工程与管理科学
Engineering and Management Science
第 8 卷◆第 9 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

低空风切变多源观测数据四维变分融合与三维风场重构方法研究

伏龙延
中国民用航空西北地区空中交通管理局甘肃分局　甘肃兰州　730030

DOI：10.32629/ems.v8i9.22163

［摘　要］低空风切变具有尺度小、演变快和局地性强等特点，单一观测设备难以兼顾大范围覆盖、近地层精细探测和快速更新。针对天气雷达、激光测风雷达、风廓线雷达、自动气象站及机载观测等多源资料在时空分辨率、坐标体系和观测误差方面存在的差异，本文构建了一套基于 WRF-4DVar 的多源观测融合与三维风场重构方法。首先对异构资料进行坐标统一、时间匹配、空间网格化和质量控制；随后以 WRF 模式为动力约束，通过观测算子将不同类型观测映射至模式空间，在连续同化时间窗内最小化背景场与多时次观测之间的差异，获得最优三维分析风场；最后基于融合结果计算低空风切变诊断量。该方法能够在统一动力框架下综合利用多源异构观测，为机场低空风切变精细监测提供连续三维风场基础。

［关键词］低空风切变；多源观测；四维变分同化；WRF；三维风场

1 引言

低空风切变是航空器起飞、进近和着陆阶段的重要危险天气，其主要表现为较短时间和较小空间范围内风速、风向或垂直气流的快速变化。受对流活动、地形扰动及边界层湍流等过程影响，机场近地层风场具有明显的局地性和非均匀性，单一观测设备难以完整描述风切变的三维结构及其快速演变。

天气雷达、激光测风雷达、风廓线雷达、地面气象站和机载观测在探测范围、时间分辨率和观测变量方面具有明显互补性，但不同设备之间存在坐标体系、采样频率、观测尺度和误差结构差异，难以直接形成统一连续风场。四维变分同化（4D-Var）能够在给定时间窗内，以数值模式为动力约束，同时吸收不同时刻、不同位置的多源观测，并通过模式演变将离散观测信息传播至三维空间。[1-2]因此，本文以多源观测预处理和质量控制为基础，采用 WRF-4DVar 构建机场低空三维风场，并进一步开展风切变诊断。[3]

与简单空间插值或静态加权不同，4D-Var 能够同时利用观测的空间位置和实际观测时刻，使多源资料在同一模式轨迹上得到统一约束。对快速变化的低空风场而言，这种处理方式有利于减少不同设备时间不同步造成的结构错位，并在观测稀疏区域维持分析场的动力连续性。[1-2]

2 多源观测预处理与质量控制

多源资料进入同化系统前首先需要完成空间、时间和数据质量统一。天气雷达和激光雷达通常采用距离、方位角和仰角描述观测位置，需转换至统一笛卡尔坐标系，并结合站点海拔和地形高度进行修正。对于多普勒天气雷达，其直接观测量为沿雷达波束方向的径向速度。若三维风矢量为 (u,v,w)，则模式风场对应的径向速度为

$$V_r = u\cos\theta\sin\varphi + v\cos\theta\cos\varphi + w\sin\theta \quad (1)$$

其中，θ 和 φ 分别为仰角和方位角。该关系既用于预处理阶段理解雷达观测的几何含义，也可直接作为 4D-Var 同化天气雷达径向速度的观测算子。对于风廓线雷达和自动气象站，则主要通过模式网格到观测高度和站点位置的插值建立对应关系。

不同设备的时间分辨率从秒级到十分钟量级不等。预处理过程中需修正设备时钟偏差和数据传输延迟，并尽量保留实际观测时刻。由于 4D-Var 能够在连续时间窗内调用多时次观测，因此不必将所有资料强制插值到同一瞬时时刻；对于快速演变的雷达和近地层风场资料，减少不必要的时间插值可降低突发风变被平滑的风险。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

空间离散观测可根据需要采用径向基函数等方法完成网格化处理。[4]设第 i 个观测点位置为 x_i，其观测值为 f_i，目标位置 x 的估计值可表示为

$$\hat{f}(x) = \Sigma_{i=1}^{N} \lambda_i \varphi(\|x - x_i\|) \quad (2)$$

其中，λ_i为插值权重，ϕ 为径向基函数。网格化主要用于生成辅助分析场或处理无法直接进入同化系统的离散资料；对于能够通过观测算子直接映射至模式空间的原始观测，应优先保留其原始位置和观测值，以减少重复插值带来的平滑误差与观测相关性。

质量控制采用设备状态检查、物理一致性检验和统计异常识别相结合的方式。天气雷达重点检查信噪比、速度退模糊和异常回波，激光测风雷达检查有效探测距离和数据连续性，地面设备检查缺测和物理量范围；同时利用风场连续性、多设备交叉验证及 3 倍标准差或 DBSCAN 等方法识别异常样本。对明显异常数据进行标记、剔除或局部重构，并将质控信息用于后续观测误差设置，从而降低低质量观测对分析场的影响。

在多源同化中，质量控制结果还应与观测误差设定相联系，而不宜仅采用简单的“保留—剔除”二元处理。例如，对信噪比较低但仍具有有效信息的雷达或激光雷达资料，可在保留观测的同时增大其误差方差，使其在代价函数中的权重降低；对于观测环境稳定、连续性较好的资料，则可赋予相对较小的误差。这样既能够充分利用边缘质量资料中的有效信息，又可避免低质量观测对分析场产生过强约束。此外，对同一设备连续扫描或经过空间插值形成的资料，还应注意相邻观测间可能存在误差相关性，必要时通过观测抽稀或超观测处理降低重复信息的影响。

3 WRF-4DVar多源观测融合与风切变诊断

WRF-4DVar 以数值模式作为时间演变约束，在给定同化时间窗内寻找最优初始状态，使模式轨迹同时接近背景场和多时次观测。设初始状态为 x_0，背景状态为 x_b，背景误差协方差矩阵为 B，第 k 时刻观测为 y_k，观测误差协方差矩阵为 R_k，观测算子为 H_k，则代价函数可表示为[1-2]

$$J(x0) = J_b + J_o \quad (3)$$

其中背景项为

$$J_b = \tfrac{1}{2}(x_0 - x_b)^{T} B^{-1} (x_0 - x_b) \quad (4)$$

观测项为

$$J_o = \tfrac{1}{2}\Sigma a_{=0}^{N} [Ha(xa) - ya]^{T} R_k^{-1} [Ha(xa) - ya] \quad (5)$$

模式状态由初始状态通过 WRF 模式积分得到：

$$xa = M_{0 \to k}(x_0) \quad (6)$$

通过迭代最小化代价函数，可获得最优分析初始场：

$$x_0^{a} = \arg\min_{x0} J(x_0) \quad (7)$$

背景项用于限制分析场无依据地偏离模式背景，观测项则综合整个同化时间窗内不同设备、不同位置和不同时刻的观测信息。通过模式动力演变，某一时刻的观测信息能够向前后时次及邻近空间传播，从而使离散观测共同约束一条连续的大气演变轨迹。

实际计算中可采用增量 4D-Var，在背景轨迹附近对模式和观测算子进行线性化，并利用切线性模式和伴随模式计算代价函数梯度，通过迭代求得最优分析增量。这样既保留非线性 WRF 模式对大气过程的约束，又降低直接优化高维模式状态所带来的计算压力。[1]

不同观测资料需建立相应观测算子。天气雷达通过式(1)将模式中的 u、v、w 投影至雷达波束方向；激光测风雷达根据扫描几何将模式风场映射至观测位置；风廓线雷达通过垂直插值获得相应高度的模式风速；自动气象站将模式近地面状态插值至站点位置；机载观测则根据飞机的空间位置和观测时间进行四维插值。由此，不同结构和分辨率的资料可以统一转换为模式等效观测，并进入同一代价函数。

背景误差协方差矩阵 B 和观测误差协方差矩阵 R 是决定同化结果的重要参数。B 描述背景场误差在空间和变量之间的相关结构，决定单点观测对邻域模式状态的影响尺度；R 则综合仪器误差、代表性误差和预处理误差。质量较高的观测可赋予较小的误差方差,使其在代价函数中具有更高权重；对信噪比较低、代表性较差或经过较强插值处理的资料，则应适当增大观测误差。[2]

其中，B 矩阵的设定直接影响观测信息在水平、垂直及不同变量之间的传播范围。若相关尺度设置过大，局地风切

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

变信号可能被过度扩散；若相关尺度过小，则难以充分发挥多源观测对无资料区域的约束作用。因此，机场低空风场同化应根据近地层边界层结构、模式网格分辨率及观测密度合理确定背景误差特征尺度。R 矩阵则应体现不同设备的实际观测精度和代表性差异，例如地面站能够较准确描述站点附近风场，但空间代表范围有限；雷达具有较大的覆盖范围，却受到波束展宽、遮挡和距离变化等因素影响。通过 B 和 R 的合理配置，可以在模式背景与多源观测之间建立更符合实际的权重关系。[1-2]

完成迭代优化后，以最优分析初始场重新积分 WRF 模式，可得到整个同化时间窗内连续的 u、v、w 三维风场，并沿跑道、进近方向或指定高度提取风场剖面。对于两个高度 z_1 和 z_2 处的水平风矢量，垂直风切变强度可表示为

$$S_v = \sqrt{[(u_2-u_1)^2+(v_2-v_1)^2]} / |z_2-z_1| \quad (8)$$

同时可沿跑道或飞行航迹计算水平风速梯度，以识别局地风场快速变化区域。方法验证可设置不同化、单一资料同化和多源资料同化试验，并预留未参与同化的激光雷达、机载观测或地面站资料作为独立检验。通过比较不同试验的风速均方根误差以及风切变事件命中、漏报和虚警情况，可进一步评估多源 4D-Var 相对于背景场和单一资料同化的增益。

验证时除总体误差外，还应针对风切变的业务特征进行分层统计。可分别比较近地层、跑道端及进离场关键高度的风速和风向误差，并根据风切变发生时段分析融合前后风速梯度及风向突变的恢复情况。对于典型个例，可进一步对照雷达径向速度、激光雷达剖面和地面站分钟级观测，判断同化场是否能够同时反映大范围背景风和局地快速变化。多事件统计则用于评估方法的稳定性，避免仅凭单一个例得出结论。这种“连续变量误差+事件识别能力”的联合检验更适合评价多源 4D-Var 在机场风切变监测中的实际价值。

对于低空风切变应用，还需关注模式水平和垂直分辨率对小尺度结构恢复能力的限制。若背景网格过粗，即使观测分辨率较高，分析场仍可能受到模式可解析尺度约束。因此实际应用中应结合机场范围采用适当的嵌套网格，并重点检验近地层风速梯度、局地辐散和垂直速度等结构是否得到合理改善。[3]

4 结论

本文针对低空风切变多源观测资料在时空分辨率、坐标体系及误差结构方面存在的差异，构建了以 WRF-4DVar 为核心的多源观测融合与三维风场重构方法。通过坐标统一、空间网格化和多级质量控制，将天气雷达、激光测风雷达、风廓线雷达、地面站及机载观测纳入统一同化框架；利用 WRF 模式动力约束和 4D-Var 代价函数，在连续时间窗内综合多时次异构观测，获得连续三维分析风场，并进一步开展风切变诊断。

该方法能够利用不同观测资料在空间覆盖和时间更新方面的互补优势，同时保持融合风场的动力一致性。后续需结合实际多源观测资料开展独立验证，重点评估不同观测组合、背景误差协方差及观测误差设置对三维风场重构和风切变识别结果的影响，并进一步确定适用于机场低空小尺度风场的模式分辨率和同化时间窗。

[参考文献]

[1]COURTIER P, THÉPAUT J N, HOLLINGSWORTH A. A strategy for operational implementation of 4D-Var, using an incremental approach[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1994, 120(519): 1367-1387.

[2]KALNAY E. Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

[3]SKAMAROCK W C, KLEMP J B, DUDHIA J, et al. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4[R]. NCAR Technical Note, 2019.

[4]BUHMANN M D. Radial Basis Functions: Theory and Implementations[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

作者简介：伏龙延（1993.01）男，汉族，宁夏固原市，本科学历，工程师，研究方向:民航气象业务保障及中小尺度天气研究。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.