

新冠肺炎疫情下的医院弹性空间管理

乐云¹, 雪克来提·亥依热特¹, 李永奎¹, 虞涛²

(1. 同济大学经济与管理学院, 上海 200092; 2. 上海交通大学医学院附属仁济医院, 上海 200127)

摘要: 医院是抗击新冠肺炎疫情的核心部门, 医院用户活动的有效管理、空间使用率的提升成为当前急需解决的问题。在空间使用分析方法中引入弹性空间的概念来分析医院用户活动和空间使用特征, 通过构建医院用户活动-空间映射过程, 将满足一类用户单一活动的医院空间变成满足多类用户多个活动的医院空间。最后, 通过案例验证该方法的符合性和可接受性。

关键词: 医院空间管理; 弹性空间; 活动-空间映射

中图分类号: R197.324

文献标志码: A

Hospital Flexible Space Management Under the Covid-19 Pandemic

LE Yun¹, XUEKELAITI Haiyirete¹, LI Yongkui¹, YU Tao²

(1. School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Renji Hospital, School of Medicine, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200127, China)

Abstract: Hospitals are the core department in the fight against the covid-19 pandemic. The effective management of hospital user activities and the increasing space utilization have become urgent problems. The concept of flexible space was employed to analyze the characteristics of hospital user activities and space use in the method of space use analysis. By constructing a hospital user activity-space mapping process, the hospital spaces that initially designed for meeting a single activity of one type of user can be transferred to the hospital spaces for meeting the activities of multiple types of users. Finally, the conformity and the acceptability of the method are verified in case study.

Key words: hospital space management; flexible space; activity-space mapping

体, 是医院建设与发展的主要内容之一^[1]。2020年的新冠肺炎疫情考验着很多国家和地区的公共卫生服务系统应对突发疫情的能力, 疫情防控系统的核心之一是应急救援的建筑场所, 作为这次战“疫”的主战场, 固有建筑与快速搭建的临时设施已成为夺取最后胜利的重要保障^[2]。应急医疗建筑的快速建设在面对疫情爆发时虽属无奈之举, 但起到的作用不可替代。快速建设的临时医疗建筑成本不菲, 建筑安装费用与中高档的正规医院相仿, 但使用寿命往往有限, 使用年限一般不超过10年。例如, 北京小汤山医院2003年建成, 2010年拆除, 从性价比角度来看并不经济^[3]。

抗击疫情中最可怕的不是病毒, 而是病毒面前医疗服务体系并不能较好地满足人们的就医需求。导致“看病难、看病贵”成为我国重大民生问题的主要原因之一, 是既有医院空间使用的不合理, 尤其是在重大突发性灾难事件发生时如何快速调整空间使用功能, 有效提升空间使用效率。因此, 如何有效使用有限的医院空间成为提升医院管理水平的重要问题。张远平等^[4]提出新建医院时应考虑弹性, 陈永建等^[5]提出医院功能布局时应注重弹性空间的组织形式。由于弹性空间既可以作为一个单一空间满足一个群体用户的单个活动, 又可以分为多个空间同时满足多个群体用户的多个活动^[6], 因此在应用时能够带来更多的可用面积并增加用户密度^[7-8]。

空间管理中最重要的是明确用户活动与空间的对应关系^[9-10], 医院弹性空间因区别于普通空间, 与用户活动之间的对应关系更复杂且多变。引用空间使用分析方法, 对医院用户活动与空间使用特征进行分析。通过选择用户的空间需求、找到可用空间、计算可用单元数量、将用户活动映射到可用空间等四个阶段将医院用户活动映射到对应的空间, 在不

医院建筑作为一切医疗活动的最基本空间载体

收稿日期: 2020-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(71871164)

第一作者: 乐云(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为工程管理、建设工程项目管理。

E-mail: leyun@tongji.edu.cn

通信作者: 雪克来提·亥依热特(1989—), 男, 博士生, 主要研究方向为建设工程管理。E-mail: daxuetongji@126.com



论文
拓展
介绍

损害建筑结构和功能的前提下提升医院空间使用率。

1 弹性空间的应用与分析

建筑空间的变化通常分为以下两种:一种是整个空间结构和尺寸固定,但空间布局可以通过可移动部件改变,这种空间可以作为一个单元使用也可以分为多个可用单元使用,如医院体检中心的可移动隔板;另一种是空间结构固定,但空间尺寸可通过实体部件改变,这种空间只能用作一个单独单元使用,如通过新建墙体让空间变小或拆除墙体让空间变大^[11]。本研究中的可变空间是第一种,即弹性空间,它不会损坏建筑结构的适应性空间,因此成为空间管理中的新趋势和新动力^[12]。Schmidt等^[13]研究的290个建筑空间中有137个(约占47.2%)与弹性空间有关。

调研上海市涉及弹性空间的39个医院空间后发现,有32个弹性空间(约占总数的82.1%)采用相同尺寸的子单元(即小空间,一个弹性空间包含多个小空间),并且所有39个弹性空间内都安装了可移动部件。因此,假设单个弹性空间里的子单元尺寸是相同的,单个弹性空间中可移动部件的属性也是相同的,并且可移动部件占地面积为零。为便于可用单元数量计算,将弹性空间分为两种类型:一类的头部子单元与尾部子单元不共用一个可移动部件,即弹性空间类型一;另一类的头部子单元与尾部子单元共用一个可移动部件,即弹性空间类型二。如图1所示,弹性空间类型一的头部子单元a和尾部子单元d不共用一个可移动部件,但是弹性空间类型二的头部子单元a和尾部子单元d共用一个可移动部件。

2 医院用户活动特征分析

医院用户活动特征是区分医院空间使用类型的前提,参考Kim等^[14]在分析学校用户活动特征时的方法对医院用户活动进行研究。由于医院的功能更复杂,用户活动比学校更多元化,尤其对传染病防控有特殊的生物安全要求,在《实验室生物安全通用要求》^[15]中明确规定,医院临床实验区和标本接受区都必须达到生物安全三级标准,因此必须考虑生物安全因素,避免操作人员在实验过程中吸入某些固有或外来物质而引发致命或严重疾病。

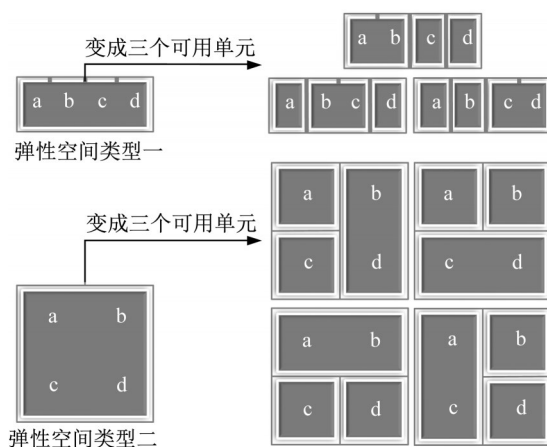


图1 弹性空间的两种类型

Fig.1 Two types of flexible space

为确认医院用户活动与空间使用的特征,对上海市某三甲医院的12位管理人员进行问卷调查,按照五点李克特量表对每个用户活动和空间使用的特征进行一致程度评分,并指出医院用户活动和空间使用的其他特征。从调查结果中看到,归纳出来的医院用户活动和空间特征都被医院管理人员认可,平均得分为4.6(满分5.0)。此外,调查问卷中医院管理人员对医院弹性空间、生物安全标准、隔音度、视觉隐私等特征提出了建议。以下是所归纳的七个医院用户活动特征。

(1) 医院用户活动特征一

医院有些非典型活动不是经常发生,但是发生时需要适当的空间。例如,全院大会平均一个月召开一次,但召开时需要一个容纳全院职工的空间。这些活动不像患者看病那样每天都发生,但在空间使用分析时需要考虑。

(2) 医院用户活动特征二

医院有些用户活动有特殊的空间需求,但该需求不是进行这些活动的最低要求。例如,医院各科室主任通常期望具有比自己的工作需求(如办公桌)更大的私人空间。

(3) 医院用户活动特征三

医院有些用户活动需要指定专门的空间,但这些空间即使空闲时也不能被其他用户使用,如重症监护室。

(4) 医院用户活动特征四

医院有些用户活动需要整个空间单元。例如,学术讲座需要整个报告厅,即使有些座位空了,讲座期间也不能在空间内进行其他活动。相比之下,护士的工作需要操作台,护士站其余空间可以被其他

活动使用。

(5)医院用户活动特征五

医院有些用户活动需要专门命名的空间,如手术室,但有些活动需要特定条件,如有床位的注射室。

(6)医院用户活动特征六

医院有些用户活动需要弹性空间,如医院门诊大厅,该区域可以按照候诊人员数量进行动态调整,而医院也有些用户活动需要非弹性空间,如医院交费处是非弹性空间,否则有人可能会破坏可移动部件并进行盗窃。

(7)医院用户活动特征七

医院有些用户活动需要达到生物安全三级标准,如传染病区,但有些用户活动不需要达到生物安全三级标准,如外科病房。

3 医院空间使用类型分析

比起其他民用建筑,医院所包含的空间数量多、种类复杂。根据国际建筑物分类系统 Ominiclass 的分类,医院具有 19 个大类和近 400 个子类的功能空间。我国医院的主要功能空间大致可以分为门诊、医技、手术、病房和其他分区^[16]。医院主要功能空间分类如图 2 所示。

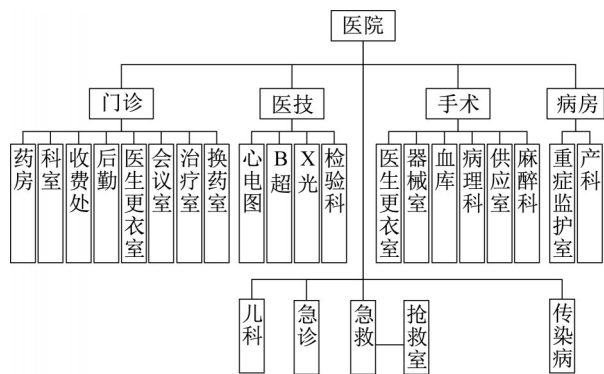


图2 医院主要功能空间分类

Fig.2 Classification of main functional spaces in hospital

为区分医院复杂的空间使用类型,参考 Kim 等^[14]在研究学校空间使用特征时的思路,将医院用户活动特征与医院空间使用特征对应分析,这样医院用户活动可以看作是不同空间使用类型之间的组合,进而得出以下八个空间使用类型。

(1)医院空间使用类型一。区分空间内的活动是否为典型活动。

(2)医院空间使用类型二。区分空间需要满足的是特殊空间需求(重要用户)还是只需满足最低需求(普通用户)。例如,医院各科室主任通常期望具有比自己的工作需求(如办公桌)更大的私人空间,一个普通检验医师日常工作只需一个检验台而无需整个房间。

(3)医院空间使用类型三。区分空间中用户的活动偏好与空间的约束条件是否一致。

(4)医院空间使用类型四。区分空间中是否需要指定的用户活动。例如,学术讲座需要整个报告厅,即使有些座位空了,讲座期间也不能在这个空间内进行其他活动。相比之下,护士的工作需要护士站中的操作台,护士站其余空间可以被其他活动使用。

(5)医院空间使用类型五。区分空间需要被用户整个占用还是只需要设备。例如,有些患者在门诊接受注射治疗时只需要一个设备(注射室里的椅子),但有些患者进行手术时需要整个房间(手术室)。

(6)医院空间使用类型六。区分空间需要专门命名还是只需某种特征。例如,医院的缴费活动必须在有命名的收费处进行,而医院排队挂号只需要一定特征的区域就可以进行。

(7)医院空间使用类型七。区分空间中是否允许使用弹性空间。例如,医院门诊大厅可以是弹性空间,按照候诊人员数量进行动态调整,但是传染病区是非弹性空间,不然无法控制病毒的传播。

(8)医院空间使用类型八。区分空间是否达到生物安全三级标准。例如,进行细胞检验需要达到生物安全三级标准的实验室,但外科病房就不需要达到生物安全三级标准。

医院空间使用类型区分如表 1 所示。

按照对医院用户活动与空间使用特征的分类,一个医院用户活动可以看作是以上八种空间使用类型的组合。因为用户活动的偏好和空间的约束条件相同与否(医院空间使用类型三)会导致两种可能(一种可能是用户偏好和空间约束相同,另一种可能是用户偏好和空间约束不同),所以空间使用类型四至八的可能性需要分别考虑。当空间约束和用户偏好相同时,空间使用类型四至八的可能组合数量为 $32=2\times 2\times 2\times 2\times 2$;当空间约束和用户偏好不同时,空间使用类型四至八的可能组合数量为 $1\ 024=(2\times 2\times 2\times 2\times 2)\times (2\times 2\times 2\times 2\times 2)$ 。当空间约束和用户偏好相同时(空间使用类型三的一种可能情

表1 医院空间使用类型区分

医院空间使用类型	区分
类型一	典型活动 非典型活动
类型二	重要用户 普通用户
类型三	空间约束条件=用户偏好 空间约束条件≠用户偏好
类型四	需要指定的空间 不需要指定的空间
类型五	需要设备 需要整个房间
类型六	需要专门命名的空间 需要有某特征的空间
类型七	允许弹性空间 不允许弹性空间
类型八	需要达到生物安全三级标准 不需要达到生物安全三级标准

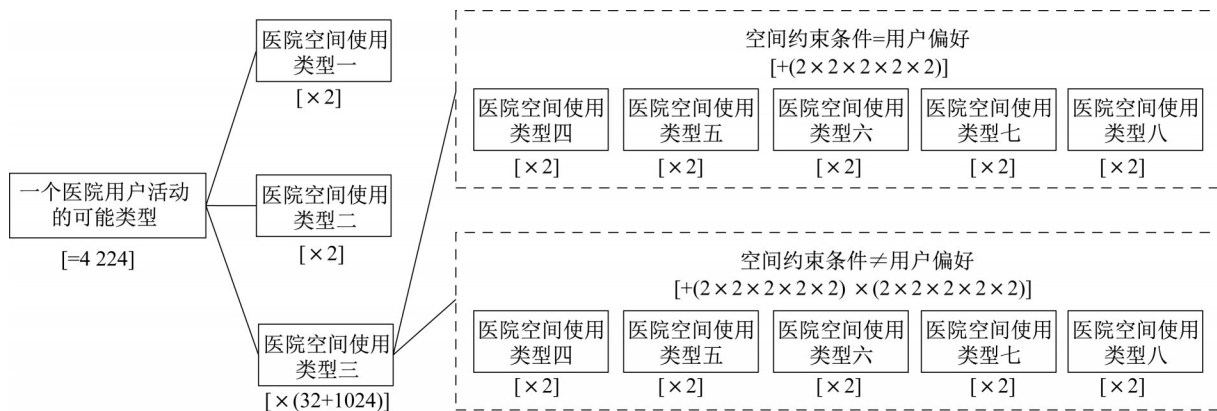


图3 医院用户活动的可能类型数量计算

Fig.3 Calculation of the number of possible types of hospital user activities

4 医院用户活动-空间映射

映射是两个集合之间的相互对应关系。在用户活动与空间关系的相关研究中,Zimmermann^[17]和Shen等^[18]通过在用户活动定义中添加“空间”属性的方式确定两者关系,Cha等^[19]通过开发空间偏好模型解释用户的空间选择行为,Kim等^[20]在地理信息系统中引用网格模式法分析学生在大学校园中的活动,确定学生活动和空间之间的关系。虽然上述方法为用户活动-空间映射提供背景知识,但是在医院弹性空间管理中无法使用,主要原因是没有考虑空间的弹性,因为弹性空间根据活动的需求可以划分为不同数量的可用单元,一个弹性空间可以同时容纳多个用户活动,这使得用户活动与空间的对应关系变得更复杂。

医院用户活动-空间映射过程是一个典型的多

况),一个用户活动的可能类型数量为 $128=2$ (空间使用类型一的可能数量) $\times 2$ (空间使用类型二的可能数量) $\times 32$ (空间使用类型四至八的可能组合数量);当空间约束和用户偏好不同时(空间使用类型三的另一可能情况),一个用户活动的可能类型数量为 $4\ 096=2$ (空间使用类型一的可能数量) $\times 2$ (空间使用类型二的可能数量) $\times 1\ 024$ (空间使用类型四至八的可能组合数量)。因此,考虑空间约束和用户偏好相同与否的两种可能情况时,一个医院用户活动的可能类型数量为 $4\ 224=128+4\ 096$,如图3所示。在现有医院空间使用类型列表中添加一个空间使用类型使得可能的用户活动数量增加到原先的4倍,这表明了空间使用分析中定义和区分空间使用类型的重要性。

项式问题,每个阶段的计算受到多项式的限制,因此在映射过程中应用蛮力搜索算法。如表2所示,医院用户活动-空间映射按照以下四个阶段进行:①选择用户的空间需求;②找到可用空间;③计算可用单元数量;④将用户活动映射到可用空间。

映射过程的第一阶段输入用户活动信息,第二阶段对不同类型的可用空间进行分类,第三阶段针对不同的弹性空间使用类型计算可用单元数量,第四阶段根据可用空间类型为用户活动分配适当的空间。图4为映射过程流程。

4.1 选择用户的空间需求

采用映射过程处理医院用户活动的空间需求时,首先读取用户类型(即医院空间使用类型二),为下一阶段选择对应的空间需求(即医院空间使用类型三)。选择用户的空间需求时需要考虑以下情况:①如果空间约束与用户偏好不同,并且用户是普通

表 2 医院用户活动-空间映射过程

Tab.2 Hospital user activity-space mapping process

阶段	功能	输入项	输出项	相关的医院空间使用类型
一	选择医院用户空间需求	医院用户活动信息	空间需求选择	二、三
二	从医院空间信息中找到可用空间,将可用空间分为不同类型	医院用户活动信息,医院空间信息,医院空间需求选择	识别可用空间及其类型	五、六、七、八
三	如果可用空间是弹性空间,就计算可用单元数	医院用户活动信息,医院空间信息,医院弹性空间类型	弹性空间的可用单元数	三
四	为医院用户活动分配指定的空间,活动映射到可用空间	医院用户活动信息,医院空间信息,可用空间类型分类,可用单元数	活动-空间组合列表	四、五

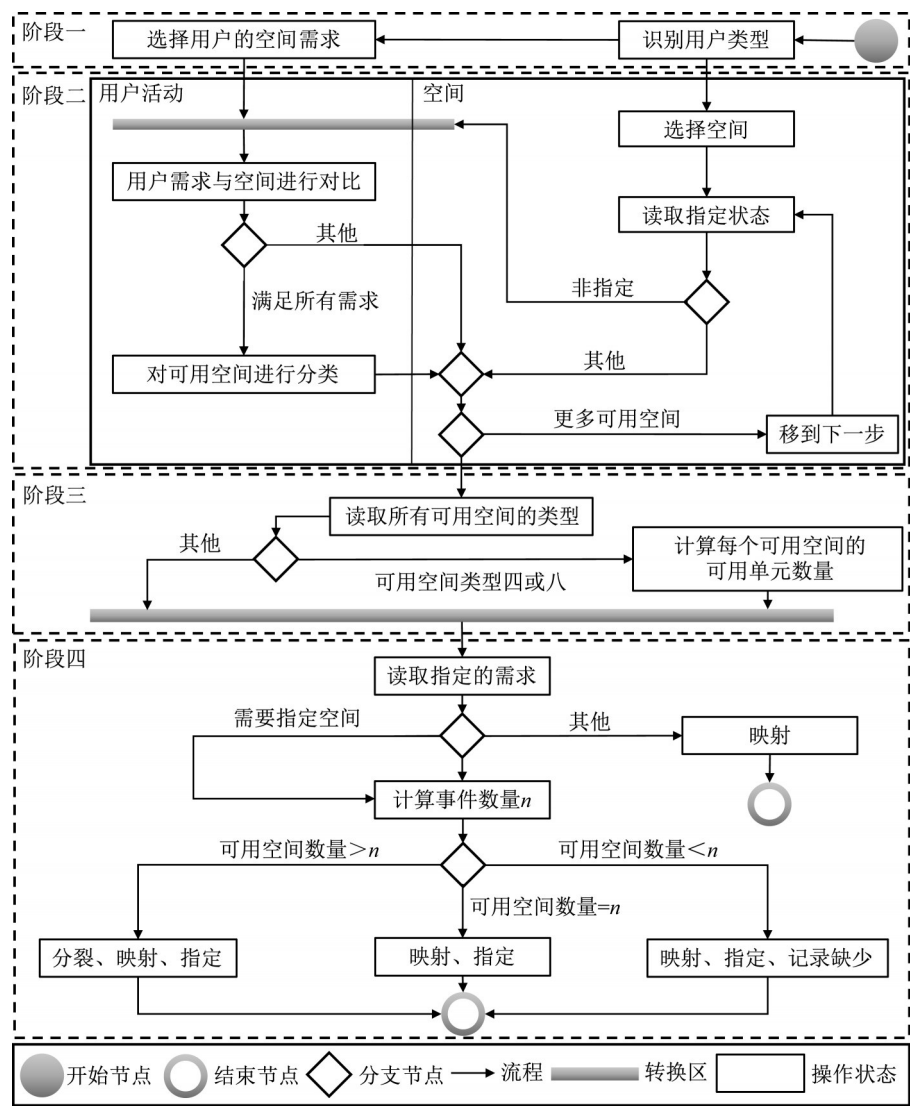


图 4 医院用户活动-空间映射过程流程

Fig.4 Flow chart of hospital user activity-space mapping process

用户,就选择空间的约束条件作为下一阶段的空间需求;②如果空间约束与用户偏好不同,并且用户是重要用户,就选择该用户偏好作为下一阶段的空间需求;③如果空间约束与用户偏好相同,就选择空间的约束条件(或用户偏好)作为下一阶段的空间需求。

4.2 找到可用空间

在第一阶段确定用户的空间需求之后,第二阶段需要读取需求的值并找到满足活动需求的所有非指定空间,如空间类型、空间名称(即医院空间使用类型六)、空间数量和空间最小面积,检查所有闲置的空间,按照可用空间类型进行标记。找到可用空间并进行分类时,按照医院空间使用类型五、七、八

的不同组合进行区分。因为《生物安全实验室建筑技术规范》^[21]中规定,达到生物安全三级标准的空间不允许使用弹性空间,因此在允许使用弹性空间条件下不考虑医院空间使用类型八。若医院用户活动需要使用整个单位空间(即医院空间使用类型五)、

不允许使用弹性空间(即医院空间使用类型七)、不需要达到生物安全三级标准(即医院空间使用类型八),则通过映射过程找到满足空间需求的所有非指定空间并标记为可用空间类型一,可用空间类型二至八以此类推,如图5所示。

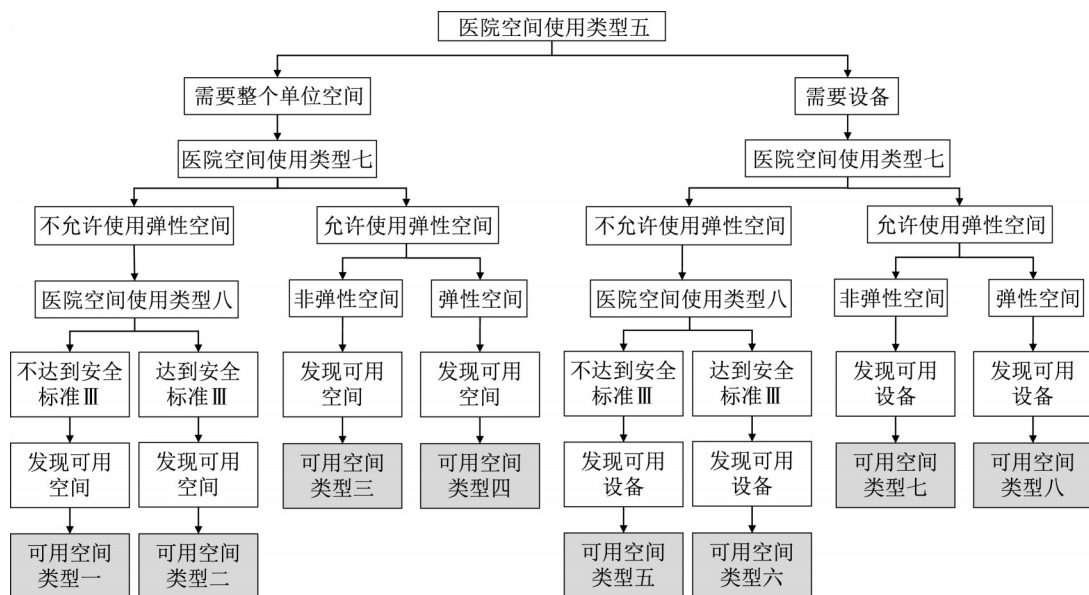


图5 可用空间类型

Fig.5 Available space types

4.3 计算可用单元数量

为捕获两种类型的弹性空间,开发了判断可用单元数量是否满足用户活动的算法。当可用空间是弹性空间(即可用空间类型四或可用空间类型八)时,从空间信息中提取含有 Z 个子单元的弹性空间;当满足用户活动空间需求的最小子单元数量为 S 时,考虑到不同的弹性空间类型,通过排列组合得到弹性空间内形成的可用单元数量 K (见式(1))。当子单元的顺序不重要时,可以使用组合法对所有可

用单元进行计算,以避免遗漏或重复操作。按照以下四个步骤进行计算:

步骤1 设 Z 为弹性空间包含的子单元数量。

步骤2 设 S 为弹性空间内一个可用单元包含的子单元数量(最初 $S=1$,即仅有一个子单元能接受用户活动)。

步骤3 如果 S 和子单元面积的乘积大于等于活动需要的最小面积,就按照以下计算方法将可用空间划分为 K 个可用单元并停止,否则转到步骤4。

$$K = \begin{cases} \frac{Z}{S}, S=1 \text{ 或 } S=Z \\ \frac{(Z-S+1)!}{(Z-S)!} = Z-S+1, 1 < S < Z \text{ 且弹性空间类型一时} \\ Z, 1 < S < Z \text{ 且弹性空间类型二时} \end{cases} \quad (1)$$

步骤4 如果 S 和子单元面积的乘积小于活动需要的最小面积,就将 S 增加1个单位($S=S+1$)并转到步骤3。

4.4 将用户活动映射到可用空间

根据医院用户活动信息和第三阶段计算的可用单元数量,读取医院空间使用类型四和医院空间使用类型五,将活动映射到可用空间并生成活动-空间组合。生成活动-空间组合后,按照第二阶段中确定

的可用空间类型对空间进行标记。

5 案例分析

为检验医院用户活动-空间映射过程的符合性和可接受性,进行验证实验。验证实验的案例从上海市仁济医院中开发,如表3所示,五位医院管理人员参与实验,要求实验人员从案例中的20个用户活

动和14个空间中生成用户活动-空间组合。

5.1 映射结果

平均工龄为11.4年的医院管理人员A、B、C、D、E参加验证实验。先通过人工方式生成活动-空

间组合,然后按照映射过程生成活动-空间组合,对两次生成的活动-空间组合进行对比。从实验结果发现,医院管理人员B、D、E按照映射过程生成的活动-空间组合和有效的活动-空间组合完全一致,医院管理人员A在内科楼案例中由于理解“需要指定的空间”规则时产生错误而未能生成一个活动-空间组合,医院管理人员C在科研楼案例中由于理解“达到生物安全三级标准”规则时产生错误而生成了一个错误的活动-空间组合。缺失的活动-空间组合在图6中用虚线突出表示。

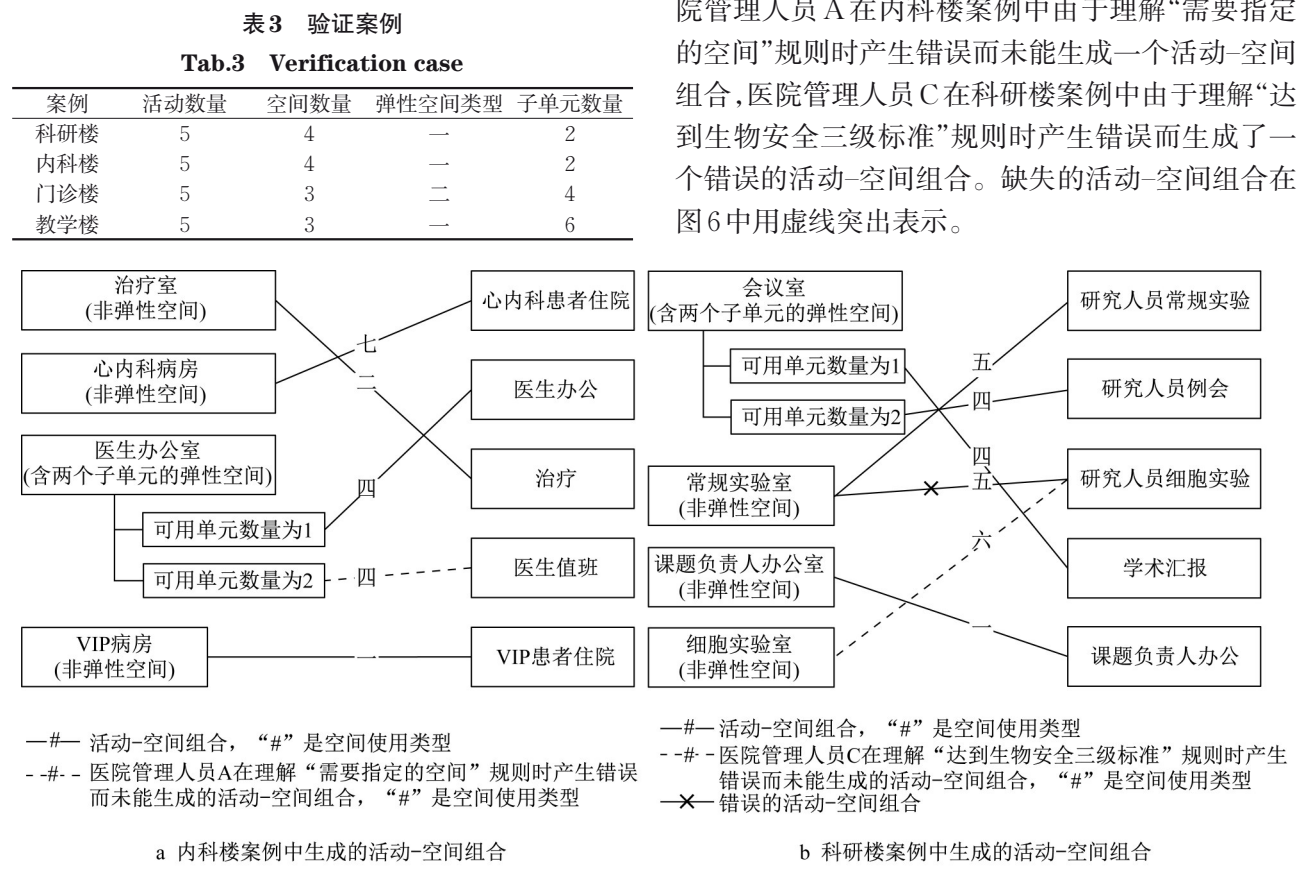


图6 医院管理人员生成的活动-空间组合

Fig.6 Activity-space pairs generated by hospital administrators

5.2 符合性检验

符合性是指映射过程生成结果和专业人员生成结果的一致程度。医院管理人员通过人工生成活动-空间组合消耗的平均时间为2.10 h,其中最短1.80 h、最长2.40 h、标准差0.19 h;按照映射过程生成用户活动-空间组合消耗的平均时间为1.50 h,其

中最短1.30 h、最长1.70 h、标准差0.16 h。这表明,按照映射过程生成活动-空间组合所消耗的时间比人工消耗的时间短。由于按照映射过程生成的活动-空间组合和有效的活动-空间组合之间存在两处偏差,因此通过计算得到的映射过程符合性为98%,如表4所示。

表4 符合性检验					
Tab.4 Conformity verification					
参与者	工龄/年	人工生成的活动-空间组合数	按照映射过程生成的活动-空间组合数	有效的活动-空间组合数	符合性
医院管理人员A	6.0	19	20	19	0.95
医院管理人员B	17.0	20	20	20	1.00
医院管理人员C	12.0	20	20	20	1.00
医院管理人员D	13.0	20	20	20	1.00
医院管理人员E	9.0	20	20	19	0.95
平均值	11.4				0.98

5.3 可接受性检验

可接受性是指专业人员在多大程度上接受映射过程的意愿。为验证映射过程98%的符合性不是

随机事件,进一步验证映射过程的可接受性,邀请医院管理人员对映射过程进行评价,从医院空间管理的角度在五点李克特量表上对映射过程的可接受性

进行评估。从评估结果看到,所有医院管理人员都认为映射过程是可以接受的,平均得分为4.8,其中四位医院管理人员打5分,一位医院管理人员打4分。医院管理人员对映射过程的评价和建议如下:在医院空间管理中映射过程能够更好地梳理用户活动和空间之间的关系,通过直观的信息向医院管理人员展示空间使用情况;映射过程中通过弹性空间的变化实现了空间使用率的提升;如果映射过程中有多种用户类型使用效果就会更好,如按照病情的严重程度将患者分为两种以上级别,不仅仅是当前的重要用户和一般用户,而是按照病情严重程度分一级用户、二级用户、三级用户等。

6 结语

基于医院用户活动与空间使用特征分析了医院空间使用相关的4 224种空间使用类型,将弹性空间和生物安全因素引入到医院用户活动-空间映射过程,即选择用户的空间需求,找到可用空间,计算可用单元数量,将用户活动映射到可用空间。邀请五位医院管理人员对四个医院案例进行验证实验,映射过程符合性达到98%,可接受性得分为4.8分(满分5.0分)。医院管理人员在面对复杂多变的用户活动和空间时,本研究可实现用户活动和空间的有效匹配,动态调整医院空间使用,提高医院空间管理水平。

作者贡献声明:

乐云:分析当前研究现状,指导研究方向,审查研究内容和结果的合理性。

雪克来提·亥依热特:负责具体的研究工作,收集并分析案例,组织验证实验,整理论文思路并撰写论文。

李永奎:提供研究背景和主要研究方法。

虞涛:提供案例,组织实验。

参考文献:

- [1] 吴锦华, 张建忠, 乐云. 医院改扩建项目设计、施工和管理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2017.
WU Jinhua, ZHANG Jianzhong, LE Yun. Hospital reconstruction and expansion project design, construction and management[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2017.
- [2] 刘蔓, 文一雅. 走在疫情前面的应急医疗: 探索集约化应急医疗建筑模块[J]. 中国医院建筑与装备, 2020, 21(6): 36.
LIU Man, WEN Yiya. Emergency medical treatment ahead of the epidemic: explore intensive emergency medical building

module [J]. Chinese Hospital Architecture & Equipment, 2020, 21(6): 36.

- [3] 谷建, 冯正功. 疫情引发的思考[J]. 建筑技艺, 2020(3): 50.
GU Jian, FENG Zhengong. Thinking triggered by the epidemic[J]. Architecture Technique, 2020(3): 50.
- [4] 张远平, 蔡琳玲, 李海默. 疫情下公共卫生防控应急体系建设的反思[J]. 中国医院建筑与装备, 2020, 21(6): 21.
ZHANG Yuanping, CAI Linling, LI Haimo. Reflection on the construction of public health prevention and control emergency system in epidemic situation[J]. Chinese Hospital Architecture & Equipment, 2020, 21(6): 21.
- [5] 陈永建, 李美慧. 基于平战结合运营模式下传染病医院建设初探: 以北京地坛医院朝阳院区为例[J]. 中国医院建筑与装备, 2020, 21(3): 49.
CHEN Yongjian, LI Meihui. Preliminary study on the construction of infectious disease hospital based on the combination of peacetime and wartime operation mode: Beijing Ditan Hospital Chaoyang District case study [J]. Chinese Hospital Architecture & Equipment, 2020, 21(3): 49.
- [6] WOODMAN K R. Re-placing flexibility: an investigation into flexibility in learning spaces and learning[D]. Melbourne: The University of Melbourne, 2010.
- [7] HASSANAIN M A. Factors affecting the development of flexible workplace facilities [J]. Journal of Corporate Real Estate, 2006, 8(4): 213.
- [8] VAN DER VOORDT T J M. Costs and benefits of flexible workspaces: work in progress in The Netherlands [J]. Facilities, 2004, 22: 240.
- [9] TABAK V, VRIES B, DIJKSTRA J. Simulation and validation of human movement in building spaces [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2010, 37(4): 592.
- [10] GOLDSTEIN R, TESSIER A, KHAN A. Space layout in occupant behavior simulation [C]//12th Conference of International Building Performance Simulation Association. Sydney: Proceedings of Building Simulation, 2011: 1074-1080.
- [11] CHERRY E. Programming for design: from theory to practice [M]. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [12] ISRAELSSON N, HANSSON B. Factors influencing flexibility in buildings [J]. Structural Survey, 2009, 27(2): 138.
- [13] SCHMIDT R, AUSTIN S. Adaptable architecture: theory and practice[M]. New York: Routledge, 2016.
- [14] KIM T W, FISCHER M. Ontology for representing building users' activities in space-use analysis [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2014, 140(8): 04014035.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 实验室生物安全通用要求: GB 19489—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National

- Standardization Administration of China. General requirements for laboratory biosafety: GB 19489—2008[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [16] 刘建军. 医疗工艺设计与运营管理[J]. 中国医院建筑与装备, 2016(2): 48.
- LIU Jianjun. Medical process design and operation management [J]. Chinese Hospital Architecture & Equipment, 2016 (2): 48.
- [17] ZIMMERMANN G. Modeling and simulation of individual user behavior for building performance predictions [C]//2007 Summer Computer Simulation Conference. San Diego: Society for Computer Simulation International, 2007: 913-920.
- [18] SHEN W, SHEN Q, SUN Q. Building Information Modeling-based user activity simulation and evaluation method for improving designer-user communications [J]. Automation in Construction, 2012, 21(Supplement C): 148.
- [19] CHA S H, STEEMERS K, KIM T W. Modeling space preferences for accurate occupancy prediction during the design phase[J]. Automation in Construction, 2018, 93: 135.
- [20] KIM Y, KIM T W. How do people explore a large concourse in university campus? A computational analysis[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2019, 6(4): 666.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 生物安全实验室建筑技术规范:GB 50346—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for biosafety laboratory building: GB 50346—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

(上接第179页)

- hardening laws [J]. International Journal of Fracture, 2015, 194(1):1.
- [15] HOMEL M A, GUILKEY J E, BRANNON R M. Numerical solution for plasticity models using consistency bisection and a transformed-space closest-point return: a nongradient solution method[J]. Computational Mechanics, 2015, 56(4):565.
- [16] SHARIFIAN M, SHARIFIAN M, KRYSL P, *et al.* Stress-update algorithms for Bigoni-Piccolroaz yield criterion coupled with a generalized function of kinematic hardening laws [J]. European Journal of Mechanics A:Solids, 2018, 67: 1.
- [17] BILOTTA A, LEONETTI L, GARCEA G. An algorithm for incremental elastoplastic analysis using equality constrained sequential quadratic programming [J]. Computers and Structures, 2012, 102:97.
- [18] PLACIDI L. A variational approach for a nonlinear 1-dimensional second gradient continuum damage model [J]. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2015, 27 (4/5): 623.
- [19] ARMORO F. Elastoplastic and viscoplastic deformations in solids and structures [M]//Encyclopedia of Computational Mechanics. New York: John Wiley & Sons Ltd., 2018: 227-264.
- [20] FLETCHER R, REEVES C M. Function minimization by conjugate gradients[J]. Computer Journal, 1964, 7(2):149.
- [21] LUCAMBIO L R, PRUDENTE L F. Nonlinear conjugate gradient methods for vector optimization[J]. SIAM Journal on Optimization, 2018, 28(3): 2690.
- [22] AWWAL A M, KUMAM P, ABBAKAR A B. A modified conjugate gradient method for monotone nonlinear equations with convex constraints [J]. Applied Numerical Mathematics, 2019, 145: 507.
- [23] 祝恩阳, 姚仰平. 结构性土 UH 模型[J]. 岩土力学, 2015, 11: 3101.
- ZHU Enyang, YAO Yangping. A UH constitutive model for structured soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 11: 3101.
- [24] SUEBSUK J, HORPIBULSUK S, LIU M D. Modified structured cam clay: a generalised critical state model for destructured, naturally structured and artificially structured clays [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37:956.
- [25] DAFALIAS Y F, MANZARI M T, AKAISHI M. A simple anisotropic clay plasticity model [J]. Mechanics Research Communications, 2002, 29(4):241.
- [26] TAIEBAT M, DAFALIAS Y F, PEEK R. A destructuration theory and its application to SANICLAY model [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2010, 34(10):1009.
- [27] ROSCOE K H, BURLAND J B. On the generalised stress-strain behaviour of 'wet' clay [M]//Engineering Plasticity. Cambridge: Cambridge University Press, 1968:535-609.
- [28] DENNIS J E. A characterization of superlinear convergence and its application to quasi-Newton methods [J]. Mathematics of Computation, 1974, 28(126): 549.
- [29] ZHANG L, ZHOU W J. Spectral gradient projection method for solving nonlinear monotone equations [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2017, 196(2):478.