

中电建桐柏县坑塘水面200MW分布式光伏项目光伏支架檩条优化设计

郝良 李雪青 姚力

中国水利水电第三工程局有限公司/陕西江河水利水电土木勘测设计研究院有限公司 陕西 西安 710000

摘要：本文首先简单介绍桐柏坑塘光伏的项目背景、设计依据、项目规模、设计条件等，其次详细讲述了该项目檩条计算过程、优化分计算方式方法，从檩条选型、强度选择、成型方式、连接方式、截面形式等多方面优化考虑。并计算形成计算结果。文章最后陈述了本次优化设计的总结及心得体会。

关键词：光伏；檩条；荷载；强度；稳定性

引言：分布式光伏项目一般体量大，重复率高。本次分析计算依托于中电建桐柏县坑塘水面200MW分布式光伏项目进行。对于单桩多列的分布式光伏支架，结构构件中檩条的占比最大。对檩条进行着重优化计算，可为工程项目节约较大的成本。根据项目可研，光伏支架总用钢量约为7300t，其中檩条约占总用钢量56%，为4088t。因此檩条的优化设计非常必要。

1 项目背景

1.1 项目简介

工程项目地点：本项目位于河南省东南部南阳市桐柏县。

项目规模：本工程规划光伏发电200MW，拟建在河南省南阳市桐柏县乡镇坑塘上建设分布式光伏电站，结构阵列可分为2行*13列、2行*26列，其中2行*13列光伏支架约6700座，2行*26列光伏支架约3400座。

1.2 结构设计依据

依据规范标准详见计算书；
设计任务书、合同、可行性研究报告等。

1.3 结构设计条件

光伏支架设计使用年限为25年，支架结构的安全等级为三级，结构重要性系数为0.95。

本工程25年一遇风压 $0.31\text{kN}/\text{m}^2$ ，25年一遇雪压 $0.38\text{kN}/\text{m}^2$ 。地面粗糙度类别为B类。

本项目采用固定安装方式，组件最低点距水面不小于1.5米，桩基础东西向间距为4.5米和4.1米（对应檩条设计的跨度）。

光伏板组件每块规格：2278mm×1134mm×20mm（575Wp），光伏板每块重量：32.6kg。根据光伏板组件规格，檩条的间距固定为1400mm；

固定支架倾角：25°，（对应檩条的安装角度）；

组件排布方式：2行*13列、2行*26列排列。若按2行*13列排列，每MW需光伏支架约67阵列。若按2行*26列排列，每MW需光伏支架约34阵列。本次优化计算仅以2行*13列为例，其他阵列计算参考此阵列。

檩条间距：因组件连接位置固定，檩条的间距固定为439/1400/898/1400/439mm，每根檩条的受荷宽度为1144mm。



附图1 坑塘光伏支架实景图；

1.4 设计信息

檩条钢材：Q355

檩条跨度(mm)：850/4500/4500/4500/850（端跨悬挑）

檩条两侧悬挑(mm)：850.000

连续檩条跨数：3跨

光伏板倾角（度）：25.000

强度计算净截面系数：0.950

容许挠度限值[v]：1/250

拉条设置：设一道。（约束檩条下翼缘）

是否考虑冷弯效应：不考虑冷弯效应。

1.5 基本参数取值

恒载：檩条计算恒载主要有：光伏板组件荷载、檩条自重，檩条连接附件拉条自重。据实考虑。

活荷载：活荷载包含雪荷载及施工检修荷载。雪荷载计算：a.基本雪压： $S_0 = 0.38\text{kN/m}^2$ ；b.积雪分布系数 $\mu_r = 1.0$ 。施工荷载（kN）：1.000（作用在跨中）

风荷载：查询当地气象参数，基本风压按取值： 0.31kN/m^2 （25年重现期）；风振系数： $\beta_z = 1.0$ ，根据《光伏支架结构设计规程》NB/T10115-2018第4.1.2条；风压高度变化系数： μ_z 取1.0，根据《建筑结构荷载规范》GB50009-2012第8.2.1条；风荷载体型系数，按《光伏支架结构设计规程》NB/T10115-2018第4.1.3条；需分别计算风荷载整体体型系数，风荷载局部体型系数。分别插入计算得：

$\mu_{s1} = 0.925, \mu_{s2} = -1.15, \mu_{s111} = -2.2, \mu_{s112} = -1.95, \mu_{s121} = -1.6, \mu_{s122} = -1.25, \mu_{s131} = -1.0, \mu_{s132} = -1.0$ 。

檩条计算考虑各檩条所在区域的风荷载体型系数，取最不利处。根据檩条平面布置图，最不利处应为高区边部。

2 优化分析计算

2.1 檩条选型

为便捷光伏构件的安装，一般采用C型直卷边薄壁型钢、Z型卷边薄壁型钢或光伏专用U型薄壁型钢。

因檩条跨度为4.5米，选用U型薄壁型钢，较浪费，本工程暂不考虑。其次本工程檩条布置坡度为 25° ，坡度较大。初步判断，檩条的稳定应力起控制作用，Z型檩条适用于较大坡度屋面。

但经过试算，因本工程采用了设置一道拉条约束檩条下翼缘，光伏板约束檩条上翼缘。檩条截面受强度应力控制，同条件下采用C型檩条更经济。

最终，本工程选用了C型檩条。

2.2 强度等级的确定

冷弯薄壁型钢常采用的强度等级有Q235，Q355。根据计算书，檩条截面主要受强度应力控制。采用高强度钢材，能充分发挥出高强度特性，达到节约钢材的效果。最终选定檩条强度等级为Q355B。

2.3 檩条的成型方式

对于常规建筑，檩条设计时，常采用标准型钢。但由于本工程工程量大，檩条的规格型号若能定制，可根据强度、挠度、稳定性等综合考虑，就挖掘出檩条截面的最大承载价值。设计时根据实际受力特点自定义截面，由厂家采用辊式冷弯机冷弯制成，截面可自由调整。

于是我们及时与业主方、拟定的生产厂家沟通，业主及生产厂家认为自定义檩条截面做法可行，且不影响总成本。

最终，本项目采用了自定义截面檩条。

2.4 檩条连接方式

檩条常规固定方式有简支檩条、连续檩条。因连续檩条，支座作用可减小檩条跨中弯矩设计值，可减少檩条总重量，所以本工程采用连续檩条。

2.5 檩条厚度的优选

与业主方沟通可选檩条厚度有2.0mm，2.5mm，3.0mm厚，对各厚度进行对比计算，发现檩条薄壁开展的檩条用钢量会更少，本工程选用2.0mm厚檩条。

3 檩条计算书

3.1 计算书

-----设计依据-----

《钢结构设计标准》（GB 50017-2017）

《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》（GB 51022-2015）

《冷弯薄壁型钢结构技术规范》（GB 50018-2002）

《建筑结构可靠性设计统一标准》（GB 50068-2018）

《光伏支架结构设计规程》（NB/T 10115-2018）

《建筑光伏系统应用技术标准》（GB/T 51368-2019）

《光伏发电站设计规范》（GB 50797-2012）

-----设计信息-----

檩条钢材：Q355

檩条跨度(mm)：900/4500/4500/4500/900

檩条两侧悬挑(mm)：900.000

连续檩条跨数：3跨

光伏板倾角（度）：25.000

檩条截面：C100X50X20X2.0

光伏面板能否阻止檩条上翼缘受压侧向失稳：能

是否采用构造保证檩条风吸力下翼缘受压侧向失稳：不采用

计算檩条截面自重作用：计算

强度计算净截面系数：0.950

容许挠度限值[v]：1/200

拉条设置：设一道

拉条作用：约束檩条下翼缘

是否考虑冷弯效应：否

-----檩条作用与验算-----

3.1.1 截面特性计算

檩条截面：C100X50X20X2.0

$b = 50\text{mm}$ ； $h = 100\text{mm}$ ； $c = 20\text{mm}$ ； $t = 2.00\text{mm}$

$A = 4.6400\text{e-}04\text{m}^2$ ； $I_x = 7.3872\text{e-}07\text{m}^4$ ； $I_y = 1.7566\text{e-}07\text{m}^4$

$W_{x1} = 1.4774\text{e-}05\text{m}^3$ ； $W_{x2} = 1.4774\text{e-}05\text{m}^3$ ； $W_{y1} = 9.3471\text{e-}06\text{m}^3$ ； $W_{y2} = 5.6289\text{e-}06\text{m}^3$

3.1.2 檩条上荷载作用

△ 恒荷载

光伏自重 (kN/m²): 0.150

檩条自重作用折算均布线荷 (kN/m): 0.046

檩条计算恒荷线荷标准值 (kN/m): 0.217

△ 活荷载 (包括雪荷与施工荷载)

雪荷载 (kN/m²): 0.380

施工荷载 (kN): 1.000 (作用在跨中)

△ 风荷载

作用在檩条上的局部风荷载为三段均布线荷载

风荷载分段1:

长度: 5.1 m

荷载值: -1.321 kN/m

风荷载分段2:

长度: 5.1 m

荷载值: -1.170 kN/m

风荷载分段3:

长度: 5.1 m

荷载值: -1.321 kN/m

3.1.3 荷载效应基本组合

组合1 :1.30*恒荷载+1.50*施工活荷载

组合2 :1.00*恒荷载+1.50*檩条风吸

组合3 :1.30*恒荷载+1.50*檩条雪

3.1.4 檩条强度、稳定验算

强度验算

所在跨: 1 轴和 2 轴之间、2 轴和 3 轴之间、3 轴和 4 轴之间

控制内力 (kN·m): M_x = 3.201;M_y = -0.179(组合: 2)

有效截面计算结果:

A_e = 4.4889e-04;

W_{ex1} = 1.3784e-05; W_{ex2} = 1.3784e-05; W_{ex3} = 1.4598e-05mm³; W_{ex4} = 1.4598e-05

W_{ey1} = 9.7337e-06; W_{ey2} = 5.4286e-06; W_{ey3} = 9.7337e-06mm³; W_{ey4} = 5.4286e-06

强度计算最大应力σ (N/mm²): 265.455 <= f = 305.000

强度验算满足!

风吸力作用跨中下翼缘受压稳定验算

所在跨: 1 轴和 2 轴之间、3 轴和 4 轴之间

控制内力 (kN·m): M_x = -2.559;M_y = 0.130(组合: 2)

有效截面计算结果:

A_e = 4.6105e-04;

W_{ex1} = 1.4724e-05; W_{ex2} = 1.4724e-05; W_{ex3} = 1.4540e-05mm³; W_{ex4} = 1.4540e-05

W_{ey1} = 9.8910e-06; W_{ey2} = 5.4277e-06; W_{ey3} = 9.8910e-06mm³; W_{ey4} = 5.4277e-06

受弯构件整体稳定系数: φ_b = 0.857

下翼缘受压稳定计算最大应力 (N/mm²): 229.427 <= f = 305.000

风吸力下翼缘受压稳定验算满足!

3.1.5 连续檩条挠度验算

荷载效应标准组合

组合1 :1.00*恒荷载+1.00*施工活荷载

组合2 :1.00*恒荷载+1.00*檩条风吸

组合3 :1.00*恒荷载+1.00*檩条雪

控制组合: 2

所在跨: 左端悬挑处

悬挑端最大挠度: 8.51mm

悬挑端计算挠跨比: 1/212 <= 1/200

挠跨比验算满足!

连续檩条验算满足!

3.2 计算结果

由计算书可看出, 檩条截面为C100X50X20X2.0时强度应力及稳定系数满足规范要求, 且接近限值。因此本工程檩条选用C100X50X20X2.0。

结语

通过本次优化计算, 檩条的总用量由可研阶段的4088t, 减少至3050t。节约钢材约1038t。可为业主节约材料成本约620万元。

本次优化计算, 针对项目主要特点, 环境条件等, 分别分析考虑了檩条的规格形式、强度等级、连接方式、成型工艺等。从每项影响因素中, 选取最合理经济的参数及方案。最终形成了此次的计算成果。

通过本次优化计算, 我深刻认识到: 结构设计首先需对规范透彻理解, 将理论知识与实际工程相结合, 设计应跟随实际工程调整, 而不是一成不变的。其次, 抓住细节, 每个细节做好才能设计出好的作品。才能更好的为实际工程服务。

参考文献

- [1]《钢结构设计标准》(GB 50017-2017)
- [2]《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018-2002)
- [3]《光伏支架结构设计规程》(NB/T 10115-2018)
- [4]《建筑光伏系统应用技术标准》(GB/T 51368-2019)。