在沙特光伏项目中关于不同土壤热阻率与不同电缆敷设宽度对项目的影响分析

喻 聪 龚 旭 龚伟红 念 阳 王继涛
中国电建集团贵州工程有限公司 贵州 贵阳 550003

摘 要：沙特光伏场区多处于高温干旱荒漠，土壤热阻率偏高且直埋电缆成组敷设，容易造成散热受限、载流量折减和线路损耗增加，进而影响项目全生命周期收益。为量化土壤热阻率与敷设宽度的耦合影响，本文对沙特中部荒漠区和东部绿洲边缘区土样进行热阻率测试，建立直埋电缆群二维稳态有限元模型，并以3个热阻率水平和3个敷设宽度开展正交仿真。结果表明：土壤热阻率和敷设宽度对载流量的影响权重分别约为62%和31%，其余为交互作用；热阻率大于2.5 K·m/W时，敷设宽度至少应较常规值放宽20%，并宜结合导热回填改善散热。在某1 GW荒漠光伏项目中，优化方案可使有效载流量提高约7%、电缆沟开挖量降低约10%，全生命周期发电损耗成本减少约120万美元。研究形成了可按热阻率分区选取敷设宽度的工程方法，可为中东荒漠光伏项目的电缆选型、沟槽布置和成本控制提供依据。

关键词：沙特光伏项目；土壤热阻率；电缆敷设宽度；电缆载流量；有限元仿真

引言

沙特能源转型与中沙清洁能源合作持续推进，大型光伏项目对集电线路的安全性、经济性和本地适应性提出了更高要求[1]。沙漠集中式光伏场址气温高、降水少、土体松散，电能汇集距离长，线路损耗与输送能力直接影响项目收益[2]。光伏场区电缆数量多、回路密集，若采用统一沟槽宽度和通用土壤参数，局部高热阻区可能成为整个集电回路的载流瓶颈。在这一环境下，土壤热阻率决定热量由电缆向远处土体传递的难易程度，敷设宽度则通过改变电缆间距影响回路间热叠加；热阻率升高与宽度缩小同时出现时，缆芯温升会进一步累积。设计值偏乐观可能造成载流量高估、绝缘长期高温和发电损耗增加，取值过于保守又会导致电缆截面、沟槽开挖和回填工程量增加。既有研究多针对城市电缆沟、排管或国内一般土壤，针对沙特高热阻砂土与多回路光伏电缆的参数匹配仍不足，且土壤热特性与沟槽几何常被分开讨论。本文结合土样测试、有限元仿真和正交试验，分析热阻率与敷设宽度的单独及耦合作用，提出分区设计阈值，并以实际项目数据检验其工程效益。

1 典型场址土壤参数实测与仿真模型构建

本文选取沙特光伏项目较集中的中部荒漠区和东部绿洲边缘区开展采样，每类地貌选取3个已建或在建场址，在0.8～1.2 m常用直埋深度采集原状土样；每个场址布置5个平行采样点，以减小局部砾石、盐碱结晶和表层扰动造成的离散性，同时记录粒径组成、干密度及常年含水率。试验设置70%、75%、80%、85%、90%、95%共6个压实度梯度，以及0、2%、4%、6%、8%、10%、15%共7个含水率梯度，采用瞬态平面热源法测试。每组参数重复3次取平均值，剔除相对偏差超过10%的异常值，并在相同室温下完成仪器校准和样品密封，减少水分蒸发对结果的影响。压实度提高会增加颗粒接触，含水率上升则以导热能力更强的水替代孔隙空气，二者共同改变非饱和土的导热性能，采用多梯度测试可减少单一取值造成的偏差[3]。结果显示，荒漠区风沙土受含水率影响最显著：含水率低于2%时热阻率通常高于2.5 K·m/W，升至4%时热阻率约下降30%；绿洲边缘区沙壤土细颗粒占比较高，在相同含水率和压实度下，热阻率比风沙土低14%～21%。个别盐碱结晶样本偏差约6%，未改变总体区间。这一趋势与覆土含水率影响直埋电缆散热的研究结论一致[4]。两类土样采用二次多项式拟合，决定系数均大于0.92，可满足方案阶段计算精度。结合运行期1%～4%的常年含水率和施工期约85%的压实度，确定风沙土热阻率取1.8～2.7 K·m/W，沙壤土取1.4～2.2 K·m/W。模型输入采用区间上限校核最不利工况，并以实测均值评估经济性，从而避免通用标准值与场址条件不符。该取值反映稳态工况；降雨入渗、长期干化及缆芯发热引起的水分迁移可能改变热参数，后续动态校核应进行修正[5]。

表1 沙特光伏项目两类场址土壤热阻率参数对照表

土壤类型	分布区域	热阻率变化规律	同条件热阻率差值	工程取值区间	拟合/采样偏差
荒漠区风沙土	中部荒漠区	含水率 < 2%时 > 2.5K • m/W；升至4%时 ↓ 30%	基准值	1.8-2.7K • m/W	拟合决定系数 > 0.92
绿洲边缘区沙壤土	东部绿洲边缘区	细颗粒占比高，热阻率整体偏低	较风沙土 ↓ 14%-21%	1.4-2.2K • m/W	盐碱样本偏差 ≈ 6%，可忽略

2 双因素对电缆运行特性的影响规律分析

土壤热阻率与敷设宽度在实际工程中同步作用，单因素计算难以反映多回路之间的热叠加。本文建立直埋电缆群二维稳态传热模型，将电缆各结构层按实物尺寸和材料参数建模，导体损耗作为体热源；地表设置与空气的对流换热边界，远端及深层土体边界布置在电缆发热影响可忽略的位置。缆芯最高允许温度、环境温度、埋深、电缆型号、回路数及负荷条件保持不变，仅调整土壤热阻率与总敷设宽度。网格在电缆和回填区加密，并以计算域扩大后最高温度变化小于容许误差作为边界独立性判据。试验选取1.5、2.0、2.5 K • m/W三个热阻率水平，分别代表绿洲边缘、半荒漠和荒漠核心区；敷设宽度取0.3、0.5、0.8 m，形成3×3参数组合。地下电缆群温度场与载流量采用有限元法求解，并以迭代方式确定满足温度限值的载流量[6]。同一组组合保持其他输入一致，使计算差异可归因于热阻率、敷设宽度及二者交互作用。

仿真结果表明，热阻率越高，扩大敷设宽度带来的降温和增容越明显，但宽度增加到一定程度后，回路间热叠加已明显减弱，边际收益随之下降。在2.5 K • m/W条件下，宽度由0.3 m增至0.8 m，缆芯最高温度约下降6 ℃、载流量提高约9%；在1.5 K • m/W条件下，同样调整仅使温度下降约3 ℃、载流量提高约5%。2.0 K • m/W工况的结果位于两者之间，说明响应随热阻率连续变化，未出现异常突变。方差分析显示：热阻率大于2.0 K • m/W时，土壤热阻率和敷设宽度的贡献率约为68%和32%；热阻率低于1.5 K • m/W时，二者贡献率约为44%和56%。这说明高阻区首先受土体散热能力制约，低阻区则更易通过扩大间距减弱回路间热叠加。电缆排列方式也会改变局部热聚集，不规则或过密排列会抬升缆芯温度并降低载流量[7]，因此表2的宽度效应应在排列规则、埋深一致的前提下使用。

因此，荒漠核心区不宜仅依靠加宽沟槽，应优先采用热阻率稳定的筛选砂或导热回填料，并通过分层压实、含水率控制和施工复测降低界面热阻；在绿洲边缘区，扩大敷设宽度通常更经济。对于多回路集中敷设，还应校核最不利回路的位置和相邻电缆热叠加，避免以平均温度代替最高缆芯温度。既有多回路电缆沟研究同样表明，排列不规则会使局部温度升高、载流量下降[8]。当场地受限时，可将大沟槽拆分为若干较小回路组，或采用导热回填替代继续扩宽。设计比选应同时计算电缆增容、开挖回填、附属结构及运行损耗的全生命周期费用，而不应只比较一次性土建投资。

表2 沙特光伏项目电缆敷设双因素耦合影响分析

场景/区域	土壤热阻率	敷设宽度变化	缆芯温度变化	载流量变化	因素贡献率
荒漠核心区域	2.5 K • m/W	0.3m → 0.8m	↓ ~6℃	↑ ~9%	土壤热阻率：68% ↑；敷设宽度：32%
半荒漠区域	2.0 K • m/W	(正交试验覆盖)	(数据未给出)	(数据未给出)	土壤热阻率 > 敷设宽度 (参考阈值)
绿洲边缘区域	1.5 K • m/W	0.3m → 0.8m	↓ ~3℃	↑ ~5%	敷设宽度：56% ↑；土壤热阻率：44% ↓
总结/提示	(阈值：2.0 K • m/W)	0.3m；0.5m；0.8m	降幅：3-6℃	增幅：5-9%	高阻区主因：土壤；低阻区主因：敷设宽度

3 双因素耦合影响权重与适配阈值分析

土壤热阻率与敷设宽度共同构成直埋电缆散热的关键边界条件。基于9组正交仿真结果，土壤热阻率对载流量的总体影响权重约为62%，敷设宽度约为31%，其余为交互作用。由响应曲线可划分三档：热阻率低于1.8 K • m/W时，常规宽度即可满足散热要求；处于1.8 ~ 2.5 K • m/W时，宽度宜较常规值增加约10%；高于2.5 K • m/W时，至少增加20%，并同步评估导热回填。直埋电缆研究表明，回填砂的干湿程度、厚度及保护结构均会改变温度场与载流量[9]。此外，金属护套环流会增加附加损耗并造成温升，在高压单芯电缆方案中不可忽略[10]；地表气温、埋深、回填土和排列方式也会改变地下电缆稳态温度场[11]。因此，上述阈值用于方案比选而非替代热校核：回路数、埋深、负荷率、环境温度、护套接地或回

填材料改变时，应重新计算最不利缆芯温度。设计阶段可按实测均值确定经济方案，再以热阻率上限和最高环境温度校核安全裕度；施工阶段则通过土样复测、沟槽尺寸检查和回填验收确认输入条件。

4 工程优化方案与应用效益验证

依据《电力工程电缆设计标准》关于土壤热阻系数和多根并列敷设载流量校正的要求[12]，结合上述阈值，提出两类场景参数。小规模组串散点敷设时，高阻荒漠区（1.8～2.7 K·m/W）3回路以内的总宽度不低于0.5 m，低阻绿洲边缘区（1.4～2.2 K·m/W）不低于0.4 m；大规模集中电缆沟敷设时，高阻区10回路以内取1.2～1.5 m，每新增2根电缆相应增加0.15 m，低阻区同等回路数可缩小约15%。对热阻率超过2.5 K·m/W且沟槽受限的区段，优先更换回填料或调整回路分组，避免单纯提高电缆截面造成投资增加而散热瓶颈仍未消除。

以沙特某在建1 GW荒漠光伏项目2024年初步设计数据为样本，将原统一沟槽方案与分区优化方案比较。优化后电缆有效载流量提高约7%，电缆沟开挖工程量降低约10%；按项目寿命期负荷与损耗电价折算，发电损耗成本减少约120万美元。结果说明，先实测热阻率、再匹配沟槽宽度和回填方案，可在不降低热稳定裕度的前提下减少无效土建与长期损耗。

综上，沙特荒漠光伏项目的电缆设计应以场址实测热阻率为基础，并将敷设宽度、回路数和回填材料作为联合变量。高阻区重点改善导热条件，低阻区优先优化间距，可在安全、投资和损耗之间取得更合理的平衡。本文采用稳态模型，尚未纳入昼夜温差、季节降雨、风沙迁移和负荷波动；后续可结合长期气象与在线温度监测，建立动态热参数和寿命损耗模型。

参考文献

[1]王艺博，任瑞华，葛建平. 中国与沙特清洁能源合作：基础、挑战与未来发展潜力[J]. 科技导报，2025，43（7）：79-91.

[2]王若为，李音璇，葛维春，等. 沙漠光伏电能外送技术综述[J]. 发电技术，2024，45（1）：32-41.

[3]徐洁，胡海涛，郑植. 压实度和含水率对非饱和土导热系数的影响[J]. 岩土工程学报，2020，42（增刊1）：244-248.

[4]贺永智，徐旭，吕玲，等. 覆土层含水率对直埋式电缆散热特性的影响研究[J]. 中国计量大学学报，2019，30（4）：427-433.

[5]张伟政，燕跃豪，辛军，等. 土壤湿度迁移情形下埋地电缆载流量计算模型研究[C]//中国电机工程学会高电压专业委员会2015年学术年会论文集. 西安：中国电机工程学会高电压专业委员会，2015：1-6.

[6]梁永春，李彦明，柴进爱，等. 地下电缆群稳态温度场和载流量计算新方法[J]. 电工技术学报，2007，22（8）：185-190.

[7]张秀丽，胡明丽，邓红雷，等. 基于磁-热-流耦合模型的不规则排列电力电缆温度场与载流量计算[J]. 绝缘材料，2016，49（7）：44-48.

[8]覃喜，周文俊，吕鸣，等. 电缆沟多回敷设中电力电缆多物理场耦合场及载流量数值计算[J]. 电工技术，2022，43（15）：131-134.

[9]李欢，张延伟，张瑞祥. 直埋XLPE电缆在不同敷设条件下的温升与载流量仿真[J]. 电力工程技术，2023，42（1）：169-177.

[10]陈悦，杨仕友，覃喜. 计及金属护套环流影响的高压电缆温度场及载流量的数值分析[J]. 电工电能新技术，2021，40（10）：18-26.

[11]王有元，陈仁刚，陈伟根，等. 有限元法计算地下电缆稳态温度场及其影响因素[J]. 高电压技术，2009，35（12）：3086-3092.

[12]中华人民共和国住房和城乡建设部. 电力工程电缆设计标准：GB 50217—2018[S]. 北京：中国计划出版社，2018.