

不规则区域沥青路面摊铺路径优化研究

张兴冰 王梓旭

四川成乐高速公路有限责任公司 成都 610041

DOI: 10.32629/ems.v8i7.21116

[摘要] 为解决收费站广场及连接线不规则区域摊铺中冷接缝密集问题,提出基于摊铺机宽度约束的路径优化方法,以人工补筑面积、接缝长度、设备挪动次数和施工时长最小化为目标,构建三种工况数学模型。依托某“喇叭口”区域(宽44.4m渐变至15m,渐变150m,总长420m)进行Python仿真对比:直板式补筑区达44.55%,不宜采用;混合方案采用定宽核心区与变窄边缘区策略,接缝长度较仅伸缩式减26%、工期缩25%,增加班组可再缩工期。该方法能有效降低接缝规模与施工耗时,为同类工程提供借鉴。

[关键词] 沥青路面; 摊铺技术; 不规则区域; 路径优化

1 引言

高速公路收费站由主线、渐变过渡段、收费广场组合而成,路面宽窄连续变化,几何形态复杂,沥青摊铺施工难度远高于标准直线路段。若摊铺条带划分、行进路线规划不合理,纵向冷接缝数量大幅增加;摊铺机频繁转向、调宽会加剧沥青混合料温度离析,接缝压实薄弱、路面平整度不足,车辆启停重载作用下极易产生水损害、车辙、坑槽,大幅缩短路面服役年限^[1]。

现有沥青摊铺研究多聚焦材料配比、温控、摊铺设备结构优化、标准路段智能化施工^[3],针对常规矩形广场的路径优化多以行驶距离、燃油消耗为目标函数,缺少对冷接缝长度、人工补筑面积、转场挪机频次等路面质量关键指标的量化约束。收费站喇叭口区域宽度骤变、过渡段短,熨平板伸缩调整范围存在硬性上限,运料车辆仅能从宽幅一侧进料,摊铺必须由宽向窄单向推进,现有优化模型无法适配该类特殊空间约束。

沥青混合料摊铺温度离析、压实均匀性是路面施工核心研究课题,红外测温、深度学习图像识别等数字化监测手段已逐步落地摊铺现场质量管控^[4,5,6],但现有成果极少针对收费站异形渐变摊铺区域开展路径规划量化研究。本文针对收费站异形摊铺区域,结合8m直板式、3~6m伸缩式摊铺机作业宽度限制,建立多目标路径优化数学模型,以减少补筑区、缩短接缝、降低挪机次数、压缩工期为核心优化目标,通过Python参数化仿真对比三类施工方案,验证分区联合摊铺路径的提质增效效果,填补复合不规则区域摊铺路径系统性优化的研究空白^[2]。

2 工程概况

研究对象为高速匝道收费站出口喇叭口作业区,整体总长420m,包含44.4m宽收费广场、150m线性渐变收窄段、15m宽标准连接线。受运输路线限制,运料车仅能从广场宽端进场,摊铺作业必须由宽侧向窄侧单向施工。现场仅可配置两台摊铺机协同作业:直板式固定摊铺宽度8m,伸缩式可调宽度3~6m,两台设备摊铺行进速度均为1.5m/s。

该区域施工核心痛点集中于冷接缝与路面平整度:纵向

冷接缝压实度、温度一致性差,是路面水损高发薄弱带;摊铺机反复挪位、拆装熨平板会中断连续摊铺,形成路面错台、基准面破坏,局部平整度劣化。因此路径规划核心原则为:单向由宽至窄摊铺前提下,最大化单次连续摊铺距离,控制纵向冷接缝总量,减少设备拆装、转场挪动频次,同步控制人工修补面积、缩短整体施工时长。

3 路径优化分析

沥青摊铺机分为固定幅宽直板式、可调幅宽伸缩式两类,本工程场地规模受限,仅可采用单台直板搭配单台伸缩摊铺机组合施工,设置三类对比工况:仅直板摊铺机施工、仅伸缩摊铺机施工、直板+伸缩联合摊铺。将喇叭口区域拆解为线性渐变等腰梯形段、等宽矩形标准段,分段建立对应优化模型。

3.1 优化模型建立

根据图1可知,该施工区域宽度为:

$$w(x) = \begin{cases} 44.4 - (44.4 - 15)/150 \cdot x & (0 \leq x \leq 150) \\ 15 & (150 \leq x \leq 420) \end{cases}。因此,可以得到每个$$

位置 x 的最小摊铺带数 $n(x) = \lceil \frac{w(x)}{\max_width} \rceil$,其中 $\max_width$

为摊铺机最大宽度或组合使用固定+伸缩式宽度,又因宽度在渐变区内呈连续线性变化,故将渐变区划分为若干小段,在每小段内可视为宽度不变。

考虑到使用8m直板式摊铺机平行作业时,由于边界呈线性收缩,矩形块无法覆盖的三角形区域视为人工补筑区 A_{manual} 。

针对三种方案,分别三种子模型如下:

(1) 离散化固定布局模型

离散化固定布局模型适用于方案一的直板式摊铺机,其固定摊铺宽度为 W_{fixed} ,单次摊铺的覆盖域由矩形卷积确定。其判定准则为:若 $W(x) > n \cdot W_{\text{fixed}}$ 时,将会产生摊铺机无法覆盖的“几何死角”,即人工补筑区,其计算式为: $A_{\text{manual}} =$

$$\int_0^{420} [W(x) - \Phi(W(x), W_{\text{fixed}})] dx, \text{ 其中 } \Phi(W(x), W_{\text{fixed}}) \text{ 为步进}$$

覆盖算子，即当路面宽度连续变化时，使用若干台直板式摊铺机平铺能达到的“最大有效包络面积”。

(2) 阶梯收缩伸缩模型

阶梯收缩伸缩模型适用于方案二的伸缩式摊铺机，在作业过程中，将设备的多次挪动作业视为同时存在多台参数完全一致的设备进行联合作业，通过动态调整设备数量 $n(x)$ ，进而将连续的路面宽度变化转化为阶梯式的设备响应，判定条件为： $W_{\min} \leq \frac{W(x)}{n(x)} \leq W_{\max}$ ，其中 $x \in [0, 420]$ 。其存在临界点，即 $\frac{W(x)}{n(x)} = W_{\min}$ 或 $\frac{W(x)}{n(x)} = W_{\max}$ ，设备宽度性能发挥至最大，也就是施工方案中的撤离点坐标。

(3) 核心轴线稳态模型

核心轴线稳态模型适用于方案三的直板式与伸缩式联合使用，通过将摊铺区域划分为“定宽核心区”和“变窄边缘区”来进行不同的设备组合设计，模型为： $W(x) = W_{core} + 2 \cdot W_{edge}(x)$ ，

其中 W_{core} ， $W_{edge}(x)$ 分为定宽核心区区和变窄边缘区。核心规划理念为保持核心区不动，将扰动（变宽、撤离）限制在边缘伸缩机中，进而显著降低核心区域的接缝偏差，提高路面平整度。

3.2 程序编写

为定量评估不同施工策略在不规则区域下的效能，开发了基于 Python 的 EngineeringPavingV22 参数化仿真框架，集几何建模、拓扑分析和多准则评价为一体，由底层几何引擎、方案解析模块和统一可视化组件核心架构，其中 Python 版本为 3.12.10，引用模块为 numpy 和 matplotlib.pyplot。

4 方案对比

根据理论模型，分别设定区域几何参数

$$\left\{ \begin{matrix} W_{start} : 44.4m (x=0), L_{trans} : 150m \\ W_{end} = 15.0m (x \geq 150m), L_{total} : 420m \end{matrix} \right\}$$
，设备物理约束 $\left\{ \begin{matrix} W_{fixed} : 8m \\ 3.0m \leq W_{trans} \leq 6.0m \end{matrix} \right\}$ ，

利用 python 语言编写程序，得到如下结果（见表 2、图 1）：

表 1 不同方案施工参数统计

方案	设备挪动次数	接缝长度（m）	总施工时长（h）	备注
仅使用直板式	4	1680	/	存在大量人工补筑区，平整度无法得到保障
仅使用伸缩式	7	1650	24.08=22.33+1.75	
混合使用	8	1220	22.89=20.89+2	一组工人
	7	1220	17.97=16.22+1.75	两组工人

注：设备挪动单次均考虑为 15min

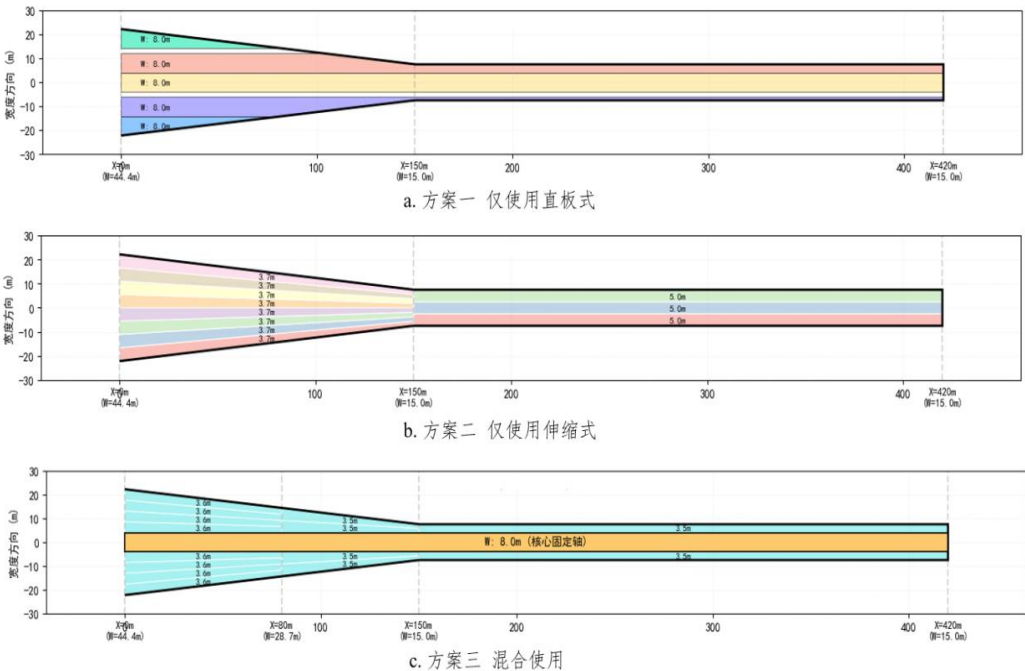


图 1 不同方案施工顺序图

4.1 方案一人工补筑区计算

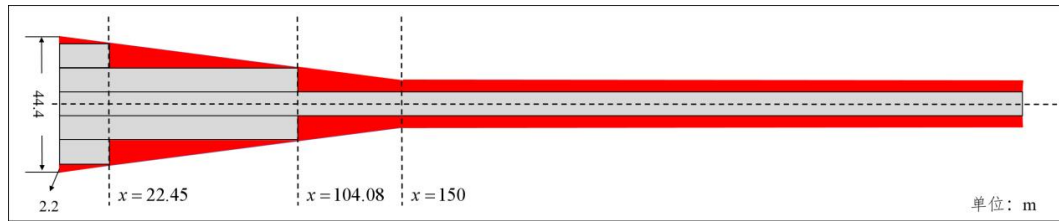


图2 方案一人工补筑区

图2为仅使用直板式的施工顺序图,其中红色部分表示人工补筑区。发现,人工补筑区面积占比较高。在渐变区,人工补筑区的出现主要受不规则区域的影响;而在标准段,由于路面宽度为15m,直板式摊铺机铺筑宽度为8m,导致人工补筑区占比高达44.55% ($A_{\text{manual}} = 3789.35\text{m}^2$),即接近一半的区域无法被直板式摊铺机覆盖,需要人工补筑。由此可知,在路面宽度不规则区域,直板式摊铺机存在先天性效率缺失,会产生大量本可通过换用设备避免的人工补筑区。因此,该方案不具备参考价值,后续参数比较中不再予以考虑。

4.2 接缝长度对比

在沥青路面施工过程中,压实度与接缝长度对成品质量影响最大,尤其是冷接缝质量。为便于计算和充分考虑最不利因素,本文的接缝长度为所有接缝长度,即不区分热接缝与冷接缝。

在接缝长度方面:表1看出,方案二接缝长度最长为1650m,大于方案三1220m。由图2,方案二与方案三的接缝长度差异出现在 $x \in [80, 150]$ 区间,方案二因采用了伸缩机8次作业完成铺筑存在7条纵向接缝,而方案三因采取了核心区+边缘区的策略,仅存在4条接缝,接缝数量和长度均显著减少。这表明在不规则区域,通过划分核心区与边缘区,并充分发挥直板式的优势能够有效减少沥青路面接缝数量和接缝长度。

4.3 设备挪动次数

在设备挪动次数方面,方案二与方案三一致。在标准段,方案二与方案三策略完全相同。在渐变区($x \in [0, 150]$),因区域宽度变化率大(对称性下为9.8%),导致伸缩机需要采用牺牲每次施工宽度换取区域全覆盖的施工策略,必然导致设备的频繁挪动。在实际工程中,可以考虑采用宽度适应性更广的不同类型摊铺机的联合作业。

4.4 施工总时长

施工总时长由铺筑时长和设备挪动时长两部分构成,设备挪动时长与设备挪动次数密切相关,由4.2可知,方案二与方案三基本一致。在施工总时长方面,可以得出铺筑时长顺序为 t_1 ,方案二 $< t_1$,方案三,一组工人 $< t_1$,方案三,两组工人,也充分证明了,在不规则区域通过划分核心区与边缘区,并采用不同类型摊铺机的组合可以有效减少铺筑时长,但在设备挪动时长方面与仅使用伸缩式并无显著差异。在采用混合使用方案下,通过配置与设备数量相当的工人组合可以有限减少铺

筑时长,且铺筑长度越长,效果越明显,并能减少设备挪动时长。

5 结论

针对不规则区域的沥青路面摊铺路径问题,本文通过分析不规则区域构成,参考常见摊铺机设备参数性能,分别对仅使用直板式、仅使用伸缩式和混合使用三种不同方案构建了理论模型并进行编程,通过对比三种方案的设备挪动次数、接缝长度和总施工时长,得出了以下结论:

(1) 直板式摊铺机在不规则区域存在先天性效率缺失,不建议仅使用直板式施工方案。

(2) 在不规则区域,伸缩式必然采用牺牲每次施工宽度换取区域全覆盖的策略,会导致较长的施工接缝和较高的施工时长。

(3) 在不规则区域,可以通过划分核心区与边缘区,并在核心区充分划分直板式设备的优势,利用伸缩式在边缘区补充的策略来显著减少施工接缝长度和施工总时长。

(4) 在不规则区域,在混合使用直板式和伸缩式方案下,配置与设备数量相应的工人可以有效降低总施工时长,且在施工路径越长的情况下,效果越显著。

[参考文献]

- [1] 赵宁馨. 公路路面施工中沥青摊铺技术运用分析[C]// 江西省工程师联合会. 工程技术与新能源经济学术研讨会论文集(一). 济源市路畅公路工程养护有限公司; 2025: 688-691.
 - [2] 王昕. 基于全流程控制的道桥沥青摊铺施工质量提升路径探析[C]// 广西网络安全和信息化联合会. 2025年第九届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会议论文集. 杭州杭千高速公路发展有限公司; 2025: 281-283.
 - [3] 程彬. 沥青摊铺施工技术在公路路面工程中的应用[J]. 运输经理世界, 2022, (03): 21-23
 - [4] 耿韩, 彭龙洋, 周玥, 等. 沥青混合料摊铺温度离析与压实均匀性提升研究进展[J/OL]. 交通运输工程学报, 1-20[2026-05-17].
 - [5] 李建树. 基于红外光谱技术的沥青摊铺温度场实时调控工艺研究[J]. 交通世界, 2025, (18): 79-81.
 - [6] 张敏, 金铎, 张顺, 等. 基于深度学习算法的路面沥青摊铺红外温度离析区域检测[J]. 建筑技术开发, 2025, 52(06): 118-120.
- 第一作者简介: 张兴冰(1997-), 汉族, 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 沥青路面摊铺, 工程数字化;
- 通讯作者简介: 王梓旭(1992-), 苗族, 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 沥青路面摊铺, 高速公路桥梁建设。