

基于 VR 看房及网络大数据的住宅活荷载建模

陈 隽^{1,2}, 窦 凯¹, 徐 迟¹, 吴文瀚¹, 李 杰^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 活荷载取值是建筑结构可靠性设计的基础, 样本采集又是荷载建模的关键。针对传统的抽样采集、入户称重的研究方式存在的入户难、称重难、效率低和样本少等问题, 提出了基于网络房产中介平台开放的全景虚拟(virtual reality, VR)看房方式及网络大数据研究住宅持久性活荷载的方式。首先, 利用 VR 看房获得房间尺寸、室内物品类型及数量等数据, 再通过网络爬虫从互联网大数据资源中获得物品重量, 实现非称重方式的活荷载调查。采用该方法调查了 9 座城市的 4 676 个住宅房间样本(总面积近 75 000m²), 通过数据统计分析与荷载组合得到了住宅活荷载标准值, 并与现行规范建议值进行了对比。结果表明, 任意时点持久性活荷载标准差显著增大, 不同城市活荷载变动时间均值不同且整体呈现下降趋势。VR 系统结合网络大数据可以实现高效、便捷的住宅活荷载调查, 形成一种全新的活荷载研究方式。

关键词: 活荷载; VR(virtual reality)看房; 大数据; 荷载规范; 结构工程

中图分类号: TU312

文献标志码: A

Residential Live Load Modeling Based on Panoramic VR Viewing and Network Big Data

CHEN Jun^{1,2}, DOU Kai¹, XU Chi¹, WU Wenhan¹, LI Jie^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Reliable live load value is the prerequisite for reliability design of civil engineering buildings, and the collection of live load samples is the key data foundation for load modeling. Aiming at the problems of difficulty in entering households, weighing, low efficiency, and small samples that exist in the traditional research methods of sample collection and weighing in households, and based

on the research thinking of big data, a new research method of residential persistent live load based on panoramic VR (virtual reality) house viewing system is proposed. Through the VR system of open network platform, multi-source heterogeneous data such as pictures and videos, combined with Internet resources, comprehensive network crawler, and other means, live load investigation is realized by non-weighing method, and practical research is conducted by taking residential buildings as examples. The characteristic value of residential live load was obtained by statistical analysis and load combination of 4 676 rooms in 9 cities (with a total area of nearly 75 000 square meters). The results show that the standard deviation of sustained live loads significantly increases at any given time, the time of live load variations is different among different cities, which, overall, presents a decreasing trend. The combination of VR system and internet big data can achieve efficient and convenient residential live load surveys, forming a new research method for live loads.

Keywords: live load; VR(virtual reality) system; big data; load code; structural engineering

荷载取值是工程结构设计与可靠性评估的基本依据, 一般按时间变异性分为永久荷载、活荷载和偶然荷载^[1]。由于活荷载具有显著的时空随机性, 其概率模型的研究一直是结构工程领域的基础性科学问题, 而住宅楼面活荷载是其中重要的研究对象。

根据出现频率和持续时间的不同, 住宅楼面活荷载(简称活荷载)可再分为持久性活荷载和临时性活荷载 2 类: 前者指家具、日用品和常住居民重量等长期出现的荷载; 后者指临时性聚集人员(如家庭聚会)、房屋临时维修时的工具和材料等出现频率低且

收稿日期: 2024-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(52178151)

第一作者: 陈 隽, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土木工程大数据防灾、工程结构振动舒适度。
E-mail: ceichen@tongji.edu.cn

通信作者: 李 杰, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为工程可靠性理论、随机力学与混凝土损伤力学。
E-mail: lijie@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

持续时间很短的荷载。传统活荷载研究采用随机采样、入户调查并现场称量(或估计)室内物品重量的方式^[2-3]。对于民用住宅,入户调查涉及个人隐私,干扰住户生活,因此调查阻力极大;即便能够入户,受到称量设备能力及现场操作空间的制约,对于大型、固定式家具等室内物品也无法称重。由于上述原因,住宅活荷载研究长期停滞不前^[4],荷载特性统计已成为结构可靠度分析中最薄弱的环节^[5]。事实上,最新规范GB 55001—2021中荷载取值的核心数据基础仍是20世纪70年代的调查结果^[6]。因此,亟待发展隐私干扰低、样本采集量大及高效、低成本的新型活荷载调查方法,为发展更合理的活荷载模型奠定数据基础。

21世纪以来,社会信息基础设施日趋完善,互联网、物联网和移动终端逐步普及,与之伴生的大数据技术为活荷载研究带来新契机^[7-11]。据此,提出利用在线房产交易平台及网络大数据开展住宅活荷载采样与统计建模的全新研究思路,并具体通过中介平台全景虚拟(Virtual Reality, VR)看房和房产交易记录实现。文中完成了9座城市共4 676个房间(总面积近75 000m²)的活荷载采样和概率建模分析,与现有规范结果的对比说明新方法的可行性和进一步开展大规模活荷载调查的必要性。

1 活荷载概率模型与需求调查

活荷载特性与建筑功能有关,具有时空变异性。为方便现场调查,现有活荷载建模理论通常采用平稳随机场假定忽略荷载的空间相关性,即采用单位面积荷载(即总活荷载值除以房间面积)等作为统计量^[1]。对于活荷载随时间的变化,我国《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)^[12]建议用平稳二项随机过程(图1)描述楼面活荷载的统计特性,进而推导出设计基准期内荷载最大值的概率分布以及荷载组合的综合效应。

平稳二项随机过程将建筑设计基准期 T 划分为 r 个相等的时段 τ ,即 $r=T/\tau$;假定荷载在每一个时段出现($X(t)>0$)的概率为 p ,不出现($X(t)\leq 0$)的概率为 $1-p$ 。各时段出现的荷载幅值服从相同的概率分布(称为任意时点荷载概率分布),且相互独立。

确定平稳二项过程需要3个基本的要素:荷载一次出现的不确定性持续时间 τ 、任意时段荷载发生的概率 p 和荷载强度(幅值)的随机变量的概率分布。由于持久性活荷载始终存在($p=1$),荷载调查的重

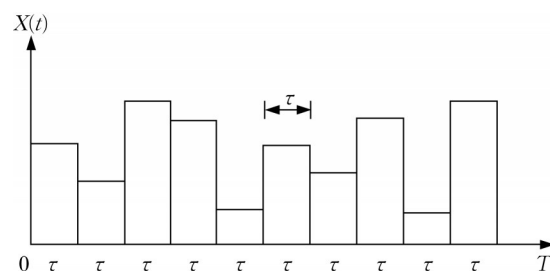


图1 平稳二项随机过程模型示意

Fig. 1 Diagram of stationary binomial stochastic process model

点即为幅值的概率特征和变动时间 τ 。临时性活荷载由于持续时间短,开展任意时点的荷载分布调查有困难,因此通常将调查得到的一次最大临时性活荷载作为该时段最大荷载,并采用与持久性活荷载相同的概率模型计算。

需要说明,国外规范和研究者也常用泊松方波过程和复合泊松点过程描述持久性活荷载和临时性活荷载时间变异性(如图2、图3所示),其中荷载幅值和变动时间的概率特征也需要通过大量采样调查确定。

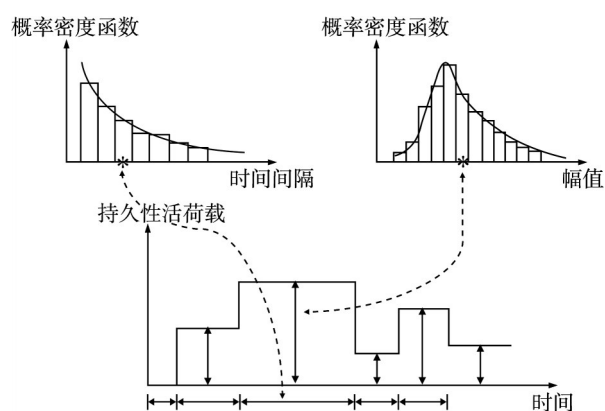


图2 持久性荷载幅值与荷载变动时间间隔

Fig. 2 Load amplitude and time interval of sustained load

2 活荷载幅值VR看房调查

重点研究住宅建筑的持久性活荷载。相较于办公楼、教室等家具布置相对整齐单一的建筑,住宅建筑存在房间功能类型多、家具品种多、室内布置多样、隐私性强等特点,调查和数据收集难度更大,对此,提出了基于在线VR看房系统的住宅活荷载幅值大数据调查的方法。

2.1 VR全景看房系统及优势

随着信息技术的快速发展,互联网在市民生活

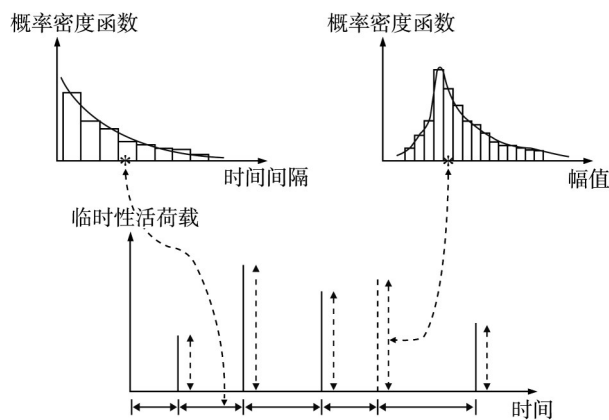


图3 临时性荷载出现时的幅值与出现时间间隔
Fig. 3 Load amplitude and time interval of extraordinary load

中发挥着越来越大的作用。在房产交易领域,许多房产网络平台(如链家网、安居客等)纷纷推出了“VR看房”功能。VR看房是一种开放式全景虚拟现实系统,让顾客足不出户便能线上360°看房,全方位了解房屋情况,并根据自己的需要挑选房源,大幅节约了时间和费用。图4为VR看房截图,图中右上角显示房屋的平面图,可查看房屋尺寸(网页上同时也提供了房屋面积),图片可360°旋转以变化观察视角。



图4 线上VR看房效果截图
Fig. 4 Screenshot of online “VR viewing”

利用VR看房系统开展住宅活荷载调查相较于传统方法具有如下显著优点:①无隐私问题。各房产交易平台上所有的可查看房源都已获得业主授权向公众开放,解决了传统方法入户难的瓶颈问题。②样本量大。随着在线房产交易的快速发展,各平台已经积累了大量房源,并且还在实时更新。③信息完整。VR看房系统提供房间的三维尺寸、平面面积、功能属性和家具布置等数值或图片(视频)信息,同时VR全景技术没有视角盲区,可避免家具等室内物品统计的重复或遗漏。④成本低。VR看房系统对公众免费开放,研究者可以足不出户地实现全国范围的活荷载调查,成本低廉。

2.2 持久性活荷载幅值调查步骤

为了验证该方法的可行性并避免重复统计同一房源数据,调查仅使用了一个平台的VR系统(链家网, <https://sh.lianjia.com>)。首先在平台上过滤掉新房、毛坯房以及室内凌乱、存在明显搬动迹象等类型的非正常样本,然后按如下步骤调查实际居住的、真实房源的活荷载幅值。

(1)室内物品重量。采用网络清单法确定室内物品重量。住宅建筑内的家具物品种类繁多,且不同种类的物品重量差别较大,因此首先将物品进行初步分类,如床、沙发、书柜等。随后,结合家具电商平台的标准及VR看房实际经验,对同类物品再进行细分,如床分为双人床、单人床、上下铺床;沙发分为单人沙发、多人沙发(L型)、多人沙发(一字型)等,最终确定了包含77种类别的室内物品清单。之后采用网络爬虫技术从主要互联网电商平台(如宜家、京东等)上爬取各类物品的重量样本共15 000余条,其中每类物品的样本量均不低于150条,取平均值作为该类物品的代表质量,形成物品质量表;利用VR系统全景查看、记录各类物品的数量,并计算其重量。

(2)内容物、附属物重量系数。通过VR看房可以获得住宅内家具数量,但无法查看内容物(如衣柜中的衣物、带门书柜内的书籍等)的情况,同时各类物品上的附属物(如家具上、床上的堆放物等)重量也不应忽略。对此,将所调查房间按拥挤情况分为不拥挤、一般拥挤、很拥挤3类(见图5示例),由调查者根据VR观察确定。根据对9个住宅房间实测调查的数据结果,分别计算每个房间内容物、附属物的重量占房间家具总重量的相对比值(即内容物、附属物重量系数),并将3类拥挤情况的系数各自取平均值作为该类情况的代表系数。以此实测数据为依据,得出3类拥挤情况的系数值分别为1.1、1.3和1.5,并直接与步骤(1)所得物品总重量相乘。

(3)常住人员重量。对于居民住宅,除了家具物品之外,常住人员的重量也是持久性活荷载的一项主要内容。调查中由VR系统观察到的床位数统计常住居民的数量。例如:某房间中放置了一张双人床或上下铺床,则认为该房间的常住居民为2名成人;若是单人床,则认为该房间的常住居民为1名成人;若放置了一张婴儿床或一辆婴儿车,则认为该房间的常住居民为1名婴儿。常住人员的重量根据我国卫生部的相关报告进行确定,将成人(包括青少年



图5 不同房间整体拥挤度典型样本

Fig. 5 Typical samples of overall crowding in different rooms

群体)的平均体重取 65 kg,婴儿的平均体重取 15kg。

(4)室面积平均值。由 VR 系统可获得调查房间的面积 A ,将步骤(1)所有物品总重量乘以步骤(2)的重量系数再加上步骤(3)的常住人口重量可得室内持久性活荷载总重量 P ,结合房屋面积 A 获得该活荷载样本的室面积平均值为 P/A 。

2.3 持久性活荷载幅值调查案例

通过 2 个具体的案例展示调查步骤。图 6 和图 7 分别为上海市的一个卧室(房间 1)和客厅(房间 2)的 VR 看房截图,房间面积分别为 10.58 m^2 和 25.38 m^2 ,拥挤程度分别为一般拥挤和不拥挤,基于 VR 场景进行物品数量统计的结果见表 1 和表 2,由此可计算出房间 1 和 2 的持久性活荷载的调查值分别为 $0.513 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.105 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 。



图6 房间1的VR看房截图

Fig. 6 Screenshot of “VR viewing” of Room 1

3 基于房产交易记录的持久性活荷载变动时间调查

如前所示,除了任意时点的幅值分布以外,持久性活荷载随机建模还需要荷载变动间隔时间,也是计算设计基准期内荷载最大值分布的关键参数。



图7 房间2的VR看房截图

Fig. 7 Screenshot of “VR viewing” of Room 2

表 1 房间 1 物品统计

Tab. 1 Results of item statistics of Room 1

物品种类	数量	单个质量/kg	总质量/kg
单人床	1	52	52
床头柜	1	17	17
四门衣柜	1	290	290
收纳盒	1	1	1
行李箱	4	4	16
常住人口	1	65(成人)	65

表 2 房间 2 物品统计

Tab. 2 Results of item statistics of Room 2

物品种类	数量	单个质量/kg	总质量/kg
1 字型沙发	1	120	120
茶几	1	24	24
电视柜	1	60	60
壁挂式电视	1	13	13
单人沙发	1	30	30

活荷载变动的背景是房屋新旧用户搬入、搬出的变化,相邻 2 次变动的时间称为荷载变动时间。传统调查方法以问卷或口头询问业主的搬迁经历,根据其回忆将 2 次搬迁的间隔作为荷载变动时间的一个样本,此前部分研究工作的调查情况和结果如表 3 所示。这种调查方式依赖住户记忆,存在精确性弱、效率低和更新慢等问题。

随着房地产行业和互联网技术的蓬勃发展,关于住宅交易的变动时间,在房地产网站上有大量公开、准确的记录^[15],据此,提出利用房地产交易数据的活荷载变动时间线上调查方法。

表3 住宅荷载变动间隔时间传统调查结果统计

Tab. 3 Statistics of traditional survey results of residential load variation interval

模型	调查方法	调查实例	数据量	平均持续时间/年
平稳二项过程	问卷调查 口头询问	荷载规范组	317	10.0
		牛建刚 ^[13]	105	9.5
		葛素娟 ^[14]	880	10.0

对于某一套住宅,一位业主总的使用时间(即荷载变动时间) T 可近似视为居住时长,即从该业主搬入此住宅到挂牌出售此住宅的时间。这一时间可根据房地产网站上给出的挂牌日期减去上次交易日期计算得到。譬如,网站上的一条信息显示,挂牌时间为2023年3月8日,上次交易时间为2015年4月27日,两者相减就可以得到一个调查样本的持续时间为7.9年。本次调查中的荷载变动时间均按上述方法获得。

4 数据分析

4.1 荷载幅值的概率分布假设检验

选取位于中国不同地区的9座城市作为调查对象,分别是上海、北京、广州、兰州、武汉、成都、昆明、沈阳和青岛,其中包含了我国首次大规模荷载调查的4个城市(北京、兰州、广州、成都),同时兼具考虑了城市的经济条件、地理位置、人口吸引力等因素。采用第3节的方法开展活荷载幅值调查,调查样本数量为4 676个房间,具体包括卧室3 320个、客厅1 300个和书房56个(卫生间、厨房因规范另有规定,故不包含),总面积约75 000m²,在各城市的分布情况见表4。

表4 持久性活荷载值K-S检验结果

Tab. 4 Results of K-S test for sustained live load values

调查城市	总数据量	临界值/ 10^{-2}	$D_n/10^{-2}$	是否通过检验
上海	630	5.4	3.3	是
北京	513	6.0	3.1	是
广州	508	6.0	5.4	是
兰州	506	6.0	4.5	是
武汉	507	6.0	4.0	是
成都	506	6.0	5.5	是
昆明	503	6.1	2.5	是
沈阳	503	6.1	4.1	是
青岛	500	6.1	4.8	是

此前研究均假定住宅持久性活荷载幅值符合极值I型分布。为了确保后续概率分布建模的准确,在此进行统计假设检验,假设住宅持久性活荷载的

理论分布为极值I型分布。以上海为例,本次调查所得的住宅持久性活荷载样本的统计均值和标准差分别为

$$\mu_{L_i} = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = 0.5085 (\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$$

$$\sigma_{L_i} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2 \right)} = 0.2752 (\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$$

式中: L_i 为持久性活荷载任意时点分布值; i 为样本编号。进而,极值I型分布的2个分布参数 α 、 β 分别为

$$\alpha = \frac{\sigma_{L_i}}{1.2826} = 0.2145$$

$$\beta = \mu_{L_i} - 0.5772\alpha = 0.3847$$

首先建立假设:上海地区任意时点住宅持久性活荷载的分布为

$$F_{L_i}(x) = e^{-e^{-[(x-0.3847)/0.2145]}}$$

对本次调查的上海任意时点持久性活荷载的概率分布进行K-S假设检验,结果表明,在置信度为95%情况下,接受上述假设,即可认为本次调查的上海的住宅持久性活荷载全部服从极值I型分布。对另外8座城市的数据重复相同建立假设、假设检验的步骤,结果均服从极值I型分布,检验结果见表4。

图8进一步给出了9座城市的持久性活荷载幅值的分布直方图及概率密度曲线(probability density function, PDF),并给出了各个城市极值I型分布的拟合参数 α 、 β 的取值。

4.2 荷载变动时间的统计结果

荷载变动时间的调查城市与荷载幅值相同,总数据量为46 353条,其中由于数据部分缺失、数据登记有误等原因,存在少量不可用数据。经数据清洗后,得到有效数据共43 059条,有效数据占比(即有效数据量与总数据量的比值)为92.9%,依据房产交易记录的具体调查结果如表5所示。

图9分别给出了9座城市的荷载变动时间直方图及累积频率曲线(cumulative frequency curve, CFC)。图中具体标出了25%、50%和75%分位值对应的荷载变动时间值。以北京为例,分别是5.96、9.98和15.05年。

5 概率建模

5.1 持久性活荷载最大值概率分布

根据假设检验,任意时点住宅持久性活荷载幅值 L_i 服从极值I型分布,分布函数为

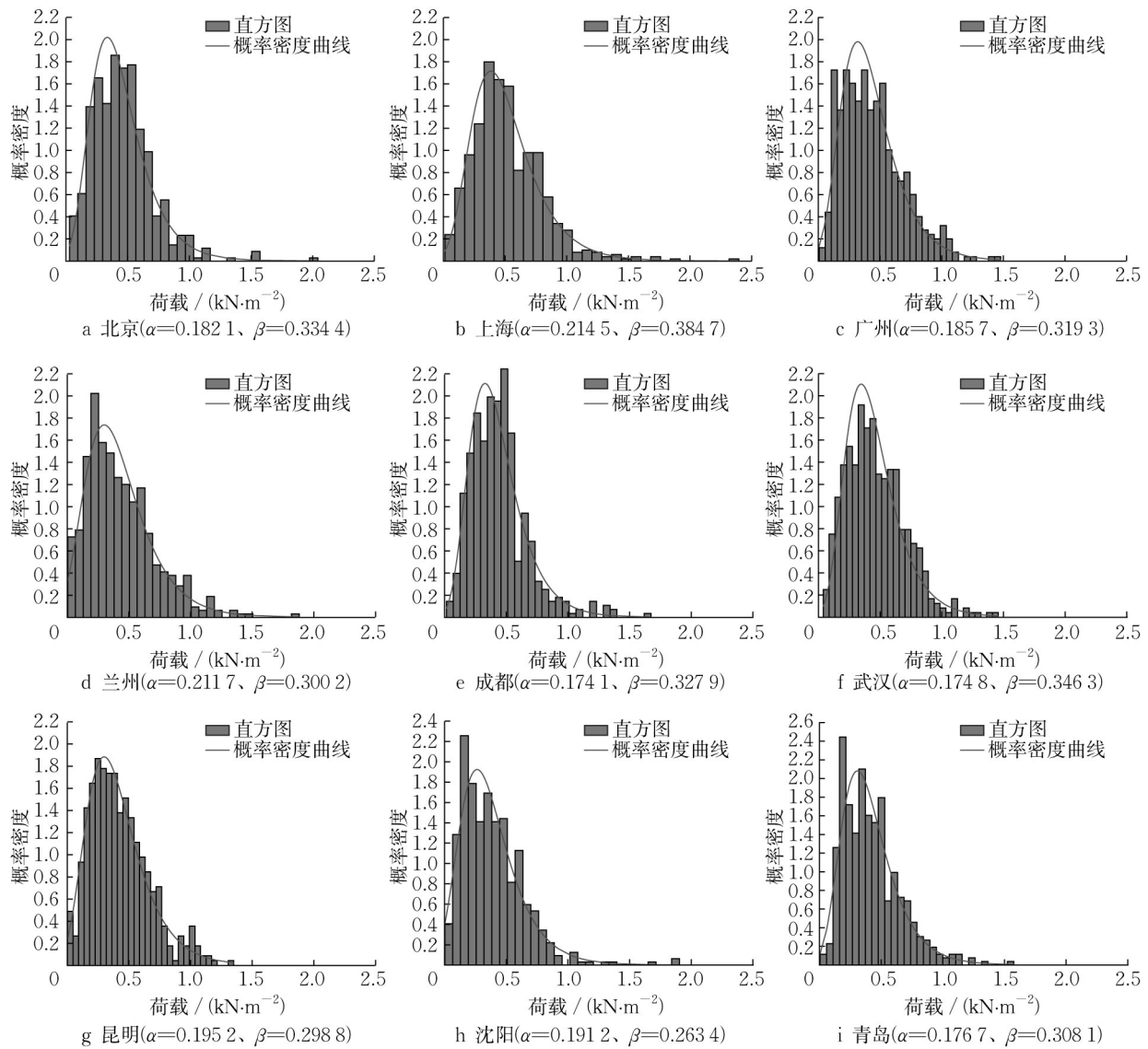


图 8 持久性活荷载直方图及概率密度曲线

Fig. 8 Histogram and probability density function of sustained live load

表 5 住宅荷载变动时间调查结果

Tab. 5 Survey results of residential load variation time

调查城市	总数据量/条	有效数据量/条	有效数据量占比/%	平均持续时间/年
北京	5 140	5 140	100.0	10.9
上海	4 448	4 438	99.8	10.5
广州	5 617	5 522	98.3	8.9
兰州	4 436	3 441	77.6	7.6
成都	5 645	5 476	97.0	6.8
青岛	5 177	4 942	95.4	6.7
武汉	5 611	5 567	99.2	6.1
昆明	5 714	4 444	77.8	5.9
沈阳	4 565	4 089	89.6	5.3
合计	46 353	43 059	92.9	7.7

$$F_{L_t}(x) = e^{-e^{-\frac{x-\beta}{\alpha}}} \quad (1)$$

式中: x 为单个荷载值; α, β 为分布参数,与随机变量的平均值和标准差有关, $\alpha > 0$ 。

设计基准期 $T=50$ 年时住宅持久性活荷载最大值 L_{iT} 也服从极值 I 型分布,概率分布函数可表示为

$$F_{L_{iT}}(x) = e^{-e^{-\frac{x-(\beta + a \ln m)}{a}}} \quad (2)$$

式中: m 表示荷载在设计基准期内的平均出现次数,计算公式为 $m=pr$ 。

根据现行可靠性设计规范建议的平稳二项随机过程,可根据任意时点的统计值计算 L_{iT} 的分布模型参数。以上海为例(本次调查值 $\alpha=0.2145, \beta=0.3847$,图 5),首先要获得分布模型的各个参数,计算过程为:① 建筑结构的设计基准期 $T=50$ 年。② 住宅持久性活荷载每一时段的长度 $\tau=10.49$ 年

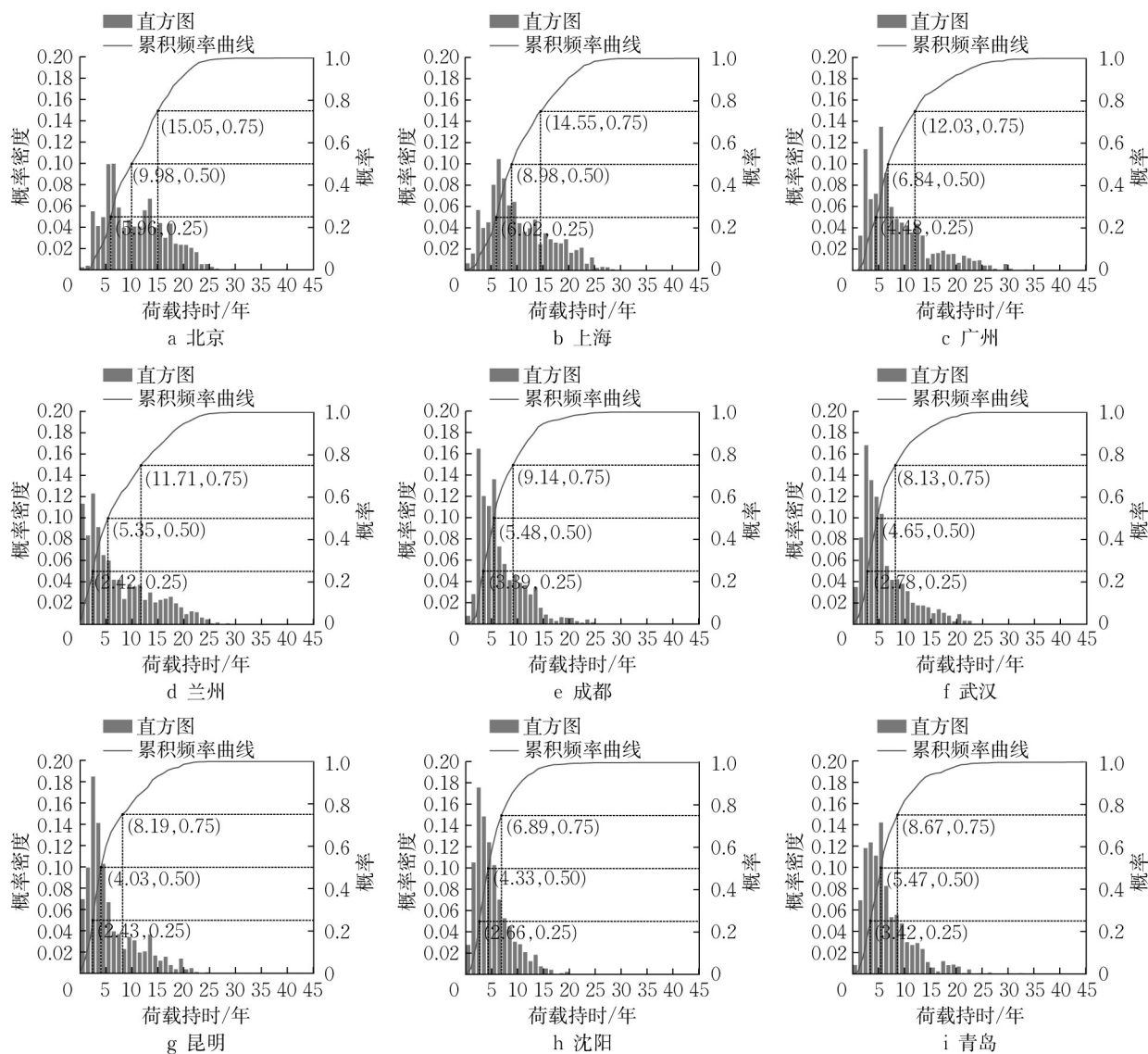


图 9 荷载变动间隔时间直方图及累积频率曲线

Fig. 9 Histogram and cumulative frequency function of load variation interval time

(表 5), 则设计基准期内的总时段数 $r=T/\tau=50/10.49=4.766$ 。③ 设计基准期内, 住宅持久性活荷载始终出现, 故出现概率 $p=1$ 。④ 设计基准期内, 住宅持久性活荷载平均出现的次数为 $m=pr=1\times 4.766=4.766$ 。

根据以上参数, 可得 L_{iT} 的平均值、标准差和变异系数分别为

$$\begin{aligned} \mu_{L_{iT}} &= \mu_{L_i} + \alpha \ln m = 0.8433 (\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}) \\ \sigma_{L_{iT}} &= \sigma_{L_i} = 0.2752 (\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}) \\ \delta_{L_{iT}} &= \sigma_{L_{iT}}/\mu_{L_{iT}} = 0.3263 \end{aligned}$$

根据上述信息, 可建立当设计基准期 $T=50$ 年时, 上海住宅持久性活荷载最大值的概率分布为

$$F_{L_{iT}}(x) = e^{-e^{\frac{x-0.7196}{0.2145}}}$$

对另外 8 座城市重复 5.1 节上述步骤, 代入所需平稳二项随机过程的各个参数, 即可获得相对应的住宅持久性活荷载最大值的概率分布情况。

5.2 荷载组合分析

楼面活荷载的最终设计取值是持久性活荷载与临时性活荷载组合后的结果。采用我国荷载规范推荐的 Turkstra 规则对住宅持久性和临时性活荷载进行组合, 其中持久性活荷载采用 5.1 节的结果, 临时性活荷载采用目前荷载规范中的建议值^[16], 组合方式有以下 2 种:

$$L_{T1} = L_{iT} + L_{is} \tag{3}$$

$$L_{T2} = L_i + L_{iT} \tag{4}$$

最终取上述 2 种组合方式中的较大值作为楼面活荷载最大值 L_T , 即

$$L_T = \max(L_{T1}, L_{T2}) \quad (5)$$

式中: L_{Tn} 为临时性活荷载任意时点分布值; L_{Ti} 为持久性活荷载任意时点分布值; $L_{T,T}$ 为设计基准期内临时性活荷载的最大值。

将上述结果代入组合公式中,可分别求出 2 种组合方式对应的统计参数。以上海为例进行计算。

(1) L_{T1} 的统计参数平均值、标准差以及变异系数分别为

$$\begin{aligned} \mu_{L_{T1}} &= \mu_{L_{T1}} + \mu_{L_n} = 1.311\ 3(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}) \\ \sigma_{L_{T1}} &= \sqrt{\sigma_{L_{T1}}^2 + \sigma_{L_n}^2} = 0.373\ 1(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}) \\ \delta_{L_{T1}} &= \sigma_{L_{T1}}/\mu_{L_{T1}} = 0.284\ 5 \end{aligned}$$

(2) L_{T2} 的统计参数平均值、标准差以及变异系数分别为

$$\begin{aligned} \mu_{L_{T2}} &= \mu_{L_i} + \mu_{L_{T2}} = 1.292\ 8(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}) \\ \sigma_{L_{T2}} &= \sqrt{\sigma_{L_i}^2 + \sigma_{L_{T2}}^2} = 0.373\ 1(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}) \\ \delta_{L_{T2}} &= \sigma_{L_{T2}}/\mu_{L_{T2}} = 0.288\ 6 \end{aligned}$$

显然,第 1 种组合 L_{T1} 的值大,由此可确定设计基

准期内住宅楼面活荷载 L_T 的分布参数 α, β 分别为

$$\begin{aligned} \alpha_{L_T} &= \frac{\sigma_{L_n}}{1.282\ 6} = 0.290\ 9 \\ \beta_{L_T} &= \mu_{L_n} - 0.577\ 2\alpha_{L_n} = 1.143\ 4 \end{aligned}$$

L_T 的概率分布函数 $F_{L_T}(x)$ 为

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-1.1434}{0.2909}}}$$

现行荷载规范对住宅结构楼面活荷载标准值取 $L_k = 2\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$, 对应的分位值(保证率)为 97.36%。利用本次调查结果可计算此保证率下上海的住宅活荷载标准值为

$$L_k = \mu_{L_T} + 2.37\sigma_{L_T} = 2.195\ 7(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$$

通过计算分别得到 9 座城市在不同分位值下的住宅活荷载标准值,并对比了当前规范和本次调查的结果(表 6),表中的相对偏差为本次调查值和现行规范值之差与现行规范值的比值。表中 79.1% 的分位值对应 1987 年版荷载规范^[17],即住宅结构楼面活荷载标准值为 $1.5\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 时的保证率。

表 6 住宅活荷载计算及与规范比较结果

Tab. 6 Residential live load calculation and comparison results with codes

数据来源	数据量/条	持久性活荷载/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)		临时性活荷载/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)		荷载变动时间/年	分位值		相对偏差/%	
		均值	标准差	均值	标准差		79.10%	97.36%		
荷载规范组	566	0.504 0	0.162 0			10.0	1.500 0	2.000 0		
上海	630	0.508 5	0.275 2			10.5	1.572 5	2.195 7	9.78	
北京	513	0.439 4	0.233 5			10.9	1.464 2	2.037 9	1.90	
广州	508	0.426 5	0.238 2			8.9	1.457 8	2.036 9	1.85	
武汉	507	0.447 2	0.224 2			6.1	1.519 0	2.082 3	4.11	
本次调查	兰州	506	0.422 4	0.271 5	0.468 0	0.252 0	7.6	1.548 4	2.167 0	8.35
成都	506	0.428 4	0.223 4			6.8	1.479 6	2.042 0	2.10	
昆明	503	0.411 5	0.250 4			5.9	1.545 4	2.138 7	6.93	
沈阳	503	0.373 8	0.245 2			5.3	1.516 9	2.104 1	5.21	
青岛	500	0.410 1	0.226 7			6.7	1.470 6	2.036 6	1.83	
全部	4 676	0.432 0	0.247 1			7.7	1.507 6	2.097 0	4.85	

5.3 结果讨论与分析

表 6 的调查统计结果表明:

(1)对于任意时点持久性活荷载,上海平均值高于规范的平均值,其余城市的平均值则低于规范值;同时,9 座城市的标准差均明显高于规范的标准差。结合作者 VR 看房的实际体验,标准差变大的主要原因是随着审美水平的提高和多元化文化发展,相较于几十年前较为单一的家具类型和布置形式,如今住宅的装修风格更加多样化(如中式、美式或日式等),造成不同住宅的家具种类和数量均差距很大。

(2)上海和北京的持久性活荷载变动时间平均值略大于规范中采用的 10 年,分别高 4.8% 和 8.3%;而其余城市的荷载变动时间均小于 10 年,下降幅度为 11%~47%。这一结果应与不同城市的经济发展

程度、房价水平、购房政策和人口吸引力等有关。

(3)值得注意的是,在相同保证率水平下,本次调查得到的 9 座城市的住宅活荷载标准值均略高于荷载规范建议的 $2.0\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$, 提高幅度均在 10% 以内。其中上海的标准值最大,比规范高 9.8%。标准值提高主要有两方面原因:荷载幅值增大和荷载变动时间缩短,具体到不同城市的主要变化原因不同。例如,上海和北京的标准值提高是由于荷载幅值的增大,而其余城市的标准值提高主要是由于荷载变动时间的缩短。

6 结论

针对传统活荷载调查方式成本高、时效性差、样

本少、代表性弱等问题,提出了大数据支撑下的建筑活荷载调查方法,综合利用房产交易平台的开放式全景VR系统获取各类物品的数量信息,再结合网络大数据和网络爬虫技术,得到物品的重量以及荷载变动时间。以住宅建筑活荷载的实例分析表明,所建议的方法具有可行性,可在不进行现场称重的前提下获得活荷载结果,成本低而效率高。然而,该方法目前仍存在自动化程度偏低和部分欠发达地区样本量少的局限性。

采用该方法完成9座城市的调查,样本数和调查面积都显著高于以往调查工作。根据调查得到了一些值得注意的结果:任意时点住宅持久性活荷载的标准差较过往统计结果明显增大,幅度为35%~70%;不同城市活荷载变动时间不同,整体呈现下降趋势。上述2个因素导致所有调查城市设计基准期内活荷载的标准值均增大,最大增幅接近10%。

作者贡献声明:

陈 隽:论文整体构思,研究步骤指导,论文修改。

窦 凯:数据收集与处理,建模与理论研究,论文撰写。

徐 迟:数据收集与处理。

吴文瀚:数据收集与处理。

李 杰:研究思路指导,建模理论指导,论文修改。

参考文献:

- [1] 曹振熙,曹普. 建筑工程结构荷载学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
CAO Zhenxi, CAO Pu. Load of civil engineering structure [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2006.
- [2] ROSS B C. Probabilistic load duration model for live loads [J]. Journal of Structural Engineering, 1983, 109(4): 859.
- [3] ASANTEY S B A. Factory and warehouse live load survey [J]. Building and Environment, 1996, 31(2): 167.
- [4] 金新阳,陈凯,唐意.《建筑结构荷载规范》发展历程与最新进展[J]. 建筑结构,2019,49(19):49.
JIN Xinyang, CHEN Kai, TANG Yi. Development and latest progress of load code for the design of building structures [J]. Building Structure, 2019, 49(19): 49.
- [5] 李杰. 论第3代结构设计理论[J]. 同济大学学报(自然科学版),2017,45(5):617.
LI Jie. On the third generation of structural design theory [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(5): 617.
- [6] JIN Xinyang, ZHAO Jida. Development of the design code for building structures in China [J]. Structural Engineering International, 2012, 22(2): 195.
- [7] 陈隽,李洋,臧笛. 建筑活荷载的大数据调查方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2020,48(2):208.
CHEN Jun, LI Yang, ZANG Di. Research on big data survey method of building live load [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(2): 208.
- [8] 李学龙,龚海刚. 大数据系统综述[J]. 中国科学:信息科学,2015,45(1):1.
LI Xuelong, GONG Haigang. Systematic a survey on big data systems [J]. Scientia Sinica: Informationis, 2015, 45(1): 1.
- [9] 陈隽. 试论结构工程中的大数据:范式、技术与实例分析[J]. 工程力学,2019,36(6):175.
CHEN Jun. A discussion on big data in structural engineering: paradigm, technology and example [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(6): 175.
- [10] 马智亮,刘世龙,刘喆. 大数据技术及其在土木工程中的应用[J]. 土木建筑工程信息技术,2015,7(5):45.
MA Zhiliang, LIU Shilong, LIU Zhe. Big data techniques and its applications in civil engineering [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2015, 7(5): 45.
- [11] ALAVI A H, GANDOMI A H. Big data in civil engineering [J]. Automation in Construction, 2017(79): 1.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构可靠性设计统一标准:GB 50068—2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Unified standard for building structure reliability design: GB 50068—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [13] 牛建刚. 典型住宅结构楼面荷载的调查与统计分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2004.
NIU Jianguang. Investigation and statistical analysis on floor loads of typical residential buildings [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004.
- [14] 葛素娟. 中原地区住宅建筑结构荷载调查与统计模型研究[D]. 郑州:郑州大学,2004.
GE Sujuan. Structural load investigation and statistical model of residential buildings in the Central Plains [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2004.
- [15] XU Chi, CHEN Jun, LI Jie. A real estate data based online survey method on the live load change of residential buildings [C]//Proceedings of the 20th Working Conference of the IFIP WG 7.5 on Reliability and Optimization of Structural Systems. Kyoto: [S.n.], 2022: 1-7.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程结构通用规范:GB 55001—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 Engineering Structures: GB 55001—2021[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.
- [17] 中华人民共和国城乡建设环境保护部. 建筑结构荷载规范:GBJ 9—1987[S]. 北京:中国计划出版社,1987.
Ministry of Urban and Rural Construction and Environmental Protection of the People's Republic of China. Code for building structural load: GBJ 9—1987 [S]. Beijing: China Planning Press, 1987.