

BIM技术在光伏场区支架排布优化与施工进度协同管理中的应用

王富厅 周铜 吕森 卢江波 成昌林
中建八局西南建设工程有限公司 四川 成都 610000

摘要：“双碳”目标推进下，大型地面光伏电站建设规模扩大、环境复杂，对精细化管理要求更高。本文以某大型光伏项目为研究对象，该项目地处高海拔（4000-4200m）、地形起伏且需牧光互补。文章系统阐述了BIM技术在光伏场区支架排布优化与施工进度协同管理中的创新应用，剖析传统项目痛点后，构建基于BIM的“数据驱动-三维协同-动态模拟”一体化方案。通过多项技术实现支架布局精准、驱动单元配置优化、工程量统计自动及施工进度可视化协同。该模式可以提升项目设计质量、施工效率与成本控制水平，为同类项目提供可复制范式。

关键词：BIM技术；光伏电站；支架排布优化；施工进度管理；牧光互补

引言

在全球能源转型与我国“双碳”目标推动下，光伏发电装机容量激增，大型地面光伏电站尤其是西部高海拔地区项目成投资重点。但这类项目面临地形复杂、气候恶劣、生态敏感、施工窗口短等挑战，传统管理模式局限性凸显，难满足现代工程要求。BIM作为集成多种信息的数字化表达方法，核心价值在于全生命周期信息共享与协同，在建筑工程领域潜力巨大。但在光伏电站支架系统精细化设计与施工管理方面，BIM应用尚在探索深化阶段。该项目是典型高难度案例，项目海拔高、地形起伏，要兼顾“牧光互补”，对支架有特殊要求。本标段规模大、系统复杂，实现支架最优排布、驱动单元精准配置及施工高效协同是关键。本文探讨BIM技术如何系统性解决难题，通过构建贯穿全过程的BIM应用体系，阐述其在支架排布、驱动单元配置、工程量统计及施工进度协同管理等方面的应用与成效，为同类项目提供参考。

1 项目概况与技术挑战分析

1.1 项目概况

该项目位于四川省甘孜藏族自治州乡城县西北部的正斗乡顶贡大草原。项目地理位置偏远，交通条件受限，距离乡城县城约91公里，西距国道G215约4公里，东距正斗乡约35公里。场址区域海拔介于4000至4200米之间，属于典型的高原山地草原地貌，视野开阔，植被以高山草甸为主，生态环境脆弱。周边已有建成的光伏电站和牧民住所，项目需充分考虑与周边环境的协调及对当地牧业生产的影响。

1.2 支架系统技术特点

本项目采用平单轴跟踪支架系统，其主要技术参数如下：

装机容量：直流侧116.064MWp。

系统构成：共32个光伏方阵，总计6200组支架。

基本单元：单排支架由5根立柱支撑，安装26块光伏组件，构成一个标准的组串单元。

驱动逻辑：为平衡成本与性能，项目设定了智能驱动策略。当前后两组相邻支架的驱动立柱高差 ≤ 1 米时，允许两个组串单元通过同动轴连接，共用一个驱动电机；当高差 > 1 米时，则每个组串单元需独立配置一个电机。

特殊要求：考虑到“牧光互补”模式，即在光伏板下进行放牧活动，组件最低离地高度被严格限定为2米，以确保大型牲畜的通行和草场的正常利用。

跟踪范围：支架具备 $\pm 45^\circ$ 的跟踪角度，以最大化捕获太阳辐射。

1.3 传统管理模式下的核心挑战

面对复杂项目条件与精细技术要求，传统项目管理模式挑战重重

1.3.1 地形适应性差

二维CAD设计难直观精准呈现4000-4200米高海拔微地形，凭等高线图排布支架易致基础标高错误，引发大量设计变更与返工。

1.3.2 支架排布与驱动配置低效

6200组支架规模下，人工判断高差定电机配置方案工作量大且易错，难实现全局最优，或致电机冗余（增成本）或不足（影响性能）。

1.3.3 “牧光互补”难精准落实

保证支架组件最低点离地不低于2米是动态空间约束问题，二维静态校核难实现，易现局部不达标，影响验收与牧民使用。

1.3.4 工程量统计不准：

支架等材料种类多、数量大，二维图纸手工统计耗时费力且准确性差，影响采购与成本控制^[1]。

1.3.5 施工进度协同难

EPC模式下,设计、采购、施工紧密耦合,高海拔有效施工期短,缺乏可视化协同平台,信息割裂,进度与实际脱节,导致资源浪费。这些挑战指向缺乏集成多源信息、三维分析、全过程动态协同的数字化管理平台,BIM技术可解决此问题。

2 BIM技术应用体系构建

针对上述挑战,项目团队构建了一个以BIM为核心,贯穿项目全生命周期的数字化应用体系。该体系以Autodesk Revit为核心建模平台,辅以Civil3D进行地形处理,Navisworks进行4D/5D模拟与协调,并通过定制化的参数化族和插件,打通了设计、算量、进度管理的数据流。

2.1 高精度场地信息模型(CIM)构建

项目的第一步是创建一个真实反映现场状况的数字孪生底座。团队利用无人机倾斜摄影技术对整个场区进行航拍,获取高分辨率的影像数据,并通过专业软件(如Pix4D)生成精度高达5cm的数字表面模型(DSM)和正射影像图(DOM)。这些数据被导入Civil3D中,经过处理生成高精度的三角网(TIN)地形曲面。该曲面不仅包含了地表的高程信息,还融合了正射影像的纹理,为后续的支架排布提供了极其精确的地理空间参考。

2.2 参数化光伏支架族库开发

BIM模型的核心是信息丰富的“族”(Family)。项目团队针对本项目特定的单平轴支架系统,开发了一套完整的参数化族库,包括:

基础族:混凝土独立基础,其尺寸和埋深可根据地质条件和荷载自动调整。

立柱族:包含不同高度的立柱,其长度可根据地形高程和组件离地高度要求自动计算。

主梁与次梁族:构成支架的主体结构。

组件族:精确模拟26块光伏组件的物理尺寸和电气连接。

驱动电机与同动轴族:作为关键的功能性构件,其存在与否由预设的逻辑规则控制。

这些族的关键在于其参数化和关联性。例如,组件族的Z轴坐标(高度)被设置为一个公式,该公式等于“地形高程+立柱高度+主梁高度-组件厚度/2”。通过将“组件最低点离地高度”设为一个全局参数(本项目为2000mm),系统可以自动反算出每根立柱所需的高度,确保全场所有位置均满足“牧光互补”的硬性要求。

2.3 BIM协同工作平台搭建

项目建立了基于BIM360(或类似平台)的云端协同环境。所有参与方——设计院、EPC总承包方、分包商、监理单位——均在该平台上进行模型的上传、下载、查看、批注和版本管理。这确保了信息的唯一性和实时性,彻底

解决了传统模式下图纸版本混乱、信息传递滞后的问题。

3 BIM在支架排布优化中的深度应用

3.1 基于地形的智能排布

在高精度TIN地形模型上,项目团队利用Dynamo(Revit的可视化编程插件)编写了自动化排布脚本。该脚本的核心逻辑如下:

3.1.1 定义排布区域

在地形模型上划定32个光伏方阵的边界。

3.1.2 设定初始参数

输入组件尺寸、组串单元尺寸(5立柱x26组件)、行间距、列间距等设计参数^[2]。

3.1.3 逐点放置

脚本从方阵起点开始,按照设定的行列间距,在地形曲面上逐个放置支架单元。在放置每一个单元时,脚本会自动从TIN曲面中读取该单元5个立柱位置的精确高程。

3.1.4 动态调整

根据读取的高程和预设的“组件最低离地高度”参数,脚本自动计算并赋予每根立柱正确的高度,确保组件安装后满足2米要求。这一过程完全自动化,将原本需要数周的人工排布工作缩短至数小时,并且保证了100%的地形适应性和规范符合性。

3.2 驱动单元的智能配置与优化

这是本项目BIM应用最具创新性的环节。在完成所有6200组支架的初步排布后,模型中包含了每一组支架驱动立柱的精确三维坐标(X,Y,Z)。团队再次利用Dynamo编写了驱动单元配置脚本:

3.2.1 遍历与配对

脚本按照预设的逻辑(通常是沿跟踪轴方向),遍历所有相邻的支架组对。

3.2.2 高差计算

对于每一对相邻支架,脚本自动计算其驱动立柱之间的Z坐标高差(ΔZ)。

3.2.3 规则判断与实例化

根据项目规则($\Delta Z \leq 1m$?共用1电机:各用1电机),脚本自动在模型中实例化相应数量的电机和同动轴族。如果共用,则只放置一个电机,并连接同动轴;如果独立,则为每组放置一个电机。

3.2.4 全局优化

通过此自动化流程,系统能够对全场6200组支架进行全局扫描和判断,确保驱动单元的配置方案在满足技术要求的前提下,实现了电机数量的最小化,从而直接优化了项目成本。此过程不仅高效准确,而且其结果是完全可视化的。管理人员可以在三维模型中清晰地看到哪些区域使用了共用驱动,哪些区域是独立驱动,为后

续的设备采购和施工组织提供了直观依据。

3.3 碰撞检查与净空分析

BIM模型的三维特性使其能够轻松进行各种空间分析。

3.3.1 阴影分析

在Revit中设置当地经纬度和典型日，可以模拟全年不同时间段的组件阴影，验证行间距设计是否合理，避免冬至日等低角度太阳光下的前后排遮挡，确保发电效率^[3]。

3.3.2 净空分析

除了静态的2米离地高度，模型还可以模拟支架在±45°极限跟踪位置时的状态，检查组件在任何角度下是否与地面或周边障碍物发生碰撞，确保“牧光互补”的动态安全性。

4 BIM在施工进度协同管理中的集成应用

项目将BIM模型与进度计划（MSProject或P6）进行深度集成，实现了4D（3D+时间）和5D（4D+成本）的施工管理。

4.14 D施工进度模拟

4.1.1 WBS分解与模型关联

项目首先将施工工作分解结构（WBS）细化到足够颗粒度（例如，按方阵、按支架类型）。然后，将Revit模型中的构件（如某个方阵的所有支架）与WBS中的具体任务进行一一关联。

4.1.2 进度计划导入

将详细的施工进度计划（包含任务开始/结束时间、逻辑关系）导入Navisworks。

4.1.3 动态模拟

Navisworks根据进度计划，按时间轴动态地“生长”或“消失”模型中的构件。管理人员可以直观地看到：每个时间段内，哪些区域在进行支架基础施工，哪些区域在进行支架安装。关键路径上的工作是否按计划推进。不同专业（如土建、支架安装、电气安装）之间是否存在空间或时间上的冲突。这种可视化模拟极大地提升了进度计划的可理解性和可执行性。在每周的进度协调会上，各方可以围绕4D模型进行讨论，提前发现潜在的窝工或资源冲突，并及时调整计划。

4.25 D成本与资源管理

BIM模型中的每个构件都携带了丰富的工程量信息（如钢材重量、混凝土方量、电机数量等）。通过将模型与成本数据库关联，可以实现：

4.2.1 动态成本预测

随着4D模拟的推进，系统可以实时计算出截至某一时间点的累计成本和未来一段时间的预计成本，为项目成本控制提供动态预警^[4]。

4.2.2 精准物料需求计划（MRP）

系统可以根据进度计划，自动推算出未来每周、每

天所需的各类材料（如不同长度的立柱、特定型号的电机）的数量和到货时间，指导采购部门进行精准采购，避免库存积压或停工待料。

4.2.3 劳动力与机械调度

结合工程量和工效数据，可以更科学地规划劳动力和大型机械（如吊车）的投入计划，实现资源的最优配置。

4.3 现场施工指导与质量管控

BIM模型不仅是办公室里的数字资产，更是指导现场施工的“活图纸”。

4.3.1 移动端应用

施工人员可以通过平板电脑或手机，在现场直接查看与自己工作区域对应的BIM模型。模型可以清晰地展示支架的安装顺序、立柱的精确高度、电机的安装位置等关键信息，减少了对二维图纸的理解偏差。

4.3.2 AR辅助安装

结合增强现实（AR）技术，工人可以通过移动设备的摄像头，将虚拟的BIM模型叠加到现实场地上，实现“所见即所得”的精准定位和安装指导，尤其适用于复杂节点的施工。

4.3.3 质量验收

监理人员可以依据BIM模型中的参数化信息，对现场安装的支架离地高度、立柱垂直度等进行快速复核，确保施工质量符合设计要求。

5 结语

本文以该项目为例，论证了BIM技术在高海拔复杂地形大规模光伏项目支架排布与施工进度协同管理中的价值。BIM技术构建数字孪生模型，实现从“经验驱动”到“数据驱动”的转变，在参数化设计、智能算法集成、4D/5D模拟等方面应用，有效应对专业技术挑战，带来提升质量、控制成本、加快进度、强化管理等综合效益。未来，BIM技术与物联网、人工智能、数字孪生等前沿技术深度融合，在光伏领域应用会更深入。如在支架部署传感器反馈数据到运维模型，实现动态评估与预测性维护。BIM将成为贯穿光伏电站全生命周期的核心数字资产，推动产业高质量、智能化发展。

参考文献

- [1]康林.BIM技术在光伏发电及太阳能热发电工程施工管理中的应用研究[J].智能建筑与智慧城市,2025,(08):90-92.
- [2]武朝平,陈子寒,李永昌,等.基于BIM与物联网的智能化光伏电站施工技术研究[J].工程建设与设计,2025,(04):91-93.
- [3]李毅隆.BIM技术在山地光伏发电工程施工管理中的应用研究[J].绿色建造与智能建筑,2024,(06):88-90.
- [4]张元海,光伏项目建设运营全过程的BIM应用与研究.广东省,广东水电二局股份有限公司,2021-04-16.