DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260532

交通枢纽装配式预制箱梁成本管控及优化策略研究
——以洋山港集疏运工程为例

陆经纬
[上海城建市政工程(集团)有限公司,上海市 200032]

摘 要: 针对装配式预制箱梁工程普遍存在技术与经济脱节、成本管控粗放等问题,依托洋山港集疏运工程预制小箱梁项目开展成本管控与优化研究。结合项目204片预制箱梁全周期生产数据,综合运用盈亏平衡分析、PAF质量成本模型、LEC安全评价法、OEE设备综合效率模型,从场地规划、产能匹配、资源配置、质量管控、安全风险量化5个维度构建精益化成本管理体系。实践表明,该管理模式实现产能与施工进度动态匹配,设备综合效率达86.5%,有效降低隐性成本、返工成本与安全损失。相关优化策略可为同类大型交通枢纽装配式预制构件工程降本增效、提质保安全提供实践参考。

关键词: 工程经济管理;预制箱梁;成本控制;质量成本;风险量化
中图分类号: U445.1;TU997 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2026)11-0384-05

Research on Cost Control and Optimization Strategies of Prefabricated Box Girders in Transportation Hubs: A Case Study of Yangshan Port Collection and Distribution Project

LU Jingwei
[Shanghai Urban Construction Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai 200032, China]

Abstract: Aiming at the problems of disjointed technology and economy and extensive cost management in prefabricated box girder projects, the cost control and optimization are studied based on the precast small box girder project of Yangshan Port collection and distribution project. Combined with the full-cycle production data of 204 precast box girders, a lean cost management system is constructed from five dimensions of site planning, capacity matching, resource allocation, quality control and safety risk quantification by comprehensively applying break-even analysis, PAF quality cost model, LEC safety assessment method and OEE equipment comprehensive efficiency model. The practice show that the management mode realizes the dynamic matching between production capacity and construction progress with the overall equipment effectiveness reaching 86. 5%, and effectively reduces the hidden costs, rework costs and safety losses. The relevant optimization strategies can provide practical references for reducing costs, increasing efficiency, improving quality and ensuring safety in similar prefabricated component projects of large-scale transportation hub.

Keywords: engineering economic management; prefabricated box girder; cost control; quality cost; risk quantification

0 概 述

随着我国交通强国战略深入实施,大型港口与内陆交通网的互联互通建设工程日益增多。洋山港水公铁集疏运系统—集疏运中心(陆域)工程项目(1标)作为智慧港口新型基础设施建设的标杆[1-2],创新性地采用了全自动化轨道吊与智能集卡双层立体交通的作业工艺。在该项目中,装配式预应力混凝土小箱梁作为桥梁上部结构的核心承载构件[3-4],其预制与架设是整个高架路网建设的重中之重。然而,当前大型预制构件工程的经济管理普遍存在“重进度、轻核算”或“技术与经济相脱节”的痛点。传统粗放式管理往往导致场地盲目扩张增加租赁成本、产能不匹配造成半成品积压或前端窝工、过度依赖人工导致质量不稳定从而引发高昂的返工故障成本[5-7]。面对微利时代的建筑市场,如何从工程技术的底层逻辑出发,用经济学原理重塑项目管理流程,已成为项目管理者必须攻克的课题。

本研究旨在通过深入剖析洋山港项目的实际工

收稿日期:2026-05-31
作者简介:陆经纬(1990—),男,本科,工程师,从事工程经济相关的技术研究。

程数据,构建一套涵盖场地选址、产能匹配、资源调度、质量预防及风险量化的五维经济管理模型,为行业提供高水平的工程经济管理实践参考。

1 项目概况与经济管理重难点分析

1.1 项目技术与经济特征概述

本项目涉及的预制小箱梁主要为 24 m 及 25 m 跨径的标准构件,分简支小箱梁及简支变连续小箱梁两种结构形式[8-9]。梁高统一为 1.6 m,采用斜腹板断面及单箱单室结构设计。其构造特点表现为:挑臂端部及根部厚度为 25 cm;腹板厚度在标准段为 19 cm,至支座断面处加厚至 32 cm;底板厚 20 cm,支座断面处加厚至 30 cm;顶板厚 25 cm。这种变截面设计虽然在力学性能上实现了材料强度的最优利用,但也为钢筋绑扎、模板定制与拼装、混凝土浇筑与振捣带来了较大的施工难度。从经济角度看,变截面意味着局部非标准化模板增加,以及对作业人员熟练度要求提高带来人工成本上升的潜在风险。

1.2 项目经济管理面临的核心挑战

(1)工期极度压缩与资金占用的矛盾。本项目小箱梁预制计划开始时间为 2022 年 3 月 31 日,全部完成时间要求在 2022 年 8 月 1 日。在短短百余天内完成 204 片大型预应力构件的生产,若盲目扩大生产线,将导致台座建设与模板采购等固定资产投资剧增,严重稀释项目利润。

(2)高质量标准与成本控制的博弈。小箱梁作为生命线工程的承重构件,其各项实测项目(如断面尺寸允许偏差、混凝土强度、张拉应力值等)均有严苛的规范限制。若发生预应力筋滑脱、波纹管堵塞、锚固区混凝土爆裂等质量通病,将产生高昂的返工、报废等内部故障成本。

(3)特种设备与高空重载作业的安全与经济风险。预制场内大件吊装频繁,最大箱梁重量达 122 t。一旦发生龙门吊倾覆、钢丝绳断裂坠物等重大安全事故,不仅会面临巨额的直接经济赔偿与行政罚款,更会导致工程全面停摆,产生无法估量的间接经济损失。

2 施工场地规划与基础设施建设的隐性成本控制

2.1 土地资源的经济化选址与布局优化

在寸土寸金的上海临港新片区,获取临时建设用地的经济代价高昂。为从源头实现成本增益,项目部经过多轮现场踏勘与经济可行性分析,作出利用同盛物流园区内预留地建设梁场的决策,且建设范围全部位于工程红线之内。这一决策直接免除了红线外临时用地的租赁费用、征地协调成本以及后期的土地复垦费用。该场地总占地面积约 14 840 m^2(折合约 1.48 hm^2),在有限的空间内,项目部对场内物流动线进行了深度优化,场地被科学划分为钢筋加工场、制梁生产区、存梁区三大功能区块。钢筋从进场、锯切、弯曲到绑扎成型,再到吊装入模,形成了最短直线距离的单向流水线,极大降低了场内材料二次倒运所消耗的机械台班费与人工搬运费。

2.2 预制台座地基处理的技术经济比选

预制台座是梁场最核心的基础设施。若地基承载力不足导致不均匀沉降,将直接引起箱梁在预制过程中开裂报废。然而,若采取过度保守的地基处理方式(如满堂打设管桩),则会造成巨大的沉没成本。项目部通过技术经济比选,确定了“原土开挖 30 cm,用碎石+8% 水泥掺量回填”的换填压实方案。结构设计严格要求总沉降量控制在 2 mm 范围内。在实际投入使用后,预制台座的最大沉降量仅为 0.8 mm,达到设计预期。这种处理方式在确保地基安全冗余的前提下,将地基处理费用压缩至最低。此外,针对预应力筋张拉后梁体中段起拱、两端压力剧增的力学特性,台座两端承重区域进行了特殊加强处理。台座顶面铺设了 8 mm 厚钢板,并按梅花形布置、间距 50 cm 锚固,槽钢与钢板之间采用牢固焊接。这种基于全寿命周期成本(LCC)理念的设计[10-11],虽小幅增加了初期的材料投入,但彻底杜绝了后期生产中钢板起拱、脱落带来的频繁停工维修成本。

2.3 存梁区与起重设备基础的经济性设计

存梁区的规模决定了预制场的缓冲能力。基于实际场地条件,存梁区台座中心间距设定为 22 m,共设置 45 个台座。考虑到场地的局限性,项目采用了可叠放 2 层的存梁方案。这一设计在不增加占地面积的情况下,使存梁容量翻倍,满足了在不架梁极端情况下连续正常生产 30 d 的需求,大幅提升了场地的经济利用率。龙门吊基础作为重载移动设备的承载体,其经济性设计同样关键。项目对龙门吊基础进行了 50 cm 换填,轨道基础采用宽度 70 cm、高度 70 cm 的 C30 钢筋混凝土。这种适度冗余的设计有效避免了轨道沉陷导致的设备磨损和行车安全事故,降低了长期的设备维保费用。

3 产能核算与进度管理的经济匹配

3.1 基于工艺周期的极限产能核算

盲目追求高产能会导致模具、台座、设备的过度投资。项目部首先对箱梁生产的工艺周期进行了科学界定：考虑到钢筋绑扎、模板支拆、混凝土浇筑、养护及龄期要求，设定了10 d的标准工艺龄期。根据单条生产线的配置，计算出每天最大产能为2片。按照每月有效施工时间26 d计算，梁场每月的最大绝对产能为52片。在2022年3月20日—8月1日共计114 d的有效施工期内，整个梁场的理论最大产能计算为204片。这一数值与全桥设计的204片预制任务量完全一致，实现了生产线满负荷运转，避免了产能过剩导致的固定资产闲置浪费。为验证产能配置的经济性，引入产能利用率模型与盈亏平衡模型进行量化计算[12-13]。模型计算公式见式(1)、(2)。计算结果见图1。

$$\eta = \frac{Q_a}{Q_{max}} \tag{1}$$

式中：η为产能利用率；Q_a为实际产量；Q_{max}为理论最大产能。

$$Q_0 = \frac{F}{P - C_v} \tag{2}$$

式中：Q_0为盈亏平衡产量；F为固定成本总额；P为预制箱梁单位合同单价；C_v为预制箱梁单位可变成本。

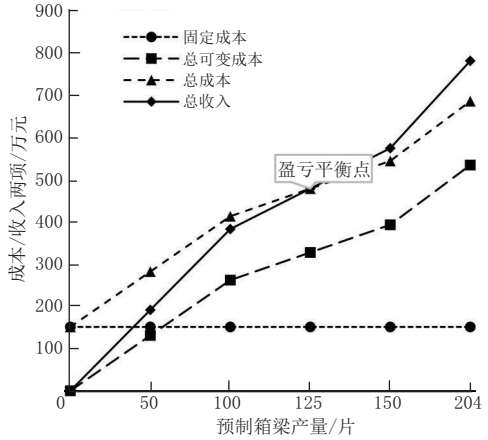


图1 预制箱梁产量—成本—盈亏平衡分析图

经盈亏平衡模型计算，项目盈亏平衡产量为125片，本项目实际产量204片，大于盈亏平衡产量，实现盈利，产能配置经济合理。

3.2 生产端与吊装端的“零库存”

在工程实践中，预制场的生产速度必须与前端架梁设备的吊装速度高度契合。若生产快于吊装，会导致存梁区积压，资金大量沉淀在半成品上；若生产慢于吊装，则会导致昂贵的架桥机及庞大的安装班组窝工，每日的误工费数以万计。本项目通过严密的工期测算，得出吊装阶段平均每天吊装能力为2片。在实际吊装的113 d内，总吊装消耗量为226片(113×2=226)，完全能够覆盖且略大于114 d内制梁生产的204片产量。这种生产力与安装产量的动态匹配，考虑了吊装期间可能存在的制约因素缓冲，确保了产品“下线即出场”，将成品库存成本和积压资金利息降至最低。

4 资源配置优化与直接成本核算

4.1 机械设备配置的经济效能最大化

大型起重设备是梁场运行的核心，也是成本支出的重头戏。本工程最大箱梁重量约为122 t。在设备的经济比选中，项目部摒弃了昂贵的超大型单一吊装设备，而是选择了一台额定起重量200 t(100+100 t)的跨径龙门吊作为核心移梁设备，其安全系数储备充足。同时，为防止“大马拉小车”造成的机械台班费浪费，项目部配套增设了2台16 t同跨径龙门吊。在日常作业中，16 t龙门吊主要负责模板的分节就位拼装、钢筋骨架的整体入模吊装以及混凝土料斗的喂料等轻量化、高频次辅助工作。这种“主辅搭配、高低错落”的设备矩阵配置，大幅提高了机械综合利用率，降低了整体设备租赁与能源消耗成本。为定量评价设备配置合理性，采用设备综合效率(OEE)模型[14]进行计算，见式(3)。

OEE = 时间利用率 × 性能利用率 × 合格品率 (3)

式中：OEE为设备综合效率；时间利用率为实际运行时间/计划可用时间；性能利用率为实际产出效率/理论设计效率；合格品率为合格构件数量/总生产构件数量。

通过模型计算，结果表明项目设备综合效率达到86.5%，高于行业一般水平，说明“主辅搭配”的设备配置方案经济高效，具体对比分析如图2所示。

4.2 大宗物资采购与供应链的经济博弈

物资材料费通常占据工程总造价的60%以上。本项目预制所需的C60高性能混凝土达9 588 m^3，各类钢筋(HPB300、HPB400)超2 140 t，预应力钢绞线及波纹管等数量庞大。在混凝土采购供应链管理上，项目部采用成熟的经济博弈策略。经过严密的前期考察与成本核算，项目部不仅与两家供应商签订了合同，还根据运输距离、原材料特性等优化了配

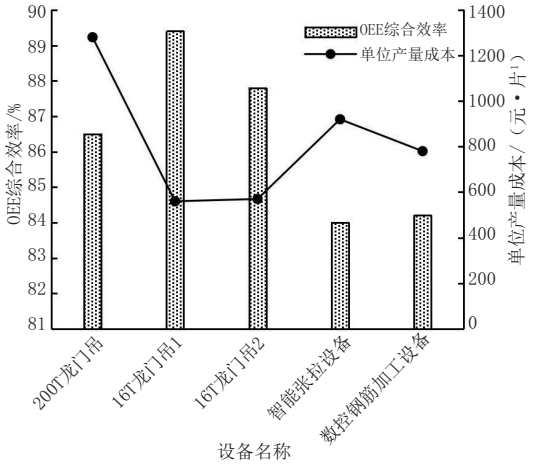


图2　预制梁场主要设备成本—效率—利用率对比分析图

合比。在实际执行中，采取“择优选取一家作为主要供应商，另一家作为备用”的策略。这种机制不仅通过引入竞争促使供应商提供更具性价比的单价与更优质的服务，还从根本上对冲了单一供应商因产能不足或交通限行导致的“断供停工”风险成本。此外，针对钢筋等高价值材料，项目部引入了数控智能化加工设备（如数控钢筋弯曲中心 YHF32 型、数控钢筋弯箍机 YHB12D 等），数控设备的投入虽然增加了机械费，但将钢筋的下料损耗率控制在了最低水平，并通过“凭限额领料单限额发放”的仓库管理制度，从源头遏制了材料的隐性流失与浪费。

5　质量成本管理：以高标准预防换取低故障率

5.1　定型钢模板与高精度工艺的预防成本投入

预制构件的外观质量与几何尺寸精度直接决定了成品的合格率。为此，项目部在模板系统上投入了较高的“预防成本”。所有预制箱梁模板均采用厂家按设计图纸特制的标准化定型整体钢模板，钢板厚度严格要求不小于 6 mm。在侧模设计上，加劲竖梁间距根据翼缘钢筋间距精心设置，且翼缘梳形模板设置加劲肋，负弯矩张拉槽模板内焊 4 根加劲钢筋支撑。在接缝防漏浆处理上，底模与侧模接触面采用了 5 cm×5 cm 矩形槽钢并加装海绵条止浆带，箱梁端头模板与内外模间隙也采用海绵条止浆带或泡沫填缝剂进行严密封堵。这些看似增加耗材与人工的操作，有效解决了混凝土跑模、胀模以及接缝漏浆产生“水波纹”、“蜂窝麻面”的质量通病，避免了后期投入大量人力物力进行表面打磨、修补的高昂内部故障成本。

5.2　智能化张拉与压浆技术对内部故障隐患的削减

预应力施工是小箱梁的核心环节，其质量优劣直接关乎桥梁的承载力与结构寿命。传统的手工张拉与压浆存在较大的人为误差，易导致伸长量不达标、断丝滑丝或孔道压浆不饱满，若造成梁体报废，单片直接经济损失将高达数十万元。项目部果断引入了 2 套智能张拉设备（YCQ-150）和 2 套智能压浆设备（ZNGJ700）。张拉过程采用张拉力与伸长量“双控法”，以应力控制为主，实际伸长值与理论伸长值误差严格控制在±6% 以内。在压浆环节，采用真空辅助压浆工艺，在排浆端启动真空泵使孔道真空度达到 −0.08 ~ −0.06 MPa 后方启动压浆泵。智能化设备的初始资本支出（CAPEX），通过其带来的高合格率、零返工率以及结构耐久性的提升，在全寿命周期内转化为可观的经济红利。

5.3　保护层厚度的精细化控制体系

钢筋保护层厚度不仅是质量检查的硬指标，更是防止钢筋锈蚀、保障桥梁设计寿命的经济防线。项目部摒弃了“垫石子”等违规操作，采用高强度的专用保护层垫块，并严格按照大于 4 块/m^2 的梅花形密度分布。垫块布设分 2 层，并采用 φ10 钢筋穿心焊接固定于底板、腹板钢筋上，确保在混凝土振捣的高频冲击下不发生移位。这种对细节的极致把控，确保每一次报验一次性通过，减少了监理复检带来的时间成本。

6　基于 LEC 评价法的安全风险经济学考量

在工程项目经济管理中，安全事故是吞噬项目利润的最大“黑洞”。一次严重的安全事故不仅会引发巨额的直接赔偿与停工损失，更会对企业的社会信誉造成难以挽回的破坏。因此，前置的安全投入本质上属于高杠杆的经济保值行为。

6.1　危险源的经济学量化评估（LEC 评价法）

本项目创新性地采用了 LEC 评价法[15]，对预制场内的危险源进行半定量的经济与安全评估，具体见式（4）。

$$D = L \times E \times C \tag{4}$$

式中：D 为危险性分值；L 为事故发生的可能性；E 为人员暴露于危险环境中的频繁程度；C 为事故后果的严重性。

根据项目安全评估矩阵，例如“龙门吊横梁与立柱之间螺栓松动”、“轨道上有障碍物”、“轨道连接偏差”等隐患，其 L、E、C 评分分别为 3、3、40，计算得出危险分值 D 为 360，属于“极其危险”级别，一旦发生将造成灾难性的经济与人员损失。针对此类高分值

风险，项目部投入了专项防范资金：在龙门吊上配置超载限制器、极限位置限制器、防台风夹轨钳和锚定装置，同时要求起重作业必须设置安全警戒区，由专职安全员必须全过程旁站监督。相反，对于如“起吊作业夜间无照明”、“施工人员疲劳操作”等 D=27 的“一般危险”，项目部通过日常的管理规范、排班优化和普通照明设施完善开展常规性干预。LEC 法的引入，使得安全管理成本的投入做到了“好钢用在刀刃上”，实现了安全经济效益的最优化。

6.2 应急预案的“保险”经济属性

即便预防再严密，工程现场的突发性风险也无法完全杜绝。项目部构建了详尽的《生产安全事故应急救援预案》。现场不仅规划了清晰的逃生与送医导航路线（如距上海市第六人民医院临港院区车程约 14 min），更投入资金储备了丰富的应急救援器材，包括 60 个灭火器、60 套防毒面罩、1 200 m 安全绳、18 台水泵以及小型发电机等。当面对人员创伤、机械伤害、触电甚至火灾等突发事件时，完善的应急组织（抢险救援组、医疗救护组等）与充足的物资能够实现“先救命、后治伤”，在黄金时间内将事故损失（人员伤亡赔偿、设备毁坏、工期延误）控制在最低。

7 结论与展望

洋山港水公铁集疏运系统—集疏运中心（陆域）工程项目（1 标）的小箱梁预制工程，为大型交通基础设施建设领域，提供了具有参考价值的工程经济管理实战样本。

本文的研究表明，高水平工程经济管理决不能停留在事后的账目核算，而必须前置并深植于工程技术全过程。本项目通过红线内预留地利用与 LCC 地基设计降低前期沉没成本；通过极限产能核算与盈亏平衡模型实现 204 片箱梁产能与吊装进度的动态“零库存”匹配；通过数控化与双供应商机制获取直接资源的经济效能；通过 PAF 质量成本理论，在定型钢模板与智能张拉设备上投入较高的“预防成本”以降低“故障返工成本”；最终，依托 LEC 量化模型与完备的应急投入构筑了有效的安全经济防线。

在建筑市场步入微利时代的今天，只有秉持“技术方案经济化、经济管理技术化”的深度融合思维，以数据驱动决策，以精益管理代替粗放生产，才能在履约保质的同时，实现工程项目经济效益与社会效益的双丰收。本项目的成功实践，可为未来同类大型装配式构件生产项目的现代化、精益化经济管理体系建设，提供可靠的理论依据与工程参考价值。

参考文献：

[1] 邹鹰，郑玉靖. 港口一体化智能绿色集疏运系统架构——以上海洋山港为例[J]. 中国港口，2024（5）：24-28.
[2] 牛建峰. 上海洋山港集疏运系统结构优化[J]. 交通与运输，2025，41（3）：88-92.
[3] 宋剑，雷丹，苗建宝. 装配式预应力混凝土箱梁桥加固方案优选研究[J]. 公路交通技术，2021，37（1）：95-100.
[4] 彭志苗. 装配式部分预应力混凝土小箱梁发展历程[J]. 城市道桥与防洪，2020（5）：59-62.
[5] 倪晗霄. 管理会计视角下制造企业降本增效策略研究——以大型桥梁预制构件生产企业为例[J]. 环渤海经济瞭望，2025（10）：166-168.
[6] 张君武. 论大型预制构件生产的劳动力组织[J]. 铁道建筑技术，2005（3）：32-34.
[7] 罗潇姝. 装配式建筑工程造价管理影响因素及常见问题对策分析[J]. 四川水泥，2024（5）：80-82.
[8] 雷兵. 25 m 预制小箱梁安装施工技术研究——以宗村大桥工程为例[J]. 工程技术研究，2023，8（11）：81-83.
[9] 刘之翔. 简支变连续箱梁桥加固设计优化及施工控制[J]. 工程技术研究，2025，10（17）：192-194
[10] 陈晓川，方明伦. 制造业中产品全生命周期成本的研究概况综述[J]. 机械工程学报，2002（11）：17-25.
[11] 李珂. 制造业企业全生命周期成本控制探讨[J]. 市场周刊，2024，37（2）：146-149.
[12] 孙庆慧，高敏雪. 产能利用率的测算方法与国内研究现状的可视化分析[J]. 调研世界，2021（11）：62-72.
[13] 丁慰国. 盈亏平衡分析方法[J]. 南京航空航天大学学报，1993，25（6）：812-818.
[14] 赵涛，戈猛，赵息. 设备维护与管理中设备效能的评估与测度[J]. 中国机械工程，2001（12）：1436-1439.
[15] 匡轮，陈丽，郭倩倩. LEC 危险性评价法及其应用的再探讨[J]. 安全与环境学报，2018，18（5）：1902-1905.