

上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

芯片发电技术基础与应用结题报告



项目名称: 基于热电芯片的多波段天空辐射观测系统

学生姓名: 冯峻 黄宇隽 李泽埔 欧阳凯泽 潘立扬

学生学号: 523031910148 (冯峻)

专 业: 微电子科学与工程

指导教师: 胡志宇 蔡星汉 姚正同

学院 (系): 集成电路学院

填写说明

1. 项目小组必须认真撰写《芯片发电技术基础与应用结题报告》。
2. 项目小组应在指导教师的指导下认真、实事求是地填写各项内容。
文字表达要明确、严谨，语句通顺，条理清晰。外来语要同时用原文和中文表达，第一次出现的缩写词，须注出全称。
3. 参考文献的书写请参照《上海交通大学本科生毕业设计（论文）撰写规范》。
4. 结题报告总字数应满足本课程要求。
5. 请用宋体小四号字体填写。

芯片发电技术基础与应用结题报告（设计报告）

项目名称

基于热电芯片的多波段天空辐射观测系统

项目前期调研：

在现有气象观测体系中，常规气象站主要对气压、风速、风向、气温、湿度及降水量等宏观气象要素进行长期连续观测（如图 1 所示），

序号	区站号/ 观测平台标识 (字符)	年 (年)	月 (月)	日 (日)	时次 (时)	气压 (百帕)	海平面气压 (百帕)	最高气压 (百帕)	最低气压 (百帕)	最大风速 (米/秒)	极大风速 (米/秒)	极大风速的风向 (度)	2分钟平均风 (度)
1	58361	2025	11	7	6	1019.8	1020.4	1020.1	1019.7	1	2.5	125	113
2	58361	2025	11	7	9	1019.3	1019.9	1019.6	1019.3	0.8	1.8	51	83
3	58361	2025	11	7	12	1019.7	1020.3	1019.9	1019.6	1	2.5	76	104
4	58361	2025	11	7	15	1019.1	1019.7	1019.6	1019.1	0.7	1.8	112	78
5	58361	2025	11	7	18	1018.1	1018.6	1018.2	1018	1	2.2	73	77
6	58361	2025	11	7	21	1017.2	1017.7	1017.2	1016.8	1	1.9	87	125
7	58361	2025	11	8	0	1018.7	1019.3	1018.7	1017.9	0.6	2	168	999017
8	58361	2025	11	8	3	1017.7	1018.2	1018.5	1017.7	2	4.2	249	270

图 1 中国地面基本气象观测数据——上海市闵行区 2025 年 11 月 7~8 日

这些指标能够较好地反映大气状态及其变化趋势。然而，通过前期调研发现，大气辐射信息，尤其是不同波段范围内的辐射强度数据，在现有公开气象平台中难以直接获取。当前气象业务系统中，多数仅提供整体短波或长波辐射的统计结果，且更新频率通常为小时级，空间与时间分辨率有限，难以反映辐射在短时间尺度上的动态变化特征。

以图 2 所示的全国短波辐射分布为例，其仅给出了整体辐射强度的空间热力图，而缺乏对紫外、可见光及近红外等不同波段辐射的细分观测数据。实际上，不同波段辐射在大气传输过程中受云层、水汽、气溶胶及污染物影响显著不同，具有重要的物理和环境指示意义。由此可见，现有气象观测体系在多波段天空辐射的高频、连续、分波段采集方面仍存在明显空缺，这为本项目开展多波段天空辐射的自主观测与分析研究提供了现实背景与研究价值。

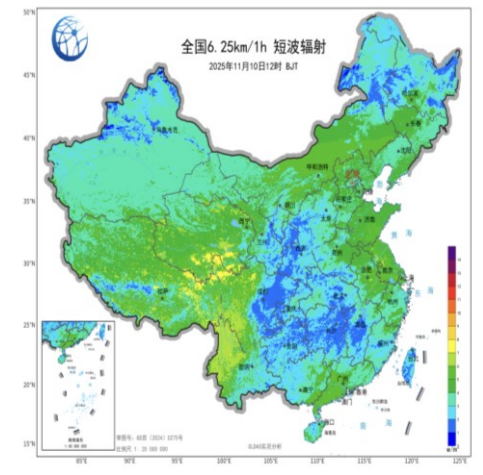


图 2 2025 年 11 月 10 日全国各地短波辐射热图

项目研究目的和意义：

研究目的：

本项目旨在基于热电芯片传感器阵列搭建一套可连续运行的多波段天空辐射采集与分析系统，实现数据硬件采集、数据处理、模型预测与可视化展示于一体的综合实验系统。具体研究目的包括：

1) 实现多波段天空辐射的分离与稳定采集

基于热电芯片对辐射能量敏感、结构简单、成本低廉的特点，结合多种窄带滤光片，构建覆盖紫外、可见光及近红外波段的 8 通道辐射采集阵列，实现对不同波段太阳辐射强度的同步观测。

2) 搭建自动化、高频率、高精度的数据采集系统

以 Raspberry Pi 为控制核心，结合 ADS1115 高精度 ADC 模块，通过 Python 脚本实现多通道数据的自动采集、频率控制，减少人工干预，提高实验的可重复性与长期运行稳定性。

3) 多通道辐射强度的时间序列预测

针对辐射数据噪声大、短时波动明显但长期变化相对平稳的特点，引入 GRU 与 LSTM 等循环神经网络模型，并合理引入多种数据降噪与采样策略，建立能够对多通道辐射强度进行短期预测的时间序列模型。

4) 构建实时辐射监测与预测的可视化系统

通过前后端协同设计，实现辐射数据的实时传输、模型推理与结果图形化，直观呈现历史数据、预测曲线及多通道对比结果，提升系统的工程完整性与可用性。

5) 构建天空图像处理系统

同步采集天空图像，并利用传统图像处理方法提取云量、纹理和边缘等指标，用于辅助解释辐射数据中的异常波动，为后续多模态分析奠定基础。

研究意义：

1) 多波段采集天空辐射的意义

辐射研究之所以与天气密切相关，是因为多波段辐射对云与水汽变化具有天然高敏感度。不同波段范围的辐射特性不同：紫外波段进入大气时会被臭氧层吸收，可见光波段，瑞利散射使得天空呈现蓝色，红外波段被水汽和 CO_2 吸收，**区分不同波段的辐射贡献，可以帮助我们了解大气吸收、散射、辐射的物理机制。**

此外，在环境科学、遥感、气象观测中，区分波段能量有助于分析地表能量收支平衡、校准卫星遥感数据、研究云层、气溶胶、污染对不同波段辐射的影响。有助于我们**研究地表能量平衡与检测环境变化。**

在实时获取天空图像后，我们还能进一步结合辐射强度的数据进行空气质量的检测，温度、湿度以及云量估算。

2) 利用时间序列模型进行多通道辐射强度短时/长时预测的意义

天空辐射强度不仅随昼夜周期呈现明显的长期变化趋势，同时也会受到云层移动、遮挡、水汽变化等因素影响，在短时间尺度上产生较大的波动。因此，仅依赖历史观测数据进行事后分析，难以及时刻画辐射变化的动态特性，而引入时间序列预测模型具有重要意义。

一方面,基于时间序列模型的辐射预测能够对未来一段时间内的辐射变化趋势进行提前估计,为气象监测、光伏发电功率预测以及相关实验决策提供参考依据。特别是在多波段观测条件下,不同波段辐射对云、水汽和大气成分的响应存在差异,通过多通道联合预测,有助于更全面地刻画天空辐射的演化行为。

另一方面,辐射数据具有噪声大、采样频率高、物理变化与测量扰动交织等特点,传统的解析建模方法难以准确描述其时序特性。LSTM、GRU 等循环神经网络能够自动从历史数据中学习长期依赖关系和潜在变化规律,为复杂物理过程提供一种数据驱动的建模思路。本项目通过引入多种降噪与采样策略,并对不同模型结构进行对比验证,探索了时间序列模型在辐射数据预测任务中的适用性与优势。

此外,将预测模型嵌入实时采集系统中,实现“观测—预测—验证”的闭环流程,有助于提升实验系统的智能化水平,也为后续开展异常检测、数据质量评估以及多模态联合建模提供了基础支撑。

研究方法和研究思路：

本项目整体研究思路遵循“物理观测 → 数据处理 → 智能建模 → 实时呈现”的技术路线，将硬件传感系统、时间序列预测模型与可视化交互系统有机结合，形成一个完整、可连续运行的多波段天空辐射观测与分析系统。具体研究方法主要围绕以下三个板块展开。设计框图参见图 3。

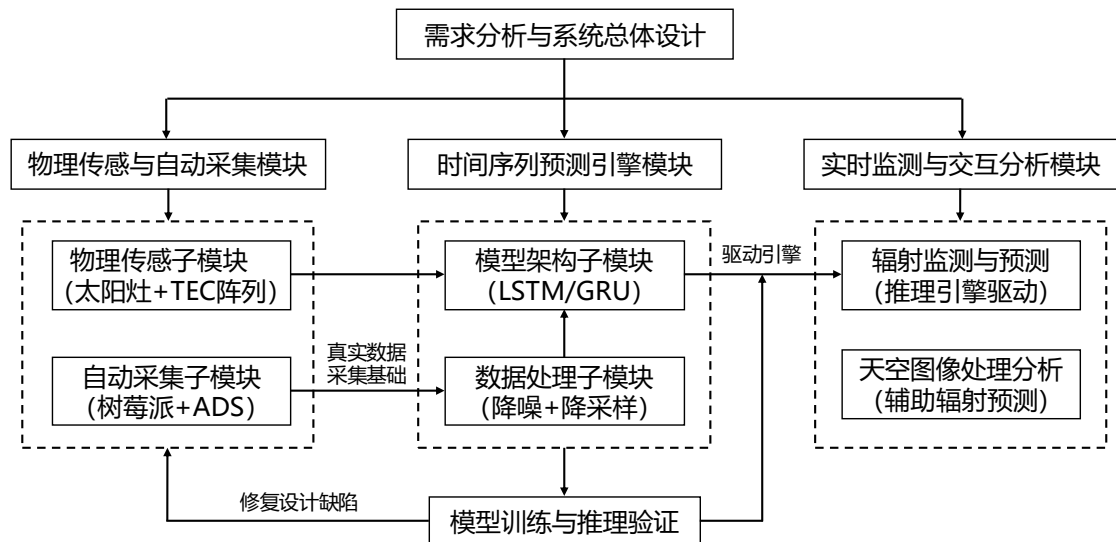


图 3 系统流程设计框图

1) 物理传感与自动采集模块

在物理传感子模块，本项目首先构建了多波段天空辐射的传感与采集系统。系统以太阳灶为聚光装置，利用其在焦点附近形成的高强度辐射区域，提高辐射信号强度与信噪比。在焦点区域周围，结合太阳灶焦斑近似高斯分布的特性，对 8 枚热电芯片（TEC）进行阵列化布置（环绕在焦点周围，并且在光轴方向上错开一段距离以均匀化受热情况），并通过在各通道前端配置不同波段范围的滤光片，实现对紫外、可见光及近红外等多个波段辐射的分离采集。

在自动采集子模块，系统采用 4 块 ADS1115 高精度模数转换器（ADC），每块 ADC 负责两个 TEC 通道的电压采集，实现 8 通道辐射信号的同步测量。采集控制以 Raspberry Pi 为核心，通过 Python 脚本调用 board、busio 以及 adafruit_ads1x15 等库，对 ADC 进行初始化配置、采样频率控制和数据读取。采集到的原始电压数据按时间戳顺序自动存储，采样频率可自由设置，初期设置为 10s 一次，后期为了丰富数据量提升到 5s 一次。通过该硬件与软件相结合的方式，我们完成了一套自动化、高频率、多通道的天空辐射数据采集系统。

2) 时间序列预测引擎模块

在完成稳定的数据采集后，针对多波段辐射数据噪声大、短时波动明显但长期变化相对平稳的特点，本项目进一步开展了时间序列预测模型的构建与验证工作。整体思路是先对原始数据进行分析与预处理，再引入合适的时间序列预测模型进行建模。在模型的预测过程中，我们也会根据数据和预测情况及时发现物理传感与自动采集模块的设计缺陷，并作出及时修复，确保数据的准确性与完整性。

在数据预处理子模块，本模块中的数据预处理阶段的优化程度将对时间序列的预测效果造成重大影响，针对热电芯片单点测量和环境扰动带来的高频噪声，我们

设计开发并比较了多种数据降噪与采样策略，包括主动限幅、滑动平均以及降采样方法，用以抑制异常跳变和高频噪声成分，同时尽量保留辐射强度的物理变化趋势。

在**模型架构搭建子模块**，模型选择方面，首先采用参数量较小、训练速度较快的 GRU 模型进行快速原型验证，以评估不同数据处理策略对预测效果的影响；在此基础上，进一步引入 LSTM 模型作为核心预测模型，用于捕捉辐射数据中的长期依赖关系。通过在不同数据集配置下进行训练、验证与测试，对模型的预测精度和稳定性进行系统评估，从而确定适用于本项目辐射数据特性的预测方案。

3) 实时监测与交互分析模块

为了将数据采集与预测结果直观呈现，并提升系统的工程完整性与可操作性，本项目进一步构建了两个相互独立但功能互补的图形化用户界面（GUI）系统。

其一是**基于辐射数据的实时监测与预测子模块**。该系统采用“Raspberry Pi 前端 + 主机后端”的架构：前端负责实时采集 8 通道辐射数据，并通过网络通信将数据发送至主机；后端在接收数据后，调用已训练完成的时间序列预测推理引擎进行实时预测，并将历史数据、预测结果以及多通道对比曲线动态展示在界面中，从而实现辐射观测与预测的实时联动。

其二是**基于图像数据的天空图像处理与分析子模块**。该系统以同步采集的天空图像为输入，利用传统图像处理方法提取云概率、灰度、纹理和边缘等多种指标，并通过可视化方式呈现图像分析结果。通过与辐射数据在时间上的对齐，该 GUI 为辐射信号的异常波动提供了直观、可解释的辅助信息。

4) 系统整体集成思路与开发方法

上述三个模块相互衔接，共同构成了完整的多波段天空辐射观测系统：物理传感与自动采集模块负责获取真实、连续的多通道辐射数据；时间序列预测引擎模块对数据进行建模与趋势预测；实时检测与交互分析模块则实现对辐射数据与天空状态的实时展示与预测。通过这一整体设计，本项目完成了从硬件采集到智能分析再到可视化呈现的完整闭环。

在实际开发过程中，我们采用办并行式的方法开发上述三个模块以及各个子模块。最核心基础的物理传感与自动采集模块作为第一优先级进行开发，而其两个子模块——物理传感子模块（太阳灶侧）与自动采集子模块（ $8 \times \text{TEC} + 4 \times \text{ADS1115}$ 侧）可独立并行开发和调试。

与此同时，时间序列预测引擎模块虽然需要真实完整的数据作为基础，但是对于模型架构搭建子模块，其模型架构和权重参数配置由于广泛的应用可以事先基于模拟数据集与物理传感与自动采集模块进行并行开发。对于数据预处理子模块，必须获取真实数据集之后才能评判辐射数据的噪声大小与分布情况，从而进行针对性算法处理，因此该模块必须在采集到真实数据并且尝试基于原始数据训练后才能进行开发。

最后优先级模块是实时监测与交互分析模块，作为预测与分析结果直观呈现的辅助模块，本模块并无核心功能，但是具有很强的工程完整性与可操作性，对数据真实性的要求也较高，可以在后期进行开发。

本系统三大模块相对独立，且并发性强，工程可落地性极强，开发流程清晰，自动化程度高且效果可视化性极强，经过如上半并行开发流程后，基本可实现较为完整的天空辐射预测系统雏形。

参考文献：

本项目参考资料均为 AI 生成，无额外参考文献；
与 AI 的对话以及 Agent 使用情况详见“总结报告”。

