

输煤钢栈桥设计与施工

石鑫¹ 赵光明² 丁圣潇²

1. 华电郑州机械设计研究院有限公司, 河南 郑州 450046

2. 华电科工股份有限公司, 北京 100070

[摘要] 为满足某火电厂改造项目输煤系统的功能需求, 针对某预应力斜拉钢栈桥展开设计与施工技术研究。钢栈桥采用混凝土桩基承台基础、空间桁架上部结构, 搭配低松弛热镀锌钢丝束钢索形成斜拉体系。通过施工仿真分析确定荷载参数与拉索张拉原理, 采用正装迭代法优化施工阶段拉索张拉力, 划分 14 个施工阶段并核算各阶段杆件应力。施工验算结果表明, 各施工阶段最大应力均控制在规范允许范围内, 最终施加二期荷载后杆件最大应力满足设计要求, 拉索张拉力计算值与目标索力误差较小, 结构受力合理、线型平顺。该研究为大跨度预应力输煤斜拉钢栈桥的设计与施工提供了技术参考, 可保障类似工程的施工安全与结构稳定性。

[关键词] 预应力斜拉钢栈桥; 空间桁架结构; 施工仿真分析; 应力核算

DOI: 10.33142/ect.v4i4.19526

中图分类号: U656.16

文献标识码: A

Design and Construction of Coal Conveying Steel Trestle

SHI Xin¹, ZHAO Guangming², DING Shengxiao²

1. Huadian Zhengzhou Mechanical Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan, 450046, China

2. Huadian Engineering Co., Ltd., Beijing, 100070, China

Abstract: In order to meet the functional requirements of the coal transportation system in a certain thermal power plant renovation project, design and construction technology research is carried out for a prestressed cable-stayed steel wharf. The steel wharf adopts a concrete pile foundation, a spatial truss upper structure, and a low relaxation hot-dip galvanized steel wire bundle steel cable to form a cable-stayed system. Determine load parameters and cable tensioning principles through construction simulation analysis, optimize the cable tensioning force during the construction stage using the forward iteration method, divide into 14 construction stages, and calculate the stress of each stage's members. The construction verification results show that the maximum stress in each construction stage is controlled within the allowable range of the specifications. After applying the second phase load, the maximum stress of the members meets the design requirements. The calculated tension force of the cable has a small error compared to the target cable force, and the structural stress is reasonable and the line shape is smooth. This study provides technical reference for the design and construction of large-span prestressed coal transportation cable-stayed steel wharf, which can ensure the construction safety and structural stability of similar projects.

Keywords: prestressed cable-stayed steel wharf; space truss structure; construction simulation analysis; stress accounting

引言

输煤栈桥是火力发电厂、煤矿等工业领域中承担燃料输送任务的关键结构, 其安全性与可靠性直接影响生产运行的连续性与经济性。随着电力工业的发展与环保要求的提升, 大跨度、高架式、预应力斜拉式输煤栈桥逐渐成为研究与应用的热点, 其结构形式与施工技术亦日益复杂化与精细化。

近年来, 学者围绕输煤栈桥的结构设计、动力响应、

施工仿真、智能监测与加固维护等方面开展了广泛研究。在结构设计方面, 钢结构栈桥因其自重轻、跨越能力强、施工周期短等优势得到广泛应用, 空间桁架、倒三角桁架等新型结构形式在提升受力性能与经济效益方面展现出显著优势。在施工技术方面, 针对斜拉体系的分批张拉与内力控制, 正装迭代法、倒拆法等施工仿真方法被广泛采用, 有效解决了施工过程中的内力重分布与线型控制难题。在动力特性与振动响应方面, 研究表明输煤栈桥在输送机

运行、风荷载等激励下易发生振动,尤其是负载工况下结构响应更为显著,需在设计中充分考虑动力效应与疲劳损伤。在监测与运维方面,智能巡检机器人、无线倾角测量系统、双光谱融合过温预警系统等技术的引入,为栈桥的实时监测、缺陷识别与安全预警提供了智能化解决方案。此外,针对既有栈桥的加固改造、防水防腐、节点抗连续倒塌等方面的研究,为栈桥的长期安全运行提供了技术支持。

然而,目前针对大跨度预应力斜拉钢栈桥的施工全过程仿真与索力控制研究仍相对不足,尤其是在多阶段施工、临时支撑设置、拉索分批张拉等方面缺乏系统性的施工力学分析与验证。为此,本文以某火电厂改造项目中的预应力斜拉钢栈桥为研究对象,通过建立有限元模型,采用正装迭代法进行施工阶段索力优化与应力核算,划分 14 个施工阶段并分析各阶段结构响应,旨在为大跨度斜拉栈桥的设计与施工提供理论依据与技术参考,提升施工安全性、结构稳定性。

1 工程概况

输煤栈桥作为火力发电厂生产运行中重要构筑物,其在保障燃料稳定供应和提升运输效率与安全性方面意义重大。钢结构输煤栈桥由于其自重轻、施工周期短、跨越能力强、安全可靠、造型美观、结构稳定等优势,在国内外的火力发电厂中应用越来越广泛。本研究以国内某火电厂改造项目新增的一条钢结构输煤栈桥为例,根据输煤工艺要求,钢结构栈桥设计参数如下:钢结构栈桥设计总长约为 111.2m,宽为 8.3m,栈桥整体坡度为 4.5° ,栈桥左端桥面距离地面约 27.1m,栈桥右端桥面距离地面约 35.7m,内部设置两路输煤皮带机。输煤栈桥的外墙及屋面均采用复合压型钢板,栈桥桥面采用钢梁、压型钢板做底模的现浇混凝土板结构,设置防滑地砖面层。

2 结构方案

栈桥基础为混凝土桩基承台结构,上部结构钢栈桥采用空间桁架结构,设置两个钢桁架立柱及左右 8 根钢拉索。栈桥 A 段右侧及 C 段的左侧分别与转运站连接,但转运站外侧均不设支座支承栈桥。空间栈桥上下弦平面内均设置水平支撑以增加桁架水平刚度,在栈桥端部及与四腿桁架柱连接处设置截面较大的端框以增加抗扭刚度。经过设计计算及优选,桁架端部端框、上下弦杆、上下横梁和钢桁架四腿柱采用热轧 H 型钢材,材质为 Q355B,栈桥斜向腹杆、上下弦水平支撑、钢桁架四腿柱柱间支撑采用方钢管。钢拉索采用强度级别为 1670MPa 的低松弛热镀锌钢丝束钢索。

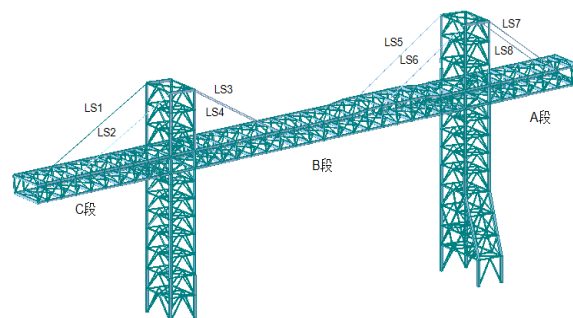


图 1 斜拉钢栈桥三维轴测图

3 施工仿真分析

栈桥拉索的施工阶段分析依据设计人员提供的结构模型进行。该模型的整体坐标系规定为: X 轴为栈桥纵桥向, Y 轴为栈桥横桥向, Z 轴为竖直方向。计算结果的符号规定为: 位移以整体坐标轴指向一致为正, 应力以受拉为正, 轴力以受拉为正, 弯矩的正负号按右手螺旋准则确定。根据施工方提供的施工方案, 该桥施工过程中采用临时支撑措施对部分栈桥段进行临时支撑, 临时牛腿支撑采用只受压的弹性连接来模拟。

3.1 荷载参数

根据模型分别提取各个施工阶段的荷载, 包括自重、拉索张拉力、二期恒载等。在有限元软件中, 结构自重通过取“自重系数”-1.2 实现, 拉索在施工阶段分批张拉, 模拟时以“初拉力荷载”的形式施加给结构, 并在“施工阶段分析控制数据”的“索预拉力控制”选择“体外力”“替换”, 即拉索在相应施工阶段的初拉力荷载为此时拉索的实际张拉力。栈桥自重及二期恒载包括输送机械自重和围护结构的重量。

3.2 栈桥钢索张拉基本原理

栈桥索力的合适与否关系到整个结构体系的受力是否合理、全桥的线型是否平顺。施工前要确定栈桥施工阶段张拉力以及张拉顺序, 以确保施工阶段的结构应力在要求范围内, 保证施工的安全。

斜拉钢结构栈桥节点复杂、安装困难, 且施工过程中结构几何形态、刚度、荷载和边界条件均在发生变化, 栈桥在实际安装中, 拉索往往分批张拉, 后张拉的拉索由于前张拉的拉索所引发的结构变形、内力重分布等效应, 拉索张力受到较大影响, 而前张拉拉索的张力也将受到后张拉拉索的影响。因此, 如果直接按设计成桥索力分批张拉拉索, 将无法实现期望的成桥状态, 即满足设计要求的合理的特征线型与受力状态, 所以必须适当调整施工阶段拉索张拉力。此外, 张拉顺序也对拉索张拉力影响显著。

通常采用倒拆法和正装迭代法确定施工阶段拉索张拉力,本文采取正装迭代法计算施工阶段拉索初张拉力。正装迭代法的原理基于前进分析法,即按照桥梁实际施工加载顺序来进行结构变形与受力分析,通过多次迭代计算,最终使张拉结束后的拉索力与目标索力收敛于某一合理范围,步骤如下。

(1) 迭代 1 次: 设初始张拉力为 F_0^1 , 输入有限元模型, 代入目标索力, $F_0^1 = F_{\text{目标}}$, 计算得到第 1 次拉索初张拉后索力 F_1^1 ;

(2) 迭代 2 次: 取初始张拉力为 $F_0^2 = F_0^1 + (F_{\text{目标}} - F_1^1)$ 并输入有限元模型, 计算得到第 2 次拉索初张拉后索力 F_1^2 ;

(n) 迭代 n 次: 取初始张拉力为 $F_0^n = F_0^{n-1} + (F_{\text{目标}} - F_1^{n-1})$ 并输入有限元模型, 计算得到第 n 次拉索初张拉后索力 F_1^n ;

直到拉索初张拉后索力 F_1^n 与目标索力 $F_{\text{目标}}$ 的差值在某允许范围内, 且整体结构变形、内力等满足规范要求。

3.3 施工流程划分

斜拉钢栈桥施工流程严格遵循结构安装与拉索张拉协同作业原则, 各阶段工序衔接紧密、逻辑清晰。施工过程以钢构件分段吊装为基础, 配合拉索分批初张拉与分级终张拉, 同步完成临时支撑安装与卸载, 确保结构受力平稳转换, 施工流程划分如图 2 所示。

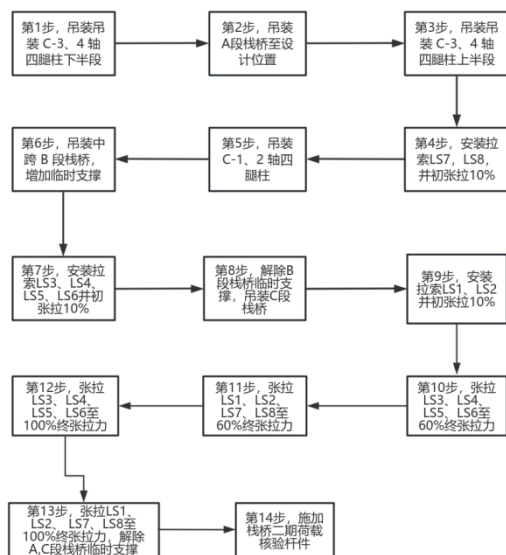


图 2 施工流程

3.4 施工过程杆件应力核算

第 1 施工阶段: 吊装 C-3, C-4 轴钢桁架四腿柱下半段; 计算得到已安装杆件最大应力为 8.30MPa。

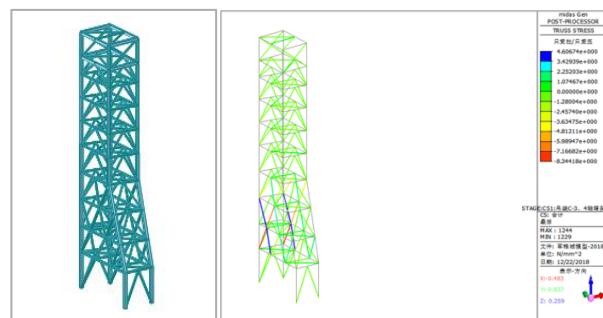


图 3 已安装杆件最大应力计算 1

第 2 施工阶段: 吊装 A 段栈桥, 栈桥左侧与 C-3, C-4 轴钢桁架四腿柱连接、栈桥右侧支撑在转运站伸出的临时牛腿上; 计算得到已安装杆件最大应力为 22.0MPa。

第 3-14 施工阶段采用相同的计算方法, 计算得到已安装杆件最大应力见表 1。

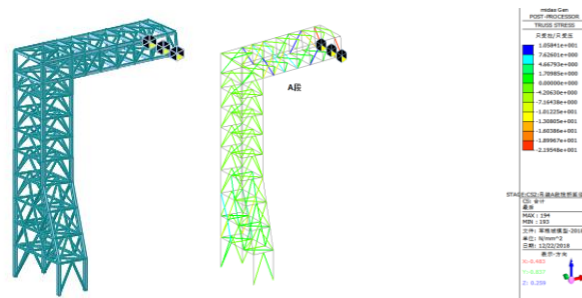


图 4 已安装杆件最大应力计算 2

表 1 钢栈桥施工过程拉索力变化

施工阶段	具体操作	计算得到已安装杆件最大应力/MPa
1	吊装 C-3、C-4 轴四腿柱下半段	8.3
2	吊装 A 段栈桥至设计位置	22.0
3	吊装 C-3、C-4 轴四腿柱上半段	22.1
4	安装拉索 LS7、LS8 并初张拉 10%	20.5
5	吊装 C-1、C-2 轴四腿柱	20.5
6	吊装 B 段栈桥, 增加临时支撑	24.5
7	安装拉索 LS3、LS4、LS5、LS6 并初张拉 10%	31.5
8	解除 B 段栈桥临时支撑, 吊装 C 段栈桥线	32.5
9	安装拉索 LS1、LS2 并初张拉 10%	29.7
10	张拉 LS3、LS4、LS5、LS6 至 100% 终张拉力	38.1
11	张拉 LS3、LS4、LS5、LS6 至 60% 终张拉力	49.8
12	张拉 LS3、LS4、LS5、LS6 至 100% 终张拉力	71.8
13	张拉 LS1、LS2、LS7、LS8 至 100% 终张拉力, 解除 A、C 段栈桥临时支撑	86.7
14	施加栈桥一期荷载核检杆件	102.2

由表 2 钢栈桥施工过程拉索力变化和图 5 可以看出,拉索张力呈现阶段性增长特征:施工初期(1~3 阶段)无拉索张拉,索力均为 0; 4~9 阶段为拉索安装与初张拉阶段,索力逐步提升至终张拉力的 10%; 10~13 阶段为分批张拉阶段,索力分别提升至 60%与 100%终张拉力; 14 阶段施加二期荷载后,索力进一步增长至最终值,符合施工方案与受力规律。

表 2 钢栈桥施工过程拉索力变化

拉索编号	施工阶段													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
LS-1	0	0	0	0	0	0	0	0	43	120	257	277	429	899
LS-2	0	0	0	0	0	0	0	0	43	121	257	277	429	899
LS-3	0	0	0	0	0	0	44	75	96	266	324	394	444	889
LS-4	0	0	0	0	0	0	44	75	96	266	324	394	444	889
LS-5	0	0	0	0	0	0	20	80	74	122	126	187	204	578
LS-6	0	0	0	0	0	0	20	80	74	122	126	187	204	578
LS-7	0	0	0	18	18	18	20	54	52	67	106	128	177	593
LS-8	0	0	0	18	18	18	20	54	52	67	106	128	177	593

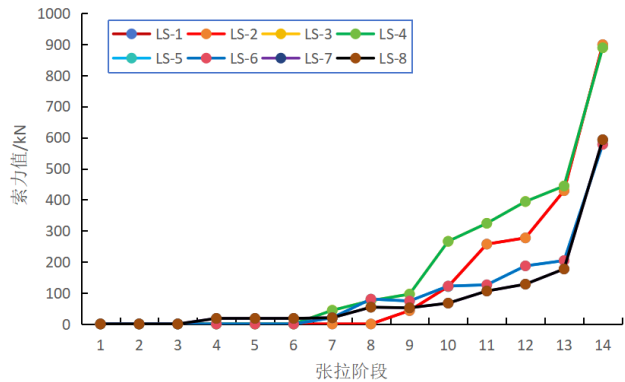


图 5 栈桥拉索内力变化曲线

拉索张力计算值与目标索力对比见表 3。从表 3 对比结果可以看出,各拉索计算索力与目标索力的误差均小于 0.0015,误差控制在极小范围内,表明采用正装迭代法计算的施工阶段拉索张力准确可靠,能够实现设计期望的成桥索力状态。同时,拉索破断荷载均为 4100kN,远大于计算索力,具有充足的安全储备,能够保障结构在使用过程中的可靠性。

表 3 拉索张力计算值与目标索力对比

拉索编号	初张拉力	二次张拉力	终张拉力	计算索力	目标索力	破断荷载	误差
LS-1	43	257	429	899.0	898.9	4100	0.000 1
LS-2	43	257	428	899.3	899.3	4100	0.000 1
LS-3	44	266	419	888.5	888.1	4100	0.000 5
LS-4	44	266	419	888.8	888.4	4100	0.000 4
LS-5	20	122	204	577.9	577.2	4100	0.001 2
LS-6	20	122	204	577.7	576.8	4100	0.001 5
LS-7	18	106	177	593.4	593.1	4 100	0.000 5
LS-8	18	106	177	593.4		4 100	0.000 6

注:表中初张拉力、二次张力、三次张拉力、计算索力均为拉索两端拉力的平均值。误差=(计算索力-目标索力)/目标索力,目标索力为设计人员提供的成桥索力。

4 结论与展望

4.1 结论

本文以某火电厂改造项目预应力斜拉钢栈桥为研究对象,开展设计与施工技术研究,通过结构方案优化、施工仿真分析、拉索张拉计算与应力核算,得出以下主要结论。

(1) 采用钢结构空间桁架与低松弛热镀锌钢丝束钢索形成的斜拉体系,能够满足大跨度输煤栈桥的受力与功能需求,结构选型合理;(2) 施工仿真分析中采用的正装迭代法能够准确计算施工阶段拉索张力,可有效解决分批张拉引发的内力重分布问题,满足设计精度要求;(3) 划分的施工阶段工艺合理,各阶段杆件最大应力均控制在规范允许范围内,结构受力均匀、变形协调,施工过程安全可靠;(4) 拉索张力呈现阶段性增长特征,与施工流程高度契合,通过分批张拉与逐步提升索力,实现了结构受力体系的平稳过渡,保障了成桥线型的平顺性。

4.2 展望

本研究为大跨度预应力输煤斜拉钢栈桥的设计与施工提供了实践经验与技术参考,但仍存在一定的改进空间:

- (1) 可进一步考虑风荷载、温度变化等动态荷载对施工过程的影响,完善荷载计算体系,提高仿真分析的全面性;
- (2) 结合工程监测数据,对施工仿真分析结果进行验证与优化,建立设计-施工-监测一体化技术体系,为类似工程提供更完善的技术支撑。

[参考文献]

[1]王鑫,马骏骧,张成.某大跨度倒三角空间桁架输煤栈桥设计研究[J].武汉大学学报(工学版),2022,55(2):55-58.

- [2]冯颖.火力发电厂输煤栈桥设计简述[J].科技创新导报,2021,18(28):35-37.
- [3]兰天龙,孙兴宇,周迎春,等.轻量化无线倾角测量系统关键技术开发及工程应用[J].测绘通报,2025(1):155-160.
- [4]陈剑华,王美战,张飞,等.基于双光谱融合的输煤栈桥过温预警系统[J].科技风,2024(35):7-10.
- [5]李海瑞,黄伟,李鹏,等.大跨度输煤栈桥钢桁架结构振动响应数值研究[J].山西建筑,2026,52(1):60-65.
- [6]谷拴成,姚博语,任翔,等.煤矿输煤栈桥抗振性能及动力响应[J].西安科技大学学报,2022,42(1):8-15.
- [7]闫林林.基于某模块化输煤栈桥的装配式组合梁板设计研究[D].邯郸:河北工程大学,2018.
- [8]胡民超,莫少康,海斌,等.基于巡检机器人的火电厂输煤栈桥智能识别技术研究[J].中国高新科技,2025(17):15-17.
- [9]唐士奇.火力发电厂输煤栈桥智能巡检机器人的研发与性能验证[J].中国高新科技,2025(12):61-63.
- [10]蒋新强,丁杰康,刘洋,等.巡检机器人输煤栈桥智能识别应用[J].工业控制计算机,2021,34(8):83-84.
- 作者简介:石鑫(1984—),男,高级工程师,本科/学士,从事火电、新能源及多能耦合联合供能方面的研究工作;赵光明(1985—),男,高级工程师,研究生学历,工学硕士学位,从事火电、新能源方面的研究工作;丁圣潇(1988—),男,高级工程师,本科/学士,从事火电、新能源方面的研究工作。