

技术合同登记编号:

号类别:委托开发

(本单位技术合同编号:FX2024HT-B005)

技术合同书

项目名称 南京市百米级分钟级融合预报系统

甲 方 南京市气象局

乙 方 南京风信科技发展有限公司

签约日期 2024 年 9 月

签约地点 南京

登记机关 南京技术市场管理办公室

南京市科学技术委员会
南京市工商行政管理局 制定

一、项目名称：南京市百米级分钟级融合预报系统
二、项目目标的技术的内容、范围、形式和要求： 南京市气象局（甲方）委托南京风信科技发展有限公司（乙方）进行南京市百米级分钟级融合预报系统开发项目开发工作，主要建设内容如下： <u>多源观测预处理与融合分析子系统、数值模式同化与预报子系统、多种气象要素降尺度预报子系统、百米级预报外推订正与融合子系统、百米级分钟级精细化展示子系统等相关工作。</u> 具体技术要求详见技术附件。
三、履行的计划、进度、期限、地点和方式： 履行的计划、进度要求： <u>2025</u> 年 <u>7</u> 月 <u>31</u> 日前完成项目最终验收。 系统验收合格后，开始为期<u>二十四</u>个月的系统免费维护期(包括软件 BUG 修复，网络安全漏洞修复等常见维护内容，免费期满后双方可协商签订后续收费维护合同)。 本合同期限为自合同签订之日起至 <u>2027</u> 年 <u>7</u> 月 <u>31</u> 日。
四、价款、报酬及其支付方式： 1、合同总价为人民币<u>壹佰肆拾玖万元整</u>(¥1490000.00 元)， 全部费用为软件开发费，即人民币<u>壹佰肆拾玖万元整</u>(¥1490000.00 元)。如果本合同下的工作被提前终止，双方按照本条款约定的原则根据当时实际工作量进行结算。 2、支付方式： (1) 合同签署后乙方以保函等形式提交合同金额的 <u>10%</u>作为履约保证金，甲方验收合格且合同履行期结束后 5 个工作日内退还。 (2) 合同签署且服务团队人员到位后，甲方支付乙方合同金额的<u>30%</u>，中期验收合格后，甲方支付乙方合同总价款的 <u>35%</u>；项目最终验收合格后，甲方支付乙方剩余总价款的 <u>35%</u>。
五、技术情报和资料的保密事项，及后续改进的提供与分享规定： 双方对合同内容和研究成果保密，未经另一方许可不得向第三者泄露。
六、风险责任的承担： 一般技术风险（如双方人员沟通配合风险、需求不明确风险、新技术应用稳定性风险、需求分析和设计方案在评审后的变更风险等）由双方共同承担，遇特殊情

况（如国家或行业政策的变更风险、用户需求发生较大变更风险、项目中引入不成熟技术的风险等）双方协商，若协商不一致，依据相关法律规定执行。
七、技术成果的归属和分享及利用研究开发经费购置财产权属： 双方确定，因履行本合同所产生的合同标的物之外的研究开发成果及其相关知识产权权力归属，按下列方式处理：任何情况下，本项目形成的成果（包括中途终止情况下的全部未完成状态的工作成果）知识产权归甲方所有，甲方享受本项目成果的一切权利包括但不限于实施、管理、许可、转化权利、论文发表、申请专利等。双方另有约定除外。
八、各方当事人的义务或协作事项及承担的责任： 甲方：1. 按时提供经费； 2. 配合乙方的软件开发工作，并提供方便。 乙方：1. 按技术指标完成软件的设计、开发及测试、部署、交付； 2. 按照进度要求完成相应的任务。 3. 乙方确认并承诺： （1）乙方因本项目委托任何第三方（包括乙方员工）完成相关工作的，第三方与甲方不形成劳务派遣关系。乙方应按照乙方与参与委托工作执行之第三方之间的约定按时支付该等第三方应得费用/报酬，并处理相关税务问题，保证该等第三方亦同意接受本合同项下的规定（包括但不限于标的项目归属和使用、保密等），该等第三方不会就其参与委托工作执行另行向甲方主张任何费用或者权益，否则，由此引起的所有争议由乙方自行处理，与甲方无关，因此给甲方造成损失的，乙方还应赔偿甲方因此所受全部损失。 （2）未经甲方事先同意，不得擅自决定、变更需甲方享有最终决定权的任何事项。 （3）未经甲方事先书面同意，乙方不得转让本合同权利义务给第三方，否则需赔偿甲方 50 万元人民币的违约金。
九、中介方、担保方的义务、报酬和支付方式及承担的责任： 无。

十、验收标准和方法：

按本合同的技术要求，及双方届时商定的验收大纲进行中期验收和最终验收。

十一、违约金或者损失赔偿的计算方法：

按照相关法律规定执行，违约方应当赔偿守约方遭受的全部损失，其他事宜双方友好协商解决。乙方因提供服务侵犯甲方或者第三人知识产权或者商业秘密等其他权益的，需赔偿甲方 50 万元人民币的违约金，违约金不足以弥补甲方损失的，还需继续赔偿损失。乙方构成违约，甲方因此支出任何费用的，甲方有权要求乙方支付包括但不限于律师费、仲裁费、诉讼费、担保费等一切费用和损失。

十二、争议的解决办法：

(√) 1、因履行本合同发生争议，由当事人协商解决，协商不成，提交南京仲裁委员会仲裁。

(×) 2、因履行本合同发生争议，由当事人协商解决，协商不成，依法向人民法院起诉。

十三、名辞和术语的解释：

无。

十四、其它：

1、 本合同经甲、乙双方代表签字盖章后生效；

2、 本合同文本一式肆份，甲、乙双方各持贰份。

3、 本合同未尽事宜，须由双方友好协商，签订补充合同，补充合同与本合同具有同等效力。

技术附件：

1. 项目建设目标

2021 年 8 月，江苏省政府办公厅印发《江苏强对流灾害性天气监测预警服务示范体系建设方案》（苏政办发〔2021〕52 号），提出“到 2023 年底，建成观测站网更为合理、预报预警技术更为先进、预警发布快速精准、应急联动顺畅高效的强对流灾害监测预警服务体系”的总体目标，以及提高监测能力、提高预报预警能力、提高预警信息发布能力、提高灾害联防联控能力、提高全民防灾减灾意识和能力五大重点任务。南京作为经济大市，经济命脉（如能源、交通、农业、水利等）和社会公用事业（如城市生命线工程、市政、卫生、环保、商业物流、旅游等）稳定运转和持续发展，以及我市人口密集、社会群体多样化发展和人民生活质量不断改善等，已经向气象灾害预报预测及相关服务提出了必须不断适应国家与社会需求的深刻变化，要更具准确性、针对性和外延性，要更加精细化、个性化和多样化的高要求。

“十三五”期间南京市气象部门在突发极端天气的预警服务能力显著提升，但仍然存在一些不足。基于新发展阶段对气象灾害防御和减灾工作更高的要求，需发展精细化程度更高、准确度更高、面向不同行业服务的具有高时空分辨率（百米级分钟级）的预报预警系统。

2. 项目建设内容

规划本次开发内容包括：多源观测预处理与融合分析子系统、数值模式同化与预报子系统、多种气象要素降尺度预报子系统、百米级预报外推订正与融合子系统、百米级分钟级精细化展示子系统等相关工作。

3. 功能需求

3.1. 多源观测预处理与融合分析子系统

多源观测预处理与融合分析子系统分为观测数据收集与转换、多源观测数据质量控制和观测数据基础数据集建设等三个模块。

（1）观测数据收集与转换：建立从江苏天擎提取常规探空、自动站、雷达

和卫星等观测数据的自动化运行模块，根据观测时间→平台→变量（或通道等）层次进行分类存储；建立观测数据存储标准，包括数据经纬度、高度、数值、质量信息、平台信息、通道信息等，基于标准改写从天擎获取的上述数据；如有缺测或数据存在问题的情况应在标准化存储数据前进行处理，生成缺测观测文件或标记错误观测数值等；建立极轨卫星 FY-3 微波资料、静止卫星 FY-4A/B 和 Himawari-8/9 红外成像仪观测资料到资料同化所需格式的转换前处理模块；建立多源卫星微波/红外资料预处理模块，实现从外部系统接入高分辨率模式同化应用所需的资料，对接入的卫星资料进行格式转换、插值处理等，生成同化应用系统能够直接加载读取的标准化、规范化、格式化的数据。

（2）多源观测数据质量控制模块：

建立卫星、雷达等数据的质量控制，包括雷达资料的速度退模糊、杂波处理和偏振量质控，卫星资料的云检测、地表检测，等。利用 FOURDD 框架等先进方法，对雷达径向风数据进行速度退模糊预处理，提供订正后的径向风场资料；基于地面雨滴谱仪统计观测构建的反射率因子 ZH 和差分反射率因子 ZDR 衰减订正模型，对 ZH 和 ZDR 等双偏振雷达变量进行衰减订正处理；基于 FY-4A/B 和 Himawari-8/9 红外成像仪观测资料，开展面向数值天气预报应用的风云四号成像仪数据接口模块开发，研发适用于数值预报同化的静止卫星红外成像仪通道云检测，针对成像仪数据时空特性与预报模式的差异，进行观测时间订正和观测空间订正，并进行数据格式转换，完成风云四号成像仪数据应用的前期准备工作；基于 FY-3 极轨卫星微波观测，建立高频和低频通道组合的云水反演方案，形成云检测算法，完成数值模式对风云三号极轨卫星微波资料的同化接口；基于快速辐射传输模式，建立多源卫星资料的偏差分析子模块，确保实现卫星资料在数值预报系统的有效同化应用。

（3）观测数据基础数据集建设模块

建立南京市区 X 波段双偏振雷达站网（江宁、高淳、浦口和六合）观测基数据的三维风场反演模块。对质量控制后的雷达数据进行等高面数据插值，利用双线性插值方法，将雷达径向风和双偏振变量插值到等高面上，形成百米级水平分辨率的双偏振变量资料，用于模式评估和数据同化；基于三维变分分析技术和泛函求极值的方式，实现南京区域 X 波段雷达百米级的高精度反演风场，用于模式

评估和数据同化；建立 X 波段雷达数据质量控制和三维风场反演模块，能够基于预设的绘图脚本，实时读取处理雷达资料并处理成所需雷达变量数据集和反演产品，推送至预设公共路径供业务和研究人员调用。建立极轨卫星 FY-3 微波资料和静止卫星 FY-4A/B 和 Himawari-8/9 红外成像仪观测资料 L1 级亮温数据集和质量控制后的数据集。

3.2. 数值模式同化与预报子系统

数值模式同化与预报子系统主要包括多源观测资料同化模块、高分辨率数值模式模块两个模块。

(1) 多源观测资料同化模块：

建设更新频次为逐 3 小时的公里级模式同化-预报快速循环更新模块，同化融合常规探空、自动站、雷达、卫星和风廓线等观测数据，为高分辨率数值预报系统提供观测分析场。流程运行采用热启动方式，由粗网格预报场提供背景场；建立同化-预报循环窗口时间长度可预调节的快速更新循环流程脚本，要求所有模式参数，包括分辨率、区域大小、物理过程参数化，循环窗口等均可在一个脚本内配置完成；在不影响当前运行流程前提下，可实时自动或手动修改未来循环窗口时间长度，以适应部分高分辨率观测时间获取时间不稳定，部分时段密集的情况。

(2) 高分辨率数值模式模块：

针对南京市建立公里级分钟级模式精细化预报模块，预报时效达 72 小时，模式间隔 30 分钟输出，更新频次为每 3 小时。数据预处理功能能够获取、处理包括驱动场和静态数据等在内的运行基础数据，形成目标区域的模式初始和边界条件；模式精细化预报功能能够通过降尺度融合粗分辨率预报数据优化目标区域的初边界条件，并通过配置本地参数实现模式积分稳定运行，生成气象预报数据；模式产品后处理能够实现要素资源分析、空间适应整合、数据转码处理及数据集成与推送指定存储空间的功能。

3.3. 多种气象要素降尺度预报子系统

多种气象要素降尺度预报子系统主要包括常规气象要素场统计降尺度模块、

地形依赖的降水融合分析模块、近地面二维风场融合模块、雷达组合反射率降尺度模块、百米级预报检验评估模块等 5 个模块

(1) 常规气象要素场统计降尺度模块

得到以公里级分辨率模式（覆盖南京区域的 1km 水平分辨率）输出结果后，以其作为近地面初始温度、湿度场的猜测场，再基于地面观测资料和数值模式预报之间的差异对初始猜测场进行校正。具体方式为：引入复杂地形作用，即利用 SRTM（Shuttle Radar Topography Mission，地面高度数据精度可达 1 arc 或 30 米）地形数据得到模式地形与高精度地形数据之间的高度差；利用反距离权重插值法计算各格点的模式高度；结合以上步骤计算模式地形中垂直高度的各气象要素（温度、湿度）变化率；综合以上各格点要素的垂直变化率和选取的临界高度确定插值点的最终高度，并计算该高度下的温度、湿度；最终结合高斯模糊算法，去除各要素场的部分噪音，以去除插值后温度、湿度产品的边缘马赛克（结果不连续）现象。

(2) 地形依赖的降水融合分析模块

降水融合分析子模块考虑南京地区地形效应及雷达观测，调整并形成各类各项权重分布的降水场，具体实现方案为：利用模式或所需区域内观测站雨量计的观测结果，将距离模式格点最近数个站点的降水值插值到格点上，同时考虑站点的非均匀性及复杂地形所产生的影响，进行降水地形效应参数化方程及格点梯度计算；然后利用雷达定量估测降水技术，将观测（估测）降水量双线性插值到模式格点上，并考虑气候尺度及空间平滑（即使用雷达定量气候校准法），并将最新观测降尺度到百米级格点上。最终形成使用观测站降水资料、考虑地形效应、雷达资料等各项权重分布的百米尺度格点下的降水场。

(3) 近地面二维风场融合模块

针对南京地区低层大气高精度风场的建设，该子模块利用南京及周边地区公里级模式输出的近地面二维风场作为背景场，并融合高时空分辨率、更精确表征对流风暴辐合上升、边界层辐合线等强对流天气时大气低层风场特征的稠密的自动站观测风场廓线资料，同时考虑复杂地形订正技术，计算得到高分辨率近地面 10 米二维风场的差分场，并与初始猜测风场结合得到二维风场各分量在高水平精度描述下的具体数值，最终形成近百米尺度分钟级的近地面 10 米二维风场融

合算法。

(4) 雷达组合反射率降尺度模块

从覆盖南京地区的公里级模式结果中提取出组合反射率的结果,通过二维线性插值将所得到的 0 至 72 小时的公里级组合反射率插值到对应的百米级水平分辨率格点上,得到百米级雷达组合反射率的结果,形成雷达组合反射率的降尺度算法。

(5) 百米级预报检验评估模块

对常规气象要素场的百米级分钟级降尺度预报提供客观评估结果。使用逐 10 分钟自动站实况观测数据集,考虑到区域内观测站点的密度与预报格点密度相比较低,采用与常规气象要素场降尺度子模块相同的方法对站点观测进行降尺度,采用地形依赖的降水融合分析子模块输出的雷达定量估测降水对站点观测降水进行融合订正降尺度,采用与边界层的三维风场融合子模块相同的观测风场订正技术对站点风速进行降尺度。检验模块包含单站检验、区域检验、不同预报时效检验和阈值分类检验四种类型,使用的检验评估指标包括偏差(BIAS)、平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)、TS 评分、BS 评分、命中率(POD)、误报率(FAR)等。另外,在开展站点检验时,统一使用最近距离插值法将预报插值到自动站站点。

3.4. 百米级预报外推订正与融合子系统

百米级预报外推订正与融合子系统主要包括多要素外推预报模块、数值模式预报订正模块、精细化预报无缝隙融合模块等三个模块。

(1) 多要素外推预报模块:

采用基于 3D Transformer 的架构,利用其在处理时空序列数据方面的优势,实现对 0-6 小时内地面多气象要素(雷达反射率、温度、湿度、气压、风速和降水)的外推预报。3D Transformer 模型通过其自注意力机制能够捕获时间维度上的长期依赖性以及空间维度上的局部和全局依赖性,为气象要素之间复杂的相互作用提供深入理解。此外,模型集成编码器-解码器结构,用于编码近实时气象观测数据,并解码为短临天气预报,从而确保预报的时空连续性和一致性。通过对模型进行调优和使用特定的气象数据增强技术,进一步提升多要素外推预报

的精度。此外，模型整合遥感数据输入，如实时卫星云图和天气雷达数据，以捕捉快速发展的天气系统。尤其在复杂地形和中小尺度天气现象预报方面。

(2) 数值模式预报订正模块：

为了有效应对数值天气预报存在的系统性偏差并提高预报的准确性，本子模块核心采用改进的 Transformer 模型，旨在订正未来 10 天内的关键地面气象要素，包括温度、湿度、气压、风速、雷达反射率和降水量。致力于深入探索气象要素间的复杂非线性相互作用及其如何受到地形和下垫面条件的影响，从而实现在各种尺度上对预报准确性的显著提升。首先对收集到的地面气象数据进行预处理，包括数据清洗、缺失值处理和数据标准化，以确保实测数据的质量。考虑到地形和下垫面的影响，采用增加地形和下垫面数据，提供更为丰富的空间上下文信息。其次通过改进 Transformer 模型的自注意力机制，捕捉时间序列中的动态变化以及气象要素的空间关联，订正高影响天气事件如暴雨、高温和大风。通过该子模块来减少数值天气预报的系统性偏差，提高极端天气的预报准确性。

(3) 精细化预报无缝隙融合模块：

建立 0-10 天的无缝隙精细化预报产品链。0-3 天采用外推与公里级数值预报产品融合，逐半小时输出；3-10 天采用 GFS 数值预报，间隔 3 小时输出；不同时效产品间的过度时段，采用最优权重进行产品融合。采用动态权重调整方法，通过整合外推预报、公里级模式和 GFS 数值模式订正后的预报产品，目标是生成一个在准确度和可靠性上都有显著提升的综合预报产品。核心采用基于机器学习的模型，智能化地评估并调整各个预报输入的权重，以适应不同天气情况下各自的表现优劣。通过构建机器学习模型来分析订正的数值预报产品和外推产品，利用历史数据和实时性能反馈来学习如何有效融合这些信息，确保动态权重分配精准反映各预报源在特定气象条件下的相对准确性。模型不仅要考虑时间因素对权重分配的影响，以保障短期以及中期预报的整体性能。本模块旨在平衡短临预报和中短期预报的效果，提供更综合的预报效果。

3.5. 百米级分钟级精细化展示子系统

基于模式预报、降尺度处理后及 AI 订正后的各类要素预报数据，提供地面风(风向风速)、地面温度、湿度、降水、雷达回波等预报产品在线实时查询展示、

时间选择、模式选择、区域选择、要素选择的网页可视化展示。提供时间选择、切换、播放等交互功能，支持多图展示等功能，例如可以选择多个要素，同时展示多张图实现综合分析等。

需要考虑不同观测资料和模式产品的水平与垂直分辨率差异，对比测试各种常用插值算法，如双线性插值、最近邻法插值、Cressman 插值和 Barnes 插值等在各气象要素的插值效果和稳定性，与已有算法进行对比。通过长时间序列的大样本测试，确定最优的百米级模式气象要素融合产品升级插值方案。同时，可提供基于百米级气象数据及相关预报产品的高精度气象数据可视化单点数据、可视化瓦片图层和可视化流场图层，以及集成展示的数据图层，更直观地展示灾害性天气的影响因子及过程分析；可以静态展示，也可以通过图片的连续播放获得动画效果。