

# 环境行为学视角下的步行桥坡度的宜步性要素与优化策略研究

周 婧

(上海济光职业技术学院,上海市 201901)

**摘 要:** 步行桥作为当今城市滨水景观的重要连接纽带已在各个地区被广泛建设。其是城市重要的步行载体,其自身的宜步性水平具有重要的价值,而其中以坡度为代表的舒适性设计对其影响最为显著。在环境行为学视角下,步行桥坡度设计应当兼顾心理感知层面与生理感知层面的平衡,其对于步行桥宜步性程度具有重要价值。基于帕累托最优的多目标优化策略,可将心理与生理层面的综合优化分别转译为针对平直区段长度与大坡度爬升阶段长度的优化。通过运用参数化的手段,将桥体坡度拆解为逐点坡度,提出了实现最高宜步性水平的优化路径与方法。

**关键词:** 步行桥;宜步性;帕累托最优;多目标优化;坡度

**中图分类号:** U448.11

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2024)09-0252-05

## 0 引 言

傍水而居自古以来就是人类选择生存之所的重要目标。随着人类社会的发展与进步,自然的水文环境逐渐演变成为了包含城市通勤、生态休闲、游憩交流的重要场所,同时其卓越的景观环境往往也造就了城市高密度建设的聚集区域。回顾我国城市发展历程,在快速城镇化发展的过程中对于此类易于开发用地,迅速被过境交通以及城内快速交通所利用,各类“滨河道”“滨湖道”被建设。现有的道路系统带来的大量快速的车流严重阻碍了城市腹地行人进入滨水区域<sup>[1]</sup>,滨水空间的属性以及亲水属性呈现出严重的衰退型特征<sup>[2]</sup>。伴随着近年来对于城市高质量发展的需求,滨水空间的步行化、亲水化、宜人化、景观化改造成为了提升城市品质、激活城市活力的重要措施,各个地区普遍展开了如“一江两岸”式的城市更新工程建设,其中宜步型交通环境的组织是创建卓越滨水空间的重要措施,其普遍呈现出桥梁于两岸衔接的步行流线的基本模型。而其中步行桥往往作为步行体系的核心被关注(见图1至图3),其所承载的城市意向价值表达与功能价值地有效协调,成为了塑造宜步性步行桥体系的重要

矛盾与课题,而其中最为显著的就是围绕桥体形式与功能之间所产生的坡度要素。因此,基于多元意义背景下的步行桥坡度影响研究具有重要的价值与意义。



图1 太原跻汾桥



图2 上海洋泾港步行桥

## 1 坡度的生理与心理的批判平衡

为了实现步行桥体的营造目标,根本的是能够引发步行行为的参与。影响步行者决策的路径有众多,包含可达性、美观性、舒适性、便利性、吸引力、熟悉

收稿日期: 2023-11-28

作者简介: 周婧(1988—),女,硕士,讲师,从事建筑设计教学及研究工作。



图3 上海倪家浜桥

度、连通性、安全性<sup>[3]</sup>等。在此过程中显然要满足两类要素的需求,其一为行动目标的吸引,其二为行动特征的满足与适应。二者不是二元对立的关系,再独特的景观化模式塑造也难以弥补过于困难的步行环境对步行者心理所产生的应激反应。借鉴科尼格对生活质量的评价<sup>[4]</sup>,宜步性水平可被理解为环境福利与同步行成本之间的比率,如下式:

$$\text{宜步性水平} = \frac{\text{环境幸福感}}{\text{步行成本}}$$

该式表现出了二者之间的平衡关系,一成不变的步行桥环境显然无法实现高度的环境幸福感的塑造,但过度复杂的场所又将带来在整体行径付出度上的提升,二者与宜步性水平的正负相关关系只有动态兼顾与平衡才能实现理想步行环境的塑造。

### 1.1 坡度组织的心理感知要素

心理对于宜步性场景的愉悦性需求,有赖于步行环境的丰富性来决定。步行吸引力理论指出具有一定复杂性的多样性和新奇性的步行环境可为行人带来感官上的愉悦<sup>[5]</sup>,从而激发步行行为的产生。

步行景观桥作为城市的核心景观以及市民活动的重要载体,其自身的趣味性、美观性、熟悉性均是其承载着的重要表达目标。由于其不再承担机动车的通勤作用,其更多的建构诉求集中于打造适宜行人通过、驻足、观赏、游玩的关键景观交通,在脱离了严苛的交通束缚之后,经常形成一种自身景观化的场景,诸如上下交叠、左右穿插、宽窄变化等各类提升行径多样性选择的形式被运用于其中,从而塑造卓越的空间体验环境。以太原市跻汾桥为例(见图1),其作为城市文化商务区中央轴线核心纽带,为了活跃整体的轴线景观环境,桥体被设计成为双向扭转交叠的形式,带来了在不同标高上不断变化的步行体验感受。基于桥体原型在跨越河道、通航要求等基本诉求的基础上,通过运用桥体坡度对空间环境

体验进行塑造也是最为常见和有效的步行环境处理方式如图。

此外多桥幅的利用以及平直区段与大坡度区段的交替组织也是提升整体步行满意水平的重要措施(见图2)。其呈现了多元化路径选择的愉悦感官,在有限范围内显著增强了桥体的体验感受,形成了移步换景的视觉感知。此外基于在其上的逗留属性,视线的通达性也尤为重要,因此在桥体之间的净高控制以及平直区段的长度控制上提出了必要的要求(见图3)。综合来实现整体心理感知要素的满足。

### 1.2 生理层面感知要素的组织

针对于步行环境生理层面的适应性,其核心在于舒适度、便利性、安全性、连通性等等。在步行桥体系之中,基于固定的路径通达目标以及不涉及人车混流的情况,安全以及联通等基本要素均可满足宜步性的要求。但舒适度伴随着针多元化的形式组织则有待进行合理的研究与优化。

根据宜步性核算公式,在生理层面核算效能的付出是重要的指标。在步行功耗上,坡度对于步行具有最为显著的影响<sup>[6]</sup>。在一项基于环境行为特征下针对于苏黎世步行交通的研究中指出,每上升1%坡度,在单位距离内增加的生理感知能效约为11%<sup>[7]</sup>,当坡度 $\geq 9\%$ 时,整体的能耗水平将上升至少约100%。在针对于罗马的宜步性研究中,经调研和实证分析2%的纵向坡度仍可以满足有障碍者的行为需求,如坡度大于8%则会基本达到步行可行径的极限<sup>[8]</sup>。《公园设计规范》(GB51192—2016)之中则要求逐鹿、此路纵坡宜小于8%,且在连接处应设置小于等于2%的缓坡段。合理的坡度区间是营造有效步行环境的必要选择。

在此基础上由于在多桥幅组织过程中造成的高差特征,为了保证景观视线的有效性,其净空高度需要进行综合控制,其应当能够保障在梁下范围内人仍能后存在合理的视线高度。人的最佳视线高度约为水平视线上20 cm以及下40 cm之间的60 cm水平区间,假设亚洲人平均身高为165 cm,则双幅桥体之间在景观视野段高差宜为:

$$H \geq H_{\text{梁高}} + 165 \text{ cm} + 20 \text{ cm}$$

当多幅桥面交叉时,净高不得低于2.5 m<sup>[9]</sup>。此外在观景同时在平直区段中,坡度不宜大于2%,从而为步行桥体的景观认知需求提供良好的物理空间环境。

综上可知,建构宜步性的步行桥空间过程中,既需要通过多样化的高差设计来塑造在心理感知层面的步行目标引导,同时又需要在保障平直观景区段以及满足有效视线高差的前提下,降低纵向坡度至合理区间,以最大化的实现整体的宜步性指标。

2 多目标坡度优化措施方法的引入

引入基于多目标遗传算法下的优化措施核心在于,在整体宜步性水平塑造过程中,环境心理感知与路径生理感知的综合协调。针对于多桥幅步行桥设计过程中,既要求在塑造高差过程中对于净高以及平直观景区段的控制,同时给出在坡度设计过程中的范围极限,其表现出在多目标上的优化需求。

此外由于桥体在整体的设计过程中,各部分之间处于一种连续变化的坡度环境,既需要满足在衔接段的上限坡度要求,也需要满足在主体上坡区间的坡度限制要求,还需要满足在平直区段的坡度要求,基于其连续变化的特征,通过帕累托最优可有效提供多元化的桥体坡度组织关系,从而有效满足宜步性数值的最大化需求。

因此在引入多目标优化机制的基础上,整体优化目标被设定为在多桥幅之间高差满足最小视线净高要求的基础上,增加桥体中心平直观景区段长度的同时降低最大坡度,从而实现对于桥体形态以及宜步性的水平的设定。

3 坡度的参数化控制及多目标优化方法

本文引入嵊州某步行桥设计作为实证案例进行分析(见图 4)。该桥体横跨新昌江两岸,连接城市地标综合服务中心以及未来城市新建片区,是城市重要的景观地标以及步行活动纽带。该桥体工程为加建工程,原桥为连接两岸主线全长 341.52 m 平直步行桥体。加建部分分为 3 段,各段参数见表 1。该桥体主要分为两部分,其一为中央以通勤为核心的快速交通部分。其二为围绕在其两侧的慢行游览景观交通部分(见图 5)。

为实现桥体的地标性文化景观的构建以及丰富的步行体验环境。加建桥体部分通过在两翼的起伏,构建了快、慢、停的综合步行体系,通过高差以及宽窄的变化,形成动态交错的步行体验。但其在强化步行感知的同时,也在极其有限的条件下在坡度设置层面上,对桥体的步行可行性提出了高度的要求。

表 1 桥型布置表

| 桥位  | 跨径布置 /m                           | 桥长 /m  | 桥宽 /m    | 斜交角 /<br>(°) | 结构形式          |
|-----|-----------------------------------|--------|----------|--------------|---------------|
| 第一联 | 3.96+36.66+29.94+45.42+3.02       | 116.45 | 4.7~10.2 | 90           | 连续<br>钢箱<br>梁 |
| 第二联 | 4.32+36.27+26.31+30.49+40.20+2.94 | 136.67 | 4.7~13.4 |              |               |
| 第三联 | 2.94+37.40+29.06                  | 71.63  | 5        |              |               |

3.1 基本形态生成

本项目由于桥面在横坐标及纵坐标上的连续变化,整体呈现出在三维曲面上的渐变形态,为了保证在行径过程中横向坐标上的标高一致性,基于 NURBS 曲线上的细分与放样,实现整体的桥面形态生成,整体生成过程如下(见图 6)。

(1)首先确定桥面中心线,为两段圆弧的拼接。在中心线上取 100 个采样点。

(2)每个采样点,沿着垂直于中心线的方向,向内外两份方向移动,移动距离通过正弦函数控制。每一组点连接形成平面上的结构线。

(3)每一条平面结构线向上移动,移动距离通过一条 NURBS 曲线控制,放样形成桥面的曲面。

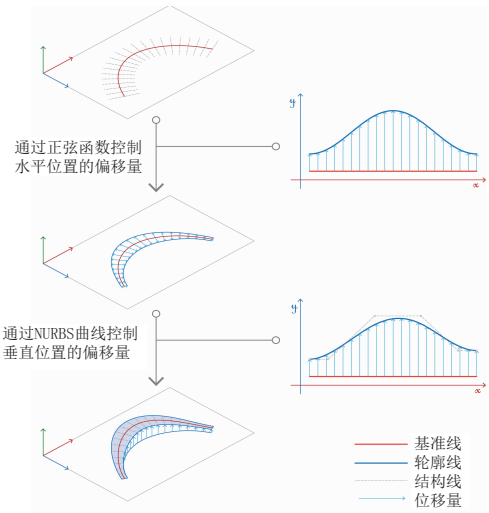


图 6 形态参数化生成图示

3.2 坡度分布优化

基础生成桥体,其是一种连续变化的曲面桥体原型,为了满足在整体桥体设计过程中衔接段曲面、大坡度曲面以及平直曲面在空间体验营造上的协调组织,对其中各类的桥面坡度进行了分段优化与点位控制,整体分为参数设定和多目标优化两个过程。

3.2.1 参数设定

以第二联桥面为例(见图 7),采用 6 个控制点的 NURBS 曲线控制坡度分布,通过 4 个参数控制。起点 Pt1 与终点 Pt6 为与现状平直一期桥体衔接固定

点。Pt2 与 Pt5 纵坐标分别与 Pt1 及 Pt6 相同,曲面在起点的坡度(斜率)为 0,确保与一期工程的桥面平滑衔接;Pt2 的横坐标通过参数  $p_1$  控制,其代表 Pt2 距离 Pt1 的距离,即  $p_1=L_1$ 。Pt3 的纵坐标为固定值 30.6,其源自于自一期桥面与二期平直区间之间满足人正常视野范围的净高控制。Pt3 横坐标通过参数  $p_2$  控制, $p_2$  表示在水平方向上,Pt2 到 Pt3 的距离与 Pt2 到 midpoint (71 m 处)的距离所形成的比值,即  $p_2=L_2/(71-L_1)$ ,此数值为动态数值,其直观的影响最终由 Pt3 至 Pt4 区间平直观景区段距离与范围,亦可呈现出自 Pt2 至 Pt3 大坡度爬升过程中的高宽比即坡度水平,此处的动态调整最为自变量在后期优化过程中可被代入至优化计算之中。与 Pt3 相类似,Pt4 的纵坐标为固定值 30.6,横坐标通过表示比例的  $p_4$  控制, $p_4=L_4/(71-L_6)$ 。Pt5 的控制逻辑与 Pt2 相同,纵坐标与 Pt6 相同,通过参数  $p_4$  控制到终点的距离,即  $p_4=L_6$ 。经过整理,控制点的坐标分别为如图 7 所示。

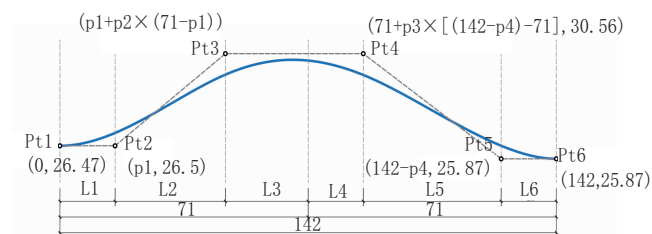


图 7 桥体起坡点位参数控制

### 3.2.2 目标设定

基于前文对于心理感知与生理感知综合满足的基本理论,在引入多目标优化的过程中,将心理感知满足目标设定为中间平直区段长度的增大,将生理感知满足设定为最大坡度的放缓的,因此本次形态坡度基于多目标优化下两个目标分别为:

(1)减小最大坡度(坡度 $\leq 9\%$ ), (2)增加中间位置平缓段(坡度 $\leq 2\%$ )的长度。

具体优化目标为,在曲线上均匀地采样了 100 个点,并得到各点位置处的轴向量  $T_n$ ,则可以计算出各点处的坡度  $Sp_n$ ,取  $Sp_n$  中的最大值  $Sp_{max}$  作为优化目标。

$$T_n = (x_n, z_n)$$

$$Sp_n = x_n / z_n$$

采用如下方式,将中间位置平缓段的长度转换为优化目标。首先在上述采样的 100 个点中,找到最高点的序号  $p_i$ ,分别向最高点的左右进行搜索,取得中间段坡度 $\leq 2\%$ 的点的数量  $hn$ ,点数数量  $hn$  越多

代表平直区段长度越长,该搜索采用如下 Python 代码实现:

```
Pi=0
zmax = zs[0]
for i,zn in enumerate(zs):
    if zn>zmax:
        Pi = i
        zmax = zn
hi = [Pi]
li = Pi-1
while Sps[li]<=0.02 and li>=0 :
    hi.append(li)
    li -= 1
ri = Pi+1
while Sps[ri]<=0.02 and ri<len(Sps):
    hi.append(ri)
    ri += 1
hn = len(hi)
```

由于 NSGA-II 采用越小越好的优化策略,而我们希望最大化  $hn$ ,因此采用  $hn$  的倒数  $1/hn$  作为优化目标,即  $hn$  的倒数数值越小则平直区段长度最大。但在整体优化过程中,最大爬坡坡度值被限制在 9% 范围内,以实现步行的有效性。

### 3.2.3 多目标优化结果

在整体优化的过程中根据满足不超过最大坡度值的前提下,减小大爬坡阶段长度扩大平直区段长度的综合情况提出了优化模型一(见图 8),其中坡度为 8.95%,平段长度为 56.36 m。同时选取了对照组模型二与模型三,分别代表了在大爬坡阶段的中间坡度以及可能的最小坡度。三者 Pt1 起坡点处均最大限度逼近了坡度为 2% 的衔接段极限,差距显著体现在中间平段长度以及对平段连续变化坡度的影响。模型一取自帕累托前线中间值区域,其呈现出了大长度的平段情况,也为整体桥体的景观满足目标提供了充足的场所,有效的满足了步行目标的心理需求。同时在爬坡段的对比中,虽然其余二者最大坡度均控制在 8% 以内,并降低了单位长度内的步行生理能耗,但由于相对长的坡段长度,在一定程度反而增加了总体的能耗水平,同时又大幅度的压缩了平直观景区段,导致了在降低步行环境幸福感的同时增大了步行成本,导致了整体宜步性水平的下降。

由对比可见,在局促小尺度背景下,以保障多幅桥体视野穿透可能性作为前提,扩大步行桥体的平

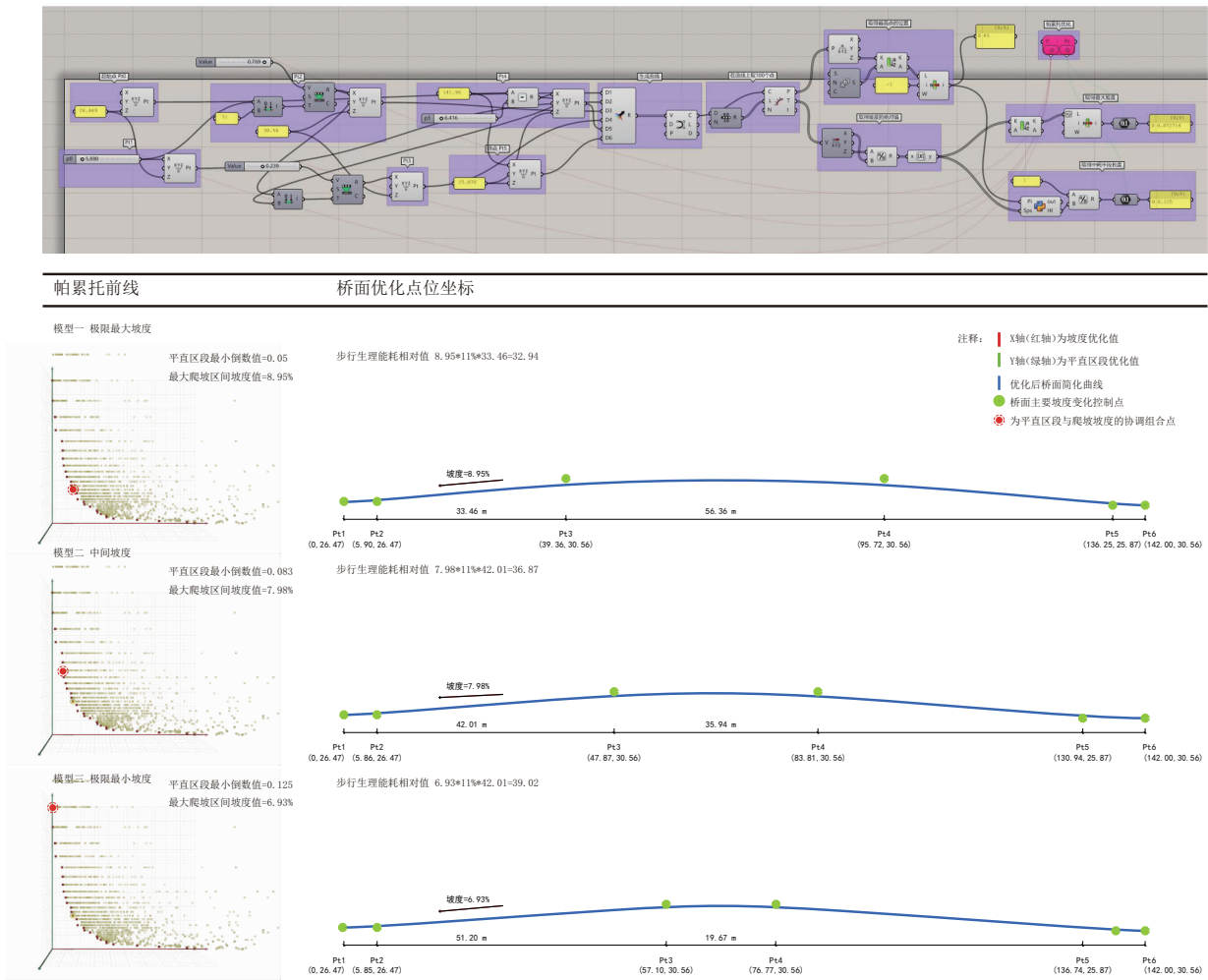


图8 多目标优化 Grasshopper 电池程序及桥体坡度优化比对结果

直区段长度，同时在相对极限坡度下完成大坡度爬升对于提升步行桥体宜步性水平具有显著的有效性。

4 结 论

步行桥的宜步性组织，核心在于合理实现在心理认知层面上的引导与生理可付诸行动的极限之间的平衡,其处在一种动态平衡状态。在有限前提下，过长的坡道或过陡的坡道对于整体宜步性水平的塑造均存在着显著的不利影响。基于在心理与生理感协调下的多目标优化，可在桥体步行体系设计的环节中,提供充足的模拟依据,并提出在平直区段与爬坡区段之间在环境幸福感知与步行成本之间的正负相关定量关系，从而在坡度层面科学合理指导步行桥步行体系设计。

参考文献:

[1] 尚维,杨春侠.城市滨水沿岸道路交通组织策略研究[J].住宅科技, 2015,35(12):10-14.  
[2] 周曦.基于恢复亲水性的江南城市滨水空间分类及更新方法研究[J].

建筑与文化,2016(8):131-133.  
[3] Alonso F, Oviedo-Trespalcacios O, Gene-Morales J, *et al.* Assessing risky and protective behaviors among pedestrians in the Dominican Republic: New evidence about pedestrian safety in the Caribbean[J]. Journal of Transport & Health, 2021(22): 101145.  
[4] Koenig G K. Come si misura la qualità della vita[J]. Ottagono, 1986 (83).  
[5] Basu N, Oviedo-Trespalcacios O, King M, *et al.* What do pedestrians consider when choosing a route? The role of safety, security, and attractiveness perceptions and the built environment during day and night walking[J]. Cities,2023(143): 104551.  
[6] Nag D, Bhaduri E, Kumar G P, *et al.* Assessment of relationships between user satisfaction, physical environment, and user behaviour in pedestrian infrastructure[J]. Transportation research procedia, 2020(48): 2343-2363.  
[7] Meeder M, Aebi T, Weidmann U. The influence of slope on walking activity and the pedestrian modal share[J]. Transportation research procedia,2017(27): 141-147.  
[8] Appolloni L, Corazza M V, D'Alessandro D. The pleasure of walking: An innovative methodology to assess appropriate walkable performance in urban areas to support transport planning[J]. Sustainability, 2019,11(12): 3467.  
[9] GB/T 51439—2021,城市步行和自行车交通系统规划标准[S].