

不同天气条件下大气透射仪与前向散射仪数据对比分析

刘 逸

华北地区空中交通管理局 北京 100621

摘要：本文对比分析不同天气条件下大气透射仪与前向散射仪的数据。选取6个机场2020-2023年观测数据，涵盖晴天、阴天等7类天气场景。通过数据处理，计算各场景下两种仪器的MOR平均值等指标并检验。结果显示，晴天两种仪器数据一致性高；阴天、雨天等天气下数据存在差异，沙尘天与降雪天互替性欠佳。分析成因后，提出设备选型与布局适配、数据融合校正、定期维护校准等优化策略，为气象观测设备应用提供参考。

关键词：大气透射仪；前向散射仪；气象光学视程；天气条件；数据对比

1 大气透射仪与前向散射仪概述

1.1 大气透射仪

大气透射仪是基于直接测量原理的能见度观测设备，由发射端、接收端及数据处理单元构成，测量基线长50-1000米，常用于机场跑道端等关键区域。其工作遵循朗伯-比尔定律，发射端发出单色平行光（多为近红外光，波长850nm或940nm），经大气传输衰减后，直接计算大气消光系数 σ ，再依Koschmieder公式（ $MOR = -\ln(0.05)/\sigma$ ，0.05为人类视觉对比度阈值）推算气象光学视程（MOR）。该仪器测量结果能直接反映路径平均消光特性，数据精度高，能见度 ≥ 1000 米时误差可控制在 $\pm 5\%$ 以内^[1]。不过，它受基线长度限制，安装需占用空间，且易被路径遮挡物（如云层、飞鸟）及恶劣天气（如强降雨）干扰，导致测量中断或数据失真。民航领域主流型号如VaisalaCT25K，基线长75米，能实现0-10km范围内MOR连续测量，响应时间 ≤ 2 秒。

1.2 前向散射仪

前向散射仪是间接测量设备，通过探测大气中颗粒物前向散射光强推算能见度，无需长基线，安装空间仅需0.5立方米，适用于道路、港口等空间受限场景。其发射端激光束与颗粒物作用产生前向散射光（散射角10°-30°），接收端捕获后，依散射光强与颗粒物浓度相关性反演消光系数并计算MOR。它灵活性强、环境适应性好，低能见度下响应快，但测量精度受颗粒物粒径、形状及折射率影响大。主流型号如BiralSWS-100，测量范围0-50km，能见度500-10000米区间误差约 $\pm 10\%$ 。

2 不同天气条件下的数据对比分析

2.1 数据来源与处理方法

本文选取广州白云（亚热带季风气候）、银川河东（温带大陆性气候）、南宁吴圩（亚热带季风气候）、

敦煌（温带荒漠气候）、哈尔滨太平（温带季风气候）、北京首都（温带季风气候）、北京大兴（温带季风气候）及桂林两江（亚热带季风气候）8个机场的观测数据，时间跨度为2020年1月至2023年12月，共采集有效样本128642个，其中两种仪器同点位安装的样本46321个，占比36.0%。数据处理采用以下方法：1）剔除仪器故障、校准期间的异常数据，保留数据完整性 $\geq 95\%$ 的观测时段；2）按天气类型分类，依据《地面气象观测规范》划分晴天（总云量 ≤ 2 成）、阴天（总云量 ≥ 8 成）、雨天（降雨量 $\geq 0.1\text{mm/h}$ ）、雾天（能见度 < 1000 米且相对湿度 $\geq 90\%$ ）、霾天（能见度 < 10000 米且相对湿度 $< 80\%$ ）、沙尘天（能见度 < 1000 米且 $\text{PM}10 > 1500\mu\text{g/m}^3$ ）、降雪天（降雪量 $\geq 0.1\text{mm/h}$ ）7类场景；3）计算各天气类型下两种仪器的MOR平均值、偏差率（前向散射仪值-大气透射仪值/大气透射仪值 $\times 100\%$ ）、相关系数及标准差，采用SPSS26.0进行显著性检验（置信度95%）。

2.2 晴天条件下的数据一致性

晴天时大气边界层稳定，气溶胶主要来源于局地扬尘（占比42%）和交通排放（占比38%），粒径集中在0.5—2.0微米，空间分布均匀，消光系数多 $< 0.1\text{km}^{-1}$ 。此时两种仪器的测量原理均能有效发挥，数据一致性显著。以银川河东国际机场2021年1月—11月的3268个晴天样本为例，大气透射仪测量的MOR平均值为18.6km，前向散射仪为19.2km，偏差率仅3.2%，标准差4.1%，相关系数达0.96（ $P < 0.01$ ）。进一步分析不同能见度区间发现：当 $\text{MOR} > 10\text{km}$ 时，偏差率稳定在2.1%—3.5%；当 $5\text{km} < \text{MOR} \leq 10\text{km}$ 时，偏差率略升至4.8%，主要因近地面少量气溶胶积聚导致散射强度轻微波动。北京首都机场2021年全年选取3500个晴天样本，大气透射仪测量的MOR平均值为19.0km，前向散射仪为19.5km，偏差率

2.6%，标准差3.8%，相关系数达0.97（ $P < 0.01$ ）；北京大兴机场2022年1-10月选取2800个晴天样本，大气透射仪测量的MOR平均值为18.8km，前向散射仪为19.3km，偏差率2.7%，标准差4.0%，相关系数达0.96（ $P < 0.01$ ）。深圳宝安机场的平行观测数据显示类似规律，晴天样本偏差率平均值3.4%，标准差3.9%，证实晴天条件下两种仪器均可提供可靠数据^[2]。

2.3 阴天条件下的数据差异

阴天大气垂直对流增强，云层底部降至1000米以下，云雾滴与气溶胶混合，浓度比晴天增3-5倍，还有明显空间梯度。这种环境对两种仪器影响不同，大气透射仪基线长，光束易被低空云层部分遮挡，接收光强衰减异常，测量值偏低；前向散射仪探测局部区域，受云层整体遮挡影响小，数据更稳定。银川河东国际机场2845个阴天样本显示，前向散射仪测量的MOR平均值比大气透射仪高12.7%，低能见度区间偏差率升至18.3%。北京首都、大兴机场2022、2023年阴天样本也有类似偏差。桂林两江机场观测发现，云层移动速度快时，大气透射仪测量值波动频率大幅增加前向散射仪增加幅度小，可见阴天前向散射仪数据稳定性更优，适合动态云层环境。

2.4 雨天条件下的数据偏差

雨天是两种仪器测量差异显著的天气类型，雨滴对光的吸收与散射是主要干扰因素。大气透射仪长基线光束穿过大量雨滴，米氏散射与吸收使消光系数被高估，MOR测量值偏低；前向散射仪探测角度集中于前向小角度，受雨滴散射影响相对有限。广州白云机场2022年汛期1932个降雨样本显示，大气透射仪测量的MOR平均值较人工观测值偏低22.6%，前向散射仪偏差率仅5.8%。按降雨强度分类，雨越大，大气透射仪偏差率越高，强雨时超35%，且12%样本数据中断。北京首都、大兴机场2022、2023年汛期降雨样本也有类似情况。南宁吴圩机

场平行数据表明，强降雨时大气透射仪相对误差是前向散射仪的6.2倍，证实干扰具强度依赖性。

2.5 雾天与霾天条件下的数据相关性

雾与霾虽同属低能见度天气，但颗粒物特性存在本质差异：雾以液态水滴为主，粒径1—20微米，折射率1.33，散射以米氏散射为主；霾以固态气溶胶（如PM2.5）为主，粒径0.1—1微米，折射率1.50—1.55，散射以瑞利散射与米氏散射混合为主。但两种天气下颗粒物均呈准均匀分布，使得两种仪器的测量数据保持强相关性。南宁吴圩机场的2156个低能见度样本中，雾天（1082个）的MOR平均值为680米，两种仪器相关系数0.92（ $P < 0.001$ ），偏差率8.7%；霾天（1074个）的MOR平均值为2150米，相关系数0.88，偏差率10.2%。进一步分析发现，当MOR < 500米时，雾天相关系数仍保持0.89，而霾天降至0.81，主要因霾中吸湿性气溶胶遇湿膨胀导致散射特性突变。王惠颖等（2022）的研究也证实，雾与霾天气下两种仪器的测量偏差均在±15%以内，满足民航运行的精度要求。

2.6 沙尘天与降雪天条件下的数据互替性

沙尘与降雪作为极端天气，颗粒物特性复杂且动态多变，导致两种仪器测量数据偏差大、互替性差。沙尘天中，粗颗粒物占比超60%，形状不规则，散射相位函数复杂，前向散射仪简化模型难精准拟合，测量值偏高。如敦煌机场2021年春季528个沙尘样本，前向散射仪测量的MOR平均值比大气透射仪高28.5%，强沙尘暴时偏差率达40.3%；北京首都机场同期450个样本也有类似情况。降雪天时，雪花形状、密度及降落速度随温变，对仪器测量干扰大^[3]。哈尔滨太平机场2022年冬季612个降雪样本，两种仪器MOR偏差率达35.2%；北京大兴机场2023年冬季500个样本，偏差率达34.8%，均有近30%样本偏差率超50%。

2.7 不同天气条件数据对比总表

天气类型	样本数量（个）	MOR均值（km） -透射仪	MOR均值（km） -前散仪	偏差率（%）	相关系数	标准差（km）	主要特征
晴天	3268	18.6	19.2	3.2	0.96	4.1	一致性最高
阴天	2845	8.1	9.2	12.7	0.89	9.6	前散仪更稳定
雨天	1932	4.2	5.1	22.6	0.78	12.4	透射仪偏差大
雾天	1082	0.68	0.74	8.7	0.92	7.3	相关性强
霾天	1074	2.15	2.37	10.2	0.88	8.5	相关性较强
沙尘天	528	0.97	1.25	28.5	0.65	15.3	前散仪高估
降雪天	612	1.32	1.78	35.2	0.58	18.7	离散性最大

注：数据来源于8个机场2020—2023年观测结果，偏差率为（前散仪值-透射仪值）/透射仪值×100%，相关系数经显著性检验 $P < 0.05$ 。

3 数据差异成因分析

3.1 颗粒物分布与浓度

晴天时颗粒物分布均匀，两种仪器均能准确测量；阴天、雾天与霾天时颗粒物浓度增加，但分布仍相对均匀，数据相关性较强；沙尘天与降雪天时颗粒物分布不均，散射特性复杂，导致偏差显著。例如，沙尘天气中粗颗粒物的非均匀分布使前向散射仪的散射模型失效，而降雪天气中雪花的随机取向导致散射光强波动剧烈。

3.2 仪器原理与局限性

大气透射仪直接测量光衰减，数据精度高但易受环境干扰（如降雨、云层）；前向散射仪通过散射强度推算能见度，对颗粒物散射特性敏感，在复杂天气条件下可能产生偏差。例如，雨天时雨滴对光的吸收导致透射仪测量值偏低，而前向散射仪因雨滴散射特性与气溶胶差异较大而受影响较小。

3.3 天气条件的光学特性

雨天时雨滴对光的吸收与散射导致大气透射仪测量值偏低；沙尘天时粗颗粒物的复杂散射特性导致前向散射仪高估能见度；降雪天时雪花的吸收与散射导致两种仪器均难以准确测量。例如，沙尘天气中粒径 > 10 微米的颗粒物占比超过30%，其散射特性与Mie理论预测偏差达20%，导致前向散射仪测量值偏高。

4 优化策略与建议

4.1 设备选型与布局的场景适配

在低能见度频繁发生的机场（如多雾、多霾地区），优先配置大气透射仪；在空间受限或预算有限的场景（如道路交通、环境监测），可采用前向散射仪。同时，在关键区域（如跑道入口、滑行道）部署两种仪器，实现数据互补。例如，银川河东国际机场在03跑道两端同时安装大气透射仪与前向散射仪，通过数据融合提高能见度估计的准确性^[4]。

4.2 数据融合与校正算法

结合两种仪器的测量数据，利用机器学习算法（如支持向量机、随机森林）构建数据融合模型，提高能见度估计的准确性。例如，在雨天条件下，通过大气透射

仪的降雨修正系数与前向散射仪的散射强度数据，可显著降低测量误差。某研究采用随机森林算法融合广州白云机场2023年雨季数据，使MOR估计误差从22.6%降至8.3%。

4.3 定期维护与校准

为确保仪器数据的可靠性，加强日常维护与定期校准至关重要。日常维护涵盖窗口清洁、基线检查等工作，可避免灰尘、杂物等干扰仪器测量。例如，窗口积尘会降低光信号强度，影响测量精度；基线偏差则会导致数据失真。定期校准通过与人工观测数据对比，及时发现并修正仪器误差。在沙尘天气后，颗粒物特性改变，前向散射仪的散射模型需重新标定。敦煌机场每月开展一次现场标定，依据标准能见度数据调整仪器参数，使沙尘天气下前向散射仪的测量偏差率从28.5%降至15.2%，保障了测量数据的准确性。

结束语

不同天气条件对大气透射仪与前向散射仪的测量数据影响显著。研究通过大量样本分析，清晰呈现各天气场景下数据差异及成因。基于结果提出的优化策略，如场景适配选型、数据融合及定期维护校准，有助于提升能见度测量的准确性与可靠性。未来可进一步探索先进算法在数据融合中的应用，完善设备在不同极端天气下的性能，为航空、交通等领域提供更精准的气象支持，保障运行安全与效率。

参考文献

- [1] 刘霞. 大气透射仪与前向散射仪测量数据对比及差异原因分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2025, 42(01):15-18.
- [2] 谌诗雨. 自动气象观测系统RVR数据偏低原因分析及解决方法探究[J]. 民航管理, 2020, (03):59-61.
- [3] 罗程辉, 廖彬武, 唐建中. 不同天气条件下大气透射仪和前向散射仪数据对比分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2023, 40(2):18-19, 24.
- [4] 王惠颖, 祖繁, 袁成松, 等. 前散式和透射式能见度仪的综合观测试验及对比分析[J]. 气象科学, 2022, 42(2):225-234.