

编号		
所属学科	K	动力与电气工程

B. 自然科学类

陕西省教育厅专项科研计划项目 申 请 书

项目名称：基于多模态数据治理与融合神经网络架构结合的短期风力发电负荷预测系统研究

项目负责人：王丹阳

所在单位：西安电力高等专科学校

申请日期：2025-09-01

陕西省教育厅

二零一六年制

研究项目	名称	基于多模态数据治理与融合神经网络架构结合的短期风力发电负荷预测系统研究						
	所属学科	K	动力与电气工程					
	申请金额	2.0000	起止年月	2025-09-01 — 2027-09-01				
	依托科研平台名称							
项目负责人	姓名	王丹阳		性别	女	出生日期	1992-12-10	
	学位	硕士	最后学位获得时间	2017-01-30		是否硕导、博导	否	
	专业技术职务	013	讲师	定职时间		2017-07-15		
	主要研究方向	工业过程自动化技术		联系电话	18992919965		所在学校	西安电力高等专科学校

项目组成员						
姓名	年龄	专业技术职务	学位	所在单位	项目分工	本人签字
雷鸣雳	53	教授	博士	西安电力高等专科学校	项目统筹、项目实施	
张静	35	讲师	硕士	西安电力高等专科学校	模型搭建及调试	
乔红	52	副教授	硕士	西安电力高等专科学校	数据分析、模型训练	
张子琦	32	工程师	硕士	西安电力高等专科学校	数据采集、数据预处理	

李娟	47	副教授	硕士	西安电力高等 专科学校	预测精度 及预测误 差概率区 间验证	
----	----	-----	----	----------------	-----------------------------	--

正式申报材料

主要研究内容	<p>为解决新能源发电中风力发电负荷的预测难题，本项目聚焦短期风电负荷预测，构建基于多模态数据融合与贝叶斯神经网络（BNN）的概率预测系统，为电网稳定与电力交易提供支撑。</p> <p>传统风电负荷预测受风速突变、地形效应及多因素非线性耦合影响较大，点预测方式易受气象数据噪声干扰，鲁棒性差，且无法量化误差分布与风险边界，导致调度决策风险偏高。为此，本项目创新采用多模态数据融合与 BNN 概率预测框架相结合的方案，通过输出功率点预测值及置信区间，实现风险量化与决策支撑。</p> <p>项目核心在于多模态数据融合技术的应用，整合多源异构数据覆盖三类关键模态：时序模态包含风机 SCADA 数据（功率、转速、温度）、气象站数据（风速、风向等）及数值天气预报（NWP）；空间模态涵盖卫星云图（云层运动）、激光雷达风廓线数据（垂直风速分布）与 GIS 地形数据（海拔、粗糙度）；文本模态则纳入气象预警文本与运维日志（设备状态描述）。</p> <p>预处理及特征融合模块是数据质量保障的关键。针对不同采样频率数据，通过线性插值将 15 分钟级 SCADA 数据与小时级 NWP 统一时间粒度；采用空间插值算法将离散气象站数据映射至风电场坐标；剔除异常数据后，利用生成对抗网络（GAN）生成符合 N-S 方程的气象样本，弥补台风、冰冻等罕见天气的数据稀缺问题，从样本层面降低误差影响。同时完成时序、图像及文本特征的提取与融合。</p> <p>预测模型采用四层结构的 BNN：输入层接收多模态融合特征；隐含层 1 设 128 节点、隐含层 2 设 64 节点，均预估概率权重；输出层含 2 节点，分别输出均值和标准差，经概率分布转换生成置信区间。模型通过变分推断结合梯度反向传播算法求解系数，实现短期风电负荷的概率建模。</p> <p>该方案通过概率预测输出置信区间，为电力系统提供关键不确定性信息，有效解决传统点预测无法量化风险、表征误差不确定性的问题，助力电网精准风险调度与决策优化。</p>
--------	---

研究内容摘要	1.研究多模态感知与动态治理 包含：多源异构数据的采集、时空对齐、异常处理、缺失填补。 2.研究贝叶斯神经网络（Bayesian Neural Network, BNN）概率预测框架，确定模型参数架构、完成模型搭建、模型训练、预测精度、及预测误差概率区间验证。				
先进性、创新点	1.先进性：本项目旨在针对精确的风力发电负荷智能预测（即风电功率预测）进行研究，研究内容符合国家对电力行业能源调整的发展策略，研究成果对提升电网稳定性、降低弃风率、优化电力市场交易至关重要。 2.创新性： 1）突破单一数据源局限，通过多模态数据特征融合捕捉气象-设备-空间的隐含关联，提升复杂天气下的预测鲁棒性和准确度。 2）BNN 概率预测模型通过权重分布化与概率区间建模，解决了风电负荷预测中不确定性量化难题，输出功率点预测值和置信区间，根据置信区间进行电网调度与备用优化、储能系统控制系统优化、风电并网风险管理等场景风险优化，支撑电网风险调度优化。				
技术指标	完成多模态数据融合及贝叶斯神经网络概率预测框架的短期风电负荷预测系统模型研究； 输出一套短期风力发电负荷智能预测系统，并输出预测精度、概率区间分布指标。				
预期成果	研究报告 1 份，论文 1 篇，包括高水平论文 1 篇，专利 1 项。				
新技术：		新工艺：		新材料：	
新装备：		新产品：		新品种：	
软件著作权：		集成电路布图：		药证：	
标准：		规范：		其他：	
论文：	1	著作：		研究报告：	1
专利：	1	培养博士：		培养硕士：	
资政、调研					

报告：	
-----	--

工作进度安排(每项不超过 60 字)	
2025-09-01 — 2025-11-30	采集风电负荷相关的时序模态、空间模态、文本模态相关数据。
2025-12-01 — 2026-02-28	建立多源异构数据预处理方法；对数据进行特征提取且对数据进行时空对齐及动态质量控制，完成数据异常处理、缺失填补等。
2026-03-01 — 2026-05-31	研究贝叶斯神经网络理论，建立概率预测框架，确定模型最优参数架构；完成模型平台搭建并调试。
2026-06-01 — 2026-08-31	完善样本数据集并基于该数据集进行模型训练，获取最优参数。
2026-09-01 — 2027-02-28	完成预测精度及预测误差概率区间验证；撰写论文并且提交专利。
2027-03-01 — 2027-09-01	整理项目相关方案及结果；完成项目研究工作报告。

项目负责人承担教育厅项目情况				
项目编号	项目名称	批准时间	结束时间	完成情况

承 诺 书

本人承诺严格遵守法律法规，服从有关文件要求和管理，确保所填报内容真实有效，数据准确客观，符合有关保密规定和学术道德规范要求，无知识产权等方面的争议。如存在违法违规违纪问题，自愿接受有关调查和处理。

承 诺 人：

年 月 日

单位审查与保证

1、系、所或依托平台审查意见（包括：审查项目的科学意义、实用价值、研究工作基础、经费预算合理性、申请者业务素质、研究能力和科学作风）

负责人（签字）：

单位（公章）

年 月 日

2、学校审查意见：

已对申请书进行了审核，同意上报。承诺在项目获得资助后做到以下几点：

- (1) 保证对研究计划所实施所需的人力、物力和工作时间等条件予以支持；
- (2) 严格遵守陕西省教育厅有关资助项目管理、财务管理等各项规定；
- (3) 督促项目负责人和本单位项目管理部门按教育厅的规定及时报送有关报表和材料；

需要说明的其他问题:

单位负责人（签章）

单位（公章）

年 月 日

陕西省教育厅自然科学研究项目 可行性研究报告

项目名称：基于多模态数据治理与融合神经网络架构结合的短期风力发电负荷预测系统研究

项目负责人：王丹阳

所在单位：西安电力高等专科学校

申请日期：2025-09-01

陕西省教育厅

一、 国内外研究开发现状和发展趋势

1. 国内外研究现状

随着全球能源结构向低碳化转型，风电作为可再生能源的重要组成部分，其装机容量持续增长。然而，风电的波动性与间歇性对电力系统的稳定性和经济性提出了严峻挑战。风电预测技术通过提前预判风电输出功率，成为优化电网调度、降低弃风率和提升能源利用效率的关键手段。当前主流的风电预测有以下几个方向：

首先是物理模型与混合方法，国家气象局与电科院合作：基于数值天气预报（NWP）结合风机功率曲线模型，开发了适用于中国复杂地形的风电预测系统（如 WRF-ChinWind）^[1]。金风科技：提出“物理+数据驱动”混合模型，结合 NWP 与 XGBoost 算法，在西北风电基地实现小时级预测精度达 90% 以上^[2]。丹麦技术大学（DTU）：开发 WRF-EnKF（集合卡尔曼滤波）模型，通过数据同化技术优化 NWP 初始场，提升北欧风电场预测精度^[6]。

其次是基于机器学习与深度学习的风电预测，清华大学采用 LSTM-Attention 模型对华北风电场数据进行预测，通过注意力机制捕捉风速时间序列的长期依赖关系^[3]。中国电科院：基于 Transformer 架构构建多变量风电预测模型，融合风速、温度、气压等气象数据，提升预测鲁棒性^[4]。美国 NREL：提出基于贝叶斯神经网络（BNN）的概率预测模型，输出风电功率的置信区间，支持电网风险调度^[7]。澳大利亚 CSIRO：采用 GAN 生成合成风电数据，解决小样本场景下的模型训练问题^[8]。

还有区域级预测与调度协同，国家电网在“风光储一体化”项目中，开发区域级风电预测平台，结合图神经网络（GNN）建模多个风场间的空间相关性^[5]。

国内外风电预测研究均聚焦于物理模型、数据驱动模型及混合方法，但国外在不确定性建模、边缘计算等方向更具前瞻性，而国内更注重与实际风电场的结合。未来，随着 AI 与气象建模、边缘计算、不确定性建模等技术的融合，风电预测将朝着多模态融合、概率化、联合优化与边缘部署发展。构建高精度、高鲁棒性、自适应性强的预测系统，将是实现风电高比例接入与能源结构转型的关键。

2. 研究前景与意义

随着全球能源结构向低碳化转型，风电作为可再生能源的重要组成部分，其装机容量持续增长。然而，风电的波动性与间歇性对电力系统的稳定性和经济性提出了严峻挑战。风力发电负荷预测技术通过提前预判风电输出功率，成为优化电网调度、降低弃风率和提升能源利用效率的关键手段。风电预测通过高精度预测提前调度火电、储能等资源，实现电力供需动态平衡，减少因风电波动导致的电网不稳定风险；预测模型提供风电输出功率的时间序列，辅助电网制定最优调度计划，减少备用电源成本，提升能源利用效率；高精度预测帮助风电场参与电力市场竞价，降低因功率偏差导致的经济惩罚，提升收益；预测技术为风光储一体化系统提供决策支持，助力实现“双碳”目标（中国计划 2030 年风光装机达 12 亿千瓦）；结合预测模型与状态监测数据，实现故障预警与智能运维，延长设备寿命。风电预测对于新

能源电力行业具有重要意义，风电预测技术精度、预测模型泛化能力提出了较高要求，需要研究高精度且兼顾高频湍流与低频气候趋势，极端天气下的融合预测系统。风电预测技术是实现能源结构低碳化、保障电力系统稳定性的核心技术。其研究意义不仅体现在提升预测精度本身，更在于推动风电从“补充能源”向“主力能源”的转型。未来，随着 AI、边缘计算、不确定性建模等技术的深度融合，风电预测将朝着多模态融合、概率化、联合优化方向发展。构建高精度、高鲁棒性、自适应性强的预测系统，将是实现风电高比例接入与能源结构转型的关键支撑。

二、 项目研究内容、关键技术和研发目标

1. 项目研究内容

本项目以新能源发电中风电负荷的预测为研究对象，进行以基于多模态数据融合及贝叶斯神经网络（Bayesian Neural Network, BNN）概率预测框架的短期风电负荷预测系统研究。

风力发电作为清洁能源的核心组成部分，在全球能源转型中扮演着关键角色。然而，其固有的间歇性和波动性给电网调度、电力交易和储能管理带来巨大挑战。精确的风力发电负荷预测（即风电功率预测）对提升电网稳定性、降低弃风率、优化电力市场交易至关重要。预测难度主要源于风速的时空复杂性、地形效应、气象突变等因素，且预测需求随应用场景呈现多尺度特征（分钟级至年度预测）。当前风电短期预测方法主要分为物理法、统计法、机器学习法及混合模型，近年来深度学习与特征优化技术的融合成为主流趋势。

风电负荷预测由于气象数据噪声和偏差存在必然的预测误差，传统点预测方案受单一数据影响，复杂天气情况下的预测鲁棒性差，且无法量化预测误差分布揭示风险边界。另外，风电功率受风速、温度、气压等多因素非线性耦合影响，且地形效应（如山地湍流）加剧了其波动性。传统点预测仅输出单一值，无法反映功率可能的波动范围，导致调度决策面临“盲目性风险”，无法为电力系统提供关键的不确定性信息，支撑风险决策。

为了解决上述问题本项目拟采用基于多模态数据融合及贝叶斯神经网络概率预测框架相结合的短期风电负荷预测方案。本方案结合气象数据、时空特征及设备状态等多模态数据，输出功率点预测值和置信区间，支撑电网风险调度。



图 1. 系统框架图

如上述系统框架图所示，本项目方案包含以下模块：多模态数据采集、数据预处理、特征融合、贝叶斯神经网络、概率预测输出。

本项目拟采用的多模态数据融合技术使用多源异构数据（气象、设备、时空），包括不限于以下模态数据：

1. 时序模态：风机监控与数据采集系统（Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA）数据（功率、转速、温度）、气象站数据（风速、风向、温度、湿度）、数值天气预报（Numerical Weather Prediction, NWP）。

2. 空间模态：卫星云图（云层运动）、激光雷达（LiDAR）风廓

线数据（垂直风速分布）、地理信息系统(Geographic Information System,GIS)地形数据（海拔、粗糙度）。

3.文本模态：气象预警文本、运维日志（设备状态描述）。

本项目的预处理及特征融合模块进行特征提取且对数据进行时空对齐及动态质量控制，从输入数据样本处理层面降低对误差预测的不利影响，并对处理后的数据样本进行时序特征、图像特征、文本特征提取及融合。

本项目拟采用贝叶斯神经网络（Bayesian Neural Network, BNN）作为核心预测模型进行风电负荷短期预测。该模型是一种将贝叶斯概率框架与传统神经网络结合的模型，主要建模目标是完成对风电短期预测的概率建模。

以上本项目方案通过概率预测输出置信区间为电力系统提供关键的不确定性信息，支撑风险决策，解决传统点预测方式无法量化风险，表征预测误差的不确定性问题。

2. 关键技术

1) 多模态感知与动态治理方法，包含：多源异构数据的采集、异常处理、缺失填补，主要以多模态数据样本质量控制、特征融合等为优化处理目标，从输入数据样本处理层面降低对误差预测的不利影响。

2) 研究贝叶斯神经网络（Bayesian Neural Network, BNN）概率预测框架，确定模型最优参数架构、完成模型平台搭建并调试、完善样本数据集并基于该数据集进行模型训练获取最优参数、完成预测精

度、及预测误差概率区间验证。

3. 研发目标

本项目旨在基于多模态数据融合及贝叶斯神经网络（Bayesian Neural Network, BNN）概率预测框架的短期风电负荷预测系统（即风电功率预测）进行研究，研究内容符合国家对电力行业能源调整的发展策略，研究成果对提升电网稳定性、降低弃风率、优化电力市场交易至关重要。具体包括：

1) 完成多模态感知与动态治理方法研究，给出一整套多模态数据处理策略方法，提高多模态数据质量，降低对预测精度的干扰。

2) 完成贝叶斯神经网络（Bayesian Neural Network, BNN）概率预测框架研究，确定模型参数架构、完成模型搭建、模型训练、及预测精度、预测误差概率区间验证。

三、 技术方案及创新点

1. 技术方案

(1) 多模态感知与动态治理方法研究

1) 研究内容：多模态数据的采集、样本时空对齐、异常处理、缺失填补。

2) 实施方案：收集用于风电预测的多源异构数据，包含气象数据：融合 NWP（数值天气预报）、卫星云图（0.1°分辨率）、雷达风速剖面（垂直分辨率 10m）；设备运行数据：SCADA 系统实时功率、风机振动频谱等；时空标签：时间文本编码：通过循环编码（周期性）与定位编码（唯一性）嵌入日期、季节信息。将不同采样频率数据（如

15 分钟级 SCADA 数据与小时级 NWP) 通过线性插值统一到时间粒度上; 利用空间插值算法将离散气象站数据映射至风电场坐标; 并对上述数据进行异常处理、缺失填补, 提高数据质量。

(2) 贝叶斯神经网络 (Bayesian Neural Network, BNN) 概率预测框架

1) 研究内容: 使用贝叶斯神经网络进行概率预测建模, 输出概率预测置信区间, 完成预测偏差的不确定性量化。

2) 实施方案: 该模型采用四层结构: 输入层、隐含层 1、隐含层 2、输出层, 其中输入层接收多模态数据特征, 隐含层 1 和 2 预估分别包含 128 节点和 64 节点概率权重, 输出层含有 2 节点分别对应输出的均值和标准差, 最后对均值和标准差进行概率分布转换输出概率区间, 最终建模输出为预测分布特性。该模型采用变分推断的方式结合梯度反向传播算法进行系数求解完成对风电短期预测的概率建模。

2. 创新点

本项目旨在针对精确的风力发电负荷智能预测 (即风电功率预测) 进行研究, 研究内容符合国家对电力行业能源调整的发展策略, 研究成果对提升电网稳定性、降低弃风率、优化电力市场交易至关重要。

1) 突破单一数据源局限, 通过多模态数据特征融合捕捉气象-设备-空间的隐含关联, 提升复杂天气下的预测鲁棒性和准确度。

2) BNN 概率预测模型通过权重分布化与概率区间建模, 解决了风电预测中不确定性量化难题, 输出功率点预测值和置信区间, 根据

置信区间进行电网调度与备用优化、储能系统控制系统优化、风电并网风险管理等场景风险优化，支撑电网风险调度优化。

四、 项目的研究基础及技术支撑条件

本项目依托某实际用户进行，所需基础数据的获取途径合理，数据量充足，为项目的进一步开展提供充分的数据支撑。

项目组成员共计 6 人，其中包括教授 1 人、副教授 2 人，均具有丰富的新能源发电技术相关专业知识与经验，能够为项目研究提供指导。

本项目研发内容所需的相关软硬件实验设备具备使用条件，能够保障理论研究的顺利进行。

五、 工作进度安排和阶段目标

开始日期	结束日期	阶段目标
2025-09-01	2025-11-30	采集风电负荷相关的时序模态、空间模态、文本模态相关数据。
2025-12-01	2026-02-28	建立多源异构数据预处理方法；对数据进行特征提取且对数据进行时空对齐及动态质量控制，完成数据异常处理、缺失填补等。
2026-03-01	2026-05-31	研究贝叶斯神经网络理论，建立概率预测框架，确定模型最优参数架构；完成模型平台搭建并调试。

2026-06-01	2026-08-31	完善样本数据集并基于该数据集进行模型训练，获取最优参数。
2026-09-01	2027-02-28	完成预测精度及预测误差概率区间验证；撰写论文并且提交专利。
2027-03-01	2027-09-01	整理项目相关方案及结果；完成项目研究工作报告。

六、 经费预算

科目名称	预算金额 (万元)	备 注
(一) 直接费		
1. 人工费		
(1) 专职研究人员人工费		
(2) 劳务外包人员人工费		
(3) 临时性研究人员人工费		
2. 设备使用费		
(1) 仪器设备使用费		
(2) 软件使用费		
3. 业务费		
(1) 材料费		
(2) 资料费	0.2	
(3) 印刷出版费	0.4	
(4) 专利与知识产权事务费	0.8	
(5) 会议费		
(6) 差旅费		
(7) 会议费		
4. 场地使用费		
(1) 场地物业费		

(2) 场地使用租金		
5. 专家咨询费	0.6	
(二) 间接费		
(三) 外委支出费		
1. 外委研究支出费		
2. 仪器设备租赁费		
3. 外协测试试验与加工费		
(四) 税金		
合 计	2	

七、 预期成果形式及先进程度

1. 预期成果形式

本项目以新能源发电中风电负荷的预测为研究对象，本项目聚焦短期风电负荷预测，构建基于多模态数据融合与贝叶斯神经网络（BNN）的概率预测系统，为电网稳定与电力交易提供支撑。具体包括：

（1）完成多模态数据融合及贝叶斯神经网络概率预测框架的短期风电负荷预测系统模型研究；

（2）输出一套短期风力发电负荷智能预测系统，并输出预测精度、概率区间分布指标。

预期成果：研究报告 1 份，论文 1 篇，包括高水平论文 1 篇，专利 1 项。

2. 先进性

本项目旨在针对精确的短期风力发电负荷智能预测（即风电功率预测）进行研究，研究内容符合国家对电力行业能源调整的发展策略，研究成果对提升电网稳定性、降低弃风率、优化电力市场交易至关重

要。

八、 推广应用前景分析

项目组已对本项目投入产出进行测算分析及经济效益评价。分析结果表明项目符合当前形势，应用前景好，升值潜力较大。同时本项目的经济效益明显。综上所述，本项目是可行的。但由于测算分析存在众多的假设条件，分析结果与实际情况可能存在一定出入。

参考文献

- [1]张强等. 基于 WRF-ChinWind 的风电功率预测研究[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 45-52.
- [2]王磊等. 混合模型在风电功率预测中的应用[J]. 可再生能源, 2021, 39(8): 1123-1130.
- [3]李明等. 基于 LSTM-Attention 的风电功率预测[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(3): 89-96.
- [4]刘志远等. Transformer 在风电预测中的应用研究[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1782-1790.
- [5]国家电网公司. 区域风电功率预测技术白皮书[R]. 北京: 国家电网研究院, 2021.
- [6]Giebel G, et al. The state-of-the-art in short-term prediction of wind power: A literature overview[J]. Wind Energy, 2021, 24(6): 587-607.
- [7]Zhang Y, et al. Probabilistic wind power forecasting with Bayesian neural networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2): 987-996.
- [8]Zhao P, et al. GAN-based data augmentation for wind power forecasting[J]. Renewable Energy, 2023, 205: 1234-1245.