



扫一扫上面的二维码图案，加我为朋友。

离开罗浮宫的时间：计算网络分析

摘要

恐怖袭击的增加已引起全球对安全紧急疏散计划的需求。我们专注于撤离世界上最大的美术馆罗浮宫。来访者的人数和种类繁多，疏散困难重重；罗浮宫管理层希望撤离计划有多种考虑。

我们将卢浮宫划分为多个部分，并构建基于代理的模型来模拟每个部分中的疏散。我们在每个部分上运行模拟以确定代理退出的速率。为了连接各部分，我们将建筑物表示为图形，从而造成网络流量问题。强对偶性可确定图中的瓶颈边缘。模拟被阻塞的通道或新的秘密出口就是将图形的边缘移除或添加。识别瓶颈是我们公共安全的最高优先事项。

我们的模型预测，使用所有四个公共出口的疏散计划可能会在 24 分钟内撤出卢浮宫。此外，虽然金字塔入口周围有许多瓶颈，但入口本身并不是瓶颈。金字塔的此属性在紧急情况下至关重要，因为它允许紧急人员进入。另外，确保通道黎塞留对撤离至关重要，因为其安全与金字塔的安全直接相关。保持这些入口的开放性和实用性对于疏散的速度和安全性至关重要。

我们的模型之所以强大，是因为它具有对单个人类行为进行建模的能力，其后是对建筑流动动力学的适应性抽象。该模型的一个弱点是我们考虑了最坏的情况，但疏散时间是实际疏散的上限。



扫一扫上面的二维码图案，加我为朋友。

重述问题

我们面临的一个广泛问题是为卢浮宫设计一个疏散模型，该模型允许探索。我们的主要目标是：

- 确定评估给定疏散计划效率的方法，
- 在不影响安全的前提下制定最佳的疏散计划，
- 查明安全高效撤离的关键瓶颈和其他障碍，
- 确定其他出口或路线阻塞对撤离的影响，并传达清晰的实施计划。其次，我们还要考虑：

- 访客的多样性（语言，分组，残疾）对撤离的影响；
- 技术在协助疏散方面的潜在好处；
- 应急人员的部署路线；和
- 模型对其他建筑物的适应性。

一般假设

- 自利。疏散人员不会为每个人考虑一个全局最优的解决方案，而是会选择一个本地的“贪婪”解决方案。
- 自然流量。除非另有指示，否则个人将在最近的出口离开。
- 遵守程序。个人遵循卢浮宫管理人员提供的疏散计划。
- 外面的安全。一旦超出建筑物范围，确保人员安全就超出了我们的任务范围。
- 恐慌的重要性。恐慌加剧会导致选择不理想或不合理。
- 电梯仅由急救人员和残疾人使用。

在紧急情况下，电梯可能很危险。

多种语言的适当标牌和技术。罗浮宫的标牌中大部分都包含易于理解的符号指示。

此外，提供疏散指示的软件包和电话应用程序很容易用不同的语言编写。

简介：定义和路线图

疏散计划是针对疏散人员的路径规程的集合，条件是每个疏散人员的位置和状态。最简单的疏散计划将遵循“自然流”，其中撤离人员向最近的出口移动。

为了衡量每个疏散计划的效率，我们可以估计完全清空建筑物的时间。但是，此措施有些天真，因为它降低了安全性并且高度依赖于初始条件。例如，由于异常多的游客聚集在蒙娜丽莎附近，试图通过一个出口集中所有游客，可能会导致人满为患，践踏和恐慌的危险。

作为替代方案，我们考虑最大撤离率，或者在数学上考虑撤离人员的时间导数的最大值。这似乎是一个相同的度量，因为总时间的减少将意味着平均退出率的增加。但是，在疏散过程中的某个时候出口率达到峰值，如图 1 所示。



扫一扫上面的二维码图案，加我为朋友。

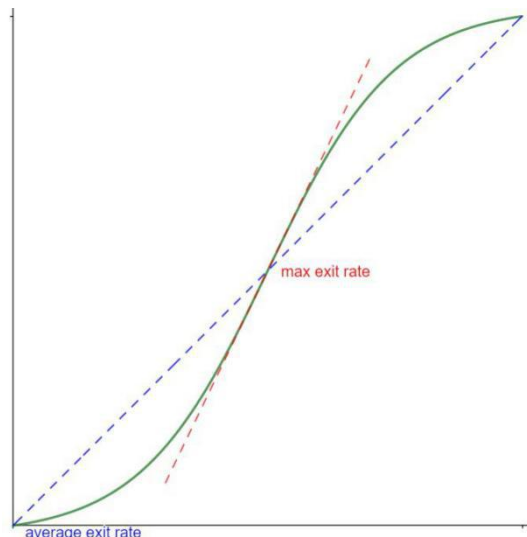


图 1. 撤离的撤离人员与时间的关系。

针对最大出口率进行优化可优化通过卢浮宫的撤离人员的吞吐量，而不是最短的撤离总时间。该值是双重的：

如果卢浮宫的入住率很高，则平均出境率应接近最大出境率。

如果天窗的入住率较低，则应降低较高的吞吐量拥挤的风险。

结果，最大化吞吐量与最大化公共安全直接相关。

建模路线图

我们实现了一个两阶段模型：

- 第一阶段使用基于计算代理的模型来了解卢浮宫部分内的局部撤离人员流动动态。
- 第二阶段将来自各部门的信息合并到一个流动网络中，我们可以据此评估和优化疏散计划。

为了澄清，我们模型的路线图是：

- 将卢浮宫的每个楼层分成较小的部分。
- 开发一个基于计算主体的模型来研究每个子区域的局部疏散现象和撤离人员流。
- 开发一个全局网络，将每个子部分建模为一个节点，将步道建模为边，将撤离人员流建模为权重。
- 应用图形算法来最大化撤离流程并预测添加或删除边的效果。
- 将结果解释为现实条件和有用的政策建议。

第一部分：局部剖面模型

分区部分

罗浮宫由嵌套的画廊布局，几个通向其他楼层的入口以及多个出口组成 [Louvre Museum 2016]。通过将博物馆划分为较小的，较不复杂的子区域以进行单独建模，我们可以降低复杂性。

我们将每个楼层分为五个小节（图 2），并标记 A 到 E 部分（例如，底层的左下部分标记为“底层 A”）。拿破仑大厅（Napoleon Hall）表示为“拿破仑 P”，具有金字塔入口（如图 3 所示），这是该楼层上唯一相关的部分。



扫一扫上面的二维码图案，加我为朋友。

发展历程

我们在基于代理的建模软件 NetLogo 中开发了本地疏散模型（Local Section Model）。基于主体的主要思想

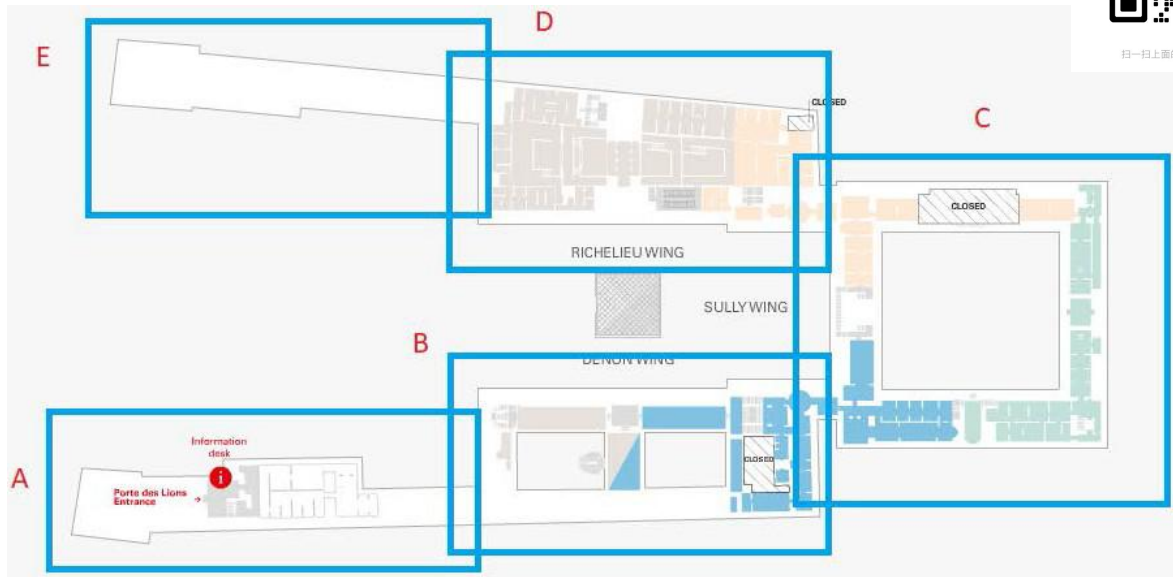


图 2. 卢浮宫的每一层都从底部开始，并逆时针移动，分为从 A 到 E 的五个子区域。

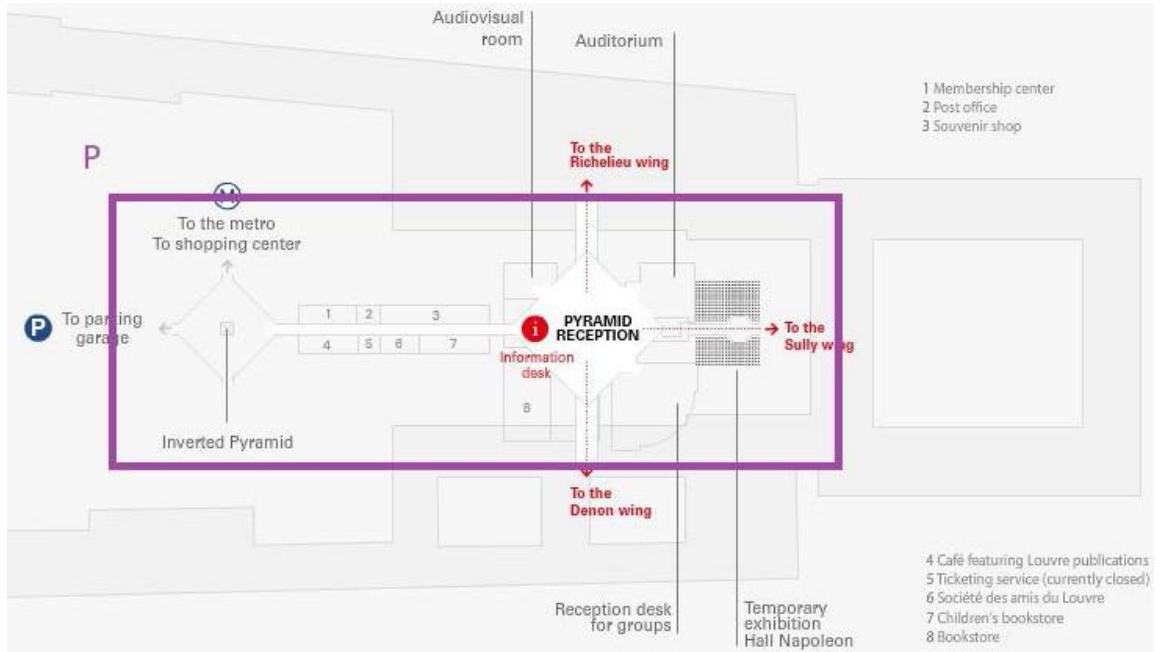


图 3. 拿破仑大厅内有一个金字塔形的子地板，该子地板独特。



扫一扫上面的二维码图案，加我为朋友。

建模是，代理是具有特定的，明确定义的目标的单个单元。尽管单个座席的通常很简单，但座席系统的复杂行为通常不只是其各个部分的总和。由于每个人是为了自己的自身利益行动而撤离，因此基于代理的模型非常适用。

图 4 显示了 NetLogo 中的结果界面，该界面易于使用和解释。图的底部显示了带有复杂画廊系统的地下 D 楼。作用在绿色（可通过）和黑色（不可通过）网格上的白色特工代表疏散人员通过画廊。蓝色小块（例如，右上角的垂直线段）表示疏散人员进入的入口，红色小块（例如，左上角的垂直线段）表示疏散人员离开的出口。

代理的特定行为逻辑如图 5 所示。我们为每个代理配备了变量 panic 属性和固定速度属性。关于速度属性的更多信息包含在以下部分中，而在这里将解释紧急属性。

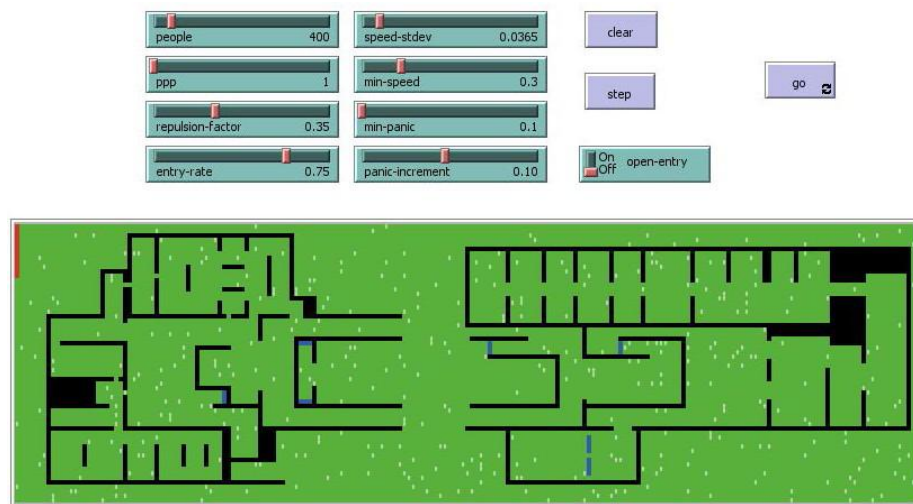


图 4. 地面 D 上的画廊表示。

图 5 中的逻辑与我们的假设一致，即每个代理人都是出于自己的利益行事，例如朝着最近的出口采取局部最优步骤。但是，仅此因素会导致纯粹的确定性行为，似乎无法准确地模拟人体运动，尤其是在紧张的情况下。为了适应这种行为，我们增加了一个恐慌参数来表示个人的紧张感增加，因为撤离人员通过改组，寻找其他出口路线等无法行动（由于人群密集）而做出反应。尽管难以量化恐慌，但将其影响纳入模型并不难。我们汲取灵感—



扫一扫上面的二维码图案，加我为朋友。

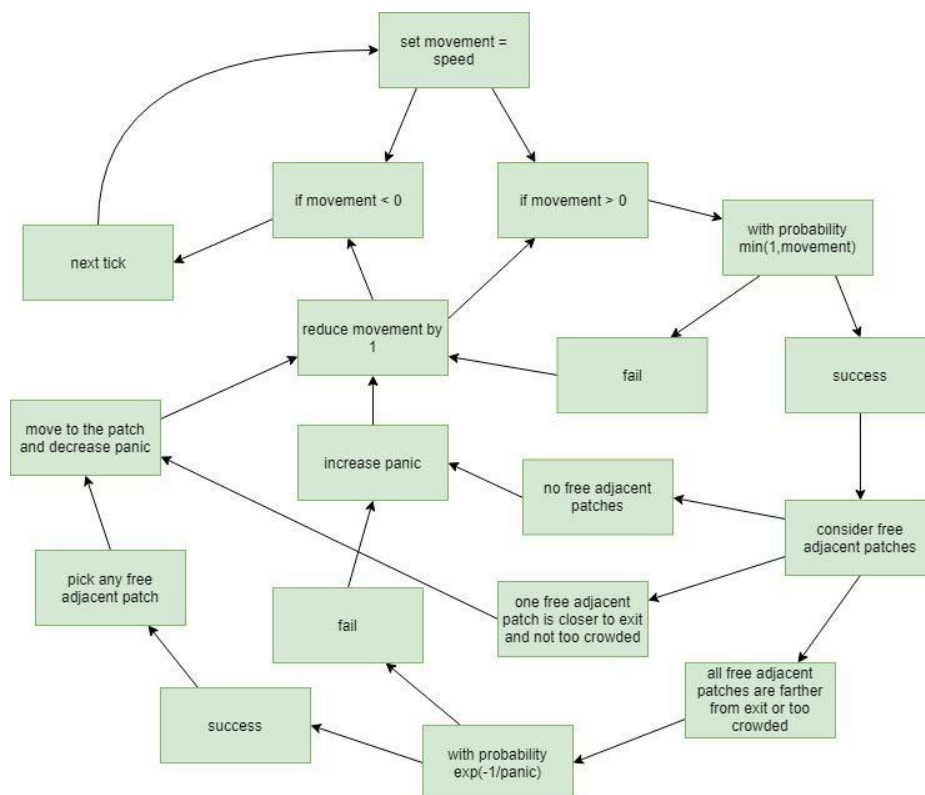


图 5. 单个代理的行为逻辑流程图。

模拟退火的结果[Wikipedia 2019a]。我们会在代理人稳定的每一步增加其恐慌，并计算 p_m ，即从其目的地稍微移开的概率，

$$p_m = \exp\left(\frac{-1}{\text{panic}}\right),$$

with

$$\lim_{\text{panic} \rightarrow 0^+} p_m = 0, \quad \lim_{\text{panic} \rightarrow \infty} p_m = 1.$$

图 4 的顶部显示了滑块参数：

- people 表示会议室中代理商的初始人数。
- ppp 表示每个可通过补丁的代理的最大密度。放大此参数可增加最大允许拥挤度。

排斥因子与在局部寻路过程中每个代理确定为“过于拥挤”的因素有关。将此参数放大可降低拥挤公差。

- speed-stdev 是指代理群体中速度属性的方差。
- min-speed 给出代理的最小速度。
- panic-increment 是指每个特工无法移动时得到的恐慌程度。
- min-panic 给出代理的最小恐慌属性。
- 滑块进入率和开关打开进入与通过蓝色进入补丁产生新代理有关。

物理可解释性

为了将模型缩放到卢浮宫的尺寸，我们使用了 Google 地图。图 6 显示了我们用作参考的点以及通过 Python 软件包 GeoPy 计算距离的示例。



扫一扫上面的二维码图案，加我为朋友。

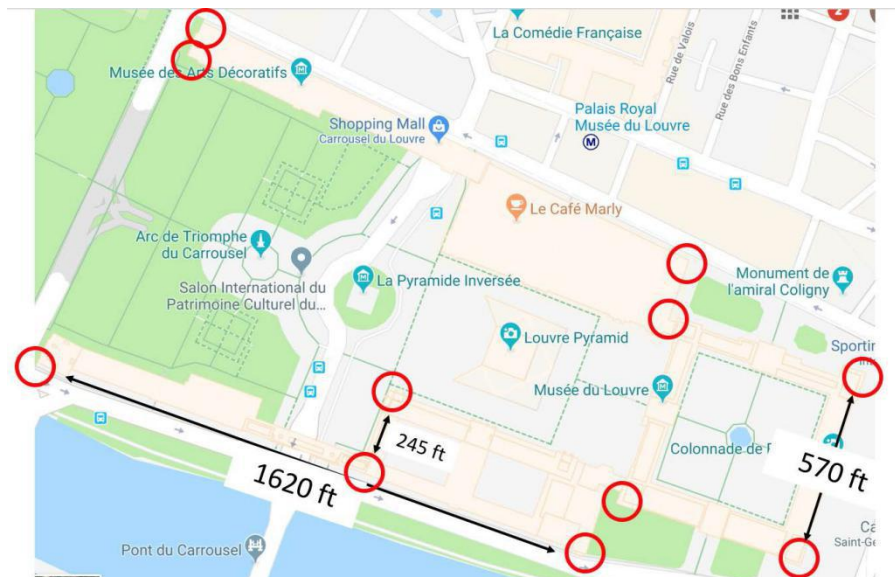


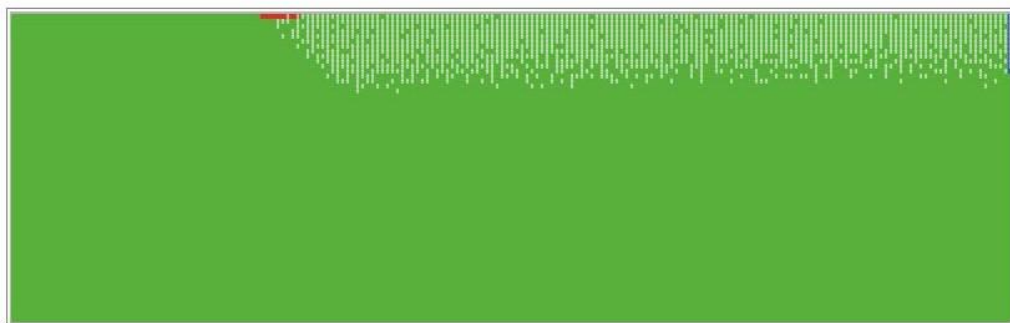
图 6. 在 Google Maps 上 ping 的点，以及一些示例距离。

为了确定代理的速度，我们参考 Yosritzal 等。[2018]，他模拟了印尼的海啸疏散。他们的平均人员疏散时的年龄行走速度为 $1.419 \text{ m/s} \approx 4.656 \text{ m/s}$ 。因此，我们缩放每个小节的表示，以便补丁是 4 英尺乘 4 英尺。因此，模型进度中的一滴答声（Netlogo 中的单位时间）大约等于现实世界中的一秒。由于我们的特工可以在任一基本方向上移动一 tick（4 英尺）或对角线方向（ $4\sqrt{2}$ 每个刻度为 4.656 英尺/秒成 1 个补丁。5.66 英尺），翻译合理此外，为了模拟不同人群的步行速度变化，我们用正态分布估计步行速度的分布分布平均为 4.656 ft/s，标准偏差为 0.170 ft/s。该分布是根据 Yosritzal 等人的统计数据得出的。[2018]针对 20-60 岁的人口。

拐角瓶颈：转弯的代价

转弯和拐角的存在是局部截面模型中最佳撤离水流的瓶颈。

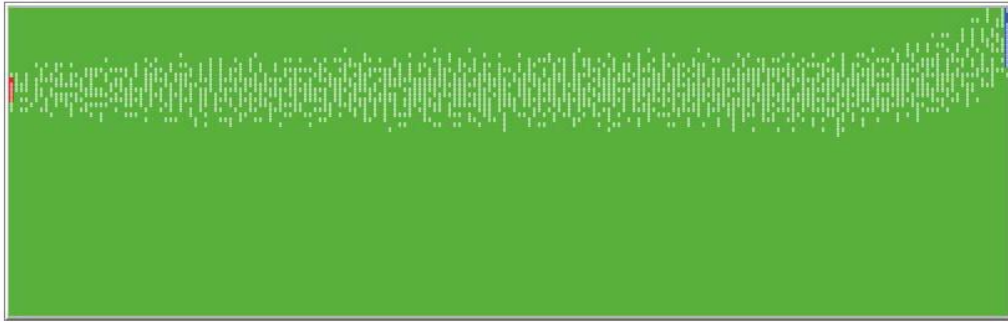
给定单个代理人希望以最短路径到达出口的情况，在两个拐角和正交出口（垂直于代理人所进入的入口走廊的出口）处都会产生压缩。图 7a 给出了在 A 楼的狮子门出口上方出现此现象的示例，在此我们可以清楚地看到单个人员逃离的欲望的影响：三角形的楔形结构限制了向外的最大流动，而不是图 7b 描述的线性流。尽管我们的特工的排斥力大大减轻了这种影响，但效果仍然很显著：图 7a 中建模的正交出口最大流出量为 4.2 e/s （每秒疏散人数），图 7b 中建模的线性出口最大流出量为 4.8 e/s 。4.8 代理人/秒，增长 14%。



a 对转弯出口流量的影响: 4.2 e/s 。



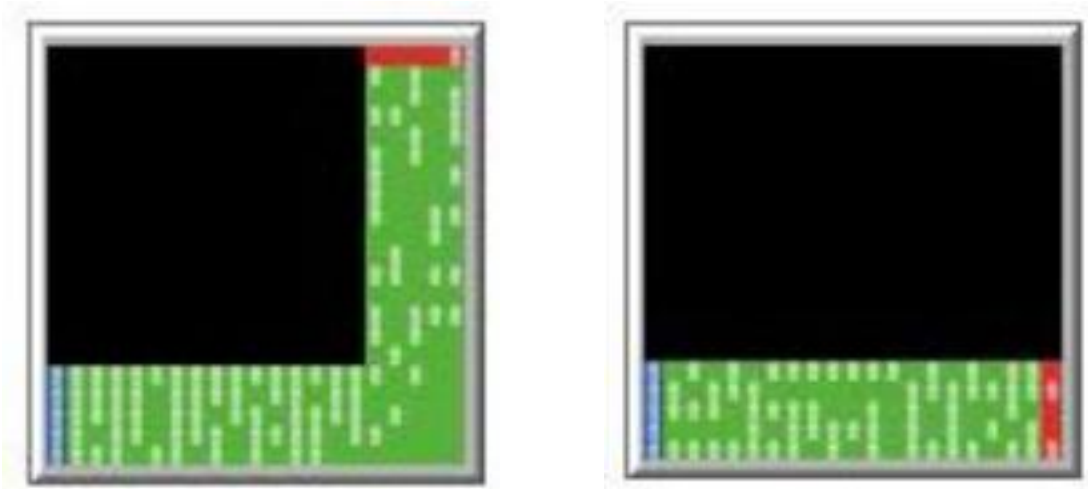
扫一扫上面的二维码图案，加我为朋友。



b 线性出口流量: 4.8 e/s。

图 7

这种现象可以扩展到大多数转弯，即在检查角落时变得明显。图 8a 的流出量为 2.0 e / s，而图 8b 表示的模型的流出量为 2.6e/s，增加了 30%。





扫一扫上面的二维码图案，加我为朋友。

边角流量：右上角离开的流量为 $2e/s$ 。

图：

我们建议在场的应急人员指导撤离人员的交通，使他们的流动与图 7b 而不是图 7a 以及图 8b 而不是图 8a 更加相似。此外，任何将来建造的秘密出口都应牢记这一现象，即面对最大的开放走廊。

第二部分：全球流程模型

本节将问题抽象为网络流量公式，求解最佳解决方案，并讨论模型的适应性。

作为网络的抽象

我们使用图形来表示各节及其之间的连接。我们将子部分表示为顶点，并将它们之间的路径（走廊或楼梯）表示为边。图 9 显示了结果图形表示。我们用两个字母（例如 LA）来表示“低地 A”的节点。其余节点（未标记为 L）对应于拿破仑大厅 N，其中 G 代表“地面”，F 代表“第一层”，S 代表“第二层”。作为参考，各节的 A - E 字母表示在图 2 中。

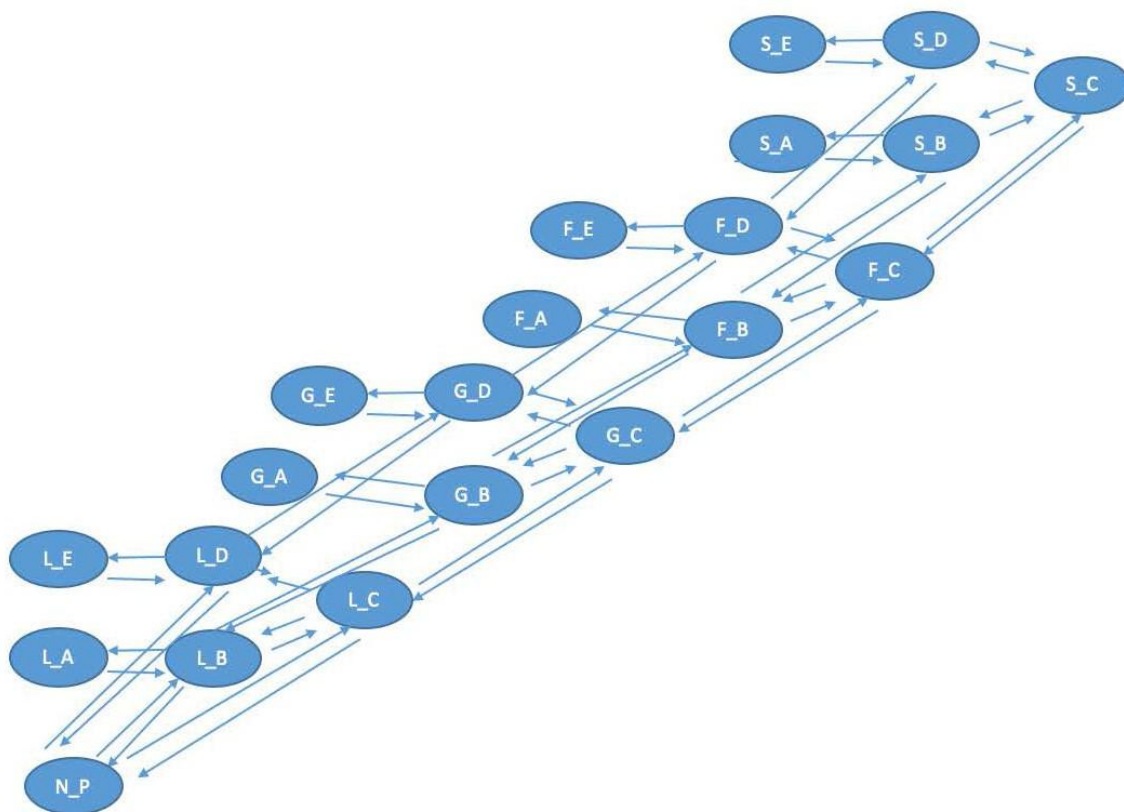


图 9. 显示所有可能边缘的常规图。

网络流公式

为了在抽象的背景下阐述这个问题，我们介绍了网络最大流量问题[Wikipedia 2019b]。考虑一个有向图 $G = (V, E)$ ，其中源顶点为 $s \in V$ ，宿顶点为 $t \in V$ 。另外，在边上定义一个容量函数 c ：对于有向边 $e = (u, v)$ ，令 $c(u, v) : E \rightarrow \mathbb{R}^+$ 。网络上的 $s - t$ 流是函数 $f(u, v) : E \rightarrow \mathbb{R}^+$ 满足以下约束：



扫一扫上面的二维码图案，加我为朋友。

偏斜对称性: $f(u, v) = -f(v, u), \forall (u, v) \in E$

容量: $f(u, v) \leq c(u, v), \forall (u, v) \in E$

余额:

$$\sum_{v \in V} f(u, v) = 0, \forall v \in V \setminus \{s, t\}$$

注意平衡约束如何排除 s 和 t 。这是因为 $|f|$ 的值。流 f 的定义为

$$|f| = \sum_{v \in V} f(s, v) = \sum_{v \in V} f(v, t).$$

最大流量问题寻求网络上的最大流量。

直觉上，流动问题可以认为是通过管道网络将水作为边缘，将顶点作为连接点。然后偏斜对称约束表示，通过边缘发送的水量等于沿相反方向发送的负水量。容量限制表明，每单位时间管道中流经的废水量最大。平衡约束条件表明，流经任何非终端连接点的每单位水也必须流出。关键问题是，在一个单位时间内可以通过管道将多少水从水源输送到水槽？具体示例如图 9 所示。

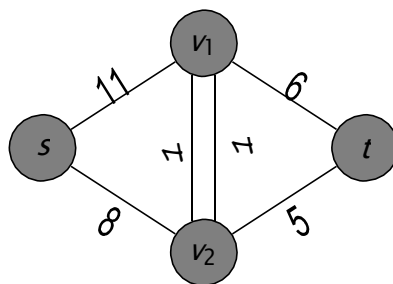


图 9. 容量写在边缘的网络。最大流量= 11（在顶部路径上发送 6，在底部路径上发送 5）

要将疏散问题转换为网络流量问题，我们需要对先前描述的网络结构进行一些修改。经典的网络流量问题假设一个来源和一个接收器，但是卢浮宫的疏散会使参观者从博物馆的多个区域开始。

我们创建一个“超源”顶点 s ，其边缘与博物馆的每个小节 r 相同。这组额外的边缘最多可以将房间的初始填充量作为流发送，因此对于小节 r ，我们将 $c(s, r)$ 设置为小部分的初始填充量。

同样，我们在每个子区域的“超级接收器”上都添加了一个有向边缘的“超级接收器”，人们可以从该子区域直接退出博物馆。

我们使用 Edmonds-Karp 算法（1972）[Wikipedia 2019c] 查找最大流量和边缘上的流量分配。

我们将最大流量值 m 解释为每秒离开卢浮宫的最大人数。这是在约束条件下的最佳速率。如果在召集疏散人员时 p 人在罗浮宫中，则疏散罗浮宫的最短时间为

$$t_{\min} = \frac{p}{m}.$$

t 分的值有助于对疏散策略进行排序，同时还留有讨论空间，该值低估了实际时间，尤其是在遇到瓶颈的情况下。

寻找瓶颈



扫一扫上面的二维码图案，加我为朋友。

为了找到瓶颈，我们在图上引入了另一个抽象问题：最小割问题。 $s-t$ 切口边缘的子集 C 定义，因此删除 C 会导致断开连接的图形，其中 s 和 t 位于不同的量中。削减成本由下式给出

$$\text{cost} = \sum_{(u,v) \in C} c(u,v).$$

最小切割问题要求以最小的成本切割。最小割问题与最大流最小割定理密切相关，最大流问题[Wikipedia 2019d]：网络中从 s 到 t 的最大流量等于最小 $s-t$ 割的代价。

此外，由于该定理是线性规划中所谓的强对偶性的结果[Wikipedia 2019e]，因此最优解具有称为互补松弛的性质。结果表明，最小切割的边缘恰好是流量等于其最大容量的边缘。换句话说：具有最大流量的边缘是瓶颈。

调整我们的模型

我们的模型非常灵活，可以轻松扩展到任何秘密出口的开口。某个部分中秘密出口的添加可以通过从该顶点到超级接收器的边缘来表示，而部分之间的阻塞可以通过移除相应的边缘来表示。这种去除边缘的技术还可以表示通过去除超级沉的相应边缘来封闭其他通道，例如 Passage Richelieu。这个简单的扩展突出了使用图形和网络流进行抽象的强大功能。

罗浮宫管理人员可以尝试使用 Net-Logo 模型中的参数。例如，他们可以观察到恐慌程度增加的影响。或者，他们可以将某些特工设置为比其他特工慢得多，以代表残疾疏散人员。

尽管我们专注于罗浮宫布局的细节，但我们的模型仍可高度适用于其他建筑物，特别是因为全局流量模型并非特定于任何特定建筑物，仅需要精确估计边重即可。

第三部分：结果和建议

我们讨论了模型的可能疏散计划和结果。对于我们的主要模型运行，我们允许通过主金字塔，Passage Richelieu，卢浮宫和卢浮宫出入口，并在较低的 D 层通过 Passage Richelieu，在 E 地层的 Carrousel du Louvre 进出口，和地面 A 处的狮子门。

我们的疏散计划会根据欧几里得距离为每个子区域计算最近的出口子区域，并将所有人员派往该出口。我们计算出的吞吐量为 17.8 e/s 之外。

罗浮宫在 2017 年[卢浮宫博物馆 2018 年]有 810 万人次，但在周二[卢浮宫博物馆 2019 年]关闭，平均每天有 26,000 人。尽管最忙碌的日子里的游客人数明显多于平均人数，但不可能所有的游客都同时在卢浮宫。因此，我们将 26,000 作为疏散中最坏情况的代理。另外，由于没有有关人员分布的信息，我们只是将他们均匀地分配到各个房间。基于这些假设，该疏散计划需要

$$t_{\min} = \frac{26000}{17.8} \approx 1460 \text{ s} \approx 24 \text{ min.}$$

瓶颈

图 10 显示了从 LD, GA 和 GE 到 super-sink 的瓶颈，如该图左侧的箭头所示。这些是对应于 Passage Richelieu, Portes des Lions 和 Carrousel du Louvre 的边缘。这意味着该部分的瓶颈实际上正在退出建筑物，而不是到达入口本身。这与金字塔的 NP 顶点（图中最左侧的箭头）相反。对于金字塔来说，瓶颈在于到达金字塔，而不是穿越金字塔。



扫一扫上面的二维码图案，加我为朋友。

金字塔不是瓶颈

拿破仑 P（金字塔）是公众的主要入口。它受到一组通往地面的楼梯的限制。此，我们可以直观地期望从拿破仑 P 到外部的超级凹陷边缘成为最小切割的一部分，因此成为需要进一步分析的瓶颈。

事实并非如此。通过检查最小切割，我们可以看到从较低地面 C 到拿破仑 P 以及从较低地面 B 到拿破仑 P 的边缘，实际上是进入代表真正瓶颈的金字塔，而不是退出金字塔本身。LB 和 NP 之间以及 LC 和 NP 之间的楼梯是此特定疏散计划的瓶颈。

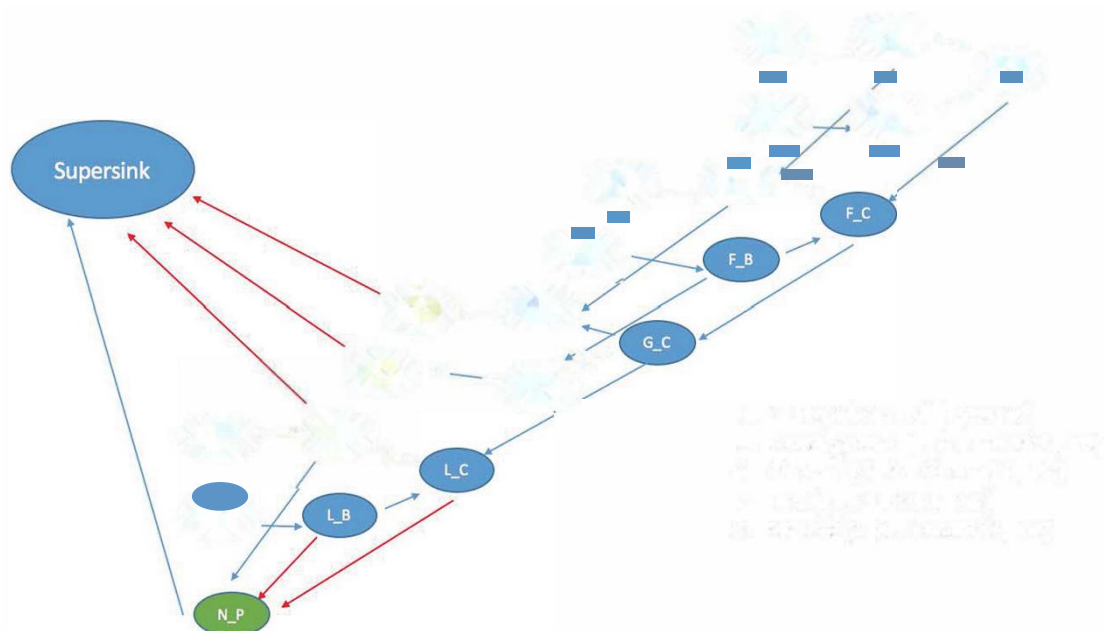


图 10. 从 G-E, G-A, 和 L-D 到 Supersink, 从 L_C 和 L_E 到 L_D, 以及从 L_C 和 L_B 到 N_P 的瓶颈, 用红色箭头表示。

我们有关金字塔的政策建议在理论上很简单：通过新楼梯或扩建现有楼梯，可以提供更高的访问率。一个更可行的建议是优先考虑打开金字塔周围的任何秘密出口，这可能会缓解进入金字塔的通道。更具体地说，如果在我们目前的疏散计划中，在较低的地面 B 或较低的地面 C 中存在秘密出口，这些出口将提供最大的缓解。在以下各节中，我们将看到金字塔出口为何对任何疏散计划的效力产生如此大的影响。

黎塞留通道对撤离至关重要

我们的疏散计划中最重要的部分是较低的地面 D，因为它为进入金字塔提供了缓解。我们看到这一点，不仅是因为 Passage Richelieu 是我们最小切割的一部分，而且还因为移除了将下部地面 D 连接到超级沉的边缘（LD, S），导致吞吐量降低了 $6.8 \text{ e} / \text{s}$ 。这会将我们最初的 $17.8 \text{ e} / \text{s}$ 降低到适度的 $11.0 \text{ e} / \text{s}$ ，并将我们的总疏散时间从 24 分钟减少到 39 分钟，疏散时间跃升了 64%。（实际上，（LD, S）的容量为 $7 \text{ e} / \text{s}$ ； $0.2 \text{ e} / \text{s}$ 的差异来自于我们最大流量网络的重新路由。此重新路由是我们模型适应性的一个示例。）

但是，更重要的是，我们观察到（LD, S）的去除极大地改变了我们的最小切割；特别是，从金字塔到超级沉的边缘（表示为（P, S））成为瓶颈。对于图形，这是无关紧要的。流出就是流出，无论它可能到哪里。夸利

然而，相对于其他出口瓶颈，金字塔安全问题更为棘手。金字塔的玻璃成分是一个问题。另一个原因是，金字塔作为卢浮宫的标志和主要公共入口的位置使其成为遭受外部攻击时的目标。结果，保护 Passage Richelieu 也是对金字塔的一种保



扫一扫上面的二维码图案，加我为朋友。

护形式。

因此，我们的政策建议是为 Passage Richelieu 增强安全性。这与以下事实吻合：Richelieu 通道以 7 e/s 的速度通过了四个公共入口中最大的出口流量。此外，它在减少金字塔入口应力方面的其他用途对安全疏散非常重要。

地面 D 是瓶颈

我们最小割口中最严格的边缘（因此是撤离人员流出的最大瓶颈）是将地面 D 连接至地面 E 的边缘。实际上，该 D-E 边缘实际上仅允许最大吞吐量 1.8 e/s 考虑到连接地面 D 和地面 E 的走廊的宽度，这个数字出乎意料的小，保守地以 4 个斑块（约 20 英尺）建模。

要了解这种差异，我们转向我们的局部剖析模型以获取见识。我们的疏散计划要求 D 地的所有疏散人员移向 E 地的 Carrousel du Louvre 出口。但是，狭窄的走廊以及复杂且嵌套的画廊的复杂转弯阻碍了他们的前进，如图 4 所示。被要求穿越地面 D 朝向通向地面 E 的走廊的撤离人员被其他撤离人员阻挡，导致上述瓶颈，并导致人们的恐慌程度增加。这种情况尤其成问题，因为地面 D 是通向地面 E 的唯一部分。请注意，在图 11 中，中间公共区域有多少被疏散者，相应地，很少有疏散者能够进入出口。此外，恐慌程度的上升，人满为患以及由此产生的公共安全危险造成了超出出口流量限制的困难。

我们研究了地面 D 瓶颈对全球总流量的定量影响。由于地面 D 是连接到地面 E 的唯一部分，因此从 Carrousel du Louvre 出口流出的流量为 $\min(F_e, F_d)$ ，其中 F_e 和 F_d 是从地面流出的流量。罗浮宫（Carrousel du Louvre）和从地面 D 到地面 E 的流动。实验结果给出了 $F_e = 4.2 \text{ e/s}$ 和 $F_d = 1.8 \text{ e/s}$ ，从罗浮宫的 Carrousel du Louvre 流出的总出口流量

e/s 。因此，地面 D 的布局直接导致净损失 2.4 e/s 。因此，消除瓶颈可以将整体出口流量从 17.8 e/s 提高到 20.2 e/s ，从而将总疏散时间从 24 分钟缩短到 21 分钟。这是我们模型最大的潜在改进。另一项实验是更换卢浮宫（Carrousel du Louvre）出口



图 11. 地面 D 的瓶颈。源（楼梯和其他走廊）以蓝色标记（例如，右上的垂直线），而出口走廊（左上方）标记为红色。最突出的瓶颈部分（顶部）用紫色框起来，而未使用的路径（底部）用橙色框起来。次级（角）瓶颈的示例以黄色圈出。

在地面 D 上有一个同等大小的出口，正好位于撤离人数最多的人群开始聚集的位置（图 12）。将此新出口称为“通道地面 D”。通道地面 D 的放置导致出口流 4.8 e/s ，与 Carrousel du Louvre 出口提供的 1.8 e/s 相反。该值与图 7b 所述的 Porte des Lions 出口的线性流提供的值非常匹配。由于狮子门的出口已建模为与卢



扫一扫上面的二维码图案，加我为朋友。

浮宫的出口相同，因此这表明通道地面 D 就其出口吞吐量而言已达到某种最佳水平。这样的通道 D 将导致 20.8 e/s 的整体流出量，将总疏散时间减少到 21 分钟，减少了 15%。

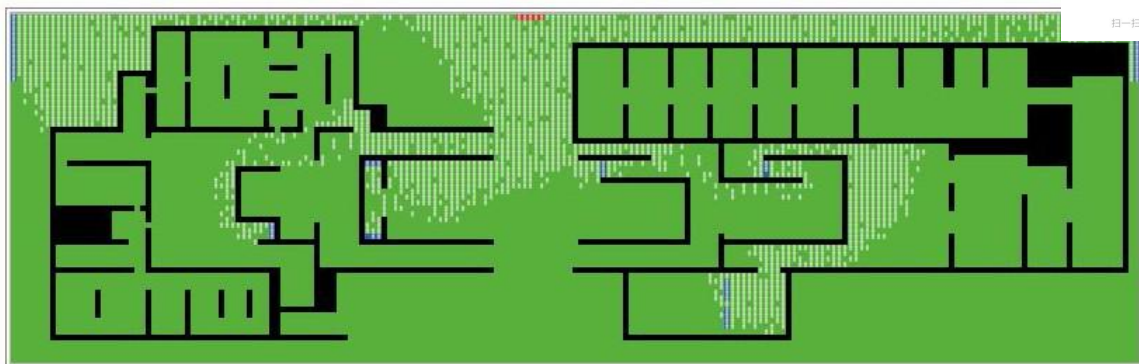


图 12. 放置一个以红色标记的出口（在中心附近的顶部），其中最大数量的撤离人员开始聚集，该出口提供的流量为 4.8 e/s ，而基础流量为 1.8 e/s 。

与最大容量相比，我们的疏散计划和所有涉及该机制的疏散计划都没有充分利用卢浮宫，因为其所在的地面 E 仅与地面 D 连接，因此其吞吐量受到限制地面 D 的大型复杂画廊网络，尤其是图 11 左上角的部分（紫色轮廓）。

后续建议

- 左上方图 11 的部分以紫色勾勒出轮廓。画廊墙壁与博物馆墙壁的靠近会限制撤离人员向出口的自然流动，并引起越来越多的恐慌。扩大将允许更多的撤离者利用这一空间。
- 通过图 11 左下方橙色部分所示的区域，安排应急人员指导撤离人员在“后方”周围。通过最短路径到达出口的经纪人的自我利益开始挤向紫色轮廓的部分，从而造成瓶颈。通过将人们引导通过橙色勾勒出的路径，一个人的局部次优路径会增加总吞吐量，因此提供了全球范围内最佳的解决方案。可替代地，诸如电话应用之类的软件包来突出未使用的或到目的地的拥挤路线也将有助于优化全球疏散情况。
- 消除“次要”和“角落”瓶颈，如图 11 中黄色圆圈所示。其中一些存在于地面 D 中，限制了撤离人员的流动，并向出口提供了多个瓶颈，将大量人员困在一个狭小的空间中并且-限制他们感觉达到最终目标的能力-提高恐慌程度。我们用来从出口中提取最大容量的大量人员可能掩盖了一些次要瓶颈。提供更简单的画廊结构将有助于产生更自然的撤离人员流，从而潜在地增加吞吐量并降低公众过度拥挤的担忧。
- 更激烈的建议集中在图 12 顶部中间附近用红色表示的潜在新出口周围。其构造超出了我们的建议范围；但是，如果地面 D 上有一个秘密出口，则其出口将为出口吞吐量带来最大的收益。

布雷斯特悖论

出人意料的是，从网络上删除边缘实际上可以增加跨网络的流量。这种现象称为 Braess 悖论，我们将在图 13 中的示例中进行说明。

在图 13 中，假设有 4000 个人从起点到终点交叉。穿越边缘所需的时间为 45 个时间单位或 $0.01P$ 单位，其中 P 为使用边缘的人数。



扫一扫上面的二维码图案，加我为朋友。

首先，考虑标记为 x 的边不存在的情况。如果 A 人采用 v_1 路径，而 B 人采用路径，则路径的时间将分别为 $0.01A + 45$ 和 $0.01B + 45$ 。

采取使他们的时间最少的路径，它们将达到平衡，其中每条路径花费相同的时间，给出以下方程式：

$$0.01A + 45 = 0.01B + 45, A + B = 4000.$$

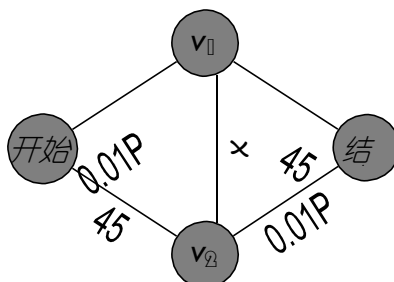


图 13. 举例说明布雷斯悖论的例子，来自 Valiant 和 Roughgarden [2010]。

该系统求解 $A = B = 2000$ 。这导致每个人服用

$$45 + .01(2000) = 65 \text{ 单位时间。}$$

现在，考虑边 x 存在但不花时间进行交易的情况是。对于一个使用 $\text{start}-v_1-v_2-\text{end}$ 路径的人，总时间为 $0.01(2000) + (0.01)(2001) \times 40$ ，节省了 25 个单位。然而，累积是促使更多人尝试此路线的动力；每增加一个人，路线的时间就会增加，直到有 2500 人沿着路线行驶，这时需要 $0.01(2500) + 0.01(4000) = 65$ 个单位时间，这与之前没有边的情况相同 x 。但是，仅采用 v_2 路径的人会发现他们的路由现在需要 85 个时间单位，因此他们也被激励选择采用 $\text{start}-v_1-v_2-\text{结束}$ 路径。然后，每个人的路径需要 $0.01(4000) + .01(4000) = 80$ 单位时间，而任何一个采用原始路径的人都需要 $45 + .01(4000) = 85$ 单位。实际上，增加一条额外路线会使每个人的费率变得更差！

Valiant 和 Roughgarden [2010] 表明，这种悖论很有可能在网络中发生。

在此讨论中，我们建议在卢浮宫中带有中间走廊的任何部分（例如，我们定义的 B 小节），都应在那儿安置急救人员，以将人员引到中间走廊之外。不允许任何人上中间走廊将允许更高的全球疏散流量。

残留网络为应急人员提供了途径

全球流动网络的另一个结果是，通过在我们构造的图上使用最大流动解决方案，我们可以找到一个残差网络来寻找应急人员的进入途径 [Blum 2015]。对于

容量函数 $c(u, v)$ 和流量函数 $f(u, v)$ ，剩余容量函数为 $cf(u, v) = c(u, v) - f(u, v)$ 。残差网络 G_f 的边缘和顶点与 G 相同，但残差函数在其边缘。请注意， G 中的有向边在残差网络中的方向可能相反。残差网络是这样的，当且仅当存在从上沉到内部节点的路径时，才存在从任何出口（金字塔，卢浮宫，卢塞勒通道或狮子门）到博物馆任何内部区域的路径。在残差图中。通过使用剩余网络中的路径，应急人员的进入将不会阻碍撤离人员的外流。这突显了确保 Passage Richelieu 通道安全的另一个原因。通过使从超级沉到金字塔的边缘保持最小切割，即确保它不是瓶颈，我们确保了应急人员进入博物馆的途径。



扫一扫上面的二维码图案，加我为朋友。

因此，我们建议：

- 优先安排疏散计划，以便在剩余网络中存在进入路径；在许多方面，可以防止金字塔出口成为瓶颈来进行总结。
- 使用残差网络查找应急人员的进入途径。

政策建议摘要

- 建议 1：增加使用金字塔的权限。
- 建议 2：如果情况需要开放秘密出口，请优先考虑金字塔周围各小节的出口，尤其是 D 地。
- 建议 3：在黎塞留通道附近增加安全保障，并高度重视确保其在撤离时的效力，以确保金字塔出口的安全。
- 建议 4：请紧急人员指导撤离人员
远离中间走廊，因此流向出口的流量与图 7b 中详细描述线性流量相似。
围绕地面 D 的“背面”，即图 10 中以橙色突出显示的部分。或者，实施电话应用之类的技术为个人或群体分配路径。
- 建议 5：设计任何未来的新秘密通道或公共出口，以使线性流动通过最近的入口或走廊。
- 建议 6：去除地面 D 等区域的角落和复杂情况，在这些区域中，复杂的画廊布局会产生二次瓶颈。更简单的画廊布局将大大提高疏散效率。
- 建议 7：优先安排疏散计划，剩余网络可以通过该计划进入博物馆。使用此类路径让应急人员进入博物馆。
- 建议 8：使用技术和适当的标志减轻语言障碍对不同人群的影响。

模型评估

敏感性分析

我们的全局流模型非常强大；它总是找到最佳的解决方案。由于基于代理的模型的高变异性以及需要一些有意义的超参数来描述人类行为，因此该模型主要在局部截面模型中显示出敏感性。

结果，我们的敏感性分析涉及到在模型的 NetLogo 实现中改变一些参数。特别是，我们专注于更改以下 4 个参数：排斥因子，速度标准差，恐慌增量和 ppp（每个补丁的人）。对于画廊，紧身走廊和拐角这三个子部分，我们一次要改变一个。参数的基本值在表 1a 中显示。为了进行比较，我们还在表 1b 中提供了默认参数值的流量。

不变参数的值为：排斥因子= 1，

speed-stdev = 0.15, panic-crement = 0.2, ppp = 2。

表 2 显示了三个小节的流程，这些小节用于将值更改为排斥因子= 1，速度 stdev = 0.15, panic-crement = 0.2 和 ppp = 2，同时将其其他参数的值保持为默认值。

表格 1

a 参数的默认值。

b 截面类型的流量为默认值。



扫一扫上面的二维码图案，加我为朋友。

节类型	默认常量	节类型	流量 (e / s)
排斥因子	0.35	画廊	1.8
速度标准差	0.0365	走廊角	2.6
恐慌增量	0.1		2.0
ppp	1		

从表中可以看出，正如预期的那样，就原始输出而言，模型对参数的值敏感。但是，在整个实验过程中，三种类型的分区（画廊，狭窄的走廊和转角）的相对顺序不会改变，这是我们对每种布局的复杂性有了定性认识后所期望的。同样，所有结果都不是不合理的，事实表明，在选择参数时既显示了稳定性，也显示了重要的意义。

表 2

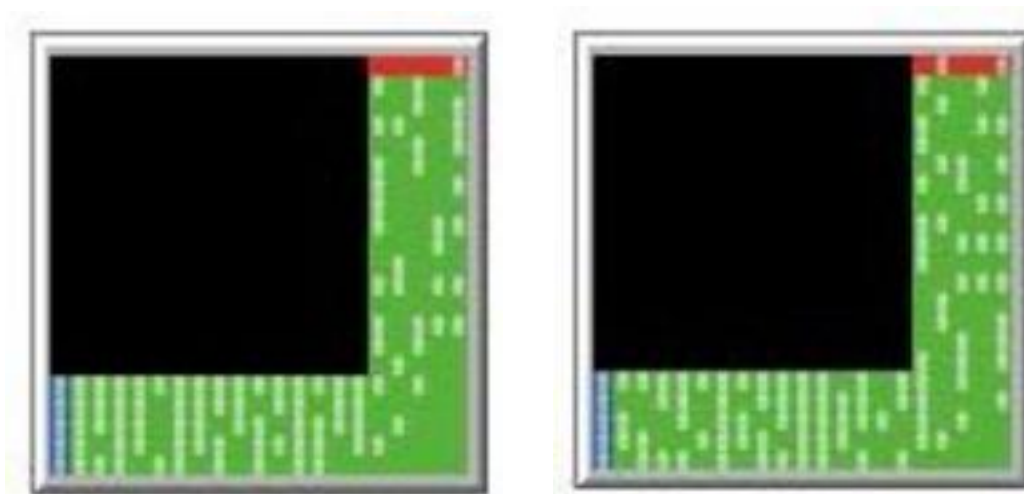
截面类型的流量 (e/s)，某些参数的值不同，而其他三个参数保持默认值。

节类型	排斥因子 1	速度标准差	恐慌增量 0.2	p
画廊	1.1	1.0	1.1	2
狭窄的	2.2	2.5	2.6	4
角	1.9	1.9	2.0	4

开发的具有严重调整参数的计算模型将无法简单地将其某些参数加倍或增加三倍而不会导致不合理的答案。

我们对各种参数分别发表评论：

- 排斥因子的增加会增加特工对拥挤区域的厌恶感，使他们彼此远离。结果，越少人越过出口线。但是，排斥系数值很高的一个有趣的副作用是，其作用类似于拐角处的默认参数。对这种现象的检查表明，高排斥效果实际上导致了最佳的转弯行为，如图 14 所示。更具体地说，高排斥诱导代理更有效地利用拐角宽度，这是极少数的局部贪婪行为导致全局优化行为。



a. 拐角对出口流量的影响：2e/s。 b. 高排斥力的流出，尽管普遍存在负面影响，但每秒钟最多 2 e/s 排斥力对出口流量的影响。

图 14。

可以看出，步行速度的标准偏差的增加似乎没有影响，因为采样的正态分布是



扫一扫上面的二维码图案，加我为朋友。

对称的。但是，这是不正确的，因为一组的步行速度是由前面最慢的移动部件控制的。结果是，有人走得更慢会导致后面的人也放慢脚步，因此我们的结果也具有合理的现实世界解释。

- 我们发现恐慌的增加对画廊的影响很大，但对角落和狭窄的走廊影响不大。恐慌的增加只是由于画廊的布局复杂而起作用。在其他两个小节中，人们可以轻松地保持运动，因此恐慌不会增加那么多，这是有道理的：如果人们被困在更复杂，更迷宫的环境中，恐慌就变得尤为重要。

- 对于 ppp，观察到的速率增加符合我们的预期，即每个补丁有更多的人将表明较大的最终出口吞吐量。

总体而言，我们的敏感性分析表明，对于参数值的大幅增加，该模型的行为不正常。这不仅意味着该模型是稳定的，而且卢浮宫的管理层将能够测试各种场景和计划，并且仍然保留我们模型的全部功能。

优势劣势

长处

- 基于代理的建模允许观察一组简单规则如何产生复杂的行为。另外，NetLogo 实现提供了用于更改参数值的直观界面。我们还采取了许多步骤来确保物理可解释性，以便我们可以将解决方案映射回现实世界。

- 将罗浮宫细分为多个更简单的小节，可以使我们观察和理解特定小节中的业务代表行为以及导致瓶颈的行为。

- 我们的全局流模型采用了高级抽象，可以轻松地整合局部截面模型的结果来评估整个系统。同样，强大的对偶性允许对全局瓶颈进行非常自然的解释。

- 高层次的抽象自然很容易适应。诸如秘密或受阻路径之类的测试场景可以轻松映射到“全局流模型”中，并纳入策略中。

就参数的大变化而言，局部截面模型非常强大。此外，参数更改的结果在情境中具有合理的解释。

弱点

- 相对于使经过的时间最少，与最大化吞吐量相比，得出的疏散计划在理论上对于最坏的情况是最佳的，但在平均或更常见的情况下可能不是最好的。

- 局部剖面模型固有地在独立环境中对卢浮宫布局和座席寻路进行建模。如果有足够的计算能力，则更连续的模型可以给出更实际的结果。

- 我们的本地截面模型中的主体逻辑非常强调距出口的距离，这导致大多数人向最近的出口挤去。只有在瓶颈后面排成一排的人时，某些代理才能找到替代出口。

- 局部截面模型中的业务代表进行的局部（自私）优化与全局流模型的整体流优化之间存在差异。

参考文献

省略