

光伏撬装系列化研究

侯宇迪

大庆油田装备制造集团石油专用设备有限公司 黑龙江大庆

【摘要】本项目针对大庆油田井场地下管线及电缆铺设错综复杂、探明困难，桩基施工容易对地下管网、电缆损坏的技术难题，通过开展光伏子阵标准化设计、可移动式预制浅基础光伏撬设计方案研究和光伏撬载荷分析等研究内容，成功研制了浅基础光伏撬装，并形成系列化设计和推广。

【关键词】光伏；撬装；系列化

【收稿日期】2024 年 8 月 12 日

【出刊日期】2024 年 9 月 27 日

【DOI】10.12208/j.jer.20240028

Photovoltaic skid-mounted serialization research

Yudi Hou

Daqing Oilfield Equipment Manufacturing Group Petroleum Special Equipment Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang

【Abstract】 This project aims at the technical difficulties of the complicated and difficult exploration of underground pipelines and cables in the Daqing Oilfield well field, and the pile foundation construction is easy to damage the underground pipelines and cables. Through the research contents such as the standardized design of photovoltaic sub-arrays, the design scheme of movable prefabricated shallow foundation photovoltaic skids and the analysis of photovoltaic skid loads, the shallow foundation photovoltaic skid-mounted was successfully developed and serialized design and promotion were formed.

【Keywords】 Photovoltaic; Skid-mounted; Serialization

1 概述

1.1 立项背景

国家能源局 2022 年 9 月 15 日专门复函中国石油等央企，支持推动风光气储氢等一体化新业态新模式。大庆油田确立了“十四五”末建成千万千瓦级新能源示范基地的宏伟目标。

2023 年新建光伏项目 88.7 万千瓦，结合新能源项目建设场地情况，低洼地、湖泊等采用桩基础建设，其余场地均可采用光伏撬建设，占比约 40%~50%，光伏撬需求量约 2.7~6.7 万座。

光伏发电需要的永久征地面积较大，油田内闲置土地大部分位于中区，且呈碎片化分布，中区管网密度较大，油田井场地下管线及电缆铺设错综复杂、探明困难，土地周边油气设施密集。

截止至 2021 年底，大庆油田采油一厂~采油九厂共计拥有地下管道约 96489 公里，2021 年平均失效率为 0.377 次/公里·年。光伏板置于单井管线上存在搬迁的可能。

采用可移动式浅基础光伏撬，可拆卸，可搬迁，便于维修作业，可以避免桩基础光伏撬在打桩时存在碰穿管线的风险，因此研究浅基础光伏撬装系列化设计与推广非常必要。

1.2 国内外现状

国内大多光伏支架为桩基础设计，桩基础存在基础深、易于地下管线干涉、不便于搬迁等问题。可搬迁、浅基础、利用废旧油管设计的光伏撬支架目前在国内尚无先例。因为我国光伏项目兴起时间较晚，现在国内对其相关的研究工作较少，撬装一体化的设计尚还处于初级阶段。

2 技术总结

2.1 光伏子阵标准化设计

2.1.1 光伏组件趋势分析及选择

2022 年 2 月，PV InfoLink 发布的“光伏技术趋势报告”，针对尺寸、电池片、及组件发展进行了详细的数据分析，并对未来趋势进行预测。随着 2021 年下半年尺寸升级的加速，大尺寸硅片从 2021

年第三季度开始市场占有率已超过 50%，并持续增加。报告预测，到 2022 年，大尺寸硅片包括 182 和 210 的市场占有率将达到 79%。并且，值得注意的是，在大尺寸硅片组件市场占有率快速增加的基础上，210 市场占有率则不断攀升，进一步成为主流。

硅片尺寸市占率变化预估

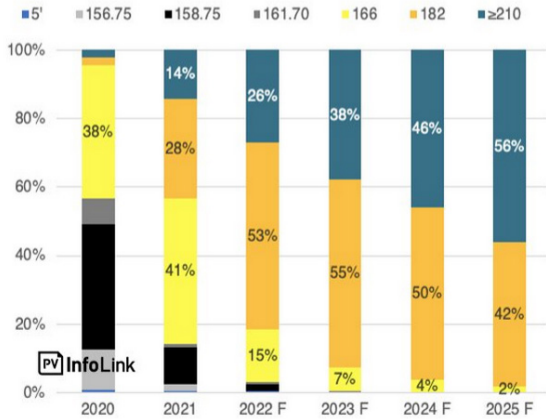


图 1 2022 年大硅片市占率近 80%

(来源：PV InfoLink 光伏技术趋势报告 2022 年 2 月)

截止到2022年8月30日，我国排名前十的组件企业上半年组件出货量					
序号	组件厂商	出货量	功率区间（版型尺寸mm）		
			535-555	600-620	650-670
1	晶科能源	18.21GW	2278x1134x30	2465x1134x35	
2	天合光能	18.05GW	2384x1096x30	2172x1303x35	2384x1303x33
3	隆基绿能	18.02GW	2256x1133x35		
4	晶澳科技	15.67GW	2278x1134x35		
5	阿特斯	8.73GW	2266x1134x30	2172x1303x35	2384x1303x35
6	东方日升	5.67GW	2384x1096x30	2172x1303x35	2384x1303x35
7	正泰	5.5GW	2278x1134x35	2172x1303x35	2384x1303x35
8	尚德	3.75GW	2278x1134x35/2384x1096x30	2172x1303x35	2384x1303x35
9	中环	2.69GW	2384x1096x30	2172x1303x35	2384x1303x35
10	一诺	2.5GW	2265x1134x30		

目前市场常用的 182 组件功率区间为 535-555Wp；210 组件功率区间为 600~670Wp，本次选取 182 组件常用峰值功率 540Wp 和 210 组件常用峰值功率 650Wp 作为基础峰值功率进行标准化方案设计，两种光伏组件的参数见下表。

编号	名称	单位	峰值功率	峰值功率
1.1	峰值功率	Wp	650	540
1.2	开路电压Voc	V	45.5	49.73
1.3	短路电流Isc	A	18.35	13.89
1.4	工作电压Vmppt	V	37.7	41.13
1.5	工作电流Imppt	A	17.27	13.13
1.6	峰值功率温度系数	%/°C	-0.34	-0.35
1.7	开路电压温度系数	%/°C	-0.25	-0.28
1.8	短路电流温度系数	%/°C	0.04	0.048
1.9	首年功率衰减	%	≤2	≤2
1.10	逐年功率衰减	%	≤0.45	≤0.45
1.11	外形尺寸	mm	2384×1303×35	2274×1134×30
1.12	重量	kg	38.7kg	34.3kg
1.14	向日跟踪方式		固定式	固定式
1.15	固定倾角角度	(°)	40	40

2.1.2 逆变器参数确定

目前油田常用的逆变器功率为 60kW、100kW、225kW、300kW 和 320kW 参数：

编号	名称	单位	功率				
1	输出额定功率	kW	320	300	225	100	60
2	最大交流侧功率	kW	352	330	247.5	110	66
3	最大交流电流	A	254	238.2	178.7	168.8	100
4	最高转换效率	%	99.01	99	99.01	98.6	98.6
5	中国效率	%	98.52	98.5	98.52	98.2	98.3
6	最大直流电压	V _{dc}	1500	1500	1500	1100	1100
7	MPPT范围	V _{dc}	500-1500			200-1000	
8	每路MPPT最大输入电流	A	40	65	30	26	22
9	额定交流输出电压	V	800V			400/380V	
10	输入路数	路	24	28	20	20	12
11	输出频率	Hz	50				
12	功率因数		0.8超前~0.8滞后				

2.1.3 光伏组件串联方案设计

根据《光伏发电站设计规范》GB50797-2012 光伏方阵组件串联数计算公式，匹配计算取值和公式如下：

(1) 电池组件计算参数

冬季光伏组件工作温度并非当地环境历年最低温度，冬季环境最低温度一般出现在凌晨 3-4 点钟，此时并未有太阳光出现，因此光伏组件工作时最低温度取极限值-30℃；

夏季电池组件工作温度，按当地环境最高温度，并附加组件自身发热，考虑极端情况，取 70℃。

(2) 电池组件串并联组合计算

计算公式：

$$\frac{V_{mppt\ min}}{V_{pm} \times [1 + (t' - 25) \times K_v']} \leq N \leq \frac{V_{mppt\ max}}{V_{pm} \times [1 + (t - 25) \times K_v']}$$

式中：

N——光伏组件串联数（N 取整）； V_{dcmax}——逆变器允许最大直流输入电压（V）

V_{mpptmax}——逆变器 MPPT 电压最大值（V）；
V_{mpptmin}——逆变器 MPPT 电压最小值（V）

V_{oc}——电池组件开路电压（V）； V_{pm}——电池组件工作电压（V）

k_v——光伏组件的开路电压温度系数； k_v' ——光伏组件的工作电压温度系数

t——光伏组件工作条件下的极限低温（℃）；
t' ——光伏组件工作条件下的极限高温（℃）

(3) 选用的允许最大直流输入电压 V_{dcmax}=1500V 的逆变器，650Wp 组件参数，组件 4 串联数为 15.6≤N≤28.9； 540Wp 组件参数，组件允许串联数为 14.4≤N≤26.1；

(4) 选用的允许最大直流输入电压 $V_{dc\max}=1100\text{V}$ 的逆变器, 650Wp 组件参数, 组件允许串联数为 $6.3\leq N\leq 21.2$; 540Wp 组件参数, 组件允许串联数为 $5.7\leq N\leq 19.1$ 。

经过计算组串常用的串联数为 28 块、26 块、20 块、18 块。

光伏标子阵标准化系列可分为桩基础系列、浅基础系列和废旧油管式光伏撬系列。

本次标准化定型图优先以 2x6 和 2x10 模型开展废旧油管式光伏撬设计, 后续根据具体情况再完善标准化设计。

2.2 可移动式预制浅基础光伏撬设计方案

2.2.1 预制浅基础主要技术数据

(1) 光伏支架结构设计工作年限为 25 年。

(2) 抗震设防烈度为 6 度, 设计基本地震加速度值为 $0.05g$ 。

(3) 风荷载: 光伏支架地基基础设计时按 50 年重现期确定基本风压, 本项目取 0.55kN/m^2 ; 地面光伏支架设计时, 按 25 年重现期确定基本风压, 本项目取 0.47kN/m^2 。地面粗糙类别为 B 类。

(4) 雪荷载: 光伏支架地基基础设计时按 50 年重现期确定基本风压, 本项目取 0.30kN/m^2 ; 光伏电站的光伏支架雪荷载按 25 年重现期确定基本雪压, 本项目取 0.26kN/m^2 。

(5) 光伏支架结构安全等级为三级, 基础设计等级丙级。

(6) 地下水和地基土对混凝土及钢筋混凝土结

构中的钢筋具微腐蚀性, 对钢结构具弱腐蚀性。

2.2.2 2×6 模型设计

光伏组件排列采用竖向双排布置, 固定倾角 40° , 光伏组件最低点距地面 1.2m 。为减少风压, 组件与组件之间留有 20mm 空隙, 每樘支架由斜梁、立柱、斜撑组成。在支架斜梁之间, 按照光伏组件的安装宽度设置檩条, 用于支撑光伏组件的重量。支架、檩条及组件均采用螺栓连接。

基础采用预制混凝土独立基础。废旧油管式光伏撬采用废旧油管制作撬座和支架、废旧抽油杆制作支撑, 将混凝土基础布置于地面, 便于运输和快速组装。

2.3 光伏撬载荷分析

风荷载按照 50 年一遇取基本风压 0.55kN/m^2 计算, 通过对支架、斜梁等构件的抗压、抗弯、抗剪、平面稳定性、整体稳定性分析计算, 前后基础的抗滑移、抗倾覆、抗拔验算, 构建强度、稳定性和基础受力等性能参数均达到国家标准规范要求, 可抗瞬间 10 级风, 光伏撬结构形式满足油田光伏项目建设需求。

2.4 废旧油管焊接工艺分析

J55 油管材质具有碳当量高、强度高、淬硬性高, 焊接性能差等特点, 焊接接头易出现较高的冷裂、晶体粗化、焊不透、焊偏等缺陷。在油管与其他材质焊接时需要进行焊接工艺评定, 确定合理的焊接方法、焊接材料、预热温度等各种参数后方可进行焊接。

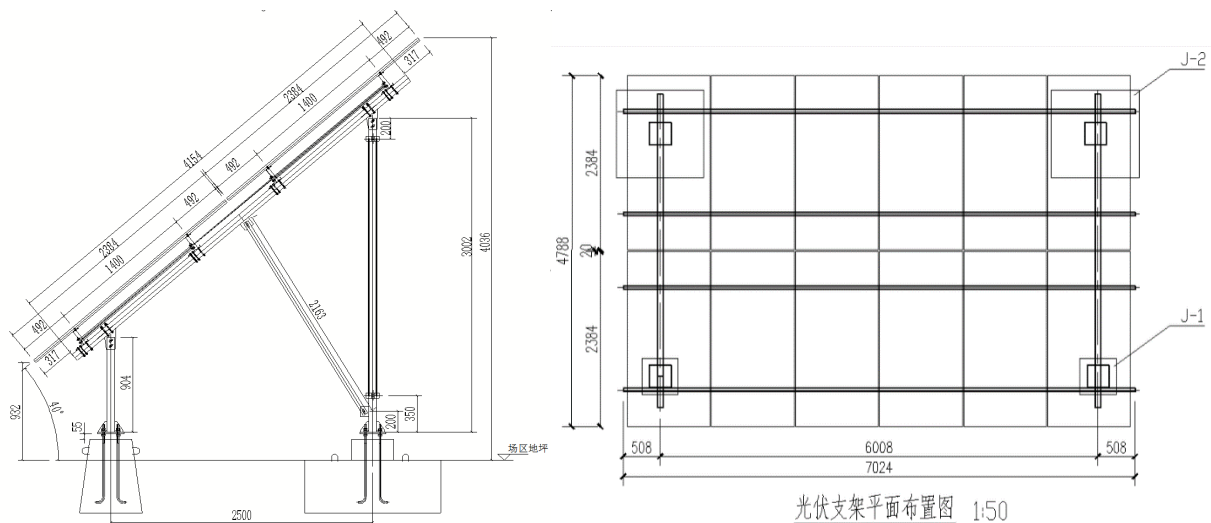


图 2 2×6 模型方案图

檩条 单构件截面验算计算书

第 1 章 设计资料

截面参数
圆管截面 B=73.00mm,H=62.00mm
设计参数
净毛面积比: 0.83
截面上翼缘侧向支撑长度: 3000.00mm
截面下翼缘侧向支撑长度: 2250.00mm
抗裂等级: 三级
组合类别: 非地震组合
钢号 Q355
钢材抗压弯强度设计值 $f=305.00\text{N/mm}^2$
钢材抗剪强度设计值 $f_v=175.00\text{N/mm}^2$
金属面规范性能设计构件类别: 轴心构件
壁厚比等级: B3 级
是否为轴心构件: 否
是否考虑受弯: 否
是否考虑受剪: 是
设计依据
(钢结构设计标准) (GB 50017-2017)

第 2 章 强度计算结果

1.截面特性验算
 $A=1166.32\text{mm}^2$
 $I_x=66863.69\text{mm}^4$; $I_y=66863.69\text{mm}^4$;
 $i_x=23.94\text{mm}$; $i_y=23.94\text{mm}$;
 $W_{1x}=18319.55\text{mm}^3$; $W_{2x}=18319.55\text{mm}^3$;
 $W_{1y}=18319.55\text{mm}^3$; $W_{2y}=18319.55\text{mm}^3$;
弯矩设计值
 $M_x=|-1.40|\times 1000000.00=1396465.88\text{N}\cdot\text{mm}$
 $M_y=|0.18|\times 1000000.00=180899.16\text{N}\cdot\text{mm}$
2.强度验算

承载力抗震调整系数 $\gamma_{RE}=1.00$
由《钢结构标准》6.1.2 条可知
截面塑性发展系数
 $\gamma_{x1}=1.20$; $\gamma_{x2}=1.20$
 $\gamma_{y1}=1.20$; $\gamma_{y2}=1.20$
由《钢结构标准》8.1.1-2 条可知, 圆管截面
$$\sigma_{max} = \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\gamma_{RE} W_x}$$

$$= \frac{\sqrt{1396465.88^2 + 180899.16^2}}{1.20 \times 18319.55 \times 0.83}$$

$$= 75.36\text{N/mm}^2 < [f_y] = 305.00\text{N/mm}^2$$

最大强度验算应力满足要求
$$\sigma_{min} = \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\gamma_{RE} W_x}$$

$$= \frac{\sqrt{1396465.88^2 + 180899.16^2}}{1.20 \times 18319.55 \times 0.83}$$

$$= -75.36\text{N/mm}^2 > [-f_y] = -305.00\text{N/mm}^2$$

最小强度验算应力满足要求

第 3 章 整体稳定性计算结果

1.截面特性验算
 $A=1166.32\text{mm}^2$
 $I_x=66863.69\text{mm}^4$; $I_y=66863.69\text{mm}^4$;
 $i_x=23.94\text{mm}$; $i_y=23.94\text{mm}$;
 $W_{1x}=18319.55\text{mm}^3$; $W_{2x}=18319.55\text{mm}^3$;
 $W_{1y}=18319.55\text{mm}^3$; $W_{2y}=18319.55\text{mm}^3$;
弯矩设计值
 $M_x=|-1.40|\times 1000000.00=1396465.88\text{N}\cdot\text{mm}$
 $M_y=|0.18|\times 1000000.00=180899.16\text{N}\cdot\text{mm}$
2.整体稳定性验算
由《钢结构标准》附录 C.0.5 条可知
整体稳定系数
 $\varphi_x=1.00$
$$\sigma_{ex} = \frac{M_x}{\varphi_x W_x} = \frac{1396465.88}{1.00 \times 18319.55} = 76.23\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{ey} = \frac{M_y}{\gamma_y W_y} = \frac{180899.16}{1.20 \times 18319.55} = 8.23\text{N/mm}^2$$

由《钢结构标准》6.2.3 条可知
$$\sqrt{\sigma_{ex}^2 + \sigma_{ey}^2} = \sqrt{76.23^2 + 8.23^2} = 76.67\text{N/mm}^2 < f = 305.00\text{N/mm}^2$$

截面整体稳定性应力满足要求

第 4 章 抗剪计算结果

1.截面特性验算
 $A=1166.32\text{mm}^2$
 $I_x=66863.69\text{mm}^4$; $I_y=66863.69\text{mm}^4$;
 $i_x=23.94\text{mm}$; $i_y=23.94\text{mm}$;
 $W_{1x}=18319.55\text{mm}^3$; $W_{2x}=18319.55\text{mm}^3$;
 $W_{1y}=18319.55\text{mm}^3$; $W_{2y}=18319.55\text{mm}^3$;
2.抗剪承载力计算
剪力设计值
 $V=|-2.57| \times 1000.00=2568.88\text{N}$
$$\tau = \frac{V}{b_s h_w} = \frac{2568.88}{11.00 \times 73.00} = 3.20\text{N/mm}^2 \leq f_v = 175.00\text{N/mm}^2$$

满足受剪强度要求

图 3 檩条计算结果简图

3 效益分析

3.1 直接经济效益

从 2023 年 1 月至今, 浅基础光伏撬已经在大庆油田采油一厂至采油六厂推广应用约 16500 座光伏撬, 并送电上网投入使用, 现场运行效果良好, 得到用户认可, 共计形成推广应用收入约 6.74 亿元, 经济效益可观。

3.2 社会效益

新型光伏撬装主体材料采用油田废旧油管, 达到环保要求的同时, 废旧物资再利用也能降低成本, 更可省去多余的废旧油管处理费用, 一举多得, 可移动的撬装设计也保证了在场地变动情况下, 光伏

发电撬装的重复利用性, 避免了固定式撬座可能出现的浪费现象。

4 市场前景

随着新型光伏撬装的研制成功, 光伏产品在油田的安装及井场间迁移效率大幅度提高, 同时固定方式由桩基固定改为浅基础固定, 降低了固定式光伏施工导致的油田管线失效的风险, 不但减少了新能源开发利用的时间成本, 而且能够节省工程中因油田管线失效而导致的额外修理支出, 提高了施工效率, 应用前景广阔。

5 结论

本项目完成了开题报告规定的全部研究内容,

样机设计、制造完成，现场试验圆满结束，样机各项运行指标达到开题报告的要求，能满足生产需要，得到用户全面认可。

通过用户现场使用证明本项目思路清晰，攻关方向准确，技术方案合理，满足用户要求，为我们光伏撬装产品提供了更为广阔的发展空间。

参考文献

- [1] 蒋卓凡.分布式光伏电站设计中的电气设计技术分析[J].智能建筑与智慧城市,2024,(10):146-148.
- [2] 张健,李允博,郭鹏,等.高渗透率分布式光伏电源接入线路停电检修反孤岛技术[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(05):125-132.
- [3] 周燕,刘卫民,陈帆,等.不同光伏渗透率下考虑需求响应的配电网储能双层规划[J].高压电器,2024,60(10):64-77.
- [4] 杜孝东,李伟,齐向阳,等.光伏区异质环境下土壤理化特性及化学计量特征分析[J/OL].草地学报,1-17[2024-10-18].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3362.S.20241014.1839.006.html>.
- [5] 龙海珊,刘凯.民用建筑中分布式光伏发电系统并网方案探讨[J].智能建筑电气技术,2024,18(05):85-88+118.
- [6] 蔡晓冬,王伟峰,刘庆发.分布式小光伏数据采集研究与应用[J].信息系统工程,2024,(10):40-43.
- [7] 廖明浩.建筑光伏系统并网技术及其对电气系统的影响分析[J].装备维修技术,2024,(05):85-87+90.
- [8] 王美婷,梁莉娜,刘英.延安市旅游资源开发现状及其发展探析[J].旅游纵览,2024,(08):155-157.