

修正风影响下飞行计划垂直剖面滚动优化研究

王可¹, 林媛茵¹, 陈顶², 韦冬冬³

(1. 中国民用航空飞行学院 飞行技术学院, 广汉 618307)

(2. 成都航空有限公司 运行风险控制中心, 成都 610202)

(3. 上海飞机客户服务有限公司 飞行工程中心, 上海 200241)

摘要: 航前预报风偏差显著影响飞行计划垂直剖面运行经济性, 提出一种基于风修正的航行中垂直剖面滚动优化方法。首先通过滚动窗口提取已飞航段实测风与预报风, 结合最优插值法修正未飞航段预报风, 得到当前滚动更新时刻对应的修正风; 然后在固定巡航高度层约束下, 构建以油耗和飞行时间最小为目标的多阶段垂直剖面优化模型; 最后在滚动更新过程中将生成的修正风作为未飞航段风输入, 采用伪谱法对未飞航段垂直剖面进行重优化。通过仿真实验验证, 结果表明: 修正风相较预报风的风速平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)分别降低69.3%和66.1%, 风向MAE和RMSE分别降低74.9%和69.4%; 顺风转强顺风和强逆风转顺风场景下, 修正风方案最大节油率分别达到4.02%和7.68%, 证明了该方法的有效性。

关键词: 预报风修正; 飞行计划; 垂直剖面优化; 最优插值; 伪谱法

中图分类号: V212

文献标识码: A

Rolling optimization of flight-plan vertical profiles under corrected wind conditions

WANG Ke¹, LIN Yuanyin¹, CHEN Ding², WEI Dongdong³

(1. Flight Technology College, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

(2. Operational Risk Control Center, Chengdu Airlines Co., Ltd., Chengdu 610202, China)

(3. Flight Engineering Center, Shanghai Aircraft Customer Service Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: Pre-flight wind forecast bias significantly affects the operational economics of flight plan vertical profiles. This paper proposes a wind-correction-based rolling optimization method for in-flight vertical profile adjustment. First, using a rolling window, measured and forecast winds over the flown segment are extracted; the forecast wind over the unflown segment is then corrected via optimal interpolation, yielding the corrected wind at each update. Second, under a fixed cruise altitude, a multi-stage optimization model is formulated with fuel consumption and flight time as objectives. Finally, the corrected wind is fed into the unflown segment during rolling updates, and the pseudospectral method re-optimizes the remaining vertical profile. Simulation results show that, compared with forecast wind, the corrected wind reduces MAE and RMSE of wind speed by 69.3% and 66.1%, and those of wind direction by 74.9% and 69.4%, respectively. In headwind-to-strong-tailwind and strong-headwind-to-tailwind scenarios, the corrected-wind scheme achieves maximum fuel savings of 4.02% and 7.68%, demonstrating the effectiveness of the proposed method.

Key words: forecast wind correction; flight plan; vertical profile optimization; optimal interpolation; pseudospectral method

收稿日期: 2026-02-28; 修回日期: 2026-09-04

基金项目: 中国商飞第八届科技周项目(技字[2026]3号); 2025年民航安全专项项目(FB2025006); 2024年度中央高校基本科研业务费资助项目—重点项目(24CAFUC01001)

通信作者: 林媛茵(2003—), 女, 硕士研究生。E-mail: 2492407496@qq.com

引用格式: 王可, 林媛茵, 陈顶, 等. 修正风影响下飞行计划垂直剖面滚动优化研究[J]. 航空工程进展.

WANG Ke, LIN Yuanyin, CHEN Ding, et al. Rolling optimization of flight-plan vertical profiles under corrected wind conditions [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering. (in Chinese)

0 引言

随着我国“十五五”民用航空发展规划的深入实施,推动国产民用飞机产业化关键突破与构建智慧民航体系已成为国家战略的重要组成。在这一进程中,提升国产民用飞机的运营经济性,是其赢得市场竞争、实现商业化成功的关键核心。飞行计划作为航班运行的基础,其垂直剖面的优化直接影响燃油消耗与飞行时间,是提高运行经济性的重要手段。然而,当前民用飞机在支干线运营中,其飞行计划的制定仍普遍依赖起飞前获取的静态气象预报文件。这些预报数据虽具权威性,但更新周期通常为数小时,与航班在实际空域中遭遇的瞬息万变的真实风场之间存在显著的时空脱节。当预报风与实际风条件不一致时,基于预报风生成的垂直剖面可能偏离实际最优方案,进而造成额外燃油消耗和飞行时间损失,削弱了其市场核心竞争力。由此可见,如何利用飞行过程中逐步获得的航迹风信息修正预报风输入,并将修正后的风数据用于飞行计划垂直剖面优化,已成为提升国产民用飞机精细化运营水平的关键技术问题。

国内外围绕风影响下的航迹与垂直剖面优化研究主要从四个方面展开。第一类研究关注风对航迹优化和运行经济性的影响。常哲宁等^[1]基于最优控制方法研究了风影响下的多目标航迹优化问题,并采用 ϵ 约束法获得 Pareto 前沿解;González-Arribas 等^[2]与 Kamo 等^[3]研究天气预报不确定性对航迹优化的影响,并通过鲁棒优化方法提升飞行时间和燃油消耗优化结果的可靠性;Girardet 等^[4]利用集合预报数据和动态规划方法生成风最优航路,并通过概率方法量化预报误差对航路选择的影响。

第二类研究集中于垂直剖面和多阶段最优控制求解。朱逸飞等^[5]、吴丽娜等^[6]采用启发式算法优化了爬升段垂直剖面;刘利朝等^[7-8]、Park 等^[9]和 Soler 等^[10]分别采用伪谱法或 Hermite-Simpson 配置法求解多阶段或下降段问题,实现了轨迹预测并获得了节油航迹;孙淑光等^[11]与 Dancila 等^[12]分别分析了垂直剖面性能及巡航段满 RTA 约束的剖面优化,验证了飞行剖面优化的可行性。

第三类研究集中在四维航迹协同优化与运行

约束建模方面。谢华等^[13-14]研究了容量受限条件下的四维航迹优化与低空无人机冲突网络建模;杨磊等^[15]揭示了柔性空域下连续下降航迹多目标优化中效率、油耗与容量的权衡关系;张军峰等^[16-17]改进进场排序与调度算法,并提出了离场四维航迹预测及不确定性分析方法;Sáez 等^[18]提出了动态进场路径与速度管理相结合的连续下降运行自动化方法。

第四类研究关注实测风信息、航空器派生数据与滚动优化的结合。Dalmau 等^[19]利用广播式实测风信息更新下降段风廓线,并据此对剩余下降轨迹进行实时调整;Abdat 等^[20]基于飞机派生数据更新风预测结果,并将其用于实时航迹优化,体现了飞行过程中利用实测风信息提升轨迹适应性的研究趋势。

综上,现有研究已在风影响航迹优化、垂直剖面最优控制、四维航迹协同优化及实时风信息更新等方面取得较多成果,但仍存在不足:一是多数研究仍以航前预报风为主要输入,对飞行过程中预报风与实测风的动态偏差考虑不足;二是垂直剖面优化多侧重单一阶段或航前规划,缺少面向航行中垂直剖面的滚动优化;三是四维航迹与交通管理研究更关注航路组织、终端区运行和冲突协调,对固定巡航高度层下飞行计划垂直剖面经济性优化支撑有限;四是已有实测风信息更新研究虽体现了航行中实测风的应用价值,但对于如何利用已飞航段实测风修正未飞航段预报风,并进一步驱动剩余航程垂直剖面重优化,仍缺少清晰的机理阐释与算例验证。

针对上述不足,本文以固定巡航高度层下的飞行计划垂直剖面为研究对象,提出一种航行中滚动优化方法。首先以欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)预报风为航前基准输入,采用历史航班快速存取记录器(Quick Access Recorder, QAR)数据模拟航行中实测风的逐步获取过程,通过滚动窗口结合最优插值方法动态修正剩余航段预报风;在此基础上,以当前飞机状态为初始条件,将修正风输入垂直剖面优化模型,对剩余航程剖面进行滚动重优化;最后基于实际航线航班数据,从风修正精度、燃油消耗、飞行时间及剖面适应性等方面验证所提方法的有效性。

1 修正风序列构建

为获得可用于垂直剖面优化的修正风输入,本文基于 ECMWF 预报风和 QAR 参数解算得到的沿航迹实测风构建修正风序列。首先,ECMWF 预报风生成航前初始风输入;其次,受限于在飞航班 QAR 数据暂无法实时接入,采用历史 QAR 数据按飞行时序解算已飞航段实测风信息;然后,考

虑到飞行过程中实测风只能随着航班运行进程逐步获取,采用滚动窗口机制在每一更新时刻仅调用当前时刻之前的已飞航段实测风,并通过最优插值(Optimal Interpolation, OI)方法对尚未抵达航段预报风进行滚动修正,得到当前滚动更新时刻对应的剩余航程修正风。航行中飞行计划垂直剖面优化机理示意图如图 1 所示,该图可直观展示本文方法的航行中应用逻辑。

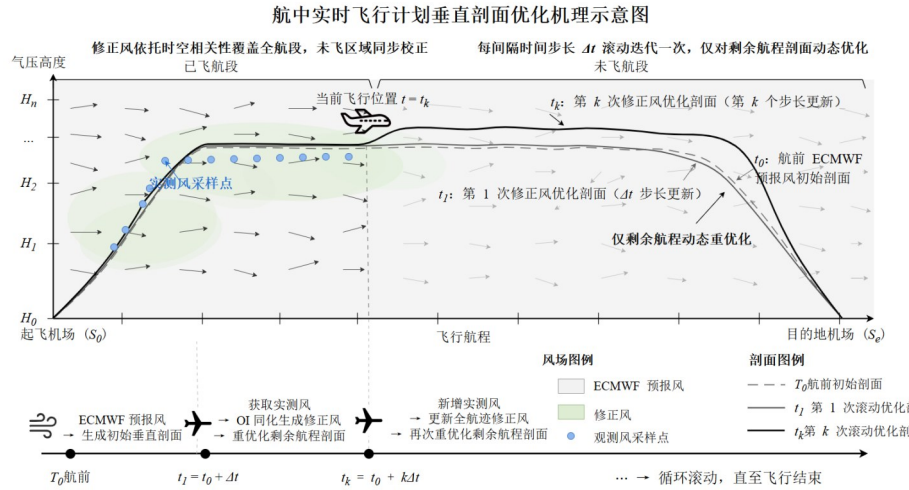


图 1 航行中实时飞行计划垂直剖面优化机理示意图

Fig. 1 Schematic of in-flight real-time optimization mechanism for flight plan vertical profiles

1.1 航迹点实测风计算模型

航迹点实测风计算基于航空器运动学关系,即地速矢量等于空速矢量与风速矢量之和。目前民用飞机获得风速风向信息通常依赖大气数据系统与惯性/GNSS导航系统的综合解算,采集频率为 1 Hz。本节基于航空器运动学关系解算航迹点风矢量,获得已飞航段沿航迹实测风序列。

设航空器在某一时刻的真空速为 V ,真航向为 ψ ,地速为 V_{GS} ,对地航迹角 χ 确定,风速为 V_w ,则东向风分量 u_w 和北向风分量 v_w 的计算公式为

$$\begin{cases} u_w = V_{GS} \sin \chi - V \sin \psi \\ v_w = V_{GS} \cos \chi - V \cos \psi \end{cases} \quad (1)$$

由此,获得了每个采样时刻航空器所处位置 (Lon_k, Lat_k, h_k) 的风矢量观测值:

$$\mathbf{V}_w(\mathbf{tk}) = [u_w(tk), v_w(tk)]^T \quad (2)$$

为便于分析与后续融合,常将风矢量转换为气象学上常用的标量风速 W_s 和风向 θ_w 。

$$W_s = \sqrt{u_w^2 + v_w^2} \quad (3)$$

$$\theta_w = \text{mod}(\arctan 2(u_w, v_w) \cdot \frac{180}{\pi} + 180, 360) \quad (4)$$

其中, $\arctan 2$ 为四象限反正切函数,风向以正北为 0° ,顺时针增加,表示风的来向。

1.2 基于最优插值法的修正风构建

由于未飞航段尚无法直接获得实测风,本文以 ECMWF 预报风作为基础,通过最优插值方法利用已飞航段实测风与预报风之间的偏差,并结合误差协方差描述的空间、高度和时间相关性,对未飞航段预报风进行统计修正,生成对应的修正风。

最优插值法的核心思想是在给定 ECMWF 预报风、实测风及其误差统计特性的前提下,通过最小化修正误差方差,得到二者的最优线性组合。其修正权重由 ECMWF 预报风误差协方差矩阵 $\mathbf{B}$ 和实测风误差协方差矩阵 $\mathbf{R}$ 共同决定。其中, $\mathbf{B}$ 描述 ECMWF 预报风误差在水平距离、高度和时间

上的相关性,决定已飞航段实测风所揭示的预报风偏差信息对未飞航段的影响范围; R 反映实测风信息在修正过程中的可信程度。当 B 较大或 R 较小时,实测风偏差在修正风中的权重提高;当 B 较小或 R 较大时,修正风更多保留 ECMWF 预报风特征。因此,OI 方法能够根据两类误差统计特征,自适应确定 ECMWF 预报风与沿航迹实测风之间的修正权重。

设 ECMWF 预报风 V_b , 实测风为 V_0 , 其中 $k=1, 2, \dots, N$ 为有效观测点数。观测算子为 H , 用于将 ECMWF 预报风数据通过经度、纬度、高度和时间插值映射到航迹点位置, 则修正风可表示为

$$V_a = V_b + K(V_0 - HV_b) \quad (5)$$

式中: K 为修正权重矩阵,用于确定实测风与同位置 ECMWF 预报风之间的偏差对待修正位置的影响程度。

$$K = BH^T(HBH^T + R)^{-1} \quad (6)$$

背景误差协方差 B_{ij} 采用随空间距离、高度差和时间差衰减的相关模型:

$$B_{ij} = \sigma_b^2 \exp \left[- \left(\frac{d_{h,ij}}{L_h} \right)^2 - \left(\frac{\Delta h_{ij}}{L_v} \right)^2 - \left(\frac{\Delta t_{ij}}{L_t} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中: σ_b^2 为背景误差方差,是经度、纬度、高度的空间函数,取值会随空间位置改变; $d_{h,ij}$ 、 Δh_{ij} 、 Δt_{ij} 分别为第 i 个实测风观测点与第 j 个待修正预报网格点的水平距离、高度差以及时间差。

观测误差协方差矩阵用于描述沿航迹实测风序列的不确定性。各观测点之间的观测误差相互独立,则可取:

$$R = \sigma_o^2 I \quad (8)$$

式中: σ_o^2 为观测误差方差; I 为单位矩阵。

通过上述方法得到的修正风既保持了 ECMWF 预报风的全航路连续性,又引入了已飞航段实测风信息对未飞航段风输入的校正能力。

1.3 面向未飞航段的滚动窗口更新机制

在航行中应用场景下,航空器只能获得当前时刻之前已飞航段的实测风。因此,本文在每一滚动更新时刻均以 ECMWF 预报风作为未飞航段基础输入,并利用已飞航段实测风与同位置 EC-

MWF 预报风之间的偏差,对剩余航段预报风进行滚动修正。具体而言,随着航班运行时间推进,新的实测风样本不断进入滚动窗口,较早样本逐渐移出窗口;每一次窗口更新后,最优插值方法重新计算实测风偏差对航路剖面各位置的修正权重,进而生成对应的修正风,并用于剩余航程垂直剖面重优化。

设当前飞行时刻为 t_k , 航空器对应的已飞航程为 s_k , 航路总航程为 S , 则已飞航段为 $[S_0, s_k]$, 未飞航段为 $[s_k, S_e]$, 滚动窗口长度为 T_w , 此时飞机状态为 (s_k, h_k, V_k, m_k) 。滚动优化以该状态作为剩余航程优化的初始状态, 求解区间 $[s_k, S_e]$ 内的垂直剖面。下一更新时刻 t_{k+1} 到来后, 系统根据已执行剖面更新飞机状态, 并再次对 $[s_{k+1}, S_e]$ 进行重优化。时刻 t_k 可用于修正的实测风样本集合为

$$\Omega_k = \{y(s_i, h_i, t_i) | t_k - T_w \leq t_i \leq t_k, s_i < s_k\} \quad (9)$$

式中: $y(s_i, h_i, t_i)$ 为由 QAR 参数解算得到的第 i 个已飞航迹点实测风; s_i 、 h_i 、 t_i 分别为该点对应的航程位置、高度和时间。

本文滚动窗口更新流程如图2所示。

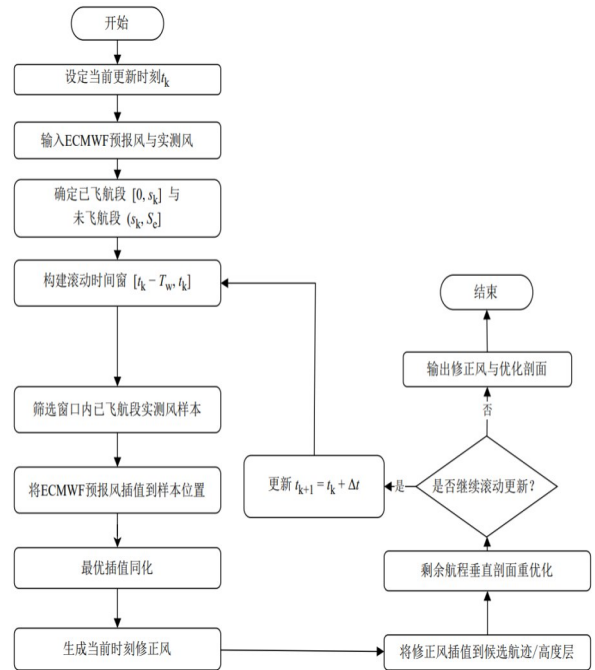


图2 风场滚动时间窗同化机制示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wind field assimilation mechanism with rolling time window

滚动窗口长度取 $T_w=20$ min,更新间隔取 $\Delta t=10$ min,即每隔 10 min 根据最新已飞航段实测风重新生成剩余航程的修正风,并对剩余航程垂直剖面进行重优化。

1.4 风数据修正效果评价指标

为评价修正风相对于 ECMWF 预报风的改进效果,本文采用独立实测风样本检验方法。具体而言,将由 QAR 参数解算得到的沿航迹实测风样本划分为参与同化样本和独立检验样本。其中,参与同化样本用于最优插值修正,独立检验样本不参与同化,仅用于评价风修正效果。ECMWF 预报风不作为验证真值,而是作为待修正的背景风输入和对比基准。

对于风速误差,其平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)的定义为

$$e_{\text{MSE}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V_{\text{ret},i} - V_{\text{for},i}| \quad (10)$$

$$e_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{\text{ret},i} - V_{\text{for},i})^2} \quad (11)$$

式中: V_{ret} 为待评价风数据的风速,包括 ECMWF 预报风和修正风; V_{for} 为同位置 QAR 解算出的实测风速; N 为独立检验样本数量。

对于风向误差,由于风向具有圆周特性,不能直接采用普通角度差。本文采用如下风向误差定义:

$$\Delta\theta_i = \min(|\theta_i^{\text{ana}} - \theta_i^{\text{bg}}|, 360^\circ - |\theta_i^{\text{ana}} - \theta_i^{\text{bg}}|) \quad (12)$$

风向平均绝对误差和均方根误差定义为

$$e_{\text{MSE},\theta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\theta_i \quad (13)$$

$$e_{\text{RMSE},\theta} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\theta_i^2} \quad (14)$$

MAE 反映整体平均偏差水平, RMSE 对局部较大误差更敏感。若修正风的风速、风向 MAE 和 RMSE 均低于 ECMWF 预报风,则说明 OI 修正能够改善整体误差并抑制局部大偏差。

2 垂直剖面滚动优化问题建模

为突出修正风对垂直剖面优化的影响,同时保证模型具有可计算性,本文作如下基本假设:

① 飞机被视为可变质量的质点,忽略其转动

惯量,采用点质量模型描述运动;② 飞行过程中飞机始终保持光洁构型(无襟翼、起落架放出),且推力方向与空速方向一致;③ 地球视为球体,忽略其自转及曲率对运动的影响;采用平面直角坐标系描述水平位置,但距离计算时考虑地球曲率;④ 水平航路固定,即飞机沿预先确定的一系列航路点飞行;⑤ 不考虑空中交通管制干预及空中避让等战术机动,假设空域环境理想。

2.1 民用飞机动力学模型

将飞机视为质点,定义状态变量和控制变量:

$$\mathbf{X} = [s, h, V, m]^T \quad (15)$$

$$\mathbf{U} = [T, \gamma]^T \quad (16)$$

式中: s 为沿航路距离; h 为高度; V 为真空速; m 为飞机质量; T 为推力; γ 为航迹倾角。

在垂直平面内,飞机的运动可采用质点动力学方程表示。

$$\begin{cases} \frac{ds}{dt} = V_{\text{GS}} = V \cos \gamma + W_q(s, h, t) \\ \frac{dh}{dt} = V \sin \gamma \\ \frac{dV}{dt} = \frac{T - D}{m} - g \sin \gamma \\ \frac{dm}{dt} = -\dot{m}_f \end{cases} \quad (17)$$

式中: $W_q(s, h, t)$ 为沿航迹风分量; $\dot{m}_f$ 为燃油流量。

需要说明的是,虽然动力学方程中将 T 和航迹倾角 γ 作为控制变量,但 T 在不同飞行阶段的处理方式不同。在爬升和下降阶段, T 可在最大可用推力、慢车推力及运行约束范围内参与优化;在巡航阶段,本文假设飞机沿给定巡航高度层近似准定常平飞,航迹倾角 $\gamma \approx 0$,加速度较小,此时推力主要由平飞力平衡关系确定,即:

$$T_{\text{cruise}} \approx D \quad (18)$$

由于本文垂直剖面优化是在给定航路上进行的,航程 s 随飞行过程单调增加,根据链式法则,对于任一状态变量 X 有:

$$\frac{dX}{ds} = \frac{dX/dt}{ds/dt} = \frac{\dot{X}}{V_{\text{GS}}} \quad (19)$$

对此,飞机动力学方程可转化为

$$\begin{cases} \frac{dt}{ds} = \frac{1}{V_{GS}} \\ \frac{dh}{ds} = \frac{V \sin \gamma}{V_{GS}} \\ \frac{dV}{ds} = \frac{(T-D)/m - g \sin \gamma}{V_{GS}} \\ \frac{dm}{ds} = -\frac{\dot{m}_f}{V_{GS}} \end{cases} \quad (20)$$

燃油消耗是本文垂直剖面优化的核心目标之一。由于该民用飞机在通用性能数据库中的适配性有限,且通用模型难以准确反映目标机型在不同高度、速度、重量和飞行阶段下的真实油耗特征,因此本文采用飞机性能数据库建立油耗模型。

飞机在飞行过程中受到的升力和阻力可表示为

$$L = \frac{1}{2} \rho(h) V^2 SC_L \quad (21)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho(h) V^2 SC_D \quad (22)$$

式中: C_L 为升力系数。

在准定常飞行条件下,升力近似平衡飞机重力在垂直于航迹方向上的分量,则有:

$$L \approx mg \cos \gamma \quad (23)$$

因此,可由升力表达式求得升力系数:

$$C_L = \frac{2mg \cos \gamma}{\rho V^2 S} \quad (24)$$

在求得升力系数后,可通过飞机阻力极曲线并查阅气动数据库获得对应的阻力系数 C_D 。

阻力系数通常表示为零升阻力和诱导阻力之和:

$$C_D = C_{D0} + KC_L^2 \quad (25)$$

式中: C_{D0} 为零升阻力系数; K 为诱导阻力因子。

将计算出来 C_D 代入式(22)即可计算出飞机阻力。在获得阻力 D 后,可根据飞机纵向运动方程进一步求解出当前飞行状态下所需推力 T 。

由推力 T 及飞机当前飞行条件查阅机型数据库可得到对应的燃油消耗率 η , 其函数依赖关系写为

$$\eta = \eta(h, M, T) \quad (26)$$

代入式(26)可计算出燃油流量 $\dot{m}_f$ 。

$$\dot{m}_f = \eta \cdot T \quad (27)$$

在计算得到当前飞行状态下的燃油流量 $\dot{m}_f$ 后,可对整个飞行过程中的燃油流量进行积分,从

而得到该航段的总燃油消耗量。

2.2 目标函数

本文以燃油消耗和飞行时间作为垂直剖面优化目标。设飞行过程起点为 S_0 , 终点为 S_e , 则燃油消耗为

$$J_{fuel} = \int_{t_0}^{t_f} \dot{m}_f(t) dt = \int_0^s \frac{\dot{m}_f(s)}{V_{GS}(s)} ds \quad (28)$$

飞行时间为

$$J_{time} = t_f - t_0 = \int_{t_0}^{t_f} dt \quad (29)$$

为便于求解,本文采用加权归一化方式构建综合目标函数:

$$\min J = w_{fuel} \frac{J_{fuel}}{J_{fuel,ref}} + w_{time} \frac{J_{time}}{J_{time,ref}} \quad (30)$$

式中: $J_{fuel,ref}$ 和 $J_{time,ref}$ 为归一化参考值。

考虑到飞行计划垂直剖面优化以经济性为主要目标,同时兼顾飞行时间,综合最优方案中燃油消耗权重 w_{fuel} 取 0.6, 飞行时间权重 w_{time} 取 0.4。同时,为对比不同目标导向下的剖面差异,本文设置耗油最少方案、飞行时间最少方案和综合最优方案三类修正风优化方案。

2.3 约束条件

为保证优化航迹的物理可实现性、飞行安全性及运行合规性,模型需满足以下约束条件。其中,高度约束适用于全飞行阶段的高度上下限控制;高度层约束为巡航阶段专属约束,仅限定巡航段须维持在指定高度层。

1) 边界条件约束

边界条件规定了系统在初始时刻 t_0 和终端时刻 t_f 必须满足的状态值:

初始状态(对应离地时刻):

$$\begin{aligned} s(t_0) &= 0, h(t_0) = h_0 \approx 0, \\ v(t_0) &= v_{to}, m(t_0) = m_{TOW} \end{aligned} \quad (31)$$

式中: t_0 为离地速度(通常取失速速度的 1.3 倍); m_{TOW} 为起飞总重。

终端状态(对应接地时刻):

$$s(t_f) = S_{total}, h(t_f) = h_f \approx 0, v(t_f) = v_{ld} \quad (32)$$

式中: S_{total} 为航路总水平距离; v_{ld} 为接地速度。

2) 推力约束

推力不能低于慢车推力,也不能超过当前高

度和速度下的最大可用推力。

$$T_{\min}(h, v) \leq T(t) \leq T_{\max}(h, v) \quad (33)$$

3) 航迹倾角约束

航迹倾角受飞机性能与乘客舒适度限制,通常在 -3° 至 $+3^\circ$ 之间。

$$\gamma_{\min} \leq \gamma(t) \leq \gamma_{\max} \quad (34)$$

4) 高度约束

$$h_{\min}(s) \leq h(t) \leq h_{\max}(s) \quad (35)$$

5) 速度约束

最小速度通常为失速速度的 1.3 倍,最大速度受结构强度、马赫数及高度限制。

$$v_{\min}(h) \leq v(t) \leq v_{\max}(h) \quad (36)$$

6) 巡航高度层约束

对于按高度层飞行的情况,在巡航阶段高度必须属于离散的许可高度层集合:

$$h(t) \in H_{cr}, \forall t \in [t_{cruise_start}, t_{cruise_end}] \quad (37)$$

其中, H_{cr} 根据东单西双确定。

7) 阶段连接约束

在多阶段垂直剖面中,相邻阶段之间需要满足状态连续性:

$$x_k(s_k^+) = x_{k-1}(s_k^-) \quad (38)$$

3 垂直剖面滚动优化模型求解

考虑到民用飞机飞行剖面具有明显的阶段性特征,不同高度区间对应的速度限制、推力状态和运行约束存在差异,本文采用分段建模与伪谱法相结合的方式,将连续最优控制问题转化为非线性规划问题进行求解。

本文研究重点是在给定巡航高度层条件下,比较预报风和修正风对垂直剖面优化结果的影响。因此,巡航高度层不作为连续优化变量,而是在优化前给定。两组的优化方案保持航路、巡航高度层、初始状态、终端状态、飞机性能参数和约束条件一致,仅改变风数据输入,从而保证对比结果的合理性。

3.1 垂直剖面分段最优控制问题构建

民用飞机完整垂直剖面通常包括起飞、爬升、巡航和下降、进近、着陆六个主要阶段。为提高剖面优化的精细化程度,本文进一步按照高度区间对爬升段和下降段进行划分。爬升阶段划分为中低空爬升段(1 500~10 000 ft)和高空爬升段

(10 000 ft 至巡航高度层 H_{cr}) 两个阶段;下降阶段划分为高空下降段(巡航高度层 H_{cr} 至 10 000 ft)、低空下降段(10 000~1 500 ft) 两个阶段。巡航段保持固定高度层飞行。

因此,完整飞行剖面可划分为七个连续子阶段:

$$p = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7\} \quad (39)$$

其中,

$$p_1 \in [0, 1500]; p_2 \in [1500, 10000];$$

$$p_3 \in [10000, H_{cr}]; p_4 \in h = H_{cr}$$

$$p_5 \in [H_{cr}, 10000]; p_6 \in [10000, 1500]$$

$$p_7 \in [1500, 0]$$

根据第 2.1 节建立的动力学模型,第 k 个阶段的最优控制问题可表示为

$$\dot{x}^{(k)}(t) = f^{(k)}[x^{(k)}(t), u^{(k)}(t), W_q(s, h, t)] \quad (40)$$

式中: $W_q(s, h, t)$ 为沿航迹风分量; $q = p$ 表示预报风方案; $q = c$ 表示修正风方案。

3.2 伪谱法离散

伪谱法是一种直接法,其基本思想是在给定时间区间内选取若干配点,用全局插值多项式近似状态变量和控制变量,并在配点处强制满足动力学方程和路径约束。与传统逐步积分方法相比,伪谱法具有较高的离散精度,适合求解具有多约束、多阶段特征的飞行剖面优化问题。

设固定航迹总航程为 S , 将实际航程区间 $s \in [0, S]$ 映射至标准区间 $\tau \in [-1, 1]$, 并在该区间选取 LGL 节点:

$$s_i = \frac{S}{2}(\tau_i + 1) \quad (41)$$

式中: τ_i 为 LGL 节点; s_i 为对应的实际航程位置。

LGL 节点在区间两端分布较密,有利于描述起飞爬升初段和下降末段剖面变化较快的特征。在每个伪谱节点处,根据当前优化变量生成高度、表速、真空速和马赫数,并插值得到该位置和高度下的沿航迹风分量。随后根据飞机性能数据库插值得到节点燃油流量。飞行时间和燃油消耗采用 LGL 权重积分近似:

$$J_{time} \approx \frac{S}{2} \sum_{i=1}^N \frac{w_i}{V_{GS,i}} \quad (42)$$

$$J_{fuel} \approx \frac{S}{2} \sum_{i=1}^N \frac{w_i \dot{m}_{f,i}}{V_{GS,i}} \quad (43)$$

式中: w_i 为 LGL 积分权重; $\dot{m}_{f,i}$ 为节点燃油流量。

经过伪谱离散后,原连续最优控制问题可转化为有限维非线性规划问题:

$$\begin{aligned} \min & J(Z) \\ \text{s.t.} & C_{dyn}(Z) = 0 \\ & C_{link}(Z) = 0 \\ & C_{path}(Z) \leq 0 \\ & C_{boundary}(Z) = 0 \end{aligned} \quad (44)$$

式中: Z 为所有阶段离散状态变量、控制变量及阶段时间组成的决策变量向量; $C_{dyn}(Z)$ 为动力学离散约束; $C_{link}(Z)$ 为阶段连接约束; $C_{path}(Z)$ 为路径约束; $C_{boundary}(Z)$ 为初始和终端边界约束。

4 仿真实验与结果分析

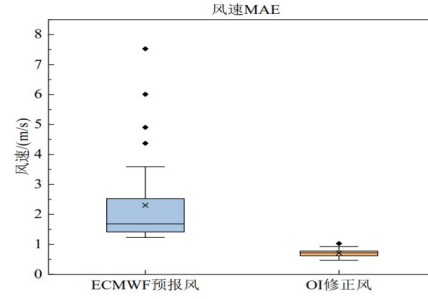
为分析修正风对飞行计划垂直剖面优化结果的影响,本文选取 2023 年 5 月—7 月呼和浩特至西安航线 61 趟运行航班作为仿真实验样本,实验采用 ECMWF 预报风、实测风和修正风三类风数据。其中,实验采用历史航班 QAR 数据模拟航行中实测风逐步获取过程,即在每一滚动更新时刻仅调用当前时刻之前的已飞航段实测风,不使用未来航段数据。

本文以 ECMWF 预报风生成的基准飞行计划作为对照方案,并在修正风输入下设置耗油最少方案、飞行时间最少方案和综合最优方案三类优化方案。

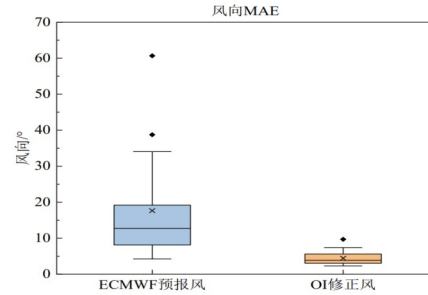
4.1 多航班风数据修正效果验证

为评价多航班场景下修正风的误差改善效果,本节统计 ECMWF 预报风与修正风的风速、风向 MAE 和 RMSE,并通过箱线图对比其误差分布特征。对比结果如图 3~图 4 所示,修正风的风速与风向误差均显著低于 ECMWF 预报风,误差分布更集中,极端偏差得到有效抑制。

多航班误差均值统计如表 1 所示。结合图 3~图 4 箱线结果可以看出:经 OI 同化,风速 MAE 与 RMSE 均值由 2.31、2.86 降至 0.71、0.97 m/s,降幅分别达 69.3% 和 66.1%;风向 MAE 与 RMSE 均值由 17.64°、24.16°降至 4.43°、7.40°,降幅分别达 74.9% 和 69.4%。该量化结果与箱线图趋势吻合,进一步证实了动态同化方法对 ECMWF 预报风稳定、显著的修正效果。

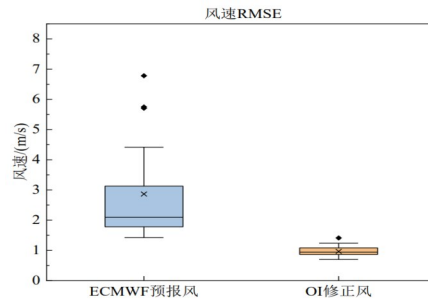


(a) 风速 MAE 对比图

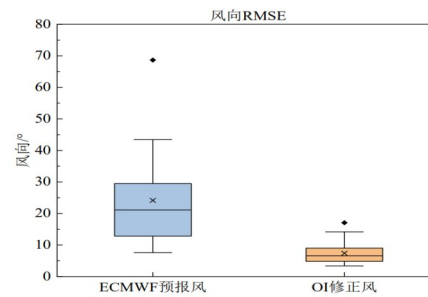


(b) 风向 MAE 对比图

图 3 ECMWF 预报风与修正风的 MAE 对比
Fig. 3 Comparison of MAE between ECMWF forecast wind and corrected wind



(a) 风速 RMSE 对比图



(b) 风向 RMSE 对比图

图 4 ECMWF 预报风与修正风的 RMSE 对比
Fig. 4 Comparison of RMSE between ECMWF forecast wind and corrected wind

表1 多航班风数据误差平均值统计

Table 1 Statistics of mean errors for multi-flight wind data

风类型	风速 MAE	风速 RMSE	风向 MAE	风向 RMSE
预报风	2.31	2.86	17.64	24.16
修正风	0.71	0.97	4.43	7.40

4.2 典型风况航班选取

为保证实验结果的可靠性,本文选取多日期、多航班运行数据开展仿真验证。考虑到篇幅限制,无法呈现所有航班的优化结果,故本文从多航班中选取出具有代表性的典型风况航班,以覆盖风修正效果的关键场景。

典型风况航班的选取遵循风况差异性和代表性原则,涵盖小偏差趋同型、逆风转强顺风型、强逆风转顺风型和顺风转逆风型四类典型场景。这四类典型航班的特征如表2所示。

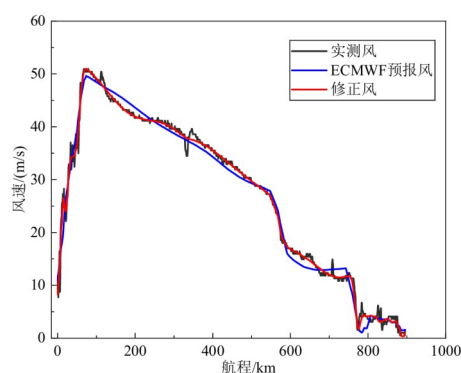
表2 典型航班风况特征对比

Table 2 Comparison of typical flight wind condition characteristics

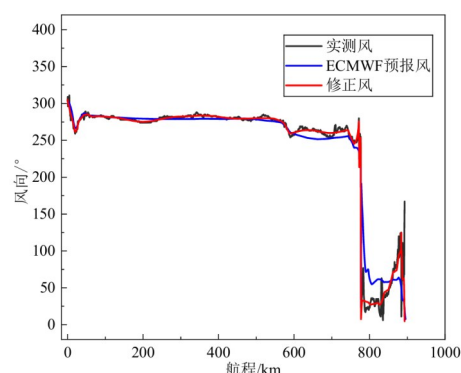
典型风况类型	预报风沿航迹平均风/ (m/s)	修正风沿航迹平均风/ (m/s)
小偏差趋同型	-6.02	-5.12
逆风转强顺风型	-0.56	+7.81
强逆风转顺风型	-17.41	+3.35
顺风转逆风型	+1.63	-10.29

小偏差趋同型风况用于验证ECMWF预报风较准确时修正风对优化结果的扰动程度;逆风转强顺风型风况用于分析修正风对优化剖面的增益;强逆风转顺风型风况用于评估其通过改善逆风条件对优化剖面的经济性提升;顺风转逆风型风况用于验证修正风对顺逆风方向变化的识别能力及优化策略的适应性。

为直观展示预报风修正方法在不同风况下的效果,上述四类典型风况下的风速和风向对比曲线如图5~图8所示。



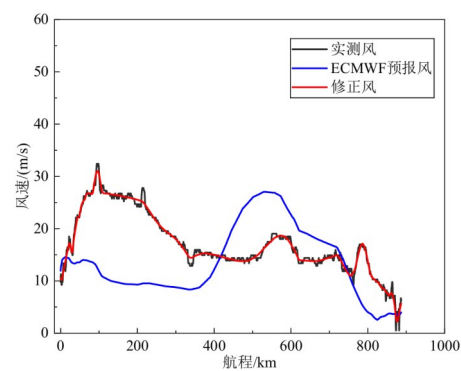
(a) 风速对比



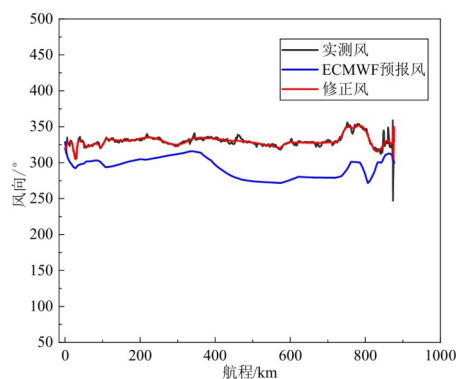
(b) 风向对比

图5 小偏差趋同型风况

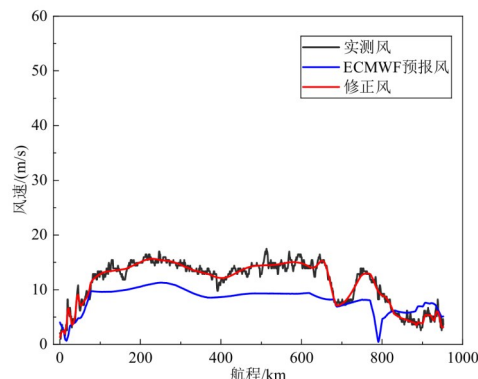
Fig. 5 Wind condition case of small-deviation convergence



(a) 风速对比

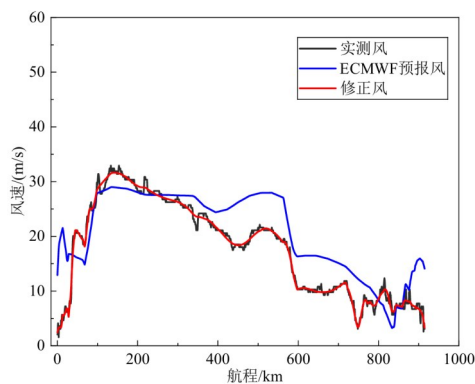


(b) 风向对比

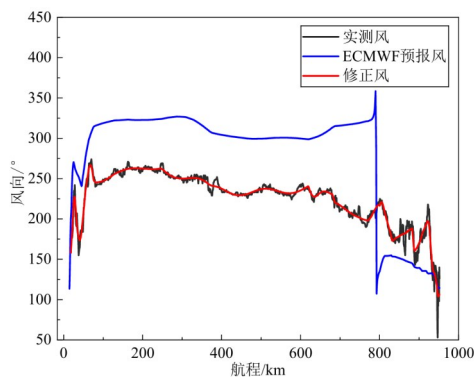


(a) 风速对比

图6 逆风转强顺风型风况
Fig. 6 Wind condition case of headwind turning into strong tailwind

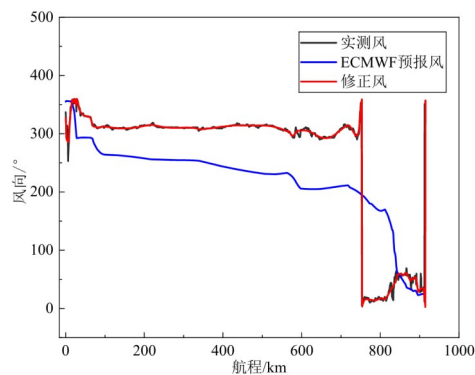


(a) 风速对比



(b) 风向对比

图8 顺风转逆风型风况
Fig. 8 Wind condition case of tailwind turning into headwind



(b) 风向对比

图7 强逆风转顺风型风况
Fig. 7 Wind condition case of strong headwind turning into tailwind

4.3 典型风况航班垂直剖面滚动优化结果

为分析不同风况下修正风对垂直剖面优化的影响,本文选取上述四类典型风况航班,以基准飞行计划为对照,在滚动修正风输入下构建耗油最少、飞行时间最少和综合最优三类优化方案,并对比各方案的高度剖面、速度剖面、燃油消耗和飞行时间变化,以评估修正风在不同风况下的优化效果与适应性。此外,为验证本文方法在航行中应用的实时性,统计了滚动优化过程中单次重优化的计算时间。统计结果表明,单次垂直剖面重优化的平均求解时间为 2.52 s,最大求解时间为 3.18 s,具备航行中在线应用的可行性。

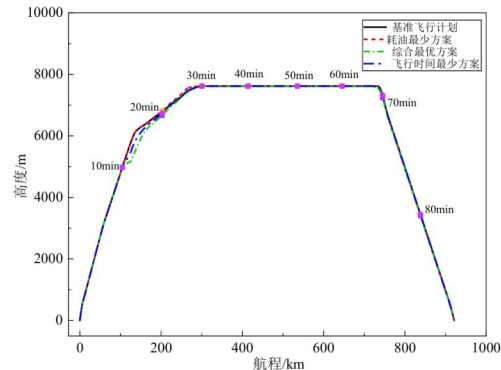
1) 小偏差趋同型风况

小偏差趋同型风况航班油耗和时间对比如表

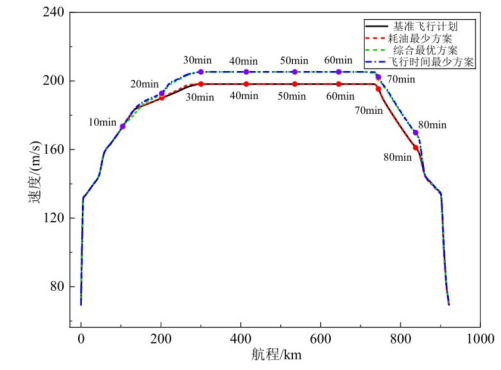
3所示,小偏差趋同型风况航班高度和速度对比如图9所示。小偏差趋同型风况下,基准飞行计划与三类修正风优化方案的高度剖面基本重合,说明修正风未对高度剖面产生明显扰动。基准飞行计划与耗油最少方案的高度和速度剖面较为接近,因此燃油消耗和飞行时间差异较小;飞行时间最少方案通过速度剖面调整,将飞行时间缩短144 s;综合最优方案则在节油9.3 kg的同时缩短飞行时间139 s。该结果表明,小偏差风况下优化收益主要来自速度剖面的局部调整。

表3 小偏差趋同型风况航班油耗和时间对比
Table 3 Comparison of fuel consumption and flight time for the small-deviation convergence case

剖面类型	燃油消耗/kg	飞行时间/s
基准飞行计划	2 689.0	5 247
耗油最少	2 674.9	5 249
综合最优	2 679.7	5 108
飞行时间最短	2 687.8	5 103



(a) 高度剖面



(b) 速度剖面

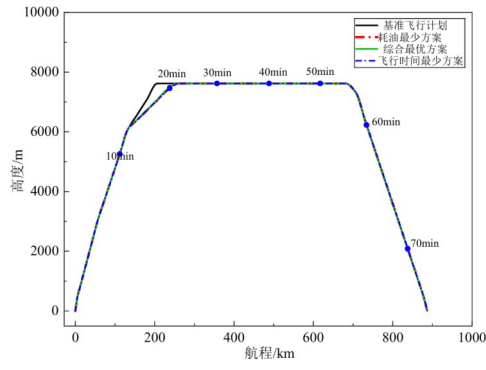
图9 小偏差趋同型风况航班高度和速度对比
Fig. 9 Comparison of altitude and speed for the small-deviation convergence case

2) 逆风转强顺风型风况

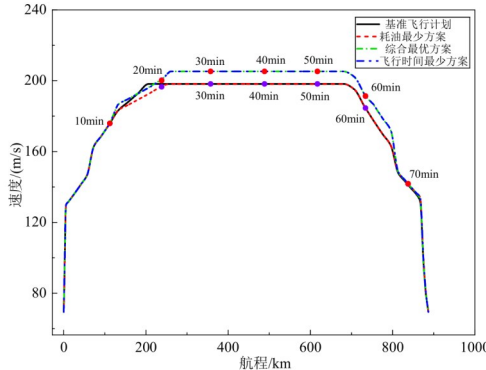
在逆风转强顺风型风况下,航班油耗和时间对比如表4所示,航班高度和速度对比如图10所示,可以看出:相较于基准飞行计划,三类修正风优化方案均降低了燃油消耗并缩短了飞行时间。其中,耗油最少方案燃油消耗为2 456.6 kg,较基准方案节油4.02%,飞行时间缩短187 s;飞行时间最短方案飞行时间为4 696 s,较基准方案缩短294 s,同时节油3.85%;综合最优方案燃油消耗为2 458.5 kg,飞行时间为4 700 s,分别较基准方案节油3.95%、缩短290 s。

表4 逆风转强顺风型风况航班油耗和时间对比
Table 4 Comparison of fuel consumption and flight time for the headwind-to-strong-tailwind case

剖面类型	燃油消耗/kg	飞行时间/s
基准飞行计划	2 559.5	4 990
耗油最少	2 456.6	4 803
综合最优	2 458.5	4 700
飞行时间最短	2 460.9	4 696



(a) 高度剖面



(b) 速度剖面

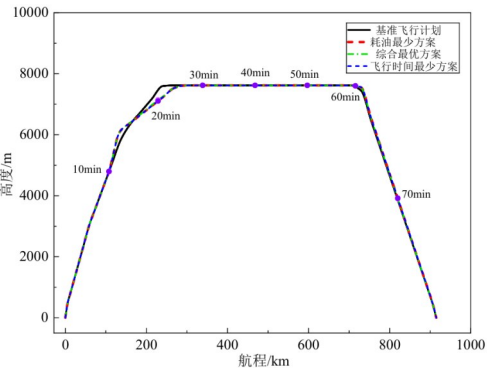
图10 逆风转强顺风型风况航班高度和速度对比
Fig. 10 Comparison of altitude and speed for the headwind-to-strong-tailwind case

3) 强逆风转顺风型风况

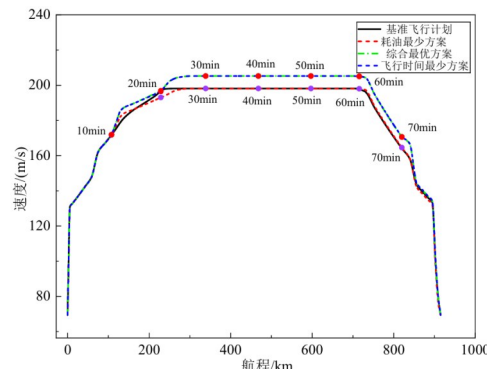
在强逆风转顺风型风况下,航班油耗和时间对比如表 5 所示,航班高度和速度对比如图 11 所示,可以看出:ECMWF 预报风显示巡航段存在较强逆风,而修正风显著削弱了该逆风分量,并使沿航迹风条件转为弱顺风。风修正带来的收益最为显著,相较基准飞行计划,修正风优化方案最多可降低燃油消耗 7.68%,最大可缩短飞行时间 492 s,说明修正风输入能够有效改善飞行计划垂直剖面的经济性。

表 5 强逆风转顺风型风况航班油耗和时间对比
Table 5 Comparison of fuel consumption and flight time for the strong-headwind-to-tailwind case

剖面类型	燃油消耗/kg	飞行时间/s
基准飞行计划	2 768.8	5 389
耗油最少	2 556.1	5 027
综合最优	2 557.3	4 901
飞行时间最短	2 577.7	4 897



(a) 高度剖面



(b) 速度剖面

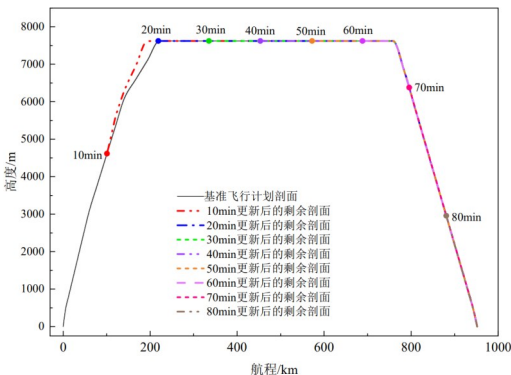
图 11 强逆风转顺风型风况航班高度和速度对比
Fig. 11 Comparison of altitude and speed for the strong-headwind-to-tailwind case

4) 顺风转逆风型风况

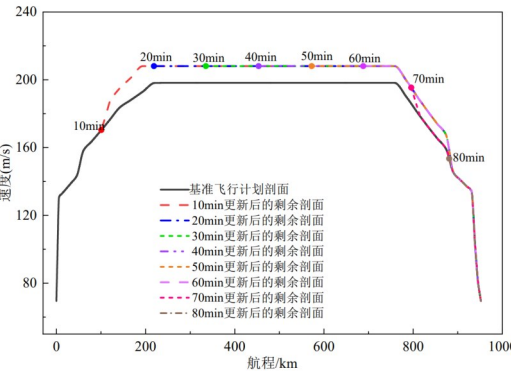
在顺风转逆风型风况下,航班油耗和时间对比如表 6 所示,航班高度和速度对比如图 12 所示。

表 6 顺风转逆风型风况航班油耗和时间对比
Table 6 Comparison of fuel consumption and flight time for the tailwind-to-headwind case

剖面类型	燃油消耗/kg	飞行时间/s
基准飞行计划	2 742.3	5 322
耗油最少	2 844.6	5 540
综合最优	2 874.4	5 459
飞行时间最短	2 872.9	5 457



(a) 高度剖面



(b) 速度剖面

图 12 顺风转逆风型风况航班高度和速度对比
Fig. 12 Altitude/speed comparison for downwind-to-headwind wind flights

从图 12 可以看出:ECMWF 预报风为弱顺风,而修正风更接近实测风,表明该航段实际转为明显逆风,预报风高估了顺风影响。由于修正后的风况更加不利,修正风优化剖面的燃油消耗高于

预报风优化结果。ECMWF 预报风优化剖面燃油消耗为 2 742.3 kg,若该剖面直接在修正风下飞行,会多耗油 125.5 kg。若在飞行过程中获取修正风并重新进行垂直剖面优化,燃油消耗可降至 2 844.6 kg,较直接沿用预报风剖面节省 23 kg,节油率约 1%,但飞行时间增加约 118 s。该结果表明,在逆风增强的不利风况下,重新优化无法完全抵消风场变差带来的燃油增加,但能够减少部分燃油损失,从而提高飞行计划对实际风变化的适应性。

5 结 论

1) 基于最优插值方法的滚动风修正能够显著降低 ECMWF 预报风的误差水平。多航班验证结果表明,修正风的风速 MAE 和 RMSE 降幅分别达到 69.3% 和 66.1%,风向 MAE 和 RMSE 降幅分别达到 74.9% 和 69.4%,证明了本文风修正方法在改善风输入精度方面的有效性和稳定性。

2) 在逆风转强顺风型风况下,修正风优化方案的节油效果显著,最大节油率达 4.02%,飞行时间最大缩短 294 s,说明修正风能够有效捕捉风向由逆转顺的变化趋势,并通过垂直剖面重优化释放顺风条件下的燃油经济性潜力。

3) 在强逆风转顺风型风况下,修正风对预报强逆风的修正幅度最为显著,修正风优化方案最大节油率达 7.68%,飞行时间最大缩短 492 s,表明风修正方法在预报风偏差较大时收益更为突出。

4) 在顺风转逆风型风况下,实际风条件较预报风更为不利,修正风重优化虽无法完全抵消逆风增强带来的燃油增加,但较直接沿用预报风剖面可节省燃油约 1%,验证了滚动重优化在不利风况下对飞行计划适应性的提升作用。

参 考 文 献

- [1] 常哲宁,胡明华,张颖,等. 风影响下航空器多目标最优控制航迹优化方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(11): 3521-3531.
Chang Zhening, Hu Minghua, Zhang Ying, et al. A multi-objective optimal control trajectory optimization method for aircraft under wind influence[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(11): 3521-3531. (in Chinese)
- [2] González-Arribas D, Soler M, Sanjurjo-Rivo M. Robust aircraft trajectory planning under wind uncertainty using optimal control[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2017, 41(3): 673-688.
- [3] Kamo S, Rosenow J, Fricke H, et al. Robust optimization integrating aircraft trajectory and sequence under weather forecast uncertainty [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2023, 152: 104187.
- [4] Girardet B, Lapasset L, Delahaye D, et al. Wind-optimal routing in the presence of uncertainties using ensemble forecasting[C]// SIDs 2023. US: IEEE, 2023: 1-10.
- [5] 朱逸飞,孙远,甄子洋. 基于改进 NSGA-II 的民机爬升段垂直剖面优化[J]. 飞行力学, 2025, 43(5): 88-94.
Zhu Yifei, Sun Yuan, Zhen Ziyang. Optimization of vertical profile for civil aircraft climbing phase based on improved NSGA-II [J]. Flight Dynamics, 2025, 43(5): 88-94. (in Chinese)
- [6] 吴丽娜,王和平. 基于改进遗传算法的最快爬升航迹的优化分析[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(10): 2669-2673.
Wu Lina, Wang Heping. Analysis of fastest climb trajectory optimal based on an improved genetic algorithms [J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(10): 2669-2673. (in Chinese)
- [7] 贾兴强,宗军耀,刘利朝,等. 基于 hp 自适应伪谱法的航空器多阶段航迹优化[J]. 飞行力学, 2024, 42(6): 43-49.
Jia Xingqiang, Zong Junyao, Liu Lizhao, et al. Multi-phase trajectory optimization of aircraft based on hp-adaptive pseudospectral method [J]. Flight Dynamics, 2024, 42(6): 43-49. (in Chinese)
- [8] 刘利朝,伍昊. 基于 Radau 伪谱法的民用飞机垂直轨迹优化方法研究[J]. 航空工程进展, 2026, 17(2): 114-121.
Liu Li)Chao(Zhao), Wu Hao. Study on Radau pseudospectral method of civil aircraft vertical trajectory optimization [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2026, 17(2): 114-121. (in Chinese)
- [9] Park S G, Clarke J P. Optimal control based vertical trajectory determination for continuous descent arrival procedures [J]. Journal of Aircraft, 2015, 52(5): 1469-1480.
- [10] Soler M, Olivares A, Staffetti E. Multiphase optimal control framework for commercial aircraft four-dimensional flight-planning problems [J]. Journal of Aircraft, 2014, 52(1): 274-286.
- [11] 孙淑光,戴博,张鹏. 飞机垂直剖面性能优化及仿真[J]. 控制工程, 2011, 18(4): 600-604.
Sun Shuguang, Dai Bo, Zhang Peng. Aircraft vertical trajectory performance optimization and simulation [J]. Control

- Engineering of China, 2011, 18(4): 600-604. (in Chinese)
- [12] Dancila R, Botez R. Vertical flight profile optimization for a cruise segment with RTA constraints[J]. The Aeronautical Journal, 2019, 123(1265): 970-992.
- [13] 谢华, 黎子弘, 杨磊, 等. 容量受限下城市对航班四维航迹优化[J]. 航空学报, 2022, 43(8): 325581.
- Xie Hua, Li Zihong, Yang Lei, et al. Optimization of four-dimensional trajectory of city pair with limited capacity[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(8): 325581. (in Chinese)
- [14] 谢华, 苏方正, 尹嘉男, 等. 复杂低空无人机飞行冲突网络建模与精细管理[J]. 航空学报, 2023, 44(18): 216-236.
- Xie Hua, Su Fangzheng, Yin Jianan, et al. Network modeling and refined management of UAV flight conflicts in complex low altitude airspace[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(18): 216-236. (in Chinese)
- [15] 杨磊, 李文博, 刘芳子, 等. 柔性空域结构下连续下降航迹多目标优化[J]. 航空学报, 2021, 42(2): 324157.
- Yang Lei, Li Wenbo, Liu Fangzi, et al. Multi-objective optimization of continuous descending trajectories in flexible airspace[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(2): 324157. (in Chinese)
- [16] 张军峰, 游录宝, 杨春苇, 等. 基于多目标帝国竞争算法的进场排序与调度[J]. 航空学报, 2021, 42(6): 464-476.
- Zhang Junfeng, You Lubao, Yang Chunwei, et al. Arrival sequencing and scheduling based on multi-objective Imperialist competitive algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(6): 464-476. (in Chinese)
- [17] 张军峰, 葛腾腾, 陈强, 等. 离场航空器四维航迹预测及不确定性分析[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(4): 800-806.
- Zhang Junfeng, Ge Tengting, Chen Qiang, et al. 4D trajectory prediction and uncertainty analysis for departure aircraft[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(4): 800-806. (in Chinese)
- [18] Sáez R, Polishchuk T, Schmidt C, et al. Automated sequencing and merging with dynamic aircraft arrival routes and speed management for continuous descent operations[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 132: 103402.
- [19] Dalmau R, Prats X, Baxley B. Using broadcast wind observations to update the optimal descent trajectory in real-time[J]. Journal of Air Transportation, 2020, 28(3): 82-92.
- [20] Abdat A, Botez R M. Real-time trajectory optimization using wind prediction updates based on aircraft-derived data[J]. Aerospace Science and Technology, 2024, 145: 108876.

(编辑:马文静)