

Arup

MassMotion

MassMotion 疏散建模软件的验证 和有效性说明

072377-00_R-001

01 版 | 2 January 2018

本报告考虑了客户的具体说明和要求。

本报告不供任何第三方使用,且不应依赖任何第三方，也不对任何
第三方承担任何责任。

工作编号 072377-00

奥雅纳工程顾问有限公司

13 Fitzroy Street

London

W1T 4BQ

United Kingdom

www.arup.com

ARUP

Document Verification

ARUP

Job title		MassMotion		Job number 072377-00	
Document title		MassMotion 疏散建模软件的验证和有效性说明		File reference	
Document ref		072377-00_R-001			
Revision	Date	Filename	2015-04-01_MassMotion_Evacuation_V&V_Draft-01.docx		
Draft 01	01-Apr-2015	Description	First Draft		
			Prepared by		
		Name	Michael Kinsey		
		Signature			
Draft 02	31-May-2015	Filename	2015-05-31_MassMotion_Evacuation_V&V_Draft-02.docx		
		Description	Second Draft		
			Prepared by		
		Name	Michael Kinsey		
		Signature			
Draft 03	22-Jun-2015	Filename	2015-06-22_MassMotion_Evacuation_V&V_Draft-03.docx		
		Description	Third Draft		
			Prepared by		
		Name	Michael Kinsey		
		Signature			
Issue 01	2-Jan-2018				
		Filename	2018-01-02_MassMotion_Evacuation_V&V_Issue-01.docx		
		Description	First Issue		
			Prepared by		
		Name	Cherry Lu Lu Lu Du Michael Kinsey		
Issue Document Verification with Document					
☒					

目录

	页码
概要	2
1 简介	4
1.1 背景	4
1.2 目的和范围	5
1.3 结构	5
2 MassMotion	7
2.1 简介	7
2.2 历史	7
2.3 几何组件	7
2.4 人员	8
2.5 人员属性	8
2.6 人员路线选择	8
2.7 人员移动	9
2.8 与其他软件技术说明的比较	9
3 理论模型说明	11
3.1 背景	11
3.2 人员运动	11
3.3 人员事件	12
3.4 人员属性	12
3.5 人员路线选择	15
3.6 人员移动	16
3.7 社会力	18
4 MassMotion 验证	21
5 MassMotion 确认	24
6 讨论	26
6.1 摘要	26
6.2 验证测试	26
6.3 确认测试	26
6.4 不确定性	27
6.5 结论	28
7 参考文献	29

概要

MassMotion [1]是一款由 Oasys (Ove Arup SYStems) 开发的行人动力学和疏散模拟软件工具。本报告论述了疏散建模工具 MassMotion 的验证和可靠性。

MassMotion 将建筑环境用一系列几何组件 (例如地面、坡道、楼梯、自动扶梯、门、栅栏和出入口) 进行表达。软件中的人员 (或三维空间的占有者) 有以下特性:

- 通过入口进入软件中建筑模型中的几何组件;
- 与软件中几何组件和其他人员存在交互; 以及
- 根据用户指定的疏散场景, 通过出口离开模型中的几何组件。

可以通过两种方式指定疏散人员的路线选择:

- 最低成本 - 人员通过“最简单”的路线行走。人员知道所有或局部的出口 (在模拟开始时, 出口变得可用/不可用)。在每个时间步骤中, 会为人员计算每条路线 (到他们知道的出口) 相关联“成本”。人员将沿着“最低成本”路线到达出口。
- 指定目的地 - 为每个人员指定了一个出口。人员将沿着“最低成本”路线到达特定的出口。

人员在模型中的移动是通过“社会力量”算法来反应反射的现象[2][3][4]。在每个时间步中“力”作用于人员, 使他们相应地移动。已经按照 Fruin 针对规划设计中行人的服务等级[5][6]对“社会力量”算法进行了校准。

验证测试

已按照以下的标准进行 MassMotion 模型的验证测试:

- 国际海事组织 (IMO) 1238 [7];
- 美国国家标准与技术研究院 (NIST) 技术说明 1822 [8]。

另外, 除了 IMO 1238 和 NIST 技术说明 1822 验证测试, 还进行了模型其它各个方面的测试。

所进行的全面验证测试, 如本报告表 6 所示。

灵敏度测试已被应用于一些验证测试, 以预测输入参数的变化对结果的影响的大小。

所有验证测试都通过了所述验收标准。值得注意的是, 两种验证测试中罗列了对输入参数小幅变化就会对结果有较大影响的高灵敏度参数: 这些结果被标记为“参见测试” (附加信息)。对这些参数的设置和修改应该仔细考虑, 否则可能会增加不真实性。

验证测试结果表明, MassMotion 能够良好的预测这些测试案例的结果。

可靠性测试

报告提出了将 MassMotion 预测与“现实世界”疏散事件、疏散演习和人员流通进行比较的确认研究。

可靠性测试的案例研究的结果表明, MassMotion 预测结果与实际数据相当。因此, 在研究的案例中, 可以得出 MassMotion 能够表示疏散中关键的人类行为特性。

不确定性

整个模型的不确定性验证和确认是无法开展的。（数值模拟过程有多种不确定性来源）。

验证和确认提供了一种数学模型评估（在计算机软件中作为数值模型实现）适用性的手段，用于通过减少不确定性来表达人员身体的行为，且无论何种情况下都可以进行。

在 MassMotion 的背景下，具体来说，这个验证和确认测试目的是：

- 通过验证测试减少模型（数学和模型）和用户（知识）不确定性；
- 通过确认案例研究来减少模型（概念）、数据和用户（知识）不确定性。

在验证和/或确认范围之外的特定情况下利用 MassMotion 应用程序，必须减少不确定性（通过减少不确定性存在的组件/子模型使用或减轻不确定性本身）。

MassMotion 中使用的理论和数据是基于观察人们正常流通行为会避开危险或有较高感知风险水平的现象。对于特定工程的应用，如果疏散人员可能会遇到更高级别的感知风险，则建模者应确定：

- 基础理论和数据在何种程度上仍然有效；
- 默认可配置参数（例如，减少预疏散时间，增加行走速度）改变是否可能会产生更准确的预测。

在特别容易引起关注的特定领域应用时，必须考虑 MassMotion 验证和确认程度来评估 MassMotion 适用性：

- 表达特别关注环境下的疏散的真实性；和
- MassMotion 的表达结果对消防安全策略的支持程度。

当评估 MassMotion 模型的核心要素（人员路线选择、人员移动和社会力量）的不确定性时，这尤其重要。

结论

验证和可靠性测试（特别是后者）是一个持续的过程。

验证和可靠性测试过程让我们确信，MassMotion 能够表示各种疏散场景中关键的人类行为特性。

1 简介

1.1 背景

MassMotion [1]是一款由 Oasys (Ove Arup SYStems) 开发的行人动力学和疏散模拟软件工具。

MassMotion 将建筑环境用一系列几何组件（例如地面、坡道、楼梯、自动扶梯、门、栅栏和出入口）进行表达。软件中的人员（或三维空间的占有者）有以下特性：

- 通过入口进入软件中建筑模型中的几何组件；
- 与软件中几何组件和其他人员存在交互；以及
- 根据用户指定的疏散场景，通过出口离开模型中的几何组件。

MassMotion 在疏散事件中实施一种模拟人类行为的理论（概念）模型。验证和可信度可以定义如下：

- **验证**测试表明，已经在 MassMotion 中正确实施该理论模型。
- **可信度**测试表明，理论模型（及其在 MassMotion 中的实现）是否表示了疏散时间的真实性。

理想情况下，可以针对一切可能的方式和每一种可能的使用组合，对模型的所有组件进行完全验证和确认，使得模型可以反应具体系统的边界，即**总体模型验证和可信度**的完整表示。这样的模型将让我们完全相信，它能够表示具体系统的任何“现实生活”场景。但只有在完全了解底层系统的所有或是大部分方面时，这才有可能。由于不完全了解系统，这种模型很少存在（并且通常情况下，工程师根本不会对复杂系统感兴趣），即模型是现实的简化。这种简化在表示“现实生活”事件时引入了一定程度的不确定性。在模型的不同组件/子模型之间，这种不确定性的程度可以变化。

模型验证和可信度测试应被视为在决策过程中减轻不确定性影响过程的一部分。验证和可信度测试的数量越大和质量越高，对模型表达现实适用性的信心越大（随后，影响模型对于工作相关的决策）。如果验证和确认数量较少或质量较差，则该模型不一定被认为是“未确认”：相反，模型用户必须识别和减轻（或减少）感兴趣的具体工程应用的不确定性。这可以通过以下方式实现：

- A. 减少对存在不确定性的给定模型组件/子模型的使用；和/或
- B. 减轻存在不确定性的给定模型组件/子模型的不确定性。

后者可以通过以下一种（或多种）方法来解决：

- 增加对组件所表示现实世界现象的理解，以指导模型使用/开发（例如，通过题材研究）；
- 进行敏感性分析，以了解使用组件/子模型中的变化范围及其意义；
- 在组件的设置/使用中，可以考虑使用保守方式来消除/减少应用组件而造成的不确定性（值得注意的是模型中若保守设置会增加消防安全策略设计冗余）。

必须在具体工程应用的背景下考虑模型验证和可信度的程度，以确定模型的适用性

- 模型需要表示疏散事件的真实性，以及

- 通过模型指导确定具体消防安全策略的程度。

1.2 目的和范围

本报告记录了 MassMotion 进行疏散建模的验证和可信度。其由 Arup 消防工程师与 Oasys MassMotion 开发团队联合开发，旨在向读者提供足够的信息，以证明 MassMotion 能够在疏散事件中表达人类行为的关键特征（准确的关键特征信息有助于合理估计模型中关键的输出结果）。

MassMotion 的验证和可信度是一个持续的过程，特别是对火灾发展过程中人类行为的理解（因此，对疏散数据/模型进行了增强）。

1.3 结构

本报告结构遵循验证和可信度测试的方法，如下：

- 第 2 节 – **MassMotion**

根据几何组件、人员属性、人员决策和人员移动对 MassMotion 进行疏散模拟的范围/能力进行分类。

- 第 3 节 – **理论模型说明**

在 MassMotion 中应用的模拟人类疏散行为的理论，可以总结为如下：

- 人员决策/路线选择 - 基于指定事件和“最低成本”算法；
- 人员移动 - 在“社会力量”模型的框架内定义。

同时也罗列了用于支持 MassMotion 中基础的理论 and 模型（及用于表现疏散过程中人员行为的适用性）的参考理论。

- 第 4 节 – **MassMotion 验证**

开展了验证测试以证明理论在 MassMotion 中正确实施（模型预测符合输入和理论规范）。测试旨在解决以下验证要素：

- 组件测试 - 检查 MassMotion 软件的每个组件是否按预期执行。
- 功能验证 - 检查 MassMotion 模型是否具有展示执行预期模拟所需功能范围的能力。该要求是一项具体的任务。为了满足功能验证，MassMotion 用户手册以容易理解方式列出了模型的完整的功能 [1]。
- 定性验证 - 证明 MassMotion 模型能够在疏散模型中再现与“现实”中一致的人类行为关键特性。
- 定量验证 - 证明 MassMotion 预测符合输入和理论规范

验证测试包括一系列基本测试场景。

- 第 5 节 – **MassMotion** 可信度测试。

该过程的最后一步是证明 MassMotion 通过比较模型预测与实验/观察到的疏散事件（和/或来自其他疏散模拟软件的结果），证明软件所表达的与现实可以很好的吻合。

- 第 6 节 - 讨论。

由于对整体模型验证和可信度测试几乎是不可能。根据本报告所述的验证和可信度说明，讨论了“不确定性”问题。

2 MassMotion

2.1 简介

MassMotion 是由 Arup 集团有限公司旗下全资子公司 Oasys Software Limited 开发的。MassMotion 通过了 ISO9001-TickIT 认证[9]，表明其开发符合国际软件质量管理体系标准。

MassMotion 是一个行人动力学和疏散模拟程序。它具有三维环境、自动人员寻路和离散事件逻辑等特点，可以对不同类型的场景进行建模。本文件旨在使设计人员能够对复杂设施的疏散设计和实施做出科学的决定。

2.2 历史

表 1 列出了 MassMotion 软件的发展历史。

版本	编译版本	发布日期
9.0	-	2017 年 07 月
8.0	-	2016 年 07 月
7.0	7.0.5.0	2015 年 02 月
6.1	6.1.1.8	2014 年 10 月
5.5	5.5.0.2	2013 年 05 月
5.0	5.0.6.4	2013 年 09 月
4.5	-	2011 年 11 月
4.0	-	2011 年 04 月

表 1: MassMotion 开发历史

本报告基于最新版本的 MassMotion 编制。

2.3 几何组件

在 MassMotion 中，建筑物理环境由一系列几何组件表示。表 2 列出了几何组件类型。

几何组件	说明
地面	人员可以在其上行走的物理水平区域。人员移动受到地面边界的限制。
连接	人员从一个几何组件过渡到另一个几何组件的物理水平连接。
楼梯、坡道和自动扶梯	一个物理垂直连接，是人员从一层的几何组件到达另一层的几何组件。
门户（入口和出口）	人员通过门户（或楼层）进入或退出模型，入口将人员引入模型。出口定义人员的最终目的地。
栅栏和障碍物	栅栏和障碍物限制了人员在物理环境中的行动。
提供服务的组件（人和物）	可以精确控制的单向流通组件。（常用于旅客处理或安检区域。）

表 2: MassMotion 几何组件类型

2.4 人员

在 MassMotion 中，通过使用入口在模拟开始时创建人员。人员在开始模拟之前不占用几何组件中的任何空间。然后，在给定的时间段内（最少 1 秒）创建所有人员。通过入口可以直接在门户上创建人员或随机的在连接到门户的楼层上创建人员。

2.5 人员属性

人员属性（见表 4）是定义人员的参数，其中包括：

- 与几何组件互动
- 与其他人员互动，以及
- 做出决定。

人员属性是强制性的：它们具有默认值，或者从均匀概率分布中随机分配（其极限由最小值和最大值定义）。

2.6 人员路线选择

人员被放置在物理环境中（由几何组件定义），并被分配目标（例如，需要通过出口疏散）。人员的行为概况促使其作出一系列选择，随后一系列的行为将帮助他们到达目的地。

每个人员：

- 在模拟开始时提供起点和目的地矩阵（即人员行程）；
- 根据行程和行为特征，做出一系列的选择到达目的地。

可以通过两种方式指定一个疏散人员的路线选择：

- 最低成本 - 人员通过“最简单”的路线行走。人员知道所有或局部的出口（在模拟开始时，出口变得可用/不可用）。在每个时间步骤中，会为人员计算每条路线

（到他们知道的出口）相关联“成本”。人员将沿着“最低成本”路线到达出口。

- 指定目的地 - 为每个人员指定了一个出口。人员将沿着“最低成本”路线到达特定的出口。

人员有能力识别拥堵。他们将根据其对环境熟悉，结合当前的条件，考虑替代路线。

在整个模型中，MassMotion 在模拟期间的每个时间步中开展动态计算。人员能够根据不断变化的情况（例如，出口的动态可用性/不可用性）来适应他们的环境，而不是受预定义的人员参数限制。

2.7 人员移动

人员通过物理环境移动。人员移动的速度由以下函数生成：

- 人员的个体特征（例如，性别、年龄、大小）
- 物理环境（例如，空间环境和人员所在的几何组件）；
- 其他邻近的人员情况。

人员在模型中的移动是通过“社会力量”算法来反应反射的现象。在每个时间步中“力”作用于人员，使他们相应地移动。已经按照 Fruin 针对规划设计中行人的服务等级对“社会力量”算法进行了校准。

2.8 与其他软件技术说明的比较

美国国家标准与技术研究院技术说明 1680 [10]为市场上一些最常见的疏散模式提供了一个标准化功能清单。表 3 摘录了 MassMotion、Simulex [11]、STEPS [12]、Legion [13] 和 buildingEXODUS [14]的部分内容。

	MassMotion	Simulex	STEPS	Legion	building EXODUS
建模方法	行为	部分行为	行为	行为	行为
目的	任何建筑类型	任何建筑类型	任何建筑类型	任何建筑类型	任何建筑类型
网格/结构	连续	连续	精细节点	连续	精细网络
模型/乘客的 视角	个人与全局	个人	个人	个人	个人
行为	人工智能/概 率	隐含	条件/概率	人工智能/概 率	隐含

移动	周围环境 (Fruin 速度 密度)	人际距离 (Fruin 速度密度)	人际距离/下一个网格单元 空格	人际距离/条件	潜力, 下一个 网格单元空格
路线选择	周围环境	最短/改变距离图	周围环境	周围环境	周围环境
可信度测试	规范/演习/文献/其他模型	演习/文献/第三方	演习/针对过去实验文献的 确认	规则/演习/针对过去实验文献的 确认/第三方确认	演习/文献/其他模型/第三方

表 3: 疏散模型的特征

3 理论模型说明

3.1 背景

MassMotion 采用的数据和基础理论是基于人员流通过程中观察到的一般人类行为的数据和基础理论，所以它们不特定用于疏散事件。在疏散期过程中，可以普遍观察到正常偏好和乐观偏好同时发生，即人们通常认为他们没有危险周围环境正常，及他们不会遇到任何不好的事情[15]。因此，疏散和正常流通期间的人类行为通常是可比较的。如果个体感知到的风险水平增加，例如，由于近距离看到火灾/烟雾，个人很可能根据所感知风险的程度调整自己的行为。

除了火灾/烟雾附近的人员之外，或者发生相当大的火灾/烟雾蔓延的事件，绝大多数人在疏散时不会直接暴露于或意识到火/烟。因此，在实际疏散期间，大多数人所认为的风险水平很可能很低（没有提供额外的资料来表明其他情况）。

此外，疏散建模分析中通常会排除接触火/烟的人员/人员，并以此作为验收标准的一部分（主要是考虑最初紧靠火/烟的人员将迅速移动到出口或保护区）。

因此，典型疏散模式中，大多数人员/人员所感知到的风险水平可能很低。所以 MassMotion 中采用的基础数据和理论尽管是基于日常人员流通观察到的一般人类行为，但仍认为适合用于在疏散期间对人类行为进行建模。

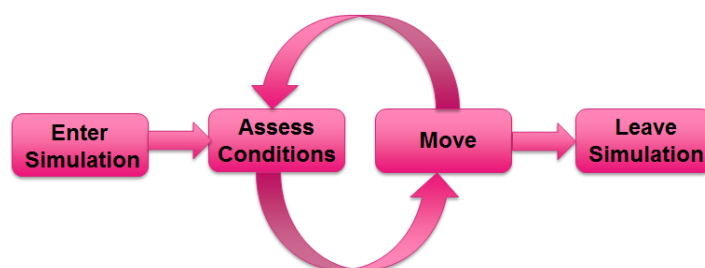
对于特定工程应用程序，如果疏散人员可能会遇到更高级别的感知风险，则建模者应确定：

- 基础理论和数据在何种程度上仍然有效；
- 修改默认参数（例如，减少预疏散时间，增加行走速度）是否会产生更准确的结果。

3.2 人员运动

在 MassMotion 中，人员运动分为人员决策过程和人员移动过程：

- 在疏散事件中人员被赋予一个目标。会“思考”的人员分析了起点和目的地之间的距离、拥堵和地形并进行决策，为人员目标计算路线成本。这种决策方式应用于动态变化环境中的人员选择最合适的路线。
- 人员移动过程中反射过程（见图 1）是基于人员基本的移动和对环境的响应，如人员在环境中进行导航，避免障碍物和其他人员。



Enter Simulation	进入模拟
Assess Conditions	评估条件
Move	移动

Leave Simulation	离开模拟
------------------	------

图1: MassMotion 反射移动过程

以下小节概述了用于疏散建模的 MassMotion 的关键功能组件。有关每个组件的更详细描述，请参见 MassMotion 用户手册[1]。

3.3 人员事件

一旦定义了 MassMotion 物理环境（使用几何组件），就会创建人员事件来启动、控制或影响仿真过程的人员流程。

人员事件属性包括：

- **起点** - 人员进入模型物理环境的入口。
- **启动时间** - 启动疏散的模拟时间。
- **预疏散时间** - 人员在其初始位置停留的持续时间。
- **目的地** - 人员的目标或目的地：或者
 - 物理环境中的特定出口，或
 - 动态（由 MassMotion）确定的“最低成本”出口。
- **模拟持续时间** - 模拟疏散事件的持续时间。

可以为所有人员、部分人员或单个人员指定事件，以更好地代表感兴趣的疏散场景。

（也可以定义事件来表示入口和出口的开/关。）

3.4 人员属性

在 MassMotion 中，人员被分配了物理和行为属性。在表 4 中列出了分配给人员的默认物理，移动和路线选择属性。（如果限制了最小值和最大值，则从每个模拟定义值之间的均匀概率分布中随机分配属性。）

	参数	默认数据	数据的由来
移动	人员半径 (m)	0.25	Fruin [5][6]讨论了面积为 0.2m ² ，尺寸为 0.6m×0.4m 的椭圆体。 0.25m 半径的圆形与其面积几乎相同，同时在计算机移动和相互作用方面效率更高。
	水平疏散行走速度 (m/s)	最小 = 0.65 最大 = 2.05 (平均值= 1.35)	默认水平疏散行走速度 (0.65m/s to 2.05m/s – 均匀分布) 是基于 Fruin[5][6]对于不同年龄和性别人员速度的调查。

参数	默认数据	数据的由来
	标准偏差 = 0.25)	
楼梯（上-楼梯与地面倾斜度 X） 影响人员速度 （按水平疏散行走速度百分比% 折算）	$(0^\circ < X < 27^\circ) : 42.5$ $(27^\circ \leq X \leq 32^\circ) : 42.5 - 37.8$ $(X > 32^\circ) : 37.8$	默认楼梯行走的速度分布范围是基于 Fruin's [5][6] 对于不同年龄和性别人员速度的调查。 （注意：线性插值适用于 $27^\circ \leq X \leq 32^\circ$ 水平疏散行走速度的百分比折算）
楼梯（下-楼梯与地面倾斜度 X） 影响人员速度 （按水平疏散行走速度百分比% 折算）	$(0^\circ < X < 27^\circ) : 57.4$ $(27^\circ \leq X \leq 32^\circ) : 57.4 - 49.8$ $(X > 32^\circ) : 49.8$	
坡道（上-坡道与地面倾斜度 X） 影响人员速度 （按水平疏散行走速度百分比% 折算）	$(0^\circ < X < 5^\circ) : 100$ $(5^\circ \leq X \leq 10^\circ) : 88.5$ $(10^\circ \leq X \leq 20^\circ) : 88.5 - 75.0$ $(20^\circ < X) : 75.0$	默认坡道步行速度分布范围是基于 Fruin [5][6] 在不同坡道角度的跑步机上研究士兵行走的时间。
坡道（下-任何角度均一致） 影响人员速度 （按水平疏散行走速度百分比% 折算）	100.0	
最大加速度 (m/s ²)	3.0	默认最大加速度，转动速率和随机因素是基于 Oasys 的定性模型和灵敏度分析。
最大转速 (degrees/s)	45.0	
随机因素 （人员在水平面上向任何方向疏散，按水平疏散行走速度百分比%折算）	0.1	
行走方向	方向：保持向右 强度：强	默认行走方向是基于 Fruin's Levels of Service A to F [5][6] 人员在拥挤情况下自我调整的特性（在流动和移动）。 选择“保持靠右行走”习惯的（一些国家）进行研究，当均靠右行走时有利于解决行动中人员之间的冲突。

	参数	默认数据	数据的由来
Route Choice	水平距离成本 (因子)	最小 = 0.75 最大 = 1.25	根据业务案例发展手册[16], 人员计算各条疏散路线上所需花费的成本, 该理论是基于伦敦交通部研究的各阶段旅程中所需花费的成本。默认在一定范围内人员选择疏散路线所需花费的成本非常相似, 而改变路线的人员会在计算过程中随机产生。
	垂直距离成本 (因子)	最小 = 0.75 最大 = 1.25	
	排队成本 (因子)	最小 = 0.75 最大 = 1.25	
	处理成本 (因子)	最小 = 0.75 最大 = 1.25	

表 4: 默认人员属性

用户也可以指定人员属性的值, 表 4 中的默认人员属性不一定分配给人员。这样可允许建模者对疏散模型中的人员属性进行额外的定义。在这种情况下, 建议建模者评估:

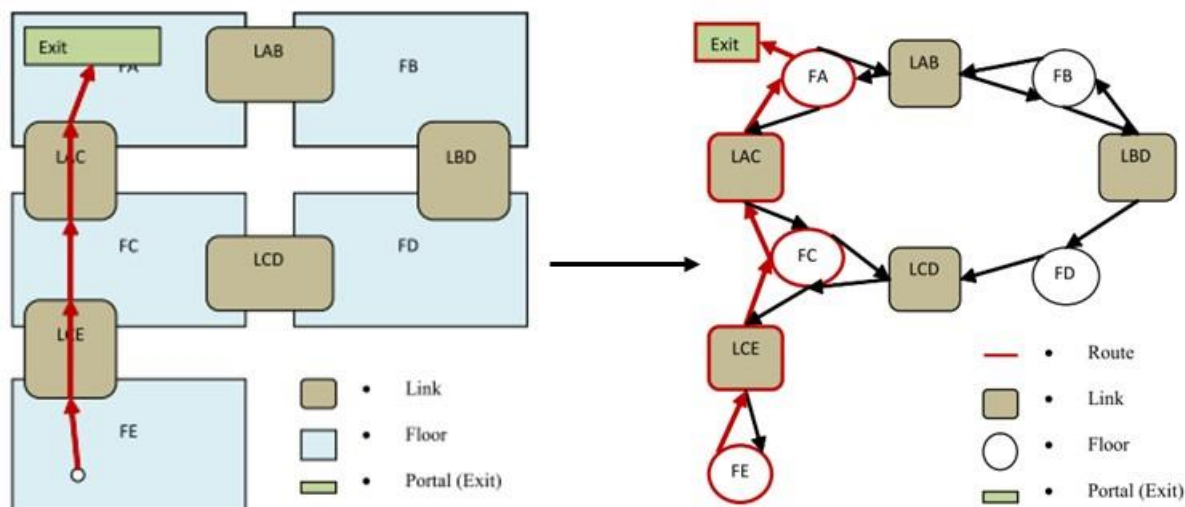
- 相关疏散场景默认人员属性的有效性;
- 从适当的出版文献中提取的可靠人员属性数据作为替代值是否更合适。

所有输入数据都应记录在文档中, 并应在描述场景、数据和模拟预测的文档中进行说明。

除了这些用户可配置的参数之外, 还存在一些影响低级人员行为的“硬编码”参数, 例如, 与社会力量模型相关的参数。本文档不再进一步展开如何测试这些参数。

3.5 人员路线选择

MassMotion 通过几何组件自动创建网络来管理物理环境的复杂性（图 2）。



Link	连接
Floor	楼层
Portal (Exit)	门户 (出口)
Route	路线
Link	连接
Floor	楼层
Portal (Exit)	门户 (出口)

图 2: MassMotion 将地面/连接系统转换成网络的示意图

MassMotion 可以独立管理网络分配，而无需建模者手动创建或维护它们。

人员路线选择过程基于网络。

单个人员选择起点和目的地点之间的路线。网络中的路线选择是基于所有可用路线的感知成本，使人员达到其最终目标而不需要回退。

成本感知是人员分析距离、拥塞和地形类型的过程，以便为人员可用的所有路线分配成本。选择最具成本效益的路线。总路线成本（以秒计）

$$Cost = \left(W_D \times \left(\frac{D_G}{V} \right) \right) + (W_q \times Q) + (W_L \times L)$$

其中

成本 = 沿路线的总行程时间 (s)；

W_D = “距离”权重（人员属性）（-）；

D_G = 从人员位置到最终目标的距离 (m) ;

V = 人员所需速度 (人员属性) (m/s) ;

W_q = “队列”权重 (人员属性) (-) ;

Q = 到达连接入口之前队列中的预期时间 (s) ;

W_L = “几何组件遍历”权重 (人员属性) (-) ;

L = 几何组件类型成本 (s) 。

成本计算随机分配 (不同的模型修改者随机分配)，在统计学上以体现具有不同行为人员中较多的群体样本。

MassMotion 算法中具有灵活性，允许人员根据当地动态条件 (即在模拟期间) 修改其路线选择。

参考文献

Kuffner, J.J.Jr., Goal-directed Navigation for Animated Characters Using Real-time Path Planning and Control, Proceedings of CAPTECH 1998, 1998 [17].

Dijkstra, E.W., A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, Numerische Mathematik, 1:269–271, 1959 [18].

Veeraswamy, A., Computational Modelling of Agent Based Path Planning and the Representation of Human Way-finding Behaviour within Egress Models, PhD Thesis, University of Greenwich, 2011 [19].

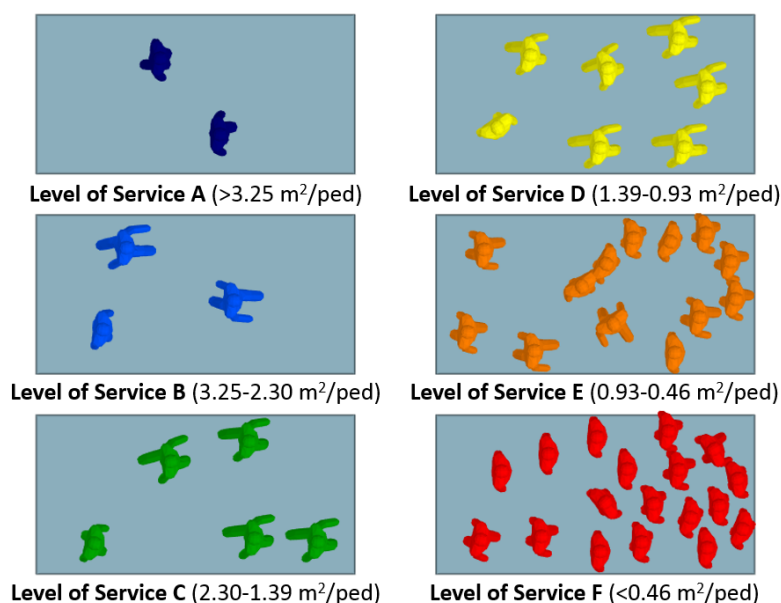
3.6 人员移动

MassMotion 人员移动过程包含了空间分析，每个人员都知道物理环境的所有可行走的表面 (已考虑到其紧邻的障碍物和其他人员)。人员知道其位置和目标之间的所有完整路线。

单个人员的优先行走速度是一个地形 (或几何组件) 的函数。人员的实际行走速度也是人员附近所有人员的密度函数，并且在 MassMotion 进行相应修正。(这表示人们喜欢根据他们正在移动的平均速度来保持人员之间的给定间隔)。

根据 Fruin [5][6] (图 3) 的成果，地形、人员密度和人员速度具有相对应的关系。

Fruin Level of Service (Walkways)



Fruin Level of Service (Walkways)	Fruin 服务级别 (走道道)
Level of Service A (>3.25m ² /ped)	服务水平 A (> 3.25 平方米/人)
Level of Service B (1.39-0.93m ² /ped)	服务水平 B (1.39-0.93 平方米/人)
Level of Service C (3.25-2.30m ² /ped)	服务水平 C (3.25-2.30 平方米/人)
Level of Service D (0.93-0.46m ² /ped)	服务水平 D (0.93-0.46 平方米/人)
Level of Service E (2.30-1.39m ² /ped)	服务水平 E (2.30-1.39m 平方米/人)
Level of Service F (<0.46m ² /ped)	服务水平 F (<0.46 平方米/人)

图3: Fruin“服务水平 (走道)”示意图

Fruin“服务水平”是基于20世纪70年代对纽约地铁的不同地形收集的数据（行走速度）。许多疏散模型软件的文本都引用了 Fruin 的成果，例如，在 IMO 1238 [7]、SFPE 手册 [20] PD 7974-6 [21]）中被就有引用，同时 Fruin 的成果也在许多疏散模型中作为默认参数（例如，buildingEXODUS [14]、Pathfinder [22]）。

参考文献

Fruin, J., Pedestrian Planning and Design, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, New York, 1971 [5].

Fruin, J, Pedestrian Planning and Design, Revised Edition, Elevator World Inc., Mobile, AL, 1987 [6].

IMO, MSC.1/Circ. 1238, Guidelines for Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships. International Maritime Organization, London, UK, 2007 [7].

SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, NFPA, 2002 (Chapter 3-13, Proulx, G., Movement of People: The Evacuation Timing) [20].

PD 7974 The Application of Fire Safety Engineering Principles to Fire Safety Design of Buildings – Part 6: Human Factors: Life Safety Strategies – Occupant Evacuation Behaviour and Condition, British Standards Institute, 2004 [21].

Galea, E.R., Gwynne, S., Lawrence, P.J., Filippidis, L., Blackshields, D., Cooney, D., buildingEXODUS User Guide and Technical Manual V 5.0, Fire Safety Engineering Group, University of Greenwich, 2011 [14].

Pathfinder Technical Reference, Thunderhead Engineering Consultants Inc., 2009 [22].

3.7 社会力

在 MassMotion 中，人员能够利用社会力量模型[2][3][4]以适应物理环境内的动态变化条件（例如，避免障碍物和其他人员）。

社会力模型假设可以通过人员所处的“社会力量”来预测人员的移动。“社会力量”可以衡量人员执行某些行为（动作）的动机，其中包括：

- 描述对移动速度的加速/减速术语；
- 描述人员希望保持与几何组件和其他人员边界的偏好距离的术语 - “排斥力”；
- 描述人员实现其目标的愿望 - “吸引力”的术语。

由此产生的移动方程是非线性耦合的 Langevin 方程[2][3]。

图 4 [2][3]中示出了导致行为变化（即人员路线选择和/或人员移动的修改）的过程示意图。

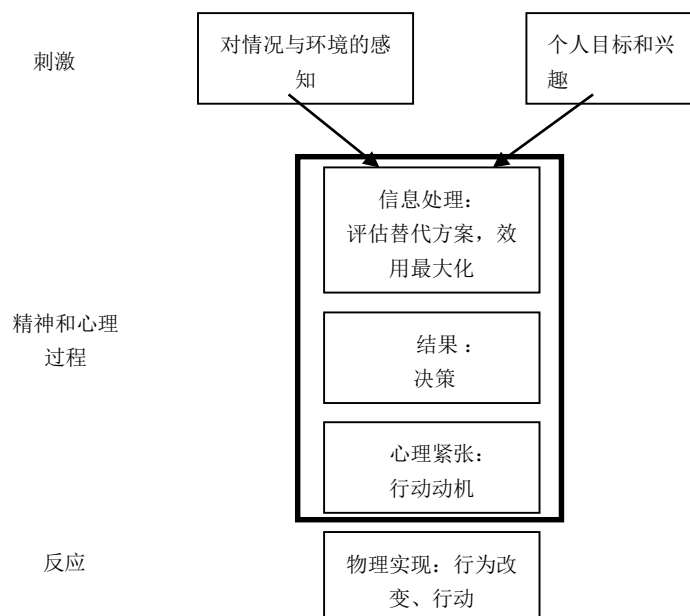


图4：导致行为变化的过程示意图

这里提出刺激（例如，物理环境的变化）将导致于人员的行为反应（例如，人员路线选择和/或人员修改移动），并根据实用效用最大化的宗旨从一组替代方案中选择（例如，在最短的时间内到达出口）。

在 MassMotion 中，社会力算法中有一系列组件力量（如表 5 所示），用于确定人员的移动（根据当地环境影响可能不同）。

表 5：社会力量模型– 组件力量

组件力量	颜色	说明
目标力	鲜绿色	目标驱动下人员将以预设的速度朝着目标移动。
邻近人员力	明黄色	模型中人员之间具有排斥力量（人员之间需要保持合适的距离）。
飘移力	紫色	面对迎面而来的人员，人员将优先选择排斥力驱动下的移动方向
碰撞转向力	天蓝色	排斥力是为了防止与邻近人员的碰撞。
碰撞屈服力	橙色	使人员减速的排斥力（和/或扭矩）避免了与相邻人员碰撞
凝聚力	白色	吸引力会将人员往具有相似目标的周围人员的几何中心移动
队列驱动力	灰色	在行动的过程中吸引力将人员推向目标的中间。
角飘移力	棕色	使人员能够转弯的排斥力。
避免迷路的力量	粉红色	将人员拉回到可步行的表面的强大力量（当人员试图移动到可行走表面的边界之外时）。
约束网格力	蓝色	产生的净力。
约束速度	黑色	产生的速度。

注意事项：

- “障碍物”不产生排斥力：它们用于限制其他力量。
- 当组件力量相加时，产生的净力减小，使其不会将人员推入边界。

参考文献

Helbing, D., Molnar, P., Social Force Model for Pedestrian Dynamics, Physical Review E, Volume 51, Issue 5, pp4281-4286, 1995 [2].

Helbing, D., Molnar, P., Social Force Model for Pedestrian Dynamics II, Institute of Theoretical Physics, University of Stuttgart, 70550, Germany, 1995 [3].

Helbing, D., Farkas, I., Vicsek, T., Simulating Dynamical Features of Escape Panic, Nature, 407, 487-490, 2000 [4].

Song, W.G., Yu, Y.F., Wang, B.H., Fan, W.C., Evacuation Behaviors at Exit in CA Model with Force Essentials: A Comparison with Social Force Model, Physica A 371, 658-666, 2006 [22].

Johansson, A., Helbing, D., Shukla, P.K., Specification of the Social Force Pedestrian Model by Evolutionary Adjustment to Video Tracking Data, Advances in Complex Systems, 10(4), 271-288, 2009 [23].

Korhonen, T., Heliovaara, S., FDS+Evac: Modelling Pedestrian Movement in Crowds – Technical Reference and User's Guide, VTT Working Papers 119, 2009 [24].

4 MassMotion 验证

通过验证测试以证明理论在 MassMotion 中的得到了正确应用（模型预测符合输入和理论规范）。

验证测试（见附录 A）中将在疏散期间人的行为分为以下几个方面：

- 预疏散行为；
- 行走速度；
- 身体；
- 做决定；
- 人群动态

测试 1-14 列出了国际海事组织（IMO）1238 [7] 和美国国家标准与技术研究院（NIST）技术说明 1822 [8] 中规定的一套标准的疏散建模验证测试。（需要说明的是，NIST 1822 中规定的四个测试无法开展中，因为 MassMotion 软件当前没有功能可以显式/直接表示该要求。未包含的验证测试为：

- 测试 2.5 - 降低可见度与步行速度；
- 测试 2.6 - 乘客失去行动能力；
- 测试 2.7 - 电梯使用；
- 测试 2.9 – 小组行为。

除了 IMO 1238 和 NIST 1822 规定的测试，还对确认测试进行了验证，以验证 MassMotion 模型的其他方面。

验证测试总结，如表 6 所示。

MassMotion 验证测试表					
ID	标题	类别	NIST / IMO	敏感度	通过/失败
1	A1 走廊步行速度	速度	是	否	通过
2	A2 上楼梯行走速度	速度	是	是	通过
3	A2 下楼梯行走速度	速度	是	是	通过
4	A3 出口流速	人群	是	是	通过
5	A4 预疏散时间	预疏散	是	否	通过
6	A5 拐角周围移动	身体/人群	是	否	通过
7	A6 参数分配	决策	是	否	通过
8	A7 逆向流动	人群	是	否	通过 (见测试)
9	A8 使用拥堵的出口	决策	是	否	通过
10	A9 出口分配	决策	是	否	通过
11	A10 楼梯拥堵	人群	是	否	通过
12	A11 移动障碍	身体/人群	是	是	通过 (见测试)
13	A12 联盟关系	决策	是	否	通过
14	A13 动态出口可用性	决策	是	否	通过
15	A14 楼梯合并	人群	否	是	通过
16	A15 楼梯流量	人群	否	是	通过
17	A16 单向通道限制	人群	否	否	见注释
18	A17 双向通道限制	人群	否	否	见注释
19	A18 自动扶梯流量	人群	否	否	见注释
20	A19 单向楼梯流量	人群	否	否	见注释
21	A20 双向楼梯流量	人群	否	否	见注释
22	A21 单向拐角流量	人群	否	否	见注释
23	A22 双向拐角流量	人群	否	否	见注释
24	A23 单向回转楼梯	人群	否	否	见注释
25	A24 垂直路线选择	决策	否	否	见注释
26	A25 水平路线选择	决策	否	否	见注释
注意：将由 Oasys 为下次发布的 MassMotion 完成验证测试 17-26。（定于 2015 年底）					

表 6: MassMotion 验证测试总结表

某些验证测试较容易受到随机抽样模型组件的影响。随机采样基于给定模拟测试的分布，用于为参数分配随机值。相同测试的重复模拟可能会导致分配不同的随机值。这

可能导致相同测试不同模拟之间的预测结果会有差异。针对这种随机抽样会对预期结果有严重影响的验证测试，根据 IMO 1238 的指导进行了 50 次模拟，以反应参数的范围的总体预测结果。

为了证明给定参数值的变化如何影响整体 MassMotion 预测，对某些验证测试进行了灵敏度分析。在提出小型设计变更（特定工程应用）时，灵敏度分析的结果可以用于预测分析模拟结果的趋势。

从所有验证测试中可以看出，MassMotion 的预测与 NIST 和 IMO 的相关验收标准相符。值得注意的是，两种验证测试证明了某些输入参数小幅变化对结果的影响具有的高灵敏度：这些参数在表 6 中已被标记为“参见测试”（其中提供了附加信息）。应该仔细考虑这些参数的输入更改，否则可能会增加不切实际的预测。

5 MassMotion 确认

本节总结的确认案例中，将实际或建模的数据与 MassMotion 的模拟结果进行了比较。在表 7（已发布）和表 8（未发布）中总结了 MassMotion 确认案例。

MassMotion 确认案例（已发布）		
参考	说明	结论
[26]	位置： 加拿大多伦多。 建筑物： 联合火车站 类型： 火车站。 占用： 10,348. 数据来源： 日常使用 数据分析： 路线选择。	MassMotion 产生了与使用 14 个出口的每一个人员相当的结果。 （观察值和预测值之间的百分比差为 0.0% - 2.1%，平均值为 0.9%）
[27][28]	位置： 英国伦敦。 建筑物： 加拿大广场一号。 类型： 高层办公室（50 层楼，4 个楼梯间）。 占用： 5,469（所有乘客）。 数据来源： 疏散演习 数据分析： 楼梯/路线/出口使用、流速、总疏散时间、其他疏散模型结果。	MassMotion 预测疏散时间比观察到的 20 分钟疏散时间多 9.5%。 MassMotion 更加仔细地预测了加拿大广场一号与 Legion（13 分 30 秒）预测的实际疏散时间之间存在 10% 的差异。 MassMotion 更加密切地预测了加拿大广场一号与 STEPS（17 分钟）预测的实际疏散时间之间存在 15% 的差异。
[27][28]	位置： 美国纽约。 建筑物： 美洲大道 155 号。 类型： 中型办公室（对 15 层楼的 6 层，2 个楼梯口进行建模）。 占用： 232. 数据来源： 疏散演习 数据分析： 楼梯/路线/出口使用、流速、总疏散时间。	MassMotion 产生的疏散时间比观察到的 7 分 24 秒的疏散时间多 5.6%。观察到了出口流速和出口使用情况相当。
[27][28]	位置： 英国伦敦。 建筑物： 汉诺威广场 10 号。 类型： 高层办公室（22 层楼，2 个楼梯间）。 占用： 1,130.	MassMotion 产生的疏散时间比观察到的 13 分钟疏散时间少 1.4%。

MassMotion 确认案例（已发布）		
参考	说明	结论
	数据来源： 疏散演习 数据分析： 楼梯/路线/出口使用、流速、总疏散时间。	
[27][28]	位置： 英国伦敦。 建筑物： 布劳得大街 85 号。 类型： 高层办公室（30 层地面，3 层楼梯） 占用： 1,385。 数据来源： 疏散演习 数据分析： 楼梯/路线/出口使用、流速、总疏散时间。	MassMotion 产生的疏散时间比观察到的 18 分钟疏散时间少 7.3%。

表 7: MassMotion 确认案例摘要（已发布）

MassMotion 确认案例（未发布）		
附录	说明	结论
B1	位置： 英国伦敦。 建筑物： （匿名） 类型： 高层办公室（50 层楼，4 个楼梯间）。 占用： 1,411（仅楼梯用户）。 数据来源： 疏散演习 数据分析： 楼梯/路线/出口使用、流速、总疏散时间。	MassMotion 预测疏散时间比观察到的 22 分钟疏散时间多 12.2%。 观察到了最多使用楼梯的楼梯疏散流速相当。 观察到了最后一个乘客离开每个楼梯的时间相当。

表 8: MassMotion 确认案例摘要（未发布）

确认案例表明 MassMotion 预测与实际/建模数据相当。

6 讨论

6.1 摘要

本报告概述了：

- 用于模拟疏散的 MassMotion 要求；
- 如何发展并应用人类行为知识和现有建模技术；
- MassMotion 中实施的理论模型和数据适用性，以反映疏散场景；
- MassMotion 的验证和确认测试。

6.2 验证测试

已按照以下步骤进行 MassMotion 模型的验证测试：

- 国际海事组织（IMO）1238 [7]；
- 美国国家标准与技术研究院（NIST）技术说明 1822 [8]。

另外，我们进行了不包含在 IMO 1238 和 NIST 技术说明 1822 验证测试中的模型各个方面的测试。

我们所进行的全面验证测试，如表 6 所示。

灵敏度测试已被应用于一些验证测试，以证明对输入参数变化对模拟结果的灵敏度。

所有经过调查的验证测试通过了验收标准。值得我们注意的是，两种验证测试证明了输入参数小幅变化会对模拟结果有高灵敏度影响：这些被标记为“参见测试”（其中提供了附加信息）。应该仔细考虑针对这些输入参数的更改，否则可能会增加不切实际的预测。

验证测试结果表明，MassMotion 能够预测这些测试案例的结果。

6.3 确认测试

在确认测试中，将 MassMotion 的模拟与“现实世界”疏散事件、疏散演习和人员流通进行比较研究。

案例确认研究表明，MassMotion 预测结果与实际数据相当。因此，在研究的案例中，可以得出 MassMotion 能够表示疏散期间人类行为关键方面的结论。

6.4 不确定性

如之前已经明确的，对总体模型验证和确认是不可能的。建模过程有多种不确定性来源。一些主要来源列举如下。

- 身体行为的固有多变性。
- 将身体行为概念化以适合考虑的模型。
- 描述概念化模型的数学模型推导。
- 计算机软件中作为数值模型的数学模型实现。
- 模型所需输入数据参数的固有多变性。
- 输入数据参数选择的不确定性。
- 缺乏与身体行为有关的知识（以及影响其的所有因素）。
- 缺乏与模型有关的知识（概念化、数学和数值）。
- 缺乏与输入数据参数相关的知识。

验证和确认提供了一种评估数学模型（在计算机软件中作为数值模型实现）适用性的手段，用于通过减少不确定性来表示身体行为的预期目的，且无论何种情况下都可以进行。

在 MassMotion 的背景下，具体来说，这个验证和确认测试目的是：

- 通过验证测试减少模型（数学和模型）和用户（知识）不确定性；
- 通过确认案例研究来减少模型（概念）、数据和用户（知识）不确定性。

但对 MassMotion 进行的验证和确认测试并不详尽。

在特定应用程序利用 MassMotion 验证和/或确认范围之外的情况下，必须减少不确定性（通过减轻不确定性存在的组件/子模型使用或减轻不确定性本身），如前所述。

MassMotion 中使用的理论和数据是基于人们正常流通行为会避开危险或有较高感知风险水平而得出的观察结果。对于特定工程应用程序，如果疏散人员可能会遇到更高级别的感知风险，则建模者应确定：

- 基础理论和数据在何种程度上仍然有效；
- 默认可配置参数（例如，减少预疏散时间，增加行走速度）改变是否可能会产生更多可能的预测。

在具体的应用情况下，需要考虑 MassMotion 验证和确认来评估 MassMotion 对以下项目的适用性：

- 具体环境中的需要表示疏散事件的真实程度；和

- 用 MassMotion 的模拟结果支持消防安全策略的程度。

当评估 MassMotion 模型的核心要素（人员路线选择、人员移动和社会力量）的不确定性时，这尤其重要。

6.5 结论

验证和确认（特别是后者）是一个持续的过程。

验证和确认过程让我们确信，MassMotion 能够表示各种疏散场景中人类行为的关键方面。

7 参考文献

- [1] MassMotion v7.0, Manual, Oasys Software Limited, 2015.
- [2] Helbing, D., Molnar, P., Social Force Model for Pedestrian Dynamics, Physical Review E, Volume 51, Issue 5, pp4281-4286, 1995.
- [3] Helbing, D., Molnar, P., Social Force Model for Pedestrian Dynamics II, Institute of Theoretical Physics, University of Stuttgart, 70550, Germany, 1995.
- [4] Helbing, D., Farkas, I., Vicsek, T., Simulating Dynamical Features of Escape Panic, Nature, 407, 487-490, 2000.
- [5] Fruin, J., Pedestrian Planning and Design, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, New York, 1971.
- [6] Fruin, J., Pedestrian Planning and Design, Revised Edition, Elevator World Inc., Mobile, AL, 1987.
- [7] IMO, MSC.1/Circ. 1238, Guidelines for Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships. International Maritime Organization, London, UK, 2007.
- [8] Ronchi, E., Kuligowski, E.D., Reneke, P.A., Peacock, R.D., Nilsson, D., The Process of Verification and Validation of Building Fire Evacuation Models, NIST Technical Note 1822, 2013.
- [9] Oasys website: [http://www.oasys-software.com/media/QA/QA%20Certificate%20\[2013-03-25%20to%202016-03-24\].pdf](http://www.oasys-software.com/media/QA/QA%20Certificate%20[2013-03-25%20to%202016-03-24].pdf), Accessed: 26-Mar-2015.
- [10] Kuligowski, E., Peacock, R.D., Hoskins, B.L., A Review for Building Evacuation Models, Second Edition, National Institute of Standards, Technical Note 1680, 2010.
- [11] IES Simulex User Manual, Integrated Environmental Solutions Inc., 2001.
- [12] STEPS (Simulation of Transient Evacuation and Pedestrian MovementS): User Manual, Unpublished, Mott Macdonald, 2003.
- [13] Legion International, <http://www.legion.biz/system/research.cfm>, 2003.
- [14] Galea, E.R., Gwynne, S., Lawrence, P.J., Filippidis, L., Blackshields, D., Cooney, D., buildingEXODUS User Guide and Technical Manual V 5.0, Fire Safety Engineering Group, University of Greenwich, 2011.
- [15] Gwynne, S.M.V., Hulse, L.M., Kinsey, M.K., Guidance for the Model Developer on Representing Human Behavior in Egress Models', Fire Technology, DOI: 10.1007/s10694-015-0501-2, 2015.
- [16] Business Case Development Manual, Transport For London, May 2013. (Appendix E 3.1)
- [17] Kuffner, J.J.Jr., Goal-directed Navigation for Animated Characters Using Real-time Path Planning and Control, Proceedings of CAPTECH 1998, 1998.
- [18] Dijkstra, E.W., A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, Numerische Mathematik, 1:269–271, 1959.

- [19] Veeraswamy, A., Computational Modelling of Agent Based Path Planning and the Representation of Human Way-finding Behaviour within Egress Models, PhD Thesis, University of Greenwich, 2011.
- [20] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, NFPA, 2002. (Chapter 3-13, Proulx, G., Movement of People: The Evacuation Timing.)
- [21] PD 7974 The Application of Fire Safety Engineering Principles to Fire Safety Design of Buildings – Part 6: Human Factors: Life Safety Strategies – Occupant Evacuation Behaviour and Condition, British Standards Institute, 2004.
- [22] Pathfinder Technical Reference, Thunderhead Engineering Consultants Inc., 2009.
- [23] Song, W.G., Yu, Y.F., Wang, B.H., Fan, W.C., Evacuation Behaviors at Exit in CA Model with Force Essentials: A Comparison with Social Force Model, Physica A 371, 658-666, 2006.
- [24] Johansson, A., Helbing, D., Shukla, P.K., Specification of the Social Force Pedestrian Model by Evolutionary Adjustment to Video Tracking Data, Advances in Complex Systems, 10(4), 271-288, 2009.
- [25] Korhonen, T., Heliovaara, S., FDS+Evac: Modelling Pedestrian Movement in Crowds – Technical Reference and User's Guide, VTT Working Papers 119, 2009.
- [26] Morrow, E., MassMotion: Simulating Human Behaviour to Inform Design for Optimal Performance, The Arup Journal 1/2010, 2010.
- [27] Rivers, E., Jaynes, C., Kimball, A., Morrow, E., Zarnke, M., Using Case Study Data to Validate 3D Agent-based Simulation Tool for Building Egress Modeling, Proceedings of the Fire and Evacuation Modeling Technical Conference 2011, 2011.
- [28] Rivers, E. Jaynes, C., Kimball, A., Morrow, E., Using Case Study Data to Validate 3D Agent-Based Pedestrian Simulation Tool for Building Egress Modeling, Proceedings Pedestrian and Evacuation Dynamics 2014, 2014.

附录 A

验证测试

A1 测试 1：走廊步行速度

A1.1 测试说明

测试符合 IMO 1238 测试 1 和 NIST 1822 测试 2.1。

该测试用于验证模型是否能够持续维持人员的设定速度。（这是计算建筑物所需安全疏散时间的关键方面。）

该测试使用代表成年人步行速度（1m/s）的行走速度和足以测试指定人员速度是否随时间保持的走廊长度。

A1.2 测试目的

测试的目的是验证人员可以沿着走廊以恒定的步行速度移动。

A1.3 模拟设置

几何组件包括：

- 宽 2m、长 45m 的走廊；
- 走廊一端的入口；
- 走廊另一端的出口。

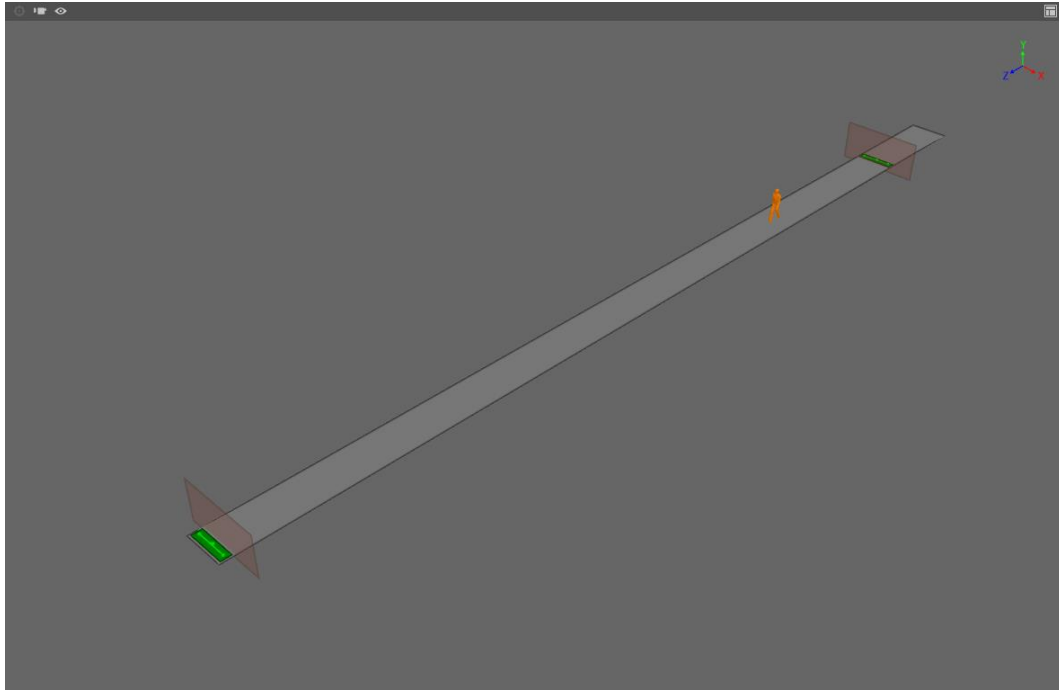
模拟了人员从入口到出口的过程。

人员的指定首选步行速度为 1.0m/s。

在 MassMotion 中，人员以 3m/s^2 的默认加速度加速/减速到首选步行速度。

为了达到 1.0m/s 的步行速度，人员需要行进 0.333m 才能从站立开始位置到达所需步行目标。走廊上设有两条间距为 40m 的警戒线。出/入口偏移警戒线至少 0.333m，以允许人员加速/减速。

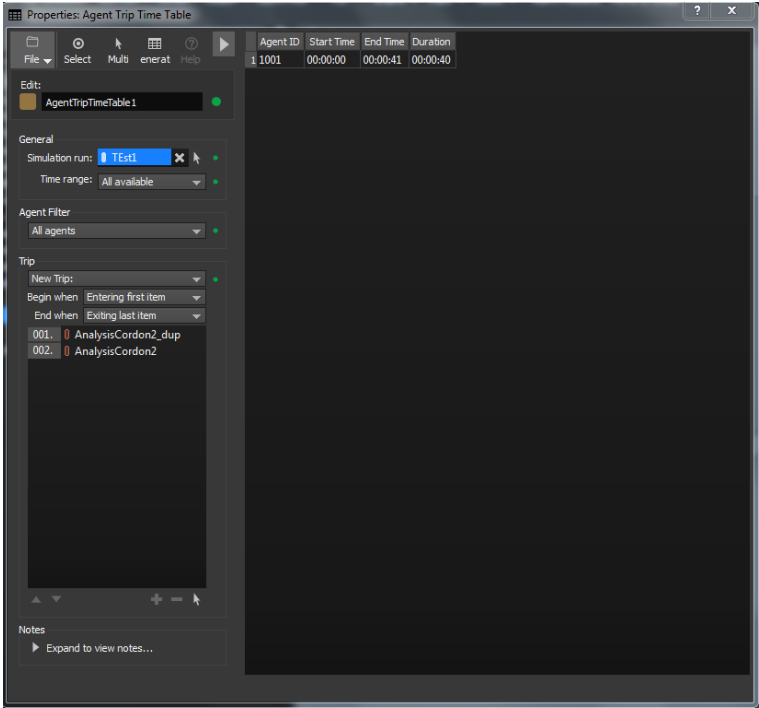
该模型如图 A1.1 所示。



图A1.1：测试1 的模拟设置

A1.4 测试结果

MassMotion 模拟出人员在警戒线之间行走 40m 的时间是 40s，即与 1m/s 的恒定行走速度一致。（见图 A1.2。）



Properties: Agent Trip Time Table	属性：人员行程时间表
File	文件
Select	选择
Multi	多选
Enerat	Enerat
Help	帮助
Agent ID	人员 ID
Start Time	开始时间
End Time	结束时间
Duration	持续时间
Edit	编辑
AgentTripTimeTable 1	人员行程时间表 1
General	一般
Simulation run	模拟运行
Time range: All available	时间范围：全部可用
Agent Filter	人员过滤器
All agents	所有人员
Trip	行程
New Trip	新的行程

Begin when Entering first item	输入第一项时开始
End when Exiting last item	退出最后一项时结束
Notes	注意事项
Expand to view notes...	展开查看注意事项

图 A1.2: 人员行进时间的 MassMotion 预测

A1.5 结论

使用 MassMotion 进行了 IMO 1238 测试 1 和 NIST 1822 测试 2.1。

IMO 和 NIST 指导中所述的测试程序是相同的，此处只考虑进行一次模拟。

预测表明，MassMotion 能够重现 IMO 和 NIST 指导中给出的模型中配置参数中所述的结果。

状态：通过。

A2 测试 2：上楼梯行走速度和 测试 3：下楼梯行走速度

A2.1 测试说明

根据 IMO 1238 测试 2、测试 3，NIST 1822 测试 2.2 进行测试。

测试的目的是验证人员可以以 1m/s 的恒定行走速度上下楼梯。

IMO 1238 测试中使用 10m 的楼梯、NIST 1822 测试中使用 100m 的楼梯，两项测试在其他方面是相同的，使用相同的 MassMotion 人员模型。此外，还进行了 NIST 1822 测试 2.2，以验证该测试适用于 IMO 1238 测试 2 及测试 3。

在 MassMotion 中，为实现楼梯上人员的首选（水平）速度，在人员的首选水平地形行走速度上使用系数。MassMotion 中使用的默认系数如表 A2.1 所示。

楼梯倾斜 (度)	系数 (%)	
	上楼	下楼
小于 27	42.5	57.4
27 至 32 之间	42.6 - 37.8 (插值)	57.4 - 49.8 (插值)
大于 32	37.8	49.8

表 A2.1: MassMotion 楼梯的默认人员属性

测试中评估了三个楼梯，每个楼梯都有不同的倾斜度（如表 A2.2 所示）。为避免计算中四舍五入以及系数可能影响到相邻区间，测试中避免使用接近 27° 和 32° 的倾角。

楼梯				
ID	倾斜度 (度)	长度 (m)	高度 (m)	横向距离 (m)
1	15.0	100.0	25.882	96.593
2	29.5	100.0	49.242	87.036
3	45.0	100.0	70.711	70.711

表 A2.2: 采用的楼梯倾斜度 (和尺寸)

A2.2 测试目的

测试的目的是验证人员可以以设定的恒定行走速度上下楼梯。

A2.3 模拟设置

测试中创建了三个楼梯，长 100m、宽 2m，倾斜度分别为 15.0°、29.5°和 45.0°。（见表 A2.2。）

每个楼梯的两端分别创建一个宽 2m 的楼板。

在 6 个楼板处分别设置出入口。

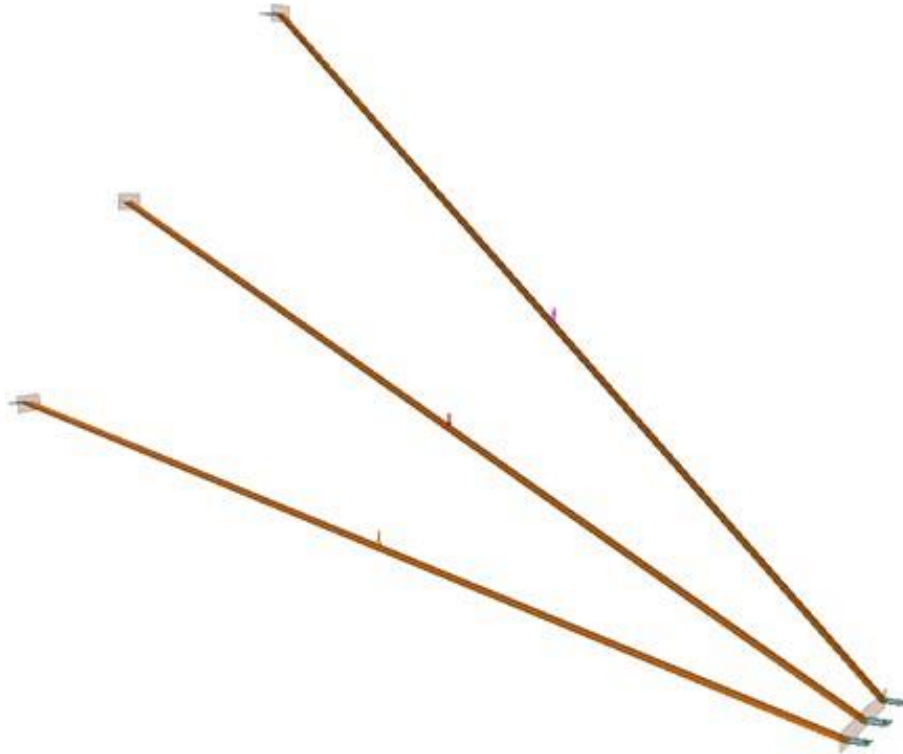


图 A2.1: MassMotion 物理模型图

测试要求人员以 1m/s 的恒定速度上下每一楼层。MassMotion 从首选水平地形（水平）步行速度与适合于楼梯倾斜度和行走方向（上/下）的乘积产生楼梯上的首选水平步行速度。因此，人员首选水平地形（水平）步行速度 S_{PLT} ，由如下公式计算

$$S_{PLT} = \left(\frac{\text{上下楼梯所需速度} \times \cos(\text{楼梯倾斜度})}{\text{楼梯系数}} \right)$$

（见表 A2.3）

定义了人员属性（如恒定速度）和“行程”活动。

对于测试 2，由楼梯底部的入口生成人员，目标设置在楼梯顶部的出口。对于测试 3，由楼梯顶部的入口生成人员，目标设置在楼梯底部的出口。

创建了每个楼梯底部和顶部的警戒线（通过生成行程时间表来监视人员行程时间）。

（见图 A2.2 和 A2.3）

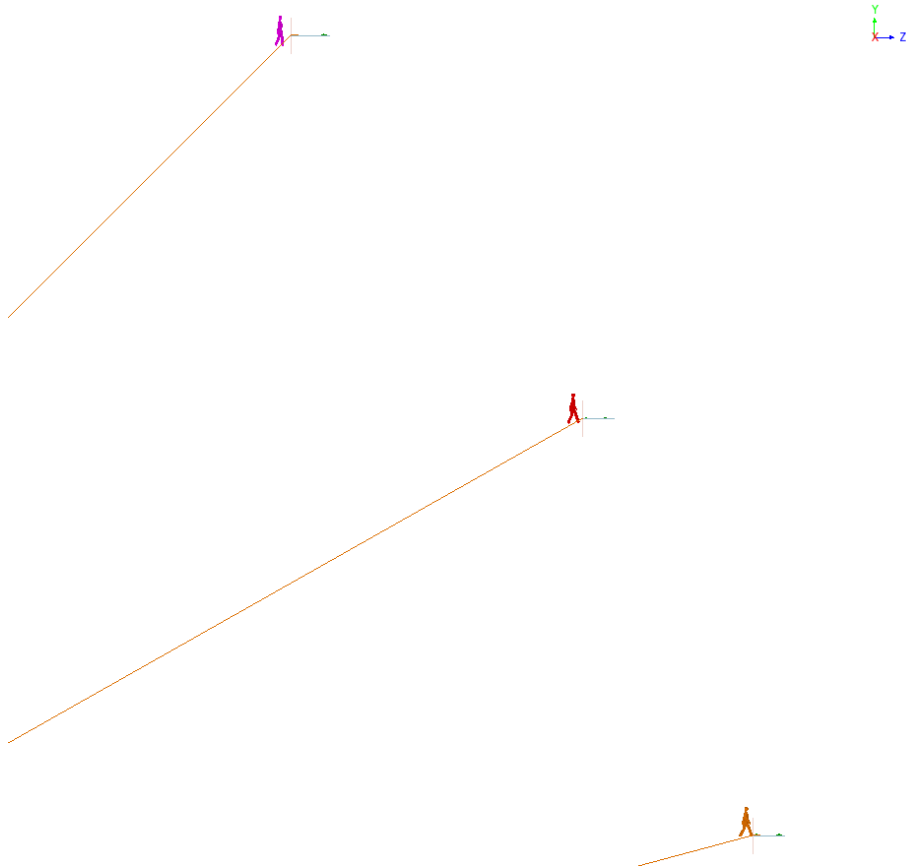


图 A2.2: MassMotion 测试 2

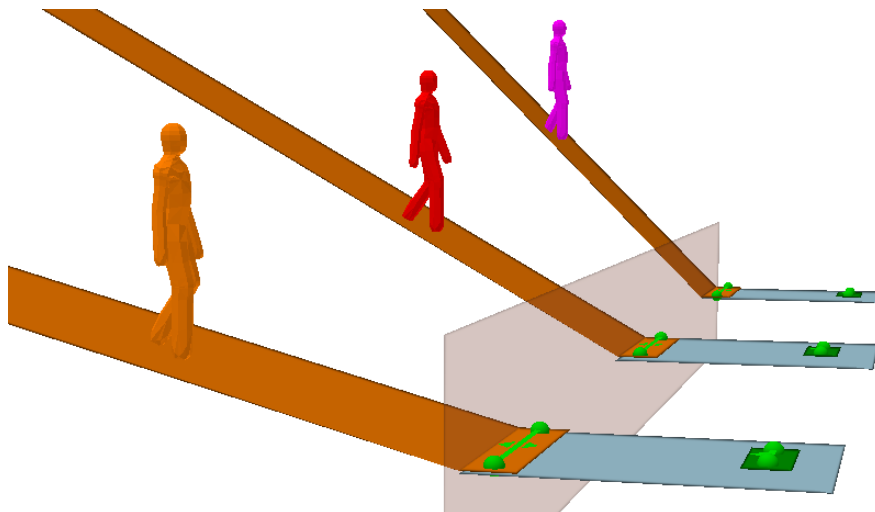


图 A2.3: MassMotion 测试 3

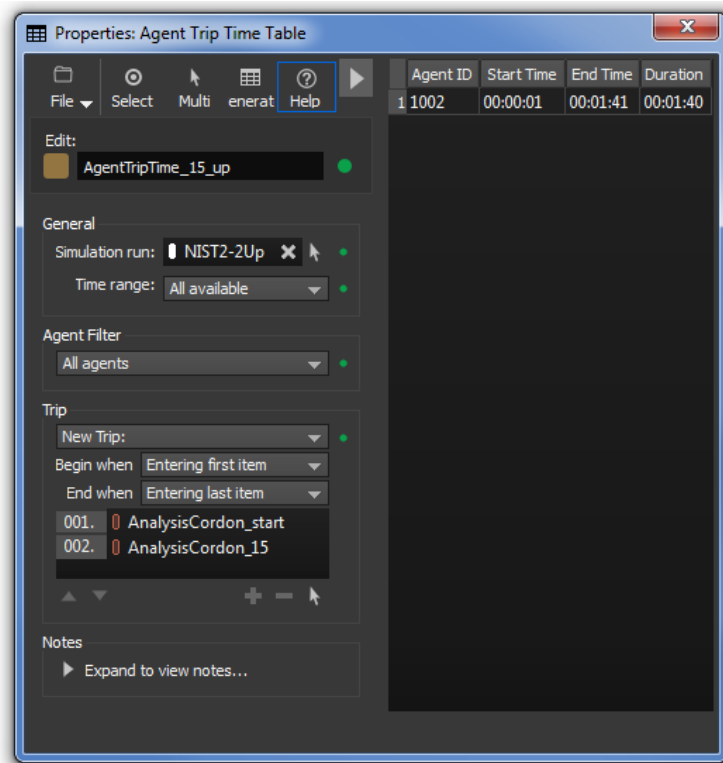
A2.4 测试结果

MassMotion 的预测结果记录在下表中。

测试	楼梯倾斜	首选水平地形行走速度 (水平) (m/s)	目标楼梯行走时间 (s)
2	15.0°上楼	2.273	100
2	29.5°上楼	2.165	100
2	45.0°上楼	1.871	100
3	15.0°下楼	1.683	100
3	29.5°下楼	1.624	100
3	45.0°下楼	1.420	100

表 A2.3: 测试 2 和 3 的 MassMotion 预测结果

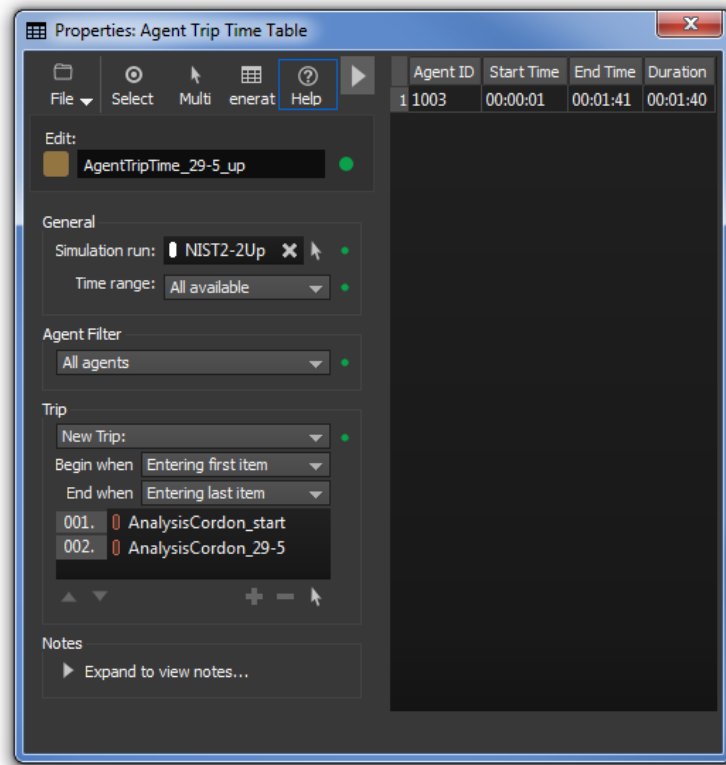
每个工况的 MassMotion 结果的行程时间表如图 A2.4 至 A2.9 所示。



Properties: Agent Trip Time Table	属性：人员行程时间表
File	文件
Select	选择
Multi	多选
Enerat	Enerat
Help	帮助

Agent ID	人员 ID
Start Time	开始时间
End Time	结束时间
Duration	持续时间
Edit	编辑
General	一般
Simulation run	模拟运行
Time range: All available	时间范围: 全部可用
Agent Filter	人员过滤器
All agents	所有人员
Trip	行程
New Trip	新的行程
Begin when: Entering first item	输入: 第一项时开始
End when: Exiting last item	退出: 最后一项时结束
Notes	注意事项
Expand to view notes...	展开查看注意事项

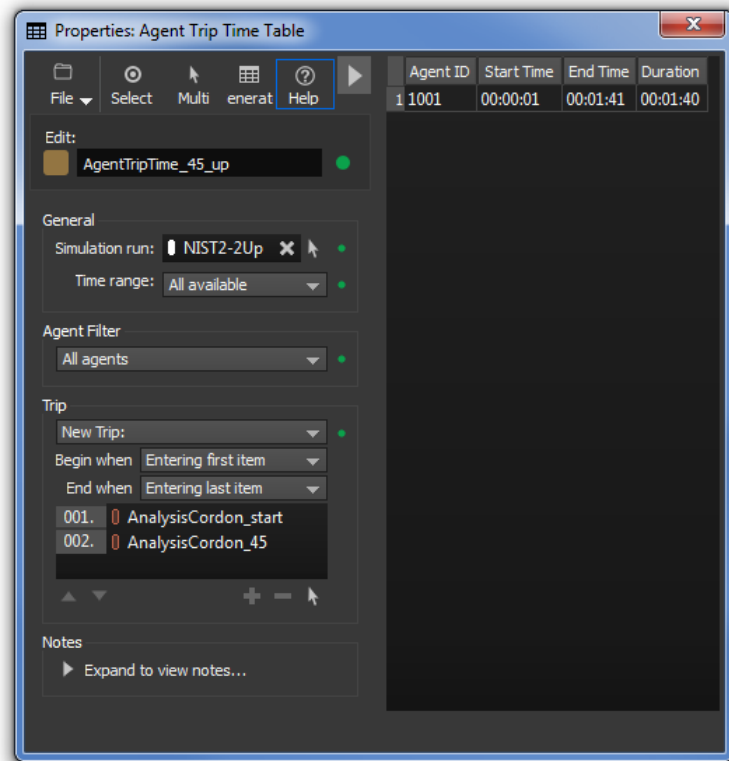
图 A2.4: MassMotion 测试 2 - 15.0°上楼 - 行程时间表



Properties: Agent Trip Time Table	属性：人员行程时间表
File	文件
Select	选择
Multi	多选
Enerat	Enerat
Help	帮助
Agent ID	人员 ID
Start Time	开始时间
End Time	结束时间
Duration	持续时间
Edit	编辑
General	一般
Simulation run	模拟运行
Time range: All available	时间范围：全部可用
Agent Filter	人员过滤器
All agents	所有人员
Trip	行程
New Trip	新的行程

Begin when: Entering first item	输入：第一项时开始
End when: Exiting last item	退出：最后一项时结束
Notes	注意事项
Expand to view notes...	展开查看注意事项

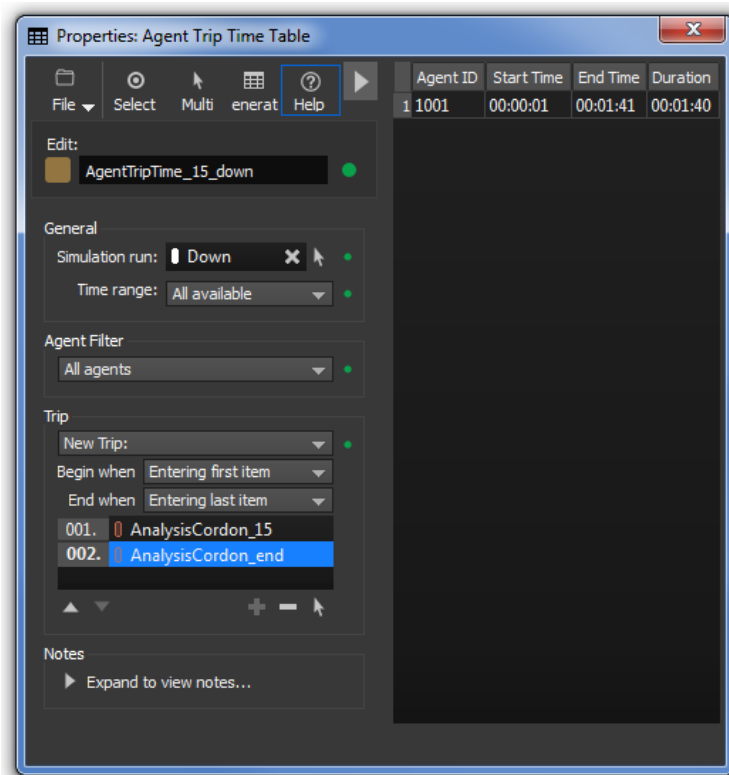
图 A2.5: MassMotion 测试 2 – 29.5° 上楼 - 行程时间表



Properties: Agent Trip Time Table	属性：人员行程时间表
File	文件
Select	选择
Multi	多选
Enerat	Enerat
Help	帮助
Agent ID	人员 ID
Start Time	开始时间
End Time	结束时间
Duration	持续时间
Edit	编辑
General	一般

Simulation run	模拟运行
Time range: All available	时间范围: 全部可用
Agent Filter	人员过滤器
All agents	所有人员
Trip	行程
New Trip	新的行程
Begin when: Entering first item	输入: 第一项时开始
End when: Exiting last item	退出: 最后一项时结束
Notes	注意事项
Expand to view notes...	展开查看注意事项

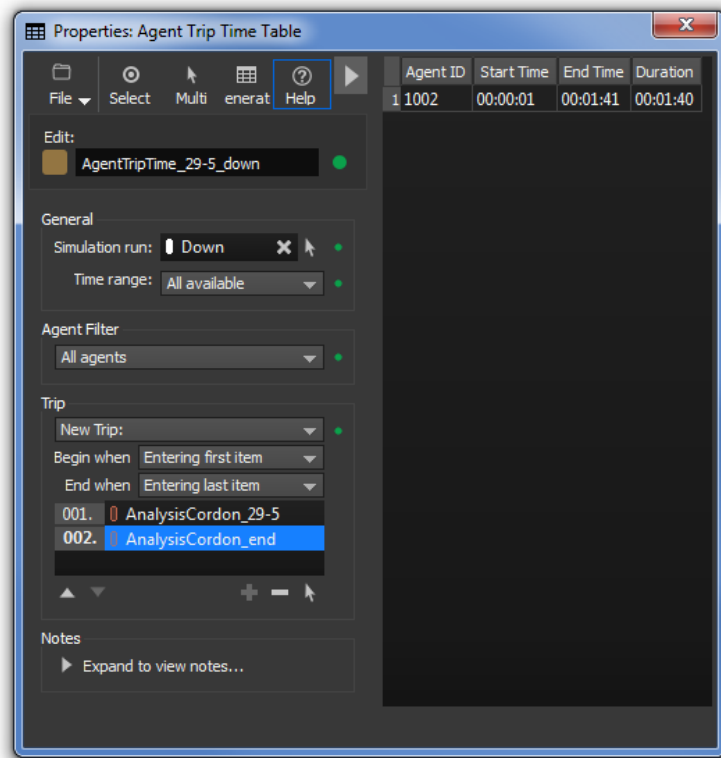
图 A2.6: MassMotion 测试 2 – 45.0° 上楼 - 行程时间表



Properties: Agent Trip Time Table	属性: 人员行程时间表
File	文件
Select	选择
Multi	多选
Enerat	Enerat

Help	帮助
Agent ID	人员 ID
Start Time	开始时间
End Time	结束时间
Duration	持续时间
Edit	编辑
General	一般
Simulation run	模拟运行
Time range: All available	时间范围: 全部可用
Agent Filter	人员过滤器
All agents	所有人员
Trip	行程
New Trip	新的行程
Begin when: Entering first item	输入: 第一项时开始
End when: Exiting last item	退出: 最后一项时结束
Notes	注意事项
Expand to view notes...	展开查看注意事项

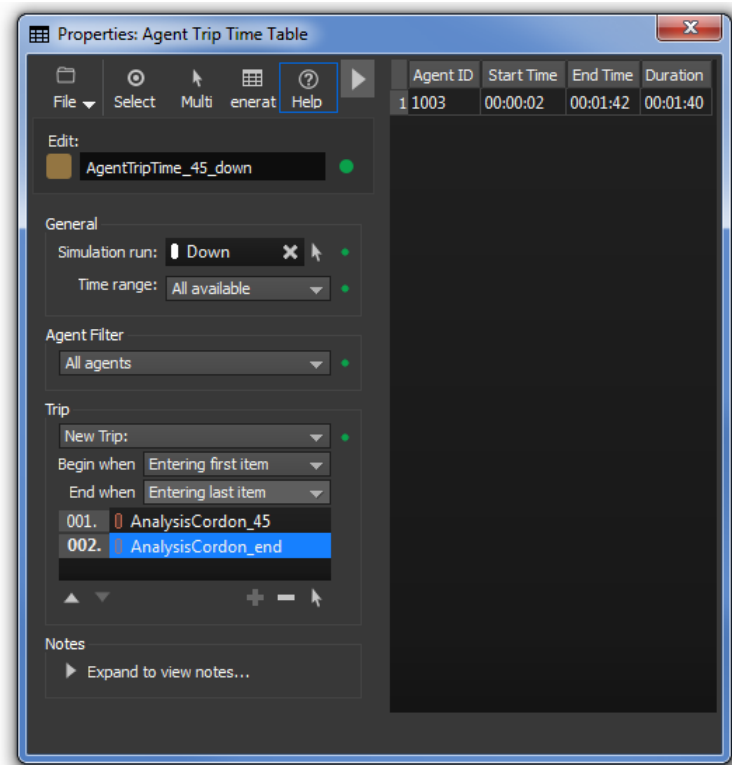
图 A2.7: MassMotion 测试 3 – 15.0° 上楼 - 行程时间表



Properties: Agent Trip Time Table	属性：人员行程时间表
File	文件
Select	选择
Multi	多选
Enerat	Enerat
Help	帮助
Agent ID	人员 ID
Start Time	开始时间
End Time	结束时间
Duration	持续时间
Edit	编辑
General	一般
Simulation run	模拟运行
Time range: All available	时间范围：全部可用
Agent Filter	人员过滤器
All agents	所有人员
Trip	行程
New Trip	新的行程

Begin when: Entering first item	输入：第一项时开始
End when: Exiting last item	退出：最后一项时结束
Notes	注意事项
Expand to view notes...	展开查看注意事项

图 A2.8： MassMotion 测试 3 – 19.5° 上楼 - 行程时间表



Properties: Agent Trip Time Table	属性：人员行程时间表
File	文件
Select	选择
Multi	多选
Enerat	Enerat
Help	帮助
Agent ID	人员 ID
Start Time	开始时间
End Time	结束时间
Duration	持续时间
Edit	编辑
General	一般

Simulation run	模拟运行
Time range: All available	时间范围: 全部可用
Agent Filter	人员过滤器
All agents	所有人员
Trip	行程
New Trip	新的行程
Begin when: Entering first item	输入: 第一项时开始
End when: Exiting last item	退出: 最后一项时结束
Notes	注意事项
Expand to view notes...	展开查看注意事项

图 A2.9: MassMotion 测试 3 – 45.0° 上楼 - 行程时间表

A2.5 结论

使用 MassMotion 进行了 NIST 1822 测试 2.2。

这些预测结果表明, 在给定模型配置参数的情况下, MassMotion 能够重现 NIST 手册中所述的结果。

状态: 通过。

A3 测试 4：出口流速

A3.1 测试说明

该测试包括两部分：

第 1 部分：根据 IMO 1238 测试 4 和 NIST 1822 测试 5.2 进行测试，以验证连接件或门的流速是否被控制在指定值。（本研究中采用 1.33 人/m/s 的系数。）

第 2 部分：通过 MassMotion 模型，预测各种宽度（800mm、900mm、1000mm、1100mm、1200mm、1400mm 和 1500mm）的连接件或门的最大无限制（无上限）流速，进行敏感度研究。

A3.2 测试目的

第 1 部分：验证不超过连接件或门的流速上限。

第 2 部分：验证 MassMotion 模型的连接件或门宽度的峰值流速的敏感度。

A3.3 模拟设置

创建了一块尺寸为 8m×5m 的楼板，通过 1000mm 宽的连接件（连接件位于 5m 高的墙的中央）连接到一块小的二层楼板。

入口位于较大楼板上（远离连接件），出口位于较小楼板上（远离连接件）。一条警戒线位于连接件处。

房间容纳人数为 100 人，疏散准备时间设置为 0s，首选行走速度为 MassMotion 默认速度（0.6m/s 至 1.2m/s 之间）。

第 1 部分： 1000mm 宽的连接件上限流速为 1.33 人/s。（图 A3.1）

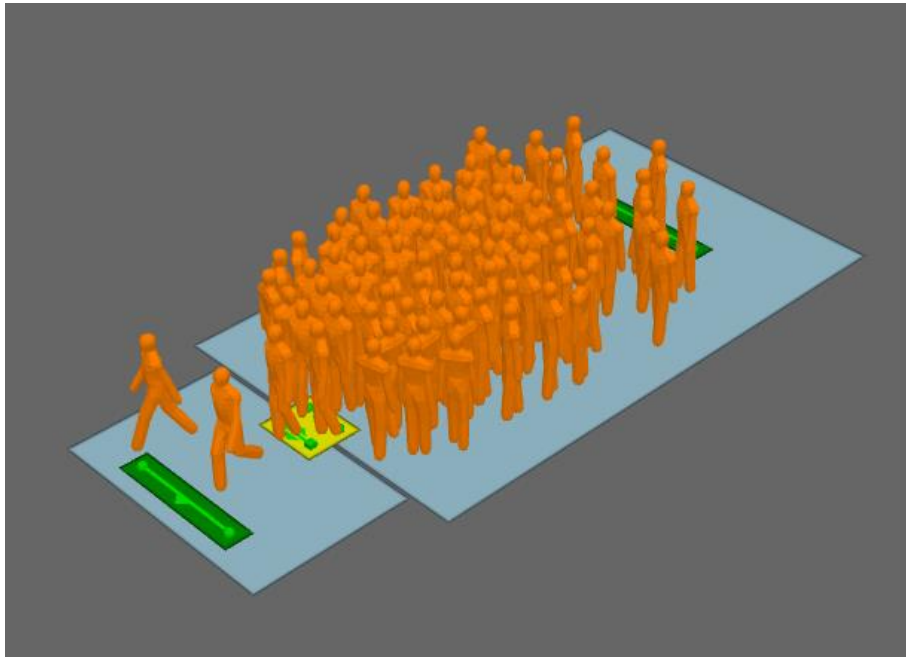


图 A3.1： 物理环境和人员情况

第 2 部分： 模拟设置与第 1 部分相同，除了以下几项：

- 连接件流速没有上限；
- 考虑多种连接件宽度（800mm、900mm、1000mm、1100mm、1200mm、1400mm 和 1500mm）。

（图 A3.2）

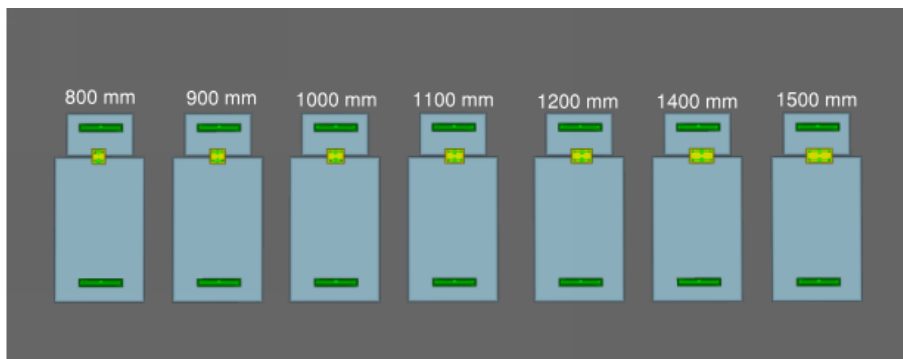


图 A3.2： 第 2 部分灵敏度工况

A3.4 测试结果

第 1 部分：图 A3.3 为连接件的时间平均流速。

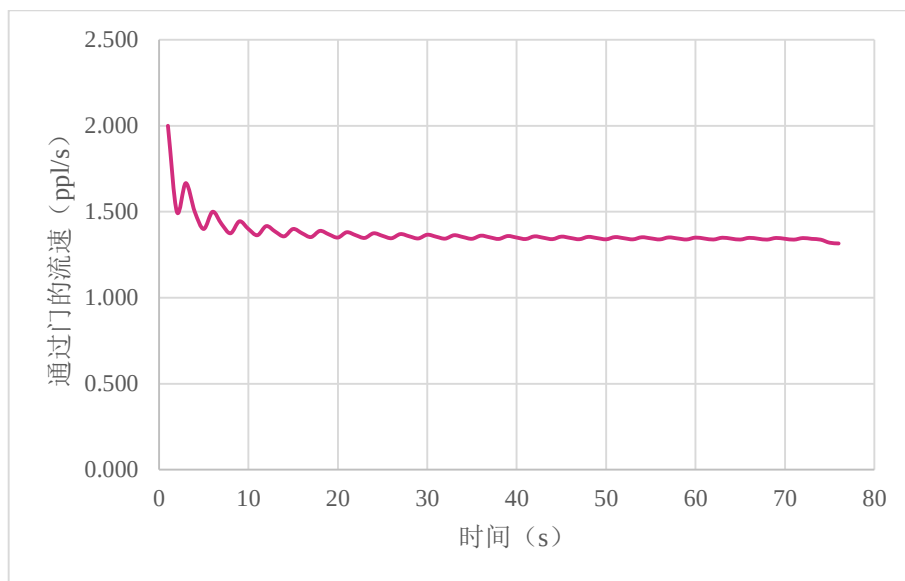


图 A3.3：跨越连接的流速（人/s）

总体平均流速（100 人/76s 疏散时间）为 1.315 人/s。

20s 至 76s 期间的时间平均流速的平均值为 1.348 人/s，即流速上限的 101.4%。

模拟开始期间的时间平均流速预计超过 1.33 人/s。这是按时间平均计算的函数，而不是由 MassMotion 内的基本上限流速导致的。（MassMotion 上限流速模型中，根据第一个人员通过后第二个人员不能使用连接的最短时间。例如：1.33 人/s 的上限流速转换为人员之间的使用 0.75s 最小延迟的连接，即在连接的人员移动通过连接之间必须至少有 0.75s。例如，假设前三名人员在 0.1s、0.85s 和 1.65s 时通过连接件（这与上限流速为 1.33 人/s 是一致的，因为通过连接件的每名人员之间有 0.75s 的延迟）。以 1 秒钟的时间间隔（从 0s 开始）进行时间平均计算（如图 A3.3 所示）。那么：

- 在 1s 时，计算出的时间平均结果为 2 人/s（第一名和第二名人员已经通过连接件）；
- 在 2s 时，计算出的时间平均结果为 1.5 人/s。

总而言之，这些预测结果表明流速上限为 1.33 人/s（即使在图 A3.3 中似乎不是这样）。

第 2 部分：图 A3.4 和 A3.5 说明了 MassMotion 预测结果（包括通过连接件的时间平均流速）。

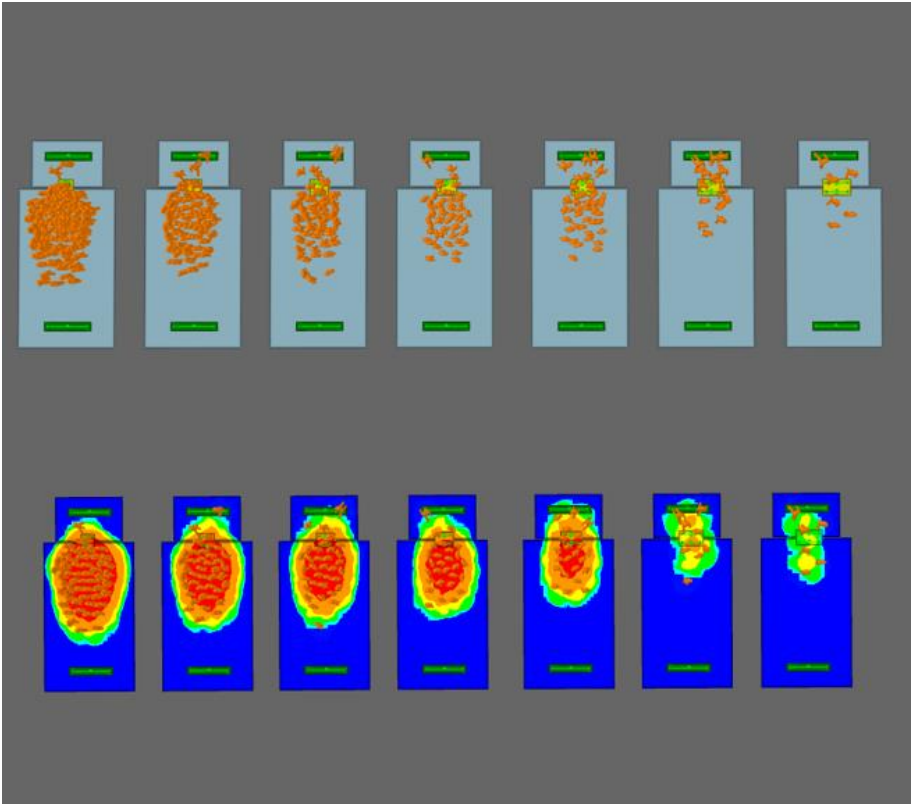
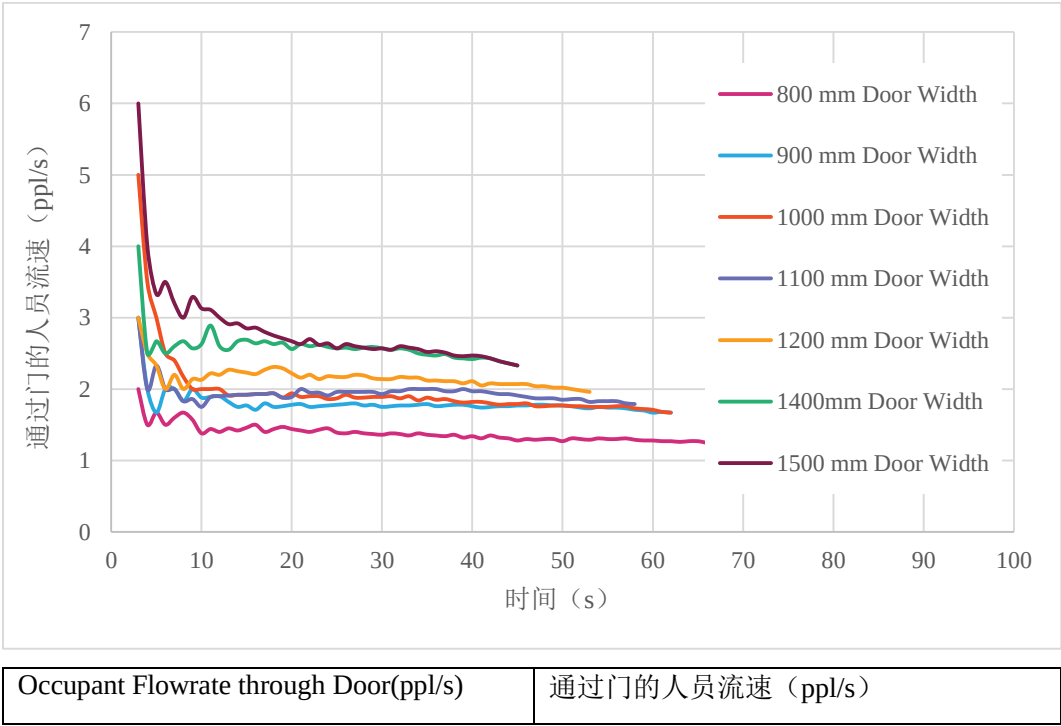


图 A3.4：第 2 部分 - 41s 时的人员瞬时密度（每种工况）



Time(s)	时间 (s)
---------	--------

图 A3.5: 通过连接件的流速 (人/s)

图 A3.5 中所示的 MassMotion 预测结果与图 A3.3 中观察到的趋势相同（包括先前提到的流速平均测量计算“峰值”）。各个工况下，第一名人员在第 1 秒钟内离开房间，可以认为近似的考虑了疏散准备时间。

考虑“稳定流动”阶段的时间平均流速，可以对所有工况下每单位宽度（人/m/s）的平均流速进行近似计算。通过“逆向工程”，每单位宽度的平均流速约为 1.9 人/m/s（见表 A3.1）。

门宽 (mm)	单位宽度平均流速* (人/m/s)	预计整体“稳定”流速 (人/s)	建模“稳定”流速 (人/s)
800	1.9	1.52	1.5**
900	1.9	1.71	1.7**
1000	1.9	1.90	1.9**
1100	1.9	2.09	2.0***
1200	1.9	2.28	2.3**
1400	1.9	2.66	2.6**
1500	1.9	2.85	2.65****
*假设。 **在 20s 时的预测值。 ***在 20 - 30s 的预测值（需注意到 30s 后的时间间隔增加到 2.1s）。 ****不符合趋势。			

表 A3.1: 每单位宽度平均流速估计

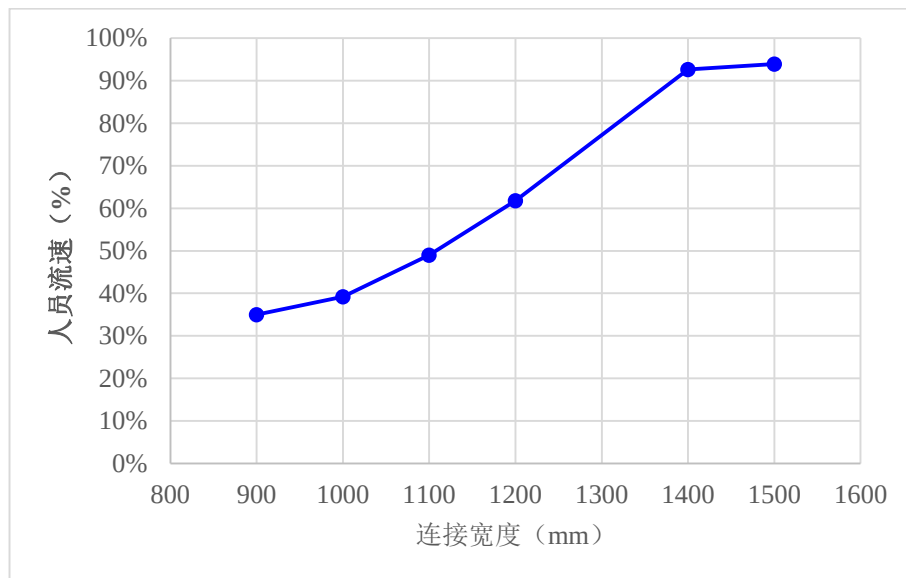
首先要注意的是，每单位宽度平均流速为 1.9 人/m/s，大于其他研究中的值 [17]。（[5][6]表明，每单位宽度的最大平均流速为 82 人/m/min $\approx$ 1.37 人/m/s。）

1500mm 门的每单位宽度的模拟“稳定”流速为 1.77 人/m/s，因此不符合每单位宽度平均流速为 1.9 人/m/s 的趋势。

考虑到每个模拟的前 20s 之后的实际流速（即，当达到恒定峰值流速面积时），预测流速遵循预期的趋势，即流速随着连接件宽度的增加而增加。在表 A3.2 和图 A3.6 中对这种关系进行了复核。

门宽 (mm)	与 800mm 宽的门比较	
	宽度增加 (%)	流速增加率 (%)
800	0.0%	0.0%
900	12.5%	35.0%
1000	25.0%	39.2%
1100	37.5%	49.0%
1200	50.0%	61.8%
1400	75.0%	92.6%
1500	87.5%	93.9%

表 A3.2: 无上限流速随着连接件宽度的增加而增加



图A3.6: 无上限流速随着连接件宽度的增加而增加

从 1000mm 到 1400mm, 无上限流速的增加与连接件宽度的增加大致成线性比例。

A3.5 结论

使用 MassMotion 进行了 IMO 1238 测试 4 和 NIST 1822 测试 5.2。

预测结果表明, MassMotion 能够重现 IMO 和 NIST 指导手册中给出的模型中配置参数中所述的结果。

状态: 通过。

A4 测试 5：预疏散时间

A4.1 测试说明

测试符合 IMO 1238 测试 5 和 NIST 1822 测试 1.1。

10 名人员位于一个 8m×5m 的地面上，设置一个 1.0mm 宽的连接件（位于 5m 墙壁的中央）。在 10s 至 100s 范围内，以均匀概率分布随机抽取预疏散时间。

测试的目的是验证每名人员在指定的时间开始移动。

IMO 1238 和 NIST 1822 测试是相同的，除了后者要求在测试模型中默认概率分布类型。

A4.2 测试目的

该测试考虑了在 MassMotion 疏散模型中的预疏散时间的表示。测试的目的是验证每个乘客在指定的时间开始移动，并且多个人员的时间范围与所使用的分布一致。

A4.3 模拟设置

MassMotion 中，“疏散”事件会自动创建一个“等待”动作（即预疏散时间），“等待”动作后为“寻找入口”和“退出”动作。

目前可以直接从 MassMotion 输出每个人员的预疏散时间。反之，定义“等待”动作，接下来是“退出”动作（忽略“寻找入口”动作），当每名人员完成疏散后，将其从模型中删除。这样就很容易从 MassMotion 中输出这个退出时间，因此可以记录出等待时间。当人员未从模型中删除时，此功能同样适用于预疏散时间。

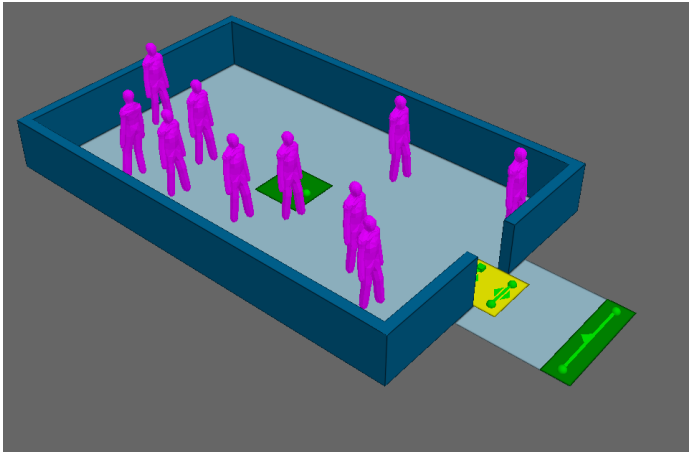
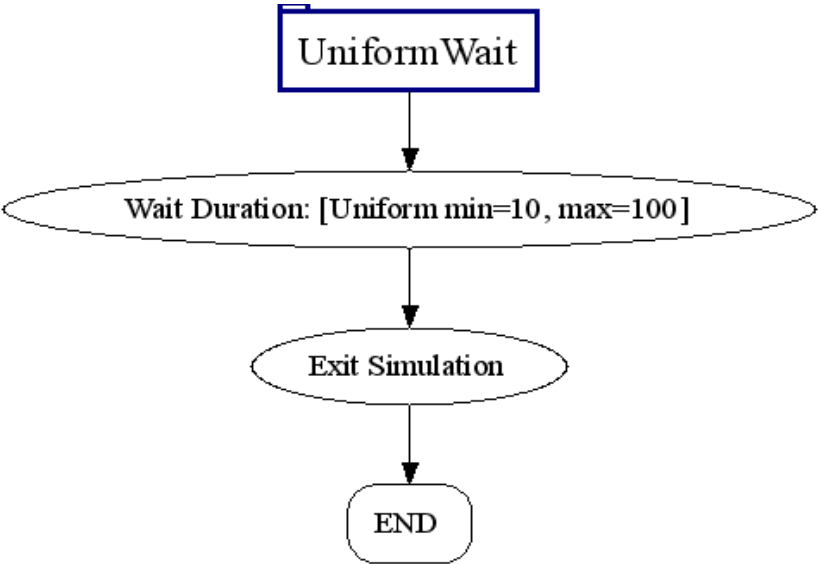


图 A4.1： 物理环境和人员情况

下图中所示的动作适用于 IMO 5 和 NIST 1.1 测试时间表产生的所有人员



Uniform Wait	均匀等待
Wait Duration: [Uniform min = 10, max = 100]	等待时间: [最短 = 10, 最长 = 100]
Exit Simulation	退出模拟
END	结束

图 A4.2： 均匀分布参数

NIST 测试还需要对任意默认的预疏散时间分布进行测试。以下将针对每种分布类型进行描述（请注意，MassMotion 不会为分布使用默认值，因此，我们已为验证测试选择了适当的值）。

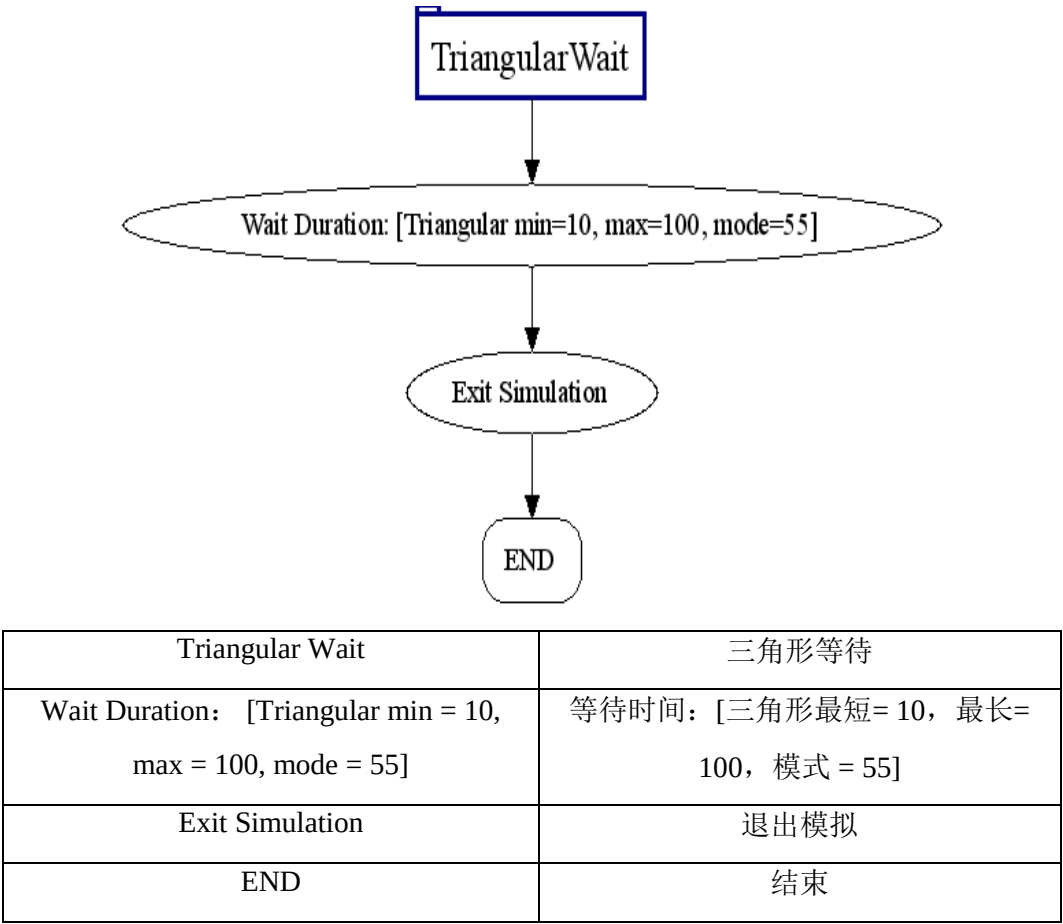
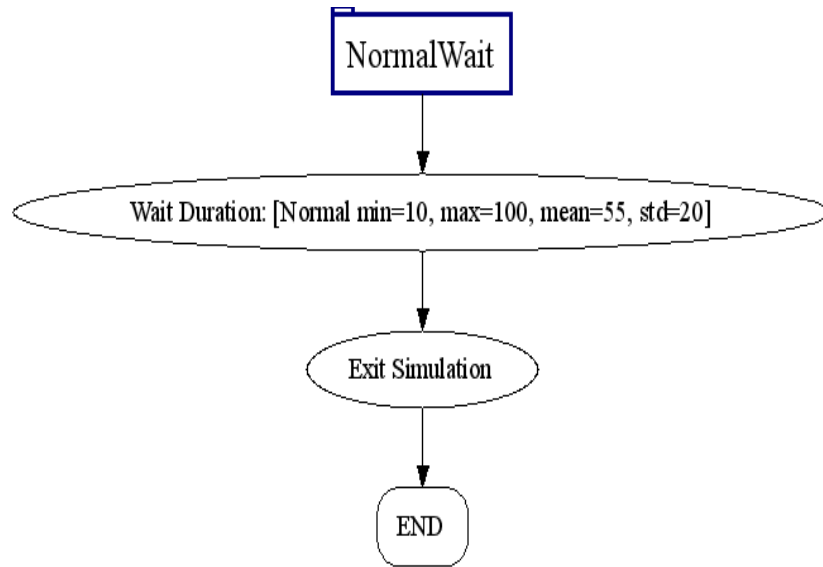
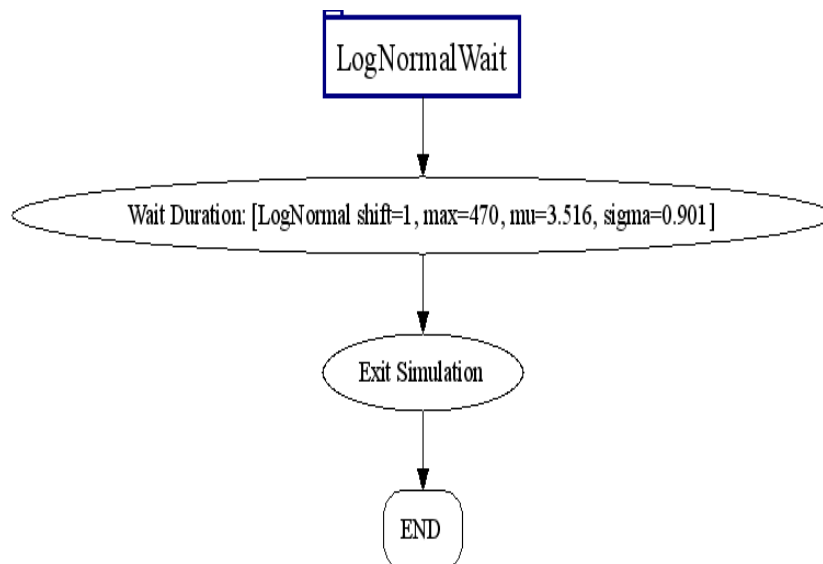


图 A4.3：三角分布参数



Normal Wait	正态等待
Wait Duration: [Normal min = 10, max = 100, mean = 55, std = 20]	等待时间: [正常最短= 10, 最长= 100, 均值 = 55, 标准差 = 20]
Exit Simulation	退出模拟
END	结束

图 A4.4: 正态分布参数



LogNormal Wait	对数正态分布等待
Wait Duration: [LogNormal shift = 1, max = 470, mu = 3.516, sigma = 0.901]	等待时间: [LogNormal shift = 1, max = 470, mu = 3.516, sigma = 0.901]
Exit Simulation	退出模拟

END	结束
-----	----

图A4.5：对数正态分布参数

计划在模拟的前 5s 内创建 10 名人员，并且从其进入时间适用于“等待”操作。因此，测得的不是他们的退出时间，而是他们在模型中的持续时间。在自动创建的 JourneyTimes.csv 输出文件中，可以给出该信息，可供用户进行分析。系统生成 50 个模拟运算（命名为“Batch1”至“Batch50”），每个模拟运算具有不同的随机种子。然后，Excel VBA 宏将打开每个 JourneyTimes.csv 文件，并将人员的持续时间提取到电子表格中。然后根据 50 次的运行结果，如 500 名人员，计算最大值、最小值和平均持续时间。

A4.4 测试结果

对于每种分布类型，对 10 名人员的 50 次模拟都生成了一系列预疏散时间，如下所示：

- 汇总数据；
- 预疏散时间的直方图（用趋势线显示）；
- 预疏散时间的累积分布。

A4.4.1 均匀预疏散时间分布

预疏散时间结果汇总：

- 最小 = 10.4s；
- 最大 = 100.2s；
- 平均（均值）= 55.9s；
- 标准偏差 = 20.8s。

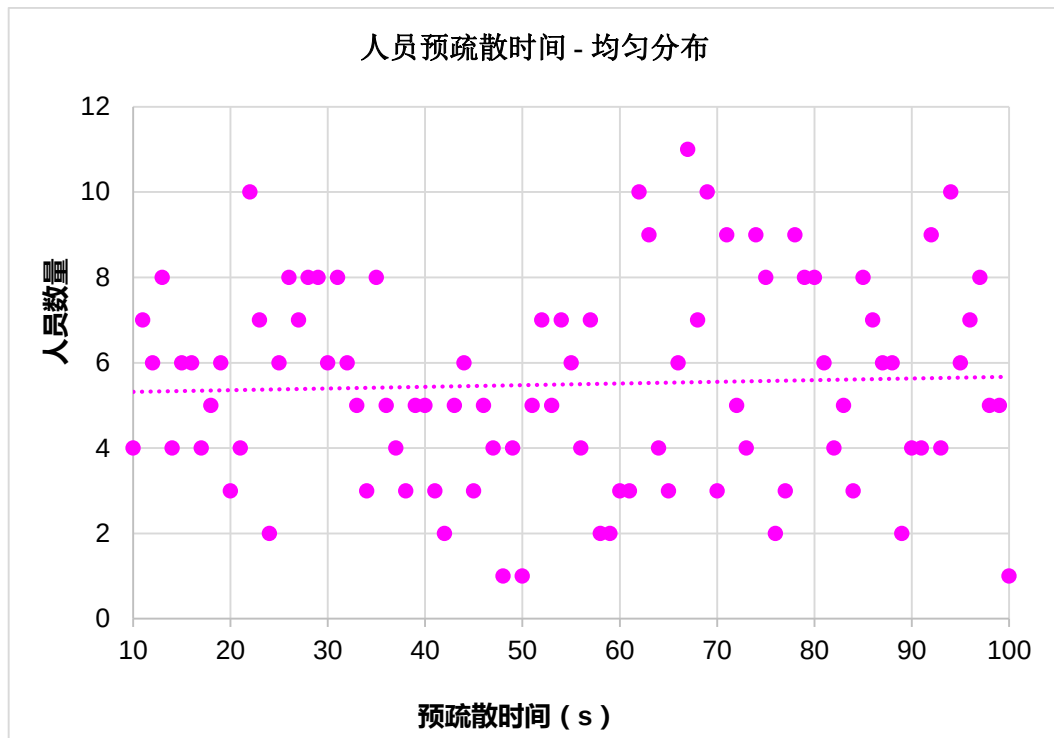


图 A4.6: 均匀分布 – 人员预疏散时间直方图

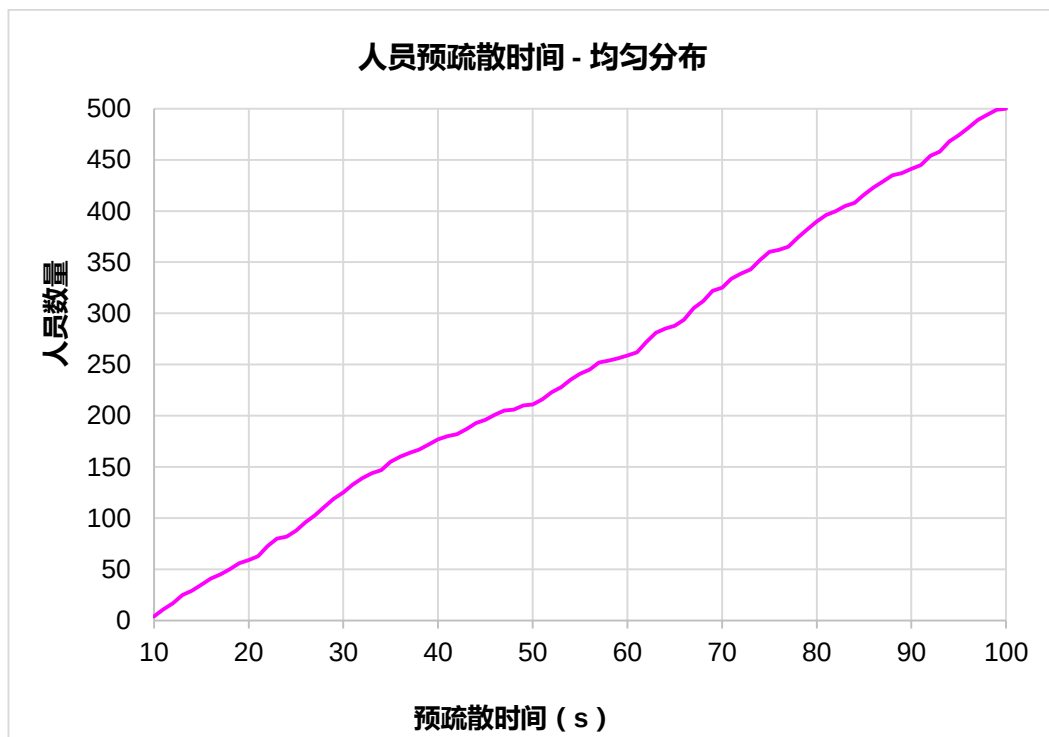


图 A4.7: 均匀分布 – 人员预疏散时间的累积分布

A4.4.2 三角形预疏散时间分布

预疏散时间结果汇总：

- 最小 = 10.6s;
- 最大 = 96.0s;
- 平均（均值）= 54.1s;
- 标准偏差 = 13.2s.

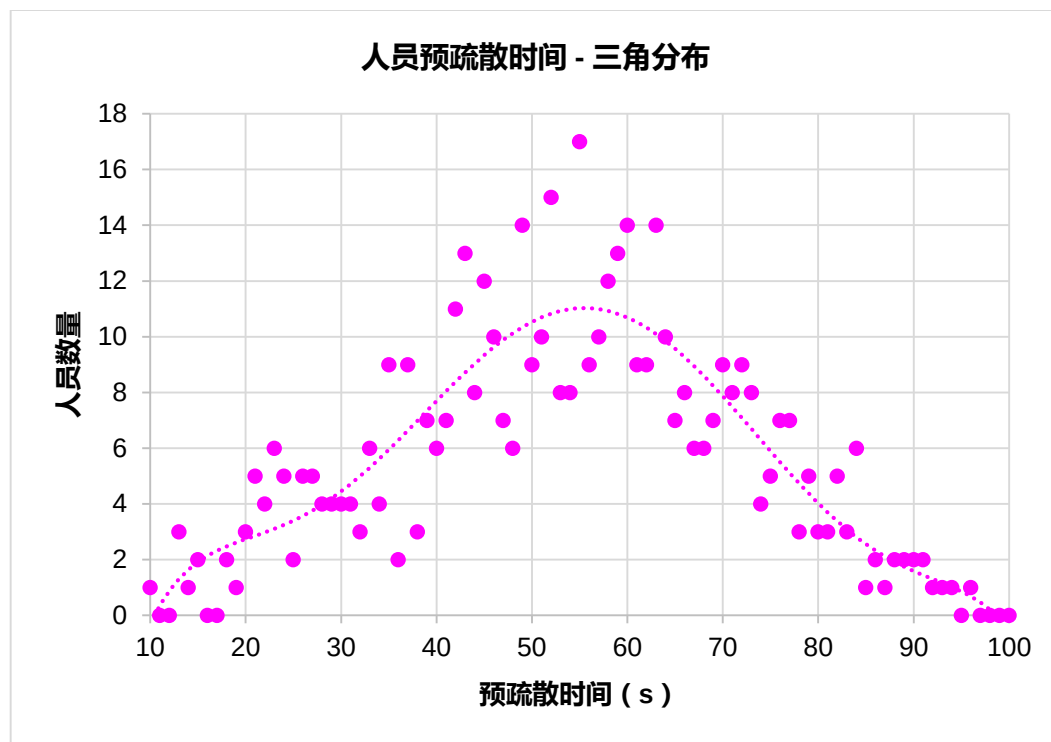
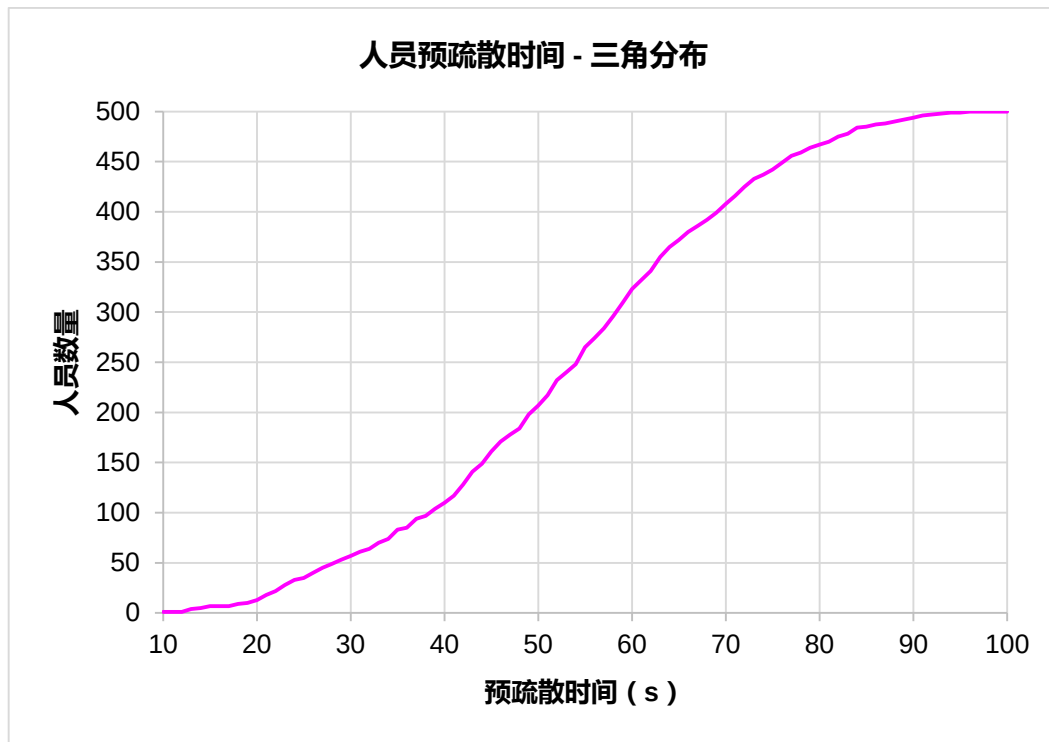


图 A4.8： 三角分布－人员预疏散时间直方图

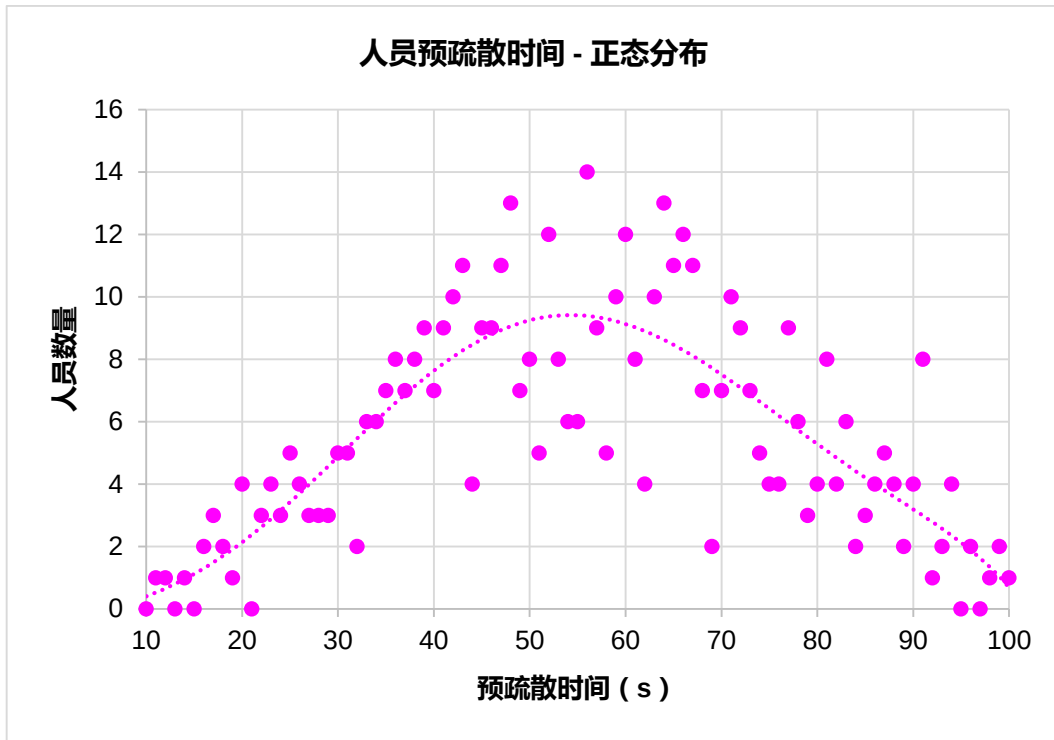


图A4.9：三角分布–人员预疏散时间的累积分布

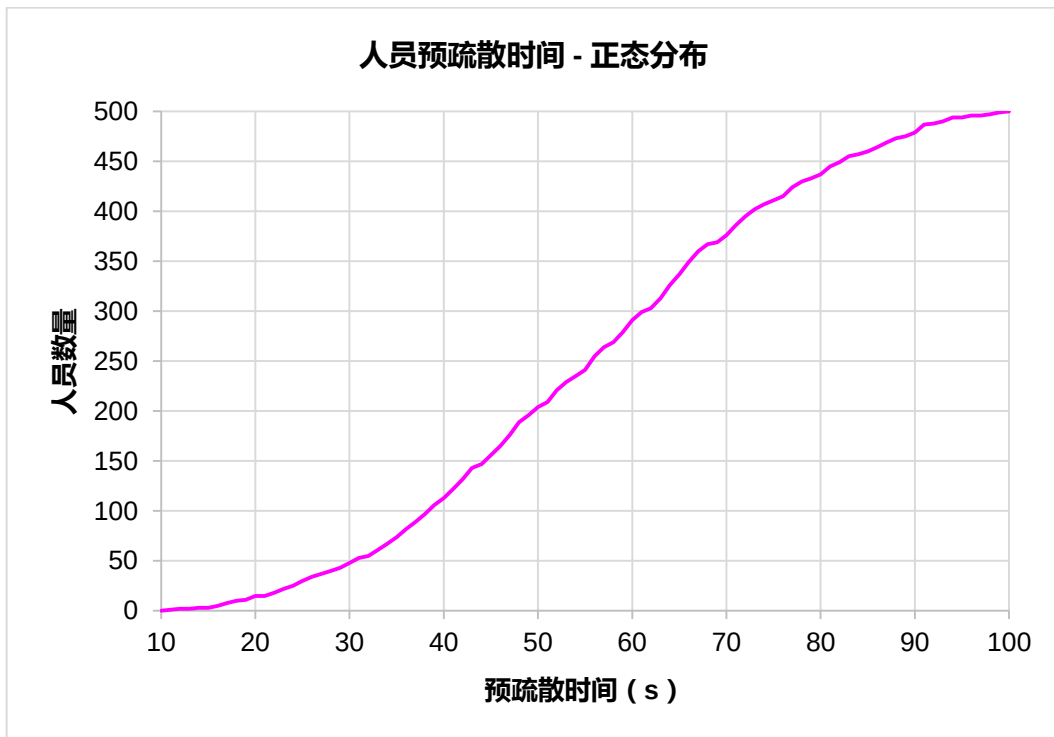
A4.4.3 正态预疏散时间分布

预疏散时间结果汇总：

- 最小 = 11.2s;
- 最大 = 100.0s;
- 平均（均值）= 56.6s;
- 标准差 = 14.7s.



图A4.10: 正态分布- 人员预疏散时间直方图

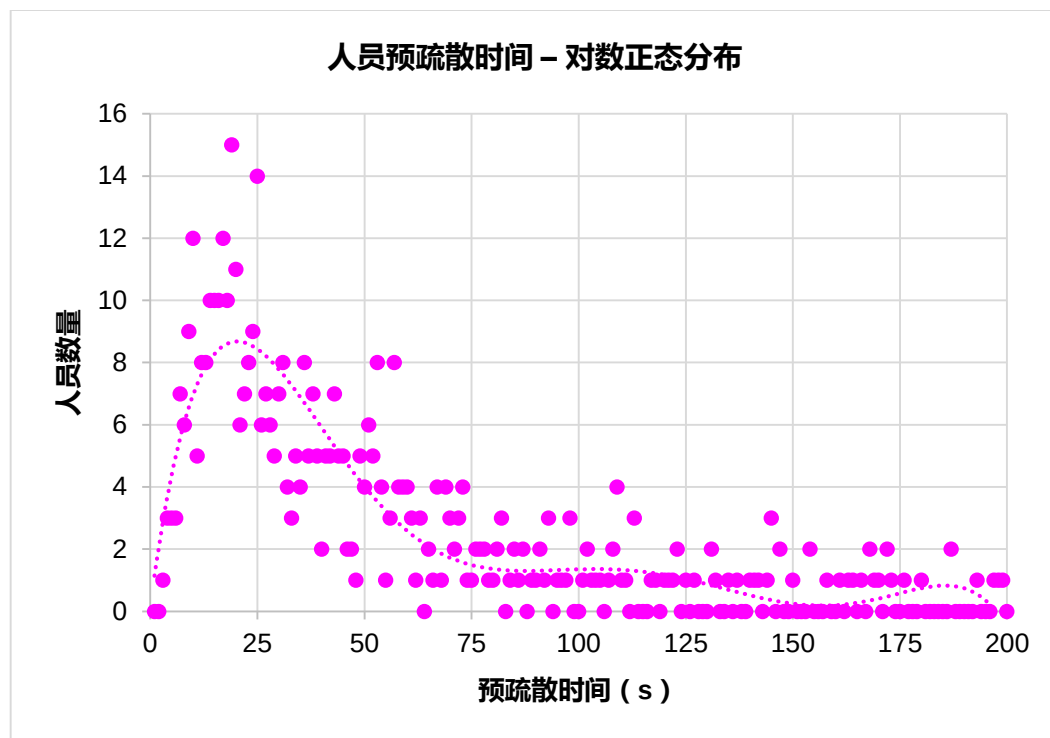


图A4.11: 正态分布- 人员预疏散时间的累积分布

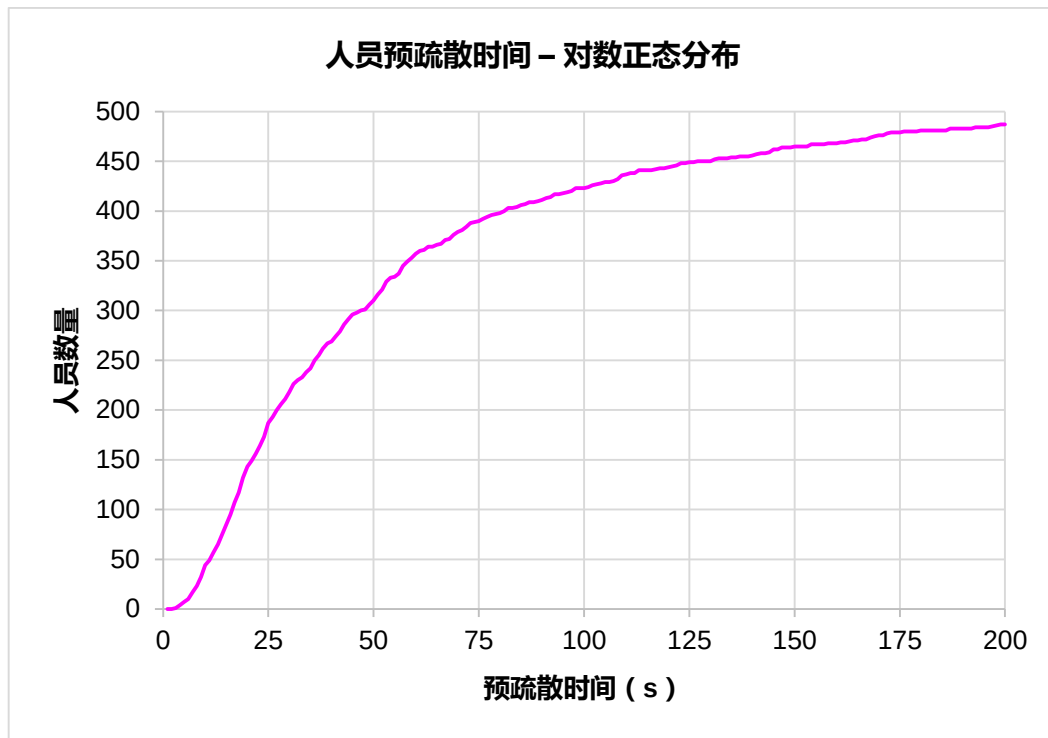
A4.4.4 对数正态分布预疏散时间分布

预疏散时间结果汇总：

- 最小 = 3.2s;
- 最大 = 465.2s;
- 平均（均值）= 56.4s;
- 标准偏差 = 63.0s.



图A4.12： 对数正态分布 – 人员预疏散时间直方图



图A4.13: 对数正态分布 – 人员预疏散时间的累积分布

A4.5 结论

在 MassMotion 疏散模型中进行了 IMO 1238 验证测试 5 和 NIST 验证测试 1.1。测试结果表明，在给定模型配置参数的情况下，MassMotion 模拟的结果与 IMO 和 NIST 指导手册中规定的结果相当。

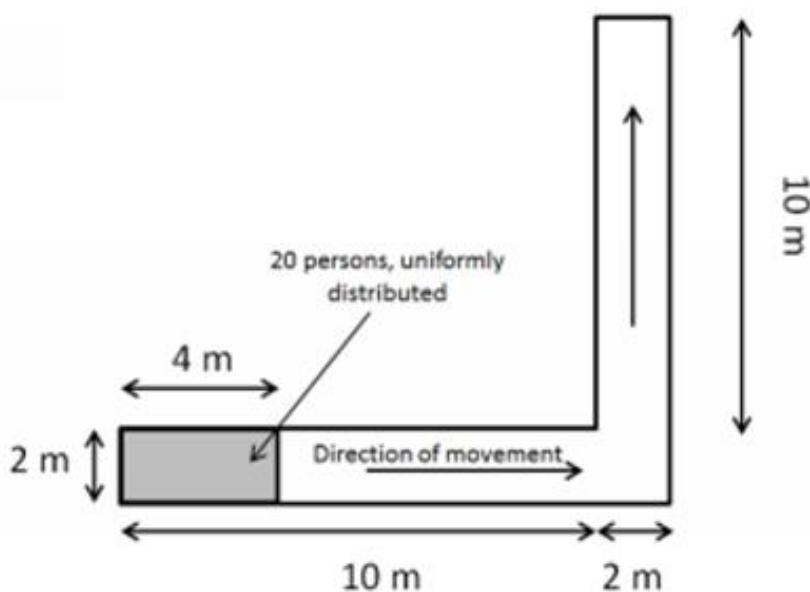
状态：通过。

A5 测试 6：拐角周围移动

A5.1 测试说明

测试符合 IMO 1238 测试 6 和 NIST 1822 测试 2.3。

该测试基于具有如图 A5.1 所示尺寸的右转角直角走廊。



20 persons, uniformly distributed	20 人，均匀分布
Direction of movement	移动方向

图 A5.1：几何布局

二十人均均匀分布，具有即时的预疏散时间，首选水平地形行走速度为 1m/s，占据走廊的一端。

测试是通过观察人员行程路线进行的人员移动的定性验证。

A5.2 测试目的

测试的目的是验证 20 名人员接近并绕过拐角处，同时不会穿透物理环境的边界。

A5.3 模拟设置

IMO 1238 测试 6 和 NIST 1822 测试 2.3 的几何布局是相同的。

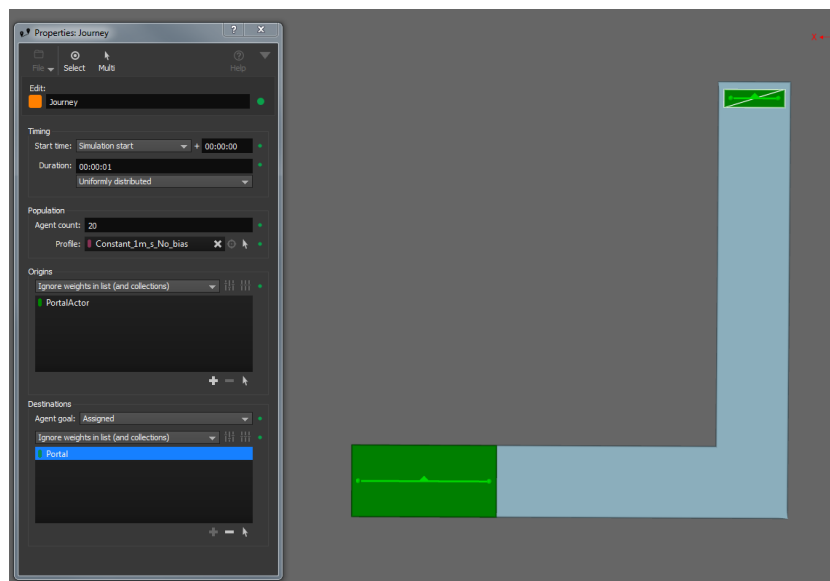
创建了一个单一的几何建筑区域，由附设了 $2\text{m} \times 4\text{m}$ 区域的 $2\text{m} \times 8\text{m}$ 区域以及
与第一层成 90° 角的 $2\text{m} \times 10\text{m}$ 区域（如图 A5.1）组成。

在 $2\text{m} \times 4\text{m}$ 的楼层设置一个入口。

在远离入口的走廊末端创建了出口。

创建了人员属性配置，具有恒定首选水平步行速度为 1m/s 并且没有方向偏移的。

在模拟的前 1s 内，20 名人员（具有描述的人员概况）均匀分布在 $2\text{m} \times 4\text{m}$ 的区域内。



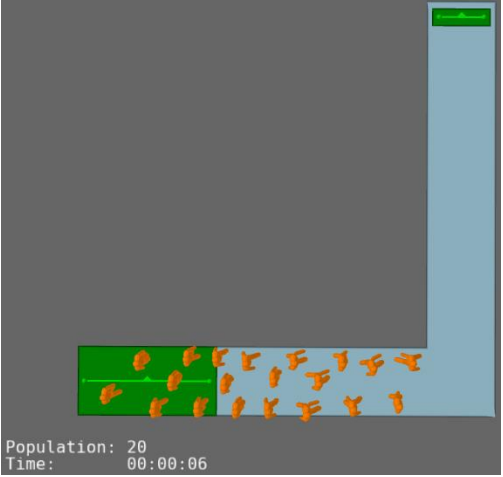
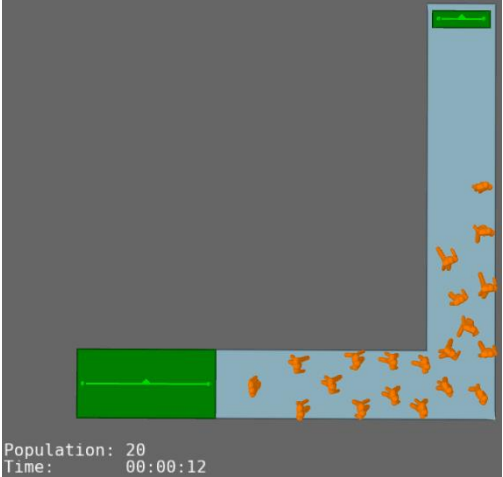
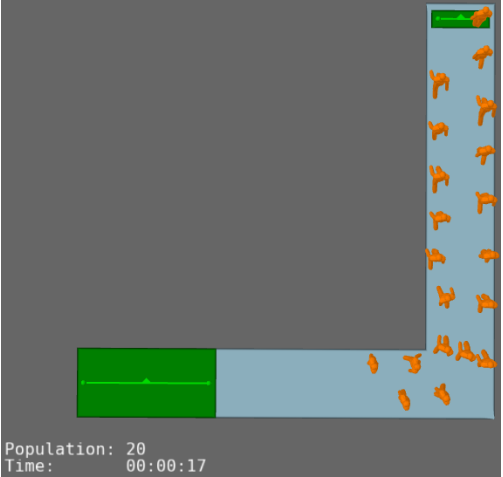
Properties: Journey	属性：行程
File	文件
Select	选择
Multi	多选
Help	帮助
Edit	编辑
Journey	行程
Timing	计时
Start Time	开始时间
Simulation start	模拟开始
Duration	持续时间
Uniformly distributed	均匀分布

Population	群体
Agent count	人员计数
Profile	概况
Origins	起点
Ignore weights in list (and collections)	忽略列表（和集合）中的权重
PortalActor	出入口角色
Destinations	目的地
Agent goal	人员目标
Assigned	已分配
Ignore weights in list (and collections)	忽略列表（和集合）中的权重
Portal	出入口

图 A5.2: MassMotion 物理环境和“行程”属性

A5.4 测试结果

图 A5.3 说明了模拟过程中关键时刻的模拟人员行程。

 Population: 20 Time: 00:00:01	 Population: 20 Time: 00:00:06								
<table><tr><td>Population</td><td>群体</td></tr><tr><td>Time</td><td>时间</td></tr></table> 时间：1s – 全体 20 名人员进入模拟，并分布在分配给入口的 2m × 4m 楼层内。	Population	群体	Time	时间	<table><tr><td>Population</td><td>群体</td></tr><tr><td>Time</td><td>时间</td></tr></table> 时间：6s – 人员以预期的 1m/s 步行速度开始前往走廊拐角。此时第一名人员近似到达拐角处。	Population	群体	Time	时间
Population	群体								
Time	时间								
Population	群体								
Time	时间								
 Population: 20 Time: 00:00:12	 Population: 20 Time: 00:00:17								
<table><tr><td>Population</td><td>群体</td></tr><tr><td>Time</td><td>时间</td></tr></table> 时间：12s – 大约 50% 的人员成功通过拐角处。由于人员在这个区域通行，拐角处稍显拥挤。	Population	群体	Time	时间	<table><tr><td>Population</td><td>群体</td></tr><tr><td>Time</td><td>时间</td></tr></table> 时间：17s – 首名人员到达目的地出口。人员在经过拐角处后，形成了两列有序队列。	Population	群体	Time	时间
Population	群体								
Time	时间								
Population	群体								
Time	时间								

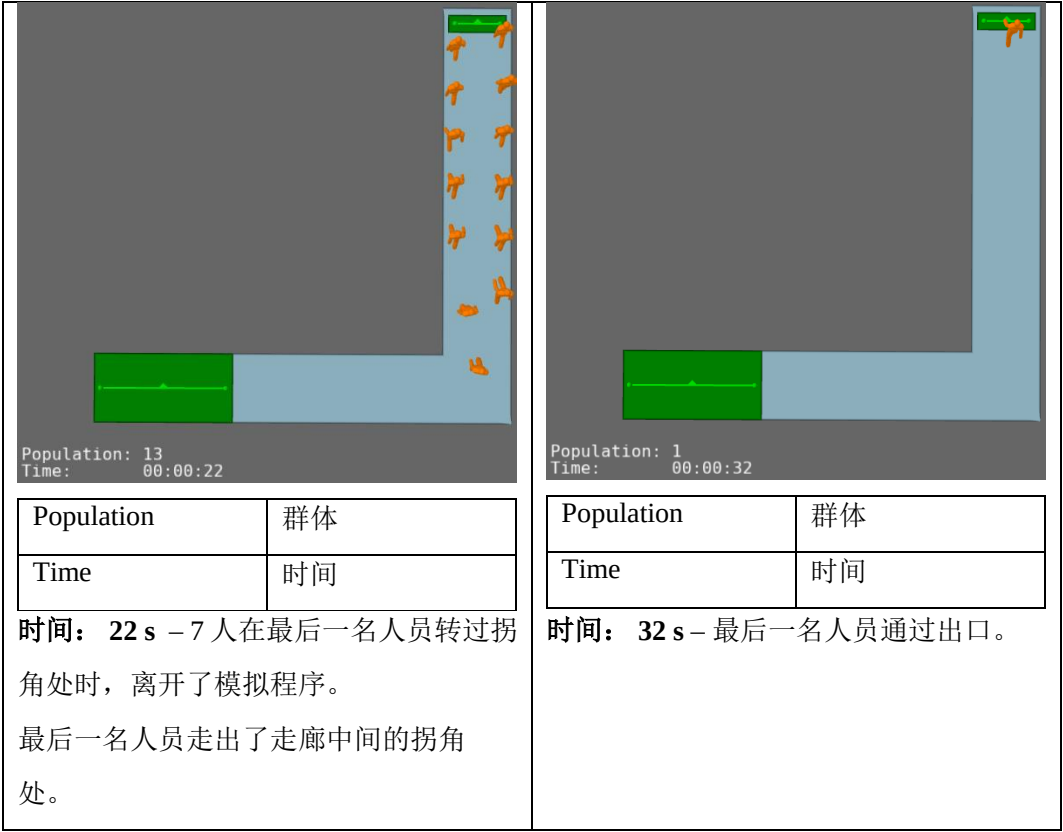


图 A5.3: MassMotion 人员行程

图 A5.4 中为人员路线预测图（从入口到出口中的 20 个人员）及人员坐标位置。

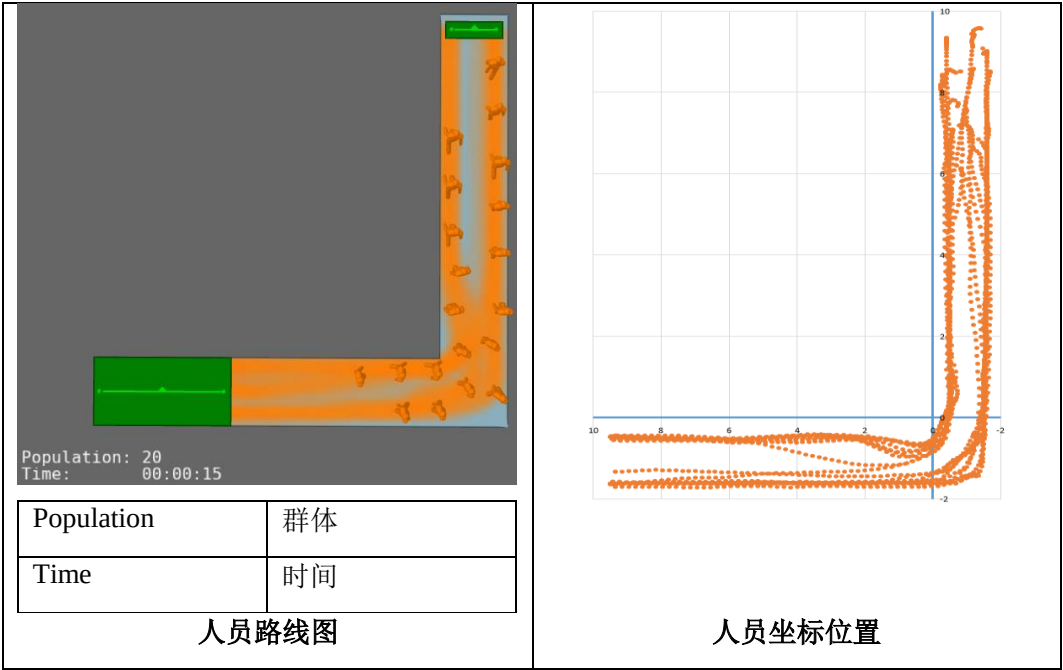


图 A5.4: MassMotion 人员路线预测图和人员坐标位置

这些证明：

- 人员可以在指定边界内通过拐角；
- 有两条不同的人员路径（特别是通过拐角之后）。

注 – MassMotion 是在二维模型中进行模拟。MassMotion 在显示时，使用三维图像覆盖在二维图像上。因此，三维图像的某些部分（例如手臂）可能看起来超出了物理环境边界。图 A5.4 的人员坐标位置图可以清楚地显示出此种现象，这只是可视化过程功能。

表 A5.1 列出了 MassMotion 预测的量化结果。

人员表现					
序号	进入时间（小时：分钟：秒）	退出时间（小时：分钟：秒）	持续时间（s）	拥堵持续时间（s）	行走距离（m）
1005	00: 00: 00	00: 00: 17	17.2	0.2	16.628
1019	00: 00: 00	00: 00: 18	17.8	0.2	16.793
1010	00: 00: 00	00: 00: 19	19.0	2.4	16.911
1014	00: 00: 00	00: 00: 19	19.6	3.4	18.112
1016	00: 00: 00	00: 00: 20	20.0	0.6	17.681
1003	00: 00: 00	00: 00: 21	21.4	3.8	17.657
1004	00: 00: 00	00: 00: 21	22.0	4.8	18.124
1012	00: 00: 00	00: 00: 22	22.6	6.6	18.805
1001	00: 00: 00	00: 00: 23	23.2	6.2	18.332
1018	00: 00: 00	00: 00: 24	23.4	6.6	19.257
1006	00: 00: 00	00: 00: 24	24.4	6.4	18.414
1007	00: 00: 00	00: 00: 25	25.4	10.0	19.137
1013	00: 00: 00	00: 00: 25	25.4	14.4	19.199
1017	00: 00: 00	00: 00: 26	26.2	15.8	18.873
1020	00: 00: 00	00: 00: 27	26.4	16.2	18.932
1002	00: 00: 00	00: 00: 28	28.6	13.4	20.470
1009	00: 00: 00	00: 00: 28	28.8	18.6	19.517
1015	00: 00: 00	00: 00: 30	29.8	20.4	20.187
1011	00: 00: 00	00: 00: 30	30.8	21.0	20.171
1008	00: 00: 00	00: 00: 32	32.6	23.0	20.712

表 A5.1: 人员表现的 MassMotion 预测

所有人员在 0s 时进入模拟。

首名人员在 17.2s（拥堵持续时间为 0.2s）时退出模拟，总行走距离为 16.63m。平均行走速度为 0.978m/s（ $16.63 / (17.2 - 0.2)$ ）。（与首选水平地形行走速度 1m/s 相比）

最后一名人员在 32.6s（拥堵持续时间为 23.0s）时退出模拟，行走距离为 20.712m。

A5.5 结论

已在 MassMotion 内进行 IMO 1238 验证测试 6 和 NIST 1822 测试 2.3。

测试结果的分析表明，全部 20 名人员在转过拐角时都不会穿透边界。

预测表明，MassMotion 能够重现 IMO 和 NIST 指导中给出的模型中配置参数中所述的结果。

状态：通过。

A6 测试 7：参数分配

A6.1 测试说明

测试符合 IMO 1238 测试 7 和 NIST 1822 测试 2.4。

该测试为 100 名人员分配了首选水平地形行走速度。从均匀概率分布（范围从 0.97m/s 至 1.62m/s - 参见 IMO 1238 人员分组“男性 30-50”）中随机选择首选水平地形行走速度。目的是确定指定的首选水平地形行走速度与均匀概率分布一致。

A6.2 测试目的

测试的目的是证明 MassMotion 能够正确设置人员的统计学参数（包括首选水平地形行走速度）。

A6.3 模拟设置

物理环境包括：

- 一个 10m × 10m 的楼板，设有一个入口；
- 相邻的 3.7m × 3.2m 的楼板，设有一个出口；
- 连接两块楼板的 1.5m × 0.8m 连接件。

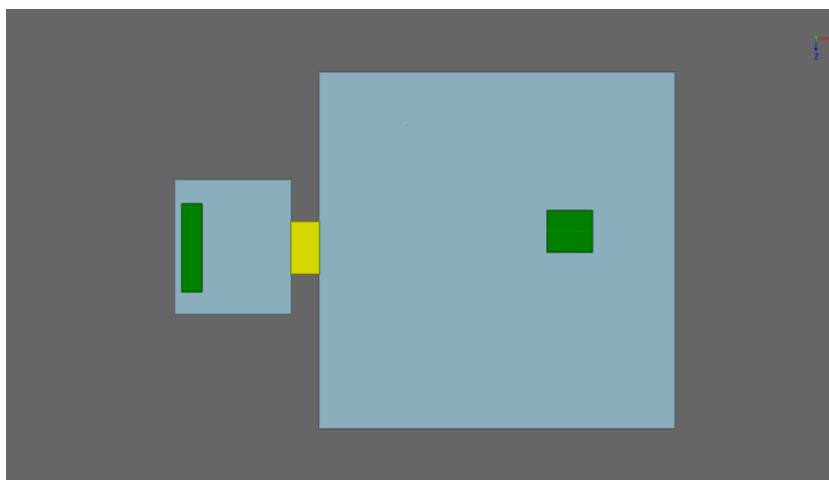


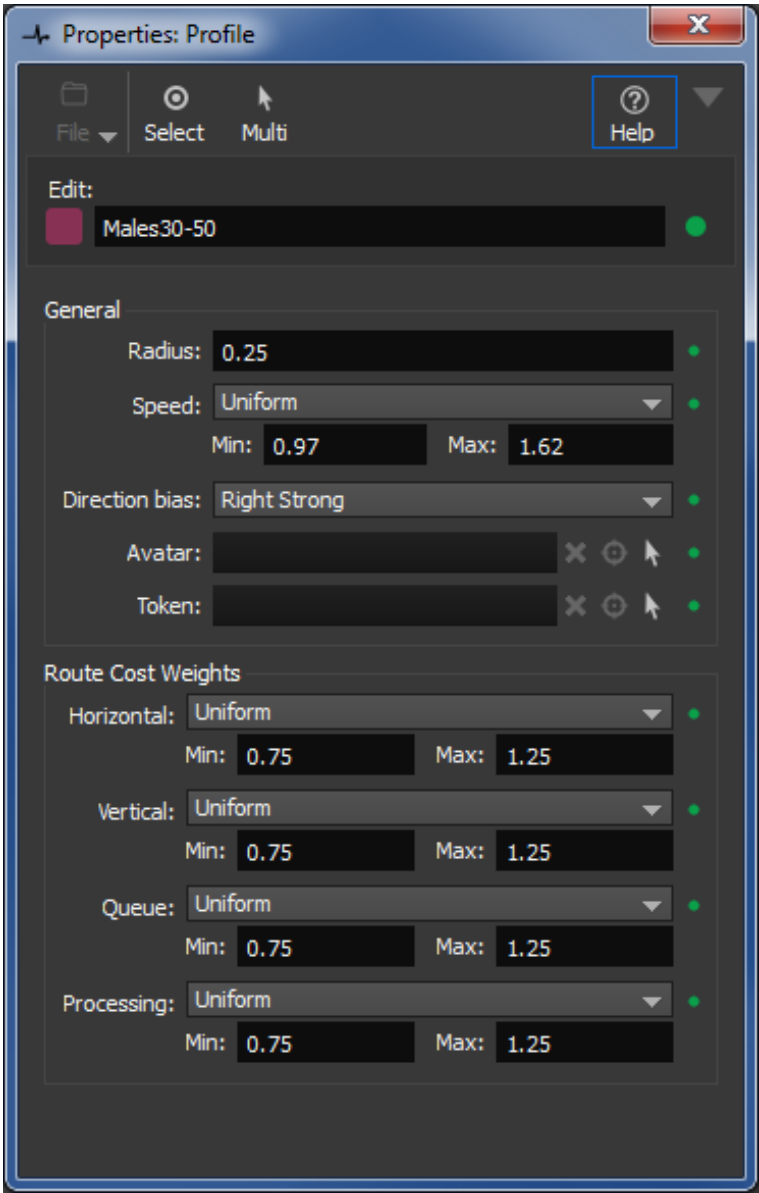
图 A6.1：物理环境

创建 IMO 1238“男性 30-50”人员概况”（图 A6.2）。

创建 100 人的“行程”活动（图 A6.3）。

创建 50 次运行的批次分析（图 A6.2，图 A6.4）。

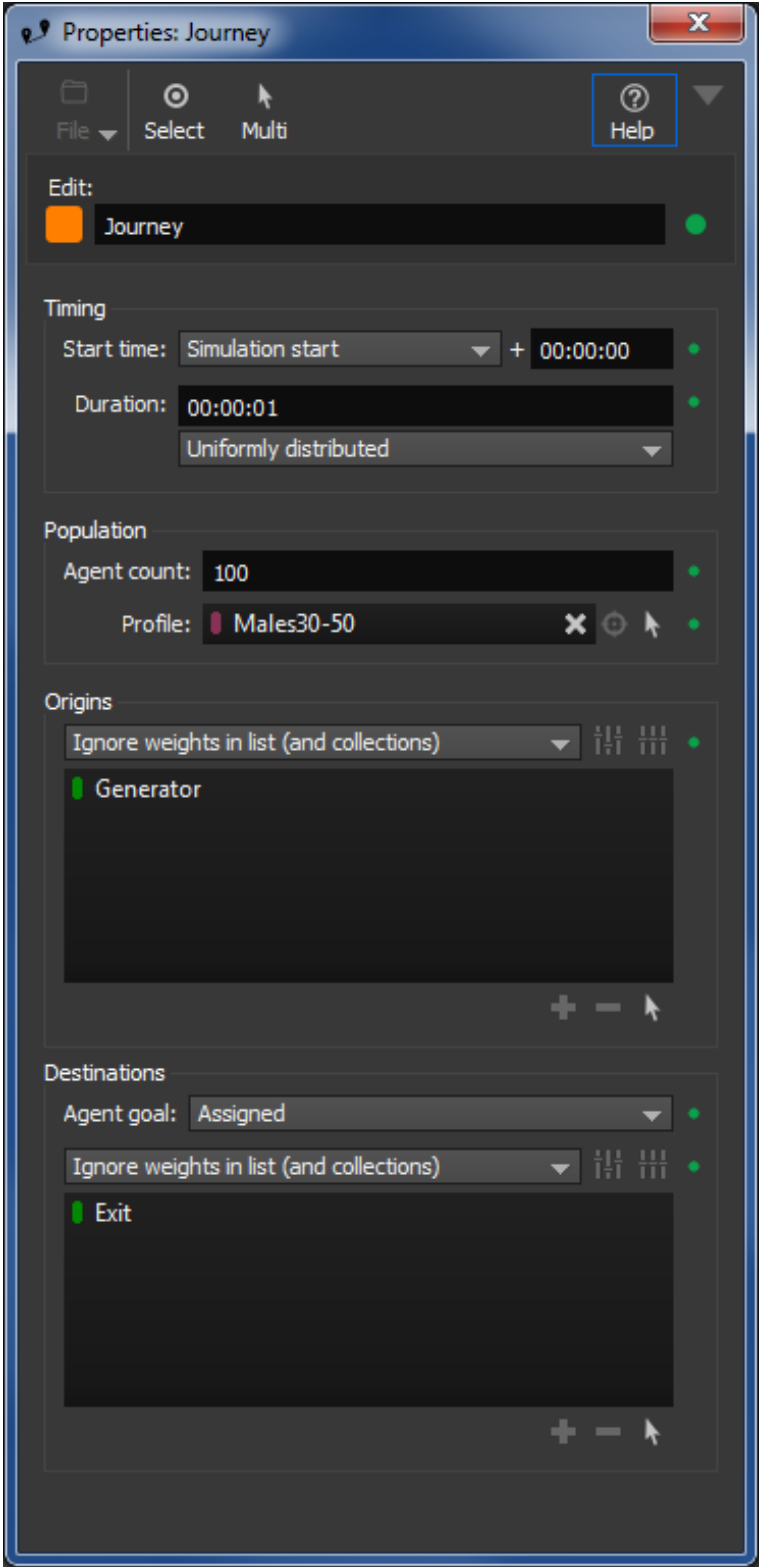
上述未明确的其他所有参数均设置为 MassMotion 默认值。



Properties: Profile	属性：概况
File	文件
Select	选择
Multi	多选
Help	帮助
Edit: Males 30-50	编辑：男性 30-50 岁
General	一般
Radius	半径

Speed	速度
Uniform	均匀
Min	最小值
Max	最大值
Direction bias: Right Strong	方向偏差: 右强
Avatar	头像
Token	令牌
Route Cost Weights	路线成本权重
Horizontal: Uniform	水平: 均匀
Vertical: Uniform	垂直: 均匀
Queue: Uniform	队列: 均匀
Processing: Uniform	处理: 均匀
Min	最小值
Max	最大值

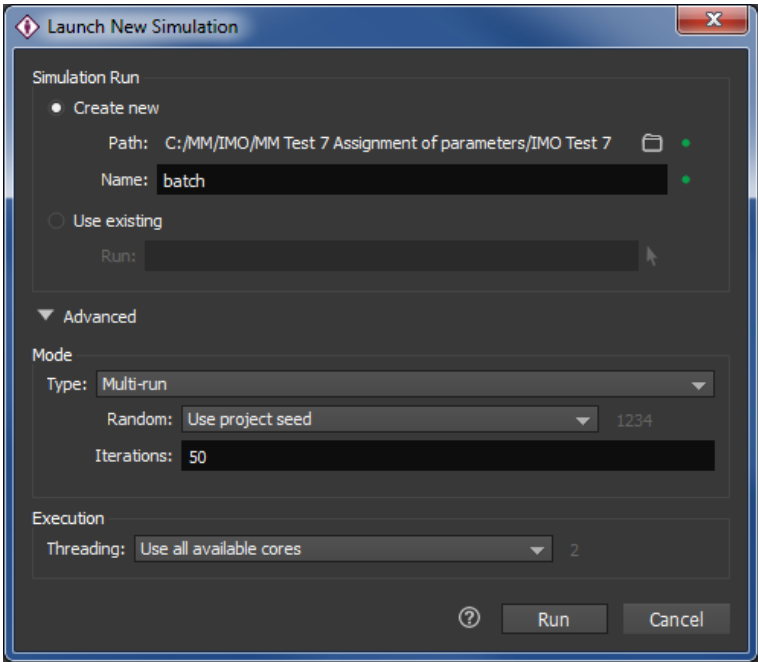
图 A6.2: 人员概况



Properties: Journey	属性：行程
File	文件
Select	选择
Multi	多选

Edit: Journey	编辑：行程
Timing	计时
Start time: Simulation start	开始时间：模拟开始
Duration	持续时间
Uniformly distributed	均匀分布
Population	群体
Agent count	人员数量
Profile	概况
Males 30-50	男性 30-50 岁
Origins	起点
Ignore weights in list (and collections)	忽略列表（和集合）中的权重
Generator	产生器
Destinations	目的地
Agent goal: Assigned	人员目标：已分配
Ignore weights in list (and collections)	忽略列表（和集合）中的权重
Exit	出口

图 A6.3：行程活动



Launch New Simulation	启动新的模拟
Create new	新建

Path:	路径:
Name:	名称:
Use existing	使用现有的
Run:	运行
Advanced	高级
Mode	模式
Type:	类型:
Multi-run	多个运行
Random: Use project seed	随机: 使用项目种子
Iterations:	迭代:
Execution	执行
Threading: Use all available cores	线程: 使用所有可用内核
Run	运行
Cancel	取消

图 A6.4: MassMotion 批量仿真运行

A6.4 测试结果

50 次模拟运行，每次生成 100 名人员，总计 5000 人。

在表 A6.1 中总结了人员首选水平地形行走速度的最小值、最大值和平均值。

首选水平地形步行速度 (m/s)		
	期望	分配
最小	0.97	0.970
最大	1.62	1.620
平均	1.295	1.295

表 A6.1: 首选水平地形行走速度

图 A6.5 显示出在 10s 至 100s 时，每 0.1m/s 的时间间隔之中，分配的首选水平地形行走速度与人员数的关系图。

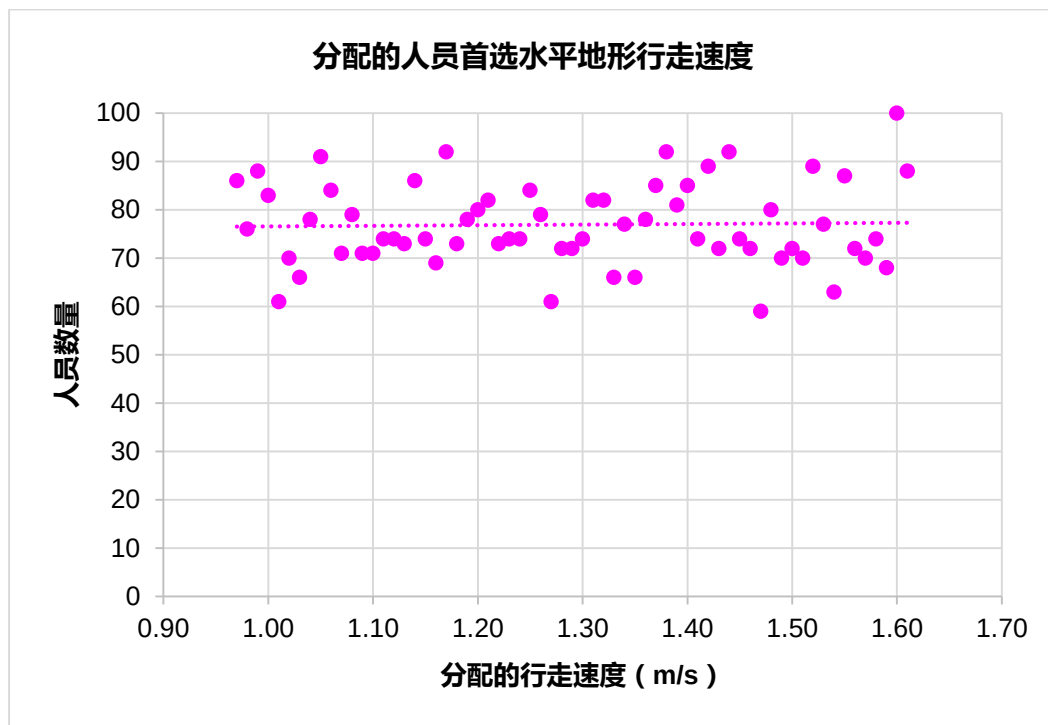


图 A6.5: MassMotion 分配的首选水平地形行走速度

趋势线表明参数分配的分布符合均匀分布。

A6.5 结论

使用 MassMotion 进行了 IMO 1238 测试 9 和 NIST 1822 测试 2.4。

预测结果表明，MassMotion 能够重现 IMO 和 NIST 指导中给出的模型中配置参数中所述的结果。

状态：通过。

A6.6 测试 8：逆向流动

A6.7 测试说明

测试符合 IMO 1238 测试 8 和 NIST 1822 测试 2.8。

2 个 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 的楼板在边界的中心线处，通过 $10\text{m} \times 2\text{m}$ 的地面（走廊）连接。

该测试为 100 个的人员群体分配了首选水平地形行走速度。从均匀概率分布（范围从 0.97m/s 至 1.62m/s - 参见 IMO 1238 人员分组“男性 30-50”）随机选择首选水平地形行走速度。人员位于离走廊较远一个房间地面一侧，首选密度为 $4\text{人}/\text{m}^2$ 。

场景 1 要求人员通过走廊到远离走廊的二楼出口，如图 A7.1 所示。

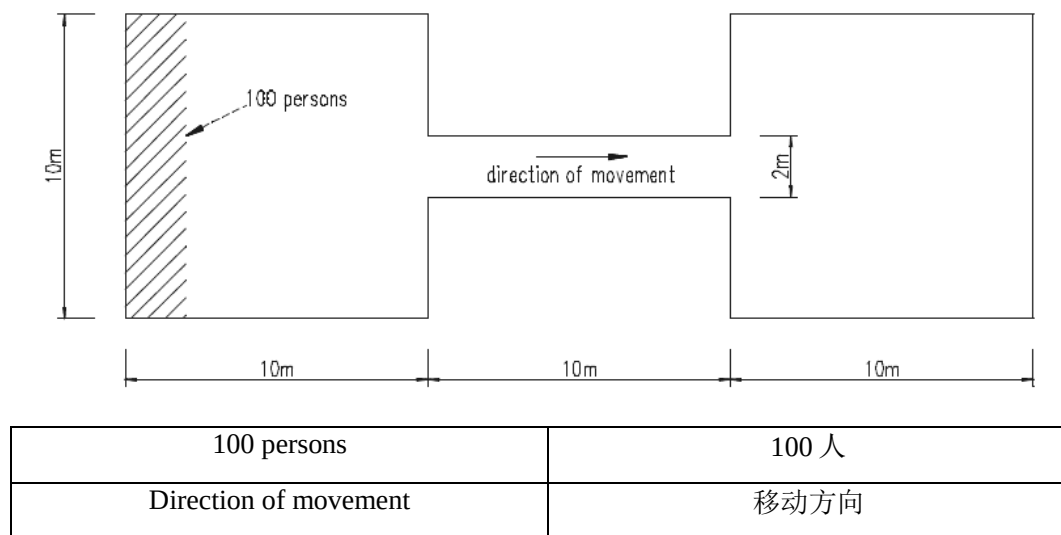


图 A7.1：几何布局 - 场景 1

考虑了表 A7.1 中总结的六个其他场景。这些场景测试了地面占有率和方向偏差（侧偏和强度）的预测灵敏度。

场景				
ID	地面占有率（人）		方向偏差	
	左	右	偏好	强度
1	100（男）	0	右	强
2	100（男）	10（男）	右	强
3	100（男）	50（男）	右	强
4	100（男）	100（男）	右	强
5	100（男）	100（女）	右	强
6	100（男）	100（男）	右	弱
7	100（男）	100（男）	无	不适用

表 A7.1：测试场景

测试的目的是调查 MassMotion 内逆向流动的影响。

A6.8 测试目的

测试的目的是验证 MassMotion 模拟逆向流动的能力及其对疏散时间的影响。

A6.9 模拟设置

2 个 10m × 10m 的楼板在边界的中心线处，通过 10m × 2m 的地面（走廊）连接。

2000mm 的连接件，连接走廊至 2 个楼板。

左侧楼板设置 1 个入口，尺寸为 2.5m × 10m，设置人数为 100 人，人员密度为 4 人/m²（后续场景中，将在右侧楼板相应位置设置类似的入口）。

右侧楼板的右侧边界处设置 1 个出口（后续场景中，将在左侧楼板相应位置设置类似的出口）。

在走廊的末端创建轮廓线。

根据 IMO 1238 指南，设置首选水平地形行走速度（基于相关人口群体的最小和最大速度内的统一概率分布的随机分配，如表 A7.2 所定义）。

分组	IMO 1238 人口群体	首选水平地形步行速度（m/s）
----	---------------	-----------------

		最小	最大
女	女 30-50	0.71	1.19
男	男 30-50	0.97	1.62

表 A7.2: IMO 1238 首选水平地形行走速度

在 MassMotion 中，人员参数“方向偏差”用于解决与其他人员的冲突。“方向偏差”定义如下：

- 方向，如无、左或右（默认值）
- 强度，如弱或强（默认值）。

表 A7.1 列出了每种场景采用的“方向偏差”参数。

场景 1 的 MassMotion 模型如图 A7.2 所示。

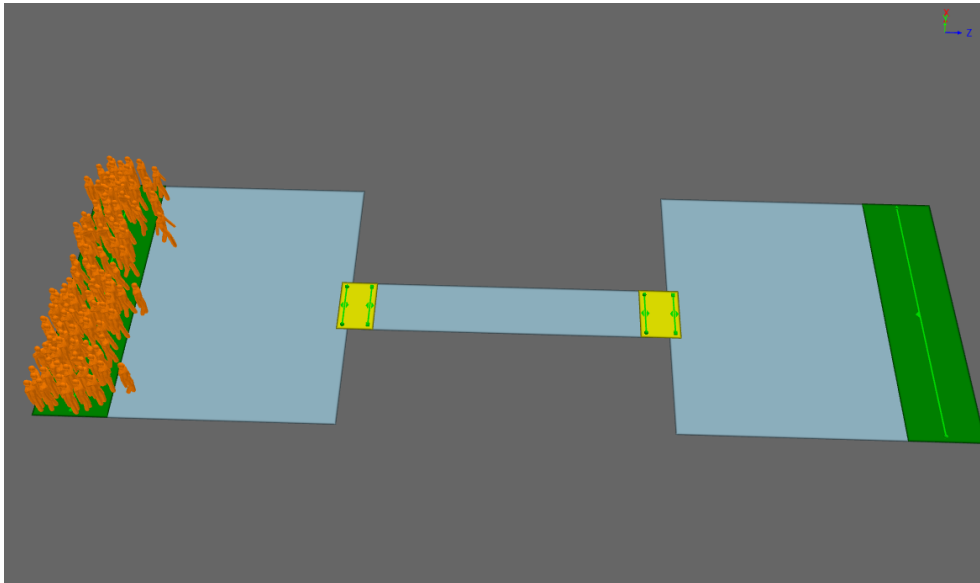
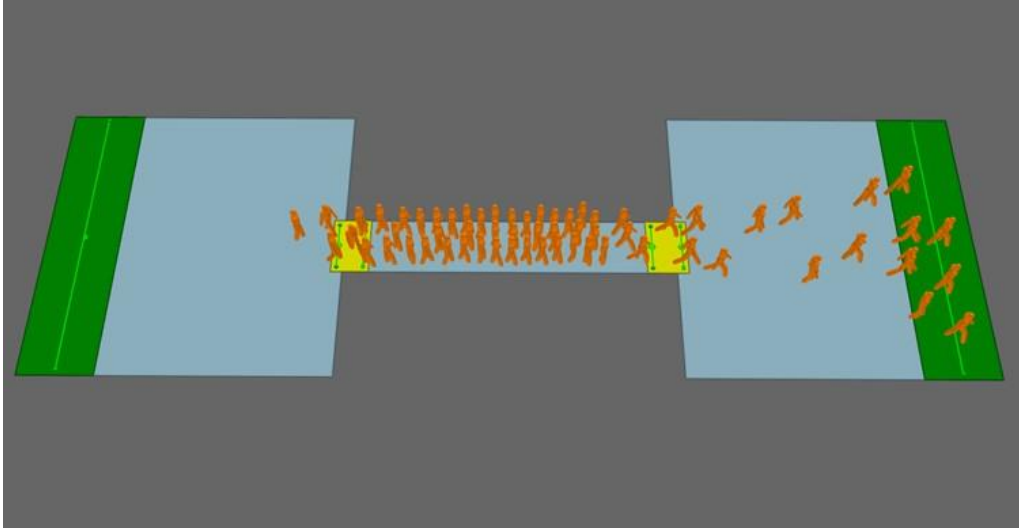


图 A7.2: MassMotion 物理几何模型及场景 1 的人员群体

A6.10 测试结果

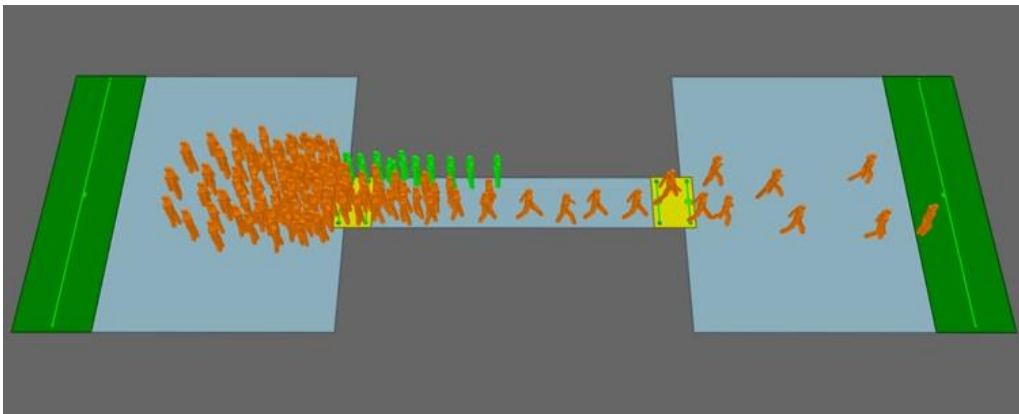
图 A7.3 为 7 种场景中，各主要时间点的模拟预测图。需注意，左侧房间的疏散人员为橙色，右侧房间的疏散人员为绿色。

场景 1（47s 时）



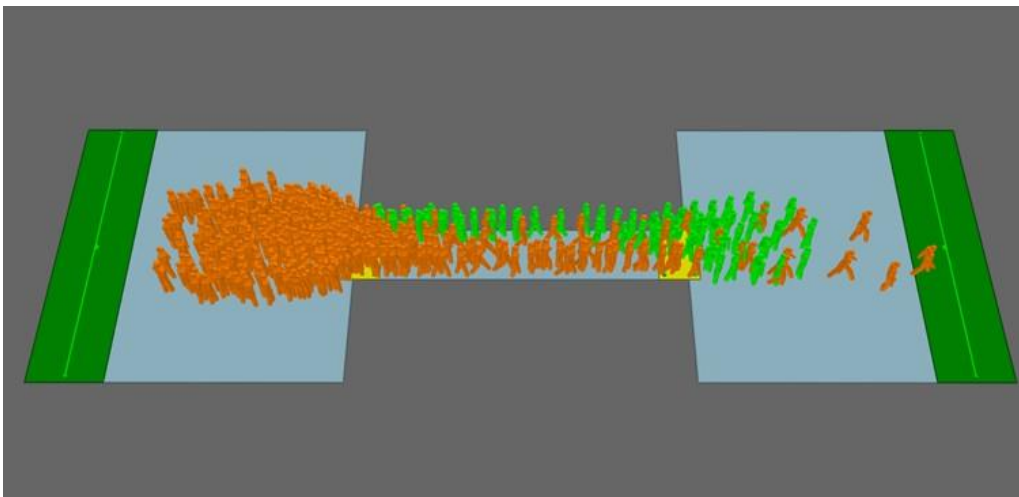
70s 时，左侧房间的最后一位人员进入右侧房间。

场景 2（25s 时）



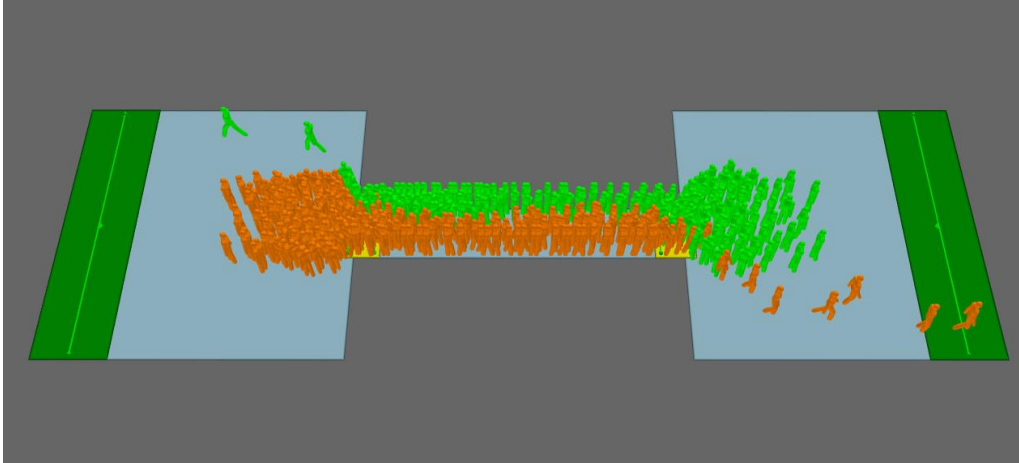
80s 时，左侧房间的最后一位人员进入右侧房间。

场景 3（25s 时）



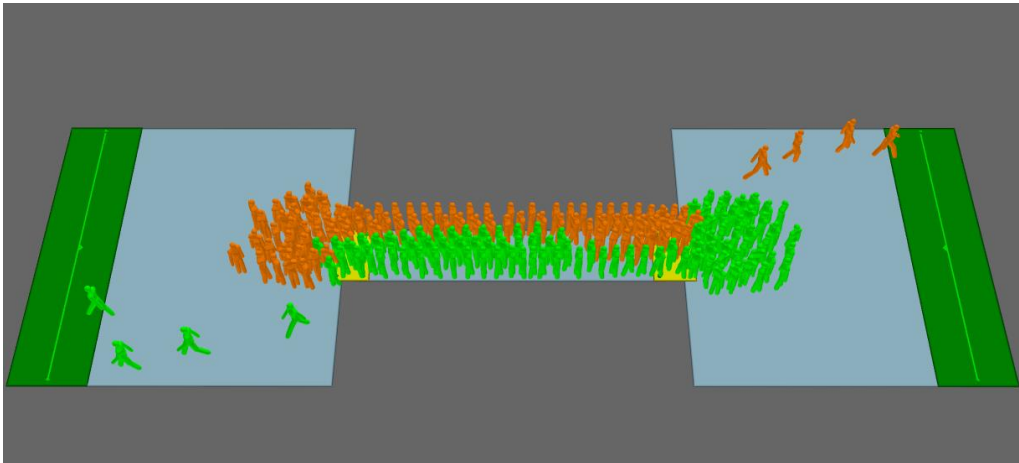
136s 时，左侧房间的最后一位人员进入右侧房间。

场景 4（38s 时）



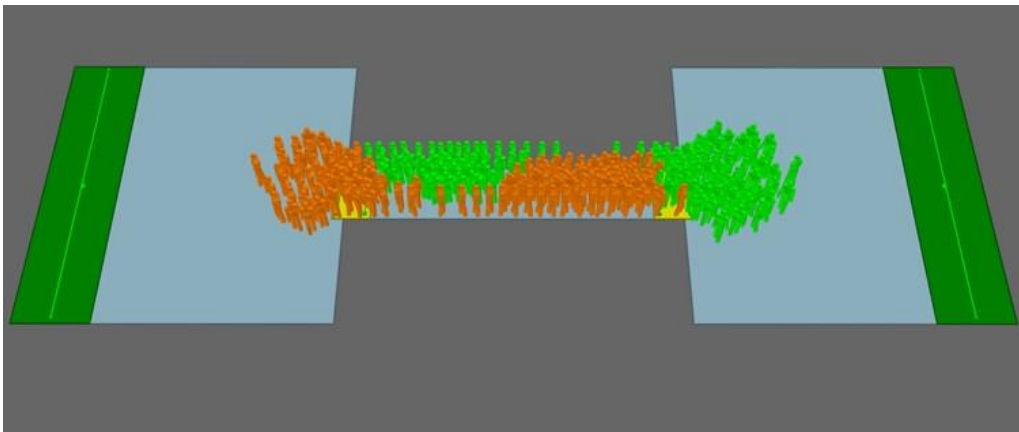
208s 时，左侧房间的最后一位人员进入右侧房间。

场景 5（53s 时）



160s 时，左侧房间的最后一位人员进入右侧房间。

场景 6（57s 时）



由右侧房间走出的人员使左侧人员无法进入右侧房间。

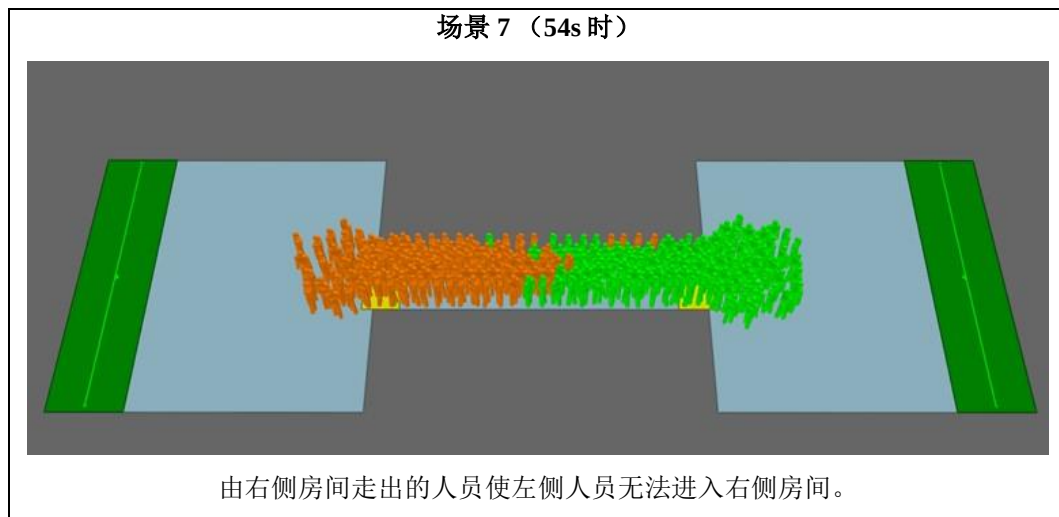


图 A7.3： 七种场景中的各种 MassMotion 预测

场景 7 表明，当方向偏差未分配给起始于逆向流动任一侧的人员时，发生（强）锁定。

场景 6 表明，即使“弱”方向偏差被分配给起始于逆向流动任一侧的人员，也会发生锁定。

场景 4、5 表明，当“强”方向偏差被分配给来自逆向流动任一侧的人员时，锁定就不会发生。

场景 1、2、3、4 表明，来自左侧楼板的最后一个人员进入右侧楼板的时间，随着来自右侧楼板人员的增加而增加。

场景 4 和 5 表明，具有更快首选水平区域步行速度的人群（男性），比具有较慢首选水平区域步行速度的人群（女性），能够更快地进入右侧房间（从左侧房间），然后面对类似的群体（男性）。

A6.11 结论

已在 MassMotion 内进行 IMO 1238 测试 8 和 NIST 1822 测试 2.8。

在逆向流动包含大量的“流动偏差”时，定义强度为“弱”（或没有方向的定向偏差时，定义强度为“无”）的这些人员工况中，发生“锁定”现象（即“人员不能从一块楼板行走至另一块楼板”）。当大量人员涉及逆向流动情况时，“流动偏差”被定义为“弱”或“无”，MassMotion 不被验证使用。

预测表明，MassMotion 能够重现 IMO 和 NIST 指导手册中给出的模型中配置参数中所述的结果（具体来说，来自左侧楼板的最后一名人员进入右侧楼板

的时间随着逆向流动中的人员数量增加而增加）。MassMotion 在大量人员涉及逆向流动情况时被验证使用，“流动偏差”被定义为“强”。

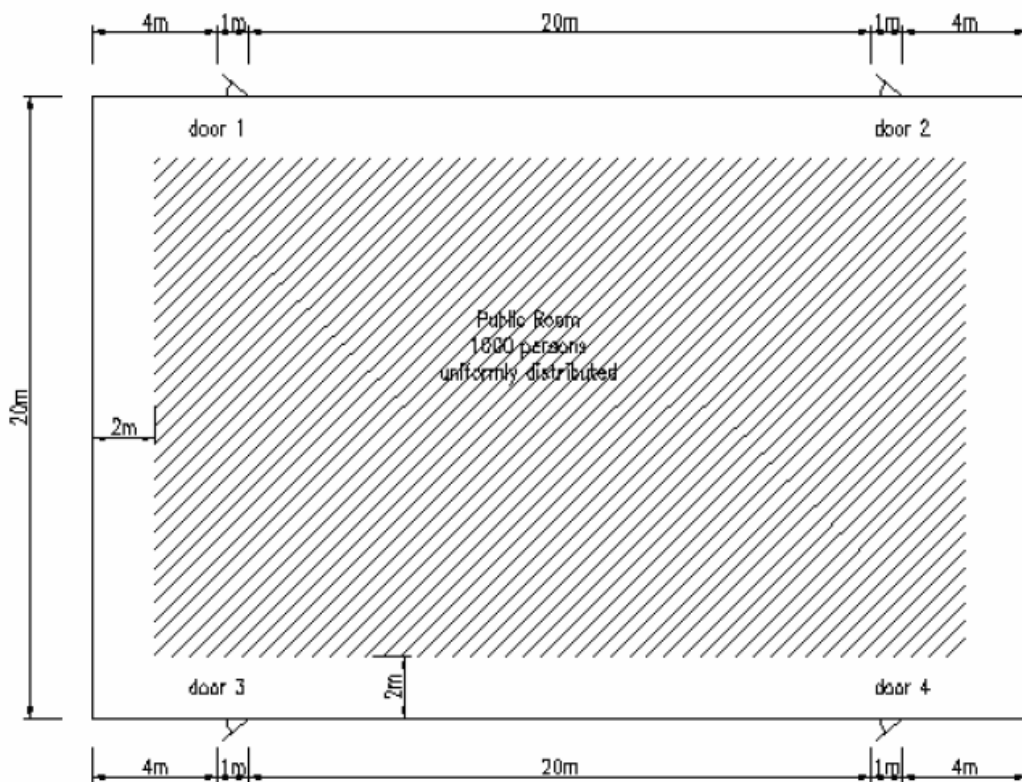
状态：通过。（适用条件 - 适当设定“流动偏差”）。

A7 测试 9：拥堵出口的使用

A7.1 测试说明

测试符合 IMO 1238 测试 9。

该测试设置 1 个 $30\text{m} \times 20\text{m}$ 的楼板，设有 $4 \times 1000\text{mm}$ 的出口。1000 名人员均匀分布在楼板中心处的 $26\text{m} \times 16\text{m}$ 范围内。如图 A8.1。



Public Room	公共房间
1000 persons	1000 人
door	门
Uniformly distributed	均匀分布

图 A8.1：退出大型公共房间的流速（IMO 测试 9，图 3）

考虑两种场景：

- 场景 1 – 所有 4 个出口都开放；
- 场景 2 – 仅“3”和“4”出口开放。

该测试检查 MassMotion 出口的选择算法。

A7.2 测试目的

测试目的为验证人员能够评估出口条件（位置、大小、拥挤度）并选择合适的出口。

A7.3 模拟设置

MassMotion 物理环境如图 A8.2 和 A8.3 所示，共设有 5 个楼板、1 个入口、4 个连接件和 4 个出口。

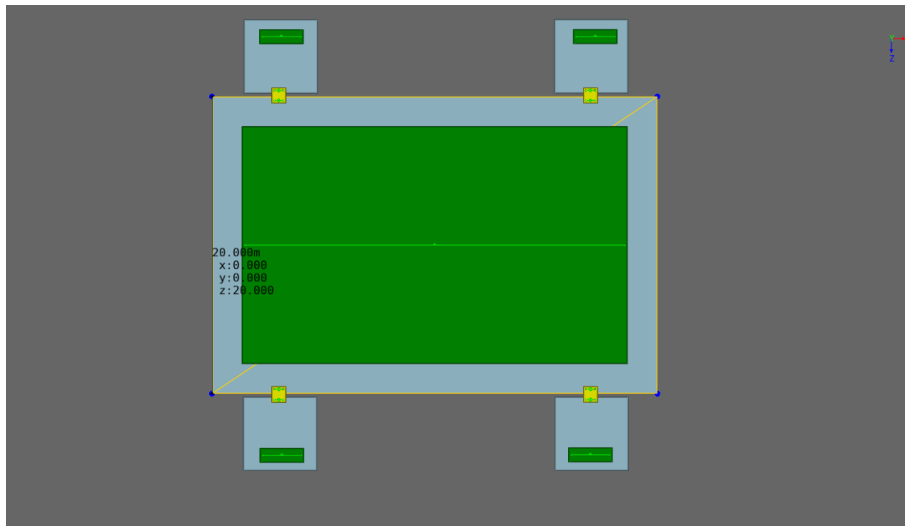


图 A8.2: MassMotion 物理环境

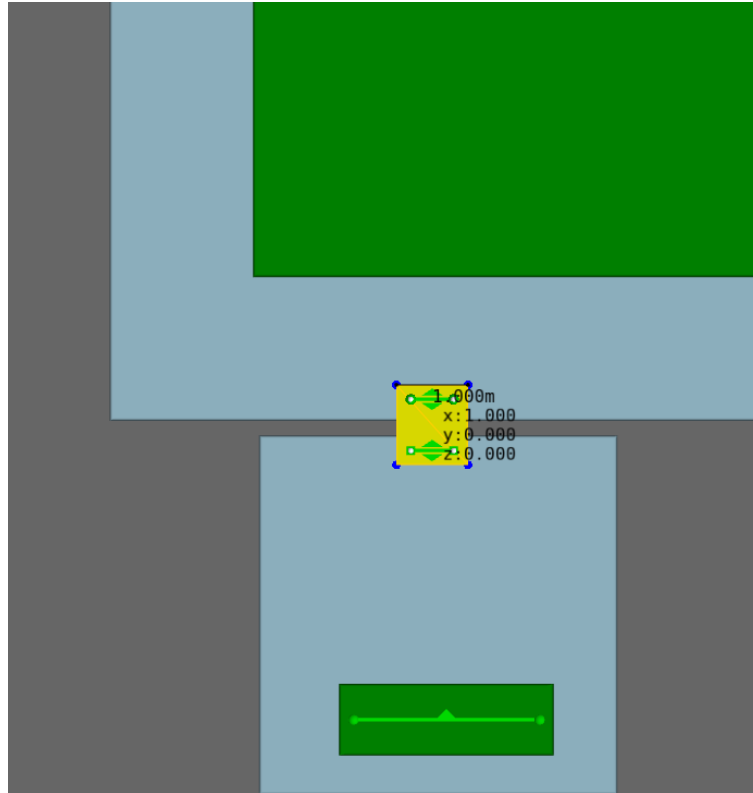


图 A8.3: MassMotion 连接

场景 1:

- 3 号连接件与 4 号连接件未定义为“门”，永久可用；
- 1 号连接件与 2 号连接件被定义为“门”，在“开门事件”中设置为立即打开。

场景 2:

- 3 号连接件与 4 号连接件未定义为“门”，永久可用；
- 1 号连接件与 2 号连接件被定义为“门”，但未设置“开门事件”，设置其等待时间成本为 2,000,000 秒（代表着重要的“等待成本”，因此使其对人员非常不利）。

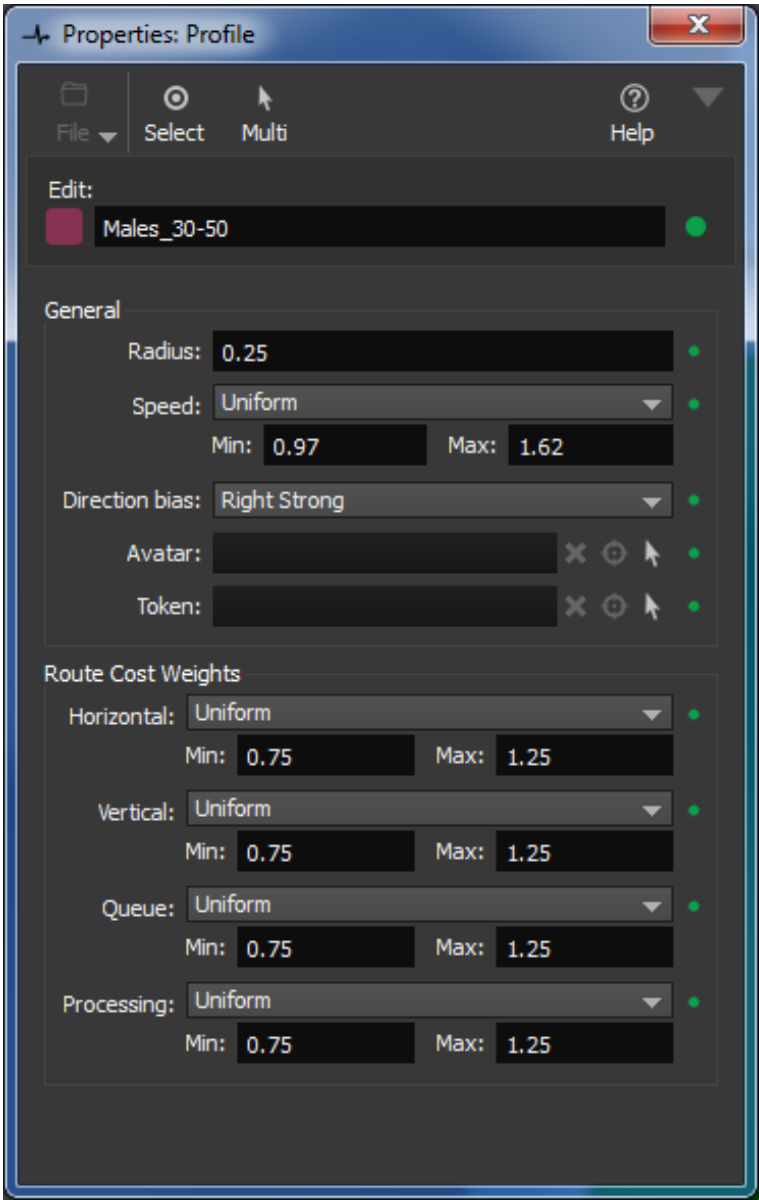
创建了 IMO 1238 “男性 30-50”人员属性（图 A8.4）。

入口在主楼板的 26m × 16 m 中心区域（距边缘的间距为 2m）创建了 1000 个人员。

创建了一个“疏散”事件（图 A8.5 和 A8.6），使得人员预疏散时间为 0。

针对连接件 1 和连接件 2，创建了一个“开门”事件（如前所述）。

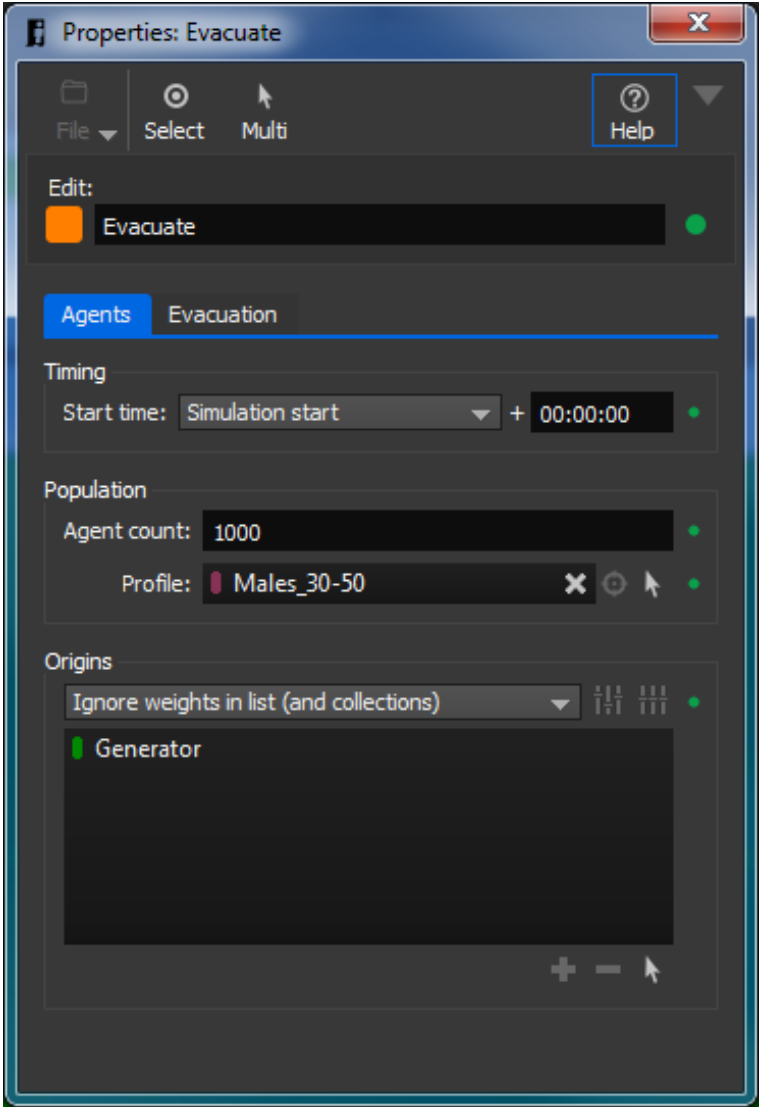
上面没有标识的所有其他参数都分配了 MassMotion 默认值。



Properties: Profile	属性：概况
File	文件
Select	选择
Multi	多选
Help	帮助
Edit: Males 30-50	编辑：男性 30-50 岁
General	一般
Radius	半径
Speed	速度
Uniform	均匀

Min	最小值
Max	最大值
Direction bias: Right Strong	方向偏差: 右强
Avatar	头像
Token	令牌
Route Cost Weights	路线成本权重
Horizontal: Uniform	水平: 均匀
Vertical: Uniform	垂直: 均匀
Queue: Uniform	队列: 均匀
Processing: Uniform	处理: 均匀
Min	最小值
Max	最大值

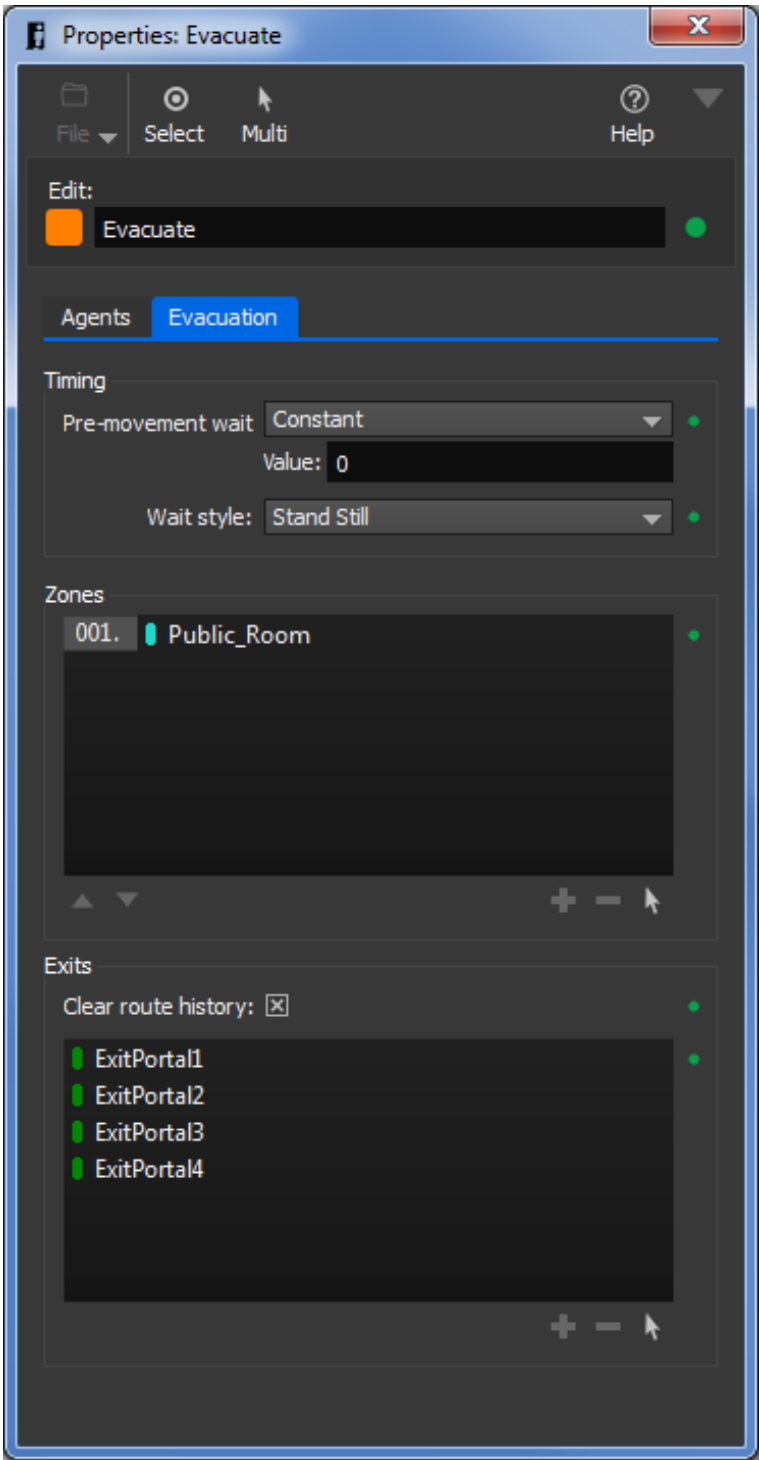
图 A8.4: MassMotion 人员资料



Properties: Evacuate	属性：疏散
File	文件
Select	选择
Multi	多选
Help	帮助
Edit: Evacuate	编辑：疏散
Agents	人员
Evacuation	疏散
Timing	计时
Start time: simulation start	开始时间：模拟开始
Population	群体
Agent count:	人员数量：

Profile: Males 30-50	概况：男性 30-50 岁
Origins	起点
Ignore weights in list (and collections)	忽略列表（和集合）中的权重
Generator	产生器

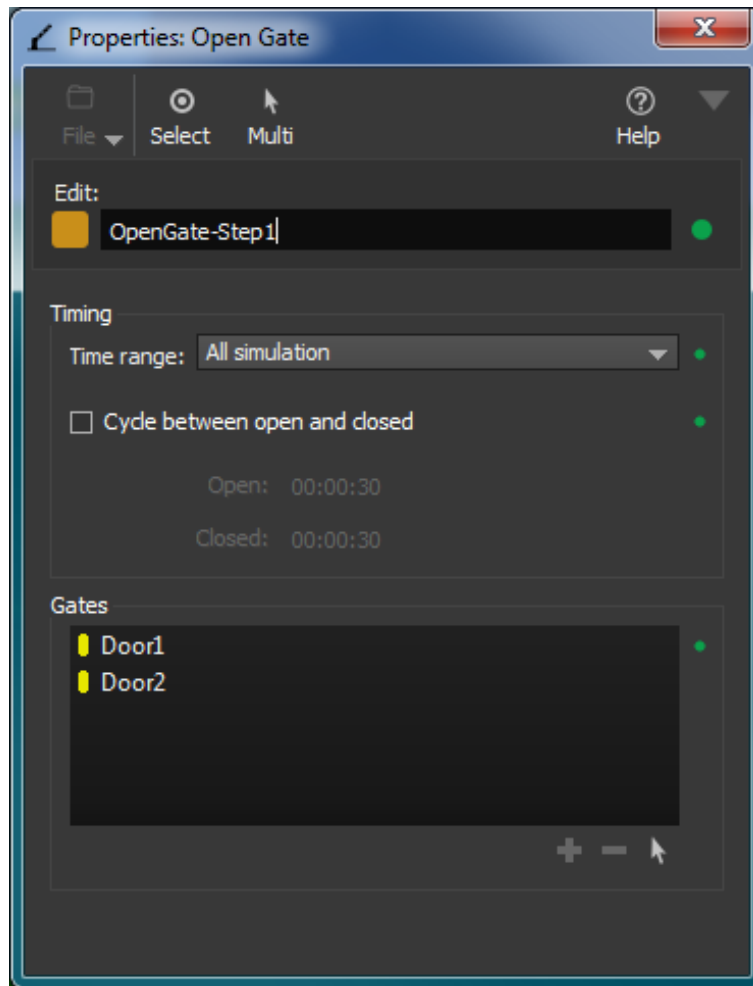
图 A8.5： MassMotion 疏散事件 - 人员



Properties: Evacuate	属性：疏散
File	文件
Select	选择
Multi	多选
Help	帮助
Edit: evacuate	编辑：疏散

Agents	人员
Evacuation	疏散
Timing	计时
Pre-movement wait	运动前等待
Constant	不变
Value	值
Wait style: Stand Still	等待风格: 静止不动
Zones	区域
Exits	出口
Clear route history:	清除路线历史:
ExitPortal1	出口 1
ExitPortal2	出口 2
ExitPortal3	出口 3
ExitPortal4	出口 4

图 A8.6: MassMotion 疏散事件 - 疏散



Properties: Open Gate	属性：开门
File	文件
Select	选择
Multi	多选
Help	帮助
Edit	编辑
Timing	计时
Time range	时间范围
Cycle between open and closed	循环打开和关闭
Gates	大门
Door1	门 1
Door2	门 2

图 A8.7: MassMotion: OpenGate 事件

A7.4 测试结果

人员在相关出口排队的典型情况如下图所示：

- 场景 1 如图 A8.8
- 场景 2 如图 A8.9

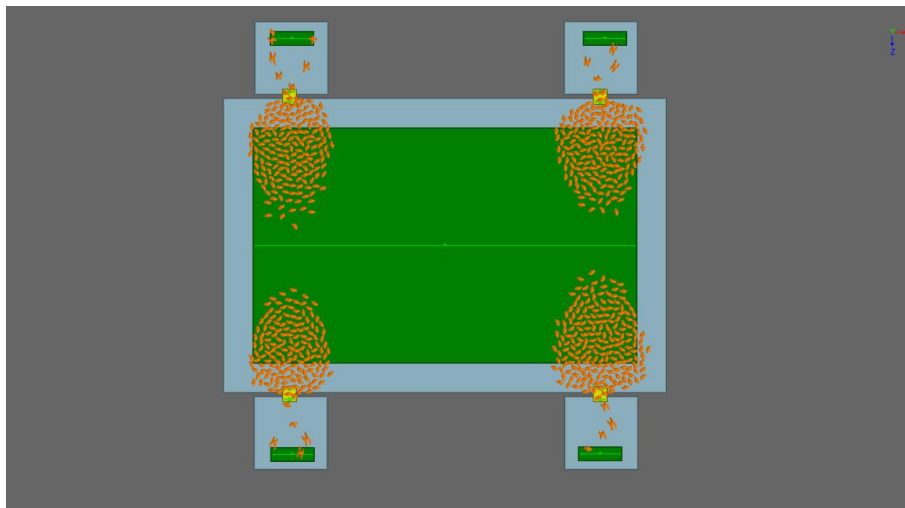


图 A8.8：场景 1 - 出口 1、2、3 和 4 可用（典型情况）

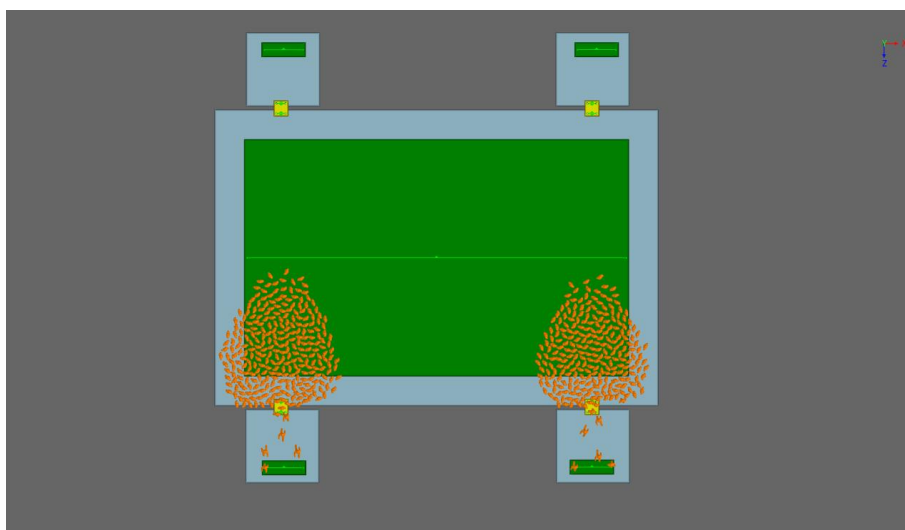
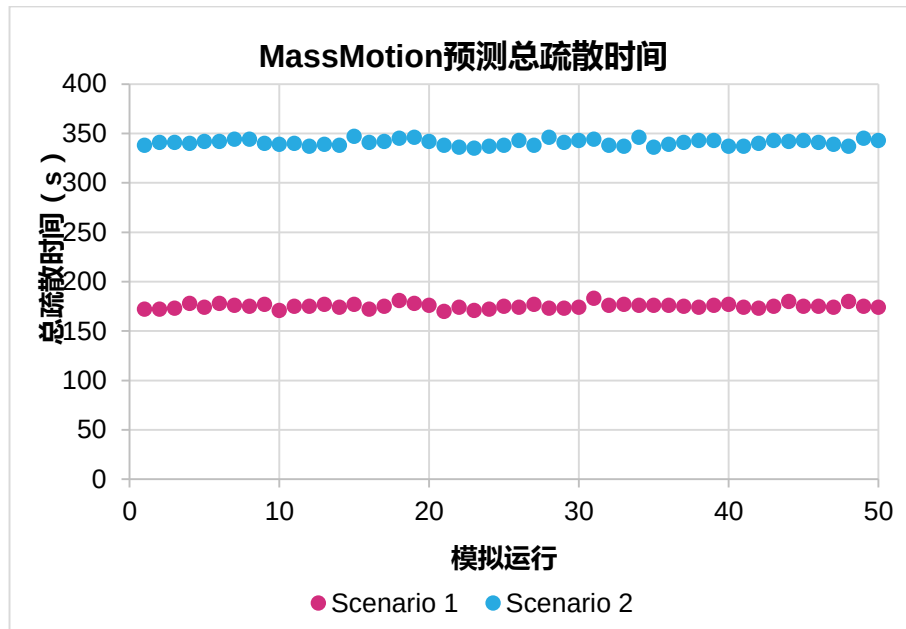


图 A8.9：场景 2 - 出口 3、4 可用（典型情况）

对场景 1 和场景 2 各进行 50 次模拟。模拟预测的总疏散时间汇总于表 A8.1 和图 A8.10 中。

	总疏散时间 (s)		
	最小值	最大值	平均值
场景 1 (出口 1、2、3 和 4)	170	183	175.2
场景 2 (出口 3 和 4)	335	347	340.7

表 A8.1: MassMotion 总疏散时间预测



Scenario 1	场景 1
Scenario 2	场景 2

图 A8.10: MassMotion 预测退出时间

图中可以看出，场景 2 的总疏散时间大约是场景 1 的总疏散时间的两倍（平均值为 1.95） - 如预期结果一致。

A7.5 结论

已在 MassMotion 内进行 IMO 1238 测试 9。

这些预测结果表明，MassMotion 能够在给定模型的配置参数情况下重现 IMO 指导手册中所述的结果。

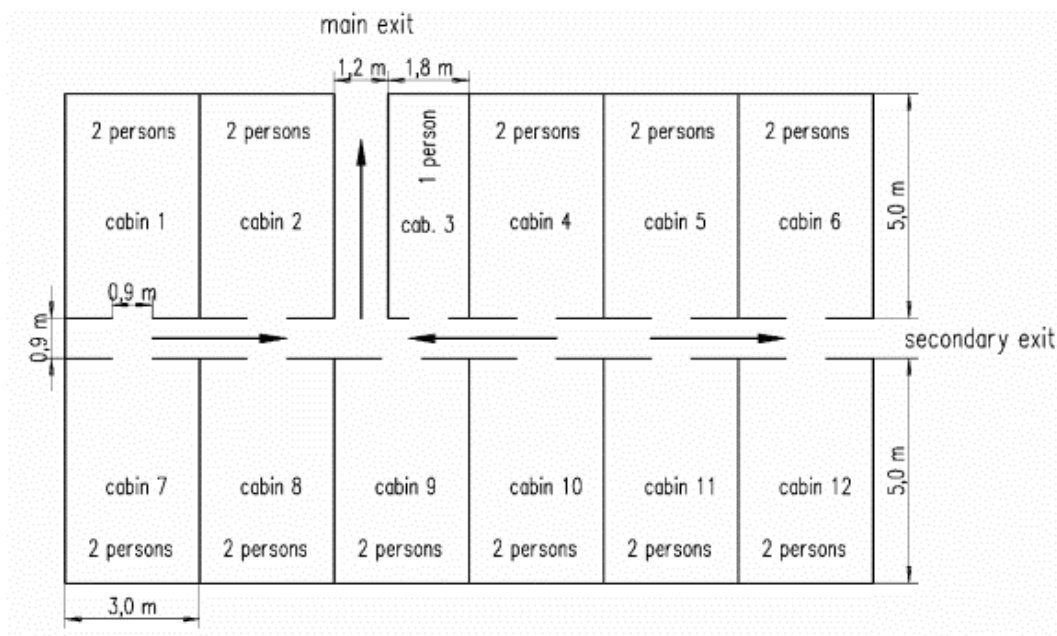
状态：通过。

A8 测试 10：出口分配

A8.1 测试说明

测试符合 IMO 1238 测试 10 和 NIST 1822 测试 3.1。

房间及走廊的几何尺寸布局如图 A9.1 表示。



Main exit	主出口
person	人
Secondary exit	次出口
cabin	房间

图 A9.1：房间走廊的配置

房间的人员分布如图 A9.1 所示。人员的预疏散时间设置为零（即瞬间移动）。从均匀概率分布中，随机选择首选水平地形行走速度（均匀概率分布范围从 0.97m/s 至 1.62m/s - 参见 IMO 1238 人口小组“男性 30-50”）。

房间 1、2、3、4、7、8、9 及 10 中的人员（橙色）分配给主要出口。

房间 5、6、11 及 12 中的人员（蓝色）分配给次要出口。

考虑两种场景：

- **场景 1** – IMO 1238 测试 10 和 NIST 1822 测试 3.1 - 如上所述。
- **场景 2** – 人员采用 MassMotion 出口选择算法（基于路线成本）。

测试是定性的。

A8.2 测试目的

测试目的是进行 MassMotion 代表退出路线分配能力的定性验证。

A8.3 模拟设置

物理环境如图 A9.2 所示。

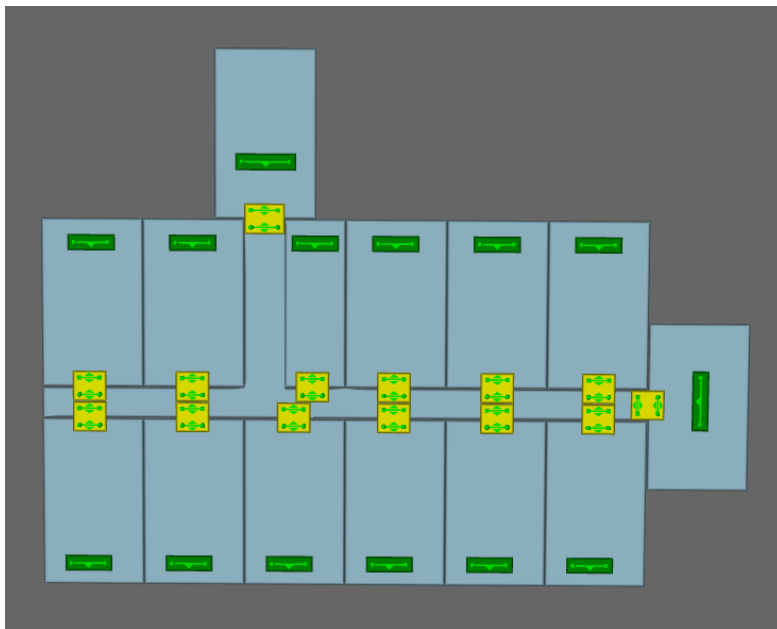


图 A9.2: MassMotion 物理环境

创建表示房间（12 个）、走廊（1 个）和目的地（2 个）的楼板。

在每个房间设置入口，在目的地处设置出口。

A8.4 测试结果

表 A9.2（以及图 A9.3 和 A9.4，显示了离开房间的人员）总结了场景 1 和 2 的 MassMotion 预测。

房间		使用出口的房间人数			
		场景 1: 定义出口		场景 2: 路线选择	
编号	人数	主要出口	次要出口	主要出口	次要出口
1	2	2	0	2	0
2	2	2	0	2	0
3	1	0	1	0	1
4	2	0	2	1	1
5	2	2	0	2	0
6	2	0	2	0	2

房间		使用出口的房间人数			
		场景 1: 定义出口		场景 2: 路线选择	
编号	人数	主要出口	次要出口	主要出口	次要出口
7	2	2	0	0	2
8	2	2	0	2	0
9	2	2	0	2	0
10	2	1	1	1	1
11	2	2	0	1	1
12	2	0	2	0	2
合计	23	15	8	13	10

表 A9.2: MassMotion 人员退出预测

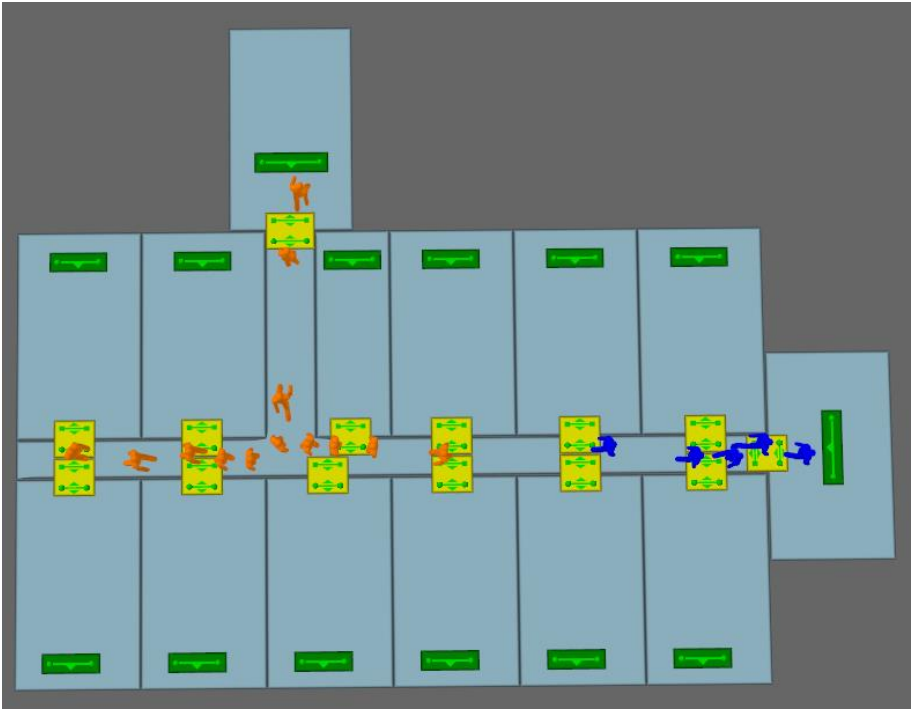


图 A9.3: 场景 1 – 人员移动到分配的出口

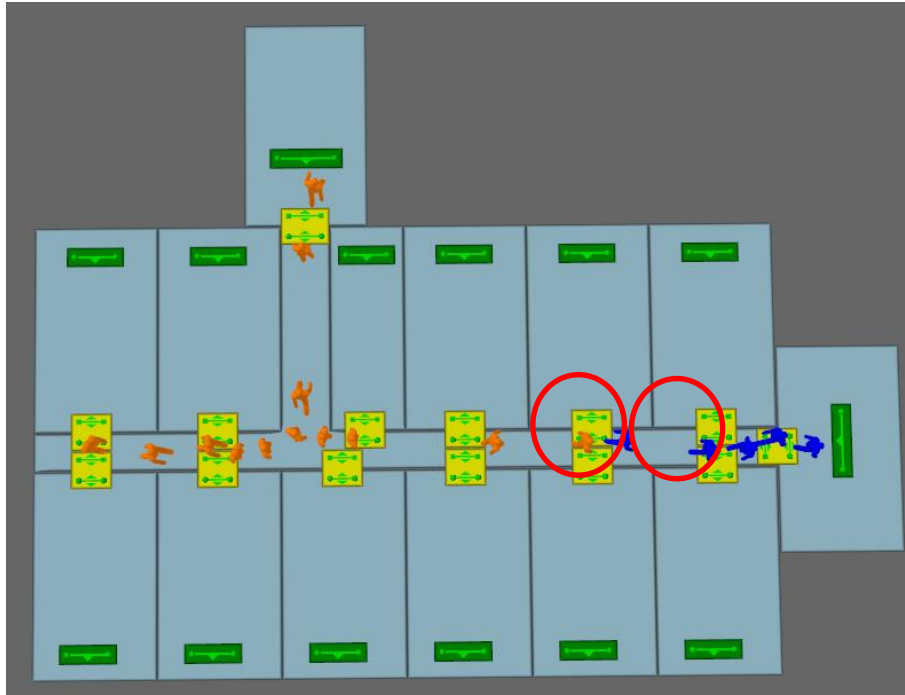


图 A9.4： 场景 2 – 人员移动到选定的出口

MassMotion 的预测结果表明：

- 场景 1 – 所有人员使用分配的出口；
- 场景 2 – 来自房间 4 的 1 名人员和来自房间 10 的 1 名人员（图 A9.4 中红圈所示）选择使用次要出口（而其他所有人员采用与场景 1 相同的出口）。

在后者中识别的人员行为是与通往主要出口的走廊相关的增加行走距离和成本的函数。

A8.5 结论

已在 MassMotion 内进行 IMO 1238 测试 10 和 NIST 1822 测试 3.1。

场景 1 预测表明，退出模拟的人员在分配的出口处执行了此项操作。

预测表明，MassMotion 能够根据模型的配置参数（分配的出口）来重现 IMO 和 NIST 指导中所述的结果。

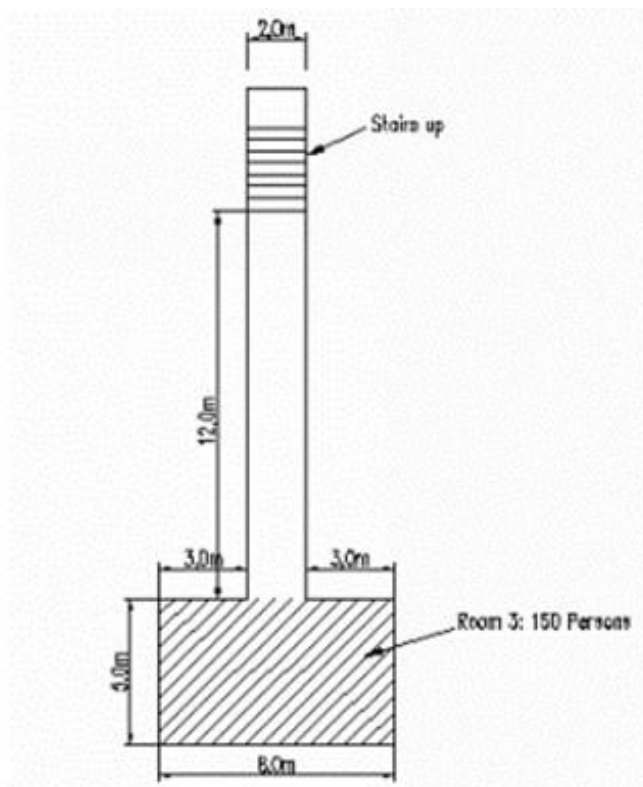
状态：通过。

A9 测试 11：楼梯拥堵

A9.1 测试说明

测试符合 IMO 1238 测试 11 和 NIST 1822 测试 5.1。

8m × 5m 的地板（房间）通过 12m × 2m 的地板（走廊）连接到 3m × 2m（3.6m 对角线）的楼梯（图 A10.1）。



Stair up	上楼
Room	房间
Person	人

图A10.1：几何布局（场景1）

需要考虑四种场景：

- 场景 1 – 150 人 – 上楼；
- 场景 2 – 100 人 – 上楼；
- 场景 3 – 150 人 – 下楼；
- 场景 4 – 100 人 – 下楼。

从均匀概率分布中随机选择首选水平地形行走速度（均匀概率分布范围从 0.97m/s 至 1.62m/s - 参见 IMO 1238 人口小组“男性 30-50”）。

A9.2 测试目的

测试的目的是验证 MassMotion 能够预测房间出口处和楼梯间的拥堵情况。

A9.3 模拟设置

创建了四个不同的几何元素：

- 1 个 8m × 5m 的地板（房间）；
- 1 个 12m × 2m 的地板（走廊）；
- 3m × 2m（对角线为 3.6m）楼梯；
- 目的地楼层。

1 个用于连接房间到走廊的连接件。

在目的地楼层创建了一个出口。

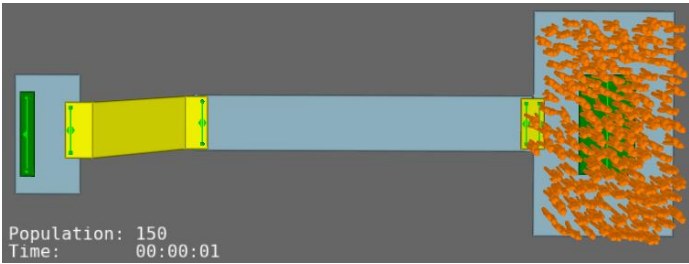
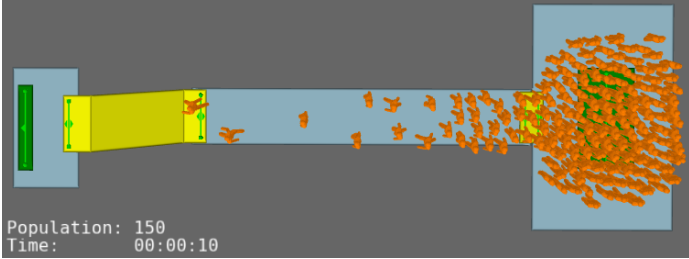
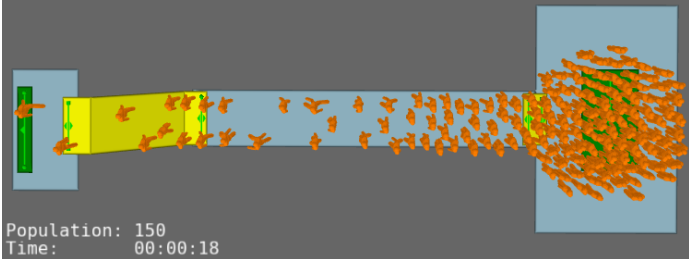
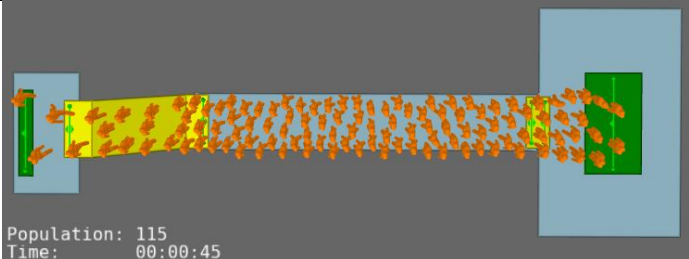
在房间里创建了入口。

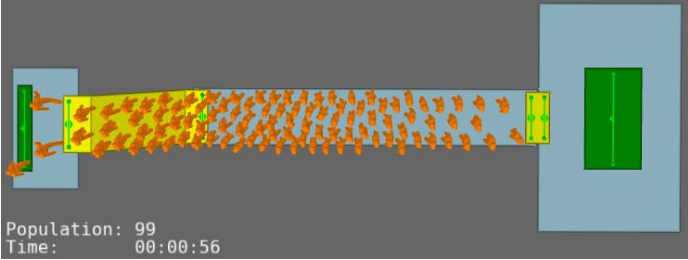
创建了 IMO 1238“男性 30-50”兼容人员概况。人员在 1s 的持续时间内被引入模型，并均匀分布在整個房间内。

在所有四种情况下，行程是从房间到楼梯（上楼）顶部或楼梯（下楼）底部。

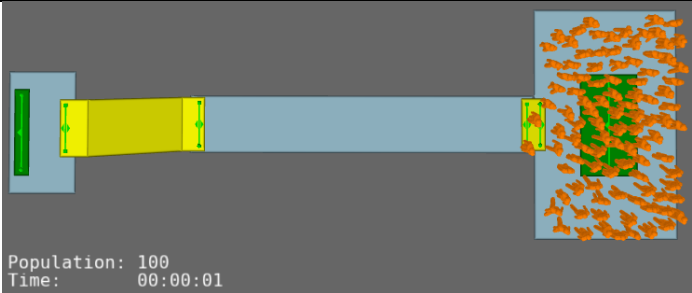
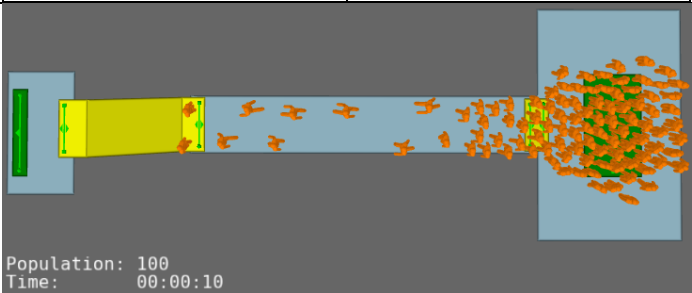
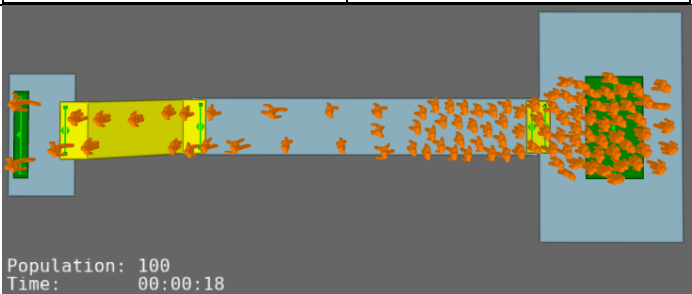
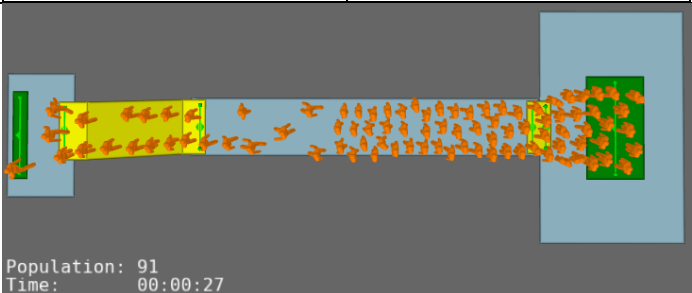
A9.4 测试结果

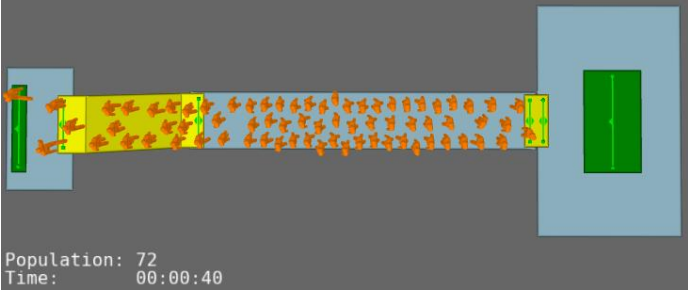
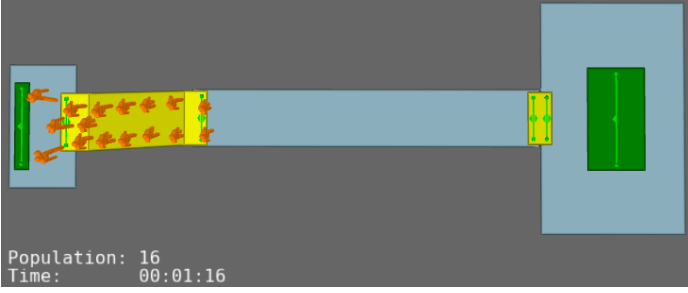
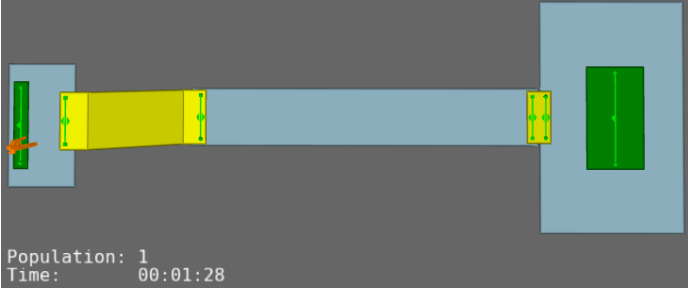
MassMotion 模拟预测如图 A10.2、A10.3、A10.4 和 A10.5 所示。

场景 1 – 150 人 – 上楼					
	时间： 1 s 房间由均匀分布的 150 个人员组成。				
<table border="1"> <tr> <td>Population</td><td>数量</td></tr> <tr> <td>Time</td><td>时间</td></tr> </table>	Population	数量	Time	时间	
Population	数量				
Time	时间				
	时间： 10 s. 房间出口堵塞。 首名人员到达楼梯口，楼梯处没有排队。				
<table border="1"> <tr> <td>Population</td><td>数量</td></tr> <tr> <td>Time</td><td>时间</td></tr> </table>	Population	数量	Time	时间	
Population	数量				
Time	时间				
	时间： 18 s. 房间出口堵塞。 楼梯处没有排队。 首名人员在离开楼梯尽头后退出模拟。				
<table border="1"> <tr> <td>Population</td><td>数量</td></tr> <tr> <td>Time</td><td>时间</td></tr> </table>	Population	数量	Time	时间	
Population	数量				
Time	时间				
	时间： 45 s. 最后的人员离开了房间。 整个走廊的人员密度很高。 楼梯处有排队。				
<table border="1"> <tr> <td>Population</td><td>数量</td></tr> <tr> <td>Time</td><td>时间</td></tr> </table>	Population	数量	Time	时间	
Population	数量				
Time	时间				

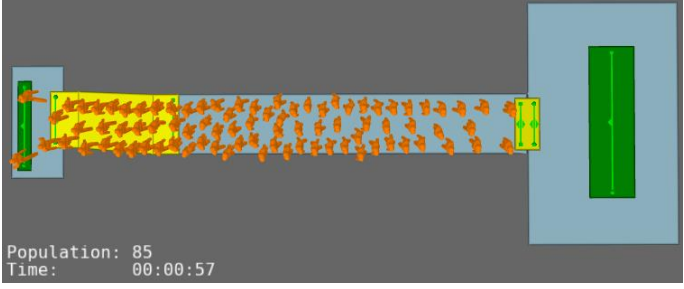
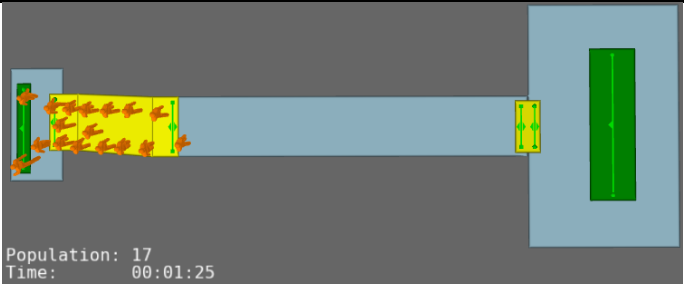
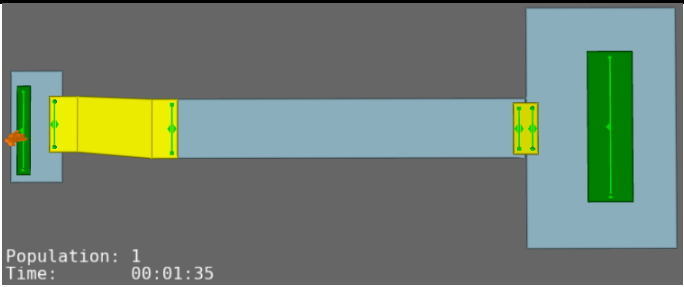
 Population: 99 Time: 00:00:56 <table><tr><td>Population</td><td>数量</td></tr><tr><td>Time</td><td>时间</td></tr></table>	Population	数量	Time	时间	时间： 56 s. 所有人员离开房间。 走廊和楼梯的人员密度很高。 楼梯处有排队。
Population	数量				
Time	时间				
 Population: 19 Time: 00:01:42 <table><tr><td>Population</td><td>数量</td></tr><tr><td>Time</td><td>时间</td></tr></table>	Population	数量	Time	时间	时间： 102 s. 最后的人员离开走廊进入楼梯。 楼梯处没有排队。
Population	数量				
Time	时间				
 Population: 1 Time: 00:01:55 <table><tr><td>Population</td><td>数量</td></tr><tr><td>Time</td><td>时间</td></tr></table>	Population	数量	Time	时间	时间： 115 s. 最后一名人员在达到楼梯尽头后退出模拟。
Population	数量				
Time	时间				

图A10.2： 场景1（150人-上楼）

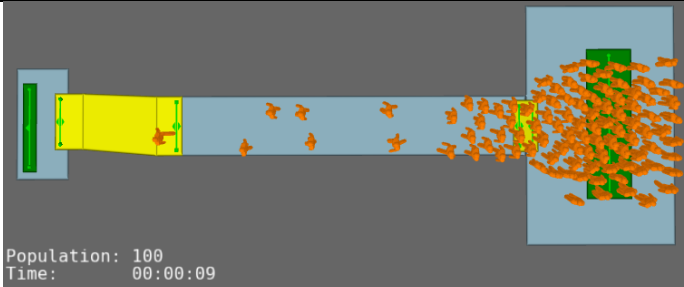
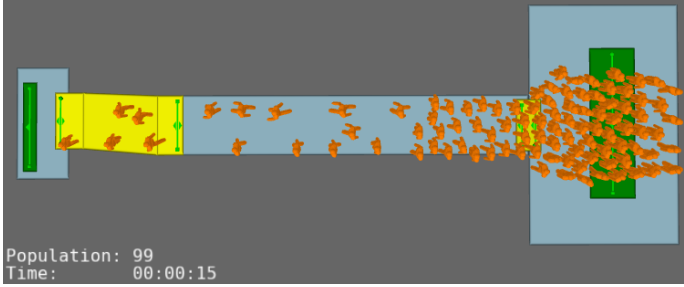
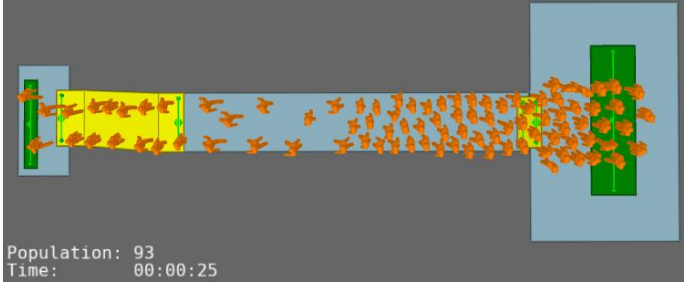
场景 2 – 100 人 – 上楼					
 Population: 100 Time: 00:00:01 <table border="1"> <tr> <th>Population</th><th>数量</th></tr> <tr> <th>Time</th><th>时间</th></tr> </table>	Population	数量	Time	时间	时间： 1 s. 房间内均匀分布 100 名人员。
Population	数量				
Time	时间				
 Population: 100 Time: 00:00:10 <table border="1"> <tr> <th>Population</th><th>数量</th></tr> <tr> <th>Time</th><th>时间</th></tr> </table>	Population	数量	Time	时间	时间： 10 s. 房间出口堵塞。 首名人员到达楼梯口（大约与 IMO 1238 测试 11 中的时间相同）。 楼梯处没有排队。
Population	数量				
Time	时间				
 Population: 100 Time: 00:00:18 <table border="1"> <tr> <th>Population</th><th>数量</th></tr> <tr> <th>Time</th><th>时间</th></tr> </table>	Population	数量	Time	时间	时间： 18 s. 房间出口堵塞。 楼梯处没有排队。 首名人员在到达楼梯尽头后退出模拟。
Population	数量				
Time	时间				
 Population: 91 Time: 00:00:27 <table border="1"> <tr> <th>Population</th><th>数量</th></tr> <tr> <th>Time</th><th>时间</th></tr> </table>	Population	数量	Time	时间	时间： 27 s. 走廊内的人员密度增加。 楼梯处没有排队。
Population	数量				
Time	时间				

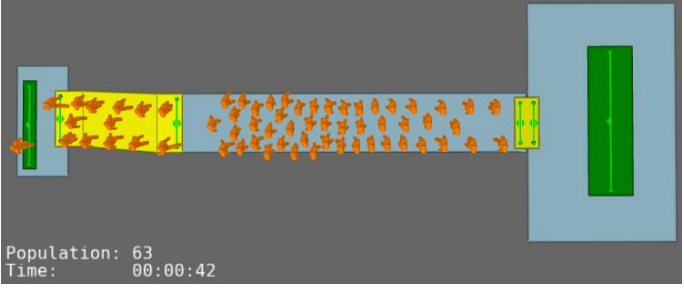
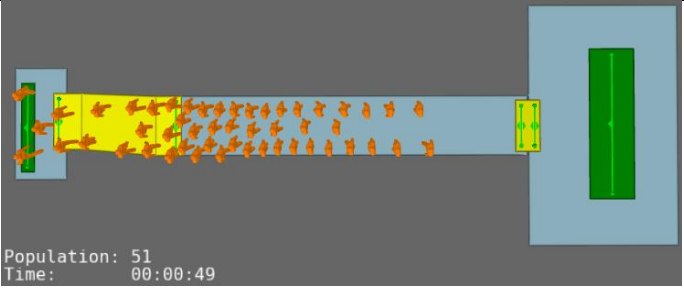
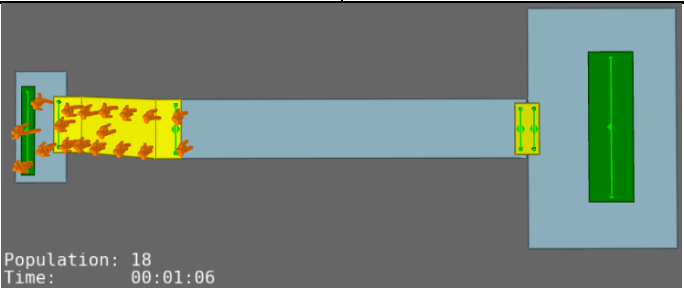
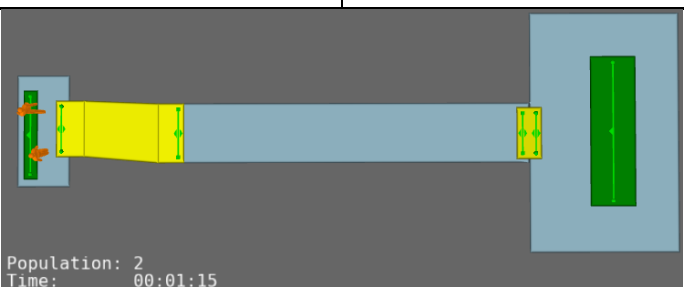
 Population: 72 Time: 00:00:40 <table><tr><td>Population</td><td>数量</td></tr><tr><td>Time</td><td>时间</td></tr></table>	Population	数量	Time	时间	时间： 40 s. 所有人员离开房间。 走廊人口密度很高。 楼梯处没有排队。
Population	数量				
Time	时间				
 Population: 16 Time: 00:01:16 <table><tr><td>Population</td><td>数量</td></tr><tr><td>Time</td><td>时间</td></tr></table>	Population	数量	Time	时间	时间： 76 s. 最后一名人员离开走廊进入楼梯。 楼梯处没有排队。
Population	数量				
Time	时间				
 Population: 1 Time: 00:01:28 <table><tr><td>Population</td><td>数量</td></tr><tr><td>Time</td><td>时间</td></tr></table>	Population	数量	Time	时间	时间： 88 s. 最后一名人员在达到楼梯尽头后离开退出模拟。
Population	数量				
Time	时间				

图A10.3： 场景2（100人 - 上楼）

 Population: 85 Time: 00:00:57 <table><tr><td>Population</td><td>数量</td></tr><tr><td>Time</td><td>时间</td></tr></table>	Population	数量	Time	时间	时间： 57 s. 所有人员离开房间。 走廊和楼梯的人口密度很高。 楼梯处有排队。
Population	数量				
Time	时间				
 Population: 17 Time: 00:01:25 <table><tr><td>Population</td><td>数量</td></tr><tr><td>Time</td><td>时间</td></tr></table>	Population	数量	Time	时间	时间： 85 s. 最后一名人员离开走廊进入楼梯。 楼梯处没有排队。
Population	数量				
Time	时间				
 Population: 1 Time: 00:01:35 <table><tr><td>Population</td><td>数量</td></tr><tr><td>Time</td><td>时间</td></tr></table>	Population	数量	Time	时间	时间： 95 s. 最后一名人员在到达楼梯底部后退出模拟程序。
Population	数量				
Time	时间				

图A10.4： 场景3（150人 - 下楼）

场景 4 – 100 楼梯 – 下楼						
 Population: 100 Time: 00:00:01		时间： 1 s. 房间内均匀分布 100 名人员。				
<table><tr><td>Population</td><td>数量</td></tr><tr><td>Time</td><td>时间</td></tr></table>		Population	数量	Time	时间	
Population	数量					
Time	时间					
 Population: 100 Time: 00:00:09		时间： 9 s. 房间出口堵塞。 首名人员到达楼梯的顶部。 楼梯处没有排队。				
<table><tr><td>Population</td><td>数量</td></tr><tr><td>Time</td><td>时间</td></tr></table>		Population	数量	Time	时间	
Population	数量					
Time	时间					
 Population: 99 Time: 00:00:15		时间： 15 s. 房间出口堵塞。 楼梯处没有排队。 首名人员在离开楼梯之后退出模拟程序。				
<table><tr><td>Population</td><td>数量</td></tr><tr><td>Time</td><td>时间</td></tr></table>		Population	数量	Time	时间	
Population	数量					
Time	时间					
 Population: 93 Time: 00:00:25		时间： 25 s. 走廊内的人员密度增加。 楼梯处没有排队。				
<table><tr><td>Population</td><td>数量</td></tr><tr><td>Time</td><td>时间</td></tr></table>		Population	数量	Time	时间	
Population	数量					
Time	时间					

 Population: 63 Time: 00:00:42		时间： 42 s. 所有人员离开房间。 楼梯处没有排队。
Population	数量	
Time	时间	
 Population: 51 Time: 00:00:49		时间： 49 s. 楼梯处有排队。
Population	数量	
Time	时间	
 Population: 18 Time: 00:01:06		时间： 66 s. 最后一名人员离开走廊进入楼梯。 楼梯处没有排队。
Population	数量	
Time	时间	
 Population: 2 Time: 00:01:15		时间： 75 s. 最后一名人员在到达楼梯底部后退出模拟程序。
Population	数量	
Time	时间	

图A10.5： 场景4（100人 - 下楼）

A9.5 结论

在 MassMotion 内进行 IMO 1238 测试 11 和 NIST 1822 测试 5.1。

模拟预测的定性评估说明了 MassMotion 模拟拥塞的能力：

- 在房间的出口处；
- 靠近楼梯的走廊尽头。

后者的拥挤程度是楼梯方向的一个函数（注意到向上楼梯比向下楼梯更加拥挤）和最初的房间人口（人口增加导致拥塞增加）。

这些预测表明，MassMotion 能够在给定模型的配置参数的情况下再现 IMO 和 NIST 指导中所述的结果（以拥塞的定性性质，即其位置和范围）的形式。

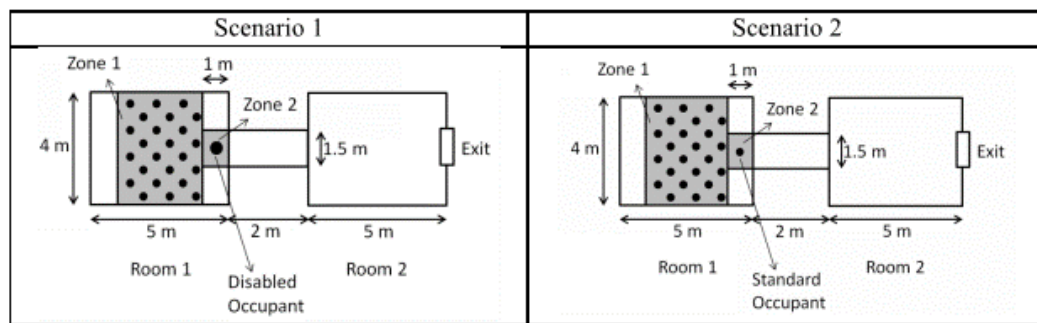
状态：通过。

A10 测试 12：移动障碍

A10.1 测试说明

测试符合 NIST 1822 测试 2.10，没有相关的 IMO 1238 测试。

两个 $5\text{m} \times 4\text{m}$ 的楼层（房间）在不同的高度处，通过一个 $2\text{m} \times 1.5\text{m}$ 的斜坡连接（房间 2 位于距地面 1m 高度处，房间 2 位于地面）。距离斜坡的房间 2 边界处有一个 1000mm 的出口（图 A11.1）。



Scenario 1	场景 1
Zone	区域
Room	房间
Disabled Occupant	残疾乘客
Exit	出口

图A11.1：几何布局

距离坡道 1m 处的房间 1 面积为 $3\text{m} \times 4\text{m}$ （区域 1），由 24 名人员组成：

- 默认人员尺寸（直径 0.5m ）；
- 首选水平地形行走速度为 1.25m/s 。

考虑两种场景：

- **场景 1** – 紧邻斜坡的房间 1 的面积为 $1\text{m} \times 1.5\text{m}$ （区域 2）的地区由“行动障碍”人员占据，具有如下特点：
 - 体积大于斜坡宽度的一半（即 $> 0.75\text{m}$ ），如轮椅使用者
 - 首选水平地形行走速度为 0.8m/s ；
 - 首选坡道行走速度为 0.4m/s 。

所有人员通过出口从房间 2 退出模拟。

- **场景 2** – 与场景 1 不同之处在于，区域 2 的单一人员具有与区域 1 中相同的人员属性（即不包括移动性受限人员）。

A10.2 测试目的

测试的目的是验证 MassMotion 能够预测在受限空间中人员流动受到存在行动障碍人员（相对较大和较慢）的限制。

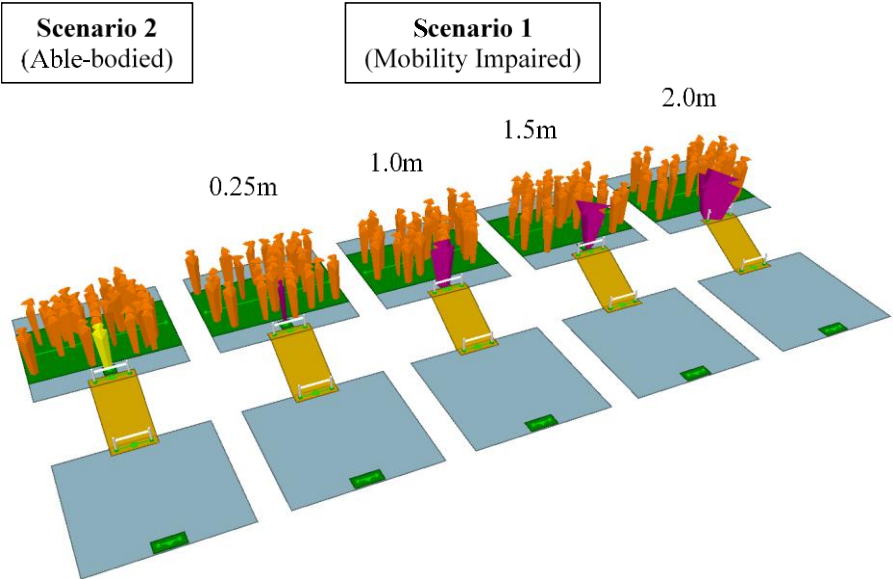
A10.3 模拟设置

与测试描述的唯一偏差涉及行动障碍人员的速度。MassMotion 在坡道上使用相同的因子（在这种情况下为 100%），适用于所有人员（“健全”和“行动障碍”）的首选水平地形行走速度。因此，行动障碍人员的首选水平地形行走速度设定为 0.4m/s（比测试描述中定义的慢），使得斜坡上的合成速度为 0.4m/s。行动障碍人员在水平楼层上移动较慢（与测试描述相比），在水平楼层可能被超越，因此行动障碍人员的较慢移动应具有有限的影响。

对于场景 1，对移动性受阻人员的宽度进行敏感性测试：

- 0.25m - 对于成年人来说，物理上不切实际（人员太小）；
- 1.0m - 满足测试要求；
- 1.5m - 斜坡的宽度；
- 2.0m - 物理上不切实际（大于斜坡的宽度）。

虽然 0.25m 和 2.0m 的宽度在物理上是不现实的，但是为了对比而包含在内（图 A11.2 与场景 2 一起说明了这四种情况）。



Scenario 2 (Able-bodied)	场景 2 (身体健全)
Scenario 1 (Mobility-Impaired)	场景 1 (行动障碍)

图A11.2: 场景 2 和场景 1 (x4) 的 MassMotion 模型

A10.4 测试结果

图 A11.3 说明了场景 1 的行动障碍人员仍在斜坡上时的 MassMotion 预测。

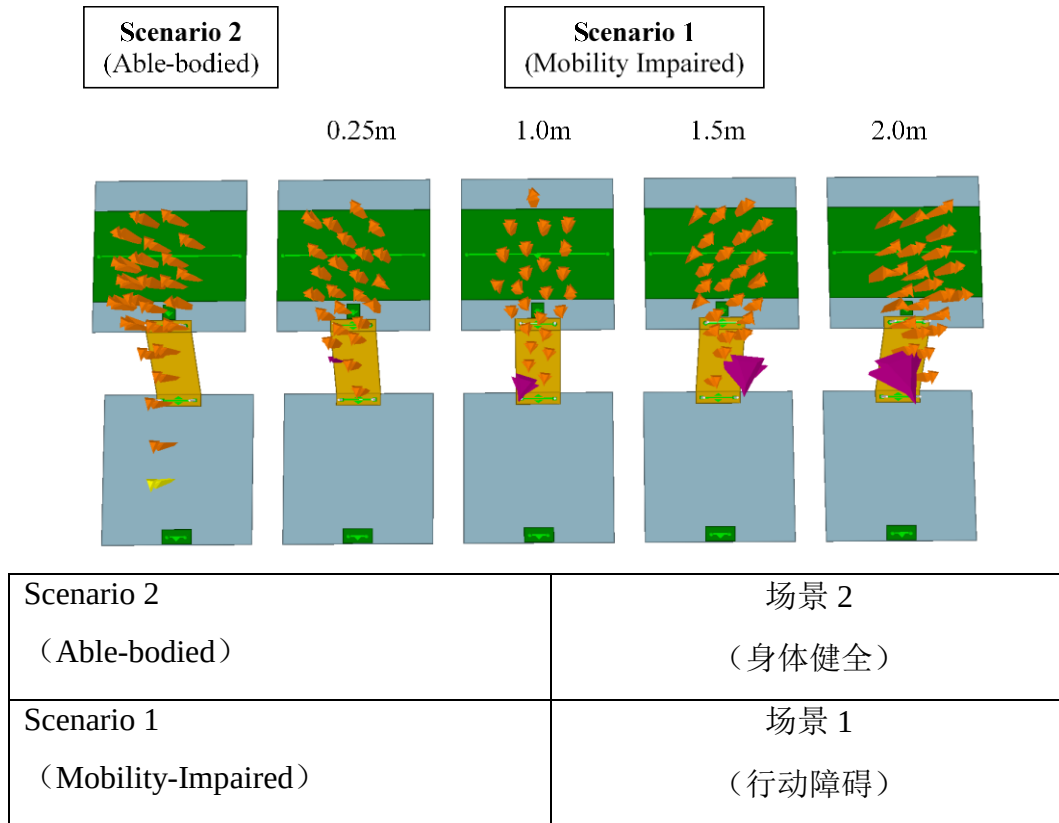


图 A11.3: 场景 2 和场景 1 (x4) 的 MassMotion 模拟

对于场景 1，起源于区域 1 的人员受到区域 2 的 1.0m、1.5m 和 2.0m 移动性受阻人员的阻碍，在 1.5m 宽的坡道上不能越过。起源于区域 1 的人员能够在 1.5m 宽的坡道上超越 0.25m 的行动障碍物。

对于场景 2，区域 2 的健全人员与区域 1 具有相同的首选步行速度，因此：

- 提前将位于区域 1 的人员移往出口；
- 在相应的时间，行动不便的人员仍在坡道上，已经沿着斜坡走过，进入了房间 2。

在进行这些模拟时，有人指出：

- 在所有情况下，较慢人员的存在阻碍了其他人员的退出速度；
- 较慢人员的实际大小比模拟中的随机变量（作为人员的初始位置的函数）的影响小；
- 在某些情况下，更快的人员在到达斜坡之前能够超越较慢的人员。

A10.5 结论

NIST 1822 测试 2.10 已在 MassMotion 内进行。

这些预测表明，在给定模型的配置参数的情况下，MassMotion 能够重现结果（以受限环境中较慢的人员阻碍快速人员的数量形式）。

状态：通过。

A11 测试 13：隶属

A11.1 测试说明

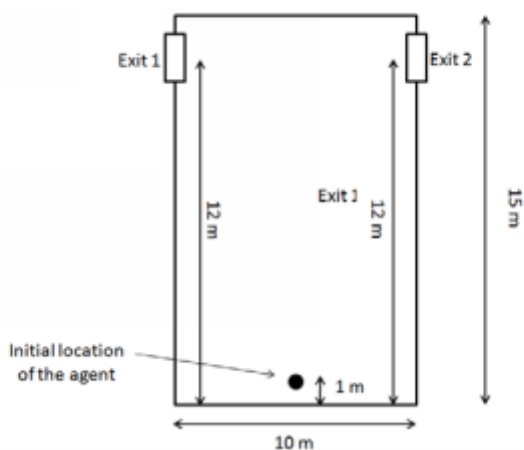
测试符合 NIST 1822 测试 3.3。

在这个测试中，术语“隶属关系”是指特定出口的熟悉度/偏好度。

1 个 15m × 10m 的地面（房间），设置有 2 个 1000mm 出口，出口位于：

- 15m 墙壁的对面；
- 使出口的中心距离 10m 墙壁之一的距离为 12m。

（图 A12.1）



Initial location of the agent	人员初始定位
Exit	出口

图A12.1：几何布局

考虑疏散单个人员的两种情况（最初在远离出口的 10m 墙壁中心）：

- **场景 1** – 人员不熟悉两个出口；
- **场景 2** – 人员不属于（熟悉）出口 2，即更倾向于选择出口。

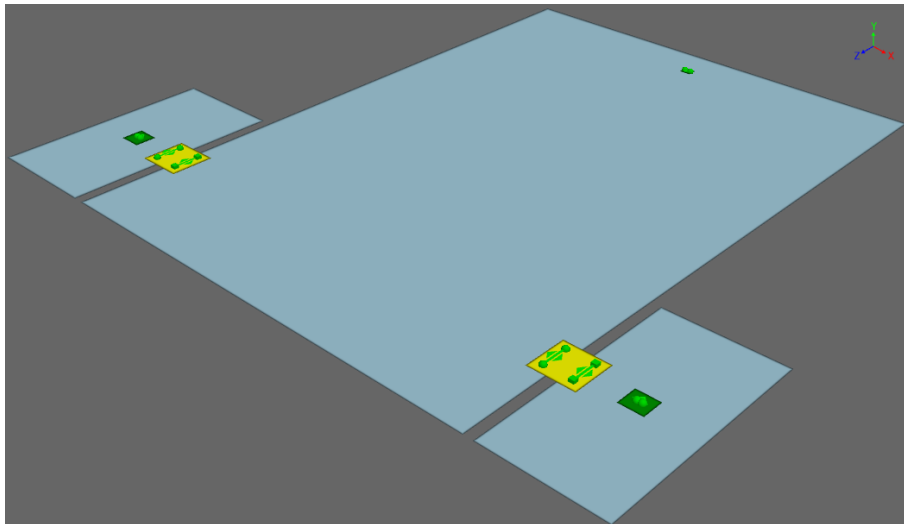
A11.2 测试目的

测试的目的是证明可以在 MassMotion 中进行表示和配置中/增强人员对于给定出口的熟悉度。

A11.3 模拟设置

MassMotion 物理环境（图 A12.2）包括：

- 3层（房间和2个目的地区域）；
- 2个连接（将房间连接到出口处的目的地区域）；
- 1个入口（与房间相关联）；
- 2个出口（与目的地区域相关联）。



图A12.2: MassMotion 物理环境

该人员被指定为 1m/s 的首选水平地形行走速度（其他所有属性均按照 MassMotion 默认值），在模拟开始的 1s 内生成该人员。

对于场景 2，进行了灵敏度测试，以检查出口 1 的偏好程度。退出权重如表 A12.1 所定义。

出口	权重（%）		
ID	场景 1	场景 2	
		案例 A	案例 B
1	50	75	99
2	50	25	1

表A12.1: 退出权重

对场景 1 和场景 2 的两种情况进行了 100 次模拟。

A11.4 测试结果

表 A12.2 总结了 100 个模拟中每个出口的使用频率。

场景	案例	出口使用	
		出口 1	出口 2
1	—	48	52
2	A	73	27
2	B	99	1

表 A12.2: MassMotion 预测出口使用

这表明 MassMotion 对出口使用的预测（以及退出使用概率）符合应用于出口的权重。

A11.5 结论

NIST 1822 测试 3.3 已在 MassMotion 内进行。

测试结果表明，MassMotion 能够重现 NIST 指导中给出的模型配置参数中所述的结果。

状态：通过。

A12 测试 14：出口动态可用性

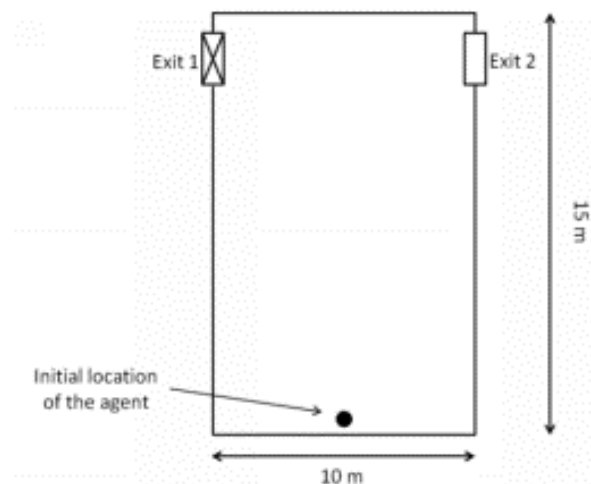
A12.1 测试说明

测试符合 NIST 1822 测试 4.1。

1 个 15m × 10m 的地面（房间）有 2 个 1000mm 出口位于：

- 15m 墙壁对面；
- 使出口的中心距离 10m 墙壁之一为 12m。

（图 A13.1。）



图A13.1：几何布局

出口 1 和出口 2 最初时都可用。1s 后，出口 1 不可用。

考虑单个人员的疏散（最初在远离出口的 10m 墙的中心）。

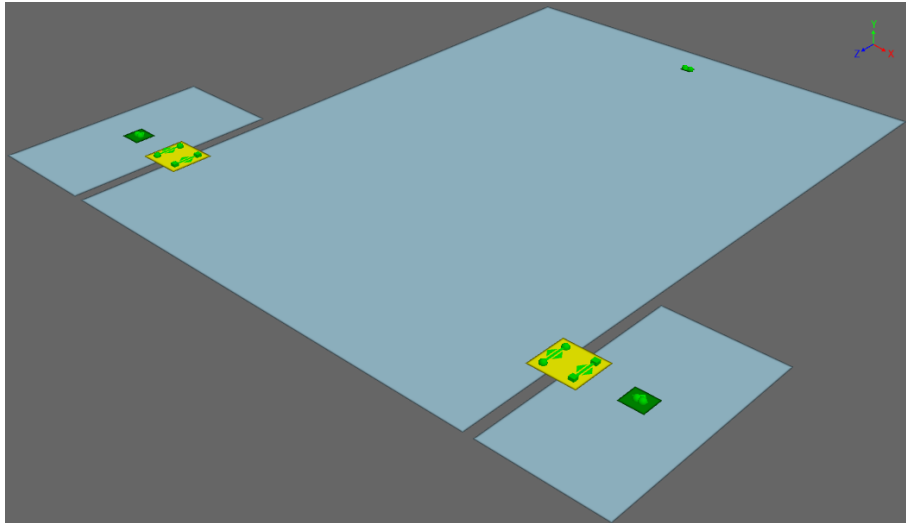
A12.2 测试目的

测试的目的是证明 MassMotion 能够表示出口的动态可用性。

A12.3 模拟设置

MassMotion 物理环境（图 A13.2）包括：

- 3 层（房间和 2 个目的地区域）；
- 2 个连接件（将房间连接到出口处的目的地区域）；
- 1 个入口（与房间相关联）；
- 2 个出口（与目的地区域相关联）。



图A13.2: MassMotion 物理环境

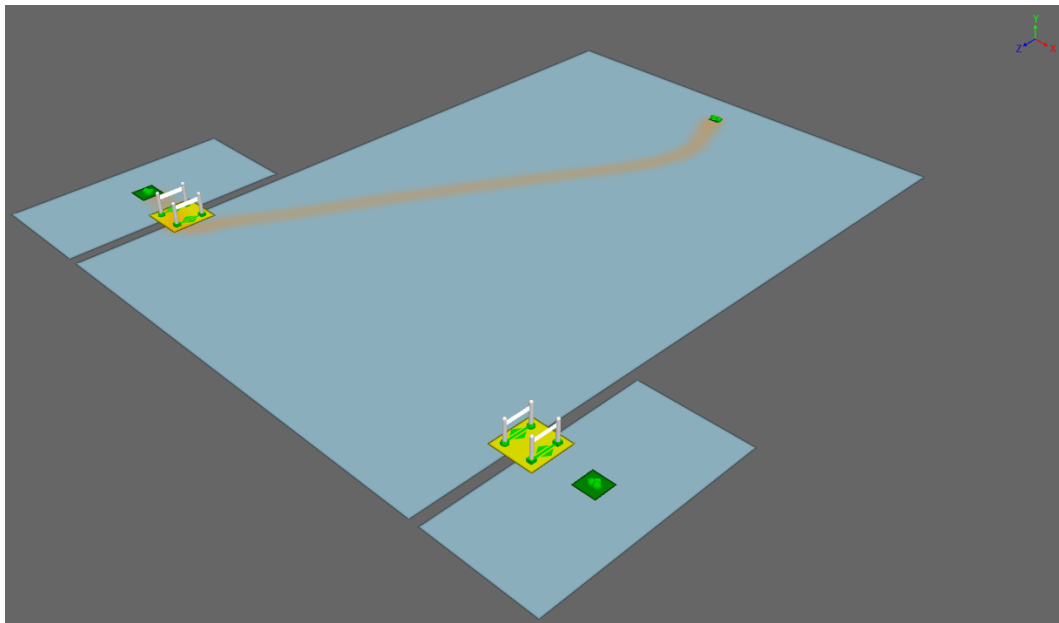
模拟中参数设置如下（未指定的参数为 MassMotion 默认值）：

- 个人资料：
 - 首选水平地形行走速度 = 常数；
 - 值 = 1m/s.
- 行程：
 - 定时持续时间 = 1s；
 - 人员数 = 1；
 - 入口（重量 = 1）；
 - 出口门 1（重量 = 0.5）；
 - 出口门 2（重量 = 0.5）。
- 出口 1 至出口 2 的连接件：
 - 被用作“门”；
 - 等待成本 = 10 万（即大成本）。
- 出口 1 的“开门”活动
 - **场景 1** – 从 0s 至 2s 模拟时间打开门；
 - **场景 2** – 从 0s 至 7s 模拟时间打开门。
- 出口 2 “开门”活动：
 - 从 0s 至 1s 的模拟时间关闭门（迫使人员最初选择出口 1）；
 - 门从 1s 开始到模拟结束。
- 疏散：

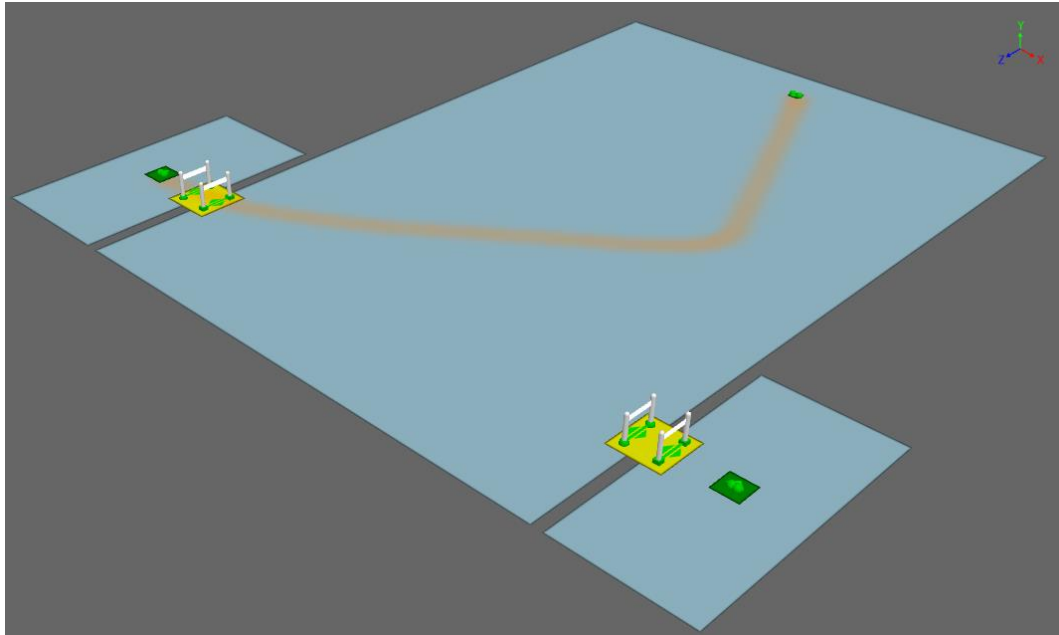
- 人员数 = 1;
- 概况 = 如上所述;
- 起点 = 入口;
- 目的地 = 出口。

A12.4 测试结果

人员路线图如图 A13.3（场景 1）和图 A13.4（场景 2）所示。



图A13.3： 场景1 的预测人员路线图（出口1 在1s 时关闭）



图A13.4： 场景2 的预测人员路线图（出口1 在6s 时关闭）

人员路线图预测与预期行为一致。

A12.5 结论

NIST 1822 测试 3.3 已在 MassMotion 内进行。

测试结果表明，MassMotion 能够重现 NIST 指导中给出的模型配置参数中所述的结果。

状态：通过。

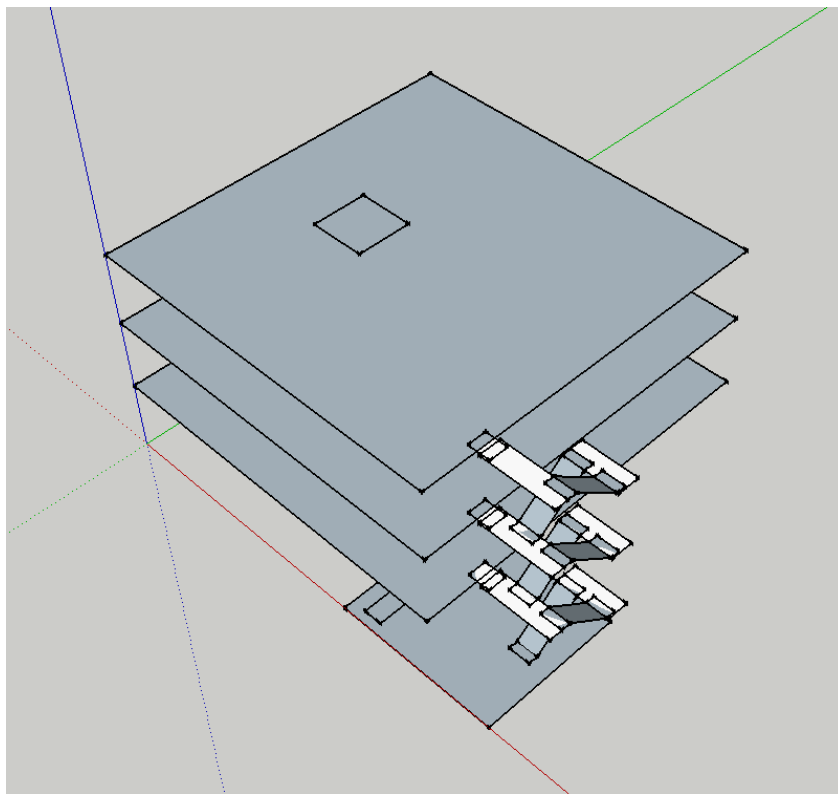
A13 测试 15：楼梯合并

A13.1 测试说明

该项测试为 MassMotion 的表现能力：

- 流速在楼梯间合并；
- 评估乘客密度对楼梯间流量合并的影响。

测试基于 3 层建筑（开放式地面）和步行楼梯，如图 A14.1 所示。



图A14.1：几何布局

表 A14.1 总结了本研究中考虑的 5 种场景中各自的占用面积。

场景	占用（人员）		
	1 楼	2 楼	3 楼
1	100	0	0
2	100	100	0
3	100	400	0
4	100	600	0
5	100	200	200

表A14.1：占用面积

A13.2 测试目的

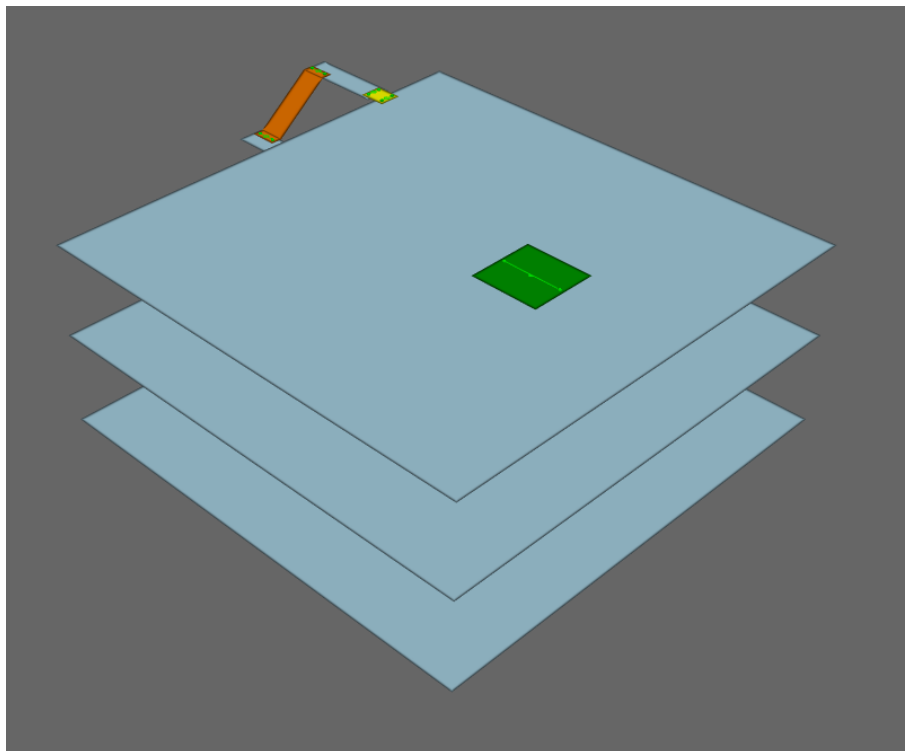
测试的目的是验证 MassMotion 是否能够在楼梯的入口处显示流量合并。

A13.3 模拟设置

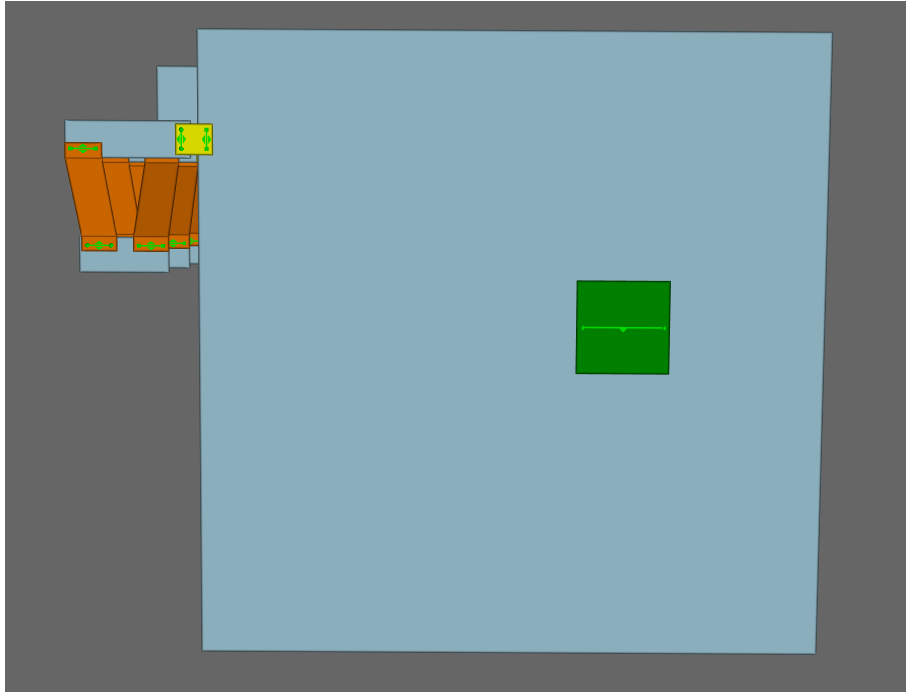
MassMotion 模型的几何特征包括：

- 三层 20.0m × 20.0m 的楼层和一层 9.0m × 7.8m 的楼层。
- 三层较高的楼层入口门宽达 1.0m。
- 楼梯：
 - 宽 1.2m，横跨 2.5m；
 - 每层平台 4.0m × 1.2m；
 - 3.0m × 1.2m 的半平台。
- 三层较高的入口。
- 首层一个长 6.5m 的出口。

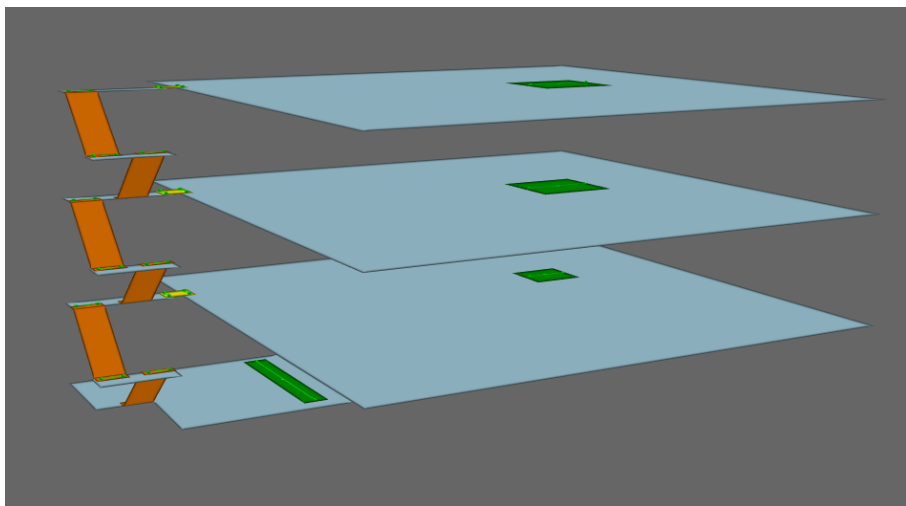
（见图 A14.2 至 A14.4）



图A14.2： MassMotion 物理环境



图A14.3: MassMotion 物理环境



图A14.4: MassMotion 物理环境

定义每个楼层的入口，使人员随机分布在整個地面上（而不是在地面的边界区域内）。

所有人员设置默认人员属性（如首选水平地形行走速度）和零预疏散时间。

为每个楼层的人员设置了“疏散”事件。

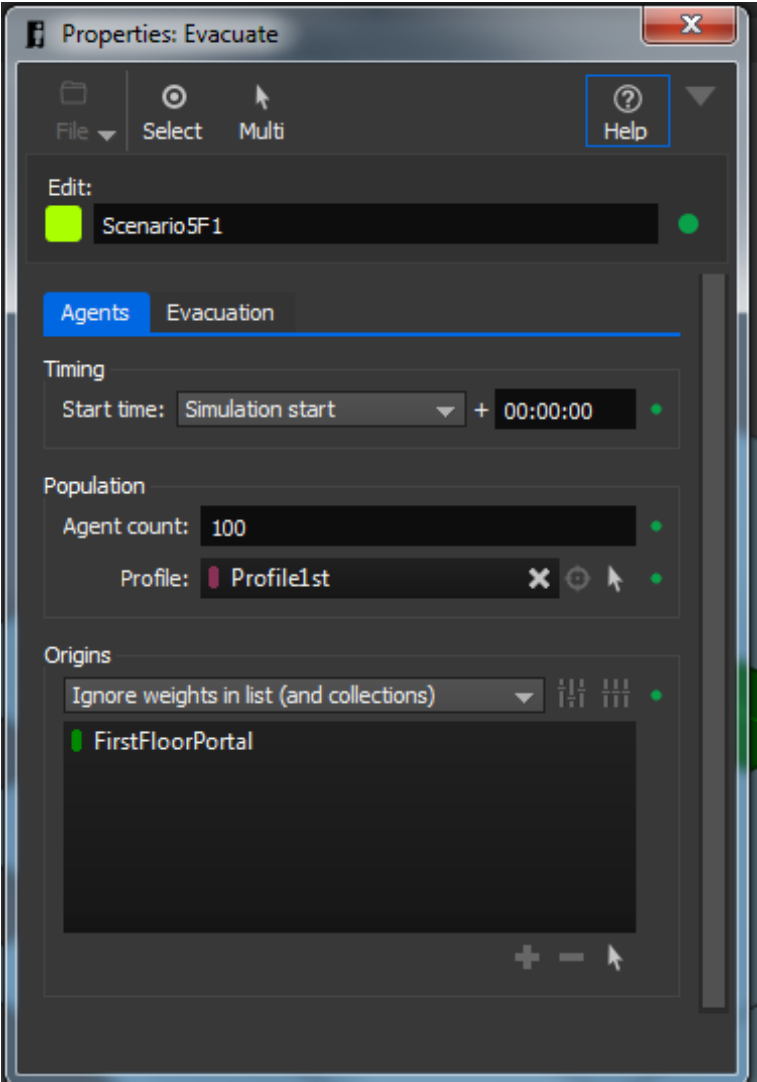
（见图 A14.5 至 A14.8）



Properties: Profile	属性：概况
File	文件
Select	选择

Multi	多选
Help	帮助
Edit: default Profile	编辑: 默认配置文件
General	一般
Radius	半径
Speed: Normal	速度: 正常
Min	最小值
Max	最大值
Mean:	均值:
Std:	标准差:
Direction bias: Right Strong	方向偏差: 右强
Avatar	头像
Token	令牌
Route Cost Weights	路线成本权重
Horizontal: Uniform	水平: 均匀
Vertical: Uniform	垂直: 均匀
Queue: Uniform	队列: 均匀
Processing: Uniform	处理: 均匀
Min	最小值
Max	最大值

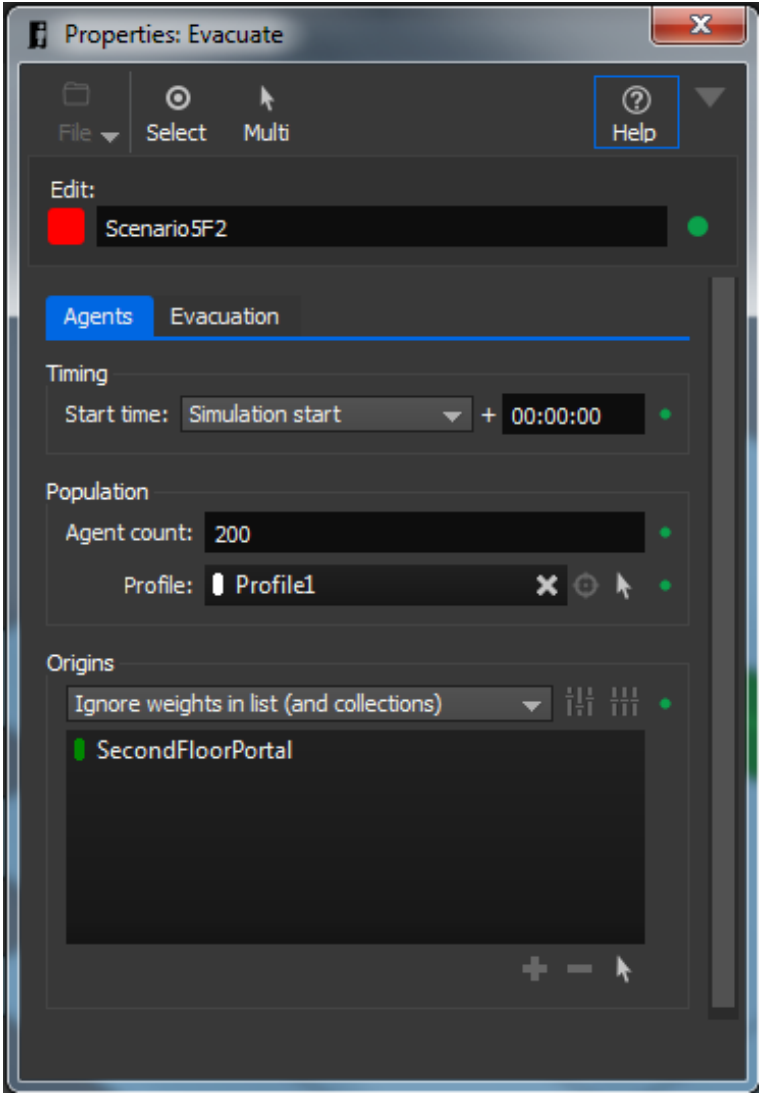
图 A14.5: 人员概况



Properties: Evacuate	属性：疏散
File	文件
Select	选择
Multi	多选
Edit	编辑
Help	帮助
Agents	人员
Evacuation	疏散
Timing	计时
Start time:	开始时间：
Population	群体
Agent count:	人员数量：
Profile:	概况：

Origins	起点
Ignore weights in list (and collections)	忽略列表（和集合）中的权重
First Floor Portal	第一层出入口

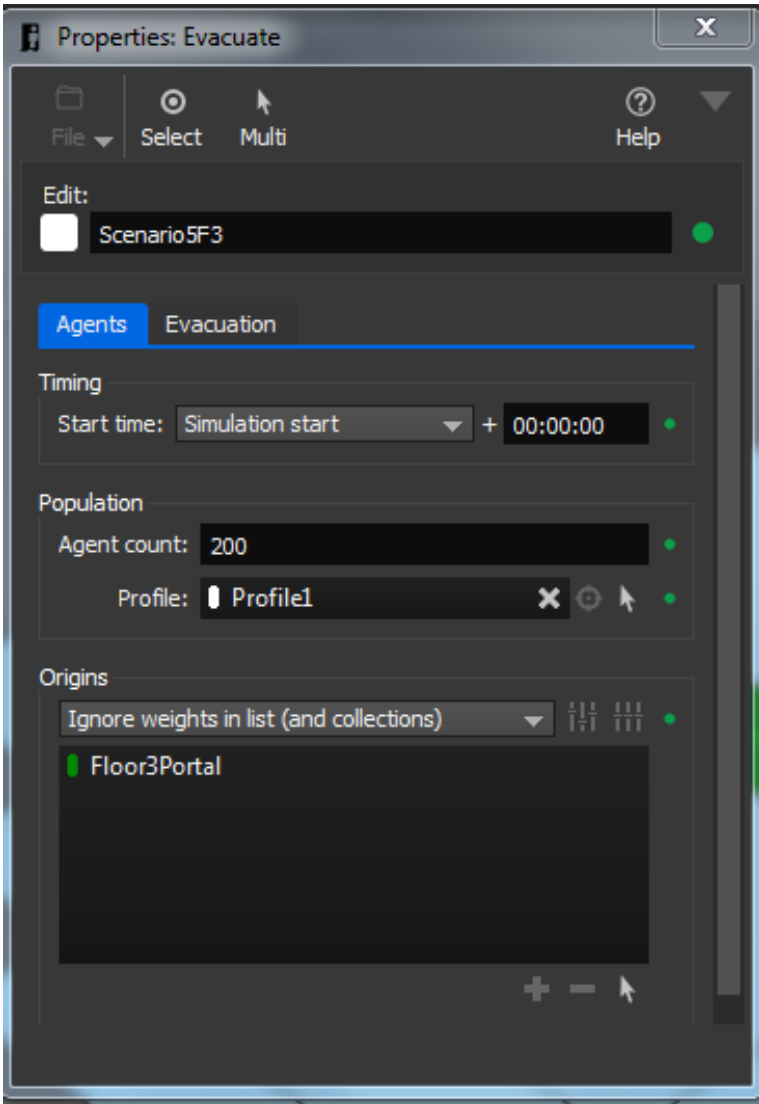
图 A14.6： 疏散事件 - 人员从一楼出发



Properties: Evacuate	属性：疏散
File	文件
Select	选择
Multi	多选
Edit	编辑
Help	帮助
Agents	人员

Evacuation	疏散
Timing	计时
Start time:	开始时间:
Population	群体
Agent count:	人员数量:
Profile:	概况:
Origins	起点
Ignore weights in list (and collections)	忽略列表（和集合）中的权重
First Floor Portal	第一层出入口

图 A14.7： 疏散事件 - 人员从二楼出发



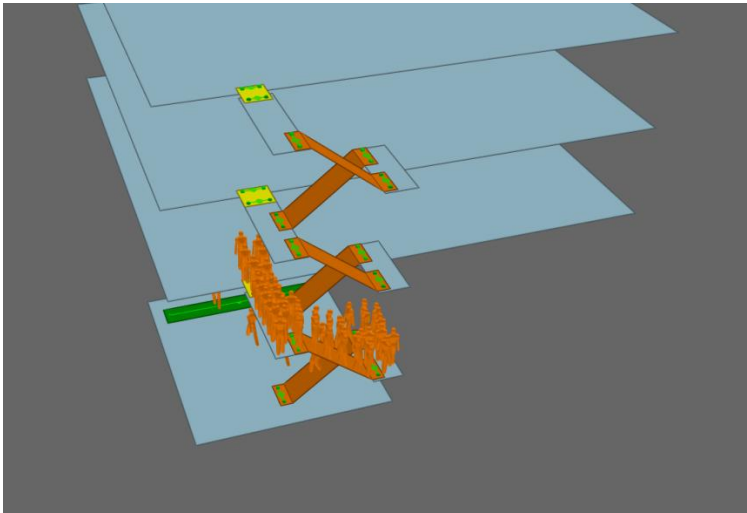
Properties: Evacuate	属性：疏散
----------------------	-------

File	文件
Select	选择
Multi	多选
Edit	编辑
Help	帮助
Agents	人员
Evacuation	疏散
Timing	计时
Start time:	开始时间:
Population	群体
Agent count:	人员数量:
Profile:	概况:
Origins	起点
Ignore weights in list (and collections)	忽略列表（和集合）中的权重
Floor 3 Portal	第三层出入口

图A14.8： 疏散事件 - 人员从三楼出发

A13.4 测试结果

场景 1 为没有合并流量的楼梯使用情况，如图 A14.9。



图A14.9： 场景1 - 没有合并流量的楼梯使用情况

人员行走至一层出口所用的时间预计为 82s。

场景 2、3 和 4 研究了二层的占用对一层人员进入楼梯的影响。表 A14.2 总结了 MassMotion 预测。

场景	一层疏散完毕		
	时间 (s)	% 与场景 1 相比的变化	% 与场景 2 相比的变化
1	82	N/A	N/A
2	123	151.2	N/A
3	116	141.4	93.5
4	115	140.2	92.7
5	117	142.7	N/A

表 A14.2: 一层疏散完毕时间 s

如果流量合并发生在多个楼层（图 A14.10），则测试场景 5 用以确定合并流量是否有影响。

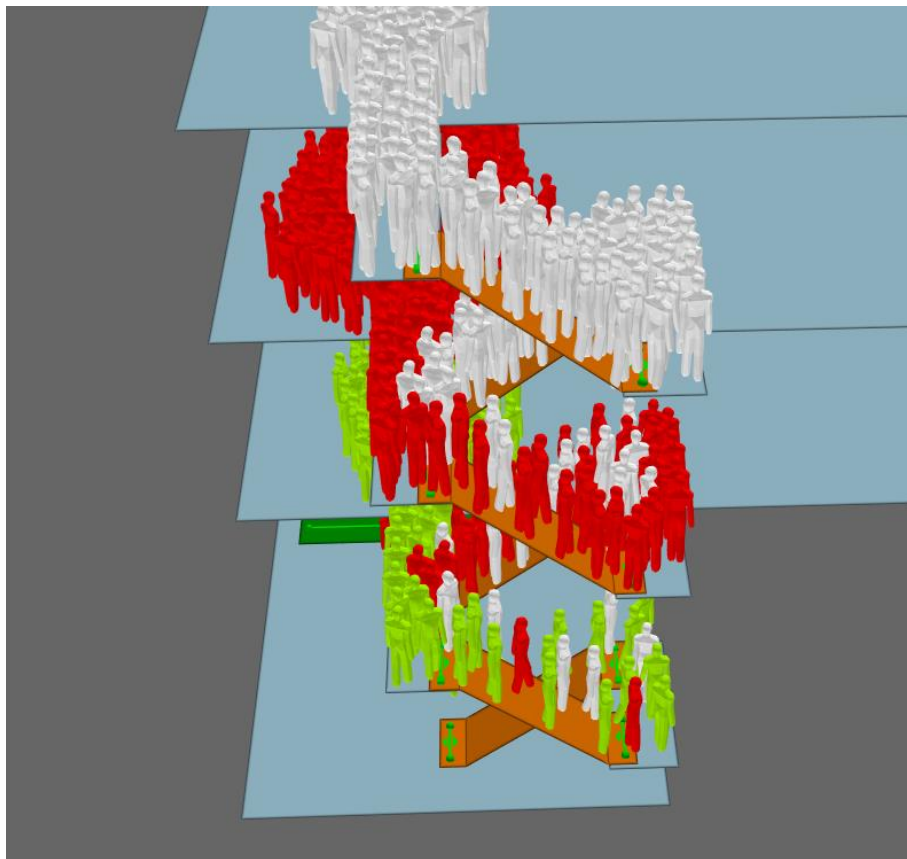


图 A14.10: 场景 5 – 合并流量

预测结果被认为可能将由楼梯上的排队行为主导（因此，随机抽样对预测的影响不会很大）。对于每个场景，只进行了一次模拟。

结果 - 场景 2、3 和 4

当人员被引入二层时，人员走完一层所花费的时间大大增加。

增加二层的人员数（从 100 个人员到 400 个人员或 600 个人员）对人员从一楼疏散所花费的时间几乎没有影响。这表明，当一个楼梯被充分利用时，合并（进入楼梯和已经在楼梯之间的流量）的比例大约为 1: 1（在本次测试检查的配置中 - 需要进一步测试来检查这一规则是否在所有情况下都适用）。

结果 - 场景 5

人员从一层疏散所需的时间为 117s，即与场景 2、3 和 4 相似。可以得出结论，多层合并流量并不会影响合并流量行为。

A13.5 结论

该测试检查了 MassMotion 内楼梯间的合并流量。可以得出如下结论：

- 可以在 MassMotion 中表示合并流量；
- 退出楼层的人员的延迟是人员从上层楼层退出的结果（并通过推断，楼梯上人员的延迟是由人员从下面的楼层进入楼梯而导致的），可通过 MassMotion 表达；和
- 对于本次测试中考虑的配置，当楼梯充分利用时，合并（进入楼梯的流量和已经在楼梯上的流量）的比例约为 1: 1。

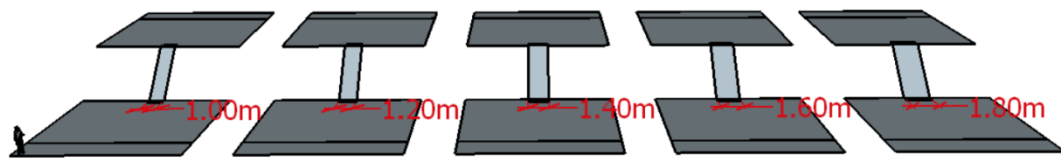
状态：通过。

A14 测试 16：楼梯流量

A14.1 测试说明

该测试调查（下和上）楼梯的流量，目的是确认楼梯宽度的增加导致人员流量的增加。

两个楼层通过楼梯连接（高度 = 3.00m；对角线 = 4.24m；角度 = 45°）。考虑五层楼梯宽度（1.0m、1.2m、1.4m、1.6m 和 1.8m）（图 A15.1）。



图A15.1：几何布局和楼梯宽度

考虑两种场景：

- **场景 1**（下楼）- 从上层到下层的流量。
- **场景 2**（上楼）- 从下层到上层的流量。

该研究使用 100 个人员（对于每个场景/楼梯宽度组合）来估计楼梯上的流量。

A14.2 测试目的

该测试的目的是验证 MassMotion 预测当楼梯宽度增加时人员流量的增加。

A14.3 模拟设置

对于这两种情况，MassMotion 几何包括：

- 5 个楼梯（如 A15.1 节所述）；
- 5 层较高的楼层（每层楼一层），每层有入口/出口；
- 5 层较低的楼层（每层楼一层），每层有入口/出口。

楼层、楼梯和门户采用 MassMotion 默认属性。（见图 A15.2）

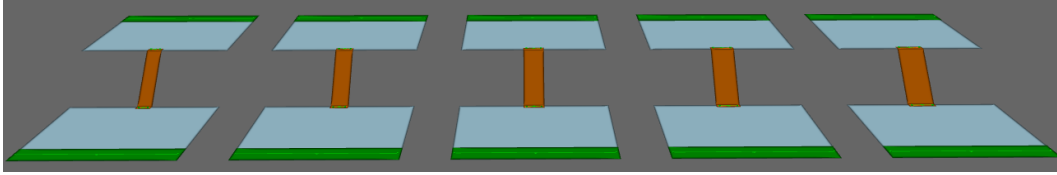


图 A15.2: MassMotion 物理环境

将 MassMotion 默认人员属性应用于在每个场景/楼梯宽度组合模拟中使用的所有 100 个人员。

为每个楼梯配置创建“疏散”事件：

- 场景 1（下楼）模拟界定了入口位于上层，出口位于相应下层。
- 场景 2（上楼）模拟界定了入口位于下层，出口位于相应上层。

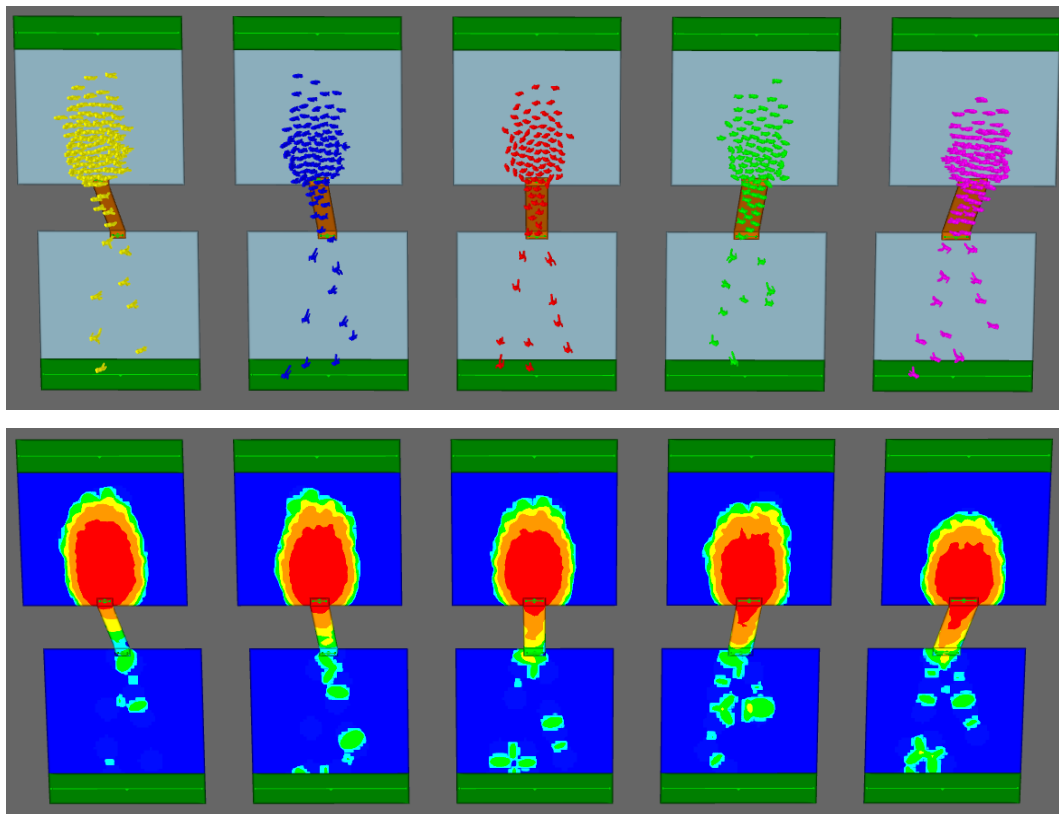
对于所有“疏散”事件，人员的开始时间为模拟开始后 0s；有 2s 的疏散时间。

在人员进入楼梯的点测量乘客流速，即在场景 1 的顶部（从上层到下层的流动）和场景 2 的底部（从下层到上层的流动）。

A14.4 测试结果

场景 1（下楼）

图 A15.3 显示了模拟开始后 30s 的人员数量和瞬间密度，楼梯宽度从左（1.0m）向右增加（1.8m）。



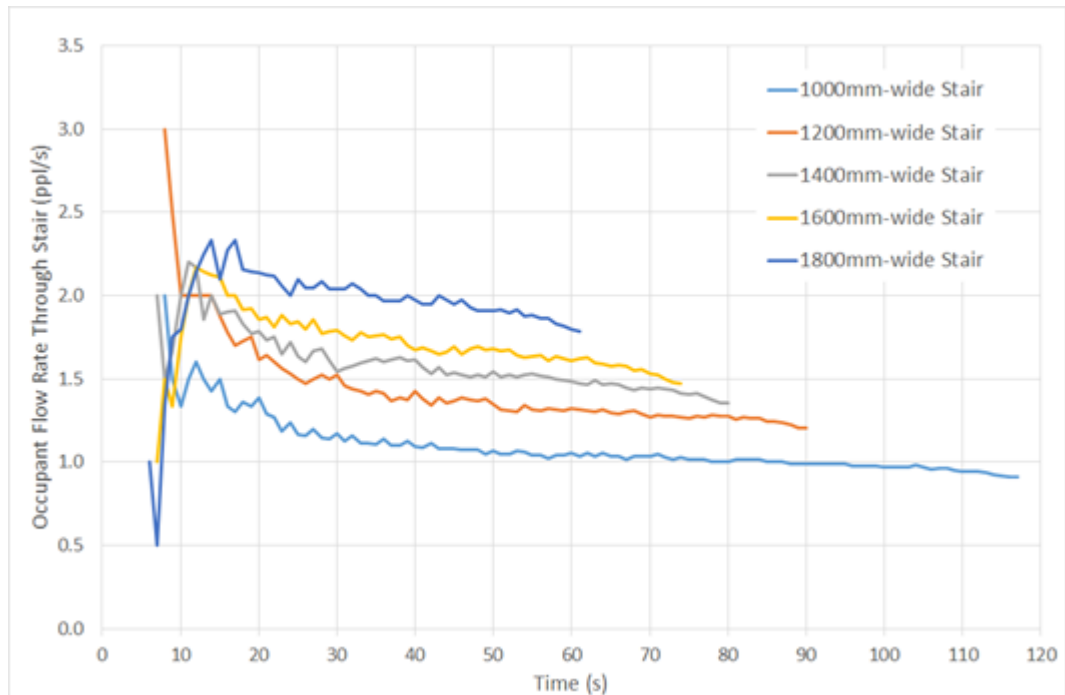
图A15.3： 场景1（下楼）– 30s 时的人员数量和瞬间密度

表 A15.1 总结了上层清空时间。

时间	观察
0	模拟开始。
10	人员进入所有楼梯。
61	1800 mm 的上层楼梯清场。
74	1600 mm 的上层楼梯清场。
80	1400 mm 的上层楼梯清场。
90	1200 mm 的上层楼梯清场。
117	1000 mm 的上层楼梯清场。

表A15.1： 场景1（下楼）- 观察

如图 A15.4 所示，通过每个楼梯的人员流速作为时间的函数。从第一个人员进入相应楼梯开始，对通过一秒钟间隔时间平均进入楼梯的人员数量进行计算。从图中可以看出，流速中有初始的“峰值”。这是在流速计算中的时间平均函数，而不是由人员通过监视位置流速的实际“峰值”引起的（有关 MassMotion 的该功能的说明，请参见第 A3.4 节）。



图A15.4： 场景1（下楼）– 通过楼梯的流速

表 A15.2 列出了通过所有楼梯的平均流速和整体平均流速。

时间段	通过楼梯的平均流速（人/s）				
	1.0m	1.2m	1.4m	1.6m	1.8m
移动平均值 开始到完成（0s 至 117s）	1.09	1.45	1.60	1.71	1.94
移动平均值 连续流动时间（25s 至 117s）	1.03	1.34	1.51	1.66	1.95
总平均值 （总占用/总退出时间）	0.85	1.11	1.25	1.35	1.64

基于每单位宽度平均流速为 1.1 人/m/s 的预期总流速	1.10	1.32	1.54	1.76	1.98
-------------------------------	------	------	------	------	------

表 A15.2: 场景 1 (下楼) - 通过楼梯的平均人员流速

排除开始或模拟期间的峰值，计算“移动平均 - 持续流动时间”。假设这个平均值和楼梯宽度之间呈近似线性关系，那么楼梯平均每单位流速估计为 1.1 人/m/s (即 66 人/m/min)。这在 Frain [5][6] 报告下楼最大流速大约为 69 人/m/min 的范围内。

表 A15.2 的最后一行显示了基于每单位 1.1 人/m/s 平均流速的预期流速，可以与“移动平均 - 持续流动时间”进行比较。

场景 2 (上楼)

图 A15.5 显示了模拟开始后 30s 的人员数量和瞬间密度，楼梯宽度从左 (1.0m) 向右 (1.8m) 增加。

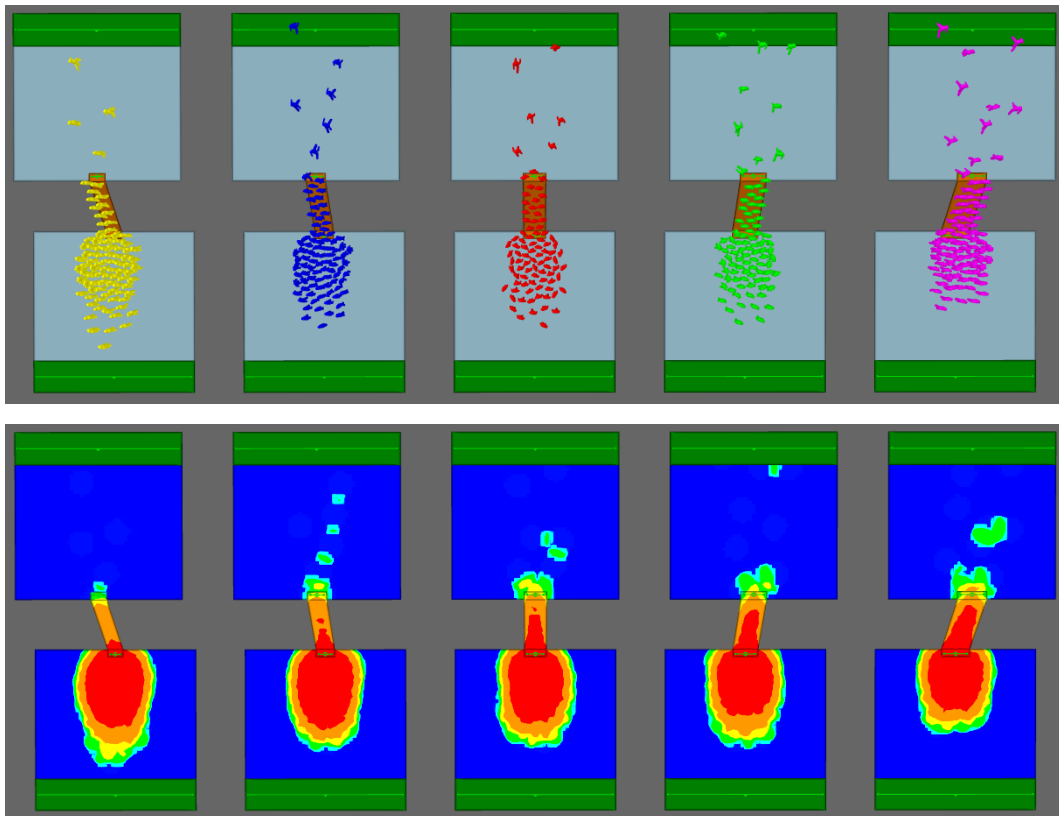


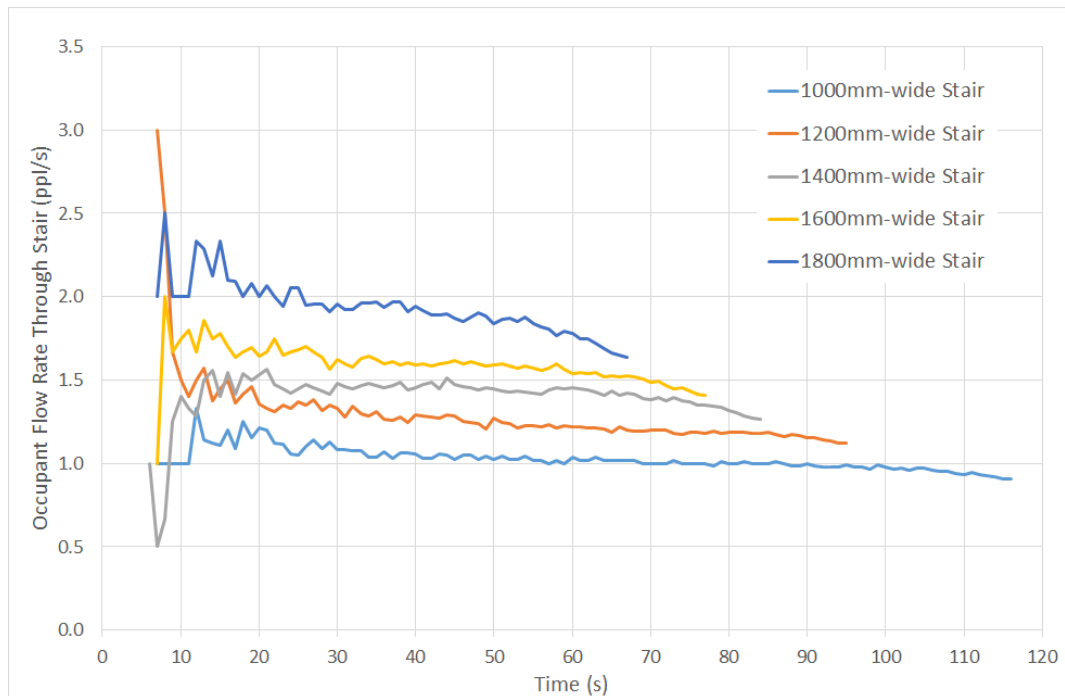
图 A15.5: 场景 2 (上楼) - 30s 时的人员数量和瞬间密度

在表 A15.3 中总结了下面楼层清场时间。

时间	观察
0	模拟开始。
7	人员进入所有楼梯。
67	1800 mm 的下层楼梯清场。
77	1600 mm 的下层楼梯清场。
84	1400 mm 的下层楼梯清场。
95	1200 mm 的下层楼梯清场。 .
116	1000 mm 的下层楼梯清场。

表A15.3: 场景2 (上楼) – 观察

类似于下楼的情况，通过每个楼梯的人员流速作为时间的函数，如图 A15.6 所示。



Occupant Flow Rate Through Stair (ppl/s)	通过楼梯占据者流速 (ppl/s)
1000mm-wide Stair	1000 毫 m 宽的楼梯
Time (s)	时间 (s)

图A15.5： 场景2（上楼） - 通过楼梯的流速

移动平均值和总体平均值，见表 A15.4。

时间段	通过楼梯的平均流速（人/s）				
	1.0m	1.2m	1.4m	1.6m	1.8m
移动平均值 开始到完成（0s 至 116s）	1.03	1.30	1.40	1.60	1.94
移动平均值 连续流动时间（25s 至 116s）	1.01	1.23	1.42	1.57	1.86
总平均值 （总占用/总退出时间）	0.86	1.05	1.19	1.30	1.49
基于每单位宽度平均流速为 1.0 人/m/s 的预期总流速	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80

表A15.4： 场景2（上楼） - 通过楼梯的平均人员流速

与楼下的情况一样，排除开始或模拟期间的峰值，计算“移动平均 - 持续流动时间”。假设该平均值与楼梯宽度之间呈近似线性关系，则每单位宽度的平均流速估计为 1.0 人/m/s（即 60 人/m/min）。这在 Frain [5][6]报告的约 62 人/m/分的上楼最大流速范围内。

表 A15.4 的最后一行给出了基于每单位 1.0 人/m/s 平均流速的预期流速，并与“移动平均值 - 持续流动时间”进行了比较。

A14.5 结论

该测试在 MassMotion 中测试了进入（向下和向上）楼梯的流速。可以得出如下结论：

- 随着人员向下移动，充分利用楼梯的楼梯宽度增加，预测的人员流速几乎线性增加 - 从这些结果估计标准化人员流速为 1.1 人/m/s；
- 随着人员向上移动，充分利用楼梯的楼梯宽度增加，预测的人员流速几乎线性增加 - 从这些结果估计标准化人员流速为 1.0 人/m/min；

状态：通过。

A15 测试 17：单向通道限制

验证测试 17 将由 Oasys 在下一版本 MassMotion 时完成（定于 2015 年底）。

A16 测试 18: 双向通道限制

验证测试 18 将由 Oasys 在下一版本 MassMotion 时完成（定于 2015 年底）。

A17 测试 19: 自动扶梯流量

验证测试 19 将由 Oasys 在下一版本 MassMotion 时完成（定于 2015 年底）。

A18 测试 20： 单向楼梯流量

验证测试 20 将由 Oasys 在下一版本 MassMotion 时完成（定于 2015 年底）。

A19 测试 21：双向楼梯流量

验证测试 21 将由 Oasys 在下一版本 MassMotion 时完成（定于 2015 年底）。

A20 测试 22： 单向拐角流量

验证测试 22 将由 Oasys 在下一版本 MassMotion 时完成（定于 2015 年底）。

A21 测试 23: 双向拐角流量

验证测试 23 将由 Oasys 在下一版本 MassMotion 时完成（定于 2015 年底）。

A22 测试 24： 单向回转楼梯

验证测试 24 将由 Oasys 在下一版本 MassMotion 时完成（定于 2015 年底）。

A23 测试 25：垂直路线选择

验证测试 25 将由 Oasys 在下一版本 MassMotion 时完成（定于 2015 年底）。

A24 测试 26：水平路线选择

验证测试 26 将由 Oasys 在下一版本 MassMotion 时完成（定于 2015 年底）。

附录 B

确认案例

形成附录 B 的确认案例记录如下：

Arup 报告 072377-00_R-001，疏散建模工具 MassMotion 的验证和确认（附录 B），草案 02，2015 年 5 月 31 日。