

中国科学技术大学

博士学位论文



能见度仪测试评价关键技术研究

作者姓名： 台宏达

学科专业： 地球物理学

导师姓名： 孙东松 教授

完成时间： 二〇二〇年六月

University of Science and Technology of China
A dissertation for doctor's degree



Key Technology Research on Test and Evaluation of Visibility Meters

Author: Hongda Tai

Speciality: Geophysics

Supervisors: Prof. Dongsong Sun

Finished time: June 2020

中国科学技术大学学位论文原创性声明

本人声明所呈交的学位论文,是本人在导师指导下进行研究工作所取得的成果。除已特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含任何他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中作了明确的说明。

作者签名: 谷宏达

签字日期: 2020.6.24

中国科学技术大学学位论文授权使用声明

作为申请学位的条件之一,学位论文著作权拥有者授权中国科学技术大学拥有学位论文的部分使用权,即:学校有权按有关规定向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅和借阅,可以将学位论文编入《中国学位论文全文数据库》等有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。本人提交的电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。

保密的学位论文在解密后也遵守此规定。

☒公开 ☐保密(____年)

作者签名: 谷宏达

导师签名: 马东松

签字日期: 2020.6.24

签字日期: 2020.6.28

摘 要

地面气象观测具有“代表性、准确性和比较性”等基本原则性要求。对能见度仪进行测试，就是要评价能见度仪的测量结果是否具有“代表性、准确性和比较性”。当前，由于不同类型能见度仪的采样空间、测量原理和测量结果存在差异，不同类型能见度仪测量结果的“代表性、准确性和比较性”难以评价。

为了测试能见度仪的测量结果，评价能见度仪的测量结果是否具有“代表性、准确性和比较性”，本文首先对比分析了两种使用最为广泛的能见度仪——大气透射仪和前向散射仪的测量特点，研究了地处我国西北地区的榆林机场在扬沙、浮尘和霾天气以及雾、雨雾和雪雾天气下，大气透射仪和前向散射仪对气象光学视程的测量结果，重点评价不同测量原理能见度仪在不同天气条件下测量结果的比较性；本文利用在机场地面较小范围内装有多套能见度仪的布局特点，重点研究了我国南北方不同地区包括海拉尔机场、大连机场、天津机场、成都机场和重庆机场共 5 个机场连续 100 天，每天两个时次的能见度仪测量结果，并使用中值法、图形比例法和均值法对多套能见度仪的测量结果进行处理，将其与机场日常天气报告中的能见度值进行比较，评价能见度仪的测量结果的代表性。

测量准确性是气象仪器测量结果评价的关键问题。通过分析当前研究进展可知，能见度仪测量准确性评价的关键问题是确立能见度的测量参考基准值。因此，本文基于大气透射仪的测量原理，研究使用多点移动式测量方法，测量并计算了大气透过率、消光系数和气象光学视程；研究并量化计算了多点移动式测量方法测量大气透过率和气象光学视程的误差，分析比较了多点移动式测量方法与大气透射式测量方法的测量误差差异。研究结果表明，在硬件条件相同的前提下，与传统大气透射式测量方法相比，使用多点移动式测量方法测量气象光学视程的相对误差明显较小。本文同时使用激光器、斩波器、导轨等部件实现了高精度多点移动式测量系统。

为了缩短能见度仪的测试评价时间，本文建立了大气环境模拟舱，使用包括雾化气溶胶发生器、黑碳气溶胶发生器等多种气溶胶发生装置，在大气环境模拟舱内生成低能见度环境。在大气模拟舱模拟低能见度环境的过程中，舱内环境的均匀性始终是难于解决的问题，本文使用计算流体力学模拟方法和基于消光系数水平分布的实验法两种方法评价舱内环境的均匀性，特别是舱内消光系数的水平分布均匀性。其中，使用计算流体力学模拟法得到了大气模拟舱内的流场和浓度场相对均匀的空间区域坐标；使用基于消光系数水平分布的实验方法得到了舱内纵向水平位置处的消光系数的分布及其测量结果的稳定度。

本文最后在大气模拟舱内生成了低能见度环境，并进行了能见度仪的对比测试。首先记录了一次大气模拟舱内能见度变化过程中，气象光学视程和温度、相对湿度的变化情况；使用气溶胶粒径谱仪记录并分析了模拟舱内不同能见度下，不同粒径的粒子浓度；在对模拟舱内的环境分析完成的基础上，本文使用所设计的多点移动式测量系统，在模拟舱内多点测量了大气透过率，并使用多点移动式测量方法和大气透射式测量方法同时处理了所测量的大气透过率并计算得到了消光系数和气象光学视程；本文对两种方法所测的气象光学视程数据进行了对比分析，并使用多点移动式测量系统与 Skopograph II 型大气透射仪的测量结果进行对比分析。实验结果表明，多点移动式测量方法及系统较好的减小了测量的系统误差，测量结果波动性较小，能够更好的反映大气模拟舱内的能见度变化情况。

关键词：能见度仪 大气透过率 消光系数 气象光学视程 测试评价

ABSTRACT

Ground meteorological observations need to meet three basic requirements, which are “representative, accuracy and comparable”. The purpose of testing the visibility meter is to evaluate whether the measurement results of the visibility meters satisfy these requirements. This evaluation is challenging in most cases due to the differences of visibility meters in sample space, measurement principles and results.

To test the measurement results of visibility meters and to evaluate whether the measurement results are “representative, accuracy and comparable”, this paper first provides a comparative analysis of transmissometers and forward-scatter visibility meters in terms of the measurement characteristics. Then, the meteorological optical range (MOR) of transmissometers and forward-scatter visibility meters located in Yulin Airport is examined to explore the “comparable” feature of different visibility meters under different weathers, such as sand, floating dust, haze weather, as well as fog, mist and snow fog. The measurements of visibility meters, which are located in Hainan, Dalian, Tianjin, Chengdu and Chongqing airports, are recorded two times a day for consecutive 100 days. In addition, the mid-value method, the graphic scale method and the mean method are adopted to process the measurements of multiple sets of visibility meters. The visibility values reported in METAR are compared with the measurements to assess the “representative” feature of visibility meters.

Accuracy is key to the evaluation of meteorological instrument measurements. Through the review of existing literature in this field, the reference value of the visibility measurement is considered a critical factor. Based on the measurement principle of transmissometers, this paper puts forward a Multi-point Visibility Measurement (MVM) method to calculate atmospheric transmittance, extinction coefficient and MOR. The error of atmospheric transmittance and MOR measured by the MVM method is also researched and quantified, followed by the comparison between the proposed method and the traditional transmissometer method. The research results show that under the same hardware conditions, the MVM method has a significantly smaller relative error of measurements than the traditional transmissometer method. At the end of this part, the high-precision multi-point mobile measurement system is realized by the applications of laser, chopper, guide rail and other components.

To shorten the time used to evaluate visibility meters, this paper builds an

atmospheric environment simulation chamber (AESC), which is equipped with a variety of aerosol-generating devices including atomized aerosol generators and black carbon aerosol generators to create a low-visibility environment. The uniformity of the AESC is a common issue. This paper combines the computational fluid dynamics (CFD) simulation method with the experimental method based on the horizontal distribution of the extinction coefficient to evaluate the uniformity of AESC, especially the horizontal distribution of the extinction coefficient in the AESC. The coordinates of the spatial region where the flow field and concentration field in the chamber are relatively uniform are obtained by CFD results. The distribution of the extinction coefficient at the longitudinal horizontal position in the chamber, as well as the stability of the measurement results, is obtained by the experimental method.

At the end of the paper, a low-visibility environment is created in the AESC, and comparisons of visibility meters are performed. Firstly, the changes in MOR, temperature and relative humidity during the experiment in AESC are recorded. An optical particle counter (OPC) is used to record and analyze the concentration of particles with different sizes under varying levels of visibility in the AESC. Based on the environmental analysis of the AESC, the MVM method and transmissometer method are used respectively to process the atmospheric transmittance and calculate the extinction coefficient and MOR. Afterward, the measurements of MVMS and Skopograph II are compared. It is found that the measurements of the MVM method and MVMS have fewer systematic errors and less fluctuation, proving their better ability to reflect the change of visibility in the AESC.

Key Words: visibility meters; atmospheric transmittance; extinction coefficient; MOR; test evaluation

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 能见度及其观测	1
1.1.1 能见度的定义与分类.....	1
1.1.2 观测方式及其特点.....	1
1.2 能见度仪测试评价的意义	8
1.2.1 研究必要性及实际意义.....	9
1.2.2 能见度在民航运行中的应用范围	10
1.3 能见度仪测试评价的研究进展	11
1.3.1 外场对比观测进展.....	11
1.3.2 模拟环境下对比测试研究进展.....	14
1.3.3 参考基准值与评价方法研究进展.....	15
1.4 论文研究内容	19
第 2 章 能见度仪外场对比观测与多能见度仪组合观测	21
2.1 能见度仪的外场对比观测	21
2.1.1 扬沙、浮尘与霾天气下的对比观测.....	22
2.1.2 雾、雨雾、雪雾天气下的对比观测.....	24
2.1.3 外场对比观测的讨论与结论.....	27
2.2 主导能见度的多能见度仪组合观测	28
2.2.1 主导能见度的自动观测方法.....	29
2.2.2 数据整体概况与分析处理.....	32
2.2.3 讨论与结论.....	38
第 3 章 高精度大气透过率和消光系数测量方法与系统实现	41
3.1 多点移动测量方法	42
3.1.1 大气透过率的多点移动测量方法.....	42
3.1.2 基于多点移动测量的消光系数计算方法.....	44
3.1.3 基于多点移动测量的 MOR 计算方法	45
3.2 测量误差分析与比较	45
3.2.1 大气透射仪的测量误差分析.....	45
3.2.2 MVM 方法测量大气透过率的相对误差分析与量化.....	48
3.2.3 MVM 方法测量 MOR 的误差分析	54

3.3 高精度多点移动式测量系统实现	56
第 4 章 能见度仪测试模拟环境及其均匀性	61
4.1 能见度仪测试模拟环境系统构成	61
4.1.1 整体结构.....	61
4.1.2 气溶胶发生与供气循环子系统.....	63
4.1.3 其他辅助子系统.....	66
4.2 能见度仪测试模拟环境均匀性分析	67
4.2.1 基于流体力学模拟的均匀性分析.....	68
4.2.2 基于消光系数水平分布的均匀性分析.....	71
第 5 章 模拟环境下的能见度仪对比实验	75
5.1 大气模拟舱环境	75
5.1.1 实验环境条件.....	75
5.1.2 气溶胶粒子浓度及分布.....	75
5.2 舱内能见度的多点移动测量与计算	77
5.3 舱内能见度的测量对比分析	80
5.3.1 多点移动式与大气透射式测量方法对比.....	80
5.3.2 多点移动测量系统与大气透射仪测量对比.....	82
第 6 章 总结与展望	85
致谢.....	95
在读期间发表的学术论文与取得的其他研究成果.....	97

第 1 章 绪论

1.1 能见度及其观测

1.1.1 能见度的定义与分类

由于术语、定义的不同，常用的能见度包括气象能见度、有效气象能见度、主导能见度、气象光学视程（Meteorology Optical Range, MOR）、机场跑道视程（Runway Visual Range, RVR）等¹。

气象能见度是指视力正常（对比阈值 0.05）的人，在当时的天气条件下，能够从天空背景中看到和辨认的目标物（黑色、大小适度）的最大水平距离¹。

有效气象能见度是指人工观测时，气象能见度在四周二分之一以上的方位内都能达到的最大距离¹。

主导能见度是指观测到的至少在四周一半或机场地面一半的范围内所能达到的最大能见度值。这些区域可由连续的或不连续的扇区组成²。

机场跑道视程（以下简称“跑道视程”）是指在机场跑道中心线上，航空器上的驾驶员能看到跑道面上的标志或者跑道边灯或中线灯的距离²。

气象光学视程是指色温为 2700K 的平行光束的光通量在大气中削弱至初始值的 5%所通过的路径长度¹。

斜程能见度是指沿着一条明显地不是水平的视线能看清合乎规定的目标物或灯光的最大距离。

由上述能见度的定义可知，能见度特别是气象能见度、有效气象能见度、主导能见度、机场跑道视程、斜程能见度均是从人（包括气象观测员或者航空器驾驶员）的角度出发，使用人工观测方法观测得到的物理量；仅气象光学视程是从仪器的角度出发，使用仪器观测方法测量得到的物理量。

1.1.2 观测方式及其特点

大气能见度的获取通常采用人工观测和仪器探测两种方式。

在气象日常业务运行中，有效气象能见度通常使用人工观测获得，也会使用仪器测量的气象光学视程表示气象能见度。

在民航气象观测中，包括民用航空气象地面观测的日常观测、特殊观测和事故观测项目也均使用人工观测确定主导能见度。主导能见度通常由观测员在观测平台或观测场，使用能见度观测方法，以能见度目标物目标灯为主要参考，由人工观测完成。

根据国际民航组织（International Civil Aviation Organization, ICAO）及中

国民航局的约定^{2,3}，跑道视程只能使用仪器探测的方法确定。跑道视程可使用人工观测和仪器探测。由于准确性、实时性较差，同时为了满足机场跑道多点监测的需要，ICAO 和世界各国要求大型运输机场的精密进近跑道只能使用仪器探测跑道视程，不能使用人工观测。

不同种类的大气能见度及其观测方式见表 1.1。

表 1.1 大气能见度及其常用观测方式

人工观测	仪器观测
有效气象能见度、主导能见度、斜程能见度	气象光学视程、机场跑道视程

1、能见度的观测及其特点

能见度人工观测法实施于观测平台或观测场，由观测员从大气背景中分辨目标物或目标灯的最远距离。在人工观测活动开始前，气象部门一般会首先依据规范要求，选取好目标物或目标灯，绘制目标物（灯）示意图。观测员按照符合规范要求的观测程序，确定各观测方向上不同距离的目标物（灯）是否符合“刚好能见”、“轮廓清晰”等规范要求，观测和报告能见度。以人工观测方法进行的能见度目视观测当前在各地气象部门、机场气象台站等广泛地采用。

在机场进行民用航空气象地面观测和报告工作中，夜间云、能见度、天气现象的观测一直都是观测员必须面临的难题。人工目测能见度具有观测方便，观测初始成本较低等优点，但在实际观测中存在如下问题：

（1）观测目标灯和目标物选取困难。为反映目标物与背景的亮度差异，可用目标物在背景中的光亮度对比 C 表示：

$$C = \left| \frac{L_0 - L_b}{L_b} \right| \quad (1.1)$$

上式中， L_0 表示目标物的亮度， L_b 表示背景亮度， C 表示目标物与背景亮度差异的对比值。当目标物是绝对黑体且有鲜明的景象时， $C=1$ ；当目标物与背景亮度相同，目标物目测不被觉察时， $C=0$ 。

而在实际观测过程中，对于观测员来说，其所看到的应当是目标物的视亮度 L_0^* 和背景的视亮度 L_b^* ，而非目标物的本身的固有亮度 L_0 和背景固有亮度 L_b 。因此，对于观测者而言，目标物的视亮度对比应当为：

$$Y = \left| \frac{L_0^* - L_b^*}{L_b^*} \right| \quad (1.2)$$

上式中， Y 为视亮度对比传输系数，它反映了目标物与背景的固有视亮度对比在大气中传输时的变化⁴。

由于人眼有一定的盲区，当 Y 逐渐减小到不能从背景中分辨目标物时，此

时的 Y 称之为入眼对比感阈，用 ε 表示。 $Y = \varepsilon$ 是目标物由能见转为不能见的临界值；当 $Y > \varepsilon$ 时，目标物可辨；当 $Y < \varepsilon$ 时，目标物不可辨。

在民航气象规范中已对目标物、目标灯的选择和设置有较为详细的要求⁵，但符合规范颜色、光强、距离、大小和方位要求的目标物和目标灯在实际工作中难于寻找或设置，容易使得观测员对目标物和目标灯的选择特征的理解不够清晰，已选取的目标灯光强难于达到要求，从而导致能见度观测特别是夜间观测难于实现等问题。

(2) 部分机场气象部门观测平台或观测室建设难于符合要求。机场能见度特别是主导能见度的人工观测结果用于为航空业务运行人员特别是飞行人员服务，但出于飞行安全及场地限制，观测点设置不可能与飞行人员相一致。民航气象规范中要求观测平台应当紧邻值班观测室设立⁵，除因特殊情况外，观测平台与机场标高的高度差应小于20米，在平台上观测员能够目视以下范围：(一)至少一条跑道及其航空器最后进近区域；(二)以观测平台为圆心，四周每个象限的至少一半的自然地平线。部分机场气象台的观测室及观测平台四周受制于客观条件，障碍物遮蔽严重，目视范围受限，难于达到上述要求。

(3) 能见度的人工观测过程的主观性较强，观测结果难以进行质量控制。民航气象规范性文件中对目标灯和目标物的观测方式、方法进行了详细描述⁶，但能见度的人工观测结果与每个观测员在不同地点、不同时间、不同季节、不同天气条件下对能见度变化规律的认识有关。何谓“刚好能见”，何谓“轮廓清晰”，不同观测员有不同理解。不同观测员即使在相同的时间段、相同的时间点观测，观测结果仍有差别。规范中提及可以参考跑道灯光的可见距离，可以参考能见度测量设备的能见度值进行观测和报告，但对如何参考跑道灯光，参考测量设备的哪一测量值进行主导能见度的观测和报告并未进行详细描述。

(4) 影响能见度人工观测结果的因素众多。能见度的人工观测主要与人眼的对比敏感度、大气消光特性以及目标物的固有亮度对比三个要素有关，而影响到上述三个要素的相关因素又包括目标光学特征、目标背景特征、目标观测角度等，也受到个人视觉、心理素质、工作责任心、观测经验和对可见目标的理解水平所影响。另外，大气的均匀程度如一些小范围的天气过程可能会限制目标灯目标物的观测，导致主导能见度无法代表四周一半以上的能见度情况，如在图1.1中，能见度300m的雾恰好在观测平台的周围，观测平台上主导能见度的人工观测结果无法客观反映机场主导能见度的真实情况。

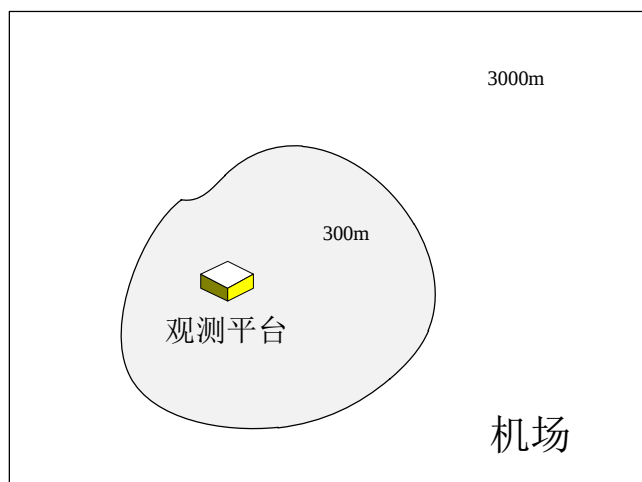


图 1.1 一种影响机场主导能见度观测的特殊情况

正是由于上述诸多影响因素的存在，致使大气的能见度人工目视观测结果并不是一个非常客观的物理量。观测员的观测不仅需要大量参考观测经验，当难于实现客观观测工作的时候，观测结果甚至还需要参考预报结论，观测结果难以客观反映大气状态的本质。

2、能见度的仪器探测及其特点

能见度测量仪器的工作原理，几乎全都建立在大气透过率或大气消光系数测量的基础上，通过测量大气透过率或大气消光系数，按照能见度计算公式转换出能见度值。根据测量方式的不同，能见度测量仪器可以分为透射式能见度仪和散射式能见度仪两大类。另外，还有通过摄像机拍摄设置标记，通过图像分析进行能见度观测的仪器，摄像机拍摄固定标志的能见度观测方法与人工观测类似，可以覆盖较大的观测范围。但该种观测方式在观测标记的设置、全方位观测时的眩光处理以及夜间观测是同样存在着一些问题。目前该类系统尚处于试验阶段。

在机场气象地面观测中，大气透射仪、前向散射仪是当前最为常见的能见度仪器观测使用设备，二者也是世界气象组织和国际民航组织主要推荐的能见度探测仪器⁷⁻⁹。

在大气能见度的分类及相关定义中，气象光学视程具有明确的仪器设备观测方法定义，且具有计算方法简便，计算过程与人工观测过程相类似等优点，因此，气象光学视程常作为能见度仪的主要输出结果，而能见度仪输出的 MOR 也常作为气象观测人员进行人工观测的仪器参考值。

跑道视程是经大气透射仪测量大气透过率，或由前向散射仪测量大气消光系数后，使用大气透过率（或消光系数）、跑道灯光强度和大气背景光亮度等计算得到的物理量。在民用航空运行中，机场跑道视程为飞机起飞、降落的关键参考物理量，因此在机场能见度仪的使用中，机场气象及运行人员主要参考机

场跑道视程。跑道视程可使用人工观测和仪器探测，但由于准确性、实时性较差，同时为了满足机场跑道多点监测的需要，ICAO 和世界各国要求大型运输机场的精密进近跑道只能使用仪器探测跑道视程，不能使用人工观测。

近年来随着新技术的发展，后向散射能见度仪、图像能见度仪等各类新型大气能见度测量方法和系统也在迅速发展¹⁰⁻¹⁴，但除大气透射仪和前向散射仪之外，国际民航组织（International Civil Aviation Organization, ICAO）及中国民航当前不推荐使用其他仪器探测并计算跑道视程^{3,6,9}。

（1）测量算法

光在大气的传输过程中，其衰减即大气消光是大气吸收和大气散射联合作用的结果。大气的消光作用包括大气中的分子散射、分子吸收、气溶胶散射、气溶胶吸收，消光作用的大小通常使用大气消光系数进行表示，如式(1.3)所示。

$$\delta = \alpha_a + \beta_a + \alpha_m + \beta_m \quad (1.3)$$

式(1.3)中， α_a 为气溶胶散射系数， β_a 为气溶胶吸收系数， α_m 为分子散射系数， β_m 为分子吸收系数。大气能见度越大，消光系数 δ 越小；大气能见度越小，消光系数 δ 越大。

依据消光系数和光在大气中的传输距离，使用比尔郎伯定律就可以计算出光在大气中传输时的衰减情况，如式(1.4)所示。

$$\frac{I}{I_0} = \tau = e^{-\int_0^l \delta(r) dr} \quad (1.4)$$

式(1.4)中， I_0 为光在大气传输时发射端的光强， I 为光传输接收端的光强， τ 为大气透射率， l 为光在大气中的传输距离， $\delta(r)$ 即为消光系数。

若在这段光的传输距离中大气是水平均匀的，则有：

$$\frac{I}{I_0} = \tau = e^{-\delta \cdot l} \quad (1.5)$$

$$\delta = \frac{-\ln \tau}{l} \quad (1.6)$$

大气透过率与消光系数是使用能见度仪进行气象光学视程、机场跑道视程仪器探测的关键中间量。其中，大气透射仪直接测量得到大气透射率，并进而根据式(1.6)计算得到消光系数；前向散射仪则忽略了大气的吸收作用，主要通过测量大气中的散射系数并使之近似于消光系数，如式(1.7)。

$$\delta \approx \alpha_a + \alpha_m \quad (1.7)$$

式(1.7)中， α_a 为气溶胶散射系数， α_m 为分子散射系数。

大气透射仪或前向散射仪测量并计算得到消光系数后，一般使用

Koschmieder 定律¹⁵ 计算气象光学视程，当人眼对比视觉阈值取为航空中常用的 0.05 时，气象光学视程的计算公式为：

$$MOR = \frac{1}{\delta} \ln \frac{1}{0.05} = \frac{-\ln 0.05}{\delta} = \frac{2.996}{\delta} \approx \frac{3}{\delta} \quad (1.8)$$

跑道视程的常用计算方法为：使用 Koschmieder 定律和 Allard 定律¹⁶ 进行分别计算后，取二者的较大计算结果报告跑道视程³。Allard 定律的计算方法为：

$$E = \frac{I \cdot \tau^R}{R^2} = \frac{I \cdot e^{-\delta \cdot R}}{R^2} \quad (1.9)$$

其中， E 为观测者人眼处的亮度值， R 为光源与观测者之间的距离， I 为光源的强度， τ 为大气透过率， δ 为大气消光系数。当 E 取为人眼所能分辨的最小亮度值时（即人眼照度阈值，与大气背景光亮度有关），此时得到的 R 即为人眼观测灯光时所能看到的最远距离。

比较 Koschmieder 定律计算得到的 MOR 与 Allard 定律计算得到的 E ，取二者较大值报告跑道视程，如式(1.10)所示：

$$RVR = \max(MOR, E) \quad (1.10)$$

(2) 大气透射仪结构特点及其测量特性

透射式测量能见度的仪器即为大气透射仪，由发射器和接收器组成，其常见结构如图 1.2 所示。其中，发射器主要提供经过调制的定常平均功率的光通量源，常使用的光源是卤灯或氙气脉冲放电管，对光源进行调制主要用于减少来自太阳光的干扰；接收器主要由光检测器组成（例如在一个抛物面镜或透镜的焦点上放置一个光电二极管）；测量原理为发射端的光发射器照射被探测样本，光接收器测量被样本衰减后剩余的光辐射，根据光检测器的输出测量并计算发射器与接收器之间的大气透过率，并结合发射器和接收器之间的距离，使用式(1.6)计算发射器与接收器之间的平均消光系数，使用式(1.8)计算发射器与接收器之间的平均 MOR 值。

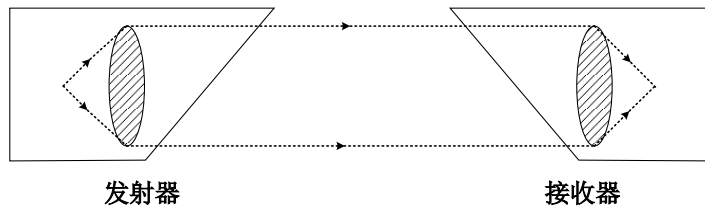


图 1.2 大气透射仪常见结构

由于大气透射仪的发射器和接收器分置探测样本两端，直接测量光辐射在样本大气中的透过率，进而换算出大气消光系数，反演得出大气能见度，测量过程没有对大气作均匀假设，同时考虑了采用空间内大气的散射作用和吸收作

用, 依据准直光束的损失测量能见度, 测量过程与气象光学视程的定义紧密相关, 且与其他类型能见度仪相比, 因此其测量精度较高, 具有信噪比高、采样空间大等优点, 但其探测精度依赖于基线长度, 安装对准要求严格, 更适合低能见度条件下使用。一个优良且良好维护的大气透射仪在其最高准确度范围内工作时, 能够对 MOR 量值能给出非常好的近似, 广泛应用于民用航空领域¹⁴。然而当能见度较高时, 大气透射仪的测量精度受透过率测量误差的限制而增大, 且其在测量精度和稳定性、光学污染防治和对准及地基安装等方面的较高技术要求, 国内至今尚无批量生产¹⁷⁻¹⁹。

与前向散射仪相比, 大气透射仪的主要优点在于²⁰:

- 1) 消光系数直接由公式(1.4)所决定, 测量和计算过程没有任何假设;
- 2) 大气透射仪可以在好天气下, 不借助于外部参考设备或仪器, 自己进行校准。

由于上述原理及优点的存在, 一般认为经过校准和良好维护的大气透射仪, 其测量结果的准确性是要高于前向散射仪的。与前向散射仪相比, 大气透射仪的缺点主要在于安装和维护方面, 主要表现在²⁰:

- 1) 地基的不稳定、土壤的冻胀有可能会使大气透射仪发射端和接收端的对齐出现问题;
- 2) 大气透射仪的测量结果对窗口污染非常敏感, 需要经常对大气透射仪的窗口进行清洁;
- 3) 为了保证机场内航空器的安全, 行业对于安装于其中的仪器、设备的支撑杆具有易折易碎特性的要求, 然而大气透射仪为了保证发射端和接收端的对齐, 对其支撑杆的硬度又有一定的要求, 因此, 大气透射仪有可能会对航空器造成潜在的危害;
- 4) 单基线长度的大气透射仪难以覆盖完整的 RVR 测量范围;
- 5) 大气透射仪在进行维护后, 需要在高能见度条件下进行重新校准。

(3) 前向散射仪结构特点及其测量特性

散射式能见度仪又可分为前向散射能见度仪和后向散射能见度仪, 其测量原理为: 考虑大气对光辐射的角度散射系数与总消光系数所具有的确定的比例关系, 利用在某一特定角度所测量得到的光散射量, 近似线性计算出采样空间内的消光系数并进而得到大气能见度。前向散射仪由于其安装和使用较为方便, 广泛应用于高速公路和气象部门。目前我国民用航空机场安装的自动观测系统中适用的散射式能见度仪主要为前向散射仪。

与大气透射仪直接测量光的衰减并计算消光系数有所不同, 前向散射仪通过测量光束夹角为 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 的发射器和接收器所构成的采样空间内, 气溶胶

粒子的前向散射系数，使其作为大气消光系数进而估测得到 MOR。前向散射仪的光发射、接收装置相对固定，不需要频繁标定，其常见结构图如图 1.3 所示。

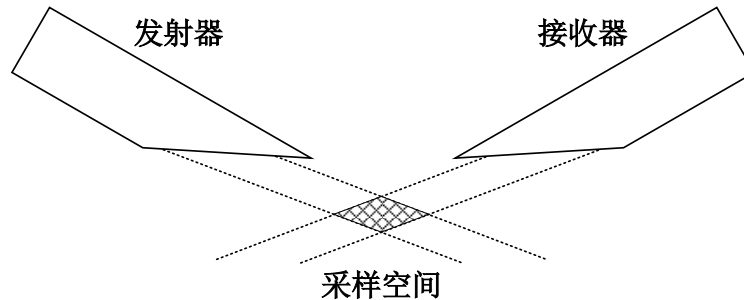


图 1.3 前向散射仪常见结构

由图 1.3 可以看到，前向散射仪的探测样本采样体积非常小，而且由于气溶胶粒子的散射相函数不仅与粒子大小有关，也与粒子的化学组成、粒子核类型等因素有关，大气中光辐射的角度散射系数与总消光系数的比例系数假设会带来一定误差，因此，前向散射仪的发射器和接收器测量光束所构成的采样空间应该选取到气溶胶粒子散射相函数与粒子大小、粒子化学组成、粒子核类型等因素相关性最小的角度范围内，以使得前向散射仪在各种不同天气条件和不同气溶胶粒子类型环境下都均有较好的测量准确度。同时，由于前向散射仪忽略了气溶胶粒子的吸收作用，其在低能见度环境特别是强吸收气溶胶粒子（如黑碳气溶胶）环境下的测量结果有很大偏差²¹。

与大气透射仪相比，前向散射仪的主要优点在于²⁰：

- 1) 前向散射仪对窗口污染的敏感性比大气透射仪要小的多；
- 2) 由于前向散射仪的发射器和接收器可以安装与一根支撑杆上，因此前向散射仪的支撑杆可以满足机场设备易折易碎的要求；
- 3) 前向散射仪可以覆盖完整的 RVR 测量范围；
- 4) 前向散射仪在低能见度下也可以进行校准。

相比大气透射仪，前向散射仪的缺点主要表现在：

- 1) 采样空间较小，测量结果的代表性不如大气透射仪；
- 2) 测量结果的准确性与天气现象的类型有关。

1.2 能见度仪测试评价的意义

能见度探测在交通运输领域如机场和高速公路开放关闭、车辆限行限速、飞机起飞着陆，在环保领域如空气质量监控，在军方活动等方面承担着重要的地位和作用。例如，能见度的高低是民用航空活动是否能够正常运行，飞机能否正常起飞和着陆的关键指标。

本部分研究内容主要围绕能见度在民航运行中的应用范围，以及能见度的

准确探测在民用航空运行中的意义两方面展开论述，以交通运输领域中的民用航空活动为例说明能见度仪测试校准的意义。

1.2.1 研究必要性及实际意义

地面观测工作是气象预报工作的基础，长期、稳定的地面气象观测资料对于气候统计、防灾减灾、公共服务和科学研究等可以提供重要的数据支撑，因此，地面气象观测具有三性的原则性要求，即“代表性、准确性和比较性”。能见度作为地面气象观测的基本气象要素之一，其观测过程和观测结果同样需要遵循三性原则。

能见度仪器测量的误差来源包括能见度计算的算法误差和仪器的测量误差两部分。由于常用的大气透射仪和前向散射仪均为自动观测，其测量和计算过程不受观测员的主观干预影响，因此能见度仪的算法误差表现为系统特性误差。造成能见度测量误差的因素按照信号的产生、转换、处理、传输和显示等途径主要有：光辐射稳定性误差、光学系统参数和调整误差、光电器件噪声误差、电路放大处理误差、信号传输显示误差等。

在《民用航空自动气象观测系统技术规范》（AP-117-TM-2012-03）中要求 MOR 最大允许误差为：50 米（MOR 小于等于 600 米时），或 MOR 的 10%（MOR 大于 600 米且小于等于 1500 米时），或 MOR 的 20%（MOR 大于 1500 米时）。RVR 最大允许误差为：10 米（RVR 小于等于 400 米时），或 25 米（RVR 大于 400 米且小于等于 800 米时），或 RVR 的 10%（RVR 大于 800 米时）。由于前述能见度观测方法的限制及技术问题的存在，观测误差大小是否满足技术规范无法衡量，主导能见度的观测结果准确性的无法确定；观测原理的不同导致不同观测方式的观测结果之间不具有比较性；不能保证客观反映及代表当时大范围大气的真实状况。

另一方面，在民用航空业务运行中，能见度主要用于机场运行最低标准、飞行计划最低标准、精密进近着陆的运行分类标准以及航空公司的各类运行条件中。能见度观测的准确性直接影响机场能否正常开放、航班能否正常起飞和着陆、航班备降场的选择以及精密进近方式的确定等。

近年来，我国民用航空业特别是通用航空的飞速发展，通用航空机场对能见度仪的需求愈发旺盛；与此同时，仪表着陆系统、卫星导航技术、平视显示技术等新技术的应用逐步提升了航班的全天候正常运行能力，行业也对低能见度下的航班正常运行提出了越来越高的期望和要求。2018 年 12 月 4 日晚，中国民航在北京首都国际机场首次完成了基于平视显示技术的跑道视程 90 米低能见度验证试飞。2019 年 1 月 7 日，全国民航工作会议提出，要在大型机场继续推进低能见度起飞，全面提升机场低能见度运行保障水平。2019 年 2 月 21

日，民航局召开北京大兴国际机场 IIIB 型精密进近仪表着陆系统建设推进会，北京大兴国际机场将在国内率先实现跑道视程小于 175 米但不小于 50 米的运行，有效提升机场的低能见度运行能力。

因此，准确探测能见度对于保证基础气象观测资料的准确性，保障民用航空运行安全具有重要意义。

1.2.2 能见度在民航运行中的应用范围

在多个定义的能见度相关物理量中，与民用航空正常运行直接相关的两个物理量为主导能见度和跑道视程。主导能见度和跑道视程是航空活动能否正常进行的重要标准之一。机场气象台在机场例行天气报告（METAR 电报）和机场特殊天气报告（SPECI 电报）中所报告的即为主导能见度和跑道视程⁶。

随着我国民用航空业的快速发展，各种类型的民航机场大量建设完成，这其中包括了大量的甚至是无人值守的通用航空机场。各类机场均广泛使用自动气象站完成机场地面气象观测。而作为民用航空运行的关键气象指标，如何使用能见度传感器及其测量结果，完成主导能见度、跑道视程的准确自动观测和报告是迫切需要解决的问题。根据中国民用航空局相关规章、规范性文件^{22,23}，主导能见度和跑道视程两种与能见度相关的物理量广泛存在于飞机起飞最低标准、进近最低标准、精密进近着陆运行分类标准、机场运行最低标准、计划最低标准等各类民航运行标准中。机场主导能见度、跑道视程的高低直接决定了该机场能否正常开放、飞机能否在该机场正常起飞着陆、航班备降场选择、飞机精密进近方式的确定等各种民航运行的关键问题，具体包括起飞最低标准、进近最低标准、计划最低标准等。

1. 起飞最低标准

起飞最低标准是指飞机能够在某机场起飞的限制条件。该标准中所包含的气象要素仅能见度这一项，只有在起飞过程中必须看清和避开障碍物时才包含能见度和云底高两种气象要素。

2. 进近最低标准

进近是指飞机在着陆之前的下降过程中对正跑道的过程。飞机能否在某机场进近的限制条件即为进近最低标准。进近最低标准包括非精密直线进近最低标准、目视盘旋进近最低标准以及各类精密进近的分类标准，各标准中一般包含最低下降高度和能见度两个要素，且能见度使用跑道视程或主导能见度进行表示。同时，主导能见度或跑道视程的高低决定了精密进近着陆的运行分类标准（如 I 类运行、II 类运行或 III 类运行等）。

除上述标准之外，计划最低标准、着陆最低标准，以及航空公司遵照规定的相关准则，结合其运行条件（包括机型、机载设备、机组技术水平和飞行经

验等)制定的各类公司标准(如对驾驶员的使用限制和搭配的要求、对机长的特殊区域、航路和机场合格要求等),主导能见度均作为重要的衡量参考指标。

1.3 能见度仪测试评价的研究进展

气象仪器的测试包括自然大气条件下进行的动态测试以及恒定气象要素条件下的静态测试。(李伟, 2010)认为在各类气象传感器的检定校准过程中,有必要在实验室模拟气象条件下,产生被测量恒定的气象要素条件,作为校准或检定点,对气象仪器或传感器进行静态测试。

为了能够准确测量得到大气能见度,能见度仪的测试、校准及检定受到越来越多的关注。由于大气能见度受气溶胶粒子质量浓度、化学组分和混合状态、大气相对湿度、光照变化、人为因素等多种影响,研究探测得到大气能见度的高精度参考基准值,在不同类型环境条件下完成能见度仪的测试和校准始终是难于解决的问题。

1.3.1 外场对比观测进展

由于能见度可以进行人工观测和仪器观测,而大气透射仪和前向散射仪为进行能见度观测的常用仪器。因此,为了评价不同观测方式和观测仪器的测量特性,研究人员进行了大量的对比观测。

1、人工观测与仪器探测比较

杨玉霞等²⁴对比了芬兰 Vaisala 公司的 PWD20 能见度仪与目测能见度在不同能见度范围、不同天气现象下的测量差异,研究发现 80.6%的能见度目测值大于仪器自动观测值,人工观测与自动观测能见度的相关系数在轻雾条件下最高,在霾、浮尘、扬沙和烟等视程障碍天气现象下相关系数最低。认为观测原理差异、观测时间差异和采用样本差异是二者产生差异的主要原因。

谭浩波等²⁵对比了广州市能见度网所使用的美国 Belfort 公司的 Model 6000 型前向散射仪与人工观测值的测量结果,研究发现能见度仪器观测与人工观测的变化趋势基本一致,在能见度小于 15km 时,二者的量值比较符合,在能见度大于 15km 时,器测值明显大于人工观测值。

张惠婵等²⁶利用广州机场 2005~2009 年器测能见度和人工观测能见度资料进行对比分析,结果表明当能见度 $<800\text{m}$ 时,器测能见度与人工观测能见度存在较大差异,能见度范围在 5000m~10000m 时,二者最为接近。

吴振强等²⁷对比了美国 Belfort 公司的 Model 6000 型前向散射仪与人工目测距离的差异,研究结果表明,在能见度小于 10km 时,二者的相对偏差较小,大于 10km 时,能见度传感器的测量结果比人工观测的测量结果平均偏少 26.3%。

刘宁微等²⁸以辽宁中部地区沈阳、鞍山、本溪三个城市为研究对象,对比分析了 Vaisala 公司的 FD12 能见度仪与人工定时观测能见度资料的差异和相关性,结果表明,2010 年全年平均器测能见度值大于平均目测能见度值,但目测能见度在一年中的大部分时间大于器测能见度值,所占日数比例达 59.5%。

Kim 等²⁹在韩国首尔气象台西北方向 3km 处对比了基于图像的视程 (Image-based Visual Range, IVR)、人工观测视程 (Human eye-based Visual Range, HVR) 和气象光学视程 MOR,对比结果表明,相比与 MOR,IVR 与 HVR 的相关性更高。当能见度变高时,HVR 会低于 IVR 的测量值,当能见度变差时,MOR 在大部分情况下会高于 IVR。

根据以上研究及其相关结论可以看到,在部分研究中的某个或某几个能见度范围内,能见度的人工观测值与仪器测量值较为符合,但大部分情况下,能见度的人工观测结果与仪器测量结果偏差较大。

虽然能见度的定义是从人的角度出发,以人工观测的方式得到的物理量,但由于在 1.1.2 中所述能见度人工观测的特点,能见度的人工观测的主观性太大,观测结果难以作为能见度仪校准修正的参考基准值。因此,我国地方气象部门近年来逐步推动能见度观测的自动观测(主用“前向散射仪”)取代人工观测进程,如《前向散射能见度仪观测规范(试行)》³⁰中指出:“在进行记录处理与气象报告的编制时,可按照相关业务规定,使用自动观测的能见度值代替人工目测的能见度值”;国际民航组织约定³,能见度的仪器探测结果为能见度的最佳估计值,并约定运输机场的跑道方向能见度即跑道视程的获取只能使用仪器测量得到,不能使用人工观测。

2、能见度仪器探测比较

国内外研究人员普遍采用直接比对的方式研究测试各类能见度仪,评估其准确性、稳定性和一致性。

Griggs 等³¹报告了由 WMO 组织开展的第一次大规模能见度仪对比试验,来自不同厂家的共 14 套不同基线长度的大气透射仪、10 套前向散射仪和 1 套后向散射仪以及人工观测加入到了对比试验中。试验的地点选在距英国唐卡斯特东南方向约 5 英里的驻芬宁利皇家空军基地,主要原因在于该地频繁出现辐射雾和平流雾,同时具有比较大的开放场地,因此可认为在这块场地上雾是相对均匀的。观测时间为 1988 年 10 月 17 日至 1989 年 5 月 11 日,在这段时间内进行了 7×24 小时观测。仪器的大体布置方位为:长基线的大气透射仪放置在仪器中间,前向散射仪放置在东侧,短基线大气透射仪和后向散射仪等能见度仪放置在西侧,各能见度仪分散放置,以避免对相邻仪器有影响。该次对比试验得到了如下主要结论:

(1) 参加对比试验的能见度仪均具有较高的运行可靠性,且能够提供相比于人工观测结果更高重复性的 MOR 测量结果,但没有一个仪器的能够在其整个运行范围内都满足国际民航组织和 WMO 各技术委员会的要求和需要;

(2) 相比于其他类型的能见度仪,大气透射仪在低能见度下表现出较好的同类型仪器的内部一致性,但大气透射仪对于安装的稳定性和准确性要求较高,有时需要频繁擦拭镜头并进行反复校准;各不同长度基线的大气透射仪都在 40m~1000m 的范围内给出了较好的 MOR 估计值,但即使性能表现最好的大气透射仪,其可靠的 MOR 量值最高也在 5km 以下;

(3) 散射仪对镜头的光学污染并不敏感,特别适合于应用到无人观测站点;前向散射仪之间的测量结果一致性表现较差,特别是在低 MOR 环境下更为明显。但有两个型号的前向散射仪测量结果之间具有密切的相关性,且与大气透射仪之间表现出了较好的一致性,由此表明在能见度测量领域,大气透射仪并非不可取代;对比试验提出未来的工作应主要集中于不同的粒子谱分布对散射效应的影响以及对散射仪测量结果的影响等方面。

本次对比试验同样提出了上述结论仅为在本站点做进行的对比试验所表现出来的结果,尚不清楚上述结论是否适合于不同气候条件的其他地区。

濮江平等³²报告了在 1998 年 6 月至 9 月间于北京南苑机场进行的 2 套大气透射仪和 3 套前向散射仪的对比试验。结果表明:

(1) 从总体误差分析,前向散射仪 FD-12P 的表现最好,其次为 PFP-9012 双光路前向散射仪,而 MITRAS 大气透射仪表现较差,特别是在高能见度环境下表现不佳,难以作为参考值之用;

(2) 参加对比测试的所有能见度仪在能见度低于 2000m 时都表现较好,但能见度大于 4000m 时,前向散射仪的测量结果明显偏高,且各能见度仪的测量结果离散性较大,不确定性均较大。

Bloemink 等³³介绍了荷兰皇家气象局组织开展的能见度仪对比试验,其使用大气透射仪、前向散射仪以及中性滤光片、散射盘建立了能见度仪的校准链,报告了从 2005 年 9 月至 2006 年 8 月为期一年的前向散射仪与大气透射仪的对比结果。对比试验验证了其所建立的能见度校准链的可用性,但也提出了对比试验所面临的一些问题,主要问题在于可用的对比数据不多,由于需要稳定的低能见度环境来对能见度仪的比对结果进行分析,在 1 年的连续测量中也仅有 554 个有效的 10 分钟平均值数据可供分析,300m~800m 之间可用数据非常少。

Waas 等³⁴报告了在三个机场使用在运行的大气透射仪作为参考基准值,11 套与之平行放置的前向散射仪的对比结果。对比试验从 2006 年秋天开始,连续进行了 9 个月的时间,对比试验主要为了验证前向散射仪对 RVR 的测量结果是

否可以取代大气透射仪,得到了如下主要结论:在 1000m 以下的均匀气象条件下,前向散射仪和大气透射仪具有较好的测量结果的相关性;而在不均匀的气象条件下,即使是大气透射仪相互之间的测量结果也会有非常大的不一致性;有降水时各种能见度仪的测量结果一致性较好,但均小于观测员的观测结果;而在毛毛雨下,前向散射仪比大气透射仪的测量结果要偏小;在降雪条件下,因为在比对试验期间降雪天气特别少,而且在仅有的降雪天气下大气透射仪也存在镜头污染等问题,所以没有得到具有统计学意义的可靠结论;

明虎等³⁵报告了陕西咸阳机场 2013 年 1 月~2014 年 8 月大气透射仪与前向散射仪测量跑道视程的对比数据,得到了以下主要结论:当跑道视程在 400m 以下时,90%的测量数据表明大气透射仪的测量结果大于前向散射仪,而跑道视程在 400m 以上时,前向散射仪测量跑道视程大于等于大气透射仪的比例较高;跑道视程小于等于 600m 时,大气透射仪和前向散射仪具有较好的替代性,而跑道视程大于 1000m 时,两种设备测量数据的偏差较大;在雾、冻雾、霾和暴雨天气下,两种仪器测量跑道视程的测量结果具有较好的一致性,而在雪、烟和扬沙天气下,两种仪器的测量数据偏差较大。

Chan 等³⁶报告了香港机场 4 套前向散射仪和 2 套大气透射仪为期两年半的对比结果。实验结果表明前向散射仪 PWD20 在霾、雾/薄雾、降水条件下均表现较好,但在霾天气下其与大气透射仪的测量结果偏差较大。

根据以上对比试验可以看到,在能见度仪的对比观测试验中,不同地区、不同型号的能见度仪,在不同的大气环境下表现出了各异的性能,对比试验所处的大气环境的均匀性、对比试验过程中是否具备多种天气条件以及测量基准值的如何选取等问题是完成能见度仪对比测试或校准的关键。

总体说来,对于能见度使用仪器观测代替人工观测不仅是技术发展的趋势,也是无人值守通用航空机场、无人值守气象站点的行业需要。我国地方气象部门近年来逐步推动能见度观测的自动观测(主用“前向散射仪”)取代人工观测进程,在 2011 年中国气象局印发的《前向散射能见度仪观测规范(试行)》中指出,“在进行记录处理与气象报告的编制时可按照相关业务规定,使用自动观测的能见度值代替人工目测的能见度值”。

1.3.2 模拟环境下对比测试研究进展

在计量学领域,“测试”并没有确切的定义,通常将其理解为一个复合词,即“测量和试验”。“测试”是个内容广泛的名词,通过测试既要得到被测试对象的计量、测量特性,赋予其准确的量值,又要确定其性能,包括测量性能,还包括使用性能、环境适应性、可靠性、维修性、稳定性和电气性能等。

为了缩短仪器设备的测试时间,同时为了满足仪器设备在极端气候下的性

能和环境适应性的测试需要，美、英等国建设了大规模的气候实验室³⁷⁻³⁹，主要用于测试在极端温湿度、降水、吹雪、吹风等气候环境下的飞机、武器等仪器、设备的性能，例如美国空军的 McKinley 气候实验室中可以模拟实现高达 60 米/秒的风，以及雪、盐雾、沙尘、冻雨、积冰条件等极端天气条件，可以模拟 -65°F~+165°F 的极端温度环境，但上述气候实验室中很少或几乎没有进行过各种低能见度环境下的能见度仪性能评估。

周向军等⁴⁰认为应当建设室外实验场和烟雾实验室对能见度仪进行测试和标校，提出了能见度仪标校实验室的实验室配置和检定精度需求，给出了进行能见度仪标校所需的标准透射仪和高精度散射仪的技术指标。

王胜杰等⁴¹对能见度仪检测实验室建设的关键问题进行了探讨，研究阐述了能见度仪检测实验室的技术特性，提出能见度仪的标准器建设、低能见度环境模拟和能见度仪检测方法等能见度仪测试校准的关键性问题。

Burnham 等⁴²报告了在美国 Eglin 空军基地气候实验室的舱室内进行能见度仪标校测试的实验结果，3 套大气透射仪和 5 套前向散射仪在气候实验室模拟环境下进行比对，重点研究了雾环境下各能见度仪对跑道视程的测量结果能否满足运行需要，同时研究测试了雾霾天气、雪、雨、冻雨和极端温度下各能见度仪的响应特性。但实验过程中，由于不同能见度仪的采样空间差别很大，实验过程难以做到模拟环境的均匀一致，从而导致特别是 RVR 在 1000 英尺以上时，250 英尺基线长度的大气透射仪的测量结果难以作为可用的参考基准值，对比试验难以完成完整的静态测试。

1.3.3 参考基准值与评价方法研究进展

气象仪器的测量特性可以分为静态测量特性和动态测量特性。一般说来，可以在实验室的模拟气象环境条件下，使用实验设备产生恒定的气象要素条件，从而对气象传感器进行静态测试，而在外界自然大气条件下，由于大气本身各气象要素的变化，此时较容易得到气象传感器的动态特性。

1、能见度参考基准值的研究进展

在能见度仪的直接对比试验中，作为比对参考基准值的即可以认为是能见度仪标准器。由前人在野外和实验室内进行能见度仪对比测试的实验过程和结论可以看到，不论是进行野外能见度仪对比试验测试能见度仪的动态特性，还是在实验室内对能见度仪进行静态特性的测试，具有高测量精度的能见度参考基准值是对能见度仪进行测试校准的基础。

在 1989 年由 WMO 所组织的第一次大规模能见度仪比对实验中³¹，参考基准值的选取是按照不同的 MOR 段和不同的能见度仪类型分段分类进行的，具体说来：在低 MOR 实验条件下，短基线大气透射仪在参考基准值中所占的比

例较大，而前向散射仪对于参考基准值的影响比例很小；在高 MOR 实验条件下，前向散射仪在参考基准值中所占比例较大；在中等 MOR 实验条件（200m~2000m）下，参考基准值主要由较长基线的大气透射仪提供。

在 1998 年北京南苑机场进行的 2 套大气透射仪和 3 套前向散射仪的对比试验中³²，由于实验目的主要是为了评估加拿大 Presentey 公司的两套能见度传感器所测量的 RVR 值是否可用，因此试验中将 VAISALA 公司的 MITRAS 透射仪作为参考传感器和能见度参考值。

在荷兰气象局 2005 年 9 月至 2006 年 8 月组织的为期一年的能见度仪对比试验中³³，建立了由大气透射仪和前向散射仪共同构成的校准链，将两个校正良好的大气透射仪和前向散射仪测量值作为能见度标准值。

在 Waas 等报告的在德国 3 个机场进行的能见度仪对比试验中³⁴，“Skopograph II”型双基线大气透射仪被选作为基准参考值。

在 Chan 等报告的在香港机场所进行的 4 套前向散射仪和 2 套大气透射仪对比试验中³⁶，为了保证机场能见度测量数据的连续性，使用了机场在运行使用的 Flamingo 大气透射仪的测量结果作为参考基准值。

王敏等⁴³在实验室内对 3 个国产厂家的前向散射仪进行了比对，使用 FD12P 对国产厂家的前向散射仪进行了对比。

根据前面的能见度仪对比试验相关文献资料可以看到，能见度仪的对比试验可以采用以下三种分析方法或原则分析试验数据：

- （1）不选取参考基准值，只比较能见度仪相互之间的测量结果差异；
- （2）根据试验目的，选取单一能见度仪测量值作为参考基准值，比较其余能见度仪与该能见度仪测量结果的差异；
- （3）不选用单一的能见度仪作为测量参考基准值，而是使用多套能见度仪的测量结果，在不同的能见度范围内选用不同的能见度仪测量值，多套能见度仪的测量值进行组合得到最终对比试验所需的参考基准值。

就大气透射仪和前向散射仪本身而言，可以使用中性滤光片在高能见度晴朗天气下对大气透射仪进行校准，使用散射盘对前向散射仪进行校准；而在上述自然条件或实验模拟条件的对比试验研究中，考虑到大气透射仪是直接测量得到大气透过率并依据“比尔朗伯”定律计算得到消光系数，因此有很多对比试验选用大气透射仪的测量结果作为对比测试的参考基准值，或大气透射仪的测量结果在能见度仪参考基准值中占据较大的参考比例。同时，由于大部分的能见度定义均为从人的角度出发而给出的，因此也有能见度仪的对比试验特别是在人工观测与仪器观测的对比试验中，常选取人工观测能见度值作为能见度的参考基准值，如 1.3.1 中所述。

大气透射仪对能见度的测量结果及人工观测到的能见度量值虽从实验原理和实验过程中得到了较多的研究认可，但两种观测方式所得到的能见度参考基准值也存在各自的缺点，主要表现在大气透射仪发射端与接收端对正较困难，对窗口污染敏感，需要频繁维护和校准，不同基线长度的大气透射仪在不同的能见度环境下表现出不同的测量精度，短基线大气透射仪具有较大的前向散射误差，只能在较小的测量范围内表现较高的测量精度⁷，单一基线的大气透射仪不能覆盖完整的能见度测量范围⁴⁴，单一大气透射仪的测量值难以直接作为参考基准值。因此，在不同的能见度环境条件下，采用不同基线长度的大气透射仪作为参考基准，或采用多套能见度仪的综合测量结果作为基准成为一些能见度仪对比试验的做法。人工观测能见度在某些条件下可以作为参考基准值，其优缺点如 1.1.2 中所述，此处不在赘述。

虽然后向散射式能见度仪、图像能见度仪等各类新型测量方法和系统也在迅速发展^{10,11,13,14}，但对高测量精度的大气消光系数和提供能见度参考基准值的测量原理和仪器设计，以及系统部件和外部环境条件对高精度大气消光系数和能见度参考基准值的影响等研究较少。

2、能见度量值评价方法研究进展

在 WMO 气象仪器和观测方法指南中⁷，对能见度仪的性能要求主要是从 MOR 和 RVR 的测量范围、报告分辨率、测量不确定度、传感器时间常数、输出平均时间、可达到的测量不确定度等方面提出，具体性能要求见表 1.2：

表 1.2 WMO 气象仪器和观测方法指南中对能见度仪的性能要求

	测量范围 (米)	报告分 辨率	需要的测量不 确定度	传感器时 间常数	输出平 均时间	可达到的测 量不确定度
MOR	100~100k	1	50 (MOR ≤ 600) 10% (600 < MOR ≤ 1500) 20% (MOR > 1500)	<30s	1~10 min	20m 或 20% 的较大者
RVR	10~2000	1	10 (RVR ≤ 400) 25 (400 < RVR ≤ 800) 10% (RVR > 800)	<30s	1~10 min	20m 或 20% 的较大者

在国际民航组织根据运行需要,同时结合设备仪器实际可达到的技术指标,推荐给出了机场使用的能见度传感器推荐的性能参数,具体见表 1.3。

表 1.3 国际民航组织推荐的能见度传感器性能参数

	测量范围 (米)	精度 (米)	报告分辨力 (米)	测量间隔 (分钟)	平均时间 (分钟)
MOR	50~10k	± 50 (MOR 小于 500) $\pm 10\%$ ($500 < \text{MOR} \leq 2\text{k}$) $\pm 20\%$ (MOR $> 2\text{k}$)	50 (MOR ≤ 800) 100 ($800 < \text{MOR} \leq 5\text{k}$) 1k (MOR $> 5\text{k}$)	1	1 和 10
RVR	10~2k	± 25 (RVR ≤ 150) ± 50 ($150 < \text{RVR} \leq 500$) $\pm 10\%$ ($500 < \text{RVR} \leq 2\text{k}$)	25 (RVR ≤ 400) 50 ($400 < \text{RVR} \leq 800$) 100 ($800 < \text{RVR} \leq 2\text{k}$)	---	---

在中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会所发布的《地面气象观测规范 气象能见度》(GB/T 35223-2017)中对于 MOR 测量仪器的提出技术指标要求¹,具体见表 1.4。

表 1.4 国家标准中对于 MOR 测量仪器的技术指标要求

项目名称	技术指标
测量范围	10m~35000m
精度	$\pm 10\%$, 10m~1000m; $\pm 15\%$, 10000m~35000m;
仪器一致性	$\pm 5\%$
时间常数	60s
更新时间	15s
输出接口	RS-232, RS-485

中国民航局发布气象自动观测系统技术规范中主要对能见度仪的测量 MOR 和 RVR 的测量范围、分辨力、最大允许误差等提出要求⁴⁵,具体为见表 1.5。

表 1.5 中国民航对能见度仪的测量性能要求

	测量范围(米)	分辨力(米)	最大允许误差(米)
MOR	10~10000	1	50 ($MOR \leq 600$) 10% ($600 < MOR \leq 1500$) 20% ($MOR > 1500$)
RVR	10~2000	1	10 ($RVR \leq 400$) 25 ($400 < RVR \leq 800$) 10% ($RVR > 800$)

由上述可知,不同的组织、机构对能见度仪性能参数的要求并不完全相同,不同厂家所生产的能见度仪的测量性能也并不一致,大部分组织、机构对能见度仪测量准确性的要求在 10%~20%左右。但同时要注意的是,能见度仪对比试验所呈现的仪器性能差异并不能完全反映能见度的测量误差,即使大气透射仪在各种对比试验中也会表现出来不同的性能,导致能见度仪测量结果的一致性评估并不能代替其准确性评价⁴⁶。能见度仪测量的准确性评价迫切需要更低测量误差和更高测量精度的方法和系统。

为使探测结果更加接近大气能见度特别是气象光学视程的真值,马舒庆等¹²从气象光学视程的定义出发,使用相机对黑体进行拍摄,认为该方法在能见度 30km 以下由于黑体黑度和 CCD 相机的非均匀性带来的误差约为 3.7%。Tang 等²¹将该系统的测量结果与大气透射仪和前向散射仪进行了比对,测量结果表明该系统与大气透射仪的相对平均偏差较好,但与前向散射仪测量偏差极大。本文从大气透射仪的测量原理出发,综合考虑大气透射仪的测量基线与误差的相对关系,设计使用多点移动式测量系统测量大气透过率并计算消光系数,明显减小了测量大气透过率和消光系数的系统误差^{47,48},理论分析和实验证明了该方法在各种能见度条件下的测量误差均远小于大气透射仪^{49,50}。

1.4 论文研究内容

能见度是气象、民航、交通运输等行业常用的气象要素,是民用航空正常运行的关键性指标,大气透射式能见度仪和前向散射式能见度仪民航和地方气象部门常用的能见度测量仪器,是机场测量 MOR 和 RVR 的关键气象仪器。本文针对能见度仪的测量比较性、代表性和准确性开展工作,重点研究了能见度仪测试评价中的若干关键问题,提出并实现了多点移动式大气透过率和消光系数测量方法与系统,设计实现并研究了能见度仪的测试模拟环境及其均匀性,在低能见度模拟环境内开展了多点移动式测量方法与常见能见度测量方法和测量仪器的对比试验。

论文主要由以下部分组成:

第一章概述了能见度的定义与分类，分析了不同的能见度观测方式及其特点。对本课题工作开展的研究必要性和实际意义进行了论述，特别是概述了能见度在民航运行中的应用范围。分析了国内外能见度仪测试评价工作的研究进展，对能见度仪的外场比对观测、模拟环境比对观测，以及能见度参考基准值与评价方法进行了综述。

第二章主要讲述了透射式和散射式能见度仪在榆林机场进行外场对比观测的实验结果；针对当前特别是通用航空机场的自动观测需求，给出了在机场使用多套能见度仪进行组合自动观测的方法，分析了天津机场、大连机场、海拉尔机场、成都机场和重庆机场连续 100 天的能见度仪组合观测数据，并与机场日常天气报告的能见度值进行对比，对观测数据的差异原因进行了分析。

第三章主要讲述了多点移动式测量方法与系统实现。该章首先重点分析了多点移动测量方法对大气透过率、消光系数和 MOR 的不同计算原理，对使用该方法进行多点移动式大气透过率、消光系数和 MOR 的测量误差进行了计算分析，并对多点移动式测量系统的相对误差与大气透射仪的测量相对误差进行了对比分析。最后设计实现了多点移动式高精度大气透过率测量系统。

第四章主要讲述了可用于能见度仪测试校准的测试环境的建立与系统研制。该章概述了大气环境模拟系统的整体结构，论述了系统的气溶胶发生、供气循环和各辅助单元的设计及功用。然后使用计算流体力学和实验方法两种方式对大气模拟环境的均匀性进行了分析。

第五章主要介绍了在大气环境模拟舱内进行对比试验的情况。首先介绍了大气模拟环境内的实验环境条件，以及舱内的气溶胶粒子浓度和分布情况。介绍了在大气模拟环境内多点移动式测量系统测量气象光学视程的数据处理过程及测量结果，使用多点移动式测量系统进行了多点移动式测量方法与传统大气透射仪测量方法的对比试验，以及使用多点移动式测量系统进行了与大气透射仪的对比试验结果。

第六章为本文的总结与展望部分，该章首先介绍了本文所开展的主要工作和所得到的主要结论，介绍了本文主要的创新点，最后展望了下一步的研究方向。

第2章 能见度仪外场对比观测与多能见度仪组合观测

大气透射仪和前向散射仪为当前地方气象和民航气象部门主用的能见度自动测量仪器。根据国际民航组织和中国民航局相关规范，机场的每条跑道在跑道两端和中间共需安装3套大气透射仪或前向散射仪作为能见度的自动化观测仪器^{5,8}。近年来，我国不同的地区、不同机场的研究人员对大气透射仪、前向散射仪的观测数据以及人工观测数据进行了对比分析，如刘宁微等研究对比了辽宁中部地区的能见度器测与目测数据²⁸，谭浩波等对比了珠江三角洲地区的前向散射仪器测值与人工观测值²⁵，张慧婵等对广州白云机场的器测能见度和人工观测能见度资料进行了对比分析²⁶，明虎等对安装于西安咸阳机场跑道一端的大气透射仪和前向散射仪测量的跑道视程进行了对比分析³⁵。上述研究表明，人工观测与能见度自动测量仪器的测量结果之间存在较大差异，能见度自动测量仪器如大气透射仪和前向散射仪之间在不同的地区、不同的天气条件下也表现出不同的性能差异。

2.1 能见度仪的外场对比观测

由于我国南北方天气特点差异，在南方少有霾、沙尘天气等非球形粒子散射导致的低能见度天气，因此前向散射仪在我国南方机场得到了部分应用。而在北方特别是华北地区和西北地区，霾和沙尘现象导致的非球形粒子散射问题引起前向散射仪的较大测量误差，大气透射仪在机场中占据绝对的应用比例。

本文首先考虑西部地区的气象环境特点，分析了2012年在榆林榆阳机场进行的为期12个月的大气透射仪和前向散射仪对比测量结果，重要对比了扬沙、浮尘等天气条件下，大气透射仪与前向散射仪的测量性能差异。考虑到RVR的计算过程需要涉及到背景光亮度问题，而不同能见度仪生产厂家所使用的背景光亮度计的测量结果仍存在较大差异⁴⁴，因此本文以MOR作为主要测量结果进行比对。

榆林机场跑道走向为南北走向，其中大气透射仪（LT31）安装于跑道南端（跑道号34），前向散射仪（FD12P）安装于跑道北端（跑道号16）。大气透射仪与前向散射仪的安装示意图如图2.1所示。

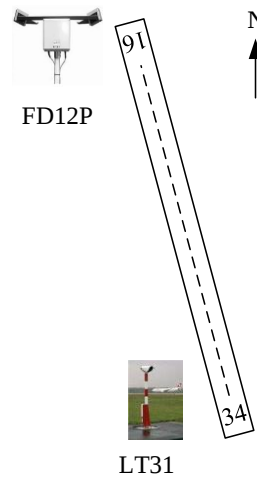


图 2.1 榆林机场大气透射仪、前向散射仪与跑道的位臵关系

2.1.1 扬沙、浮尘与霾天气下的对比观测

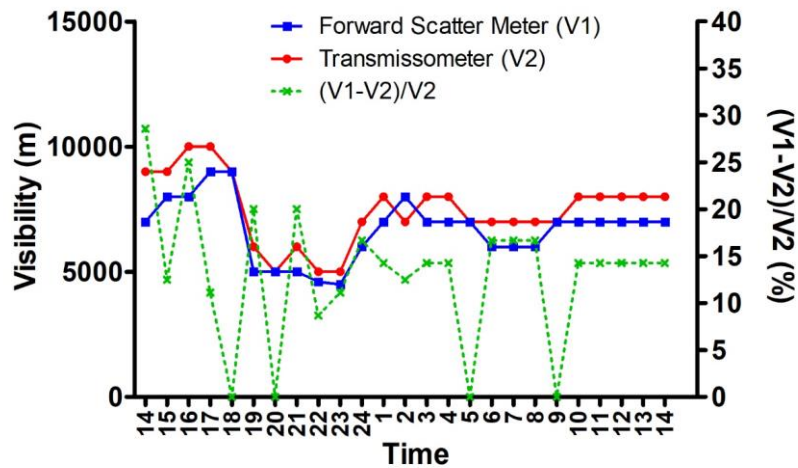


图 2.2 扬沙天气下前向散射仪与大气透射仪测量对比

2012年4月23日至4月24日，榆林机场发生扬沙（SA）天气过程，前向散射仪与大气透射仪的测量对比如图2.2所示。可以看到，大部分时刻两种能见度仪所测量的能见度均大于5000m，但大气透射仪的测量结果普遍大于前向散射仪，二者测量的偏离在0%至30%之间，平均偏离为13.22%。在测量的25组不同时刻的数据中，共有18组时刻的数据偏差在10%与20%之间，占比为72%；共有5组时刻的数据偏差小于10%，其中4组偏差为0；有2组时刻的数据偏差大于20%，最大偏差28.57%。

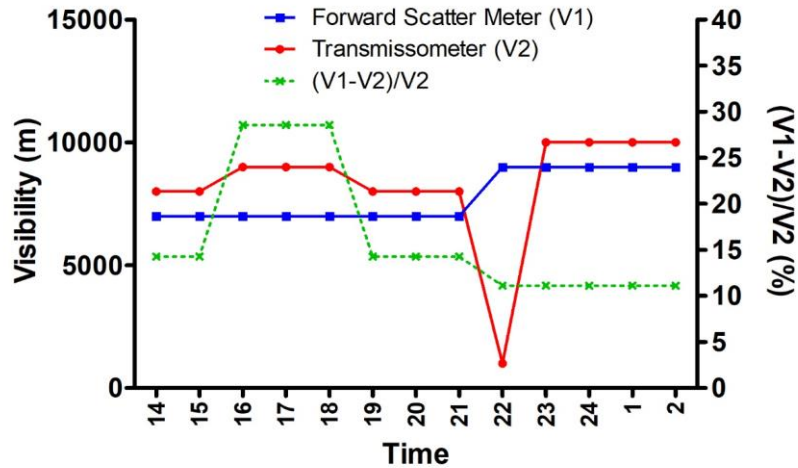


图 2.3 浮尘天气前向散射仪与大气透射仪测量对比

在 2012 年 4 月 27 日至 4 月 28 日的浮尘天气 (DU) 中, 大部分时刻的能见度为 7000m 以上, 明显高于 4 月 23 日的扬沙天气, 大气透射仪和前向散射仪的测量数据对比如图 2.3 所示。由图可以看到, 此次天气过程中大气透射仪的测量结果普遍大于前向散射仪, 前向散射仪与大气透射仪的平均偏差为 16.36%。13 组不同时刻的对比数据偏差全部大于 10%; 10 组数据的偏差小于 15%, 占比 76.92%。总体说来, 在浮尘天气过程中, 前向散射仪的测量结果较为平稳, 大气透射仪的测量结果波动较大。

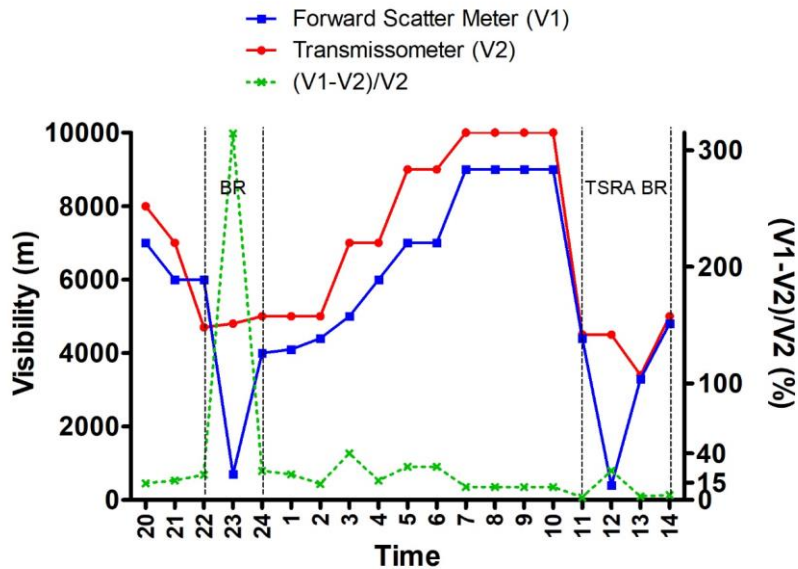


图 2.4 霾天气下前向散射仪与大气透射仪测量对比

2012 年 4 月 29 日至 4 月 30 日的霾 (HZ) 天气过程中, 前向散射仪与大气透射仪的测量结果变化趋势一致, 如图 4 所示。但大部分时刻的大气透射仪的测量结果大于前向散射仪, 但有两次前向散射仪测量结果明显偏低的测量过程, 且两次过程均发生于出现轻雾的时刻。整个天气过程中, 前向散射仪与大气透

射仪的测量偏差平均为 32.64%，除去 4 月 29 日 23 时的整点观测后，二者的测量偏差平均为 17.00%。

2.1.2 雾、雨雾、雪雾天气下的对比观测

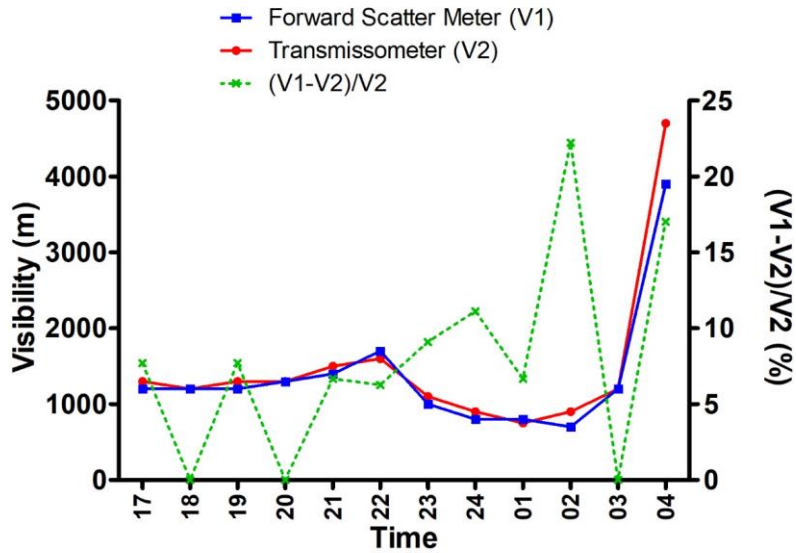


图 2.5 雾天前向散射仪与大气透射仪测量对比

在 2012 年 7 月 25 日的雾天气过程中，前向散射仪和大气透射仪的测量结果较为接近，没有出现大气透射仪的测量结果明显大于前向散射仪的情况，如图 2.5 所示。二者测量偏差的最大值为 22.22%，最小值为 0，平均偏差为 7.87%。有 1 组测量的偏差大于 20%，占比为 8.33%，有 9 组测量的偏差小于 10%，占比为 75%。是目前各种天气现象中，测量结果最为接近的一种天气现象。

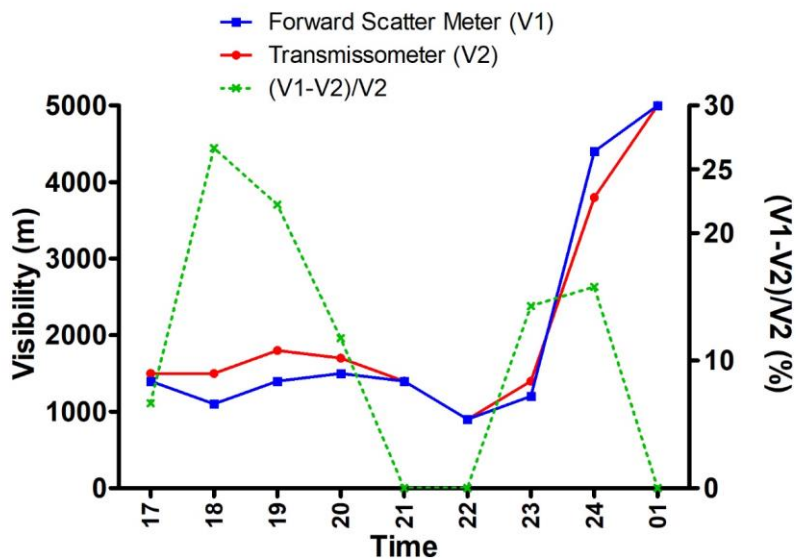


图 2.6 雾天前向散射仪与大气透射仪测量对比

在 2012 年 7 月 26 日的雾天气过程中，没有出现明显的大气透射仪大于前向散射仪的情况，如图 2.6 所示。二者测量的平均偏差为 10.82%，最大偏差为 26.67%，最小偏差为 0。有 2 组数据的测量结果大于 20%，占比为 22.22%，有 4 组数据的测量结果小于 10%，占比为 44.44%。

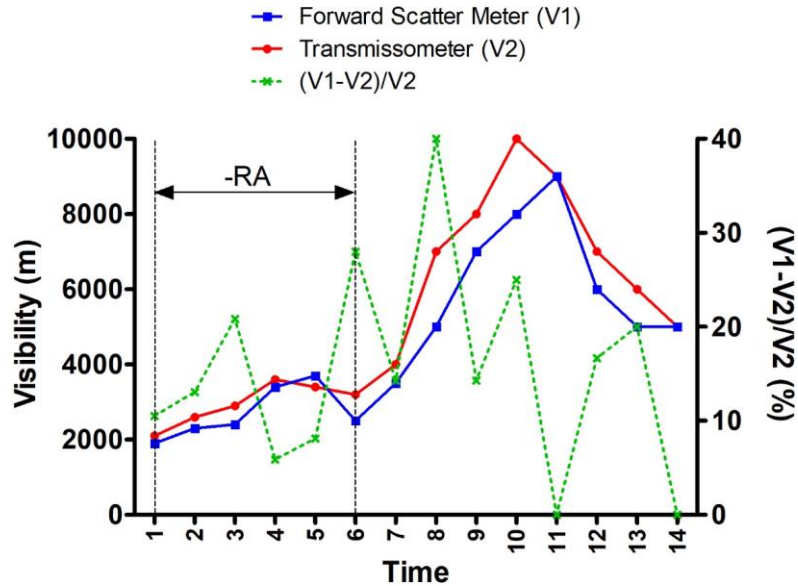


图 2.7 雨雾天气下前向散射仪与大气透射仪测量对比

在 2012 年 5 月 1 日的雨雾（RA BR）过程中，大气透射仪的测量结果普遍大于前向散射仪，如图 2.7 所示。二者测量偏差的平均值为 15.47%，最大偏差为 40%。有 4 个时刻的测量偏差在 10%以下，占比 28.57%。在雨雾过程中，雨并为对二者的测量平均偏差产生太大影响，但有雨过程相对于没雨过程而言，二者的测量偏差波动较小。

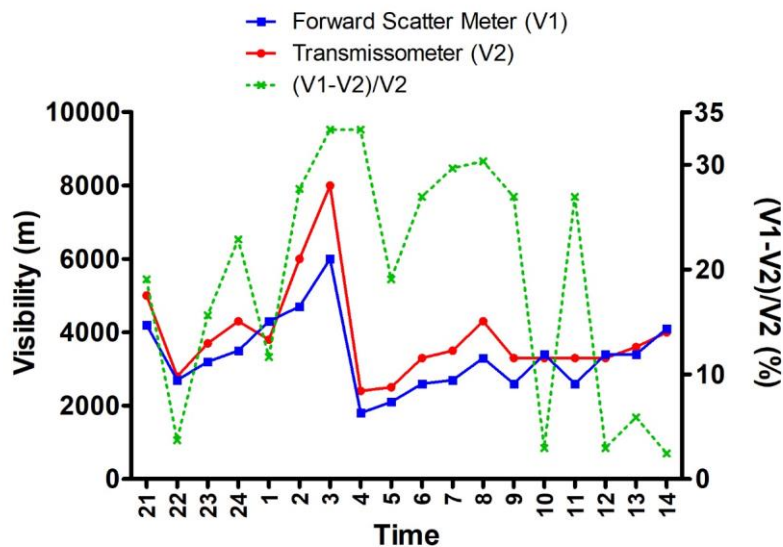


图 2.8 雨雾天气下前向散射仪与大气透射仪测量对比

在 2012 年 5 月 20 日至 5 月 21 日的雨雾过程中, 大气透射仪的测量结果普遍大于前向散射仪, 如图 8 所示。在 18 个对比时刻中, 前向散射仪的测量结果最低为 1800m, 最高为 6000m, 大气透射仪的测量结果最低为 2400m, 最高为 8000m。两种仪器所测量的最低能见度值与最高能见度值出现的时刻一致。

在 18 组对比数据中, 前向散射仪与大气透射仪的测量偏差平均值为 18.95%, 最大偏差为 33.3%, 有 5 组对比数据的测量偏差小于 10%, 占比 27.78%; 有 9 组对比数据的测量偏差大于 20%, 占比 50%。

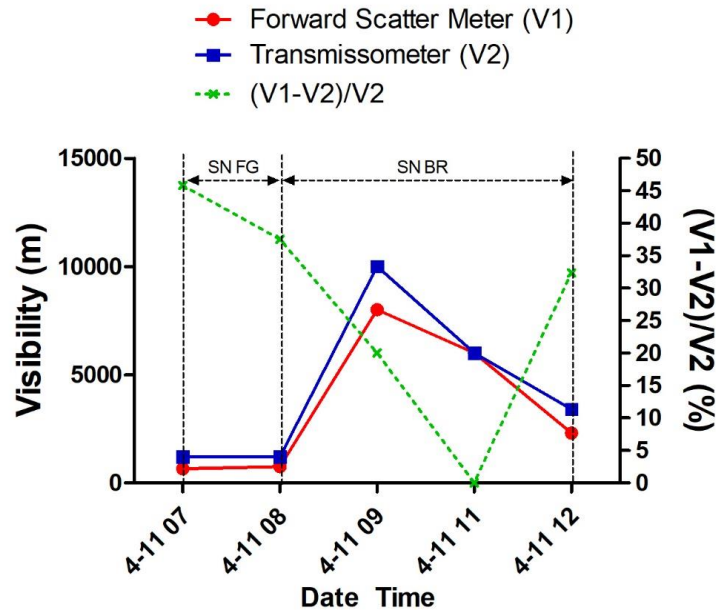


图 2.9 雪雾天气下前向散射仪与大气透射仪测量对比

在 2012 年 4 月 11 日的雪雾 (SN FG) 天气过程中, 大气透射仪的测量结果在大部分时刻大于前向散射仪, 前向散射仪的测量结果与大气透射仪的偏离较大, 最大可达 45% 以上, 如图 2.9 所示。在雪-轻雾 (SN BR) 天气过程中, 前向散射仪的测量结果与大气透射仪的偏离较小。因此, 整体说来在雪雾天气中, 前向散射仪与大气透射仪的测量结果偏离较大, 且雾越大, 前向散射仪与大气透射仪的测量结果偏移越大。

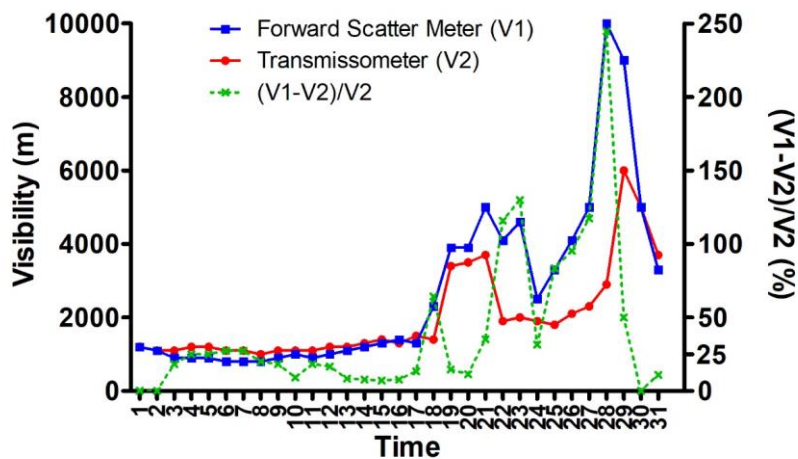


图 2.10 雪雾天气下前向散射仪与大气透射仪测量对比

在 2012 年 11 月 9 日至 11 月 10 日的雪雾天气过程中,共有 31 个对比时刻,其中前 17 组对比数据中,大气透射仪普遍大于前向散射仪,但偏差波动并不大,如图 10 所示。二者平均偏差为 14.65%,后 14 个时刻的对比数据中,二者偏差波动较大,平均偏差为 71.75%,且出现了明显的前向散射仪测量结果大于大气透射仪测量结果的情况。

全部时刻的测量偏差平均值为 40.44%,二者测量结果的最大偏差达到了 244.83%,最小偏差为 0。有 15 组数据的测量结果大于 20%,占比为 48.39%,有 8 组数据的测量结果小于 10%,占比为 25.81%。

2.1.3 外场对比观测的讨论与结论

本文在榆林榆阳机场同时使用大气透射仪和前向散射仪进行了为期 1 年的对比试验,分别研究了以固态气溶胶粒子为主的扬沙、浮尘和霾等天气过程和以液态气溶胶粒子为主的雾、雨雾和雪雾天气过程。根据在榆林机场进行的大气透射仪和前向散射仪的对比测试可以看到,在各种天气条件下,大气透射仪和前向散射仪的测量结果均呈现较大差异。在所统计的不同时刻的不同天气过程中,大气透射仪和前向散射仪均有几次异常值的出现。其中在浮尘天气条件下,大气透射仪的测量出现了一次明显低值;而在霾天气下,前向散射仪的测量出现了两次明显低值。

在以固态气溶胶为主的扬沙、浮尘和霾天气过程中,大气透射仪测量 MOR 的测量值普遍大于前向散射仪所测量的 MOR 测量值,扬沙所引起 MOR 测量差异小于浮尘天气和霾天气。在以较多液态气溶胶为主的雾、雨雾和雪雾天气过程中,大气透射仪与前向散射仪在雾和雨雾天气下, MOR 的测量结果较其他天气过程最为接近;而在雪雾天气下,前向散射仪的测量结果大于大气透射仪;

雾所引起的 MOR 测量差异小于雨雾和雪雾天气。

对比试验表明：（1）考虑能见度观测结果对于航空运行的重要性，对比试验说明在机场运行中，不能完全依靠单套或一种类型的能见度仪进行能见度自动观测，能见度的观测结果应该结合人工观测。对于无人值守的机场气象台站，可以考虑同时采用不同类型、型号的能见度仪，取平均值进行自动观测，并在报告中注明观测方式（AUTO）。（2）对比试验充分说明了能见度仪的性能测试的重要性，对于能见度仪的误差分析、计量溯源是未来下一步的研究方向。

2.2 主导能见度的多能见度仪组合观测

根据之前其他研究人员在各地的能见度仪对比试验，以及本文在榆林机场所进行的大气透射仪和前向散射仪的对比试验可以看到，不能完全依靠单套或一种类型的能见度仪进行能见度的自动观测。因此，在本节内容中，考虑综合使用机场多套能见度仪进行组合观测。

从本文 1.2.2 可以看到，主导能见度在民用航空运行中占据重要的地位和作用。在机场的例行天气报告中所报告的能见度值即为主导能见度。

主导能见度的仪器自动观测是指使用沿跑道安装的测量设备进行观测。《民用航空气象地面观测规范》指出，当自动观测设备能够输出主导能见度值时，可以将该设备输出的主导能见度值作为确定主导能见度的参考；当设备处于无人值守的自动发报状态时，在电码“**AUTO**”标注在机场日常天气报告（**METAR** 电报）和机场特殊天气报告（**SPECI** 电报）中，采用仪器测量的 10 分钟平均的能见度值报告主导能见度。

由于能见度仪的采样空间与人工观测的水平观测范围存在较大差别，单套能见度仪的测量值与主导能见度的定义、水平覆盖范围差别较大，大气透射仪和前向散射仪的测量结果难以直接作为机场主导能见度进行观测和报告。伴随多跑道机场的建设，机场内能见度仪数量日益增多。如何考虑单套能见度测量仪的水平范围代表性，使用机场多套能见度测量仪测量结果，完成机场主导能见度的仪器自动观测，是各机场气象台站迫切需要解决的问题。

当前，机场的执照观测员会按照观测规范以目测或器测方式观测主导能见度，然后将观测结果记录到地面观测簿中，并发布 **METAR** 电报；当主导能见度达到特殊天气标准时，将发布 **SPECI** 电报。在 **METAR** 和 **SPECI** 电报中，以电码“**VVVV**”组报告主导能见度，且遵循按增量等级报告的原则：

- 1、当能见度小于 800 米时，以 50 米为等级报告；
- 2、当能见度大于或等于 800 米且小于 5000 米时，以 100 米为等级报告；
- 3、当能见度大于或等于 5000 米且小于 10000 米时，以 1000 米为等级报告；
- 4、当能见度大于或等于 10000 米时，报告“9999”（但适用电码“**CAVOK**”

的条件时除外)；

5、当任何观测值不符合所使用的报告等级时，向下取最接近的一级进行编报。

国际民航组织提出使用多个能见度仪测量值的综合代表性问题，利用多套能见度仪的中值进行主导能见度的自动观测和报告，但没有相应的案例研究与验证⁸。香港机场在地面气象观测中，同时使用两条跑道共6套能见度仪的最小值及人工观测报告能见度，但未对多套能见度仪的综合测量结果与人工观测值进行对比分析，未实现主导能见度的自动观测⁵¹。本文作者从主导能见度的定义出发，提出使用半球镜面摄像机或鱼眼透镜扩大能见度仪的自动观测范围，进而报告主导能见度，但相关仪器尚未应用^{52,53}。因此，使用机场现有多套能见度自动观测仪器，研究机场主导能见度的自动观测方法，并使用人工观测数据进行代表性评价是必要的。

本节利用航空气象服务网观测记录了5个机场100天的能见度自动观测数据，使用中值法、图形比例法和均值法处理数据并计算得到机场主导能见度。文中将不同方法处理得到的主导能见度与机场人工观测报告的主导能见度进行对比分析，研究了不同方法计算处理主导能见度的误差和能力。相关研究结论对目前配备多套能见度仪的各运输机场及通用航空机场的主导能见度自动观测具有参考意义。

2.2.1 主导能见度的自动观测方法

1、中值法

机场内的能见度传感器分别安装于跑道两端和中部，既可以测量机场跑道相应位置点处的能见度值，又可根据测量结果的差异体现机场内能见度的跑道方向的变化情况。因此，中值法观测报告主导能见度的步骤为：

将机场内 n 套能见度仪的MOR的10分钟平均值按照从小到大排序，然后按照表2.1的方法报告主导能见度⁸。当只有一个能见度传感器时，只能报告一个能见度值，无法体现出机场能见度在水平方向上的变化情况，在这种情况下，只能将此能见度传感器报告主导能见度。

2、图形比例法

使用前述中值法报告主导能见度时，前提假设是每个传感器代替相同比例的水平范围覆盖区域。而如果机场受到局地雾的影响，则需要考虑每个能见度仪所能代表的百分比。本文将考虑能见度仪测量代表区域的测量方法称之为图形比例法。使用图形比例法观测和报告机场主导能见度需要找到能够代表机场水平范围内能见度的中心点。机场基准点（Aerodrome Reference Point, ARP）是用于指示机场地理位置的指定点，通常位于使用中的或规划的所有跑道的几

表 2.1 中值法主导能见度报告值

传感器的数量	观测到的能见度值 (注: $V1 < V2 < V3 < V4 < V5$)	要报告的主导能见度值
1	V1	V1
2	V1, V2	V1
3	V1, V2, V3	V2
4	V1, V2, V3, V4	V2
5	V1, V2, V3, V4, V5	V3

何中心, 且首次确定后保持不变^{54,55}。因此, 以机场基准点作为机场主导能见度观测报告的中心点得到观测结果, 更能代表机场的整体水平方向能见度的分布情况, 所测量和报告的主导能见度更加具有代表性。

(1) 单跑道机场主导能见度自动观测

对于单跑道机场来说, 根据民航相应规章、规范要求, 应当沿跑道方向配备 3 套能见度传感器^[8]。当机场配备的 3 套能见度传感器由于仪器设备故障, 仅有两套或以下可用时, 图形比例法无法使用, 只能采用与中值法相同的观测报告方式, 以能见度传感器测量值的较小值报告主导能见度。当机场配备 3 套或以上正常工作的能见度传感器时, 能见度传感器在机场内的分布图及其代表区域如图 2.11 所示。

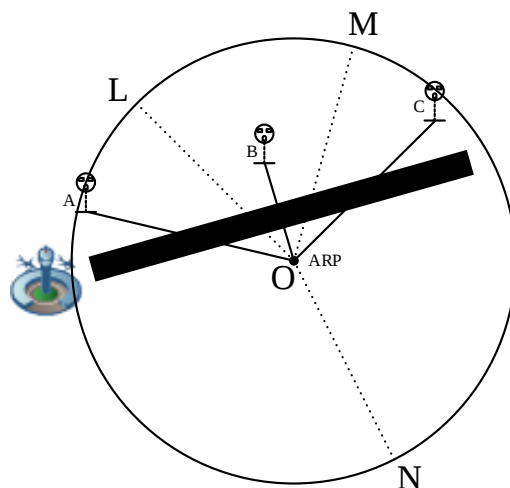


图 2.11 单跑道机场能见度传感器代表范围示意图

图 2.11 中, O 为机场的基准点, 可通过机场的航行资料汇编资料查询得到。A、B、C 为分别安装在跑道接地地带、停止端和中间地带的能见度传感器。连接 OA、OB 和 OC, OL 为 $\angle AOB$ 等分线, OM 为 $\angle BOC$ 等分线, ON 为 $\angle COA$ (大于 180°) 等分线。能见度传感器 A 的 MOR 10 分钟平均值用以代表扇形区域 LON 的能见度值, 能见度传感器 B 的 MOR 10 分钟平均值代表扇形区域 LOM 的能见度值, 能见度传感器 C 的 MOR 10 分钟平均值用以代表扇形区域 MON

的能见度值。

令 V_A 、 V_B 、 V_C 分别代表机场跑道旁三套能见度传感器所测的 MOR 10 分钟平均值。依据主导能见度的定义并参照图 1 可以得到，单套能见度传感器的测量结果无法代表机场地面一半以上的水平范围，而任意两套能见度传感器的测量结果所代表的机场地面水平范围均超过了一半。通过上述分析可以发现，当有三台能见度传感器报告 MOR 时，该方法使得主导能见度总是报告中间值，与中值法的报告值一致，相关主导能见度报告值如表 2.2 所示。

表 2.2 三套能见度传感器的主导能见度报告值

能见度传感器测量值排序	主导能见度报告值
$V_A < V_B < V_C$	V_B
$V_A < V_C < V_B$	V_C
$V_B < V_A < V_C$	V_A
$V_B < V_C < V_A$	V_C
$V_C < V_A < V_B$	V_A
$V_C < V_B < V_A$	V_B

(2) 双跑道机场的主导能见度自动观测

对于双跑道机场而言，以常见的机场基准点位于一条跑道的中心为例。A、B、C、D、E、F、G 为分别安装在跑道接地地带、停止端和中间地带的能见度传感器。双跑道机场能见度传感器分布示意图如图 2.12 所示。

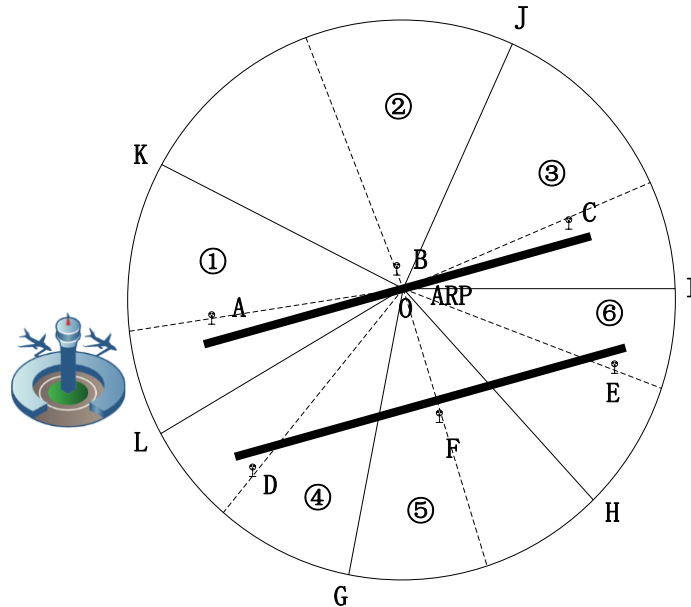


图 2.12 双跑道机场能见度传感器代表范围示意图

连接机场基准点与各能见度传感器，即 OA 、 OB 、 OC 、 OD 、 OE 和 OF ， OK 为 $\angle AOB$ 等分线， OJ 为 $\angle BOC$ 等分线， OI 为 $\angle COE$ 等分线， OH 为 $\angle EOF$ 等分线， OG 为 $\angle FOD$ 等分线， OL 为 $\angle DOA$ 等分线。得到 $\angle LOK$ 、 $\angle KOJ$ 、 $\angle JOI$ 、

$\angle IOH$ 、 $\angle HOG$ 和 $\angle GOL$ 六个区域①、②、③、④、⑤和⑥。

能见度传感器 A 的 MOR 10 分钟平均读数代表扇形区域 LOK 的能见度值，能见度传感器 B 的 MOR 10 分钟平均读数代表扇形区域 KOJ 的能见度值，能见度传感器 C 的 MOR 10 分钟平均读数代表扇形区域 JOI 的能见度值，能见度传感器 E 的 MOR 10 分钟平均读数代表扇形区域 IOH 的能见度值，能见度传感器 F 的 MOR 10 分钟平均读数代表扇形区域 HOG 的能见度值，能见度传感器 D 的 MOR 10 分钟平均读数代表扇形区域 GOL 的能见度值。

双跑道机场的图形比例法主导能见度自动观测报告方法为：（1）若①、②、③、④、⑤和⑥六个区域的任意三个区域的角度大于 180 度时，刚好使得这三个区域大于 180 度的那个区域的能见度值（MOR 读数）即为器测主导能见度。

（2）若①、②、③、④、⑤和⑥六个区域的任意四个区域的角度大于 180 度时，刚好使得这四个区域大于 180 度的那个区域的能见度值（MOR 读数）即为器测主导能见度。（3）若①、②、③、④、⑤和⑥六个区域的任意五个区域的角度大于 180 度时，刚好使得这五个区域大于 180 度的那个区域的能见度值（MOR 读数）即为器测主导能见度。

（3）均值法

使用均值法观测和报告主导能见度的方法为：直接使用多套能见度传感器的 MOR 测量 10 分钟平均值求和再取平均值，使用此值报告主导能见度。均值法观测和报告主导能见度的计算公式为：

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2.1)$$

式(2.1)中， V 为主导能见度， V_i （ $i=1, 2, \dots, n$ ）为机场内能见度传感器所测量的 MOR 10 分钟平均值。

2.2.2 数据整体概况与分析处理

1、数据整体概况与比较分析

使用气象光学视程 10 分钟平均值作为器测主导能见度的数据统计值。气象光学视程 10 分钟平均值数据来自航空气象服务网（<http://www.amsc.net.cn>）-跑道观测-自观列表-各个机场每条跑道风盘，并从风盘中直接读出 MOR 10A 的数据，以航空气象观测报告 METAR 报文发布的主导能见度作为比对的基准数值。各机场的跑道长度、机场基准点位置及能见度传感器数量如表 2.3 所示。

表 2.3 各机场相关参数

机场名称及四字代码	跑道长度 (米)	机场基准点 经纬度坐标	能见度传感器数量(个)	观测平台与 基准点直线 距离(米)
海拉尔机场 (ZBLA)	2800	N49°12.3' E119°49.5'	2	1000
大连机场 (ZYTL)	3300	N38°57.6' E121°31.8'	3	700
天津机场(ZBTJ)	3600/3200	N39°07.5' E117°20.8'	共 6 个, 工 作 4 个	590
成都机场 (ZUUU)	3600/3600	N30°34.8' E103°56.9'	6	760
重庆机场(ZUCK)	3200/3600	N29°43.0' E106°38.4'	6	955

所有白天可用数据的统计时间为北京时每天早上 7 点整, 所有夜间可用数据的统计时间为北京时每天晚 19 点整。从 2014 年 12 月 10 日起连续记录数据 100 天, 除去数据中天气现象为好天气组(CAVOK)以及机场没有发布 MOR 10A 的情况, 得到白天和夜间可用数据组数如表 4 所示, 其中, V_1 、 V_2 为各机场航空气象日常天气报告(METAR 报) 7 点和 19 点整点报中的能见度值的 100 天平均值。

表 2.4 各机场能见度数据整体情况

机场四字代码	白天可用 数据组数	夜间可用 数据组数	V_1 均值 (m)	V_2 均值 (m)
ZBTJ	72	74	3600	4000
ZBLA	30	31	7000	8000
ZYTL	51	56	4900	4700
ZUUU	93	94	4000	4700
ZUCK	91	88	4800	4400

使用中值法、图形比例法和均值法处理每条跑道的 MOR 10 分钟平均值。三种方法处理后的主导能见度数据与各机场航空日常天气报告中的主导能见度数据的对比箱线图如图 2.13 所示。

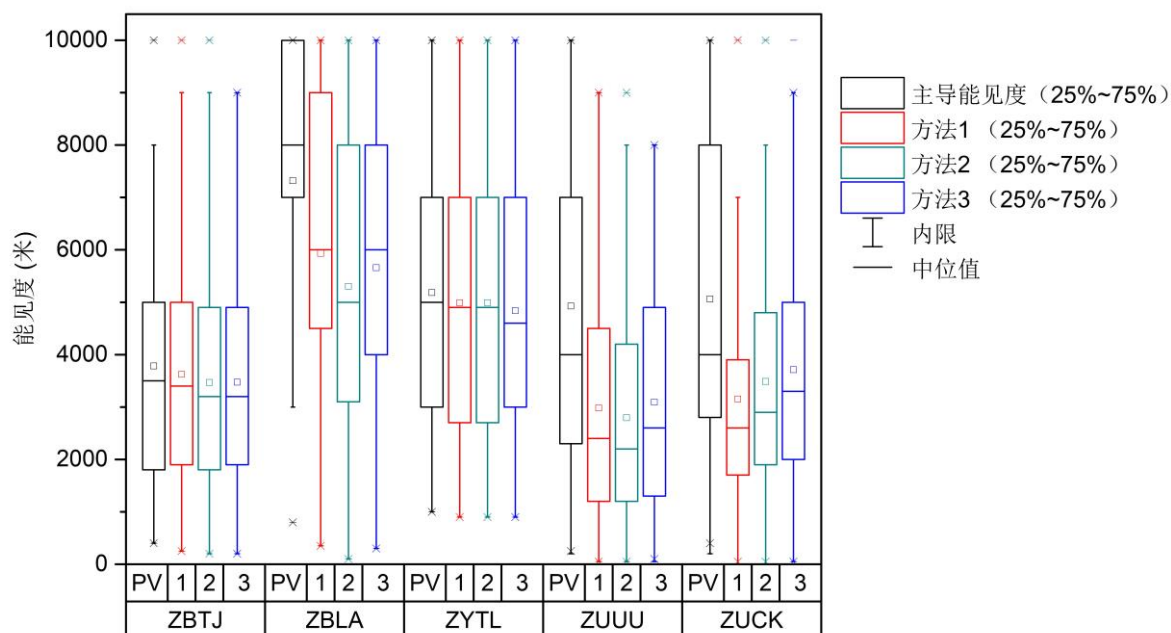


图 2.13 三种方法与主导能见度报告值整体比较箱线图

图 2.13 中，PV 为各机场航空日常天气报告中所报告的，以人工观测为主要观测方式观测的主导能见度；1、2、3 为分别使用中值法、图形比例法和均值法将 MOR 10 分钟平均值处理后，并按照主导能见度的报告规则取整，即能见度 5000 米以下 100 米取整（特别的能见度 800 米以下 50 米取整），能见度大于或等于 5000 米时 1000 米取整得到的器测主导能见度。

由图 2.13 可以得到，天津机场、大连机场的仪器测量与人工观测和报告的主导能见度值的中位值、上下四分位数都最为接近，海拉尔机场、成都机场和重庆机场的仪器测量主导能见度值普遍低于人工观测和报告的主导能见度值。

以人工观测和报告的主导能见度作为参考基准值，定义中值法、图形比例法和均值法三种方法的测量偏差为：

$$E = \frac{|V_i - V_{PV}|}{V_{PV}} \times 100\% \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2.2)$$

式(2.2)中， V_1 、 V_2 和 V_3 分别为中值法、图形比例法和均值法计算得到的主导能见度， V_{PV} 为人工观测和报告的主导能见度。使用式(2.2)计算的测量偏差对比如图 2.14 所示，其中，机场四字代码下方括号内的数字为机场能见度仪的数量。

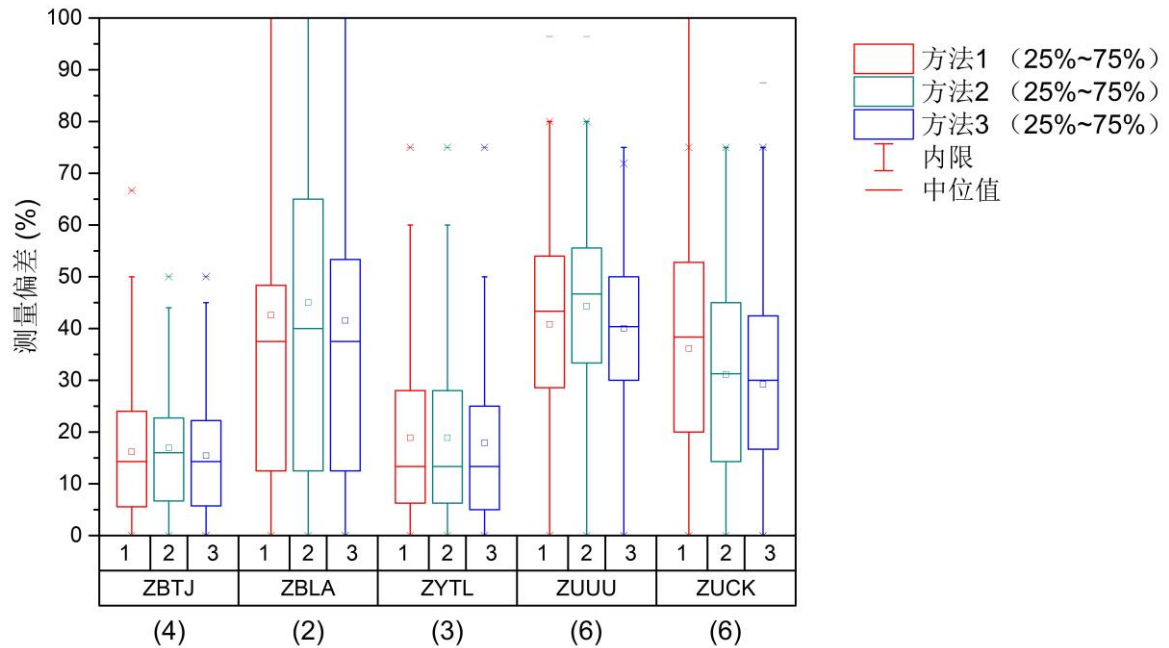
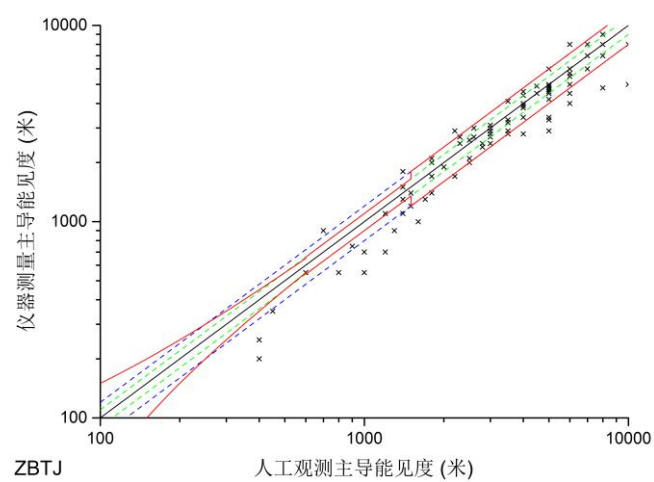


图 2.14 三种方法的测量偏差对比

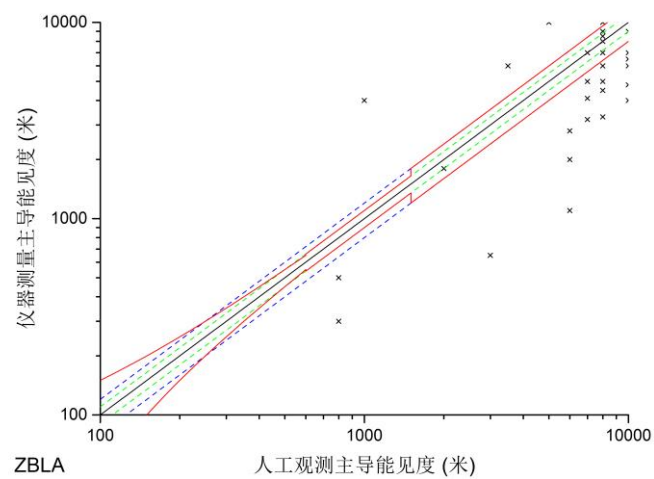
由图 2.14 可以看到，三种主导能见度自动器测方法的测量结果与人工观测报告的主导能见度均呈现较大偏差。天津机场、大连机场的器测主导能见度与人工观测报告的主导能见度偏差较小，海拉尔机场、四川机场和重庆机场的器测主导能见度与人工观测报告的主导能见度偏差较大。三种方法相比，对于天津机场、大连机场、成都机场和重庆机场，第三种方法即均值法较之于中值法和图形比例法具有更小的测量偏差；而对于海拉尔机场，中值法具有最小的测量偏差。海拉尔机场的测量偏差较大，且上下四分位覆盖范围较大，考虑主要与其能见度传感器数量较少有关。而成都机场、重庆机场的能见度传感器数量较多，但其测量偏差仍然较大，其上下四分位覆盖范围较小，考虑主要与当地多发雾等低能见度天气现象有关。综合比较各机场使用三种方法处理后的器测数据，均值法以其较小的测量偏差、较多的适用机场、较简便的处理方法，具有较好的应用优势。

2、均值法数据比较分析

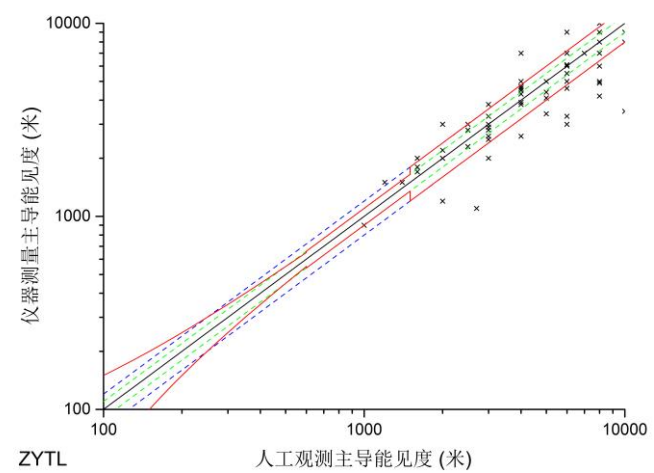
将各机场均值法处理后的仪器测量主导能见度与人工观测报告的主导能见度进行比较分析，如图 2.15 所示，其中黑线为仪器测量主导能见度与人工观测报告主导能见度的等值线，绿线为以人工观测主导能见度为参考基准值得到的 $\pm 10\%$ 的偏差线，蓝线为 $\pm 20\%$ 的偏差线，红线为世界气象组织要求^[6]的能见度传感器测量误差线，即 50 米（ $MOR \leq 600$ 米）、 $\pm 10\%$ （ $600m < MOR \leq 1500m$ ）或 $\pm 20\%$ （ $MOR > 1500m$ ）。



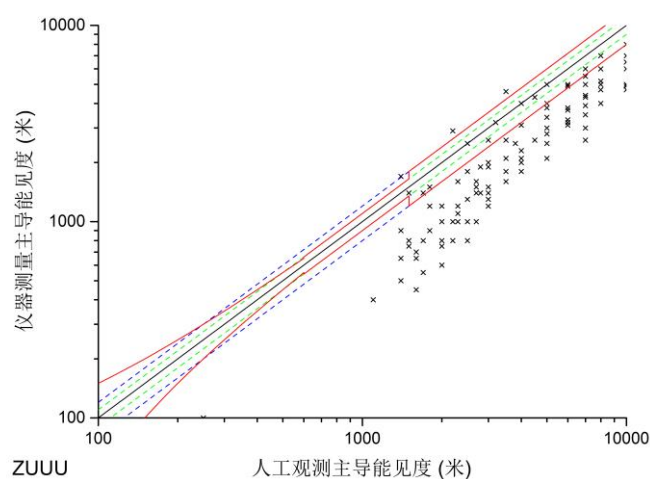
(a) 天津机场



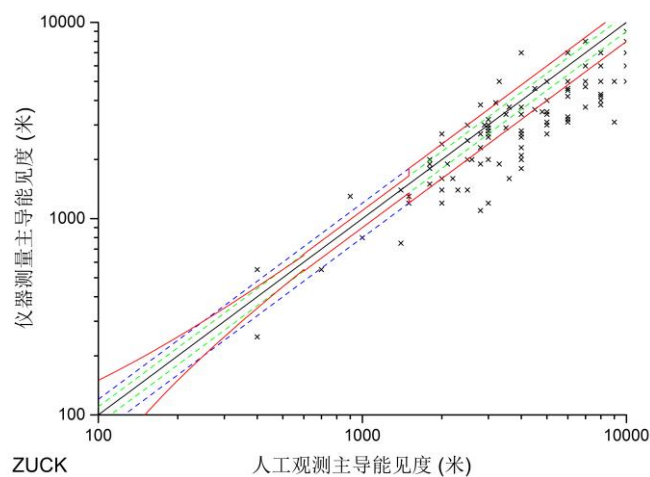
(b) 海拉尔机场



(c) 大连机场



(d) 成都机场



(e) 重庆机场

图 2.15 均值法各机场仪器与人工观测主导能见度对比

从图 2.15 可以看出,对于天津机场、大连机场而言,当能见度在 1500m 以上时,仪器测量计算的主导能见度基本上可以满足测量精度要求,对于海拉尔机场、成都机场和重庆机场来说,仪器测量主导能见度整体低于人工观测和报告的主导能见度,且有一大部分数据不能满足世界气象组织要求的观测质量精度要求。

各机场的总观测点数量、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 及符合世界气象组织能见度测量误差要求的观测点数量及其占比如表 2.5 所示。

表 2.5 各机场观测点观测质量

机场名称代码 及能见度传感 器数量	总观测点数 量	±10%观测 点数量	±20%观测 点数量	WMO 误差要 求范围内的观 测点数量	WMO 误差 要求范围内的 观测点占比
ZBTJ (4)	95	43	70	68	71.58%
ZBLA (2)	41	10	13	13	31.71%
ZYTL (3)	79	33	55	55	69.62%
ZUUU (6)	130	8	20	20	15.38%
ZUCK (6)	121	20	48	44	36.36%

从表 5 可以看出,对于天津机场(ZBTJ)、海拉尔机场(ZBLA)和大连机场(ZYTL)三个机场而言,能见度传感器数量越多,使用器测方法计算得到的符合世界气象组织误差要求的主导能见度观测点占比越高。但通过成都机场(ZUUU)、重庆机场(ZUCK)的观测结论可以看到,不仅传感器数量会影响主导能见度的器测质量,当地气候特点同样会较大程度的影响测量偏差。

2.2.3 讨论与结论

根据前述数据及相关分析可以得知,影响机场仪器观测和报告主导能见度与人工观测和报告主导能见度产生偏差的因素主要有:

(1) 观测原理和方法:人工观测报告的主导能见采用人工目视目标灯和目标物的方法,三种主导能见度仪器自动观测方法则均为对仪器测量气象光学视程值的处理和应用,人工观测和仪器测量由于观测方法、测量原理的不同直接导致了二者偏差;其次,大气透射仪、前向散射仪等不同类型能见度仪由于测量原理不同,不同能见度环境下测量误差也存在差异。因此,观测方法、测量原理、实际能见度高低都会对机场仪器观测和报告主导能见度产生影响。

(2) 能见度传感器数量:通过对 5 个机场主导能见度仪器自动观测的测量结果,特别是比较天津机场、大连机场和海拉尔机场可以看到,机场能见度传感器数量越多,主导能见度的仪器测量结果越接近于人工观测和报告主导能见度值;

(3) 地区气候差异:不同地区的大气相对湿度、可吸入颗粒物质量浓度、气溶胶吸收系数与消光系数比值、天气现象等因素均会导致主导能见度的人工观测结果和仪器观测结果及不同类型的能见度仪之间产生测量结果差异^[17-19]。

(4) 观测位置差异:人工观测报告主导能见度的位置为机场观测平台,图形比例法所使用中心位置为机场基准点。通过表 3 比较 5 个机场观测平台与机场基准点的直线距离,以及通过图 4 比较 5 个机场使用图形比例法计算主导能见度的测量偏差可以看到,天津机场和大连机场的观测平台距离机场基准点距离最近,其使用图形比例法的测量偏差与其他机场相比最低;海拉尔机场的观

测平台距离机场基准点距离最远，其使用图形比例法的测量偏差与其他机场相比最高；观测平台与机场基准点的距离对成都机场和重庆机场使用图形比例法测量偏差的影响不明显。

从观测数据的质量上，主导能见度的仪器观测报告方法所得到的主导能见度不如人工观测主导能见度的数据质量。然而，主导能见度的仪器自动观测与人工观测相比也具备其独特优势，即：（1）主导能见度的仪器自动观测可以进行连续观测，而人工观测只能在某一时刻进行观测；（2）主导能见度的仪器观测由于探测原理和计算方法相同，观测结果具有较好的一致性，仅由于仪器设备的性能偏差而产生观测结果的差异，而人工观测结果受观测员的主观因素影响较大，不同观测员的“视觉对比阈值”及其对“恰好能见”的理解不同，使得人工观测结果的一致性不如仪器观测。

对航空运行的影响而言，目前行业普遍认为人工观测能见度较之于仪器观测，更加接近大气的真实状况，但能见度观测偏差对航空运行的影响主要表现为航空运行标准的个别能见度值处，对于大部分的能见度观测结果而言，仪器观测结果的偏差并不会影响到航空运行。对于 1500m 以下的各类视程障碍天气现象，不管主导能见度的仪器观测与人工观测的偏差大小，各机场均按照国内外标准使用跑道视程代替主导能见度进行观测和报告，此时主导能见度的仪器测量偏差并不会对航空运行产生影响。

主导能见度对于民用航空运行具有重要意义。伴随我国通用航空机场的大规模建设，各地通用航空机场观测员数量不足问题凸显，使用能见度测量仪器观测和报告主导能见度对于通用航空机场的运行具有重要的实际意义。

本节使用中值法、图形比例法和均值法分别分析研究了天津机场、海拉尔机场、大连机场、成都机场和重庆机场的 100 天的白天和夜间能见度仪器观测数值和人工观测主导能见度值。研究表明，使用中值法、图形比例法和均值法计算得到的主导能见度与人工观测报告的主导能见度均有较大偏差，均值法与其他两种方法相比具有相对较小的观测偏差，但三种方法的观测质量均不如人工观测主导能见度值。影响三种仪器观测方法的原因主要包括机场能见度传感器的数量及地区气候差异两个方面。

考虑到在视程障碍天气现象发生时，各机场在 1500m 以下的低能见度天气均按照国内外标准规范，使用能见度传感器报告和使用跑道视程，因此使用主导能见度的自动观测并不会在低能见度天气条件下影响航空运行。

未来的研究可以考虑在完全使用能见度传感器进行主导能见度自动观测时，要考虑结合人工观测值，或者完全自动观测时要报告最低值的观测方法。同时，使用能见度传感器进行主导能见度的自动观测时还应考虑不同地区的盛

行风向，调整能见度仪的代表性区域，得到不同机场的代表性范围的合适比例。另外，推进能见度仪的测试、校准和计量检定，特别是将机场运行标准中的关键能见度值作为计量检定点，对于推进能见度仪及主导能见度的自动观测和报告具有重要意义。

第3章 高精度大气透过率和消光系数测量方法与系统实现

通过前文可知，不管是大气透射仪和前向散射仪的直接对比观测，或是使用机场多套能见度仪进行的组合观测，均难以取得较好数据质量的观测结果。

在对能见度仪进行测试校准工作，包括今后将会开展的计量检定工作中。研究提出具有更高精度的能见度测量结果，研究其作为能见度仪标准器的可能性，对于推荐能见度仪的测试、校准和计量检定具有重要的实际意义。

为了实现能见度仪的测试校准，提供高精度的可校准物理量是重要的。在现有的能见度仪，包括大气透射仪和前向散射仪中，大气透过率和消光系数是进行能见度仪器观测的关键中间物理量。

大气透过率是评价大气中光传输衰减特性的重要参数。大气透射仪通过测量并计算接收光强与发射光强的比值，可以直接得到大气透过率。大气透射仪根据其测量的大气透过率，结合相应的基线长度（一般为 15m、30m、50m 或 75m），可以计算得到消光系数和能见度。

与其他大气透过率测量仪器相比，大气透射仪对大气透过率的测量具有信噪比高、采样空间大等优点，测量结果更为直接和准确。大气透射仪测量能见度的误差决定于三个因素：能见度大小、基线长度和大气透过率的测量误差。前两个因素造成的误差是由测量原理决定的，与仪器本身的测量性能无关，大气透射率的准确测量是大气透射仪准确得到消光系数和能见度的关键。

大气透射仪符合民用航空对于能见度的高精度测量要求，被广泛应用于民用航空领域。光源的强度漂移、波长漂移、窗口污染以及干涉滤光片的透过率特性的温漂变化等导致接收光信号的微小变化，可引起大气透射仪测量结果的精度超出要求范围。由于在测量精度和稳定性、光学污染防治和对准以及地基安装等方面的较高技术要求，国内至今还无成熟的大气透射仪批量生产。

Vaisala 公司的大气透射仪采用了发射光强检测和稳定手段以及窗口污染侦测技术来部分解决大气透射率测量的稳定性和准确性问题⁵⁶；长春气象仪器研究所研制的 TS 型透射表在防止透镜表面结霜、精度校准、部件寿命和光轴校准等方面做了较多改进¹⁸；杨中秋等研制了 DT 型大气透射仪，在准确定标、分档次处理信号、采用高分辨率转化器、采用高性能元器件和恒温等方面采取了一系列的防护措施，以提升大气透过率的测量精度¹⁹；施德恒等利用激光的相干特性及脉冲特性，采用滤波器及滤波算法和脉冲相干激光减小系统的电干扰和光干扰，使用性能稳定的光电二极管和 Nd:YAG 激光器提升透过率的测量精度^{57,58}；肖韶荣等通过改变加载到光源的调制信号的幅度，并选择固定透过

率的衰减片，扩大透射仪接收机的输入端信号变化范围，提升大气透过率和能见度的测量准确性⁵⁹；程绍荣等通过在大气透射仪的发射端使用固定频率的脉冲信号源调制光强信号，减小信号源的频率变化和幅度变化，采用自动光功率控制电路输出功率稳定的光信号，在接收端使用 PIN 管等低噪声和高稳定性器件和电路结构，控制减小接收信号的电路输出噪声¹⁷；王宗俐等和赵力等使用反射镜和位移调节器，对大气透过率进行差分测量，提高了系统的抗环境污染能力和灵敏度^{14,60}；田林等采用角反射器的单端透射式能见度测量方案，利用锁相放大技术抑制噪声，提高大气透过率的测量精度⁶¹。

由于大气透射仪完整考虑了大气的散射作用与吸收作用，因此，本章节以大气透射仪对大气透过率的测量为基础，研究了大气透射仪的测量原理、误差影响因素及上述文献设计系统的优点，进而研究提出了多点移动大气透过率测量方法，并分析使用该方法进行大气透过率、消光系数和 MOR 的测量误差，从测量原理上降低了系统部件的硬件性能对大气透过仪测量精度的影响，提高了大气透过率的测量精度。最后设计实现了多点移动大气透过率测量系统，将激光发射端与光电接收端安装高精度滑轨上，降低长基线光学收发系统准直问题的影响；在大气透过率的测量处理上采用多点测量的方式，降低了光源不稳定的影响，减小测量系统的系统误差；系统采用多点多次测量并最小二乘拟合的方式得到大气消光系数，减小了环境的变化对消光系数和能见度测量结果的影响，从而通过系统实现为能见度仪的测试校准标准器提供了设计参考。

3.1 多点移动测量方法

3.1.1 大气透过率的多点移动测量方法

多点移动大气透过率测量（Multi-point Visibility Measurement, MVM）方法通过测量不同距离 r 处的大气透过率，得到大气透过率与基线长度的关系数组，进而得到精确测量的大气透过率和大气消光系数。

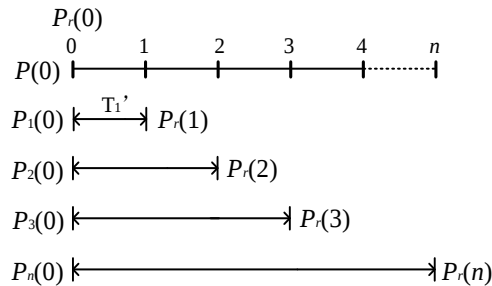


图 3.1 多点移动大气透过率测量示意图

多点移动透过率测量过程如图 3.1 所示。首先将移动接收端移动至位置 0 点处，此时，光从激光发射端发出后，不经过工作大气，直接传输到移动接收端的光电探测器。令 T_0 表示此时系统所产生的光能量的衰减，即由系统本身（不包含大气衰减）所造成的光的能量衰减为：

$$T_0 = P(0) - P_r(0) \quad (3.1)$$

式(3.1)中， $P(0)$ 表示初始状态时激光发射端的发射功率， $P_r(0)$ 表示移动接收端位于位置 0 点时，光电探测器接收到的功率，此时的测量基线长度为 0。

移动接收端每移动 5 米测量一次，共测量 10 个点，令 $P_1(0) \sim P_n(0)$ 表示移动接收端在不同位置点处停留时，激光发射端的功率； $P_r(1) \sim P_r(n)$ 表示移动接收端在不同位置点处停留时，移动接收端接收到的功率。

当接收端移动到第 1 点时，基线长度为 5m，光电探测器测量的值为 $P_r(1)$ ，则有：

$$T_1 = P_1(0) - P_r(1) \quad (3.2)$$

T_1 为此时整个测量系统产生的总的光衰减量，其中既包含了 5m 基线长度的大气所造成的光衰减量 T_1' ，也包含了系统本身所产生的光的衰减量 $\frac{P_1(0)}{P(0)} T_0$ ，即：

$$T_1 = T_1' + \frac{P_1(0)}{P(0)} T_0 \quad (3.3)$$

因此，考虑到系统本身产生的光衰减量，可认为激光发射端的实际发出功率为 $P_1(0) - \frac{P_1(0)}{P(0)} T_0$ ，此时精确测量的大气透过率表示为：

$$\tau = \frac{P_r(1)}{P_1(0) - \frac{P_1(0)}{P(0)} T_0} = \frac{P(0) \cdot P_r(1)}{P(0) \cdot P_1(0) - P_1(0) \cdot T_0} \quad (3.4)$$

将(3.1)代入(3.4)可以得到：

$$\tau = \frac{P(0) \cdot P_r(1)}{P_1(0) \cdot P_r(0)} \quad (3.5)$$

可以认为一次移动测试过程中，待测的大气透过率保持均匀且不变，则移动接收端在第 1 个测量点（5m 基线长度）时的待测大气透过率与第 n 个测量点（测量基线长度为 $5 \times n$ ）时的待测大气透过率是相同的。因此，类似式(3.5)，移动接收端在第 n 个测量点处测得的大气透过率为：

$$\tau = \frac{P(0) \cdot P_r(n)}{P_n(0) \cdot P_r(0)} \quad (3.6)$$

式(3.6)中， $P_n(0)$ 为移动接收端在第 n 个测量点（测量基线长度为 $5 \times n$ ）时，

激光发射端的发射功率， $P_r(n)$ 为移动接收端在第 n 个测量点处接收到的功率。根据式(3.6)的测量方法，当移动接收端位于不同测量点时，可以得到 n 个大气透过率。

3.1.2 基于多点移动测量的消光系数计算方法

传统大气透射仪通常采用单点多次平均的方式测量消光系数，降低测量的随机误差，其计算公式可展开为：

$$\sigma = -\frac{\overline{\ln \tau}}{\bar{r}} = -\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \tau_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i} = -\frac{\sum_{i=1}^n \ln \tau_i}{\sum_{i=1}^n r_i}, \quad (3.7)$$

使用多点移动大气透过率测量方法并线性拟合方法，可以同时降低系统误差和随机误差，得到更为精确测量的大气消光系数。

根据最小二乘法原理，使残差平方和最小，即：

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n [\ln \tau_i - (-\sigma \cdot r_i)]^2 \\ & = \sum_{i=1}^n (\ln \tau_i + \sigma \cdot r_i)^2 = \text{Min} \end{aligned} \quad (3.8)$$

由于式(3.8)的二阶偏导恒大于 0，即：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \sum_{i=1}^n (\ln \tau_i + \sigma \cdot r_i)^2}{\partial \sigma^2} \\ & = 2 \cdot \frac{\partial \sum_{i=1}^n r_i (\ln \tau_i + \sigma \cdot r_i)}{\partial \sigma} = \sum_{i=1}^n 2r_i^2 > 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

因此，式(3.8)有极小值，令其一阶偏导为 0 可以得到系统所测量的大气消光系数 σ 为：

$$\sum_{i=1}^n (r_i \cdot \ln \tau_i) + \sum_{i=1}^n (\sigma \cdot r_i^2) = 0 \quad (3.10)$$

$$\sigma = -\frac{\sum_{i=1}^n r_i \cdot \ln \tau_i}{\sum_{i=1}^n r_i^2} \quad (3.11)$$

式(3.11)中， $r_i = 5\text{m}, 10\text{m}, 15\text{m}, 20\text{m}, 25\text{m}, 30\text{m}, 35\text{m}, 40\text{m}, 45\text{m}$ 和 50m 。将式(3.6)代入(3.11)中即可计算得到消光系数。

可以看到，式(3.7)是(3.11)中 r 为固定值时的特例，即多点透射式能见度测量系统与单点多次能见度测量系统从基本原理上是一致的，二者都可以降低随机误差。但基于多点移动并最小二乘法的消光系数测量方法在降低随机误差的同时，也降低了系统误差，从而使得消光系数和能见度的测量结果更具有连续

性，二者的连续变化过程能够更好的体现大气的消光特性的变化。

3.1.3 基于多点移动测量的 MOR 计算方法

根据 Koschmieder 定律，MOR 的计算方式为：

$$MOR = \frac{-\ln \varepsilon}{\delta} \quad (3.12)$$

式中， ε 为人眼对比敏感度阈值，按照 WMO 和 ICAO 的建议通常取为 0.05，因此式(3.12)可以写为：

$$MOR = -\frac{\ln 0.05}{\delta} \approx \frac{3}{\delta} \quad (3.13)$$

将式(3.11)代入(3.13)即可得到多点移动测量方式下的 MOR 计算方法，即：

$$MOR = -\frac{3 \cdot \sum_{i=1}^n r_i^2}{\sum_{i=1}^n r_i \cdot \ln \tau_i} \quad (3.14)$$

3.2 测量误差分析与比较

3.2.1 大气透射仪的测量误差分析

大气透射仪的测量原理简图如图 3.2 所示。

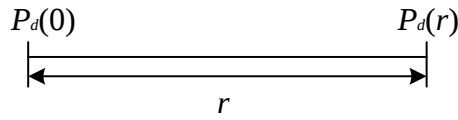


图 3.2 大气透射仪的测量原理图

1、大气透射仪测量大气透过率的误差分析

对于固定基线长度的大气透射仪而言，其大气透过率为：

$$\tau = \frac{P_d(r)}{P_d(0)} \quad (3.15)$$

大气透射仪测量大气透过率的系统误差为：

$$\Delta \tau = \frac{1}{P_d(0)} \cdot \Delta P_d(r) + \frac{-P_d(r)}{[P_d(0)]^2} \Delta P_d(0) \quad (3.16)$$

大气透射仪的大气透过率相对误差为：

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta\tau}{\tau} &= \frac{\Delta P_d(r) + \frac{-P_d(r)}{P_d(0)} \Delta P_d(0)}{P_d(r)} = \frac{P_d(0) \cdot \Delta P_d(r) - P_d(r) \cdot \Delta P_d(0)}{P_d(0) \cdot P_d(r)} \\
 &= \underbrace{\frac{\Delta P_d(r)}{P_d(r)}}_{\text{接收端}} - \underbrace{\frac{\Delta P_d(0)}{P_d(0)}}_{\text{发射端}}
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

由式(3.17)可以看出, 对于固定基线长度的大气透射仪而言, 其所测量的大气透过率的相对误差为大气透射仪接收端的相对误差与发射端的相对误差之差。

假设已知大气透射仪的大气透过率相对误差为 $n\%$, 则有:

$$\frac{\Delta P_d(r)}{P_d(r)} - \frac{\Delta P_d(0)}{P_d(0)} = n\% \tag{3.18}$$

2、大气透射仪测量 MOR 的误差分析

根据大气透射仪的测量原理, 大气透射仪测量 MOR 的基本计算公式为:

$$V = \frac{3l}{-\ln \tau} = \frac{3 \cdot l}{-\ln \left(\frac{I}{I_0} \right)} \tag{3.19}$$

式(3.19)中, V 为 MOR, l 为大气透射仪的基线长度。

根据式(3.19)可以计算出, 对于固定基线长度的大气透射仪而言, 在不同的 MOR 环境下, 其大气透过率值是一定的。部分典型基线长度大气透射仪在不同 MOR 环境下的大气透过率如表 3.1 所示。不同基线长度和不同 MOR 环境下的大气透过率真值如图 3.3 所示。

对式(3.19)进行偏微分计算, 就可以得到大气透射仪测量 MOR 的系统误差, 即:

$$dV = -\frac{3}{\ln \tau} dl + \frac{3l}{(\ln \tau)^2} \cdot \frac{1}{\tau} d\tau \tag{3.20}$$

若不考虑大气透射仪的基线定位误差, 则式(3.20)可以写为:

$$dV = \frac{3l}{(\ln \tau)^2} \cdot \frac{1}{\tau} d\tau \tag{3.21}$$

由于根据式(3.19)有:

$$\ln \tau = -\frac{3l}{V} \tag{3.22}$$

$$\tau = e^{-\frac{3l}{V}} \tag{3.23}$$

表 3.1 部分典型基线长度大气透射仪在不同 MOR 下的透过率真值

基线 大气透 过率 MOR	10m	20m	30m	40m	50m
50m	0.548811636	0.301194212	0.165298888	0.090717953	0.049787068
100m	0.740818221	0.548811636	0.40656966	0.301194212	0.22313016
500m	0.941764534	0.886920437	0.835270211	0.786627861	0.740818221
1000m	0.970445534	0.941764534	0.913931185	0.886920437	0.860707976
2000m	0.98511194	0.970445534	0.955997482	0.941764534	0.927743486
5000m	0.994017964	0.988071713	0.982161032	0.97628571	0.970445534
8000m	0.996257022	0.992528055	0.988813045	0.98511194	0.981424688
10000m	0.997004496	0.994017964	0.991040379	0.988071713	0.98511194

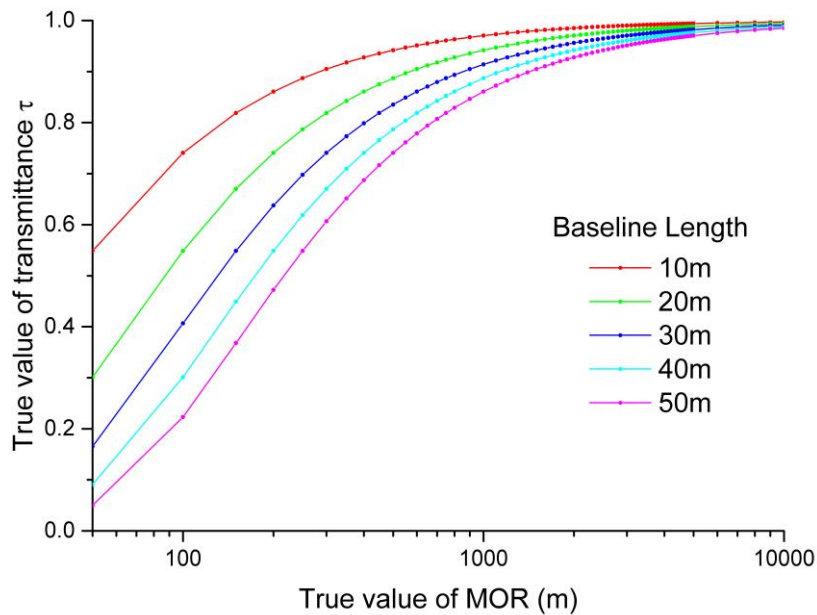


图 3.3 不同基线长度和不同 MOR 下的大气透过率真值

将式(3.22)和(3.23)代入式(3.21)，因为 τ 为非直接得到的物理量，将式(3.21)中的 τ 用 l 和 V 代替，可以得到：

$$\begin{aligned}
 dV &= \frac{3l}{\left(-\frac{3l}{V}\right)^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{3l}{V}}} d\tau \\
 &= \frac{V^2}{3l} \cdot e^{\frac{3l}{V}} d\tau
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

由式(3.24)可以得知,当不考虑大气透射仪的发射端与接收端直接的定位误差时,大气透射仪测量 MOR 的绝对误差与 MOR 的大小 V 、基线的长度 l 以及大气透过率的测量误差 $d\tau$ 有关。

由于民航及地方气象系统对于能见度仪的测量误差都是以相对误差的形式表示的,所以式(3.24)可以写为:

$$\frac{dV}{V} = \frac{V}{3l} \cdot e^{\frac{3l}{V}} d\tau \quad (3.25)$$

根据公式(3.25)可以知道,对于大气透射仪而言, MOR 的相对误差与 MOR 的大小、基线的长度和透过率的测量误差有关。而单就某台大气透射仪自身而言,能提高 MOR 的相对误差的方法就是其对大气透过率的测量误差。这也是选择大气透过率作为能见度仪测试校准关键物理量的原因。

或可将式(3.22)和(3.23)代入式(3.25),可以得到:

$$\frac{dV}{V} = -\frac{1}{\tau \cdot \ln \tau} \cdot d\tau \quad (3.26)$$

或

$$\frac{dV}{V} = -\frac{1}{\ln \tau} \cdot \frac{d\tau}{\tau} \quad (3.27)$$

根据公式(3.26)可以看到,如果不从 MOR 的大小以及基线长度的角度考虑,仅从大气透过率的角度去考虑,则可以看到, MOR 的相对误差与大气透过率的大小和大气透过率的绝对误差大小有关。根据公式(3.27)可以看到, MOR 的相对误差大小与大气透过率对数的倒数和大气透过率的相对误差大小有关。

若大气透过率测量的相对误差为 $n\%$, 则式(3.27)可以写成:

$$\frac{dV}{V} = -\frac{1}{\ln \tau} \cdot n\% \quad (3.28)$$

若大气透射仪测量大气透过率的测量相对误差为 1%, 则由式(3.28)和表 3.1 可以计算得到,大气透射仪 1%的大气透过率相对误差会对 MOR 测量相对误差的影响,如表 3.2 和图 3.4 所示。

由表 3.2 和图 3.4 可以看到,如果大气透过率的测量误差一定(如表格 3.2 中的 1%),则不管是在什么样的能见度条件下,大气透射仪的基线长度越短,所测得的 MOR 的相对误差越大;基线长度越长,所测得的 MOR 相对误差越小。

3.2.2 MVM 方法测量大气透过率的相对误差分析与量化

1、MVM 方法测量大气透过率的相对误差分析

对式(3.6)取偏微分,可以得到 MVM 法测量大气透过率的系统误差,即:

表 3.2 大气透射仪 1%的大气透过率相对误差所引起的 MOR 测量相对误差

基线 MOR 相对误差 MOR	10m	20m	30m	40m	50m
50m	1.666666667	0.833333333	0.555555556	0.416666667	0.333333333
100m	3.333333333	1.666666667	1.111111111	0.833333333	0.666666667
500m	16.66666667	8.333333333	5.555555556	4.166666667	3.333333333
1000m	33.33333333	16.66666667	11.11111111	8.333333333	6.666666667
2000m	66.66666667	33.33333333	22.22222222	16.66666667	13.33333333
5000m	166.6666667	83.33333333	55.55555556	41.66666667	33.33333333
8000m	266.6666667	133.3333333	88.88888889	66.66666667	53.33333333
10000m	333.3333333	166.6666667	111.1111111	83.33333333	66.66666667

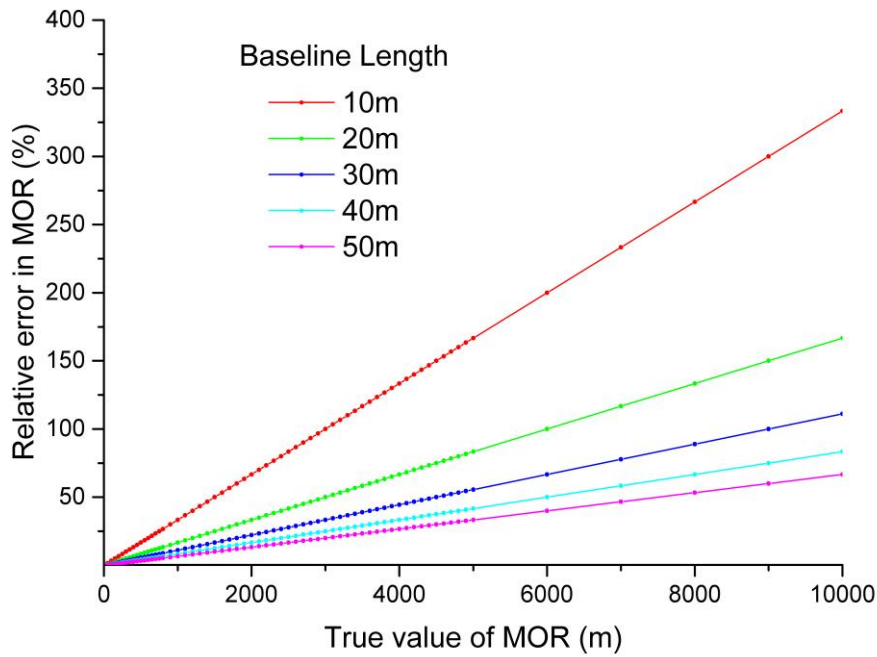


图 3.4 大气透射仪 1%的大气透过率相对误差会引起的 MOR 的相对误差

$$\begin{aligned}
 \Delta \tau(r_n) = & \frac{P_r(n)}{P_n(0) \cdot P_r(0)} \Delta P(0) + \frac{P(0)}{P_n(0) \cdot P_r(0)} \Delta P_r(n) \\
 & + \frac{-P(0) \cdot P_r(n)}{P_r(0) \cdot [P_n(0)]^2} \Delta P_n(0) + \frac{-P(0) \cdot P_r(n)}{P_n(0) \cdot [P_r(0)]^2} \Delta P_r(0)
 \end{aligned} \quad (3.29)$$

将式(3.29)与式(3.6)相比,可以得到MVM法测量大气透过率的相对误差为:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\Delta\tau(r_n)}{\tau(r_n)} \\
 &= \frac{\frac{P_r(n)}{P_n(0) \cdot P_r(0)} \Delta P(0) + \frac{P(0)}{P_n(0) \cdot P_r(0)} \Delta P_r(n)}{\frac{-P(0) \cdot P_r(n)}{P_r(0) \cdot [P_n(0)]^2} \Delta P_n(0) + \frac{-P(0) \cdot P_r(n)}{P_n(0) \cdot [P_r(0)]^2} \Delta P_r(0)} \\
 &= \frac{\frac{P(0) \cdot P_r(n)}{P_n(0) \cdot P_r(0)}}{\frac{\Delta P(0)}{P(0)} + \frac{\Delta P_r(n)}{P_r(n)} - \frac{\Delta P_n(0)}{P_n(0)} - \frac{\Delta P_r(0)}{P_r(0)}} \\
 &= \underbrace{\left[\frac{\Delta P_r(n)}{P_r(n)} - \frac{\Delta P_r(0)}{P_r(0)} \right]}_{\text{接收端}} - \underbrace{\left[\frac{\Delta P_n(0)}{P_n(0)} - \frac{\Delta P(0)}{P(0)} \right]}_{\text{发射端}}
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

式(3.30)中, $P(0)$ 表示初始状态即基线长度为 0 时激光发射端的发射功率, $P_r(0)$ 表示移动接收端位于位置 0 点时, 光电探测器接收到的功率; $P_n(0)$ 为移动接收端在第 n 个测量点 (测量基线长度为 $5 \times n$) 时, 激光发射端的发射功率, $P_r(n)$ 为移动接收端在第 n 个测量点处接收到的功率。

可以看到, 使用 MVM 方法测量大气透过率的相对误差虽然仍然同时与接收端和发射端有关, 但通过比较式(3.17)和式(3.30)可以看到, MVM 方法测量大气透过率的相对误差与激光接收端和发射端在不同位置的相对误差的差值有关, MVM 测量大气透过率的相对误差大小明显小于大气透射仪测量大气透过率的相对误差。但 MVM 测量大气透过率的相对误差仍需进一步量化。

2、MVM 方法测量大气透过率的相对误差量化

假设多点移动式系统移动到位置 n 时, 基线长度与大气透射仪的基线长度是相同的, 则此时有:

$$P_r(n) = P_d(r) \tag{3.31}$$

式(3.31)中, $P_r(n)$ 为多点移动式系统在位置 n 处的接收端的功率, $P_d(r)$ 为大气透射仪接收端接收到的功率。同样, 有:

$$P_n(0) = P_d(0) \tag{3.32}$$

式(3.32)中, $P_n(0)$ 为多点移动式系统在位置 n 处时发射端的功率, $P_d(0)$ 为大气透射仪发射端的功率。

若假设固定基线长度的大气透射仪测量大气透过率的相对误差为 $n\%$, 则有:

$$\frac{\Delta P_d(r)}{P_d(r)} - \frac{\Delta P_d(0)}{P_d(0)} = \frac{\Delta P_r(n)}{P_r(n)} - \frac{\Delta P_n(0)}{P_n(0)} = n\% \quad (3.33)$$

将大气透射仪测量大气透过率的相对误差式(3.17)与改进方法测量大气透过率的相对误差式(3.30)做差，可以得到：

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta \tau_d}{\tau_d} - \frac{\Delta \tau(r_n)}{\tau(r_n)} \\ &= \underbrace{\frac{\Delta P_d(r)}{P_d(r)}}_{\text{大透接收端}} - \underbrace{\frac{\Delta P_d(0)}{P_d(0)}}_{\text{大透发射端}} - \left[\underbrace{\left(\frac{\Delta P_r(n)}{P_r(n)} - \frac{\Delta P_r(0)}{P_r(0)} \right)}_{\text{接收端}} - \underbrace{\left(\frac{\Delta P_n(0)}{P_n(0)} - \frac{\Delta P(0)}{P(0)} \right)}_{\text{发射端}} \right] \end{aligned} \quad (3.34)$$

将式(3.31)和式(3.32)代入式(3.34)以得到：

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta \tau_d}{\tau_d} - \frac{\Delta \tau(r_n)}{\tau(r_n)} = \frac{\Delta P_d(r)}{P_d(r)} - \frac{\Delta P_d(0)}{P_d(0)} - \\ & \left(\frac{\Delta P_r(n)}{P_r(n)} - \frac{\Delta P_r(0)}{P_r(0)} \right) + \left(\frac{\Delta P_n(0)}{P_n(0)} - \frac{\Delta P(0)}{P(0)} \right) \\ &= \frac{\Delta P_r(0)}{P_r(0)} - \frac{\Delta P(0)}{P(0)} \end{aligned} \quad (3.35)$$

由此，大气透射仪测量大气透过率的相对误差比改进方法测量大气透过率的相对误差多出来的部分，是当基线长度为 0 的时候，移动接收端的相对误差减去发射端的相对误差。

由式(3.35)可知，大气透射仪与改进方法测量大气透过率的相对误差之差为：

$$\frac{\Delta \tau_d}{\tau_d} - \frac{\Delta \tau(r_n)}{\tau(r_n)} = \frac{\Delta P_r(0)}{P_r(0)} - \frac{\Delta P(0)}{P(0)} \quad (3.36)$$

式中， $P_r(0)$ 和 $P(0)$ 分别表示移动接收端在位置 0 点处，基线长度为 0 的时候的接收端功率和发射端功率。接下来要对式(3.36)的等号右侧进行进一步量化。

令 T_0 表示此时系统所产生的光能衰减，因为光没有穿过大气，所以 T_0 仅为系统本身所产生的能量衰减，有：

$$T_0 = P(0) - P_r(0) \quad (3.37)$$

当基线长度为 r 时，令 T_r 表示此时系统所产生的能量衰减，则：

$$T_r = P_n(0) - P_r(n) \quad (3.38)$$

T_r 中既包含了基线长度为 r 的大气所产生的能量衰减 T_r' ，也包含了系统本身所产生的光能的衰减量 $\frac{P_n(0)}{P(0)}T_0$ ，所以式(3.38)又可写为：

$$T_r = P_n(0) - P_r(n) = T_r' + \frac{P_n(0)}{P(0)}T_0 \quad (3.39)$$

当基线长度和能见度一定且已知时，大气的真实透过率是可以计算出来的，即每一个固定的基线长度和已知能见度会对应一个大气透过率真值，见表 3.1。由此可以认为大气透过率的真实值是已知的，应当尽可能的把式(3.39)中的物理量用大气透过率来表示。

假设基线长度为 r ，能见度为 V 时的大气透过率真值为 τ_0 ，则有：

$$T_r' = (1 - \tau_0)P_n(0) \quad (3.40)$$

假设基线长度为 r 的大气透射仪测量到的大气透过率为 τ_d ，即：

$$P_d(r) = \tau_d \cdot P_d(0) \quad (3.41)$$

或

$$P_r(n) = \tau_d \cdot P_n(0) \quad (3.42)$$

将式(3.40)和式(3.42)代入式(3.39)可以得到：

$$P_n(0) - \tau_d \cdot P_n(0) = (1 - \tau_0) \cdot P_n(0) + \frac{P_n(0)}{P(0)}T_0 \quad (3.43)$$

$$T_0 = (\tau_0 - \tau_d)P(0) \quad (3.44)$$

假设基线长度为 r 的大气透射仪测量大气透过率 τ_d 的相对误差为 $n\%$ ，即：

$$\frac{\tau_d}{\tau_0} = 1 \pm n\% \quad (3.45)$$

式(3.44)可以写为：

$$T_0 = (\pm n\% \cdot \tau_0) \cdot P(0) \quad (3.46)$$

将式(3.46)代入式(3.37)，有：

$$(\pm n\% \cdot \tau_0) \cdot P(0) = P(0) - P_r(0) \quad (3.47)$$

$$P_r(0) = (1 \pm n\% \cdot \tau_0) \cdot P(0) \quad (3.48)$$

因为 $P_r(0)$ 比 $P(0)$ 要小，所以式(3.48)可以写为：

$$\frac{P_r(0)}{P(0)} = 1 - n\% \cdot \tau_0 \quad (3.49)$$

基线长度为 0 时，式(3.49)的真实值应该为 1，因此类似式(3.15)和式(3.17)，有：

$$\frac{\Delta P_r(0)}{P_r(0)} - \frac{\Delta P(0)}{P(0)} = n\% \cdot \tau_0 \quad (3.50)$$

将式(3.50)代入式(3.36)可知，大气透射仪与多点移动式测量方法测量大气透过率的相对误差之差为 $n\% \cdot \tau_0$ ，即：

$$\frac{\Delta \tau_d}{\tau_d} - \frac{\Delta \tau(r_n)}{\tau(r_n)} = n\% \cdot \tau_0 \quad (3.51)$$

式中， $n\%$ 为大气透射仪测量大气透过率的相对误差，即 $\frac{\Delta \tau_d}{\tau_d} = n\%$ ； τ_0 为大气透射仪在基线长度为 r 及能见度为 V 时的大气透过率真值，因此，式(3.51)可以写为：

$$n\% - \frac{\Delta \tau(r_n)}{\tau(r_n)} = n\% \cdot \tau_0 \quad (3.52)$$

$$\frac{\Delta \tau(r_n)}{\tau(r_n)} = n\% \cdot (1 - \tau_0) \quad (3.53)$$

式(3.53)即为量化后的 MVM 方法测量大气透过率的相对误差，其中， $n\%$ 为大气透射仪测量大气透过率的相对误差； τ_0 为大气透射仪在基线长度为 r 及能见度为 V 时的大气透过率真值。

若设大气透射仪测量大气透过率的相对误差计算中公式(3.28)中的 $n\%$ 为 1%，即如果具备完全相同的发射器和接收器硬件条件，仅由于接收器在不同基线长度位置点处停留并测量，则按照类似传统大气透射仪的测量方式测量大气透过率的相对误差都是 1%，此时测量大气透过率和 MOR 的测量为等精度测量。

而根据式(3.53)可以看到，因为不同的能见度和不同的基线长度条件下， τ_0 是不同的，如表 3.1 所示，所以多点移动式系统的接收端在移动时，在各固定测量点测量得到的大气透过率的相对误差是不一样的。即接收器在不同位置点处停留时，不同位置点处所测量的大气透过率和 MOR 的测量误差是不一样的，此时对于大气透过率和 MOR 的测量是不等精度测量。在这种不等精度测量方法下，大气透过率的相对误差在部分具体基线长和 MOR 量值下的计算结果如表 3.3 所示（以 $n\% = 1\%$ 进行计算）。

表 3.3 MVM 方法测量大气透过率的相对误差

基线 大气透 过率相对 误差 MOR	10m	20m	30m	40m	50m
50m	0.451188364	0.698805788	0.834701112	0.909282047	0.950212932
100m	0.259181779	0.451188364	0.59343034	0.698805788	0.77686984
500m	0.058235466	0.113079563	0.164729789	0.213372139	0.259181779
1000m	0.029554466	0.058235466	0.086068815	0.113079563	0.139292024
2000m	0.01488806	0.029554466	0.044002518	0.058235466	0.072256514
5000m	0.005982036	0.011928287	0.017838968	0.02371429	0.029554466
8000m	0.003742978	0.007471945	0.011186955	0.01488806	0.018575312
10000m	0.002995504	0.005982036	0.008959621	0.011928287	0.01488806

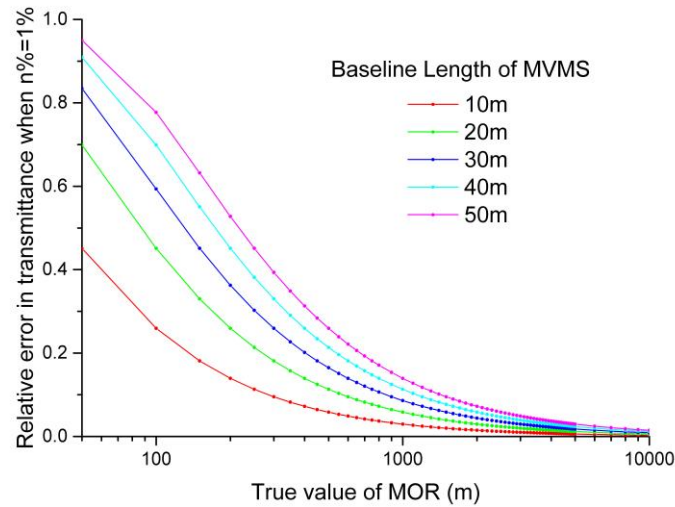


图 3.5 MVM 方法测量得到的大气透过率相对误差

3.2.3 MVM 方法测量 MOR 的误差分析

式(3.14)为 MVM 方法测量并计算 MOR 的计算公式。若不考虑基线的定位误差, 对该式取偏微分计算, 即可得到 MVM 方法测量 MOR 的系统误差为:

$$dV = \frac{3 \cdot \left(\sum_{i=1}^n r_i^2 \right) \cdot \left[\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{\tau(r_i)} \cdot d\tau(r_i) \right]}{\left[\sum_{i=1}^n r_i \cdot \ln \tau(r_i) \right]^2} \quad (3.54)$$

由于式(3.14)同样可以写为:

$$3 \cdot \sum_{i=1}^n r_i^2 = -V \cdot \left[\sum_{i=1}^n r_i \cdot \ln \tau(r_i) \right] \quad (3.55)$$

或

$$\sum_{i=1}^n r_i \cdot \ln \tau(r_i) = -\frac{3 \cdot \sum_{i=1}^n r_i^2}{V} \quad (3.56)$$

将式(3.55)代入式(3.54)可以得到:

$$dV = -\frac{V \cdot \left[\sum_{i=1}^n r_i \cdot \ln \tau(r_i) \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{\tau(r_i)} \cdot d\tau(r_i) \right]}{\left[\sum_{i=1}^n r_i \cdot \ln \tau(r_i) \right]^2} \quad (3.57)$$

$$\frac{dV}{V} = -\frac{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{\tau(r_i)} \cdot d\tau(r_i)}{\sum_{i=1}^n r_i \cdot \ln \tau(r_i)} \quad (3.58)$$

将式(3.56)代入式(3.58)等号右侧分母部分, 可以得到:

$$\frac{dV}{V} = \frac{V}{3 \cdot \sum_{i=1}^n r_i^2} \cdot \left[\sum_{i=1}^n r_i \cdot \frac{d\tau(r_i)}{\tau(r_i)} \right] \quad (3.59)$$

式(3.59)即为使用 MVM 方法测量 MOR 的相对误差。

对于本文所涉及实现的多点移动式大气透过率测量系统而言, 光电接收端每 5m 停止并测量一次, 因此有:

$$r_i = 5m, 10m, 15m, 20m, 25m, 30m, 35m, 40m, 45m, 50m \quad (3.60)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n r_i &= 5 + 10 + 15 + 20 + 25 + 30 + 35 + 40 + 45 + 50 \\ &= 275 \end{aligned} \quad (3.61)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n r_i^2 &= 5^2 + 10^2 + 15^2 + 20^2 + 25^2 + 30^2 + 35^2 + 40^2 + 45^2 + 50^2 \\ &= 25 + 100 + 225 + 400 + 625 + 900 + 1225 + 1600 + 2025 + 2500 \\ &= 9625 \end{aligned} \quad (3.62)$$

$$\frac{V}{3 \cdot \sum_{i=1}^n r_i^2} = \frac{V}{3 \cdot 9625} = \frac{V}{28875} \quad (3.63)$$

将式(3.63)代入式(3.59), 可以得到:

$$\frac{dV}{V} = \frac{V}{28875} \cdot \left[\sum_{i=1}^n r_i \cdot \frac{d\tau(r_i)}{\tau(r_i)} \right] \quad (3.64)$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{V}{28875} \cdot \left[r_1 \cdot \frac{d\tau(r_1)}{\tau(r_1)} + r_2 \cdot \frac{d\tau(r_2)}{\tau(r_2)} + \dots + r_n \cdot \frac{d\tau(r_n)}{\tau(r_n)} \right] \quad (3.65)$$

将式(3.53)和式(3.60)以及表 3.3 中的数据代入式(3.65)即可以得到 MVM 方法测量 MOR 的相对误差的量化结果。不同 MOR 条件下使用 MVM 方法测量 MOR 的相对误差如表 3.4 所示，同等硬件条件下使用 MVM 方法测量 MOR 的相对误差与大气透射仪测量 MOR 的相对误差对比如图 3.6 所示。

表 3.4 MVM 方法测量 MOR 的相对误差（ $n\%=1\%$ ）

MOR	50	100	500	1000
相对误差	0.397783287	0.594366961	0.891400752	0.943460389
MOR	2000	5000	8000	10000
相对误差	0.971142641	0.988312344	0.992672326	0.994131737

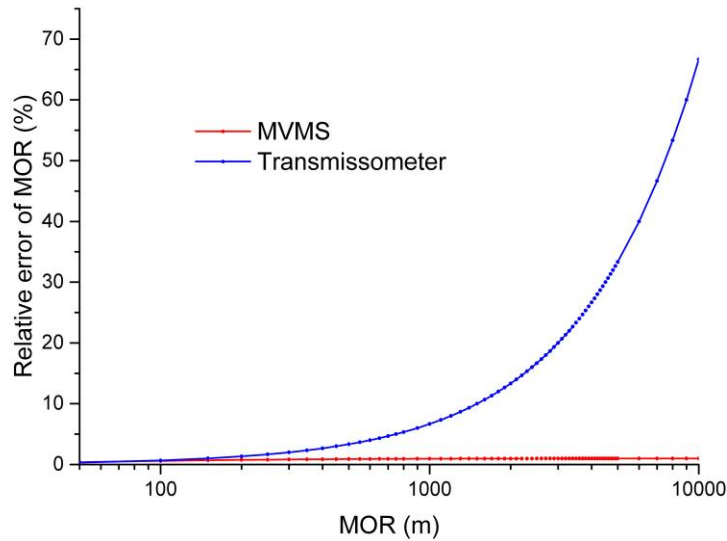


图 3.6 MVM 方法与大气透射仪测量 MOR 的相对误差对比图

由图 3.6 可以看到，MVM 方法测量 MOR 的相对误差明显小于大气透射仪测量 MOR 的误差。

3.3 高精度多点移动式测量系统实现

本节根据多点移动测量方法，设计实现了多点移动大气透过率和消光系数测量系统。系统由激光发射端、移动式接收端、高精度导轨，以及通信子系统、供气循环子系统及其他子系统组成，系统构成示意图如图 3.7 所示。

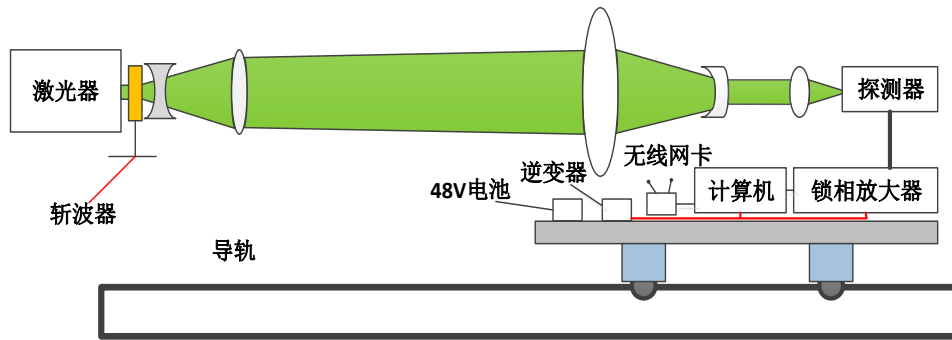


图 3.7 多点移动测量系统构成示意图

系统光路部分主要由激光器、光学斩波器、锁相放大器和收发透镜组组成。波长为 532nm 的激光经扩束透镜和反射镜组成的光路系统进行扩束、发散角压缩及准直后，沿导轨方向发射。光学斩波器放置于激光发射端，将连续光调制为脉冲光，斩波器的参考信号输入到安装于移动式接收端的锁相放大器参考通道中。透过大气后的激光光束由接收透镜组接收，探测器的信号接入锁相放大器的信号通道，进行光能量的采集。系统主要光学部件参数见表 3.5。系统部件组成透视图如图 3.8 所示。

表 3.5 多点测量系统部件参数

主要部件	参数指标	
激光器	波长	532 $\pm$ 1nm
	发散角	<1.2mrad
	光斑直径	~2.0mm
光学斩波器	斩波频率	20~1KHz
	叶片槽角度	18°
	数据位	8
锁相放大器	满量程灵敏度	1nV~1V
	输入信号频率范围	1mHz~100KHz
光电探测器	波长范围	350nm~1100nm
	输出电压	0~10V

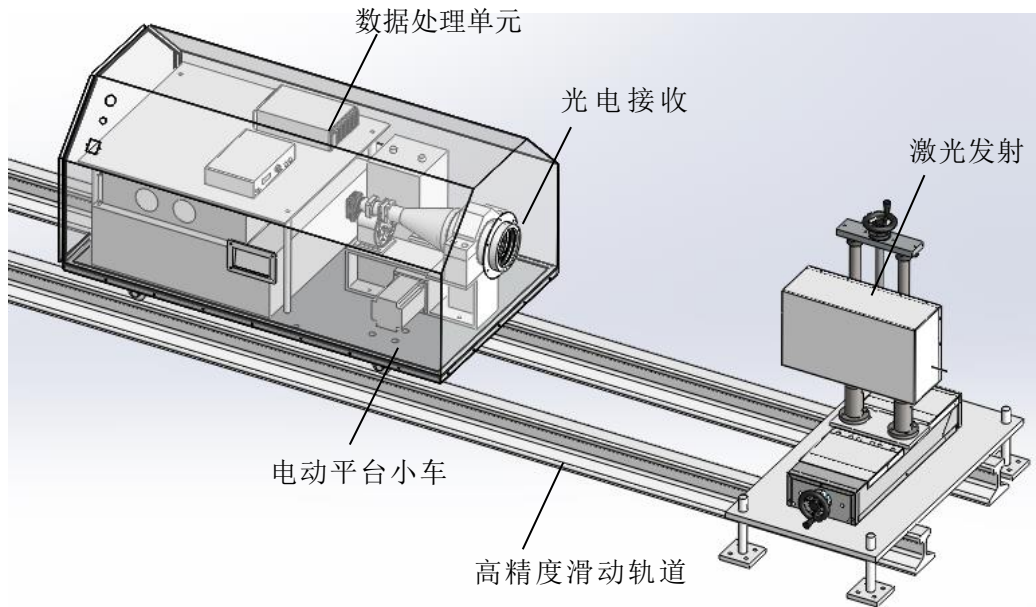


图 3.8 系统部件组成透视图

为了降低激光器能量波动的影响，该系统设计为一路分光进行动态监测的方法，将监测光束和测量光束分别由两个同型号探测器接收。激光器出射光束经过斩波器后分成两路，大部分出射后作用于工作大气，小部分反射后由透镜汇聚到探测器表面进行探测，探测器的输出信号接入锁相放大器中。锁相放大器的两路接入信号进行锁相差分，得出的结果为两个探测器探测到能量之差。

移动接收端包括安装底板、小车外罩、滚轮、齿轮、伺服电机、减速器、PLC、接近传感器、蓄电池和逆变器组成。伺服电机使用安川 SGMJV-08ADE6S, 750W 电机，伺服驱动器型号为安川 SGD5V-5R5A01B，减速器为直角减速器，PLC 型号为 IVC1-1006MAT，接近传感器为 LJ18A3-8-Z/BX NPN 常开，蓄电池为橙方 4830 锂电充电电池，逆变器为 YKDA-HT2000I (48/220) 逆变电源，

安装底板上放置光电接收单元和信号采集单元。移动接收端整体放置于导轨上，由 PLC 控制伺服电机运转，通过齿轮带动滚轮转动，从而控制小车的运动速度、往返次数和停留时间。根据接近传感器的信号，检测小车位置。小车运动过程中 X/Y 方向偏差极低，保证在整个测试过程中，接收探头始终处于有效接收光路中。

导轨由两根长 55m，间距 0.35m 高精度钢构组成，移动式接收端可在导轨上平顺移动。在导轨一侧每隔 5m 安装感应片，接近传感器和感应片组合的检测方式可以实现移动式接收端的精确定位。以接近传感器和感应片的安装误差 2mm 计算，当测量基线长度取 5m 时，安装误差所造成的基线长度偏差为 0.04%，且该偏差随着测量基线长度的增大逐渐减小。

移动式接收端通过无线网络连接控制室服务器。服务器设置移动式接收端系统参数，控制移动式接收端工作，监控其工作状态，收集并记录所测量数据。

系统工作流程如图 3.9 所示。

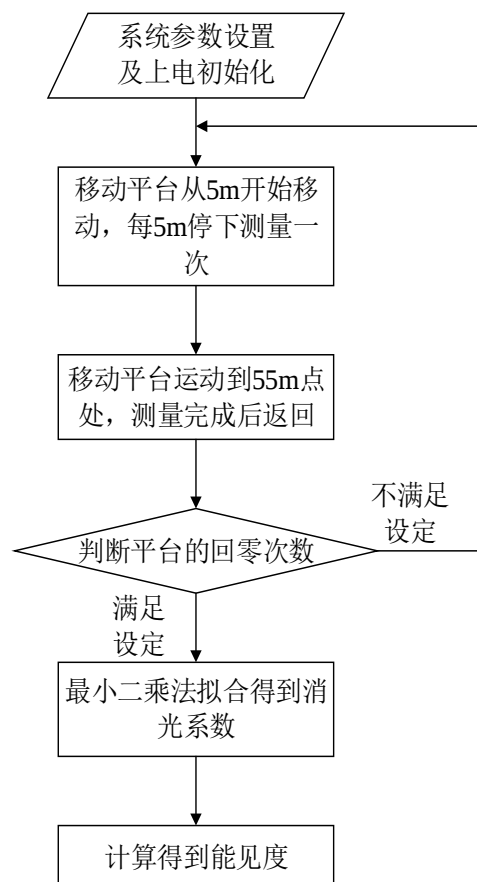


图 3.9 系统测量流程图

第4章 能见度仪测试模拟环境及其均匀性

气象仪器的测试包括自然大气条件下进行的动态测试以及恒定气象要素条件下的静态测试。李伟等⁶²认为在各类气象传感器的检定校准过程中，有必要在实验室模拟气象条件下，产生被测量恒定的气象要素条件，作为校准或检定点，对气象仪器或传感器进行静态测试。

为了缩短测试时间，测试仪器设备在极端气候下的性能和环境适应性，美、英等国建设了大规模的气候实验室，如1.3.2中所述。为了填补能见度传感器在静态测试环境的空白，在本人的参与下，本课题组研究开发了可用于透射式能见度仪和散射型能见度仪的大气环境模拟舱，用于快速模拟不同气溶胶种类，不同能见度大小的雾、霾、沙尘等低能见度环境。

在本章中，首先给出了能见度仪测试环境的系统概况，包括系统结构以及各组成单元的组成及功用；然后重点围绕能见度仪测试环境的均匀性和一致性问题，使用CFD流体力学模拟结果和舱内多点移动测量舱内大气消光系数两种方式，分析研究了舱内环境的均匀性和一致性，得到了相应的研究结论。

4.1 能见度仪测试模拟环境系统构成

4.1.1 整体结构

能见度仪测试模拟环境由大气环境模拟舱体、气溶胶发生子系统、供气循环子系统、监控子系统、供电子系统、给排水系统等部分组成。系统整体结构如图4.1所示，系统外观尺寸如图4.2所示。

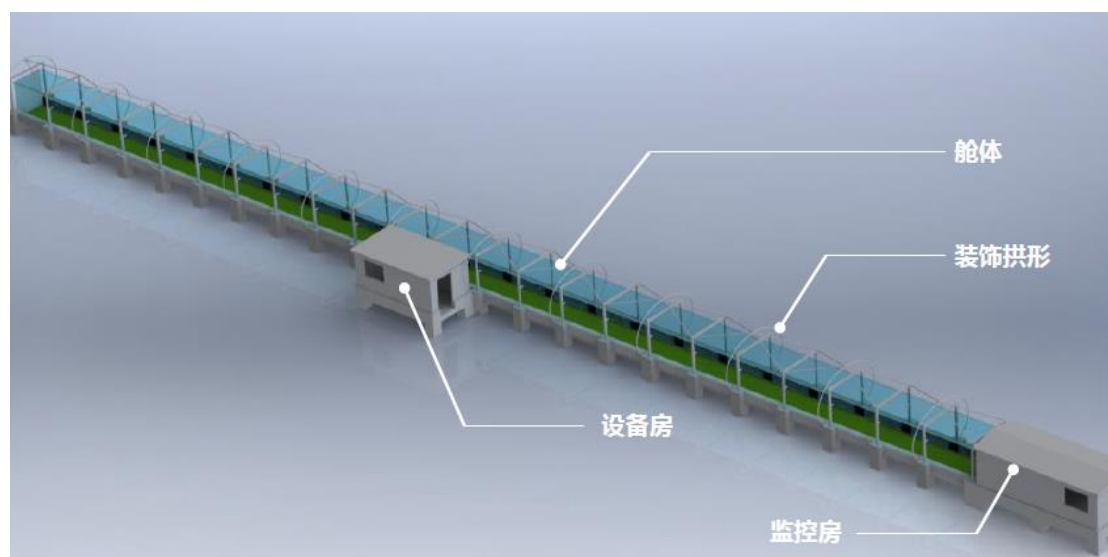


图4.1 能见度仪测试模拟环境系统整体结构

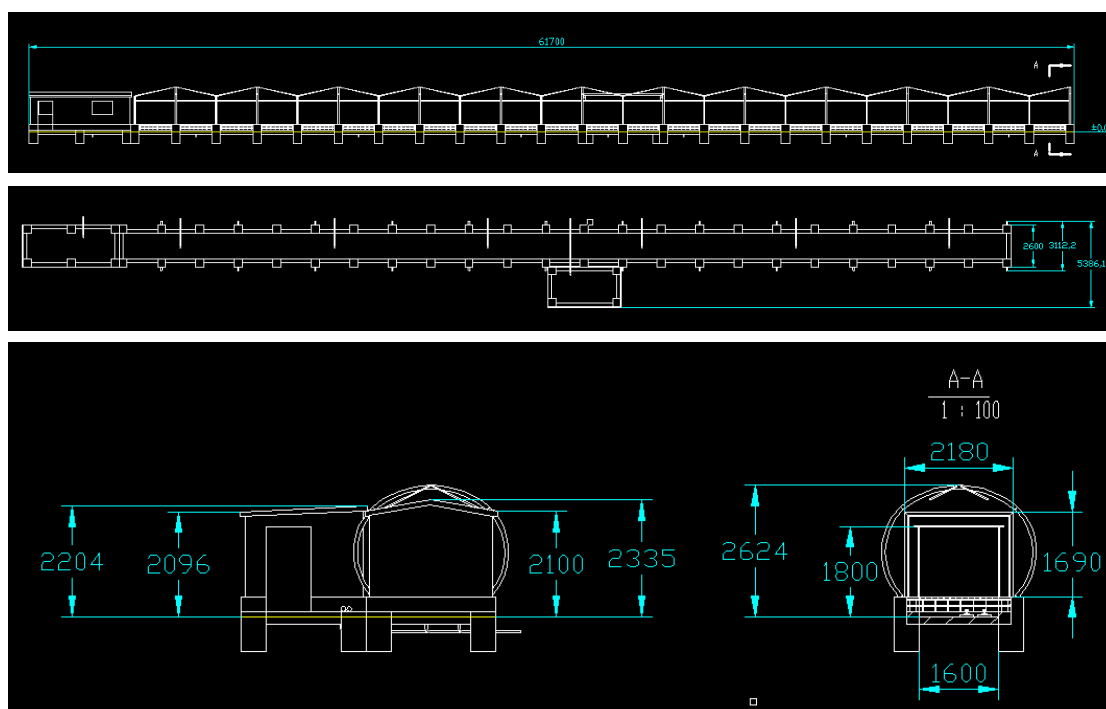


图 4.2 能见度仪测试模拟环境系统结构尺寸图

系统主体即大气环境模拟舱采用框架式长筒型结构，由夹胶钢化玻璃（厚度 $6\text{mm}+6\text{mm}$ ）搭建，舱体钢化玻璃总面积为 239.6m^2 ，可透射可见和近红外波段，可见波段透过率大于 90%，红外波段（ $780\text{nm}\sim 1000\text{nm}$ ）透过率大于 70%。较高的可见光波段透过率主要用于研究外部大气背景光亮度、灯光等对舱内能见度、跑道视程测量结果的影响。

舱体整体使用固定锚爪对钢化玻璃进行连接固定。舱体的立柱和横梁使用 200 型槽钢，立柱和横梁表面采用白色氟碳喷涂。舱体具备一定的强度和抵御一定的冲击力，以防止被物体损坏或强风破坏或地震破坏（基本风压： $0.50\text{KN}/\text{m}^2$ ，基本雪压： $0.40\text{KN}/\text{m}^2$ ）。模拟舱舱体外部实物照片如图 4.3 所示。



图 4.3 模拟舱舱体外部实物照片

舱体内部截面为长方形，高 1.69m，宽 1.6m，环境整体长 55.7m，可满足最长 50m 基线长度的大气透射仪测试使用。

舱体一侧设置三个 0.8m 宽可开启检修门，分别位于模拟舱 3m、38.2m、52.76m 处，用于进入舱体内部调试设备。舱体内部地面采用钢筋混凝土现场浇筑，使用高质量防腐室外地砖，地砖上表面涂绿色环氧地坪漆。通道内壁底部设有排水排污槽和排水口，在舱体内部各类管线均采用 PVR 管。模拟舱舱体内部实物图如图 4.4 所示。



图 4.4 模拟舱内部实物图

舱体外中部设有设备房，放置空气压缩机、气溶胶发生仪器及其他检测仪器。舱体一端设有超净控制室，控制室内部可对大气环境模拟舱进行环境监控和系统控制。舱体另一端设有大型轴流风机，风机开启时，轴向气流可对舱体内部空气进行整体换新。

4.1.2 气溶胶发生与供气循环子系统

气溶胶发生子系统主要由气溶胶设备房及其内部的气溶胶发生设备，以及延伸至整个大气模拟舱舱体的气溶胶供气循环系统组成。

气溶胶设备房为混凝土框架结构，混凝土桩基础。设备房内部长 4.6 米，宽 2.5 米。建筑高度为 2.476 米。墙体为夹芯结构，外檐为铝塑板+保温棉+石膏板。设备房内装有冷暖空调一台，设备配电及用电插座若干。设备房活荷载标准值为 7.0 KN/m^2 ，吊挂荷载 1.2 KN/m^2 。结构安全等级为二级。

设备房内主要安装使用的设备有：气源系统（包括空气压缩机、储气罐、干燥机与三级过滤器）、粉尘气溶胶发生器（德国 TOPAS 公司 SAG-410L）、黑碳气溶胶发生器（瑞士 Jingcast 公司 Jingcast 5201A）、雾化气溶胶发生器（德

国 TOPAS 公司 ATM-241)、气溶胶静电中和器(德国 TOPAS 公司 EAN-581)。另有设备粉尘仪(美国 TSI 公司 DUSTTRAK II 8530)和粒径谱仪(德国 Grimm 公司 Grimm 1.109)放置于大气模拟舱舱体内。气溶胶设备安装房示意图及气溶胶设备如图 4.5 所示。气溶胶设备房内部实物图如图 4.6 所示。气源系统可提供的最大空气量为 $90\text{ m}^3/\text{h}$, 由空气压缩机将各类气溶胶发生器发出的气溶胶粒子通过 PVR 管道注入模拟舱内, 在舱内生成低能见度环境。

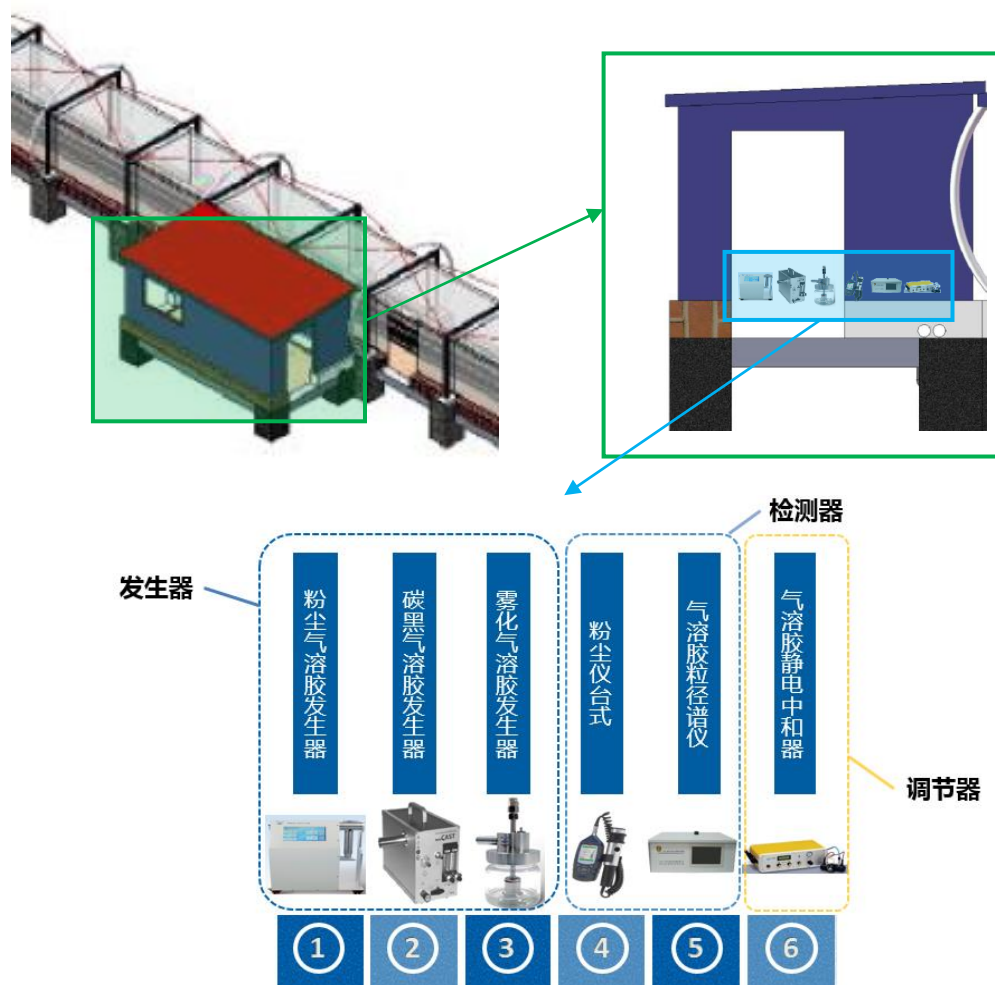


图 4.5 气溶胶设备房及其内部设备示意图



图 4.6 气溶胶发生室内部实物图

空气压缩机将气溶胶发生器产生的气溶胶粒子注入大气模拟舱体内。模拟舱舱体内部一侧设置 10 台扰流风扇，进行连续吹扫，在舱内形成局部乱流以保证舱内空气的气溶胶尽可能混合均匀，舱体内部气流均匀混合的设计准备时间小于 30 分钟（以粉尘仪在模拟仓前、中、后三点测试，读数差别小于 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 为截止）。压缩气体输运及舱体气体循环系统示意图见图 4.7。所有气流管道均由电磁阀控制，可远程开启和关断，便于实现多种循环工作方式。

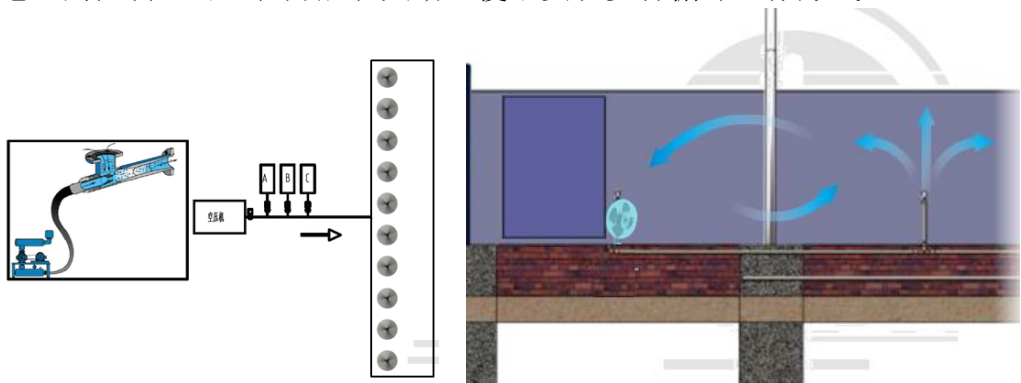


图 4.7 压缩气体输运及舱体气体循环系统示意图

在保证舱体内气溶胶混合均匀的前提下，舱体内风速可控范围为 $0\sim 5\text{m/s}$ ，风速 5m/s 用于清除内部空气，并用于舱体内部喷水清洁后的风干。舱体设置有排气口，排气口处设置防雨百叶、高效过滤器及电动调节风阀等。

4.1.3 其他辅助子系统

1. 监控子系统

大气模拟舱一端与一个监控室严密连接。监控室内采用固定结构，内部长6m，宽2.6m，配备冷暖空调一台。室内放置服务器、工控PC机、系统状态显示器。监控室外观图如图4.8所示。

大气模拟舱内部两端各放置一台摄像头，用于监测舱体内空气能见度变化情况；摄像头型号为沃仕达百万高清无线监控摄像头，配16G TF卡并使用无线传输模式。



图 4.8 监控房外观图

2. 供电子系统

能见度仪测试模拟环境整体接入50KW的电缆，以满足大气模拟舱、设备安装房、供气循环系统、监控房、标定系统、清洁排水系统、监控系统和控制系统的供电需要，同时满足大风量风机的运转需要。

供电系统设置总配电箱一个，分配电箱（设备间、监控室、玻璃舱、照明）4个，敷设动力电缆、电源线、防水插座（220/380V）。

3. 清洁排水子系统

大气模拟舱清洁给水排水系统用于对舱体外部进行清洁。舱体内部设置多个龙头并配备喷水管，用于清洗舱体内表面粘附的气溶胶。清洁排水子系统能够迅速、及时地将外部喷淋系统和内部清洗系统排出的污水由重力作用排到下水管渠。下水管渠能够拦阻下水中的大块固体物，加溢流设施排除，溢流排

水不危及大气模拟舱的建筑安全。排水系统安装 DN100 舱内地漏 6 个,制作露天排水沟。

4.2 能见度仪测试模拟环境均匀性分析

能见度仪测试模拟环境内的均匀性、一致性对于能见度仪的比对、测试具有重要意义。由于前向散射仪的采样空间远小于大气透射仪,模拟舱内环境的均匀性是进行前向散射仪性能评估位置设置及采样空间选择的关键。特别是前向散射式能见度仪与大气透射仪的采样空间差别较大,如何使用大气模拟舱内的采样空间,选取具有可比性的能见度仪安装点是需要进行深入研究的问题。

由于舱内气溶胶颗粒的运动及扩散特性直接影响到舱内环境的均匀性,因此,研究舱内环境的均匀性问题,就必须研究舱内气溶胶在湍流中的气粒两相流输运问题。

当前关于室内气溶胶颗粒的扩散研究多以评价室内空气质量 (Indoor air quality, IAQ) 为研究目标,以生物气溶胶 (植物纤维、花粉等植物性气溶胶和微生物、细菌、病毒等动物性气溶胶) 及呼吸、咳嗽、喷嚏、抽烟、烹饪等产生的气溶胶为研究对象⁶³⁻⁶⁵。

为了在模拟舱内模拟自然大气低能见度环境,舱体内主要以盐类、粉尘和黑碳等气溶胶发生器为舱内气溶胶源,然而在现有研究中,专门以盐类、粉尘及黑碳气溶胶等室外常见气溶胶在室内的扩散特性的研究较少。Johnson 等⁶⁶和 Zhao 等⁶⁷以气溶胶渗透为主要研究过程,对来自工业、交通运输排放的室外气溶胶通过门窗、通风及空调设施等进入室内环境的渗透进行了部分研究工作。

对于室内气溶胶颗粒的运动和分布的研究方法有理论分析法和实验分析法。理论分析法包括集总参数模型法、多区域模型法和基于计算流体力学模拟的方法等。由于气溶胶粒子悬浮在空中,其传输和分布是与气流及湍流的运动密切相关的,基于计算流体力学模拟法成为当前室内气溶胶颗粒运动及分布的主要方法。

计算流体力学模拟通过计算室内颗粒的分布情况或者其运动轨迹,基于 CFD 流体力学仿真,获得颗粒运动的详细轨迹或颗粒浓度的详细分布情况⁶⁸,主要有拉格朗日方法和欧拉方法两种。欧拉方法将气溶胶粒子按照连续相进行处理,在控制体积的基础上,以类似流体相的形式组成守恒方程;拉格朗日方法将粒子按照离散相处理,该方法追踪每一个粒子的运动轨迹。

对于不同的室内环境特点,欧拉方法或拉格朗日方法模拟的效果有所不同。Zhang 等⁶⁹在同一流场环境对比了两种方法,由于对气溶胶颗粒和湍流的处理方式不同,两种方法在环境不稳定时模拟结果有较大偏差。为了模拟气溶胶颗

粒在湍流中的扩散和沉降，欧拉方法和朗格朗日方法与雷诺时均 N-S 方程（RANS）模型、大涡模拟（LES）、分离涡模拟（DES）模型得到了交叉应用^{70,71}。Sajjadi 等⁷²使用晶格玻尔兹曼法，与 LES 和 RANS 模型共同使用，与实验数据的对比表明模拟取得了良好的一致性。由于数值模拟气溶胶颗粒运动需要消耗较多的运算时间，Chen 等⁷³提出了使用马尔科夫链模型预测模拟粒子浓度分布的趋势，取得了比拉格朗日方法和欧拉方法都更加快速的模拟效果。

关于室内或舱体的通风策略的研究，如风口位置、送风量、新风率，模型的准确性直接关系到模拟结果的准确性和合理性。

另外，使用实验手段，通过采用不同的仪器对室内颗粒的质量浓度、数量浓度、沉降、粒径分布、空间分布、舱内外颗粒浓度比等进行测量，了解舱内气溶胶粒子运动和分布的规律。

虽然室内气溶胶粒子运动和扩散的各种模型和模拟方法得到了一定的研究和应用，然而模拟效果与实验数据的一致性才是检验适合不同模拟是否准确的最终标准。本节主要使用了流体力学模拟及舱内的多点移动测量消光系数实验两种方法，通过计算机模拟和舱内实验结果均验证了舱内的模拟环境的均匀性和一致性。

4.2.1 基于流体力学模拟的均匀性分析

使用计算流体力学软件 Fluent 对舱内环境进行计算流体力学模拟，首先需要对能见度仪测试模拟环境特别是大气模拟舱舱体进行建模。舱体的长宽尺寸及出入口示意图如图 4.9 所示。

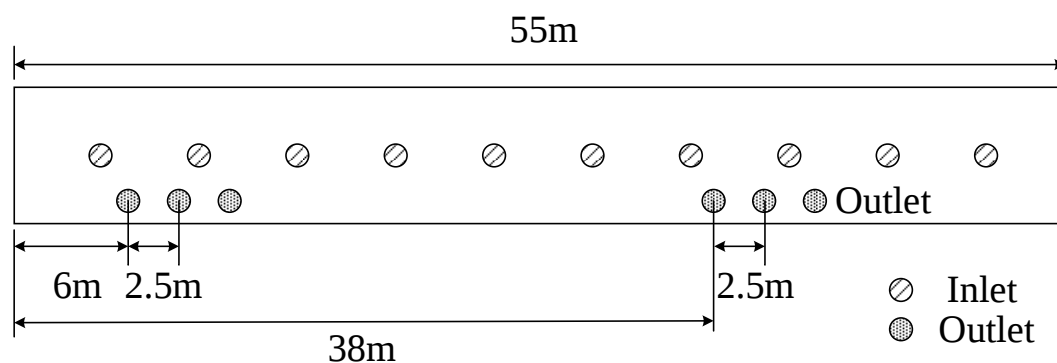


图 4.9 舱体出入口示意图

使用 CFD 进行计算流体力学模拟的大气模拟舱截面积为 $1.6\text{m} \times 1.8\text{m}$ ，总长度 55m 。舱体侧面设置有 10 个气溶胶入口和 6 个出气口，注入口和出气口设置于模拟舱的同侧。气溶胶入口的间隔为 5m ，气溶胶入口中心距离舱体地面的高度为 0.9m ，注入口直径为 25mm 。6 个出气口共分为两组，每组分为 3 个出口；第一组第一个出口距离舱体起始端 6m ，第二组的第一个出口距离舱体起始端 38m 。舱体出口的下端距离地面 10cm ，出气口直径为 12cm 。

舱体下部在气溶胶注入口和出气口的对侧设置有 10 组交流风扇与通风管道，风扇直径为 20cm，通风管道大小为 23cm×23cm。每个风扇在墙壁内部与通风管道直接相连，风扇与通风管道在模拟舱底部形成局部循环风。第一组风扇距离舱体起始端为 7.25m，风扇中心与通风管道中心距离 1m，两组风扇中心距离 5m，风扇中心距离地面 19cm。风扇的风速为 2500r/min，风量为 12m³/min。风扇与通风管道配置及布局示意图如图 4.10 所示。

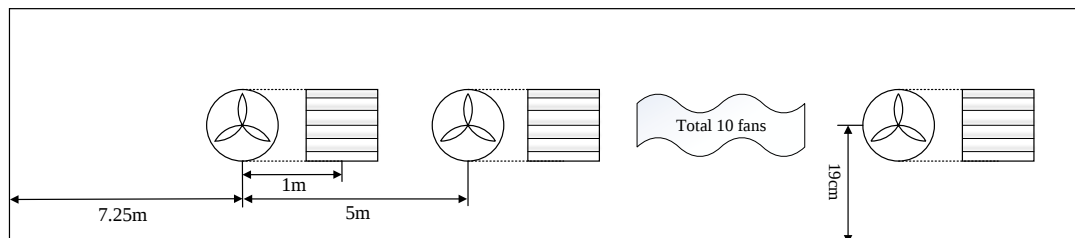


图 4.10 风扇与通风管道配置及布局示意图

使用 CFD 计算流体力学对舱体内气溶胶粒子的流速和粒子轨迹进行模拟时，首先使用 Gambit 软件生成舱体的几何和四面体网格，使用 Fluent 软件包对 N-S 方程进行计算实现。气溶胶注入口的气溶胶粒子直径按照 1μm 计算，喷入速度设置为 0.1m³/min，气溶胶粒子浓度设置为 108P/cm³。在大气模拟舱内建立坐标系如图 4.11 所示。

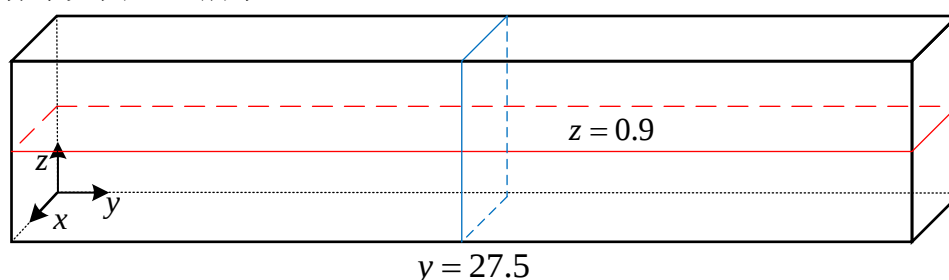
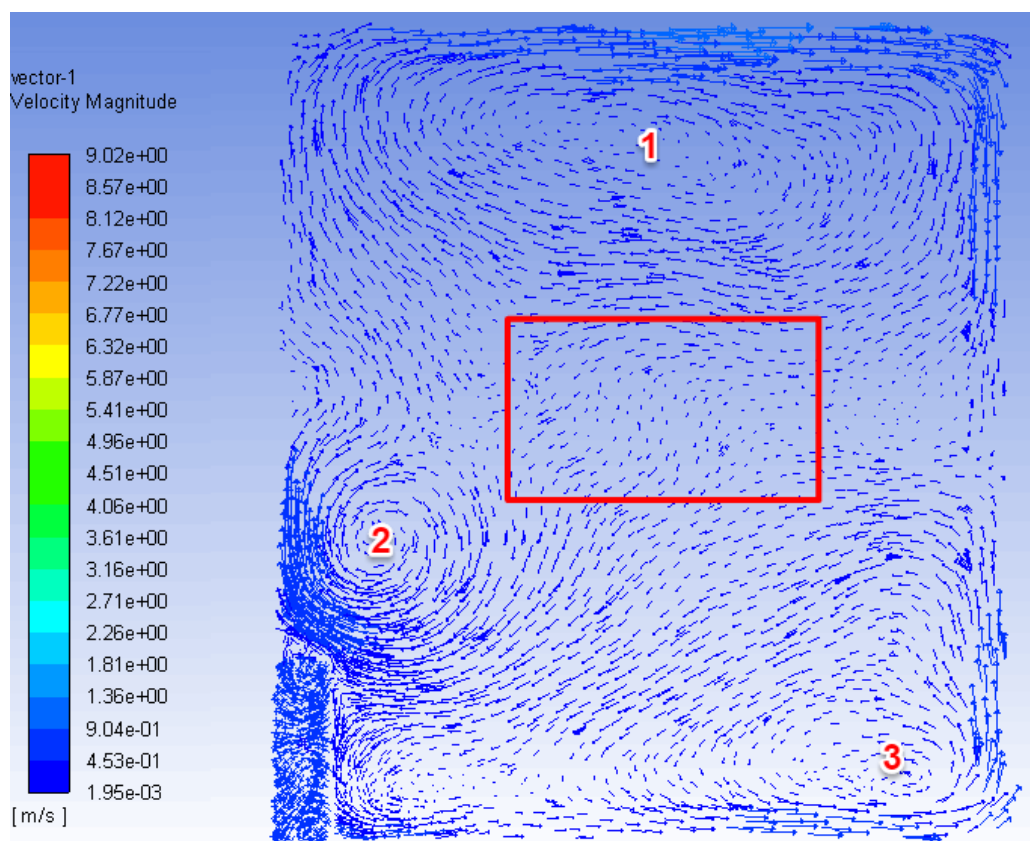


图 4.11 大气模拟舱内坐标系（单位：m）

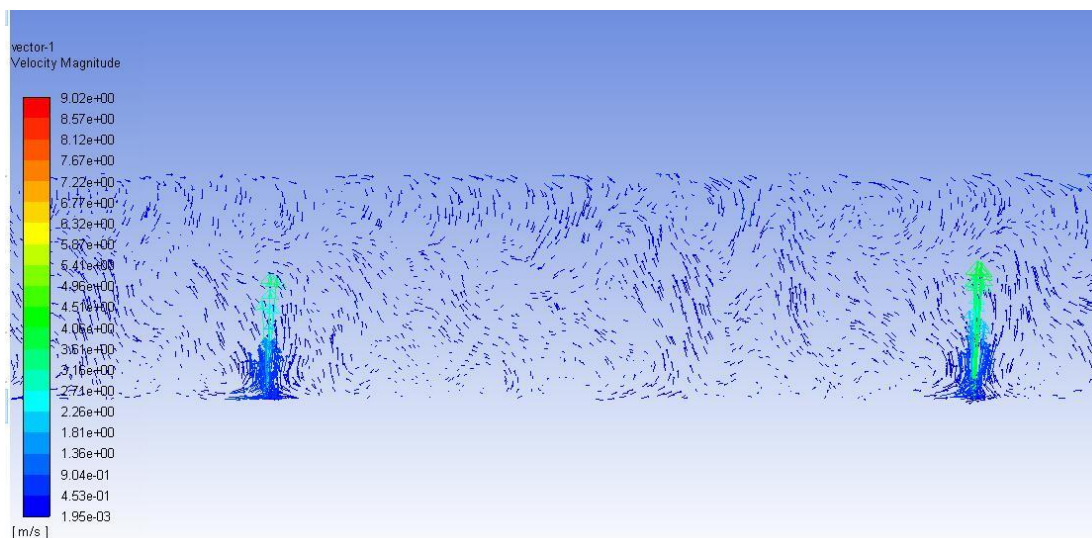
根据 Fluent 的模拟结果，为了找到舱内空间中的气流相对均匀区域，选取 $y = 27.5m$ 和 $z = 0.9m$ 两个平面进行流场分析。其中， $y = 27.5m$ 平面的流场图如图 4.12 所示。

图 4.12 平面 $y = 27.5\text{ m}$ 处的流场分布

由于气溶胶注入口和舱内扰流风扇的共同作用，在舱内平面 $y = 27.5\text{ m}$ 中共有 3 处涡旋，为了便于描述，分别以 1、2 和 3 命名。涡旋 1、2、3 的位置如图 4.12 所示。从图中可以看到，涡旋 1、3 的直径大于涡旋 2。涡旋 1 和 2 呈顺时针旋转，且转速更快，涡旋 3 呈逆时针旋转，转速最慢。最大流速区位于涡旋 2 的左下部。流速相对均匀的空间区域的坐标为：

$$\begin{cases} x = 0.4 \sim 1.2\text{ m} \\ z = 0.7 \sim 1.1\text{ m} \end{cases} \quad (4.1)$$

平面 $z = 0.9\text{ m}$ 的流场图如图 4.13 所示。可以看到，该平面流场的最突出的特点在气溶胶注入口处，流速从 3 m/s 快速下降到约 0.5 m/s 。在两个气溶胶注入口中间没有明显的流场变化。

图 4.13 平面 $z = 0.9m$ 的流场图

由图 4.12 和图 4.13 可以看到，在大气模拟舱中，空间内流场相对均匀的区域坐标为：

$$\begin{cases} x = 0.4 \sim 1.2 \text{ m} \\ y = 2.5 + n \cdot 5 \text{ (} n = 0, 1, 2, \dots, 10 \text{)} \text{ m} \\ z = 0.7 \sim 1.1 \text{ m} \end{cases} \quad (4.2)$$

因此，式(4.2)所表示的区域即为计算机流体力学模拟所得到的舱内气溶胶环境相对均匀的区域。可以考虑在进行能见度仪对比测试时，将前向散射仪的采用空间放置于式(4.2)所描述的区域中。

4.2.2 基于消光系数水平分布的均匀性分析

由于大气模拟舱主要用于对能见度仪进行测试、检定，消光系数是大气透射仪、前向散射仪等能见度仪测量能见度的关键物理量，因此对舱内气溶胶环境均匀性的要求本质上是对舱内消光系数分布均匀性的要求。本节使用舱内的多点移动测量系统，在舱内测量不同位置处的消光系数，根据多点不同位置处的消光系数差异评估舱内能见度环境的水平分布，特别是消光系数的水平分布均匀情况，从而判断舱内消光系数的分布均匀性。

依据 3.1.1 中的测量方法，在实验过程中，当激光发射单元发射出激光束后，通过控制移动平台在轨道上移动，搭载在移动平台上的光电接收单元可获得不同距离的激光衰减信号，经过数据采集和处理，并使用整体最小二乘法进行多点拟合，可以得到此刻的大气透过率。使用多点测量小车按照单程 50m 的移动距离，整体往返 2 次，从而在舱内同一点处的不同时刻分别测量得到 4 次透过率值，对于同一点处多次大气透过率值拟合结果的单位权方差进行分析，并比较多点之间测量结果的差异，进而评价各测量点测量结果的大气透过率测量稳

定度和一致性。

在一次能见度环境模拟舱内进行的连续 5 小时的测量实验中，整个实验过程中舱内的温度保持相对恒定，气压在 60min 内由 1014hPa 增加到 1016hPa，并保持稳定直至实验结束。由于舱内主要注入的气溶胶粒子，并未使用雾化超声波起雾器，因此在 5 小时的连续实验中，相对湿度变化缓慢，随气溶胶的注入由 42% 缓慢升高到 63%。移动测试平台以 0.4m/s 的速度从 5m 处到 45m 处往返测量，每 5 米为一个测量间隔，每一个测量定位点停留 3s 且每往返 2 次（约 10min）的测量结果作一次数据拟合。可以看到，随着舱内气溶胶浓度的增加，消光系数逐渐增大，能见度逐渐降低，整个测量过程中舱内 MOR 及消光系数稳定变化，变化过程如图 4.14 所示。

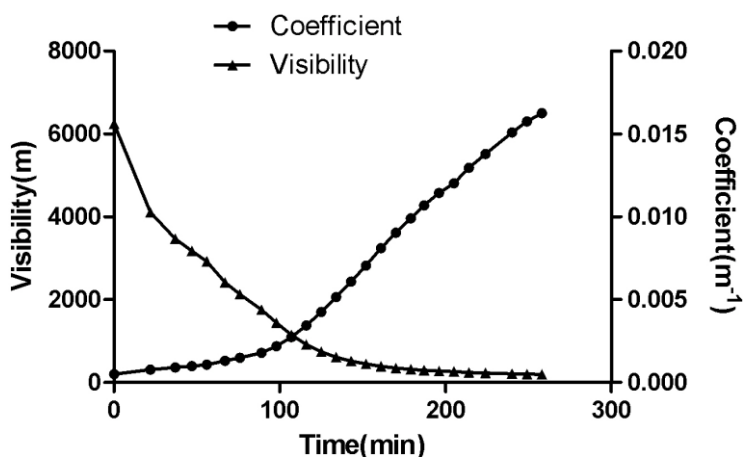


图 4.14 一次实验过程的消光系数和 MOR 变化情况

如图 4.15 为舱内大气透过率的对数 $\ln \tau$ 随基线长度 r 的变化，图中虚线是各个测量点 4 次测量的平均值的连线，实线为整体最小二乘拟合出的直线，其斜率即为消光系数。

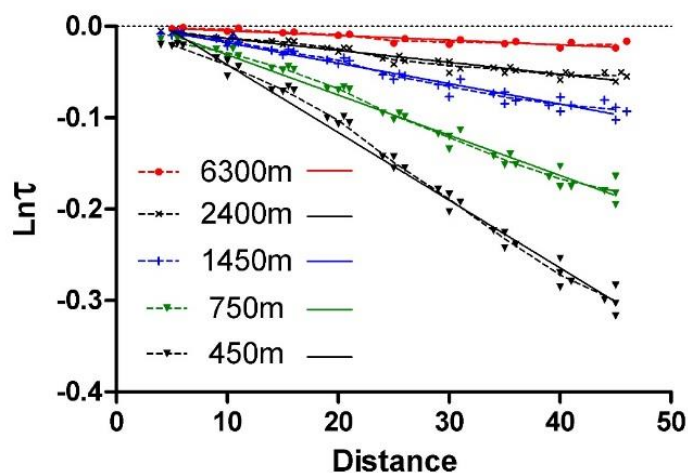


图 4.15 5 次能见度拟合测量结果

从图 4.15 可以看出, 在高能见度条件下, 舱内大气透过率测量结果的离散程度比较小, 最小二乘法拟合的结果与平均值的偏差不大。随着舱内的能见度逐渐降低, 大气透过率测量结果离散程度增大, 最小二乘法拟合的结果与平均值的偏差在增大。大气透过率测量的离散性可以用单位权方差来衡量, 最小二乘法的拟合效果由确定系数来表征。在各种能见度条件下的单位权方差和确定系数见表 4.1。

表 4.1 不同能见度条件下的系统确定系数和单位权方差

Visibility (m)		Unit weight variance (10^{-4})	Coefficient of determination
Above	6300	1.34	0.8552
	4120	4.37	0.8927
	3000	3491	0.9194
3000- 2000	3200	4.67	0.9291
	2920	3.89	0.9492
	2400	3.89	0.9395
	2131	4.22	0.9699
	1763	5.47	0.9739
2000- 1000	1450	11.4	0.9648
	1159	18.84	0.9619
	921	15.37	0.9811
1000- 500	750	22.32	0.9818
	622	21.57	0.9885
	525	37.34	0.9863
	450	46.73	0.9872
Below	350	49.54	0.9907
500	245	115.6	0.9897
	195	223.5	0.9885

从表 4.1 可以看出, 当大气环境模拟舱内能见度大于 2000m 时, 单位权方差均小于 5×10^{-4} , 这表明在高能见度条件下, 大气透过率测量结果的聚集度较好, 但此时确定系数均小于 0.97, 甚至在能见度大于 4000m 时, 确定系数小于 0.9, 最小二乘法拟合出的效果稍差, 说明在高能见度条件下, MVM 方法在模

拟舱内各点测量的消光系数和能见度的稳定度较好，但各点之间的消光系数差异稍大。当模拟舱内环境从能见度 2000m 开始下降时，单位权方差在逐渐增大，这与舱内大气透过率的迅速减小与消光系数的迅速增大有关，仅从单位权方差无法表征该方法及系统的测量性能，而确定系数呈现稳定增长的趋势，当能见度从 1000m 开始下降时，确定系数始终维持的 0.98 以上，甚至在 349m 能见度时，出现了 0.99 高确定系数，表明大气模拟舱实验室内不同位置处的消光系数差异变小，模拟舱内的消光系数水平分布具有良好的一致性，同时也说明了 MVM 方法及系统的测量具有较高的稳定度。

同时，由表 4.1 可以看到，拟合的单位权方差评价了在各个测量点测量值的稳定度，数据的离散性很小，说明了小车的移动对舱内大气的影响有限，否则小车在往返过程中测量的透过率会变化很大。

总体说来，在模拟舱内高能见度时较小的单位权方差，以及模拟舱内低能见度时较高的确定系数，均表明了大气环境模拟舱较好的消光系数纵向分布及 MVM 方法及系统较高的测量稳定度。测试模拟环境和 MVM 系统可用于能见度仪的测试、评价工作。

第 5 章 模拟环境下的能见度仪对比实验

5.1 大气模拟舱环境

5.1.1 实验环境条件

本节记录了大气环境模拟舱内的一次实验过程中，模拟舱实验环境条件的变化情况。该次实验过程持续约 5 小时，在实验中始终使用 ATM241 气溶胶发生器向舱内注入气溶胶粒子，观测到舱内的 MOR 从 6200m 不断降低直到 190m 后稳定较长时间。

本实验过程中使用气溶胶粒径谱仪每 5 分钟测量一次舱内的气溶胶分布。多点移动式测量系统在整个实验过程中在舱内往返移动，平台的运动速度设置为 0.4m/s。移动平台往返两次大约需要 10min 的时间，在这段时间内，我们可以认为舱内的气溶胶浓度和粒径分布是一致的。因此，大气透过率在每个 5m 处会被测量 4 次。在整个实验中，舱内的温度和气压保持相对稳定的状态。相对湿度有所增加，舱内的温度和相对湿度的变化如图 5.1 所示。

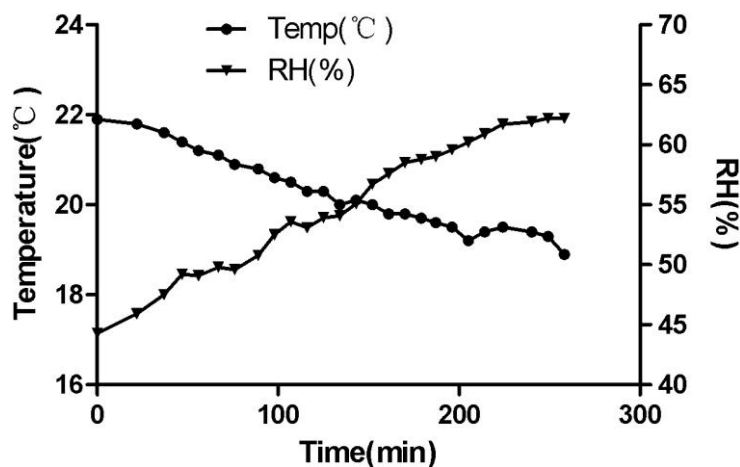


图 5.1 舱内温度湿度在实验过程中的变化

5.1.2 气溶胶粒子浓度及分布

在模拟舱内的整个试验过程中，使用 DUSTTRAK II 8530 型激光粉尘仪记录舱内不同位置点处的气溶胶粒子浓度，使用 Grimm 1.109 型粒径谱仪记录舱内的气溶胶粒径分布。根据气溶胶粒径分布测量结果得到舱内气溶胶粒子尺寸分别为 $0.5\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ 、 $2.5\mu\text{m}$ 中的气溶胶粒子数随时间的变化关系如图 5.2

所示。

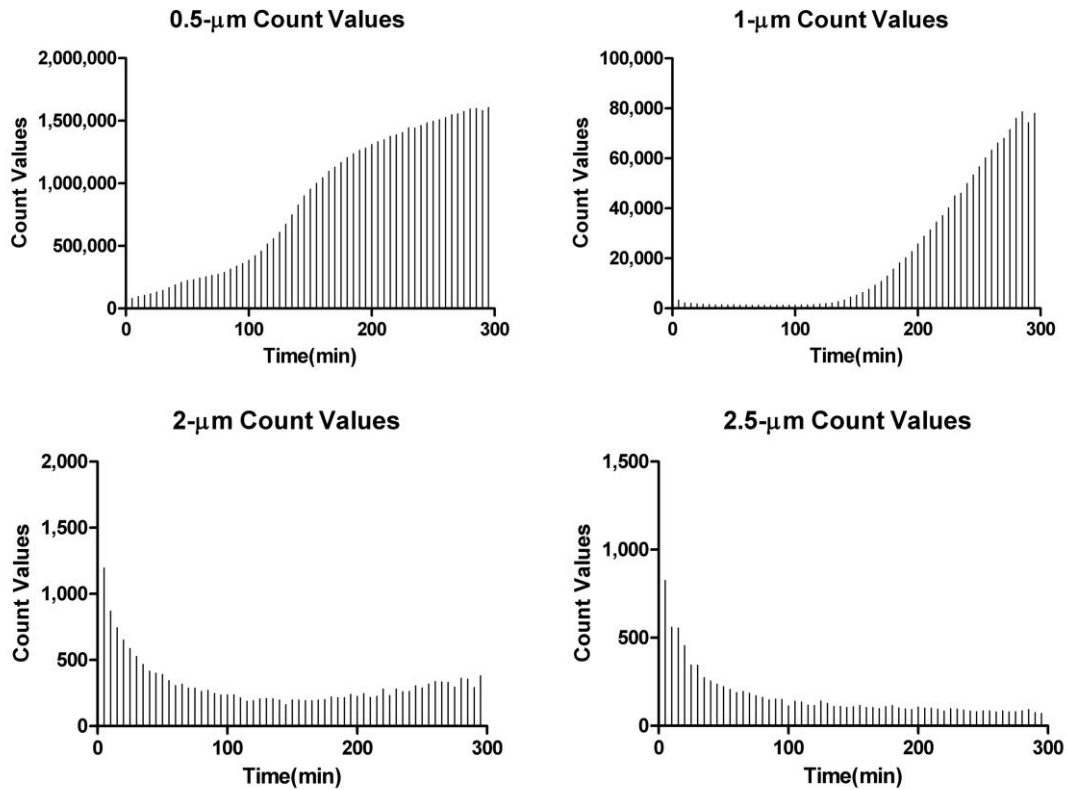


图 5.2 模拟舱气溶胶粒子数随时间的变化关系

由图 5.2 可以看到，由于实验过程所使用的 TOPAS ATM-241 气溶胶发生器所产生的气溶胶粒子小于 $1\mu\text{m}$ ，所以整个模拟舱内的 $0.5\mu\text{m}$ 气溶胶粒子数量在持续增加， $1\mu\text{m}$ 大小的气溶胶粒子数量在开始阶段基本保持不变，在实验后半段开始增加，考虑主要与模拟舱内小粒子的数量增加，粒子之间的碰并增长有关。与 $0.5\mu\text{m}$ 和 $1\mu\text{m}$ 的小粒子相比，较大一些的 $2\mu\text{m}$ 与 $2.5\mu\text{m}$ 气溶胶粒子在整个实验过程中均变化较小。

图 5.3 显示了整个实验过程中，不同能见度条件下模拟舱内的气溶胶粒径分布情况，纵坐标表示粒子数量，横坐标使用对数坐标系表示气溶胶粒径大小。

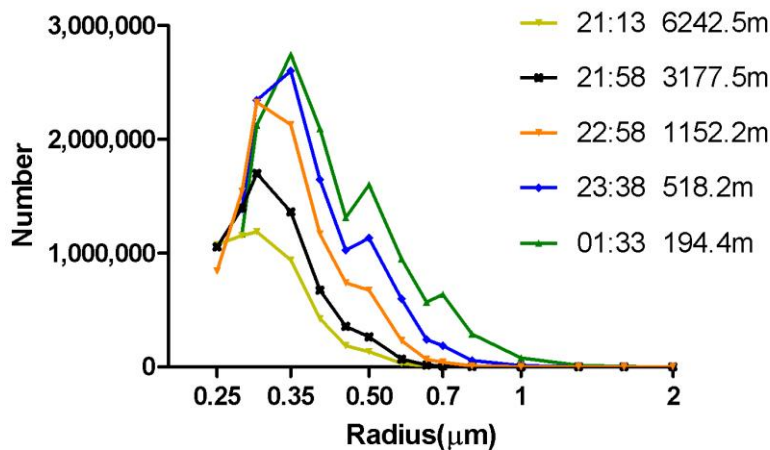


图 5.3 模拟舱内不同能见度下的粒径分布

由图 5.3 可以看到，随着气溶胶发生器向模拟舱内注入气溶胶粒子，模拟舱内的能见度在降低的同时粒子数量在不断增加，但不同粒径大小的气溶胶粒子的增长比例是不一样的。随着模拟舱内粒子数量的增加，气溶胶的峰值粒径存在增大的趋势，且存在由单峰粒径分布向多峰粒径分布转化的趋势，在 $0.35\ \mu\text{m}$ 、 $0.5\ \mu\text{m}$ 和 $0.7\ \mu\text{m}$ 多个粒径处开始出现粒径峰值。

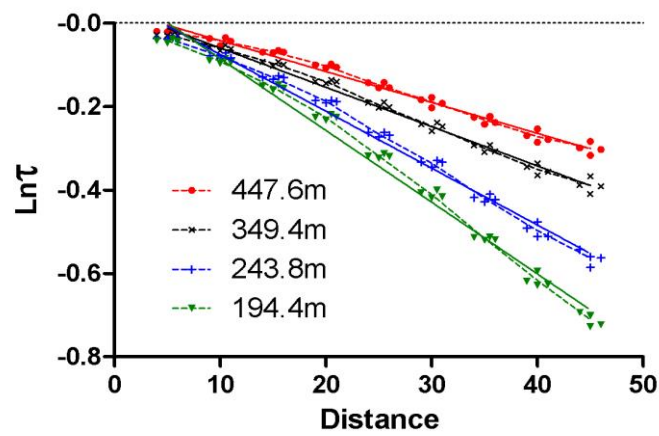
5.2 舱内能见度的多点移动测量与计算

在本次实验过程中，移动测量平台每 10 分钟往返两次，从而在每一个固定测量点处测量得到 4 个大气透过率值。由于数据较多和篇幅限制，本节就不再详细罗列，表 5.1 中列出了当移动平台测量得到舱内能见度降至 194.4m 时，移动平台在每一个固定测量点处所测量的 4 次大气透过率。其他能见度条件下的大气透过率测量数据记录情况与表 5.1 类似。

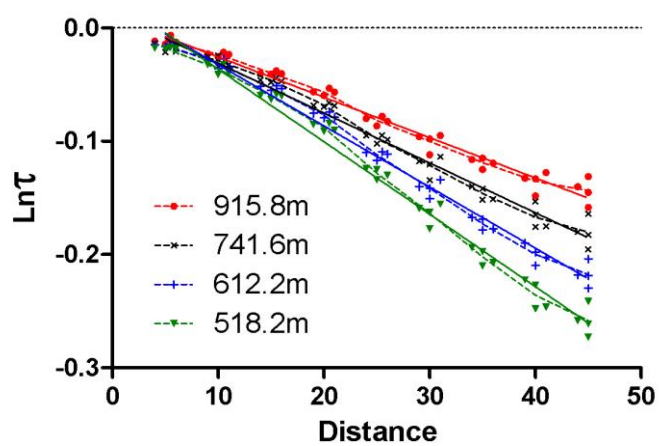
在实验过程中，将能见度降低的整个过程的大气透过率都记录下来，将不同基线处的大气透过率对数并与基线长度绘制拟合曲线。大气透过率对数与基线的关系如图 5.2 所示。

表 5.1 能见度为 194.4m 时的大气透过率

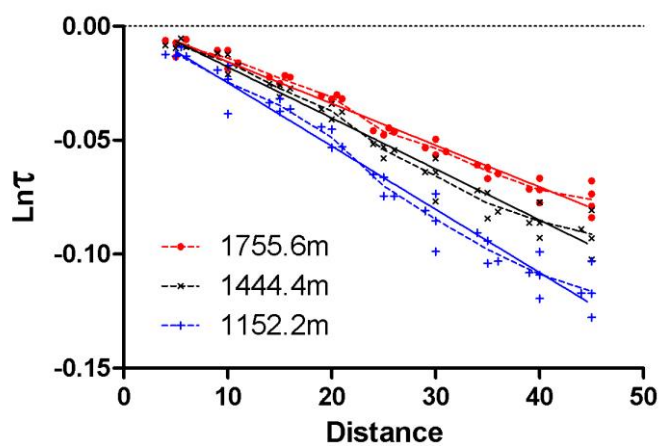
基线长度 (<i>m</i>)	5	10	15	20	25
第 1 次去	0.953188	0.909844	0.852437	0.79214	0.726257
第 1 次返	0.95307	0.91396	0.862336	0.802784	0.731245
第 2 次去	0.957578	0.919013	0.854994	0.797339	0.723679
第 2 次返	0.959144	0.907882	0.860667	0.797649	0.72673
基线长度 (<i>m</i>)	30	35	40	45	
第 1 次去	0.657677	0.59449	0.533423	0.485263	
第 1 次返	0.670147	0.598608	0.551431	0.499807	
第 2 次去	0.659275	0.595256	0.538373	0.483031	
第 2 次返	0.665446	0.598381	0.534978	0.496242	



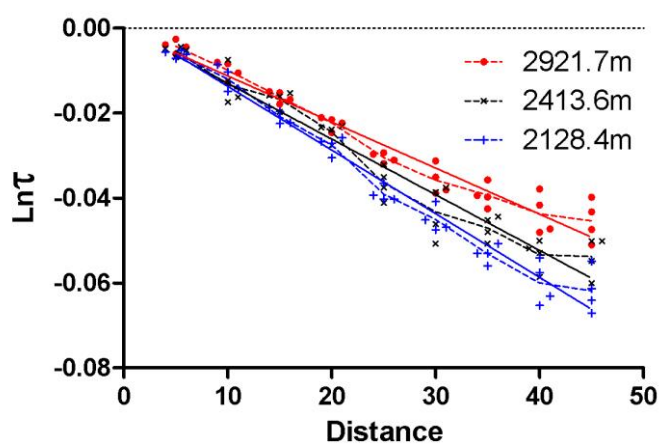
(a)



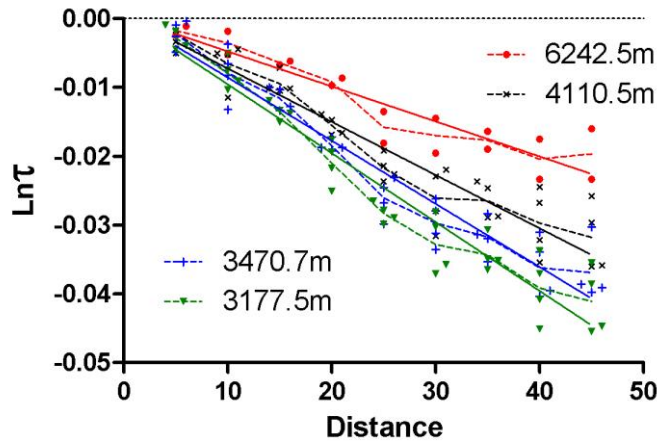
(b)



(c)



(d)



(e)

图 5.4 不同基线处大气透过率对数与能见度的关系曲线图

在图 5.4 中,不同颜色的点代表当移动接收端在固定测量点处测量得到的大气透过率,虚线代表移动接收端在该固定测量点多次测量的平均值,相应颜色的直线由最小二乘法拟合得到,直线的斜率代表了在该次测量过程得到的消光系数,进而代表不同的能见度值,能见度值使用 Koschmieder 定律进行计算。图 5.4 (a)、图 5.4 (b)、图 5.4 (c)、图 5.4 (d) 和图 5.4 (e) 分别为舱内测量能见度范围在 190m~500m、500m~1000m、1000m~2000m、2000m~3000m 以及 3000m 以上的 5 种不同的能见度范围的测量结果。

5.3 舱内能见度的测量对比分析

5.3.1 多点移动式与大气透射式测量方法对比

由于多点移动式测量系统测量大气透过率和消光系数的测量原理与其他能见度仪的测量原理不同,因此使用不同的硬件系统直接进行能见度测量比较时,难以获得具有可比性的测量结果,从而难以实现对多点移动式测量方法及系统的直接验证。因此,本节中首先使用多点移动式测量系统本身,对其同时采用多点移动式方法和大气透射式两种方法处理测量结果,即使用式(3.19)计算 50m 基线长度的大气透过率、消光系数及 MOR,并将其与使用式(3.14)的计算结果进行比较,以判断多点移动式测量系统的测量准确性。

实验过程为在大气模拟舱中注入由 ATM-241 型气溶胶发生器生成的气溶胶粒子,模拟大气能见度环境从高到低和从低到高的两个变化过程,同时使用多点移动式测量系统测量和记录数据。实验结果如图 5.5 和图 5.6 所示。

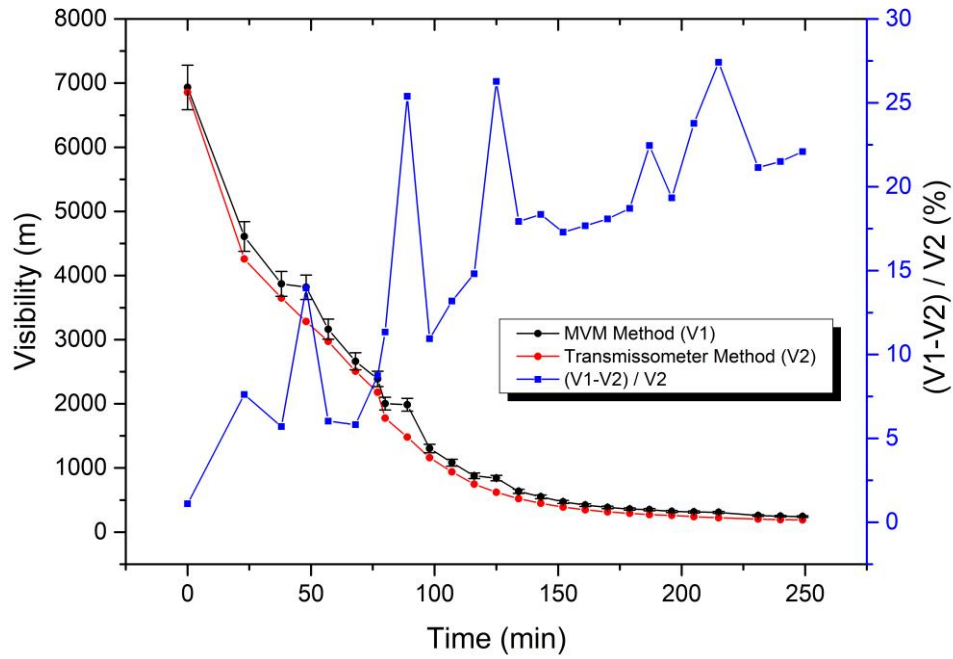


图 5.5 模拟舱内能见度由高到低变化的比对结果

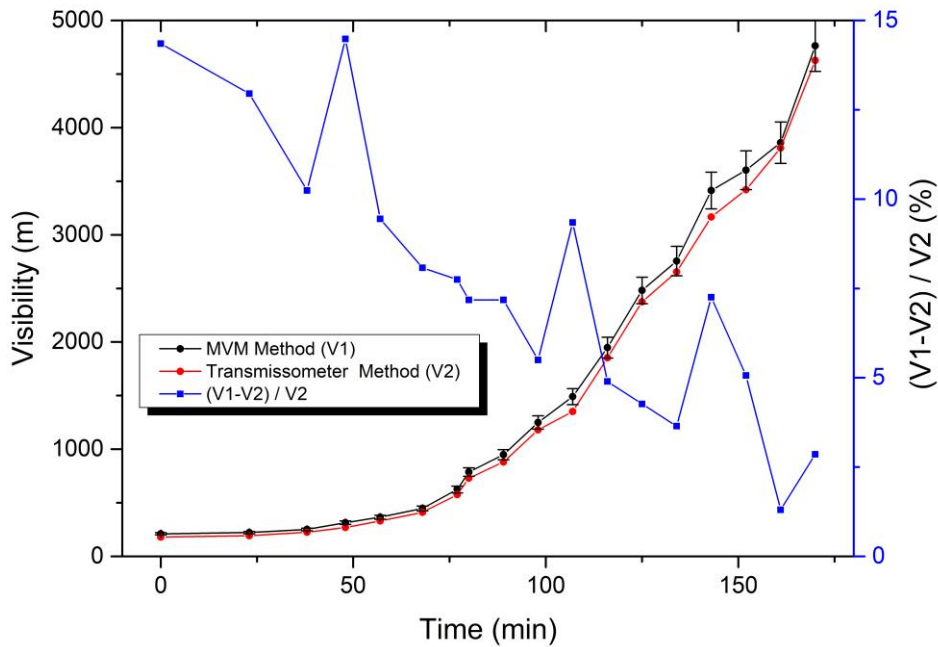


图 5.6 模拟舱内能见度由低到高变化的比对结果

图 5.5 和图 5.6 中，MVM 方法测量数据点处的误差线为 5%。为了表征两种

测量方法在不同能见度环境下的测量差异, 令 κ 表示两种测量方法的测量结果差与大气透射式测量结果的百分比, 即:

$$\kappa = \frac{(V_1 - V_2)}{V_2} \times 100\% \quad (5.1)$$

由图 5.5 和图 5.6 可以看到, 当模拟舱内的能见度环境由高到低变化时, κ 在逐渐增大, 当模拟舱内的能见度环境由低到高变化时, κ 在逐渐减小。两种能见度变化趋势均表明: 环境能见度越高, 两种测量方法的测量结果差异越小; 环境能见度越低, 两种测量方法的测量结果差异越大; 在各种能见度环境下, 多点移动式测量方法均可以对大气透射式测量方法的测量结果产生差异并进行修正。两种测量方法的最大差异为 27.42%, 出现在舱内能见度为 308.47m 的时候, 两种测量方法的最小差异为 1.105%, 出现在舱内能见度为 6933.42m 时。

5.3.2 多点移动测量系统与大气透射仪测量对比

本节使用了 Skopograph II 型大气透射仪与多点移动测量系统 (Multi-point Visibility Measurement System, MVMS) 在模拟舱环境下进行对比测试。Skopograph II 型大气透射仪使用脉冲氙灯作为光源, 可以测量大气透过率并计算消光系数, 测量范围为 7.5m 到 3000m, 平均采样时间为 1 分钟。仪器在测试每天测试之前均经过了完整的镜头清洁及校正, 测量基线设置为 50m。

将 MVMS 系统与 Skopograph II 型大气透射仪同时放置于大气环境模拟舱中, 进行多次能见度测量对比试验。对比实物图如图 5.7 所示。

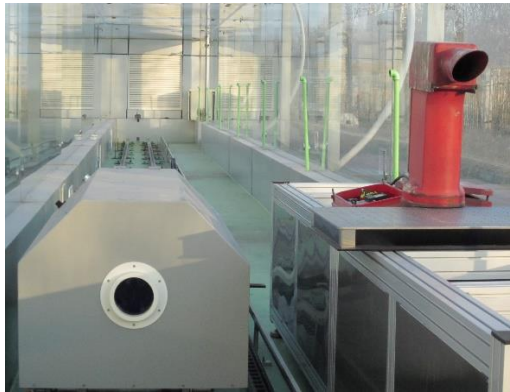


图 5.7 MVMS 系统移动接收端与 Skopograph II 型大气透射仪实物图

在模拟舱环境内进行了多次两种能见度仪的对比实验。在每次对比试验时, 大气环境模拟舱使用 ATM-241 雾化气溶胶发生器, 配以 NaCl 及去离子水组成的溶剂持续向大气环境模拟舱喷入气溶胶粒子。多点移动大气透过率测量系统

的移动接收端的运动速度设置为 0.4m/s，每点停留时间设置为 3s，接收端每往返两次做一次最小二乘拟合，从而得到大气透过率、消光系数及所对应的能见度值，一次完整的测量结果输出时间为约 10 分钟。Skopograph II 型大气透射仪的测量数据由 3000m 开始发生改变时记录数据，在一个月多次测量对比实验中，共得到能见度对比数据 285 组，各能见度区间的测量组数如表 5.2 所示，数据对比的偏差分布如表 5.3 所示。

表 5.2 各能见度区间内的测量组数

能见度区间 (m)	测量组数 (组)	占比 (%)
1000~3000	101	35.4
500~1000	40	14.0
350~500	42	14.7
250~350	63	22.1
200~250	39	13.7

表 5.3 数据对比偏差分布

偏差范围 (%)	数据对数量 (组)	占比 (%)
<10%	262	91.93
10%~20%	9	3.16
>20%	14	4.91

多点移动大气透过率测量系统与 Skopograph II 型大气透射仪的数据对比如图 5.8 所示。在图 5.8 的 3 条斜线中，中间虚线为多点大气透过率测量系统与 Skopograph II 型大气透射仪测量结果等值线。两条实斜线为两种测量系统偏差 10% 以内的点的分布线。91.93% 的测量结果位于 10% 偏差分布线范围以内。两种仪器的测量结果相关系数为 0.9857。

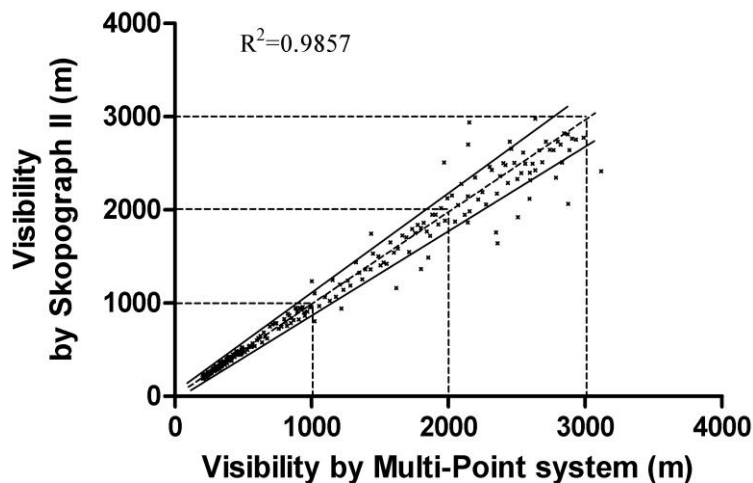


图 5.8 多点移动大气透过率测量系统与 Skopograph II 型大气透射仪

图 5.9 是大气模拟舱内一次对比试验中，两种测量仪器的测量结果。在能见度由 3000m 降至 200m 的过程中，多点移动大气透过率测量系统的能见度变化始终保持均匀变化，特别是在能见度值高于 1000m 时，与 Skopograph II 型大气透射仪相比，多点移动大气透过率测量系统使用最小二乘拟合方法，在连续测量过程中同时减小了系统误差与随机误差，故其测量结果波动性较小，更好反映了实验过程中模拟舱内能见度的连续变化趋势。

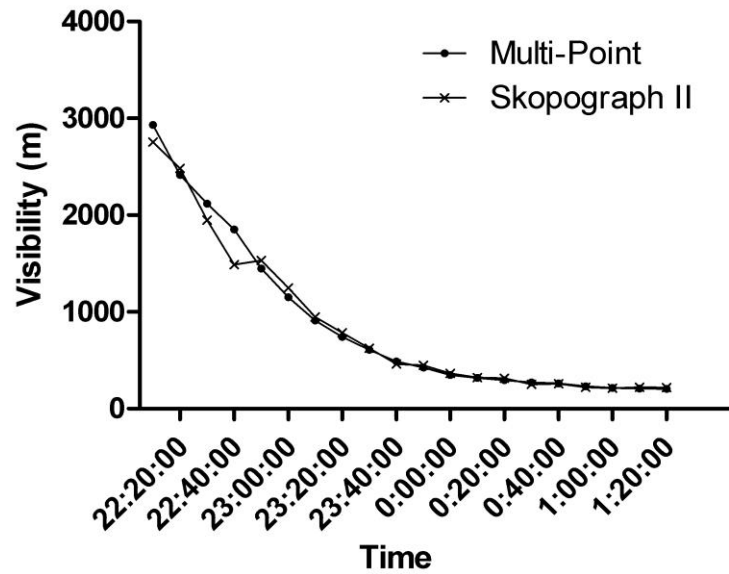


图 5.9 一次对比试验数据

第6章 总结与展望

本论文主要包括五部分内容：首先，本文简要论述了能见度的定义、分析了几种不同的能见度观测与探测方式及各自特点；通过对能见度在民航运行中的应用范围的论述，说明了对机场能见度仪进行测试评价的意义；文章回顾了对能见度仪进行外场对比观测和模拟环境下对比观测的研究进展，对能见度参考基准值和评价方法的研究同样进行了回顾。第二章重点研究了在榆林榆阳机场进行能见度仪外场对比观测时，大气透射仪、前向散射仪两种不同类型能见度仪在不同天气下的性能表现；使用中值法、均值法和图形比例法研究了天津机场、大连机场、海拉尔机场、重庆机场和成都机场共5个机场连续100天的，每天两个固定时次的能见度仪器观测数据，并将几种方法处理后的数据与机场日常天气报告（METAR报）中的能见度报告值进行了对比。第三章提出了一种可用于大气透过率和消光系数测量的多点移动测量方法，该章节首先使用该方法测量并计算了大气透过率、消光系数和气象光学视程，接下来将该方法与传统大气透射仪的测量方法进行了误差分析与比较，最后设计实现了该方法，建立了高精度的多点移动式测量系统。第四章对能见度仪的测试模拟环境进行了研究和论述，该章节阐述了能见度仪测试环境模拟系统的系统构成，并重点对模拟环境的均匀性展开研究，使用了计算流体力学方法和实验法两种方法，研究了模拟环境的均匀性特别是消光系数的纵向分布均匀性。第五章在能见度仪测试模拟环境中进行了能见度仪对比试验。该章节首先对模拟环境的实验环境条件，粒子浓度及分布情况进行了论述，然后在模拟环境中，使用多点移动测量方法，测量并计算了模拟环境中的大气透过率和气象光学视程；最后在模拟环境中对比分析了多点移动式测量方法与大气透射式测量方法及大气透射仪的对比测试结果。

本论文主要有以下结论：

- 1、能见度的人工观测与仪器观测，以及大气透射仪、前向散射仪等能见度测量仪器各有优缺点，但由于测量原理、采用空间的不同，当前各种能见度观测探测方式各有特点，单独一种观测或探测方式的测量结果难以作为能见度仪测试评价的参考基准值。

- 2、大气透射仪和前向散射仪由于采样空间和采样原理的不同，不同的天气条件下两种仪器的能见度测量结果有不同的测量差异。在机场地面范围内，使用均值法、中值法和图形比例法综合处理多套能见度仪的测量结果后，数据质

量仍然不如人工观测能见度的数据质量；观测原理和方法、能见度传感器数量、地区气候差异和观测位置差异是造成观测数据偏差的主要原因。

3、使用多点移动式测量方法测量大气透过率并计算消光系数、气象光学视程的系统误差明显小于大气透射仪，但随即误差与大气透射仪一致，总体误差较小，该方法具有较高的测量精度。相较于大气透射仪，多点移动式测量方法及系统的测量结果更适合作为能见度仪比对测试的参考基准值。

4、能见度仪测试模拟环境内的流场环境在模拟舱中部具有相对均匀区域，可以在模拟舱中部空间内进行能见度仪对比试验。模拟环境内的移动小车对环境内流场的影响较小，环境内的消光系数具有稳定性和多次测量的一致性。

5、在模拟环境内能见度降低过程中， $0.5\mu\text{m}$ 和 $1\mu\text{m}$ 的小粒子增加较为明显， $2\mu\text{m}$ 与 $2.5\mu\text{m}$ 气溶胶粒子变化较小；在该种模拟环境下，与大气透射仪测量方法和大气透射仪相比，多点移动式测量方法及系统的测量结果具有稳定性，能够更好的反映模拟环境内的能见度变化情况。

本文的主要创新点在于：

1、对比研究了大气透射仪、前向散射仪在我国西部地区的扬沙、浮尘、霾以及雾、雨雾和雪雾的测量结果，研究了使用图形比例法、中值法和均值法处理机场平面多套能见度仪的测量结果，研究结果表明均值法与其他两种方法相比具有相对较小的观测偏差，但三种方法的观测质量均不如人工观测主导能见度值。

2、研究使用多点移动测量方法测量并计算消光系数和气象光学视程，并基于该方法设计实现了相应的系统。相比较于大气透射仪，该方法及系统在各种能见度条件下均具有较小的系统误差，其测量结果可以作为能见度仪比对测试的参考基准值。

3、研究建立了存在一定均匀性空间区域和消光系数测量稳定性的能见度仪测试模拟环境，该环境可在5小时内生成高低不同的能见度条件。在该环境内的对比试验表明了多点移动测量方法的测量准确性和稳定值。

对于本文未来的研究，主要可以从以下几个方面的工作开展：

1、研究外部自然光照以及舱内灯光亮度变化对能见度的影响。由于机场配备了各种类型的跑道灯光系统，研究跑道灯光强度对机场跑道能见度的变化，有助于评价机场能见度仪对跑道视程的测量精度。

2、在模拟舱内进行不同型号的大气透射仪及前向散射仪的对比试验。本文在舱内通过使用MVMS系统与大气透射仪的对比，理论和实验验证说明了

MVMS 系统的测量准确性。在建立了较好的能见度参考基准值后，可以对更多不同测量原理和类型的能见度仪开展测试评估工作。

3、研究模拟更多不同类型天气条件对能见度仪的影响。在大气模拟舱内可以使用粉尘气溶胶发生器、黑碳气溶胶发生器等仪器设备，研究扬沙、浮尘天气以及强吸收作用气溶胶粒子对能见度仪测量结果的影响。

参 考 文 献

- [1] GB/T 35223-2017, 地面气象观测规范 气象能见度[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2017.
- [2] CCAR-117-R2, 中国民用航空气象工作规则[S]. 北京: 中国民用航空局, 2013.
- [3] Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation, Meteorological service for international air navigation[S]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2013.
- [4] 冯民学.高速公路交通气象智能化监测预警系统研究[D].南京: 南京信息工程大学, 2005.
- [5] AP-117-TM-2012-01, 民用航空机场气象台建设指南[S]. 北京: 中国民用航空局, 2012.
- [6] AP-117-TM-02R1, 民用航空气象地面观测规范[S]. 北京: 中国民用航空局, 2012.
- [7] WMO No.8, Guide to meteorological instruments and methods of observation[S]. Geneva: Secretariat of the World Meteorological Organization, 2014.
- [8] ICAO Doc.9837, Manual on automatic meteorological observing systems at aerodromes[S]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2013.
- [9] ICAO Doc.9328, Manual of Runway Visual Range Observing and Reporting Practices[S]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2005.
- [10] Wang J, Liu X, Yang X, et al. Development and evaluation of a new digital photography visiometer system for automated visibility observation[J]. Atmospheric Environment, 87:19-25.
- [11] 宫纯文, 李学彬, 李建玉等. 大气气溶胶消光系数测量新方法[J]. 光学学报, 2014, 34 (1): 0101001.
- [12] 马舒庆, 徐振飞, 毛节泰等. 以黑体为目标的能见度参考标准试验研究[J]. 应用气象学报, 2014, 25 (2): 129-134.
- [13] 杜传耀, 马舒庆, 杨玲等. 双光路能见度测量方法和试验[J]. 应用气象学报, 2014, 25 (5): 610-617.
- [14] 王宗俐, 曹乃锋, 王春录. 一种激光能见度仪设计的新方法[J]. 激光与红外, 2012, 42 (6): 629-632.
- [15] Koschmieder H. Theorie der horizontalen sichtweite[J]. Betrag. Atm. Physik., 12:33-55.
- [16] Allard Émile. Mémoire sur l'intensité et la portée des phares: comprenant la description de quelques appareils nouveaux, ainsi que des études sur la transparence des flammes, la vision des feux scintillants et la transparence nocturne de l'atmosphère[M]. Imprimerie nationale, 1876.

- [17] 程绍荣, 魏全忠, 吕军. 一种实用型大气透射式能见度仪的研制[J], 光电工程, 2011 38 (2):144-150.
- [18] 孙耀东, 李虹. TS 型透射表现场使用中的技术问题分析[J], 气象水文海洋仪器, 1998, (4):17-22.
- [19] 杨中秋, 王庆安, 牛利平等. DT 型大气能见度记录仪的研制和精度分析[J], 气象科学., 1990, 10 (1):52-60.
- [20] Burnham DC, Spitzer EA, Carty TC, et al. United States Experience Using Forward Scattermeters for Runway Visual Range [EB/OL]. National Technical Information Service, 1997.
- [21] Tang F, Ma S, Yang L, et al. A new visibility measurement system based on a black target and a comparative trial with visibility instruments[J]. Atmospheric Environment, 143:229-236.
- [22] CCAR-97FS-R3, 民用机场飞行程序和运行最低标准管理规定[S]. 北京: 中国民用航空局, 2017.
- [23] CCAR-121-R4, 大型飞机公共航空运输营运人运行合格审定规则[S]. 北京: 中国民用航空局, 2010.
- [24] 杨玉霞, 胡雪红. PWD20 能见度仪及与目测能见度对比分析[J], 兰州大学学报 (自然科学版), 2009, 45 (S1):61-63.
- [25] 谭浩波, 陈欢欢, 吴兑等. Model 6000 型前向散射能见度仪性能评估及数据订正[J], 热带气象学报, 2010, 26 (6):687-693.
- [26] 张慧婵, 陈浏. 广州新机场目测和器测能见度资料的对比分析[J]. 气象研究与应用, 2010, 31 (S2):123-125.
- [27] 吴振强, 李文斌, 杨森槐等. Belfort M6000 能见度传感器实测距离与人工目测距离的对比分析[J], 科技创新导报, 2011, (32):99-101.
- [28] 刘宁微, 马雁军, 王扬锋等. 辽宁中部地区大气能见度器测与目测数据的对比分析[J], 环境科学研究, 2012, 25 (10):1120-1125.
- [29] Kim KW. The comparison of visibility measurement between image-based visual range, human eye-based visual range, and meteorological optical range[J]. Atmospheric Environment, 190:74-86.
- [30] 中国气象局综合观测司. 前向散射能见度仪观测规范 (试行) [EB/OL]. 中国气象局, 2011.
- [31] Griggs DJ, Jones DW, Ouldrige M, et al. The first WMO intercomparison of visibility measurements[R]. United Kingdom: World Meteorological Organization, 1988/1989.

- [32] 濮江平, 胡宗刚, 魏阳春等. 能见度自动观测系统性能对比及分析[J], 气象科学, 2002 22 (1) :60-71.
- [33] Bloemink HI. KNMI Visibility standard for calibration of scatterometers[C]. WMO Technical conference on meteorological and environmental instruments and methods of observation (TECO-2006), 2006: 4-6.
- [34] Waas S. Field test of forward scatter visibility sensors at german airports[C]. WMO Technical conference on meteorological and environmental instruments and methods of observation (TECO-2008), 2008: 1-17.
- [35] 明虎, 陈丽杰, 高联辉等. 机场低能见度自动观测设备测量数据对比[J], 应用气象学报, 2015, 26 (6) :750-758.
- [36] Chan PW. A test of visibility sensors at Hong Kong International Airport[J]. Weather, 71:241-246.
- [37] Elfstrom G. History of Test Facility Design Expertise at Aiolos Engineering Corporation[C]. 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2007:149.
- [38] Hendrickson C. Flight Testing Under Extreme Climatic Conditions [EB/OL]. National Technical Information Service, 1988.
- [39] Drake CW. Environmental test capabilities of the Air Force McKinley Climatic Laboratory[C]. 23rd Aerospace Sciences Meeting, 1985: 89.
- [40] 周向军, 杨恒祥, 张正. 烟雾实验室——能见度仪标校实验场初探[C]. 第十二届中国科协年会论文集. 福州: 中国科学技术协会, 2010: 1-6.
- [41] 王胜杰, 褚进华, 解淑艳. 能见度仪检测实验室建设的探讨[J], 环境监控与预警, 2015, 7 (6) :63-67.
- [42] Burnham DC. Evaluation of visibility sensors at the Eglin Air Force Base Climatic Chamber [EB/OL]. National Technical Information Service, 1983.
- [43] 王敏, 张世国, 汪玮等. 前向散射式能见度仪示值对比及标定方法研究[J], 气象科技, 2017, 45 (2) :217-222.
- [44] Burnley S, McKinney M, Seliga TA, et al. Federal aviation administration requirements for runway visual range (RVR) visibility and ambient light sensors[C]. 11th Conference on Aviation, Range, and Aerospace. Hyannis: American Meteorological Society, 2004.1-5.
- [45] AP-117-TM-2018-03R1, 民用航空自动气象观测系统技术规范[S]. 北京: 中国民用航空局, 2018.
- [46] Crosby JD. Visibility sensor accuracy: what's realistic[C]. 12th Symposium on

- Meteorological Observations and Instrumentation. Long Beach: American Meteorological Society, 2003. 1-5.
- [47] 庄子波, 台宏达, 蒋立辉. 一种基线长度改变的能见度测量和评价方法[J], 光学学报, 2016, 36 (2) :201001.
- [48] 台宏达, 庄子波, 蒋立辉等. 大气透过率的多点移动测量[J], 光学精密工程, 2016, 24 (8) :1894-1901.
- [49] Tai H, Zhuang Z, Sun D. Visibility measurement in an atmospheric environment simulation chamber[J]. Current Optics and Photonics, 1:186-195.
- [50] Tai H, Zhuang Z, Sun D. Development and accuracy of a multipoint method for measuring visibility[J]. Applied Optics, 56:7952-7959.
- [51] Chan PW, Shun CM. Challenges in the use of instrumented visibility readings in synoptic observations[C]. WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Method of Observation. St Petersburg: World Meteorological Organization, 2008.1-13.
- [52] 台宏达, 庄子波.一种半球镜面式能见度自动观测仪[P]. 中国: ZL201520924439.3, 2016-03-23.
- [53] 台宏达, 庄子波. 一种主导能见度自动观测仪器[P]. 中国: ZL201520924440.6, 2016-03-23.
- [54] Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation, Aerodrome[S]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2013.
- [55] MH5001-2013, 民用机场飞行区技术标准[S]. 北京: 中国民用航空局, 2013.
- [56] Engel S, Heyn K. Measurement of atmospheric transmission and determination of visual range[P]. United States of America: 0502686.9, 2005-10-08.
- [57] 施德恒, 刘新建, 黄国庆等. 一种透射式跑道能见度激光测量仪研究[J], 激光技术, 2003, 27 (5) :419-422.
- [58] 施德恒, 黄宜军. 透射式跑道能见度激光测量仪的研究[J], 光学技术, 1998, (05):78-81.
- [59] 肖韶荣, 吴群勇, 周佳等. 透射式能见度仪动态范围扩展方法[J], 应用光学, 2014, 35 (4) :574-579.
- [60] 赵力, 万晓正, 齐勇等. 多次反射法透射式能见度测量系统研究[J], 山东科学, 2011, 24 (6) :67-70.
- [61] 田林, 陆亦怀, 桂华侨等. 基于角反射器的单端透射式能见度仪的研究[J], 大气与环境光学学报, 2011, 6 (5) :390-397.

- [62] 李伟, 贺晓雷, 齐久成. 气象仪器及测试技术[M]. 气象出版社: 北京, 2010.
- [63] Liu Y, Li H, Feng G. Simulation of inhalable aerosol particle distribution generated from cooking by Eulerian approach with RNG k-epsilon turbulence model and pollution exposure in a residential kitchen space[J]. *Building Simulation*, 10:135-144.
- [64] Hussein T, Glytsos T, Ondráek J, et al. Particle size characterization and emission rates during indoor activities in a house[J]. *Atmospheric Environment*, 40:4285-4307.
- [65] Zhao B, Zhang Z, Li X. Numerical study of the transport of droplets or particles generated by respiratory system indoors[J]. *Building & Environment*, 40:1032-1039.
- [66] Johnson AM, Waring MS, DeCarlo PF. Real-time transformation of outdoor aerosol components upon transport indoors measured with aerosol mass spectrometry[J]. *Indoor Air*, 27:230-240.
- [67] Zhao H, Stephens B. Using portable particle sizing instrumentation to rapidly measure the penetration of fine and ultrafine particles in unoccupied residences[J]. *Indoor Air*, 27:218-229.
- [68] Grau-Bové J, Mazzei L, Malki-Ephstein L, et al. Simulation of particulate matter ingress, dispersion and deposition in a historical building[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 18:199-208.
- [69] Zhang Z, Chen Q. Comparison of the Eulerian and Lagrangian methods for predicting particle transport in enclosed spaces[J]. *Atmospheric Environment*, 41:5236-5248.
- [70] Wang M, Lin C, Chen Q. Advanced turbulence models for predicting particle transport in enclosed environments[J]. *Building & Environment*, 47:40-49.
- [71] Karadimou DP, Markatos NC. Modelling of two-phase, transient airflow and particles distribution in the indoor environment by Large Eddy Simulation[J]. *Journal of Turbulence*, 17:216-236.
- [72] Sajjadi H, Salmanzadeh M, Ahmadi G, Jafari S. Simulations of indoor airflow and particle dispersion and deposition by the lattice Boltzmann method using LES and RANS approaches[J]. *Building & Environment*, 102:1-12.
- [73] Chen C, Liu W, Lin C, et al. A Markov chain model for predicting transient particle transport in enclosed environments[J]. *Building & Environment*, 90:30-36.

致 谢

不知不觉在科大读博已五年，五年时间转瞬即逝，在这五年时间里学会了很多，在此我要对指导过我的老师，帮助过我的同学，照顾过我的朋友说一声“谢谢”！

首先感谢我的导师孙东松为我提供了宝贵的读博机会，使我能够继续深造并且很幸运地在科研的道路上前行。此论文是在导师的指导下完成的，他在实验结果的讨论、论文的结构、撰写和修改等方面都提出了宝贵的意见，也提供了很多的帮助。导师深厚的学术功底，敏锐的科学洞察力，独到的见解使我受益良多，也会深刻影响我以后的工作和生活。在此，向孙东松教授致以最诚挚的感谢！

感谢中国民航大学空中交通管理学院的蒋立辉教授、刘海文教授对我的论文的指导，两位教授对我的科研思路的启发、课题的申请、论文的撰写以及人生的规划方面都给予了很大的帮助。也要感谢中国民航大学飞行技术学院的庄子波副教授，在我的整个学习过程中他与我共同讨论，共同设计实验方案，共同开展实验，才使得实验得以顺利进行。

还要特别感谢我的父母，感谢你们对我的悉心养育、谆谆教诲，正是因为有了你们对我一直的鼓励、支持，才让我能够完成学业、结婚生子、继续深造，完成生命中的一个一个的目标。感谢我的妻子和女儿，是你们让我的人生更加的完整、幸福。

最后要感谢参与我论文评审和答辩的各位老师，是你们的建议才这篇论文变得更加完善，也让我有了更高的努力方向和目标。

2020 年 6 月

在读期间发表的学术论文与取得的其他研究成果

已发表论文:

- [1] **Hongda Tai**, Zibo Zhuang and Dongsong Sun. Development and accuracy of a multi-point method for measuring visibility[J], Applied Optics, Vol.56, No.28, pp.7952-7959, Oct, 2017. (当期封面文章)
- [2] 台宏达, 庄子波, 刘海文, 孙东松. 机场主导能见度仪器自动观测方法研究[J]. 气象科技, 2019, 47(2): 222~228.
- [3] **Hongda Tai**, Zibo Zhuang, Lihui Jiang and Dongsong Sun. Visibility Measurement in an Atmospheric Environment Simulation Chamber[J], Current Optics and Photonics, Vol. 1, No. 3, pp. 186-195, June, 2017.
- [4] **Hongda Tai**, Xiaohua Kang, Zibo Zhuang and Dongsong Sun. Performance of backscatter visibility lidar at UYN airport[C], Proc. of SPIE Vol. 2017, 10255: 102552W-1.
- [5] 台宏达, 庄子波, 蒋立辉等. 大气透过率的多点移动测量[J]. 光学精密工程, 2016,24(8): 1894-1901.
- [6] 庄子波, 台宏达, 蒋立辉. 一种基线长度改变的能见度测量和评价方法[J]. 光学学报, 2016(2):1-9.
- [7] 熊兴隆, 刘春媛, 蒋立辉, 李猛, 马愈昭, 台宏达. 多次散射影响下激光大气透射仪测量误差研究[J]. 光电子·激光, 2015(10):2037-2044.
- [8] 马愈昭, 崔雅峰, 熊兴隆, 蒋立辉, 台宏达, 庄子波. 基于大气透过率的机场周边颗粒物质量浓度预测模型[J]. 光电子·激光, 2017(9): 992-998.
- [9] 庄子波, 陈星, 台宏达, 宋德龙, 陈柏纬. 基于奇异值分解的激光雷达湍流预警算法[J]. 光学精密工程, 2019,27(03): 166-174.

专利:

- [1] 台宏达, 庄子波. 一种半球镜面式能见度自动观测仪. 实用新型专利, 中国, 2015: CN205103172U. (已授权)
- [2] 台宏达, 庄子波. 一种主导能见度自动观测仪. 实用新型专利, 中国, 2015: CN205103423U. (已授权)