

水上柔性光伏双层索系结构分析与施工关键技术研究

杜壮壮¹, 王泽强^{2*}, 马鑫民¹, 赵一峰^{2,3}, 胡洋², 陈新礼²

(1. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083; 2. 北京市建筑工程研究院有限责任公司, 北京 100039; 3. 北京建工集团有限责任公司博士后科研工作站, 北京 100055)

摘要: 水上柔性光伏支架可采用单层悬索、双层索系、索网支撑等结构形式。针对北京良乡污水处理厂结构跨度大、造型复杂、施工难的特点, 选择双层索系结构光伏支架, 该支架由承重索、抗风索和竖向连接索组成。该结构通过对双索和摇摆柱的设计, 使结构具有跨度大、自重轻以及拉索受力均衡的优点。在对索结构进行合理的选型设计时, 基于等效用钢量的方法对三种索结构设计方案的成本效益进行了评估。对经济效益较好的双层索系结构光伏支架进行了静力性能及参数分析。考虑到地面施工条件受到限制, 研究了适合该工程的水上施工方法及关键技术。结果表明: 良乡污水处理厂双层索系结构光伏支架的经济效益较好, 结构变形及构件应力均满足规范要求。张拉单层拉索的施工张拉方案能够有效节约成本, 采用的摇摆柱临时加固措施及辅助钢绞线辅助布索方式, 能够有效地保证施工过程的安全, 满足质量控制要求。

关键词: 双层索系; 摇摆柱; 参数分析; 等效用钢量; 水上施工技术

中图分类号: TM615, TU74

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)10-0113-10

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240510001

Structural Analysis and Construction Technologies of Floating Flexible Photovoltaic Double-Layer Cable Systems

DU Zhuangzhuang¹, WANG Zeqiang^{2*}, MA Xinmin¹, ZHAO Yifeng^{2,3},
HU Yang², CHEN Xinli²

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing Building Construction Research Institute Co., Ltd., Beijing 100039, China; 3. Post-Doctoral Research Center, Beijing Construction Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100055, China)

*Corresponding author: wzeq7902@sina.com

Abstract: The floating flexible photovoltaic bracket can be in the form of a single-layer suspension cable, a double-layer cable system, a cable net support and other structural forms. In view of the characteristics of the Beijing Liangxiang sewage treatment plant, which has a large structural span, complex shape, and construction difficulties, a double-layer cable-stayed structure photovoltaic support is chosen. This support consists of load-bearing cables, wind-resistant cables, and vertical connecting cables. Through the design of double cables and rocking columns, the structure has the advantages of large span, light weight and well-balanced internal forces of the cable. The cable structure was reasonably selected and designed, and the cost-effectiveness of the three cable structure design schemes was evaluated based on the method of equivalent steel consumption. The static performance and parametric analysis of the double-layer cable structure photovoltaic bracket with good economic benefits were carried out. Based on the limited ground

收稿日期: 2024-05-10

作者简介:

杜壮壮(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事大跨度水上光伏柔性索结构设计方面的研究。E-mail: duzz1999@163.com。

通信作者:

王泽强(1979—), 男, 博士研究生, 教授级高级工程师, 主要从事大跨度预应力钢结构方面的研究。E-mail: wzeq7902@sina.

conditions, the water-based construction methods and key technologies suitable for the project were studied. The results show that the economic benefits of the double-layer cable structure photovoltaic bracket of Liangxiang Sewage Treatment Plant are good, and the structural deformation and component stress meet the requirements of the specification. The single-layer cable construction tensioning scheme can effectively save costs, and the temporary reinforcement measures of the rocking column and the auxiliary steel strand effectively ensure the safety of the construction process and meet the quality control requirements.

Keywords: double-layer cable system; rocking column; parameter analysis; equivalent steel consumption; water-based construction technology

由于刚性支架设计和施工方法简单,目前我国光伏电站工程大量采用刚性光伏支架,但刚性光伏支架跨度一般不超过5 m,需使用较多支撑柱,对下方土体产生较大影响。而柔性支架可以实现大跨度设计和施工,能够减少支架柱和支撑梁数量,降低支架用钢量,提高经济效益,为光伏发电的发展提供了更广阔的空间。大跨度柔性结构光伏支架因基础较少,可适应山地、荒漠、水体等复杂地形条件,还可在不影响地面使用功能的前提下,充分利用上空的太阳能资源,甚至可实现对地面环境的改造,更好地应用于“渔光一体”、“农光互补”等生态项目^[1],推动产业融合,具有很大的经济价值和广阔的应用前景。

通常柔性光伏支架可采用单层悬索、双层索系、索网支撑等结构形式。柔性拉索组成的结构体系通过预应力施加,使得结构由无应力组装和低应力松弛状态向高应力成型状态转化^[2-6]。已有学者对柔性索施工方法开展了研究,侯敬峰等^[7]对海口五源河体育场月牙形索桁架屋盖结构提出的多种施工方法进行了详细的数值模拟分析,最终确定了“地面铺装拉索,整体提升后张拉径向索”的施工方法。鲍敏等^[8]对天全体育馆预应力优化设计相关的关键技术进行了研究,并验证了张拉斜索使结构成型的可行性。袁野等^[9]通过监测张拉施工过程中的结构位形与索力变化情况,验证了其工程施工方案具有足够的安全储备。张晋勋等^[10]对国家速滑馆提升和张拉技术、施工监测等方面进行了研究,总结出国家速滑馆屋面索网结构施工成套关键技术。对于柔性索结构的施工技术,目前大多数研究都是结构在地面条件下进行施工的,然而,与地面索结构相比,水上柔性索结构的施工方法研究相对较少。

本文以北京良乡污水处理厂为例,对矩形平面柔性索结构的设计和水上施工关键技术等进行了介绍。针对柔性索结构提出了三种设计方案,使用Midas Gen建立了三种方案的有限元模型,在满足设计要求的前提下,基于等效用钢量的方法对材料经济性进行评估,选出经济效益较好的柔性光伏双层索系结构对其进行参数分析,并进一步对优化设计后的结构进行静力性能分析。对于污水处理厂这样有大量水上作业的场景,由于地面条件的限制,常

规的安装、提升和张拉方法往往不再适用,本文针对这种特殊作业条件提出了水上施工方法及关键技术。

1 工程概况

北京市房山区良乡卫星城污水处理厂太阳能光电建筑应用示范项目是北京市大型公共建设项目。柔性索结构拟采用双层索系,结构在上层凹形承重索下方增加一层凸形稳定索,两层主索之间通过竖向连接索连接,使污水处理厂单樞索系跨度达到了68.7 m,整体索系跨度达到137.4 m,索结构完全覆盖了污水池。高强度拉索代替一般受拉构件,大大降低结构自重,从而降低了整体用钢量,经济性较好。其平面布置如图1所示。

双层索系结构为污水池覆盖结构,上覆太阳能电池板,由于双层索系结构存在一定角度,使得其面对太阳时的光照接收效率更高,相比水平布置的索系结构,这种布局方式能够提高光伏发电效率。索系结构沿东西向布置,一共6樞索桁架,每樞间距6 m。太阳能电池板通过组件夹具固定在相邻的承重索上,组件夹具选用不锈钢角钢,并通过螺栓将拉索卡头与太阳能电池板的铝合金外边框固定在一起。结构两侧均设有外围钢结构和边柱用于维持结构稳定,中间摇摆柱连接相邻两樞索系,施工时通过张拉稳定索使结构成型。良乡污水处理厂采用的柔性光伏双层索系结构示意图如图2所示。

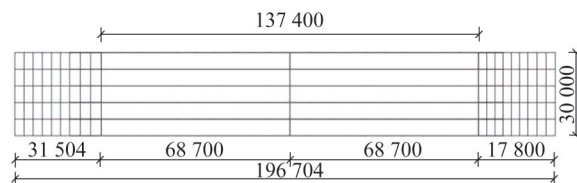


图1 北京良乡污水处理厂平面布置图(单位:mm)
Fig. 1 Layout plan of Beijing Liangxiang Sewage Treatment Plant (unit:mm)

2 设计计算控制指标及荷载条件

2.1 设计计算控制指标

对拉索进行承载能力极限状态验算,根据《索结构技术规程》(JGJ 257—2012)^[11]中的5.6节,拉索的抗拉力设计值应满足下列公式要求。

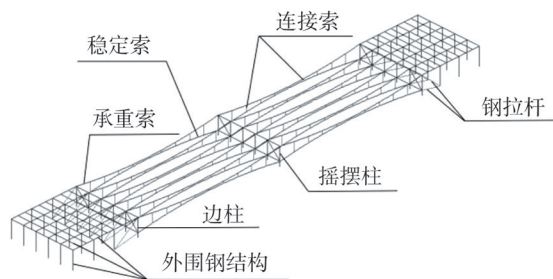


图2 良乡污水处理厂柔性光伏双层索系结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the flexible photovoltaic double-layer cable system structure of Liangxiang Sewage Treatment Plant

$$F = \frac{F_{tk}}{r_R} \quad (1)$$

$$r_0 N_d \leq F \quad (2)$$

式中: F 为拉索的抗拉力设计值; F_{tk} 为拉索的极限抗拉力标准值; r_R 为拉索的抗力分项系数, 取 2.0, 当拉索为钢拉杆时取 1.7; N_d 为拉索承受的最大轴向拉力设计值; r_0 为结构的重要性系数。

2.2 荷载条件及荷载组合

该工程恒荷载即光伏板自重按照 $0.2 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ 考虑。根据《建筑结构荷载规范》(GB50009—2012)^[12] 不上人屋面活荷载取为 $0.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$; 基本雪压 $0.4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$, 屋面积雪分布系数取 1.0, 计算得到雪荷载标准值为 $0.4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$; 基本风压 $0.45 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$; 高度系数取 1.0 (粗糙度类别: B 类, 高度: 10 m); 体型系数取 -1.2; 高度 z 处的风振系数按照《索结构技术规程》(JGJ 257—2012)^[11] 取值 1.6; 因光伏板的排列方式存在一些空隙, 考虑空隙的卸风作用, 使风荷载有所减小, 风荷载折减系数取 0.9, 最终风荷载标准值 (吸力) 取 $0.78 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ 。结构经多次验算和设计, 最终承重索预应力为 250 kN, 稳定索为 200 kN。

良乡污水处理厂覆盖结构上铺设光伏面板, 该工程中风荷载是最主要的结构稳定性影响因素。根据荷载设计要求, 从承载能力极限状态和正常使用极限状态两方面进行考虑, 选取几个具有代表性的不利工况进行分析, 其工况组合如表 1 所示。

3 柔性索结构方案比选

柔性索结构作为主要受力构件, 在工程设计阶段需进行合理的选型, 保证结构的整体刚度和稳定性。当索结构用于轻型屋面时可选用双层索系和张弦结构。根据实际工程需要, 在中间跨度及荷载条件不变的情况下, 针对矩形平面的柔性索结构提出了三种设计方案, 经多次试算和设计给出每种方案合理的构件截面及预应力。最终对应的整体计算模型分别为 A、B、C。三种柔性索结

表 1 荷载组合系数

Table 1 Load combination coefficients

工况	恒载	活荷载	雪荷载	风荷载
ZJ1(CJ1)	1.0(1.3)	1.0(1.5)		
ZJ2(CJ2)	1.0(1.3)		1.0(1.5)	
ZJ3(CJ3)	1.0(1.0)			1.0(1.5)
ZJ4(CJ4)	1.0(1.3)	1.0(1.5)		0.6(0.9)
ZJ5(CJ5)	1.0(1.0)	0.7(1.05)		1.0(1.5)

注: ZJ 为正常使用极限状态; CJ 为承载能力极限状态 (括号内)。

构设计方案结构立面图如图 3 所示。

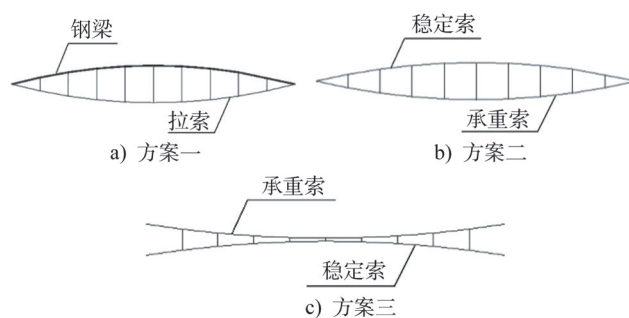


图3 三种柔性索结构立面图

Fig. 3 Elevations of three types of flexible cable structure

模型 A 采用的是方案一张弦结构, 由钢梁上弦与钢索下弦通过竖向撑杆连接构成的预应力自平衡体系, 其上部钢梁可承受一定的弯曲和剪切作用。模型 B 采用的是方案二双层索系结构中较为独特的鱼腹式索桁架结构, 其上部稳定索能有效减小风荷载对结构的影响, 提高整体抗风性能, 具有良好的承载性能。模型 C 采用的是方案三双层索系结构, 其中, 承重索主要用于承受恒载和雪荷载, 稳定索用来抵抗风荷载产生的向上的吸力, 该方案具有结构变形小和经济性好的特点。三种索结构体系的设计方案均可充分利用拉索的高强度性能, 减轻结构的自重, 并且满足屋面光伏面板的铺设要求。

使用 Midas Gen 建立有限元模型, 考虑几何非线性, 边柱和外侧拉杆底部约束采用固定铰支座, 外围钢结构底部约束采用固定端约束, 中间摇摆柱底部约束采用滑动铰支座, 使其沿着拉索长度方向允许产生一定的弹性位移, 减小两跨拉索索力差值, 进而减小柱基的水平方向受力。其中, 模型 C 柔性光伏双层索系结构的有限元模型如图 4 所示。

良乡污水处理厂柔性光伏双层索系结构有限元模型的承重索和稳定索拟采用 $\Phi 52$ 高钒镀层索, 一共 24 根, 双层索系结构中间部位的 3 根短吊索为拉杆, 其余吊索

采用 $\Phi 16$ 高钒镀层索,一共72根拉索、36根吊杆,拟采用的高钒镀层索强度等级为1 670 MPa;边柱、摇摆柱、柱间支撑与外侧拉杆分别采用 $\Phi 402 \times 10$ 、 $\Phi 299 \times 8$ 、 $\Phi 180 \times 5$ 与 $\Phi 203 \times 10$ 的空心圆钢管;边梁与中间梁均为H型钢,截面尺寸分别为 $175 \text{ mm} \times 175 \text{ mm} \times 7.5 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$ 、 $175 \text{ mm} \times 90 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。

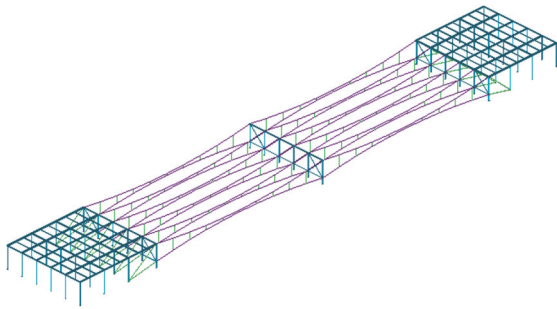


图4 柔性光伏双层索系结构有限元模型

Fig. 4 Finite element model of flexible photovoltaic double-layer cable structure

针对三种结构形式的静力性能和钢结构用量进行比较分析。三种模型A、B、C在1.0恒载+1.0活荷载的标准组合作用下的竖向变形如表2所示,在1.3恒载+1.5活荷载的最不利组合作用下的拉索应力如表3所示。

表2 三种模型标准组合作用下的竖向变形

Table 2 Vertical deformation under the standard combination of the three models

模型编号	竖向变形/mm	计算挠跨比	挠跨比容许值	是否满足要求
A	207.73	1/331	1/250	是
B	-217.58	1/316	1/200	是
C	-320.37	1/214	1/200	是

表3 三种模型最不利组合作用下的构件应力

Table 3 Component stress under the most unfavorable combination of the three models

模型编号	拉索应力/MPa	承载力安全系数	是否满足要求
A	766.28	2.18	是
B	751.21	2.22	是
C	621.25	2.69	是

经验算,三种模型的竖向挠度满足设计要求,拉索具有足够的安全储备。对三种方案不包含相同外围钢结构的材料用量进行统计,并进行经济性能的评估。其材料用量统计如表4所示。

表4 三种索结构光伏支架材料用量统计

Table 4 Statistics of steel consumption for three types of cable structure photovoltaic support materials

模型编号	中间索结构形式	钢构件/kg	索/kg
A	张弦结构	3 418.01	1 001.60
B	鱼腹式索桁架结构	72.79	2 004.18
C	双层索系结构	—	2 020.76

通过观察表格可以初步得出双层索系结构使用钢材的需求最少,但普通钢构件和索的造价存在较大差异。因此,经济性不能仅仅以用量来衡量,根据董石麟等^[13]的研究成果,可采用经济性指标 E (式(3))对钢结构进行经济性评估。

$$E = \frac{(\zeta_{nb} + \zeta_{cb})W_{cable} + (\zeta_{nb} + 1)W_{bar}}{Ag} \quad (3)$$

式中: E 为实际等效用钢量; ζ_{nb} 为节点和杆件的质量比,取25%; ζ_{cb} 为索和钢构件同等质量下的等效成本比,取为3; W_{cable} 为索的总重量; W_{bar} 为钢构件总重量; A 为光伏支架水平投影面积; g 为重力加速度,取 $9.81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

由上式计算得到模型A实际等效用钢量 $18.97 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,模型B实际等效用钢量 $16.65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,模型C实际等效用钢量 $16.56 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。实际等效用钢量越高说明经济性越差,因此,第三种柔性光伏双层索系结构的经济性较好。而且该方案中部空间占用少,下部净空高,最终选择经济性能较好的第三种柔性光伏双层索系结构作为污水处理厂工程最终的屋盖结构方案。

4 柔性光伏双层索系结构参数分析

4.1 拉索预应力对静力性能的影响

预应力的施加是悬索体系成型的必要条件,是提高悬索稳定性的重要参数之一,当施加的预应力过小时,结构承受荷载时容易发生过大变形,甚至可能导致结构失去稳定性,或使得拉索的使用率降低;而当施加的预应力过大时,拉索单元可能没有足够的安全储备,易导致拉索破断,进而影响结构的正常使用。选择合适的拉索预应力可以有效降低悬索的挠度,增加悬索的承载能力和稳定性。由于承重索承受的预应力对结构的位移及内力影响较大,采用参数分析的方法探讨对承重索施加大小不同的预应力时对结构静力性能的影响,计算结果如图5、图6所示。

由图5可知,在标准组合作用ZJ1中,施加低于250 kN预应力时结构的跨中挠度均超过挠度容许值 $L/200$,无法满足规范要求,故不考虑低于250 kN预应力的情况。

由图6可知,在施加不同预应力作用下,索应力与预

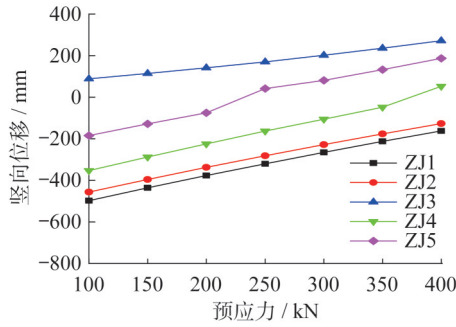


图5 预应力与跨中挠度关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between prestress and mid-span deflection

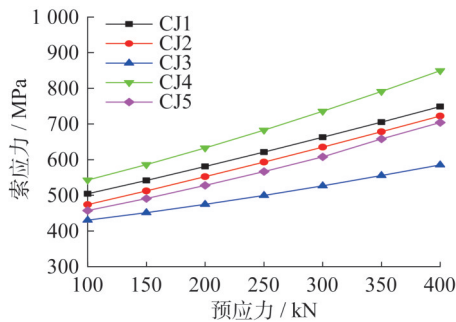


图6 预应力与索应力关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between prestress and cable stress

应力成线性关系,索应力随预应力的增加而增大,可见预应力对结构的变形和内力具有很大影响。然而,施加预应力并不是越大越好,因为过大的预应力会导致索应力增大,越来越接近索体的最小破断力,导致结构的安全性降低。

承重索选择 250 kN 的预应力既能满足竖向位移的挠度限值,又能保证足够的安全储备。在确保结构安全性的前提下,相比于采用其它预应力值,选择 250 kN 的预应力可以降低材料和施工成本,同时简化施工过程监测。

4.2 拉索截面对静力性能的影响

考虑承重索、稳定索截面类型变化时柔性光伏双层索系结构的静力性能,承重索、稳定索截面公称直径在 44 mm~58 mm 之间变化,结构在标准组合作用 ZJ1 下的竖向位移及最不利组合作用 CJ1 下的拉索、钢构件应力如表 5、表 6 所示。

计算结果表明,随着承重索截面公称直径的增大,结构最大竖向位移的绝对值逐渐减小,减小幅度为 14.85%;拉索应力和钢构件应力的绝对值也逐渐减小,减小幅度分别为 37.69%、6.77%。当承重索截面的公称直径小于 48 mm 时,结构的竖向位移无法满足规范要求,

表 5 不同承重索截面下结构的竖向位移和拉索应力
Table 5 Vertical displacement of structure and cable stress under different load-bearing cable cross-sections

公称直径/mm	有效截面积/mm ²	竖向位移/mm	拉索应力/MPa	钢构件应力/MPa
44	1 120	-354.34	840.83	-97.23
48	1 340	-336.89	720.71	-99.01
50	1 450	-329.47	674.37	-99.96
52	1 570	-320.37	621.25	-101.17
56	1 820	-308.09	555.43	-102.88
58	1 950	-301.72	523.95	-103.81

表 6 不同稳定索截面下结构的竖向位移和拉索应力
Table 6 Vertical displacement of structure and cable stress under different stable cable cross-sections

公称直径/mm	有效截面积/mm ²	竖向位移/mm	拉索应力/MPa	钢构件应力/MPa
44	1 120	-349.51	649.13	-104.45
48	1 340	-334.73	635.15	-102.81
50	1 450	-328.31	628.92	-102.08
52	1 570	-320.37	621.25	-101.17
56	1 820	-309.30	610.55	-100.48
58	1 950	-303.63	604.99	-100.72

因此,在满足结构静力性能要求的前提下,可适当减小承重索截面的公称直径,以达到节约成本的目的。

随着稳定索截面公称直径的增大,结构最大竖向位移的绝对值逐渐减小,减小幅度为 13.13%;拉索应力和钢构件应力的绝对值也逐渐减小,减小幅度分别为 6.80%、3.57%。与承重索类似,当稳定索截面的公称直径小于 48 mm 时,结构的竖向位移无法满足规范要求,因此,在满足结构静力性能要求的前提下,可适当减小稳定索截面的公称直径来节约成本。

4.3 矢跨比对静力性能的影响

在其它参数不变的情况下,改变柔性光伏双层索系结构的矢跨比(即结构计算矢高与计算跨径之比)会导致结构初始预应力分布的改变。矢跨比在 1/25~1/29 之间变化,结构在标准组合作用 ZJ1 下的竖向位移及最不利组合作用 CJ1 下的拉索、钢构件应力如表 7 所示。

计算结果表明,随着矢跨比的减小,结构最大竖向位移的绝对值逐渐增大,增大幅度为 70.33%,变化较大;拉索应力和钢构件应力的绝对值也逐渐增大,增大的幅度较小,分别为 1.52%、1.43%。由此可知,矢跨比的减小对柔

表7 不同矢跨比下结构的竖向位移和拉索应力

Table 7 Vertical displacement of structure and cable stress under different rise-span ratios

矢跨比	竖向位移/ mm	拉索应力/ MPa	钢构件应力/ MPa
1/25	-320.37	621.25	-101.17
1/26	-368.16	623.41	-101.54
1/27	-439.38	625.66	-101.87
1/28	-471.30	628.86	-102.38
1/29	-545.69	630.69	-102.62

性光伏双层索系结构的竖向位移影响最大,而且当矢跨比低于1/25时,结构的竖向位移无法满足规范要求。

5 柔性光伏双层索系结构静力性能分析

经参数分析后,对柔性光伏双层索系结构的拉索预应力、拉索截面、结构矢跨比进行了最优取值,并对优化后的结构进行静力性能分析。

5.1 变形特征

柔性光伏双层索系结构竖向挠度容许值及钢结构柱顶水平位移需满足下列要求:根据《索结构技术规程》(JGJ257—2012)^[11]局部修订要点解析第2.3节表3规定,双层索系最大挠度容许值为 $L/200$;《钢结构设计标准》(50017—2017)^[14]关于无桥式吊车单层钢结构柱顶水平位移限值为 $H/150$,其中 H 为柱高。通过有限元计算得出正常使用极限状态各工况中结构最大水平和竖向位移如图7所示。

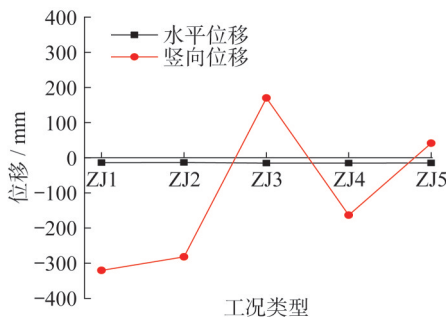


图7 柔性光伏双层索系结构位移曲线

Fig. 7 Displacement curves of flexible photovoltaic double-layer cable structure

由图7可知,工况ZJ1中柔性光伏双层索系结构的竖向挠度绝对值最大,为320.37 mm,结构的挠跨比为1/214,满足规范中双层索系结构最大挠度容许值要求,竖向变形云图如图8所示。水平位移在正常使用极限状态各工况下相差较小,在工况ZJ4下水平位移绝对值最

大,为15.24 mm,为钢柱高度的1/656,故钢柱能为结构提供可靠的约束作用,满足规范要求,两边及中间摇摆立柱顶的水平位移如图9所示。

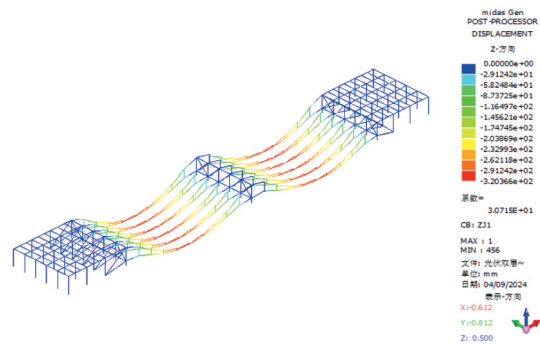


图8 工况ZJ1中竖向变形云图(单位:mm)

Fig. 8 Contour of vertical deformation in load case ZJ1 (unit: mm)

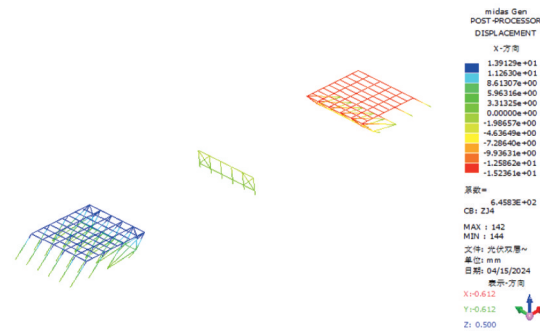


图9 工况ZJ4中两边及中间摇摆立柱柱顶水平位移云图(单位:mm)

Fig. 9 Contour of horizontal displacement of the top of the rocking columns on both sides and in the middle in load case ZJ4 (unit: mm)

5.2 构件应力

索单元是该工程最主要的受力构件,而刚性构件主要包括两侧的钢结构、边柱及摇摆柱,具有保持结构形态的作用,因此需对索单元和刚性构件的受力状态进行分析。计算得到承载能力极限状态下各工况中构件最大应力如图10所示。

由图10可知,当承重索应力减小时抗风索应力增加,反之在承重索应力增加时抗风索应力减小,两者之间存在相互影响和协同作用,以保证整个结构的稳定性。在工况CJ4中承重索应力最大,为682.70 MPa,应力云图如图11所示。在工况CJ5中抗风索应力最大,为566.77 MPa。承重索的承载力安全系数最小为2.55,满足安全性能要求。在工况CJ5中刚性构件应力最大,其值为138.33 MPa,应力云图如图12所示,对应承载力安全系数为1.7,满足安全性能要求。

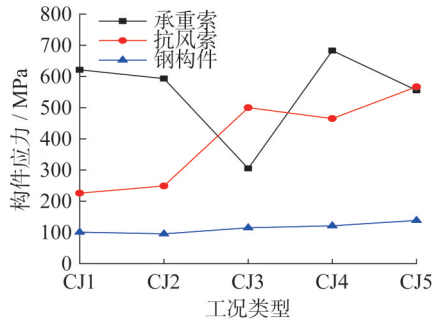


图10 柔性光伏双层索系结构构件最大应力
Fig. 10 Maximum stress of flexible photovoltaic double-layer cable system structure components

表8 三种施工方法优劣性
Table 8 Advantages and disadvantages of three construction methods

影响因素	张拉方案		
	张拉单层拉索	张拉双层拉索	张拉连接索
调节端数量	少	多	最多
张拉设备	少	多	最多
同步张拉可控性	最易	易	难
施工周期	短	长	最长
人力成本	少	多	最多

该工程最终采用的张拉方案为张拉单层拉索,这种方法在预应力构件深化设计、施工操作简易性、施工周期和施工成本上都具有明显优势,能够有效节约成本。经施工仿真计算确定了分5级逐根张拉的工序,5级张拉分别为拉索设计值的20%、40%、60%、80%、100%。

6.2 水上施工关键技术

对于污水池覆盖结构这样有大量水上作业的场景,施工过程需要制定详细周密的方案。在水上作业时,由于地面条件的限制,常规的安装、提升和张拉方法往往不再适用。因此,需采用一些特殊的技术措施以确保施工顺利进行。其中,技术措施之一是设置辅助固定钢绞线,通过连接结构边柱和轻型摇摆柱,用钢绞线临时保证结构的稳定。另一项技术措施是设置辅助钢绞线,将两端边柱连接起来,以作为拉索牵引安装的滑道。具体操作上,拉索从钢结构边柱开始,通过U形环吊环连接辅助钢绞线,卷扬机提供拉索牵引动力,从而牵引钢绞线,使拉索得以安装到位,其中采用的U形环吊环作用是方便预应力拉索的滑动,水上拉索施工作业图及U形环吊环示意图分别如图13、图14所示。

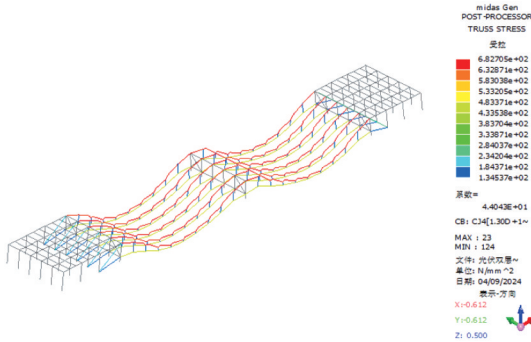


图11 工况CJ4中索单元构件应力云图(单位:MPa)
Fig. 11 Stress contour of cable element components in load case CJ4 (unit:MPa)

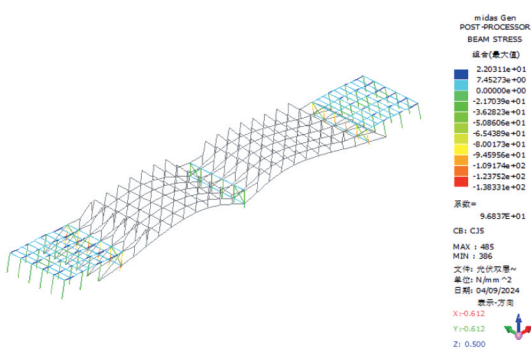


图12 工况CJ5中刚性构件应力云图(单位:MPa)
Fig. 12 Stress contour of rigid components in load case CJ5 (unit:MPa)

6 施工方法及关键技术研究

6.1 施工方法比选

柔性光伏双层索系结构张拉成型过程中,按照预应力施加的对象不同有三种张拉方案:同步张拉双层的承重索和抗风索、单独张拉单层的一种拉索、张拉连接索。三种张拉方案施加的预应力能够均匀地传递到结构的每个单元,从而满足结构的强度和稳定性。表8列举出三种施工方法在施工时的优劣性。



图13 水上拉索施工作业图
Fig. 13 Water-based construction drawing of cable

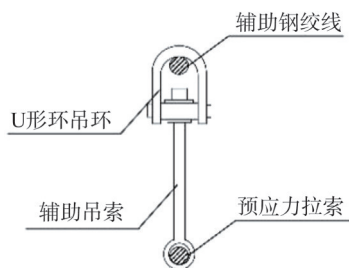


图14 U形环吊环示意图

Fig. 14 Schematic diagram of U-shaped lifting ring

由于场地条件限制,摇摆柱在施工过程中不能承受水平方向的力。考虑到钢索自重和预应力引起的侧向力可能会对摇摆柱产生较大影响,因此需要采取临时固定措施以确保施工安全。具体措施为通过搭设简易支撑脚手架、在立柱和支座之间设置连接螺栓、进行局部电焊等临时加固措施,对摇摆柱进行加固,以抵抗施工过程中对摇摆柱产生的侧向力,摇摆柱临时固定措施如图15所示。



图15 摇摆柱临时固定措施图

Fig. 15 Temporary fixing measure diagram for rocking column

这些施工技术措施的实施将有助于在水上作业条件下确保结构的安全稳定,同时提高施工效率。最终施工完成后如图16所示。



图16 良乡污水处理厂太阳能光电建筑应用示范项目

Fig. 16 Liangxiang Sewage Treatment Plant solar photovoltaic building application demonstration project

6.3 施工监测

在施工过程中,结构性能的监测对施工安全性和稳定性至关重要。监测内容主要包括索力、位移和钢结构应力等多个方面,旨在确保结构在张拉过程中能够安全地进行。通过实时监测数据和反馈,结合仿真计算,可以保证结构在施工过程中的精度和可靠性。以索结构安装过程中控制牵引速度和被牵引拉索形状、索结构张拉过程中控制索力为重点,监控结构变形作为辅助监测手段,双重监测以确保施工过程的安全性和成型准确性。

该工程在施工张拉过程中,按照每增加20%拉索索力作为柔性索结构跨中竖向变形监测的时间点,采用全站仪进行检测。通过表9的监测数据可以发现,每阶段张拉后实测位移之间的差值在30 mm左右,结构跨中竖向变形与荷载之间呈现典型的线弹性关系,这也意味着在张拉过程中,索力的控制必须非常精确,只有保证了索力的精确度,才能保证结构变形的精确度。

表9 柔性索结构跨中竖向变形监测数据

Table 9 Monitoring data of vertical deformation in the mid-span of flexible cable structures mm

位移	张拉进度百分比				
	20%	40%	60%	80%	100%
实测位移	230.91	200.62	170.30	143.56	117.86
理论位移	230.68	200.36	171.26	143.19	116.96
位移差值	+0.23	+0.26	-0.96	+0.37	+0.90

注:位移差值=实测位移-理论位移。

7 结论

本文通过对良乡污水处理厂进行结构选型设计、经济效益对比、参数分析、施工张拉方案的研究,得到的主要结论如下:

(1) 在相同荷载条件下,三种光伏支架设计方案的静力性能均符合规范要求,其中模型C的实际等效用钢量最小,为 $16.56 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,故最终选择经济效益较好的第三种柔性光伏双层索系结构作为最终的工程方案。

(2) 通过参数分析可知,当承重索选择不小于250 kN的预应力、承重索和稳定索截面的公称直径不低于48 mm、矢跨比选择1/25时,结构的竖向位移满足规范要求,能够节约成本。

(3) 经优化后的柔性光伏双层索系结构最大竖向位移绝对值对应挠跨比为1/214,最大水平位移绝对值是钢柱高度的1/616,位移均满足规范要求;承重索的承载力安全系数最小为2.55,刚性构件承载力安全系数为1.7,均满足安全性能要求。

(4) 该工程需在施工条件受限的污水处理池上空完成拉索的安装和张拉,利用结构边柱作为施工作业点,使

用固定钢绞线和辅助钢绞线的方式辅助布置预应力拉索,克服了无法在污水处理池中搭设脚手架的难题,该施工方法为水上柔性光伏结构的施工提供了可能。

参考文献:

- [1] 陈杰,雷书彦,陶芬,等. 光伏农业研究与发展路径[J]. 中南农业科技, 2022, 43(6): 189-192.
CHEN Jie, LEI Shuyan, TAO Fen, et al. Research and development path of photovoltaic agriculture [J]. South-Central Agricultural Science and Technology, 2022, 43(6): 189-192. (in Chinese)
- [2] 王雷,苏敏,刘博,等. 安康体育馆拱支索拉结构设计[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊1): 648-658. DOI: 10.19701/j.jzjg.22S1722.
WANG Lei, SU Min, LIU Bo, et al. Design of arch supported cable-stayed structure of Ankang Gymnasium [J]. Building Structure, 2022, 52 (Suppl. 1): 648-658. DOI: 10.19701/j.jzjg.22S1722. (in Chinese)
- [3] 谢忠良,周红梅,叶甲淳. 浙江工商大学下沙校区主体育场钢罩棚结构设计[J]. 建筑结构, 2012, 42(8): 33-37, 61. DOI: 10.19701/j.jzjg.2012.08.008.
XIE Zhongliang, ZHOU Hongmei, YE Jiachun. Analysis and design on the steel roof of main stadium of Zhejiang Gongshang University [J]. Building Structure, 2012, 42(8): 33-37, 61. DOI: 10.19701/j.jzjg.2012.08.008. (in Chinese)
- [4] 李瑞雄,贾水钟,李亚明. 上海世博温室张弦铝合金网格结构体系研究与工程应用[J]. 建筑结构, 2023, 53(1): 16-22. DOI: 10.19701/j.jzjg.SHY2318.
LI Ruixiong, JIA Shuizhong, LI Yaming. Research and engineering application of string aluminum alloy grid structure system for Shanghai World Expo Greenhouse [J]. Building Structure, 2023, 53(1): 16-22. DOI: 10.19701/j.jzjg.SHY2318. (in Chinese)
- [5] 陈进于,区彤,刘雪兵,等. 顺德德胜体育中心游泳馆单层马鞍形索网设计分析[J]. 钢结构(中英文), 2022, 37(8): 26-34. DOI: 10.13206/j.gjgs.21071901.
CHEN Jinyu, OU Tong, LIU Xuebing, et al. Design analysis of single layer saddle net for swimming pool of desheng sports center in Shunde [J]. Steel Construction (Chinese & English), 2022, 37(8): 26-34. DOI: 10.13206/j.gjgs.21071901. (in Chinese)
- [6] 王哲,白光波,陈彬磊,等. 国家速滑馆钢结构设计[J]. 建筑结构, 2018, 48(20): 5-11. DOI: 10.19701/j.jzjg.2018.20.002.
WANG Zhe, BAI Guangbo, CHEN Binlei, et al. Steel structural design of national speed skating oval [J]. Building Structure, 2018, 48(20): 5-11. DOI: 10.19701/j.jzjg.2018.20.002. (in Chinese)
- [7] 侯敬峰,周储君,王泽强,等. 海口五源河体育场月牙形索桁架屋盖结构施工过程数值模拟研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(9): 92-97. DOI: 10.19701/j.jzjg.2020.09.016.
HOU Jingfeng, ZHOU Chujun, WANG Zeqiang, et al. Research on numerical simulation of construction process of crescent cable truss roof structure in Haikou Wuyuanhe Stadium [J]. Building Structure, 2020, 50(9): 92-97. DOI: 10.19701/j.jzjg.2020.09.016. (in Chinese)
- [8] 鲍敏,司波,向新岸. 天全体育馆刚性屋面索穹顶施工技术研究和应用[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊2): 1784-1789. DOI: 10.19701/j.jzjg.23S2550.
BAO Min, SI Bo, XIANG Xin'an. Research and application of construction technology of rigid roof cable dome in Tianquan stadium [J]. Building Structure, 2023, 53 (Suppl. 2): 1784-1789. DOI: 10.19701/j.jzjg.23S2550. (in Chinese)
- [9] 袁野,张其林,张舒翔,等. 大跨度轮辐式单双层索网结构施工过程模拟[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(20): 15-20.
YUAN Ye, ZHANG Qilin, ZHANG Shuxiang, et al. Simulation of construction process for large-span wheel-spoke single-double-layer cable net structures [J]. Construction Technology, 2023, 52(20): 15-20. (in Chinese)
- [10] 张晋勋,高树栋,王泽强,等. 国家速滑馆大跨度马鞍形索网结构关键施工技术[J]. 施工技术, 2019, 48(24): 41-44, 48. DOI: 10.19701/j.jzjg.2019.48.24.41-44, 48. (in Chinese)
- [11] 赵鹏飞,刘枫,钱基宏,等. 《索结构技术规程》(JGJ 257—2012)局部修订要点解析[J]. 建筑结构, 2024, 54(13): 37-42. DOI: 10.19701/j.jzjg.20221245.
ZHAO Pengfei, LIU Feng, QIAN Jihong, et al. Analysis of partial revised keys Technical specification for cable structures (JGJ 257—2012) [J]. Building Structure, 2024, 54(13): 37-42. DOI: 10.19701/j.jzjg.20221245. (in Chinese)
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Load Code for the Design of Building Structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [13] 董石麟,刘宏创. 鸟巢四撑杆型索穹顶大开口体育场挑篷结构形态确定、参数分析及试设计[J]. 空间结构, 2020, 26(3): 3-15. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2020.03.003.
DONG Shilin, LIU Hongchuang. Morphologic determination, parametric analysis and tentative design of a novel bird nest-type cable dome structure with quad-strut layout as stadium canopy [J]. Spatial Structures, 2020, 26(3): 3-15. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2020.03.003. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the

People's Republic of China. Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)

(上接第90页)

- [28] European Committee for Standardization. Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance—Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings: EN 1998-1: 2004[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [29] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2007.
HAN Linhai. Concrete-filled steel tubular structure: Theory and practice[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [30] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 2015版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Design of Concrete Structures: GB 50010—2010 [S]. 2015 ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [31] EOM T S, PARK H G, LEE C H, et al. Behavior of double skin composite wall subjected to in-plane cyclic loading [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(10): 1239-1249. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541x.0000057.