

基于经济性的梁板预制技术优化

戴园¹, 傅晨曦², 吴亚坤²

(1. 宿迁市交通运输综合行政执法支队, 江苏 宿迁 223800; 2. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 针对永久预制梁厂面临的产品多样化与成本控制难题, 在既有设备基础上, 提出一种“向上兼容、向下改造”的柔性生产线优化策略。通过重构蒸养与张拉工艺, 构建了兼顾效率与能耗的自动化生产体系。研究表明: 采用节能蒸养模式节能一与节能二可使单梁蒸养成本分别降低21%、40.7%, 其节能二可使五年累计节约成本达251.4万元; 二次张拉工艺结合低温蒸养可有效提升生产效率并保障结构安全。为梁厂柔性、低碳生产提供了可行的技术路径与经济性参考。

关键词: 柔性生产线; 预制梁板; 能耗优化; 蒸养; 二次张拉; 经济性

中图分类号: U443.32; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)03-0220-05

Optimization of Beam Slab Prefabrication Technology Based on Economy

DAI Yuan¹, FU Chenxi², WU Yakun²

(1. Suqian Transportation Integrated Law Enforcement Detachment, Suqian 223800, China; 2. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: To address the challenges of product diversification and cost control in permanent prefabricated beam plants, a flexible production line optimization strategy characterized by “upward compatibility and downward modification” based on the existing equipment is proposed. By re-engineering the steam curing and tensioning processes, an automated production system that balances efficiency and energy consumption is established. The results demonstrate that adopting the energy-saving steam curing modes (energy-saving I and II) can reduce the beam curing cost of single beam by 21% and 40.7%, respectively, and its energy-saving II can save a cumulative cost of 2.514 million yuan over five years. The secondary tensioning process combined with low-temperature steam curing can effectively enhance the production efficiency and ensure the structural safety, which provides a viable technical pathway and economic reference for the flexible and low-carbon production of beam plants.

Keywords: flexible production line; prefabricated beam slab; energy consumption optimization; steam curing; secondary tensioning; economy

0 引言

桥梁工业化是我国桥梁工程建造的必然趋向之一, 而标准化设计、流水式布局、智能化设备、信息化管理、装配式施工以及全过程监控是桥梁工业化建造的重要特征^[1]。工业化智能建造在房屋建造行业发展较快, 但在公路桥梁工业化的应用有待提升。限制桥梁工业化的快速发展因素主要包括: 公路桥梁整体性能要求高、预制厂前期建设投入成本大、施工企业资质要求高以及预制构件生产、运输与安装成本较高等。

目前, 预制厂的生产建设与其成本控制问题, 已

在学术界与工程界获得广泛关注, 并积累了一定的研究成果。徐桂平^[2]介绍了某市政桥梁综合性预制构件厂建设, 主要包括预制厂选址、各功能区规划、关键设备选型等内容。李长春等^[3]结合预应力混凝土轻型T梁结构特点, 详细介绍了预制厂建设的选址要求、主要生产设备、产能规划、生产线布置以及各功能区生产布局等内容。刘晶晶等^[4]针对不同工作效率的生产设备, 将最低完成时间为目的, 采用了混合果蝇优化算法和遗传算法, 处理柔性车间不同工序之间的生产调度问题。王佳怡等^[5]结合生产车间制造过程的实际情况, 最小完成时间与最小机器能耗为目的, 设计了基于优化遗传算法的生产调度模型。常春光等^[6]根据预制构件生产特点, 提出了采用差分算法的装配式构件生产总价控制模型。熊福力等^[7]探讨了预制构件多条生产线同时生产的资

收稿日期: 2025-10-21

作者简介: 戴园(1985—), 男, 硕士, 工程师, 从事公路工程建设管理工作。

源配置与调度等问题,在有限的资源下,为预制厂实现合理、高效生产提供生产依据。

上述研究为预制厂生产调度、资源优化配置与成本控制研究提供了一些理论基础,关于基于经济性的预制构件生产线优化配置研究依然较少。本文依托盐城某预制工厂,在原设备资源基础上,开展柔性生产线适应多样产品生产需求的研究,对比分析了不同蒸养工艺、二次张拉工艺的经济效益,为梁厂布局提供了合理方案。

1 背景项目

本项目依托盐城智能建造产业园,其生产线可用的区域为 200 m × 83 m。根据小箱梁生产工艺流程,将自动化生产功能区划分为:钢筋制造安装区、混凝土运输浇筑区、养护区、张拉提梁区^[8-9]。

钢筋绑扎区:用于钢筋的吊装或将回路上的移动台座横移到生产线上。

混凝土浇筑区:经上道工序完成吊装腹板钢筋后移模至本区,本区需要完成合模、吊装顶板钢筋、浇筑混凝土。浇筑完成,静停、脱模。当强度满足纵向移梁强度后移梁至养护区。

蒸养区:把梁体纵向移动到固定式养护室内部,智能养护系统可根据工艺数据自行进行设计温控曲线,实现自动调整温度与湿度。到达要求强度后移梁至张拉提梁区。

张拉、提梁区:进行张拉、提梁至临时存梁区。或将生产线上的移动台座横移到回路。

考虑到桥梁工程中小箱梁常用跨径一般在 25~40 m 范围内,为满足公路小箱梁的自动化生产需求,在进行小箱梁自动化生产功能区规划时,按照 40 m 公路小箱梁的生产需求进行布置。由于场地平面尺寸限制及小箱梁外形尺寸限制等原因,生产线应按直线型设计,各生产区的功能分区见图 1。

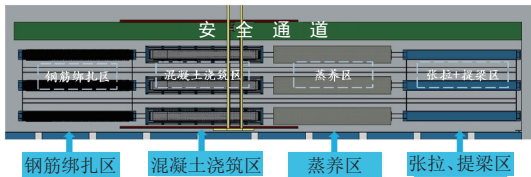


图 1 自动化生产线

2 可调柔性生产线设计

2.1 柔性生产线研究现状

永久性梁厂常面临因工程需求变化而切换产品

类型的挑战,这对生产线的改造适应性提出了要求。然而,生产线装备定制化程度越高,其产品兼容范围也越小。

在建筑方面,构件的外形、尺寸、构造具有较高的一致性,预制件在尺寸上相仿,其工位大小提前按照最大板进行考虑,是可以兼容各种不同尺寸板的制作。桥梁自动化生产线产品切换可以参考以上研究思路。

2.2 柔性生产需求分析

2.2.1 自动化生产线特点

“工厂自动化生产线技术”核心在于实现装配式箱梁的工厂化智能流水作业。其通过整合智能机器人钢筋加工、混凝土轨道运输与浇筑以及结合自动化智能控制系统,构建了一套覆盖各生产环节与整体工序的自动化生产线成套技术。技术特征体现在:

(1)自动化控制程度高。按照工序流程,进行台座就位、模板安装、混凝土运输浇筑、振捣、蒸养、预应力张拉、压浆、移梁等生产施工。

(2)全程数据信息化智慧管控。对施工各工序材料参数、设备设置参数、流水节拍等一系列过程参数存储至系统数据库,在施工过程中,与设计参数有偏差的数据提示预警。

(3)技术先进,可复制、易推广。预制厂采用标准化设计、自动化生产、智能化管控,具有高效、标准、优质的特点,具有较大的推广应用价值。

2.2.2 产品范围分析

根据预制厂场地尺寸限制,共布置两条小箱梁生产线分别用于常规 25~40 m 跨径正交小箱梁、25~40 m 跨径斜交小箱梁的预制生产。生产线可用于 20 m 空心板梁生产,以及不同跨径 T 梁生产。

2.3 柔性生产线架构

2.3.1 调节原则

预制厂设计以精益生产为目标,做到合理布局、流畅高效、安全经济。

(1)运输快捷:流水化设计、多机联动、自动化生产运输。

(2)距离最优:各工序线运、无交叉,减少吊装移运。

(3)工位平衡:各工序资源配置合理均匀,减少工位等待与空缺。

(4)安全合规:设备安装、高压蒸汽条件下元件保护,要符合相关法规规程,进行合规安装布局;模

台运行,物体起运要设安全保险装置。

(5)经济合理:满足小批量产品预制,厂区设备与空间做到物尽其用^[10]。

(6)柔性生产:生产线预留柔性发展空间。

2.3.2 向上兼容设计

柔性生产线向上兼容方法为钢筋可在其他工位绑扎后运输至浇筑工位。对于生产线而言,常用梁长布局的总长度 L 为:

$$L = ML_1 + ML_{1,2} + ML_2 + ML_{2,3} + ML_3 + ML_{3,4} + ML_4 \quad (1)$$

式中: ML_1 为钢筋绑扎区长度; $ML_{1,2}$ 为钢筋绑扎区与混凝土浇筑区之间工位间隙; ML_2 为混凝土浇筑区长度; $ML_{2,3}$ 为浇筑区与蒸养区之间工位间隙; ML_3 为蒸养区长度; $ML_{3,4}$ 为蒸养区与张拉区之间工位间隙; ML_4 为张拉区长度。

对于拆解钢筋绑扎区、压缩作业空间后,总长度 L 可描述为:

$$L = XL_1 + XL_{1,2} + XL_2 + XL_{2,3} + XL_3 \quad (2)$$

式中: XL_1 为混凝土浇筑区长度; $XL_{1,2}$ 为浇筑区与蒸养区之间工位间隙; XL_2 为蒸养区长度; $XL_{2,3}$ 为蒸养区与张拉区之间工位间隙; XL_3 为张拉区长度。

对于钢筋绑扎区域取消、工位间隙压缩带来的场地长度增加,与主梁长度具有以下关系:

$$\begin{aligned} & ML_1 + \sum_{i=1}^3 (ML_{i,i+1} - XL_{i,i+1}) = \\ & ML_1 + (ML_{1,2} - XL_{1,2}) + (ML_{2,3} - XL_{2,3}) + ML_{3,4} - 0 \quad (3) \\ & = 3 \times (GL_x - GL_m) \end{aligned}$$

式中: GL_x 代表最大规格梁长; GL_m 为一般规格梁长。

2.3.3 向下兼容设计

柔性生产线适应较小梁长构件生产,由于浇筑区装备设施比较固定,可优先考虑增加蒸养工位的策略,总长度可描述为:

$$L = SL_1 + SL_{1,2} + SL_2 + SL_{2,3} + n \times SL_3 + (n-1)SL_{3,3} + SL_{3,4} + SL_4 \quad (4)$$

式中: SL_1 为钢筋绑扎区长度; $SL_{1,2}$ 为钢筋绑扎区与混凝土浇筑区之间工位间隙; SL_2 为混凝土浇筑区长度; $SL_{2,3}$ 为浇筑区与蒸养区之间工位间隙; SL_3 为蒸养区长度; $SL_{3,3}$ 为蒸养区工位间隙; $SL_{3,4}$ 为蒸养区与张拉区之间工位间隙; SL_4 为张拉区长度。

对于式(4),若 $n \geq 3$,则意味着可以腾出多余的蒸养工位;假如 $n=3$ 时,不用坚持1个浇筑工位与3个蒸养工位的模式,可以采用2个浇筑工位与2个蒸养工位的模式。

3 基于经济性的生产能耗分析

3.1 二次张拉工艺

3.1.1 工艺原理

小箱梁的预制生产中采用二次张拉技术,前期工序涵盖钢筋加工绑扎、孔道与预埋件定位、模板支立、混凝土拌合与浇筑振捣,随后进行蒸汽养护与拆模。此后进入预应力施工阶段,首先完成第一阶段预应力张拉,并将梁体调离台座进行自然养护;待条件满足后,开展第二阶段预应力作业,包括清孔、穿筋、终张拉、压浆料制备与孔道灌浆;最终通过封锚处理与成品验收。具体二次张拉工艺见图2。

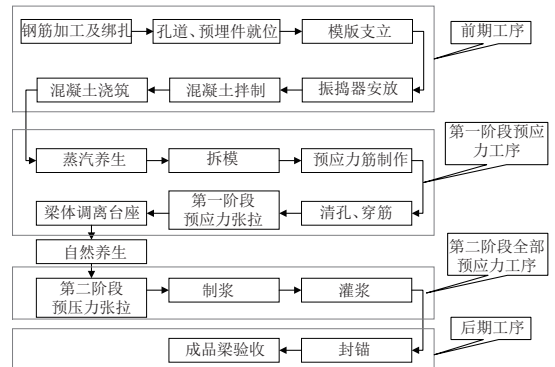


图2 二次张拉工艺流程图

3.1.2 效率分析

若想达到1 d一片梁的生产效率,则也需要采用蒸汽养生工艺,使梁体强度达到初步可以张拉的水平。

采用30 m小箱梁进行试算,计入1.1冲击力自重及钢束张拉50%工况下主梁应力。在该工况下,上缘有5.3 MPa压应力,下缘有1.1~2.2 MPa压应力,应力水平较低。根据《公预规》^[11]7.2.8,在短暂工况下,需满足如下规定:

$$\sigma'_{cc} \leq 0.70f'_{ck} \quad (5)$$

换算为强度指标时:

$$f'_{ck} \geq \sigma'_{cc}/0.70 \quad (6)$$

由此可见,混凝土抗压强度 f_{ck} 需大于7.6 MPa。另一方面,需要对锚下应力进行控制,考虑到钢束张拉力为设计值的50%,则梁体强度高于设计强度的50%,即需要达到25 MPa,方可保障局部受力安全。蒸养工艺可采用更为节能的方式,扣除浇筑等作业时间,建议蒸养时间按18 h考虑。

3.2 低能耗工艺建立

3.2.1 能耗计算

蒸养包括预养、升温、恒温及降温^[12]。构件预养时产生一定强度,可防止高温裂缝。升温速率受模

板、预养时长、混凝土干硬度等因素影响^[13-14]。其中,蒸养环节,密封养护温度为 40℃,带模养护温度为 30℃,脱模养护温度为 20℃。

(1)加热混凝土所需的热量计算:

$$Q_1 = \rho c V (T_h - T_0) \quad (7)$$

式中: Q_1 为所需热量,kJ; ρ 为混凝土密度, kg/m^3 ; c 为混凝土比热容, $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$; V 为混凝土体积, m^3 ; T_h 为混凝土恒温蒸养温度, $^\circ\text{C}$; T_0 为混凝土浇筑完成后温度, $^\circ\text{C}$ 。

(2)加热模板和保温层所需的热量计算:

$$Q_2 = G_1 c_1 (T_h - T_a) + G_2 c_2 (T_h - T_a) \quad (8)$$

式中: Q_2 为加热模板和保温层所需的热量,kJ; G_1 为模板重量,kg; G_2 为保温层重量,kg; c_1 为模板比热容, $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$; c_2 为保温层比热容, $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$; T_a 为环境温度, $^\circ\text{C}$ 。

(3)周围环境中散失的热量

$$Q_3 = 3.6AKt_1\omega(T_p - T_a) + 3.6AKt_2\omega(T_h - T_a) \quad (9)$$

式中: Q_3 为环境散失热量,kJ; A 为表面积, m^2 ; K 为传热系数, $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$; ω 为透风系数,无量纲; T_p 为混凝土平均温度, $^\circ\text{C}$; t_1 为升温时长,h; t_2 为恒温(最高温)时长,h; 系数 3.6 用于将单位瓦时($\text{W} \cdot \text{h}$)转换为单位千焦(kJ)。

(4)蒸汽充满自由空间的耗热量

$$Q_4 = \gamma V_s \quad (10)$$

式中: Q_4 为蒸汽耗热量,kJ; γ 为蒸汽热容量, kJ/m^3 ; V_s 为空间体积, m^3 。

(5)蒸汽用量

$$G_z = \frac{(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4)\beta}{\chi} \quad (11)$$

式中: G_z 为蒸汽用量,kg; β 为损伤系数; χ 为蒸汽含热量, kJ/kg 。

3.2.2 工艺能耗分析

为保证小箱梁预制生产的效率,应采用蒸汽养生产设备进行养护^[15]。现对天然气锅炉容量进行计算,计算过程如下:

(1)蒸养能耗测算指标

a. 设定室温 20℃,蒸养温度 60℃;

b. 蒸发 1t 水需热量 64 万大卡;

c. 1 m^3 天然气燃烧释放热量 8 200 大卡;即蒸发 1 t 水需 78 m^3 天然气;

d. 混凝土比热容为 0.92 $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$; 1 大卡=4.18 kJ;

e. 一榀 40 m 箱梁重量为 63.07 $\text{m}^3 \times 2\,600 \text{ kg}/\text{m}^3 =$

164 000 kg;

(2)一榀 40 m 小箱梁从 20℃→60℃,需热量:

164 000 $\text{kg} \times (60^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \times 0.92 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K} \div 4.18 \text{ kJ}/\text{大卡} = 144.4 \text{ 万大卡}$ 。

(3)锅炉容积计算

a. 根据蒸汽生产工艺及蒸养升温速率不大于 15 $^\circ\text{C}/\text{h}$,设定 3 h 把梁体从 20℃升温至 60℃;

b. 环形生产线每天生产 8 榀箱梁,理论上同时处于升温过程的梁体数量为 $8 \div 3 = 2.67$ 榀,考虑到生产安排的离散型和一定的安全系数,同时处于升温过程的梁体设定为 3 榀;

c. 每小时需热量: 144.4 万大卡 $\times 4 \text{ 榀} \div 3 \text{ h} = 192.5 \text{ 万大卡}$;因蒸发 1 t 水=释放热量 64 万大卡,即每小时需蒸发水量为 $192.5 \text{ 万大卡} \div 64 \text{ 万大卡}/\text{t} = 3.0 \text{ t}$;

d. 升温过程以外的保温梁板需要热量暂定为升温梁板的 20%,蒸养锅炉热效率 80%。则每小时需蒸发水量为 $3.0 \text{ t} \div 80\% \times (1 + 20\%) = 4.5 \text{ t}$,即:需要蒸发量为 4.5 t/h 的锅炉。因此,选定锅炉容量为 4.5 t。

最后,为满足 40 m 跨径小箱梁的养护需求,宜选用的蒸养箱尺寸为 41 m $\times$ 3.5 m $\times$ 3.8 m 保温蒸养箱。蒸汽管道布置为:蒸养箱两边各一条,蒸汽出口离地高度 1.3 m,蒸汽出口间距 1 m,靠近蒸养箱壁布置。

3.3 经济分析

3.3.1 蒸养能耗分析

考虑高效蒸养与节能蒸养两种模式,为达到同等蒸养效率,对场地的需求不同。一般高效蒸养,最高温度达到 65℃,小箱梁蒸养时长一般是 24 h,此时按照一个蒸养工位考虑即可。

根据国内相关厂家调研,若将温度降低为 45℃,高温时长为 12 h,则需要经历 2 个蒸养周期加 8 h 静停,可考虑两个工位同时蒸养;若进一步减少高温时长,则需要经历 2 个蒸养周期加 16 h 静停,可考虑三个工位同时蒸养,一个工位静停养护。

3.3.2 经济效益分析

虽然蒸养能耗降低,但相应的用地成本将会增加,以 30 m 小箱梁为例,分别计算成本消耗,见表 1。对于一片梁,见图 3,高效、节能一、节能二的蒸养成本分别为 7 208.5 元、5 695.6 元、4 271.7 元,采用节能蒸养模式节能一与节能二可使单梁蒸养成本分别降低 21%、40.7%。

用地成本方面,以盐城为例,根据 2022 年 5 月份的挂牌价格,工业用地 276 887 m^2 ,价格为 5 857.76 万元,每平方折合价为 211 元。

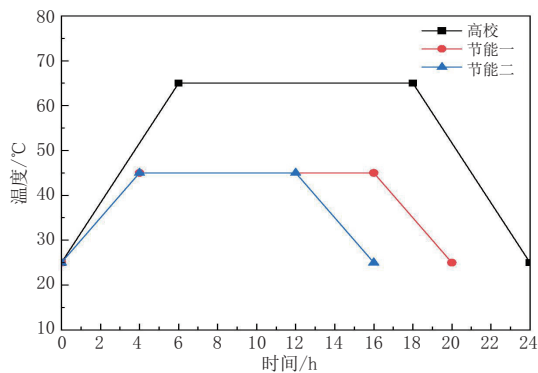


图3 蒸养效率及周期考虑

表1 一片梁成本计算表

项目	高效	节能一	节能二
每小时热量/万大卡	83.3	41.6	41.6
等效时长/h	18	16	12
一次升降温热量总计/ 万大卡	1 498.9	666.2	499.6
一片梁热量总计/ 万大卡	1 498.9	13 32.3	999.2
计入损耗热量总计/ 万大卡	2 023.5	1 598.8	1199.1
蒸发水量/t	31.6	25.0	18.7
燃烧生物质/t	7.9	6.2	4.7
蒸养成本/元	7 208.5	5 695.6	4 271.7

经计算,在节能一的模式下,生产43片梁,节约费用与用地成本增加费用相当,节能二的模式下,生产44片梁,节约费用与用地成本增加费用相当。

若以一条生产线每年生产150片梁,则逐年累计的节约费用见表2,5年后的节能一与节能二的累计节约成本分别达到129.7万元、251.4万元,经济效益显著。

表2 单条生产线的成本核算

项目	节能一	节能二
用地面积增加/m ²	306	612
用地成本增加/元	64 566	129 132
蒸养成本/元	-1 512.9	-2 936.8
折算梁片数/片	42.7	44.0
一年累计节约成本/万元	20.8	39.9
三年累计节约成本/万元	75.2	145.7
五年累计节约成本/万元	129.7	251.4

4 结 语

基于梁厂建设运行成本考虑,研究自动化生产线关键的工效设计方法,重点研究了蒸养工位与蒸养效率的问题,早龄期部分张拉、足龄期补张的二次

张拉策略,为梁厂建设提供了多样化的参考方案;现得到以下结论。

(1)提出并构建了“向上兼容、向下改造”的柔性生产线架构,实现了多规格梁板的高效适配生产;

(2)通过优化蒸养工艺,节能模式(节能二)较传统模式单梁蒸养成本降低40.7%,具备显著经济性与环保效益;

(3)二次张拉工艺结合低温蒸养可在保障结构安全的前提下提升生产效率,适用于高强度节拍生产;

(4)建立了基于能耗最小化的蒸养工艺计算模型,为预制梁厂节能设计与运行提供理论依据;

(5)研究成果可为永久性梁厂的柔性化、智能化升级提供技术支撑与经济性评估参考。

参考文献:

[1] 孙策.城市桥梁预制装配化绿色建造技术应用与发展[J].世界桥梁,2021,49(1):39-44.

[2] 徐桂平.市政桥梁预制构件厂规划设计研究[J].城市道桥与防洪,2018(8):231-234.

[3] 李长春,郝艳海.智能化预制梁厂功能区布局及优化设计[J].建筑施工,2023,45(6):1199-1202.

[4] 刘晶晶,刘业峰,黎虹.基于混合果蝇-遗传算法求解柔性作业车间调度问题[J].计算机测量与控制,2020,28(12):227-232.

[5] 王佳怡,潘瑞林,秦飞.改进遗传算法求解柔性作业车间调度问题[J].制造业自动化,2022,44(12):91-95.

[6] 常春光,韩梦瑶.基于差分算法的装配式构件生产成本控制[J].科学技术与工程,2020,20(13):5327-5331.

[7] 熊福力,张杏,曹劲松,等.预制构件并行生产线资源配置与生产调度集成优化[J].控制与决策,2022,37(9):2399-2406.

[8] 刘攀攀.基于工业机器人的桥梁预制构件智能建造实践[J].城市道桥与防洪,2025(2):161-166.

[9] 徐赛英.桥梁预制拼装全过程数字化施工管理研究[J].城市道桥与防洪,2025(1):174-177.

[10] 刘超,王新慧,王鑫超,等.多品种自动化流水线铸造生产的防错技术与管理[J].中国铸造装备与技术,2021,56(2):59-63.

[11] JTG 3362—2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

[12] 陈前融.连续梁桥短线预制阶段施工线形控制系统研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.

[13] 黄琛,吴庆雄,王承罡,等.蒸养预制PC箱梁的有效预应力研究[J].公路,2024(11):205-210.

[14] 韩建民.蒸汽养生在箱梁预制中的应用[J].公路交通科技:应用技术版,2012,8(9):298-299.

[15] 方爱斌,朱敏涛.不同预制构件生产线生产工艺及能耗指标分析研究[J].混凝土,2021(1):127-131.