

机器学习在定日镜设计中的应用研究

黎臻 戴靠山

四川大学建筑与环境学院, 四川成都, 610065;

摘要: 定日镜是塔式光热发电系统中的核心设备, 其设计水平直接影响系统运行效率、结构安全和工程经济性。在定日镜设计中, 风荷载参数是重要依据, 而传统风洞试验、数值模拟和理论计算等方法虽具有较高准确性, 但普遍存在周期长、成本高和效率不足等问题。随着人工智能技术的发展, 机器学习为定日镜设计提供了新的研究思路。本文围绕机器学习在定日镜设计中的应用展开论述, 分析了定日镜的结构特点、设计要求及风荷载参数对结构设计的影响, 指出传统设计方法在工况参数分析中的局限性; 在此基础上, 探讨了定日镜设计参数的可预测性, 以及机器学习用于定日镜风荷载参数预测的基本思路。进一步结合定日镜设计需求, 对决策树、随机森林和BP神经网络等常用模型进行了分析, 并讨论了不同模型在定日镜设计中的适用性。研究表明, 定日镜相关风荷载参数具有一定规律性和可预测性, 机器学习能够利用已有样本建立输入变量与目标参数之间的映射关系, 从而提高设计分析效率, 可作为传统方法的重要补充, 在定日镜设计中具有较好的应用潜力。

关键词: 定日镜; 机器学习; 风荷载; 结构设计; 参数预测

DOI: 10.69979/3029-2727.26.02.081

引言

近年来, 在全球能源转型和“双碳”目标持续推进的背景下, 太阳能作为一种清洁、可再生能源, 受到了广泛关注。塔式光热发电因具有聚光效率高、储热能力强和输出相对稳定等优点, 被认为是重要的发展方向。定日镜作为塔式光热发电系统中的核心部件, 其作用是跟踪太阳并将太阳辐射反射至吸热器, 因此其设计水平直接影响系统的运行效率、结构安全性和经济性。

在定日镜设计中, 风荷载是必须重点考虑的因素。由于定日镜迎风面积较大、结构较轻、运行姿态不断变化, 复杂风环境会对其镜面受力、支撑结构稳定性和驱动系统安全性产生明显影响^[1-4]。传统研究主要依赖风洞试验、数值模拟和结构分析等方法, 这些方法虽然能够较准确地反映定日镜受力特征, 但也存在周期较长、成本较高、参数获取效率较低等问题, 难以完全满足工程设计中快速分析和方案比选的需要。

随着人工智能技术的发展, 机器学习在风工程和结构工程中的应用不断增加。机器学习能够利用已有样本建立输入参数与目标结果之间的映射关系, 实现对相关设计参数的快速预测。因此, 将机器学习引入定日镜设计, 有望提高风荷载相关参数的获取效率, 辅助设计人

员开展结构分析和方案评估。基于此, 本文主要探讨机器学习在定日镜设计中的应用可行性, 以说明机器学习可为定日镜设计提供一种新的研究思路和辅助方法。

1 定日镜设计中的关键影响因素

1.1 定日镜的结构特点与设计要求

定日镜是塔式光热发电系统中的核心聚光设备, 主要由镜面、支撑结构、驱动装置和立柱等部分组成, 其主要功能是跟踪太阳并将太阳辐射反射至塔顶接收器。与一般结构相比, 定日镜具有迎风面积大、结构较轻、运行姿态变化频繁等特点, 因此其受力状态较为复杂, 如图1所示。由于定日镜通常布置在荒漠、戈壁等风环境较复杂的地区, 风荷载对其结构设计具有重要影响。不同俯仰角和风偏角条件下, 镜面风压分布、整体受力以及结构响应都会发生变化, 这使得定日镜表现出较强的风敏感性。风作用不仅关系到结构安全, 也会影响驱动系统稳定性和聚光精度。

因此, 在设计要求上, 定日镜不仅要满足强度、刚度和稳定性的基本要求, 还要兼顾跟踪精度、运行可靠性和经济性。总体来看, 定日镜设计是一项同时涉及结构性能与工程应用需求的综合性工作。



图1 定日镜示意图

1.2 风荷载参数对定日镜结构设计的影响

风荷载参数是定日镜结构设计中的重要依据。平均风压系数、脉动风压系数、风载系数和风振系数等参数，能够反映定日镜在不同风向和不同姿态下的受力特征^{[2][3][5]}。由于定日镜迎风面积较大、结构较轻，这些参数的变化会直接影响镜面、支撑结构和驱动装置的设计取值。

在实际设计中，风荷载参数不仅关系到结构强度和稳定性，还会影响定日镜的变形和振动水平。如果风荷载估计不合理，可能导致结构设计偏于保守或安全储备不足，从而影响工程经济性和运行可靠性。因此，合理获取风荷载参数，对定日镜结构设计具有重要意义。

1.3 传统设计方法存在的问题

目前，定日镜设计中的风荷载分析主要依赖风洞试验、数值模拟和理论计算等传统方法。这些方法虽然能够较准确地反映定日镜的受力特征，但通常存在研究周期较长、计算过程复杂和成本较高等问题。对于多工况、多参数的设计需求而言，传统方法在效率上存在一定局限。

此外，传统方法往往更适合具体工况分析，而在快速预测和方案比选方面能力不足。工程设计中若需反复调整参数并进行比较，仅依赖传统方法会增加设计工作量。因此，有必要探索更加高效的辅助分析方法，以提升定日镜设计效率^{[4][5]}。

2 机器学习在定日镜设计中的应用基础

2.1 机器学习在风工程领域的研究现状

随着人工智能技术的发展，机器学习已逐渐应用于风工程研究中，并在风压预测、风荷载分析和结构响应评估等方面表现出较好的应用前景^[6]。相关研究表明，神经网络、决策树、随机森林和梯度提升树等方法，已被用于建筑表面风压系数、脉动风压特征以及结构响应参数的预测。

总体来看，机器学习能够利用已有样本数据建立输入变量与目标参数之间的关系，相比传统方法具有预测速度快、适合多参数分析等优点。因此，机器学习在风工程领域的应用正不断增多，也为其进一步用于定日镜设计提供了参考。

2.2 定日镜设计参数的可预测性分析

定日镜设计涉及多类关键参数，如平均风压系数、脉动风压系数、风载系数以及风振系数等。这些参数虽然会受到俯仰角、风偏角、结构形式和来流条件等多种因素影响，但总体上并不是完全无规律变化的，而是与工况条件之间存在较为明确的对应关系。已有研究表明，不同姿态下定日镜的风压分布、整体受力和响应水平都会随参数变化呈现出一定规律性，这说明相关设计参数具有可分析、可归纳和可预测的基础。从预测角度看，机器学习方法的核心在于通过已有样本建立输入变量与输出结果之间的映射关系^[6]。对于定日镜而言，俯仰角、风偏角以及结构几何特征等因素可以作为输入变量，而风压系数、风振系数等则可作为输出变量。由于这些设计参数本质上来源于外部环境与结构特征共同作用的结果，且在一定范围内具有稳定的变化趋势，因此具备利用机器学习进行预测的条件。尤其是在多工况设计分析中，若已有一定样本基础，机器学习能够较快识别参数间的潜在关系。

此外，定日镜设计通常需要在多种姿态和风环境条件下开展参数分析，传统方法虽然精度较高，但效率较低。相比之下，机器学习更适合处理这类多变量、非线性问题，能够在已有研究结果基础上实现参数快速估计。因此，从理论上讲，定日镜设计参数具有较好的可预测性，机器学习也具备应用于定日镜设计辅助分析的可行性。

2.3 机器学习用于定日镜设计的基本思路

机器学习用于定日镜设计的基本思路,是利用已有研究中获得的样本数据,建立设计影响因素与目标参数之间的映射关系,从而实现对相关设计参数的快速预测。在定日镜设计中,可将俯仰角、风偏角、结构尺寸及其他工况条件作为输入变量,将平均风压系数、脉动风压系数、风载系数或风振系数等作为输出变量,通过模型训练得到相应的预测关系。

在具体应用中,首先需要整理已有试验、数值分析或文献中的参数样本,并进行适当的数据处理;随后选取合适的机器学习方法,如神经网络、随机森林或梯度提升树等,对输入与输出之间的关系进行学习如图2;最后将训练完成的模型用于未知工况下的参数估计。这样可以减少对传统试验和复杂计算的依赖,提高定日镜设计中的分析效率。

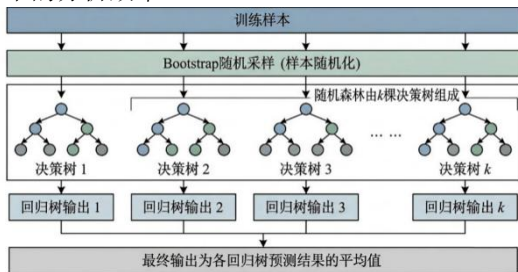


图2 随机森林示意图

总体来看,机器学习并不是完全替代传统方法,而是作为一种辅助工具,为定日镜设计中的参数预测、方案比较和快速评估提供支持。

3 适用于定日镜设计的机器学习模型

3.1 定日镜风荷载参数预测的常用模型

在定日镜设计中,平均风压系数、脉动风压系数、风载系数和风振系数等参数具有明显的非线性和多变量特征,因此可采用机器学习方法进行预测。结合定日镜设计中参数分析的实际需求,决策树、随机森林和BP神经网络是较为常用且具有代表性的模型。

决策树模型具有结构简单、结果直观和易于实现等特点,能够根据输入变量与输出参数之间的关系进行分层划分,适用于初步分析定日镜不同工况下设计参数的变化规律。随机森林是在决策树基础上发展起来的集成学习方法,通过构建多棵决策树并综合其结果,可有效提高预测精度和稳定性,对多工况下定日镜风荷载参数的预测具有较好的适用性。BP神经网络则具有较强的非线性拟合能力,能够较好地处理俯仰角、风偏角等输入因素与风荷载参数之间复杂的映射关系,适用于定

日镜设计中连续性较强参数的预测。

总体来看,决策树、随机森林和BP神经网络各有特点。其中,决策树更适合进行规律识别和初步分析,随机森林在预测精度和稳定性方面表现较好,BP神经网络则在复杂非线性问题中具有一定优势。因此,这三类模型均可作为定日镜风荷载参数预测的常用模型,为后续设计分析和模型选用提供基础。

3.2 不同机器学习模型在定日镜设计中的适用性

定日镜设计参数通常受俯仰角、风偏角、结构尺寸及来流条件等多种因素共同影响,具有一定的非线性和多变量特征,因此不同机器学习模型在定日镜设计中的适用性也存在差异。决策树模型结构清晰、可解释性较强,适用于分析定日镜参数变化的基本规律,尤其适用于样本规模较小或需要快速建立初步预测关系的情况。

随机森林模型是在决策树基础上的集成学习方法,能够通过多模型综合提高预测结果的稳定性和准确性。对于定日镜这类工况较多、参数关系较复杂的设计问题,随机森林在处理非线性关系和减少单一模型波动方面具有较好优势,因此更适合用于风荷载相关参数的综合预测。BP神经网络则具有较强的非线性拟合能力,能够较好反映输入条件与输出参数之间较复杂的映射关系,适用于定日镜设计中连续性较强、变化规律较复杂的参数预测。因此,在定日镜设计中应根据研究目的、样本条件和参数特点,合理选择相应的机器学习模型。

4 结语

综上所述,定日镜设计受到风荷载等多种因素影响,风荷载参数的合理获取对于结构安全、运行稳定性和工程经济性具有重要意义。传统风洞试验、数值模拟和理论计算方法虽然能够较准确地反映定日镜受力特征,但在多工况、多参数条件下仍存在效率不足的问题。

从现有研究基础来看,定日镜风荷载相关参数具有一定的规律性和可预测性,这为机器学习方法的引入提供了条件。针对定日镜设计参数预测问题,决策树、随机森林和BP神经网络等模型均具有一定适用性,其中决策树适合进行规律识别与初步分析,随机森林在预测精度和稳定性方面表现较好,BP神经网络则适合处理较复杂的非线性关系。总体而言,机器学习可作为传统方法的重要补充,为定日镜设计中的参数分析和模型选

择提供新的思路。

参考文献

- [1]官博,李正农,王莺歌,等.太阳能定日镜结构风载体型系数风洞试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2008,35(9):6-9.
- [2]王莺歌,李正农,官博.定日镜的风压分布与脉动特性[J].自然灾害学报,2007,16(6):187-194.
- [3]吴卫祥,李正农,王志峰.塔式太阳能定日镜抗风设计参数研究[J].太阳能学报,2021,42(6):191-197.
- [4]廖驰,钟杰,戴靠山,等.塔式光热电站定日镜结构

风致响应与振动控制研究综述[J].土木与环境工程学报(中英文),2023,45(2):166-178.

[5]刘寅,邢国华,张雯,等.大型矩形定日镜结构气动风荷载特性及预测[J].振动与冲击,2025,44(15):75-85.

[6]曾轩.平屋顶槽式聚光镜镜面风压分布研究及风压预测[D].湘潭:湘潭大学,2022:14-69.

作者简介:黎臻(1999.12.21-),男,汉族,重庆市,硕士研究生,研究方向:太阳能定日镜抗风。