

JJF

中华人民共和国民用航空部门计量技术规范

JJF（民航）0125—2026

民用航空大气透射仪校准规范

Calibration Specification for Civil Aviation Atmospheric Transmissometer

2026-02-09 发布

2026-03-01 实施

中国民用航空局 发布

民用航空大气透射仪 校准规范

Calibration Specification for

Civil Aviation Atmospheric Transmissometer

JJF(民航) 0125-2026

本规范经中国民用航空局 2026 年 02 月 09 日批准, 并自 2026 年 03 月 01 日起施行。

归口单位: 中国民用航空局航空器适航审定司

主要起草单位: 中国民航大学

民航华北地区空中交通管理局

中国民航科学技术研究院

参与起草单位: 中国民用航空总局第二研究所

民航华东地区空中交通管理局安徽分局

陕西省计量科学研究院

天津鑫隆空港科技有限公司

凯迈(洛阳)测控有限公司

本规范技术条文由起草单位负责解释。

本规范主要起草人：

台宏达（中国民航大学）
陈钰彤（民航华北地区空中交通管理局）
张阿里布米（中国民航科学技术研究院）
刘星辉（中国民用航空总局第二研究所）
王 伟（民航华东地区空中交通管理局安徽分局）
贾 蓓（中国民航科学技术研究院）
林海姣（中国民航科学技术研究院）
梁 飞（中国民用航空总局第二研究所）
杨 明（民航华东地区空中交通管理局安徽分局）
李 奕（陕西省计量科学研究院）
王桂红（天津鑫隆空港科技有限公司）
于留波（凯迈（洛阳）测控有限公司）
魏国栓（凯迈（洛阳）测控有限公司）

目录

引言.....	(II)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语.....	(1)
4 概述.....	(1)
5 计量特性.....	(2)
5.1 气象光学视程示值相对误差.....	(2)
5.2 透射比示值相对误差.....	(2)
6 校准条件.....	(3)
6.1 环境条件.....	(3)
6.2 测量标准及其他设备.....	(4)
7 校准项目和校准方法.....	(4)
7.1 校准项目.....	(4)
7.2 校准方法.....	(5)
8 校准结果表达.....	(8)
9 复校时间间隔.....	(9)
附录 A.....	(10)
附录 B.....	(13)
附录 C.....	(23)

引言

本规范以 JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》和 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

民用航空大气透射仪校准规范

1 范围

本规范适用于测量气象光学视程 (Meteorological Optical Range, MOR) 范围为 $10\text{ m} \sim 10000\text{ m}$ 、基线长度为 10 m 、 30 m 、 35 m 、 50 m 和 75 m 等多种规格的大气透射仪的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 1034 光谱光度计标准滤光器

JJF 2032-2023 透射式能见度仪校准规范

AP-117-TM-2018-03R1 民用航空自动气象观测系统技术规范

AP-117-TM-2022-06R1 民用航空气象计量器具检定与校准管理办法

凡注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语

3.1 基线长度 baseline length

大气透射仪发射端和接收端之间的距离，基线长度的单位为米 (m)。

3.2 气象光学视程 meteorological optical range (MOR)

白炽灯 (色温 2700 K) 平行光束的光通量在大气中削弱至初始值 5% 所通过的路径长度，气象光学视程的单位为米 (m)。

注：本规范中所提及的“能见度”均指气象光学视程 (MOR)。

4 概述

大气透射仪由发射端、接收端和数据处理模块三部分构成，如图 1 所示：

发射端：产生符合特定光谱特性（如色温 2700 K ）的脉冲或连续准直光源；

接收端：接收经大气衰减后的光信号，并将其转换为电信号；

数据处理模块：根据接收信号计算透射比，进而依基线长度应用比尔-朗伯 (Beer-Lambert) 和 Koschmieder 定律推算气象光学视程 (MOR)，并输出测量

结果。

大气透射仪工作原理基于光在大气中因吸收和散射而衰减的特性，通过测量光源与透射光强比值，实现对 $10\text{ m} \sim 10000\text{ m}$ MOR 范围内的精确测量，为民航运行提供可靠的能见度数据。

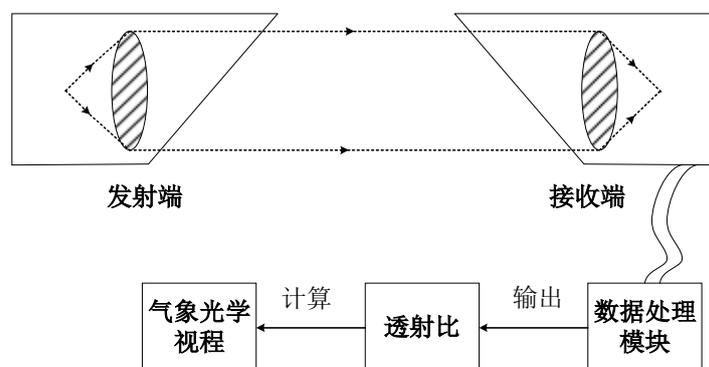


图 1 大气透射仪通用组成结构示意图

5 计量特性

5.1 气象光学视程示值相对误差

气象光学视程 (MOR) 的示值相对误差见表 1。

表 1 气象光学视程示值相对误差

气象光学视程 MOR	气象光学视程的示值相对误差
$MOR \leq 600\text{ m}$	$\pm(50/V) \times 100\%$
$600\text{ m} < MOR \leq 1500\text{ m}$	$\pm 10\%$
$1500\text{ m} < MOR \leq 10000\text{ m}$	$\pm 20\%$

V 为气象光学视程 (m)。

5.2 透射比示值相对误差

大气透射仪透射比 τ 示值相对误差见表 2。

表 2 透射比示值相对误差

气象光学视程 MOR	透射比 τ 的示值相对误差
$MOR \leq 600\text{ m}$	$\pm \frac{50 \cdot L \cdot (-\ln C_0)}{V^2} \times 100\%$

表 2 透射比示值相对误差 (续)

气象光学视程 MOR	透射比 τ 的示值相对误差
$600\text{ m} < \text{MOR} \leq 1500\text{ m}$	$\pm \frac{L \cdot (-\ln C_0)}{V} \times 10\%$
$1500\text{ m} < \text{MOR} \leq 10000\text{ m}$	$\pm \frac{L \cdot (-\ln C_0)}{V} \times 20\%$
<p>L 表示基线长度 (m), V 为气象光学视程 (m)。 C_0 为人眼对比敏感度阈值, 民航领域通常取 0.05。</p>	

注: 校准结果可与表 1、表 2 所列参考限值进行比对, 用于使用单位开展结果解释与运行维护决策, 不作为合格判定依据。

6 校准条件

6.1 环境条件

本规范所指校准, 由民航气象计量技术支持机构或获得计量授权证书的机构, 在实验室条件下或现场环境进行。

6.1.1 实验室校准条件

a) 实验室校准应在温湿度可控的校准室内进行, 室温维持在 $3\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度不超过 85%;

b) 实验室应远离强光直射、振动源及高电磁干扰区;

c) 仪器送入后, 应通电预热并稳定运行一段时间, 具体预热时间应按照设备厂家指导手册执行, 以确保光学系统与电路温度均衡后方可校准。校准过程中, 所有光学窗面须保持清洁, 无尘埃、油污等附着, 并配备必要的遮光设施以消除背景光干扰。

6.1.2 现场校准条件

a) 现场校准应在校准设备和被校设备安装完毕且光学对中、调平完成, 通电预热并稳定运行一段时间后就地进行, 无需拆卸发射端或接收端以免引入二次误差;

b) 现场校准应选择能见度 $\geq 10\text{ km}$ 的天气条件, 校准前应彻底清洁所有光学面; 建议为中性密度标准滤光片组或高透射比量具加装遮光罩, 屏蔽环境杂散

光；

- c) 被校设备通电预热具体时间根据设备厂家的指导手册执行。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 高透射比量具

6.2.1.1 高透射比量具是一种高速旋转的确定透射比的扇形滤光片，用于高透射比范围的校准，适用于透射比值大于 98% 的情况。

6.2.1.2 高透射比量具应具有下列技术特性：

- a) 外形尺寸：有效测试区域半径不小于 80 mm；
- b) 透射比范围：98.0% - 99.7%；
- c) 扩展不确定度 ($k=2$)：0.05%。

6.2.2 中性密度标准滤光片组

6.2.2.1 中性密度标准滤光片组由不少于 3 片不同透射比值的滤光片组成，用于中、低透射比范围的校准，适用于透射比值小于 97% 的情况。

6.2.2.2 中性密度标准滤光片组应具有下列特性：

- a) 单片尺寸：中央有效测试区域面积不小于 80 mm×80 mm；
- b) 透射比范围：10% - 97%；
- c) 扩展不确定度 ($k=2$)：0.3%。

6.2.2.3 所选用的滤光片透射比标称值应在上述透射比范围内合理分布，建议包含低（约 50%）、中（约 70%）、高（约 90%）不同透射比梯度的滤光片，以满足民航常用长基线仪器在不同气象光学视程（MOR）校准点下的量值溯源需求。

6.2.3 当需要透射比值在 97%-98% 之间时，可选用中性密度标准滤光片组或高透射比量具，具体选用规则按 7.2.1 的规定执行。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

7.1.1 透射比示值相对误差

7.1.2 气象光学视程示值相对误差

注：校准项目根据被校仪器类型和客户需求校准，可按委托仅开展透射比校准；MOR 为由透射比换算所得的派生量，可作为附加记录项随证书给出，但不作为独立校准项目出具结论。

7.2 校准方法

7.2.1 校准前的准备

校准前，应对大气透射仪的外观、机械部分、光学窗口及传感器表面进行详细检查，确保仪器外观完好，光学窗口清洁，无明显损伤。确认仪器发射器光束中心与接收器几何中心对准，并确保仪器已按照厂家指导手册建议的预热时间完成设备的通电预热。

校准点的选择以气象光学视程 (MOR) 为依据，选取 350 m、500 m、800 m、1500 m、3000 m、5000 m 和 10000 m 共七个典型校准点。前 4 个校准点为必校准点，后 3 个校准点为推荐校准点，可根据用户的实际需求确定。

标准器具的选用原则基于各 MOR 校准点处的透射比计算值：

- a) 当透射比值 $\geq 98\%$ 时，应选用高透射比量具；
- b) 当校准点对应的透射比值 $< 97\%$ 时，应选用中性密度标准滤光片组；
- c) 当透射比值介于 97%和 98%之间时，可根据实际情况选用中性密度标准滤光片组或高透射比量具，宜优先选择滤光片组。

不同基线长度的大气透射仪在上述校准点下的标准器具选用规则见表 3。

表 3 不同基线长度大气透射仪标准器具选用规则

基线	10 m	30 m	35 m	50 m	75 m
350 m	滤光片组	滤光片组	滤光片组	滤光片组	滤光片组
500 m	滤光片组	滤光片组	滤光片组	滤光片组	滤光片组
800 m	滤光片组	滤光片组	滤光片组	滤光片组	滤光片组
1500 m	高透射比量具	滤光片组	滤光片组	滤光片组	滤光片组

表 3 不同基线长度大气透射仪标准器具选用规则（续）

基线	10 m	30 m	35 m	50 m	75 m
3000 m	高透射比量具	高透射比量具或滤光片组	滤光片组	滤光片组	滤光片组
5000 m	高透射比量具	高透射比量具	高透射比量具	高透射比量具或滤光片组	滤光片组
10000 m	高透射比量具	高透射比量具	高透射比量具	高透射比量具	高透射比量具

注：表 3 中所列基线长度仅为典型值。校准时，应以大气透射仪实际安装的基线长度为准。当表中给出“或滤光片组”时，表示对应透射比处于 97%-98% 过渡区间，按 7.2.1 c) 执行。

不同基线长度大气透射仪在选定校准点对应的透射比标准值见表 4。

表 4 不同基线长度大气透射仪 MOR 校准点对应的透射比值

基线	10 m	30 m	35 m	50 m	75 m
350 m	0.9179	0.7733	0.7408	0.6514	0.5258
500 m	0.9418	0.8353	0.8106	0.7408	0.6376
800 m	0.9632	0.8936	0.8770	0.8290	0.7548
1500 m	0.9802	0.9418	0.9324	0.9048	0.8607
3000 m	0.9900	0.9704	0.9656	0.9512	0.9277
5000 m	0.9940	0.9822	0.9792	0.9704	0.9560
10000 m	0.9970	0.9910	0.9896	0.9851	0.9778

注：表 4 中给出的透射比值仅供参考。校准时，应根据大气透射仪实际基线长度 L 和选定的 MOR 校准点，按公式 $\tau = e^{\frac{L \cdot \ln 0.05}{MOR}}$ 计算实际的标准透射比值。

7.2.2 透射比示值相对误差校准方法

进行透射比示值相对误差校准时，应按照以下方法进行重复测量及参数记录：

每个校准点的透射比测量应进行至少 3 次独立重复测量。每次测量之间，应重新安装或重新启动所选用的标准器（滤光片组或高透射比量具），以减少测量过程中的随机误差及人为操作误差的影响。每次测量需待仪器读数稳定后进行记录。

7.2.2.1 标准器安装要求

a) 使用中性密度标准滤光片组进行校准时，应将滤光片垂直放置于发射端与接收端之间的光路中央，确保滤光片的中心位置与仪器发射光束的光轴对齐。测量中应记录滤光片的编号及对应透射比标准值。

b) 使用高透射比量具进行校准时，应启动量具的光学旋转装置，确保量具的旋转平面垂直于透射仪光路，调整光学窗口至最佳位置和角度，使仪器读数稳定。每次测量完成后，应关闭量具并重新启动以进行下一次测量。

7.2.2.2 测量数据记录要求

校准过程中，应记录以下参数：

- a) 校准时环境条件（按照第 6 章校准条件要求）；
- b) 仪器型号及编号、标准器型号、编号及有效期；
- c) 每个校准点的标准透射比值；
- d) 每次测量的仪器示值及对应的透射比测量值；
- e) 每个校准点 3 次测量结果的平均值及计算过程。

7.2.2.3 透射比示值相对误差计算

每个校准点的透射比示值相对误差，按公式（1）计算：

$$E_{T_i} = \frac{T_{i,avg} - T_{i,std}}{T_{i,std}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

E_{T_i} —— 第 i 校准点的透射比示值相对误差；

$T_{i,avg}$ —— 第 i 校准点的 3 次测量平均透射比；

$T_{i,std}$ —— 第 i 校准点透射比标准值。

7.2.3 气象光学视程示值相对误差校准方法

在透射比示值相对误差校准过程中，应同步记录各校准点处由仪器计算输出的气象光学视程（MOR）示值，作为透射比校准的补充记录内容。为确保 MOR 示值的溯源性和一致性，应按以下方式进行记录：

a) 每一校准点的透射比示值由中性密度标准滤光片或高透射比量具设定，透射比测量完成后，应读取大气透射仪自动计算输出的 MOR 示值；

b) 每一校准点应进行 3 次独立的 MOR 示值读取。为增强重复性，应在每次读取前，按设备手册执行一次复位/清零/重新计算操作（如有）。应分别记录 3 次示值，并计算其平均值作为该校准点的 MOR 示值；

c) 校准记录表应包括每一校准点的透射比标准值、对应的 3 次 MOR 示值、平均 MOR 示值、相关环境条件与仪器运行状态等信息。每个校准点的 MOR 示值相对误差，按照公式（2）计算。

$$E_{V_i} = \frac{V_{i,avg} - V_{i,std}}{V_{i,std}} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

E_{V_i} ——第 i 校准点的 MOR 示值相对误差；

$V_{i,avg}$ ——第 i 校准点的 3 次测量平均 MOR 示值；

$V_{i,std}$ ——第 i 校准点的 MOR 标准值。

MOR 示值作为由透射比计算所得的参数，仅用于评估仪器透射比测量结果的一致性与溯源性，不作为校准结果的合格判定依据。

8 校准结果表达

8.1 校准证书内容信息

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 校准地点；
- d) 证书唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 委托方名称和地址；
- f) 被校对象的描述及明确标识；
- g) 校准单位校准专用章；
- h) 校准日期；
- i) 校准所依据的技术规范名称及代号；
- j) 测量校准的溯源性及有效性说明；

- k) 校准环境的描述;
- l) 校准结果及其测量不确定度 (不确定度评定方法参见附录 B);
- m) 复校时间间隔的建议;
- n) 签发人签名或等效标识;
- o) 校准结果仅对被校对象有效性的声明;
- p) 未经实验室书面批准, 部分复制证书或报告的声明。

8.2 校准结果适用性说明

实验室条件下进行的校准适用于对大气透射仪本体性能的评定以及建立出厂基准。当设备在现场重新安装使用时, 由于运输、安装过程可能引入光路对准偏差, 应结合安装状态和性能核查结果, 确认实验室校准结果是否继续有效。

当重新安装后光路几何关系、光轴对准状态、设备自检和比对结果均正常, 且示值变化不超过出厂技术手册允许偏差范围时, 可认为实验室校准结果仍然有效; 若发现光路偏移、比对误差或系统漂移超限, 则应进行现场校准。

9 复校时间间隔

复校时间间隔由送校单位根据使用情况自行决定, 建议为 1 年。有以下情况之一时, 建议提前进行送校:

a) 大气透射仪经过维修或调整, 且维修内容可能影响光学、信号采集或数据处理链路时;

——如更换或重新调整光学单元 (发射器、接收器、滤光片、透镜等)、信号采集或放大电路、主控板等关键部件时, 建议进行复校;

——若仅更换连接线缆、电源模块、外壳等不影响光学通道及数据处理链的部件, 可不视为复校条件, 但应进行性能检查以确认正常。

b) 发现测量值显著异常或持续频繁异常时;

c) 大气透射仪的安装位置、运行高度或周边光学背景发生重大变化, 可能影响测量条件时。

附录 A

民用航空大气透射仪校准记录表

校准记录流水号：

第 页 共 页

校准环境	校准环境				
	温度 (°C)				
	相对湿度 (%RH)				
标准器	名称：	编号：			
	型号/规格：	生产厂家：			
被校设备	送校单位：	准确度等级/最大允差：			
	名称：大气透射仪	编号：			生产厂家：
标准透射比值 (-)	型号/规格：	生产厂家：			
	送校单位：	准确度等级/最大允差：			
校准项目	标准透射比值 (-)	读数 1	读数 2	读数 3	平均值
标准 MOR 值 (m)	读数 1	读数 2	读数 3	平均值	

校准人：

复核人：

校准日期：

校准证书内页格式

A.1 校准证书第2页

证书编号：××××××-××××

校准机构说明				
校准所依据/参照的技术文件（代号、名称）				
校准环境条件及地点：				
温 度：	°C	地 点：		
相对湿度：	%RH	其 他：		
校准使用的计量基（标）准装置（含标准物质）/主要仪器				
名称	测量范围	不确定度/ 准确度等级	证书编号	有效期至

A.2 校准证书结果页

证书编号：××××××-××××

校 准 结 果							
序号	标准器透射比 (标称值)	被校透射仪透射比示值			平均值	相对误差 (%)	扩展不确定度 (k=2)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
序号	标准器 MOR (标称值)	被校透射仪 MOR 示值 (m)			平均值 (m)	相对误差 (%)	扩展不确定度 (k=2)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
声明：校准结果仅对被校对象有效；未经实书面批准，不得部分复制证书。							

注：可续页或增补行。

其它说明：本证书所给“相对误差”可与本规范表 1、表 2 参考限值进行比对，仅供运行维护决策参考，不作为合格判定依据。

附录 B

民用航空大气透射仪测量结果不确定度评定示例

B.1 概述

本附录针对民用航空大气透射仪在校准过程中涉及的标准器具——中性密度标准滤光片组和高透射比量具，分别给出测量不确定度评定的详细示例。

在中性密度标准滤光片组示例中，重点关注透射比标准值的不确定度、仪器读数的重复性及环境条件等因素；在高透射比量具示例中，除一般因素外，特别针对旋转量具特有的旋转不稳定性、位置调整误差等因素进行了不确定度分析。

B.2 测量模型

本示例首先对透射比示值相对误差进行评定，再把透射比误差传递到气象光学视程示值相对误差，对气象光学视程示值相对误差进行评定。

B.2.1 符号与术语

符号	量名	计量单位	说明
τ_s	透射比标准值	—	由滤光片或高透射比量具给出
$\bar{\tau}$	被校大气透射仪 透射比读数平均值	—	每个校准点测量 3 次取平均值
η	透射比示值相对误差	%	关键输出量
L	基线长度	m	按 3.1 条给出
C_0	对比敏感度阈值常数	—	取 0.05 (民航约定)
V_s	标准 MOR	m	由 τ_s 计算得到
\bar{V}	被校大气透射仪 MOR 读数平均值	m	与 $\bar{\tau}$ 同步获取
ε	MOR 示值相对误差	%	最终校准量

B.2.2 透射比示值相对误差

大气透射仪测量得到的透射比示值相对误差表示为公式 (B.1)。

$$\eta = \frac{\bar{\tau} - \tau_s}{\tau_s} \times 100\% \quad (\text{B.1})$$

灵敏系数:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \bar{\tau}} = \frac{1}{\tau_s}, \quad \frac{\partial \eta}{\partial \tau_s} = -\frac{\bar{\tau}}{\tau_s^2}$$

适用性说明:

式 (B.1) 适用于示例 A (中性密度标准滤光片) 与示例 B (高透射比量具), 差别仅在于 τ_s 的溯源途径及其不确定度组成。

B.2.3 气象光学视程示值相对误差

大气透射仪测量得到的气象光学视程示值相对误差表示为公式 (B.2)。

$$\varepsilon = \frac{\bar{V} - V_s}{V_s} \times 100\% \quad (\text{B.2})$$

其中:

$$V_s = -\frac{L \cdot \ln C_0}{\ln(\tau_s)} \quad (\text{B.3})$$

灵敏系数:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \bar{V}} = \frac{1}{V_s}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau_s} = \frac{VL \ln C_0}{V_s^2 \tau_s (\ln \tau_s)^2}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial L} = \frac{\bar{V} \ln C_0}{V_s^2 \ln \tau_s}$$

注: C_0 为常数时, 其不确定度可忽略。

B.3 不确定度来源与分类

民用航空大气透射仪的测量不确定度来源, 依据测量模型 (B.1) — (B.3) 进行分析与分类。测量不确定度分量的来源按照其评定方法分为 A 类评定和 B 类评定两类。

民用航空大气透射仪的校准过程中, 测量不确定度主要来源于以下几个方面:

- a) 被校仪器测量重复性引入的不确定度；
- b) 标准透射比量值引入的不确定度；
- c) 校准过程中环境条件变化引入的不确定度；
- d) 仪器光路对准误差引入的不确定度；
- e) 基线长度测量引入的不确定度；
- f) 对比阈值常数取值引入的不确定度（一般为常数，可不计入，如有特殊要求需单独评定）；
- g) 标准器特有的计量性能引入的不确定度，包括中性密度标准滤光片或高透射比量具特定的误差来源。

对以上测量不确定度来源进行分类如下：

(1) A类评定

采用重复测量获得的数据，通过统计分析方法进行评定，主要包括：

——被校仪器测量重复性。

(2) B类评定

根据非统计分析方法获得的数据，通过经验、证书、标准规范或其他方式评定，包括：

- 标准透射比量值的不确定度（来自标准器校准证书）；
- 环境条件（温度、湿度、环境杂散光等）变化引入的不确定度；
- 仪器光路对准误差；
- 基线长度测量的不确定度（一般由钢尺或激光测距仪证书获得）；
- 对比阈值常数（ C_0 ）取值的不确定度（一般常数可忽略，特殊情况需计入）；

标准器特有的计量性能：

——中性密度标准滤光片组，主要包括滤光片透射比证书给定的不确定度、滤光片透射比的均匀性和滤光片表面污染等；

——高透射比量具，主要包括高透射比量具的扇形圆心角测量误差、旋转稳定性、旋转平面偏心或垂直度误差、测量窗口定位重复性等。

对于已在实验室完成校准并重新安装于现场的大气透射仪，在评估其校准结果是否可延时，建议根据设备现场安装状态，酌情考虑由光路几何偏移可能引

入的附加不确定度。该部分不确定度的典型来源包括发射端与接收端间的对准偏差（角度或位置误差）、支架安装精度、地面沉降引起的光轴倾斜等。

由于此类因素属于设备现场使用条件，通常不作为标准计量校准的不确定度评定项目，本规范不强制要求计量技术机构对该部分进行评定，但可由使用单位或第三方依据实际情况在进行校准结果有效性分析时作为技术依据。

B.4 示例A——中性密度标准滤光片组

B.4.1 校准条件与数据采集

校准时，应满足本规范第 6 章所规定的环境条件。

校准过程中所使用的标准器具为中性密度标准滤光片组，应提前确认其具有有效的校准证书，并获得滤光片透射比的标准值及对应的扩展不确定度。校准前，应仔细检查滤光片表面，使用无尘气流和光学镜头纸进行吹拂和清洁，确保滤光片表面无明显污染和颗粒物，以避免对测量结果产生影响。

校准时将被测滤光片垂直放置于仪器的光路之间，调整滤光片位置，确保仪器发射的光束中心完全通过滤光片的均匀区域。

数据采集时，应按照本规范第 7.2.1 节的要求选择适合的透射比校准点。每个透射比校准点需独立重复测量 3 次，每次测量结束后，应取出滤光片，翻转并重新定位后再次进行测量。记录仪器透射比示值，并取其算术平均值作为最终示值。同时，记录仪器同步输出的气象光学视程示值，以供后续不确定度评定使用。

B.4.2 标准不确定度评定

在使用透射比为 0.8770 的中性密度标准滤光片，对民用航空大气透射仪进行校准时，被校仪器 3 次透射比示值的平均值为：

$$\bar{\tau} = 0.8689$$

对示值的各输入量的不确定度进行如下评定。

B.4.2.1 被校仪器示值重复性

在此校准点进行 3 次独立测量，计算得到的测量示值的标准偏差为 $s = 0.0015$ ，因此采用 A 类评定方式，仪器重复性的不确定度为：

$$u_{rep} = \frac{0.0015}{\sqrt{3}} = 0.00087$$

B.4.2.2 滤光片透射比标准值的不确定度

标准滤光片经上一级计量部门校准，校准证书给出的透射比扩展不确定度为 0.0030 ($k=2$)，按照 B 类评定方式，则其标准不确定度为：

$$u_{\tau_s} = \frac{0.0030}{2} = 0.00150$$

B.4.2.3 滤光片透射比均匀性引入的不确定度

根据标准滤光片的技术要求，透射比的均匀性偏差在 ± 0.002 以内，按均匀分布估计，其标准不确定度为：

$$u_{\text{nonif}} = \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.00115$$

B.4.2.4 滤光片表面残留污染引入的不确定度

经清洁后，滤光片表面可能仍残留微量污染，估计该影响在 ± 0.001 以内，按均匀分布估计，其标准不确定度为：

$$u_{\text{clean}} = \frac{0.001}{\sqrt{3}} = 0.00058$$

B.4.2.5 环境条件变化引入的不确定度

此项不确定度来源主要包含两部分：一是环境杂散光对接收端的影响；二是极端环境温度对标准滤光片透射比的影响。

环境杂散光：校准时已采取遮光措施，且仪器具备背景光补偿功能，杂散光残余影响估计为 0.1%，按均匀分布：

$$u_1 = \frac{0.001}{\sqrt{3}} = 0.00058$$

标准器温度漂移：考虑到现场校准环境温差可能较大（如极寒条件下与实验室温差可达 60°C ），中性密度滤光片的温度系数一般不超过 $5 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。以最大温差 60°C 估算，由温度引起的透射比最大漂移量为 $\Delta\tau_{\text{temp}} \approx 0.003$ 。按矩形分布考虑，其引入的标准不确定度为：

$$u_2 = \frac{0.003}{\sqrt{3}} \approx 0.0017$$

合成环境影响标准不确定度为：

$$u_{env} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{(0.00058)^2 + (0.0017)^2} \approx 0.0018$$

B.4.2.6 滤光片安装对准误差引入的不确定度

滤光片在测量时的安装定位误差对测量透射比的影响估计在 ± 0.001 以内,按三角分布估计,其标准不确定度为:

$$u_{align} = \frac{0.001}{\sqrt{6}} = 0.00041$$

B.4.3 合成标准不确定度与扩展不确定度

根据透射比示值相对误差的测量模型,分别求出各输入量对应的灵敏系数为:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \bar{\tau}} = \frac{1}{\tau_s} = 1.1405$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau_s} = -\frac{\bar{\tau}}{\tau_s^2} = -1.1295$$

滤光片透射比均匀性、表面污染、环境条件变化以及安装对准误差等分量对透射比测量的影响,与测量仪器示值的变化具有相同的作用机理,因此可等效采用灵敏系数 1.1405。因此,各分量对透射比示值相对误差的贡献分别为:

仪器示值重复性贡献:

$$1.1405 \times 0.00087 = 0.00099$$

标准值不确定度贡献:

$$1.1295 \times 0.00150 = 0.00169$$

滤光片均匀性贡献:

$$1.1405 \times 0.00115 = 0.00131$$

表面污染贡献:

$$1.1405 \times 0.00058 = 0.00066$$

环境条件贡献:

$$1.1405 \times 0.0018 = 0.00205$$

对准误差贡献:

$$1.1405 \times 0.00041 = 0.00047$$

对上述各项分量贡献值进行平方合成,得到透射比示值相对误差的合成标准不确定度:

$$u_c(\eta) = 0.00323$$

有效自由度计算约为 34，因此取包含因子 $k = 2$ ，对应的扩展不确定度为：

$$U(\eta) = 0.00645(k = 2)$$

B.5 示例B——高透射比量具

B.5.1 校准条件与数据采集

a) 校准时，应满足本规范第 6 章所规定的环境条件；

b) 校准所用标准器具为经校准合格的高透射比量具，其透射比标准值由扇形圆心角和滤光片透射比换算而成。使用前应检查量具旋转装置，确认转动顺畅无异常噪音，并提前启动量具旋转 5 min 以上，确保转速达到稳定状态。

c) 校准操作中，应调整高透射比量具的旋转平面，使其与仪器光轴垂直，确保旋转中心与仪器发射光束同轴。操作过程中，应监测仪器示值的稳定性。此外，在量具前后加装消光隔板，进一步减少环境杂散光的干扰。

d) 数据采集时，应按照本规范第 7.2.1 节的要求选择适合的透射比校准点。每个校准点应独立进行 3 次测量，每次测量前均需停止量具旋转，重新调整至起始位置后再次启动，记录仪器透射比示值。将 3 次测量值求算术平均值，并记录对应的标准透射比值。同时，应记录仪器对应输出的气象光学视程示值，以便后续误差分析和不确定度计算。

B.5.2 标准不确定度评定

在使用透射比为 0.9822 的高透射比量具对大气透射仪进行校准。经独立重复测量 3 次，得到仪器透射比示值的平均值为：

$$\bar{\tau} = 0.9830$$

对示值的各输入量的不确定度进行如下评定。

B.5.2.1 被校仪器示值重复性

在此校准点进行 3 次独立测量，计算得到的测量示值的标准偏差为 $s = 0.0006$ ，因此采用 A 类评定方式，仪器重复性的不确定度为：

$$u_{rep} = \frac{0.0006}{\sqrt{3}} = 0.00035$$

B.5.2.2 透射比标准值（上级量传值）引入的不确定度

高透射比量具校准证书提供的透射比扩展不确定度为 $U = 0.0005 (k = 2)$ ，按 B 类评定方法，得到其标准不确定度为：

$$u_{\tau_s} = \frac{0.0005}{2} = 0.00025$$

B.5.2.3 定标时偏离理想大气能见度条件引入的不确定度

实际校准过程中，能见度条件不可能达到理想状态，估算实际偏差导致的透射比变化最大为 0.00026，按均匀分布估计标准不确定度为：

$$u_{vis} = \frac{0.00026}{\sqrt{3}} = 0.00015$$

B.5.2.4 量具旋转稳定性引入的不确定度

量具旋转过程中的转速波动 ($\pm 0.2\%$)，导致透射比波动最大约为 0.002，按三角分布估计标准不确定度为：

$$u_{rot} = \frac{0.002}{\sqrt{6}} = 0.00082$$

B.5.2.5 旋转平面垂直度与偏心误差引入的不确定度

高透射比量具旋转平面与大气透射仪光轴的垂直偏差最大为 $\pm 0.2^\circ$ ，导致透射比测量的最大变化约为 0.0008，按三角分布评定标准不确定度为：

$$u_{\beta} = \frac{0.0008}{\sqrt{6}} = 0.00033$$

B.5.2.6 测量窗口定位重复性引入的不确定度

高透射比量具每次安装时窗口位置重复性偏差导致透射比变化估计最大为 ± 0.0005 ，按均匀分布评定其标准不确定度为：

$$u_{pos} = \frac{0.0005}{\sqrt{3}} = 0.00029$$

B.5.2.7 量具圆心角测量不确定度

高透射比量具的透射比由其扇形滤光片的圆心角决定，根据圆心角测量证书，其扩展不确定度为 $0.0005 rad (k = 2)$ ，透射比灵敏系数为 $-1/2\pi$ ，因此圆心角误差导致的透射比标准不确定度为：

$$u_{\theta} = \frac{0.0005}{2 \times 2\pi} = 4.0 \times 10^{-5}$$

B.5.2.8 环境条件变化引入的不确定度

校准时环境条件的波动,如温湿度变化、杂散光影响等因素,会对测量示值造成一定的不确定性。估计该影响最大在 ± 0.0008 范围内,按三角分布估计,其标准不确定度为:

$$u_{env} = \frac{0.0008}{\sqrt{6}} = 0.00033$$

B.5.3 合成标准不确定度与扩展不确定度

根据透射比示值相对误差测量模型,各输入量的灵敏系数分别确定如下:

被校仪器示值、环境因素、旋转误差等影响透射比示值的分量,其灵敏系数为:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \bar{\tau}} = \frac{1}{\tau_s} = 1.0181$$

标准透射比量值的灵敏系数为:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau_s} = -\frac{\bar{\tau}}{\tau_s^2} = -1.0189$$

圆心角误差灵敏系数为:

$$-\frac{1}{2\pi} = -0.1592$$

因此,各分量对透射比示值相对误差的贡献分别为:

仪器示值重复性贡献:

$$0.00035 \times 1.0181 = 0.00036$$

标准值量传不确定度贡献:

$$0.00025 \times 1.0189 = 0.00025$$

偏离理想能见度贡献:

$$0.00015 \times 1.0181 = 0.00015$$

旋转稳定性贡献:

$$0.00082 \times 1.0181 = 0.00083$$

垂直度与偏心误差贡献:

$$0.00033 \times 1.0181 = 0.00034$$

窗口定位重复性贡献:

$$0.00029 \times 1.0181 = 0.00030$$

圆心角测量误差贡献:

$$4.0 \times 10^{-5} \times 0.1592 = 6.4 \times 10^{-6}$$

环境条件变化贡献:

$$0.00033 \times 1.0181 = 0.00034$$

对上述各项分量贡献值进行平方合成, 得到透射比示值相对误差的合成标准不确定度:

$$u_c(\eta) = 0.00108$$

有效自由度计算约为 32, 因此取包含因子 $k = 2$, 对应的扩展不确定度为:

$$U(\eta) = 0.00216 (k = 2)$$

附录 C

大气透射仪不同基线长度和 MOR 的透射比测量要求参考

为方便用户使用，本附录给出不同基线长度的大气透射仪在各个 MOR 校准点处，对应的透射比精度要求。

这些数据仅供用户在实际校准操作、选择标准器具及不确定度评定时作为参考依据，不作为仪器合格判定标准。

表 C.1 不同校准点的透射比测量要求 (%)

基线 (m) \ MOR (m)	10	30	35	50	75
350	1.2245	3.6734	4.2857	6.1224	9.1836
500	0.6000	1.8000	2.1000	3.0000	4.5000
800	0.3750	1.1250	1.3125	1.8750	2.8125
1500	0.2000	0.6000	0.7000	1.0000	1.5000
3000	0.2000	0.6000	0.7000	1.0000	1.5000
5000	0.1200	0.3600	0.4200	0.6000	0.9000
10000	0.0600	0.1800	0.2100	0.3000	0.4500