

构建现代化气象观测业务体系：“天元”平台的实践与探索

张晓平 安力珺 王生鹏

青海省大气探测技术保障中心，青海西宁，810000；

摘要：随着气象现代化建设的深入推进，传统依赖人工、分散管理的综合气象观测业务运行模式，已难以适应精准预报、精细服务和科学管理的需求。为此，中国气象局气象探测中心数据质量室研制了综合气象观测业务运行信息化平台（“天元”），通过信息化、流程化、标准化手段，全面重塑气象观测业务的运行生态。本文以《天元平台应用流程指南（V3.2）》为依托，结合2021至2024年全国推广实践数据，从设计理念、核心业务流程及内在逻辑等角度，对天元平台进行分析。根据相关研究结果可知，“天元”平台通过创建统一、协同、可追溯的业务信息化环境，使综合气象观测业务全要素生产率提高了22.7%，数据可用率提高了41%，为我国气象观测业务的高质量发展提供了有力支撑。

关键词：气象观测；信息化平台；天元；业务流程；装备保障；数据质量；全要素生产率

DOI：10.69979/3029-2700.26.03.094

1 引言

1.1 研究背景

综合气象观测是气象工作的根基。到2023年底，我国已经形成了包含7大类17个观测网元的综合体系，有国家级自动气象站24239个、天气雷达236部、在轨风云卫星7颗，形成了空天地海一体化的观测格局。传统业务运行长期存在“三散两低”的问题：站点、设备、人员信息分散；装备保障、物资供应流程分散；维护、检定、报废数据分散；从而造成业务协同效率低、观测数据可用率低。现有的ERP、CMMS等系统只能解决局部问题，不能满足气象行业对数据即产品所要求的时效性、准确性、可追溯性。

1.2 研究意义

对“天元”平台做系统性的剖析和定量化的成效评估，不仅能检验出它的价值，还可以给气象行业乃至其它行业的数字化治理提供一个可以复制、推广的实践模式。

1.3 文献综述

国际上美国NOAA的元数据管理系统（MMS）、欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的观测业务ERP系统（OBS-ERP）等虽然有借鉴意义，但是多集中于卫星或者雷达等单一网元，没有公开全链条流程模型。国内研究目前大部分停留在信息化总体架构设计和BPMN流程建模上，没有对实际生产数据进行实证分析。本文的创新之处在于，首次把DEA-Malmquist生产率指数模型应用到该领域中，对平台带来的效率和质量双重提升

效应进行量化的计量。

1.4 研究思路

依托三年半全国范围的运行日志、工单、检定证书等共计3.2TB的生产数据，再现并剖析关键业务流程的数字化重塑过程；创建面板数据DEA模型，计算平台对于业务全要素生产率的影响；

2 “天元”平台基础架构

2.1 总体架构

平台采用“四层两体系”的总体架构：

（1）基础设施层使用的是私有云和边缘混合云的方式，用了Kubernetes容器编排技术达到5.3万并发。

（2）数据层使用分布式时序数据库（TDengine）和图数据库（Neo4j），实现观测数据和业务元数据毫秒级的关联查询。

（3）用SpringCloudAlibaba微服务框架建立326个微服务，平均响应时间78毫秒。

（4）应用层：提供PC端、移动端及小程序三端协同的应用界面。

两体系即标准规范体系（包含国标、行标、企标共87项）和安全运维体系（达到网络安全等级保护2.0第四级标准）。

2.2 组织-任务-站点模型

平台创新性地引入“组织-机构-任务-站点”四元组数据模型：

-组织（Organization）：映射国、省、市、县四级

行政体系。

-机构 (Agency)：定义责任主体及其负责的观测任务集合。

-任务 (Task)：涵盖地面观测、天气雷达、辐射、农业气象、大气成分等各类观测业务。

-站点 (Station)：包含地理位置、站号及可共享的任务列表。

利用图数据库来构造实体之间的复杂关系，从而使同一个地点可以同时做最多九种不同的观测任务，并且实现了土地资源的集约化（节约率为31%）。

2.3 精细化权限模型

定义了42个功能角色、136个数据角色，使用基于角色的访问控制 (RBAC) 和基于属性的访问控制 (ABAC) 两种方式结合的模式。另外加入动态授权，面对突发故障等应急情况时，市级管理员可以向下级临时授权备件调拨等权限（有效期为48小时），到期后自动收回，在保证安全的前提下又具有了业务的灵活性。

3 核心业务流程数字化重塑

3.1 全生命周期物资供应链管理

3.1.1 智能需求预测

以2015年—2020年共2.1亿条历史故障数据为训练集，用XGBoost算法训练出“设备失效概率-时间”预测曲线，预测未来12个月的备件需求，准确率为91.4%，使平均库存水平降低28%。

3.1.2 采购合规性控制

国家审计署2023年第4号公告显示，气象部门政府采购违规率较去年同期降低6.7个百分点。

3.1.3 智能仓储管理

单价在5万元以上的关键件采用一物一码的方式，用条码、RFID双标识实现批量自动化盘点。2024年1月，北京备件中心盘点6.8万件物资耗时由原来的5天缩短到4.5小时。

3.2 台站建站流程标准化

3.2.1 标准化元数据模型

根据WMOOSCAR/Surface国际标准扩展了18个本地化字段，形成了中国气象观测站元数据规范QX/T2023-456。

3.2.2 数字孪生预演

建站前用BIM和GIS技术做数字孪生场景预演，可以自动检测和预警雷达遮挡角大于 0.5° 等17种常见的选址冲突，减少现场返工率达52%。

3.2.3 在线协同审核

建立县级填报、智能预审、省市县人工复核四级在线审核链。系统预审调用28条规则引擎，平均耗时7分钟；整体流程平均耗时0.8个工作日，相比传统线下纸质流程效率提高6.3倍。

3.3 闭环维护维修保障体系

3.3.1 故障知识图谱

创建一个包含18.6万个故障现象、故障原因、故障解决办法三者三元组的本体知识图谱。维修人员输入故障现象（自动站无降水数据），系统就会智能地给出前五个最有可能的解决办法，命中率可以达到84%。

3.3.2 智能备件调度

用DQN深度Q网络强化学习算法，以“维修延误时间最短”和“物流成本最低”为多目标来优化。2023年汛期在华南地区开展试点，平均故障修复延误时间由原来的11.4小时降到现在的4.6小时。

3.3.3 维修-计量联动

更换雷达射频器件等关键部件后平台会触发计量定标任务，通过接口调取中国计量科学研究院进行现场定标并缩短定标证书有效期从原来的30天改为7天。

3.4 计量检定无缝集成

创建气象专用计量电子证书对象标识符 (OIDs) 体系，同国家市场监督管理总局e-Cert系统对接，达成47种气象仪器检定结果的自动回传以及状态更新。2024年起国家级站网仪器计量覆盖率一直为100%，检定过期预警从事后15天提前到事前30天。

4 平台应用成效的定量评估

4.1 数据来源与指标体系

选取全国31个省（区、市）2020年1月到2024年6月共的面板数据，用省级气象观测业务系统做决策单元 (DMU)。投入指标有业务人员数、年度装备经费、库存金额，期望产出指标有数据可用率、观测精度、平均故障修复时间 (MTTR)，非期望产出指标有设备故障率、计量超时率。

4.2 DEA-Malmquist 模型分析

采用DEAP2.1软件计算全要素生产率 (TFP) 指数及其分解项。主要结论如下：

(1) 全国观测业务的TFP年增长率为5.02%，技术进步所占的比重是3.71%，技术效率的提高所占的比重是1.29%。

(2) 平台全面推广上线后(2022年第三季度起), TFP 环比显著提升 22.7%。

(3) 平台的应用可以促进区域均衡, 西部省份技术效率提高最明显的是青海、甘肃的 TFP 增长率分别达 8.4%、7.9%。

4.3 稳健性检验

为了保证结论的可靠性, 做了稳健性检验, 用业务人员实际工时代替投入指标, 核心结论不变; 采用随机前沿分析(SFA)模型进行估计, 关键参数在 1%显著性水平下仍然为正, 说明“天元”平台对业务生产率的正向促进效应是稳健的。

5 讨论: 平台价值的再审视

5.1 驱动制度与组织创新

平台的应用迫使业务流程进行重新构造, 促使省、市、县三级观测业务部门从按专业分割的职能型组织转变为流程型组织, 并且催生出装备保障产品经理等新岗位。

5.2 促进数据生产要素化

平台已经沉淀下 3.2PB 以上高质量、高关联性的业务数据。2023 年这部分数据资产价值达到 18.4 亿元, 占气象部门数据资产总值的 34%, 业务数据已经变成了重要的生产要素。

5.3 应对安全与伦理挑战

平台也会遇到新的问题, 边缘采集终端有物理安全风险, 故障知识图谱有厂商核心商业信息等。本文给出分级的脱敏办法, L1 级信息可以公开分享, L4 级敏感信息只能在授权的范围内使用。

6 未来展望

6.1 智能化升级: 构建“天元大脑”

(1) 采用联邦学习的方法, 联合主要的设备厂商来训练一个通用的设备失效预测模型, 提高预测的能力, 但是并不牵涉到数据隐私的问题。

(2) 多模态健康诊断, 对雷达伺服电机等重要部件使用声学、振动、图像等各种 AI 分析手段进行早期故障诊断, 准确率为 95%。

(3) 使用深度强化学习生成全国 236 部天气雷达 72 小时维护计划, 可预计减少计划性停机时间 12%。

6.2 深度数据融合

打通与“气象大数据云平台(天擎)”的 382 个数据和服务接口, 把观测数据流、业务状态流、保障任务流整合成“三流合一”的数字孪生气象观测网, 支持用实时模拟评估单点故障对智能网格预报的影响。

6.3 移动化与现场作业支持

升级天元版本, 实现离线扫码, 解决无网络信号区域的维修数据回传问题, 配合 AR 眼镜使用, 现场维修时可以实时叠加设备三维拆解图纸, 可以将专家出差支持需求降低 50%。

6.4 开放生态体系建设

发布天元 OpenAPI2025 年开放了 128 个核心微服务接口, 创建气象观测开发者社区, 设立每年 500 万元创新激励基金; 孵化轻量级 SaaS 应用, 最后构建起健康的平台即服务(PaaS)商业生态。

7 结论

经过三年半的全国性实践检验, 中国气象局推进观测业务现代化的重要基础设施“天元”平台, 成功把综合气象观测业务的全要素生产率提高了 22.7%, 把数据可用率提高了 4.1%, 并有效缩小了区域间业务能力差距。本研究结果表明, 本平台不单单是一个先进的软件系统, 更是一种将现代治理理念深深融合进去的业务运行新范式。当未来的智能升级、开放生态越来越完善的时候, 天元平台就会巩固我国气象强国的观测基本能力, 起到稳定基础的作用, 对气候变化和保障国民经济及人民生命财产安全发挥更加稳固的基础性作用。

参考文献

- [1] 王志豪, 李强, 张伟. 气象观测业务信息化架构研究[J]. 气象科技, 2020, 48(3): 1-9.
- [2] 李强, 刘敏, 胡晓明. 基于 BPMN 的气象装备保障流程建模[J]. 应用气象学报, 2021, 32(2): 234-242.
- [3] WMO. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8) [S]. 2021.
- [4] Cooper WW, Seiford LM, Tonek. Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software [M]. Springer, 2007.
- [5] 中国气象局. 气象高质量发展纲要(2022—2035 年)[Z]. 2022.
- [6] 国家审计署. 2023 年第 4 号公告: 关于 2022 年度中央预算执行和其他财政收支的审计工作报告[R]. 2023.