

基于对象特征的建筑结构平面图空间数据自动生成方法

Method for Automatically Generating Spatial Data of Architectural Structure Plan based on Object Characteristics

江浩¹, 齐慧芳²

- 广州市第一装修有限公司, 广东 广州 510060;
- 广州科技贸易技术学院, 广东 广州 511442)

摘要: 采用目前方法生成建筑结构平面图空间数据时, 无法获取建筑结构对象特征, 存在还原性差、VRI值低和完全度低的问题, 因此提出基于对象特征的建筑结构平面图空间数据自动生成方法。采用射线跟踪算法实现目标模型到图像平面的几何映射, 在电磁散射模型的基础上获得后向散射图。采用主成分分析方法获取后向散射图中的建筑结构对象特征, 根据提取的特征通过卷积运算生成建筑结构平面图空间数据。试验结果表明, 所提方法的还原性好、VRI值高、完全度高。

关键词: 建筑结构; 平面图; 空间数据生成; 射线跟踪算法; 对象特征

中图分类号: TP751 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2023) 04-0128-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.04.021

JIANG Hao¹, QI Hui Fang²

(1. Guangzhou No. 1 Decoration Co., Ltd., Guangzhou 510060, China;

2. Guangzhou Vocational College of Technology & Business, Guangzhou 511442, China)

Abstract: When the current method is used to generate spatial data of building structure plan, the object characteristics of building structure can not be obtained, and there are some problems such as poor reducibility, low VRI value and low completeness. Therefore, an automatic generation method of spatial data of building structure plan based on object characteristics is proposed. The ray tracing algorithm is used to realize the geometric mapping from the target model to the image plane, and the backscatter map is obtained based on the electromagnetic scattering model. The principal component analysis method is used to obtain the features of the building structure object in the backscatter map. According to the extracted features, the spatial data of the building structure plan is generated by convolution operation. The experimental results show that the proposed method has good reducibility, high VRI value and high completeness.

Keywords: building structure; floor plan; spatial data generation; ray tracing algorithm; object characteristics

0 引言

在未来移动应用的发展中, 导航和位置服务领域中的室内地图属于重点研究内容, 位置服务属于主要发展方向^[1]。目前发展应用、服务实现和设计表达是室内地图的主要研究内容, 但研究数据获取与数据采集的相关文献较少。在室内地

作者简介: 江浩 (1984—), 男, 硕士, 中级工程师, 研究方向: 工程管理和安全管理。

收稿日期: 2022-07-25

图数据获取的研究领域中与自动化技术相关的体系较少，主要采集方式是矢量化采集^[2]。建筑结构平面图数据主要包括路径信息、语义属性信息和空间数据等。反映建筑结构的连通关系、表达空间邻域和几何数据等拓扑信息均存在于数据空间中，是构建建筑结构平面图的承载平台和地理框架。目前建筑结构平面图空间数据生成方法存在还原性差、VRI 值低和完全度低的问题，需要对建筑结构平面图空间数据生成方法进行分析和研究。

马焜阳等^[3]提出基于 Faster R-CNN 的建筑结构平面图空间数据生成方法，该方法对桌子、床等无效的建筑功能构件进行识别和剔除，采用 Faster R-CNN 目标检测模型获得建筑结构平面图空间数据，该方法无法获取建筑结构特征，存在还原性差的问题。王权等^[4]提出基于投影方法的结构平面图空间数据生成方法，该方法首先对建筑物构件间的邻近关系进行分析，根据分析结果对建筑物进行划分，利用投影方法计算屋顶特征，并生成建筑物平面空间数据。但是该方法在数据生成过程中只生成了屋顶特征，导致数据的 VRI 值较低。赵继芳等^[5]提出基于稀疏重构的建筑结构平面图空间数据生成方法，该方法通过阈值算法求解低秩稀疏分解，根据分解结果采集墙体回波，在全变分约束条件下结合交替方向和增广拉格朗日算法求解稀疏重构稀疏，获得建筑结构的平面图。但是，该方法没有考虑建筑结构对象的特征，导致生成数据的完全度较低。

为了解决上述方法中存在的问题，提出基于对象特征的建筑结构平面图空间数据自动生成方法。

1 后向散射系数图生成

基于对象特征的建筑结构平面图空间数据自动生成方法采用电磁散射模型在轨道参数和目标参数的基础上获得后向散射图，具体过程如下：

(一) 场景模型采样

利用建筑目标 3D 模型绘制场景，建立局部观察坐标系，通过射线跟踪实现场景模型采样^[6]。

(二) 射线跟踪法

可以将建筑表面数据划分为 $W_x \times W_y$ 个片段，并且通过斜距投影获得射线路径，将得到的射线路径与平面中的片段进行对比，即可得到射线的反射路径^[7]，反射方向的计算表达式为：

$$\hat{k}_s = \hat{k}_i - 2(\hat{k}_i * \hat{n}_s)\hat{n}_s \quad (1)$$

反射方向对应的矢量为 (x_{ks}, y_{ks}, z_{ks}) ，用 $\{m_0\Delta x, n_0\Delta y, z(m_0, n_0)\}$ 描述射线入射点在空间中对应的坐标，属于索引 (m_0, n_0) 片段，其中 Δx 、 Δy 描述的是 x 方向和 y 方向中存在的片段尺寸； $z(m_0, n_0)$ 代表的是深度坐标，跟踪路径可通过下式获得：

$$(x, y, z)_i = \begin{cases} \left(\begin{matrix} m_0\Delta x + i\Delta x, n_0\Delta y + i\frac{y_{ks}\Delta x}{x_{ks}}, \\ z(m_0, n_0) + i\frac{z_{ks}\Delta x}{x_{ks}} \end{matrix} \right), & y_{ks} < x_{ks} \\ \left(\begin{matrix} m_0\Delta x + i\frac{x_{ks}\Delta y}{y_{ks}}, n_0\Delta y + i\Delta y, \\ z(m_0, n_0) + i\frac{z_{ks}\Delta y}{y_{ks}} \end{matrix} \right), & y_{ks} > x_{ks} \end{cases} \quad (2)$$

设置函数 $f(i) = z(i) - z\{[x(i)/\Delta x], [y(i)/\Delta y]\}$ ， $[x]$ 描述的是 x 的邻近整数。一般情况下入射点与零值之间为对应关系，可知函数 $f(i)$ 当平面与射线处于相交状态时第一次经过零点，在上述分析的基础上通过下述流程判断反射点索引位置：

- (1) 在初始化处理的过程中将 i 的值设置为零；
- (2) 计算 $F(i) = f(i)f(i+1)$ ；
- (3) 当 $F(i)$ 的值大于零时， $i = i + 1$ ，转到步骤 (2) 中；相反，进行下一步；
- (4) 终止迭代，计算反射点对应的坐标，并保存计算结果。

通过上述过程，获得多次散射的跟踪路径。

(三) 电磁散射

后向散射强度在城市复杂的环境中与目标几何结构、表面特征之间存在关联，结构简单的散

建筑结构

射模型无法描述地物在城区内的差异性^[8-9]。基于对象特征的建筑结构平面图空间数据自动生成方法为了获取高质量的仿真图像,通过电磁散射模型对信号与目标之间的交互作用进行分析。

根据 Kirchhoff 近似理论计算电磁强度,天线在高频远场中接收到的电磁场可通过下式进行描述:

$$\hat{e}_s(r) = \frac{jk \exp(-jkr)}{4\pi r} E_i(I - \hat{k}_s \hat{k}_s) \times \iint_A \hat{F}(\hat{k}_i, \hat{e}_i, \hat{n}) \exp[j(\hat{k}_i - \hat{k}_s) \times \hat{r}'] d\hat{r}' \quad (3)$$

参数 $\hat{F}(\hat{k}_i, \hat{e}_i, \hat{n})$ 一般情况下可以利用介电常数计算得到,包括极性、平面电磁和电磁波等,其表达式如下:

$$\begin{aligned} \hat{F}(\hat{k}_i, \hat{e}_i, \hat{n}) = & -(\hat{e}_i, \hat{q}_i)(\hat{n} \times \hat{k}_i) \hat{q}_i (1 - R_{\perp}) + \\ & (\hat{e}_i \times \hat{p}_i)(\hat{n} \times \hat{q}_i)(1 + R_{//}) + \\ & (\hat{e}_i, \hat{q}_i) \times [\hat{k}_s \times (\hat{n} \times \hat{q}_i)] \\ & (1 + R_{\perp}) + (\hat{e}_i \times \hat{p}_i) \times (\hat{n} \times \hat{k}_i) \times \\ & (\hat{k}_s \times \hat{q}_i)(1 - R_{//}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: R_{\perp} 、 $R_{//}$ 分别表示垂直 Fresnel 反射系数、水平 Fresnel 反射系数; $(\hat{p}_i, \hat{q}_i, \hat{k}_i)$ 表示位置 \hat{r}' 所处的正交坐标系。

对公式 (3) 进行优化:

$$\hat{e}_s(r) = \frac{jk \exp(-jkr)}{4\pi r} E_i(I - \hat{k}_s \hat{k}_s) \hat{F}(\hat{k}_i, \hat{e}_i, \hat{n}) I_A \quad (5)$$

通过上述分析构建极化散射矩阵 S :

$$\begin{bmatrix} E_{sh} \\ E_{sv} \end{bmatrix} = \frac{jk \exp(-jkr)}{4\pi r} \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ih} \\ E_{iv} \end{bmatrix} \quad (6)$$

结合上述公式获得 $S_{pq} = \hat{F}(\hat{k}_i, \hat{e}_{iq}, \hat{n}) \times \hat{e}_{sq}$, 其中 \hat{e}_{sq} 、 \hat{e}_{iq} 分别表示散射场与入射场的垂直或水平极化分量, \hat{k}_s 的方向与极化分量之间属于垂直关系,消除 \hat{k}_s 的对应项,获得反射率矩阵 γ :

$$\gamma = \begin{pmatrix} \gamma_{hh} & \gamma_{vh} \\ \gamma_{hv} & \gamma_{vv} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{hh} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{vv} \end{pmatrix} I_A \quad (7)$$

式中: I_A 表示与形状相关的系数。基于对象特征的

建筑结构平面图空间数据自动生成方法通过粗糙面模型描述平面起伏的随机性,建筑物背景对应的粗糙度通常较大,表面较为光滑^[10-11]。

设定粗糙面表面高度的起伏满足相关长度为 l 、均方根高度为 σ 的高斯分布,此时相干分量可通过下式进行描述:

$$\langle I_A \rangle = I_A \times \exp(-4k_n^2 \sigma^2) \quad (8)$$

式中: k_n 表示平面法向方向中 \hat{k}_s 对应的分量。

随机散射场对应的方差即为非相干分量,其计算公式如下:

$$\sigma_A^2 = \langle I_A I_A^* \rangle - |\langle I_A \rangle|^2 \quad (9)$$

相干叠加全部面元片段对应的随机散射场与散射场在成像平面中的投影,获得分辨单元 (r_m, n_{xr}) 对应的反射率系数 $\gamma(m_r, n_{xr})$, 其计算公式如下:

$$\begin{aligned} \gamma(m_r, n_{xr}) = & \sum_{\text{facets}} \gamma_{\text{single}}(m_r, n_{xr}) + \\ & \sum_{\text{facets}} \sum_{\text{times}} \gamma_{\text{multiple}}(m_r, n_{xr}) \end{aligned} \quad (10)$$

在雷达散射界面定义 $\delta = 4\pi R^2 |E_s|^2 / |E_i|^2$ 的基础上获得后向散射系数图 $\delta(m_r, n_{xr}) = \frac{k^2}{4\pi} |\gamma(m_r, n_{xr})|^2$ ^[12-13]。

2 平面图空间数据自动生成

2.1 特征提取

通常情况下由 $D \times 5$ 特征向量矩阵构成后向散射系数图,其中 D 为特征向量在后向散射系数图中对应的长度。设 $X = [x_1, \dots, x_{1 \times p}, \dots, x_M]^T$ 代表特征空间,其中 $l = 1, \dots, L, M = L \times P, p = 1 \dots P, L$ 代表种子点在不同尺度中的子块数量, P 表示多尺度层数。

基于对象特征的建筑结构平面图空间数据自动生成方法采用主成分分析方法提取后向散射系数图中存在的特征,具体过程如下:

(1) 设 \sum_x 表示协方差矩阵,可通过下式进行描述:

建筑结构

$$\begin{cases} \sum_x = (S_{ij}) \\ S_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{n-1} \end{cases} \quad (11)$$

(2) 主成分 f_v 中存在的信息量可以通过主成分方差所占的比重进行反映：

$$b_v = \frac{\lambda_v}{\sum_{v=1}^V \lambda_v} \quad (12)$$

(3) 利用 V 个方差共同占有的比重计算主成分的个数 V ，并用 $G(m)$ 进行描述：

$$G(m) = \sum_{v=1}^V \lambda_v / \sum_{m=1}^M \lambda_m \quad (13)$$

(4) 联合前 V 个主成分，获得后向散射系数图的特征向量。

2.2 数据生成

为了提高平面图空间数据生成的效率，假设图像分辨单元在信号带宽与合成孔径内的散射强度不发生变化，则点扩展函数与后向散射图特征向量的卷积结果即为建筑结构平面图^[14-15]：

$$O(r, xr) = \sum_M \sum_N \sigma(m, n) h(r - m\Delta r, xr - n\Delta xr) \quad (14)$$

式中： $\sigma(m_r, n_{xr})$ 表示分辨单元在离散化散射系数图中对应的散射系数； x 表示交叉向； r 表示距离向；其中， $h(r, xr)$ 表示点扩展函数，其表达式如下：

$$h(r, xr) = e^{j2k_0 r} \{ \text{sinc}(\Delta k r) \text{sinc}(k_0 \theta_0 xr) \} \quad (15)$$

式中： k_0 代表中心频率； Δk 表示带宽。

3 实验与分析

为了验证基于对象特征的建筑结构平面图空间数据自动生成方法的整体有效性，需要对基于对象特征的建筑结构平面图空间数据自动生成方法进行测试，本次测试的实验环境如下：

操作系统：Windows 7 旗舰版 32 位；

IDE：Microsoft Visual Studio 2005；

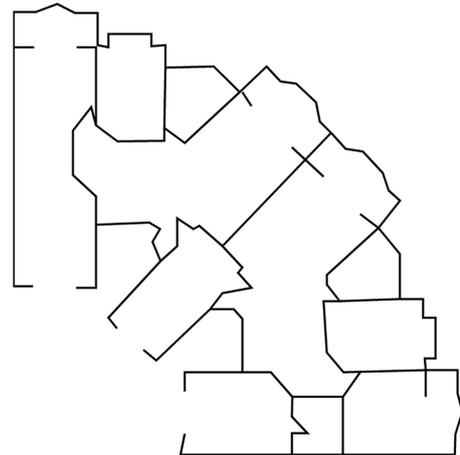
处理器：AMD Athlon (tm) II * 4 635

Processor 2.9GHz。

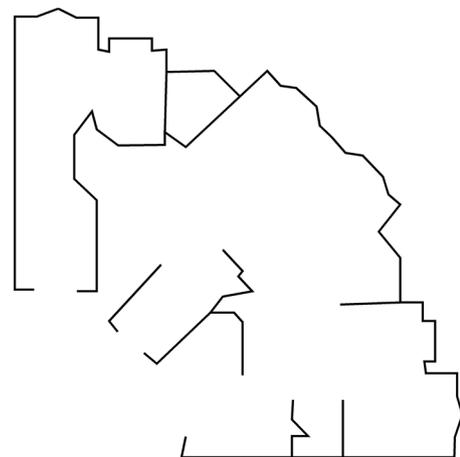
分别采用基于对象特征的建筑结构平面图空间数据自动生成方法（方法 1）、基于 Faster R-CNN 的建筑结构平面图空间数据生成方法（方法 2）和基于投影方法的建筑结构平面图空间数据生成方法（方法 3）将图 1 的三维模型转变为平面图。



图 1 三维模型
Fig.1 3D model

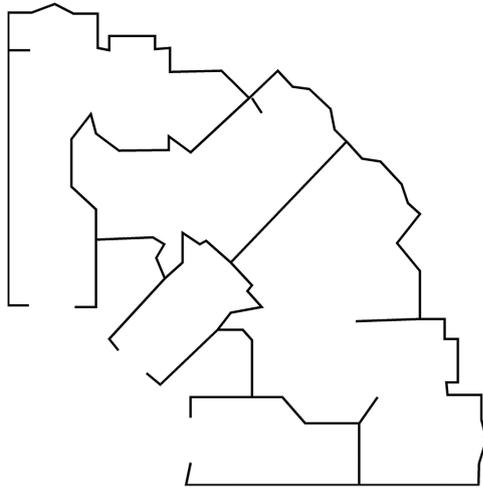


(a) 方法 1 生成的结构平面图



(b) 方法 2 生成的平面图结构

建筑结构



(c) 方法3生成的平面图结构

图2 不同方法生成的平面图结构

Fig. 2 Planar structure generated by different methods

分析图2中的数据可知,方法1生成的建筑结构平面图与三维模型基本相符,建筑结构内部的隔断均体现在了平面图中,方法2和方法3生成的建筑结构平面图与三维模型不符,生成的平面图中缺少三维模型内部构件,通过上述分析可知,方法1获取的平面图空间数据可精准的还原建筑结构,方法1的还原性较好。

为了进一步验证方法的有效性,选取向量恢复指数 VRI 作为测试指标,生成数据的精准度与 VRI 值之间成正比, VRI 可通过下式计算得到:

$$VRI = 0.5D_v + 0.5 \times (1 - F_v) \quad (16)$$

式中: F_v 表示错误识别率; D_v 表示正确识别率。

方法1、方法2和方法3的 VRI 值测试结果如图3所示。

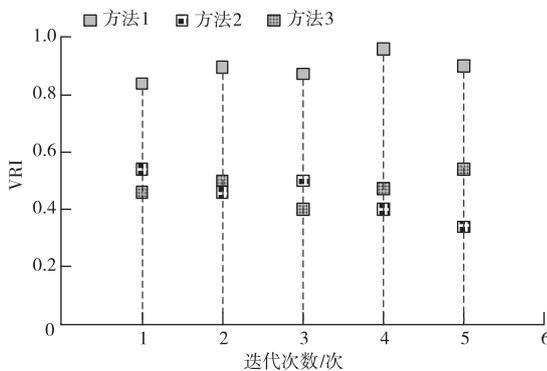


图3 不同方法的 VRI 值测试结果

Fig. 3 Test results of the VRI values for the different methods

根据图3可知,方法1在多次实验过程中获得的 VRI 值均高于0.8,远远高于方法2和方法3获得的 VRI 值, VRI 值越高表明方法1获得的建筑结构平面空间数据精准度越高,因为方法1提取了建筑结构中的对象特征,根据提取的特征生成平面图,进而提高了方法1的精度。

将完全度作为测试指标对方法1、方法2和方法3进行测试,对比不同方法生成的建筑结构平面图空间数据的完全度,测试结果如图4所示。

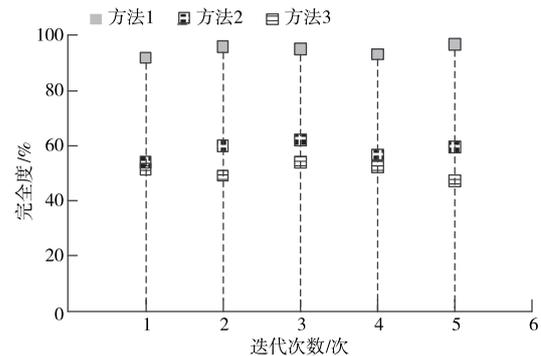


图4 不同方法的完全度测试结果

Fig. 4 Complete degree test results for the different methods

根据图4可知,方法1生成的建筑结构平面图空间数据的完全度均在90%以上,方法2和方法3生成的建筑结构平面图空间数据的完全度分别在60%和50%附近波动,对比方法1、方法2和方法3的测试结果可知,方法1获取的数据完全度较高,因为所提方法为了降低对象特征的维度,采用了主成分分析法对数据进行处理,获取了高精度的对象特征用于生成平面图空间数据,进而提高了数据的完全度。

4 结束语

在室内位置服务发展过程中建筑结构平面图空间数据生成方法属于关键技术。目前建筑结构平面图空间数据生成方法存在还原性差、 VRI 值低和数据完全度低的问题,提出基于对象特征的建筑结构平面图空间数据自动生成方法,首先获取建筑结构的后向散射系数图,并提取对象特征,根据提取的特征生成建筑结构平面图空间数据,解决了目前方法中存在的问题,为室内位置服务技术的发展提供了保障。

参 考 文 献

- [1] 徐旺, 游雄, 张威巍, 等. 2D 地图的建筑物场景结构提取方法及其在城市增强现实中的应用 [J]. 测绘学报, 2020, 49 (12): 114-124.
- [2] 严旭, 范盛颖. Revit 软件钢结构建模与出图的实践 [J]. 建筑钢结构进展, 2019, 21 (1): 100-109.
- [3] 马焜阳, 成毅, 葛文, 等. 利用 Faster R-CNN 自动识别建筑平面图功能构件的方法 [J]. 测绘科学技术学报, 2019, 36 (3): 311-317.
- [4] 王权, 宋春花, 牛保宁. 面向移动终端的三维建筑物模型简化方法 [J]. 计算机应用研究, 2019, 36 (2): 615-620.
- [5] 赵继芳, 晋良念, 刘庆华. 穿墙雷达建筑物结构布局稀疏成像方法 [J]. 雷达科学与技术, 2019, 17 (5): 101-106.
- [6] 赵元, 齐锋, 何俊, 等. 分布式仿真环境下空室通信畅通区三维空间数据生成方法 [J]. 弹箭与制导学报, 2019, 39 (1): 74-78.
- [7] 王浩宇, 路强. 空间监视雷达测试数据的自动生成方法研究 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2020, 43 (5): 50-53.
- [8] 李宏亮, 贾茹, 张悦, 等. 一种航天器测试注入数据序列自动生成方法 [J]. 航天器工程, 2020, 29 (1): 93-99.
- [9] 侯文龙, 邓雪原. 基于 IFC 标准的楼层平面尺寸标注自动生成方法研究 [J]. 图学学报, 2019, 40 (6): 137-143.
- [10] 周鹏, 刘星, 谭浩. 网络三维 GIS 空间数据存储及动态拓扑方法 [J]. 测绘科学, 2018, 43 (10): 137-143.
- [11] 刁明光, 赵元元, 赵丹宁, 等. 矿山遥感监测成果数据报表自动生成方法 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (3): 1107-1112.
- [12] 赵鹏飙, 刘歌, 罗磊, 等. 基于手机的室内数字平面图构建方法 [J]. 计算机工程, 2018, 44 (11): 271-275, 281.
- [13] 陈尔康, 高长生, 荆武兴. 空间目标的轨迹和姿态数据生成 [J]. 西北工业大学学报, 2019, 37 (2): 378-385.
- [14] 杨杰, 诸云强, 宋佳, 等. 地理空间模型自动数据匹配结果精准表达方法 [J]. 地球信息科学学报, 2018, 20 (6): 744-752.
- [15] 王晓鹏, 王忠义, 许玉龙, 等. 四维光场数据中基于极平面的深度估计方法 [J]. 湘潭大学自然科学学报, 2018, 40 (2): 35-38.
- [8] 方俊, 王柏峰, 田家乐, 等. PPP 项目合同主体收益分配博弈模型及实证分析 [J]. 土木工程学报, 2018, 51 (8): 96-104, 128.
- [9] 马桑. PPP 项目再谈判的博弈分析与模型构建 [J]. 现代管理科学, 2016, 274 (1): 40-42.
- [10] 饶海琴, 徐彩红. 政府投资项目中的不完全信息静态博弈模型分析 [J]. 上海理工大学学报, 2006 (4): 386-390.
- [11] 李小莉. 考虑声誉的公私合作项目监管演化博弈分析 [J]. 系统工程学报, 2017, 32 (2): 199-206.
- [12] 曹吉鸣, 申良法, 彭为, 等. 风险链视角下建设项目进度风险评估 [J]. 同济大学学报, 2015, 43 (3): 468-474.
- [13] 陈婉. “PPP+EOD” 创新城市可持续发展新模式 [J]. 环境经济, 2021 (15): 26-29.
- [14] 黄岩渠, 胡宗义, 喻采平. 风险定量测度方法的相容性与局限性 [J]. 统计与决策, 2016, 458 (14): 28-32.
- [15] 王军武, 余旭鹏. 考虑风险关联的轨道交通 PPP 项目风险分担演化博弈模型 [J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40 (9): 2391-2405.
- [16] 王元明, 徐大海. 基于风险传递的公共项目风险分配研究 [J]. 开发研究, 2012, 163 (6): 94-97.
- [17] 徐杰, 李果林. 风险收益动态视角下政府与社会资本合作演化博弈分析 [J]. 软科学, 2020, 34 (6): 126-130.
- [18] 王望珍, 匡思玥. 基于演化博弈的装配式建筑激励政策研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (1): 126-131.
- [19] 亓霞, 柯永建, 王守清. 基于案例的中国 PPP 项目的主要风险因素分析 [J]. 中国软科学, 2009 (5): 107-113.

(上接第 121 页)