of tied arch bridge[J]. Bridge Construction, 2018, 48(2): 61-66.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢管混凝土拱桥技术规范: GB50923-2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.  
Ministry of Housing and Urban rural Development of The People's Republic of China. Technical code for concrete filled steel tubular arch bridge; Gb50923-2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [18] 国家铁路局. 铁路桥涵混凝土结构设计规范: TB/10092-2017 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.  
National Railway Administration. Specification for design of concrete structures for railway bridges and culverts; TB/10092-2017[S]. Beijing: China Planning Press, 2017.

(编辑 吴海西 沈 波)