

团体标准
《大气臭氧激光雷达监测系统运行和质量控制技术
规范》（征求意见稿）
编制说明

项目牵头单位：广东省广州生态环境监测中心站

编制与验证单位：中国科学院合肥物质科学研究院、广东省生态环境
监测中心、安徽大学、合肥中科环光技术有限公司

二〇二六年九月

目录

一、项目的目的和意义	1
1.1 项目目的	1
1.2 项目意义	1
二、工作情况介绍	2
2.1 工作过程	2
2.2 技术路线图	3
图1 技术路线图	4
2.3 基本原则	4
三、项目涉及技术的基本情况	4
四、编制原则和主要内容的确定论据	5
1 范围	6
2 规范性引用文件	6
3.术语和定义	7
4 系统构成	11
5 检查维护要求	12
6 质量保证和质量控制	16
7 运行维护措施	26
附录A 性能检测参数计算方法（规范性）	31
附录B 运行维护方法（资料性）	39
附录C 大气臭氧激光雷达监测系统巡检内容表	43
附录D 大气臭氧激光雷达连续自动监测系统质量控制工作记录表	47
五、与有关的现行法律、法规和强制性国家标准、行业标准、广东省地方标准及 广州市公共服务类地方标准的关系	48
六、重大分歧意见的处理经过、结果和依据	48
七、其他应予说明的事项	48

一、项目的目的和意义

1.1 项目目的

为贯彻《中华人民共和国生态环境法典》《中华人民共和国气象法》《中华人民共和国计量法》和《区域环境空气臭氧自动监测质量评估技术要求》及相关法律法规、标准和文件要求，规范大气臭氧激光雷达监测系统的运行与质量控制，编制《大气臭氧激光雷达监测系统运行与质量控制技术规范》。该规范的制定旨在确保大气臭氧激光雷达的稳定高效运行，推动激光雷达技术的持续发展与广泛应用，有效支持广州市空气污染源监管与治理工作，提升大气环境监测的整体质量和公信力。

1.2 项目意义

激光雷达作为全国环境监测体系中第一款大量布点的立体监测技术，将传统的近地面布点监测升级为垂直、水平及监测路径（走航）的廓线监测及平面监测，使得监测手段产生了质的变化，从传统意义上针对大气环境的被动采样监测转变为针对目标区域的主动监测，为实现打赢蓝天保卫战的战略目标提供了强有力的技术手段支撑。但在快速发展的监测技术领域，各设备厂家之间由于市场竞争带来的技术壁垒导致该技术并未高效透明地用于实际监测工作中，如使用方不能针对大量的实时监测数据进行及时有效的审核、监管、应用，无疑是对监测系统能力建设成果的一大浪费，也将阻碍立体监测乃至整体环境监测技术的长期发展。另外，针对光化学污染等攻关难题的需求，臭氧激光雷达、温湿度激光雷达、前体物/常规污染物激光雷达、测风激光雷达等一系列立体监测技术也已逐步进入监测市场，尽快规范立体监测系统领域的数据质控、反演、应用工作具有十足的前瞻性和必要性。

目前，国内外大气臭氧激光雷达监测技术面临着波长选取、设备性能和技术参数等方面的多样化，且设备缺乏校准或者校准方法各异，导致数据质量参差不齐；同时，数据处理和分析方法没有统一标准，不同研究人员和机构可能采用不同的算法和流程，导致监测结果不一致，影响了监测数据的科学性、可

靠性和应用效果。

此次针对大气臭氧激光雷达监测系统制定的管理和质量控制技术规范，不仅从臭氧激光雷达波长的选取原则、模块级规范项目（如背景噪声、系统线性度等）、系统级规范项目（如信噪比、有效探测距离、盲区等）和产品数据规范项目（如臭氧浓度测量准确性等）等方面进行相应规范，而且对大气臭氧激光雷达在安装调试及运行过程中的维护和巡检等内容提出明确要求。

此规范的制定能有效提升臭氧激光雷达监测系统的稳定性和可靠性，确保监测数据具有更高的准确性和可比性，方便数据的整合和分析，增强激光雷达数据在研究及应用过程中的价值。

二、工作情况介绍

2.1 工作过程

（1）成立项目编制工作组

2024年8月向广州市市场监督管理局提交广州市地方标准制定计划申报，2024年8月22日被纳入2024年度广州市地方标准拟立项项目。

2024年9月19日成立大气臭氧激光雷达监测管理要求和质量控制技术研究项目工作组，2024年11月20日成立地方标准《大气臭氧激光雷达监测管理要求和质量控制技术规范》编制工作组。2026年9月向广东省分析测试协会提交团体标准制修订计划项目任务书。

（2）整理汇总资料并形成《技术规范》草案稿

2024年8月—2025年5月，为制定《技术规范》草案稿，项目团队对相关资料进行了全面的整理与汇总。这一过程包括对现有技术文件、研究数据以及实际应用案例的系统性分析，旨在确保草案稿的科学性、先进性和可操作性。通过这一阶段的工作，成功形成了《技术规范》的草案稿，为后续的专家咨询和标准制定奠定了坚实的基础。

（3）方法比对和方法验证实验验证

前期，为验证臭氧激光雷达监测方法的准确性和适用性，本研究开展了方

法比对和方法验证实验。实验在广州塔附近区域安装1台固定式臭氧激光雷达，与广州塔梯度监测数据进行比对分析，验证臭氧浓度垂直分布特征的监测方法。同时，在臭氧污染典型时段（4月至11月），结合季节性风向特点，分别在从化区良口镇、番禺区大学城、南沙区榄核镇、新垦镇、南沙街增设5台固定式臭氧激光雷达，形成南北方向的组网监测体系。通过对比不同区域和时间段的臭氧垂直分布数据，验证激光雷达在区域臭氧垂直浓度特征及传输特性监测中的可行性，并为臭氧垂直遥感监测方法的标准化提供示范支持。另外在国内其他地方也开展了相应的实验进行验证。

（4）完善草案稿

2025年6月—2026年9月，为完善《技术规范》草案稿，项目团队结合前期整理的资料和实验验证结果，对草案进行了进一步优化和补充。针对激光雷达的运行维护、质量控制等关键环节，补充了技术细节和操作要求，确保规范的科学性和可操作性。对草案中的条款进行了精炼和优化，使其更加清晰、正式，便于理解和执行。并对附录中的巡检记录表、质控工作记录表及计算方法等内容进行了补充和完善，确保附录的完整性和实用性。

（5）项目立项

2026年9月，组织召开了团体标准草案稿立项论证会，会后编制组根据专家意见对技术规范进行了修改。结合专家和相关单位的反馈意见，对草案稿进行了针对性修改，进一步提升了规范的适用性，形成征求意见稿初稿。

（6）征求意见

2026年9月-10月，在全国团体标准信息网上公开征求意见。

2.2 技术路线图

本标准技术路线基于当前激光雷达监测技术发展现状和广州市区域应用实际，结合已有的技术资料、仪器设备性能、质量控制需求及试验验证结果，采用“标准文献调研+技术方案分析+系统测试比对+质量控制优化+标准框架构建”的编制思路。标准编制工作的技术路线见图1。

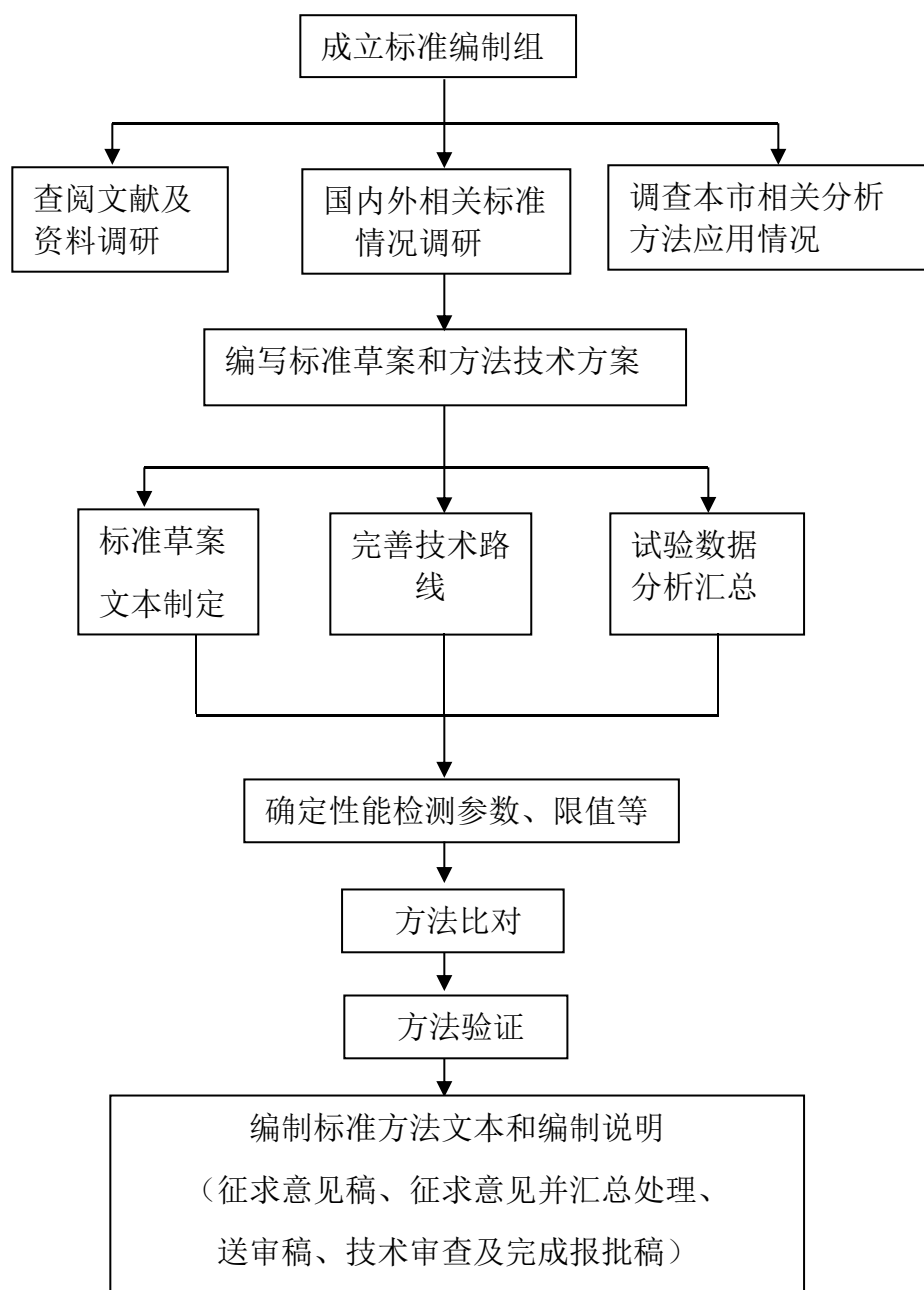


图 1 技术路线图

2.3 基本原则

1.技术规范满足相关环保标准和环保工作的要求，确保标准的科学性、先进性、可行性和可操作性；

2.技术规范具有普遍适用性，易于推广使用。符合检测从业单位的技术水平，能被国内主要的环境分析实验室所应用并达到所规定的要求。

三、项目涉及技术的基本情况

广东省作为工业化进程较快的省份，面临着臭氧浓度超标及日益严峻的大气污染问题。鉴于广州市复杂的地理环境和多样化的污染源，在采用先进的大气臭氧雷达技术时，确保监测数据的准确性和一致性显得尤为关键。依据技术要求及检测方法相关标准实施严格质量控制，是实现监测数据与监管平台有效对接、满足地方专项要求的核心手段。通过精准监测数据支撑臭氧污染科学治理，能有效推动区域空气质量改善，为环境治理提供精确的数据支持。

自2016年起，为了获取珠三角中心区域臭氧浓度的垂直高空分布特征，并与广州塔的梯度臭氧分层监测数据进行对比分析，1台固定监测的臭氧激光雷达被安装于广州市中心区的广州塔附近区域，该地点位于海珠区，是开展长期在线监测并获取臭氧浓度垂直分布的理想位置。2016年，广州市臭氧浓度的监测结果显示，4月到11月期间臭氧浓度较高，易发生以臭氧为首要污染物的污染天气。因此，除了广州塔附近的固定雷达外，还在臭氧污染典型时段（4月至11月），结合季节性风向特点，在广州市南北方向的典型区域增设了5台固定式臭氧激光雷达进行加强观测。

同时为了监测臭氧的区域垂直浓度特征及其传输特性，除了中心点位的固定监测外，南北方向分别在从化区的良口镇、番禺区的大学城、南沙区的榄核镇、新垦镇、南沙街安装了5台激光雷达，进行加强监测。这一组网旨在获取不同时间段、不同区域的臭氧高空分布特征，分析臭氧高值时段在广州市的垂直空间分布及变化规律，并进行臭氧垂直遥感监测的可行性研究及示范。

随着臭氧、温湿度、前体物及测风等一系列立体监测激光雷达逐步进入市场，规范该领域工作已不可或缺。本规范的制定不仅能推动生态环境监测技术的整体升级，更能为同类型项目提供可借鉴经验，助力生态环境治理体系现代化及绿色低碳发展目标的实现。在保障公众健康的同时，通过方便地整合和分析数据，提升监测数据的真实性、可靠性和可追溯性，为臭氧污染防控提供精准支撑，具有深远的社会与技术意义。

四、编制原则和主要内容的确定论据

本技术规范主要结合现行有效的各类技术规范、法律法规、国家和省级管理部门的通知等要求，结合工作实际情况进行编写，规定了大气臭氧雷达监测系统的构成、日常运行维护要求，质量保证和质量控制等技术要求。

1 范围

文本内容：“本标准规定了大气臭氧激光雷达监测系统的术语和定义、系统构成，检查维护、质量保证与质量控制、运行维护措施的要求。

本标准适用于地基大气臭氧差分吸收激光雷达监测系统的运行维护和质量控制”

编制说明：

本技术规范旨在规范基于差分吸收原理的臭氧激光雷达监测系统的检查维护、质量保证和质量控制措施，确保激光雷达系统的运行稳定性和数据准确性，提高臭氧监测工作的规范性和科学性，为此类系统的运行管理提供技术参考。

2 规范性引用文件

文本内容：“下列文件中的内容通过文中的规范性引用而成为本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

HJ 193 环境空气气态污染物（SO₂、NO₂、O₃、CO）连续自动监测系统安装和验收技术规范

HJ 590 环境空气 臭氧的测定 紫外光度法

HJ 818 环境空气气态污染物（SO₂、NO₂、O₃、CO）连续自动监测系统运行和质控技术规范

HJ 1099 环境空气臭氧监测一级校准技术规范”

编制说明：

本技术规范编制过程中，规范性引用了上述监测技术规范及要求，同时参

考了相关国家标准、行业标准，以及国家、省各级管理部门出具的关于激光雷达监测工作的办法、要求等，以确保激光雷达系统的安全性、质量控制及环境适应性要求，同时为臭氧监测技术的实施提供科学依据，涵盖了激光产品安全、电气安全、环境空气臭氧监测及质量控制等多个方面。激光雷达原理性的描述内容参考了相关文献和书籍。具体如下：

1. GB 7247.1-2012 激光产品的安全 第1部分：设备分类、要求和用户指南
2. GB 2894-2008 安全标志及其使用导则
3. GB/T 10320-2011 激光设备和设施的电器安全
4. GB 3095 环境空气质量标准
5. HJ 633-2026 环境空气质量指数（AQI）技术规定
6. 环办监测函〔2017〕290号 关于印发《国家环境空气质量监测网城市站运行管理实施细则（试行）》的函
7. Collis R T H , Russell P B .Lidar measurement of particles and gases by elastic backscattering and differential absorption[J].Springer Berlin Heidelberg, 1976.
8. Kovalev V A , Eichinger W E .Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods[J].John Wiley, 2004:i-xvi.

3.术语和定义

文本内容：“臭氧激光雷达 **ozone differential absorption lidar (O₃-DIAL)**

本文件所述臭氧激光雷达是指基于弹性散射原理（包括米散射和瑞利散射）和差分吸收原理，以高重复频率向大气中发射两束波长非常接近的激光，其中一束激光的波长位于臭氧光谱吸收较强，另一束激光波长位于臭氧光谱吸收较弱的位置，利用臭氧对这两束激光在不同距离上的散射回波信号差异，确定两束激光共同路径上臭氧的浓度，从而实现对臭氧时空分布进行探测的主动遥感仪器。”

编制说明：

该定义参考了激光雷达相关技术书籍、文献，结合差分吸收激光雷达技术原理进行描述，明确了臭氧激光雷达的工作机制和应用范围。

文本内容：“**3.2 λ_{on} 波长 λ_{on} wavelength**

激光雷达发射的位于臭氧光谱吸收较强位置的工作波长，该波长通道信号包含了臭氧吸收信息。”

编制说明：

该定义参考了臭氧差分吸收激光雷达技术的基本原理，结合臭氧光谱吸收特性进行界定，并明确了其包含臭氧吸收信息的作用。

文本内容“**3.3 λ_{off} 波长 λ_{off} wavelength**

激光雷达发射的位于臭氧光谱吸收较弱位置的工作波长，该波长通道信号包含了大气背景信息。”

编制说明：

该定义基于臭氧差分吸收激光雷达技术原理，与 λ_{on} 波长相对，指出其为臭氧吸收较弱的波长，主要用于提供大气背景信息，以进行臭氧浓度反演计算。

文本内容“**3.4 盲区Blind Region**

在离激光雷达较近的一段距离范围内，激光器发射的激光光束不在接收视场内，接收望远镜接收不到大气颗粒物及分子的后向散射光，激光雷达无法准确获取臭氧浓度信息，这一区域称为激光雷达的盲区。”

编制说明：

该定义基于臭氧激光雷达的技术原理及行业通用检测方法进行编制，臭氧激光雷达的盲区范围主要由发射激光束与接收望远镜的视场角匹配关系决定，其物理机制为近场激光光路与接收光路未完全重叠。

文本内容：“**3.5 过渡区Transition Region**

盲区以外，发射的激光光束逐步地进入接收望远镜的接收视场内，大气后

向散射光只是部分地被接收，这一区域称为激光雷达的过渡区。”

编制说明：

该定义基于臭氧激光雷达的技术原理、光学系统特性及信号接收规律进行编制，过渡区的形成与激光发射光路和接收望远镜视场的几何匹配直接相关。在盲区外侧，随着距离增加，激光束与接收视场的重叠面积逐步扩大，导致后向散射信号由部分接收向完全接收过渡。

文本内容：“**3.6 大气气溶胶后向散射系数 Backscattering Coefficient of Atmosphere Aerosol**

指发射光在大气中传播单位距离时，大气分子和颗粒物对发射光在 90° 至 180° 方向的散射而产生的相对衰减率。”

编制说明：

该定义描述了激光在大气中传播单位距离时，大气中分子和颗粒物对入射激光由于在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 方向的后向散射而产生的相对衰减率。单位为： $\text{Sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 或者 $\text{Sr}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。参考文献：Lidar Measurement of Particles and Gases by Elastic

Backscattering and Differential Absorption, R. T. H. Collis and P. B. Russell.。

文本内容“**3.7 大气气溶胶消光系数 Extinction Coefficient of Atmosphere Aerosol**

指发射光在大气中传播单位距离时的相对衰减率，是大气中的颗粒物对发射光的散射与吸收贡献之和。”

编制说明：

该定义描述了激光在大气中传播单位距离时的相对衰减率，是大气中分子和颗粒物对入射激光的散射与吸收的贡献之和，严格地说，这是能量因散射而被吸收和耗散。单位为： m^{-1} 或者 km^{-1} 。参考文献：Lidar Measurement of Particles and Gases by Elastic Backscattering and Differential Absorption, R. T. H. Collis and P. B. Russell.。

文本内容：“**3.8 数据采集时间间隔 Data Acquisition Interval**

指上次数据采集完成到下次数据采集开始的时间差。”

编制说明：

该定义来源于激光雷达数据采集系统的通用定义，指明数据采集的时间间隔，以描述系统的数据获取频率。

文本内容：“**3.9 空间分辨率 Space Resolution**

激光雷达采集到的原始回波信号是离散数据，相邻两个数据点之间对应的空间距离为空间分辨率，它表征了采集数据的间隔程度。”

编制说明：

激光雷达采集到的原始回波信号是离散数据，相邻两个数据点之间对应的空间距离为空间分辨率，它表征了采集数据的间隔程度。激光脉冲长度、采集系统的模数转换速率和电子带宽是影响距离分辨率大小的因素。在激光雷达的数据处理和反演计算中，如果用到平滑等空间滤波技术，颗粒物浓度廓线距离分辨率会大于原始回波信号的空间分辨率，具体大小取决于所使用的平滑技术的细节，称之为有效空间分辨率。参考文献：Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods [M]. A John Wiley & Sons, Inc., 2004.。

文本内容“**3.10 信噪比 Signal-to-noise Ratio**

信噪比（SNR）是探测器接收到的信号与产生的总的噪声之比，是衡量信号与噪声强弱关系的度量。”

编制说明：

信噪比是衡量激光雷达探测性能的重要指标，有必要对其进行明确定义。该定义参考了信号处理领域的通用定义，描述了激光雷达系统中探测信号与噪声的比值，并作为数据质量评估的重要参数。

文本内容“**3.11 有效探测距离 Effective Detection Range**

激光雷达在晴朗天气下进行原始信号采集，工作波长 λ_{on} 和 λ_{off} 通道信号信噪比 $SNR \geq 20$ 时对应的距离。”

编制说明：

有效探测距离是衡量激光雷达探测性能的重要指标，有必要对其进行明确定义。该定义结合激光雷达实际应用，设定了在晴朗天气下，当 λ_{on} 和 λ_{off} 通道的信噪比 $SNR \geq 20$ 时的探测距离，以确保数据的有效性和可比性。

4 系统构成

文本内容：“4.1 激光雷达系统包括光源发射系统、光学接收系统、数据采集与分析系统。

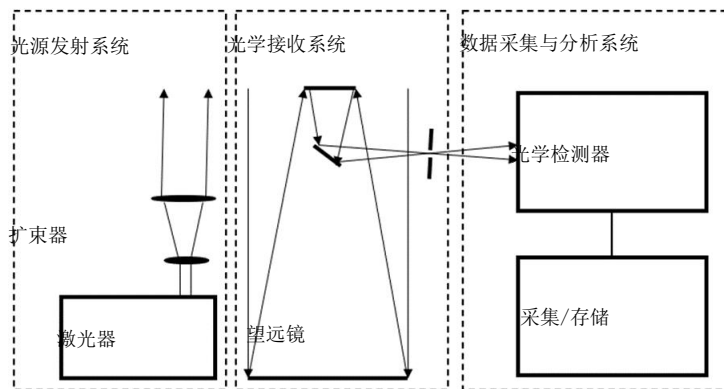


图1 大气臭氧激光雷达系统结构示意图

4.1.1 光源发射系统：光源发射系统由激光器、扩束镜、反射镜等光学器件组成。激光器发出脉冲光束经过准直扩束、反射之后，按照一定的发散角发射至大气中。

4.1.2 光学接收系统：光学接收系统由接收望远镜、光阑、准直透镜、分光器件等组成。激光与大气相互作用产生的部分后向散射光被望远镜接收后经过光阑、准直透镜，再由分光器件去除大气背景光干扰并分离多个波长信号后传输到数据采集与分析系统。

4.1.3 数据采集与分析系统：数据采集与分析系统包括光学检测器、信号采集单元、数据分析和存储单元。光学接收系统接收的光信号由光学检测器分别进行光电转换，光信号转换为电学信号后，经信号放大器调制、放大，被信号采集单元采集，由数据存储单元进行存储，并通过数据分析单元进行反演计算和展示。”

编制说明：

本规范遵循激光雷达领域的通用方案，对臭氧激光雷达的系统构成及功能进行了分类定义，增加臭氧激光雷达系统结构示意图，以直观展示系统组成和工作原理，并对相关术语和技术指标进行了细化说明，以提高标准的适用性和可操作性。

5 检查维护要求

文本内容：“**5.1 基本要求**

5.1.1 臭氧激光雷达自动监测系统应可全年连续运行，停运超过3天以上，应及时记录和备案，并采取有效措施及时恢复运行。需要主动停运的，运维人员应提前报备。

5.1.2 站房应保证正常的供电状态，如果发生停电导致数据缺失应及时记录和备案，并采取有效措施及时恢复运行。

5.1.3 在日常运行中因设备故障需要临时使用备用监测设备开展监测，或因设备报废需要更新监测设备的，应于设备更换后1周内备案。设备更新应执行HJ 193的相关要求。

5.1.4 监测设备主要技术参数应与设备说明书要求和系统安装验收时的设置值保持一致。如需对主要技术参数进行调整，应开展参数调整试验和设备性能测试，记录测试结果并编制参数调整测试报告。主要技术参数调整应及时记录和备案。

5.1.5 设备的日常维护主要分为设备每日、每周、每季度、每半年和每年巡检、维护和校正及站房和辅助设备的日常巡检维护，日常维护需要记录存档。进行设备维护时，应规范操作，注意安全，防止发生意外。系统日常运行维护应按HJ 818的相关要求执行。”

编制说明：

本规范参照了《环境空气气态污染物（SO₂、NO₂、O₃、CO）连续自动监测系统安装和验收技术规范》（HJ 193）和《环境空气气态污染物（SO₂、NO₂、O₃、CO）连续自动监测系统运行和质控技术规范》（HJ 818）中5.1的

相关要求，结合臭氧激光雷达监测系统的实际运行需求，制定了设备运行、维护和参数调整的具体要求，确保系统全年稳定运行、及时恢复故障、准确记录性能测试结果，并强调安全操作和定期维护记录，以保证监测数据的准确性和设备的长期可靠性。

文本内容：“**5.2.1 臭氧激光雷达系统每周应开展一次运行环境条件巡检，并填写巡检记录表(参见表C.1)。**

5.2.2 运行环境条件巡检内容主要包括：

- a)检查雷达系统的供电环境是否正常，电压是否稳定，是否存在供电隐患；
- b)检查激光器电源应急停机装置是否正常，并处于明显位置；
- c)检查雷达系统的固定是否稳定牢靠，是否存在倾倒等风险隐患；
- d)检查各仪器设备是否整洁，标识是否清晰；臭氧雷达激光警告标志、说明标志是否清晰，激光窗口围栏警告标志是否清晰；
- e)检查雷达防护外壳是否正常；
- f)检查网络通讯系统及数据传输功能是否正常；
- g)检查外部环境是否正常，有没有对测定结果或运行环境存在明显影响的污染源；
- h)对仪器周边及站房内外环境卫生进行检查，及时保洁；
- i)定期检查雷达及站房周边环境安全，检查消防、避雷和报警等安全设施是否正常；
- j)及时清除站房或仪器周围的杂草和积水，剪除对采样或监测光束有影响的树枝；
- k)及时检查雷达周边环境，检查电源、主机是否有被水浸没等风险隐患，及时消除风险隐患。

5.2.3 对于部署在固定站房的雷达，除开展5.2.2巡检内容外，还应对站房及辅助仪器进行巡检，主要包括：

a)保证空调正常工作，站房温度保持在 $(25\pm5)^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度保持在80%以下，每年对站房空调至少进行一次维护保养，空调应具有来电自启动功能，并设置成来电自启动；

b)在冬、夏季节应注意站房内外温差，应及时调整站房温度，防止光学镜片表面出现冷凝水情况；

c)站房门窗关闭良好，人走关门；

d)检查站房是否有漏雨现象，站房外围的其它设施是否有损坏或被水淹，如遇到以上问题应及时处理，保证系统能安全运行。”

编制说明：

本条款参照了《环境空气气态污染物（ SO_2 、 NO_2 、 O_3 、CO）连续自动监测系统运行和质控技术规范》（HJ 818）中5.2的相关要求，结合臭氧激光雷达系统在实际运行过程中的环境敏感性和设备特点，制定了系统运行环境条件的巡检频次、内容及要求，旨在保障设备稳定运行、数据采集准确及操作环境的安全性及规范性。

文本内容：“**5.3 激光雷达系统运行状况日常巡检**

5.3.1 每日远程巡检内容：

- a)检查仪器是否正常运行；
- b)检查雷达采集软件是否正常工作；
- c)检查雷达分析软件是否正常工作；
- d)检查雷达是否有异常或者报警问题；
- e)检查雷达数据存储和传输是否正常；
- f)填写每日运维记录表（参见表C.2）。

5.3.2 每周巡检维护内容：

- a)检查雷达激光器是否有异常或者报警；
- b)检查雷达软件是否工作正常，参数设置是否正常；
- c)检测并记录背景噪声基线斜率绝对值；

- d)检测信噪比和有效探测距离是否满足要求;
- e)检查、计算并记录本周的有效数据率;
- f)检查网络和数据传输/上传是否正常;
- g)检查激光安全标识是否齐全;
- h)检查雷达望远镜镜片表面是否清洁, 如果不干净需要清理干净;
- i)检查天窗镜片是否清洁, 如果不干净需要清理干净;
- j)检查天窗加热装置功能是否正常(如配备);
- k)检查激光光斑是否位于天窗出光中心, 有偏差进行调整;
- l)检查激光器冷却水水位是否过低, 如果过低需要加水(仅限水冷激光器);
- m)仪器说明书规定的其他维护内容;
- n)填写每周运维记录表(参见表C.3)。

5.3.3 每季度巡检维护内容:

- a)完成每周工作事项中全部内容;
- b)对激光光斑形状和激光能量进行测试、标定和校准(方法由各自仪器厂商确定);
- c)检查、计算并记录本季度的有效数据率;
- d)对系统线性度进行检测和校准;
- e)对工作波长通道灵敏度一致性进行检验;
- f)更换一次冷却水(仅限水冷激光器);
- g)仪器说明书规定的其他维护内容;
- h)填写每季度运维记录表(参见C.4)。

5.3.4 每半年巡检维护内容:

- a)完成每季度工作事项中全部内容;
- b)更换一次冷却水滤芯(仅限水冷激光器);
- c)对激光发射波长偏差进行检验;

- d)采用臭氧分析仪对臭氧浓度测量准确性进行检验（选测项）；
- e)对有效数据区最低高度进行检验（选测项）；
- f)对磁盘进行数据整理和备份；
- g)仪器说明书规定的其他维护内容；
- h)填写半年运维记录表（参见表C.5）。

5.3.5 每年巡检维护内容：

- a)完成每半年工作事项中全部内容；
- b)对臭氧浓度廓线一致性进行检验（选测项）；
- c)仪器说明书规定的其他维护内容；
- d)填写年运维记录表（参见表C.6）。”

编制说明：

参照了《环境保护部办公厅 关于印发〈国家环境空气质量监测网城市站运行管理实施细则（试行）〉的函》（环办监测函〔2017〕290号）中附录1内容，根据激光雷达系统的特点和运维要求，结合实际工作需要进行了修订，旨在规范激光雷达设备的日常维护和巡检工作，确保设备的正常运行与数据的准确性。内容包括远程巡检、每周巡检、每季度巡检、每半年巡检以及每年巡检等多个维度，涵盖了从设备基础检查到各项技术指标测试的各类维护工作，特别是根据不同的周期，逐步提高巡检的深度与技术要求。

6 质量保证和质量控制

文本内容：“6 质量保证和质量控制

6.1 一般要求

6.1.1 激光雷达测试过程中，单次数据采集积分时间应 $\leq 10\text{min}$ 。

6.1.2 按巡检要求及表1中检查频次，开展质量控制参数检查工作，并记录检查结果，记录表格样式可参考附录D。

6.1.3 每次激光雷达系统故障检修完成后，应对仪器进行质量控制参数测

试，并对检修和测试情况进行记录并存档。”

编制说明：

本条款依据激光雷达系统运行过程中对数据质量的基本要求，结合环境监测设备质量管理的实际经验，明确了臭氧激光雷达在测试过程中积分时间的控制标准、性能检测的检查频次及记录要求，以及设备检修后的性能验证流程，确保数据采集过程的规范性和结果的可靠性，为系统质量保证与质量控制提供依据和操作指导。其中，激光雷达测试过程中，单次数据采集的积分时间不应超过10分钟，以保证数据的高效采集与质量。

文本内容：“6.2 质量控制参数

6.2.1 激光雷达系统质量控制参数及偏离后的控制措施见表1。

表1 激光雷达质量控制参数及控制措施

检查项目	指标	检查频次	建议的控制措施
激光发射 λ_{on} 波长	$253\text{ nm} \leq \lambda_{on} \leq 320\text{ nm}$	系统完成安装调试后的48 h内 以及更换激光器模块后	更换激光器或维修激光器
激光发射 λ_{off} 波长	$ \lambda_{on} - \lambda_{off} \leq 30\text{ nm}$	系统完成安装调试后的48 h内 以及更换激光器模块后	更换激光器或维修激光器
激光发射波长偏差	$\leq 0.5\text{ nm}$	系统完成安装调试后的48 h 内、更换激光器模块后、每半 年应进行一次	更换激光器或维修激光器
探测距离偏差（选测项）	$\leq$ 空间分辨率	系统完成安装调试后的48 h 内、更换激光器模块后	检查维修采集系统
系统线性度	线性度 $\geq 95\%$ 拟合斜率 $\leq 10^{-5}$	每季度	调整光路
背景噪声基线斜率绝对值	$\leq 10^{-5}$	每周	调整采集系统
工作波长通道灵敏度一致性	$\leq 20\%$	每季度	更换倍增管
信噪比	$\geq 1000@0.5\text{ km}$ $\geq 100@2\text{ km}$	每周	检查激光发射功率并调整光 路
有效探测距离	$\geq 3\text{ km}$	每周	检查激光发射功率并调整收 发光路
臭氧浓度测量准确性（选测 项）	相对偏差 $\leq 20\%$ 相关系数 $R \geq 0.8$	每半年	调整光路
有效数据区最低高度（选测 项）	$\leq 300\text{ m}$	每半年	调整光路
有效数据率	$\geq 85\%$	每周、每季度	排查原因并解决
臭氧浓度廓线一致性（选测 项）	$\leq 20\%$	每年	调整光路

6.2.2 激光发射波长

6.2.2.1 激光雷达系统完成安装调试后的48 h内以及更换激光器模块后应

进行一次激光发射波长检查。

6.2.2.2 使用分辨率优于**0.25 nm**的光谱仪分别测量激光雷达的工作波长 λ_{on} 和 λ_{off} ， λ_{on} 对应的光谱仪读数应在**253 nm~320 nm**范围内， λ_{on} 和 λ_{off} 的差值应在**±30 nm**范围内。详细方法见附录A.1。

6.2.2.3 当激光发射波长不满足要求时，需要根据实际情况更换激光器或维修激光器，操作方法见7.5。

6.2.3 激光发射波长偏差

6.2.3.1 激光雷达系统完成安装调试后的**48 h**内、更换激光器模块后以及每半年应进行一次激光发射波长偏差检查。

6.2.3.2 激光雷达工作波长 λ_{on} 和 λ_{off} 与光谱仪实测结果绝对偏差平均值分别应满足**≤0.5 nm**的要求，详细方法见附录A.2。

6.2.3.3 当激光发射波长偏差不满足要求时，需要根据实际情况更换激光器或维修激光器，操作方法见7.5。

6.2.4 探测距离偏差（选测项）

6.2.4.1 激光雷达系统完成安装调试后的**48 h**内、更换激光器模块后应进行一次探测距离偏差检查。

6.2.4.2 激光雷达工作波长 λ_{on} 和 λ_{off} 分别对三个不同目标物的探测距离与测距仪测量结果的绝对偏差平均值分别应满足**≤空间分辨率**的要求，详细方法见附录A.3。

6.2.4.3 当探测距离偏差不满足要求时，需要根据实际情况检查维修采集系统，操作方法见7.2。

6.2.5 系统线性度

6.2.5.1 每季度应对仪器的系统线性度进行检测和校准，直到满足要求。

6.2.5.2 在激光雷达探测器前依次加装五档衰减片，工作波长 λ_{on} 和 λ_{off} 通道有效信号过渡区峰值变化的线性度应满足**≥95%**，比值廓线的拟合斜率绝对值应满足**≤10⁻⁵**的要求，详细方法见附录A.4。

6.2.5.3 当系统线性度不满足要求时，需要根据实际情况调整光路，操作方法见7.1。

6.2.6 背景噪声基线斜率绝对值

6.2.6.1 每周应对仪器进行一次背景噪声基线斜率绝对值检查。

6.2.6.2 激光雷达在晴朗天气下将望远镜接收面遮挡后进行原始信号采集，工作波长 λ_{on} 和 λ_{off} 通道背景基线噪声信号线性拟合斜率的绝对值应分别满足 $\leq 10^{-5}$ 的要求，详细方法见附录A.5。

6.2.6.3 当背景噪声基线斜率绝对值不满足要求时，需要根据实际情况调整采集系统，操作方法见7.2。

6.2.7 工作波长通道灵敏度一致性

6.2.7.1 每季度应对仪器的工作波长通道灵敏度一致性进行检查。

6.2.7.2 在激光雷达探测器前依次加装五档衰减片，工作波长 λ_{on} 和 λ_{off} 通道有效信号过渡区峰值变化的线性拟合斜率（灵敏度）相对偏差应满足 $\leq 20\%$ 的要求，详细方法见附录A.6。

6.2.7.3 当工作波长通道灵敏度一致性不满足要求时，需要根据实际情况更换倍增管，操作方法见7.3。

6.2.8 信噪比

6.2.8.1 每周应对仪器的信噪比进行一次检查。

6.2.8.2 激光雷达在晴朗天气下进行原始信号采集，工作波长 λ_{on} 和 λ_{off} 通道有效信号幅值与噪声比值分别应满足 $\geq 1000@0.5\text{ km}$ 和 $\geq 100@2\text{ km}$ 的要求，详细方法见附录A.7。

6.2.8.3 当信噪比不满足要求时，需要根据实际情况检查激光发射功率并调整光路，操作方法见7.1和7.4。

6.2.9 有效探测距离

6.2.9.1 每周应对仪器的有效探测距离进行一次检查。

6.2.9.2 激光雷达在晴朗天气下进行原始信号采集，工作波长 λ_{on} 和 λ_{off}

通道信号信噪比 $\text{SNR} \geq 20$ 时对应的距离分别应满足 $\geq 3 \text{ km}$ 的要求，详细方法见附录A.8。

6.2.9.3 当有效探测距离不满足要求时，需要根据实际情况检查激光发射功率并调整光路，操作方法见7.1和7.4。

6.2.10 臭氧浓度测量准确性（选测项）

6.2.10.1 每半年采用臭氧分析仪对臭氧浓度测量准确性进行检查。

6.2.10.2 激光雷达在3种不同污染天气下，探测到的臭氧浓度与符合GB/T 15438和HJ 1099的臭氧分析仪获得的臭氧浓度在指定范围内的相对偏差应满足 $\leq 20\%$ ，相关系数均应满足 ≥ 0.8 的要求，详细方法见附录A.9。

6.2.10.3 当臭氧浓度测量准确性不满足要求时，需要根据实际情况调整光路，操作方法见7.1。

6.2.11 有效数据区最低高度（选测项）

6.2.11.1 每半年应对仪器的有效数据区最低高度进行检查。

6.2.11.2 基于臭氧浓度测量准确性的测试数据，满足要求的第一台臭氧分析仪与激光雷达之间的距离应满足 $\leq 300 \text{ m}$ 的要求，详细方法见附录A.10。

6.2.11.3 当有效数据区最低高度不满足要求时，需要根据实际情况调整光路，操作方法见7.1。

6.2.12 有效数据率

6.2.12.1 每周、每季度分别进行一次有效数据率计算，统计周期内的有效数据率应大于等于85%，详细方法见附录A.11。当有效数据率不满足要求时，需要根据实际情况排查原因并解决。

6.2.12.2 监测系统正常运行时的所有监测数据均为有效数据，应全部参与统计。

6.2.12.3 对仪器进行检查、校准、维护保养或仪器出现故障等非正常监测期间的数据为无效数据，两次校准、维护保养间隔不得小于7天；仪器启动至仪器预热完成时段内的数据为无效数据。

6.2.12.4 在仪器故障、运行不稳定或其他监测质量不受控情况下出现的零值或负值为无效数据，不参加统计。

6.2.12.5 对于缺失和判断为无效的数据均应注明原因，并保留原始记录。

6.2.13 臭氧浓度廓线一致性（选测项）

6.2.13.1 每年对臭氧浓度廓线一致性进行检查。激光雷达在3种不同污染天气下，三台样机获得的臭氧浓度廓线之间在指定范围内的相对标准偏差均应满足 $\leq 20\%$ 的要求，详细方法见附录A.12。

6.2.13.2 当臭氧浓度廓线一致性不满足要求时，需要根据实际情况调整光路，操作方法见7.1。”

编制说明：

本条款从激光雷达系统的运行特点出发，结合以往项目实施和运维管理过程中对臭氧激光雷达性能稳定性、数据准确性等方面的实际要求，系统梳理并明确了激光雷达性能检测的关键参数、检查频次及控制要求。性能指标的设定充分考虑了臭氧激光雷达的工作原理和应用环境，在激光发射波长、波长偏差、探测距离、系统线性度、信噪比、灵敏度一致性、有效探测能力、数据完整性及浓度测量准确性等方面进行了全面量化。这些参数均可通过仪器配套功能或配合常规测量设备进行检验，具有较强的操作性和可评估性。针对每项性能参数的检测，文件明确了对应的检查周期和判定标准，并制定了偏离后的处理措施，如调整光路、更换部件、维护采集系统等，保障系统在性能异常情况下能及时恢复正常状态。部分关键技术细节（如波长检测、线性度测试、有效数据率判定等）已通过附录形式给出，便于实施人员具体操作和溯源验证。本条款内容构建了激光雷达系统质量控制的重要基础，旨在通过制度化、标准化的检测流程，提升设备运行的稳定性与监测数据的可靠性，为后续数据分析、比对与成果输出提供有力支撑。

a) 激光发射波长：

激光发射波长是激光雷达系统性能的关键参数之一，直接影响臭氧等气体

的监测精度。该检查旨在确保激光雷达在正确的工作波长范围内运行，以避免波长偏差带来的测量误差。激光发射波长设定在253 nm至320 nm之间，符合臭氧吸收带紫外区（哈特莱带，220~320 nm，中心波长253 nm）的要求，以确保标准臭氧浓度的有效探测。根据设备特性，波长偏差需限制在30 nm以内，从而保证整体监测精度。激光雷达系统在完成安装调试后的48小时内，以及更换激光器模块后，都需要进行一次波长检查，这是因为在这些阶段，系统尚未完全稳定，激光器的性能可能存在初期波动。一般情况下，激光雷达在稳定运行后，波长波动较小，因此不需要频繁检查波长；但在安装调试和激光器更换后，确保波长符合标准是避免初期波动影响测量精度的必要步骤。

b) 激光发射波长偏差：

在臭氧激光雷达的应用中，波长精度对浓度反演结果至关重要。即使是0.5 nm的波长偏移，也可能导致显著的浓度偏差。臭氧的紫外吸收特性对波长变化十分敏感，激光与臭氧分子相互作用的效率会受到影响，从而改变测量信号的强度并影响反演算法的准确性。因此，激光发射波长偏差检查是确保激光器稳定性和精确度的关键环节，标准偏差设定为 ≤ 0.5 nm，以确保激光发射波长在设计范围内的波动较小，避免对测量结果产生影响。这项检查对于维持激光雷达的长期稳定运行至关重要，若偏差超出范围，及时更换或维修激光器可有效防止性能退化及数据不准确。

c) 探测距离偏差（选测项）：

探测距离偏差是评估激光雷达探测能力的一个重要指标，探测距离的准确性直接关系到气体浓度分布的测量精度。该指标设定的偏差标准为 $\leq$ 空间分辨率，确保测量的探测距离与实际目标物之间的偏差控制在最小范围内，保证系统能够精确捕捉目标物的光学特征，从而有效提高检测的可靠性。安装调试后的48小时内，设备需要经过充分运行才能确保系统的各个部分（如激光器、光学组件和采集系统）达到最佳状态，因此此时进行探测距离偏差检查可以确保系统的精确性。更换激光器模块后，激光器的光学输出特性和性能可能会发生

变化，这时需要再次进行检查，确保激光束的探测范围没有受到不利影响。

d) 系统线性度：

系统线性度检查的目的是确保激光雷达的信号响应在整个探测范围内保持线性。通过加装五档衰减片，可以模拟不同信号强度的衰减过程，检测激光雷达的信号是否呈现线性衰减。如果系统工作在非线性区域，或者近场信号饱和、发生非线性失真等问题，都会导致线性度不达标，进而影响数据的准确性。因此，为确保系统的测量精度，每季度对系统线性度进行检查和校准是必要的。当线性度不符合要求时，需根据实际情况调整光路，确保设备处于最佳工作状态。

e) 背景噪声基线斜率绝对值：

背景噪声基线斜率检查的目的是确保激光雷达系统的背景噪声基线尽可能保持在斜率接近零的状态，从而提高测量结果的精确性。背景噪声基线斜率应控制在 $\leq 10^{-5}$ 的范围内，因为过大的背景噪声或基线翘尾现象会导致信号发生非线性变化，进而影响反演结果的准确性。尤其在低浓度气体的测量中，背景噪声的干扰会显著降低信噪比，从而影响数据的可靠性。因此，为了确保系统的稳定性和测量准确性，若背景噪声基线斜率不符合要求，需根据实际情况进行调整。具体措施包括检查电子学噪声是否偏大、是否存在外界干扰、滤光片是否正常等，必要时更换相应硬件模块，以恢复系统性能。

f) 工作波长通道灵敏度一致性检查：

工作波长通道的灵敏度一致性检查用于评估激光雷达在不同条件下的稳定性。设定的相对偏差标准为 $\leq 20\%$ ，这一要求确保雷达系统在多个探测通道下能保持一致的灵敏度表现，避免因灵敏度差异影响数据的一致性。灵敏度一致性差会导致不同波长数据的不对等表现，从而影响对臭氧等气体浓度的精确测量。每季度对仪器的工作波长通道灵敏度一致性进行检查，旨在确保激光雷达在不同波长通道下的信号响应一致性。随着设备的使用，激光雷达的灵敏度可能因光电倍增管老化、光学元件磨损或其他因素而出现变化，导致不同波长的

通道灵敏度发生偏差。定期检查通道灵敏度的一致性有助于及时发现和纠正这些偏差，确保各波长通道在不同探测条件下具有相似的灵敏度水平，从而保证测量结果的准确性和可靠性。若检查结果显示灵敏度不一致，通常需要更换相关硬件模块，如倍增管，以恢复系统的正常性能。

g) 信噪比：

信噪比是评估雷达系统能否有效识别信号的重要指标。信噪比越高，系统对真实信号的识别能力越强，噪声对数据的干扰越小。设定的信噪比标准为 $\geq 1000@0.5\text{ km}$ 和 $\geq 100@2\text{ km}$ ，确保在不同探测距离下，系统能够清晰识别信号，减少背景噪声对测量结果的影响，从而保证数据的准确性。每周对仪器的信噪比进行检查，目的是确保激光雷达在正常运行时能够保持足够的信号强度和较低的噪声水平。信噪比是评估激光雷达测量准确性的关键指标，较高的信噪比能够有效减少背景噪声对信号的干扰，从而提高数据的可靠性和测量精度。通过定期检查信噪比，可以及时发现激光发射功率不足或光路调整问题，避免因信号过弱或噪声过大导致的测量误差。如果信噪比低于要求，通常需要检查激光发射功率、调整光路，或检查系统是否受到外界干扰。

h) 有效探测距离：

有效探测距离是评估激光雷达探测范围的关键参数，影响监测的空间覆盖能力。该项检查通过确保信号的信噪比在一定阈值以上，保证激光雷达能在3km以内有效探测目标。有效探测距离的要求确保系统在不同距离下都能提供稳定和准确的检测结果，尤其对于大气层中臭氧等气体的测量至关重要。每周对仪器的有效探测距离进行检查，目的是确保激光雷达的探测距离满足预设标准，以保证测量结果的准确性和可靠性。有效探测距离是指在满足信噪比要求的前提下，激光雷达能够有效监测到目标的最远距离。如果有效探测距离不足，可能意味着激光发射功率不足，或者光路存在调整问题，这会直接影响到数据采集的范围和精度。因此，定期检查有效探测距离可以及时发现问题，确保激光雷达在正常工作范围内运行。若发现探测距离不符合要求，应根据实际

情况检查激光发射功率，并对光路进行必要的调整。

i) 臭氧浓度测量准确性（选测项）：

臭氧浓度测量准确性是评估激光雷达数据质量的关键指标，直接影响其作为环境管理决策依据的有效性。通过对照国标臭氧分析仪来进行量值传递，确保激光雷达测得的臭氧浓度与实际值的相对偏差 $\leq 20\%$ ，且相关系数 $R \geq 0.8$ 。建议每半年采用臭氧分析仪对臭氧浓度测量准确性进行检查，验证激光雷达的测量结果的可靠性与准确性，确保其在不同污染天气条件下稳定、精确地监测臭氧浓度。如检测结果不符合标准，需根据实际情况调整光路，优化激光雷达性能，确保数据的准确性与稳定性。该比对工作对于保障雷达系统在长期运行中的数据质量具有重要意义。然而，因激光雷达在进行准确性校准时需保持水平探测状态，或通过安装反射镜实现水平发射，受到场地条件限制，故将该项列为选测项。经过前期实验分析，在天气状况适宜且臭氧小时浓度大于100的情况下，运行良好的臭氧激光雷达与国标法臭氧分析仪比对实验（水平方向）呈现较好的线性关系，线性方程 R^2 在 0.7—0.95 左右，实际值的相对偏差 $\leq 20\%$ 。

j) 有效数据区最低高度（选测项）：

有效数据区最低高度是保证雷达系统能够覆盖所需大气层高度的重要指标，确保低层大气数据的准确采集，主要目的是降低盲区和过渡区对低层大气臭氧浓度测量的准确性。设定标准为 $\leq 300\text{ m}$ ，确保在低层大气中臭氧浓度能够得到准确测量。此项检查保证激光雷达在测量过程中能有效覆盖大气层的各个层次，避免因高度问题导致低层数据丢失或不准确。建议每半年应对仪器的有效数据区最低高度进行检查，确保激光雷达与臭氧分析仪之间的距离符合要求。若检查结果不符合标准，需根据实际情况调整光路，优化探测性能，以确保数据的完整性和准确性。该项与“臭氧浓度测量准确性”测试密切相关，实际操作中受环境条件、设备安装高度、场地开阔程度等因素限制，存在测试难度，因此将该项列为选测项。

k) 有效数据率：

有效数据率是指激光雷达采集到的有效数据在总数据中所占的比例，直接影响监测数据的代表性和可靠性。设定标准为 $\geq 85\%$ ，旨在确保大部分数据为有效数据，排除无效或异常数据的干扰，确保监测结果真实、可靠。此项检查可确保系统在长时间运行中的数据质量，并及时发现和解决潜在问题，保证数据的准确性和稳定性。每周和每季度分别进行一次有效数据率计算，统计周期内的有效数据率应 $\geq 85\%$ 。当有效数据率未达到要求时，需根据实际情况排查原因并采取相应措施进行解决。

l) 臭氧浓度廓线一致性（选测项）：

臭氧浓度廓线一致性检查用于验证不同设备和环境条件下的测量结果是否一致。设定的标准为相对标准偏差 $\leq 20\%$ ，确保在不同污染天气条件下，多个设备之间的臭氧浓度测量结果具有良好的同步性。这对多个监测站或多台设备组网监测时尤为重要，能够保证大气质量监测的整体一致性和可靠性。每年进行此项检查，主要通过对比三台样机在三种不同污染天气下的臭氧浓度廓线，验证设备间的平行性。若结果不符合要求，需根据实际情况调整光路，以确保测量精度和一致性。由于此项检查需要三台设备的平行比对，对场地和设备数量有较高要求，因此将其作为选测项。

7 运行维护措施

文本内容：“7.1 调整光路

7.1.1 当激光雷达的系统线性度不满足表1中要求时，需要运维人员现场调节光路，通过调整发射光路组件，使激光束的传播路径与系统光学轴重合，确保激光从发射光学系统的光轴几何中心均匀发射。详细方法见附录B.1。

7.1.2 按照5.3的要求，每季度或者仪器移动位置后均需要对激光雷达的光路进行检查和调整。”

编制说明：

本条款围绕激光雷达系统中“光路调整”这一关键维护操作进行规范，目的是确保激光束在系统运行中的传输路径稳定、光学轴对准准确，从而提升系统的线性响应能力和探测性能。结合实际运行经验，激光雷达的线性度往往受光路对准精度的影响较大，尤其在设备运输、振动或外力干扰后，光路系统可能出现微小偏移，导致信号响应不稳定，影响数据质量。因此，本条款明确了在线性度异常时所需采取的具体操作措施，要求运维人员现场检查并调整发射光路，使激光束能沿预设的光学轴传播，保证发射均匀性和中心对准性。此外，为确保系统长期运行的稳定性和可靠性，本条款进一步规定了光路定期检查与维护的频次要求，特别是在设备移动或系统状态调整后必须重新确认光路状态。相关操作方法已通过附录提供细化指引，便于运维人员依照标准流程进行定位和调整。

文本内容：“7.2 检查、调整采集系统

7.2.1 当激光雷达的探测距离偏差、背景噪声基线斜率绝对值不满足表1中要求时，需要运维人员现场检查、调整或维修采集系统。详细方法见附录B.2。”

编制说明：

本条款针对激光雷达运行过程中采集系统的异常诊断与维护措施进行了规范，目的是确保数据采集链路的稳定性和系统整体探测能力的可靠性。根据现场运维经验，激光雷达探测距离不足、背景噪声基线漂移等问题，往往与采集系统中的关键组件（如前端信号处理模块、采样电路、模数转换单元）工作状态异常有关。这些问题会直接影响激光信号的识别与还原精度，从而导致数据质量下降。因此，本条款明确规定：当探测距离或背景噪声基线斜率等关键性能指标偏离规范要求时，必须由运维人员对采集系统进行现场检查与必要的调整或维修。操作过程中，应重点排查信号路径中的增益设置、放大电路的线性响应，以及光电转换单元的响应灵敏度等关键因素。为保障操作的可执行性，本条款同时指向附录中对相关调整方法的具体描述。通过这一安排，既提供了

判断故障的依据，也为现场排查提供了标准化流程支持，确保问题可以被有效发现与解决。

文本内容：“7.3 更换倍增管

7.3.1 当激光雷达的工作波长通道灵敏度一致性不满足表1中要求时，需要运维人员现场更换倍增管。详细方法见附录B.3。”

编制说明：

本条款针对激光雷达探测系统中光电探测器灵敏度退化导致的通道一致性偏差问题，提出了明确的维护措施，即在必要时更换倍增管（Photomultiplier Tube, PMT）。激光雷达系统依赖多个波长通道对回波信号进行探测，不同通道间灵敏度的一致性对于反演结果的准确性至关重要。实际运行中，倍增管作为核心的光电转换器件，存在一定的老化与漂移特性，尤其是在长时间运行或高负载工作环境下，其增益可能发生衰减，造成通道灵敏度不匹配，影响数据的横向比较与质量控制。基于上述原理，本条款规定：当工作波长通道的灵敏度一致性不满足质量控制指标时，须由具备资质的运维人员对倍增管进行更换操作。更换操作需遵循设备制造商建议和标准操作流程，重点关注倍增管型号匹配、安装角度、供电电压及屏蔽接地等关键参数，确保新器件在更换后能恢复系统原有性能指标。本节同时通过附录提供了现场更换的具体操作步骤和注意事项，有助于统一作业规范，提升运维效率。

文本内容：“7.4 检查激光发射功率

7.4.1 当激光雷达的信噪比、有效探测距离不满足表1中要求时，需要运维人员现场检查激光发射功率。详细方法见附录B.4。

7.4.2 若发射功率低于规定范围，应适当提高激光器功率，确保其恢复至额定水平。

7.4.3 若发射功率已符合要求，则需对光路进行调整(见7.1)。”

编制说明：

本条款针对激光雷达系统运行过程中，信噪比下降或有效探测距离不足等

性能异常现象，明确了检查与恢复激光发射功率的运维要求。激光器是激光雷达系统的核心发射部件，其输出功率直接影响信号强度、探测深度和信噪比表现。当设备长期运行或受到外部环境的影响（如温湿度变化、功率模块老化）时，激光器的发射功率可能出现衰减，进而导致探测能力下降，无法满足系统性能指标要求。为此，本条款首先提出需由运维人员现场对激光发射功率进行检测，判断当前输出是否处于额定工作范围内。若功率明显偏低，建议采取适当提高激光器电流或调节工作参数等方式，在保障安全性的前提下，将输出恢复至设备出厂额定范围。若激光发射功率本身正常，则需进一步排查光学系统可能存在的问题，如发射光路偏移、透镜污染或损耗等，并依照第7.1节规定的方式对光路进行重新校准。通过明确功率检查及对应处理路径，本条款可有效协助运维人员定位性能下降的具体原因，保障激光雷达系统长期稳定运行，满足大气探测或环境监测中对高灵敏度和高可靠性的技术要求。

文本内容：“7.5 更换激光器或维修激光器

7.5.1 当激光雷达的激光发射波长、激光发射波长偏差不满足表1中要求时，需要返厂更换激光器或维修激光器。

7.5.2 更换或维修激光器后的激光雷达需要按照6.2的方法重新进行检测，直至满足表1中各质量控制参数的要求。”

编制说明：

本条款针对激光雷达核心部件——激光器的关键性能指标异常情形，明确了返厂更换或维修的技术处理要求。激光发射波长及其偏差是确保激光雷达反演算法准确性和系统正常运行的基础参数。一旦激光器的中心发射波长偏离设计值，或波长稳定性无法满足标准要求，将直接影响探测信号与参考信号之间的匹配关系，造成反演误差增大甚至结果失真。此类问题通常由激光器老化、腔体污染或驱动模块失效等造成，需专业技术人员通过精密仪器进行拆解检测，已超出常规现场维护能力范围。因此，本条款明确要求在上述指标异常时，应将设备返厂更换或维修激光器，以确保核心组件满足设计性能。同时，

出于质量控制的完整性和系统恢复后的数据准确性要求，更换或维修后必须严格依照第6.2节所规定的流程重新开展质控检测，逐项验证其输出信号特性、系统一致性及稳定性，直至各项关键性能检测参数满足表1中指标限值。通过建立“返厂维修+质控复核”的闭环机制，确保激光器类故障处理后的设备性能能够恢复至标准状态，为系统长期稳定运行提供保障。

文本内容：“7.6 维修采集系统

7.6.1 当激光雷达的探测距离偏差、背景噪声基线斜率绝对值不满足表1中要求时，需要返厂检查维修采集系统。

7.6.2 维修采集系统后的激光雷达需要按照6.2的方法重新进行检测，直至满足表1中各质量控制参数的要求。”

编制说明：

本条款对激光雷达系统中采集系统模块的运行异常情况，明确了返厂维修及后续质控检测的要求。当雷达的探测距离偏差与背景噪声基线斜率绝对值未达到表1中规定的性能指标，说明采集系统可能存在如增益异常、信号处理链路失调、模数转换异常等问题。这类故障通常涉及硬件电路板、放大模块、ADC模块等核心部件，无法通过现场手动调试或简单替换解决。因此，本条款要求在上述性能检测参数失效时，设备应返厂进行采集系统的专业检修，确保采集链路的信号完整性和稳定性。在完成维修后，雷达需按照第6.2节规定的质控检测流程重新进行全量参数检测，确保恢复后的系统性能满足全部质控要求。该条款建立了故障处理后的质控复核机制，保障设备在采集系统维修后数据输出的可靠性与准确性，是维持整体系统稳定运行与数据质量的重要措施。

附录A 性能检测参数计算方法（规范性）

编制说明：

为确保激光雷达系统输出数据的准确性和一致性，本规范在第6.2节提出了关键性能检测参数的考核指标及频次要求。附录A作为配套部分，对第6.2节中所列性能检测参数的具体计算方法与操作流程进行详细说明，便于运行维护人员和质控审核人员准确掌握各参数的评估方式，并在设备运行过程中统一质控口径、降低主观判断偏差。通过系统化、可量化的质控计算方法，有助于及时发现设备性能异常点位（如激光波长漂移、背景噪声偏高、系统探测距离不足等），从而指导光路调整、模块更换或返厂维修，保障后续臭氧浓度反演等算法基础输入数据的可靠性。本附录内容在编制过程中，充分参考了各类主流激光雷达系统的运维经验和技术资料，以通用仪器设备和常规可实施方法为前提，未引用未公开文件，确保行业广泛适用性。各条款在形式上保持一致，均包含检测前提条件、测量步骤、计算公式与判定标准，方便不同运维单位按统一方式开展日常或定期质控工作。

A.1 激光发射波长

激光雷达系统的工作波长是臭氧差分吸收反演的基础参数，其精度直接影响反演算法的可靠性和臭氧浓度计算的准确性。为保障激光器输出波长稳定性，本条款明确了使用分辨率优于0.25 nm的光谱仪对 λ_{on} 和 λ_{off} 两个波长进行测量的技术要求，并设定了合理的波长范围与差分波长容差。本参数设置中，“ $253\text{ nm} \leq \lambda_{on} \leq 320\text{ nm}$ ”的范围兼顾了目前国内常用激光器型号的覆盖能力，同时“ $|\lambda_{on} - \lambda_{off}| \leq 30\text{ nm}$ ”的差分波长要求参考了主流激光雷达系统实际应用中的经验阈值，在满足差分吸收原理前提下，确保探测灵敏度和反演精度之间的平衡。检测方法描述采用通用性强的技术语言，便于使用不同型号设备的单位按统一标准进行波长测定和校验。该条款为后续波长偏差、探测一致性等参数的检测提供了基础波长参考值，是质控流程中的首要环节。

A.2 激光发射波长偏差

激光器波长偏差的评估是判断激光雷达长期运行稳定性的重要指标。尽管设备在出厂时已进行标定，但激光器在高频率运行或经历运输、长期环境应力影响后，其中心发射波长可能会产生偏移，进而影响反演波长对的匹配精度，最终导致臭氧浓度计算产生系统误差。本条款在A.1条款基础上，进一步细化了波长一致性检验的技术要求。通过对 λ_{on} 和 λ_{off} 各自进行三次独立测量，并使用式（1）计算绝对偏差平均值($\Delta\bar{\lambda}$)，确保结果具有重复性和统计代表性。该计算方法不依赖特定品牌或型号的设备，具备良好的可操作性和通用性。偏差限值以表1中参数为准，制定时参考了多型号臭氧激光雷达的实测数据和工程经验。该方法为后续判断是否需更换激光器（见第7.5节）或调整系统光路（见第7.1节）提供了依据，确保系统长期稳定运行与监测数据质量。

A.3 探测距离偏差

探测距离偏差是评价激光雷达定位精度和信号同步性能的重要参数，对于波长通道反演路径一致性及数据空间配准准确性具有直接影响。由于激光雷达的探测路径主要依赖光电接收系统的响应时间和同步控制能力，误差积累可能造成有效探测区间判断失准，进一步影响臭氧浓度的垂直廓线反演质量。本条款通过设置晴朗、低湿、低气溶胶浓度的标准气象条件，最大限度降低大气环境对信号传播路径的扰动，确保测试数据的有效性与可比性。采用实际目标物反射信号作为测量依据，与标准激光测距仪进行距离对比，可有效排除系统内部算法或时间基准引起的偏差。对三个典型目标物的信号距离进行采集，并通过式（2）计算平均偏差值 ($\Delta\bar{L}$)，能较为全面地反映系统探测路径的一致性及其稳定性。限值标准参考多台臭氧激光雷达的现场校准记录，兼顾设备差异性与实用性，作为判断是否需调整采集系统（见7.2节）或返厂维修（见7.6节）的技术依据。

A.4 系统线性度

系统线性度反映激光雷达接收系统在不同信号强度下的响应一致性，是保证臭氧浓度反演准确性的重要基础。尤其在大气污染物分布不均或信号衰减显

著的环境中，系统若存在非线性响应，将导致反演计算误差累积，严重影响浓度廓线的准确表达。本条款设定在典型中等气溶胶负荷与适度湿度的条件下开展测试，避免极端天气对光学信号衰减带来的影响，同时要求避开近地云层，确保数据采集的连续性和代表性。通过外加透过率已知的衰减片，构造不同信号强度场景，可直观检验探测系统响应随输入变化的线性关系。采用5种不同透过率条件下采集的信号数据，构建信号幅度与透过率关系图，并进行线性拟合，进一步使用相关系数 R^2 量化拟合优度，有助于统一评估系统稳定性。线性度的限值参考多型号臭氧激光雷达的现场调试数据和典型运行结果，既考虑行业通用性能标准，又兼顾实际设备差异。当 R^2 不满足表1中线性度指标时，应检查光路或采集系统稳定性，必要时进行调整或返厂维修，以保障后续反演数据的质量控制基础。

A.5 背景噪声基线斜率绝对值

背景噪声基线斜率反映激光雷达在接收路径完全遮挡、无信号输入时的系统本底稳定性，是评估仪器在静态条件下能否维持平稳零基线的关键指标。若背景信号存在显著漂移，可能表明系统存在电噪声、热漂移、光路杂散光等问题，将干扰有效信号的识别，甚至影响反演准确性。本条款要求在遮挡接收望远镜的前提下，采集 λ_{on} 与 λ_{off} 通道的背景噪声原始信号数据，确保雷达接收系统在无外部信号影响的理想状态下运行。采集数据时间上限设为10分钟，是兼顾系统稳定评估与实际运维可行性的权衡。通过构建信号强度随距离变化的廓线，并进行线性拟合，计算其斜率绝对值 k ，可量化背景信号随距离的变化趋势。理想状态下背景噪声应稳定在零附近，其拟合斜率绝对值越小，表示系统越稳定。设定此指标的目的在于排查激光雷达在静态条件下是否存在信号漂移风险，为有效信号识别和后续反演提供可靠的数据背景环境。若斜率绝对值超标，建议检查光路遮光是否完全、电源是否干扰严重或接收器温控系统是否正常，必要时开展系统排查和维修。

A.6 工作波长通道灵敏度一致性

激光雷达反演臭氧浓度依赖于 λ_{on} 和 λ_{off} 两个工作波长通道的同步响应和比值变化。若两个波长通道的响应灵敏度存在显著差异，即使接收到相同强度的回波信号，其幅值仍可能存在系统性偏差，从而影响臭氧浓度的准确反演。因此，评估两个工作波长通道的灵敏度一致性是保障系统性能稳定、反演结果可靠的重要环节。本指标基于A.4中系统线性度测试所采集的5组数据，分别对 λ_{on} 与 λ_{off} 两通道信号过渡区峰值与衰减片透过率之间的线性关系进行拟合。通过计算其线性拟合斜率（即通道灵敏度），并根据式（6）进一步计算两通道灵敏度的相对偏差 k_{rel} ，以此反映系统双波长通道响应能力的一致程度。拟合斜率 k 表示通道对输入信号强度变化的响应程度，理想状态下 λ_{on} 与 λ_{off} 通道的拟合斜率应基本一致。相对偏差 k_{rel} 越小，表示两个波长通道的灵敏度越一致，系统匹配性越高。设定该指标的目的在于排除波长通道间响应不对称、接收链路增益不一致等因素带来的误差干扰，提升雷达系统整体的响应匹配性与反演稳定性。若检测发现 k_{rel} 超标，应排查两个波长通道的增益设置、接收光路配置或信号采集单元的硬件一致性，必要时进行重新标定或调整。

A.7 信噪比

信噪比（SNR）是衡量激光雷达系统回波信号质量的重要指标，直接影响后续反演精度和数据有效性。SNR越高，说明目标回波在背景噪声中的可辨识度越强，系统探测能力越优，反演结果越可靠。反之，则可能存在因信号弱、背景干扰大或系统状态不稳定导致的反演误差增大甚至失真等问题。本测试选取典型气象条件（能见度 ≥ 10 km，湿度 $\leq 70\%$ ）的晴朗天气下，在避开云区的前提下进行垂直探测，模拟系统在正常外场运行条件下的信号响应能力。采集积分时间控制在10 min内，以确保测试反映实际应用中较常见的工作状态。采用公式（7）计算背景噪声的标准差（Noise），再用公式（8）计算目标位置（如500 m、2000 m）处信号与噪声之比，即信噪比（SNR）。测试对 λ_{on} 和 λ_{off} 两个波长通道分别在两个典型高度处进行，反映系统在近地面和中高层大气环境下的信号质量水平。本指标不仅检验系统整体光电性能（如激光发射

能量、接收灵敏度、放大电路噪声控制能力等），也间接反映系统的整机稳定性、环境适应性等综合性能。若某波长通道的SNR明显偏低，建议检查光学链路清洁度、望远镜准直状态、激光器输出稳定性及探测器性能等环节。通过对SNR的定量要求和规范测试，可为用户后续对数据有效性筛选、信号提取及浓度反演奠定基础，进一步提升系统在实际业务应用中的数据质量保障能力。

A.8 有效探测距离

有效探测距离是衡量激光雷达系统整体探测能力的核心指标之一，体现了系统在实际观测条件下能够提供可靠、大气信息的最大垂直高度范围。该项指标直接关系到系统能否满足对高空区域目标气体（如臭氧）或气溶胶的监测需求。本项测试在典型良好气象条件（能见度 ≥ 10 km，湿度 $\leq 70\%$ ）下进行，确保外部大气透明度对激光传输影响最小，测试更能体现系统本身的探测能力上限。通过连续采集工作波长 λ_{on} 和 λ_{off} 通道的原始信号，并绘制信号廓线，结合前述A.7的信噪比计算方法（公式7、8），判定 $\text{SNR} \geq 20$ 的信号段为有效探测范围。自地面起，从信号廓线的过渡区向上传递，信噪比首次低于20的点即被认为超出了系统可靠探测能力的范围，向下一个满足 $\text{SNR} \geq 20$ 的最大高度即为有效探测距离。此外，因 λ_{on} 通道用于臭氧差分吸收反演，若 λ_{off} 通道有效探测距离大于 λ_{on} 通道，有效臭氧反演范围仍以 λ_{on} 通道的有效探测距离为准，从数据科学性和反演精度角度进行约束，确保反演区间数据质量均处于系统能力范围内。该项测试可以综合反映系统的光电链路效率、光学增益、望远镜接收能力、信号处理性能及整机环境适应能力，是雷达系统技术性能验收及运行能力评估的重要依据。

A.9 臭氧浓度测量准确性（选测项）

臭氧浓度测量准确性是评估差分吸收激光雷达在实际监测中对臭氧浓度反演效果的重要指标，直接决定了该系统能否作为地面站点的有效补充与高空探测手段。本项测试以国家标准方法（臭氧分析仪）为对照基准，通过水平路径或近水平路径下的比对验证，体现雷达臭氧反演浓度的可信程度。测试过程

中，激光雷达系统通过设置水平发射或借助反射镜实现近地面高度（ $\leq 300\text{ m}$ 和 600 m ）处的水平观测，保证测量路径与臭氧分析仪采样口空间接近，最大限度减少空间偏差带来的浓度差异。比对过程中需确保天气条件晴朗（湿度 $\leq 70\%$ ），并优选5~9月臭氧污染过程频发的时段，要求覆盖臭氧8小时平均浓度分别为 $100\sim 160$ 、 $161\sim 215$ 、 $216\sim 265\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的三种典型污染情景，以保证比对结果的代表性和适应性。比对过程通过同步连续观测获得小时均值数据序列。通过公式（9）计算臭氧浓度的绝对偏差 ΔO ，通过公式（10）进一步计算相对偏差 ΔO_{rel} ，反映系统与标准仪器间的偏差比例。并以标准仪器测值 O_{st} 为横坐标，雷达测值 O_{lidar} 为纵坐标绘制散点图，进行线性拟合，最终由公式（11）计算相关系数 R ，以衡量雷达系统反演趋势与地面标准值之间的一致性。为确保结果科学合理，测试过程中需剔除包括降水在内的不利天气情况，及不满足信噪比要求的数据，确保比对数据的质量与有效性。本项指标可作为系统验收或运行评估的重要参考，同时也为高空或远距离区域的臭氧浓度监测提供量值可溯源的支撑。但该测试项目需要较多配套条件与较长测试周期，因此设置为选测项目，仅在系统验收、整机性能全面评估或更换核心探测部件后开展，供使用单位根据实际需求选择实施。若比对结果不满足预设偏差要求，可依据前述指标逐一排查系统波长稳定性、通道灵敏度一致性、信噪比等性能参数，完成校准调试后重新开展比对验证，确保臭氧浓度反演结果的准确性与可靠性。

A.10 有效数据区最低高度（选测项）

有效数据区最低高度是衡量激光雷达系统能否对近地面臭氧浓度进行有效监测的重要参数，决定了其应用于地面空气质量评估与污染源解析的能力。该指标反映了激光雷达在近地面条件下的数据反演质量，尤其在城市环境中具有重要意义。本项测试基于A.9中的比对实验数据，通过臭氧分析仪的布设高度确定激光雷达最靠近地面的有效监测高度。在A.9的比对测试中，若雷达反演的臭氧浓度与标准仪器的浓度比对结果（绝对偏差、相对偏差及相关系数）均满足表1要求，即认为该雷达在对应高度具备有效监测能力。此时，应记录比

对中距离激光雷达最近的臭氧分析仪放置位置（如300 m），即为该激光雷达系统的有效数据区最低高度。该指标对比选不同型号激光雷达、确定系统部署策略和调研城市近地面污染水平均具有重要参考价值。测试过程中应特别注意保证数据质量，严格按照A.9要求选取信噪比较高、天气条件合适的的数据段进行比对分析，确保最低有效高度评价的科学性和可重复性。因为此项目基于A.9（选测项）的测试结果，因此该项目为选测项。

A.11 有效数据率

有效数据率反映激光雷达系统在特定时间周期内的稳定运行能力与数据连续性水平，是衡量系统可靠性与运维管理质量的重要指标。本项测试内容基于激光雷达在一个统计周期内的运行记录与数据产出情况进行统计分析，评估其中可用于科学分析和业务应用的有效数据所占比例。统计周期建议以“月”或“季”为单位进行，确保评价具有代表性和时效性。有效数据率的评估结果需满足表1的相关要求，作为运行验收与质量管理的重要依据之一。 T_1 —雷达统计周期的总时间，单位h； T_2 —统计周期内激光雷达维护和故障的时间，单位h。 T_3 —统计周期内激光雷达受外部因素干扰不纳入统计周期时间，单位h。其中受外部因素干扰一般为极端天气如强降雨、强降雪、浓雾台风等导致大气条件完全无法满足观测要求的时段，也包括因站点停电、周边市政施工等外部不可抗因素导致系统被迫停机的情况，这部分时间不计入有效数据率的统计基数。统计有效数据时，还要求单份观测数据的信噪比、有效探测范围均满足本附录前述指标要求，且无明显的信号异常漂移或数据截断问题，方可认定为有效数据。有效数据率按照公式（XX）进行计算：有效数据率 = $(T_1 - T_2 - T_3) / (T_1 - T_3) \times 100\%$ ，该计算方式排除了不可控外部因素对系统运行评价的干扰，能够更客观地反映激光雷达本身的稳定运行能力。若最终计算得到的有效数据率不满足表1规定的限值要求，运维人员需梳理统计周期内的故障记录与维护日志，分析频发故障的核心原因，针对激光器稳定性、供电可靠性、环境温控系统等高频问题模块开展针对性排查与升级改造，从而提升系统长期

连续运行的可靠性，保障监测业务的连续性。

A.12 臭氧浓度廓线一致性（选测项）

本项测试旨在验证不同大气臭氧激光雷达系统在相同环境条件下对臭氧廓线的测量一致性，确保监测数据在区域联用或组网应用中的可靠性。选取3台设备在水平距离小于50 m范围内同步运行，具备可比性和代表性。测试条件涵盖多种污染水平下的典型天气情况，增强评估的全面性和代表性。测试方法基于统计学的标准差和相对标准偏差指标，利用同一高度上各台雷达的臭氧浓度值计算一致性水平。所选高度范围（300~2000 m）避开近地面干扰和远距离信噪比下降的影响，确保数据稳定可靠。剔除不利天气和低信噪比数据，有效提高分析准确性。该测试方法具有较高的科学性，所采用的相对标准偏差指标能够定量反映多台设备间测量结果的离散程度，评价标准明确、计算方法合理，可为设备一致性验证和质量控制提供有效支撑。但该测试方法具有一定的操作门槛（需要至少3台臭氧激光雷达），所以设置为选测项。

附录B 运行维护方法（资料性）

编制说明：

1. 制定运行维护操作附录的意义

为保障大气臭氧激光雷达系统长期稳定运行和监测数据质量，本附录结合实际应用需求，对运行过程中可能涉及的日常维护、故障处理、设备清洁、运行环境检查、预警管理等工作进行规范化描述，作为第7章“运行维护措施”的具体技术实施指导。该附录的制定不仅有助于提升设备运行的标准化管理水平，也便于操作人员快速掌握日常维护方法，降低人为误差，减少仪器故障率，延长设备使用寿命，确保数据产出连续、稳定、可追溯。通过规范化操作流程，保障雷达数据具备良好的时空一致性和长期可比性，为科学研究、业务监测、应急决策等提供可靠支撑。

2. 运行维护操作附录的必要性分析

2.1 技术规范概述

激光雷达系统作为高精度、全天候的环境监测设备，其运行稳定性和监测准确性不仅依赖于仪器本身的性能参数，还与系统运行过程中的维护管理密切相关。若缺乏标准化运行维护规范，极易造成仪器漂移、数据质量下降、误报警等问题，影响后续数据分析和应用效果。因此，有必要将运行维护措施具体化、制度化，形成可操作、可复制的规范流程，指导各类用户单位科学运行设备。

2.2 与第7章的关系说明

第7章提供了运行维护工作的频次和判定依据，而本附录则进一步细化每项关键维护工作的具体操作方法和要点。通过结构化、标准化的描述方式，使运维人员能够根据实际情况快速定位、准确操作，是落实第7章要求的重要技术支撑。

2.3 方法的可行性和适应性

本附录内容来源于激光雷达设备生产商、用户单位及实际运维案例，具有

较强的可行性与实操性，适用于不同品牌、型号的大气臭氧激光雷达系统。为适应不同地区运行环境的差异，附录中部分方法也具备灵活调整空间，便于推广应用。

3. 逐项说明

B.1 调整光路

光路调整是大气臭氧激光雷达系统运行维护中的关键步骤，直接关系到激光束的发射稳定性、接收信号的能量强度及后续臭氧浓度反演结果的准确性。本条款旨在通过制定规范化的光路调整操作方法，为运维人员提供明确、可执行的技术指导，确保设备在长期运行中保持良好的光学性能和测量一致性。本方法充分结合当前激光雷达系统的结构特点和运维经验，参照国内外同类仪器厂商的维护指南及行业应用案例，从准备工作、光束对准、接收系统调整、线性度校准、复检确认等方面进行了系统梳理，具有较强的合理性和操作可行性。同时，该条款强调了激光器运行安全规范，如佩戴防护眼镜、使用专用工具，并结合实测目标（如标准校准板、高反射率材料）进行回波检测和系统校准，从而提高调整的精度和安全性。通过设置多环节复检机制和操作记录要求，也为维护工作的追溯与技术规范执行效果评估提供了依据。该操作流程不仅适用于新设备安装调试，也适用于运行期间因环境变化、振动位移、光学器件老化等因素引起的光路偏移问题的修正，具备广泛的适应性和实践指导价值。

B.2 检查、调整或维修采集系统

采集系统作为大气臭氧激光雷达的核心组成部分，其运行状态直接决定了回波信号的获取质量与后续数据反演的可靠性。本条款围绕采集系统可能出现的常见问题，系统性地提出了现场检查、参数调整、故障排查及维修验证的全过程操作指南，保障系统在复杂现场条件下的持续稳定运行。本方法具有良好的合理性与可行性，结合了当前主流激光雷达系统的结构特征和多家运维单位的实践经验，针对影响数据采集质量的主要因素（如光路污染、电磁干扰、增

益参数不合理等)提出了具体检查与调整措施,便于操作人员迅速定位问题并及时处理。本条内容强调数据采集全过程中的信号基线稳定性和噪声控制,特别设置了背景噪声检测、增益调节、滤波算法等实用手段,有效应对实际应用中背景漂移、信号微弱、环境干扰等问题。同时,针对数据采集卡、探测器、激光器等关键硬件可能出现的故障,明确了现场处理优先与返厂维修的技术路径,有利于运维团队依据标准高效分工执行。此外,本条设置了明确的调整后验证机制,包括标准气比对、数据前后对比、调整记录归档等环节,确保每次调整后系统性能满足技术规范要求,并实现全流程可追溯,为质量控制和长期运行管理提供数据支撑。

B.3 更换倍增管

倍增管(PMT)作为激光雷达系统中用于检测微弱回波信号的关键器件,其性能直接关系到系统的探测灵敏度与信噪比水平。由于其内部结构精密、对静电敏感且长期运行后可能出现老化失效,因此在系统运行维护中定期检查和必要时更换倍增管是保障系统长期稳定运行的重要措施。本条款制定依据当前主流臭氧激光雷达设备的硬件配置,充分参考厂商推荐操作规程和运维实践经验,从准备工作、拆装过程、电路连接到调整验证,系统性地规范了更换倍增管的完整技术路径。条款设计强调操作的安全性和可控性。在更换操作前要求设备完全断电,并配合静电防护措施,最大限度降低对敏感器件的潜在损伤风险。同时提出了环境洁净度要求,防止因尘埃、湿气进入光学系统而影响后续探测精度。在实际拆装过程中,条款明确提出“轻拿轻放”“防接触玻璃窗口”等细节操作规程,有助于操作人员规范执行、降低误操作概率。针对电路连接部分,也强调了高压线缆与信号线的正确匹配,提升更换后的电气可靠性。本方法的合理性体现在:对更换后的倍增管,须通过标准光源测试和系统回波质量评估,验证其是否满足雷达性能要求,并可通过高压电压调节实现精细匹配,确保系统输出的信号强度与动态范围符合技术标准。同时,通过设置确认与记录环节,确保更换操作过程的全程可追溯,也便于后续故障分析和运

维评估。此外，条款还关注了废旧器件的环保处置，体现了标准的完整性和操作闭环管理理念。

B.4 检查激光发射功率

激光器作为激光雷达的核心组件，其输出功率的稳定性和准确性对探测距离、信噪比和整体数据质量有重要影响。本条款旨在规范激光发射功率的检查方法，确保激光雷达始终在设计功率范围内运行，从而保障反演结果的可靠性和数据的一致性。条款设计充分考虑了激光功率检测工作的操作风险和技术要求，设置了系统的准备流程，确保在检查前进行设备断电与人员防护。激光器工作时功率集中、能量密度高，因此明确规定使用专用激光防护眼镜，并确保环境无尘清洁，以避免不必要的光学干扰和安全隐患。功率检测部分采用标准功率计测量法，明确提出需选择匹配波长和量程的功率计，并强调功率计光轴需与激光束精确对准，以获取真实有效的发射功率数据。通过与设备标称值对比，可初步判断激光输出是否异常，具有良好的操作可重复性和结果可比性。除直接测量外，条款进一步要求检查光路传输过程中的能量损耗情况，通过检查透镜、反射镜、窗口等关键元件是否污染或老化，识别功率损失的非激光器源头。这体现了检查流程的系统完整性，不仅局限于激光器本体，同时覆盖整条发射链路。在激光器状态检查部分，条款提出通过查看电源、电压电流、冷却系统和运行时长等参数，全面评估激光器的健康状况。该方法不仅可以发现异常工作状态，也可提前预判激光器老化趋势，为维修或更换提供依据。在功率恢复调整方面，条款设定了安全前提：依据设备说明书进行电压或电流调节，并强调不得超出安全范围。这既保障了激光器不被过调烧毁，也确保了调节具有科学依据与操作边界。最后，通过对调整后功率的复检和过程记录，实现检查工作的闭环，确保每次功率检查和调试都具有可追溯性，符合质量控制体系对数据完整性和操作记录的基本要求。

附录C 大气臭氧激光雷达监测系统巡检内容表

附录C（资料性）

大气臭氧激光雷达监测系统巡检内容表

表C.1 监测站房及辅助设备日常巡检记录表

城市：		站点名称：		时间： 年 月 日	
序号	巡查内容	正常	异常		
站房外部及周边					
1	点位周围环境变化情况				
2	站房外围的防护栏、隔离带有无损坏情况				
3	视频监控系统是否正常				
4	站房防雷接地是否完好				
5	站房屋顶是否完好，有无漏雨				
6	检查外部环境是否正常，有没有对测定结果或运行环境存在明显影响的污染源				
7	检查站房是否有漏雨现象，站房外围的其它设施是否有损坏或被水淹，如遇到以上问题应及时处理，保证系统能安全运行				
8	检查站房的安全设施，做好防火防盗工作				
9	检查雷达周边环境，检查电源、主机是否有被水浸没等风险隐患，及时消除隐患				
站房内部					
1	雷达系统的供电环境是否正常，电压是否稳定，是否存在供电隐患				
2	激光器电源应急停机装置是否正常，并处于明显位置				
3	雷达系统的固定是否稳定牢靠，是否存在倾倒等风险隐患				
4	仪器设备是否整洁，设备标识是否清晰；臭氧雷达激光警告标志、说明标志是否清晰，激光窗口围栏警告标志是否清晰				
5	雷达防护外壳是否正常				
6	网络通讯系统及数据传输功能是否正常				
7	保持站房内部环境清洁，布置整齐，各仪器设备整洁，设备标识清楚				
8	保证空调正常工作，站房温度保持在 $25\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度保持在80%RH以下，每年对站房空调至少进行一次维护保养				
9	在冬、夏季节应注意站房内外温差，应及时调整站房温度，防止光学镜片表面出现冷凝水情况				
10	定期检查消防、避雷和报警安全设施				
11	检查电路系统和通讯系统，保证系统供电正常，电压稳定；保证断电情况短时间内供电和网络通讯正常，出现问题及时解决				
12	门窗关闭良好，人走关门				
13	每周对站房内外环境卫生进行检查，及时保洁				
异常情况处理说明：					
巡检人：		复核人：			

表C.2 每日远程巡检记录表

城市：		站点名称：		时间： 年 月 日	
天气环境	天气情况（ ）【晴、雨、阴、多云、雪、雾】				
	室外温度（ ）℃ 湿度（ ）%RH				
	空气质量等级（ ）【优、良、轻度污染、中度污染、重度污染、严重污染】				

序号	巡查内容	正常	异常
1	检查仪器是否正常运行		
2	检查雷达采集软件是否正常工作		
3	检查雷达分析软件是否正常工作		
4	检查雷达是否有异常或者报警问题		
5	检查雷达数据存储和传输是否正常		
异常情况处理说明:			
巡检人:		复核人:	

注：每日远程巡检记录表填写完成后，需及时存档。

表C.3 每周巡检维护记录表

城市:		站点名称:		时间: 年 月 日	
天气环境	天气情况 () 【晴、雨、阴、多云、雪、雾】				
	室外温度 () °C 湿度 () %RH				
	空气质量等级 () 【优、良、轻度污染、中度污染、重度污染、严重污染】				
序号	巡查内容	正常	异常		
1	检查雷达激光器是否有异常或者报警				
2	检查雷达软件是否工作正常，参数设置是否正常				
3	检测并记录背景噪声基线斜率绝对值				
4	检测信噪比和有效探测距离是否满足要求				
5	检查、计算并记录本周的有效数据率				
6	检查网络和数据传输/上传是否正常				
7	检查激光安全标识是否齐全				
8	检查雷达望远镜镜片表面是否清洁，如果不干净需要清理干净				
9	检查天窗镜片是否清洁，如果不干净需要清理干净				
10	检查天窗加热装置功能是否正常（如配备）				
11	检查激光光斑是否位于天窗出光中心，有偏差进行调整				
12	检查激光器冷却水水位是否过低，如果过低需要加水（仅限水冷激光器）				
13	仪器说明书规定的其他维护内容				
异常情况处理说明:					
巡检人:		复核人:			

注：每周巡检维护记录表填写完成后，需及时存档。

表C.4 每季度巡检维护记录表

城市：				站点名称：				时间： 年 月 日			
天气环境	天气情况（ ）【晴、雨、阴、多云、雪、雾】										
	室外温度（ ）℃ 湿度（ ）%RH										
	空气质量等级（ ）【优、良、轻度污染、中度污染、重度污染、严重污染】										
序号	巡查内容								正常	异常	
1	完成每周工作事项中全部内容										
2	对激光光斑形状和激光能量进行测试、标定和校准（方法由各自设备厂商确定）										
3	检查、计算并记录本季度的有效数据率										
4	对系统线性度进行检测和校准										
5	对工作波长通道灵敏度一致性进行检验										
6	更换一次冷却水（仅限水冷激光器）										
7	仪器说明书规定的其他维护内容										
异常情况处理说明：											
巡检人： 复核人：											

注：每季度巡检维护记录表填写完成后，需及时存档。

表C.5 每半年巡检维护记录表

城市：				站点名称：				时间： 年 月 日			
天气环境	天气情况（ ）【晴、雨、阴、多云、雪、雾】										
	室外温度（ ）℃ 湿度（ ）%RH										
	空气质量等级（ ）【优、良、轻度污染、中度污染、重度污染、严重污染】										
序号	巡查内容								正常	异常	
1	完成每季度工作事项中全部内容										
2	更换一次冷却水滤芯（仅限水冷激光器）										
3	对激光发射波长偏差进行检验										
4	采用臭氧分析仪对臭氧浓度测量准确性进行检验（选测项）										
5	对有效数据区最低高度进行检验（选测项）										
6	对磁盘进行数据整理和备份										
7	仪器说明书规定的其他维护内容										
异常情况处理说明：											
巡检人： 复核人：											

注：每半年巡检维护记录表填写完成后，需及时存档。

表C.6 每年巡检维护内容

城市：		站点名称：		时间： 年 月 日	
序号	巡查内容			正常	异常
1	完成每半年工作事项中全部内容				
2	对臭氧浓度廓线一致性进行检验（选测项）				
3	仪器说明书规定的其他维护内容				
异常情况处理说明：					
巡检人： 复核人：					

注：每年巡检维护记录表填写完成后，需及时存档。

编制说明：结合实际工作经验制定的大气臭氧雷达监测系统巡检表，主要分为监测站房及辅助设备日常巡检、设备的每日、每周、每季度、每半年和每年巡检，对应正文的第5章内容，考虑到可操作性以及现场情况的复杂性，此表仅供参考，不作硬性要求，各生态环境监测机构可结合自身实际修改表格。

附录D 大气臭氧激光雷达连续自动监测系统质量控制工作记录表

附录D

(资料性)

大气臭氧激光雷达连续自动监测系统质控工作记录表

表D.1 大气臭氧激光雷达连续自动监测系统性能检测工作记录表

站点名称			资产编号		
仪器型号			出厂编号		
环境条件	温度 (℃) :		相对湿度 (%) :		其他:
质量控制 设备信息	工具名称		型号		编号
	中性密度滤光片				
	望远镜遮挡盖				
	散射板				
激光发射波长偏差					
		理论波长		实测波长	
				是否合格	
λ_{on}					
λ_{off}					
探测距离偏差					
		雷达实测距离		测距仪测距	
				是否合格	
λ_{on}					
λ_{off}					
系统线性度					
		线性度和拟合斜率			是否合格
λ_{on}					
λ_{off}					
背景噪声基线斜率绝对值					
		拟合斜率绝对值			是否合格
λ_{on}					
λ_{off}					
工作波长通道灵敏度一致性					
λ_{on} 斜率		λ_{off} 斜率		拟合斜率的相对偏差	
				是否合格	
信噪比					
0.5 km处信噪比		2 km处信噪比			是否合格
有效探测距离					

	有效探测距离	是否合格
λ_{on}		
λ_{off}		
臭氧浓度测量准确性（选测项）		
相对偏差	相关系数R	是否合格
有效数据区最低高度（选测项）		
有效数据区最低高度		是否合格
有效数据率		
有效数据率		是否合格
臭氧浓度廓线一致性（选测项）		
相对标准偏差		是否合格

操作人：_____ 复核人：_____

日期： 年 月 日

编制说明：结合实际工作经验制定的大气臭氧激光雷达连续自动监测系统质控工作记录表，对应正文的6.2部分内容，考虑到可操作性以及现场情况的复杂性，此表仅供参考，不作硬性要求，各生态环境监测机构可结合自身实际修改表格。

五、与有关的现行法律、法规和强制性国家标准、行业标准、广东省地方标准及广州市公共服务类地方标准的关系

1.本技术规范未与有关法律法规和强制性标准冲突。

六、重大分歧意见的处理经过、结果和依据

本规范制定过程中不存在重大分歧意见。

对于所有反馈意见，课题组均逐一进行了研究和讨论，在此基础上，根据征求意见情况对本规范文本进行了修改完善。

七、其他应予说明的事项

无。