DOI:10.16853/j.cnki.1009-3575.2026.05.007

沙漠地区光伏支架基础选型研究

杜 强[1],薛子威[1],张 森[1],赵海飞[2],史斯文[2,*]
(1.内蒙古工业大学土木工程学院,呼和浩特 010051;2.内蒙古电力勘测设计院有限责任公司,呼和浩特 010020)

摘要:当前国家大力推广在沙漠、戈壁、荒漠地区建设大型光伏基地,但由于沙漠风积沙具有级配差、质地松散、流动性大等特点,对光伏支架基础稳定性及耐久性的影响与其他场地相比有较大的区别。因此,研究沙漠地区光伏支架基础的合理选型尤为重要。为了探究适合在沙漠地区使用的光伏支架基础型式,在总结大量已有文献的基础上,采用层次分析法从可靠性、效率性、环保性、经济性、耐久性等方面对5种常见的光伏支架基础进行对比,研究表明预应力管桩的权重最大为0.221,螺旋钢管桩的权重0.203,混凝土灌注桩的权重为0.068,型钢桩的权重为0.110,钢筋混凝土条形基础的权重为0.042。此外,通过MATLAB数值模拟研究发现,预应力管桩的25 a累积腐蚀深度和桩顶水平位移最小,性能最优,推荐采用预应力管桩作为沙漠地区光伏支架基础。

关键词:沙漠场地;光伏支架基础;层次分析法;预应力管桩
中图分类号:TU475 **文献标志码**:A **文章编号**:1009-3575(2026)05-0058-10

Different Foundation Selection of Photovoltaic Support in Desert Area

DU Qiang[1], XUE Ziwei[1], ZHANG Miao[1], ZHAO Haifei[2], SHI Siwen[2,*]
(1. *School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot* 010051, *China*;
2. *Inner Mongolia Electric Power Survey & Design Institute Co., Ltd., Hohhot* 010020, *China*)

Abstract: Currently, China is vigorously promoting the construction of large-scale photovoltaic bases in desert and Gobi regions. However, due to the characteristics of desert wind-accumulated sand, such as poor gradation, loose texture, and high fluidity, its impact on the stability and durability of photovoltaic support foundations is significantly different from that of other sites. Therefore, it is particularly important to study the reasonable selection of photovoltaic support foundation types in desert areas. To explore suitable photovoltaic support foundation types for use in desert areas, this paper summarized a large number of existing literature, and employed the Analytic Hierarchy Process (AHP) to compare five common photovoltaic support foundations based on reliability, efficiency, environmental protection, economy, and durability. The study showed that the weight of the stress pile was 0.221, the weight of the spiral steel pipe pile was 0.203, the weight of the concrete cast-in-situ pile was 0.068, the weight of the H-shaped steel pile was 0.110, and the weight of the reinforced concrete strip foundation was 0.042. In addition, numerical simulations using MATLAB found that the 25-year accumulated corrosion depth and pile head horizontal displacement of prestressed pipe piles were the smallest, indicating the best performance. It is recommended to use prestressed piles as the photovoltaic support foundation in desert areas.

Key words: Desert field; Photovoltaic bracket foundation; Analytic Hierarchy Process; Prestressed pipe piles

随着全球环保意识的增强和能源危机的加剧,清洁能源作为传统化石燃料的重要替代品受到广泛关注[1]。其中,太阳能凭借可再生性和广泛的可利用性,成为清洁能源体系的关键组成部分。2021年国家提出在沙漠地区规划建设大型风光基地。预计到2030年,以沙漠为建设场地的大型风光基地总装机容量将达4.55亿kW[2],标志着我国新能源发展的重大飞跃。

沙漠地区具备发展光伏的显著优势:气温高、降雨稀少、日照时间长、太阳辐照强烈,且地势开阔、建筑物稀少,为大规模光伏电站建设提供了理想空间。然而,沙漠环境的特殊性对光伏电站建设提出了严峻挑战。沙漠地形复杂多变,沙漠风积沙级配差、粒间几乎无胶结,在常年风力作用下呈现流动性大、质地松散、稳定性极差的特性。这些特性对光伏支架基础的稳定性构成了巨大威胁。基础作为光伏支架的核心承重结构,支撑系统的自重并承受外部荷载,庞大的数量更使其成为影响整个项目建设的关键环

收稿日期:2025-11-10
基金项目:内蒙古自然科学基金项目(2018BS05015)
作者简介:杜 强(1987—),男,博士,副教授,主要从事环境岩土工程方面的研究,E-mail:dq410@imut.edu.cn;*为通信作者,史斯文(1990—),男,硕士,高级工程师,主要从事电力勘察方面的研究,E-mail:ssiwen@nmdsy.com

节[3-4]。在沙漠这一特殊地质环境下，基础的选型直接决定了光伏系统的结构安全、施工可行性以及整体经济性。因此，针对沙漠地区进行科学、合理的光伏支架基础选型，对整个光伏电站的安全、高效建设和长期稳定运行至关重要。本文将对目前常用的5种光伏支架基础型式进行介绍，并从技术和经济角度进行对比分析，旨在为沙漠地区的光伏电站建设提供参考依据。

1　光伏支架基础型式

目前，光伏支架常用的基础型式主要包括型钢桩、螺旋钢管桩、混凝土灌注桩、预应力管桩（PHC管桩）以及钢筋混凝土条形基础等[5-6]，如图1所示。此外，部分异形桩基础也可用作光伏支架基础[7-8]，但在实际工程中应用尚不广泛。



a. 型钢桩　b. 螺旋钢管桩　c. 混凝土灌注桩　d. 预应力管桩　e. 钢筋混凝土条形基础

图1　光伏支架基础型式

Fig. 1　Photovoltaic basic type

1.1　型钢桩基础

型钢桩是由钢板、钢带等通过焊接、热轧等工艺制成。其施工采用液压机械夹持桩身，垂直向下压沉至预定深度。

为深入探究型钢桩在沙漠地区的适用性，丁晓勇等[9-13]开展了水平载荷试验及竖向抗压、抗拔载荷试验。研究表明，型钢桩的极限承载力与截面尺寸、桩长呈正相关关系；在相同承载力要求下，H型桩相较于C型和槽型桩具有耗材低、强度高、挤土量少、施工便捷、运输方便等优势。然而，沙漠地区土体松散且盐分含量高，型钢桩的应用面临地质与气候的双重挑战。从地质层面来看，松散砂层孔隙比大、地基承载力低，难以对桩体形成有效嵌固。叠加动态风荷载作用，易诱发流沙迁移，侵蚀桩周土体，削弱桩侧覆土压力，导致桩体水平位移与沉降。在气候层面，沙漠昼夜温差达30~50 ℃，引发钢材反复热胀冷缩，产生周期性应力循环，加速疲劳裂纹产生。同时，风沙冲蚀破坏桩体表面防腐涂层，暴露的钢材基体在土壤中氯离子作用下发生电化学腐蚀。风沙冲蚀与化学腐蚀的协同作用显著加速腐蚀速率，缩短使用寿命。

1.2　螺旋钢管桩基础

螺旋钢管桩以钢管为主要受力结构，外侧螺旋焊接钢板叶片，桩端呈锥形。施工时，通过专用机械直接旋入地下。近年来，该基础在光伏电站中应用广泛。

颜然等[14]研究发现钻进比与沉桩扭矩、下压力呈线性关系，且钻进比对扭矩的影响大于下压力；降低钻进比可有效提升螺旋桩抗拔承载力。鉴于螺旋桩桩径较小，抗倾覆能力较弱，倾斜荷载下的竖向荷载分量会加速其破坏，部分学者对其倾斜向承载特性开展了研究。胡伟等[15]探讨了荷载角度的影响及锚片表面土压力分布规律，发现荷载角度在0°~65°时，承载性状由水平方向控制。刘志鹏等[16]研究了荷载角度、叶片直径等因素对单桩极限承载力及桩周土体位移场的影响，指出在砂土地基中，螺旋桩承受斜拔荷载时破坏主要由水平荷载控制，竖向荷载会加速水平破坏。荷载角度、埋深比、叶片直径及数量等因素均显著影响螺旋桩承载性能，在沙漠地区应用需深入研究。

王思朋等[17]认为螺旋钢管桩在沙漠地区满足承载力设计要求，并具备绿色环保、施工便捷高效、可重复利用等优点[18]。然而，螺旋桩在旋入过程中表面镀锌层易受损，可能影响其耐久性；在高盐碱沙漠地质条件下，钢材腐蚀速度加快。光伏电站设计寿命通常为25 a，螺旋钢管桩在特殊腐蚀性环境中能否满足此寿命要求，仍需长期观测验证。

1.3　混凝土灌注桩基础

混凝土灌注桩是在桩位现场通过机械或人工方法成孔，然后灌注混凝土或钢筋混凝土形成的桩基础。其依靠桩身与桩周土的摩擦力共同抵抗压、拔荷载并维持稳定，上部支架通过桩顶预埋件或地脚螺栓固定。

针对特殊地质条件，李博[19]指出荒漠区厚层松

散砂层导致造孔定位困难，需注意塌孔风险。成桩过程对灌注桩承载性能至关重要，沙漠地区应用需综合考虑水文地质、气候及运输条件。在地质条件上：松散砂层侧压力小，钻孔时孔壁极易坍塌；流沙层流动性强，难以有效支撑桩孔，导致成孔困难且易偏移，这对施工的效率性造成很大影响；在气候方面，高温加速水泥水化，混凝土坍落度损失快，影响浇筑质量；昼夜温差使混凝土内部产生温度应力，易开裂。因此，沙漠地区施工需严格控制工艺以确保结构的可靠性与耐久性全面满足设计标准及长期服役需求。此外，地表以上外露桩身需支模浇筑，施工速度比预制桩慢[20-21]。

1.4 预应力管桩

预应力管桩（PHC管桩）桩身采用高强度混凝土配预应力钢筋，施工时通过锤击或静压法沉桩，局部土体固结时需引孔[22]。具有安装工序简单，机械化程度高，施工速度快等优点，已广泛应用于各类场地的光伏项目。

李红星等[23]在砂土场地进行了预应力管桩的侧向荷载、侧向-扭转耦合荷载及循环荷载现场试验。研究表明，预应力管桩基础变形呈现阶段性特征；扭转荷载加速土体塑性发展，降低了立柱抗裂性；桩帽可有效减小泥面位移，但对立柱变形影响有限；正常使用极限状态下，循环荷载后的残余变形约为单次荷载变形的2倍。这些发现对沙漠地区应用具有重要参考价值：揭示的变形阶段性特征有助于设计合理监测周期与预警阈值，预判风荷载或流沙迁移下的桩体变形趋势；提出的扭转荷载加速塑性破坏的结论契合沙漠砂层承载力低的特点，为加强桩体抗扭构造提供了理论依据；桩帽抑制泥面位移的效果为减少风蚀导致的桩周土流失提供了防护思路；循环荷载下残余变形增大的现象与沙漠频繁风荷载高度相关，有助于评估预应力管桩长期耐久性，指导荷载取值与安全储备设计。夜昊等[24]对比分析了预应力管桩、预成孔注浆地锚桩及钢螺旋桩的施工工艺和单桩承载力，提出预应力管桩更适用于沙漠地区。

预应力管桩具有多方面显著优势。力学性能上，预应力有效提升桩身抗裂性与承载力，抗弯、抗剪强度优于普通混凝土桩，适应复杂地质与较大荷载。施工方面，采用工厂预制，质量稳定、效率高；现场沉桩无需泥浆护壁，速度快，工期短，机械与人工成本低。经济性上，同等承载力下，桩身尺寸小、材料用量省，造价低，后期维护成本低。环保性方面，工厂化预制减少现场湿作业，降低扬尘与噪声污染；施工无泥浆排放，减少环境破坏。然而，在沙漠风力作用下，管桩周围易形成涡流区，砂粒迁移导致“沙窝”现象，使基础埋深减小，影响光伏组件稳定性。同时，风沙流持续冲刷桩体表面，造成风力侵蚀[25]，其对管桩承载性能的长期影响仍需进一步研究。

1.5 钢筋混凝土条形基础

钢筋混凝土条形基础通常设置于地表或浅埋，依靠基础自重平衡风荷载产生的上拔力，内部配置钢筋[26]。其施工工艺相对简单，易于操作，采用标准化模板可实现流水化作业，提高施工效率[27-28]，且无需特殊大型机械设备。在可流动沙漠地基上，采用联合条形基础有助于解决不均匀沉降问题[27]。

但该基础本身也存在局限性，其埋深较浅，当小于0.5 m时，需验算抗滑移稳定性[27]。对于沿支架长度方向布置的条形基础，为抵抗后柱在风吸力下的较大拉拔力，通常需增加基础自重，导致工程量增大。

在沙漠环境中，条形基础也面临严峻挑战：昼夜温差悬殊，白天高温暴晒使混凝土膨胀，夜间低温使其迅速收缩，诱发基础内部产生疲劳应力，易出现贯穿性裂缝，威胁结构安全。松散沙土缺乏有效持力层，易导致条形基础不均匀沉降，造成上部结构倾斜甚至坍塌。此外，相对于其他基础型式，条形基础施工周期长，混凝土浇筑与养护依赖大量水资源[29]，而沙漠水资源极度匮乏，取水困难且运输成本高昂。沙漠地区交通不便，也使得施工设备与建材的长距离、低效率运输成为制约因素。

2 基于层次分析法的基础评估模型

为选取最适合沙漠地区的光伏支架基础类型，建立了基于层次分析法（Analytic Hierarchy Process，AHP）的基础评估模型。AHP通过构建目标层—准则层—方案层的结构并融合定性判断和定量计算，可以解决复杂、模糊的多目标决策问题[30-31]。首先本文基于550 Wp光伏组件所需的抗拔极限承载力要求进行元素间的比较并确定各层元素的判断矩阵；然后，根据判断矩阵计算出其相对重要性权重并进行一致性检验；最后，计算各方案的总权重，选取出总权重最大的基础类型作为最优类型。

2.1　构建准则层判断矩阵

考虑到实际光伏电站项目需求，结合沙漠地区环境恶劣、土体流动性大、质地松散等特点，参考孙琦等[32]研究结果，选取可靠性、经济性、效率性、耐久性、环保性5个方面作为准则层评价指标；选取光伏支架常用的5种基础类型作为方案层，列出基础比选功能表，如表1所示。

表1　基础比选功能表

Table 1　Pile foundation comparison function table

准则层	方案层
可靠性	预应力管桩
经济性	螺旋钢管桩
效率性	钢筋混凝土灌注桩
耐久性	型钢桩
环保性	钢筋混凝土条形基础

在基础选型研究中优先考虑可靠性，并兼顾耐久性、经济性、效率性与环保性[33-35]，依据此对准则层5个指标进行重要性比较，构建5×5阶判断矩阵，如表2所示。

表2　准则层判断矩阵

Table 2　Criteria level judgment matrix

准则层	可靠性	经济性	效率性	耐久性	环保性
可靠性	1	3	4	2	5
经济性	1/3	1	2	1/2	3
效率性	1/4	1/2	1	1/3	2
耐久性	1/2	2	3	1	4
环保性	1/5	1/3	1/2	1/4	1

矩阵采用SAATY提出的1~9标度法[36]，1表示两因素同等重要，3表示一因素比另一因素稍微重要，5表示明显重要，7表示强烈重要，9表示极端重要；2、4、6、8为相邻标度的中间值。

沙漠地区风荷载显著、地基松散，基础可靠性直接决定光伏系统安全，优先级最高；耐久性紧随其后，需确保基础达到设计寿命，保障长期运维安全。在保障安全与寿命的基础上，经济性为次要准则，经济性聚焦沙漠地区高昂的施工及运输成本控制，效率性聚焦通过缩短工期降低恶劣环境下的施工风险，经济性重要性略高于效率性；环保性则需在成本约束下，合理平衡植被保护与土壤污染防控。根据1~9标度法，确定各因素间的相对重要性量化：可靠性对耐久性为2，对经济性为3，对效率性为4，对环保性为5；耐久性对经济性为2，对效率性为3，对环保性为4；经济性对效率性为2，对环保性为3；效率性对环保性为2[37-39]。

2.2　构建方案层判断矩阵

沙漠地区风力较大且光伏板对基础的抗压承载力要求不高，所以抗拔极限承载力成为检验基础可靠性的重要指标。本文以550 Wp单晶硅光伏组件为例，光伏支架承载能力极限状态下，基本组合效应设计值Sd按照相关规范确定。经计算，光伏支架所需的抗拔承载力为1.67 kN，基于基础抗拔承载力的余量进行可靠性评分。

由文献可知，在上部光伏支架相似的情况下，不同基础类型的抗拔承载力存在差异。采用桩长5.5 m、桩径300 mm的预应力管桩时，抗拔极限承载力78 kN；采用桩长3.4 m、直径76 mm的螺旋钢管桩时，抗拔极限承载力60.8 kN[24]；采用截面尺寸80 mm×80 mm×4 mm×4 mm、桩长2 m的H型钢桩时，抗拔极限承载力为21.72 kN[10]；采用桩长3 m、直径300 mm的C30混凝土灌注桩时，抗拔极限承载力为12.09 kN；而采用总长2.6 m、宽0.48 m、高0.4 m的钢筋混凝土条形基础时，抗拔极限承载力为9.47 kN[28]。

以抗拔承载力余量为指标计算可靠性分数：把承载力余量按照每10 kN为1分计算，不足10 kN按1分算，对可靠性赋分。可靠性依次为：预应力管桩8分，螺旋钢管桩6分，混凝土灌注桩1分，型钢桩2分，钢筋混凝土条形基础1分。可靠性判断矩阵如表3所示。

表3　可靠性判断矩阵

Table 3　Reliability judgment matrix

基础型式	预应力管桩	螺旋钢管桩	混凝土灌注桩	型钢桩	钢筋混凝土条形基础
预应力管桩	1	8/6	8	4	8
螺旋钢管桩	6/8	1	6	3	6
混凝土灌注桩	1/8	1/6	1	1/2	1
型钢桩	2/8	1/3	2	1	2
钢筋混凝土条形基础	1/8	1/6	1	1/2	1

基础施工时间直接影响施工效率，材料运输时间也会给工期带来影响，材料运输时间越短，效率越高、工期越短。螺旋钢管桩施工较快，但存在运输困难问题[40]。预应力管桩虽力学性能稳定，但运输费用高且压桩困难，这也给工期效率带来影响[41]。钢筋混凝土条形基础形式简单，施工方便，但需要现场开挖、大规模的支模及混凝土养护工作，工程量大且人工耗时多。钢筋混凝土灌注桩，成孔较方便，混凝土和钢筋用量较钢筋混凝土条形基础小。型钢桩具有在相同承载力条件下挤土量少、施工容易且运输便捷等优点[10]。

基于可靠性计算各基础尺寸，经换算，预应力管桩的施工耗时约为58.2 min/根[42]，钢管螺旋桩的施工耗时为4.9 min/根[43]，混凝土灌注桩的平均施工时间约为33 min/根[44]，钢筋混凝土条形基础施工时间为72 min/m，型钢桩的平均施工时间为1 min/根[45]，

以单根基础的施工工期为指标，每10 min赋1分，不够10 min按1分算。然后对效率性反向赋分，效率性分数=10−初始分。

各基础的效率性打分依次为：预应力管桩4分，螺旋钢管桩9分，混凝土灌注桩6分，型钢桩9分，钢筋混凝土条形基础2分。效率性判断矩阵如表4所示。

表4 效率性判断矩阵

Table 4 Efficiency judgment matrix

基础形式	预应力管桩	螺旋钢管桩	混凝土灌注桩	型钢桩	钢筋混凝土条形基础
预应力管桩	1	4/9	4/6	4/9	4/2
螺旋钢管桩	9/4	1	9/6	9/9	9/2
混凝土灌注桩	6/4	6/9	1	9/6	7/2
型钢桩	9/4	9/9	9/6	1	9/2
钢筋混凝土条形基础	2/4	2/9	2/7	2/9	1

计算每种基础所需费用：预应力管桩860元/根、螺旋钢管桩91元/根、混凝土灌注桩135元/根、型钢桩331元/根、钢筋混凝土条形基础246元/米。

以单根基础造价为指标，每100元赋1分，不够100元按1分算。对经济性分数反向赋分，经济性分数=10−初始分。各桩型经济性打分依次为：预应力管桩1分，螺旋钢管桩9分，混凝土灌注桩8分，型钢桩6分，钢筋混凝土条形基础7分。经济性判断矩阵如表5所示。

表5 经济性判断矩阵

Table 5 Economic judgment matrix

基础型式	预应力管桩	螺旋钢管桩	混凝土灌注桩	型钢桩	钢筋混凝土条形基础
预应力管桩	1	1/9	1/8	1/6	1/7
螺旋钢管桩	9/1	1	9/8	9/6	9/7
混凝土灌注桩	8/1	8/9	1	8/6	8/7
型钢桩	6/1	6/9	6/8	1	6/7
钢筋混凝土条形基础	7/1	7/9	7/8	7/6	1

基于某沙漠光伏项目的腐蚀环境来评估基础的耐久性。根据该项目岩土勘察报告，地下水对混凝土结构具有微腐蚀性，对混凝土结构中的钢筋具有弱腐蚀性；地基土对混凝土结构和混凝土结构中的钢筋腐蚀均具有微腐蚀性。根据pH值并结合电阻率测试结果，地基土对钢结构具有弱-中腐蚀性。

以基础的腐蚀程度为指标，采用反向赋分法，微腐蚀性记为1分，弱腐蚀性记为3分，中腐蚀性记为5分，针对每种结构类型，叠加其面临的所有腐蚀因素，得到“总腐蚀值”依次为：预应力管桩1分，螺旋钢管桩7分，混凝土灌注桩6分，型钢桩4分，钢筋混凝土条形基础5分。

叠加腐蚀因素与防腐措施进行反向赋分，耐久性=10−腐蚀值。按总腐蚀值反向赋分，耐久性打分为预应力管桩8分，螺旋钢管桩2分，混凝土灌注桩3分，型钢桩5分，钢筋混凝土条形基础4分。耐久性判断矩阵如表6所示。

沙漠地区生态环境脆弱，光伏基础施工的植被破坏率是环保性的核心评价指标。基础底面积越

表 6　耐久性判断矩阵

Table 6　Durability judgment matrix

基础型式	预应力管桩	螺旋钢管桩	混凝土灌注桩	型钢桩	钢筋混凝土条形基础
预应力管桩	1	8/2	8/3	8/5	8/4
螺旋钢管桩	2/8	1	2/3	2/5	2/4
混凝土灌注桩	3/8	3/2	1	3/5	3/4
型钢桩	5/8	5/2	5/3	1	5/4
钢筋混凝土条形基础	4/8	4/2	4/3	4/5	1

大，开挖范围越广，植被直接破坏越严重；施工注浆量越多，混凝土浆液污染土壤的范围越大，间接影响植被生长。因此，环保性通过基础底面积和施工注浆量双因素量化评估。

预应力管桩桩顶面积 70 685 mm^2，无注浆。螺旋钢管桩桩顶面积 4 536 mm^2，无注浆。混凝土灌注桩面积 70 685 mm^2，注浆量为 0. 2 m^3。型钢桩面积 6 400 mm^2，无注浆。钢筋混凝土条形基础面积 4 992 000 mm^2，注浆量为 0. 5 m^3。

以基础注浆量为指标，每 0. 25 m^3 赋 1 分，不够 0. 25 m^3 按 1 分算，无注浆量为 0 分。对注浆量分数反向赋分，注浆量分数=3−初始分。

以 4 536 mm^2 为基准面积，赋 5 分，每种基础的底面积得分=5−$\log_{10}$（当前面积/基准面积）。螺旋钢管桩 5 分，型钢桩 5 分，预应力管桩和混凝土灌注桩 4 分，钢筋混凝土条形基础 3 分。将基础底面积得分与注浆量分数叠加，即为环保性分数：预应力管桩 7 分，螺旋钢管桩 8 分，混凝土灌注桩 6 分，型钢桩 8 分，钢筋混凝土条形基础 4 分。环保性判断矩阵如表 7 所示。

表 7　环保性判断矩阵

Table 7　Environmental judgment matrix

基础型式	预应力管桩	螺旋钢管桩	混凝土灌注桩	型钢桩	钢筋混凝土条形基础
预应力管桩	1	7/8	7/6	7/8	7/4
螺旋钢管桩	8/7	1	8/6	8/8	8/4
混凝土灌注桩	6/7	6/8	1	6/8	6/4
型钢桩	8/7	8/8	8/6	1	8/4
钢筋混凝土条形基础	4/7	4/8	4/6	4/8	1

2. 3　计算权重向量

层次分析法中的权重反映某一层级元素相对于其所属上一层级元素的重要程度占比，采用和积法计算出各指标的权重。首先计算判断矩阵的最大特征值及其对应特征向量，对每一列进行归一化：

$$\boldsymbol{a}'_{ij}=\frac{\boldsymbol{a}_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}\boldsymbol{a}_{ij}} \tag{1}$$

式中：a_{ij} 为元素 i 相对元素 j 的重要性评分，a'_{ij} 为元素归一化后的重要性评分，m 为元素数量。

然后计算每一行的平均值且作为权重，以 w_i 表示：

$$\boldsymbol{w}_i=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\boldsymbol{a}'_{ij} \tag{2}$$

方案层权重汇总表如表 8 所示，记为 $\boldsymbol{w}_1$。准则层的权重由准则层的判断矩阵通过和积法计算得出，记为 $\boldsymbol{w}_2$，分别为可靠性 0. 42，效率性 0. 16，经济性 0. 10，耐久性 0. 26，环保性 0. 06。其中，可靠性权重为 39%，在 5 项指标中占比最大。

表 8　方案层权重汇总

Table 8　Summary of scheme layer weights

基础型式	可靠性	效率性	经济性	耐久性	环保性
预应力管桩	0. 444	0. 133	0. 032	0. 364	0. 212
螺旋钢管桩	0. 333	0. 299	0. 290	0. 091	0. 242
混凝土灌注桩	0. 056	0. 206	0. 258	0. 136	0. 182
型钢桩	0. 111	0. 299	0. 194	0. 227	0. 242
钢筋混凝土条形基础	0. 056	0. 064	0. 226	0. 182	0. 121

2. 4　一致性检验

AHP 法分析结果的准确性由调研的客观程度所决定。当比较的风险因素较复杂或主观性较大时，较难保证计算结果的客观性，即判断矩阵一致性指标较差。因此，有必要通过计算每一个两两矩阵的特征向量对判断矩阵做一致性检验。

一致性检验的指标是 I_C 值，I_C 值越小代表一致性越好，当 $CI\leqslant 1$ 时，认为该判断矩阵分析结果可以

接受。

计算CI值之前先计算λ_{max}：

$$\lambda_{max}=\frac{\sum(\boldsymbol{Aw})_i}{n\boldsymbol{w}_i} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{A}$是判断矩阵，$\boldsymbol{w}$是权重，n是矩阵阶数。

再计算I_C值，其中λ_{max}是判断矩阵的最大特征值：

$$I_C=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1} \tag{4}$$

随着判断矩阵的阶数升高，其I_C值越来越难以满足条件。因此，放宽阶数限制引入平均一致性指标I_R，如表9所示，并对I_C进行进一步的校正。最终通过矫正之后的R_C值进行一致性表征：

$$R_C=\frac{I_C}{I_R} \tag{5}$$

针对准则层的5阶判断矩阵计算得到R_C=0.015<0.1，准则层判断矩阵满足一致性检验，计算所得权重具有一致性。针对方案层的R_C=0.000<0.1，5种基础类型在准则层的约束下满足一致性检验，计算所得权重具有一致性。

表9 随机一致性I_R表格

Table 9 Random consistency I_R table

N阶	I_R值
3	0.52
4	0.89
5	1.12
6	1.26
7	1.36

2.5 计算总权重

通过准则层各评价指标的权重与对应指标下各方案的局部权重进行加权求和运算得到总权重，计算公式如下：

$$\boldsymbol{W}=\boldsymbol{w}_1\boldsymbol{w}_2=\begin{bmatrix}0.444&0.133&0.032&0.364&0.212\\0.333&0.299&0.290&0.091&0.242\\0.056&0.206&0.258&0.136&0.182\\0.111&0.299&0.194&0.227&0.242\\0.056&0.064&0.226&0.182&0.121\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0.42\\0.16\\0.10\\0.26\\0.06\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.221\\0.203\\0.068\\0.110\\0.042\end{bmatrix}$$

根据综合得分可知，5种桩基施工方案的权重：预应力管桩的权重为0.221，螺旋钢管桩的权重为0.203，混凝土灌注桩的权重为0.068，型钢桩的权重为0.110，混凝土条形基础的权重为0.042。说明在保证基础可靠性和耐久性的同时，兼顾经济性、环保性和施工效率方面，预应力管桩作为沙漠地区光伏支架基础较为合适。目前预应力管桩在沙漠地区光伏建设中已有应用（见图2）。



腾格里沙漠新能源基地一期光伏项目　库布其沙漠新能源基地　阿拉善百万光伏项目

图2 实际光伏项目

Fig. 2 Actual PV projects

3 讨论

3.1 基础腐蚀耦合

沙漠地区特殊的气候与土壤环境使得光伏支架基础面临腐蚀威胁，沙漠环境中风沙冲蚀与化学腐蚀的协同作用，易造成基础抗拔承载力下降，影响支架系统的服役可靠性。风沙冲蚀直接破坏基础表面防腐涂层，氯离子浓度诱发的电化学腐蚀，碱性pH值加速的混凝土碳化或钢材腐蚀，共同构成了腐蚀演化的外部驱动力；而基础材质硬度、防腐涂层厚度与自身耐久性则决定了其抗腐蚀能力的内在差异。

基于此，本文进一步采用MATLAB对腐蚀性评价进行定量分析。基础腐蚀性考虑风沙冲蚀破坏涂层与电化学腐蚀的协同作用，通过构建环境参数网格，耦合不同基础类型的敏感度系数、量化腐蚀深度随时间的演化规律。

首先，在 MATLAB 里设置基础物理力学参数，包括桩长、桩径、涂层厚度、抗弯刚度、抗拔承载力等；土体参数包括弹性模量、内摩擦角、重度、阻尼比等；环境参数包括风速、氯离子浓度和 pH 值。然后，通过 function 函数并依据耐久性打分设置基础的腐蚀速率和敏感度系数。最后，通过 sand-d 和 angle 函数模拟风沙冲蚀，通过 electro-corr 函数模拟化学腐蚀，计算结果如图 3 所示。

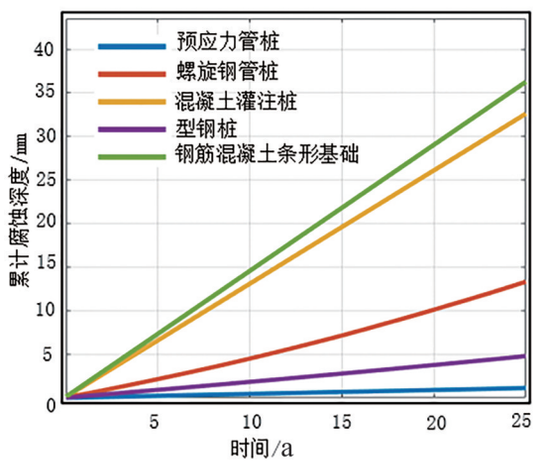


图 3　腐蚀深度发展

Fig. 3　Deep development of corrosion

预应力管桩、螺旋钢管桩、型钢桩具有防腐涂层，腐蚀深度控制较好，混凝土灌注桩和钢筋混凝土条形基础没有防腐涂层且会与土中氯离子产生电化学反应导致腐蚀深度较大。钢筋混凝土条形基础埋深较浅受风蚀严重，腐蚀深度最大。经预测，在 25 a 的服役期不同基础的腐蚀深度分别为：预应力管桩 1. 12 mm，螺旋钢管桩为 13. 32 mm，混凝土灌注桩为 32. 59 mm，型钢桩为 4. 78 mm，钢筋混凝土条形基础 36. 36 mm。混凝土灌注桩和钢筋混凝土条形基础可以加入防腐涂层使其防腐能力增强。

3. 2　基础长期可靠性

沙漠地区光伏支架基础长期承受以风荷载为主的动态荷载作用。风荷载具有随机性强、幅值波动大的特点，长期循环作用易引发桩顶水平位移，严重时可能导致支架倾斜、光伏组件失效。因此基于 MATLAB 进一步开展风荷载下基础长期可靠性研究。

先在 MATLAB 里设置与腐蚀性研究中相同的基础参数和土体参数，再通过 wind-mean 平均风荷载、wind-var 风荷载变异系数、load-freq 荷载频率函数设置风荷载参数。模拟输出 25 a 长期循环风荷载作用下的桩顶累积水平位移，结果如图 4。

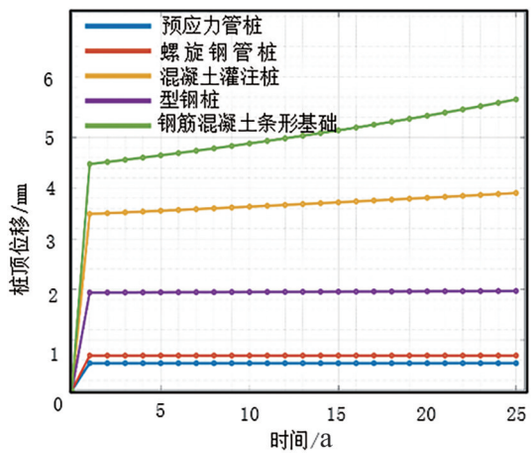


图 4　桩顶水平位移–时间图

Fig. 4　Pile top horizontal displacement-time diagram

由图 4 预测结果可知，在 25 a 的服役期各基础位移分别为：预应力管桩 0. 54 mm，螺旋钢管桩 0. 69 mm，混凝土灌注桩 3. 90 mm，型钢桩 1. 97 mm，钢筋混凝土条形基础 5. 75 mm。预应力管桩在长期性能上表现也比较优越，钢筋混凝土条形基础的位移最大，长期性能最差。

3. 3　光伏新型桩基础

除常规基础类型外，近年基于仿生原理提出了部分新型光伏桩基。这类新型桩基是针对沙漠地区环境挑战开发的前沿技术，图 5 所示蛇形桩[7]借鉴仿生学原理，提出了一种创新的光伏阵列桩基，其模仿蛇腹鳞与土之间的各向异性摩擦力使基础具备强大的抗拔力[46]。

蛇形桩的极限抗拔承载力为 70. 25 kN，高于螺旋钢管桩的 60. 8 kN，低于预应力管桩的 78 kN。其在 6 kN 的水平荷载作用下，桩顶部的水平位移为 0. 28 mm[7]，具备良好的可靠性。

为进一步探讨蛇形基础作为沙漠地区光伏基础的可行性，分析其在长期风荷载循环下 25 a 服役期内的桩顶水平位移，经过 MATLAB 数值模拟分析，其桩顶水平位移仅为 0. 598 mm，该数值与预应力管桩的长期水平位移相近。表明其长期承载性能同样优越。结合蛇形桩在抗拔方面展现的可靠性优势，以及该模拟结果印证的长期耐久性，进一步证明这种新型异形桩在沙漠地区光伏支架基础中的应用具备良好可行性，但是否可以作为沙漠的基础形式还需从多个角度分析和大量的工程数据做验证。

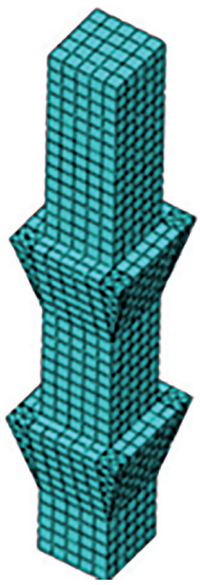


图5 蛇形基础

Fig. 5 Serpentine foundation

4 结论

本文主要介绍了预应力管桩、螺旋钢管桩、混凝土灌注桩、型钢桩和混凝土条形基础5种常见的光伏支架基础型式在沙漠中的应用现状。

基于层次分析法从可靠性、经济性、效率性、耐久性、环保性进行量化处理,通过对比发现预应力管桩在综合考虑的5种条件下权重最大,适合作为沙漠光伏支架基础。

同时,本文采用MATLAB系统探究了多因素耦合作用下不同类型基础的腐蚀深度演化规律以及长期荷载作用下基础顶部的水平位移响应特性。研究结果与层次分析法的评价结果高度吻合,其中预应力管桩的耐久性与长期稳定性表现尤为突出,是沙漠地区光伏电站的优选基础型式。并探讨了蛇形基础作为新型光伏桩基的可行性。

参考文献:

[1] 张兴凯,张文臣,高祥虎,等. 风能和太阳能清洁能源的发展现状与挑战[J]. 科技中国,2024(8):47-50.

[2] 赵紫原,白 歌. “风光”大基地建设持续升温[J]. 中国电力企业管理,2023(18):32-33.

[3] WU J J, PU L J, ZHAI C M. A review of static and dynamic p-y curve models for pile foundations[J]. Buildings, 2024, 14(6):1507.

[4] WANG J, LUND P D. Review of recent offshore photovoltaics development[J]. Energies, 2022, 15(20):7462.

[5] 肖江奇. 沙漠地面光伏电站支架及基础计算选型设计[J]. 陕西水利,2022(6):159-161+166.

[6] 吴国成,吴彬瑜. 荒漠戈壁光伏发电站施工技术[J]. 工程建设与设计,2024(15):197-199.

[7] SU X J, LI Z H, WANG Q, et al. Comparison and optimization of bearing capacity of three kinds of photovoltaic support piles in desert sand and gravel areas[J]. Buildings, 2024, 14(8):2559.

[8] ZHOU J J, YU J L, GONG X N, et al. Field tests on behavior of pre-bored grouted planted pile and bored pile embedded in deep soft clay[J]. Soils and Foundations, 2020, 60(2):551-561.

[9] 丁晓勇,许能权,邢皓枫. 光伏支架型钢桩宏细观受力特性试验研究[J]. 工业建筑,2025,55(4):154-161.

[10] 丁晓勇,徐开源,邢皓枫. 光伏支架型钢桩承载特性研究[J]. 太阳能,2024(6):95-103.

[11] 丁晓勇,许能权,邢皓枫. 砂土场地型钢桩现场载荷试验及其承载特性分析[J]. 水文地质工程地质,2024,51(3):69-79.

[12] 丁晓勇,许能权,邢皓枫. 沙漠地区光伏支架基础选型与受力分析[J]. 低温建筑技术,2022,44(9):121-124.

[13] 丁晓勇. 光伏支架H型钢桩现场试验承载特性分析[J]. 地基处理,2022,4(6):490-495.

[14] 颜 然,孔纲强,于江华. 砂土地基中钻进比对螺旋桩安装性能和抗拔承载性能的影响[J]. 岩土力学,2024,45(6):1778-1788.

[15] 胡 伟,杨 瑶,刘顺凯,等. 光伏支架螺旋桩斜向拉拔承载特性试验研究[J]. 太阳能学报,2022,43(12):50-61.

[16] 刘志鹏,孔纲强,文 磊,等. 砂土地基中倾斜螺旋桩群桩上拔与水平承载特性模型试验[J]. 岩土力学,2021,42(7):1944-1950.

[17] 王思朋,倪晟炜,包文龙. 光伏电站螺旋桩的计算及应用案例[J]. 能源工程,2024,44(2):77-81.

[18] 魏德强. 螺旋钢管桩在沙漠地区光伏项目中的施工方法[J]. 工程建设,2019,51(7):65-69.

[19] 李 博. 光伏电站组件支架基础灌注桩施工技术与质量控制研究[J]. 现代工程科技,2024,3(10):25-28.

[20] 杨 博,高 鹏,王 冉,等. 沙漠地区钻孔灌注桩成孔工艺[J]. 科技传播,2014,6(7):190-191.

[21] 贲冬平,夏园江. 沙漠地区螺旋钻成孔的灌注桩施工[J]. 科技创业家,2013(22):10.

[22] 何文俊,郑少平,周于程. 光伏电站支架基础型式对比分析及选型探讨[J]. 太阳能,2016(1):26-32.

[23] 李红星,冯世进,何邵华,等. 砂土场地光热发电新型高强预应力混凝土短桩基础受力特性研究[J]. 岩土力学,2021,42(12):3217-3226.

[24] 夜　昊,刘志伟,张　磊,等. 沙漠地区光伏支架基础选型及试验研究[J]. 西北水电,2024(4):148-155.

[25] 王梦南,崔　巍,王景航,等. 塔克拉玛干沙漠光伏电站防风固沙解决方案浅析[J]. 太阳能,2023(11):74-79.

[26] 梁　言. 光伏支架基础形式介绍及基础设计探讨[J]. 住宅与房地产,2021(2):148-149.

[27] 张海锋,马　娜. 光伏支架基础形式介绍及基础设计的探讨[J]. 太阳能,2020(12):66-70.

[28] 刘　艳,王　强. 光伏电站支架基础加固方案研究[J]. 太阳能,2018(10):45-47.

[29] 高　飞. 阿尔及利亚光伏电站项目基础桩型选择分析[J]. 山西建筑,2015,41(15):72-73.

[30] 苏有文,杨婷惠,李超飞,等. 层次分析法在跨海大桥桩基选型中的应用[J]. 建筑技术,2019,50(5):586-588.

[31] 赵洪山,胡　浈,魏　伟,等. 基于SAO-VIKOR的配电网分布式光伏承载能力综合评估方法[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版),1-10[2026-01-07]. https://link.cnki.net/urlid/13.1212.TM.20240805.1316.004.

[32] 孙　琦,郑　川,王学恒,等. 基于层次分析法的农光互补光伏支架基础选型研究[J]. 科技创新与生产力,2024,45(10):40-45.
孙　琦,郑　川,王学恒,等. 基于层次分析法的农光互补光伏支架基础选型研究[J]. 科技创新与生产力,2024,45(10):40-45.

[33] 张　陈,付连红,徐新战,等. 基于层次分析法的SLD桩施工风险种类及权重研究[J]. 城市建筑,2019,16(33):100-104.

[34] 李光辉,陈　艳,王绍丞,等. 渔光互补光伏电站水域环境下桩基础选型与施工技术研究[J]. 科技资讯,2024,22(6):192-194.

[35] 高　冲,范　辆,马海杰. 基于系统功能优势函数的太阳能光伏企业竞争力评价模型研究[J]. 华北电力大学学报,2011,38(6):55-59.

[36] 王怡平,李进孝,任志凤,等. 光伏支架基础现状与砂砾石地质下其结构优化的研究[J]. 太阳能,2025(5):88-95.

[37] 杨根栋,刘　娜,王　超,等. 基于实际工程特点探讨光伏支架基础选型[J]. 太阳能,2025(7):103-112.

[38] 郑　川,郭璟聪,张泽渔,等. 基于层次分析法的光伏支架基础评价指标体系研究[J]. 土工基础,2025,39(2):262-266.

[39] 周　润,王龙威,豆红强. 基于AHP-TOPSIS法的光伏支架基础选型研究[J]. 水利与建筑工程学报,2023,21(1):90-96.

[40] 何荣华,祁俊丰,刘振宇,等. 高海拔季节性冻土地区光伏支架基础选型设计及施工[J]. 安装,2023(S2):166-168.

[41] 蒋　理,黄际钢. 西藏光伏项目可行性研究阶段光伏阵区桩基础形式比选研究[J]. 水电与新能源,2022,36(12):20-22+41.

[42] 杨小成,罗　娟. 黄河下游涵闸改建中PHC管桩技术研究[C]//水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心(水旱灾害防御中心). 第十五届防汛抗旱信息化技术交流会论文集. 郑州:黄河水利出版社,2025:164-169.

[43] 刘　洋,李文军. 浅谈螺旋桩、灌注钢管桩在山地光伏电站运用中的几点优势[J]. 水电站机电技术,2016,39(S1):71-72.

[44] 何益森. 电力小镇建筑工程中钻孔灌注桩施工技术应用研究[J]. 中国建筑金属结构,2025,24(8):58-60.

[45] 金小荣,郭　永,秦　康,等. 帽型H型钢嵌合型组合桩在软土基坑中的应用[J]. 地基处理,2024,6(1):98-103.

[46] WANG L,LI J X,BAI W Y,et al. Study on the bearing capacity optimization and performance of photovoltaic support in desert sand and gravel area based on bionics[J]. Scientific Reports,2025,15:9638.