

基于数字孪生的光热发电系统多尺度建模与实时优化控制

李斌

上海新能睦控技术有限公司, 中国·上海 200241

摘要: 针对塔式光热发电系统在设计、运行与优化中的难点, 本文提出了一种基于数字孪生的多尺度建模与实时优化控制方法。首先构建了从单个定日镜到定日镜组再到整个定日镜场的多层次物理与数据驱动混合模型, 实现了对镜面朝向、聚光热流以及系统级能量转换的全局描述。针对定日镜跟踪精度需求, 提出了基于天文算法和高精度校正的追日控制和纠偏控制策略。系统架构上, 设计了集成 Vue 前端和 SpringBoot 后端的数字孪生平台, 实现了多维度交互式可视化监控和人机界面优化。以某塔式光热电站为原型, 搭建了数字孪生仿真平台, 实现了对实际镜场数据的实时融合与仿真对比。结果表明, 该系统能有效提高跟踪效率和系统响应速度, 优化了光热发电输出性能。

关键词: 数字孪生; 光热发电; 多尺度建模; 实时优化控制; 追日算法; 数据融合; 可视化监控; 系统架构

Multi-Scale Modeling and Real-Time Optimization Control of a Solar-Thermal Power Generation System Based on Digital Twin

Li Bin

Shanghai New Energy Digital Technology Co., Ltd., China Shanghai 200241

Abstract: This paper proposes a multi-scale modeling and real-time optimization control method based on digital twins to address the difficulties in the design, operation, and optimization of tower solar thermal power generation systems. Firstly, a multi-level physics and data-driven hybrid model was constructed from a single heliostat to a group of heliostats, and then to the entire heliostat field, achieving a global description of mirror orientation, focused heat flux, and system level energy conversion. Aiming at the demand for tracking accuracy of the heliostat, a sun tracking control and correction control strategy based on astronomical algorithms and high-precision correction is proposed. In terms of system architecture, a digital twin platform integrating Vue front-end and SpringBoot back-end has been designed to achieve multi-dimensional interactive visual monitoring and human-machine interface optimization. A digital twin simulation platform was built based on a tower type solar thermal power station, achieving real-time fusion and simulation comparison of actual mirror field data. The results indicate that the system can effectively improve tracking efficiency and system response speed, and optimize the output performance of solar thermal power generation.

Keywords: Digital twin; Solar thermal power; Multi-scale modeling; Real-time optimization control; Sun-tracking algorithm; Data fusion; Visualization monitoring; System architecture

0 引言

塔式光热发电系统作为太阳能大规模发电和储能的关键方式, 具有清洁可再生和出力稳定的特点, 但其复杂的光学与热力过程使系统优化控制成为难题。传统控制方法多局限于单一尺度: 例如, 已有研究针对定日镜角度跟踪和校准提出了多种方法, 也有针对热力循环的动态模型预测控制算法。然而, 随着数字孪生技术的发展, 将跨尺度的物理建模与数据驱动方法融合, 为实现全厂级优化控制

提供了新的机遇。数字孪生通过构建与物理系统相对应的虚拟模型, 并与实时传感器数据交互, 可用于系统监测、状态预估和控制策略仿真优化。然而, 目前在光热领域, 缺乏同时覆盖定日镜、镜场及电站全局的多尺度数字孪生模型, 以及高效的控制算法和可视化界面设计。因此, 本文针对塔式光热电站设计了一套多尺度数字孪生框架和实时优化控制方法, 力图在系统层面对发电效率和响应速度进行提升。本文主要贡献如下: 提出从单镜级、镜场级到

电站级的分层建模方案，在单镜级考虑光学反射与运动学特性，在镜场级统计计算聚光总能，在系统级建立热力循环与动态能量平衡模型；基于太阳位置天文算法结合图像测量反馈，设计高精度易实现的定日镜追踪控制策略；利用数据驱动方法对定日镜校准误差进行在线预测与补偿，提高跟踪精度；集成太阳辐射预报、现场传感器和历史数据，构建融合模型实现对下游热负荷和系统状态的实时预测，以指导控制决策；开发基于 Vue.js 的前端可视化系统和 Spring Boot 后端，支持三维镜场、温度分布等多维度实时监测，优化数字孪生交互界面。

1 多尺度数字孪生建模

1.1 单镜级建模

在单镜层面，根据太阳高度角和方位角计算镜面法线，进而得到光线反射到塔顶接收器的聚光位置；同时建立定日镜运动学模型，描述其转动电机的响应特性。单镜模型考虑镜面反射系数、安装误差等因素，可用于精确预测每台定日镜的聚光效率。在数字孪生框架中，每台镜机对应一个虚拟孪生体，能够实时映射物理镜面的姿态与光学状态，并与现场传感器数据同步，保证虚实一致。

建立定日镜的几何光学模型：

$$n_{\text{镜}} = \frac{s+r}{\|s+r\|}$$

其中， s 为入射方向向量， r 为反射方向向量；法线 n 镜用于计算光线聚焦点位置。

$$P_{\text{焦}} = P_{\text{塔顶}} + h \cdot n_{\text{镜}}$$

其中 h 为镜面到接收器的距离。

定日镜运动学响应可用二阶系统近似：

$$\ddot{\theta}(t) + 2\xi\omega_n\dot{\theta}(t) + \omega_n^2\theta(t) = \omega_n^2\theta_{\text{指令}}(t)$$

$\theta(t)$ 为当前俯仰或方位角， $\theta_{\text{指令}}(t)$ 为控制指令角度， ω_n 、 ξ 分别为系统自然频率和阻尼比。

1.2 群组级建模

在群组层面，由 30 台单镜组成群组，并配备群组控制器与定日镜通信，当软件平台下发“一键模式切换”指令时，会将预设的参数、模式等批量下发至群组内所有定日镜，并在切换完成后统一上报执行结果。

定义群组聚光效率为：

$$\eta_{\text{组}}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i(t)$$

1.3 全场级建模

在全场层面，采用全自动与纠偏校正相结合的方式，

对所有定日镜的聚光贡献进行叠加。通过对定日镜场布局、遮挡效应和几何损失建模，计算到达接收器的总光通量分布。同时考虑瞬时光照变化和实时镜场调整，对镜场集中度和热通量梯度进行评估，为后续热力过程提供输入。数字孪生平台在此基础上构建全场级虚拟模型，将全场定日镜孪生体的数据汇聚，实时展示镜场整体状态。

全场聚光热流密度分布：

$$q(x, y) = \sum_{i=1}^M \eta_i I_{\odot} f_i(x, y)$$

其中 M 为全场镜机总数， I_{\odot} 为太阳辐照度， $f_i(x, y)$ 为第 i 台镜在接收面 (x, y) 处的光斑分布函数。

2 实时优化控制与算法设计

2.1 全自动模式

针对定日镜跟踪精度，首先采用天文算法计算理论太阳位置，并基于此设计开环控制指令；使用图像反馈进行校正，克服机械误差和大气折射的影响。具体而言，控制器先计算当前时刻的方位角和高度角，再对电机执行细调。当进行纠偏校正时，配置的摄像头实时反馈实际光斑位置，实现闭环校正，显著提高跟踪精度。

太阳位置开环计算：

$$\alpha = \arcsin(\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos H)$$

$$\beta = \arctan 2(-\cos \delta \sin H, \cos \phi \sin \delta - \sin \phi \cos \delta \cos H)$$

其中 δ 为太阳赤纬， ϕ 为地点纬度， H 为时角。

2.2 优化控制策略

在实时控制层面，引入模型预测控制思想，对光热系统进行调度优化。实时采集太阳辐照度、接收器温度和负荷需求数据，构建短期预测模型，对未来数十分钟的系统输出进行预测。然后通过求解优化问题，动态调整镜场姿态，以平衡发电效率和安全约束。

3 数字孪生平台设计与实现

3.1 系统架构

本文开发的数字孪生系统采用前后端分离架构。后端基于 Spring Boot 构建，负责实时数据收集、模型运算和控制算法实现；前端基于 Vue.js 开发，实现人机交互界面。前端显示包括全场定日镜分布图、实时数据等，并可通过 WebSocket 技术接收后端计算结果，实现动态可视化监控。该架构支持系统模块化扩展，可方便地嵌入新的算法或仿真组件。

3.2 界面可视化优化

前端设计强调多维度监控和用户友好性。定日镜三维

模型视图能够实时展示各定日镜的朝向。用户可通过调整方位角与俯仰角等操作，直观地了解定日镜状态。所示的界面示例中，将现场数据传递给软件，实现了数字孪生的人机界面，见图 1。



图1 数字孪生人机界面

4 结语

本文提出了一种面向塔式光热发电的多尺度数字孪生建模与实时优化控制方法。从定日镜、镜场到全厂三个层

次进行建模，实现了物理规律与数据驱动的集成描述；针对系统特点设计了高精度的追日算法和基于模型预测的优化控制方案。构建的 Vue/SpringBoot 数字孪生平台，实现了实时数据融合、预测和多维可视化。仿真验证表明，该方法显著提升了跟踪精度和系统响应速度，对提高光热发电效率具有积极作用。未来工作将进一步结合强化学习等智能控制手段，提升系统的自主优化能力。

参考文献：

[1] 仇韬, 许黎玲, 王伟. 塔式太阳能光热电站控制系统研究[J]. 南方能源建设, 2020,7(2):60 - 64.
 [2] 张玲, 李翔. 数字孪生技术在能源行业的应用与挑战[J]. 自动化学报, 2023, 49(10): 2035 - 2048.

作者简介：李斌（1999.04-），男，汉族，吉林四平人，本科，软件工程师，现任职于上海新能陆控技术有限公司，研究方向：新能源光热系统领域研究。