行人流动态的建模与仿真

经斯图加特大学物理系批准，作为授予自然科学博士（Dr. rer. nat.）学位的论文

提交人：来自哥廷根的彼得·莫尔纳

主审：W. Weidlich 教授、博士、荣誉博士　副审：Apl.Prof. Dr. habil. A. Wunderlin　口试日期：1995年12月15日

II. 斯图加特大学理论物理研究所

1995

arXiv:2601.02526v1 [cs.MA] 5 Jan 2026

前言

本文提出了一种用于描述行人流的微观模型，该模型基于社会力理论构建。

本研究有两个目标:

- 开发一种贴近现实的模型，可作为设计满足需求的行人设施的工具。

- 通过一个拥有充足数据的模型，验证一项社会科学理论。

对行人模型的研究表明，尽管个体的行为模式简单，行人流中的相互作用相互交织，仍会形成复杂的空间和时间结构。因此，可以在行人群体中观察到集体行为的涌现，其中每个个体只遵循两条行为规则：1. 它们希望以一定的期望速度沿最直接的路径到达指定的目的地。2. 它们努力与彼此以及障碍物保持一定距离。这种自组织的集体行为表现为穿过人群的行人流道，其中只包含运动方向相同的行人。另一个值得观察的现象是，在通道或交叉口处，运动方向会发生振荡。

此外，还展示了行人流特性对建筑几何形状的强烈依赖性，并研究了几何变化对流动性能指标的影响。在一个示例中，通过缩小可通行区域，实现了效率提升。

这一效应可用于优化行人设施，方法是让平面布局经历一个进化过程。为此，本文介绍了一种进化程序的实现，该程序建立在遗传算法和进化策略的原始方法之上。

在行人模型的扩展中，社会力模型加入了决策模型，以描述对备选目的地的选择行为。此外，模型还纳入了行人的适应与学习能力。这样，行人便能依据积累的经验，改进避让行为和决策策略。为此，模型参数将经历一个经过修改的进化过程。

在大型人行设施中，行人的方向感和路径选择对建筑各区段的负载起着决定性作用。为确定路径系统中各子路段的负载，我们开发了一种方法，可在考虑行人主观选择标准的基础上，计算整个路径系统中各子路段的负载。该方法还能够正确处理规则网络，并允许路径选择存在容差。

最后，基于行人动力学的社会力模型，我们建立了一个模型，用以描述路径系统如何自主发展并形成最小绕行，这种情况在自然界中十分常见。在这些运输路径系统中，网络总长度与路径的（材料）成本之间达到最优平衡。在所提出的模型中，行人会踩踏出人行小径，这些小径通过频繁使用得以维持，而在无人使用后便会消失。在仿真中，该模型将一个完全连通的网络转化为一个绕行最少的路径系统。

为了计算这些模型，我们开发了专用的仿真软件，使用户能够使用一种特殊的描述语言方便地进行模型规范。仿真过程的控制与观察，以及结果的表演，均通过图形用户界面完成。

最后，本文还将讨论仿真理论中的一些主题，例如面向对象的模型规范与实现，以及仿真中的并发问题。

在此，我谨向 Wolfram Eifert、Dr. Dirk Helbing、Joachim Keltsch、Regina Röder、Dr. Nicole J. Saam、Martin Schenk、Dr. Dr. Frank Schweitzer、Jens Starke、Anja Steinhauser、Jens Wedekind、Prof. Dr. Dr. h.c. Wolfgang Weidlich、理论物理学第二研究所的工作人员，尤其是我的家人，致以感谢，感谢他们给予我的启发性讨论和建议、为本文校对，并在实现本项工作过程中提供支持。

斯图加特，1995年12月 *P´eter Moln´ar*

目录表

1 引言 **15**

2 行人交通调查 19

2.1 运动行为.19 2.2 行人设施设计.24 2.3 建模.27 2.3.1 宏观模型.28 2.3.2 微观模型.28

3 社会相互作用 31

3.1 动态社会影响理论.32

3.2 社会力理论.33

行人 ¨流动力学 3 **5**

4.1 行人¨模型 35

4.1.1 行人的运动.36 4.1.2 驱动力.37 4.1.3 行人之间的相互作用.38 4.1.4 与障碍物的距离行为.42 4.1.5 吸引物.46 4.1.6 群体中的相互作用.47

4.2 参数的确定.47

4.3 自组织现象.49

4.3.1 路径形成.50 4.3.2 行人¨交叉口.50 4.3.3 通行方向振荡.50

4.4 评价标准.51

4.4.1 效率.52

4.4.2 速度变化.53 4.4.3 舒适度.53 4.4.4 群体间距.54

4.4.5 平均指标.55 4.4.6 测量值预测.56 4.4.7 性能（流量）.57 4.4.8 （自）组织程度、多样性测度.58

4.5 性能指标.62

4.5.1 走廊性能指标.62 4.5.2 交叉口效率.62

5 前言 优化 7 **5**

5.1 进化原理的构想.76 5.2 行人设施的进化¨优化.77 5.3 遗传算法.79 5.4 进化策略.80 5.5 遗传算法和进化策略的研究.82 5.5.1 进化¨优化的实现.83 5.5.2 进化¨优化示例.86

6 社会力模型的扩展¨ 89

6.1 决策模型.89

6.2 行为策略的进化.92

7 路径网络 95

7.1 将行人设施表示为网络.96 7.2 路径网络中的路段负荷.98 7.2.1 确定最短路径.99 7.2.2 使用频率的分布.100 7.2.3 随机 Warshall-Floyd 算法.103

8 开　发踩踏小径 10 9

9 仿真程序 115

9.1 行人模型的结构.115 9.2 对象与类.117 9.3 面向对象的模型规范.118 9.3.1 模拟器的组成部分.119 9.3.2 仿真对象的方法.119 9.4 并发问题.120 9.5 计算时间与计算精度.124 9.6 模型语言的描述.125

符号表 131

参考文献 137

插图目录

2.1 校园踩踏小径的形成.22 2.2 穿过斯图加特城市公园的人行小径.23 4.1 指向一个（中间）目标的方向向量.39 4.2 目标方向坐标系示意图.42 4.3 用于描述行人之间距离行为的不同势函数形式¨.43 4.4 采用椭圆排斥势的行人动力学轨迹 . 64 4.5 采用拉伸排斥势的行人动力学轨迹 . 64 4.6 用于描述与边界之间距离行为的不同势函数形式¨.65 4.7 带隔墙走廊的势函数表示.66 4.8 带隔墙走廊的改进势函数表示 . . . . . 66 4.9 吸引物的势函数表示.67 4.10 行人流中的路径形成 1.68 4.11 行人流中的路径形成 2.68 4.12 相互垂直的流中的振荡.69 4.13 自组织环形交通.69 4.14 带有狭窄通道的隔开走廊.70 4.15 带有两个通道的隔开走廊.71 4.16 走廊的性能指标.72 4.17 有障碍物的交叉口.73

4.18 交叉口的效率度量.74

5.1 走廊的变化可能性.77 5.2 交叉口的变化可能性.78 5.3 用于研究进化方法的评价函数.86 7.1 由多个走廊组成的网络.97 7.2 由房间组成的网络.97 7.3 行人流模型的网络表示.98 7.4 Warshall-Floyd 算法.99

7.5 Martina Franca 路径系统 1.101 7.6 Martina Franca 路径系统 2.101 7.7 Martina Franca 路段负荷分布.103 7.8 方形网络.104 7.9 方形网格的负荷分布. 105 7.10 Martina Franca 不同方法所得负荷分布的比较 f¨ur.106 8.1 最小绕行系统的示意表演.110 8.2 走廊内行人流的路径形成 f¨angerstroms.112 8.3 由四个节点构成的踩踏小径系统的形成 . . . . . 113 9.1 模拟器代码在各功能区域中的分布 . 116 9.2 嵌套作用域树结构.126 9.3 模型规范示例.129

表目录

2.1 平面中的服务水平.27 4.1 个人走廊性能指标 f¨ur.63 4.2 三人组走廊性能指标 f¨ur.63 5.1 遗传算法与进化策略之间的差异.84

第1章

引言

直到20世纪50年代，我们的城市主要以步行为主。随着乘用车日益普及，城市结构发生了变化，变得越来越不适宜步行。这引发了行人与机动车交通分离的进程。如今，人们越来越重视建设步行街区、购物中心和休闲设施。

在规划符合需求的步行设施时，人员流动的建模与仿真发挥着重要作用。这样，设施方案在规划阶段就可以根据预期需求进行评估，从而避免建筑物内出现瓶颈或闲置区域。

行人交通主要受行人之间的社会心理互动，以及他们对周围环境的反应所决定。相比之下，构成机动车交通特点的技术因素，例如加速时间、制动距离或方向改变时的限制，则处于次要地位。

因此，行人构成了一个有趣的社会系统；由于易于观察，可用于验证社会动力学模型：行人的行为可通过速度变化显现，并能以物理量测量。个体之间互动的事件频繁发生，因此可以得出统计结论。

此外，还可以从复杂程度不同的平面来考察行人行为，并分别通过建模加以描述。

基于这两个方面，研究人员构建了一个行人¨动态的微观模型，并在本文中予以介绍。

本文介绍的个体行为（在行人"流"中）建模与仿真方法，无论是在城市规划领域还是社会科学领域，都是一种全新的方法。

为了向广泛（且部分持怀疑态度的）受众传播跨学科研究的方法，成果应采用具有吸引力且易于理解的设计，同时提供用于建模与仿真的工具，这将非常有帮助。因此，开发了一款仿真软件，使用户能够自行指定、仿真并评估模型。

面向需求的行人设施设计

早在 20 世纪 60 年代，行人流就已成为交通研究的对象。研究人员通过大量观察，考察了单个行人的定向行为以及城市结构中行人群体的行为（第 2.1 节）。随后，根据对行人流速度和密度的测量，推导出了行人设施设计的判据（第 2.2 节）。

近年来，除了针对不同应用目的开展的实证研究外，还出现了用于仿真人群行人的宏观和微观模型（第2.3节）。

微观仿真能够详细研究城市环境中的行人流。因此，在设施的规划阶段，就可以对建筑进行有意义的研究，并发现平面图中的潜在弱点。模拟行人的特性也可轻松调整，以适应建筑的用途以及预期的行人流组成。

通过对行人进行数学描述（第4章），还可以采用一些评价判据，而这些判据仅凭实证观察很难收集。此类指标包括舒适度和心理紧张程度，以及受状况影响的感知外界印象的能力，例如在百货商店中感知商品陈列的能力。

利用传统和新的评价标准，可以对仿真中的设施平面图进行评价和优化。这可以通过对进化过程进行建模来实现。第5章介绍了这种自20世纪70年代以来以多种方式应用于技术优化的方法，并提出了一种用于优化行人设施的实现方案。

如果考虑规模较大的行人设施，还必须对行人的定向能力进行建模。熟悉该设施的行人对连接路径及其性质有准确的认识。根据这些认知地图进行路径选择时，考虑的不仅是路径长度或体力消耗等判据，还包括其他主观感受；这些感受往往也受到各路段行人流量的影响（第2.2节和第4.4节）。

各路段的行人流量取决于入口点的产生率、目标节点的吸引力，以及行人所使用的路径。根据行人个人评价标准进行路径选择的搜索算法，会为路径系统中的各个路段确定所谓的负荷频率。

这样，仅凭行人流量、行人的需求以及行人设施各部分的特性，就可能发现因路段或通道过载而产生的问题。人流特别密集、因而适合设置销售区域的位置也会显现出来。

这些设施的局部路段针对特定的行人流量和组成所呈现的典型特性，可以通过社会力模型的微观仿真（第 4 章）来确定。

在人行设施中，所谓的最小绕行系统备受关注，因为一方面需要提供足够数量的连接路径，另一方面又不能让人行道将设施的整个区域切割开来。在自然界中，许多运输系统都具有这些特性，例如植物中的供应系统，以及动物和人类的交通网络。此类路径系统的形成过程能够适应行人交通的需求，也可以用社会力理论进行建模（第 8 章）。

空间分布个体的社会行为

心理学和社会科学领域曾尝试采用多种方法来描述空间分布个体之间的关系。其中两种方法将在第3章介绍。它们构成了行人动力学社会力模型的基础。

行人从一个地点走到另一个地点这一简单任务，与选择目的地相比，并不需要太多思考。行人一旦确定了自己的

方向，几乎就会自动朝着自己的目的地前进。这里的“自动”是指，他会避开障碍物和迎面而来的行人，而无需进一步思考。在此过程中，他凭借经验，能够对事件作出最佳反应。

观察表明，个体行人的运动轨迹非常相似。这使得我们能够运用社会力理论进行数学描述。

行人的行为可以从复杂程度不同的多个层次进行考察。行人通过行走运动抵达目的地，这构成了进一步建模层次的基础。

在行人动力学的社会力模型层次之上，还可以构建目标选择决策模型。各层次的模型状态彼此依赖：行走运动会触发目标方向的选择，而决策过程的结果又会给出新的目标方向。行人的微观模型可以通过近乎任意数量的复杂行为规则不断扩展。

用户友好的仿真软件

鉴于行人流建模的这两个方面，我们开发了一款仿真软件：它既可作为计算机辅助设计软件的一部分，供建筑师和城市规划者使用，也可作为独立的应用程序，用于设计和仿真社会力模型。

考虑到该理论的传播，以及模拟器在不同（对计算机不太热衷的）学科中的潜在用户，我们为这款软件配备了易于操作的图形用户界面。借此，用户可以观察和控制仿真过程。仿真结果既可以动画形式录制成视频，也可以绘制成图表并打印在纸上。

模型规范采用专门为此开发的¨描述语言编写。第9章将简要介绍该语言，并解释模拟器所依据的组件和面向对象概念。

[1]用于绘制（建筑）图纸和平¨面图的计算机辅助设计软件

第2章

行人交通研究

自20世纪60年代以来，行人流一直是交通研究的课题。研究人员通过大量观察，考察了单个行人的定向行为，以及城市结构中行人群体的行为（第 2.1 节）。随后，根据对行人流速度和密度的测量，推导出用于行人设施设计的判据（第 2.2 节）。

近年来，除了针对各种应用目的开展的实证研究外，还出现了用于仿真行人群体的宏观和微观模型（第2.3节）。

2.1 运动行为

行走运动

交通工程文献中给出的行人平均速度为 1.34 m/s。男性的平均速度为 1.41 m/s，比女性（1.27 m/s）高约 10%。步行速度在约 20 岁时达到最高。50 岁以后，速度会明显下降。行人群体中的速度呈正态分布。魏斯指出，均值为 1.34 m/s 时，标准差为 0.26 m/s。

伴随条件在行走过程中也起着重要作用 [，例如93]:

- 行人交通可分为四类，各类的平均速度有所不同：在工作和厂区交通中，行人

以 1.61 m/s 的速度行进，速度最快。其次是通勤人流，速度为 1.49 m/s。购物和休闲时，行人的平均速度则分别只有 1.16 m/s 和 1.10 m/s。

- 时段与行人¨速度之间存在依赖关系。早晨的速度最高。上午和下午早些时候可以观察到明显的下降。只有在午间和傍晚，行人的平均速度才会暂时上升。

- 环境温度也会影响行人¨速度。当温度为 25° C时，速度仅为均值的92%；而在 0° C时，则升至约109%。

- 在可观测的长度范围内，平坦路面上的人行道长度不会产生明显影响，但楼梯上则会产生影响。

动态空间需求

站立的人至少需要 0.15 m² 的面积。这相当于极度拥挤的情况，此时人员无法移动。行走所需的动态空间明显更大。在侧向上，必须考虑行人的宽度分布（包括随身携带的行李）、在理想路径上运动时身体的波动，以及偏离理想路径的情况。

在运动方向上，行人需要为接下来的步伐留出个人空间。此外，还必须与前方人员保持一定的安全距离。无行李行人的平均宽度为 0.71 m，速度为 1.34 m/s 时的步长为 0.63 m，由此得出的最小动态空间需求为 0.45 m² ，最大可能行人密度为 2.2 P/m²（每平方米人数）。在通道宽度不变的情况下，密度越高，步长越短，速度也越低。当行人密度约为 5.4 P/m² 时，行走运动便会停止 [Wei93]。

保持距离

文献中关于行人与墙及边界之间保持的距离，数据差异很大。不过，保持的距离在很大程度上取决于边界的性质。作为参考值

魏建议，走廊内与混凝土墙之间的距离为 0.25 m，与金属墙之间的距离为 0.20 m；人行道上与房屋墙面之间的距离为 0.45 m，与花园围栏及车行道之间的距离均为 0.35 m。

定向

行人通常沿着朝向目的地的最短路径行走。如果目的地在行人的视线范围内，且通往目的地的路径畅通，他们会尽可能沿直线行走。较为复杂的路段可以用包含多个中间站点的折线表示。

行人会以醒目且视觉上容易辨认的点为参照，并朝这些点行进。例如，人行横道处的交通信号灯就可以作为这样的定向点。通过将每个穿越方向的信号灯设置在对面道路一侧的右侧（或左侧），人们试图将相向而行的行人流分开 [Sch67，第 32] 页。

在较长的路段上可能会出现方向修正，因为靠近时会发现新的障碍物或定向点。

人行道的走向为行人提供了方向指引。然而，如果既定人行道的走向不合理，迫使行人绕行较远，他们就会在可能的情况下自行开辟路径。公园草坪上纵横交错的众多踩踏小径（参见图 2.1）便是这种行为的明证。

此外，还可以清楚地观察到第二种现象：行人往往倾向于沿着既定路径行走。与瞄准定向点并开辟自己的路径相比，这样做更简单，也更省力。人们多少会顾忌踩踏小径会破坏草坪，这或许会进一步增强他们使用现有路径的倾向。

对现有路径的利用会形成未经规划的路径系统所具有的典型特性，这些特性在 Schaur 中也见于其他运输路径系统以及自然界的自组织结构 [Sch94]:

1. 两条相交的路径彼此贴合。路径走向呈现轻微的曲线。

2. 大多数节点由三条路径构成。

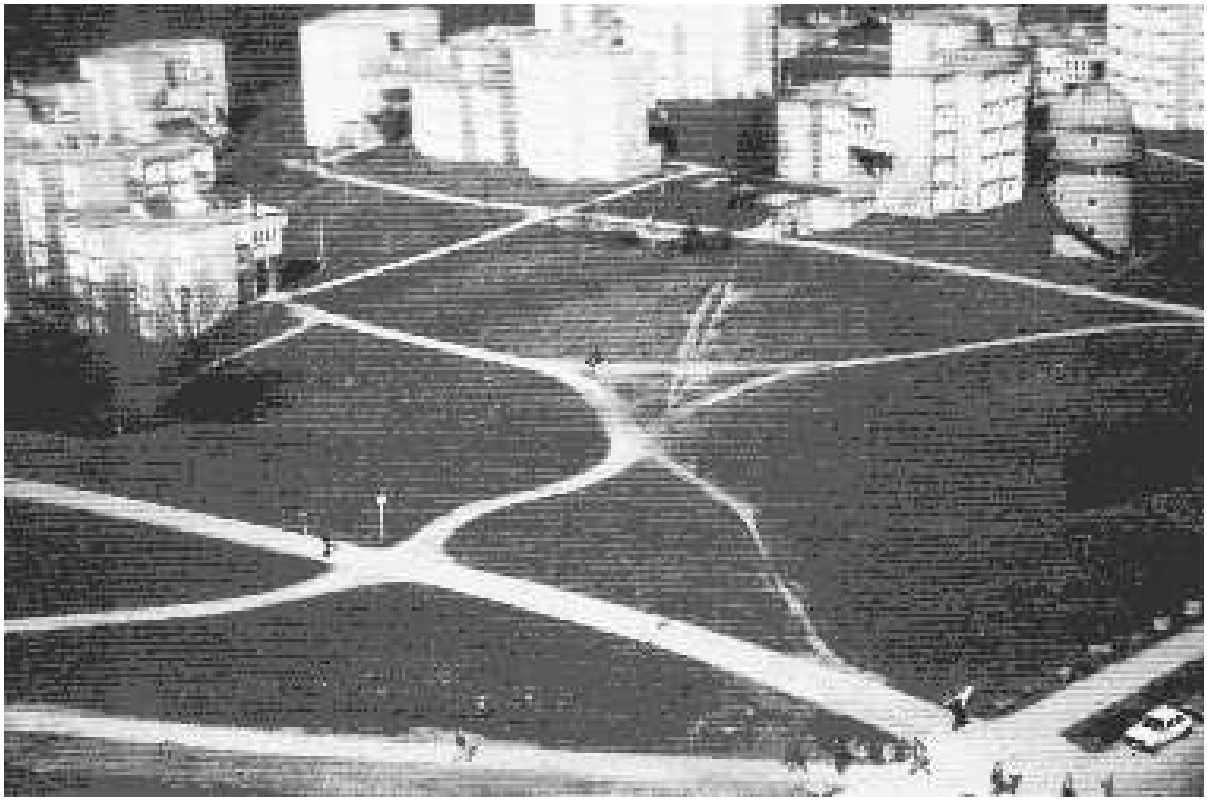


图 2.1： 斯图加特大学法伊欣根校区。除了规划建设的人行道外，还形成了一些踩踏小径。下部可以看到一条几乎沿水平方向延伸的铺砌道路。它是在那里出现一条使用频繁的踩踏小径后修建的。

图 2.1 清楚地展示了规划路径（图的下半部分）与非规划人行小径之间的差异。基于行人社会力模型（第 4 章）对非规划路径系统的演变进行建模，将在第 8 章中讨论。

对 Schenk [Sch95a] 的研究展示了行人定向的两种效应：斯图加特城市公园的一条踩踏小径构成了大学建筑与应用科学大学之间的重要路径联系。这条直接路径长130米，比规划建设的人行道短20米，几乎呈直线穿过公园的草坪。尽管这条路径曾多次被毁（即草坪被恢复原状），但每次都会重新形成。仔细观察会发现，这条路径上有两个明显的弯折处。

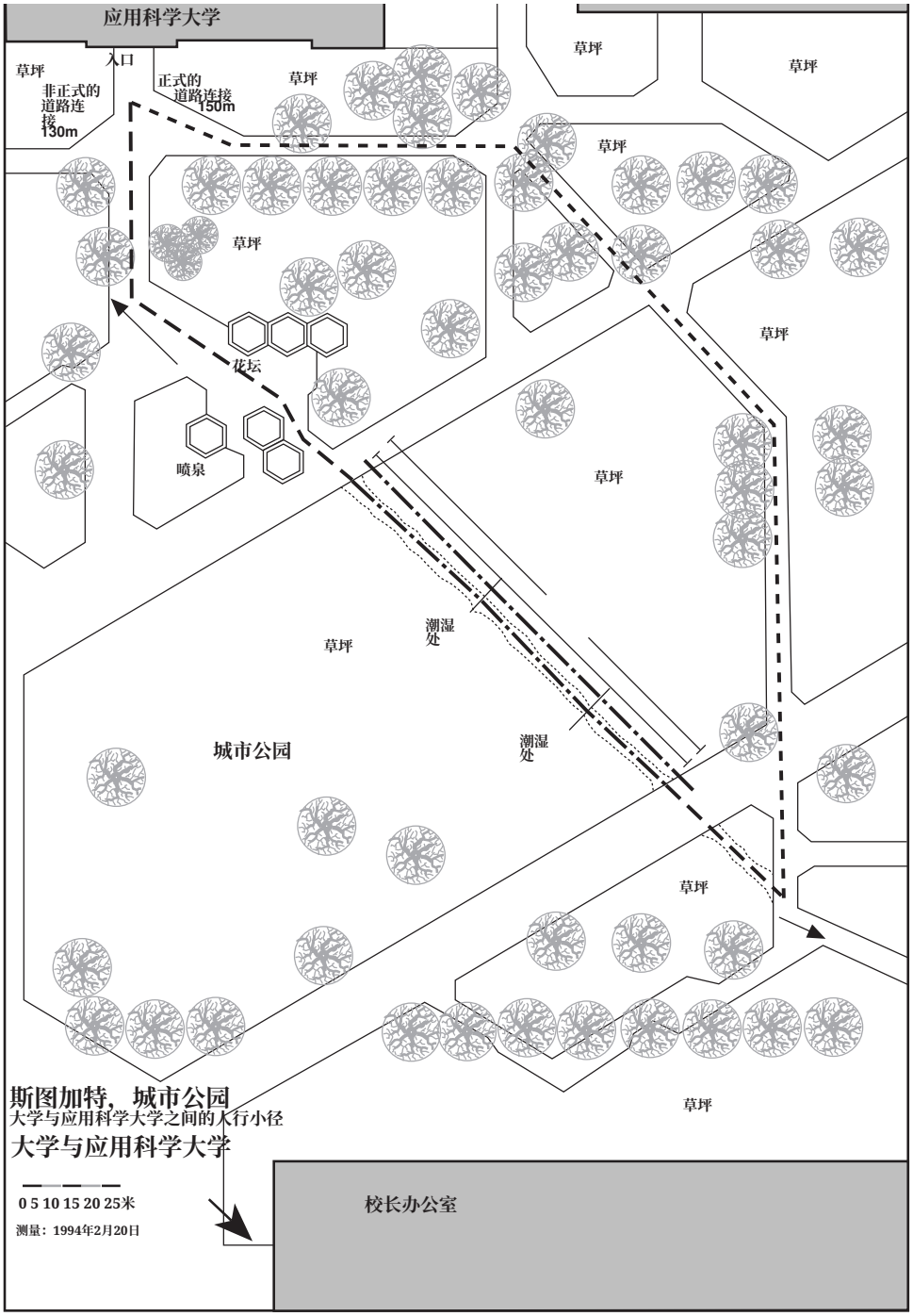


图 2.2： 斯图加特城市公园，位于大学和应用科学大学之间。踩踏形成的小径构成了一条几乎笔直穿过公园的连接路径 [Sch95a]。

从大学¨建筑¨走来的行人¨的定向行为¨解释了这两次改变路线的原因¨。在人行道的起点（图 2.2 右下方），应用科学大学的入口被树木¨遮挡。透过树木¨，只能看到通往入口的人行道¨的一小段，它成为第一个定向点。走近时，行人¨发现自己即将撞上喷泉池，于是调整路线，以便恰好从喷泉和树木之间通过。他们¨此时还看不到，自己这样走会径直走向花坛，因此还必须第二次改变路线 ¨¨。

从应用科学大学走向大学¨的行人¨没有这个问题 ¨。他们的定向点从远处就清晰可见，路上也没有任何障碍。尽管如此，他们仍两次改变路线，这只能用他们根据现有路径进行定向来解释¨。

环境与地面状况

行人也会受到环境和地面性质的引导。根据天气情况，他们更倾向于选择开阔或 ¨有顶棚的交通区域。

许多行人似乎会避开空旷且没有人的区域。在宽阔的广场上，可以观察到他们宁愿绕行、沿着边缘行走，也不愿沿对角线穿过广场。对于大型对象，例如高墙或纪念碑，他们往往会绕很大的弯，这会使行走路径变长。

人们也会避开不平整的地面，以及被雨水泡软的小径。一旦小径无法通行，便会沿其旁边形成新的路径。地形中的坡度和下坡会促使行人沿之字形坡道行走。人们愿意接受由此产生的绕行，因为之字形坡道的坡度较缓。

2.2 行人设施设计

为了规划行人设施，定义了定量数据，作为人行道、楼梯等尺寸设计的设计依据。

类比于流体动力学，在一个时间段内穿过某一横截面的行人数值之间存在如下关系

$$N = \rho\, b_n\, v_h\, T \tag{2.1}$$

与行人密度 ρ、人行道的可用宽度 b_n 以及行人 v_h的水平速度¨有关。在通行能力

$$L = \frac{N}{T} = \rho\, b_n\, v_h \tag{2.2}$$

是指每小时通过一个横截面的最大人数。在文献中，常使用以 1 m 单位宽度为基准的比通行能力¨

$$\hat{L} = \rho\, v_h \tag{2.3}$$

，以便以统一的方式比较不同的设施类型。行人的速度 v_h 对此处的密度十分敏感。通常，行人密度越大，速度越低。例如， Kladek 的近似关系（据 [Wei93，第 62] 页）通过以下公式描述速度与密度之间的关系

$$v_h(\rho) = v_h^0 \left(1 - \exp\left(-\gamma \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho^{\max}}\right)\right)\right) \tag{2.4}$$

自由空间中的速度¨、允许的最大密度 v_h^0以及标定常数¨，均可通过经验研究确定。在 $\rho^{\max}$ 魏 γ中，建议采用 [.34 m、93].4 P/m $v_h^0 = 1$和 $\rho^{\max} = 5.913$ P/m² 。由此，根据式（2.3）和（2.4），单位通行能力为

$$\hat{L}(\rho) = v_h^0\, \rho \left(1 - \exp\left(-\gamma \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho^{\max}}\right)\right)\right) \tag{2.5}$$

或者，作为速度的函数，可表示为

$$\hat{L}(v_h) = v_h \left(\frac{1}{\rho^{\max}} - \frac{1}{\gamma} \ln\left(1 - \frac{v_h}{v_h^0}\right)\right)^{-1} \tag{2.6}$$

因此，当速度为$v_h = 0.70$ m、密度为 1.75 P/m² 时，最大通行能力达到 1.225 P/ms [魏93]。这意味着，最大通行能力既不会在速度最高时达到，也不会在密度最大时达到。

一般来说，在评价行人设施的性能时，以下关系值得关注：

- 行人速度与行人密度的关系
- （特定）能力¨取决于行人¨密度
- （特定）能力¨取决于速度

这些依赖关系通常以所谓的基本图形式绘制出来。其曲线走向与机动车私人交通的曲线相似 [魏93]。

设计行人设施时，不适合采用最大能力。行人密度达到 1.75 P/m² 在极少数情况下才是可接受的。即使在建筑物疏散等极端状况下，也必须假定能够将陷入恐慌的人群控制在一定程度，使其以 0.70 m/s 的速度移动，这相当于平均步行速度的一半。

因此，设施的设计应更加宽松。交通负荷峰值会根据其出现频率加以考虑。对于高但罕见的负载，可以接受比正常负载时更低的质量等级。

20世纪70年代初，Fru 首次将服务水平概念（LOS）应用于行人交通，以进行详细区分。Oed 早已有类似的想法。通常采用以下判据 Wei：

K1 自由选择速度的可能性

K2 被迫变速的频率

K3 必须注意其他行人

K4 被迫改变方向的频率

K5 横穿行人流时的阻碍

K6 运动方向相反时的阻碍

¨K7 超车时的阻碍

K8 意外接触的频率

根据这些判据，可以对步行设施的使用质量进行分类。通过区分在特定行人密度下各项判据是否满足，可以定义不同的质量等级。此外

根据所示的依赖关系，还可以为每个LOS分配一个典型速度和通行能力。步行设施的通行能力不仅取决于速度和密度，还可以根据使用质量确定。第4.4节对此还引入了相应的质量测度，这些测度将在行人流仿真中计算。

行人设施或其某一部分的评价方式如表2.1所示， [Wei93] 以一个平面为例进行了说明。对于楼梯设施，

LOS	**密度** $\mathrm{P/m^2}$	**判据** K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8								**特征描述**
A	0.00–0.10	+	+	+	+	+	+	+	+	完全自由通行
B	0.10–0.30	+	+	=	+	+	+	+	+	自由活动
C	0.30–0.45	=	+	=	=	=	=	=	+	轻度障碍
D	0.45–0.60	=	=	=	=	−	−	−	+	中度干扰
E	0.60–0.75	−	−	−	=	−	−	−	+	重度残疾
F	0.75–1.00	−	−	−	−	−	−	−	+	交通拥堵
G	1.00–1.50	−	−	−	−	−	−	−	=	中度拥挤
H	1.50–2.00	−	−	−	−	−	−	−	−	严重拥挤
I	2.00–5.40	−	−	−	−	−	−	−	−	极度拥挤

表2.1： 平面步行中不同服务水平的特征描述示例。评估采用定性方式，分为好、中等和差。

行人在舒适度相同的情况下会接受更高的密度。同时，与平面上相比，速度随着密度增加而下降得更慢。因此，对质量的评价会向更高密度方向移动。除此之外，楼梯和水平交通面上特征的典型分布相同。

2.3 建模

为对行人设施进行数学描述和计算，人们开发了各种模型。许多交通科学研究采用简单的回归模型，根据实地采集的数据，将行人流量、密度和速度等量联系起来 [Wei93]。由于没有纳入行人的行为规则和互动，所得数学关系只能推广到已知的建筑形态；然而，要预测新建或仍处于规划阶段的设施中的行人流行为，则存在困难。

2.3.1 宏观模型

在 Henderson及其同事的研究中 [Hen71], [HJ74], [Hen74] ，他们将实地采集的行人流量数据与气体动力学模型和流体动力学模型进行了比较。然而，使用适用于普通液体和气体的玻尔兹曼方程，意味着假设动量和能量守恒，而这一假设对于行人流而言并不现实。

Helbing 提出了一种针对行人的宏观模型，该模型以玻尔兹曼型方程为基础，且无需假设动量守恒和能量守恒 [Hel92a], [Hel92b]。模型描述了行人之间的成对相互作用，以及期望速度和行走方向。通过将行人群体划分为具有不同期望速度和目标方向的亚群体，该模型还可用于研究行人交通的不同组成。

宏观模型假设密度是连续的，但即使近似来看，这一假设也不适用于行人流。行人位于空间中明确的位置，其单位面积内的数量以整数为单位变化。这会导致强烈的空间波动，只有在考察足够大的面积、速度范围和时间间隔上的均值时，这些波动才会消失。

2.3.2 微观模型

在微观建模中，通常用简单的规则来描述单个个体的行为。众多个体行动者之间的相互作用会产生宏观效应，可用于研究系统。由于所需的个体数量庞大，微观模型通常只能通过计算机仿真来处理。这也解释了为何微观模型与仿真直到近几年才兴起：一方面，模型采用了适用于个体的局部、简单且合理的行为规则；另一方面，现代计算机提供了必要的计算能力，能够计算详细的模型。

自20世纪80年代中期以来，人们开发了多个目标各异的微观模型。这些模型在所仿真人类行为的复杂程度，以及对运动过程的表演和仿真方面也有所不同。

根据行人动力学的表演方式，可以粗略地将其划分为微观模型。

Walker模型

在 [GM85] 和 [EOI92] 中提出的方法让行人在表示二维物理空间的方形网格上行走。行人的运动通过从一个网格点移动到相邻网格点来实现。步长由网格的网格间距预先固定。 Gibbs 和 Marksjö [GM85] 可以让行人以五种不同的速度（0.5 至 2.5 m/s）在网格间距为 0.5 m 的网格上行走，具体做法是按 5、4、3、5、2、4、5、3、4、5、1、4、5、3、2 的顺序模拟速度各异的行人。

行人会根据占用数占据其周围的网格点，占用数的数值会随着与其位置的距离增加而减少。不同个体在同一网格点上的占用数会相加。对于下一步移动，行人会优先选择占用数最低的相邻位置。

Ebihara、 Ohtsuki 和 Iwaki开发了一个用于仿真火灾或地震时建筑物疏散的模型。在该模型中，行人在更大的网格上移动，但其中的节点可以由多个人占用。网格点包含有关占用情况和疏散状态的信息，以及关于下一出口的状态和方向的信息，前提是从现实建筑中的该位置可以看到该出口，或该出口设有相应标识。行人行为模型可以考虑个体的决策和学习能力[EOI92]。

而在 Helbing开发的模型中，行人则在二维连续空间中移动。模拟中的行人按照各自的速度，沿目标方向以特定步长行进。遇到障碍物时，他们会将行进方向改变一个特定角度。如果这次转向不够，或者在新选定的方向上遇到另一个障碍物，他们就会尝试多次改变方向，且每次采用更大的角度。如果这些避让动作均未成功，行人便会在障碍物前停下 [Hel90][Hel91]。

第4章介绍了一种用于行人动力学的社会力模型，该模型同样属于微观模型。它描述了行人在连续物理空间中的位置和运动。

排队模型（queueing models）

此外，为仿真疏散措施，还开发了 [YM89]和 [Løv93][Løv94] 模型。行人位置和运动的表演方式与上述模型不同：建筑物被表示为由各个空间构成的网络。其中，空间对应于网络的节点，节点上分布着位于相应空间内的人员。各个空间之间的连接门表示网络的边（参见第7.1节，图7.2）。

行人可以在考虑通道通行能力和目标空间容量的情况下，在各个空间之间移动。这些数值必须从其他模型或实证研究中获得。此外，排队模型无法考虑建筑物几何形状的影响。

路线选择

行人路线选择模型 [BT86] [TvB92]关注行人对路段和目的地的选择。此类模型通常旨在确定大型购物中心和市中心各商店或摊位的吸引力，以及连接路径的使用率。这些模型可置于运动模型之上的层级。相关主题将在讨论社会力模型扩展的章节以及讨论路网的章节中介绍。

微观仿真的优势

微观模型和仿真能够对模拟个体的特性进行详细研究。这样就能确定一些量，而在观察真实行人流时，要确定这些量则需要付出很大努力。例如，方向和速度变化的频率。在仿真中，可以轻松地确定所有个体的这类测量值。

行人可以配备额外的行为规则，这些规则取决于各个个体当前的局部状况（参见第6章）。

在仿真中，可以逼真地再现行人交通的构成。行人的各种个体特征，例如年龄或性别，以及出行目的，都可以纳入考虑。

第3章

空间中的社会相互作用理论

心理学和社会科学领域曾尝试以不同方法描述个体之间的关系及其相互影响的强度。为此，人们普遍认为，个体之间相互影响的可能性取决于彼此的距离。这一假设需要定义一个空间，而各种方法在空间的定义上存在很大差异。[LL] 中列出了社会空间的几种表述方式：

- 作为由年龄、性别、族裔归属、宗教或职业等社会特征构成的多维场。多维空间中两点之间的距离取决于在哪些类别上存在一致性。（引自 Blau。）

- 作为个体之间具有成对连接的网络。距离可以通过连接边的长度来定义。（引自 Moreno。）

以下各节将介绍两种用于描述空间分布的个体之社会行为的理论。在这两种方法中，都可以假定存在一个一般性的社会空间；其拓扑结构既考虑个体在物理空间中的排列，也考虑个体的意见和社会差异。对于这种社会空间，目前尚未找到令人满意的定义，因此，物理空间构成了它的一种简化形式。

3.1 动态社会影响理论

社会影响理论（动态社会影响理论）提出了一种方法，用于描述在考虑个体空间排列的情况下所发生的社会相互作用。“社会相互作用”这一概念涵盖各种社会过程，例如说服讨论伙伴或组身份的发展。影响的强度简称为“社会影响”。这种影响从一个源出发，作用于某个（目的地）个体。

当多个社会源对一个个体产生影响时，影响的大小可以表示为源的强度（strength） S、直接性（immediacy） I 以及源的数量（number） N 的乘积，通过一个函数

$$\hat{\imath} = f(SIN) \tag{3.1}$$

加以描述。这里的强度指的是源施加影响时所具有的权力、重要性或强度。直接性反映了施加影响者与受影响者之间的关系。例如，它可以通过地理距离，或两人进行接触的频率来确定。 Latané 在基于物理空间的模型中使用距离的倒数或其平方[1]。

社会影响不会随着源的数量成比例地增加。这一假设建立在 Fechner 和 Stevens的规律之上，它们将客观现实与主观现实之间的关系描述为非线性关系：根据Stevens定律，主观感知强度¨ Ψ 与客观物理刺激的某个幂指数 β 成正比

$$\Psi = \kappa\, \Phi^{\beta} \tag{3.2}$$

与此同时，通过.....研究社会影响对源的数量的依赖关系

$$\hat{\imath} = s\, N^{t} \tag{3.3}$$

由 $t < 1$ 描述。

[1]在行人动力学的社会力模型（第4章）中，影响强度由一个指数衰减的距离函数决定；即使个体之间的距离趋近于零，该函数仍保持在有限值域内。

3.2 社会力理论

社会力量的概念基于社会科学场论[Lew51]，并由 Helbing 以数学形式表述 [Hel94]。

其中，社会力场表示外部因素对个体的影响，并决定其行为。与社会作用理论类似，这种场也可以由个体之间的相互作用产生。

在社会力模型中，个体的瞬时状态通过其在多维连续空间中的位置 $\vec{x}_\alpha =$ （x_1，.....，x_d）来描述。受社会力影响而产生的变化，类似于物理系统，可通过朗之万方程表示。

$$\frac{d\vec{x}_\alpha}{dt} = \vec{f}_\alpha(\vec{x}_\alpha, t) + \vec{\mathcal{F}} \tag{3.4}$$

这种形式可以用来模拟个体的行为：他们按照最小阻力原则行事，或对某种影响作出最可能的反应。

$\vec{}$随机项 $\mathcal{F}$ 表示偏离常规行为的随机偏差，这种偏差会出现在$\vec{}$模棱两可的状况中。此外，它还包括 $\mathcal{F}$ 建模时未逐一考虑的较小影响。

如果社会力场无旋，也就是说，力对 $\vec{x}$ 各组件的偏导数可以交换

$$\frac{\partial}{\partial x_i} f_j(\vec{x}_\alpha, t) = \frac{\partial}{\partial x_j} f_i(\vec{x}_\alpha, t) \qquad \text{für alle } i,\, j = 1 \ldots d \text{ und für alle } t \tag{3.5}$$

则该力场存在一个势 U，满足

$$\vec{f}(\vec{x}, t) = -\nabla U(\vec{x}, t) \tag{3.6}$$

。根据 Lewin的理论，这个势¨可以解释为社会场。例如，它可以表示 ¨公众意见、社会规范或当前趋势。

与物理系统不同，这里不要求满足牛顿定律“作用 =反作用”，因为个体之间确实可能对彼此产生程度不同的影响¨。同样，社会相互作用过程中也不假定遵循经典力学中的能量和动量守恒。

社会¨力既可以描述成对相互作用，也可以描述全局场的影响。当个体同时受到多个影响因素作用时，适用叠加原理。社会力由多个

¨力共同组成

$$\vec{f}_\alpha(\vec{x}_\alpha, t) = \sum_l \vec{f}_{\alpha l}(\vec{x}_\alpha, t) \tag{3.7}$$

其中， l 用于标记各个源。

在社会作用理论中，可以对由多条规则共同产生的行为进行建模。式（3.1）中的函数也称为社会力。这两种方法有共同之处。因此，社会作用理论（动态社会影响理论）的相关论述同样适用于社会力模型。

第4章

行人动力学的社会力¨模型

行人从一个地点走到另一个地点这项简单任务，与选择目的地相比，不需要太多思考。行人确定方向后，几乎会自动朝目的地前进。这里的“自动”是指他们会避开障碍物和迎面而来的行人，而无需进一步思考。经验有助于他们对事件作出最佳反应。

观察表明，单个行人的运动¨方式非常相似。差异仅体现在步行速度以及他们与障碍物和其他行人保持的距离上。这些差异往往与年龄、性别和文化背景有关。

行人运动¨的简单性使得我们可以用社会力理论对其进行数学描述。尽管单个行人的运动具有很强的可预测性，但多个行人相互作用时，却会形成复杂的空间和时间结构。行人通常既没有意识到自己是这种结构的一部分，也没有意识到自己对此有所贡献。

4.1 行人¨模型

下文将用社会力来描述观察到的运动模式。这里始终以受到社会力作用的行人 α 的视角为出发点。其他行人用 β 表示，周围的障碍物用 B 表示，吸引点用 i 表示。模型的所有量都通过一个

$\vec{}$符号作为下标与特定对象相对应。社会力 f 及其势能 U 通常取决于施力者（β、B 或 i）与行人 α 之间的距离。其他量，例如迎面而来的行人的速度 $\vec{v}_\beta$，也可能决定相互作用。由于定义中已明确这些依赖关系，因此不再额外标注力函数和势函数。

在行人动力学的社会力模型中，质量被设定为 $m = 1$。因此，社会力的量纲为加速度 $\left[\frac{m}{s^2}\right]$。

4.1.1 行人的运动

¨行人的行为 ¨表现为速度的变化，也就是在空间中的运动。行人的速度 $\vec{v}_\alpha$ 由所有作用于行人的社会力相互作用决定，并且

$$\frac{d\vec{v}_\alpha}{dt} = \underbrace{\vec{f}^{\,0}_\alpha}_{\text{Ziel}} + \underbrace{\sum_\beta \vec{f}_{\alpha\beta}}_{\text{Fußgänger}} + \underbrace{\sum_B \vec{f}_{\alpha B}}_{\text{Hindernisse}} + \underbrace{\sum_i \vec{f}_{\alpha i}}_{\text{Attraktionen}} + \underbrace{\sum_{\alpha'} \vec{f}_{\alpha\alpha'}}_{\text{Gruppen}} + \underbrace{\vec{\mathcal{F}}_\alpha}_{\text{Fluktuation}} \tag{4.1}$$

发生变化。运动方程中的各项将在以下各节中介绍。

与物理系统不同，行人是主动参与者，能够自主产生运动。

社会力有时会导致行人的速度超过其最大可能速度。在这种情况下，他想跑得比实际能力更快。因此，行人的运动受

$$\frac{d\vec{r}_\alpha}{dt} = \theta\, \vec{v}_\alpha \tag{4.2}$$

通过限制函数

$$\theta = \begin{cases} 1 & : \quad \|\vec{v}_\alpha\| \le v_\alpha^{max} \\ \frac{v_\alpha^{max}}{\|\vec{v}_\alpha\|} & : \quad \|\vec{v}_\alpha\| > v_\alpha^{max} \end{cases} \tag{4.3}$$

确定。

除了模型定义的式（4.1）中的社会力之外，个体的行为还会受到一个随机项的影响。它会在每个时间点使运动方程发生一个随机选取值的变化。引入随机量可能出于以下三个目的Gil:

1. 随机项代表了所有因贡献较小而未在模型中明确定义的影响量。

2. 通过加入微小的随机扰动，可以避免模型或仿真中产生的伪影。此外，这也能防止系统停留在（无差异的）平衡状态。

3. 加入噪声可以检验模型的鲁棒性。在出现自组织效应时，这一点尤为重要，以确保这些效应完全由模型相互作用引起。

行人运动模型由众多行动者组成，他们随机分布，并以不同的初始条件进入系统。因此，系统始终受到外部影响，这些影响也可视为噪声。为避免不稳定的平衡状态，行人模型中引入了一个涨落项

$$\vec{\mathcal{F}}_\alpha = \left\langle \vec{e}_\alpha^{\,0}, \vec{f}_\alpha \right\rangle \mathcal{N}(0,\mu)\, \vec{e}_\alpha^{\,\perp} \tag{4.4}$$

通过随机变量 $\mathcal{N}(0,\mu)$ 引入。其分布函数

$$P(\mathcal{N}(0,\mu)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\mu}} e^{-x^2/2\mu} \tag{4.5}$$

具有正态分布的形式。单位向量 $\vec{e}_\alpha^{\,\perp}$ 与目标方向的单位向量 $\vec{e}_\alpha^{\,0}$ 垂直，因此满足 $\left\langle \vec{e}_\alpha^{\,0}, \vec{e}_\alpha^{\,\perp} \right\rangle = 0$。此外，涨落项 ¨ 表示偏离常规情况的随机变化。当整个社会力 f_α 指向与行人的目标方向相反的方向时，它的影响尤为显著。

4.1.2 驱动力

行人沿直线行走，以其个人速度 ¨ 沿路径近乎恒定地前往下一个目的地 ¨。在此过程中

偏转或减速后，他会尝试再次加速至期望速度，并朝目的地前进。

这种选择期望行进路线的行为，可以用驱动力来表示，

$$\vec{f}_\alpha^{\,0} = \frac{1}{\tau_\alpha}\left(v_\alpha^0\, \vec{e}_\alpha^{\,0} - \vec{v}_\alpha\right) = \underbrace{\frac{v_\alpha^0}{\tau_\alpha}\, \vec{e}_\alpha^{\,0}}_{\mathrm{I}} + \underbrace{\frac{-1}{\tau_\alpha}\, \vec{v}_\alpha}_{\mathrm{II}} \tag{4.6}$$

其中包括期望速度 $v_\alpha^0\,\vec{e}_\alpha^0$、当前速度 $\vec{v}_\alpha$ 和弛豫时间 τ_α。方向单位向量

$$\vec{e}_\alpha^0(t) = \frac{\vec{p} - \vec{r}_\alpha}{\|\vec{p} - \vec{r}_\alpha\|} \tag{4.7}$$

由行人的当前位置¨以及最近的目标点 $\vec{r}_\alpha$ 确定。不过，也可以将力项的两部分分别解释为恒定加速力（I）和摩擦力（II）。

如果要描述的不是目标点，而是较大的目标区域，例如走廊尽头或一个通道（参见7.1），则可以用两个点 $\vec{p}$ 和 $\vec{q}$来界定，行人必须从这两点之间通过。行走方向

$$\vec{e}_\alpha^0 = \frac{\vec{s}}{\|\vec{s}\|} \tag{4.8}$$

由到两点之间线段的最短距离¨ $\vec{s}$ 确定

$$\vec{s} = \begin{cases} \vec{p} - \vec{r}_\alpha & : \ \langle \vec{r}_\alpha - \vec{p}, \vec{e}_{qp} \rangle \leq 0 \\ \vec{p} - \vec{r}_\alpha - \langle \vec{e}_{qp}, \vec{p} - \vec{r}_\alpha \rangle \ \vec{e}_{qp} & : \ 0 < \langle \vec{r}_\alpha - \vec{p}, \vec{e}_{qp} \rangle < \|\vec{q} - \vec{p}\| \\ \vec{q} - \vec{r}_\alpha & : \ \|\vec{q} - \vec{p}\| \leq \langle \vec{r}_\alpha - \vec{p}, \vec{e}_{qp} \rangle \end{cases} \tag{4.9}$$

其中 $\vec{e}_{qp} = (\vec{q} - \vec{p}) \ / \ (\|\vec{q} - \vec{p}\|)$（参见图4.1）。对于要从一端走到另一端、穿过笔直走廊的行人而言，整个路段上的行走方向 $\vec{e}_\alpha^0$ ¨保持不变。

4.1.3 行人之间的相互作用

在行人群体中最常观察到的相互作用，是行人之间保持距离。每位行人都会为他人留出一定的个人空间。留出的领地大小取决于具体状况，其中行人密度尤为重要。如果侵犯了他人的领地，行人就会沿着直接路径远离。

为描述这种行为，假定两名行人之间沿连线方向存在排斥相互作用。排斥力的强度取决于距离；距离最小时，排斥力最大，随后随着距离增加而单调趋近于零。此外，即使在可能的最小距离下，影响强度也不得超过最大限值。

例如，具有如下形式的指数函数方法满足这些条件

$$U_{\alpha\beta} = p_\alpha \ \exp\left(-\frac{\|\vec{r}_\alpha - \vec{r}_\beta\|}{\sigma_\alpha} \right) \tag{4.10}$$

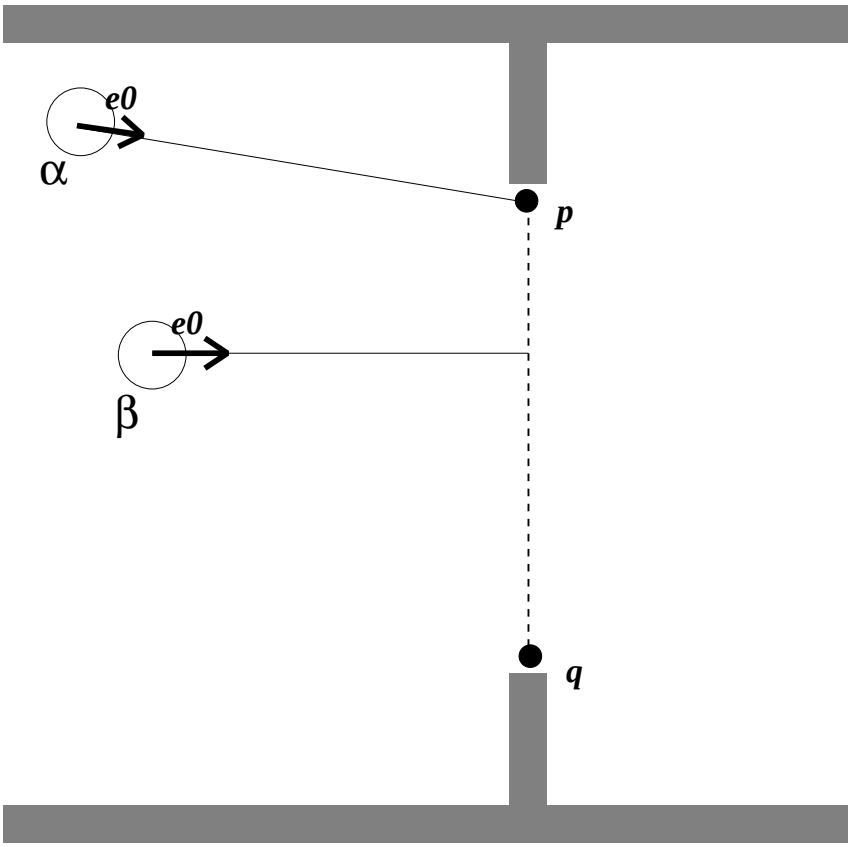


图4.1： 通往通道的方向确定。方向单位向量 $\vec{e}_\alpha^0$、$\vec{e}_\beta^0$ 根据到 $\vec{p}$ 与 $\vec{q}$ 之间连线的最短距离，按照（4.9）确定。方向向量 $\vec{e}_\alpha^0$ 垂直于该连线。β 到通道顶点 $\vec{p}$ 的距离最短。

以及由此产生的社会力

$$\vec{f}_{\alpha\beta} = -\nabla U_{\alpha\beta} = \frac{p_\alpha}{\sigma_\alpha} \exp\left(-\frac{\|\vec{r}_\alpha - \vec{r}_\beta\|}{\sigma_\alpha}\right)(\vec{r}_\alpha - \vec{r}_\beta)\,. \tag{4.11}$$

参数 p_α 和 σ_α 决定成对相互作用的最大强度和作用范围。它们表示行人¨愿意让出位置给另一个人的意愿。

扩展1

¨当行人密度较低时，行人能够大致了解其他行人的行为，并估计他们的运动。在避让动作中，会将对方的行走方向纳入考虑，并相应地留出更多空间。因此，排斥势会扩展至接下来几步行人的空间需求：

行人的步伐:

$$U'_{\alpha\beta} = p_\alpha \, e^{-r'/\sigma_\alpha} \tag{4.12}$$

mit

$$r' = \frac{1}{2}\sqrt{\left(\|\vec{r}_\alpha - \vec{r}_\beta\| + \|\vec{r}_\alpha - \vec{r}_\beta - \Delta t v^0_\beta \, \vec{e}^{\,0}_\beta\|\right)^2 - \left(\|\Delta t \, v^0_\beta \, \vec{e}^{\,0}_\beta\|\right)^2} \tag{4.13}$$

方程 (4.13) 在此定义了一个椭圆，其两个焦点分别位于 $\vec{r}_\beta$和 $\vec{r}_\beta + \Delta t \, v^0_\beta \, \vec{e}^{\,0}_\beta$。第二个焦点对应于行人在时间 Δt后将到达的地点（参见图 4.3 中间）。

由于行人会根据周围行人来源的方向感知其影响，因此对这些影响的反应程度各不相同。例如，行人不太会注意在自己身后行走的人，而会更多注意走在自己前面、必要时需要避让的人。

在建模中，可以通过将感知范围限制在一个视角 ϕ 内来考虑这种行为。该视角朝向行人的目的地。来源位于此范围之外的所有影响，都会通过一个前置因子

$$w = \begin{cases} 1 & : \quad \left\langle -\vec{f}_\alpha, \vec{e}^{\,0}_\alpha \right\rangle \geq \cos\phi/2 \\ \omega < 1 & : \quad \left\langle -\vec{f}_\alpha, \vec{e}^{\,0}_\alpha \right\rangle < \cos\phi/2 \end{cases} \tag{4.14}$$

减弱了。这样还可以防止后方行人的拥挤。仿真中， $\phi = 200°$ 和 $\omega = 0.2 \ldots 0.5$的取值表现良好。

扩展 2

通过所介绍的势函数形式，行人会非常突然地彼此避让。这是由椭圆势的形式造成的。发生正面碰撞时，双方行人受到的力都与各自的运动方向相反，但不会受到垂直方向的偏转力，因此无法实现避让。

这个问题通过一种新的方法得到了解决：同样假设行人对发生在自己前方的事件，比对发生在自己后方的事件反应更强烈。

周围行人的相互作用势会沿目标方向的反方向 $\vec{e}^{\,0}_\alpha$ 延伸¨。通过引入新的坐标系 $\{\vec{x}, \vec{y}\}$¨，

数学描述可以通过引入沿 $\vec{e}_\alpha^0$方向对齐的坐标系¨而得到简化。目标方向向量 $\vec{e}_\alpha^0$ 构成新坐标系基底的第一部分。通过施密特正交化方法 [Fis86] ，可以将基底扩展为

$$\begin{aligned} \vec{y} &= \vec{e}_\alpha^0 \\ \vec{x} &\perp \vec{y} \qquad \text{mit} \quad \langle \vec{x}, \vec{x} \rangle = 1 \end{aligned} \tag{4.15}$$

补¨充。

行人¨的排斥作用 β 由势

$$U''_{\alpha\beta} = p\, e^{-r''/\sigma_\alpha} \tag{4.16}$$

和社会力

$$\vec{f}''_{\alpha\beta} = -\frac{1}{\sigma r''}\, e^{-r''/\sigma_\alpha}\, (\vec{r}_\alpha - \vec{r}_\beta) \tag{4.17}$$

mit

$$r'' = \sqrt{\langle (\vec{r}_\alpha - \vec{r}_\beta), \vec{x} \rangle^2 + \gamma^2 \, \langle (\vec{r}_\alpha - \vec{r}_\beta), \vec{y} \rangle^2} \tag{4.18}$$

und

$$\gamma = \begin{cases} 1 & : \quad \langle \vec{r}_\alpha - \vec{r}_\beta, \vec{y} \rangle \geq 0 \\ \frac{1}{1+\lambda \vec{v}_\alpha} & : \quad \langle \vec{r}_\alpha - \vec{r}_\beta, \vec{y} \rangle < 0 \end{cases} \tag{4.19}$$

表示。

与 (4.10) 和 (4.12) 中的势函数相比，采用这种方法时，行人会更早地避开前方行走的行人。类似地，可以通过压缩$\vec{y}$-轴的正半轴，并使用 $\gamma' > 1$ f¨ 对 $\langle \vec{r}_\alpha - \vec{r}_\beta, \vec{y} \rangle > 0$ 进行削弱，来描述来自后方事件的影响。这种描述取代了 (4.14) 中的视角前因子 w 。

为了考虑其他行人的运动——这在第一个扩展方法 (4.12) 中已经实现——坐标系将根据相对目标方向 $\{\vec{x}, \vec{y}\}$

$$\vec{y} = \frac{\vec{e}_\alpha^0 - \delta_\alpha \frac{v_\beta^0}{v_\alpha^0}\, \vec{e}_\beta^0}{\| \vec{e}_\alpha^0 - \delta_\alpha \frac{v_\beta^0}{v_\alpha^0}\, \vec{e}_\beta^0 \|} \tag{4.20}$$

行人¨沿 α β 对齐。参数 δ_α 表示对另一名行人¨的行走方向考虑程度有多大（参见图 4.2）。

公式（4.10）、（4.12）和（4.16）中的势函数在图 4.3 中以等势线的形式展示，以便比较。

利用截至目前介绍的两条行为规则——到达目的地的驱动力，以及维护他人领地的规则——已经可以描述真实的人流。社会力量在改变

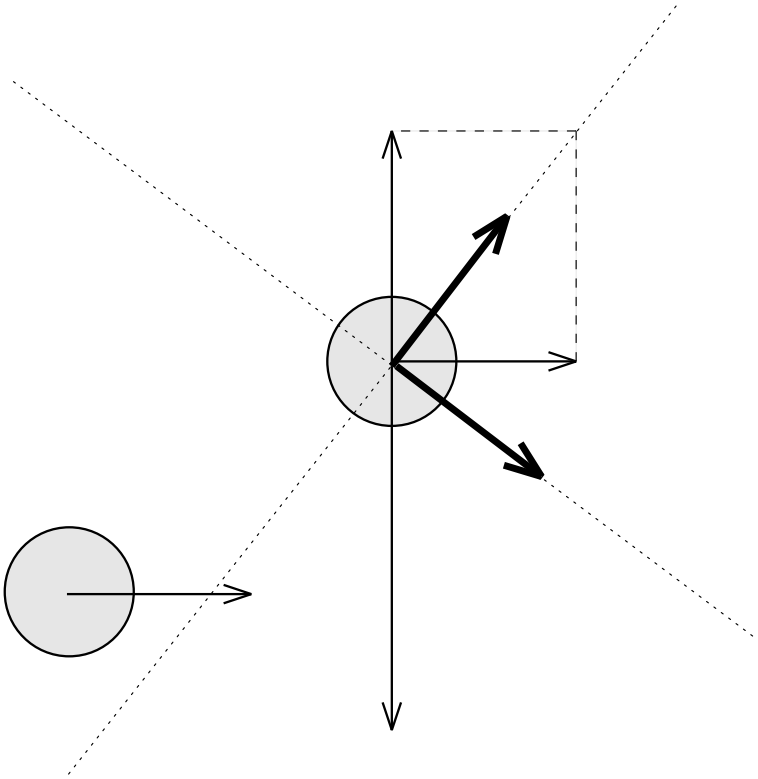


图 4.2： 第二种扩展势函数 $U''_{\alpha\beta}$ （见式 (4.16)）的坐标系由行人¨的瞬时速度 β 和 α的目标方向定义。图中的向量为 $e0 = \vec{e}^{\,0}_{\alpha}$、 $v = \vec{v}_{\beta}$和 $d = \delta_{\alpha}$ （v^0_{β}/v^0_{α}）。新坐标系的基底向量为式 (4.20) 中的 $y = \vec{y}$和式 (4.15) 中的 $x = \vec{x}$。

行人运动时的相互作用

$$\frac{d\vec{v}_{\alpha}}{dt} = \vec{f}^{\,0}_{\alpha} + \sum_{\beta \neq \alpha} \vec{f}_{\alpha\beta} \tag{4.21}$$

这样可确保行人¨相互避让。图 4.4 和图 4.5 展示了两股行人流以相反方向交错穿行的仿真。可以清楚地看出，与式 (4.12) 中的椭圆势函数相比，式 (4.16) 中的势函数方法能产生更平缓的避让动作。

4.1.4 与障碍物的距离行为

除了行人之间的相互影响外，行人设施的建筑结构也会对其行为产生强烈影响。墙和障碍物（例如柱子或座椅布置）形成的边界会阻挡行人的路径，迫使他们绕行。

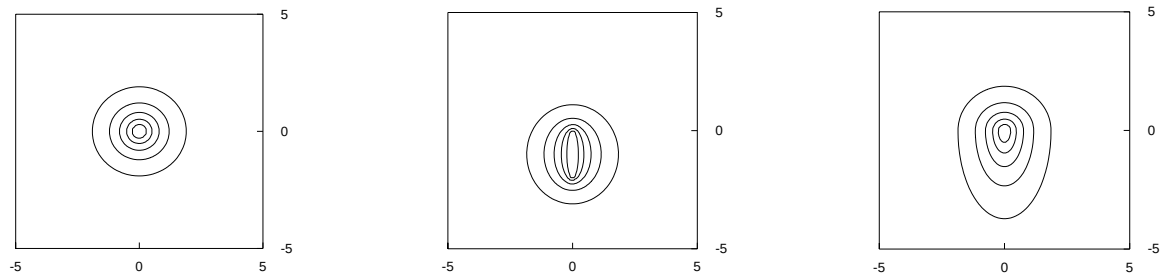


图4.3： 行人相互排斥作用的不同势类型。等势线描述了从行人的视角观察到的其领地形状；该行人的目标方向朝上。从左至右：式（4.10）中的势、式（4.12）中的第一次扩展，以及式（4.16）中的第二次扩展。

与周围的行人类似，行人也会与障碍物保持一定距离，该距离考虑了行走过程中产生的波动。距离在很大程度上取决于障碍物和边界的性质。相比之下，墙的长度影响较小（参见第 2.1 节）。

描述障碍物的方法与描述行人之间保持距离的方法相似。障碍物的排斥作用由势

$$U_{\alpha B} = b_{\alpha B}\, e^{-\|\vec{r}_{\alpha B}\|/\vartheta_{\alpha B}} \tag{4.22}$$

描述。在此，影响强度也会随着距离的增加而呈指数衰减。参数 $b_{\alpha B}$ 和 $\vartheta_{\alpha B}$ 一方面归属于行人 α，另一方面也描述障碍物的属性 B。行人与障碍物之间的距离取为直线距离。

对于由点 $\vec{p}$ 和 $\vec{q}$ 之间的线段定义的墙，直接距离向量为

$$\vec{r}_{\alpha B} = \begin{cases} \vec{p} - \vec{r}_\alpha & : \ \langle \vec{r}_\alpha - \vec{p}, \vec{e}_{qp} \rangle \le 0 \\ \vec{p} - \vec{r}_\alpha - \langle \vec{e}_{qp}, \vec{p} - \vec{r}_\alpha \rangle \, \vec{e}_{qp} & : \ 0 < \langle \vec{r}_\alpha - \vec{p}, \vec{e}_{qp} \rangle < \|\vec{q} - \vec{p}\| \\ \vec{q} - \vec{r}_\alpha & : \ \|\vec{q} - \vec{p}\| \le \langle \vec{r}_\alpha - \vec{p}, \vec{e}_{qp} \rangle \end{cases} \tag{4.23}$$

（参见图4.1）。与直径为 d、中心位于 $\vec{m}$ 的圆形障碍物之间的直接距离为

$$\vec{r}_{\alpha B} = \frac{\|\vec{r}_\alpha - \vec{m}\| + \frac{1}{2}d}{\|\vec{r}_\alpha - \vec{m}\|^2} \, (\vec{r}_\alpha - \vec{m}) \tag{4.24}$$

定义。

多个边界

行人环境通常由多面墙构成，此外还包含一些障碍物。当障碍物与边界彼此靠近时，就会产生这样一个问题：应如何构成社会力，以表示建筑环境产生的整体排斥影响。对此可以采用不同的方法：

1. 所有影响的叠加。这意味着将环境要素的所有贡献相加。2. 最短距离。行人只考虑距离自己最近的障碍物。3. 最大作用。行人会对对其产生最大影响的障碍物作出反应，其他所有影响都会被屏蔽。

以墙为例可以清楚地说明这个问题：一面直墙可以描述为两个点之间的线段。根据（4.23），此时势函数和距离向量均有明确的定义。任意弯曲的墙都可以用一条折线来近似。在这种情况下有两种可能：在叠加的情形下，多边形的每一段都作为单独的墙段对势作出贡献；或者只有其中一段对行人产生作用。由于直墙可以看作多边形的特殊情况，因此相互作用的描述并不唯一。

下面将展示在设计模型时如何选择一种能够最佳描述待模拟状况的方法。

方法 1 和方法 2 的示例势函数如图 4.6 所示，以供比较。两段墙彼此垂直。当行人只受到距其最近的墙的影响时，角落处的排斥力与墙前其他位置处的排斥力相同。行人可以充分利用这片区域。按照行人只考虑作用最大的障碍物的方法，在本例中也会得到相同的结果。

在第二种情况下，行人受到两段墙的势贡献同等程度的影响。因此，角落处的排斥力更强。行人会避开这里。当行人沿着带有转角的走廊行走时，就会观察到这种情况。由于他们希望避免突然改变方向，因此会提前避让。

势函数的设计

势的设计很大程度上取决于障碍物的功能和类型。通常，可以通过合理的假设和经验来预测行人对障碍物的反应，并找到与之相匹配的社会力描述。

一条宽 10 米的走廊，两侧长边由两面墙¨隔开。设墙¨沿 $\vec{e}_x$方向延伸。为了描述这两面平行的墙¨，可以采用如下形式的势函数

$$U_x = e^{-|\langle \vec{e}_y, \vec{r}_\alpha \rangle|} + e^{-|10 - \langle \vec{e}_y, \vec{r}_\alpha \rangle|} \tag{4.25}$$

方向向量 $\vec{e}_y$ 垂直于墙¨，即可选择该势函数。为简便起见，本例中不考虑参数。

一面垂直伸入走廊、长 3 米的隔墙，可以通过一个势函数项来描述

$$U_y = \begin{cases} e^{-|\langle \vec{e}_x, \vec{r}_\alpha \rangle - 10|} & : \quad \langle \vec{e}_y, \vec{r}_\alpha \rangle \leq 3 \\ e^{-\|\vec{r}_\alpha - 3\vec{e}_y - 10\vec{e}_x\|} & : \quad \langle \vec{e}_y, \vec{r}_\alpha \rangle > 3 \end{cases} \tag{4.26}$$

¨。图4.7展示了总相互作用的等势线$U_{\alpha B} = U_x + U_y$。隔墙的排斥相互作用越强，行人避让的幅度就越大。¨不过，对于走廊中间的行人而言，没有理由与隔墙的开放端保持如此大的距离。因此，可以通过以下方式定义尖端处的势

$$U_y' = \begin{cases} e^{-|\langle \vec{e}_x, \vec{r}_\alpha \rangle - 10|} & : \quad \langle \vec{e}_y, \vec{r}_\alpha \rangle \leq 3 \\ e^{-\sqrt{(\langle \vec{e}_y, \vec{r}_\alpha \rangle - 3)^2 / \mu^2 + (\langle \vec{e}_x, \vec{r}_\alpha \rangle - 10)^2}} & : \quad \langle \vec{e}_y, \vec{r}_\alpha \rangle > 3 \end{cases} \tag{4.27}$$

通过 $\mu > 1$ 压平（见图 4.8），行人因此从边缘被引导至走廊中间，并能紧贴障碍物通过。

障碍物作为屏蔽

社会力¨源于对事件的感知，而感知通常由目光接触¨实现。如果障碍物（例如隔墙）挡住了某位行人¨观察其他行人的视线，那么这些行人也不会对他产生影¨响。由于行人势能与墙势能相互重叠，在某些情¨况下，被遮挡行人可能会对另一侧产生微弱影响。为避免这种情况，必须对每种相互作用进行检¨查，判断其是否被某个障碍物遮挡。为此，根据两名行人之间的连线以及

墙两端之间的连线，作出两条直线。如果这两条直线相交，且交点位于墙的两端之间，则不会发生相互作用。

4.1.5 吸引物

橱窗陈列、海报、街头艺人以及其他许多事物，都会促使路过的行人靠近，有时还会让他们停留片刻。¨与其他势类型类似，对于较大的距离，吸引力的强度会趋近于零。随着靠近，吸引物的影响逐渐增强，直到在某个距离处再次减弱。相互作用逐渐消失的距离范围，为行人围绕吸引物形成了一个停留区域。

根据停留区域的位置，可以区分不同类型的吸引物。人们会靠近街头艺人，直到某个距离，以便能够清楚地观察一切。通常，表演者会自行确保观众不会靠得太近。对于大型对象，也可以观察到类似的行为：站得过近时，反而无法看得那么清楚。一种势函数

$$U_{\alpha i} = \underbrace{-e^{-\|\vec{r}_i - \vec{r}_\alpha\|/\chi_{\alpha i}}}_{\text{I}} + \underbrace{e^{-\|\vec{r}_i - \vec{r}_\alpha\|/\varphi_{\alpha i}}}_{\text{II}} \tag{4.28}$$

描述这种行为的函数由两部分组成：一个作用范围较远的吸引项 (I)，以及一个作用范围短得多的排斥项 (II)。

另一类吸引物，例如橱窗，以一个特定位置为特征，行人会停留在那里。由于该位置对应的势应呈现一个平坦的凹陷，因此它通过

$$U'_{\alpha i} = -e^{-\|\vec{r}_i - \vec{r}_\alpha\|^2/(2\chi_{\alpha i})} \tag{4.29}$$

以不同于第一类的方式进行描述。

吸引物并不局限于吸引点。吸引物也可以具有其他空间形状。例如，百货商店的橱窗正面可以用一条由两个点界定的线段来描述。

行人对表演或陈列品的兴趣 $a_{\alpha i}$ 通常会随着¨时间逐渐减弱。兴趣随时间的变化由

$$\frac{da_{\alpha i}}{dt} = -\frac{a^0_{\alpha i}}{T^i}\, e^{-\|\vec{r}_i^{\,min} - \vec{r}_\alpha\|/\chi_{\alpha i}} \tag{4.30}$$

用 $a_{\alpha i}(t_0) = a^0_{\alpha i}$ 描述。对某项吸引力的初始兴趣 $a^0_{\alpha i}$ 因人而异。对某些行人来说，某项吸引力可能完全不具吸引力。若行人停留在某项吸引力的停留区域内，其兴趣会随着时间近似线性地减弱。此后，若行人再次来到某项吸引力附近，只要对该吸引力的兴趣已降至零，该吸引力便不会对他产生影响。

4.1.6 群体中的相互作用

行人¨经常以小组形式出现。尤其是在购物区和休闲公园，行人¨流中两人组和三人组占很大比例。各组的人数大致符合泊松分布[CHJ61]。由四人、¨五人或更多人组成的组则少得多。

组内成员通常会尝试并肩行走。如果需要，例如在躲避障碍物 ¨时，组员可能会短暂分开。一旦越过障碍物，他们便会再次靠拢。

在该模型中，对群体行为的描述仅限于各个伙伴并肩行走的倾向¨。这可以通过一种不随时间¨和距离变化的恒定吸引力来实现。吸引群体相互作用与促使行人到达目标点的力相似。

用于维系组的势

$$U_{\alpha\alpha'} = g_\alpha \|\vec{r}_\alpha - \vec{r}_{\alpha'}\| \tag{4.31}$$

与伙伴 $\vec{r}_\alpha - \vec{r}_{\alpha'}$ 和 α'之间的距离 α 成正比。社会力的大小

$$f_{\alpha\alpha'} = -\nabla U_{\alpha\alpha'} = -g_\alpha \frac{\vec{r}_\alpha - \vec{r}_{\alpha'}}{\|\vec{r}_\alpha - \vec{r}_{\alpha'}\|} \tag{4.32}$$

在整个空间中保持恒定。由于势在距离非常小时也不会完全消失，因此它会稍微减弱另一名行人的排斥力。这样，组内成员彼此之间的距离会比他们与其他行人之间的距离更小。

4.2 力项的研究，势参数的确定

社会力模型使用众多参数，以适应真实的行人流。一些参数可以通过高度简化的假设从实证数据中确定，

而另一些则只能通过模型仿真，并将结果与观测到的流动进行比较来确定。

期望速度与驱动力

通过经验观察（第 2.1 节），发现当行人密度较低时（LOS A，每平方米少于 0.1 人），行人速度服从正态分布，其形式为

$$P(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}\, e^{-\frac{\left(v-\langle v\rangle^{\mathbf{2}}\right)}{2\sigma}}. \tag{4.33}$$

均值为 $\langle v\rangle$ =1.34 米/秒，标准差为 σ =0.26 米/秒。这些数值可作为期望速度 v_α^0 ¨采用。

根据驱动力的定义（4.6），可得出指数加速规律。一个在时刻 t_0 停止的行人，经过时间 t 后达到速度

$$v(t_0 + t) = v_\alpha^0 \left(1 - e^{-t/\tau_\alpha}\right) \tag{4.34}$$

参数 τ_α 表示达到期望速度 63% 所需的时间。文献中没有找到关于行人加速时间的数据。仿真在 $\tau_\alpha = 0.2 \ldots 0.5$ 情况下会产生现实的结果。

大小 τ_α 会与其他相互作用共同产生影响。在仿真中，取值为 $\tau < 0.5$ 时，行人表现出攻击性行为，不太愿意避让其他行人。取值为 $\tau > 1.0$ 时，他们则会大幅偏离原来的行进路线。对于不同的期望速度但相同的弛豫时间，速度较快的行人避让的次数明显少于速度较慢的行人。由于这与经验相悖，而文献中又没有关于个别行人行为进攻性差异的资料，因此模型中不采用 τ_α ，而是使用商 v_α^0/τ_α 来描述行人的特征 ¨。

避让行为

距离势的参数应选择得当，以避免行人之间发生碰撞。

假设两名迎面而来的行人¨由于受到侧向限制而无法相互避让，那么在最小距离处

r^{min} 行人的驱动力与排斥性相互作用达到平衡

$$\begin{aligned} & \vec{f}_\alpha^{\,0} &=& \vec{f}_{\alpha\beta} \\ \Leftrightarrow \qquad & \frac{v_\alpha^0}{\tau_\alpha} &=& \frac{p_\alpha}{\sigma_\alpha}\, e^{-\frac{r^{min}}{\sigma_\alpha}} \end{aligned} \tag{4.35}$$

其中。对于 $r^{min} = \sigma_\alpha$ ，参数取决于¨

$$\frac{p_\alpha}{\sigma_\alpha} = \frac{v_\alpha^0\, e}{\tau_\alpha} \approx 2.71628\, \frac{v_\alpha^0}{\tau_\alpha} \quad \text{und} \quad p_\alpha \approx 7\sigma_\alpha \tag{4.36}$$

以及 $v_\alpha^0 = 1.34$ 和 $\tau_\alpha = 0.5$。在仿真中，参数 $p_\alpha = 2.1$ 和$\sigma_\alpha = 0.3$ 经验证是合适的。

这样也可以估算边界、障碍物和吸引点的距离势参数¨。

群体凝聚力

组内的两个个体会受到相互竞争的相互作用：一方面是与行人保持距离，另一方面是维持组内凝聚力。在平衡距离 r 处，式（4.10）和（4.31）中的势能相互抵消：

$$p_\alpha\, e^{-r/\sigma_\alpha} = g_\alpha\, r \tag{4.37}$$

采用上述数值，并设组员之间的平衡距离为 0.8 米，可得群体吸引力参数为 $g_\alpha = 0.18$。

4.3 行人流中的自组织现象

以下介绍第4.1节中的社会力模型对行人动力学的仿真。重点在于集体行为的涌现。尽管仿真中的行人会自主行动，模型中也不包含模仿行为或合作行为，但行人个体动力学的自组织会使人流中形成空间和时间结构。

4.3.1 路径形成

在一条走廊中，行人群从走廊两端分别向另一端行进。行走方向相同的行人会在人流中形成行人流道（图4.10）。尽管这些行人流道并非固定的行走路径，且总会受到迎面而来或超越的行人的干扰，但它们仍然是稳定的结构。

有时，行人流道会拓宽到几乎所有行人都按各自行走方向在同一侧行走。此时，原本的避让方向模型对称性仅因行人之间的相互作用而被打破，偏向其中一侧（图4.11）。

仿真表明，向左或向右避让的倾向强弱不一，并非形成行人流道的必要条件。尽管如此，偶尔还是可以观察到偏向右侧的倾向。不过，这与道路交通规则无关。例如，Older 也观察到伦敦的行人倾向于靠右行走，尽管当地车辆靠左行驶 [Old68]。

4.3.2 行人交叉口

在行人交叉口上，自组织模式不那么明显。有时可以观察到水平和垂直行人流之间的振荡（图4.13）。第二种结构是形成环形交通式的涡旋。这种短暂的结构可以通过在十字路口中心设置障碍物来稳定（参见第4.5节）。

4.3.3 通行方向振荡

简单通道

¨如果走廊被一堵墙隔开，墙上有一个狭窄的通道，其开口刚好宽到能让一名行人通过（图4.14），那么每个时间段内，只有一股来自一侧的行人流波能够越过屏障。对向人群的压力会使这股人流中断。因此，行人会在开口处交替改变行进方向。这种随时间变化的模式由后续行人和波动维持。否则，走廊两侧会达到平衡，行人流便会停滞。

在这种状况下 ¨，行人会改变自己的行为。他们会变得更具攻击性，推挤得更厉害；也可能彼此协商，或另寻路径。

双通道

为了考察具有两个通道的情景，我们在行人模型的基础上扩展了一个决策模型，该模型将在第6.1节中介绍。这里提前给出一项结果，因为即使采用非常简单的决策行为，也能够产生集体结构。行人选择距离自己最近的通道。通道前方的交通密度在决策过程中不予考虑。

假设行人非常有耐心，并且彼此保持相对较大的距离，就可能出现这样一种状况：每个组各占据一个通道（图4.15）。另一种模式表现为运动方向的振荡，类似于单通道的状况。此时，一个亚群体会同时占据两个通道。

相同的效应也可以通过盐溶液—水振荡器产生；这一装置曾在 [YOSN91] 中进行实验和理论研究。在一个装满水的容器中放入一个装有盐溶液的塑料杯。若在杯底开一个小孔，盐溶液便可从杯中流入水容器，反过来，水也能进入杯中。当溶液浓度、注入量和孔的直径取适当值时，流动方向便会发生振荡。

¨若在杯上开两个孔，可能出现两种不同的效应¨：当两个孔靠得很近时，两股流的方向相同，并像单孔实验那样发生振荡。¨而当两个孔相距较远时，则会观察到循环流动。盐溶液从一个孔流出，水则从另一个孔流入。此时，流动方向不会发生振荡。

4.4 行人流的评价标准 n

前几节描述了行人流的各种现象。

除了观察模拟的行人交通以及研究上一节所述的现象外，人们也关注仿真的定量

结果，这些结果可用于评价建筑物的特性。由此可在规划阶段发现并消除行人交通中可能出现关键状况的薄弱环节。与第2.2节中为服务水平分析引入的判据 K1 至 K8 类似，下面将定义效率、被迫速度变化、舒适度、群体保持在一起的程度以及不同亚群体的分隔程度等评价指标。

这些测度是通过穿过步行设施的行人，针对步行设施的某一路段确定的。瞬时测量值在每个时间步计算，并在一名行人穿过该设施所需的时间段内进行积分。索引表示行人的个体量。

评价指标反映了在特定交通负荷和行人群体组成下，步行设施某一（部分）路段的特性。因此，在仿真过程中，必须保持行人流入条件恒定。

4.4.1 效率

步行设施的效率说明行人相对于其期望速度多快通过该设施（或其中的某一路段）。为此，将行人瞬时速度沿目标方向的组件与其期望速度进行比较，并在该时间段内取平均值。

$$Y_\alpha^1 = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} dt\,\frac{\langle \vec{e}_\alpha^{\,0}, \vec{v}_\alpha\rangle}{v_\alpha^0} = \underbrace{\frac{1}{v_\alpha^0 T}}_{\mathrm{I}}\underbrace{\int_{t_0}^{t_0+T} dt\,\left\langle \vec{e}_\alpha^{\,0}, \vec{v}_\alpha\right\rangle}_{\mathrm{II}} \tag{4.38}$$

在一条走廊中，目标方向 $\vec{e}_\alpha^{\,0}$ 随时间保持不变。此时，式（4.38）中的第二项对应走廊的长度

$$\int_{t_0}^{t_0+T} dt\,\left\langle \vec{e}_\alpha^{\,0}, \vec{v}_\alpha\right\rangle = l_{\mathrm{Korridor}} \tag{4.39}$$

而效率表示路径长度与行人在时间 T 内在无障碍物的空旷区域本会走过的线段长度之间的比值。

由此可以得出路径段的有效长度，表示为

$$l_\alpha^0 = \frac{l_{\text{Korridor}}}{Y_\alpha^1} = v_\alpha^0\, T \tag{4.40}$$

定义。

行人在人群拥挤时有时会比自己的期望速度走得更快。这会使效率大于 1。如果根据（4.2）对步行速度设置了上限，则将 $\vec{v}_\alpha$ 替换为 $\theta\vec{v}_\alpha$ ：

$$Y_\alpha^1 = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} dt\, \frac{\langle \vec{e}_\alpha^{\,0}, \theta\vec{v}_\alpha\rangle}{v_\alpha^0} \tag{4.41}$$

此时，对于 $v_\alpha^{max} = v_\alpha^0$ ，始终有 $Y_\alpha^1 \leq 1$。

4.4.2 速度变化、速度方差

参照第2.2节的K2标准——被迫变速的频率，可以将仿真中沿目标方向的速度方差定义为评价指标:

$$\begin{aligned} Y_\alpha^2 &= \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} dt \left(\frac{\langle \vec{e}_\alpha^{\,0}, \vec{v}_\alpha\rangle}{v_\alpha^0}\right)^{\mathbf{2}} - \left(\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} dt\, \frac{\langle \vec{e}_\alpha^{\,0}, \vec{v}_\alpha\rangle}{v_\alpha^0}\right)^{\mathbf{2}} \\ &= \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} dt \left(\frac{\langle \vec{e}_\alpha^{\,0}, \vec{v}_\alpha\rangle}{v_\alpha^0}\right)^{\mathbf{2}} - \left(Y_\alpha^1\right)^{\mathbf{2}} \end{aligned} \tag{4.42}$$

考察沿目标方向的速度， $\vec{v}_\alpha\rangle$ 意味着方差同时包含行人减速和避让动作的影响。因此，通过Y_α^2 也将K4标准——被迫改变方向的频率——纳入评价。

4.4.3 舒适度、影响方差

行¨人的反应强度能够反映其所处的状况。受到的影响越多，他就越感到不适，也就越需要集中注意力观察周围环境。能够量化这一现象的数值也具有实际重要性：如果行¨人必须

高度关注周围的行人，就会较少留意其他影响，例如百货商店里的商品供应。

一种合适的量可由某一时间点t 作用于行人 α 的社会力¨的大小来表示，形式为

$$\frac{1}{N_{\mathbf{F}}}\sum_{l\in\mathbf{F}}\|\vec{f}_\alpha^{\,l}\|^{\mathbf{2}} \qquad \text{mit der Anzahl der Kraftterme } N_f \tag{4.43}$$

由此给出。该表达式与实际施加的社会力$\vec{f}_\alpha^{\,tot} = \sum_{l\in\mathbf{F}} \vec{f}_\alpha^{\,l}$之差，即为总社会力的方差

$$\sigma^{\mathbf{2}}(\vec{f}_\alpha^{\,tot}) = \frac{1}{N_{\mathbf{F}}}\sum_{l\in\mathbf{F}}\|\vec{f}_\alpha^{\,l}\|^{\mathbf{2}} \; - \; \frac{1}{{N_{\mathbf{F}}}^{\mathbf{2}}}\|\vec{f}_\alpha^{\,tot}\|^{\mathbf{2}} \tag{4.44}$$

它被定义为瞬时负荷。该量所考虑的力$\mathbf{F}$的集合可以限定为特定的相互作用类型。例如，仅考虑行人之间的影响:

$$\vec{f}_\alpha^{\,l} = \vec{f}_{\alpha\beta} \tag{4.45}$$

这对应于第2.2节中的K3准则，即必须注意其他行人。

行人在时间段 T 内走过的线段上所承受的平均负荷为

$$Y_\alpha^3 = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} dt\,\frac{1}{N_\beta}\sum_\beta\|\vec{f}_{\alpha\beta}\|^{\mathbf{2}} \; - \; \frac{1}{{N_\beta}^{\mathbf{2}}}\left\|\sum_\beta \vec{f}_{\alpha\beta}\right\|^{\mathbf{2}} \tag{4.46}$$

行人所承受的负载越小，路径质量就越高。

4.4.4 群体间距

另一项质量准则是组在人流中保持在一起的程度。在服务水平分析中（参见第2.2节），这一点未被考虑。对于休闲和购物出行而言，这项准则与家庭成员保持在一起尤为相关。

属于 α 的群体成员 $\{\alpha_k\}$ 希望尽可能紧密地聚在一起。但在避开障碍物时，他们会暂时分散

开来。衡量一个组沿着一段路径能够保持多紧密的指标，是各个群体成员之间的平均距离

$$Y_\alpha^4 = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} dt\,\frac{1}{(n_\alpha-1)}\sum_{\alpha'}\|\vec{r}_\alpha - \vec{r}_{\alpha'}\| \tag{4.47}$$

组的规模为¨ n_α。

对于较大的组，平均群体间距会更大，因为不再是每个人都能紧挨着另一个人行走。然而，只有在各群体成员之间的吸引力足够强，且他们的期望速度大致相同的前提下，这一指标才有说明意义。如果不满足这一前提，即使在开阔路段上，组也会仅因速度不同而逐渐散开。

4.4.5 系统（子系统）的平均指标

前文各节介绍的评价指标描述的是单个行人的状况。为了评价行人设施，可以据此确定某个（子）系统的测量值：在整个仿真时长内，对所有经过该路径区段的行人的个体测量值取平均。于是，某路段的平均测量值为

$$\langle Y\rangle = \frac{1}{N}\sum_\alpha Y_\alpha \tag{4.48}$$

与方差

$$\sigma^{\mathbf{2}}(Y) = \frac{1}{N}\sum_\alpha {Y_\alpha}^{\mathbf{2}} - \left(\frac{1}{N}\sum_\alpha Y_\alpha\right)^{\mathbf{2}} \tag{4.49}$$

已给出。若要对行人流作出更详细的判断，也可以分别对不同的亚群体进行平均，例如这些亚群体在行走方向或速度上有所不同。

通过

$$\langle Y'\rangle = \frac{1}{N_1+\ldots+N_n}\left(N_1\langle Y_1\rangle + \ldots + N_n\langle Y_n\rangle\right) \tag{4.50}$$

und

$$\begin{aligned}\sigma^{\mathbf{2}}(Y') &= \frac{1}{N_1+\ldots+N_n}\left(N_1\left(\sigma^{\mathbf{2}}(Y_1)+\langle Y_1\rangle^{\mathbf{2}}\right)+\ldots+N_n\left(\sigma^{\mathbf{2}}(Y_n)+\langle Y_n\rangle^{\mathbf{2}}\right)\right)\\ &- \frac{1}{(N_1+\ldots+N_n)^{\mathbf{2}}}\left(N_1\langle Y_1\rangle+\ldots+N_n\langle Y_n\rangle\right)^{\mathbf{2}}\end{aligned} \tag{4.51}$$

实现各个路径区段或子种群测量值的组成。

4.4.6 测量值预测

人流仿真从一个系统为空的初始状态开始。行人逐渐被激活并进入系统。经过一段时间后，活跃行人的数量保持恒定，因为每有一人离开系统，就会有一人进入。然而，初始状态的影响需要很长时间才能消退，系统才能达到稳态。

因此，计算上述评价指标需要非常长的仿真时间，也会带来很高的计算开销。通常，一个测度从任意数值开始，其变化会单调收敛至最终值。其随时间的变化大致呈指数函数 $y(t) = a_0 + a_1 \exp(-t/a_2)$ 的形式，其中包含常量 a_0、a_1 和 a_2。

对于截至时间步 t_i 收集的平均测量值 $\langle Y \rangle_i$ 及其误差$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2(Y)}$，可以拟合相应的函数，以预测最终结果。

一种合适的方法是最小二乘法 [PTVF92，第 15], 章，其中要使量¨最小化

$$\chi^2 \equiv \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\langle Y \rangle_i - y(t_i, a_0 ... a_{M-1})}{\sigma_i} \right)^2 \tag{4.52}$$

通过调整参数 $a_0 ... a_{M-1}$ 来实现。极小值的条件为：

$$0 = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\langle Y \rangle_i - y(t_i)}{{\sigma_i}^2} \right) \left(\frac{\partial y(t_i, ... a_k ...)}{\partial a_k} \right) \qquad k = 0, ..., M-1 \tag{4.53}$$

如果待拟合函数是基底函数的线性组合

$$y(t) = \sum_{k=0}^{M-1} a_k X_k(t) \tag{4.54}$$

由此，(4.53) 得到线性方程组

$$0 = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{{\sigma_i}^2} \left(\langle Y \rangle_i - \sum_{j=0}^{M-1} a_j X_j(t_i) \right) X_k(t_i) \qquad k = 0, ..., M-1. \tag{4.55}$$

通过交换求和顺序，可以将方程组写成矩阵方程

$$\sum_{j=0}^{M-1} \alpha_{kj} a_j = \beta_k \tag{4.56}$$

与 $M \times M$ 矩阵

$$\alpha_{kj} = \sum_{i=1}^{N} \frac{X_j(t_i)\, X_k(t_i)}{\sigma_i^{\mathbf{2}}} \tag{4.57}$$

以及长度为 M的向量 L¨

$$\beta_k = \sum_{i=1}^{N} \frac{\langle Y \rangle_i \; X_k(t_i)}{\sigma_i^{\mathbf{2}}} \tag{4.58}$$

写出。矩阵的矩阵求逆（α）$_{M\times M}$可按照高斯消元法 [Kli84, S. 61 ff.][PTVF92, Kap. 2] 进行¨，并直接给出待拟合函数的参数：

$$a_j = \sum_{k=0}^{M-1} (\alpha)_{jk}^{-1} \; \beta_k \tag{4.59}$$

其中参数方差为

$$\sigma^{\mathbf{2}}(a_j) = (\alpha)_{jj}^{-1} \tag{4.60}$$

选择由不同基函数线性组合构成的拟合函数有一个优点：按照上述方法进行计算时，可以利用前一个时间步的结果。无需存储各模拟步的均值和方差。

因此，所提出的指数函数无法使用。不过，假设预测仅在经过一定的启动阶段后才开始，则待拟合函数可以取为

$$y(t) = a_0 + \sum_{j=1}^{M-1} a_j \, \frac{1}{t^j} \tag{4.61}$$

使用双曲线的线性组合。通常，一个长度为 $M = 5$ 的参数组就足以外推测度的变化。在极限 $t \to \infty$ 下，拟合函数趋近于 a_0。

4.4.7 流量能力

在规划行人设施时，通常会将设施的（特定）通行能力（2.3）作为设计依据（参见第 2.2 节）。

也可以通过仿真确定该能力：统计连接设施各个部分的门（参见第 7.1 节）处进出行人的数量。

为此，对每个通行方向，流量

$$\Phi_l^{\pm} = \frac{N_k^{\pm}}{T} = \rho_l^{\pm}\, v^{\pm}\, b_l \tag{4.62}$$

以及流量密度

$$\hat{\Phi}_l^{\pm} = \frac{N_k^{\pm}}{T b_l} = \rho_l^{\pm}\, v^{\pm} \tag{4.63}$$

定义为仿真时间 T、门宽 b_l、各通行方向的局部密度 $\rho_l^{\pm}$ 以及其速度 $v^{\pm}$。

根据（2.3），行人设施某一部分的通行能力等于在特定时间间隔内穿过交通区域的人数，可由人流通过设施所有门的流入量和流出量计算得出：

$$L = \frac{1}{2}\sum_l b_l \left(\hat{\Phi}_l^{+} + \hat{\Phi}_l^{-}\right) \tag{4.64}$$

4.4.8 （自）组织程度、多样性度量

行人流中经常会出现规律性模式，在观察行人设施及仿真结果时，这些模式会立刻引人注意（参见 4.3）。

不过，只有根据某些特征对行人进行标记后，自组织现象才会显现出来。如果按照行人的目的地方向，用不同颜色的符号表示他们，就能清楚地看出相反的行进方向以及走廊中行进路线的形成。然而，如果按照其他判据（例如行人的速度）对行人进行区分，这种现象就不会显现出来，尽管它仍然会发生。

为了能够根据特定特征对系统组织进行定量描述，现在需要引入一个有序度度量。一种方法是通过熵来描述系统的状态。为此，将一个体积分割成大小相等的单位，并确定在时间点 t 位于单位 um $\vec{x}_i$ 中的某个亚群体的对象所占数量比例。熵定义为

$$H(A,t) = -\sum_{\mathbf{C}}\sum_{x_i \in A} P(\mathbf{C},\vec{x}_i,t)\, \ln P(\mathbf{C},\vec{x}_i,t) \tag{4.65}$$

。C表示各个亚群体，例如前往某一目的地的行人。 P(C $\vec{x}_i$, t) 表示属于亚群体 C、并在时间点 t 停留在路段 um $\vec{x}_i$ 中的行人所占比例 [Hak83]。

在行人流的微观描述中，按照（4.65）给出的定义存在问题，因为设施中的面积单位无法设置得足够大，不能容纳更多行人。因此，引入一个量，它具有与熵相同的特性，但由行人之间的成对相互作用来定义。由于这一表达式在形式上等同于熵，以下也称其为熵。

参照熵的定义，确定每个亚群体C 对一名行人的影响占比 $P_{\alpha\mathbf{C}}$ 。该影响以所有亚群体所施加的势之和为基准

$$P_{\alpha\mathbf{C}} = \frac{\sum\limits_{\beta\,\in\,\mathbf{C}} U_{\alpha\beta}}{\sum\limits_{\mathbf{C}'}\sum\limits_{\beta\,\in\,\mathbf{C}'} U_{\alpha\beta}} \tag{4.66}$$

一名行人的有序度为

$$S_\alpha = -k\sum_{\mathbf{C}} P_{\alpha\mathbf{C}}\,\ln P_{\alpha\mathbf{C}} \tag{4.67}$$

已定义。常数 $k > 0$ 用于对该表达式进行归一化。

由于式（4.67）中的负号，这个有序度量实际上是一个无序度量，因为当一名行人只被一个亚群体包围并受到其影响时，熵最低。当所有亚群体对该人的影响都同样强时，熵达到最大值。

对于两个亚群体 C和 $\mathbf{C}'$，其影响所占比例（比例系数）为

$$\begin{aligned} P_{\alpha\mathbf{C}} &= P \qquad \text{mit} \quad 0 \le P \le 1 \\ P_{\alpha\mathbf{C}'} &= 1 - P_{\alpha\mathbf{C}} \qquad (4.68) \\ & \qquad (4.69) \end{aligned}$$

时间点 t 的瞬时熵为

$$S_\alpha = -k\,(P\,\ln P\,+\,(1-P)\,\ln(1-P)) \tag{4.70}$$

确定。按照要求，当 $P^0 = 1/2$ 时，熵达到最大值。可以通过必要条件（4.71）和充分条件（4.72）证明这一点：

$$0 \;=\; \frac{d}{dP}S_\alpha$$

$$\begin{aligned}
\Leftrightarrow\ 0 &= -k\,\frac{d}{dP}\big(P\,\ln P\,+\,(1-P)\,\ln(1-P)\big)\\
\Rightarrow\ 0 &= \ln P+\frac{P}{P}-\frac{1}{1-P}-\ln(1-P)+\frac{P}{1-P}\Big|_{P=P^0}\\
&= \ln P-\ln(1-P)\Big|_{P=P^0}\\
\Rightarrow\ P^0 &= \frac{1}{2} \qquad (4.71)
\end{aligned}$$

$$\frac{d}{dP}\left(-k\,\ln\frac{P}{1-P}\right)\Big|_{P=P^0}=\ \frac{-k}{P}+\frac{-k}{1-P}\Big|_{P=P^0}=\ -4k<0 \qquad (4.72)$$

对于包含 n 个亚群体的系统，对所有种群 $\mathbf{C}$，一般有 $P^0_{\alpha\mathbf{C}}=1/n$ 。当熵最大时，行人群体完全混合。在这种情况下，根据（4.67），熵的值为

$$S_\alpha=-k\sum_{\mathbf{C}}P_{\alpha\mathbf{C}}\,\ln P_{\alpha\mathbf{C}}=-k\sum_{\mathbf{C}}\frac{1}{n}\,\ln\frac{1}{n}=k\,\ln n \qquad (4.73)$$

为求得最大熵关于数量 n 的值，需将熵用$k=1/\ln n$归一化。当集合完全分离，且行人 α 只受一个亚群体影响时，熵等于零。

在一个总共有 N 名行人和 n个亚群体的系统中，瞬时熵定义为

$$S=-\frac{1}{\ln(Nn)}\sum_{\alpha}\sum_{\mathbf{C}}\frac{P_{\alpha\mathbf{C}}}{\sum_{\alpha'}P_{\alpha'\mathbf{C}}}\,\ln\frac{P_{\alpha\mathbf{C}}}{\sum_{\alpha'}P_{\alpha'\mathbf{C}}} \qquad (4.74)$$

其中，将对一名行人的影响所占比例与对所有人员的影响进行比较。

此外，熵也可以在一个时间段 T 内定义为

$$S_T=-\frac{1}{\ln(NnT)}\int_{t_0}^{t_0+T}dt\,\sum_{\alpha}\sum_{\mathbf{C}}\frac{P_{\alpha\mathbf{C}}}{\int_{t_0}^{t_0+T}dt'\,\sum_{\alpha'}P_{\alpha'\mathbf{C}}}\,\ln\frac{P_{\alpha\mathbf{C}}}{\int_{t_0}^{t_0+T}dt'\,\sum_{\alpha'}P_{\alpha'\mathbf{C}}} \qquad (4.75)$$

这样，除了行人的空间分布外，系统的时间变化也被纳入有序度量。

这三个量¨、 S_α和 S S_T 分别是彼此独立的测度，并对系统的状态作出不同的说明。具有 N 名行人¨的系统的瞬时熵，与所有行人 ¨的个体熵均值¨有所不同， $1/N\,\sum_\alpha S_\alpha$ 因为它还显示出行人密度¨的差异。为作说明，假设有两名行人¨ α 和 α' ，他们分别均匀地受到所有种群的影响。行人¨ α 则受到更强的影响，因为

其周围的人员站得更密集。此时，系统的瞬时熵 S 将不同的密度表示为有序度（$S \to 0$），而均值则取一个表示均匀分布的值（$S < 1/N \sum_\alpha S_\alpha$）。

同样，系统在一个时间段 S_T 内的总熵也不同于瞬时熵 S的时间平均：前者显示出具有较低有序度值的时间波动，而瞬时熵的时间均值可能更高。

通过熵可以看出，系统在空间中以及时间演化过程中表现得有多均匀。因此，有序度这一概念应解释为系统各部分之间的差异。

作为行人交通的另一项评价指标，根据占比影响（4.66）和个体熵（4.67）的定义，可以通过

$$P'_{\alpha\mathbf{C}} = \frac{\int_{t_0}^{t_0+T} dt \sum_{\beta \in \mathbf{C}} U_{\alpha\beta}}{\sum_{\mathbf{C}'} \int_{t_0}^{t_0+T} dt \sum_{\beta' \in \mathbf{C}'} U_{\alpha\beta'}} \tag{4.76}$$

und

$$S'_\alpha = -\frac{1}{nT} \sum_{\mathbf{C}} P'_{\alpha\mathbf{C}} \ln P'_{\alpha\mathbf{C}} \tag{4.77}$$

隔离度

$$Y^5_\alpha = 1 - S'_\alpha = 1 + \frac{1}{nT} \sum_{\mathbf{C}} P'_{\alpha\mathbf{C}} \ln P'_{\alpha\mathbf{C}} \tag{4.78}$$

推导出。这里，t_0 至 $t_0 + T$ 正是行人 α 穿过该（子）系统所需的时间。因此，这表达了行人在其路径上受到不同亚群体影响的程度。在均匀混合的人群中，$Y^5_\alpha = 0$；而在隔离度较高时，$Y^5_\alpha \to 1$。与其他评价指标类似，可以对穿过某一设施的所有行人的隔离度取均值（参见 4.4.5）。此外，还可以对其时间演化作出预测（参见 4.4.6）。

这种指标在不同文化或政治背景的人们聚集于公共场所时都很重要。紧张的状况可能会因人群开始拥挤而轻易升级。例如，体育场内两支足球队的球迷。为避免冲突，可以通过采取适当的（建筑）措施，让各组能够在空间上分隔开来，从而防止人群混合。

4.5 性能指标

上一节中引入的评价标准是针对两个简单系统——走廊和交叉口——确定的。由此可见，除了交通密度之外，建筑物的几何形状也会影响行人流的行为。

4.5.1 走廊的性能指标

为了研究走廊中的行人流，对走廊宽度为 4、6 和 8 米，以及两个相向行进的行人组规模分别为 102、204 和 408 个体的情况进行了仿真。当一名行人到达目的地后，便由其所属亚群体中的一名新成员替换；新成员具有与前一名行人无关的特性。因此，每个亚群体中的活跃行人数保持恒定。

在第一组仿真（表4.1）中，行人单独行进；在第二组仿真（表4.2）中，行人以三人组形式行进。由个人组成的人流与由三人组组成的人流之间的差异可见图4.16。仿真结果将在图4.16说明文字中讨论。

4.5.2 交叉口效率

行人流在交叉口处往往会受到频繁避让行为的显著干扰。提高交叉口通行能力的一种方法是在交叉口中间设置一个障碍物。这样可以减少避让行为的数量，以至于缩小通行区域所造成的不利影响不足为虑。

在对交叉口行人交通进行仿真时，这一效果十分明显：图 4.17 所示的两种设施采用相同数量的行人，并在相同的参数和初始条件下进行了仿真。

图 4.18 展示了空交叉口和带障碍物交叉口的仿真结果。除了总体效率（Total）之外，还分别针对五种不同速度类别测定了性能指标。障碍物带来的提升十分明显。相比之下，分布在各个速度类别之间的变化则不太显著。

ρ	w	N	N_{tot}	效率	方差	影响	组
0.318750	8	102	2779	9.263520e-01	1.750491e-02	3.846491e-01	0.000000
0.425000	6	102	2718	9.076417e-01	2.563989e-02	5.782057e-01	0.000000
0.637500	4	102	2598	8.753088e-01	4.383204e-02	1.144845e+00	0.000000
0.637500	8	204	5027	8.570126e-01	4.934287e-02	5.975415e-01	0.000000
0.850000	6	204	4658	8.234650e-01	7.001586e-02	9.307962e-01	0.000000
1.275000	4	204	3828	7.537521e-01	1.118642e-01	1.881226e+00	0.000000
1.275000	8	408	8700	8.024332e-01	8.599004e-02	9.819080e-01	0.000000
1.700000	6	408	7417	7.687076e-01	1.064169e-01	1.423571e+00	0.000000
2.550000	4	408	6063	6.931106e-01	1.464716e-01	2.351771e+00	0.000000

表4.1： 由个人组成的行人流的走廊性能指标。这些仿真针对不同的走廊宽度和种群规模进行。ρ 表示平均密度，N_{tot} 表示所有"测量到的"行人的总数。图中列出了效率（式4.38）、速度方差（式4.42）和影响方差（式4.46）等性能指标。对于个人而言，群体间距（式4.47）等于零。

ρ	w	N	N_{tot}	效率	方差	影响	组
0.318750	8	102	1107	9.315365e-01	1.533524e-02	3.957259e-01	3.970409
0.425000	6	102	1092	9.216949e-01	1.880761e-02	5.883629e-01	3.811176
0.637500	4	102	1075	9.016998e-01	2.712228e-02	1.158885e+00	3.966465
0.637500	8	204	2128	9.016516e-01	2.624432e-02	6.006539e-01	4.540360
0.850000	6	204	2090	8.877308e-01	3.285849e-02	9.173967e-01	4.681740
1.275000	4	204	2036	8.573940e-01	4.942715e-02	1.874801e+00	5.262294
1.275000	8	408	4045	8.659953e-01	4.494565e-02	8.955614e-01	5.612268
1.700000	6	408	3848	8.427222e-01	5.863792e-02	1.389480e+00	5.904872
2.550000	4	408	3312	7.915510e-01	8.780707e-02	2.195521e+00	6.230577

表4.2： 由三人组构成的行人流走廊性能指标。所绘制的量与表4.1中的量相对应。

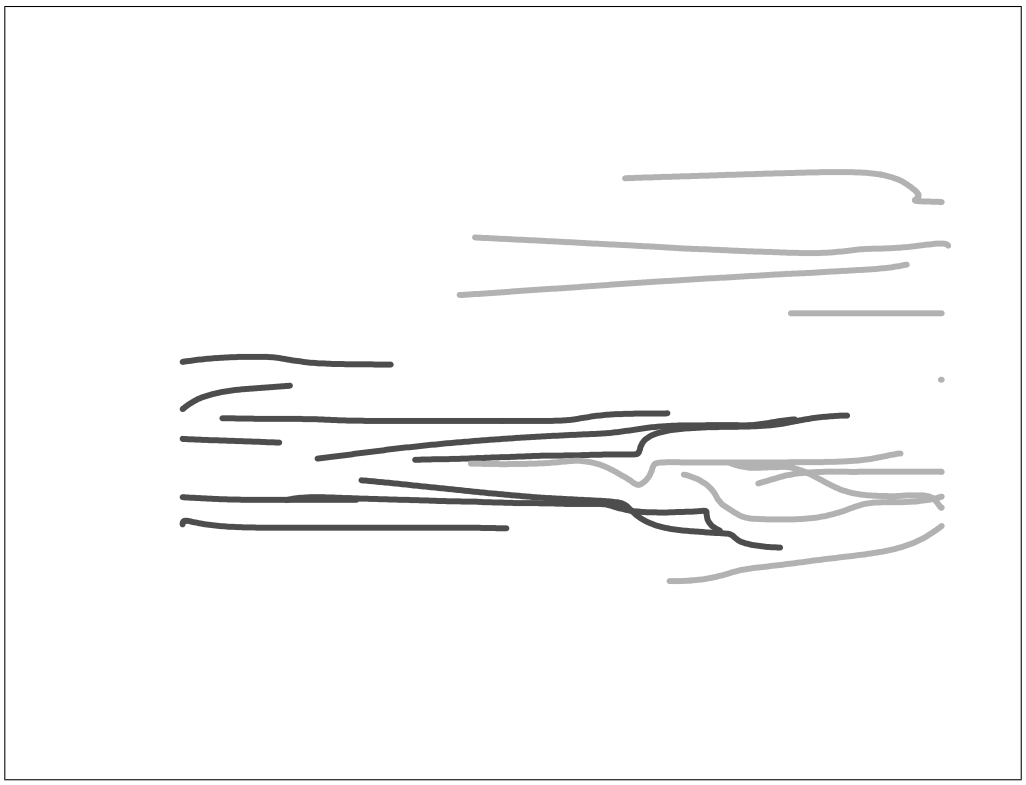


图 4.4： 两股方向相反的人流的轨迹。椭圆势的社会力通过保持距离（4.12）产生避让动作。

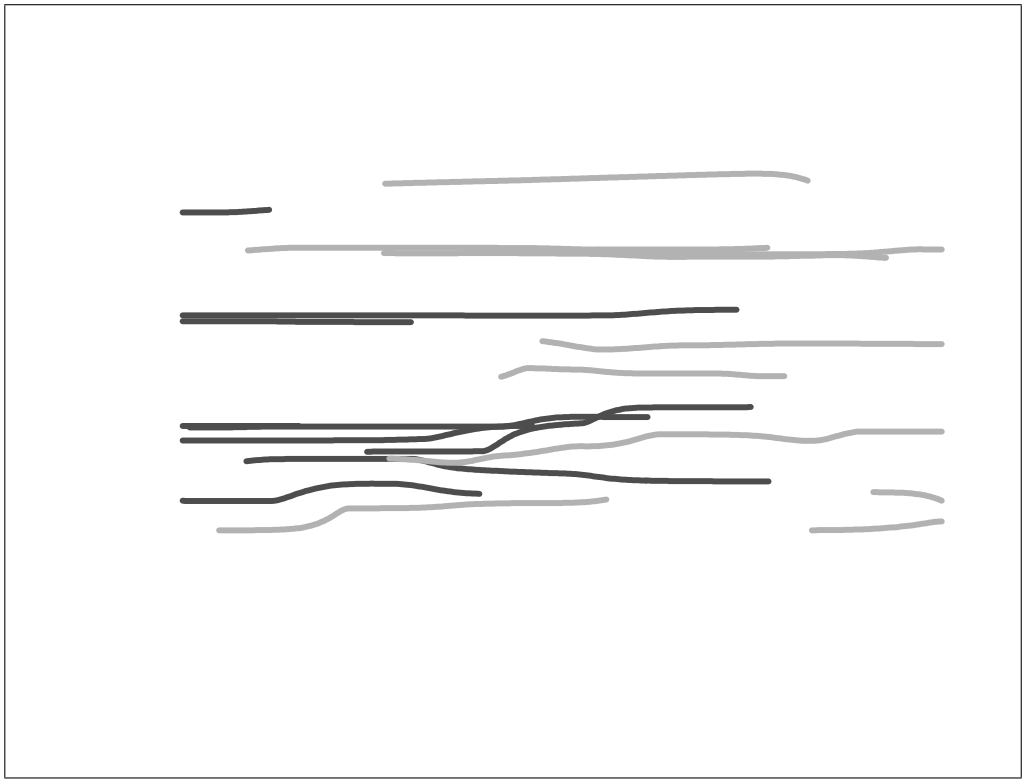


图 4.5： 相比之下，式（4.16）中的势函数方法能够实现更加平滑、柔和的避让动作。

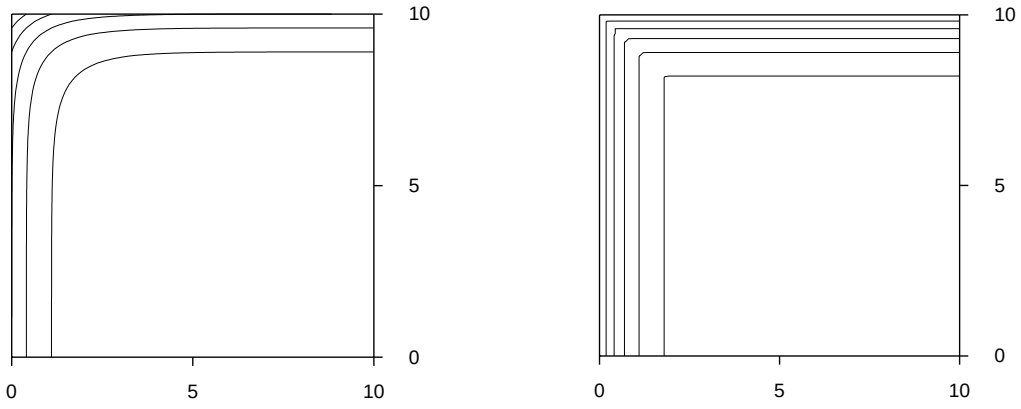


图 4.6： 比较两种表示相互垂直墙壁排斥作用的方法。第一种方法（左侧）将两面墙的势贡献相加。第二种方法（右侧）只有距离行人最近的墙产生作用。

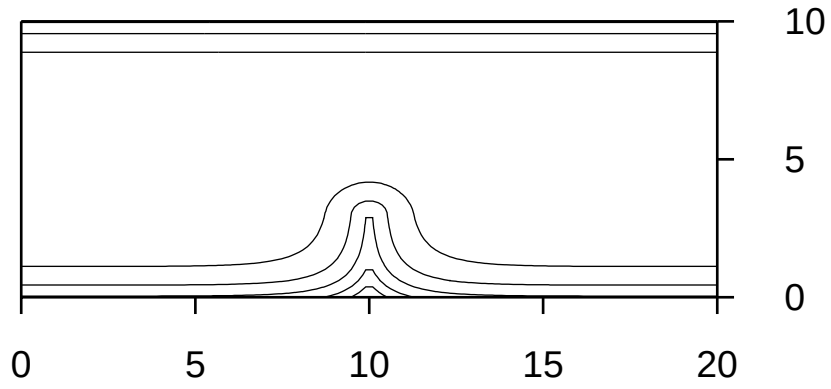


图4.7： 根据式（4.26），一个宽10米的走廊中有一面垂直向内伸出的隔墙时的势函数表示。

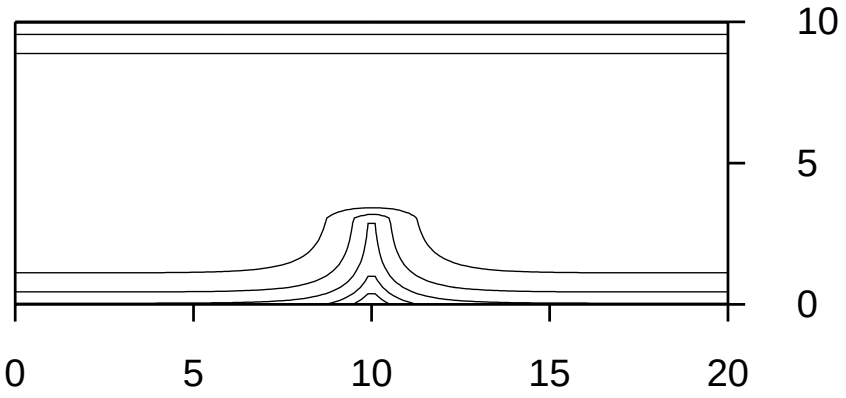


图4.8： 根据式（4.27）将势函数平坦化后，走廊中间的可用面积增大了。行人仍然能够绕过障碍物。

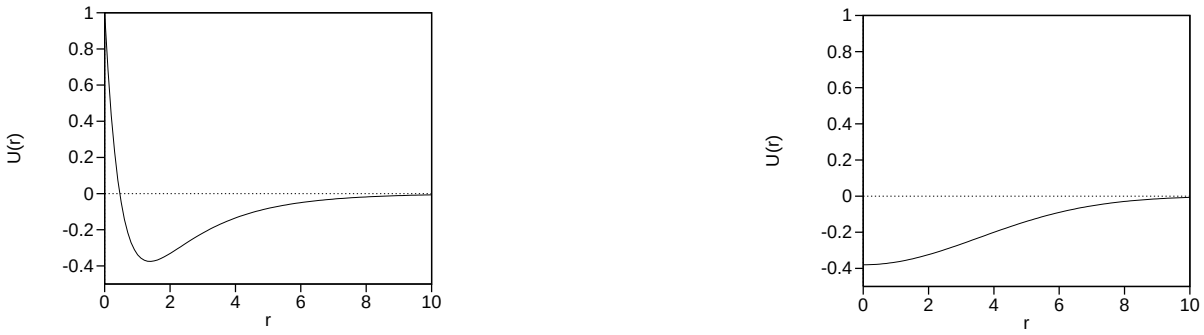


图4.9： 不同类型吸引物的势函数。式（4.28）中的势函数通过内部的排斥部分，使行人与吸引物保持一定距离；而式（4.29）中的势则完全具有吸引性。

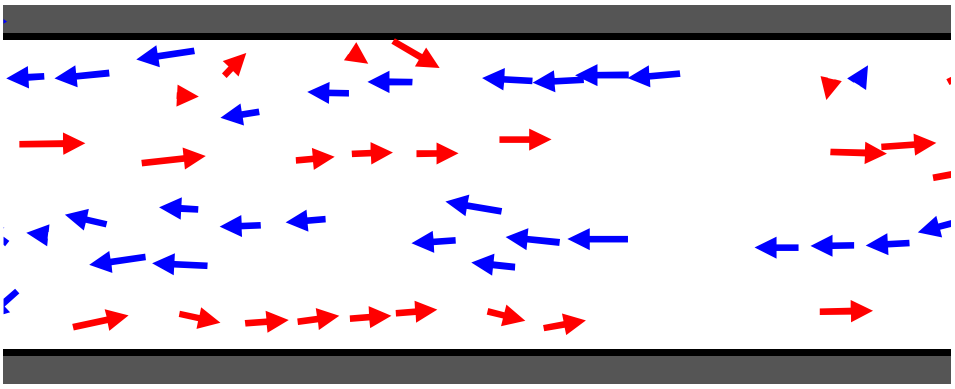


图4.10： 行人流道的形成。行走方向相同的行人共同在人流中形成行人流道。这种集体行为完全源于行人之间的相互作用以及走廊墙壁的影响。

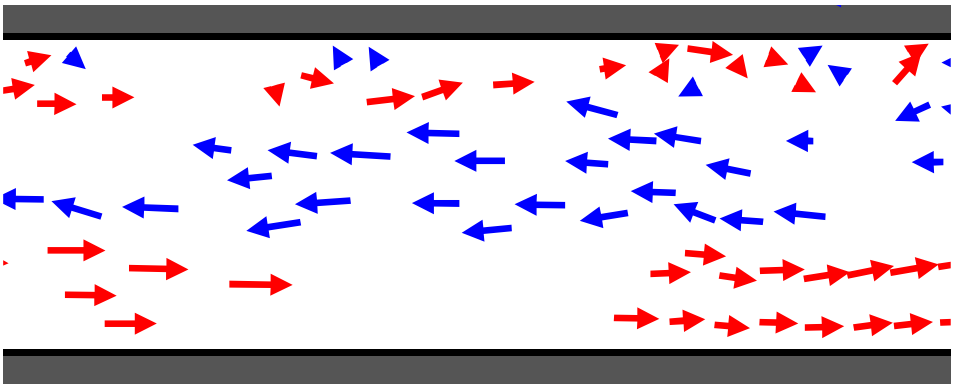


图4.11： 有时，某一行走方向的行进路线会扩展到几乎所有行人都朝着自己的行走方向靠右行走。几乎所有人都在左侧行走的状况，同样可能发生。走廊右上方可以看到湍流：迎面相遇的行人无法避让，因为他们一侧被墙挡住，另一侧则被一股非常稳定的人流围住。

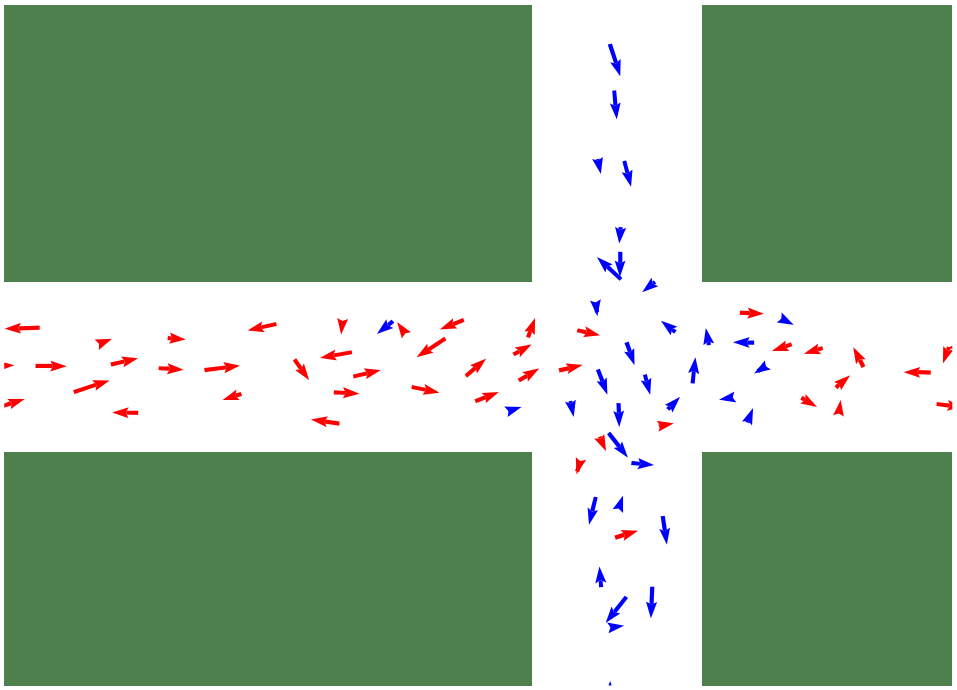


图4.12： 一个有行人在四个方向通行的交叉口：从上到下、从右到左，以及各自的反向。交叉口由垂直方向和水平方向行进的行人交替通行。

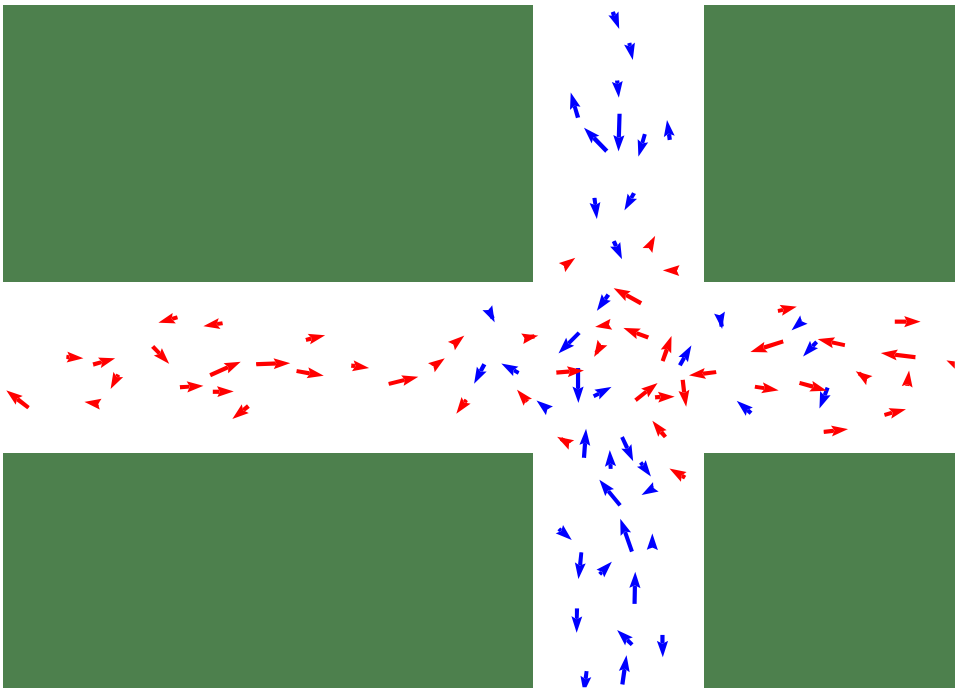
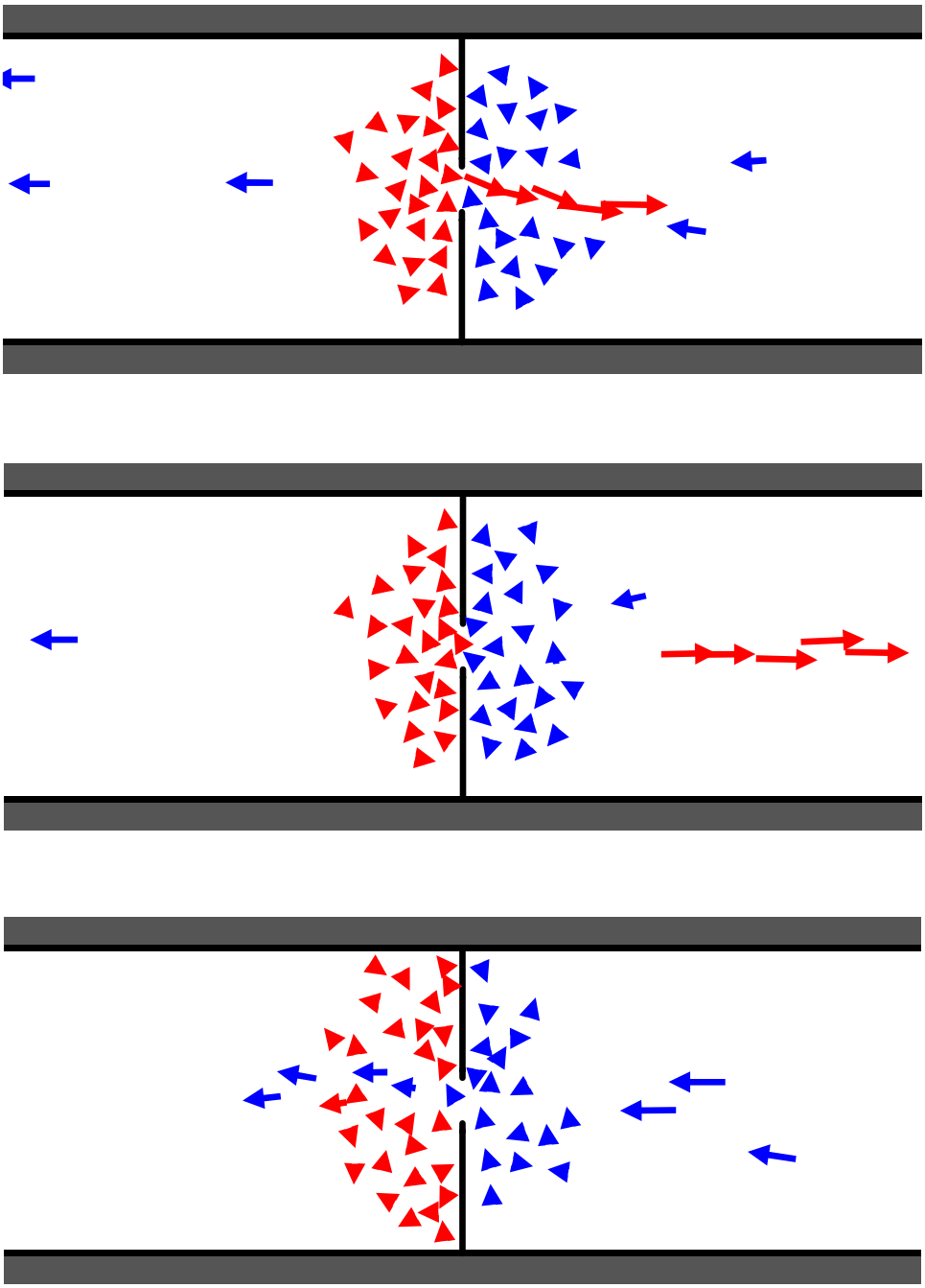


图4.13： 行人之间的相互作用形成了环岛。然而，这种结构的生命周期很短。不过，可以通过在十字路口中心设置一个障碍物来稳定它（参见第4.5节）。



¨**图 4.14:** 每次只有少数行人（上图）能通过通道狭窄的入口，直到流量被对向人群的压力阻止。经过一段平衡期（中图）后，另一侧便能通行（下图）。只要有新的行人到来，这一过程就会不断重复。

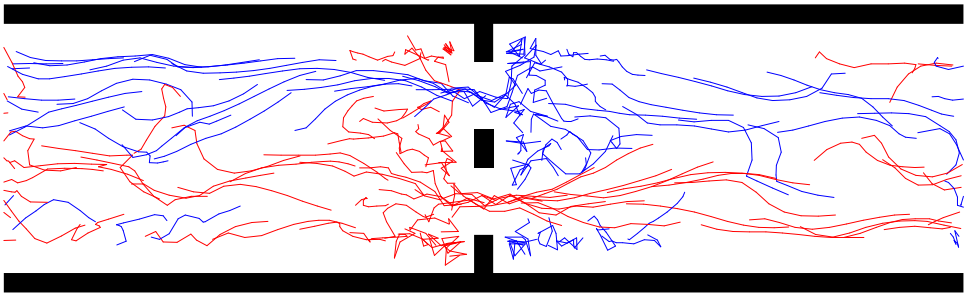


图4.15： 两个行进方向上的行人分别占用了两个通道。前提是他们非常有耐心，并且彼此保持足够的距离。如果每个亚群体都有足够多的行人补充进来，这种结构就非常稳定。那些选错通道的人会被困在角落里。

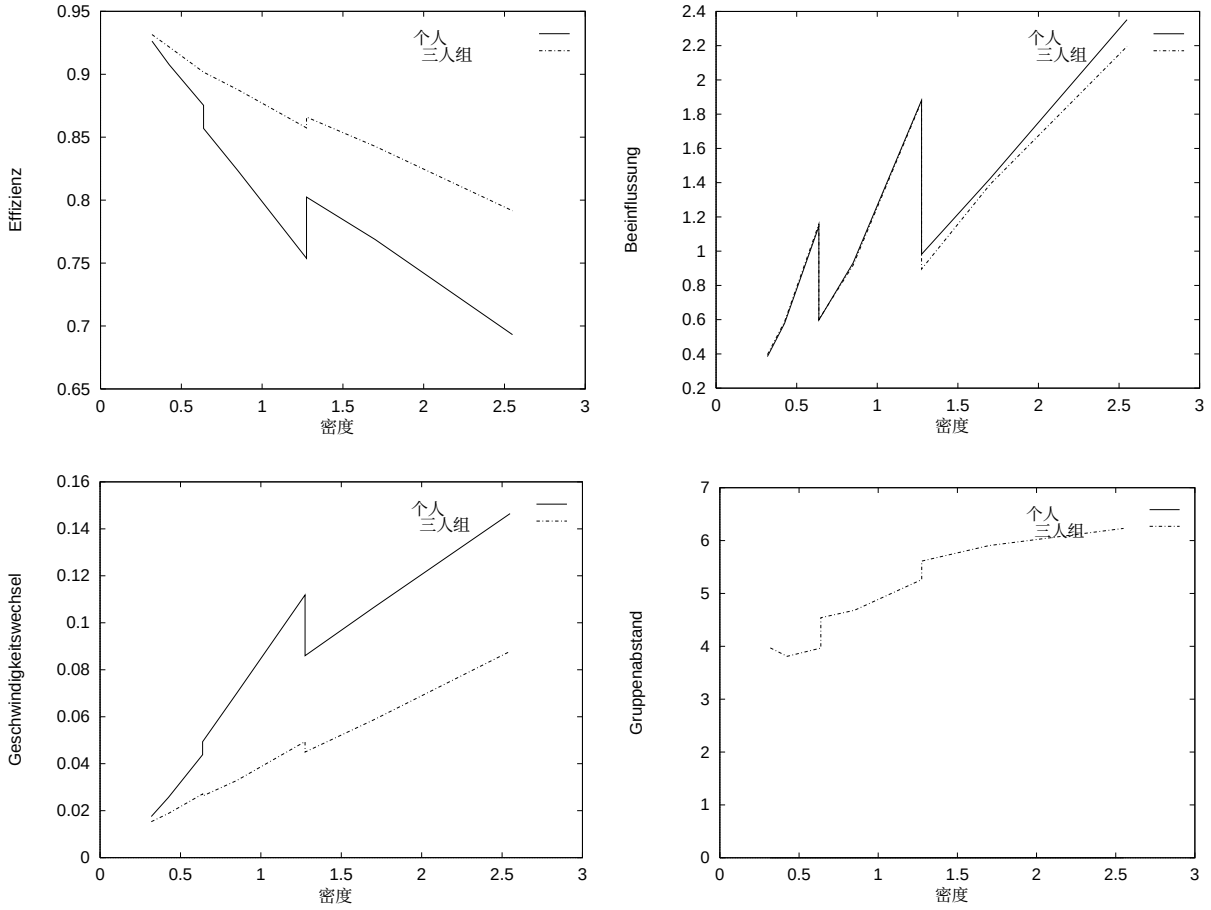


图4.16： 走廊性能指标。各个数据点按照表4.1和表4.2中的顺序，以行人密度为横坐标绘出。设施效率（左上）随着密度增加而近乎线性下降。令人惊讶的是，三组人流的效率下降得较为平缓。尽管存在额外的组间相互作用，各组在人流密度较高时仍能更高效地组织人流。速度方差（左下）与效率的变化恰好呈镜像关系。对比行人密度相同、走廊宽度分别为4米和8米时的测量结果，可以发现，效率和速度方差不仅受密度影响，也取决于走廊形状。影响方差（右上）更清楚地显示出其对建筑形状的依赖。走廊变窄导致这项测度的上升幅度远大于密度增加所造成的影响。群体间距（右下）如预期般在密度较高时增大。

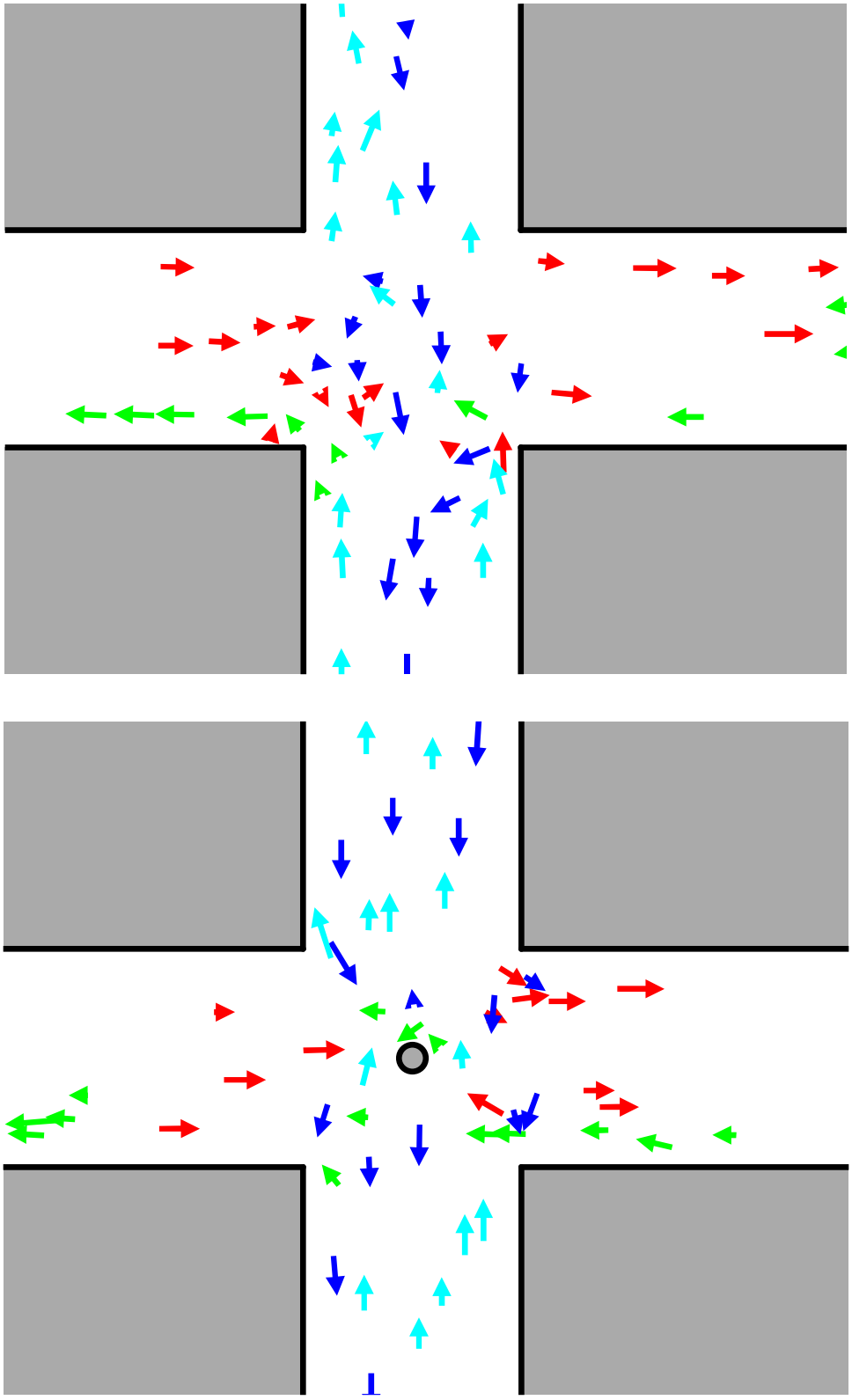


图4.17： 交叉口处行人交通的性能特性（上图）可通过增设障碍物（下图）得到显著改善。

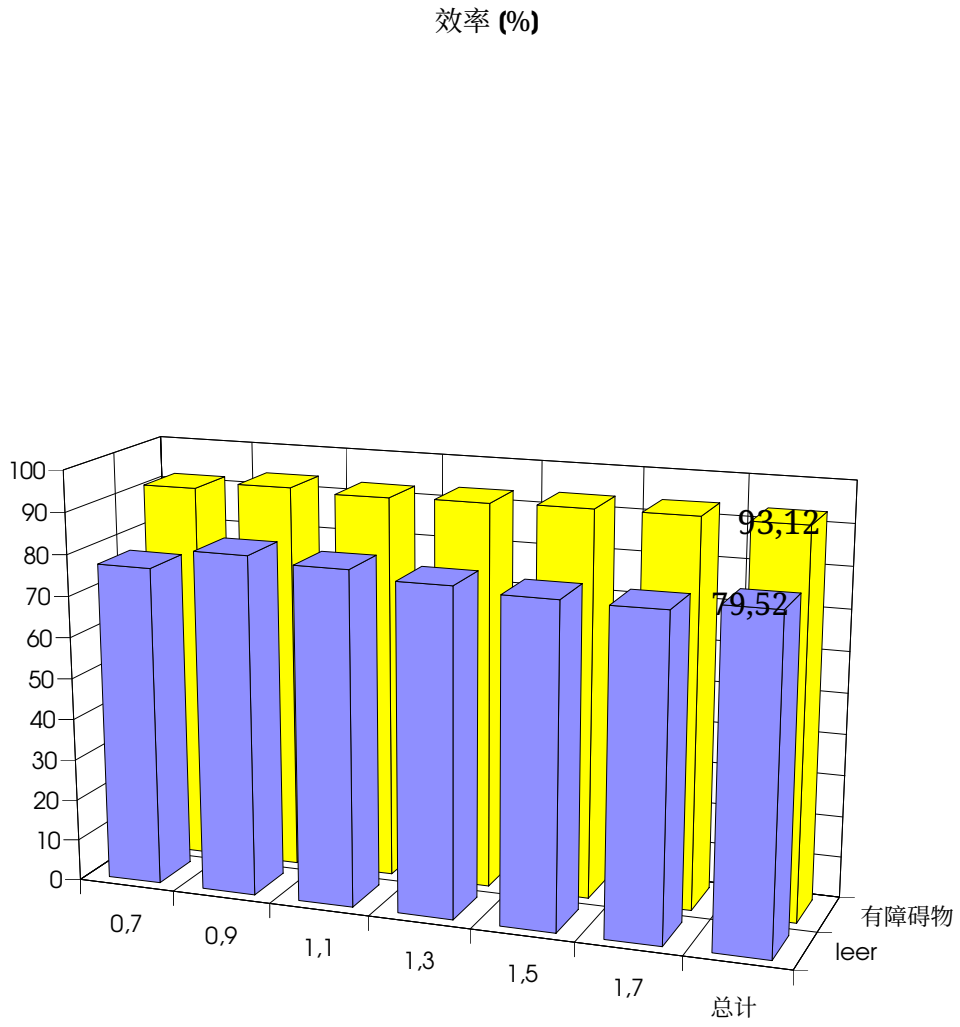


图 4.18: 交叉口的效率度量。仿真采用了相同的参数，分别针对空交叉口和有障碍物的交叉口进行。障碍物减少了行人的避让动作次数，从而显著提高了系统效率。

第5章

通过进化程序进行形状优化

行人群体的仿真表明，流动对建筑物的几何形状十分敏感。行人与其对建筑环境的反应之间的相互作用意味着，只需对建筑物平面图进行一些有针对性的细微改动，就能显著改善行人交通。正如第4.5节中一个交叉口的例子所示，在某些情况下，甚至可以通过缩小可通行区域来提高效率。

设施平面图的优化可以通过对进化过程进行建模来实现。这种方法自20世纪70年代以来，已被广泛用于各种技术优化（参见 [Rec73]）。

由进化这一基本思想出发，人们发展出了许多方法，其具体实现方式在某些方面差异很大。遗传算法与进化策略之间的历史性区分，源于两者几乎同时出现且彼此互不知晓。这种区分一直延续至今，在文献中仍然存在。这些方法及其后续发展的丰富成果提供了众多组件，可据此组合出适合自身问题的进化程序。

第5.3节和第5.4节介绍了这两种方法最初的思路。第5.5.1节则介绍了一个进化程序的实现，该程序用于通过示例函数研究各种方法。

5.1 进化原理的思想

在自然界中，个体种群必须在日常生活中努力生存。只有最成功的个体才能存活并繁衍。通过这一选择过程，最强个体基因中编码的特性会传递给下一代。只要环境要求不发生变化，种群就会不断产生更成功的世代。

核心内容是繁殖出新一代。遗传信息以轻微变异的形式传递给后代（变异）。如果存在多个亲本，这一过程称为多亲进化。新的遗传信息还可以通过组合两个个体的基因额外产生（交叉）。这样，后代便能从其亲本的多种成功特性中受益。

在数学与技术应用中，接受进化原理处理的是问题的潜在解。它们对应于特定的参数组、初始值或设备设置。在进化方法的术语中，这些解被称为个体，但它们与同样被称为个体的行人并无关联。

个体的数值表示以基因的形式实现，这些基因可以由二进制数或多维空间中的实值向量组成。此外，还要定义改变基因的规则。

进化¨优化方法按以下步骤进行：从随机¨选取的值中生成一个由问题潜在解构成的初始种群。根据每个个体的成功程度，通过繁殖和随机¨变异创建下一代中的新个体。评价和繁殖¨过程不断重复，直到找到最优值。为此，还需要定义合适的终止准则。

以下五¨个组件构成了采用进化¨方法进行优化的成功要素 [Mic94，第 17, 18]页：

1. 对问题潜在解进行数值编码（表示）¨，即潜在解的表示形式¨Pro -

题目，2. 一种用于生成潜在解的初始种群的方法，3. 一种评估解的适应度的方法（适应度函数），4. 用于改变和组合遗传物质的算子，

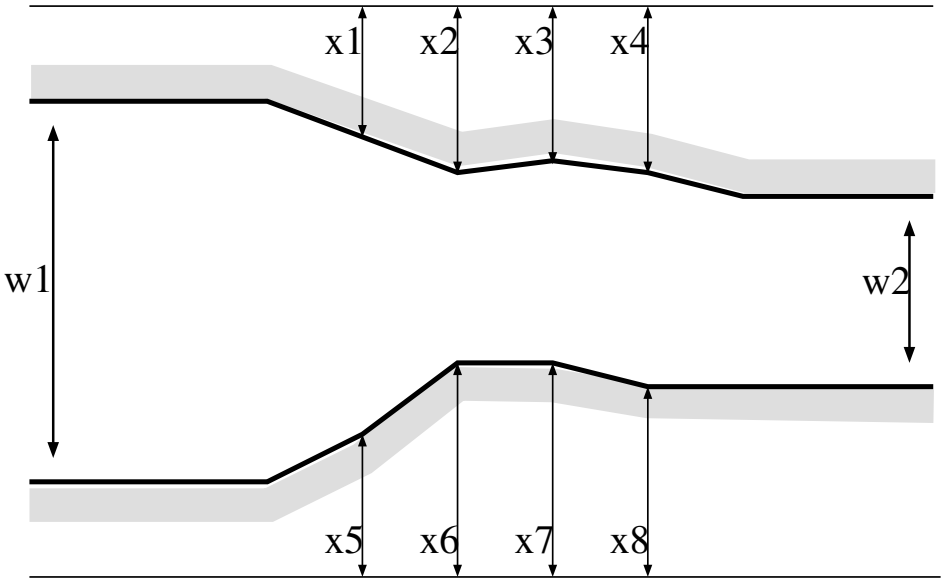


图5.1： 两端宽度不同的走廊的各种变化方式 $w1$和 $w2$。在进化过程中可以优化各段墙¨的朝向 $x_1 \ldots x_8$。

5. 各种参数，例如种群规模以及变异算子的应用频率。

仅仅由于实现和执行进化优化方法的可能性众多，因此其应用并不存在普遍适用的方案。第5.5.2节中示例函数的优化也说明了这一点。更重要的是，对待优化系统的实验或理论研究越充分，成功优化的可能性就越大。

5.2 行人设施的进化优化

通过进化¨优化，也可以根据第4.4节介绍的各种评价准则，改进行人¨设施的平面图。通常，重点在于提高交通效率。此时，个体的适应度由效率度量 $Y1$ （4.38）确定。而在设计销售区域时，则可以将顾客福祉以及顾客对所售商品的注意力作为优化准则。

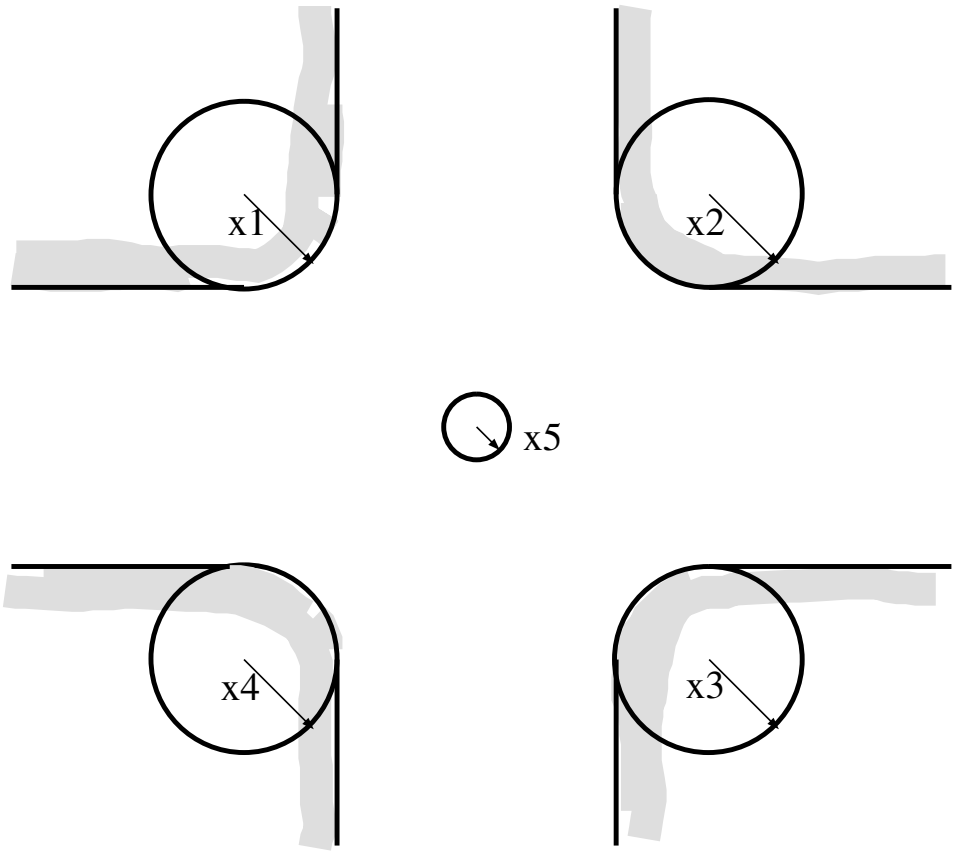


图 5.2： 交叉口的变化可能性。通过改变角落处的圆角$x1 \ldots x4$ 以及中间的障碍物，可以优化行人流动。

图 5.1 和图 5.2 展示了行人¨设施平面图的表示示例。走廊的墙壁可以划分为可移动区段，从而使走廊的横截面能够灵活调整。优化过程中的个体由间距 $x1 \ldots x8$ 构成。交叉口可以通过调整拐角处的不同半径 $x1 \ldots x4$ 以及障碍物的大小$x5$进行修改。

在进化过程中，会针对每个个体，在一定时长内模拟其相应平面图中的人流。需要注意的是，由此得出的评价标准仅适用于特定的行人流组成。这一组成在整个优化过程中保持不变。

因此，仿真中的不同人数规模（参见第 2.1 节）也可能导致不同的优化结果。要成功将进化算法应用于交通空间，还必须了解建筑物的用途以及预期的人流量。

5.3 遗传算法

遗传算法与其生物学原型非常相似。类比于由许多氨基酸串联而成的 DNA（脱氧核糖核酸），基因被表示为多位二进制数。对于不同的问题，对这种表示形式的解读可能大不相同。例如，可以对不同的游戏策略进行编码，也可以按旅行商问题规定的顺序，对需要依次访问的点进行编码；还可以用数值表示一个值。

编码

区间 $[-1,1]$ 中的一个值 x，例如可以用一个十位二进制数表示，其形式为

$$x = 2\frac{s}{2^{10}} - 1 = \frac{s}{2^9} - 1; \tag{5.1}$$

可以表示。基因 $s = (0101000111)$ 表示 $x = 327/512 - 1 \approx -0.3613$。对于多维问题，则将相应数量的二进制数连接起来。

初始种群

在进化过程开始时，会生成一个规模为 μ 的种群，其中包含随机确定的个体。第一代的生成已经会影响进化过程的速度。对待优化的问题了解得越充分，个体就应越密集地分布在推测的最优值附近。

评价函数与选择

对每个个体都会计算其适应度，也就是问题解的质量。适应度可以通过评价函数 $f: \{x\} \to \mathbb{R}$、实验或仿真来确定。适应度值决定了个体在下一个时期繁殖的概率。该概率可以通过

$$p_k = \frac{f(x_k)^\tau}{\sum_{k'=1}^{\mu} f(x_{k'})^\tau} \tag{5.2}$$

用指数 $\tau > 0$来定义。新一代由祖代个体根据其繁殖概率 p_i进行 μ次选择而产生。特别成功的个体也可以被繁殖多次。指数 τ 的取值越大，成功的解就越容易胜出，进化过程也就越快。较小的 τ 值允许成功程度较低的个体参与繁殖，从而避免进化过程陷入局部最优。

遗传算子

在每一世代中，基因都可能以一定的概率发生变化。变化可以通过两种方式进行：

变异。随机选取二进制数中的一个位置并对其进行改变。如果该位置原来的值为 1，就将其设为 0，反之亦然。对基因进行数值解释时，翻转高位会导致更大的数值变化。

交叉。随机选取一个位置，将两个基因分别切开。然后将第一个基因的前半部分与第二个基因的后半部分拼接起来。对剩下的两部分也进行相同的操作。由此产生两个新的不同基因，它们继承了双方祖先的特性。

根据编码方式的不同，新一代的某些基因有时会超出有效值范围。如果无法通过恰当定义变异算子和交叉算子来避免这种情况，可以引入一个实例来修复无效基因。在数值优化领域，人们也常将惩罚项加入评价函数中，以确保无效基因无法获得成功。然而，对于耗时非常长的评价函数，惩罚项并不适用。

5.4 进化策略

进化策略方法源自数值优化领域。最早的方法是 Rechenberg 和 Schwefel进行的一项实验：他们使用一块铰接板，寻找在风洞中最有利于气流的翼型[···]。

问题的变量是相邻板件之间的角度。随机改变一个数值···，并舍弃所有劣于其前代解的解，经过大量步骤后，便可得到最优解·····[73]Rec。

最初，进化策略由仅含一个个体的种群构成。唯一的遗传算子是变异。与遗传算法不同，个体表示为向量对（x，σ）$\in \mathrm{IR}^n \times \mathrm{IR}^n$。其中，向量$x$ 表示解空间中的位置¨，σ 是一个标准差向量，变异通过它来

$$x' = x + \mathcal{N}(0, \sigma) \tag{5.3}$$

实现。其中，$\mathcal{N}$（0，σ）是一个由相互独立、服从正态分布的随机数构成的向量，其均值为 0，标准差为 σ。这种方法符合生物学中的观察：较小的变化远比大的变化常见。如果新产生的个体更成功，也就是说更接近最优值¨，它就会取代其祖先。否则，它将被淘汰。

收敛性与步长控制

该方法对于正则优化问题的收敛性证明见 [BHS91] 。不过，这并不能说明其收敛速度。为了加快进化过程，可以引入步长控制：标准差 σ 根据最近几次进化步骤的成功情况进行调整。 Rechenberg 为此引入了成功概率

$$W = \frac{\text{Zahl der erfolgreichen Mutationsschritte}}{\text{Gesamtzahl der Mutationsschritte}} \tag{5.4}$$

以及所谓的1 5成功规则，见 [Rec73] [Sch77，第128–132]页：对于每 k 个进化步骤，计算平均成功概率 W，并按照以下方式调整标准差向量

$$\sigma' = \begin{cases} c_d\,\sigma & : \quad W < 1/5 \\ \sigma & : \quad W = 1/5 \\ c_i\,\sigma & : \quad W > 1/5 \end{cases} \tag{5.5}$$

其中 $c_d < 1$ 和 $c_i > 1$ 按此进行调整。在 [Sch77] 中，建议采用 $c_d = 0.85$、 $c_i = 1/0.85$ 和$k = 10$ 这些值。

多成员进化策略

当只有一个初始个体和一个后代时，称为双成员进化策略。更大的种群则称为多亲进化策略。

一般用 μ 表示种群规模，用 λ 表示后代的数值。然后可以从 $(\mu+\lambda)$ 个体中进行选择。除了这种 $(\mu+\lambda)$ 方法外，也可以仅从 λ 后代中进行选择，称为 $((\mu,\lambda))$ 进化策略。因此，成功的个体会有更长的生命周期。如果某一世代产生的个体都不比其祖先更成功，那么在 $(\mu+\lambda)$ 策略下，进化迄今达到的质量会保持不变；而在 (μ,λ) 策略下，结果则可能再次变差。

自适应进化策略

对于（$\mu+\lambda$）和（μ， λ）策略，除了使用确定性算法（例如1 5成功规则）来调节步长外，还可以通过将标准差向量 σ 纳入进化过程来实现调节 [Mic94]。

遗传算子会作用于向量对（x， σ）的两个部分。该方法分多个阶段进行：首先，通过混合两个个体

$$\begin{aligned}(x^1,\sigma^1) &= ((x_1^1,\ldots,x_n^1),(\sigma_1^1,\ldots,\sigma_n^1))\\ (x^2,\sigma^2) &= ((x_1^2,\ldots,x_n^2),(\sigma_1^2,\ldots,\sigma_n^2))\end{aligned} \tag{5.6}$$

生成一个新的

$$(x',\sigma') = ((x_1^{q_1},\ldots,x_n^{q_n}),(\sigma_1^{q_1},\ldots,\sigma_n^{q_n})) \tag{5.7}$$

，随机选择 ¨个¨，使 $q_i = 1$，2 对所有 $i = 1\ldots n$ 都成立。另一种方法是通过对亲本进行算术平均来生成后代

$$(x',\sigma') = (((x_1^1+x_1^2)/2,\ldots,(x_n^1+x_n^2)/2),((\sigma_1^1+\sigma_1^2)/2,\ldots,(\sigma_n^1+\sigma_n^2)/2)) \tag{5.8}$$

。然后对交叉操作的结果进行变异（x'， σ'），并以

$$\begin{aligned}\sigma'' &= \sigma'\, e^{N(0,\Delta\sigma)}\\ \text{und}\qquad x'' &= x + N(0,\sigma'')\end{aligned} \tag{5.9}$$

应用。 $\Delta\sigma$ 是该方法的一个控制参数。

5.5 遗传算法与进化策略的研究

遗传算法和进化¨策略都会利用现有的解，并由此生成新的潜在解；这些解会相互竞争，并

必须胜过其祖先。¨而传统遗传算法中的个体由二进制数表示，也有一些方法采用实值向量，因此同样适用于数值优化，与进化¨策略一样。主要区别总结于表 5.1。

这两种方法在过去二十年中不断得到发展，并且 ¨也吸收了对方方法中的一些思想。进化¨优化的每种应用都要求针对具体问题进行特别调整。在当今的发展中，遗传算法与进化¨策略之间的界限正变得越来越模糊。

为了优化行人设施以及模型扩展中的策略优化（第 6 章），我们实现了一个进化程序，该程序建立在前述各节的方法基础之上。下面将利用该程序，通过两个示例函数研究各个方法的特性。

5.5.1 进化¨优化的实现

上一节所述的行人设施表示形式，同样使得在实现遗传算法时采用 n 维实值向量 $x \in \mathrm{IR}^n$ 成为可行的选择。其中，每个组件 x_i的有效范围都由一个独立的区间 $u_i \leq x_i \leq l_i$ 确定。

初始种群的个体可以通过两种方式生成：

1. 在整个值域上均匀分布。此时，为每个组件

$$x_i = u_i + (l_i - u_i)\,\mathcal{Z} \tag{5.10}$$

   从值域中分配一个随机数。

2. 边界值分布。一个组件

$$x_i = \begin{cases} u_i & : \quad \mathcal{Z} \leq 0.5 \\ l_i & : \quad \mathcal{Z} > 0.5 \end{cases} \tag{5.11}$$

   取区间的最小值或最大值。

随机数 $\mathcal{Z}$在区间 $[0 \ldots 1]$上服从均匀分布 ¨。示例计算中初始种群的生成分别以50%的比例采用这两种方式。

准则	**遗传算法**	**进化¨策略**
编码	表演 der 个体 通过二进¨制数	通过实值向量进行表演 向量
世代	对于下¨一代 世代— 会选择 μ 个体， 其中强者更有 个体获得良好机会 被多次选中的可能， 另一方面， 最弱者也仍有机会。 以一定概率被选中—— 被选中	生成一个临时基因—— 代，包含 λ 或 $\mu + \lambda$ 个个体—— 体。通过移除 来对种群进行 最弱者重新缩减为 μIn- dividuen。
选择	这些个体首先被 选中，然后交给变异 算子 un- 被选中	通过交叉和变异 算子，首先创建一个 临时¨世代，其 规模为¨大 λ，然后 将 die 最¨强 aus- 选¨择。
控制	Das 优化算法 由..... 变异- 概率 p_m 和 交叉概率 p_c 控制。 Sie 保持 在整个过¨程中 保持不变。	变异步长的 уйғурларға 算子的 步长取决于 σ 向量，该向量也 可能受到进化过程的 影响
无效个体	如果通过繁殖 生成了一个个体， 而该个体不满足 问题的边界条件¨，则可以 对其进行修复， wer- 或者通过惩罚项进行 被评价函数 淘汰	无效的 个体 der 暂时的世代中被 丢弃。如果生成的 繁殖算子使 过多 的无效个体 个体， 必须调整控制参数 米调整。

表 5.1： 遗传算法与进化策略经典方法之间的差异

新一代个体的繁殖包括根据适应度选择亲本并生成后代。为此实现了四种不同的方法，以下分别称为遗传算法的标准版本、遗传算法的 Plus 版本，以及 (μ， λ)-和 (μ+λ)-进化策略。

个体 k 按照一定的概率进行选择

$$p_k = \frac{f(x_k)^\tau}{\sum_{k'=1}^{\mu} f(x_{k'})^\tau} \tag{5.12}$$

该概率取决于个体的适应度 $f(x_k)$ 和指数 τ。因此，同一个体也可能被选中多次。在遗传算法的 Plus 版本中，选择范围涵盖连续两代。与此类似，在 (μ+λ)-进化策略中，祖先种群和中间代的全部个体中适应度最高的 μ个体得以存活。

遗传算法实现中的交叉算子会确定一个随机索引 i_c，并在该处拆分两个基因 x 和 y。新个体

$$\begin{aligned} x' &= (x_1, \ldots, x_{i_c}, y_{i_c+1}, \ldots, y_n) \\ y' &= (y_1, \ldots, y_{i_c}, x_{i_c+1}, \ldots, x_n) \end{aligned} \tag{5.13}$$

由交换后的部分组成。交叉算子作用于两个基因的概率 p_c 在进化过程中保持不变。

随后，以概率 p_m 对基因进行变异。为此，变异算子会确定一个随机索引 i_m，并将一个随机值赋给该索引处的组件：

$$x'' = \left(x'_1, \ldots, x'_{i_m-1}, u_{i_m} + (l_{i_m} - u_{i_m})\, \mathcal{Z}, x'_{i_m+1}, \ldots, x'_n\right) \tag{5.14}$$

在进化过程中，p_m 也保持不变。

在进化策略的实现中，个体由一对向量构成（x， σ）。按照第 5.4 节中的学习策略，繁殖通过式（5.7）中的交叉算子和式（5.9）中的变异算子进行。与遗传算法不同，进化策略将这些算子应用于所有个体。

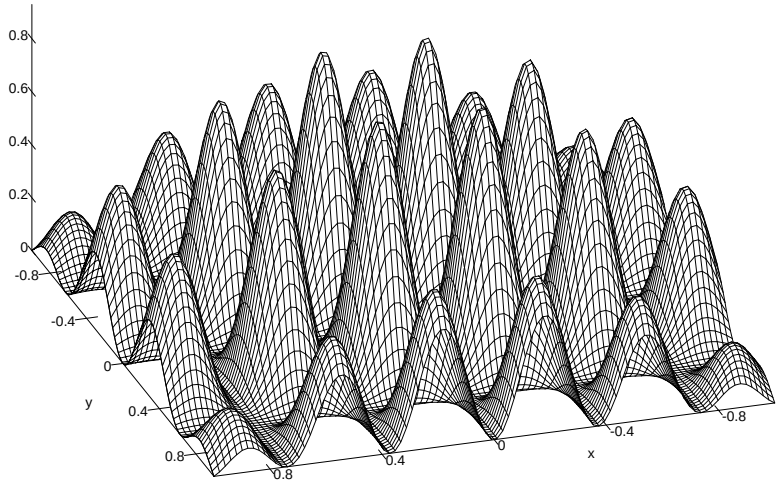


图 5.3： 式（5.16）中的评价函数，其最大值是待求目标。该表演给出了一个二维截面，其中 $\mathrm{x} = x_1$ 和 $\mathrm{y} = x_2$ f¨ur $x_3 = x_4 = x_5 = 0$。

5.5.2 进化¨优化示例

根据这两个测试函数

$$f(x) = \frac{1}{5}(5 - {x_1}^{\mathbf{2}} - {x_2}^{\mathbf{2}} - {x_3}^{\mathbf{2}} - {x_4}^{\mathbf{2}} - {x_5}^{\mathbf{2}}) \tag{5.15}$$

und

$$\begin{aligned} g(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) &= \frac{1}{5}\left(5 - \sum_{i=1}^{5} {x_i}^{\mathbf{2}}\right) \cdot \frac{1}{2}\left(\cos\left(17x_1\right) + 1\right) \\ &\cdot \frac{1}{2}\left(\cos\left(12x_2\right) + 1\right) \cdot \frac{1}{2}\left(\cos\left(23x_3\right) + 1\right) \\ &\cdot \frac{1}{2}\left(\cos\left(6x_4\right) + 1\right) \cdot \frac{1}{2}\left(\cos\left(15x_5\right) + 1\right) \end{aligned} \tag{5.16}$$

研究了进化¨优化的实现。两个函数的最大值都位于 $x_i = 0$处，f¨ur $i = 1 \ldots 5$，最大值为 1。函数 g 还包含多个局部极大值，这使优化更加困难（参见图 5.3）。

针对不同版本使用不同参数进行了优化，并确定了截至目前测试的个体总数。

95% 最大适应度所需测试的个体总数。最迟在二十个世代后，进程便会终止。

为研究遗传算法，将算子概率p_c 和 p_m 以每次.1 的步长从 0 变动到 1。其他参数被赋予值$\mu = 2$，4， 10，10 和 $\tau = 0.5$， 1，2。

在优化抛物线函数 f 时¨，标准版本和加号版本在许多参数组合下所需的个体数都不超过二十个。加号版本略胜一筹，因为它保留了优于新解的旧解。面对只有一个极值的简单测试函数 f，它能够发挥这一优势；相比之下，标准版本对局部最优更加不敏感。

在优化 g 时，标准版本至少需要 3400 个体。加号版本在最佳情况下仅凭两百个体就已取得成功。值得注意的是，对于所有达到 95% 阈值的参数组合，应用交叉算子 p_c f¨的概率降为零。因此，进化¨程序相较于其他数值方法的优势——继续使用成功解的片¨段，并在解之间进行交换——并未得到发挥。

为了研究进化策略（μ， λ）和（$\mu+\lambda$），我们尝试使用以下参数优化两个测试函数 f 和 g： $\mu = 1$，5，10，20，100，$\lambda = 1$，5，10，20，100， $\tau = 0$，1，2 和 $\Delta\sigma = 0.1$，0。5，1，2。取得的成果与遗传算法相当。优化函数 g ben¨时，（μ， λ）策略需要较大的子代规模 λ，因为它更频繁地生成无效个体。这里也表明，在这个问题上，（μ+λ）策略优于（μ， λ）策略。

不过，对两个示例函数进行的优化实验并未得出关于特定参数组合的可靠建议。进化优化的两种方法——遗传算法和进化策略——取得了同样好的效果。

由于行人设施优化过程中最耗时的部分是通过交通仿真确定适应度，因此应选择一种只需相对较少个体的进化算法。在这方面，遗传算法的 Plus 版本和（$\mu+\lambda$）进化策略相比另外两种实现似乎更有前景。

第6章

社会力模型的扩展

行人的行为可以从不同复杂程度的层次加以考察。行人通过行走运动抵达目的地，这为进一步的建模层次奠定了基础。

例如，行人动力学的社会力模型之上还可以建立目标选择决策模型，下一节将对此进行介绍。

各层次的模型状态相互依存：例如，行走运动会引发对目标方向的选择。反过来，决策过程的结果又会确定新的目标方向。

微观模型（如行人模型）可以扩展，纳入几乎任意数量的复杂行为规则。不过，这里不再进一步讨论这些所谓的多智能体模型。

6.1 决策模型

如第4.3.3节所述，可以扩展社会力模型，使其包含一个决策模型，让行人能够在不同的通道之间进行选择。

决策过程可以通过时间点或空间来指定：

- 即时决策是在出现备选方案时作出的，例如在设有多扇门的入口处。如果这些决策不会引发后续决策，那么只需根据当前状况选择一个备选方案。双通道的例子便是如此：行人选择一条通道进入下一个空间。他们后续的行进路径不受先前决策的影响。在行人模型中，决策过程通过下文所述的多项Logit方法来实现。

- 如果在路径起点能够获得关于系统的（近乎）完整信息，就可以预先确定路线。第7章将介绍一种方法，用于确定行人路线选择所造成的路径系统路段负荷。

- 通常，定期行走的路线也会在路径起点选定。决策过程则会随着路径的反复使用而持续进行。路线选择基于以往决策的经验值。这类决策过程可以通过进化方法（参见6.2、5）以及其他具有学习能力的系统[1] 来实现。

决策标准包括:

- 路径长度与预期体力消耗
- 行人流量
- 路径状况

这些评估判据被归纳为一个主观长度（参见第 4.4.1 节）。另一个量是预期时长，即行人计划用来走完这段线段的时间。

在仿真中，个体根据当前状况，以一定的概率作出决策。决策行为可通过多项Logit模型 [DM75] 描述。其中，行人作出决策 ¨的概率为

$$p_{j\leftarrow i} = \frac{e^{(U_j - U_i - S_{j\leftarrow i}\delta_{ij})/\xi}}{\sum_{j'} e^{(U_j - U_i - S_{j\leftarrow i}\delta_{ij})/\xi}} = \frac{e^{(U_j - S_{j\leftarrow i}\delta_{ij})/\xi}}{\sum_{j'} e^{(U_j - S_{j\leftarrow i}\delta_{ij})/\xi}} \tag{6.1}$$

[1]有关可学习系统的详细概述见 STARKE in [Sta94]

该概率由备选方案 j 和 i 的效用函数 U_j 和 U_i 以及切换时产生的损失 $S_{j\leftarrow i}$ 定义。参数 ξ 表示个体选择较差备选方案的意愿。克罗内克符号 δ_{ij} 满足： $\delta_{ij} = 1$适用于 $i = j$ ，其他情况均为 $\delta_{ij} = 0$ 。

在 4.3.3 中两个通道的示例里，效用由通过两扇门之一所需的有效时间 $T_{\alpha j}$ 来定义。每次切换都会产生延迟时间 ΔT，在模型中，对于所有备选方案，这一时间都相同。对于所有 i, j，根据效用函数 $U_j = -T_{\alpha j}$和损失 $S_{j\leftarrow i} = \Delta T$，从通道 i 切换到 j 的概率为

$$p_{j\leftarrow i} = \frac{e^{-(T_{\alpha j}+\Delta T\delta_{ij})/\xi_\alpha}}{\sum_{j'} e^{-(T_{\alpha j'}+\Delta T\delta_{ij'})/\xi_\alpha}} \tag{6.2}$$

其定义如下。有效时间由预计到达通道和通过通道所需的时间组成。

$$T_{\alpha j} = \underbrace{\frac{l_{\alpha j} - \Delta l_j}{v_\alpha^0}}_{\text{Zeit zum Erreichen}} + \underbrace{\frac{\Delta l_j}{v_j}}_{\text{Zeit zum Passieren}} \tag{6.3}$$

其中， $l_{\alpha j}$ 表示行人¨到通道 j的当前距离。通道处的行人流量用通道速度 v_j 描述。该速度根据此时通道周围半径为 Δl_j 的范围内行人的平均速度 $\langle v\rangle_j$得出。

如果通道周围区域畅通，则将行人¨的期望速度¨ v_j v_α^0 作为假设值。否则，

$$v_j = \begin{cases} v_{\min} & : \quad \langle v\rangle_j \le 0 \\ \langle v\rangle_j & : \quad 0 < \langle v\rangle_j \le v_\alpha^0 \\ v_\alpha^0 & : \quad \langle v\rangle_j > v_\alpha^0 \end{cases} \tag{6.4}$$

mit

$$\langle v\rangle_j = \frac{1}{N_j} \sum_{\alpha'\in\{\alpha'|l_{\alpha' j}\le\Delta l_j\}} \vec{v}_{\alpha'}\,\vec{e}_{\alpha j} \tag{6.5}$$

单位向量 $\vec{e}_{\alpha j}$ 表示 α 的通行方向。通道速度 v_j 受期望速度的上限约束。为避免通道时间无限延长，引入下限 $v_{\min}$¨。 $v_{\min}$ 的值越高，选择人流密集通道的可能性也越大。

参数 $v_{\min}$、 ξ_α和 ΔT 表示行人的决策策略。由于这些参数并非可测量的量，因此难以根据经验数据确定。

假设行人能够根据自身经验制定出最优策略，那么可以让参数经历一个进化过程，该过程将在下一节中介绍。

6.2 行为策略的进化

行人能够通过不断重新评估并反复尝试，改进自己的运动和避让行为。因此，可以假设他们会根据自身经验，在行人交通中形成最优行为。建模时，可以通过让模型参数经历进化优化过程，来模拟这些能力。

代表行人运动与决策行为的部分模型参数，可以在进化过程中进行优化。其他参数则作为特性，在整个仿真时长内保持不变。

可变参数包括社会力模型（第4.1节）中的势参数和决策模型（第6.1节）中的策略参数，其中必须遵守第4.2节中为修改后的参数所确定的关系。行人的一个属性可以假定为其期望速度。行走方向、目的地或出行目的则构成了其他可能性。

对于参数优化，可以对第5章中介绍的进化原理进行适当修改后加以采用。待优化参数的集合代表进化算法中的一个潜在解。与通常的方法不同，除了适应度之外，还为每个解赋予一个属性。

这种进化算法不划分世代。新的潜在解，即所谓的后代，会在每位行人的行程开始时生成。行人到达目的地后，会根据第4.4节中的个体性能指标$Y_\alpha^1 \dots Y_\alpha^5$进行评价。此外，评价后的解会被赋予行人的特性。随后，参数组可用于繁殖新的潜在解。

在仿真中会生成一定数量的行人，在整个仿真期间数量保持不变。行人通过系统后，会从初始位置重新出发。其特性保持不变。

每当一名行人开始行进时，都会从收集到的解中生成一个新的参数组。与式 (5.12) 中的繁殖概率类似，解以如下概率

$$p_{\alpha k} = \frac{c_{\alpha k}\, f_k^{\tau}}{\sum_{k'=1}^{\mu} c_{\alpha k'}\, f_{k'}^{\tau}} \tag{6.6}$$

被选中进行繁殖。该定义不仅考虑适应度，还考虑潜在解与新行人预先给定的特性之间的匹配程度。特性的一致性可以通过

$$c_{\alpha k} = \exp\left(-\frac{\sqrt{(v_k^0 - v_\alpha^0)^{\mathbf{2}}}}{\omega}\right) \tag{6.7}$$

¨表示。对于相同的期望速度，匹配度最大。通过 ω 确定容差范围。然后按照第 5.5.1节应用交叉算子和变异算子来生成新的参数组。

行人的特性使得具有相同特性的解更有可能进行繁殖。这类似于自然界中由同一物种的个体组成的组，它们栖息在地理位置不同的栖息地中。由于同一栖息地内个体之间的繁殖比不同地区个体之间的繁殖更有可能，因此不同的亚种可以在不同的栖息地中进化出来。在行人行为策略进化模型中，这意味着行动缓慢和快速的行人将形成不同的行为策略。如果特性由离散量给出，例如运动方向，那么只有具有完全相同特性的解才能相互组合。

第7章

路径网络

在较大的行人设施中，行人的目标点通常不在其起始位置的视线范围内。人们会选择中间目标，并首先前往这些目标。熟悉该设施的行人对连接路径及其性质有准确的认识。依据这些认知地图进行路径选择 [DS82] 时，不仅会考虑路段长度或费力程度等判据，还会考虑其他主观感受，而这些感受往往也受各路段区段行人流量的影响（参见第2.2节和第4.4节）。

各区段的行人流量取决于入口点的产生率、目标节点的吸引力，以及行人所走的路径。为了确定路径系统中各条路段上的行人流量，可以使用搜索算法，针对所有起点—终点节点对，找出行人根据个人评价判据会选择的路径。随后，根据各路段区段在所选路径中出现的情况，为其赋予相应的负荷频率。

这样一来，仅根据行人流量、行人的需求以及行人设施各个部分的特性，就能发现由路段或通道过载所引发的问题。人流特别密集、因而对商业空间具有吸引力的地点也会因此显现出来。

设施的子路段负载 ¨也会改变其性能特征，进而影响使用各条路径的概率¨。对于路网的边，可以引入一种主观长度¨，用以考虑路径特征在行人流量方面的行为¨（参见第¨4.4.1节）。

对于行人来说，穿过拥挤的人群通常比绕道走侧街耗时更长。

根据网络的路段负荷，利用主观长度可以反复计算（主观上的）最短路径和路段负荷，直到可能达到平衡。

为了仿真大型设施中的行人流，可以将系统划分为若干子路段，其特征特性根据行人流量和组成，通过社会力模型的微观仿真（第4章）确定。

7.1 将行人设施表示为网络

将行人设施视为网络时，建筑物的性质被简化为地点与连接通道关系。该表示通过一个图 $G(V, E)$实现，其中包含 V 个节点和 E 条边。对于节点和边的解释，这里提出三种可能性：

对行人设施的简单表演（图7.1）将交叉口视为（网络）节点，将道路或走廊视为（网络）边。这样处理忽略了行人交通的二维特征以及交叉口的形状。因此，这种表演只能应用于各点之间具有较长连接路径的系统。

在图7.2所示的表演中，走廊通过门（参见9.1）被分隔成各个路段。这些能够容纳一定数量行人的路段被视为网络节点。实现路段之间转换的门构成边。这种表演例如用于排队模型（参见第2.3.2节）。x 第三种表演方式（图7.3）是将门视为网络节点。它们还作为（中间）目的地，用于行人定向。所有与同一路段相邻的门彼此相连，因为被围住的交通区域正是通往所有这些门的通道。因此，一个交叉口的区域会被多条网络边穿过。

一个路段的所有边受到的行人流量影响相同，因此在确定边负荷时将其视为一个整体。

以下各节讨论的研究既涉及将路径系统视为简单图，也涉及采用上文最新介绍的方式进行考察。

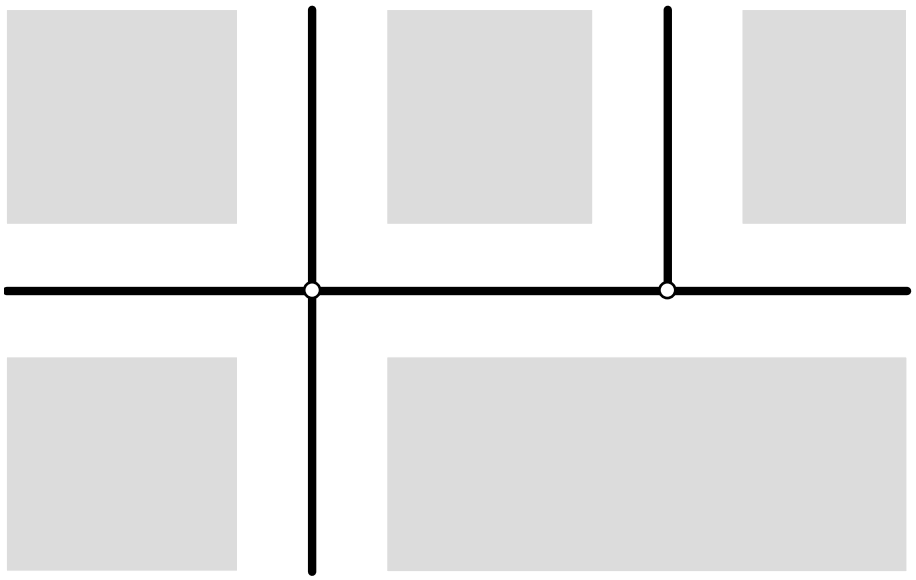


图7.1： 行人设施的简单网络表示。各个交叉口表示为节点（白色点），连接通道表示为边（粗条）。

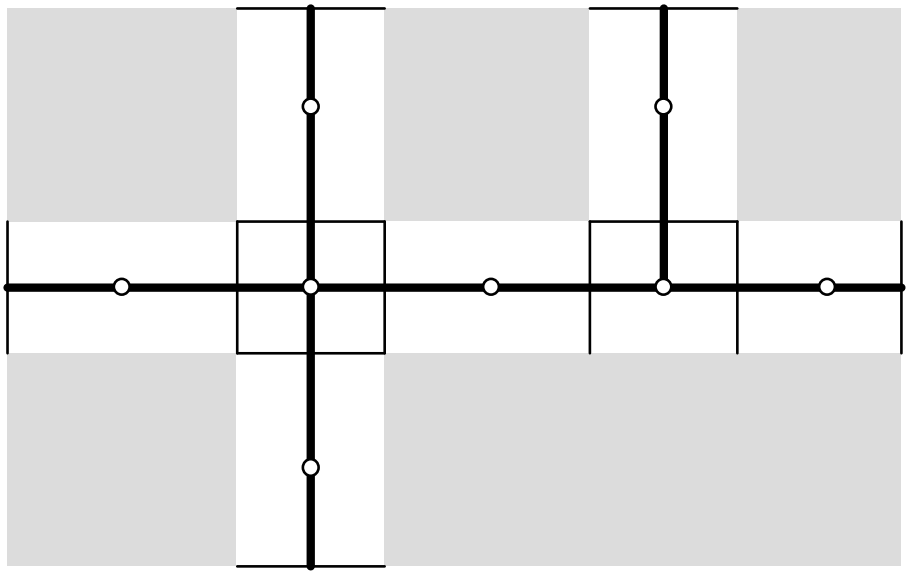


图7.2： 行人设施由门（细线）划分为各个区段，行人在其中停留。区段构成网络的节点，接口（门）则构成网络的连接边。这种表示用于排队模型（参见第2.3.2节）。

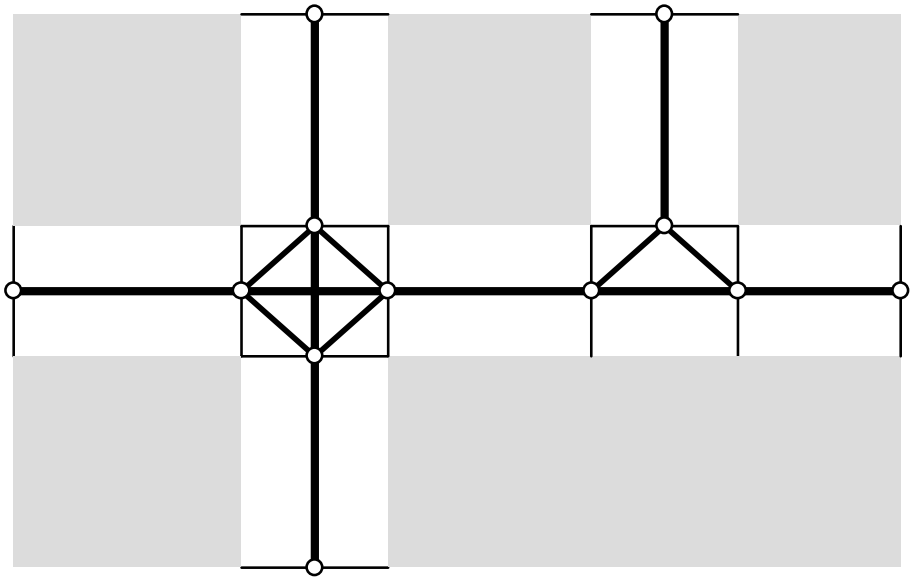


图 7.3： 与排队模型中的表演（图 7.2）相比，行人流模型将区段之间的接口视为定向点，因此也将其视为网络节点。多条连接边可以穿过一个空间路段。

7.2 路径网络中的路段负荷

路径网络中各路段的负荷，取决于从某一点前往另一点的行人数量，以及他们选择的路线。通常，行人会选择通往目的地的最短路径；但如果路段性质不佳，或行人流量较大，他们也愿意绕行。因此，最短路径指的是主观感知的长度。

负载频率定义为一条边在所有最短路径中出现的频率（a, b），乘以从 a走到 b 的行人数值 $N_{a,b}$ 。这一与出行总数无关的量 F_i 称为负载频率

$$F_i = \frac{\sum_{a=1}^{V}\sum_{b=1}^{V} N_{(a,b)}\,\delta_{i\in(a,b)}}{\sum_{a=1}^{V}\sum_{b=1}^{V} N_{(a,b)}} \tag{7.1}$$

mit

$$\delta_{i\in(a,b)} = \begin{cases} 1 & : \text{ Kante } i \text{ ist ein Teil des kürzesten Weges ist} \\ 0 & : \text{ sonst} \end{cases} \tag{7.2}$$

称为。

```
for (a=1; a<=V; a++)
  for (b=1; b<=V; b++)
    if (M[a][b] < Infinity)
      for (c=1; c<=V; c++)
        if (M[a][b] + M[b][c] < M[a][c]) M[a][c] = M[a][b] + M[b][c];
```

图 7.4： 用于确定图中每一对节点之间最短路径的 Warshall-Floyd 算法仅由三个嵌套的 for 循环组成。两个外层循环遍历所有节点。如果存在一条从 a 到 b 的路径，即 M[a][b] $< \infty$，则会检查 b 与 c 之间的所有路径，看它们是否构成从 a 到 c的更短路径。

7.2.1 最短路径的确定

一种非常简洁的确定从节点 a到 b的最短路径的方法，建立在一种确定图中所有成对连接的方法之上，该方法由 Warshall 引入。这里利用了以下事实：

> “如果存在一条从节点 a 到 b 的路径，也存在一条从 b到 c 的路径，那么也存在一条从 a 到 c的路径。”

这一点还可以进一步严格表述，从而能够在一次遍历中计算图中所有成对连接。为此，将各节点排成一列并编上索引。具体如下：

> “如果存在一条从 a 到 b 的路径，其上只经过索引小于 b 的节点；并且存在一条从 b到 c的路径，那么也存在一条从 a到 c的路径，其上只经过索引小于 $b+1$ 的节点。”

这一针对拓扑图得出的观察也适用于度量有向图。

> “从一个节点 a 到另一个节点 c、且只经过索引小于 $b+1$ 的节点的最短路径，要么是仅使用索引为 b的节点从 a到 c 的最短路径，要么（如果后一条更短）是从 a 到 b 的最短路径加上从 b 到 c的距离。”

由此可以得出一种用于确定网络中所有两两最短连接的算法，该算法通常归因于¨。区别

仅在于比较查询：“是否存在连接？”用于 WARSHALL，以及“该连接是否更短？”用于¨（见图 7.4）。以下称为 Warshall-Floyd 的算法用 FLOYD (¨) 步解决该问题，也就是说，三个相互嵌套的循环各自最多执行 O 次。

除了距离矩阵（M_{ab}）$V\times V$记录的从 a 到b 的路径长度外，还引入了路径矩阵（R_{ab}）$V\times V$。从 a 到 b 的一条路径上，下一个要经过的节点是 R_{ab}。由这些条件的传递性可知：从 a 到 b 的最短路径经过 R_{ab}，而从 R_{ab} ¨出发则经过 R_{Rabb}，依此类推。这样，所有节点对在（R_{ab}）$V\times V$ 中的最短路径及其在（M_{ab}）$V\times V$ 中的长度都得到了记录。

Warshall-Floyd 算法的方法保证不存在比所求解更短的路径。但是，如果一个图中包含多条长度相同的边，则解并不唯一。

与 DIJKSTRA、 PRIM或 KRUSKAL的其他算法相比，该算法具有实现简单、在稠密图（即 $E > V$）中效率高的特点，参见 [Sed92][Kru56]。

7.2.2 使用频率的分布

边的使用频率分布反映了路网在连接路径负载方面的质量。

在以下计算中，假定起点和目标节点均匀分布，并从网络的每个 V 节点分别向其他 $V-1$ 节点发送一名行人。由此对所有节点对 $N_{(a,b)} = 1$作出假设。

类似于帕累托分布——该分布由 PARETO 提出，用于比较收入者与收入之间的关系¨，见 [Gab93],——将网络的边按照其使用频率进行排序，并绘制边的序号 z_i与其使用频率¨之间的关系 F_i。在（自然）网络中，使用频率的分布通常呈现指数分布函数的形式。

$$z_i = k\ \exp(-F_i/\alpha) \qquad i = 1 \ldots E \tag{7.3}$$

与边的数量 E 有关。分布向高频率下降得越陡，网络中各路段的负载分布就越均匀。

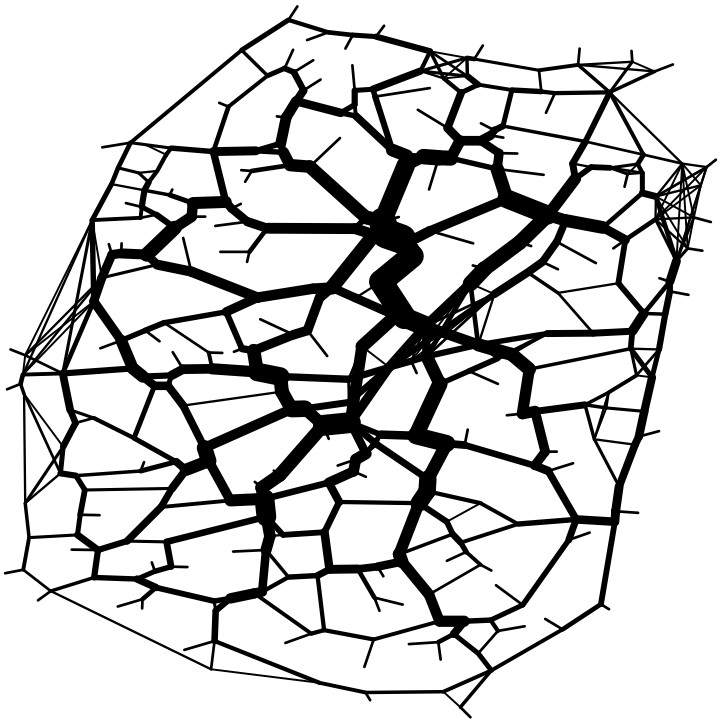


图 7.5：该网络表示意大利城市 Martina Franca。边出现在成对最短路径上的频率以线条粗细表示。

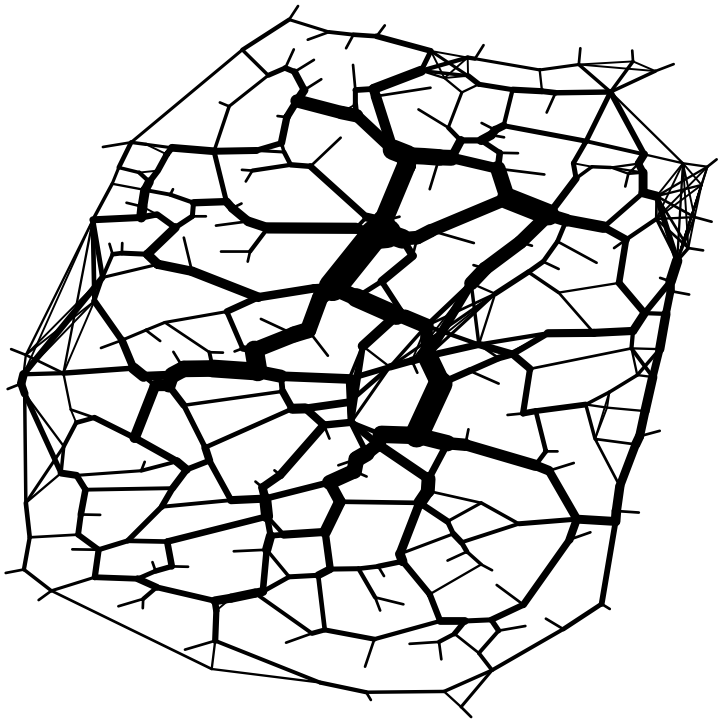


图 7.6：Random-Warshall-Floyd-算法迭代 20 次后的使用频率。边长被划分为 15% 的类别。因此，长度差异较小的路线会承受相同程度的负载（参见第 7.2.3 节，第 106 页）。

帕累托分布

$$z_i = k' F_i^{-\alpha'} \qquad i = 1 \ldots E \tag{7.4}$$

与指数分布相比，帕累托分布对使用频率的描述较差（参见图 7.10）。然而，通过对使用频率 F_i =exp(F_i) 进行变换¨，可以将式（7.3）转化为帕累托分布（7.4）。

分布函数的参数 α 和 k，以及 α' 和 k'，可以通过线性回归法 [PTVF92，第 15] 章（参见 4.4.6 ）确定：为此，对式（ 7.3 ）或（ 7.4 ）的两边取自然对数。引入新变量 $\tilde{z}_i = \ln z_i$ 和 $k = \ln k$ 后，指数分布可转化为直线方程

$$\tilde{z}_i = \tilde{k} - \alpha F_i \tag{7.5}$$

˜为了确定帕累托分布的系数，还必须引入 $F_i = \ln F_i$ ：

$$\tilde{z}_i = \tilde{k} - \alpha \tilde{F}_i \tag{7.6}$$

根据平方误差最小化的必要条件

$$\chi^2(\alpha, \tilde{k}) = \sum_{i=1}^{E} \left(\tilde{z}_i - \tilde{k} + \alpha \tilde{F}_i \right)^2 \tag{7.7}$$

$$\begin{aligned} 0 &\stackrel{!}{=} \frac{\partial \chi^2}{\partial \tilde{k}} = -2 \sum_{i=1}^{E} \left(\tilde{z}_i - \tilde{k} + \alpha \tilde{F}_i \right) \\ 0 &\stackrel{!}{=} \frac{\partial \chi^2}{\partial \alpha} = 2 \sum_{i=1}^{E} \tilde{F}_i \left(\tilde{z}_i - \tilde{k} + \alpha \tilde{F}_i \right) \end{aligned} \tag{7.8}$$

˜参数 α 和 k 由下式给出

$$\begin{aligned} \tilde{k} &= \frac{\left(\sum_{i=1}^{E} F_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^{E} \tilde{z}_i \right) - \left(\sum_{i=1}^{E} F_i \right) \left(\sum_{i=1}^{E} F_i \tilde{z}_i \right)}{E \sum_{i=1}^{E} F_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{E} F_i \right)^2} \\ \alpha &= \frac{E \sum_{i=1}^{E} F_i \tilde{z}_i - \left(\sum_{i=1}^{E} F_i \right) \left(\sum_{i=1}^{E} \tilde{z}_i \right)}{E \left(\sum_{i=1}^{E} F_i \right)^2 - \sum_{i=1}^{E} F_i^2} \end{aligned} \tag{7.9}$$

˜ ˜已确定。应将 F¨ur α' 和 $k' = \ln k'$ 替换为 F_i 通过 F_i 。

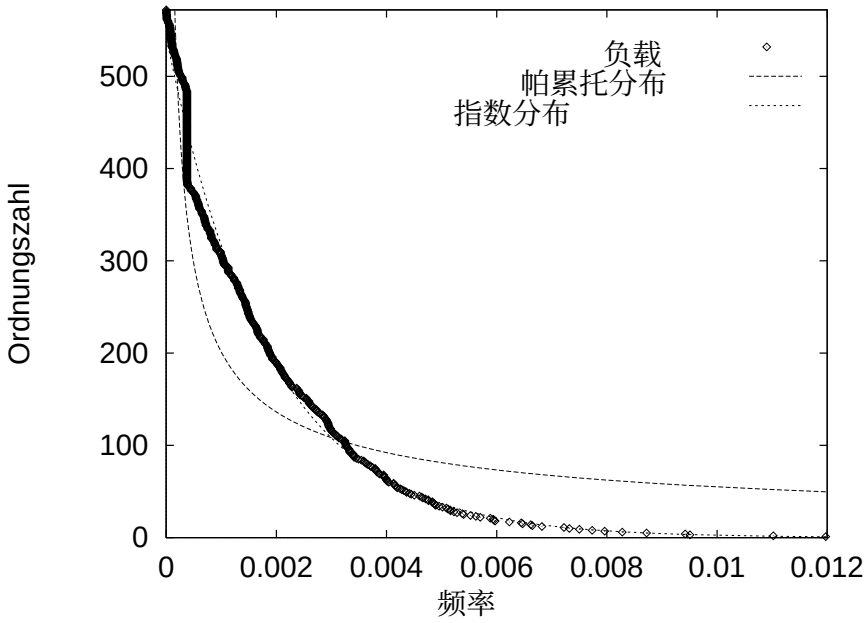


图 7.7： Martina Franca 的路段负荷分布。边的序号 z_i 按照负载频率 F_i 绘制于 ¨上。符号表示通过简单 Warshall-Floyd 算法确定的频率。拟合的分布函数以线条表示。虽然指数函数与分布¨吻合良好，但帕累托分布无法充分反映使用频率与序号之间的关系。

7.2.3 随机 Warshall-Floyd 算法

均匀的网络，例如图 7.8 所示的方形网格，清楚地揭示了 Warshall-Floyd 算法的薄弱之处：如果从节点 a到 b存在多条等长路径，则每次都会选择按照节点编号最先出现的那条连接。在运输路径系统中，等效连接也会按相同比例分担负载，而该算法只会将等长路段中的第一条以满负载计入，其他路段则不予计入。

这一点在图 7.8 左上方清晰可见：下方的水平边负载极重。路径系统在水平方向、垂直方向以及两条对角线上呈现的对称性，也应体现在负载频率的分布中（参见图 7.8 右下方）。

为了寻找更短的连接路径，该算法处理 Kno-

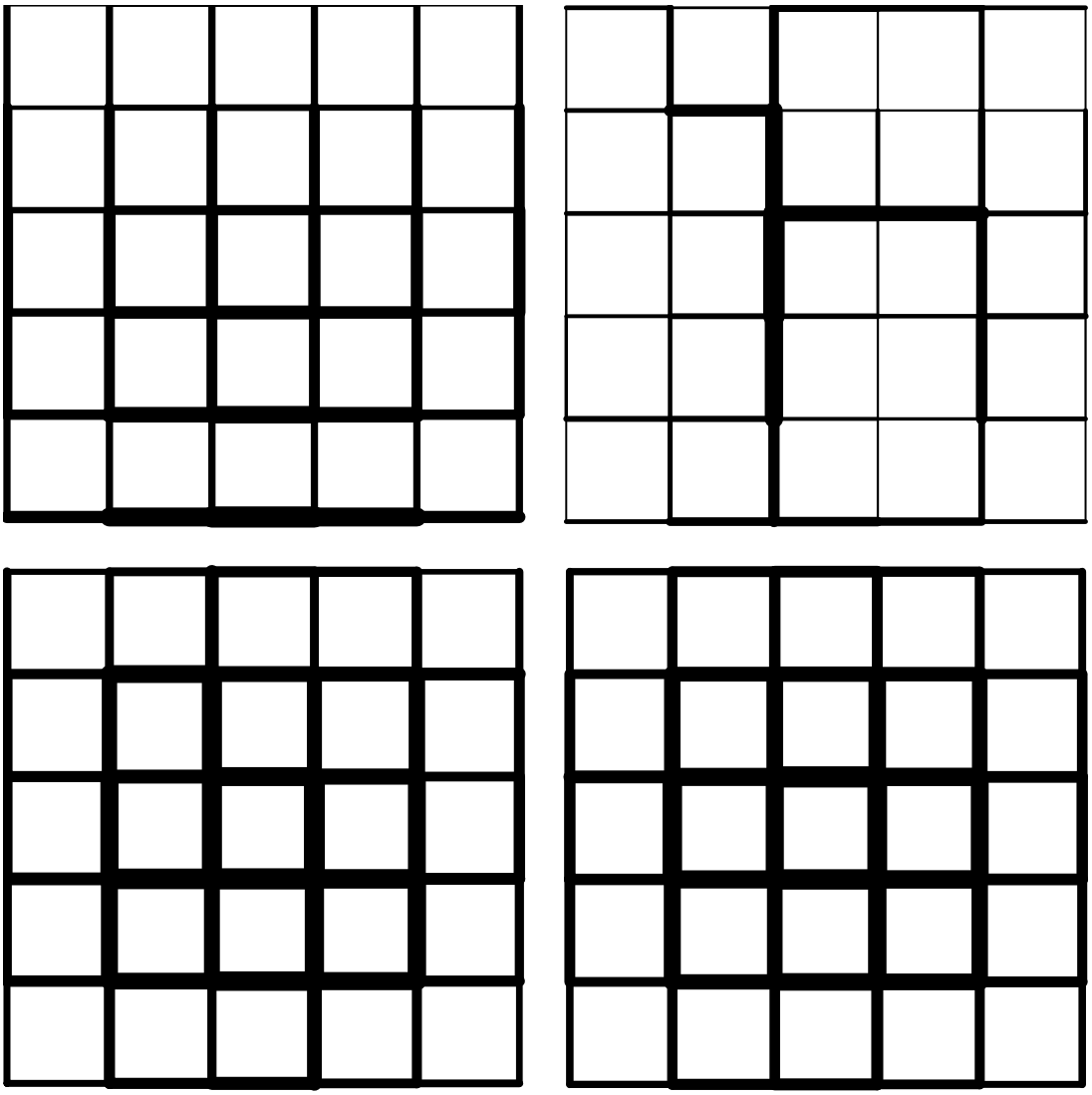


图 7.8： 平方网络。上方图示展示了运行一次简单 Warshall-Floyd 算法后的边负载。在右侧所示的计算中，节点在连接路径上的检查顺序由随机数生成器产生。下方图示展示了运行随机 Warshall-Floyd 算法 20 次（左侧）和 100 次（右侧）后的结果。

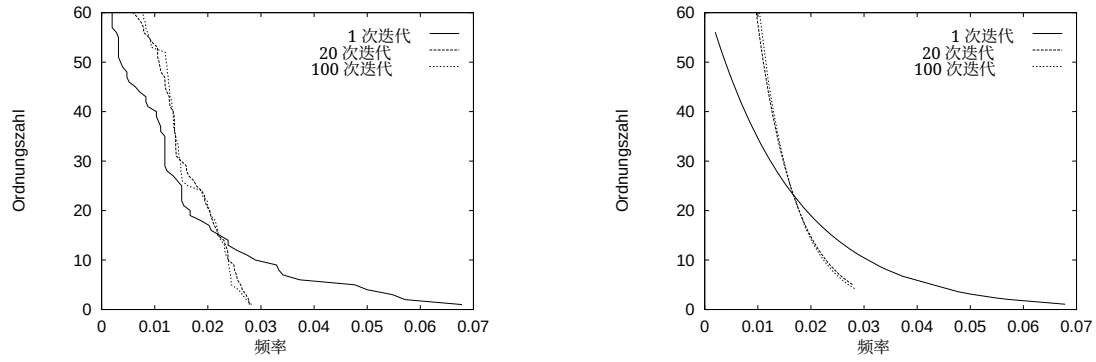


图 7.9： 简单 Warshall-Floyd 算法和 Random-Warshall-Floyd 算法在运行 20 次和 100 次时，方形网格的负荷分布（左侧）和指数分布函数（右侧）。仅经过 20 次迭代后，分布函数几乎没有变化。Random-Warshall-Floyd 算法产生的分布整体上更宽、更均匀。它更接近 S 形曲线，而非指数形式。

按特定顺序遍历图的边。若任意改变这一顺序，就会产生新的边负载分布（参见图 7.8 右上）。

通过一个技巧可以修正这一伪影：

> “Warshall-Floyd 算法会连续多次应用于随机编号的节点。使用频率在此过程中针对每条边，在所有迭代中进行累加。”

该随机 Warshall-Floyd 算法确保每条长度相同的路段都有一定概率在搜索顺序中位列第一。以不同编号重复执行的次数越多，路段负荷分布就越均匀。算法每次迭代的进展可以通过误差函数 t

$$\epsilon_t = \sum_{i=1}^{E} \frac{\Delta F_i^{t-1}}{F_i^{t-1}} - \sum_{i=1}^{E} \frac{\Delta F_i^t}{F_i^t} \tag{7.10}$$

可以将其作为随机 Warshall-Floyd 算法的终止条件。图 7.8 显示了经过 20 次（左侧）和 100 次（右侧）迭代后的负载。尽管边厚度的差异仍然清晰可见，但经过 20 次迭代后，边负荷的指数分布函数几乎没有变化（参见图 7.9）。

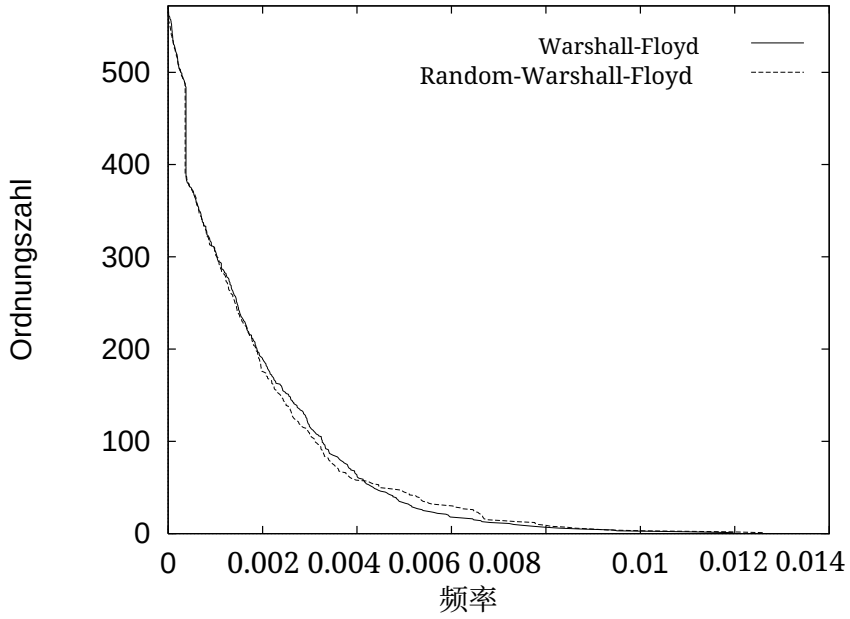


图7.10： Martina Franca 的负荷分布。对比之下，采用简单 Warshall-Floyd 算法，使用指数分布系数 α =538。05 进行计算 $k = 542.90$(实线)，以及采用随机 Warshall-Floyd 算法进行计算（虚线），其中参数为 $\alpha = 508.23$ 和 $k = 515.33$。差异在排名靠前的位置尤为明显。随机 Warshall-Floyd 算法得到的分布中，使用频繁的边分布得更加均匀。

在自然网络中，例如 Martina Franca 的路径系统，长度完全相同的边很少出现。不过，由于行人对距离的主观感受允许存在高达 15% 的容差，即使在这类路径系统中，长度相近的路段也会以相似的频率被使用。为确定这些网络中的负载，需要按照特定长度将边划分类别。同一类别中的边被视为等长，因此在重复应用算法时，其负载也会大致均匀。为避免长度划分类别对结果造成影响，应采用不同的类别边界进行这一过程。

将 Martina Franca 路径系统的边划分为 15% 的类后，经过随机 Warshall-Floyd 算法的 20 次迭代，负载在使用频率较高的道路上分布得更加均匀。图7.5和图7.6的对比清楚地显示了不同路段的负载情况。两种情况下的负荷分布如图7.10所示。

Hil 和 Nag 提出了其他用于处理网络中长度相近路段的方法。除可通过 Warshall-Floyd、 Deijkstra-Prim 或 Kruskal 求得的最短路径外，还会考虑从起始节点出发的其他边。在确定路径长度时，假设行人沿这些边前行，随后继续沿通往目的地的最短路径行走。负载则根据长度比例分配到各条边上。

第 8 章

踩踏小径的形成

与上一章讨论的路径网络不同，自然界中常见的路径系统会在网络总长度与路径路段所需的（材料）投入之间取得折中。我们称之为最小绕行，因为任意两个节点之间的路径可能比它们之间的直接连接更长。然而，所有线段的总和仍短于完全图的总长度；在完全图中，每个节点到其他任一节点都有一条直接路径 [Ott91]。

自然界中的许多运输系统都具有这种形式。例如，闪电中的放电、植物的供应系统，以及动物和人类的交通网络都属于此类。所有这些系统的形成原因都相同：对于需要运输的粒子，或想要走到目标节点的个体来说，使用现有的行人流道比自行开辟路径更容易，也就是更省力。正是这种差异，使它们愿意绕行。

最小绕行路径系统在人行设施中也备受关注，因为一方面应提供足够数量的连接路径，另一方面又不能让人行道将设施的整个区域切割开来。与连接路径总长度尽可能短的网络骨架相比，最小绕行路径系统更能满足行人交通的需求。

而将一个完全图稀疏化为骨架，可通过搜索算法实现¨（Sed92，第 423 页及以下）¨；相比之下，构造具有最小绕行的系统则更为复杂：它们是通过合并彼此邻近的连接而形成的。与构造骨架不同，这一过程中必须向网络中插入额外的节点。¨

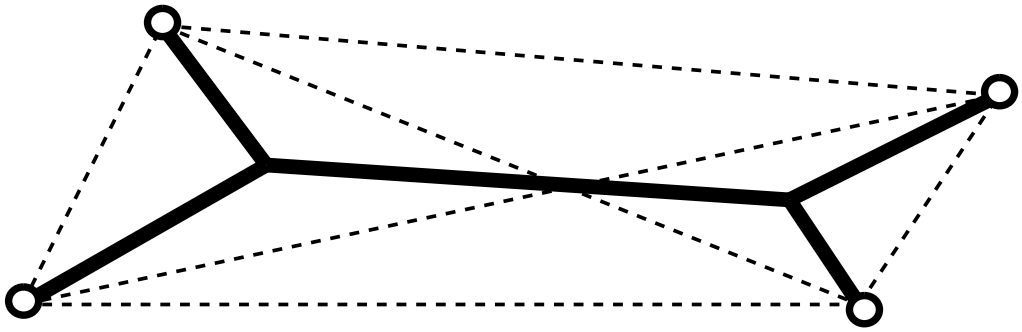


图 8.1： 具有四个节点（粗线）的最小绕行系统示意图。在天然系统中，分叉处呈弯曲走向。虚线表示用于比较的直接路径系统。

系统的总长度通过共用连接得以缩短。但在两个节点之间采用单独连接时，则需要接受较长的路径。图 8.1 示意性地展示了一个包含四个节点的最小绕行系统。

此类路径系统的构造可以通过一种非常费力的机械线绳模型来完成 [Kol91]：具体做法是，用棉花或天然丝绸制成的线绳连接模型中路径系统的各个节点，线绳长度大于固定点之间的距离。线绳多出的长度对应于允许的绕行最大长度。将线绳润湿后，它们会聚拢并相互粘连。由此形成的结构即使干燥后仍能保持牢固。

在仿真中，可以由行人自身生成符合其需求的路径系统。正如第2.1节中所述，对于行人来说，使用现有小径也比开辟新的小径更加容易。在以下假设下，可以将这种行为实现到行人运动的社会力模型中：

- 行人偏好在已有的小径上行走。在小径上，他们不必不断重新确定方向。
- 经常使用的行人流道会因此变得更宽、更显眼，从而对其他行人更具吸引力。
- 很少使用的小径会再次消失。

在模型中，行人行走的地面由一个随时间变化的势 $U_{\mathrm{tr}}(\vec{r},\ t)$ 以及新产生的脚印

$$Q_\beta(\vec{r},t) = -q\,\exp\left(-\|\vec{r}_\beta(t) - \vec{r}\|/\gamma\right) \tag{8.1}$$

如图所示。参数 $q > 0$ 和 $\gamma > 0$ 决定了“足迹”的形状，该足迹由行人 β 在时间 t 留下。脚印对应势的负值。轨迹势的动态由

$$\frac{dU_{\mathrm{tr}}}{dt} = -\frac{1}{T}\,U_{\mathrm{tr}} + \sum_\beta Q_\beta \tag{8.2}$$

由衰减常数 T给出。初始时，轨迹势 ¨处处为零。随后，每个时间步都会将脚印加到势上。同时，已有的脚印会按因子 $dt/T \equiv \Delta t/T$衰减。地面上的脚印会产生如下形式的吸引性社会力

$$\vec{f}_{\mathrm{tr}} = -\nabla U_{\mathrm{tr}} \tag{8.3}$$

并入（4.1）中的其他项。

因此，除了受到其他行人及其环境所产生的力之外，行人还会受到已存在路径的吸引。图 8.2 展示了走廊中一股人流所形成的踩踏小径的聚集现象。尽管行人可以利用走廊的整个宽度，但由于与地面上的脚印相互作用，最终形成了狭窄的踩踏小径。

这一模型遵循与 ¨类似的原理： [SLF] 中介绍的主动行走者模型。借鉴蚂蚁趋化性的原理[1] ，该模型模拟粒子（主动行人）的运动。它们在给定的网格上移动，并在当前位置留下标记，从而形成行人流道。粒子以一定概率转移到相邻节点，而这一概率由局部标记点决定。若不定期通过新标记加以更新，这些行人流道便会逐渐消失。

由此产生的路径系统具有最小绕行的典型特征：各条路径汇聚成束，且走向弯曲。图 8.3 所示的一个包含四个节点的系统仿真展示了四臂交叉口如何被三臂节点取代；在自然运输系统中，三臂节点也最为常见 [Sch94]。

[1]由化学刺激引发的动物和植物的定向运动。一些蚂蚁会根据先前留下的局部气味标记来确定方向。

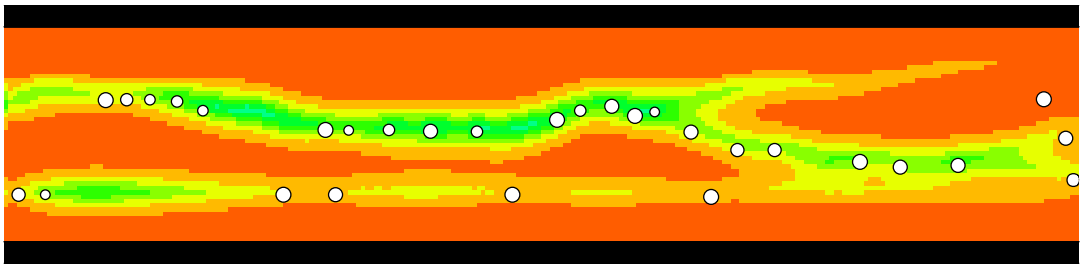


图 8.2： 行人从走廊右端出发，径直走向另一端。除了受到其他行人和墙壁的排斥外，他们还会被现有路径吸引。仿真结果对行人流量、路径的吸引力及其衰减时间非常敏感。

仿真的结果对参数非常敏感。规划者可以在一定范围内自由选择这些参数：路径的吸引力越大，行人绕行的次数就越多，设施中用于人行道的面积就越少。由于行人之间的相互作用，在行人密度较高时，路径会变宽。由此导致的更频繁使用也会使这些路径格外明显地形成。沿着某一节点与另一节点之间的路径行走的行人越多，这条连接路径就越笔直。

路径形成模型还可以纳入由地形坡度或克服障碍物所引起的影响。地面的特性不必符合现实情况，而是应根据行人设施规划的目标来设定。

因此，该模型不仅适用于描述行人在地形中的行为，还能在考虑行人交通的需求和特性的基础上，为构造满足需求的路径系统作出重要贡献。

基于社会力模型的路径形成建模与仿真将在 [Kel96]中进行详细探讨。

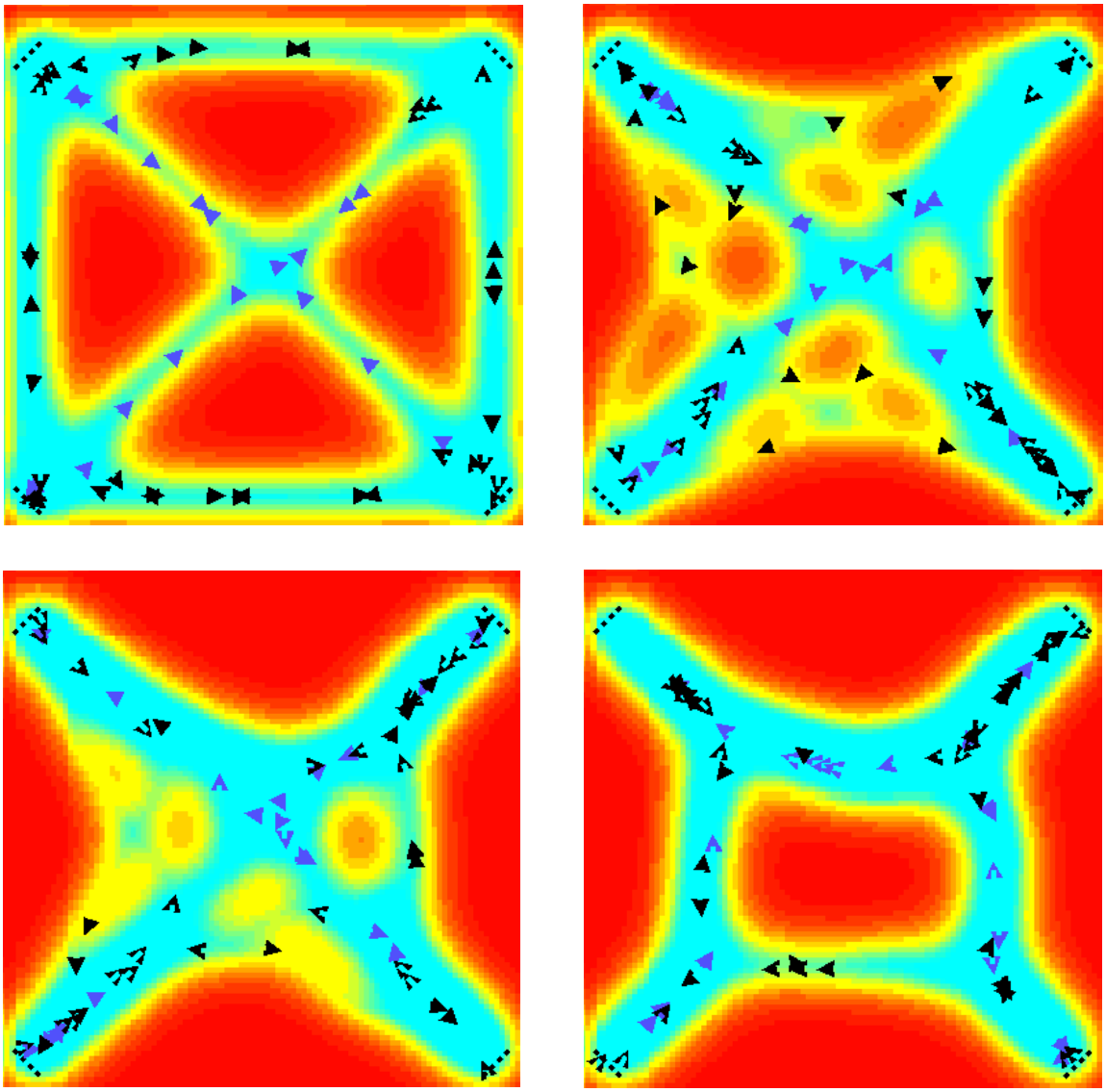


图 8.3： 通过行人¨流动力学仿真四个节点构成的路径系统的形成过程。行人从每个节点出发，前往所有其他节点。为研究与地面的相互作用所产生的效果，本例中行人之间没有相互作用。过程从一个预先给定的、完全连接的网络开始（左上）。随着时间推移，路径逐渐变宽，对角连接的面积和重要性也日益增加（右上）。在这一过程中，四个岛屿最终几乎完全消失（左下）。最终形成一个具有最小绕行的系统（右下），其中只包含三臂节点。

第9章

仿真程序

鉴于行人流建模的两个方面，我们开发了一款仿真软件，既可作为建筑师和城市规划者所用计算机辅助设计软件的组成部分，也可作为独立的应用程序，用于设计和仿真社会力模型。

考虑到该理论的传播，以及模拟器在不同（较少热衷于计算机的）学科中的潜在用户，我们为软件配备了易于操作的图形用户界面。因此，用户可以观察和控制仿真过程。仿真结果可以动画的形式录制成视频，也可以制成图形并打印出来。

模型规范使用专门为此开发的描述语言编写。

仿真程序是在 UNIX 操作系统和 X Window/OSF-Motif 环境下开发的，因此可以安装在多种计算机上。

9.1 行人模型的结构

行人动力学模型由多个组件构成。其中包括“行人”和他们活动的“走廊”。走廊的边界和几何形状由“墙壁”和“障碍物”决定。所有这些组件共同描述一个“楼层”，而一栋建筑中可以有多个楼层。走廊之间的连接称为“门”。这些门控制行人从一条走廊进入另一条走廊，并为他们指明目标方向。

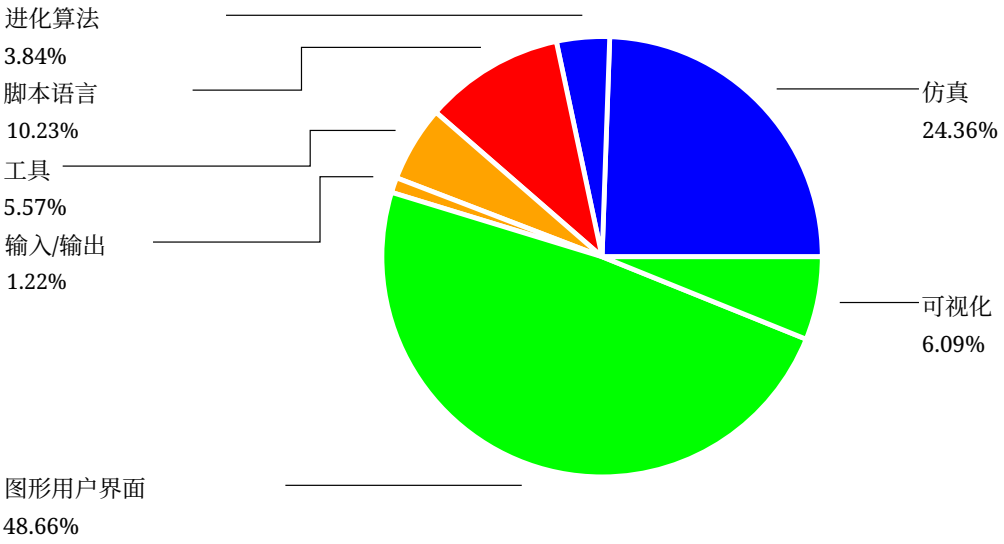


图 9.1： 仿真程序为用户提供了（如同任何现代软件一样）用于交互式模型规格说明以及观察和控制仿真运行的函数。在任何时间点，都可以根据结果生成图形表示。这些函数归入图形用户界面（Graphical User Interface）和可视化（Visualization）两大领域，共占用 C 和 Motif/UIL 中超过 17000 行程序代码的 50%。相比之下，数值计算（仿真）的实现和进化优化（进化算法）仅需要四分之一的程序代码。其余部分则分配给语言解释器（脚本语言）、各种工具（工具）以及输入输出例程（输入/输出）。

组件之间可以建立连接。受到其他对象影响，或自身会影响其他对象的对象彼此关联。连接意味着一个组件知道另一个组件、包含另一个组件，或对其施加影响。相互作用的类型由组件的类型决定。

举例来说：一条走廊与其中的行人相连接。此外，走廊还由障碍物构成，并且也与这些障碍物相连接。行人与障碍物之间通过走廊间接相连，行人和障碍物都与走廊相连接。行人会受到走廊中起作用的社会力的影响，而这种力又由走廊内所有行人和障碍物所产生的力求和构成。

对象的特性，例如行人的期望速度，或墙的排斥效应强度，均由所谓的仿真参数定义。在模型规范中，通过描述语言为参数赋值，

并为其指定数值。

9.2 对象和类

对象的概念要求我们以一种特殊的方式看待问题：将问题分解为相互独立的对象。相似的对象被归为同一类，类用于描述其成员的特性。

类由多个部分组成这一点尤其容易引起混淆。下面用一个简单的（生物学）例子来说明两个类之间“是一种关系”和“由.....组成”这两种关系的区别：

狗是一种哺乳动物。狗由.....组成腿、躯干、头部和脊柱。 (9.1)

(9.2)

第一句话（9.1）说明，狗属于哺乳动物这一上位概念。“是一种关系”体现了类的专门化。一个新类会继承其伙伴类的所有特性，并在此基础上添加更多特性。这个过程称为继承或导数。“是一种关系”只适用于一个方向，因此可以称之为类层次结构。在某些语言中，也允许多重继承。例如，狗可以从哺乳动物和家养动物类中派生出来。不过，这种层次关系无法简化为单一继承，因为并非所有哺乳动物都是家养动物，反之亦然。

第二个句子（9.2）表达了狗与头部之间的组成关系。它说明了狗的组成。狗有一个头部，但狗不是头部。由于头部的特性无法转移到（完整的）狗身上，因此不可能构成一种是一种关系。概括而言，组成关系表示两个对象之间的关联，它们的状态变化相互依赖。

脊椎动物类的一个特殊特征是与脊柱类之间存在组成关系，这一关系也会传递给所有后续的类，例如哺乳动物类和狗类。因此，与脊椎动物类之间的组成关系不应定义在狗类中，而应尽可能在层级结构的高层定义。

9.3 面向对象的模型规范、面向对象的模型实现

原则上，在仿真中必须区分模型规范化与模型实现 [Sch95b]。仿真程序可以采用面向对象的方式编写，即使模型规范中并未涉及对象。同样，面向对象模型也不要求仿真程序采用面向对象的方式实现。尽管如此，仍存在一些由模型的观察视角所决定的关联。

为了实现本文介绍的行人动力学仿真程序，采用了 C++ 编程语言，并充分利用了其支持面向对象编程的功能。程序结构中的某些部分既用于实际仿真，也用于控制程序、在屏幕上进行动画图形表演以及生成纸面图形。面向对象编程语言的许多特性并不适用于面向对象的模型规范，因此不再赘述。例如，函数模板（templates）、对对象进行封装以防止外部未经授权地访问其特性，以及将通信机制限定为消息交换 [Sch95b][Str93]。

面向对象的模型规范应具有以下特性[Sch95b]:

- 组件化构建：现实系统由各个组件组成，这些组件也必须能够独立运行¨。因此，组件又构成了独立的模型，这些模型可在更高的层次级别上组合成更复杂的模型¨。

  组件规范的顺序不应产生影响。顺序无关这一要求也延伸到对象仿真的执行过程中，因此对模型实现提出了很高的要求（参见第 9.4 节）。

- 面向状态的观点：组件在任何时刻都处于某种状态，该状态由其状态变量的当前值决定。其时间行为由动力学描述（更新函数）确定，该描述取决于自身的状态以及其他组件的状¨态。

9.3.1 模拟器的组成元素

在仿真程序中，对象按照上述两点进行构建。其中，所有仿真对象都继承自类 *SimulObject*，该类规定了其结构。

每个对象由一组参数、状态变量、链表和方法构成。参数对应模型中社会力定义的量（参见第 4 章）。例如，行人的状态变量是其瞬时位置和速度。

通过链表定义对象之间的依赖关系。其中大多数链接对应作用于对象的特定社会力（参见第 9.1 节）。

方法是用于执行各种任务的子程序，例如更新状态变量。五种基本方法的功能将在下一节中说明。

除了对象定义外，模拟器还包含一个用于分析规格文件的组件。该文件会在仿真开始时读入，并据此执行模型规范化。

此外，还有一个管理器，通过优先级队列来控制对象的更新（参见第 9.4 节）。

9.3.2 仿真对象的方法

模拟器提供的所有对象都源自 *SimulObject* 类，其中定义了以下方法：

1. 创建。创建对象时，会申请所需的存储空间，并为对象分配一个内存地址。这样，对象便可以与其他对象链接起来。不过，状态变量此时尚未赋值。

2. 初始化。参数将被解析。此时会根据参数的标识符，在对象的作用域中查找赋值。如果赋值由算术表达式（例如随机函数）构成，则会在此时间点计算该表达式。

3. 引用。用于建立与另一个对象连接的方法会首先检查是否定义了与伙伴所属类的连接。如果没有，则会将连接请求传递给祖先类。

4. 更新。该方法负责更新对象。更新函数会考虑对象的内部状态以及与之连接的对象的基态。

5. 时钟。该方法负责时钟与时间推进，将当前状态变量赋值为基态变量。

在继承层次结构中，所有类都提供这五种方法。类的方法只处理该类定义中新增的实例（参数和状态变量）。继承的实例则由定义它们的类的方法处理。

调用创建、初始化 和更新 方法的顺序从基类$SimulObject$ 开始，并沿继承层次结构向下进行。

对于引用 方法，情况恰好相反。这里首先在最底层（最后一个）类定义中，检查是否为与伙伴的连接定义了相应的相互作用。如果没有，则会将连接尝试传递给前一个定义中的方法。

方法时钟 的各个部分彼此不依赖顺序，因为它们只涉及类定义中引入的状态。

C++ 编程语言会通过一种称为构造函数方法的机制，自行按正确顺序创建对象的各个部分（创建）；每个 C++ 对象都会定义这种方法。至于其他方法的处理顺序，则必须显式实现。

9.4 并发问题

一旦某个对象的状态¨变化取决于其他对象，就会出现对象更新顺序问题。因此，对于状态为 $a = 1$、 $b = 1$ 的两个组件 a 和 b，若先计算 a 再计算 b，则结果为 $a = 2$、 $b = 3$。反过来计算则会得到 $a = 2$、 $b = 2$。

确定依赖关系

Rasmussen和 Barrett在其模拟理论 [RB95] 中提出了一种通用模拟器，用于研究各个对象之间的依赖关系：系统中的 n 对象 S_i 会被分配计数器 q_i 。通用模拟器依次遍历各个对象 S_i ，并检验其更新是否取决于其他对象。如果存在其他对象，其结果会决定该对象的更新结果，但这些对象尚未更新，那么就存在这种依赖关系。

如果不存在依赖关系，则执行更新 S_i ，并将计数器 q_i 加一。否则，对象保持不变。随后，模拟器转到下一个对象 S_{i+1} ¨。该过程会一直重复，直到所有对象都已更新。

以两个对象 S_1 和 S_2 为例，可以说明这一过程。其中， S_1 取决于 S_2 。模拟器发现对象 S_1 存在依赖关系，于是转到下一个对象 ¨。 S_2 不依赖于其他对象，可以进行更新。计数器q_2 加一。在下一轮中，模拟器再次从对象S_1开始，此时该对象可以更新。对于各对象的计数器，依照这种方式确定依赖关系

$$\begin{aligned} q_1 &= 1\, q_2 \\ q_2 &= 0\, q_1 \end{aligned} \tag{9.3}$$

已确定。

模拟器确定依赖关系所需的步骤数量由

$$N = \sum_{i=0}^{n-1}(n-1)(n-i) = n(n+1)(n-1) = n^{\mathbf{3}} - n \tag{9.4}$$

从上方限定。

在此过程中，通用模拟器还会计算更新依赖关系的雅可比矩阵

$$Dq = \left(\frac{\partial q_i}{\partial q_j}\right)_{n\times n} = \left(\frac{\Delta q_i}{\Delta q_j}\right)_{n\times n} \tag{9.5}$$

其中，导数 $\partial q_i/\partial q_j$ 表示为了更新一次 S_i ， S_j 需要进行多少次更新。大于零的值表示两个对象之间存在依赖关系。对于特殊情况 $i = j$ ，有 $\partial q_i/\partial q_j = 1$。当雅可比矩阵 Dq 等于单位矩阵时，系统可模拟，也就是说与顺序无关。这直接由定义得出。

该示例得出的雅可比矩阵为

$$Dq = \begin{pmatrix} \frac{\partial q_1}{\partial q_1} & \frac{\partial q_1}{\partial q_2} \\ \frac{\partial q_2}{\partial q_1} & \frac{\partial q_2}{\partial q_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{9.6}$$

如果其对角线上包含¨个 Dq 子矩阵，则该系统不可模拟。但是，将子矩阵中的对象合并为一个 ¨上级对象后，便可使系统变得可模拟。

对于上三角矩阵，可以通过重新排列对象的更新顺序来实现可模拟性（参见高斯消去法 [Kli84]） [RB95]。

时间推进

实现顺序无关性的一种方法是采用时间推进法。在该方法中，除了状态变量外，对象还具有用于基态 z_i^0的变量 z_i 。每个时间步分两个阶段进行。首先，为所有对象确定新的状态

$$z_i = u_i(z_1^0, \ldots, z_n^0) \tag{9.7}$$

根据基本状态，通过更新函数 u_i 计算。随后， ¨基本状态接收当前值

$$z_i^0 = z_i \tag{9.8}$$

因此，结果是唯一确定的。不过，这种方法需要两倍数量的状态变量¨。

时钟与时间推进

这种方法的一种扩展是 Eschenba-cher的时钟与时间推进。该方法保证顺序无关性¨，此外还处理事件级联中的后续事件¨ [Sch95b]。后续结果的一个例子是行人¨在时间 t的平均速度¨。只有在所有行人对象¨都更新之后，才能确定该速度。

在时钟与时间推进中，一个时间步由多个时钟周期组成。在某个时钟周期 k 、时间 t k¨，可以更新所有仅依赖于

在时钟周期 k_0 至 k 中处理的对象的对象。与（9.8）类似，状态¨将被 ¨继承，并切换到新的时钟周期 $k+1$ 。随后可以处理其他对象。所有对象更新完毕后，模型将进入下一个时间步 $t+1$ 和时钟周期 k_0 ¨。

可变时间步

在人流动力学模型中，出于计算时间方面的考虑，让所有对象都按相同的时钟周期更新并不经济。由于相互作用范围较短，行人对象需要以很小的时间步 $\Delta t = 0.05$秒进行计算。而足迹对象的变化较慢，因此也应较少更新。因此，为每个对象分配一个独立的时间步长Δt_i 。

行人的时间步长也可以根据其速度和状况动态调整。在设施的空旷区域行走、且位于其他对象相互作用范围之外的行人，应比拥挤区域中的行人更少更新。

对于可变时间步，可以扩展时钟与时间推进方法。对象将当前状态纳入基态后，会确定其希望再次更新的时间点 t_i'。随后，根据这一时间点将它们排入队列。

仿真程序按照对象在队列中的排列顺序处理它们。处理后续事件时，也可以采用时钟推进方法。当所有应在时间点 t 更新的对象都处理完毕后，系统时间会直接跳转到队列中下一个对象的时间点 ¨。

图形用户界面中的一些系统对象由 ¨外部事件控制，例如用户输入，或系统要求屏幕窗口对象重绘其表演。

异步事件到达时，这些对象会连同当前系统时间t 一起加入队列。所有与时间 t 相关的对象更新完毕后，它们便可对外部事件作出响应。与立即处理事件驱动对象相比，将对象加入队列的优点在于，时间点 t的更新过程仍然是明确定义的。

仿真程序的执行速度在很大程度上取决于队列的实现。队列的速度主要取决于根据对象的时间点 t_i' 将其插入队列的效率。由于最高效的搜索算法基于树结构，因此队列也实现为树。

搜索算法的效率可以通过插入新元素时所需的平均比较操作数量 Z来估算。对于有序列表，该数量为 $Z = 1/2\,n$。而对于均匀填充的二叉树，则只需

$$Z \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{\ln n/\ln 2-1} i\,2^i < \frac{\ln n}{n\,\ln 2} \sum_{i=1}^{\ln n/\ln 2-1} 2^i < \frac{\ln n}{n\,\ln 2} 2^{\ln n/\ln 2} = \frac{\ln n}{\ln 2} \tag{9.9}$$

少得多的操作。具有两个以上（向下指向）连接的树结构，其平均所需数量也处于同一数量级。即使只有 1000 个对象，采用列表的实现所需的比较操作也大约是采用树结构的实现的五十倍。

然而，如果新对象只在队列末尾插入，树的结构就会退化为有序列表的结构，速度优势也随之消失。当模型中的所有对象都具有相同的步长 $\Delta t_i = \Delta t$ 时，就很容易出现这种状况。

为此，可以采用专门设计的算法来处理所谓的平衡树，例如 2-3-4 树或 Bayer 和 McCreight [Sed92，第 15,18] 章中的 B 树。这些算法确保每次插入操作后，树都会重新达到平衡。其原理类似于活动挂饰：在一根线上添加一个额外的挂件，会使挂饰失去平衡。类似地，正如可以通过添加一个新的悬挂点使活动挂饰恢复平衡，平衡算法也会选取树中的一个节点作为新的根节点。尽管平衡树的机制较为复杂，但在对象数量很大时，使用它们仍然值得。

9.5 计算时间与计算精度

社会力模型中的成对相互作用会导致较长的计算时间，因为每个时间步所需的计算数量与行人对象的数量成正比。即使忽略与距离很远的行人之间的相互作用项，计算人员之间距离的开销仍然存在。

将交通区域划分为更小的路段，可以减少计算数量。这样便可以对行人进行粗略定位。走廊对象负责将区域划分为路段，并管理其中行人的列表。计算相互作用时，只需考虑同一路段或相邻路段中的行人。门对象则负责行人在各个走廊之间的转移。

由于力项变化曲线较陡，必须采用 0.05 秒的小时间步；这也增加了每个时间步的计算开销。在这段时间内，以 1.3 m/s 的速度行进的行人仅移动 6.5 厘米。此外，模型已经考虑了其他行人的运动及其后续步伐。

因此，近似而言，可以认为行人周围的环境在多个时间步内保持不变。与其他干扰相比，由此造成的精度损失可以忽略不计。

对于仿真而言，这意味着在计算行人相互作用之间，可以采用大得多的时间步。行人对象以时间步 ΔT 更新，运动方程仍可在对象内部使用 $\Delta t \ll \Delta T$ 进行积分（参见第 9.4 节）。

9.6 模型语言的描述

开发描述语言是为了能够确定仿真中的各种控制参数。其结构借鉴了 C 或 Pascal 等编程语言。为了解释描述语言，先介绍几个术语：

标识符 参数和对象通过所谓的标识符来调用。标识符由字母和数字组合而成，其中第一个字符必须是字母。许多编程语言都有这一限制，因为这样就能轻松地区分标识符和数值。

常量 常量可以表示数值或文本。数值常量以数字或正负号开头，后接

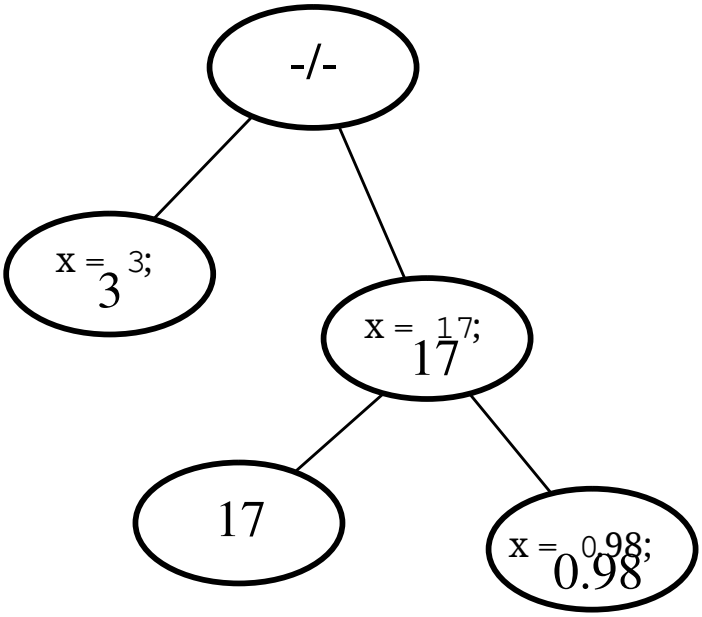


图 9.2： 嵌套作用域树结构（以椭圆表示）。作用域包含树中所有与其存在向下连接的区域。标识符的解析方向与此相反：要确定标识符的值，需沿树向上遍历，直到找到赋值。大号数字表示各个作用域中与 x 关联的值。

数字，且最多包含一个小数点。多维向量常量由一系列数值常量表示，各数值常量之间用竖线分隔。文本常量用引号括起来。

表达式¨ 赋值右侧也可以是数值表达式或文本操作。它们由标识符、常量以及预定义算子和函数组合而成。只有在对象解析表达式时，才会对其进行计算。

作用域 作用域由花括号括起来。在一个作用域内，所有标识符都是已知的，且可以使用。此外，还可以在其中创建更多作用域。各个作用域按树结构排列（参见图 9.2）。这意味着，在所有内部作用域中也都能找到一个标识符。

类名 一些标识符代表固定的类类型。它们被称为类名，不得自由使用。模型的每个对象类

都由一个类名表示。例如包括：¨、pedestrian、 street和 floor。

连接 两个对象可以彼此连接。通常，它们因此会相互作用。连接的重要性将在第 9.3.2 节中进一步说明。

描述语言的语法区分三种指令。每条指令都以分号 ;结束。

赋值 最简单的指令是赋值。它用等号 = 表示。赋值始终从右向左进行。赋值的形式如下：

标识符*1* = 常数;标识符
1 = 标识符*2*;

引入标识符 Nr. 1，并将其与常数的值或第二个标识符的值关联。

定义 通过如下形式的指令：

类名 标识符 ;类名 标识符
{ ... }

会从由类名指定的类中创建一个对象，并将其与指定的标识符连接。在第二个版本中，还会为该对象创建一个新的作用域。

声明 声明指令在两个对象之间建立连接。其形式如下：

标识符;

第一个对象由声明所在的作用域确定。第二个对象是与该标识符连接的对象。

此外，还可以通过另外两条指令扩展对象的定义：

乘法 可以一次创建多个相同对象。乘法的形式为：

类名 标识符 [*Zahl*]

¨**继承** 对象在定义时可以继承另一个对象的整个作用域和链接。此外，该对象还可以包含自己的赋值和声明，但这些不会反过来影响被继承其作用域的对象。

待模拟的模型可以通过这些指令构建。需要注意指令的排列顺序：如果在同一作用域中，针对同一个标识符出现两次赋值，后一次赋值会取代第一次赋值。如果在这些指令之间定义了另一个对象，该对象只会识别第一次赋值。此外，必须先定义一个对象，才能在声明中将其与另一个对象串联起来。

描述语言提供了多种定义仿真结构和参数值的方式。然而，语法正确并不意味着仿真设置合理。图 9.3 展示了第4.3.3节中对行人流通过狭窄开口进行仿真的模型规范。

```
# Simulation eines schmalen Durchgangs
dt = 0.05; display_rate = 1;
street GangTuer {
  beta = 10.0;
  polygon { -1.0|10.0; 51.0|10.0; color = 1; sig = 0.2;}
  polygon { 51.0|0.0; -1.0|0.0; color = 1; sig = 0.2;}

  beta = 2.0; sig = 0.2; avoid = 0; color = 1;
  polygon { 25.2|0.0; 25.2|4.25; 24.8|4.25; 24.8|0.0;}
  polygon { 25.2|10.0; 25.2|5.75; 24.8|5.75; 24.8|10.0;}
}
floor F {
  GangTuer;
  xmin = -1.0|-1.0; xmax = 52.0|11.0; dx = 0.1|0.1;
  vmin = 0.7; vmax = 2.3; vtau = 2.68; epsilon = 0.001;

  gate LINKS { color = 5; 5.0|0.5; 5.0|9.5; }
  gate RECHTS { color = 5; 45.0|0.5; 45.0|9.5; }
  offset = 0.5;
  door MITTE { color = 5; 25.0|5.75; 25.0|4.25; }

  p = 2.1; sig = 0.3; lam = 10.0; mu = 0.1; vfaktor = 1.2;
  v0 = norm(1.34,0.26); t = unif(0.0,50.0);
  pedestrian A [30] {
    color = 2; LINKS; MITTE; RECHTS; GangTuer; clan = 0;
  }
  pedestrian B [30] {
    color = 4; RECHTS; MITTE; LINKS; GangTuer; clan = 1;
  }
}
```

图 9.3： 模型规范示例。对象 GangTuer 为行人提供环境。其中定义了墙壁及其相互作用参数。对象 F 包含通道左侧、右侧和中间的定义，以及行人种群 A 和 B 的定义，每个种群各有 30 名成员。行人作用域内通道声明的顺序决定了它们的路径。共享参数在上级作用域中赋值。

符号表

17 0123.987	小数点表示及千位间留空格的数字写法
$\mathbb{R}$	实数集
$\mathbb{R}^n$	n维实值向量集
$\mathbb{Z}$	整数集
x_i, x^i, x_{ij}, x_i^j, x_{ij}^k, x^1, x^2, x^3	i, j 和 k 是量¨的指标 x，既可以标在上方，也可以标在下方；若无其他说明，该符号不表示幂表示法
x', x''	撇号用于区分不同的量¨，不表示导数
$x^{\mathbf{2}}$, $x^{\mathbf{3}}$	平方和三次方，指数以粗体显示
$\vec{p}$	由分量 $p_1 \dots p_n$ 组成的向量，通常为二维向量（$n = 2$），也可以是 p_x, p_y
$\langle \vec{p}, \vec{q} \rangle$	向量 $\vec{p}$ 和 $\vec{q}$ 的点积，$\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$

$\mathcal{N}$, 具有分布函数$P(\mathcal{N}(x, \sigma)\ x') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x'-x)^{\mathbf{2}}/2\sigma}$的正态分布随机数，$x$ 表示均值，σ 表示标准差；若无其他说明，则假定 $x = 0$ 和 $\sigma = 1$ $\mathcal{Z}$, $\mathcal{Z}(a, b)$ 均匀分布随机数，区间 $[a, b]$ 内的所有数值出现的概率相同；若无其他说明，则假定 $a = 0$ 和 $b = 1$

单位

m 米（长度）	$\mathrm{m}^{\mathbf{2}}$	平方米（面积）	m/s 米每秒（速度）
$\mathrm{P/m}^{\mathbf{2}}$	人员每平方米（行人密度）	P/ms	人员每米每秒（比流量）

°摄氏度（温度）

函数与算子

$\sum_N, \sum, \sum$ 求和，求和指标为 i，指标范围为 $1 \ldots N$，求和^{i} $^{i=1}$ 适用于其后所有表达式，直到遇到下一个 $+$或 $-$算子$\int_{t_0+T} dt$, $\int_{t_0} dt$ 积分，积分变量为 t，积分上下限为 $t_0 \ldots t_0+T$，积分适用于其后所有表达式，直到遇到下一个 $+$ 或 $-$算子 $\frac{d}{dt}$ 对 t求导$\frac{\partial}{\partial x_i}$ 对组件 x_i求偏导∇ Nabla 算子，分量导数向量 exp(x), e^x 指数函数 ln x, ln(x) 自然对数，适用于其后所有表达式，直到遇到下一个 $+$或 $-$算子 cos x, ~~cos~~(x) 余弦函数，适用于其后所有表达式，直到遇到下一个 $+$ 或 $-$ 算子 ,δ_{ij} 克罗内克符号 $\delta_{ij} = 1$ 适用于 $i = j$ 和 $\delta_{ij} = 0$ 适用于 $i \neq j\langle x \rangle$ 变量 x 的均值，带有$\sigma^2(x)$ 方差$\overline{\chi^2}$ 最小二乘法所得的平方误差

$$\langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i$$

$$\sigma^2(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} {x_i}^2 - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{N} x_i$$

行人设施的设计依据

N 每小时通过横截面的人员数量ρ 行人¨密度v_h 行人的水平方向速度¨b_n 人行道有效宽度T 观测时段L 行人设施的通行能力 ˆL 按 1 米宽度计的特定通行能力

v_h^0 开阔区域允许的最大速度

社会心理学模型

ˆı 社会影响$f(SIN)$ 社会力S 影响的强度（strength）I 直接性、即时性（immediacy）N 施加影响的个体数量

Ψ 主观感知强度Φ 客观物理刺激

β 幂指数κ 比例系数

社会力¨模型

α, β 个体（行人）的指标， α 表示受到力作用的人， β 表示施力者B 障碍物和边界的指标i 吸引物的指标α' 所属的群体成员$U_{(\cdot)}$ 势、社会场，指标（·）表示相互作用的伙伴 → →$f_{(\cdot)}$ 如果存在势，则社会力为 $f = -\nabla U_{\rightarrow}\mathcal{F}$ 涨落项，向量随机变量$t, \Delta t$ 时间、时间步$\vec{r}_\alpha, \vec{r}_\beta$ 行人的瞬时位置$\vec{v}_\alpha, \vec{v}_\beta$ 瞬时速度$\vec{e}_\alpha^{\,0}$ 指向瞬时目标方向的单位向量 $\vec{e}_\alpha^{\,\perp}$ 垂直于瞬时目标方向的单位向量，满足$\left\langle \vec{e}_\alpha^{\,\perp}, \vec{e}_\alpha^{\,0} \right\rangle = 0$，模型中两种方向选择会得到相同结果$\vec{f}_\alpha^{\,0}, \vec{f}_\beta^{\,0}$ 驱动力v_α^0 （大小为）期望速度v_α^{max}行人能够移动的最大速度大小

τ_α 弛豫时间$a_{\alpha i}, a_{\alpha i}^0$ 瞬时吸引力强度、初始兴趣

U_{tr} 踩踏路径势

$\rightarrow f_{\mathrm{tr}}$ 现有踩踏小径的吸引力Q_β 足迹的势T 踩踏路径势能的衰减时间

性能指标

Y_α, Y 由行人¨自行 α 确定的个体性能指标，以及设施区段性能指标T 行人设施区段的通行时间¨Y^1 效率度量Y^2 被迫改变速度的频率Y^3 影响程度、舒适度 Y^4 群体保持聚集的测度Y^5 行人群体中不同亚群体的分隔程度l_α^0 设施区段的有效长度 N_l^+,N_l^- 在某段时间内进入某设施（部分设施）的人数，以及离开的人数 $\Phi_l^\pm$ 流量密度ρ_l 区段内的行人密度 $lv^\pm$ 流入和流出的行人的平均速度 b_l 区段宽度 lL 某个子区段的通行能力$\mathbf{C}$ 具有共同特征的个体亚群体$P_\alpha\mathbf{C}$ 某个亚群体对个体的比例影响 αS_α 个体瞬时有序度S 含有 $\mathbf{N}$ 个个体的系统的瞬时熵S_T 系统在整个周期内的熵 T

进化¨方法

x， x'， x''， x^1， x^2 通过二进制数或维度为 n 的实值向量表示一个潜在解的基因型，$x = （x_1，\ldots\ldots，x_n）$ μ 种群规模λ 中间种群规模p_k 个体的繁殖概率 kW 一个进化步骤的成功概率σ 变异算子的标准差

（x， σ）进化策略中采用自适应步长的个体表示p_c， p_m 交叉算子和变异算子的应用概率.$c_{\alpha k}$ 行人 α 与潜在解 k 的特性一致性$p_{\alpha k}$ 取决于特性的繁殖概率

决策模型

i, j 决策选项的索引¨.$p_{j\leftarrow i}$ 转移概率U_i, U_j 备选方案 i和 j 的效用$S_{j\leftarrow i}$ 切换时产生的损失ξ 接受较差备选方案的意愿

路径网络

$G(V, E)$ 含有 V 个节点和 E 条边的图（M_{ab}）距离矩阵， M_{ab} 表示从a 到 b 的第 k 短线段的长度（R_{ab}）路径矩阵， R_{ab} 表示从 a 到 b 的第 k 短路径上的下一个（中间）节点F_i 边的使用频率 iz_i 边的序号 i，按使用频率排序， z_1是经过频率最高的边ϵ_t 随机 Warshall-Floyd 算法迭代 t 次后的误差

仿真理论

S_i 仿真对象 iq_i 数¨值，对象的数值 iDq 数¨值的雅可比矩阵z_i 状态 i的 u_i 更新函数 it 时间k, k_0 时钟周期、初始时钟周期Δt， ΔT 时间步Z 所需比较操作的数量

参考文献

[BHS91] T. Baeck、F. Hoffmeister 和 H.-P. Schwefel。进化策略综述。载于 R. Belew 和 L. Booker 编，《第四届遗传算法国际会议论文集》，第 2–9 页。Morgan Kaufmann，洛斯阿尔托斯，加利福尼亚州，1991年。[BT86] Aloys Borgers 和 Harry Timmermans。《地理分析》，18:115，1986年。[CHJ61] James S. Coleman、John Hopkins 和 John James。自由形成群体的平衡规模分布。《社会计量学》，24(1):36–45，1961年3月。[DM75] A. Domencich 和 D. McFadden。《城市出行需求：行为分析》。North Holland，阿姆斯特丹，1975年。[DS82] Roger M. Downs 和 David Stea。《认知地图》。Harper and Row，纽约，1982年。原书名：《心智中的地图》。[EOI92] Manabu Ebihara、Akira Ohtsuki 和 Hideaki Iwaki。基于分类推理和确定性值处理的紧急疏散期间人类行为仿真模型。《土木工程中的微型计算机》，7:63–71，1992。[Fis86] Gerd Fischer。《线性代数》。Vieweg，不伦瑞克/威斯巴登，1986年。[Fru71] John J. Fruin。行人设施设计：服务水平概念。《公路研究记录》，355:1–15，1971年。公路研究委员会，华盛顿哥伦比亚特区。[Gab93] Th. Gabler。《Gabler经济百科全书》。Gabler有限责任公司，威斯巴登，第 13 版，1993年。[Gil95] Nigel Gilbert，1995年5月。达格施图尔城堡研讨会报告。[GM85] P. G. Gibbs 和 B. Marksj¨o。行人流微观仿真模型。《仿真中的数学与计算机》，27:95–105，1985年。

[Hak83] Hermann Haken。《协同学》。Springer Verlag，柏林/海德堡/纽约，第 3 版，1983年。[Hel90] Dirk Helbing。《行人流动态行为的物理建模》。硕士论文，乔治-奥古斯特大学第三物理研究所，哥廷根，1990年。[Hel91] Dirk Helbing。行人行为的数学模型。《行为科学》，36:298–310，1991年。[Hel92a] Dirk Helbing。行人移动的流体动力学模型。《复杂系统》，6(6):391–415，1992年。[Hel92b] Dirk Helbing。随机方法、非线性动力学与社会过程的定量模型。博士论文，斯图加特大学，1992年。Shaker 出版社，1993年。[Hel94] Dirk Helbing。社会场中个体行为的数学模型。《数学社会学杂志》，19(3):189–219，1994年。[Hen71] L. F. Henderson。人群流体的统计特性。《自然》，229(5):381–383，1971年2月。[Hen74] L. F. Henderson。论人群运动的流体力学。《交通研究》，8:509–515，1974年。[Hil95] Martin Hilliges。《快速路网络动态交通流的现象学模型》。博士论文，斯图加特大学第二理论物理研究所，1995年。[HJ74] L. F. Henderson 和 D. M. Jenkins。行人对交通挑战的反应。《交通研究》，8:71–74，1974年。[Hum] Klaus Humpert。个人通讯。¨Kel]Joachim Keltsch。通过自组织和主动行人实现路径形成。硕士论文，斯图加特大学第二理论物理研究所，1996年。[Kli84] Wilhelm Klingenberg。《线性代数与几何》。高校教材。Springer Verlag，柏林/海德堡/纽约/东京，1984年。[Kol91] Marek Kolodziejczyk。线流模型：分支的自然自发形成。载于《自然结构》，第 7 卷，第 137–142 页，斯图加特，1991年。斯图加特大学特别研究领域 230。

[Kru56] Joseph B. Kruskal。《图的最短生成子树与旅行商问题》。《美国数学会会刊》，7:48–50，1956年。[Lat] Bibb Latan´e。个人通信。[Lat81] Bibb Latan´e。《社会影响心理学》。《美国心理学家》，1981年。[Lew51] Kurt Lewin。《社会科学中的场论》。Harper，纽约，1951年。[LL] James H. Liu 和 Bibb Latan´e。《社会空间的主体间几何》。《传播学刊》，即将出版。[Løv93] Gunnar G. Løvas。《行人交通流的建模与仿真》。第469–473页。里昂高等师范学院，1993年6月。欧洲仿真多会议。[Løv94] Gunnar G. Løvas。《行人交通流的建模与仿真》。《交通研究》B辑，28B(6):429–443，1994年。[Mic94] Zbigniew Michalewicz。《遗传算法：数据结构与进化程序》。Springer Verlag，柏林/海德堡/纽约/东京，第二版，1994年。[Nag95] Kai Nagel。《交通流的高速微观仿真》。博士论文，科隆大学，1995年。[Oed63] Detlef Oeding。《行人交通及其他设施的人行道交通负荷与尺寸设计》。载于《道路建设与道路交通技术》，研究报告第22卷。联邦交通部道路建设处，波恩，1963年。[Old68] S. J. Older。《商业街人行道上的行人移动》。《交通工程与控制》，第160–163页，1968年8月。[Ott91] Frei Otto。《生长型聚落的自然构造》。《概念》SFB 230第37期，斯图加特，1991年11月。[Pro95] Daniel Probst。《自动机、复杂性与合作演化》。Dagstuhl研讨会，1995年。[PTVF92] William H. Press、Saul A. Teukolsky、William T. Vetterling 和 Brian P. Flannery。《C语言数值配方》。剑桥大学出版社，剑桥，第二版，1992年。

[RB95] Steen Rasmussen 和 Christofer L. Barrett。《仿真理论要素》。即将发表于 ECAL 95，《计算机科学讲义》，Springer Verlag，1995年。[Rec73] Ingo Rechenberg。《进化策略》。Frommann-Holzboog，1973年。[Sch67] Hellmut Schubert。《城市行人交通的规划措施》。载于《道路建设与道路交通技术》，研究报告第56卷。联邦交通部道路建设处，波恩，1967年。[Sch77] Hans-Paul Schwefel。《利用进化策略对计算机模型进行数值优化》。Birkhäuser，巴塞尔/斯图加特，1977年。[Sch94] Eda Schaur。《城市规划中的拓扑结构》。载于《拓扑学研讨会》。特别研究领域230，斯图加特，1994年。[Sch95a] Martin Schenk。《行人行为研究》。博士论文，斯图加特大学城市规划研究所，1995年。[Sch95b] Bernd Schmidt。《仿真模型的面向对象规范》。载于《建模与仿真》，欧洲仿真多会议，布拉格、圣迭戈，1995年。SCS出版物。[Sed92] Robert Sedgewick。《C语言算法》。Addison Wesley，1992年。[SLF] F. Schweitzer、K. Lao 和 F. Family。《活跃随机行者模拟蚂蚁主干路径的形成》。已提交发表，1995年。[Sta94] Jens Starke。《学习型系统比较研究》。硕士论文，斯图加特大学理论物理研究所II，1994年。[Str93] Bjarne Stroustrup。《C++程序设计语言》。Addison Wesley，第二版，1993年。[TvB92] Harry Timmermans、Xavier van der Hagen 和 Aloys Borgers。《交通系统、零售环境与行人出行链行为：建模问题与应用》。《交通研究》，26B(1):45–59，1992年。[Wei93] Ulrich Weidmann。《行人交通技术》。技术报告，苏黎世联邦理工学院交通规划研究所，苏黎世，1993年。丛书第90号。[YM89] Steven J. Yuhaski 和 J. MacGregor-Smith。《利用状态依赖排队模型对建筑物内循环系统进行建模》。《排队系统》，4:319–338，1989年。

[YOSN91] KenichiYoshikawa、Noboru Oyama、Masaru Shoji 和 Satoshi Nakata。《将盐水振荡器用作简单的非线性动力系统：节律、分岔与锁频》。《美国物理学杂志》，59(2):137–141，1991年2月。