



T/CECS G XXXX: 20XX

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction Standardization

公路桥梁无人机智能化检测规程

Specification for intelligent inspection of highway bridges using
UAV

(征求意见稿)

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

中国工程建设标准化协会标准

公路桥梁无人机智能化检测规程

Specification for intelligent inspection of highway bridges using UAV

T/CECS G: XXXXXX

主编单位：清华大学

中路高科交通检测检验认证有限公司

发布机构：中国工程建设标准化协会

实施日期：20XX 年 XX 月 XX 日

人民交通出版社股份有限公司

北京

征求意见稿

前　　言

根据中国工程建设标准化协会《关于开展 2022 年第一批中国工程建设标准化协会标准（CECS G）制修订项目编制工作的通知》（中建标公路[2022]091 号）的要求，由清华大学、中路高科交通检测检验认证有限公司承担《公路桥梁无人机智能化检测规程》（以下简称“本规程”）的制订工作。

编制组总结了在公路桥梁无人机检测领域近十年来工程经验和相关科研成果，经过广泛、深入的调查研究，认真总结工程经验，参考有关国际标准和国家标准并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本规程共分 8 章 3 个附录，主要技术内容是：1 总则、2 术语和符号、3 基本规定、4 检测方案设计、5 数据采集、6 数据处理、7 成果质量评价、8 成果记录与表达，附录 A 无人机平台操作、附录 B 无人机桥检智能化分级、附录 C 图像尺度因子的计算原理等。

请注意本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本规程提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，使用本标准相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本规程由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理，由清华大学或中路高科交通检测检验认证有限公司负责具体技术内容的解释。本规程在执行过程中，如有需要修改或补充之处，请将有关资料和建议寄送解释单位（地址：北京市海淀区清华大学新土木馆，清华大学土木工程系结构所《公路桥梁无人机检测标准》管理组，邮政编码：100084），以供修订时参考。

主 编 单 位： 清华大学

中路高科交通检测检验认证有限公司

参 编 单 位： XXXX

目 次

1 总则.....	5
2 术语和符号.....	7
2.1 术 语.....	7
2.2 符 号.....	9
3 基本规定.....	10
4 检测方案设计.....	14
4.1 一般规定.....	14
4.2 现场踏勘.....	14
4.3 设备与平台.....	15
4.4 定位与控制.....	22
4.5 参数选取与验证.....	25
4.6 任务规划.....	27
4.7 应急预案.....	30
5 数据采集.....	32
5.1 一般规定.....	32
5.2 多源数据采集要求.....	33
5.3 关键部位采集要求.....	35
6 数据处理.....	39
6.1 一般规定.....	39
6.2 三维模型建立.....	39
6.3 病害检出.....	41
6.4 病害参数量化.....	44
6.5 病害定位.....	45
7 成果质量评价.....	47
8 成果记录与表达.....	50
8.1 一般规定.....	50
8.2 记录格式.....	50

8.3 数据存储.....	51
8.4 成果输出.....	52
附录 A 无人机平台操作	54
A.1 一般规定.....	54
A.2 设备与人员要求.....	55
A.3 气象要求.....	55
A.4 操作方法.....	56
附录 B 无人机桥检智能化分级	57
附录 C 图像尺度因子的计算原理.....	59
本规程用词用语说明.....	61
引用标准名录.....	62

Contents

1	General provisions	5
2	Terms and symbols.....	7
2.1	Terms.....	7
2.2	Symbols.....	9
3	Basic requirements.....	10
4	Inspection scheme design	15
4.1	General requirements.....	15
4.2	Site survey.....	15
4.3	Devices and platforms.....	16
4.4	Positioning and control	23
4.5	Parameter selection and verification.....	26
4.6	Task planning	28
4.7	Emergency plan.....	30
5	Data collection	32
5.1	General requirements	33
5.2	Requirements for multi-source data collection	33
5.3	Requirements for key parts data collection.....	35
6	Data processing	39
6.1	General requirements	39
6.2	3D model establishment.....	39
6.3	Defect detection	41
6.4	Defect parameter quantification.....	44
6.5	Defect localization	45
7	Quality evaluation of results	47
8	Results recording and expression.....	50
8.1	General requirements	50
8.2	Recording Format	50
8.3	Data storage	51
8.4	Result output	52
	Appendix A Drone platform operation	54
A.1	General requirements	54
A.2	Equipment and personnel requirements	55

A.3 Meteorological requirements	55
A.4 Operation method.....	56
Appendix B Classification for intelligent bridge defect inspection.....	57
Appendix C Calculation principle of ISF	59
Explanation of wording in this standard	61
List of quoted standards	62

征求意见稿

1 总则

1.0.1 为指导桥梁无人机检测技术的应用，做到技术先进、数据准确、安全可靠、经济高效，制定本规程。

【条文说明】

在役桥梁的人工损伤检测技术难以满足日益增长的工程需求。目前通用的检测手段结合望远镜、登高车、桥检车等工具，使用裂缝测试仪、游标卡尺、卷尺等测量设备，检测效率低、速度慢、自动化程度较低，且存在巨大的安全风险与隐患，违规操作等导致的安全事故时有发生。同时，人工法检查裂缝损伤主观性强、容易造成遗漏与错误，存在测不准、效率低、记不全等缺点，导致无法满足工程实践的需求。

随着数字图像软硬件技术的发展，利用数字图像法进行桥梁结构表面的裂缝检查成为有效的结构损伤检查方法并得到广泛研究与应用。与传统的人工方法相比，利用数字图像法进行结构表面裂缝识别，裂缝的检出与提取过程更加客观、可靠，实现了裂缝形态与参数的准确记录，减少了高空作业并提高效率，应用优势明显。

同时，随着无人机技术的发展，通过无人机搭载数字图像设备、激光扫描设备进行桥梁工程的损伤检测的新方法得到了广泛研究并获得成功应用。无人机检测公路工程，可代替检测人员执行梁底、梁侧以及桥墩的表面损伤检测；结合数字图像与三维模型处理方法，可实现裂缝、破损、露筋等损伤的分类、定量测量以及准确记录。一方面，由于消除了工作人员的高空作业，大大提升了检测工作的安全性；另一方面，无人机检测具备自动化与智能化的发展潜力，可实现全过程自主检测，采用数字方式整理、记录桥梁结构检测成果，符合工程结构养护数字化、智能化发展趋势。

1.0.2 本规程适用于公路桥梁表观缺损、病害的检测。

【条文说明】

在役桥梁养护管理体系中，表观缺陷损伤检测是桥梁检测最重要的内容之一。典型的桥梁结构外观缺陷损伤包括混凝土表面裂缝、剥落、风化，钢筋外露、锈蚀，构件变形等，钢结构表面锈蚀、涂层剥落，焊缝开裂等。

本规程适用于公路桥梁结构的表面表观技术状况的检测，其技术手段也同样适用于铁路桥梁、市政桥梁等桥梁结构的表观技术状况检查。

1.0.3 公路桥梁无人机智能化检测，除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

【条文说明】

桥梁无人机检测应首先满足桥梁检测、监测等国家与行业标准要求，同时与 CECS 标准《工程结构数字图像法检测技术规程》《建设工程基于无人机搭载平台检测通用技术标准》等其他数字图像法或无人机检测标准相协调。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 无人机平台 unmanned aerial vehicle platform

无线电遥控设备或自身程序控制装置操纵的无人驾驶飞行器。

2.1.2 位姿 pose

物体在三维空间中的位置和方向，通常由其位置坐标和朝向角度来描述。

2.1.3 多视角几何 multi-view geometry

研究从多个不同视角获取的图像之间的几何关系，以实现三维重建、相机位姿估计和特征匹配等任务的学科。

2.1.4 同步定位与建图 simultaneous localization and mapping (SLAM)

一种用于移动设备在未知环境中同时估计自身位置和构建环境地图的技术，通过传感器数据和算法实现实时定位与地图更新。

2.1.5 三维重建 three-dimensional reconstruction

通过从二维图像或点云数据中提取信息，利用算法生成三维模型的过程，通常用于表示物体或场景的空间结构。

2.1.6 分辨率 resolution

能够反映图像的清晰度和细节表现能力的总像素数量，通常表示为百万像素（MP）。

2.1.7 量测镜头 measuring lens

透镜组的排列进行过严格校正，内方位元素、焦距等光学信息已知的镜头。

2.1.8 非量测镜头 non-metric lens

透镜组的排列没有进行严格的校正的镜头，内方位元素未知，不够稳定或不能重复拨定，或时有变化，因而不能进行像位的解析计算，需要对相机内参数进行检校，求解出相机内方位元素（主距与像主点位置）与多种畸变参数的镜头。

2.1.9 远心镜头 telecentre lens

主要是为纠正传统工业镜头视差而设计，它可以在一定的物距范围内，使得到的图像放大倍率保持不变，这对被测物不在同一物面上的情况是非常重要

的应用。

2.1.10 视场角 field of view (FOV)

成像设备所能捕捉到的场景范围，通常以角度表示，决定了设备在特定距离下能够成像的宽度和高度。

2.1.11 动态模糊 motion blur

在拍摄过程中，由于相机运动或被摄物体移动导致的图像模糊现象，通常表现为图像中物体边缘不清晰，影响图像的细节识别和分析。

2.1.12 图像尺度因子 image scaling factor

指图像中的单位像素对应真实空间的实际距离，用以描述图像的空间分辨能力。

2.1.13 重叠率 overlap rate

指在无人机影像采集过程中，连续图像间的重叠区域所占的比例，通常以百分比表示。

2.1.14 正直摄影 upright photography

摄影基线和相机主光轴垂直。

2.1.15 交向摄影 convergent photograph

在摄影基线两端，两相机主光轴在物方相交成某一角度的摄影。

2.1.16 二值化 binarization

将灰度图像转换为仅包含黑白两种像素值的过程，以突出特定特征或简化图像处理。

2.1.17 超分辨率 super-resolution

通过图像处理技术提升图像分辨率的过程，旨在从低分辨率图像中恢复出更高细节的高分辨率图像。

2.1.18 裂缝骨架线 fracture skeleton line

对图像中的裂缝进行细化操作，得到的与裂缝形状连通性和拓扑结构相一致的曲线，用以表示裂缝主干。

2.2 符号

- ISF——图像尺度因子；
 u ——物距，拍摄距离；
 l ——传感器对角线尺寸；
 L ——测量范围的对角线距离；
 f ——镜头的焦距；
 N_d ——图像对角线像素数量；
 $W_{c,m}$ ——裂缝平均宽度；
 S_c ——裂缝面积；
 L_c ——裂缝长度。

3 基本规定

3.0.1 公路桥梁无人机智能化检测的对象包括:

- 1** 混凝土的表观缺损，包括表面裂缝、剥落、渗水、露筋等；
- 2** 钢结构的表观缺损，包括表面裂纹、表面锈蚀、涂装缺损、螺栓松动等；
- 3** 缆索体系的表观缺损，包括护套破损、锚具锈蚀等；
- 4** 桥梁支座的表观缺损与异常。

3.0.2 下列情况下，宜对公路桥梁采用无人机智能化检测:

- 1** 需要形成数字化检测成果时；
- 2** 难以使用人工检测、人工检测效率与精度低下或人工检测存在安全隐患时；
- 3** 需要连续、大面积检测时；
- 4** 需要实现自动化检测时。

3.0.3 公路桥梁无人机智能化检测系统应由无人机平台、数据采集设备和数据处理模块组成。

【条文说明】

公路桥梁无人机智能化检测系统主要由无人机平台、数据采集设备和数据处理软件组成。其中，无人机平台为搭载设备进行数据采集的核心控制平台，检测人员利用无人机平台的机动性、灵活性，将搭载的检测设备送至各个人工难以达到的部位。数据采集设备包括可见光视觉传感器、红外传感器、激光雷达等，为获取桥梁表观缺损与病害原始数据的必要设备。数据处理模块能够对采集到的原始数据进行加工和转换，以输出检测人员所需要的分析结果，例如检出病害的参数、空间定位等。在工程实践中，该模块可以基于智能算法或人工后处理等方式实现。

3.0.4 检测任务中，无人机平台应配备相应的数据采集设备，对桥梁结构进行表
面原始数据的采集，并基于数据处理模块对原始数据中的病害进行检测与定位。

【条文说明】

本条说明了公路桥梁无人机智能化检测系统中的各组成部分在实际检测任
务中是如何运作和联系在一起的。

3.0.5 检测成果应能确保病害信息的真实性、全面性和准确性，并应能支撑桥梁的服役状态评定，作为后续运维管养的决策依据。

3.0.6 公路桥梁无人机智能化检测可根据检测目的、范围和精度的不同，划分为全面精细化检测、重点构件检测和快速巡视检查三类工作模式。各类工作模式可应用于《公路桥涵养护规范》JTG 5120-2021 规定的不同检查类型，其适用关系可按表 3.0.6 确定。

表 3.0.6 无人机检测工作模式与桥梁检查类型的适用关系

无人机检测工作模式	初始检查	日常巡查	经常检查	定期检查	特殊检查
全面精细化检测	●			●	▲
重点构件检测			▲	▲	●
快速巡视检查		●	●		▲

注：● 表示主要适用；▲ 表示根据具体需求可适用。

【条文说明】

为明确无人机智能化检测技术的应用场景，本条根据检测任务的深度和广度，将无人机检测划分为三种典型工作模式，并建立了其与《公路桥涵养护规范》JTG 5120-2021 中规定的五种检查类型的对应关系。

全面精细化检测：指采用无人机对桥梁全部可见结构表面进行高精度数据采集和分析，旨在获取桥梁全面的表观病害信息，并形成数字化的检测成果。此模式要求高分辨率、全覆盖，通常用于建立基准数据或进行全面评估。因此，它主要适用于需要全面摸底的初始检查和系统性评估的定期检查。对于某些特殊检查，如灾后全面评估，也可采用此模式。

重点构件检测：指针对桥梁的特定关键部位（如主缆、索塔、支座、关键节点等）或已知的病害区域进行详尽的、高精度的检测。此模式聚焦于局部，检测精度要求高。它适用于特殊检查中对特定问题的深入探查，也可作为定期检查或经常检查中对重点关注部位的补充手段。

快速巡视检查：指利用无人机高效、快速地对桥梁进行宏观巡视，主要目的是及时发现明显的、严重的结构损伤或安全隐患，如构件断裂、严重变形、大型障碍物等。此模式强调效率而非精度。它非常适合于高频次的日常巡查和

经常检查。在某些特殊检查的初期快速响应阶段，也可采用此模式来快速了解总体状况。

通过这种划分和对应，使用者可以根据《公路桥涵养护规范》的具体要求，清晰地选择合适的无人机检测工作模式和技术方案。

3.0.7 公路桥梁无人机智能化检测作业宜按图 3.0.7 规定的程序进行：

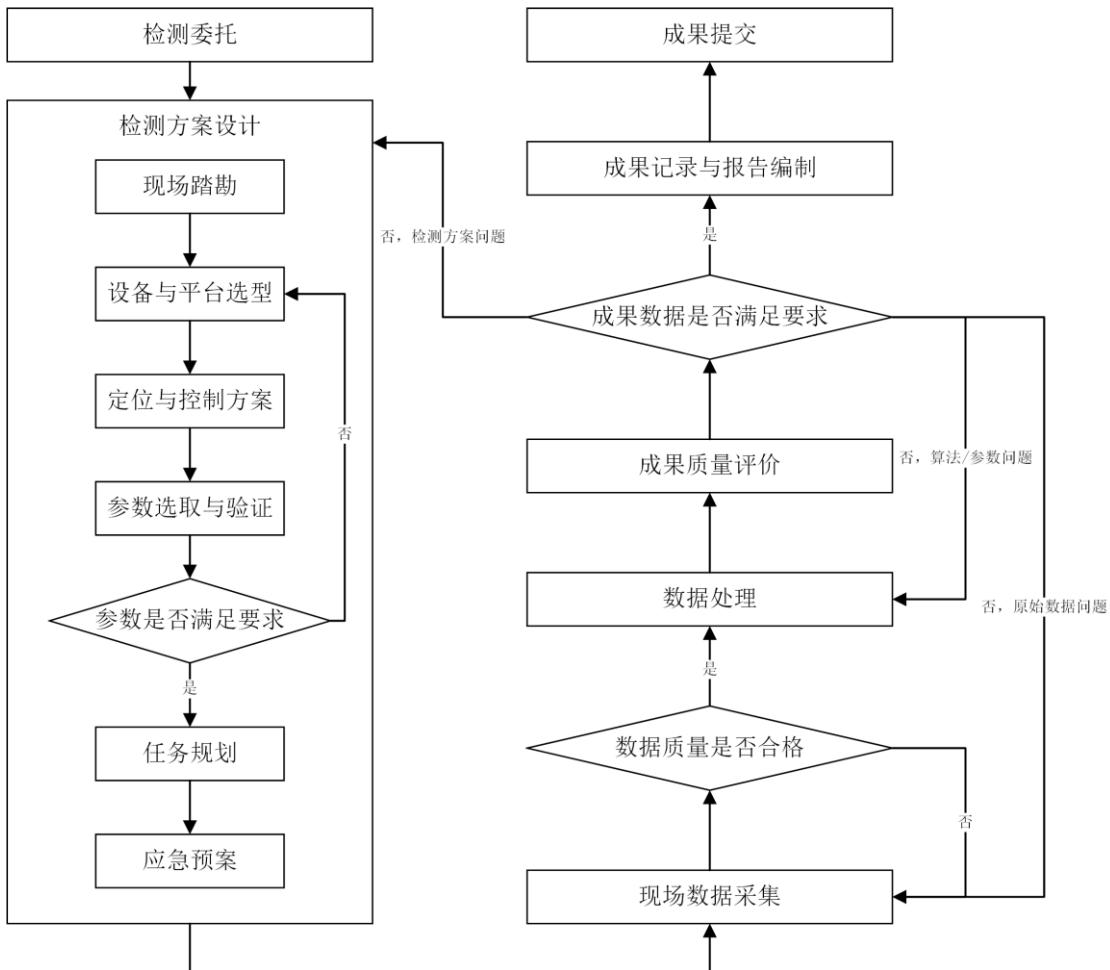


图 3.0.7 公路桥梁无人机智能化检测工作流程

【条文说明】

本条规定了公路桥梁无人机智能化检测的推荐工作流程，旨在确保检测工作的系统性、科学性和成果质量。该流程是一个包含多个反馈闭环的迭代过程，主要环节说明如下：

检测方案设计：这是检测工作的首要环节，其质量直接决定后续工作的成败。此阶段包含一个重要的内部验证闭环：在完成“参数选取与验证”后，应立即判断所选设备和参数理论上能否满足检测精度要求（如图像尺度因子等）。若不满足，应返回“设备与平台选型”等步骤进行调整，直至方案理论可行，

从而避免后续工作因方案设计不当而返工。

现场数据采集：此环节强调即时质量检查。数据采集完成后，应立即对原始数据的质量进行初步判断（如图像是否清晰、有无漏拍、重叠率是否足够等）。若数据质量不合格，应立即进行重采或补采，确保进入下一环节的数据是有效的。

数据处理与成果质量评价：此环节是智能化检测的核心。在完成“数据处理”和“成果质量评价”后，需要对检测成果的精度进行最终判定。若成果精度不满足要求是由于算法或处理参数问题导致，应返回“数据处理”环节，调整算法或参数后重新计算。若问题根源在于原始数据质量，则应返回“数据采集”环节，进行数据重采。若问题暴露出检测方案存在根本性缺陷（如设备选型错误导致精度无法达标），则必须返回“检测方案设计”环节，从源头进行修正。

成果记录与报告编制：只有在成果质量评价通过后，方可进入此环节，形成最终的检测报告和成果文件。

3.0.8 公路桥梁无人机智能化检测作业应符合下列规定：

1 检测方案设计应结合桥梁工程资料、设计图纸以及现场踏勘情况，制定科学、详细的检测方案；

2 设备选型应结合检测任务的委托要求，综合考虑桥梁结构特点、病害类型及检测精度，合理选取适配的检测设备，以确保满足检测需求；

3 应结合桥梁结构各部位的特点，分别对关键构件（如梁体、墩柱、支座、索塔、缆索等）进行全面的数据采集，确保数据的全面性和准确性；

4 数据处理可包括图像处理、点云处理、三维重建等技术手段，确保能够识别桥梁结构表面的病害特征并进行定位；

5 宜对数据处理的结果进行精度判断，若满足要求则进行结果输出，若不满足则应返回方案制定。

3.0.9 开展桥梁无人机检测作业时，应确保人员与设备的安全性。操控人员、无人机平台以及检测工作应符合附录 A 的规定。

3.0.10 公路桥梁无人机智能化检测工作可按照本规范附录 B 的方法进行智能化评级，划分为 L0~L5 共 6 个等级，用于评判检测工作的自动化程度与智能化水平。

4 检测方案设计

4.1 一般规定

4.1.1 公路桥梁无人机智能化检测方案的制定应紧扣检测委托的任务需求。方案应明确检测的目标、范围和精度要求，并应包括现场勘查、设备与平台、定位与控制、参数选取与验证、任务规划及应急预案等内容。

4.1.2 无人机检测作业的方案设计与现场实施，除应符合本规程外，还必须遵守国家及行业关于电力设施、铁路、公路、航道、民航等安全管理的相关规定。

4.2 现场踏勘

4.2.1 开展公路桥梁无人机智能化检测前，应开展现场踏勘，以明确桥梁结构特点、周边环境、作业条件及潜在风险。

【条文说明】

现场踏勘可采取人工踏勘或无人机踏勘等方式。踏勘时应记录重点巡查区域、待检桥梁结构的特殊构造、待检桥梁结构各主要构件的分布等，以便于制定详细检测方案。设计图纸、数字模型等资料可以辅助现场踏勘。

4.2.2 现场踏勘应识别并记录影响飞行安全的重大风险源，并评估其对检测作业的影响。风险源应至少包括：

- 1** 强电磁干扰源：桥梁附近或上方的高压输电线路、变电站、移动通信基站、雷达设施等；
- 2** 空中障碍物：桥梁结构以外的架空线缆、周边高大树木或建（构）筑物；
- 3** 地面及水域交通：桥下航道、桥上及周边道路的车辆与人流情况；
- 4** 空域限制：作业区域是否涉及机场净空区、军事管理区、临时管制区等。

4.2.3 当存在下列情况之一时，不宜采用无人机进行检测，或应在采取特殊安全保障措施并获得相关许可后方可实施：

- 1** 无法有效规避强电磁干扰，无人机定位或通信信号持续不稳定的；
- 2** 飞行路径与高压线等危险源的安全距离无法满足相关行业规定的；
- 3** 作业空域受严格限制且无法获得飞行许可的。

4.2.4 现场踏勘时应确认正式作业期间的自然环境条件满足要求，并应符合以下规定：

- 1 光照：**宜选择光线充足、柔和、亮度均匀的时间段作业，避免逆光或光照剧烈变化；当光照条件不足时，宜设置附加补光装置；
- 2 风力：**作业场地环境风速不应超过无人机平台最大抗风能力的 70%，且不宜在风力大于 5 级（10.7 m/s）的环境下进行精细化数据采集。桥梁峡谷风、横风等局部阵风效应应予以重点关注。
- 3 温湿度：**作业环境的温度和湿度应在无人机及搭载设备允许的工作范围内。在低温、高温或高湿环境下作业时，应评估其对电池续航、设备性能及结露的影响。
- 4 降水：**严禁在雨、雪、冰雹等天气下作业。

【条文说明】

根据风级划分，风速高于 10.7m/s 时属于强风（风力等级 6 级），此时风速将超过一般民用微型及轻型无人机的抗风能力安全值，故为保证作业安全，风力达到 6 级及以上时不宜进行检测作业。小型及更大级别无人机最大抗风能力将有一定提升，此时作业最大风速宜依据无人机实际性能及使用说明确定。

过高或过低的环境温度及湿度将显著降低无人机电机及电池性能，影响无人机续航及抗风能力，故不宜在极端环境下进行检测作业。一般民用微型或轻型无人机作业温度在-10°C 到 40°C 之间，测绘用小型或中型无人机在-20°C 到 50°C 之间，不同无人机的作业温度应参考使用说明确定。

4.3 设备与平台

4.3.1 公路桥梁无人机智能化检测方案应明确检测任务所使用的数据采集设备与作业平台。设备与平台的选型应与 3.0.6 条 确定的工作模式相匹配。

【条文说明】

检测方案应明确指出检测任务所采用的数据采集设备，即搭载在无人机上的用于获取原始数据的设备，如相机、激光雷达等。此外，支持人员操作的作业平台也是必不可少的，例如无人机平台、车载平台及无人机机场等。

设备与平台的选型应与 3.0.6 条 确定的工作模式相匹配。例如，全面精细化检测和重点构件检测对成像质量和定位精度要求高，宜选用高性能的相机

和定位模块；快速巡视检查则可优先选用机动性强、续航时间长的无人机平台。

4.3.2 检测任务选用的设备与平台应具备良好的集成性和扩展性，确保不同模块间的协调工作，以适应多样化的检测任务。

【条文说明】

设备与平台的集成性确保这些设备能够在同一平台上协调工作，实现数据的同步采集和处理。扩展性则是指系统能够根据不同的检测任务和需求，灵活添加或更换设备模块，以适应复杂、多样的桥梁检测环境。

4.3.3 数据采集设备应包括病害采集装置，宜包括建模装置与辅助装置。

【条文说明】

病害采集装置是检测工作的核心设备，通过高分辨率成像，可以捕捉到裂缝、锈蚀、脱落等病害信息。此外，根据实际需求，成像装置还可以配备建模装置，用于三维点云数据采集，帮助构建桥梁结构的三维模型。辅助装置（如补光设备、激光测距等）可以提高成像质量，在光线不足或复杂环境下增强图像效果，从而提高检测结果的准确性和可靠性。

4.3.4 病害采集装置应满足下列要求：

1 应具备高分辨率成像能力，能够在复杂光照条件下清晰捕捉桥梁表面病害细节；

2 可选用可见光成像设备、红外成像设备或其他适合病害类型的设备；

4.3.5 选用相机作为病害采集装置时，其参数应满足表 4.3.5 的要求；

表 4.3.5 相机参数要求

技术参数	指标要求
分辨率	$\geq 12 \text{ MP}$ (1200 万像素)
传感器尺寸	$\geq 1/1.7$ 英寸
镜头焦距	宜在 24-200 mm，可根据任务需求选择
帧率	$\geq 24 \text{ fps}$
防护等级	宜具备 IP43 或更高等级

【条文说明】

本条规定了选用相机作为病害采集装置时应具备的技术参数要求，具体包括以下几个方面：

相机的分辨率要求至少为 1200 万像素，以确保能捕捉到桥梁表面细微病害。传感器尺寸应大于 1/1.7 英寸，以增强相机在低光条件下的成像质量。此处的英寸为摄影行业中约定的英寸单位，1 英寸≈1.6cm。

镜头焦距宜在 24-200mm 范围内选择，以适应绝大多数不同的桥梁检测任务。

录制视频数据时，帧率要求至少 24 帧每秒，确保动态捕捉的流畅性。

防护等级应为 IP43 或更高，以确保相机具备基本的防尘、防水能力，以应对复杂的桥梁检测环境。

4.3.6 镜头选择应符合下列要求：

1 宜选用量测镜头。若采用非量测镜头，镜头应满足失真小、可标定、成像清晰等要求；

2 采用非量测镜头进行定量检测时，应标定成像设备的基本参数，包括主点坐标、主距、镜头畸变系数；

3 采用双目或多目相机测量时，宜在使用前标定单目成像参数、相机间的相对位置关系；

4 镜头靶面尺寸不应小于感光元件尺寸；

5 镜头的分辨率不应小于相机感光元件的物理分辨率；

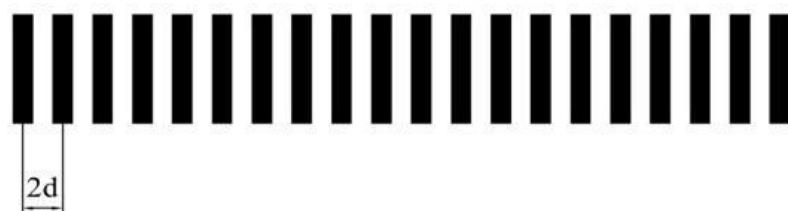
6 镜头焦距的选择应由测量距离、感光元件的对角线长度与测量范围的对角线长度确定；

7 在对镜头的放大倍数敏感的使用场景中应使用远心镜头。

【条文说明】

非量测型镜头相机包括工业相机和民用相机，常用的接口包括 C 接口、CS 接口、F 接口、V 接口、T2 接口、徕卡接口、M42 接口、M50 接口等（C 接口和 CS 接口是工业相机最常见的国际标准接口）。

镜头分辨率是指摄影镜头清晰地再现被摄景物细节的能力，分辨率定义为在像面处镜头在单位毫米内能够分辨开的黑白相间的条纹对数，如下图所示：



分辨率为 $1/2d$ ，其中， d 为线宽。分辨率的单位为lp/mm（线对/毫米）。

一般使用的分辨率计算公式为：

$$\varepsilon = 0.61 \times \frac{\lambda}{N.A.}$$

式中，

ε ——分辨率；

λ ——使用的波长（可见光取 $0.55\mu\text{m}$ ）；

N.A. ——镜头数值孔径。

远心镜头包括物方远心镜头、像方远心镜头、双侧远心镜头，其中双侧远心镜头的放大倍数既不会受探测物的距离影响也不会受镜头到靶面感光元件的距离影响。

4.3.7 建模装置应满足下列要求：

1 应具备高三维数据采集能力，能够获取桥梁结构的三维点云；

2 可选用激光雷达、可见光成像设备或其他三维建模设备。

4.3.8 选用激光雷达作为建模装置时，其参数应满足表 4.3.8 的要求；

表 4.3.8 激光雷达参数要求

技术参数	指标要求
测量精度	$\leq 5 \text{ cm}$
扫描范围	涵盖 $5 \text{ m} \sim 100 \text{ m}$ 范围
扫描速度	$\geq 100,000$ 点/秒
水平视场角	$\geq 60^\circ$
垂直视场角	$\geq 45^\circ$
防护等级	宜具备 IP54 或更高等级
数据接口	支持 USB、以太网或无线数据传输

【条文说明】

本条规定了选用激光雷达作为建模装置时应具备的技术参数要求，具体包括以下几个方面：

测量精度是指经过 GNSS/IMU 数据融合解算后，最终点云成果的绝对精度。 5cm 的精度是当前主流无人机激光雷达系统在良好作业条件下可以稳定达到的水平，也是保证模型可用于基本量测的门槛。

扫描范围应涵盖 5 米至 100 米范围，以确保雷达点能够覆盖桥梁主体范围。扫描速度应到每秒 100,000 点以上，能够快速获取大量数据点，提高建模效率；同时保证点云数据的密度合适，成果点云不会过于稀疏。

水平、垂直视场角的要求确保雷达能够扫描广泛的区域，减少检测盲区。

防护等级设定为 IP54 或更高，保证设备在户外复杂环境下的防尘、防水性能。

数据接口支持 USB、以太网或无线数据传输，确保设备与数据处理平台的兼容性和数据传输的便捷性。

4.3.9 选用可见光成像设备作为建模装置时，应满足下列要求：

- 1 可将作为病害采集装置的可见光成像设备同时用作建模装置，共用原始数据；
- 2 当建模装置采用的可见光成像设备不同于病害采集装置时，可在表 4.3.5 的基础上放宽对分辨率和传感器尺寸的要求：分辨率应大于等于 6MP（600 万像素），传感器尺寸应大于等于 1/1.3 英寸。

4.3.10 辅助装置应满足下列要求：

- 1 应能够在光线不足或环境复杂的情况下优化成像质量，提升桥梁病害的识别效果；
- 2 宜根据作业环境和检测目标进行配置，可包括用于照明增强、成像优化和平台增稳的设备。

【条文说明】

本条对辅助装置的配置提出了原则性要求。辅助装置是确保在复杂条件下获取高质量数据的关键。

照明增强设备主要指 LED 补光灯、频闪灯等。在桥梁底板、箱梁内部、夜间或阴天等光线不足的场景，充足且均匀的照明是保证图像清晰、色彩真实的前提，也是后续病害智能识别算法有效性的基础。

成像优化设备主要指各类滤光镜。例如，偏振镜可以有效消除水面、光滑涂层或潮湿混凝土表面的反光，使裂缝等细节更加清晰。在特定光谱检测任务中，也可能使用窄带滤光片等。

平台增稳设备主要指无人机平台与相机之间的减振和增稳装置。除了无人机自带的三轴云台，对于一些需要极高图像稳定性的精细检测任务，可加装如

高阻尼减振球/减振板等被动减振装置，以进一步过滤高频振动对成像的影响。

4.3.11 针对桥梁病害检测任务，应选用多旋翼式无人机平台。

【条文说明】

多旋翼无人机相比于固定翼无人机，在桥梁检测任务中具有更高的稳定性和灵活性，尤其适用于桥梁结构复杂、空间狭窄的环境。多旋翼无人机能够实现高精度悬停，便于对桥梁的特定部位进行近距离检测，同时具备更强的操控性，能够灵活应对桥梁不同部位的病害检查需求。此外，多旋翼无人机的飞行速度较低，适合进行高分辨率图像采集，确保病害细节的准确捕捉。

4.3.12 为确保桥梁检测任务稳定、安全、持续开展，桥梁病害检测工作中使用的无人机平台技术参数应满足表 4.3.12 的要求：

表 4.3.12 无人机平台技术参数要求

技术参数	指标要求
悬停精度（水平）	$\leq \pm 0.8m$ （无 GNSS） $\leq \pm 0.5m$ （GNSS） $\leq \pm 0.1m$ （RTK）
悬停精度（垂直）	$\leq \pm 0.6m$ （无 GNSS） $\leq \pm 0.3m$ （GNSS） $\leq \pm 0.1m$ （RTK）
抗风能力	≥ 5 级风速（约 10.8-13.8m/s）
飞行稳定性	横滚角度偏差 $\leq \pm 3^\circ$ ，俯仰角度偏差 $\leq \pm 3^\circ$
航高控制精度	$\leq \pm 0.5m$
单架次有效飞行时间	≥ 20 分钟
实用升限	$\geq 150m$

【条文说明】

本条对桥梁病害检测工作中无人机平台的技术要求进行了详细规定，以确保无人机在执行任务时具有足够的稳定性、精度和续航能力。

悬停精度分为水平和垂直两个方向，要求水平悬停精度在无 GNSS 情况下不超过 0.8 米，使用 GNSS 情况下不超过 0.5m，使用 RTK 时精度提高到不超过 0.1 米；垂直方向悬停精度的要求与此类似。这些参数确保无人机在复杂桥梁环境中能够稳定工作，特别是在近距离检测时确保成像和数据采集时的机身的稳定性。

抗风能力要求无人机能够在风速达到 5 级（约 10.8-13.8 米/秒）的情况下正常飞行，保证在风力较大的桥梁检测环境中仍能稳定工作。

飞行稳定性通过对横滚角度和俯仰角度的偏差进行限制，确保无人机在飞行中的姿态稳定，不会出现较大的倾斜。

航高控制精度保证无人机能够精确保保持高度，以便在复杂的桥梁环境中安全飞行。

单架次的续航时间的要求不低于 20 分钟，以满足大多数桥梁检测任务的持续性需求。

无人机的实用升限不低于 150 米，以适应不同桥梁结构的检测工作，例如大跨径悬索桥的索塔检测。

4.3.13 无人机平台应具备良好的环境适应能力，能够在温度、湿度等气候条件变化较大的环境中稳定运行，并具备防尘、防水等功能。

4.3.14 无人机平台应具备良好的扩展性，具备联网、飞行状态管理、数据实时传输、云平台控制等功能，能够根据任务需求快速更换或搭载不同类型的检测设备。

4.3.15 无人机平台应配备自动避障系统、具备紧急返回功能。当平台在作业过程中遭遇突发情况时，应能自动采取悬停或降落等保护措施。

4.3.16 在桥梁无人机检测的作业过程中，可配备车载平台作为检测作业的辅助平台，提供数据处理、设备操作及人员安全保障的支持功能。

【条文说明】

通过在检测现场设置车载平台，作业人员可以实时处理无人机采集的数据，提升检测效率。同时，车载平台还可以作为操作设备的集成平台，方便作业人员监控和控制无人机运行，确保检测任务的顺利开展。此外，车载平台还能为检测人员提供安全防护，尤其在桥梁复杂环境中，车载平台可以提供相对稳定的工作空间，有效提升作业的安全性和可靠性。

4.3.17 车载平台可配备以下设备或功能：

- 1 无人机起降平台；
- 2 信号发射与接收装置；
- 3 智能计算终端；
- 4 无人机精确定位装置。

4.3.18 车载平台应具备良好的环境适应能力，确保在桥梁检测现场具备足够的稳定性和耐用性，满足各类复杂作业环境的需求。

4.3.19 车载平台应为作业人员提供安全作业环境，并配备必要的电源、通信和设备存储设施，确保无人机检测任务的顺利进行。

4.3.20 对于特大跨桥梁、生命线桥梁的检测任务，可选用无人机机场，自动放飞无人机执行任务。

4.3.21 无人机机场应能提供设备充电、无人机起降、数据传输等功能，从而确保无人机能够在巡检任务中连续工作。

4.3.22 无人机机场应配备防护设施，保障无人机在恶劣气候条件下安全运行，并确保设备的稳定性和可靠性。

4.3.23 无人机机场的建设位置应结合桥梁结构布局、检测需求及环境条件进行科学选址，确保无人机起降的安全性和检测工作的有效性。

4.4 定位与控制

4.4.1 无人机平台定位方式包括：GNSS 定位、SLAM 定位及 UWB 定位等。

【条文说明】

全球卫星导航系统（GNSS）是一种以卫星为基础的无线电导航系统，可提供时间/空间基准和所有与位置信息相关的实时动态信息。GNSS 定位通过电波的传播时间来确定卫星和无人机间的伪距，再以伪距为半径进行三球交汇，联立方程求解无人机位置。包含一般 GNSS 技术，以及基于信号差分的 RTK 技术。

SLAM 定位是利用无人机自带的惯性导航系统、相机或激光雷达获取位置信息，在移动过程中根据位置和地图进行自身定位，同时在自身定位的基础上建造增量式地图，实现无人机的自主定位和导航，包括基于惯性导航系统、视觉、激光雷达以及融合式等 SLAM 方案。

UWB 技术是一种利用纳秒级的非正弦波窄脉冲传输数据的无线载波通信技术，具有抗干扰性能强、传输速度高等优势。UWB 定位是利用无人机的 UWB 基站与附近布置的 UWB 定位信标进行通讯，获取无人机的距离和角度信息，并利用三角定位等几何定位方法求得无人机的位置信息。

4.4.2 制定检测方案时，应根据现场条件选取合适的无人机平台定位方式。

1 对于空旷地带，特殊干扰较少的桥梁上部结构的检测任务，可采用 GNSS

定位方式；

2 对于梁底等不便获取 GNSS 信号场景的检测任务，可采用 SLAM 或 UWB 等定位方式；

3 对于较为复杂、障碍物较多的检测环境，可采用 SLAM 技术实现无人机的自主避障和局部定位；

4 根据检测条件，在基站信号满足的情况下，可采用 UWB 定位。

4.4.3 当采用 GNSS 定位时，定位卫星数量不应少于 8 颗；采用基于信号差分的 RTK 定位时，定位的卫星数量不应少于 15 颗。

【条文说明】

对于标准 GNSS 定位，至少需要 4 颗卫星才能进行三维解算。为保证定位解的可靠性和精度（良好的 DOP 值），本规程规定了不应少于 8 颗的工程应用门槛。在桥梁等有遮挡环境下，满足此要求是无人机进入稳定 GNSS 定位模式的基础。

对于 RTK 定位，其目的是获得厘米级的高精度结果。这需要高质量的差分数据和良好的卫星几何构型来快速、可靠地解算载波相位模糊度。虽然理论上 5-6 颗共视卫星即可起算，但更多的卫星数量能显著提升解算的成功率和稳定性。本规程推荐无人机接收的卫星总数宜不少于 15 颗，这是一个在保证 RTK 解算质量和适应桥梁作业环境之间取得平衡的建议值。同时，操作人员应实时关注 RTK 状态，确保获得并保持“固定解”（Fixed）。

4.4.4 当采用 UWB 定位时，布设的信标数量不应少于 4 个，并宜采用能良好覆盖作业区域的几何构型布设。对于高要求或长期巡检场景，宜增加信标数量以提升系统性能。

【条文说明】

UWB 定位的精度和可靠性在很大程度上取决于地面信标的数量和几何布局。

三维空间定位至少需要 4 个不在同一平面上的已知点（信标）才能唯一确定目标位置。因此，4 个信标是实现无人机三维定位的最低要求。良好的几何构型（如矩形、正多边形）可以优化精度因子（GDOP），提高定位精度，因此推荐采用此类布局。

在长期、自动化巡检等高要求场景下，增加信标数量是提升系统性能的有效手段。更多的信标可以提供冗余观测数据，当部分信标被桥梁结构或无人机

自身遮挡时，系统仍能稳定输出高精度定位结果，显著增强系统的鲁棒性。采用将作业空间包裹起来的8信标立体布局是一种常见的增强方案。

4.4.5 根据自动化程度的不同，无人机的控制方式可分为手动控制、航线飞行和自主飞行。检测作业时应根据检测场景、桥梁复杂程度和安全要求选择合适的控制方式。

【条文说明】

本条将无人机控制方式按自动化水平由低到高划分为三个层次，以适应不同的检测需求。

手动控制为基础的无人机控制方式，操作员通过遥控器直接控制无人机的飞行姿态和轨迹，所有决策由人做出。此方式灵活直接，但依赖于飞手的技能和经验。手动控制对应本规程附录B中的L0、L1级智能化水平。

航线飞行是指，操作员在进行飞行作业前设定飞行高度、航点路线、重叠率等飞行参数，无人机将根据预设飞行参数进行自动飞行作业，操作员在需要时介入并调整飞行轨迹。操作员的角色从“驾驶员”转变为“监控员”。这是实现标准化、可重复检测的关键，对应本规程附录B中的L2、L3级智能化水平。

自主飞行是指，无人机不仅能执行预设任务，还能利用机载传感器（如视觉、激光雷达）实时感知周边环境，自主进行路径规划、动态避障和任务调整。这代表了更高级的智能化水平，对应本规程附录B中的L4、L5级智能化水平。

4.4.6 手动控制适用于局部检查、复杂环境下的精细操作或首次探查飞行。采用手动控制时，应符合下列规定：

- 1 作业前应充分熟悉飞行环境，识别视觉盲区和安全隐患；
- 2 宜设置观测员，协助操作员监控无人机姿态及周边环境；
- 3 飞行宜在操作员或观测员的直接视距内进行。确需超视距飞行时，必须确保图传和控制链路稳定，并能通过机载传感器信息全面掌握飞行状态。

4.4.7 航线飞行适用于对桥梁大面积区域进行重复性、标准化的数据采集。采用航线飞行时，应符合下列规定：

- 1 航线规划应确保数据采集的全覆盖和飞行的安全性，并能避开已知障碍物；
- 2 在GNSS信号良好的开放空域，可基于GNSS坐标规划和执行航线；
- 3 在桥底等GNSS信号受遮蔽的区域，可采用UWB定位、SLAM重定位或

视觉标签等技术引导无人机沿预设轨迹飞行；

4 作业过程中操作员应保持对无人机的监控，在出现异常时能立即切换至手动控制。

4.4.8 自主飞行适用于在未知或动态变化的环境下执行复杂的检测任务。无人机在该模式下应具备环境实时感知、自主路径规划和自主避障能力。采用自主飞行前，应对其算法的可靠性和安全性进行充分验证。

4.5 参数选取与验证

4.5.1 为保证作业精度和安全，避免采集的图像出现严重的动态模糊，无人机拍摄图像时飞行速度不应高于 12 m/s；拍摄视频影像时飞行速度不应超过 3 m/s。

4.5.2 为保证飞行安全和图像质量，无人机与被测构件表面的拍摄距离应根据环境风速、构件类型和无人机性能综合确定，并宜满足下列要求：

1 对于桥墩、塔柱、主梁等大尺寸构件，拍摄距离不宜小于 2m；

2 当环境风速大于 8.0 m/s（4 级风）时，最小拍摄距离应适当增大，且不宜小于 3 m；

3 对于缆索、桁架杆件等细长或复杂构件，为避免误判和碰撞，拍摄距离不宜小于 5 m；

4 采用具备全向高精度避障、接触式探测或配备有防护罩的专用无人机进行抵近检查时，可在确保安全的前提下，不受上述距离限制，但应制定专项作业方案。

【条文说明】

本条规定了常规无人机作业时的安全拍摄距离。这是在无人机定位精度、抗风性能和避障能力的综合考量下，为防止碰撞而设定的安全裕度。过近的距离不仅增加碰撞风险，无人机下洗气流也可能吹动构件表面的碎屑，影响图像质量。

第 2 款强调了风速的影响，大风会显著降低无人机的操控精度和稳定性。

第 3 款针对缆索等小尺寸目标，无人机的视觉避障系统可能难以有效识别，因此需要保持更远的距离。

第 4 款为采用先进技术的抵近检查提供了依据。例如，使用带球形防护罩

的无人机可以安全地在构件表面滚动或进行轻微接触，以获取超高分辨率的图像。但此类特殊作业风险较高，必须制定专项方案并由经验丰富的操作员执行。

4.5.3 为保证原始图像的质量，避免明显的动态模糊，图像采集时快门时间不宜长于 1/50s。

4.5.4 为保证原始图像的质量，避免过多的噪声干扰，图像采集时相机 ISO 不宜高于 1600。

【条文说明】

ISO（胶片速度）用于表述数码相机中曝光与输出图像亮度之间的关系。在数码相机系统中，可以通过设置传感器的信号增益来实现曝光和传感器数据值之间的任意关系，即设置相机的 ISO 参数。当拍摄环境较暗时，如无合适的补光设备，可以选择较高的 ISO 值进行拍摄，但此时图像的信噪比较低，图像中存在大量噪点，将显著影响病害识别效率与精度。

4.5.5 为保证足够的景深，使桥梁构件表面在不同距离处均保持清晰，进行拍摄时光圈值（F 值）不宜小于 F4.0。在光照充足时，宜使用 F5.6 至 F11 之间的光圈值。

【条文说明】

光圈值（F 值）直接影响图像的景深。景深是指在对焦点前后能保持清晰成像的距离范围。在桥梁检测中，尤其是在斜向拍摄或构件表面不平整时，需要较大的景深来确保整个目标区域都在清晰范围内。光圈值越小（如 F1.8, F2.8），景深越浅，容易导致对焦点以外的区域模糊，丢失病害信息。光圈值越大（如 F8, F11），景深越大，但过大的光圈值（如 F16 以上）可能因衍射效应降低图像的锐度。因此，本条规定了拍摄时光圈设置的推荐范围，以平衡景深和成像质量。F4.0 是保证基本景深的下限，F5.6-F11 通常是大多数镜头的最佳成像光圈范围。

4.5.6 在制定检测方案时，应结合选取的参数对图像尺度因子进行预验证，以确保能够获取指定精度的病害细节表现。

【条文说明】

图像尺度因子直接决定了采集到的图像能否清晰地反映出桥梁表面的病害细节，如裂缝、锈蚀等，其含义是图像中的 1 像素对应实际空间中的多少距离。通过对图像尺度因子的预验证，检测人员可以确保无人机及其搭载设备在选定

的飞行高度和拍摄参数下能够满足检测精度的要求，避免因分辨率不足而导致病害信息遗漏或检测误差。例如，某检测工作预期检出 0.1mm 宽度的裂缝，则数据采集设备的图像尺度因子应大于 0.1mm/pixel。若不满足要求，则应按照 3.0.7 条的要求重新设计检测方案。

4.5.7 图像尺度因子应按照公式(4.5.6)计算，其计算原理见附录 C。

$$ISF = \frac{u \times l}{f \times N_d} \quad (4.5.6)$$

式中，

ISF ——图像尺度因子，单位 mm/pixel；

u ——物距，单位 mm；

l ——传感器对角线尺寸，单位 mm；

f ——焦距，单位 mm；

N_d ——图像对角线尺寸，单位 pixel；

【条文说明】

实际计算时，也可取 l 、 N_d 分别为传感器、图像长边（或短边）的物理尺寸、像素数，从而方便计算。

4.5.8 当验证图像尺度因子不满足病害检测要求时，应通过调整拍摄距离、相机焦距或选用调整成像设备进行优化，直到符合要求。

【条文说明】

当验证图像尺度因子大于预期时，应进行参数调整。例如，可通过减小物距（即无人机与桥梁表面的距离）、增大焦距、更换尺寸更大的传感器、提高图像分辨率等方式降低图像尺度因子。

4.6 任务规划

4.6.1 任务规划应根据 3.0.6 条确定的工作模式制定。不同工作模式下的任务规划要点如表 4.6.1 所示：

表 4.6.1 不同工作模式的任务规划要点

工作模式	规划目标	主要规划内容	路径特点
全面精细化检测	获取全桥表观病害信息，建立高精度数字档案。	1. 首次检测：宜进行多轮飞行规划，可包括粗略	全覆盖、网格化路径，多角度组合。

		<p>建模、精细建模和病害详查的路径。</p> <p>2. 重复性检测： 规划高精度航线复飞，确保数据可比性。</p>	
重点构件检测	详查特定构件或已知病害区域的状况。	针对目标区域进行多角度、多距离的抵近观测路径规划。	环绕、往复等非标准化、定制化路径。
快速巡视检查	快速发现桥梁宏观、严重、突发性病害。	规划沿桥梁主线、关键部位的快速巡视路径，可不进行全覆盖。	沿主线的“一”字形路径，飞行速度较快。

【条文说明】

本条是任务规划的核心指导条款。任务规划是将检测目标转化为具体飞行执行方案的关键步骤，其策略和复杂程度直接取决于 3.0.6 条定义的三种工作模式。表 4.6.1 系统地总结了不同模式下任务规划的核心要点。

①全面精细化检测：这是规划最为复杂的模式，其目标是为桥梁建立一份完整的“数字病历”。首次检测时，在没有历史数据的情况下，规划的核心是如何从零开始最高效地获取最全面的数据。此时，可参考采用先进的多轮飞行策略。例如：

第一轮（粗略建模）：进行高空、大范围的飞行，快速生成一个粗略三维模型，主要用于后续精细化航线的自动规划和全局避障。若已有桥梁 BIM 等模型，此轮可省略。

第二轮（精细建模与普查）：基于粗略模型，自动规划出贴近构件表面的、全覆盖的安全航线，进行数据采集。此轮成果用于建立精细三维模型，并检出较大面积的表现病害。

第三轮（详查）：针对关键部位或第二轮发现的疑似区域，进行抵近、多角度的详查，以获取超高分辨率图像用于微小病害分析。

重复性检测时，在已有数字档案的基础上，规划的核心是高精度地复现基准航线，以保证数据的时序可比性，从而实现对病害发展的量化分析。

②重点构件检测：此模式规划的核心是“聚焦”。路径设计完全服务于“看清、看透”特定目标（如一个索夹、一条焊缝、一个支座）的目的。因此，路径通常是非标准化的，需要根据目标的几何形状和观测需求进行专门定制，往往需要经验丰富的飞手进行手动或半自动的组合飞行。

③快速巡视检查：此模式规划的核心是“效率”。为了在最短时间内完成对桥梁总体状态的评估，规划时会牺牲覆盖的全面性，只选择沿桥梁主线、墩台等关键位置的路径，飞行速度也相对较快，旨在快速发现如断裂、严重错位、大型挂落物等宏观、突发性的安全隐患。

4.6.2 规划飞行路径时，应根据构件表面几何形状合理选择路径形式。对于大面积平整表面，宜采用网格化的“Z”字形或“一”字形路径；对于复杂或圆形构件，可采用环绕式路径。

4.6.3 对于图像采集任务，任务规划中应明确航向和旁向的重叠率。为保证三维重建质量，航向重叠率不宜低于 60%，旁向重叠率不宜低于 50%。在结构复杂、高差变化大的区域，航向和旁向重叠率均宜提高至 70%~80%。

【条文说明】

无人机图像采集过程中，相邻 2 张图像中重叠区域占总图像区域面积的比例称为重叠率，一般分为航向重叠率和旁向重叠率。航向重叠率为无人机在同一条航线上作业时，采集的相邻图像的重叠率；旁向重叠率为无人机在相邻航线上作业时，拍摄的图像重叠率。

一般巡检无人机在进行常规平面航线时，可在设定航线时设定重叠率并自动计算航线，也可以通过下列计算公式进行计算相邻图像拍摄距离：

$$d = (1 - \pi) \times \frac{D \times l_x}{f} \quad (6.7.2)$$

式中，

d —— 相邻图像拍摄距离；

π —— 重叠率；

D —— 测量距离；

l_x —— 感光元件在航向方向的长度；

f —— 镜头焦距。

4.6.4 对于重复性巡检任务，应将首次检测时验证有效的飞行航线进行固化，作

为后续检测的基准航线。

4.7 应急预案

4.7.1 检测方案中应包含全面的应急预案，确定如出现因安全风险、事故及其他突发状况必须中止检测任务的情况时的处理方法。

【条文说明】

应急预案所针对的情况主要包括三类，第一类为安全风险，即因天气变化等原因检测任务风险增大，易产生各种检测事故时的处理方法；第二类为事故，即检测事故已经发生时的处理方法；第三类为其他突发状况，如空域临时管制时的处理方法。

4.7.2 当检测过程中出现新的安全风险时，应暂时停止检测工作，快速评估安全风险的持续时间、对检测的影响程度等因素。如安全风险影响较大，应立即停止检测工作，操控无人机进入安全空域进行返航或就地应急降落；如安全风险可控，则应灵活调整检测方案，在保证安全的情况下谨慎开展检测工作。

【条文说明】

如因天气变化原因产生新的安全风险，应首先评估无人机平台的飞行安全，出现如降雨、降雪、冰雹等天气，或实时风速超过飞行安全风速时，应立即停止检测工作，安全降落无人机；出现其他可能影响安全的天气变化时，应调整检测方案和检测参数，谨慎开展检测工作。如在检测过程中发现前期踏勘未发现的其他隐患，则应先暂停检测工作，确认是否可以排除隐患或改变检测路线，确认安全后继续检测工作。

4.7.3 当检测过程中出现事故时，应首先确认事故现场安全状况，保证人员安全，并由专业安全人员处理事故现场；在确认不会出现起火等情况时方可靠近事故无人机，评估损坏情况，并进行回收等工作。

4.7.4 因各种原因停止检测工作时，应妥善保存检测数据，记录检测进度，以备重新检测时参考。重新开始检测任务时，如相隔时间不长，桥梁未有新明显损害且检测环境相似时，可从上一次检测进度继续检测任务；其他情况下，宜重新从头开始检测任务，上一次检测任务的留存数据可作为开展检测工作时的参考。

4.7.5 因各种原因停止检测工作时，应同时记录造成检测工作停止的原因，在下次检测时应制定相应的预案，保证后续检测的正常进行。

征求意见稿

5 数据采集

5.1 一般规定

5.1.1 公路桥梁无人机智能化检测应根据检测需求、工程资料和现场踏勘情况等，设计合理的数据采集方案，确保数据的有效、完整。

【条文说明】

桥梁无人机检测是一种高效的桥梁检查方式，主要通过无人机配备的高清摄像头和其他传感器，对桥梁的结构完整性和安全状况进行评估。在进行桥梁无人机检测时，设计合理的数据采集方案是确保检测有效性和数据完整性的关键。

5.1.2 数据采集的范围、内容和精度应根据 3.0.6 条确定的工作模式进行，并应满足其对应的要求：

1 全面精细化检测：应进行全覆盖数据采集，成果应能支持建立精细三维模型，并能清晰表达结构表面的各类表观病害；

2 重点构件检测：应针对特定构件或区域进行多角度、高精度的详查，数据应能清晰表达目标部位的细微特征，可不进行整体三维建模；

3 快速巡视检查：可仅对桥梁关键受力部位和宏观状态进行数据采集，数据应能反映出明显的、严重的病害或异常情况。

【条文说明】

本条是数据采集的核心要求，它将采集策略与检测目标直接挂钩。

全面精细化检测的目标是“数字建档”，因此要求数据具有全面性和高精度，是三类模式中要求最高的。

重点构件检测的目标是“局部详查”，如同“内窥镜”，要求在局部区域看得最清、最细，但无需顾及全局。

快速巡视检查的目标是“快速筛查”，如同“望远镜”，要求快速发现大问题，允许牺牲细节和全面性。

5.1.3 桥梁无人机检测时，应及时记录天气、风速、温度等外部环境条件，以便后续分析时考虑环境因素的影响。

【条文说明】

环境条件会显著影响无人机的飞行稳定性和数据采集质量。记录检测时的环境条件有助于分析数据时考虑到环境因素的实际影响，帮助评估数据的可靠性和精确度，确保后续分析和决策的准确性，帮助改进未来的检测计划和飞行策略，以适应各种复杂的外部环境，保证无人机检测工作的高效和安全。

5.1.4 检测后应及时进行数据备份并记录时间和位置。

【条文说明】

及时的数据备份是确保数据安全、完整并便于追溯的关键措施，有助于保护关键的监测数据免受丢失或损坏，提高数据管理的效率和可靠性，为桥梁维护和安全评估提供信息支持。

5.1.5 桥梁无人机检测应根据检测的目的选择设备种类与采集部位，所选设备应具有产品合格证。

【条文说明】

桥梁无人机检测是在役桥梁养护管理体系的重要部分，应选择具有基本产品合格证的设备进行采集。

5.1.6 对于有定检需求的桥梁，应进行无人机飞行路线固化，并采集固化路线后需要的无人机姿态与定位等数据。

5.2 多源数据采集要求

5.2.1 可见光数字图像采集应满足以下要求：

- 1 应标定相机及镜头的基本参数，包括主点坐标、主距、镜头内参矩阵等；
- 2 采用双目或多目相机时，宜在使用前标定单目成像参数、相机间的相对位置关系；
- 3 采集应在光照适宜的时间进行，且应避免逆光拍摄，防止因过亮或过暗影响图像质量；
- 4 应根据现场光照情况调整快门速度、光圈值等参数，既保证无人机在悬停抖动的情况下拍摄的照片符合运动模糊度的要求，又确保图像明亮程度满足后续处理需求；
- 5 采集中宜保持镜头正对目标部位，以提高数字图像中有效像素的数量；
- 6 影像的重叠率应满足 4.6.5 条的要求，以保证三维重建的成功率；
- 7 采集中宜设置合适的标定点或参考物，以便测量和分析。

【条文说明】

相机、镜头参数将影响图像的分辨率和畸变，光照条件将极大影响成像的质量，从而影响检测的精度；无人机悬停拍摄时必然存在一定的振动，快门时间应保证图像足够明亮又不会模糊；足够的图像重叠率是三维重建成功的关键。

5.2.2 红外图像采集应满足以下要求：

- 1 采集前应校准红外摄像头，确保读数准确、图像清晰；
- 2 应选择合适的天气条件进行采集，避免极端温差、强日照辐射等影响成像效果；
- 3 应根据现场光照情况调整拍摄参数，保证采集的数据有效可用；
- 4 可使用红外滤镜去除背景热辐射，提高成像清晰度；
- 5 应对红外图像数据做好实时标注与整理工作，以防图像特征过少或难以辨认导致无法将其与实际场景匹配。

【条文说明】

无人机在桥梁检测中采集红外图像主要利用红外摄像头捕捉桥梁表面和结构的热分布，有效识别因损伤或结构缺陷导致的热异常区域，检测到桥梁表面不易察觉的裂缝、水分渗透、腐蚀或内部空洞等问题，在夜间或低温环境中尤为有效。校准红外摄像头是确保图像读数准确和清晰度的基础；极端的温度和辐射会影响成像质量；实时标注和整理能防止因特征不明确而影响后续的分析和使用。

5.2.3 点云数据采集应满足以下要求：

- 1 应根据现场情况与检测方案选择点云密度和探测距离适宜的雷达；
- 2 飞行路径宜使得采集点云形成闭环，计算闭合误差以评价定位的准确度；
- 3 应控制无人机与待测桥梁结构距离适中，确保激光束能够密集地接收场景的几何特征；
- 4 可结合可见光摄像头等其他传感器辅助采集，为点云数据的理解与分析提供额外的视觉信息；
- 5 采集后应及时检查数据情况，确保所采集点云完整覆盖目标部位，避免缺失或遮挡影响数据可用性。

【条文说明】

点云采集通常依赖定位技术将不同时刻采集的点云帧进行拼接获得整体的

点云，闭合误差是评价定位精度的重要指标；无人机与待测桥梁的距离应在雷达的探测范围内，以保证点云有足够的密度和精度；采集中，障碍物遮挡会影响点云的完整性，因此有必要在采集后及时检查数据是否完整可用。

5.3 关键部位采集要求

5.3.1 梁体的数据采集应根据其结构形式制定专项方案，并应满足下列要求：

- 1 对于混凝土箱梁、T 梁等实体梁，应符合：
 - a) 梁侧：当单次拍摄视场可完整覆盖梁高时，可沿梁纵向采用“一”字形路径；当无法完整覆盖时，应采用“Z”字形路径；
 - b) 梁底：宜沿桥梁横向采用“Z”字形路径，并确保 GNSS 信号丢失后，有可靠的替代定位方式；
 - c) 弱光区域：对于梁底、箱梁内侧等光照不足区域，宜配备并使用补光设备；
 - d) 关键部位：对于节段接缝、支座连接区域等部位，应进行多角度的补充拍摄。
- 2 对于钢桁梁或混凝土桁架梁，应符合：
 - a) 杆件：应对主要受力的弦杆和腹杆，沿其轴线方向进行往复飞行拍摄，确保杆件的四个主要检查面数据采集完整；
 - b) 节点：应对所有或关键的环节，进行多角度、环绕式的抵近拍摄，重点检查焊缝、螺栓连接区域；
 - c) 飞行安全：在桁架内外飞行时，必须采用高精度定位与控制方式，降低飞行速度，并宜使用具备全向避障或带防护罩的无人机；
 - d) 涂层反光：对于表面光滑的钢结构涂层，应调整拍摄角度或使用偏振镜，以减小反光对图像质量的影响。

5.3.2 墩柱数据采集应满足下列要求：

- 1 墩柱数据采集时应合理规划飞行路线，避开地面或水面附近设施及交通，防止发生碰撞，对靠近地面或水面的部位进行的检查应在保证安全的前提下进行；
- 2 墩柱检测时应对每一表面进行“Z”字形检测；对于棱角处，应额外采集索塔总数据量 10%-20% 的数据，沿“一”字形路线进行检测；

3 墩柱检测应辅以补光设备以弥补光线较弱且不均匀的不足。

【条文说明】

墩柱的形状和结构可能较为复杂，需确保无人机能够从多个视角进行全面的拍摄和数据采集，同时避免与桥梁结构或地面设施发生碰撞。

5.3.3 对斜拉桥和悬索桥，应针对索塔进行数据采集，并满足下列要求：

- 1** 索塔检测时应暂停附近车道交通流，以保证人员和设施安全；
- 2** 索塔高处受风力影响较大，索塔数据采集应避开大风、降水等天气；
- 3** 索塔检测时应对每一表面沿“Z”字形路线进行检测，对于索塔棱角处应额外采集索塔总数据量 10%-20%的数据，沿“一”字形路线进行检测；
- 4** 索塔的顶端和各侧面的光照强度通常不均匀，宜采用高动态范围的相机进行采集；
- 5** 对索塔的连接、锚固和其他细部结构，应额外采集索塔总数据量 10%-20%的数据；
- 6** 采集索塔数据时应远离塔身和缆索，确保良好的飞行控制以防止碰撞，并采用较高的采集频率防止晃动影响数据质量；

【条文说明】

索塔检测通常需要无人机飞行到较高的高度，可能会影响下方的交通安全，因此有必要采取一定的交通管控；应重点关注索塔棱角、连接、锚固等薄弱部位，额外采集数据确保检测的准确。

5.3.4 对斜拉桥和悬索桥，应针对缆索进行数据采集，并满足下列要求：

- 1** 缆索检测时，无人机应从桥跨内侧与外侧对每根缆索进行“一”字形检测，并额外在缆索呈 45°角的拍摄方向进行“一”字形检测，以保证缆索信息完整；
- 2** 在桥跨内侧对缆索进行无人机检查时应暂停附近车道交通流，以保证人员和设施安全；
- 3** 对缆索进行可见光数字图像采集时，应确保图像能分辨出 0.1mm 的病害；
- 4** 对于缆索与桥梁以及锚固结构的连接点，应额外采集缆索总数据量 10%-20%的数据。

【条文说明】

缆索检测通常需要无人机飞行到较高的高度，可能会影响下方的交通安全，

因此有必要采取一定的交通管控；缆索的损伤可能非常微小，如细小的裂纹或腐蚀点，需要高分辨率的摄像系统，以确保能捕捉到足够的细节；应重点关注缆索与桥梁及锚固的连接点等薄弱部位，额外采集数据确保检测的准确。

5.3.5 支座数据采集应满足下列要求：

1 支座检测时，无人机对每个支座应从至少四个方向进行采集，确保采集数据覆盖支座的各个表面；

2 应合理规划飞行路线，保证足够的安全距离，避免无人机与梁体或墩柱发生碰撞；

3 应通过合理的定位设备保证定位模块正常工作，并辅以补光设备以弥补光线偏暗的不足。

【条文说明】

支座处空间狭窄，支座检测对无人机的飞行控制有较高要求，应在保证安全距离的前提下进行采集，防止碰撞对无人机和桥梁造成损伤；梁下通常光照昏暗且定位信号弱，对无人机的安全飞行造成一定影响，有必要采取措施保障操作安全性与数据采集质量。

5.3.6 伸缩缝装置的数据采集应满足下列要求：

1 应从桥面上方、桥面侧下方等多个视角对伸缩缝进行往复飞行拍摄，确保获取其全貌及与梁、台的连接状态；

2 应对伸缩缝两侧的锚固区混凝土进行重点、抵近拍摄，以识别混凝土的破损、开裂等病害；

3 应对型钢、齿板等外露金属构件进行清晰成像，以检查其变形、断裂、锈蚀及连接螺栓的状态；

4 采集数据时应注意避让过往车辆，必要时应采取临时交通管控措施。

【条文说明】

伸缩缝是桥梁结构中的薄弱环节，其工作状态直接影响行车舒适性和结构耐久性。无人机检测的优势在于能从多个传统手段难以达到的角度（如桥面侧下方）进行观测。采集的重点是伸缩缝本体及其与主梁、桥台的连接区域，尤其是锚固区混凝土的完好性，这是伸缩缝最常见的病害部位之一。由于伸缩缝位于行车道上，作业时必须高度关注交通安全。

5.3.7 桥台的数据采集应满足下列要求：

1 应对桥台的台身正面、两个侧面以及翼墙表面进行全覆盖的“Z”字形路径拍摄；

2 应对台帽、耳背墙等顶部结构进行重点拍摄，检查其混凝土状况及与梁体的间隙；

3 应对桥台周边的锥坡、护坡等附属结构进行数据采集，以识别水毁、冲刷、滑塌等病害；

4 对于台身表面的渗水、析白等水迹病害，宜在雨后或特征最明显的时间段进行拍摄。

【条文说明】

桥台是连接桥梁与路基的关键结构。无人机可以安全、高效地对高大桥台的各个立面进行数据采集，这是其相较于人工检测的显著优势。除了台身和翼墙的结构性病害，无人机还能便捷地获取锥坡、护坡等区域的影像，有助于综合判断桥头区域的整体稳定性，如是否存在桥头跳车等问题的外部迹象。对于与水相关的病害，选择合适的拍摄时机（如雨后）能使病害特征更明显，提高检出率。

6 数据处理

6.1 一般规定

6.1.1 数据处理的内容和深度应与 3.0.6 条确定的工作模式相匹配。根据检测目标，数据处理可部分或全部包括下列内容：

1 三维模型建立：适用于全面精细化检测，或需要通过模型进行病害定位的场景；

2 病害检出：适用于所有工作模式，检出的病害类型和精度要求应与任务目标一致；

3 病害参数量化：适用于需要对病害尺寸、数量等进行定量评估的全面精细化检测和重点构件检测；

4 病害定位：适用于需要明确病害空间位置的场景，其实现方式可按 6.5 节的规定执行。

6.1.2 数据处理流程关注的病害种类应与桥梁类型相关，包括但不限于混凝土裂缝、钢结构裂缝、混凝土剥落、露筋、钢结构锈蚀、螺栓脱落、缆索防护破损等。

6.1.3 在对检测原始数据进行算法自动处理时，其准确度应满足本规程 7.0.4 条目的准确度验证要求。

6.2 三维模型建立

6.2.1 宜基于检测原始数据建立桥梁的三维模型或取得已有的三维模型，用于展示检测范围及实施病害定位。

6.2.2 获取可见光数字图像数据时，可基于多视角几何方法进行三维重建，生成桥梁表面模型。该过程宜按照图 6.2.2 的流程进行：

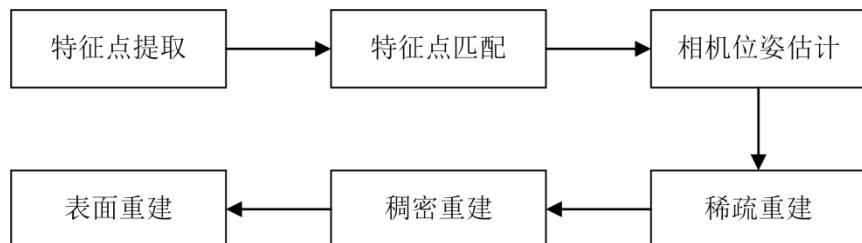


图 6.2.2 多视角几何方法三维重建流程

【条文说明】

在基于多视角几何三维重建方法中，输入数据为经预处理后的图像。数据依次经过特征点提取、特征点匹配、相机位姿估计、稀疏重建、稠密重建以及表面重建等流程，输出目标桥梁的三维点云模型以及表面模型。其中，各个步骤的具体作用如下：

特征点提取：使用算法自动提取图像中的特征点；

特征点匹配：比对并匹配不同视角图像中的特征点，建立不同视角图像之间的几何关系；

相机位姿估计：基于特征点匹配结果，估计相机在各个视角下的拍摄位置与姿态；

稀疏重建：利用相机位姿估计结果，生成稀疏点云数据，初步重建桥梁的三维结构；

稠密重建：通过密集匹配算法，生成高精度的稠密点云数据，增强细节表现；

表面重建：生成连续且平滑的桥梁三维表面模型。

6.2.3 采用多视角几何方法进行三维重建时，影像数据应完整覆盖检测目标，其重叠率应符合 4.6.5 条的规定。

6.2.4 获取激光雷达数据时，可基于同步定位与建图方法进行三维重建，生成桥梁表面模型。该过程宜按照图 6.2.4 的流程进行：

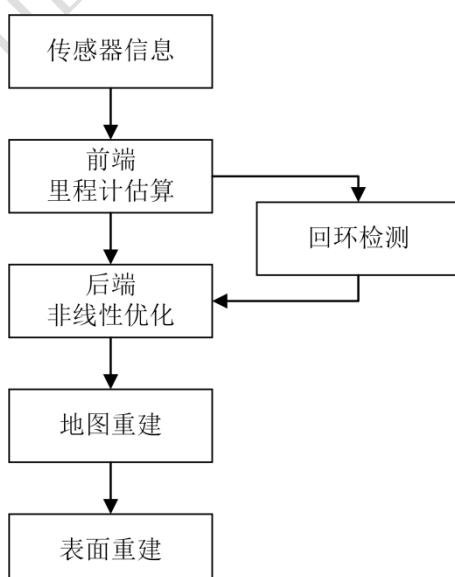


图 6.2.4 同步定位与建图方法三维重建流程

【条文说明】

在基于同步定位与建图的三维重建方法中，输入数据为激光雷达或图像帧数据。数据依次经过前端里程计估算、后端非线性优化、回环检测、地图重建和表面重建等流程，输出目标桥梁的三维点云模型以及表面模型。其中，各个步骤的具体作用如下：

前端里程计估算：通过激光雷达和惯性导航传感器，估算设备的相对运动轨迹，获取局部地图信息；

后端非线性优化：使用非线性优化算法对设备轨迹进行全局优化，减少运动过程中累积的误差；

回环检测：再次经过已扫描区域时，进行回环检测，进一步修正和优化整体运动轨迹；

地图重建：根据优化后的轨迹，将不同扫描位置的点云数据进行融合，生成完整的三维点云；

表面重建：生成连续且平滑的桥梁三维表面模型。

6.3 病害检出

6.3.1 本规程规定的病害检出方法主要适用于处理和分析无人机采集的视觉图像数据。

【条文说明】

目前，桥梁无人机病害自动检测多采用较为成熟的视觉图像检测方法，随着技术的进步可逐渐引入其他先进的检测方法。

6.3.2 病害检出方法主要分为人工检出方法、自动检出方法两类，自动检出方法包括：数字图像处理方法、机器学习分类法、深度学习方法等。在桥检工作中，应根据图像背景复杂情况与对处理流程自动化程度的要求采用适宜的病害检出方法，或将多种检出方法相结合的集成方法。

【条文说明】

深度学习方法由机器学习中人工神经网络方法发展而来，属于机器学习方法的特例，近年来的研究进展较为迅速，在结构病害检出领域取得了较好的应用效果。

6.3.3 按照检测结果的信息格式进行区分，病害自动检出方法可主要分为病害分

类方法、病害定位方法、病害像素分割方法三类。病害分类方法仅区分桥梁结构图像内是否包含某种病害，自动检出结果不包含病害的位置信息；病害定位方法以包络框等形式给出病害在桥梁结构图像中的位置信息，病害像素分割方法则通过逐像素地判定与分类，给出病害的精确位置。

【条文说明】

应根据病害检出任务的具体目标选择合适的病害检出方法。对病害位置信息无要求，需要快速判断图像是否存在病害的任务，宜选择分类方法；对病害位置信息有要求，需要定位与标记图像病害的任务，宜选择目标检测方法；对病害信息定位要求高，需要精确提取病害的任务，应选取语义分割方法。数字图像处理方法、机器学习分类法、深度学习方法分别适用于不同的任务场景，其对应关系如表 6.3.3。

表 6.3.3 各类病害自动检出算法对应的任务场景

算法	任务场景
数字图像处理方法	语义分割
机器学习分类法	图像分类
深度学习方法	图像分类、目标检测、语义分割

6.3.4 当桥梁结构表面洁净、图像背景简单、病害的几何特征较为固定时，可采用数字图像处理方法进行病害的自动检出，得到病害的二值化图像，具体流程宜按下列进行：



图 6.3.4 数字图像方法检测流程

【条文说明】

基于数字图像处理的病害识别方法主要根据灰度图中病害与背景的灰度值差异完成病害检出，常用的病害二值化方法包括阈值法、滤波法等；杂质过滤主要去除二值化过程中产生的各类噪点，常用的方法有面积阈值过滤法等。

6.3.5 对仅需检验桥梁区域是否存在病害的情况，可使用机器学习分类法进行病害的自动识别，具体流程宜按下列进行：



图 6.3.2 分类器检测方法流程

【条文说明】

有监督式分类算法的开发步骤为：（1）确定需要识别的病害类别；（2）对每类病害选取足够数量的病害图像，进行分类标注，构建训练数据集；（3）训练分类器。无监督式分类器无需制作训练集或训练分类器，但分类器输出的聚类结果不包含图像所属的类别标签信息，应对各类别图像进行人工辨别，并着重评估分类结果的准确度。

6.3.6 对于采集图像条件复杂、对病害定位算法抗干扰能力要求较高的场景，宜采用深度学习方法进行病害的自动识别。深度学习方法的基本流程包括：构建深度学习模型、建立数据集、模型训练和模型应用。

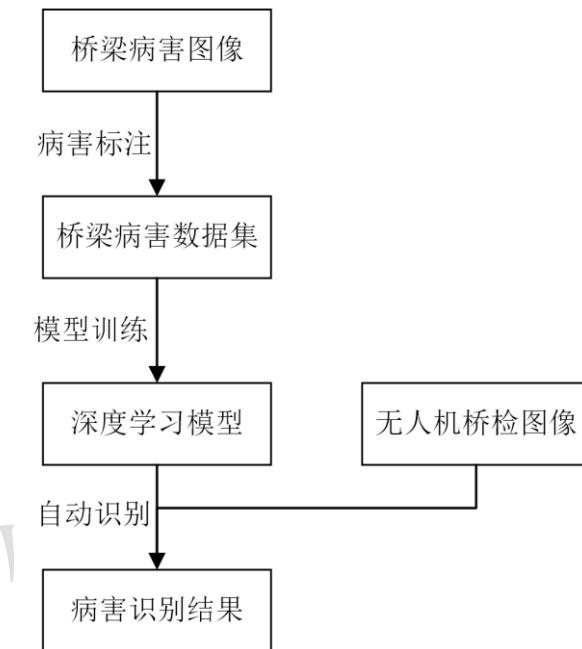


图 6.3.6 深度学习方法流程

6.3.7 深度学习方法使用的深度学习模型、数据集应满足以下要求：

1 数据集图像应来源于真实桥梁工程，且数据集中包含的每一类病害的数量应足够多且具有代表性，每类病害不应少于 200 处；

2 应根据具体的识别任务目标选择对应的深度学习模型，图像分类、目标检测、像素分割任务分别对应图像分类、目标检测、语义分割模型。

3 所选取的深度学习模型应综合考虑检测精度和检测效率，必要时可选取多个模型分别测试效果，择优选取；也可将多个模型进行结合，通过集成学习方法提升病害检出的总体准确度。

【条文说明】

目前，基于深度学习的病害检测任务中卷积神经网络的应用较多，随着技术的进步可逐渐引入其他先进的深度学习网络结构。卷积神经网络中，分类模型识别图像中包含的病害类型，对应分类任务，常用的模型有 MobileNet、GoogleNet、ResNet 等；目标检测模型以包络框的方式标记图像中的病害区域，对应目标检测任务，常用的检测模型有 R-CNN、YOLO 等；语义分割模型提取病害所在的像素位置，对应病害分割任务，常用的分割模型有 FCN、Unet、DeepLab 等。

6.3.8 对于各种病害自动检出算法，应进行算法的准确度验证，以保证病害自动识别结果的可靠性。在进行准确度验证时，应随机选取 5%-10% 的图像进行病害的人工标记，将人工标记结果与自动识别结果对比并计算识别准确度。

6.3.9 对于具有特殊图像特征的大型桥梁，当一般的深度学习模型的病害识别准确度无法满足要求时，可针对该桥梁开发专用的病害识别模型，以提升模型的识别准确度。

6.4 病害参数量化

6.4.1 病害量化可用的参数指标包括但不限于：病害面积、裂缝长度、裂缝宽度、病害点位数量等。对于常见的病害种类，宜采用的参数指标如下表：

表 6.4.1 几个常见病害类别宜采用的参数指标

病害类别	宜采用的参数指标
混凝土剥落、漏筋、钢结构锈蚀	病害面积 (m ²)
混凝土裂缝、钢结构裂纹	裂缝长度 (mm)、裂缝最大/平均宽度 (mm)
螺栓/铆钉脱落	脱落数量 (个)
杆件弯曲变形	最大变形值/变形矢高 (mm)

6.4.2 需要进行基于长度、宽度、面积等几何尺寸的病害参数量化时，应以病害分割得到的病害分布二值化图像为依据；需要进行病害点位数量的参数量化时，宜采用病害识别得到的目标检测结果数据。

6.4.3 拍摄距离较远、设备条件受限导致图像像素精度无法满足参数量化的准确度要求时，可在进行病害分割之前首先进行图像超分辨率重建，提升图像的像素精度。

【条文说明】

图像超分重建可采用最近邻插值、双线性插值等基于像素插值的数字图像方法，也可使用深度学习方法。

6.4.4 在对裂缝长度、宽度进行参数量化时，可根据裂缝二值化图像提取出裂缝骨架线与裂缝边界，以便于裂缝的几何尺寸计算。

6.4.5 出现多条裂缝相互交叉或裂缝分支的情况时，宜首先逐一拆解出单条裂缝的骨架线，再针对每一条单一裂缝进行参数量化。

6.4.6 计算裂缝宽度时，可选择裂缝平均宽度或最大裂缝宽度作为宽度参数，应根据病害检测的实际需求进行选择。两种裂缝宽度的计算方法如下：

1 病害平均宽度应按式(6.4.6)进行计算：

$$W_{c,m} = \frac{S_c}{L_c} \quad (8.4.6)$$

式中，

$W_{c,m}$ —— 裂缝平均宽度；

S_c —— 裂缝面积，通过计算二值化后的裂缝像素面积进行换算；

L_c —— 裂缝长度。

2 计算裂缝最大宽度时，应在裂缝骨架线上等间距取一系列宽度测点，逐一计算每个测点位置的裂缝宽度，取各测点的计算最大值。单个测点位置的裂缝宽度可按以下方式计算：根据测点与骨架线临近点的坐标计算骨架线在测点位置的走向；作出测点处骨架走向线的垂线，与裂缝边缘的交点为裂缝宽度参考点；计算两参考点间距，作为该测点的裂缝宽度。

6.5 病害定位

6.5.1 应对检测出的病害在桥梁结构上进行空间定位。定位结果应能以三维坐标或其他明确的方式表示。

6.5.2 实现病害空间定位，应具备下列一项或多项基本条件，并建立二维影像与三维空间之间的几何映射关系：

1 桥梁结构的三维数字模型：可为高精度点云、网格模型或 BIM 模型；

2 病害影像采集时的相机精确位姿：包括无人机在全局坐标系下的位置和姿态；

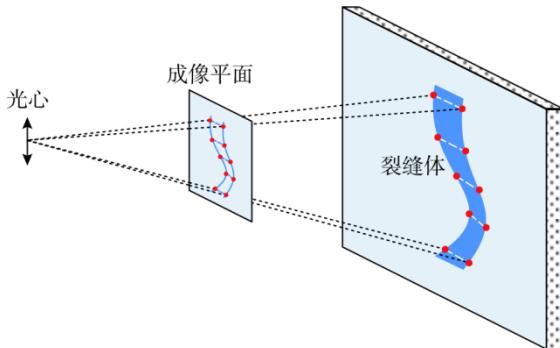
3 从无人机到病害点的直接测距信息：可通过机载激光测距仪获取。

【条文说明】

本条规定了实现病害定位所需的核心技术要素。任何有效的定位方法，都是对这些基本要素的综合运用。根据所依赖的要素不同，形成了不同的技术路径。例如：

示例一：基于模型的投影定位法。此方法主要综合运用第 1 款（三维模型）和第 2 款（相机位姿）的条件。通过已知的相机位姿，将二维影像中的病害点反向投影为空间射线，求解其与三维模型的交点，从而得到病害的三维坐标。

这是目前主流且可视化效果好的方法。如下图所示：



示例二：基于直接测量的定位法。此方法主要综合运用第 2 款（相机位姿）和第 3 款（直接测距）的条件。它无需三维模型，通过无人机实时的高精度位姿和激光测距仪测得的视线方向距离，直接通过空间坐标变换解算出病害点的三维坐标。此方法流程简单，适用于快速定位。

除上述示例外，任何能够建立可靠几何映射关系的方法，如基于多影像前方交会的摄影测量方法等，均可采用。

6.5.3 病害的物理尺寸可通过其空间定位点之间的几何关系计算得到。定位成果应记录病害的空间坐标或其在结构上的相对位置。

7 成果质量评价

7.0.1 应对桥梁无人机检测每阶段的成果进行评价与筛选，结果不满足要求时应重新实施对应的检测流程。

7.0.2 图像原始数据应满足下列要求：

- 1** 图像清晰，无明显模糊、噪点或变形；
- 2** 图像的色彩和光照条件均匀，无过度曝光或阴影遮挡；
- 3** 图像尺度因子的计算值不应大于任务设定值。

7.0.3 点云成果数据应满足下列要求：

- 1** 表征结构表面的点云厚度不应大于 5 cm；
- 2** 点云数据的平均尺度误差的绝对值不应大于 0.5%。

【条文说明】

理论上讲，表征结构表面的点云厚度应该接近于 0。实际检测工作中，受到设备精度、算法精度的影响，点云模型中的表面可能会存在一定的厚度，属于正常现象。本条规定了点云厚度的限值，从而避免产生误差过大的点云成果数据。

点云数据的尺度误差是指，相同物体的真实尺寸与点云中测量尺寸之间的误差。宜选取多个代表性尺寸（例如桥梁跨度、主梁高度、桥墩直径等），计算误差后取平均，得到平均尺度误差。

7.0.4 病害识别成果应按照本条文说明中的方法进行算法准确度的验证。不同目标任务的检测准确度应分别满足下列要求：

- 1** 图像分类任务：每一类病害的 F1-score 均应大于 85%；
- 2** 目标检测任务：每一类病害的 AP 值均应大于 65%；
- 3** 语义分割任务：每一类病害的 IoU 均应大于 60%。

【条文说明】

1 图像分类任务宜采用 F1-score 作为准确度指标，其计算方法为：
(a) 首先，将自动分类结果与人工分类的正确结果进行对照。出现自动分类算法判定图像包含某类病害、该图像确包含该类病害的情况，记为一次真阳性识别（正确识别）；出现算法判定图像包含某类病害、该图像实际上未包含

该类病害的情况，记为一次假阳性识别（病害误判）；出现算法判定图像未包含某类病害、该图像实际上包含该类病害的情况，记为一次假阴性识别（病害漏判）。

(b) 对每一类目标识别病害，统计该病害类别对应的真阳性、假阳性、假阴性出现次数，对病害类别 i 分别记为 $TP(i)$ 、 $FP(i)$ 、 $FN(i)$ ；使用如下公式计算该类别的分类准确率：

$$F1 - score(i) = \frac{TP(i)}{TP(i) + FP(i) + FN(i)} \quad (9.0.4-1)$$

2 目标检测任务宜采用 AP 值作为准确度指标，其计算方法为：

(a) 首先，将自动检测与人工标记的正确结果进行对照。出现自动分类算法识别到某类病害、并存在一处人工标记的病害与之相符的情况，记为一次真阳性识别（正确识别）；出现算法识别出某类病害、但不存在人工标记的病害与之对应的情况，记为一次假阳性识别（病害误判）；出现人工标记出某类病害、但不存在自动识别的病害与之对应的情况，记为一次假阴性识别（病害漏判）。

(b) 应使用 IoU 阈值方法判定自动识别结果与人工标记结果是否匹配。取自动识别标注框与人工标注框的交集，面积记为 S_I ；取两个识别框的并集，面积记为 S_U ；可使用以下公式计算二者之间的 IoU 值：

$$IoU = S_I / S_U \quad (9.0.4-2)$$

IoU 值高于预先设定的阈值（该阈值宜取为 0.5-0.6 之间的固定值）时，认为二者匹配，否则认为二者不匹配。

(c) 对某一类别的病害，记模型正确检测出的正样本数量为 TP (True Positives)，模型错误检测为正样本的负样本数量为 FP (False Positives)，模型未检测到的正样本数量为 FN (False Negatives)。通过调整模型的置信度阈值，可以得到一系列的 TP 、 FP 和 FN 值，进而计算出对应的一系列准确率 P (Precision) 和召回率 R (Recall)：

$$\begin{cases} P = \frac{TP}{TP + FP} \\ R = \frac{TP}{TP + FN} \end{cases} \quad (9.0.4-3)$$

将这些点绘制在 P-R 曲线上。

(d) 计算 P-R 曲线下的面积得到该类病害的自动检测 AP 值。

3 语义分割任务宜采用 IoU 作为准确度指标，其计算方法为：

(a) 对每一类病害，取预测掩码与真实掩码作对比，计算 IoU 值。确保预测掩码和真实掩码都是二值化的，其中 1 代表目标区域，0 代表背景。

(b) 计算预测掩码和真实掩码的像素级交集，即同时标记为 1 的像素点数，记为交集面积；计算预测掩码和真实掩码的像素级并集，即标记为 1 的像素点数之和，记为并集面积；将交集面积除以并集面积得到 IoU 值。

7.0.5 病害定位的位置误差不应大于 5cm。

【条文说明】

宜在所有进行定位的病害中，随机选取 5%-10% 进行误差检查。以病害真实位置的中心点为参考点，通过投影定位的病害中心不应落在以参考点为圆心、5cm 为半径的圆形之外。

7.0.6 病害参数量化计算的成果应满足下列要求：

1 病害面积的相对误差的绝对值不宜大于 40%；

2 裂缝长度值的相对误差的绝对值不宜大于 20%，宽度值的相对误差的绝对值不宜大于 40%；

3 病害点位数量的误差的绝对值不宜大于 10%；

4 检测工作宜能识别宽度不小于 0.2mm 的裂缝。

8 成果记录与表达

8.1 一般规定

8.1.1 无人机桥检应如实反映检查的结果，准确地表述待检桥梁的健康状况，避免主观臆断，做到不遗漏、不隐瞒、不夸大。

【条文说明】

无人机桥检作为一种高效、安全的桥梁检测手段，其重要作用在于客观、真实地反映桥梁的实际情况，应确保所获取的数据和信息准确无误，全面记录桥梁的各个部位和结构状况；应准确记录待检桥梁的健康状况，用专业、规范的语言描述桥梁存在的问题，不应有含糊其辞或模棱两可的表述；检测人员不应凭主观经验或看法对桥梁状况进行判断，应以无人机采集的数据为依据进行分析，从而最大程度地减少人为因素对检测结果的影响。

8.1.2 成果记录与表达应由专业人员完成，保证结果表达准确、清晰，术语使用专业、规范。

【条文说明】

成果记录与表达是无人机桥检的关键环节，直接关系到检测成果的传播、应用和评价。为确保检测成果质量、促进信息有效传递、提升桥梁安全管理水
平，无人机桥检的成果记录与表达工作应由专业人员完成。

8.1.3 桥检数据处理不同阶段的成果应整理成规范格式的成果进行提交和保存。

【条文说明】

标准化的文件管理能提高桥检工作的规范性，提高数据处理的效率，便于后续分析与回顾。文件格式的选择应遵循本规程 8.2 节的规定。

8.2 记录格式

8.2.1 无人机桥检产生的同种类型的数据，包括原始数据及各阶段成果，应以同种固定的规则进行记录。

8.2.2 数据的存储应选择广泛支持的文件格式。

【条文说明】

选择广泛支持的文件格式能提高数据的可读性、读写效率、安全性和互操

作性，减少对特定软件厂商的依赖，有助于确保数据在长期存储和跨平台使用中保持有效性和可用性。

8.2.3 对于三维点云模型，应以.ply/.pcd/.las 等格式记录。

8.2.4 对于三维网格模型，应以.ply/.obj 等格式记录。

8.2.5 对于检测中记录的时间、温度等信息，应以.json/.txt/.xml 等格式记录。

8.2.6 对于病害与三维模型的对应关系，应以.json/.txt/.xml 等格式记录。

8.2.7 对于已提取出的病害坐标信息，应以.csv/.mat/.json 等格式记录。

8.2.8 对于已提取出的病害尺寸信息，应以.csv/.mat/.json 等格式记录。

8.2.9 对于已提取出的病害图像，应以.jpg/.bmp 等格式记录。

8.3 数据存储

8.3.1 无人机桥检采集的原始数据及数据处理不同阶段的成果均应存储在安全、可追溯的系统中，包括本地服务器和云端服务器等，并宜在不同介质、不同地理位置中进行备份。

【条文说明】

将数据存储在安全且可追溯的系统中，能确保数据的完整性和长期可用性。利用本地服务器和云端服务器进行双重存储，本地服务器提供快速访问和控制，云端服务器提供数据的冗余备份和灾难恢复能力。这样的存储方案可以对数据的安全性进行严格管理，以及通过日志记录和版本控制等措施实现数据的可追溯性。

8.3.2 存储系统应设置加密功能，确保只有授权人员可以访问。

【条文说明】

为了保护无人机桥梁检查中采集的敏感数据，存储系统应配置加密功能，以确保数据在存储和传输过程中免受未授权访问的威胁。只有经过认证的授权人员才能获得访问密钥或凭证，从而解密这些数据并进行查看或操作，保障了数据的机密性和完整性，降低数据泄露或滥用的风险。

8.3.3 应定期评估数据存储需求及存储容量的使用情况，及时扩展存储能力。

【条文说明】

在无人机桥检系统长期运行的过程中，随着数据采集和处理量的不断增加，存储需求可能会超出初始预计，定期审查当前存储容量的使用情况可以帮助识

别潜在的不足和瓶颈。在评估过程中，应分析数据增长趋势，预测未来的存储需求。存储容量接近上限时应及时扩展存储能力，确保了存储资源随时可用，避免存储不足导致的潜在数据丢失或者系统崩溃。

8.3.4 应定期进行数据访问和使用的审查，以识别和响应不当访问或潜在的数据泄漏风险。

【条文说明】

定期进行数据访问和使用的审查是确保无人机桥梁检查数据安全的重要措施。审查旨在监控和评估数据访问与使用的规范性，及时发现任何未授权的访问尝试或可疑活动，从而采取必要措施，保护数据的机密性和完整性。同时，审查数据使用情况也能揭示是否存在潜在的数据泄露风险，包括过期的访问权限、冗余的数据存储和不合规的数据处理流程，防止更严重的安全事件发生，确保数据管理符合规定，进一步增强组织对数据安全的整体防范能力。

8.4 成果输出

8.4.1 输出的标准成果文件应包含病害坐标、病害图像、病害尺寸等信息，成果的详细程度和形式应与 3.0.6 条确定的工作模式相适应：

1 全面精细化检测：宜提交带病害信息标注的精细三维模型及完整的病害清单；

2 重点构件检测：应提交目标区域的多角度高分辨率影像集、病害详图及量化结果；

3 快速巡视检查：可提交带位置描述的巡视影像（或视频）简报及重大病害汇总表。

【条文说明】

输出的标准成果文件旨在提供一套完整的桥梁检测资料，应全面而详尽地反映待检测桥梁的状态。三维模型提供桥梁的布局和设计，病害坐标便于后续的跟踪和维护，病害图像帮助相关人员快速识别问题，病害尺寸信息提供关于病害严重程度的定量数据，为评估桥梁状态与撰写检测报告提供数据支持。

8.4.2 输出的成果应具备良好的数据开放性和兼容性。当业主或管理单位已有桥梁信息模型（BIM）或三维运维平台时，输出的病害成果宜具备向目标平台进行迁移和集成的能力。

8.4.3 实现病害成果向 BIM 或三维运维平台的迁移，应满足下列条件：

1 坐标系对齐：应确保无人机检测成果的坐标系与目标平台的坐标系保持一致或存在明确的转换关系。可在外业数据采集时，联测目标平台坐标系下的控制点；

2 数据格式兼容：输出的病害模型、参数等数据，宜采用目标平台支持或兼容的开放性数据格式（如 IFC、CityGML、JSON 等）；

3 属性信息挂接：迁移后的病害信息应能作为独立的、带属性的对象，挂接在 BIM 模型的相应构件上，并包含病害类型、尺寸、图像、检测日期等关键属性。

8.4.3 每次检测结果应形成正式检测报告，包括但不限于检测的基本情况、图像资料、检测结果、结果分析、养护建议等，并做到清晰易读、专业严谨。

【条文说明】

每次无人机桥梁检测的结果都应形成一份正式的检测报告，记录检测情况、关键数据、发现的问题及相关分析，并提供有关桥梁的健康状况和潜在问题的清晰、准确的信息，为后续的维护、修复工作提供依据。

8.4.4 检测成果应进行系统性归档，并长期保存。归档资料除包括最终的检测报告外，还应至少包含下列内容：

1 原始数据：所有采集的原始影像、视频、激光点云数据，以及无人机的飞行日志文件（含 POS 数据）；

2 过程文件：检测方案、外业记录、相机标定参数、生成的三维模型文件等；

3 结果数据：病害识别和量化的详细清单、病害影像集、病害定位信息文件等；

4 成果交付物：交付给委托方的所有电子和纸质文件。

附录 A 无人机平台操作

A.1 一般规定

A.1.1 进行桥梁无人机检测作业及其他相关工作，必须遵守《中华人民共和国民用航空法》《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》（国令第 761 号）《民用无人驾驶航空器运行安全管理规则》（CCAR-92）及其他相关法律法规要求。

A.1.2 无人机平台运行与维护应符合中国民用航空局《民用无人驾驶航空器系统空中交通管理办法》（MD-TM-2016-004）和《轻小无人机运行规定》（AC-91-FS-2015-31）的相关规定。

A.1.3 操作无人机时不得危及他人的生命财产安全。

A.1.4 下列情况下无人机驾驶员不应驾驶无人机：

1 在饮用任何含酒精的液体之后的 8h 之内或处于酒精作用之下；

2 受到任何药物影响，其工作能力对飞行安全造成影响时。

A.1.5 无人机平台开始运行前，应该制定相应的飞行方案和应急预案，包括：

1 检查无人机及其携带设备；

2 无人机航线；

3 无人机安全应急处理预案。

A.1.6 无人机作业人员应按照使用说明书要求的技术参数运行无人机平台。

【条文说明】

无人机平台出厂时均有使用说明书，详细地介绍了无人机的技术参数。不同的无人机机型技术参数有很大差异，无人机平台应按照例如工作环境温度、最大可抗风速、有效使用环境等技术参数的要求飞行。

A.1.7 无人机平台运行时，应符合下列规定：

1 无人机平台应在隔离空域内飞行，在限飞区飞行应遵守相应的限制规定，严禁在禁飞区飞行；

2 无人机平台应在昼间飞行，并按照所需检测对象的环境照度要求选择飞行时间段；

3 无人机平台宜在良好的气象条件下运行。

A.2 设备与人员要求

A.2.1 实施无人机机外载荷作业飞行的无人机应满足下列要求，如对无人机系统进行改装的，也应符合有关强制性国家标准：

- 1 应满足民航局的要求并通过型号合格审定；
- 2 应持有有效的适航证；
- 3 应具备无人机与载荷组合手册。

【条文说明】

根据以往操作经验和调查，无人机距离被测物体太近，信号易受到其干扰，引起操作失灵，或者操作稍有不慎，会发生撞击事故。为防止发生碰撞，应尽量保证距离检测对象 0.5m 以上。

A.2.2 实施无人机机外载荷作业飞行的驾驶员，应熟练掌握有关机型操作方法，了解风险警示信息和有关管理制度，具备操控无人机安全飞行的条件，并根据其所操控的无人机类别向国务院民用航空主管部门申请取得相应民用无人驾驶航空器操控员执照，并持证飞行。

A.2.3 实施无人机机外载荷作业飞行的驾驶员应做好接受飞行操作检查的准备。

A.2.4 实施无人机机外载荷作业飞行的驾驶员，应持有按中国民用航空规章《民用航空人员体检合格证管理规则》颁发的有效体检合格证，并且在行使驾驶员执照权利时随身携带该合格证。

A.3 气象要求

A.3.1 无人机应在机型使用说明限定的气象条件下运行。

A.3.2 下列气象条件下，严禁驾驶无人机：

- 1 雷暴天气；
- 2 大风天气；
- 3 低能见度。

A.3.3 下列气象条件下，应限制驾驶无人机并遵守下列规定：

- 1 不宜在 5 级以上大风天气飞行；
- 2 不宜在能见度小于 300m 时飞行；
- 3 不宜在低温环境飞行，飞行中不宜激烈运动，电池使用前应注意保温；

4 高原飞行，首先要空载试飞，进行飞行机动检查后，再全载荷试飞。完成测试后，方可进行飞行作业。

A.3.4 在获取高精度数字图像时，无人机的抗风能力宜大于 4 级。

A.4 操作方法

A.4.1 无人机平台获取视频数据时应保持飞行的稳定性，获取数字图像时应保持悬停的稳定性。

A.4.2 无人机平台悬停时的飞行姿态控制稳度宜满足下列要求：

1 横滚角 $<\pm 3^\circ$ ；

2 俯仰角 $<\pm 3^\circ$ 。

A.4.3 无人机平台悬停时的飞行航线控制稳度宜满足下列要求：

1 偏航距 $<\pm 0.5\text{m}$ ；

2 航高差 $<\pm 0.5\text{m}$ ；

3 航迹弯曲度 $<\pm 5^\circ$ 。

【条文说明】

无人机平台悬停时的航线控制稳度在采用 GNSS 系统定位时精度较差，应尽量采用视觉定位进行控制。

A.4.4 无人机平台不宜靠近检测对象 0.5m 范围以内。

A.4.5 检测工作中宜结合地面控制站实现无人机的任务规划、实时监测、数据通信。

【条文说明】

无人机地面控制站是实现无人机精准操纵与自动巡检的重要工具，其具有任务规划、任务回放、实时监测、数字地图、通信数据链在内的集控制、通信、数据处理于一体的综合能力。在检测工作中，宜通过无人机地面控制站规划任务并自动执行飞行检测，提升无人机平台检测的自动化程度。

附录 B 无人机桥检智能化分级

B.0.1 桥梁无人机检测工作可按照表 B.0.1 所述的特征进行智能化分级。

表 B.0.1 桥梁无人机检测智能化分级特征

等级	名称	主要特征	无人机控制与数据采集	三维重建	病害检测与量化
L0	人工检测辅助	带翅膀的望远镜	人工控制, 手动采集数据	无	I 人工识别为主 II 自动检测为主*
L1	病害定位检测	可将病害定位于桥梁上	人工控制, 手动采集数据	离线重建	
L2	局部自动检测	可沿 GNSS 航线自动控制	沿 GNSS 航线自动控制并采集数据	离线重建	
L3	整体自动检测	可在无 GNSS 区域沿航线自动控制 可实时查看定位与建图进展	机载设备感知定位, 自动控制并采集数据	实时重建	
L4	高度自动检测	有限的自动探索	自主探索、规划航线, 自动控制并采集数据	实时重建	
L5	完全自动检测	完全智能, 不依赖人工干预	自主探索、规划航线, 自动控制并采集数据	实时重建	自动检测

*注：自动检测包括数字图像处理，深度学习等方法。

【条文说明】

不同检测任务在数据采集与病害检测方面的智能化程度具有一定的差异。对于特定的检测任务，根据 3.0.5 条中各个流程的自动化特征，可对整个检测任务的智能化程度进行分级。包括人工检测辅助、病害定位检测、局部自动检测、整体自动检测、高度自动检测和完全自动检测 6 个等级。其中，每个等级下又具体细分为 I、II 两个等级。

其中，L0 为最原始的人工控制，手动采集数据的检测方式，且不含三维建图功能。L1 将离线三维重建加入了工作流，这意味着能够实现病害在桥梁表面的定位。L2 代表能够实现给定基于 GNSS 生成的航线时的自动控制与数据采集，即除梁底以外的大部分区域在人工规划好航线的情况下能够实现自动检测。L3

将检测区域做了进一步的扩展，能够在梁底等无导航信号的区域实现自动检测，这需要使用机载感知设备（如相机、雷达等）构建局部地图进行定位；同时也能满足实时建图的需求。L4 能实现有限的自动探索，即在不预先给定航线的情况下，自动探索、规划航线，自动控制并采集数据。L5 代表实现完全的自动检测，彻底摆脱了人工干预。

使用细分等级I和II可更加全面地评估检测任务的智能化水平。细分等级由病害检测与量化工作的自动化程度进行评判：I 级代表病害的检测与量化以人工识别为主，即获取检测数据后主要由人工进行筛查；II级代表以自动检测为主，包括使用数字图像处理、深度学习等方法进行自动的病害检测与量化。

B.0.2 不同的检测工作的智能分级结果可反映该检测工作的自动化程度。等级越高，检测工作的自动化程度越高。

【条文说明】

实际工程中在对检测任务的智能化分级进行评估时，应综合考虑上述的等级与细分等级进行评判。例如，某检测任务采用无人机平台，能够实现沿给定的 GNSS 航线自动飞行采集数据，并通过某深度学习算法自动检测图像中的裂缝，则该任务评级为 L2-II 级。

附录 C 图像尺度因子的计算原理

C.0.1 桥梁无人机检测工作中，应采用图像尺度因子来表征图像尺寸与真实尺寸的变换关系。

【条文说明】

图像尺度因子（单位：mm/pixel）表征着图像中1个像素对应真实物理尺寸的长度，反映了图像尺寸与真实尺寸的变换关系。通过计算图像尺度因子，检测人员能够在开展检测任务之前估算当前参数下能够检测到的病害最小尺寸，并与设定的检测目标进行比对。

C.0.2 计算图像尺度因子时，应明确透镜成像模型。桥梁无人机检测工作中宜采用针孔成像模型。

【条文说明】

常用的透镜成像模型包括凸透镜成像模型、针孔成像模型等。凸透镜成像模型基于实际光学透镜的成像原理，物体发出的光线经过凸透镜汇聚后，穿过焦点并在像平面上成像。该模型能够较精确地模拟光学成像的实际过程，但计算复杂，涉及光路折射和透镜畸变等问题。

针孔成像模型假设所有的光线经过一个无厚度的针孔（光心），并在图像平面上形成图像，光心与像平面之间的距离即为焦距。针孔成像模型物理意义明确，能够快速建立图像坐标与实际物体尺寸的对应关系。由于该模型不涉及复杂的透镜畸变和光路折射问题，计算更为简单且精度足够，特别适合桥梁无人机检测中的病害定位与尺寸测量，能够满足大部分桥梁检测的需求。

C.0.3 图像尺度因子的计算应采用相似三角形法则，如图C.0.3所示。

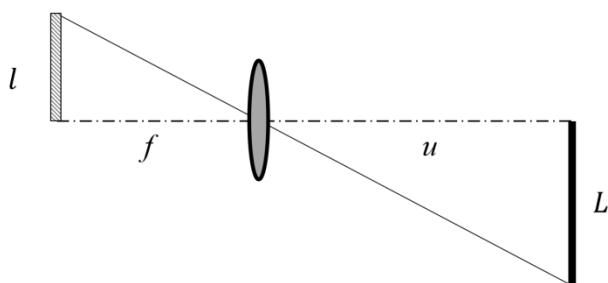


图 C.0.3 图像尺度因子的计算原理

【条文说明】

采用相似三角形原理计算图像尺度因子ISF。图 C.0.3 中， l 表示传感器对角线尺寸， f 表示焦距， u 表示物距。 L 表示图像对角线对应的真实物理尺寸，数值上等同于ISF与图像对角线像素数 N_d 的乘积，即 $\text{ISF} = L \times N_d$.

征求意见稿

本规程用词用语说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”；

反面词采用“严禁”。

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”；

反面词采用“不应”或“不得”。

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”；

反面词采用“不宜”。

表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 标准中指定应按其他有关标准、规范执行时，其写法为：“应符合……的规定”

或“应按……执行”。

引用标准名录

- 《公路桥涵养护规范》 JTG5120-2021
- 《近景摄影测量规范》 GB/T12979
- 《数字航空摄影测量 空中三角测量规范》 GB 23236
- 《工业建筑可靠性鉴定标准》 GB 50144
- 《工程摄影测量规范》 GB 50167
- 《民用建筑可靠性鉴定标准》 GB 50292
- 《桥梁挠度检测仪》 JJG（交通）143-2020
- 《轻小无人机运行规定（试行）》 AC-91-FS-2015-31
- 《民用无人驾驶航空器系统空中交通管理办法》 MD-TM-2016-004
- 《工程结构数字图像法检测技术规程》 T/CECS 1114-2022