
如何避免踩踏悲剧？从“怎么走”和“如何躲”中找规律

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/39294.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

如何避免踩踏悲剧？从“怎么走”和“如何躲”中找规律。2022年韩国梨泰院踩踏事故，发生在一段有坡度的狭窄巷道里；2010年德国某音乐节踩踏事件，同样发生在斜坡上，而且是双向人流对冲。有研究者意识到，在踩踏事件中，斜坡加人群是一个被严重低估的风险组合。四川大学灾后重建与管理学院副研究员谢玮团队针对这一长期被忽视的领域展开了系列实验，从而更清楚地理解斜坡上的个体运动规律和水平面上的迎面避碰行为。

团队近期发表的两项研究，分别探讨了两个核心问题：一个是怎么走，一个是如何躲。前者给虚拟行人装上了真实的步态，精确量化了斜坡上的步态变化，为预防类似梨泰院的斜坡踩踏事故提供了科学依据。后者则用成本收益框架，从本质机理上揭示了迎面避碰的决策逻辑，为解决行人运动方向冲突、提高疏散效率提供了量化工具。

两项成果分别发表在《安全科学》和《混沌、孤立子与分形》上，共同完善了行人与疏散动力学理论体系，为灾害场景下的人群应急疏散与复杂建筑的疏散路径规划提供了科学支撑。

圆点

传统社会力模型把行人简化成一个质点，用来计算和模拟其在走向目标和避开障碍物共同作用下的运动轨迹与速度变化，进而推演出人群整体的流动、拥堵等现象。这个假设在平地上勉强可行，但应用于斜坡上具有明显的局限性。

想想上坡的时候，你会不自觉地迈小步、放慢速度、身体往前倾，以维持平衡。下坡时则会趋向用小碎步、身体稍往后仰，以防摔跤。改变的步长、步频、身体姿态，用一个圆点是没法模拟的。

同时，人行走时两脚交替落地，身体会左右摇摆，在狭窄的斜坡通道里，这种动态的空间占用和一个静止的圆形也截然不同。头还隔着很远，但两个人的脚已经挤在一起了。谢玮解释。

虽然目前已有研究者将坡度因素引入该传统模型，但也只是针对特定角度作了参数调整，缺乏普适性。

为此，谢玮团队提出双足社会力模型，把人的运动分成两个层次来算。第一层叫‘质心动力学’，负责决定人的身体重心往哪走、走多快。她表示，第二层叫‘双足运动学’，负责根据重心的指

令，实时算出每一步迈多大、多宽、花多长时间。

最关键的是，这两层是双向耦合的：如果腿发现坡太陡、迈不动，就会反馈给重心慢一点。如果重心突然要急转弯，腿也得赶紧调整落脚点。

随后，他们设计了跑步机实验，设置了 0° 、 5° 、 7° 、 12° 共4个上坡坡度，采集真实行人的步长、步频、步态时间等数据，通过计算机仿真将结果外推到 0° 到 30° 的整个坡度范围。

基于这些数据，团队拟合出了通行能力、临界密度等关键参数随坡度变化的数学公式。模型精度经过了验证，例如输出的步长与实验数据平均相对误差仅6.03%。

研究发现，个体步长随坡度增大而缩短，从 0° 时的66.4厘米降至 12° 时的54.0厘米，步态时间从0.49秒延长至0.73秒，而步频从每分钟122步降至84步。

这些数字让斜坡上人走得更小心变得具像化。从集体层面上看，这种小心带来的后果是：随着坡度上升，坡道的通行能力下降，而人群开始出现明显拥堵的临界密度反而升高。

上坡时步长变短，每个人前后占用的距离较平地被压缩。坡度越高，步长越短，那同样面积里能塞进更多人。团队成员、安全科学与减灾专业博士宣陈锐解释，在斜坡上，人群可能还未完全堵死时，每个人的步长已严重受限、站不稳，一旦有人摔倒就会引发连锁踩踏。这为大型活动中斜坡路段人流控制提供了更精准的阈值参考。

现行的很多建筑设计规范在处理坡道通行能力时，往往只基于平地数值做简单折减，但研究表明，这种做法严重高估了陡坡的通行能力。他表示，现行规范忽略了通行能力随坡度真实衰减的规律，而研究给出的拟合公式正好可以用于修正。

更值得警惕的是，行人速度对坡度的敏感区间集中在 5° 到 10° 。在这个看似平缓的范围内，坡度每增加一度，速度的下降幅度最大。超过 10° 后，速度下降反而趋缓。

身体对坡度的适应主要发生在这个不太陡的区间，缓坡段就可能出现明显的人流减速，形成局部拥堵。所以即使是看起来‘不太陡’的坡道，也需要设缓冲地带或加宽过道。谢玮说。

迎面走来一个人，你的大脑在算什么？

每个人都经历过一个场景：你和对面走来的人，会下意识判断是否会撞上，以及什么时候开始让、让多少、什么时候停止让。

谢玮团队对这一过程进行了科学拆解。他们设计了一个实验：两个人从通道两端相向而行，起点分别是对方的终点，如果谁都不改变轨迹，就一定会撞上。

团队用摄像头拍下全过程，分析每个人什么时候开始躲、躲多少、怎么调整。实验共招募64人（32组），在2米、6米、10米三种初始距离下重复多次，共获得约500条有效轨迹。这种不躲必撞的设置制造了最严重的冲突，便于观察决策时机和偏移量。

基于数据，团队提出了预判-行动-调整-恢复四阶段避碰理论模型。当你远远看到对面有人走来，大脑会下意识评估对方的速度和方向，判断是否会撞上。宣陈锐指出，此时身体虽无明显动作

，侧向速度已微微增加，进入预判准备。

一旦确认如果不让就会相撞，便会果断向一侧偏移，侧向速度迅速攀升，方向改变最为剧烈。但偏到一定程度后，大脑开始权衡‘再偏就浪费能量了’。谢玮表示，于是人的侧向速度下降，甚至小幅回摆。最后，双方擦肩而过，各自回到原本的直线路径上。

整个过程通常只需一两秒，快到行人自身都意识不到。研究团队通过成本-收益框架，精确捕捉到了这个决策过程。

每一刻，行人都在算一笔账，花费肌肉能量来换取更大的安全距离。谢玮解释，研究的价值在于把这种模糊的本能变成了较为精确的数学公式。通过实验数据，他们算出了安全权重约为能量成本的两倍。

安全优先，但并非不惜一切代价。她补充道，当继续加大偏移的边际安全收益已经不值得额外的能量投入时，行人就会切换策略。

用这个框架可以解释一些日常行为。太礼貌的人会持续保持在行动阶段，不断地偏移让路，过度投资安全余量。而太争抢的人则过早切换到能量节约模式，甚至从一开始就不投资安全余量。一般的正常行人天然地在这两个极端之间找到了一个平衡点。

理解这个平衡点，有助于判断人群行为何时偏离正常决策模式。比如恐慌时安全权重急剧升高可能引发混乱踩踏，或赶时间时安全权重过低导致碰撞风险。谢玮解释。

换句话说，掌握了正常人的避让决策模式，一旦观察到人群普遍过度避让或避让不足，就意味着行为已偏离正常模式，管理者可据此提前预警或调整疏导策略。

此外，避碰实验还发现，当两人从相距6米及以上的位置迎面走向对方时，每人向右侧偏移量基本稳定在约30厘米，并且所有人无一例外都靠右走。因此，设计双向坡道时，隔离带两侧至少应预留30厘米的净空，地面也宜画上靠右行走的标识。

构建一个多尺度、多因素耦合的疏散仿真平台

这两项研究分别回答了行人动力学中最根本的两个问题，一个是怎么走，一个是如何躲。

斜坡研究关注人在斜坡上如何调整步态，比如步长缩短、步频变慢、身体前倾，这些微观特征让虚拟行人具备了真实的运动能力。谢玮表示，避碰研究关注迎面遇到他人时，人如何感知风险、权衡力气与安全、做出避让决策，从而为人群仿真软件中的虚拟人赋予了人的决策逻辑。

两项研究存在多重互补关系。首先是从个体到交互的层级互补。她指出，行人真实环境中的运动，是自主运动和社会交互的叠加。一个人在斜坡上走，既要适应坡度，又要在遇到对面来人时做出避让，两项研究分别提供了这两个层级的精确描述。

同时，斜坡研究发现，坡度会压缩人的运动能力，而这些物理约束必然会影响到避碰决策，因为一个人用来躲闪的可投资预算，即可用的机动能力变小了，他自然会调整策略，比如更早停止避让。这为未来将两个模型融合起来、用于模拟真实场景中斜坡上的迎面人流行为提供了切入点。

此外，斜坡研究从每个人的步长、步频出发，推导出人群整体的密度、速度、流量之间的关系。避碰研究从每个人的成本收益决策出发，展示了微观的决策如何产生宏观可观测的四阶段行为模式。

两者共同印证了宏观的人群现象源于微观个体的物理约束与决策逻辑的耦合这一核心理念。宣陈锐说，这体现了从微观机制到宏观涌现的方法互补。

基于目前的成果，研究团队计划将两者融合，让双足社会力模型中的虚拟行人不仅能在斜坡上用符合生物力学规律的步态行走，还能在遇到对向行人时按照成本-收益逻辑进行智能避让，构建一个从环境约束到个体运动再到社会交互的完整疏散动力学模型。

谢玮表示，目前实验对象以年轻人为主，今后要纳入老人、儿童、行动不便者等更多群体。当前斜坡模型只涉及上坡行走，下坡的生物力学机制和跌倒风险是下一步的重点。避碰研究目前聚焦于两人迎面场景，今后将扩展到多人交叉、十字路口、瓶颈等更复杂的环境。

更长远看，团队希望融入负重、恐慌情绪、从众行为等更多真实因素，最终构建一个多尺度、多因素耦合的疏散仿真平台，为城市公共空间的安全设计提供更可靠的计算工具。（来源：中国科学报 杨晨）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2026.107119>

<https://doi.org/10.1016/j.chaos.2026.118126>

作者：谢玮等 来源：《安全科学》

更多科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发