

折线型平面办公建筑的低能耗形态

应小宇^{1,2}, 皇甫凡雨¹, 王 贵³, 金佳云³

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙大城市学院 国土空间规划学院, 浙江 杭州 310015;

3. 浙大城市学院 计算机与计算科学学院, 浙江 杭州 310015)

摘要: 针对折线型平面的办公建筑, 选取其中最基本的“一折”平面作为研究对象, 通过收集以杭州、上海为主的折线型建筑案例的数据, 以面宽、进深和折角等基础参数作为生成平面形态的边界条件; 借助 Python 工具进行数学建模, 生成不同形式的“一折”平面建筑模型; 利用基于 EnergyPlus 平台的 Designbuilder 能耗软件对各模型进行全年能耗动态模拟; 通过斯皮尔曼系数法进行相关性分析, 得到影响能耗最大的两个平面形态参数, 面宽进深比 M_1 和斜进深 M_2 。研究表明, 一折平面存在形态临界点, 面宽进深比的临界点为 7.6, 斜进深的临界点为 32 m。通过数据拟合得到形态参数 M_1 、 M_2 与总能耗 E_1 相互映射的变化趋势, 即 M_1 - M_2 - E_1 的等高线图。

关键词: 夏热冬冷地区; 折线型办公建筑; 能耗模拟; 平面形态参数; 回归拟合

中图分类号: TU243.2

文献标志码: A

Low-Energy Consumption Form of Polyline Plane Office Building

YING Xiaoyu^{1,2}, HUANGFU Fanyu¹, WANG Gui³,
JIN Jiayun³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. College of Spatial Planning and Design, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, China; 3. College of Computer and Computing Science, Hangzhou 310015, China)

Abstract: This paper selects the most basic “one-fold” plane as the research object for office buildings. It takes basic parameters such as width, depth, and angle as the boundary conditions to generate the plane shape by collecting the data of polyline cases mainly in Hangzhou and Shanghai. Using Python tools for mathematical modeling, it generates different forms of “one-fold” plane building models. Using the Designbuilder energy consumption software based on the EnergyPlus platform, it dynamically simulates the annual energy consumption of

each model. Using the Spearman coefficient method for correlation analysis, it obtains two plane morphological parameters that have the greatest impact on energy consumption, the width-to-depth ratio M_1 , and the oblique depth M_2 . Finally, performing regression fitting and regression evaluation on the model data, it obtains the changing trend of the mutual mapping between the morphological parameters M_1 , M_2 and the total energy consumption E_1 , and draws the contour map of M_1 - M_2 - E_1 accordingly.

Keywords: hot summer and cold winter area; polyline office building; energy consumption simulation; plane shape parameters; regression fitting

根据国际能源机构所做的“模拟走向应用”研究结果显示, 建筑节能 40% 以上的潜力, 来自于建筑方案初期的规划设计^[1-2]; 比利时权威专家 Pieter de Wilde 通过对 67 座建筑的调研, 发现在所应用的 303 项绿色建筑技术中, 57% 的技术措施需要在规划设计和方案设计阶段中落实^[3-4]。目前, 方案设计阶段的建筑性能模拟已经越来越受到重视^[5]。在设计之初有许多关于建筑形态优化的研究, 建筑师通过降低建筑体形系数这种最直接的方式来降低建筑能耗^[6]。但是, 研究表明, 夏热冬冷地区办公建筑体形系数越大, 建筑的被动容积率越大, 利用自然能源的潜力越大, 建筑能耗越低^[7]。同时, 建筑节能与可再生能源利用通用规范^[8]对严寒和寒冷地区公共建筑的体形系数提出了具体要求, 但未对夏热冬冷地区公共建筑的体形系数提出要求。可见, 体形系数不能百分百反映能耗。通过敏感性分析与统计学方法可以发现, 平面规模、建筑高度、平面形态和屋顶形态等要素与能耗有较高关联度^[9]。在方案设计阶

收稿日期: 2022-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(51878608); 浙江省自然科学基金(LY22E080004)

第一作者: 应小宇, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为绿色建筑设计。E-mail: yingxiaoyu@hzcu.edu.cn

通信作者: 皇甫凡雨, 硕士生, 主要研究方向为办公建筑低能耗形态生成方法。E-mail: 22112125@zju.edu.cn



论文
拓展
介绍

段,建筑平面形态的确定尤为重要,它不仅决定了建筑尺寸和围护结构朝向,也在建造成本、运行能耗、美学效果等方面影响建筑性能^[10]。建筑平面的可变性对建筑性能产生多种影响^[11],且平面中各评价参数之间相互制约^[12],为研究带来一定的难度。已有学者研究了不同建筑平面形态与能耗之间的关系^[13]。在科威特,一字形、L形、U形和H形建筑平面的长宽比被考虑在内以评估办公建筑形状对节能效率的影响^[14]。其中,折线型平面可灵活应用于不规整的用地形状、成组团的建筑体块,在现有办公建筑中广泛使用。然而,在建筑平面类型上,目前仅有对长方形和L形平面有研究,对于折线型平面建筑的研究较少。对建筑平面和能耗关系的研究中,引入参数化思想是一种有效的方法。本文从平面生成方法出发,突破了以往参数界限,提取与能耗明显相关的形态参数作为研究对象进行分析。

综上,基于低能耗目标下的办公建筑平面设计,本文收集夏热冬冷地区折线型办公建筑的数据,运用参数化方式控制建筑平面形态,确定面宽、进深和折角为基础参数,决定边界条件;借助Python计算机语言进行数学建模,生成32种折线型平面建筑模

型,并在DesignBuilder软件中进行三维建筑建模,通过EnergyPlus平台对模型进行全年能耗动态模拟,记录建筑全年总能耗数据 E_t 和制冷能耗 E_c ;对数据进行斯皮尔曼相关性分析,得到影响能耗最大的两个平面形态参数为面宽进深比 M_1 和斜进深 M_2 。将模型数据进行多维回归拟合和回归评价,得到形态参数与能耗的相互关系。

1 研究方法

折线型平面办公建筑低能耗形态研究流程如图1所示。夏热冬冷地区折线型办公建筑常用尺寸,通过几何分析生成折线型平面办公建筑布局数学模型,用DesignBuilder绘制建筑三维模型,建立模型库,通过EnergyPlus进行全年能耗逐时动态模拟,记录三维模型对应的能耗,通过斯皮尔曼系数的相关性分析,确定与能耗最高的两个影响参数,同时控制建筑形态,使用多元回归和样本插值得到两个参数与能耗之间的函数关系式,找到建筑形态与能耗之间的映射关系。

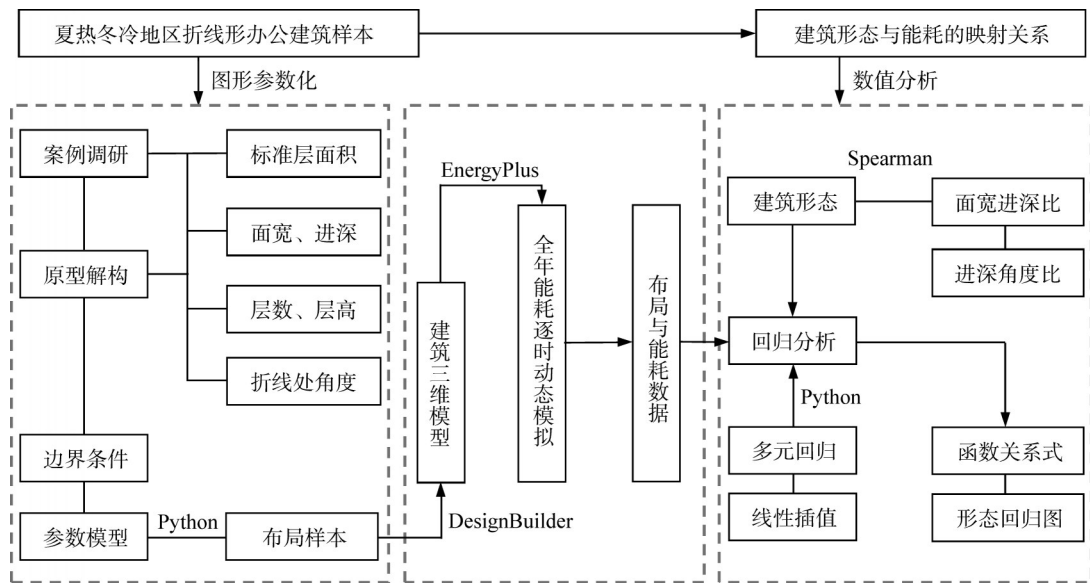


图1 研究路线

Fig. 1 Research route

1.1 案例调研及建筑模型

本文在建筑网站(archdaily、gooood等)和Google地图中,选取夏热冬冷地区20例折线型办公建筑作为研究样本,调研其形态的平面面积、面宽、进深、层数、层高与折角(表1),发现大部分折线型建筑的标准层面积为1 000~2 000 m²,边长大多为

20~80 m;样本里转折后的进深长度与转折前的进深长度大都相同,不考虑进深变化,进深大多为10~30 m,建筑层数在4~17层范围内,建筑高度大多为16~58 m,折线处角度范围为60~150°。

在建筑单体方案设计中,主要确定建筑平面形状、尺寸、层高、层数、窗墙比等参数。本文主要研究

表 1 20 例夏热冬冷地区折线形办公建筑平面数据
Tab. 1 Plan data of 20 cases of polyline office buildings in hot summer and cold winter area

| 类型 | 建筑名称 | 标准层面积/m ² | 四周面宽/m | 进深/m | 层数/层 | 高度/m | 折角/(°) |
|---|-------------------|----------------------|----------------------|------|------|------|---------|
|  a 墅园大楼 | 杭州墅园大楼 | 1 380 | 27,45,43,56 | 15 | 7 | 28 | 60 |
| | 杭州云河大厦 | 1 430 | 29,44,40,52 | 16 | 6 | 26 | 60 |
|  b LOFT49 创意城市先行区 | 杭州 LOFT49 创意城市先行区 | 1 590 | 28,46,44,58 | 16 | 14 | 57 | 90 |
| | 上海南丹路 1 号办公楼 | 860 | 44,31,30,16 | 14 | 10 | 35 | 90 |
| | 福建 IGG 游戏公司总部 | 1 490 | 13,34,40,60 | 20 | 4 | 16 | 90 |
|  c 个推总部 | 成都微芯药业原创新药一期生产基地 | 2 825 | 53,73,65,85 | 21 | 6 | 19 | 90 |
| | 杭州个推总部设计 1 | 1 685 | 30,38,39,45 | 22 | 10 | 38 | 120 |
| | 杭州个推总部设计 2 | 1 870 | 19,44,45,59 | 22 | 10 | 38 | 120 |
| | 杭州个推总部设计 3 | 1 710 | 28,35,43,49 | 22 | 10 | 38 | 120 |
| | 上海尚博金融中心 | 2 000 | 23,48,32,53 | 26 | 20 | 72 | 120 |
|  d 凯宾国际大厦 | 中国新型建筑材料工业杭州设计研究院 | 860 | 20,24,33,37 | 15 | 6 | 22 | 150 |
| | 上海凯宾国际大厦 | 3 035 | 30,57,45,71 | 23 | 10 | 36 | 90 |
| | 杭州赞成中心 | 1 900 | 23,53 | 27 | 17 | 51 | 90 |
| | 上海飞利浦大中华区总部园区 | 2 680 | 41,52,15,68 | 26 | 5 | 21 | 90 |
|  e 漕河泾办公研发园区“华鑫天地”仪电综合办公楼 | 南京红枫科创园区 A1 楼 | 3 725 | 54,72,63,76,21 | 28 | 6 | 21 | 90,100 |
| | 上海漕河泾办公研发园区“华鑫天地” | 2 155 | 47,62,18,50 | 18 | 9 | 36 | 90,100 |
|  f 和成大楼 | 浙江航空产学研基地 | 2 910 | 29,43,41,59,57,88 | 18 | 6 | 21 | 90,105 |
| | 上海和成大楼 | 1 360 | 15,15,31,31,21,25 | 19 | 4 | 18 | 130 |
| | 杭州水务控股公司 | 1 525 | 34,46,17,25,31,42 | 15 | 12 | 58 | 125,135 |
|  g 张江集电港一期 | 上海张江集电港一期 | 19 000 | 28,36,31,41,49,40,66 | 13 | 7 | 30 | 60,110 |

建筑平面, 所以将建筑面积、高度、窗墙比等条件定量化, 即设定标准层面积为 1 200 m², 楼层总数为 10 层, 每层高度为 3.6 m, 总高度 36 m, 建筑总面积 12 000 m²。

1.2 原型解构及参数化

办公建筑中最常见的是矩形平面, 但因地块形状、建筑组合、功能划分、美学形式等需求, 矩形平面会衍生出不同的形式。本研究根据转折次数, 将平面原型系统性地解构。如图 2 所示, 矩形平面将通过转折一次、二次、三次等形成新的平面类型。除了

矩形平面的办公建筑以外, 通过案例收集发现, 单次转折的平面(以下简称为“一折”平面), 具有较高的场地适应性、建筑之间布局的灵活性以及室内空间的丰富性。因此, 本文以一折平面建筑为例, 研究建筑平面与能耗之间的关系。

为实现办公建筑中一折平面的参数化, 对简化后的折线型平面进行几何分析, 将数与形产生联系, 进行数学建模。如图 3 所示, 以平面的西南角为坐标原点, 记为 A 点(0, 0), 以逆时针方向, 依次用线段连接其点 B(x₁, y₁)、点 C(x₂, y₂)、点 D(x₃, y₃)、点

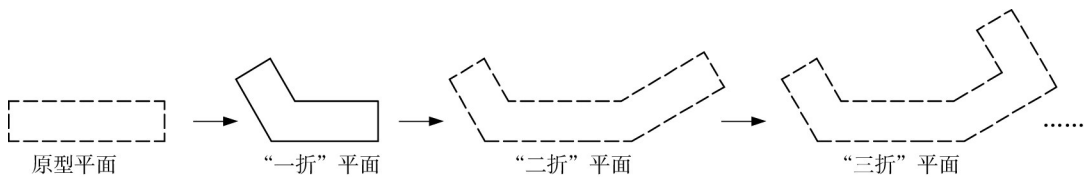


图2 折线型办公建筑平面原型及发展

Fig. 2 Plane prototype and development of polyline office building

$E(x_4, y_4)$ 、点 $F(x_5, y_5)$, 构成一个封闭的一折平面。建筑朝向统一设定为正南北, 初步设定朝正南方向的边长为面宽 L_1 , 进深为 L_2 。因 $\text{Rt}\triangle ADH \cong \text{Rt}\triangle ADG$, 两个直角三角形完全相等, 所以一折平面中

梯形 $ADEF$ 可以通过翻转与四边形 $ABCD$ 重新组合, 形成矩形平面, 且面积不变。分析得到, 当面积一定时, 一折平面形状由3个形态参数控制, 分别是面宽 L_1 、进深 L_2 与转折处角度 α 。

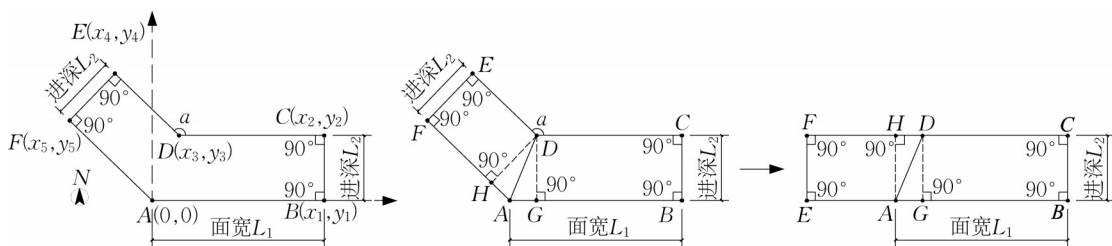


图3 一折平面形态参数化

Fig. 3 Parameterization of one-fold plane shape

将案例调研的数据作为建筑模型参数的边界条件, 如表2所示, 以使得算法生成的模型尽可能接近实际案例。实验中, 当标准层面积确定为 $1\,200\text{ m}^2$ 时, 根据样本数据, 只需确定3个基本参数的边界条件, 以此在Python软件中建立建筑平面模型对应的数学模型, 将其可视化后得到32组一折平面布局, 作为研究对象。

表2 生成平面模型的边界条件

Tab. 2 Boundary conditions for planar models

| 参数 | 范围 | 步长 |
|------------------|--------|----|
| 面积/ m^2 | 1 200 | 0 |
| 面宽/m | 20~80 | 10 |
| 进深/m | 10~30 | 10 |
| 角度/ $^\circ$ | 60~150 | 30 |

1.3 能耗模拟与数据处理

研究中选取建筑类型为办公建筑, 模拟时根据规范^[8]对办公建筑作息的要求设置空调、照明、新风系统、电气设备逐时使用率及人员在室率, 如图4所示。

为减少其他因素的干扰, 根据规范^[10]设定能耗模拟各项参数, 如表3所示。建筑模拟地点为浙江省杭州市, 层高3.6 m, 10层, 建筑总高度36 m, 标准层面积为 $1\,200\text{ m}^2$, 窗墙比设为0.3, 窗台高度0.8 m, 窗高1.5 m, 窗宽1.2 m; 空调系统采用带新风系统的风机盘管, 风冷式冷水机组, 制冷系数(COP)为

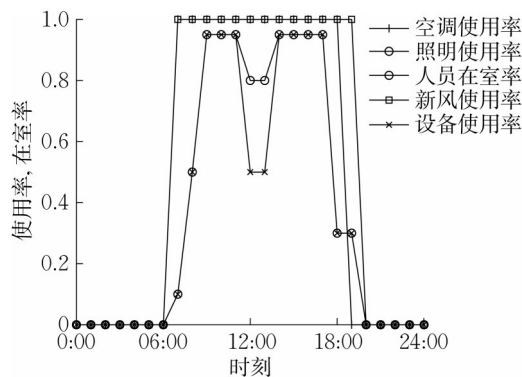


图4 空调、照明、新风、设备使用率及人员在室率

Fig. 4 Air conditioning, lighting, fresh air, equipment utilization and room rate

3.00; 热源为燃气锅炉, 锅炉热效率为0.92; 制冷起始温度为 $28\text{ }^\circ\text{C}$, 降低至 $26\text{ }^\circ\text{C}$; 采暖起始温度为 $12\text{ }^\circ\text{C}$, 升高至 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。平均新风量为人均 $30\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$; 年假14 d, 周一至周五为工作日。

建筑建造周期长, 个体差异性大, 使用周期不同, 通过仪器对实物与能耗之间的规律进行研究较为困难, 因此采用DesignBuilder建模软件, 对面宽 L_1 、进深 L_2 、转折角度 α 、全年能耗 E_1 、制冷能耗 E_2 进行建模与能耗分析, 结果如表4所示。

在标准层面积一定的情况下, 基础参数 L_1 、 L_2 和 α 控制平面形态, 但其所包含的信息具有不充分性与

表 3 建筑能耗模拟参数条件

Tab. 3 Simulation parameter conditions for building energy consumption

| 建筑模型参数 | | 建筑室内参数 | |
|--------|-----------------------|--------|--|
| 建筑类型 | 办公建筑 | 制冷温度 | 28℃→26℃ |
| 模拟地点 | 浙江省杭州市 | 采暖温度 | 12℃→20℃ |
| 层高 | 3.6 m | 室内除湿 | 90 %→40 % |
| 层数 | 10 层 | 生活热水 | 0.2 L·m ⁻² ·d ⁻¹ |
| 窗墙比 | 0.3 | 设备散热 | 15 W·m ⁻² |
| 建筑总高度 | 36 m | 人员密度 | 0.111 m ⁻² |
| 标准层面积 | 1 200 m ² | 目标照度 | 300 lux |
| 总建筑面积 | 12 000 m ² | 照明功率密度 | 8 W·m ⁻² |

片面性。如在建筑设计中,不同项目的建筑面积往往是不同的,研究长度参数意义不大;在不同长度参数条件下不同的角度对应的能耗变化规律不明显。因而在原有的基础参数上(L_1 、 L_2 和 α)加工生成新变量进行数据挖掘与筛选。

研究采用斯皮尔曼系数法进行相关性分析^[15],

其中因长度和角度计量方式不同,引入三角函数。斯皮尔曼公式如下:

$$\rho=1-\frac{6\sum d_i^2}{n(n^2-1)}$$

(1)

式中: ρ 为相关系数; n 为样本容量; d_i 为两个变量的等级的差值。

在众多生成参数中选取两个新参数,即面宽进深比 L_1/L_2 (M_1)和斜进深 $L_2/\sin \alpha$ (M_2),作为研究建筑平面与能耗相关的设计变量,相关结果见表5。

因为 M_1 与 M_2 在众多新参数中相关系数最高,所以选取这两个参数作为研究一折平面形态的变量。 M_1 可以控制一折平面的比例,而非具体数值,在实际设计中适应性更高, M_2 则可以控制一折平面的转折方向和进深。 M_2 在图形上与图5中的AG、GD、DH和HA 4条线段相同;在一折平面的折角为锐角或钝角时,与进深构成三角关系,称其为“斜进深”。

表 4 一折平面设计参数与建筑能耗

Tab. 4 One-fold plane design parameters and building energy consumption

| 序号 | L_2/m | L_1/m | $\alpha/(\text{°})$ | 体形系数 | $E_1/(\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2})$ | $E_2/(\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2})$ |
|----|----------------|----------------|---------------------|------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 10 | 50 | 90 | 0.24 | 109.03 | 34.78 |
| 2 | 10 | 50 | 120 | 0.24 | 108.62 | 34.66 |
| 3 | 10 | 50 | 150 | 0.24 | 107.21 | 33.95 |
| 4 | 10 | 60 | 60 | 0.24 | 108.42 | 33.31 |
| 5 | 10 | 60 | 90 | 0.24 | 108.09 | 33.56 |
| 6 | 10 | 60 | 120 | 0.24 | 109.56 | 34.92 |
| 7 | 10 | 60 | 150 | 0.24 | 110.71 | 36.06 |
| 8 | 10 | 70 | 60 | 0.24 | 107.57 | 33.28 |
| 9 | 10 | 70 | 90 | 0.24 | 108.02 | 33.92 |
| 10 | 10 | 70 | 120 | 0.24 | 107.80 | 34.04 |
| 11 | 10 | 70 | 150 | 0.24 | 106.84 | 33.70 |
| 12 | 10 | 80 | 60 | 0.24 | 108.64 | 32.74 |
| 13 | 10 | 80 | 90 | 0.24 | 108.25 | 33.05 |
| 14 | 10 | 80 | 120 | 0.24 | 107.64 | 33.50 |
| 15 | 10 | 80 | 150 | 0.24 | 106.66 | 33.54 |
| 16 | 20 | 20 | 120 | 0.16 | 103.45 | 29.42 |
| 17 | 20 | 20 | 150 | 0.16 | 102.54 | 28.92 |
| 18 | 20 | 30 | 90 | 0.16 | 103.30 | 29.30 |
| 19 | 20 | 30 | 120 | 0.16 | 102.99 | 29.06 |
| 20 | 20 | 30 | 150 | 0.16 | 102.33 | 28.77 |
| 21 | 20 | 40 | 60 | 0.16 | 102.96 | 29.04 |
| 22 | 20 | 40 | 90 | 0.16 | 102.79 | 28.60 |
| 23 | 20 | 40 | 120 | 0.16 | 103.54 | 29.19 |
| 24 | 20 | 40 | 150 | 0.16 | 103.89 | 29.66 |
| 25 | 20 | 50 | 60 | 0.16 | 102.55 | 28.34 |
| 26 | 20 | 50 | 90 | 0.16 | 102.21 | 28.30 |
| 27 | 20 | 50 | 120 | 0.16 | 102.04 | 28.40 |
| 28 | 20 | 50 | 150 | 0.16 | 101.93 | 28.51 |
| 29 | 30 | 20 | 120 | 0.14 | 102.18 | 28.17 |
| 30 | 30 | 20 | 150 | 0.14 | 101.76 | 27.92 |
| 31 | 30 | 30 | 120 | 0.14 | 101.70 | 27.79 |
| 32 | 30 | 30 | 150 | 0.14 | 101.54 | 27.77 |

| 表 5 斯皮尔曼相关性分析 | | |
|--------------------------------------|-------|-------|
| Tab. 5 Spearman correlation analysis | | |
| 参数 | E_1 | E_2 |
| L_1/L_2 | 0.75 | 0.71 |
| $(L_2/\sin \alpha)$ | 0.81 | 0.73 |

2 研究结果与分析

DesignBuilder 能耗模拟表明,制冷能耗在夏热冬冷地区的不同建筑平面、相同体形系数下,能耗之差占全年制冷能耗的 10 % 以上。用 Python 中的多维回归拟合函数,分别对 M_1-E_1 、 M_1-E_2 、 M_2-E_1 和

M_2-E_2 进行二维回归拟合分析,对 $M_1-M_2-E_1$ 与 $M_1-M_2-E_2$ 进行三维回归拟合分析,并通过回归指标对拟合结果进行评价。

2.1 M_1 、 M_2 分别对能耗 (E_1 、 E_2) 的影响

全年能耗 E_1 、制冷能耗 E_2 随着建筑面宽进深比 M_1 变化的散点分布如图 6a、6b 所示,总能耗 E_1 、制冷能耗 E_2 随着斜进深 M_2 变化的散点图如图 6c、6d 所示。进行一次拟合,发现 E_1 、 E_2 分别与 M_1 的一次拟合线性图均成正比例关系,即能耗随建筑面宽进深比的增大而增大; E_1 、 E_2 分别对 M_2 的一次拟合线性图均成反比例关系,即能耗随着建筑斜进深的增大而减小。

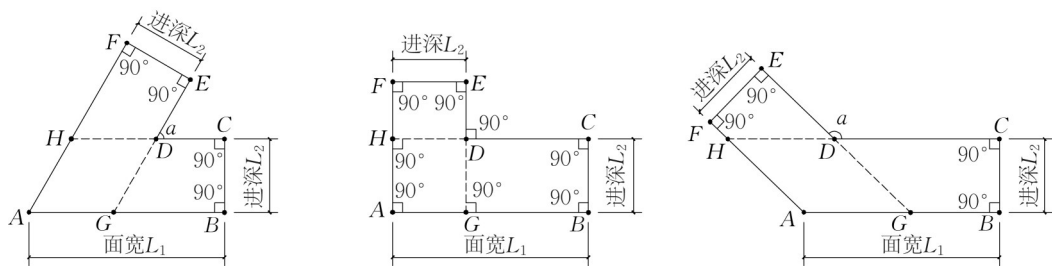


图 5 斜进深(图中虚线)
Fig. 5 Oblique depth (dotted line)

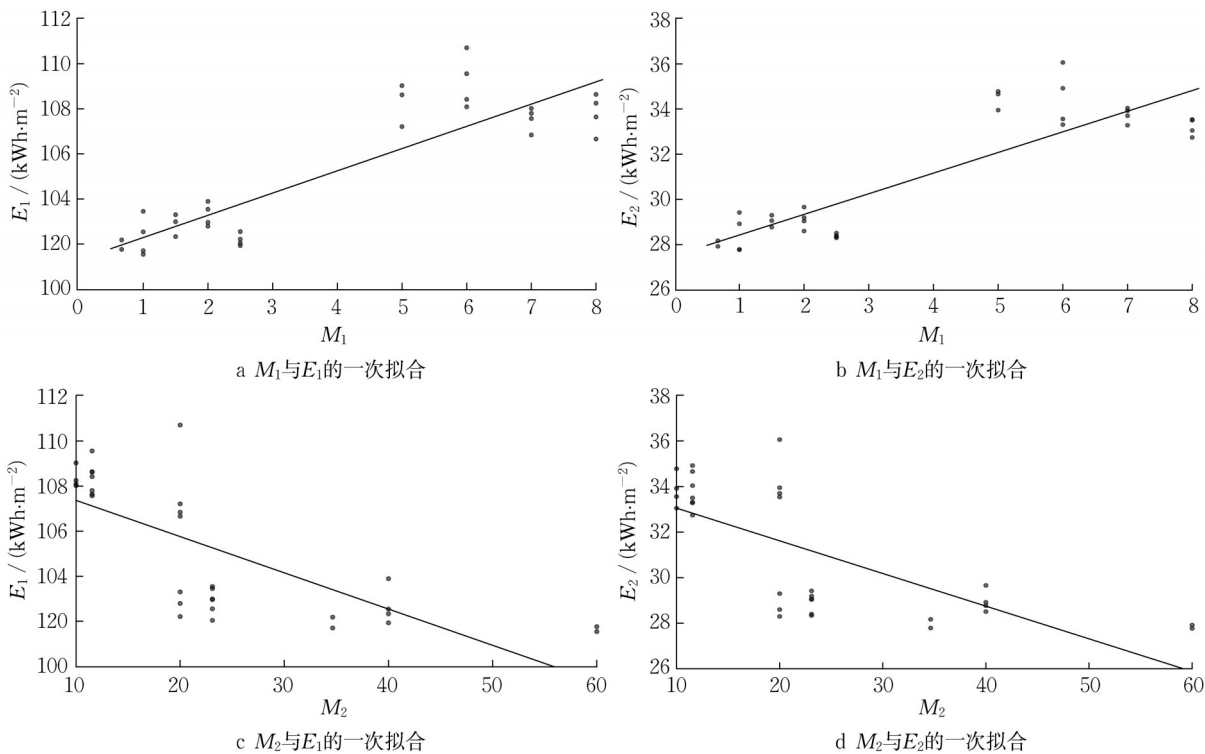


图 6 M_1 、 M_2 分别与 E_1 、 E_2 的拟合直线
Fig. 6 Fitting line of M_1 and M_2 to energy consumption (E_1 and E_2) respectively

此外,对回归模型进行显著性检验法中的 F 检验,若反映显著性的 P 值远小于 0.01,表明回归模型高度

显著^[16]。从表 6 中可以发现,4 个回归模型的 P 值均远小于 0.01,说明它们的参数对能耗均有显著影响。

表 6 方差分析
Tab. 6 Analysis of variance

| 模型 | 偏差平方和 | 自由度 | 方差 | <i>P</i> 值 | 显著性 |
|-----------------|--------|-----|--------|-----------------------------|------|
| 回归(M_1-E_1) | 215.35 | 1 | 215.35 | $2.241\ 650\times 10^{-11}$ | 高度显著 |
| 剩余(M_1-E_1) | 60.79 | 30 | 2.03 | | |
| 总和(M_1-E_1) | 237.57 | 31 | | | |
| 回归(M_1-E_2) | 184.24 | 1 | 184.24 | $3.013\ 507\times 10^{-11}$ | 高度显著 |
| 剩余(M_1-E_2) | 53.33 | 30 | 1.78 | | |
| 总和(M_1-E_2) | 237.57 | 31 | | | |
| 回归(M_2-E_1) | 150.53 | 1 | 150.53 | $1.000\ 000\times 10^{-6}$ | 高度显著 |
| 剩余(M_2-E_1) | 125.61 | 30 | 4.19 | | |
| 总和(M_2-E_1) | 237.57 | 31 | | | |
| 回归(M_2-E_2) | 119.61 | 1 | 119.61 | $5.000\ 000\times 10^{-5}$ | 高度显著 |
| 剩余(M_2-E_2) | 117.97 | 30 | 3.93 | | |
| 总和(M_2-E_2) | 237.57 | 31 | | | |

其次,对 M_1-E_1 进行一~六次多项式拟合。在五次拟合时,找到均方根误差开始平稳的回归模型,拟合结果如图 7a 所示。曲线表明, M_1 在区间(2.3, 5.8)时, E_1 值单调递增;当 M_1 数值小于 2.3 时, E_1 变化幅度小,同时 E_1 相比于其他位置,数值较小;当 M_1 在区间(5.8, 7.6)时, E_2 值单调递减,但变化幅度比 M_1 在区间(2.3, 5.8)时 E_1 的变化小;在 M_1 为 5.8 时, E_1 达到最大值 $109.07\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ 。因此可以得出以下结论:①当一折平面建筑的面宽进深比在区间(2.3, 5.8)时,建筑全年能耗随着一折平面建筑面宽进深比增大而增大,上升效果显著。②当一折平面建筑面宽进深比小于 2.2 时,建筑全年能耗随面宽进深比的变化不明显,同时制冷能耗数值相对较低,在面宽进深比在区间(5.8, 7.6)时,建筑制冷能耗随面宽进深比增大而降低。③一折平面建筑的面宽进深比在区间(0, 8.0)时,制冷能耗最大值在(5.8, 109.07)处,即面宽进深比为 5.8 时,获得最大全年能耗 $109.07\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

对 M_1-E_2 进行一~六次多项式拟合。在五次拟合时,找到均方根误差开始平稳的回归模型,拟合结果如图 7b 所示。通过与图 7a 的对比可以发现,两者曲线形态相似度很高,仅是在个别点上 M_1 有所偏移,如 $M_1=2.3$ 向右偏移到了 2.2, $M_1=5.8$ 偏移到了 5.9, $M_1=7.6$ 并未偏移。因此可以得出以下结论:①当一折平面建筑的面宽进深比在区间(2.2, 5.9)时,建筑制冷能耗随着一折平面建筑面宽进深比增大而增大,上升效果显著。②当一折平面建筑面宽进深比小于 2.2 时,建筑制冷能耗随面宽进深比的变化不明显,同时制冷能耗数值相对较低,面宽进深比在区间(5.9, 7.6)时,建筑制冷能耗随面宽进深比增大而降低。③当一折平面建筑的面宽进深比在区间(0, 8.0)时,制冷能耗最大值点

在(5.9, 35.08)处,即面宽进深比为 5.9 时,获得最大总能耗 $35.08\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

对 M_2-E_1 进行一~六次多项式拟合。在四次拟合时,找到均方根误差开始平稳的回归模型,拟合结果如图 7c 所示。曲线表明, M_2 在(11, 32)m∪(52, 60)m 区间时, E_1 值单调递减; M_2 在(32, 52)m 区间时, E_2 值单调递增。因此可以得出以下结论:①当一折平面建筑的斜进深在区间(11, 32)m∪(52, 60)m 时,建筑全年能耗随着一折平面建筑斜进深增大而降低,降低效果显著。②当一折平面建筑的斜进深在区间(32, 52)m 时,建筑制全年耗随着一折平面建筑斜进深增大而上升,上升效果显著。③一折平面建筑的斜进深在区间(0, 60)m 时,制冷能耗最低点在(32, 100.91)处,即斜进深为 32 m 时,获得最低制冷能耗 $100.91\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

对 M_2-E_2 进行一~六次多项式拟合。在四次拟合时,找到均方根误差开始平稳的回归模型,拟合结果如图 7d 所示。通过与图 7c 的对比可以发现,两者曲线形态相似度很高,仅是在个别点上 M_2 有所偏移,如 $M_2=11\text{ m}$ 向左偏移到了 12 m, $M_2=32\text{ m}$ 和 $M_2=52\text{ m}$ 并未偏移。可以得出结论:①当一折平面建筑的斜进深在区间(12, 32)m∪(52, 60)m 时,建筑制冷能耗随着一折平面建筑斜进深增大而降低,降低效果显著。②当一折平面建筑的斜进深在区间(32, 52)m 时,建筑制冷能耗随着一折平面建筑斜进深增大而上升,上升效果显著。③一折平面建筑的斜进深在区间(0, 60)m 时,制冷能耗最低点在(32, 26.95)处,即斜进深为 32 m 时,获得最低制冷能耗 $26.95\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

一折平面建筑面宽进深比与能耗存在五次多项式函数关系,斜进深与能耗存在四次多项式函数关系,如表 7 所示。

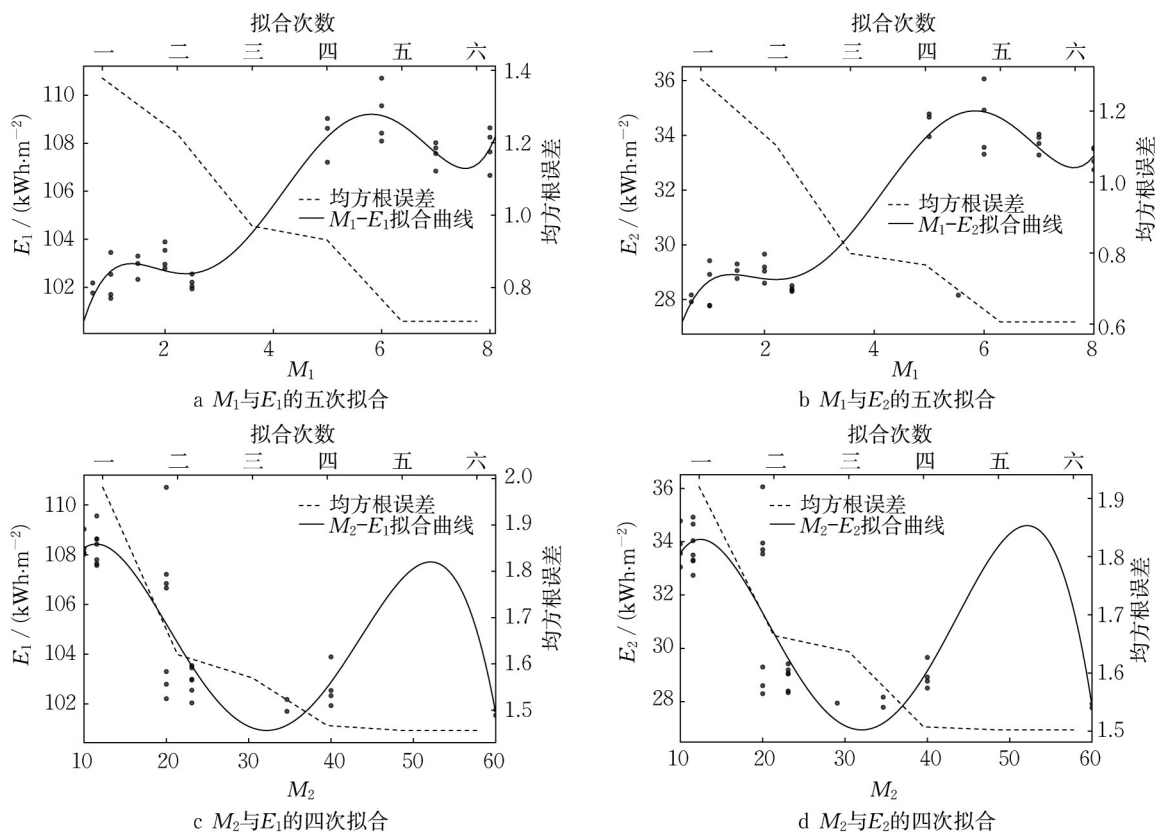


图 7 M_1 、 M_2 分别与 E_1 、 E_2 的拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of M_1 and M_2 to energy consumption (E_1 and E_2) respectively

| 表 7 M_1 、 M_2 分别对能耗(E_1 、 E_2)的拟合函数 | |
|--|---|
| Tab. 7 Fitting functions of M_1 and M_2 to energy consumption (E_1 and E_2) respectively | |
| 变量 | 函数关系式 |
| M_1 - E_1 | $y=0.022\ 62x^5-0.484\ 3x^4+3.676x^3-11.840x^2+16.37x+94.93$ |
| M_1 - E_2 | $y=0.017\ 52x^5-0.374\ 0x^4+2.810x^3-8.857x^2+12.04x+23.05$ |
| M_2 - E_1 | $y=-4.192\times10^{-5}x^4+0.005\ 351x^3-0.221\ 6x^2+3.225x+93.24$ |
| M_2 - E_2 | $y=-4.783\times10^{-5}x^4+0.006\ 161x^3-0.260\ 0x^2+3.980x+14.10$ |

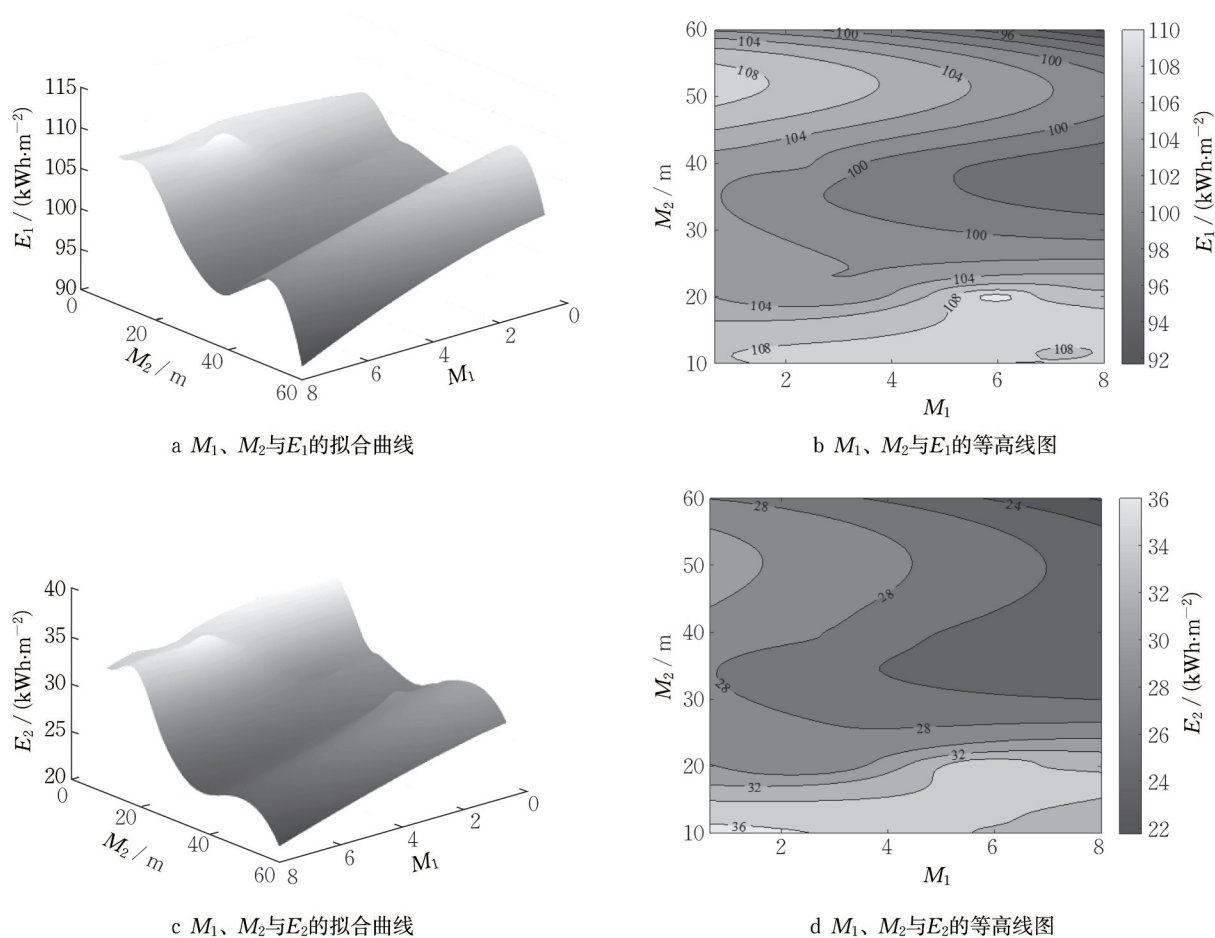
2.2 M_1 、 M_2 同时对能耗(E_1 、 E_2)的影响

在 2.1 中分析了单个变量对能耗的影响,得出夏热冬冷地区一折平面建筑面宽进深比和面宽角度比在能耗影响上的结论,并且得到较大系数的回归模型。为了进一步研究 2 个变量同时对能耗的影响,生成了 M_1 - M_2 - E_1 与 M_1 - M_2 - E_2 的三维拟合回归模型及等高线图。首先,观察 2 个变量同时作用时对能耗的影响,其次,通过二维拟合结果与三维拟合结果进行对比,验证一折平面建筑面宽进深比与面宽角度比对能耗影响的异同性,最后,生成的等高线图在实际设计中可为建筑师提供建筑形态优化方面的参考。

对 M_1 、 M_2 与 E_1 进行线性插值拟合,三维拟合结果如图 8a 所示,决定系数 R^2 为 1,误差平方和为 0,拟合效果很好,可以接受。等高线图 8b 中有高能耗区

与低能耗区两个部分,可以针对任意 M_1 值或 M_2 值,寻找最低能耗目标下的另一值的趋势。例如: $M_1=6.0$,即一折平面建筑面宽长度为进深长度的 6 倍时,若 $M_2\in(34,40)\text{m}$ 时,能获得较低能耗;当 M_2 位于区间 $(10,21)\text{m}$ 时,制冷能耗较高,应避免这种情况发生。

对 M_1 、 M_2 与 E_2 进行线性插值拟合,三维拟合结果如图 8c 所示,决定系数 R^2 为 1,误差平方和为 0,拟合效果很好,可以接受。等高线图 8d 与等高线图 8b 相比,发现能耗区域变大,例如, M_1 为 6.0 时,低能耗区域对应的 M_2 范围由 $(34,40)\text{m}$ 缩小到了 $(30,43)\text{m}$,说明在进行节能设计时,一折平面办公建筑斜进深的改变对全年能耗影响大于制冷能耗的影响。

图8 M_1 、 M_2 同时与能耗(E_1 、 E_2)的拟合曲面Fig. 8 Fitting surfaces of M_1 and M_2 and energy consumption (E_1 and E_2)

3 结论

通过改变一折建筑的面宽、进深及转折角度得到32种不同的折线型平面,并对其进行全年能耗逐时动态模拟。控制平面形态,同时采用斯皮尔曼系数公式,选择了2个最高的形态参数作为变量;运用回归拟合与回归评价指标,研究2个变量对建筑能耗的影响,得到一折建筑平面与能耗的相关性,发现低能耗目标下的形态参数临界点、最优形态数值以及两个变量同时对能耗作用的等高线图。

(1)研究采用统计学中的斯皮尔曼等级相关系数,衡量2个变量的依赖性,利用单调方程评价2个统计变量的相关性,以确定控制平面形态的参数。

(2)研究引入Python计算平台,利用参数化的形态描述方式进行建筑平面设计研究,通过其平台的数据可视化功能,成功将数据与形态结合起来。

(3)研究方法可扩展到其他多种形态的建筑。

关于一折平面建筑形态的具体结论如下:

(1)一折平面办公建筑面宽进深比单个变量对

能耗影响是越小越好。

(2)面宽进深比和斜进深耦合作用于能耗时,面宽进深比越大越好;同时,发现斜进深存在临界值,即斜进深临近32 m,能耗越小,远离32 m,能耗越大。

(3)通过拟合方法,仅针对降低能耗,可得出夏热冬冷地区一折平面建筑的优化建议是:面宽进深比为7.6,斜进深为32 m。以斜进深最优长度32 m为半径的圆,根据场地形状、景观方向、空间组合等需求,设计建筑转折方向,确定转折角度,以算出进深长度,根据绘制出 M_1 - M_2 - E_1 的等高线图,选择低能耗方向的面宽进深比,按照设计需要,选择合适的面宽长度。

应该指出的是,本文给出夏热冬冷地区一折平面建筑面宽进深比、斜进深对能耗综合影响下的等高线图,仅可作为一种选取低能耗平面形态的直观辅助工具,在实际建筑设计过程还要综合考虑平面与场地形状的适配性,内部功能布局的需求和立面造型的多样性因素。

作者贡献声明:

应小宇:研究选题,提供研究思路与技术指导,论文审定。

皇甫凡雨:案例收集,能耗模拟,数据处理,论文整体构思与撰写。

王 贵:提供数据处理思路与技术指导,论文审阅。

金佳云:样本生成,数据处理,论文审阅。

参考文献:

- [1] WARREN P. IEA-BCS ANNEX 30 final report: bring simulation into application [R]. Paris: International Energy Agency, 2008.
- [2] 房涛,李洁,王崇杰,等.能耗导向下的性能化设计方法研究与实践——山东建筑大学超低能耗教学实验楼设计[J]. 新建筑, 2020(4):76.
FANG Tao, LI Jie, WANG Chongjie, *et al.* Research and practice of lower energy consumption oriented performance design method: the design of ultra-low energy consumption teaching and experimental building of Shandong Jianzhu University[J]. New Architecture, 2020(4): 76.
- [3] DE P. Computational support for selection of energy saving building[D]. Delft: Delft University of Technology, 2004.
- [4] 夏春海,朱颖心,林波荣.方案设计阶段建筑性能模拟方法综述[J]. 暖通空调, 2007(12):32.
XIA Chunhai, ZHU Yingxin, LIN Borong. Review of building performance simulation methods in conceptual design period[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2007(12): 32.
- [5] HONG T Z, CHOU S K, BONG T Y. Building simulation: an overview of developments and information sources [J]. Building and Environment, 2000, 35(4): 347.
- [6] 洪烽桓,傅绍辉,徐岩,等.建筑师主导下基于能耗模拟的建筑形体与空间组织节能设计研究——以北京市门头沟区体育文化中心为例[J]. 西部人居环境学刊, 2020, 35(6):40. DOI: 10.13791/j.cnki.hsfwest.20200606.
HONG Fenghuan, FU Shaohui, XU Yan, *et al.* Research on architect-led energy-efficient design of building massing and spatial organization based on energy simulation: taking mentougou sport and cultural center as an example [J]. Journal of Human Settlements in West China, 2020, 35(6): 40. DOI: 10.13791/j.cnki.hsfwest.20200606.
- [7] 林美顺,潘毅群,龙惟定.夏热冬冷地区办公建筑体形系数对建筑能耗的影响分析[J]. 建筑节能, 2015, 43(10):63.
LIN Meishun, PAN Yiqun, LONG Weiding. Influence of building shape coefficient on energy consumption of office buildings in hot-summer-and-cold-winter area of China [J]. Building Energy Efficiency, 2015, 43(10): 63.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑节能与可再生能源利用通用规范:GB 55015—2021[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2021.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. General code for energy efficiency and renewable energy application in buildings: GB 55015—2021[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2021.
- [9] 王超,张伶俐,张民意,等.基于数据库分析的北方大中型体育馆形体空间要素能耗关联度研究[J]. 华中建筑, 2019, 37(6):26. DOI:10.13942/j.cnki.hzjz.2019.06.007.
WANG Chao, ZHANG Lingling, ZHANG Minyi, *et al.* A study of energy consumption correlation degree on form and space elements of large and medium-sized gymnasiums in north China based on database analysis [J]. Huazhong Architecture, 2019, 37(6): 26. DOI:10.13942/j.cnki.hzjz.2019.06.007.
- [10] 张峙,李雯喆,应小宇.低能耗办公建筑标准层平面形态参数化研究[J]. 南方建筑, 2019(1):76.
ZHANG Zhi, LI Wenzhe, YING Xiaoyu. Research on parameterization for shape of standard floor of office buildings under a low-energy consumption target [J]. South Architecture, 2019(1): 76.
- [11] WANG W, RIVARS H, ZMEUREANU R. Floor shape optimization for green building design [J]. Advanced Engineering Informatics, 2006(20): 363.
- [12] 刘利刚,林波荣,彭渤.中国典型高层办公建筑平面布置与能耗关系模拟研究[J]. 新建筑, 2016(6):104.
LIU Ligang, LIN Borong, PENG Bo. A simulation study on the correlation between building layout and energy consumption of high-rise office buildings in China [J]. New Architecture, 2016(6): 104.
- [13] ADRIANA C, FEDERICA R, JACOPO D, *et al.* Multi-objective approach to the optimization of shape and envelope in building energy design [J]. Applied Energy, 2020, 280 (115984): 1.
- [14] AIANZI A, SEO D, KRARTI M. Impact of building shape on thermal performance of office buildings in Kuwait [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(3):822.
- [15] MYERS J L, WELL A D. Research design and statistical analysis [M]. 2nd ed. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, 2003.
- [16] 王岩,隋思涟.数理统计与MATLAB数据分析[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2014.
WANG Yan, SUI Silian. Mathematical statistics and data analysis of matlab [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.