

2-15-2019

## Evaluation of Flow Line Structure of Hospital with Spatial Cognitive Agent

Yunfeng Wang

*School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Original Article is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Evaluation of Flow Line Structure of Hospital with Spatial Cognitive Agent

### Abstract

**Abstract:** Hospital flow line is the result of the mutual adaptation of its spatial layout and business process, which should be regarded as an independent analysis unit in the spatial layout design. Aiming at the phenomenon that the flow lines have the characteristics of both space and flow and are difficult to analyze, *a spatial cognitive process of agents is established by introducing structural elements from the spatial syntax analysis as the knowledge coding language of agents. Evaluation indexes of hospital flow line structure based on computational experiment are proposed and implemented. The framework of flow line analysis combining flow line indexes and efficiency indexes is discussed.* The analytical tools and methods are expanded for integrating spatial, process and behavioral analysis into building planning and design of hospitals.

### Keywords

flow line, spatial layout, space syntax analysis, agent-based, computational experiment, hospital

### Recommended Citation

Wang Yunfeng. Evaluation of Flow Line Structure of Hospital with Spatial Cognitive Agent[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(2): 181-188.

# 基于空间认知智能体的医院流线结构评价

汪云峰

(同济大学经济与管理学院, 上海 200092)

**摘要:** 医院流线是其空间布局与流程相互适配的结果, 应将其作为空间布局设计中的独立分析单位。针对流线同时具有空间和流程的特性而难以进行分析的现象, 从空间句法分析中引入结构要素作为智能体的知识编码语言, 建立了智能体的空间认知过程。提出并实现了基于计算实验的医院流线结构评价指标。设计了流线指标与效能指标相结合的流线分析框架, 为医院在楼宇规划和设计中将空间、流程与行为三者进行综合集成拓展了分析工具与方法。

**关键词:** 流线; 空间布局; 空间句法分析; 智能体; 计算实验; 医院

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 02-0181-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0798

## Evaluation of Flow Line Structure of Hospital with Spatial Cognitive Agent

Wang Yunfeng

(School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Hospital flow line is the result of the mutual adaptation of its spatial layout and business process, which should be regarded as an independent analysis unit in the spatial layout design. Aiming at the phenomenon that the flow lines have the characteristics of both space and flow and are difficult to analyze, a spatial cognitive process of agents is established by introducing structural elements from the spatial syntax analysis as the knowledge coding language of agents. Evaluation indexes of hospital flow line structure based on computational experiment are proposed and implemented. The framework of flow line analysis combining flow line indexes and efficiency indexes is discussed. The analytical tools and methods are expanded for integrating spatial, process and behavioral analysis into building planning and design of hospitals.

**Keywords:** flow line; spatial layout; space syntax analysis; agent-based; computational experiment; hospital

## 引言

我国医疗系统的现实状况引发了对医院各类人群行为的关注, 这也使得流线分析成为医院空间

布局设计的一种常用工具<sup>[1]</sup>。流线的静态或者动态表达不仅被用于辅助设计, 而且还能将设施配置和运营过程也纳入讨论范围。尽管流线分析具有巨大的潜力, 目前国内外的相关研究却尚未形成完整的分析方法体系<sup>[2]</sup>。当前业界的主流方式仍然是在流线图的基础上根据经验规则和行业规范对空间布局方案直接进行调整<sup>[3-5]</sup>。为了弥补这种方式的不足, 研究者们已经越来越多地借助基于智能体的计算实验将个体行为选择、个体间交互作用、群体涌



收稿日期: 2018-09-16      修回日期: 2018-11-29;  
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(71432007);  
作者简介: 汪云峰(1975-), 男, 湖北, 博士, 讲师,  
研究方向为管理系统中行为、组织与制度的计算实验研究。

<http://www.china-simulation.com>

现象、系统的动态和随机性等引入实际的项目之中<sup>[6-9]</sup>。然而,在大多数这类研究中流线似乎并没有真正被作为一个独立的分析单位,取而代之的是流程、人群甚至直接是空间本身。

以流线为分析单位能够为空间布局设计提供一种新的视角。例如医院经常采用以时间换空间的流线设计策略。借助较为松散的流线结构,安排病人在较大的空间范围内流动,缓解局部的人群密度压力,并以有限的空间容纳更多的病患。病患在个人体验上会感觉医院不那么拥挤,排队长度会减少,但其代价是忍受患病的不适感往返移动,以及更长的滞留时间。可见,流线是空间布局与流程相互匹配的结果。其本质是将流程的各项活动嵌入到空间布局之中,从而将空间串接起来。在给定的流程下,流线设计目标的实现依赖于空间布局的支持。对流线进行评价的重要性并不亚于对医院空间布局的评价,甚至更为重要。因为不合理的流线设计会抵消在流程设计和空间布局设计上的努力,可以认为流线方案其实才是空间布局设计的最终的,也是最重要的输出。

对流线方案进行分析的困难首先在于缺少有效的方法去评价流线。现有的流程分析方法难以引入大量的空间要素,而空间分析方法则难以兼顾流程的非线性、动态性和随机性。此时,也许还原现实场景是最好的办法:让智能体在虚拟医院空间中履行流程的安排,同时与其他对象进行交互作用。在此基础上,可以从空间、设施、人员等角度全面开展对流线的评价,进而找到空间布局以及流程设计的不足之处。

## 1 认知与空间结构评价

在流程、空间布局和流线三者中,医院的流程相对稳定,空间布局在设计阶段的前期较为自由,到了设计阶段的后期流线成为主要的改善途径。在对流线设计进行完善时,流线本身的空间结构无疑是核心要素。对于医院空间中的个体而言,无论是

病患还是医院员工,没有对医院空间结构的正确认知就无法按照流程的安排完成的一系列活动。可见,对流线的评价需要从它的空间结构入手。

对人类空间结构认知过程进行建模的首选方法是创始于 1984 年<sup>[10]</sup>的空间句法分析。它从空间的社会属性角度出发设计了一系列符合人类认知规律的空间抽象方式,是少有的能够将人类认知与空间分析结合起来的方法框架。这一方法所采用的 4 个基本要素(凸空间、轴线、交点和视域)中的前 3 个都是空间结构要素。

本文将在空间句法分析的基础上构建具有空间认知能力的智能体以支持医院流线分析。从上世纪九十年代晚期起空间句法分析被越来越多地用于研究医疗卫生设施问题,包括公共区域道路找寻、护士的移动与定位、对于隐私以及照料质量的病患偏好、疏散、布局分析设计等<sup>[11-12]</sup>。基于该方法的智能体建模也获得了一定的发展,包括以视域图为基础让智能体具有 170° 的视角,每走 3 步选择一次前进方向;采用集聚系数来评估信息损失;让智能体在交叉点上选择和判断;根据视野的通达性来选择方向等<sup>[13]</sup>。

本文提出的智能体相比前人最大的进步在于从空间感知能力升级到认知能力。感知智能体能够获取距离、角度、密度等基本空间属性信息,然后通过计算来决定下一步的行为。认知智能体则能够识别空间结构,学习关于流线的空间知识,以知识库来支持推理和决策。只有具备认知能力,智能体才能脱离响应层面进入思考层面来解析空间环境,根据空间结构的不同作出选择。

当智能体的空间结构认知过程可知时,结构评价就由对最终流线方案的静态评价转入了动态评价。随着智能体对空间结构认知的深入,其行为选择也在发生变化,对流线结构的评价也就需要覆盖智能体完成整个流线的全过程。

## 2 智能体的空间认知过程

智能体关于流线的知识包括 2 个部分: (1) 流线设计方案; (2) 以空间结构要素表达的空间知识, 这部分既来自智能体的知识禀赋, 也来自学习过程。图 1 表示了示例任务集合  $\{t_i\}$  和凸空间集合  $\{s_j\}$ 。流线是任务与凸空间的元组的集合  $\{f_i = (t_i, s_j)\}$ , 其中任务按照下标增序执行。为方便后续集合运算, 增加空元素作为流线的第一个和最后一个元素。

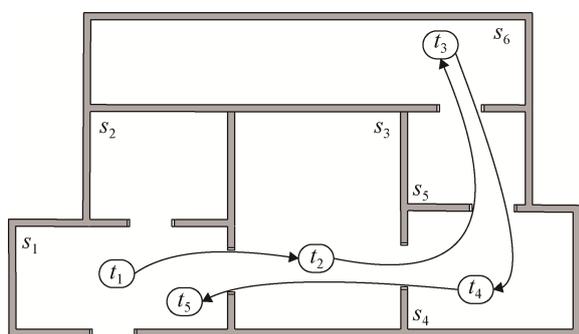


图 1 凸空间图与流线  
Fig. 1 Convex space graph and flow line

凸空间根据使用方式可分为 3 种类型: (1) 主功能空间, 也就是流程中诊疗活动实际发生的空间, 例如诊室、输液室; (2) 辅功能空间, 是对主功能空间进行支持的空间, 比如候诊大厅; (3) 交通空间, 是指在流线主(辅)功能空间之间建立联系的空间。对于一个流线而言的交通空间, 有可能是另一个流线的主(辅)功能空间, 反之亦然。后文对主功能空间和辅功能空间不作区分, 统称为功能空间。在实际布局中可能会出现一个功能空间或者交通空间需要被切割为若干个凸空间的情况。对于功能空间, 如果存在需要在多个凸空间中完成的任务, 则可以切割任务以满足与凸空间的对应关系。对于交通空间, 因不存在与任务对应的需要, 可以根据空间句法分析规范切割。

图 2 显示了用相交直线覆盖全部凸空间的轴线集合  $\{l_k\}$ , 令  $SL_k$  为  $l_k$  所覆盖的所有凸空间的集合。图 3 中的交点集合  $\{e_r\}$  既包括轴线间的交点也

包括轴线与墙壁的交点。在计算实验中智能体在交点所在空间选择前进的轴线  $l_k$ , 然后根据  $SL_k$  的空间顺序确定下一个进入的凸空间。交点中需要进行路径选择的那些将被分离出来作为决策点。

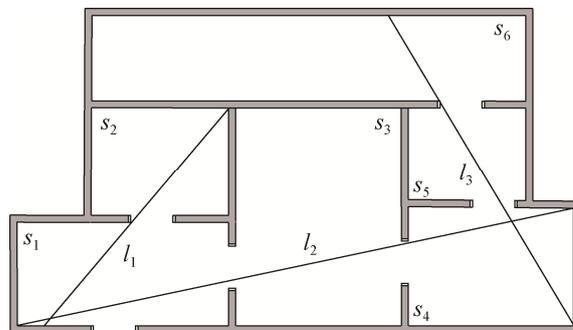


图 2 轴线图  
Fig. 2 Axial line graph

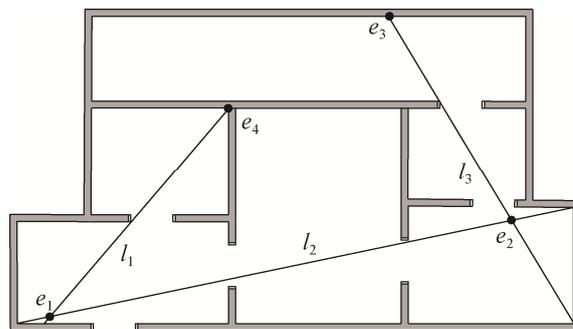


图 3 交点图  
Fig. 3 Intersection graph

智能体认知过程如图 4 所示。设其在  $i+1$  阶段初的知识集合为  $K_{i+1} = \{K_i, t_{i+1}\}$ , 即智能体总是在  $i$  阶段的任务完成后获得  $i+1$  阶段的任务信息。根据是否存在信息设施智能体有 2 种进一步获取路径信息的方式:

(1) 使用环境中的信息设施。当智能体能够通过平面图之类的信息源获得较为完整的信息时,  $K_{i+1} = \{K_i, f_{i+1}, L_{i \rightarrow i+1}, E_{i \rightarrow i+1}\}$ 。其中  $L_{i \rightarrow i+1}$  和  $E_{i \rightarrow i+1}$  表示从  $f_i$  所在凸空间出发到达  $f_{i+1}$  所在凸空间之前需要进入的轴线和交点的集合。如果是类似导引牌这样的局部信息, 则  $K_{i+1} = \{K_i, t_{i+1}, l_{i+1}\}$ , 智能体根据轴线  $l_{i+1}$  的信息选择行进方向。如果到达交点所在凸空间时, 在知识集中没有相关路由知识, 则知识集中增加该交点作为决策点, 并自行选择下一

步的路径。此时  $K_{i+1} = \{K_i, t_{i+1}, l_{i+1}, l'_{i+1}, d_{i+1}\}$ ，其中  $l'_{i+1}$  表示在决策点选择的轴线， $d_{i+1}$  表示新增的路径选择的决策点。如果在到达交点前就已经获得路由信息，则此交点仅作为交点被记录下来。此时  $K_{i+1} = \{K_i, t_{i+1}, l_{i+1}, l'_{i+1}, e_{i+1}\}$ ，其中  $e_{i+1}$  为新增的交点， $l'_{i+1}$  为在交点  $e_{i+1}$  需要改变轴线时新增的轴线。

依此过程，智能体不断累积知识集中的轴线、交点和决策点知识直到抵达  $f_{i+1}$  所在凸空间。此时  $K_{i+1} = \{K_i, f_{i+1}, L_{i \rightarrow i+1}, E_{i \rightarrow i+1}, D_{i \rightarrow i+1}\}$ ，其中  $D_{i \rightarrow i+1}$  表示从  $f_i$  所在空间出发到达  $f_{i+1}$  所在凸空间之前需要进入的决策点的集合。

(2) 通过自身的路径探索。在从当前任务所在空间出发时，智能体会选择一条轴线前进， $K_{i+1} = \{K_i, t_{i+1}, l_{i+1}\}$ 。在到达任意交点时如果没有能

够掌握路由信息，则选择一条轴线前进， $K_{i+1} = \{K_i, t_{i+1}, l_{i+1}, l'_{i+1}, d_{i+1}\}$ ，以此类推。假设智能体总能通过不断探索到达  $f_{i+1}$ ，此时  $K_{i+1} = \{K_i, f_{i+1}, L_{i \rightarrow i+1}, D_{i \rightarrow i+1}\}$ 。

智能体在计算实验过程中不断重复图 4 所示的认知过程，接触到的空间结构在这一过程中逐步成为智能体的知识组成部分。智能体的全部知识都围绕其所在流线进行组织，包括流线中的活动、凸空间位置和类型、相关轴线和交点。比如从挂号到就诊所对应的知识就包括挂号活动和就诊活动、挂号区和诊室、智能体使用的交通空间及其对应的轴线和交点(决策点)。

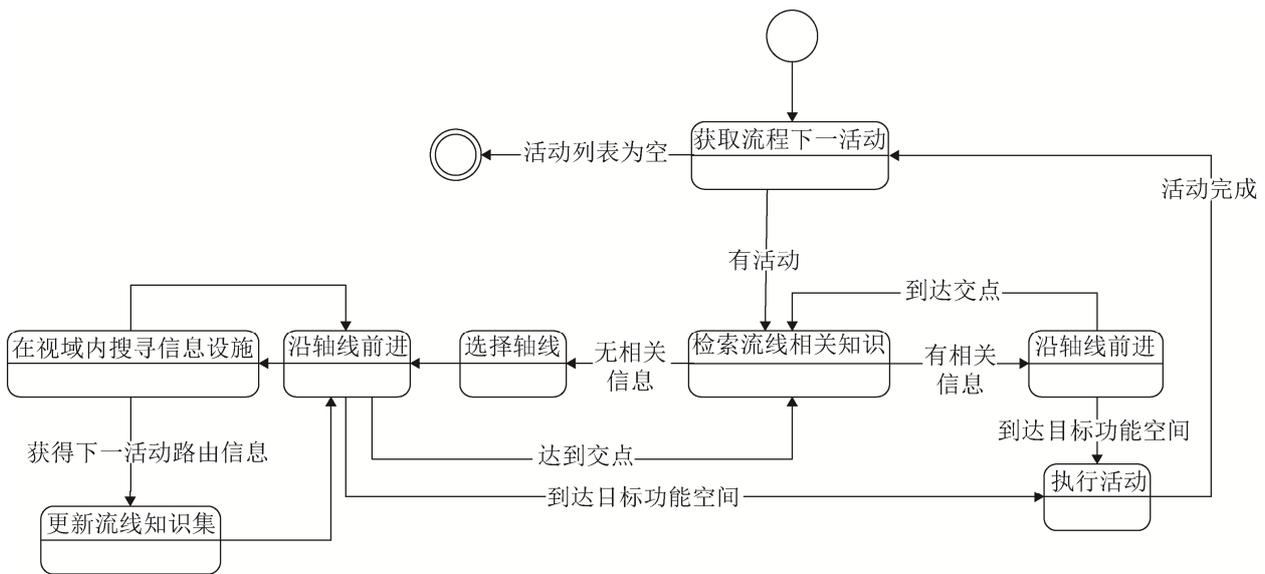


图 4 智能体认知过程  
Fig. 4 Cognition process of agent

### 3 流线结构评价

流程原本就具有分支、循环等结构，将其各项活动安排到具体的空间单元形成流线，再加上病患在实际就医过程中的个体差异和医院运作规则限制，流线结构会更为复杂。流线结构评价以空间结构要素来描述流线特征，依靠智能体的知识集来计算指标，并考察流线中流程与空间布局的匹

配效果。评价指标见表 1，这里的评价指标参考了文献[3, 14-16]。由于在各个集合中可能会出现相同的元素，下文中所使用的集合均为多重集合。

设流线中具有  $n$  个活动  $f_i, i=1, 2, \dots, n$ 。令  $SF_{i \rightarrow i+1} = \{CS_{i \rightarrow i+1}, FS_{i \rightarrow i+1}\}$  为智能体完成活动  $f_i$  直到进入活动  $f_{i+1}$  所在凸空间之前经历的凸空间集合，其中  $CS_{i \rightarrow i+1}$  为其中的交通空间， $FS_{i \rightarrow i+1}$  为其中的功能空间。令  $L_{i \rightarrow i+1} = \{l_g\}$  为从完成活动  $f_i$  直

到进入活动  $f_{i+1}$  所在凸空间之前经过的轴线集合, 且在  $l_{ig}$  中改变行进方向的次数为  $t_{ig}$ 。令  $U_{i \rightarrow i+1}$  为在完成活动  $f_i$  直到进入活动  $f_{i+1}$  所在凸空间之前且

$f_{i+1}$  所在空间未知时经过的凸空间集合。其元素来自前文所述的有信息设施和无信息设施 2 种情况下的空间探索过程。

表 1 流线结构评价指标  
Tab. 1 Flow line structure index

特征	指标	计算方式
紧凑度	平均交通空间数	$p_{co}$ , 流线中交通空间数量与全流线活动数量的比。
迂回度	平均轴线转折数	$t_{ar}$ , 流线中变换轴线次数以及轴线内变换行进方向次数之和。
明晰度	探索空间占比	$w_{in}$ , 流线中探索过程所经过空间数量与流线总空间数量之比。

(1) 平均交通空间数,  $p_{co}$ 。功能空间由交通空间连接在一起, 病患总是希望能够在两个功能空间之间少一些交通空间。该指标评价流线的紧凑程度, 其值小则意味着在功能空间之间会经过较少的交通空间。

$$p_{co} = \frac{\sum_i |CS_{i \rightarrow i+1}|}{n}$$

(2) 平均轴线转折数,  $t_{ar}$ 。流线设计应该避免经常转换行进方向, 或者在同一线路上往返。该指标评价流线的迂回程度, 其值越小意味着流线设计越友好。

$$t_{ar} = \sum_i |L_{i \rightarrow i+1}| + \sum_i \sum_g t_{ig}$$

(3) 探索空间占比,  $w_{in}$ 。在完成一个流线活动后可能并不知道下一个活动所在空间的位置, 或者对于行进路线并不具备完全的信息, 此时就会产生探索线路的行为。这一指标刻画流线的明晰程度, 降低该指标能够降低路径选择的复杂度并提升流通速度。

$$w_{in} = \frac{\sum_i |U_{i \rightarrow i+1}|}{\sum_i |SF_{i \rightarrow i+1}|}$$

### 4 实验与对比

本文在 Netlogo 中实现了上述认知过程与评价算法。这里首先以计算实验的直观效果来说明流线结构评价指标的计算过程, 然后采用传统的空间句法分析方法进行类似的评价, 通过对比两种方法说明流线结构评价带来的进步。实验场景如图 5~6

所示。

在图 5 的空间结构设计中, 空间 1、2、4、5 均作为轴线的端点, 这样设计的优点在于它们仅能作为功能空间来使用, 不会成为交通空间。由于仅开设一个门, 且不用预留行人通道, 因此空间利用率达到了最大化。与之对比的是在图 6 中同样的空间保持了与上下空间的通达, 显然有利于病患穿行节约路程, 但在可用空间上的损失也非常大。

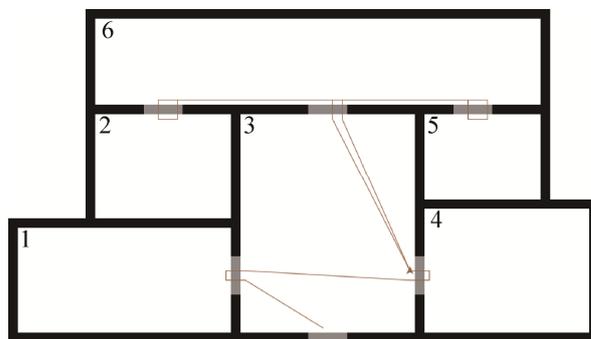


图 5 空间利用率优先方案  
Fig. 5 Space utility preferred

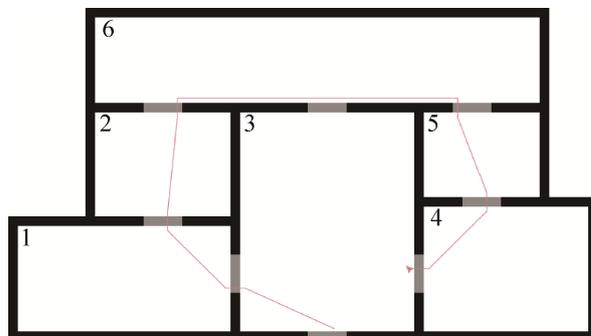


图 6 空间可达性优先方案  
Fig. 6 Spatial accessibility preferred

两种方案都采用同样的流线设计方案, 采用  $\{f_i = (t_i, s_j)\}$  的形式可表达为  $\{(1,1)(2,2)(3,6)(4,5)(5,4)(6,3)\}$ , 即从大厅出发经过各个空间完成对应活动后返回大厅, 出发时大厅不作为功能空间。由于重点在于对空间的结构进行分析, 因此在计算实验中忽略了在各个空间中具体的活动。各项指标计算的结果汇总于表 2, 可见各项指标上利用率优先方案均弱于可达性优先的方案。较为完整的评价还需要结合空间利用率的价值参数来进行权衡。

在空间利用率优先方案的基础上对比本文的流线结构评价与传统的空间句法分析, 结果如表 3 所示。严格而言, 空间句法分析原先的设定是用于纯粹的空间结构分析, 通过近年来的发展才逐渐产生了与流程相结合的空间句法分析。

表 2 流线结构评价指标对比  
Tab. 2 Comparison of flow line structure indexes

指标名称	指标	空间利用率优先	空间可达性优先
平均交通空间数	$p_{co}$	1.17	0.17
平均轴线转折数	$t_{ar}$	1.50	0.50
探索空间占比	$w_{in}$	0.31	0.00

表 3 与空间句法分析的对比  
Tab. 3 Comparison with space syntax analysis

特征	流线结构评价指标	空间句法分析指标
紧凑度	平均交通空间数 1.17	功能空间占比 1.00
迂回度	平均轴线转折数 1.50	平均轴线转换数 0.67
明晰度	探索空间占比 0.31	平均决策点数 1.33

(1) 功能空间占比, 整个流线过程中至少有一次被用作功能空间的空间总数在全部曾经经过的空间总数中所占的比例。该指标与平均交通空间数指标的区别包括 2 点: 1) 是该指标计算功能空间, 而平均交通空间数计算交通空间; 2) 是该指标认为所有的空间只有唯一的属性, 或者为交通空间, 或者为功能空间, 而在平均交通空间数的计算中空间的属性随着流线的进展动态发生变化, 既可能是功能空间也可能是交通空间。

(2) 平均轴线转换数, 流线所经轴线之间的切

换次数与流线中活动数量之比。这一指标与平均轴线转折数指标的区别也包括 2 点: 1) 是前者考察所有流线相关轴线间的交叉点数量以计算路线静态结构上整体呈现出的转折关系, 而后者则随着智能体的行进不断统计转换次数; 2) 是前者不考虑在同一条轴线上可能发生的往返行为, 后者则认为在同一条轴线上的往返行为也是一种浪费。

(3) 平均决策点数, 流线中决策点数量与流线活动数之比。其用意在于如果流线中需要进行选择的点越多, 空间结构对决策者的困扰就越大。除了轴线间的交叉点, 决策点还包括了轴线与墙壁的交点, 意即在轴线之间的交点和轴线的终点都需要进行路径选择。与之对应的探索空间占比指标则转而评价因为不知道目的地位置而进行的探索行为所经过的空间占比。

通过与典型空间句法分析指标的比较, 可以发现本文流线结构评价的特点在于: (1) 面向过程, 所有的指标都需要实验过程推进到最后才能获得全部所需数据; (2) 面向个体, 分析的对象是个体所经历的那个“真实”的流线, 而不是从整体上开展静态评估; (3) 面向活动, 流线概念的引入帮助空间句法分析收缩了分析范围, 仅考虑与活动相关的空间结构要素。

## 5 流线结构指标的应用

流线结构指标在整个应用框架与常规效能指标形成了互补关系。首先, 由于计算流线结构指标的数据来自于微观个体, 因而该指标自然会首先表达了个体对流线的认知和体验, 这一认识流线的视角是常规效能评价所不具备的。其次, 微观个体同时也受到各种效能不足的影响, 通过分析效能指标与流线结构评价指标之间的关联性, 能够帮助分析者从流线结构角度来解释效能低下的原因。

图 7 表达了流线结构评价指标在整个方案设计框架中的位置。以空间布局和流程方案为基础建立流线方案, 对其进行计算实验可以得到 2 种类型

的指标: (1) 智能体个体与群体效能指标, 比如常用的等待时间、人群密度等; (2) 流线结构评价指标。在所关心的指标不能满足预设目标时, 首选调

整流线设计。对空间布局的调整会牵涉多条流线, 因此作为后续备选措施。对诊疗流程的调整则作为最后的选择。

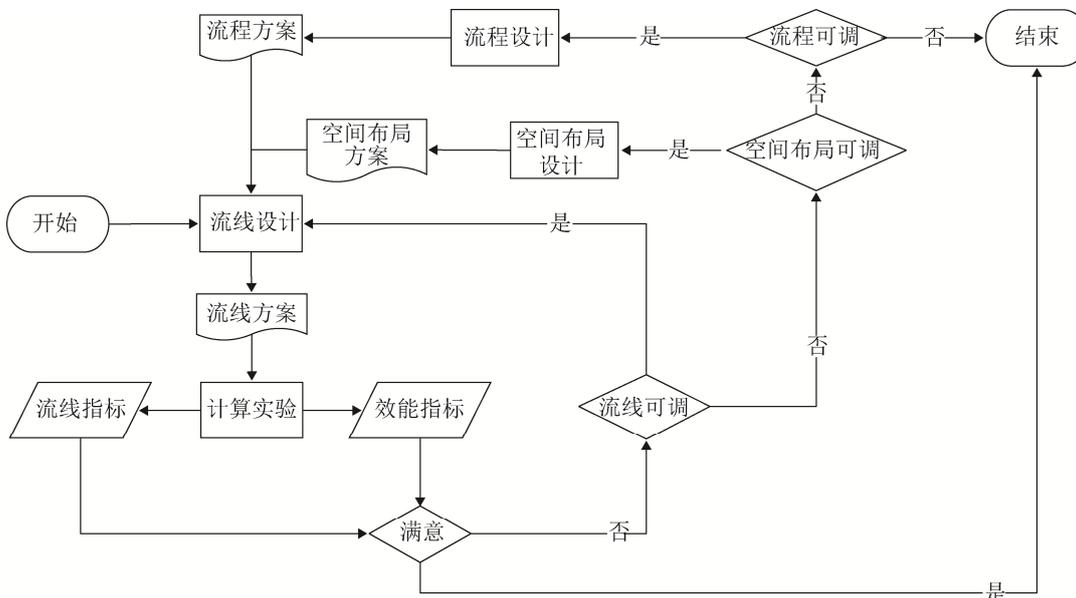


图 7 流线结构评价指标的应用  
Fig. 7 Application of flow line structure indexes

### 6 结论

流线仿真分析具备将医院空间布局、医院流程以及医患行为三者整合起来的潜力, 能够帮助医院在楼宇建设和改造中更多地结合实际运作的需要来进行规划和设计, 本文在智能体建模、评价指标和分析框架上所进行的研究是这一方向上的初步尝试。

由于仅聚焦在基于智能体认知的流线结构评价, 因而未涉及智能体执行层面的行为, 比如对象之间的间距、行走路线选择、视域算法等[10,14]。在多智能体模式下, 执行层面的行为实现会直接影响流线结构分析的效果。后续的工作需要讨论如何将认知层面的心智建模与执行层面的行为建模进行结合以确保计算实验的有效性, 以及计算实验结论的强健性。

在流线结构评价指标的构建上, 本文提出了三个指标以抛砖引玉。结合特定的研究目标, 可以提出更多的流线评价指标, 并随之发展智能体的认知

和学习方式。在获得越来越多的流线指标后, 如何利用这些指标所携带的信息推动流线调整、空间布局调整以及流程调整成为进一步值得研究的问题。此外, 常用效能指标与流线结构评价指标之间的集成, 对于推动后者在实际项目中的应用也具有非常重要的意义。

### 参考文献:

- [1] 格伦, 李艾芳, 张集锋. 综合医院建筑的流线系统研究[J]. 新建筑, 2004, 4: 20-23.  
Ge Lun, Li Aifang, Zhang Jifeng. The Study about the Flow System of General Hospital[J]. New Architecture, 2004, 4: 20-23.
- [2] 夏胜利. 高铁客运枢纽交通流线设计理论与方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016.  
Xia Shengli. Theory and Method Study on Traffic Flow Path Design of High Speed Railway Passenger Transport Hub[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [3] 袁恺星, 何柏川, 王晶冰, 等. 大型医院流线优化设计谈——许昌中心医院新区医院设计实例[J]. 中国医院建筑与装备, 2016, 5: 76-78.

- Yuan Kaixing, He Bochuan, Wang Jingbing, et al. Large Hospital Circulation Design Optimization - Xuchang Central Hospital New District Hospital Case Study[J]. Chinese Hospital Architecture & Equipment, 2016, 5: 76-78.
- [4] 季超, 丛小密. 新建医院规划难点初探——以北京大学第一医院城南院区为例[J]. 中国医院建筑与装备, 2017, 2: 68-71.
- Ji Chao, Cong Xiaomi. A Preliminary Study on the Difficulties in the Planning of New Hospitals -- A Case Study of South Area Hospital of Peking University First Hospital[J]. Chinese Hospital Architecture & Equipment, 2017, 2: 68-71.
- [5] 罗剑宏, 郑超伟, 陈国新, 等. 新医改形势下基层医院建筑与装备的发展需求研究(五)——医院主体建筑规划建设方案[J]. 中国医院建筑与装备, 2017, 9: 94-97.
- Luo Jianhong, Zheng Chaowei, Chen Guoxin, et al. Research on the Development Demands of Building and Equipment of Primary Hospitals in the New Medical Reform Situation (Part 5) – Planning and Construction Plan of Hospital Main Building[J]. Chinese Hospital Architecture & Equipment, 2017, 9: 94-97.
- [6] Ashby M, Ferrin D, Miller M, et al. Discrete Event Simulation: Optimizing Patient Flow and Redesign in a Replacement Facility[C]. USA: WSC, 2008: 1632-1636.
- [7] Basel A. Emergency Department Process Flow Improvement Based on Efficient Architectural Layout, Lean Concept and Post-lean Simulation[D]. Edmonton, Alberta: University of Alberta, 2012.
- [8] Arnolds I, Nickel S. Layout Planning Problems in Health Care (Chapter 5) [M]. H. A. Eiselt, V. Marianov (eds.), Applications of Location Analysis, International Series in Operations Research & Management Science 232. Switzerland: Springer International Publishing, 2015.
- [9] Gabriel W. In-process Agent Simulation for Early Stages of Hospital Planning[J]. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems (S1744-5051), 2013, 4: 331-343.
- [10] Hillier B, Julienne H. The Social Logic of Space[M]. USA: Cambridge University Press, 1984.
- [11] Haq S, Luo Y. Space Syntax in Healthcare Facilities Research: A Review[J]. HERD (S1937-5867), 2012, 4: 98-117.
- [12] Ostwald M J, Dawes M J. The Mathematics of the Modernist Villa: Architectural Analysis Using Space Syntax and Isovists[M]. Switzerland: Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018.
- [13] Koutsolampros P, Varoudis T. Assisted Agent-based Simulations: Fusing Non-Player Character Movement with Space Syntax[C]. Proceedings of the 11th Space Syntax Symposium, 2017.
- [14] Sadek A H, Shepley M M. Space Syntax Analysis: Tools for Augmenting the Precision of Healthcare Facility Spatial Analysis[J]. Health Environments Research & Design Journal (S1927-5867), 2016, 1: 114-129.
- [15] Samah Z A, Ibrahim N, Amir J S. Translating Quality Care Factors to Quality Space: Design Criteria for Outpatient Facility[C]. Asia Pacific International Conference on Environment-Behaviour Studies University of Westminster, London: 2013.
- [16] Cocina G G. Responding to User Cultural Needs in Hospitals with the Support of Space Syntax Analysis[C]. Proceedings of the 11th Space Syntax Symposium, 2017.