

团 体 标 准

T/CCTAS XXXX—XXXX

桥梁智慧运维技术规范

Technical specifications for intelligent operation and maintenance of
bridges

（征求意见稿）

（本文件完成时间：2025.07）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国交通运输协会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	4
4 基本规定	4
5 智慧运维系统	5
5.1 一般规定	5
5.2 建设原则	5
5.3 系统功能	5
5.4 系统架构	5
5.5 系统分级	6
5.6 系统维护	7
6 智慧感知	7
6.1 一般规定	7
6.2 在线监测	8
6.3 智慧巡查	8
6.4 定期及特殊检查	8
7 智慧运维数据	9
7.1 一般规定	9
7.2 数据存储	9
7.3 数据预处理	10
7.4 数据分析	11
7.5 数据安全与共享	12
8 智慧运维应用	13
8.1 一般规定	13
8.2 桥梁安全预警	13
8.3 桥梁性能评估	14
8.4 桥梁智慧维养	16
附录 桥梁智慧运维流程图	17

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由哈尔滨工业大学提出。

本文件由中国交通运输协会标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

桥梁智慧运维技术规范

1 范围

本文件规定了桥梁智慧运维的基本规定、智慧运维系统、智慧感知、智慧运维数据及智慧运维应用等要求。

本文件适用于公路、城市道路桥梁的智慧运维。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成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；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。

- GB/T 11708 公路桥梁命名编号和编码规则
- GB/T 20009 信息安全技术 数据库管理系统安全评估准则
- GB/T 20273 信息安全技术 数据库管理系统安全技术要求
- GB/T 22239 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求
- GB/T 28827.1 信息技术服务 运行维护 第1部分：通用要求
- GB/T 32393 信息技术 工作流中间件 参考模型和接口功能要求
- GB/T 37025 信息安全技术 物联网数据传输安全技术要求
- GB/T 37696 信息技术服务 从业人员能力评价要求
- GB 39559.2 城市轨道交通设施运营监测技术规范 第2部分：桥梁
- GB 50982 建筑与桥梁结构监测技术规范
- GB/T 51212 建筑信息模型应用统一标准
- GB/T 51269 建筑信息模型分类和编码标准
- CJJ 99 城市桥梁养护技术标准
- CJJ/T 233 城市桥梁检测与评定技术规范
- CJ/T 553 城市数字公共基础设施统一识别代码编码规则
- JT/T 132 公路数据库编目编码规则
- JT/T 1037 公路桥梁结构监测技术规范
- JTG/T 2422 公路工程施工信息模型应用标准
- JTG 5120 公路桥涵养护规范
- JTG/T 5122 公路缆索结构体系桥梁养护技术规范
- JTG/T H21 公路桥梁技术状况评定标准
- JTG/T J21 公路桥梁承载能力检测评定规程

3 术语和定义

下列定义和术语适用于本文件。

3.1

桥梁智慧运维 intelligent operation and maintenance of bridges

利用工业互联网、物联网、大数据、人工智能等信息技术，集成桥梁结构体系与其管养资源，构建智慧化管理系统，对桥梁服役状态开展全面感知、精准辨识、风险预警及养护决策的全流程闭环管理。

3.2

结构变化 structural variation

以桥梁结构成桥状态或某一规定时刻状态为基准，桥梁构件、部件、结构在使用中几何形态和表观、结构性能发生的相对变化。

[来源：JT/T 1037-2022，3.6]

3.3

多源异构数据 multi-source heterogeneous data

与桥梁结构安全、性能状态、使用环境及运维活动相关的来源于不同系统、具有不同格式的多样化数据集合。

3.4

桥梁性能预警 bridge performance early warning

为保障桥梁运维安全，对表征桥梁运维过程中结构可能发生的危险或异常状态的监测元数据或间接指标设定阈值，当监测值达到或超过阈值时触发警示信息。

3.5

桥梁病害人工智能识别系统 AI-based bridge defect recognition system

基于深度学习、计算机视觉等AI技术，通过自动分析桥梁检查数据，实现病害智慧发现、量化与分类的软硬件集成系统。

3.6

桥梁性能研判 bridge performance evaluation and judgment

基于多源监测数据、检查结果、荷载记录与数字模型，对桥梁结构当前及未来状态进行综合诊断、评估与预测的过程。

3.7

桥梁智慧决策 intelligent decision-making for bridge operation and maintenance

在桥梁运维过程中引入AI技术，用来部分或完全取代人工在养护管理决策中的作用，消除主观不确定性，提升决策管养的标准化、规范化。

4 基本规定

4.1 桥梁符合下列条件之一时，宜开展桥梁智慧运维：

- a) 城市桥梁养护类别为I类的桥梁；
- b) 公路桥梁养护检查等级为I级的桥梁；
- c) 经过评定需要开展智慧运维的桥梁。

4.2 桥梁智慧运维以提升桥梁结构的安全韧性、运行效能和实现总体运维的降本增效为目标，鼓励采用物联网、大数据、人工智能等新技术新装备。

4.3 桥梁智慧运维应实时监测桥梁运行参数，融合桥梁检查数据，对桥梁服役状态进行评估预测，编制并动态更新桥梁维养计划，“计划维修”和“状态维修”相结合，按需养护，主动预防。

4.4 桥梁智慧运维应建设智慧运维系统，通过智慧运维系统实现桥梁结构运营全过程的数字化、智慧化管理。区域桥梁群应建设统一的智慧运维系统。

4.5 桥梁智慧运维应由系统硬件、系统软件和配套工程组成。

4.6 桥梁智慧运维应建立桥梁健康监测系统，全面感知桥梁服役状态信息。桥梁健康监测系统应作为桥梁智慧运维的组成部分，其技术要求应符合JT/T 1037的规定。

4.7 桥梁智慧运维应建立桥梁检查系统，包括日常巡查、定期检查及特殊检查，并应符合CJJ 99、JTG 5120的规定。桥梁检查系统应作为桥梁智慧运维的组成部分，桥梁检查的数据、结论及管养建议等信息应录入桥梁智慧运维系统。

4.8 桥梁智慧运维流程所涉及的运维开始、运维过程关键要素和运维结果等内容应进行数字化处理，建立数字化台账，纳入运维系统统一管理。

5 智慧运维系统

5.1 一般规定

5.1.1 桥梁智慧运维系统的建设应根据运维对象的结构特点、功能需求等确定。

5.1.2 桥梁智慧运维系统应简洁实用、性能可靠、维护方便、经济合理、安全稳定。

5.1.3 智慧运维系统应将桥梁智慧运维涉及的资产设施、人员、数据、作业流程及运维评价等运维对象和任务的静态信息和动态信息进行采集、存储、管理和更新，进行数字化表达，纳入智慧运维系统。

5.1.4 桥梁智慧运维系统的建设、验收和应用除应符合本规范的规定外，还应符合GB 50982、GB 39559.2、JT/T 1037的规定。

5.2 建设原则

智慧运维系统建设原则如下：

- a) 可靠性：系统应符合智慧运维所需的功能，具备不间断稳定运行、容灾备份与快速恢复能力。
- b) 可扩展性：系统设计应模块化，支持后续新增传感器或功能模块，提供标准化 API 接口，兼容现有养护管理系统。
- c) 安全性：系统安全设计应符合 GB/T 20009、GB/T 20273、GB/T 22239、GB/T 37025 的相关规定。
- d) 融通性：系统应整合多源数据，消除信息孤岛，支持跨部门协作运维。
- e) 易用性：系统应提供可视化界面、移动端 APP，构建知识库或 AR 辅助系统，降低一线维养人员使用的技术门槛。
- f) 可维护性：运维平台和外场设备应可维护、可更换，保障运维系统与结构设计年限的协调性。
- g) 经济性：应在符合业务需求的前提下，力求经济合理，控制成本。

5.3 系统功能

桥梁智慧运维系统应进行“感知-诊断-决策-执行-反馈”的闭环管理，具备如下功能：

- a) 桥梁状态多维度感知。桥梁智慧运维系统应布设高精度的传感网络，以及采用无人机、机器人等智慧巡检手段，实现桥梁状态多维度高精度数据采集。
- b) 多源异构数据的管理。应包含数据清洗、统计分析以及专项分析功能。
- c) 健康诊断评估。宜构建数据-物理融合驱动的桥梁健康诊断评估模型。
- d) 安全预警。系统应支持多级预警阈值设置，宜构建基于人工智能技术的安全预警模块。
- e) 性能评估。桥梁智慧运维系统建设应包含桥梁结构性能评估模块，开展桥梁服役性能评估，评估结果用于指导桥梁管养决策。
- f) 智慧决策和资源调度支持。系统应支持维修策略优化、工单调度自动化、资源管理优化以及应急响应联动。
- g) 可视化与交互。系统应支持电脑端、移动端等多端协同平台，应支持数据三维可视化展示和历史数据回溯。
- h) 自动报表生成。应能自动生成季报、年报等常规报表报告，报告报表应能导出为通用办公软件相适应的文件类型。

5.4 系统架构

桥梁智慧运维系统总体架构如图 1 所示，包括感知层、传输层、数据层、平台层、应用层和展示层，各层的主要功能如下。

- a) 感知层：多维度采集桥梁结构状态、环境参数以及外部作用数据，为桥梁运维提供数据输入，包括桥梁在线监测和桥梁检查。
- b) 传输层：将感知层采集的多源异构数据安全、可靠、高效地传输到数据层，一般可包括有线/无线两类传输方式。
- c) 数据层：整合管理多源异构数据，构建统一的数据结构，为平台层分析提供数据支撑，包括数据存储、数据治理、数据分析与共享。
- d) 平台层：连接数据层与业务应用。通过各类算法的集成，形成算法库和标准化接口，承担数据挖掘、模型计算和业务支撑三大任务，包括但不限于资源管理、桥梁性能分析与风险预测预警、桥梁养护决策与应急管理。
- e) 应用层：面向桥梁运维的业务场景，通过算法驱动数据层，整合定制形成支撑桥梁运维的各类业务应用，包括但不限于桥梁健康监测、桥梁智慧巡查、桥梁智慧养护、桥梁应急管理和桥梁资产管理等。
- f) 展示层：桥梁状态的三维可视化立体展示，支持电脑端、移动端的多终端应用访问，以及通过情报板、移动端 APP 等多渠道推送运维信息。

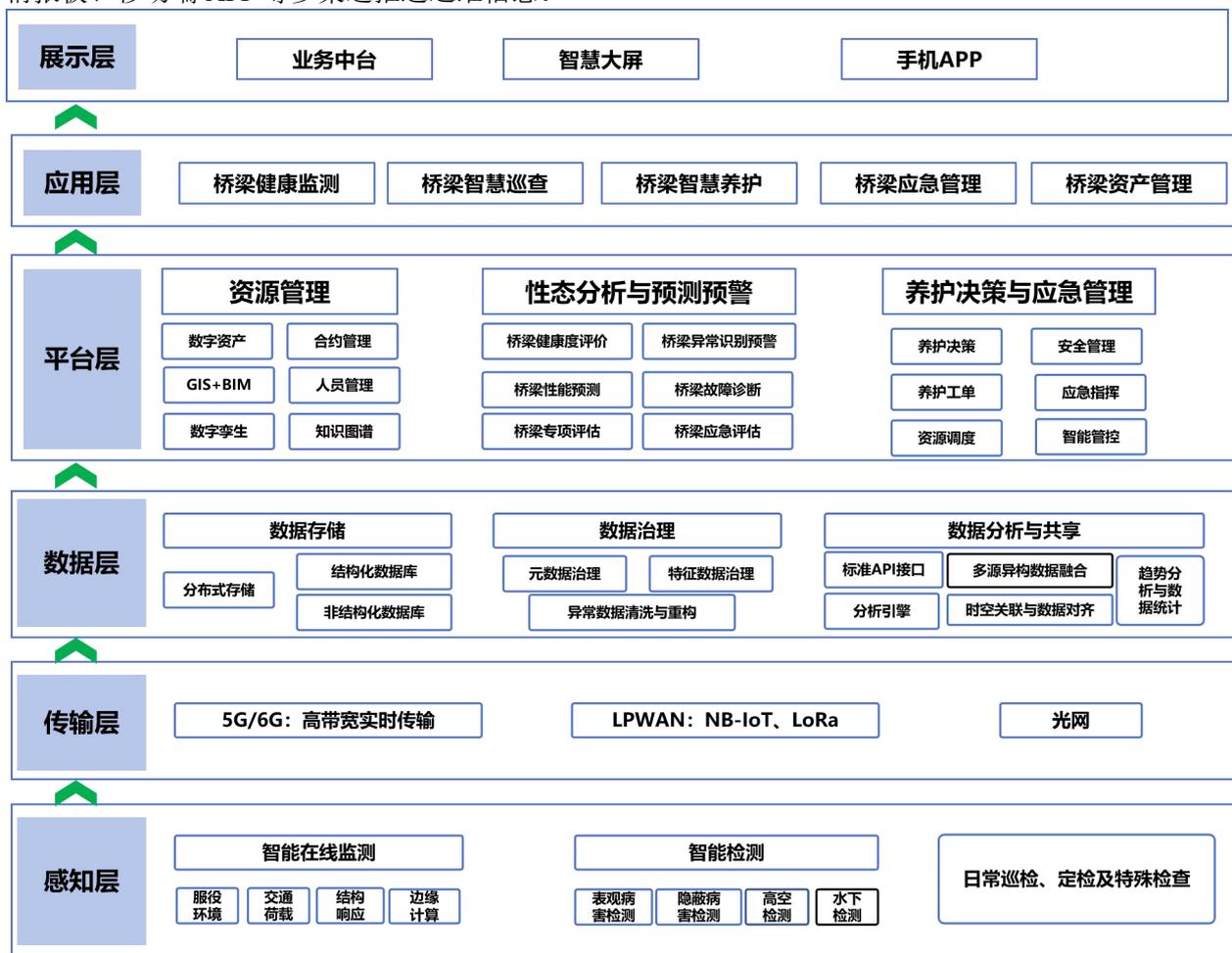


图 1 桥梁智慧运维系统总体架构

5.5 系统分级

5.5.1 依据运维系统功能特点，宜将运维系统智慧化等级分为五级，分别用 L0~L4 进行等级标识。五个等级内容应依次对应呈现展示、监控报警、动态融合、性态推演、智慧维养。运维系统智慧化分级的特征描述见表 1。

表 1 运维系统智慧化分级

级别	特征描述
L0: 呈现展示	呈现展示指通过智慧运维系统将基础设施的主要检测监测信息、结构信息等可视化展示出来,但该系统不具备判断设施状态的能力,其评估仍需依赖人工完成。例如,在桥梁结构上布设在线监测传感器,系统仅能够收集在线监测数据并采用数据系统和用户端进行数据的存储和展示,不具有数据分析预警功能。
L1: 监控报警	监控报警指利用智慧运维系统实时呈现设施的状态并对异常状态做出报警。例如,桥梁在其服役阶段,利用相关传感器实时采集桥梁服役过程中的挠度、应力等数据,一旦发现异常,系统会发出报警,人员便可及时介入并对其进行维修。
L2: 动态融合	动态融合指利用基础设施智慧运维系统全要素动态反映设施当前的实际状态,为推演未来建立基础。例如,桥梁在其服役阶段,利用传感器及智慧算法,实时监测车辆、风、温度等环境作用和结构响应,并融合桥梁检查数据,开展桥梁综合评估。
L3: 性能推演	性能推演指利用智慧运维系统预测桥梁未来一段时间的运行过程和状态,形成物理-数字空间相互映射的孪生系统。系统能够实现虚实实时全要素交互的数字孪生系统,以及桥梁性态的在线评估识别。例如,桥梁在其服役阶段,利用材料时变模型和动态融合(L2)数据,实现对桥梁未来服役过程的在线推演,从而在一定程度上将未知转化为预知,指导桥梁结构预防性养护。
L4: 智慧维养	智慧维养是指利用智慧运维系统对基础设施做出智慧诊断,智慧分析养护时机,自主规划全生命周期经济性养护方案决策,并实现养护工艺智慧选择,施工计划智慧生成,各施工项成本智慧预测及智慧生成工艺后评估等功能。

5.5.2 桥梁智慧运维系统宜根据桥梁结构特点及重要性程度分级建设,宜采用总体规划、分步实施,持续维护升级的方式。

5.5.3 桥梁智慧运维系统宜按 L2 或以上等级建设。

5.6 系统维护

5.6.1 桥梁智慧运维应建立智慧运维系统的运行、维护管理机制,建立维护设备的备品清单,并在年度预算中列支系统维护费用,系统维护应符合 JTG 5120、JT/T 1037 的规定。

5.6.2 桥梁智慧运维系统的硬件设施维护分为日常巡检维护和定期检查维护两类。检查维护内容应包括传感器、数据采集与传输设备、外场设备防护、数据设备、智慧巡检装备等,并建立检查台账。

5.6.3 桥梁智慧运维系统日常检查维护应结合桥梁的日常巡检开展,对外场运维设备的表观状况、采集传输系统是否正常工作、系统通讯工作状态等进行查看;发现松动、破损的外场设备以及采集传输异常应做好记录,并及时通知专业人员维护;智慧巡检装备应定期保养和校准。

5.6.4 外场监测设备及数据传输系统宜定期开展检查校准工作。检查校准过程应注意保护监测数据的连续性,并对出现故障的监测设备及时维修或更换。检查周期宜为 1 次/年。

5.6.5 宜对监控中心机房的硬件设备,如计算机、服务器系统等的工作状况开展定期检查维护,检查周期宜为 1 次/月。

5.6.6 桥梁运维软件平台的日常检查维护宜为 1 次/月,检查维护内容应包括系统平台各功能模块的工作状态、系统数据存储备份情况、系统访问情况以及异常数据状况、系统安全等。并建立检查台账。

5.6.7 桥梁运维软件平台定期维护宜为 1 次/年。检查维护内容包括系统软件模块功能升级、数据备份与存储系统优化清理、系统功能检查等。

5.6.8 桥梁结构运维系统在经历台风、地震、船撞、火灾、重大交通事故、极端天气等突发事件或系统崩溃后,应对运维系统的硬件系统、软件平台开展逐级特殊检查,发现问题应及时处理,恢复系统正常运行。

6 智慧感知

6.1 一般规定

6.1.1 应构建监测-检查联动的桥梁智慧感知体系,一般包括在线监测、日常巡查、定期检查及特殊检查。

6.1.2 桥梁感知、数据采集、传输设备性能和配套软件系统应符合 GB 50982、JT/T 1037 的规定。

6.1.3 在线监测系统设计应明确采集及传输硬件设备的使用寿命，不可更换类硬件设备的寿命应大于20年，可更换类硬件设备的寿命应大于5年。

6.1.4 桥梁检查所使用的仪器设备应按照国家、行业有关规范的规定及产品使用手册定期校准标定。

6.2 在线监测

6.2.1 桥梁在线监测系统的设计应符合 GB 50982、GB 39559.2、JT/T 1037 的规定。

6.2.2 穿越地质灾害高风险区域的桥梁结构宜增加针对地质灾害源的监测内容。

6.2.3 独柱墩桥梁及曲线桥梁宜建立桥梁抗倾覆监测系统，宜监测桥梁支座反力、支座倾角、支座位移及桥梁结构墩顶、跨中、四分点等关键部位的空间变位。

6.2.4 缆索体系桥梁除布设索力测点外，宜在索杆锚固区及索体布设锈蚀测点。

6.2.5 受水流冲刷影响严重的桥梁宜布设桥梁基础冲刷深度测点。

6.2.6 监测方法应与桥梁服役环境、交通荷载、结构静动态响应以及桥梁变化监测内容相匹配，监测方法应符合 GB 50982、GB 39559.2、JT/T 1037 的规定。

6.2.7 监测数据采集应符合 GB 50982、GB 39559.2、JT/T 1037 的规定，采集方法和采样频率应考虑传感器的空间分布、静态数据和动态数据的特征，以及监测数据分析和应用的要求。

6.2.8 数据采集设备应考虑抗干扰措施，包括串模干扰抑制、共模干扰抑制、接地技术及屏蔽技术，提高信噪比。

6.2.9 数据传输系统应保证可靠性、高效性及数据传输质量，应具有对各种数据接收、处理、交换和传输的能力，当传输距离较远时，宜采用数字信号或光纤传输技术进行传输。

6.2.10 数据传输系统应具有备份机制和良好的鲁棒性，在工作异常状态下应具有自诊断、自复位功能，以保障数据的完整性和可靠性。

6.2.11 应根据系统前端传感器单位时间采集的数据量大小，结合设计的传输实际通信能力，对数据进行边缘计算、分包处理，以包为单位实施传输。

6.2.12 数据传输应采用应答模式，在传送和接收两端对数据进行确认以降低误码率，保证数据的可靠性及完整性。

6.3 智慧巡查

6.3.1 日常巡检应符合 CJJ 99、JTG 5120、GB 39559.2、JT/T 1037、JTG/T 5122 的要求。

6.3.2 日常巡检应结合智慧运维系统分析结果开展，对监测数据异常或数值变化较大的桥梁部位重点巡查。

6.3.3 针对人工难以抵达的桥梁部位应采用无人机、机器人等搭载智慧巡检设备，开展桥梁智慧化巡查，提升巡查作业效率，降低巡查作业成本。

6.3.4 桥梁日常巡查应包括智慧运维系统外场设备的巡查。

6.3.5 桥梁智慧运维系统的日常巡查标准化表格及病害描述方式应符合 JTG/T H21、CJJ 99 的要求，对各类巡查数据进行数字化管理，宜进行巡查数据和桥梁病害历史数据对比分析。

6.3.6 智慧巡查装备宜配备病害人工智能识别系统，应能自动识别桥梁常见病害，并对病害进行定位、标识，应采用自动识别+人工复核的模式避免病害的漏检、误检等问题，巡查数据及时上传智慧运维系统。

6.3.7 桥梁日常巡查发现的问题应及时上报并处置，重大问题应通过智慧运维系统的电子工单系统派发运维工单，实现发现问题-工单派发-运维处置-验收评估的数字化闭环处置及桥梁运维的数据溯源。

6.4 定期及特殊检查

6.4.1 定期检查和特殊检查应符合 CJJ99、JTG 5120 的规定。

6.4.2 当在线监测系统发生结构异常报警时，应及时针对报警事项开展桥梁检查。

6.4.3 定期检查和特殊检查应制定从现场检查到报告编制的全过程信息化检查方案，数据应可追溯，检查数据和报告应及时整理、归档，并存入桥梁智慧运维系统。

6.4.4 桥梁定期检查宜采用智慧桥检系统智慧终端，固化病害录入、技术状况评定等标准化流程，实现数据的真实性以及业务流与信息流的一致性。

7 智慧运维数据

7.1 一般规定

7.1.1 桥梁智慧运维系统的数据管理应遵循标准化、智慧化和安全性原则，应包括数据存储、数据预处理、数据分析、数据安全与共享等内容，支持智慧运维应用。

7.1.2 桥梁智慧运维系统应满足运维数据不同类型的存储需求，能为不同运维类型数据提供不同的存储策略，且具备分布式对象存储服务的能力。

7.1.3 在线监测数据的数据治理应具有实时性。离线数据在上传智慧运维系统前应进行数据预处理，剔除异常数据。

7.1.4 数据分析和共享的对象应是经过数据治理后的有效数据。数据分析应支撑运维平台应用，宜采用在线智慧分析。

7.1.5 桥梁智慧运维数据应连续、可靠，贯穿桥梁运维全生命周期。

7.2 数据存储

7.2.1 桥梁智慧运维数据存储宜考虑现场采集端侧存储、中心服务器存储，宜采用在线存储和定期拷贝备份存储相结合的存储策略。

7.2.2 采集端侧结构化原始数据存储时间宜大于60天，非结构化视频图像数据宜大于30天。

7.2.3 中心服务器存储原始数据存储时间宜大于5年，特征数据大于20年。超过时限的数据可拷贝离线存储，拷贝存储的数据格式应在不同介质之间转移，支持重新导入运维平台系统的需求。

7.2.4 应采用数据库技术存储桥梁运维数据。结构化数据直接存入数据库，不宜直接入库的非结构化数据可采用文件形式存储，文件的属性、存储地址、内容提要等描述信息应存入数据库中，各类数据宜采用统一的数据存储格式。

7.2.5 桥梁智慧运维数据库设计应遵循可靠性、先进性、可扩展性原则，并应考虑数据结构的整体性、数据库系统与应用系统的统一性，宜具备向数据仓库系统迁移的能力，宜考虑与其他数据库系统或软件系统的数据交换需求。

7.2.6 桥梁智慧运维系统数据库应采用模块化开发，可按功能对桥梁各类运维信息进行分层、分类存储和管理，桥梁智慧运维系统数据库见表2。

表2 桥梁智慧运维系统数据库

序号	子数据库名称	主要存储内容
1	桥梁结构信息子数据库	包括桥梁结构设计图纸以及各专题研究成果资料。数据库中的表格、文件宜按照设计图纸目录及科研报告构件分类。
2	在线监测系统信息子数据库	传感器、采集设备、传输设备管理等所有的基本信息，包括设备位置、性能指标、安装信息、品牌规格等。
3	结构外部作用和环境子数据库	包括车辆荷载、风荷载、地震荷载、温度荷载、湿度、雨量、地震、船撞等传感器原始数据。
4	结构响应子数据库	桥梁关键构件的应变、加速度、位移等传感器原始数据、视频图像原始数据。
5	日常巡查信息数据库	桥梁日常巡查的档案记录，包括巡查时间、巡查人、问题及处理结果。
6	定期检查信息数据库	桥梁定期检查的数据记录，包括检查时间、检查单位、主要病害、技术评定结果以及结论等信息。
7	特殊检查信息子数据库	桥梁历次荷载试验、特殊检查的相关信息，包括静、动力加载工况信息荷载试验过程中所采集到的外部荷载和结构响应数据、试验与分析结果以及成桥试验报告。
8	结构有限元模型子数据库	桥梁结构各阶段有限元模型，该有限元模型宜采用通用有限元分析软件创建。有限元模型的文件形式应方便使用者在本地计算机上重建或修订，用于模型修正和安全评估调用。
9	结构自身特性子数据库	桥梁结构的静力与动力性能参数，包括结构的影响线、振型、频率、阻尼比等。参数应分为原始有限元模型计算值、初始有限元模型计算值、损伤有限元模型计算值、运营期间数据模态识别结

		果以及成桥试验期间模态识别结果。
10	特征分析子数据库	采用各类数据处理技术计算得到的处理结果，这些数据代表了结构的性能特征。
11	桥梁重要指标数据库	桥梁在线监测报警阈值数据库、各项重要观测指标（特别是结构响应、结构变化）极值数据库
12	结构安全评估预警分析子数据库	实时在线安全评估、预警、离线历史数据安全评估结果、专家评估结果等。
13	桥梁维养信息子数据库	历次桥梁维修养护所采取的措施及维养效果。
14	应急管控子数据库	应急突发事件的发现、报警、处置的信息。
15	系统维护子数据库	运维系统设备的维护信息、历史工作状态。

7.2.7 桥梁智慧运维系统应建立数据备份机制，应支持全量备份、增量备份等方式，备份内容宜包括数据库数据、数据库结构、数据库配置定义文件等。

7.3 数据预处理

7.3.1 桥梁智慧运维系统应内置数据预处理模块，包括异常数据判断、剔除或重构、数字滤波消噪及去除趋势项等，数据质量应符合数据分析的要求。

7.3.2 对影响运维系统实时报警的数据异常，宜建立基于时空关联和统计分析的数据异常在线自动判别算法，对数据异常发出警示并处理。

7.3.3 对无法在线自动识别和消除，且不影响实时报警的异常数据，宜进行离线数据处理，处理后的数据应添加异常处理标签。

7.3.4 采样频率不大于1Hz的静态数据异常处理内容宜包括以下内容：

- a) 数据调理：缺失数据补齐、重复数据规整等；
- b) 数据阶跃处理：跳跃点自动判别、消除和规整；
- c) 离群点的自动判别和修复。

7.3.5 采样频率大于1Hz的动态数据的动态数据异常处理内容宜包括以下内容：

- a) 数据调理：缺失数据补齐、重复数据规整等；
- b) 消噪：消除信噪比较大的弱噪声干扰；
- c) 异常点：异常值、离群散点、跳点等判别和修复；
- d) 低频（长周期）或脉冲干扰：消除趋势项。

7.3.6 常见异常数据治理模式及措施见表3。

表3 常见异常数据治理模式及措施

序号	异常类别	主要原因	处理模式	处理措施
1	数据缺失或重叠	传感器故障、通信中断、电源不稳定、数据记录器故障	在线自动识别、纠正	予以标记，在分析时将其补齐或剔除
2	数据阶跃	传感器重启、结构损伤、环境突变（如温度变化）、设备老化	在线自动识别、判断及纠正	判断是否是故障还是结构发生突然损伤，如为故障，则进行数据平移
3	离群点	传感器异常、环境干扰（如雷电）、操作失误、数据记录错误	在线自动识别、判断及纠正	消点、补点
4	弱噪声干扰	环境噪声（如风、雨、交通）、设备老化、电源波动	在线自动识别、纠正	滤波、降噪
5	强噪声干扰	电源干扰、电磁干扰、设备故障	在线自动识别	标记（在分析时将其剔除）
6	低频（长周期）或脉冲干扰	温度变化、交通荷载、设备老化	在线自动识别、纠正	零相位差低通滤波、趋势项剔除、模式识别消除脉冲，必要时更换采

				集设备
7	信号饱和	传感器量程不足、极端荷载事件	在线自动识别、纠正	量程调整、异常值剔除
8	信号漂移	长期运行导致传感器性能下降、环境因素变化	在线监测、后期校准	定期校准、趋势项剔除
9	同步误差	多传感器时间戳不同步、时钟偏差	在线自动识别、纠正	时间戳校正、同步采集
10	数据冗余	重复采集或记录、软件设置错误	在线自动识别、纠正	数据去重、冗余剔除
11	非线性响应	结构损伤导致响应特性变化、材料老化	在线监测、后期分析	特征提取、非线性模型拟合
12	信号混叠	采样频率不足、高频信号未被正确采样	在线监测、后期处理	提高采样频率、混叠信号分离
13	信号畸变	传感器损坏或安装不当、电缆损坏	在线自动识别、纠正	传感器更换、重新安装
14	其它难以识别与消除的数据缺陷	未知原因、复杂环境因素、设备故障	后期数据处理	综合利用多传感器信号，采用多种数据异常诊断方法进行剔除

7.3.7 应根据桥梁智慧运维异常数据的特征选择对应的数据预处理方法，宜采用阈值法、平均值法、数据插补法、噪声滤波法、基于统计与规则的方法以及机器学习方法，对数据异常进行识别，必要时可对缺失的数据进行重构，以满足桥梁评估对时序数据完整性的要求。

7.3.8 桥梁智慧运维异常数据判别和重构宜考虑运维数据的时空相关性，充分利用时空关联信息来降低数据误判的概率，提升数据重构的精度和效率。

7.3.9 宜建立桥梁智慧运维数据质量评价机制与指标，实时/定期对运维数据的完整性、准确性、一致性、时效性等属性进行监控和评价。

7.4 数据分析

7.4.1 宜采用智慧运维系统内置的软件对经过预处理后的检测、监测数据进行分析，为运维大数据的应用提供支撑。

7.4.2 数据分析应包括时域、频域维度的分析。时域范围内的统计分析应包括均值、方差、极大值、极小值等，频域范围内的统计分析应包括幅值谱、平均功率谱、时频谱、短时能量谱等，时间序列特征统计分析应包括均值、中位数、方差、极差或变异系数等。

7.4.3 数据分析的主要内容应包括环境、交通荷载、结构响应、结构变化以及桥梁维护信息统计等各类数据，一般包括统计分析和专项分析，数据分析的主要内容见表4。

表4 数据分析的主要内容

序号	名称		主要内容
1	统计分析	环境	(1) 环境温度：最高温度、最低温度、平均温度、温差、截面温度梯度等，复杂缆索体系桥梁宜分析桥梁时空温度场分布； (2) 环境湿度：最大值、平均值和超限持续时间，钢结构桥梁宜分析湿度时空分布以及单个测点湿度与累积持续时间频次分布。
2		荷载	(1) 车辆荷载：车流量、车道分布、轴重、车重，超载车数量、车重、轴重和出现时间，宜分析年极值、车辆疲劳荷载谱和校验系数等； (2) 风荷载：10min 平均风速、风向、平均风压及均方根值。
3		结构响应	(1) 结构位移：平均值、绝对最大值、均方根值及其随时间和温度的规律； (2) 结构应变：平均值、绝对最大值； (3) 索力：平均值、最大值、最小值、均方根值； (4) 支座反力：平均值、最大值、最小值及其随时间变化规律； (5) 结构振动：绝对最大值、均方根值、频谱，桥梁自振频率、振型等模态参数分析。

4	结构变化	(1) 基础冲刷：冲刷深度最大值、冲刷范围及其变化规律； (2) 基础变位：平均值、绝对最大值、均方根值及其随时间变化规律； (3) 裂缝：裂缝长度、宽度、数量、位置及其随时间变化规律； (4) 腐蚀：氯离子浓度，侵蚀深度最大值、最小值、梯度及其变化趋势。
	维护管控	桥梁结构运维过程中的维护、应急管控等涉及的“人、机、料、法、环”信息的统计分析与管理。
5	专项分析	主要进行监测数据的高级分析，宜结合数据应用开展，包括模态分析、桥梁特征量与环境因素之间的相关性分析、非线性回归分析等： (1) 车辆荷载作用响应分离：车辆自重的准静态响应、车辆过桥振动响应、冲击系数分析等； (2) 相关性分析：作用与环境、作用环境与响应之间互相关分析，作用响应自相关分析等； (3) 趋势分析：构件变形趋势、构件性能退化、基础变位趋势、预应力有效应力变化趋势等； (4) 疲劳分析：主梁疲劳累积损伤指数、疲劳荷载谱； (5) 协同工作性能分析：主要承重构件共同承受荷载的性能。

7.4.4 数据分析可采用统计分析、相关性分析、趋势性分析、比对性分析以及基于机器学习的分析方法。

7.4.5 静态数据的时域统计分析宜根据监测参数的特征，结合分析需求，可按分钟、小时、日、季度、年为单位进行分析。

7.4.6 动态数据的时域统计分析区间和分析频率宜根据监测参数数据特征、分析时长、采样频率和预警需求确定。

7.4.7 时间序列的集中趋势宜采用均值、众数或中位数反映；离散程度宜采用方差、标准差、极差或变异系数反映。

7.4.8 相关性分析宜包含自相关分析和互相关分析，自相关分析根据应用需求，可采用一阶和二阶进行，两个单变量监测数据的互相关性应采用皮尔森相关系数进行度量，两个多变量监测数据的互相关性应采用典型相关分析等方法进行度量。

7.4.9 趋势分析应根据监测数据特征采用线性回归、多项式回归和指数函数回归等进行分析。对趋势特征不明显的监测数据可采用神经网络等方法进行分析。

7.4.10 疲劳分析应采用S-N曲线、名义应力法、热点应力法、缺口应力法等进行分析，应力响应循环次数宜采用雨流计数法计算。

7.4.11 数据分析宜采用在线自动化模式，复杂专项分析可采用在线/离线相结合的方式。

7.5 数据安全与共享

7.5.1 数据安全应包含数据采集、传输、存储、使用、共享和销毁全过程的安全。数据安全与共享应符合GB/T 20009、GB/T 20273、GB/T 22239、JT/T 1037的规定。

7.5.2 桥梁智慧运维数据安全应遵循全程加密传输、分级分类存储、最小权限处理、按需授权使用、可控安全共享及彻底销毁验证的原则，保障数据全生命周期安全。

7.5.3 数据存储安全应根据数据分类分级进行差异化存储，对敏感数据加密处理，通过访问控制、定期备份和安全存储环境建设，保障数据存储的保密性、可用性和设备安全。

7.5.4 数据处理安全应采取权限管控、操作审计和安全隔离，规范处理流程，防止因权限滥用或算法漏洞导致的数据泄露与篡改。

7.5.5 数据销毁安全应严格遵循流程，应采用安全的数据擦除技术；应对存储介质进行物理销毁或安全格式化；记录数据销毁过程与结果，以备审计。

7.5.6 桥梁智慧运维系统可采用接口共享、文件共享、数据库共享以及数据平台共享等方式，与外部系统进行数据共享交互。

7.5.7 数据共享宜遵守授权同意原则和最小必要原则、安全可控原则和合规性原则。任何数据共享行为均获得数据所有者或相关授权方的明确授权同意，且仅共享与桥梁运维相关的必要数据，根据业务需求明确数据必要性和关联性，避免过度采集与共享无关数据。

7.5.8 数据共享应建立审计日志系统和追溯机制，记录数据请求、传输、访问、登录等操作及详细信息，用于安全事件追溯分析，定期分析检查审计日志，及时处理异常操作和安全隐患。

8 智慧运维应用

8.1 一般规定

8.1.1 桥梁结构智慧运维应用包括但不限于：桥梁安全预警、桥梁安全评估和桥梁维养管控等，智慧运维应用除符合本规范外，尚应符合 JT/T 1037、JTG 5120、CJJ 99 的有关规定。

8.1.2 桥梁智慧运维宜定期开展桥梁安全性和适用性评估。当桥梁在遭受洪水、地震、滑坡、船舶或漂浮物撞击、爆炸、火灾、车辆严重超载或车辆撞击后，以及其他异常情况影响造成桥梁损伤的情形，应及时开展桥梁安全性、适用性等专项评估。

8.1.3 宜构建基于机器学习的桥梁性能预测评估智能算法库，以智能算法驱动检测监测数据，实现桥梁性能的在线智能评估。

8.2 桥梁安全预警

8.2.1 应建立覆盖环境作用、结构响应、整体性能以及异常事件的多要素预警指标体系，桥梁预警指标体系及与预警事项见表 5。

表 5 桥梁预警指标体系及预警事项

类别	指标体系	桥梁结构类型			
		梁桥	拱桥	斜拉桥	悬索桥
环境及荷载	温度	◎	◎	◎	◎
	湿度	◎	◎	◎	◎
	风速	●	●	●	●
	车辆荷载轴重	●	●	●	●
	地震动加速度	●	●	●	●
结构响应	主梁竖向位移	●	●	●	●
	主梁横向位移	●	●	●	●
	梁端纵向位移	●	●	●	●
	支座位移	●	●	●	●
	塔顶水平偏位	-	-	●	●
	塔顶倾斜度	-	-	●	●
	拱顶位移	-	●	-	-
	索夹滑移	-	-	-	●
	锚碇位移	-	-	-	●
	主缆偏位	-	-	-	●
	墩顶水平位移	●	●	●	●
	关键构件应变	●	●	●	●
	索力	-	●	●	●
	主梁振动加速度	●	●	●	●
	索杆振动加速度	-	●	●	●
结构变化	基础冲刷	●	●	●	●
	桥墩沉降	●	●	●	●
	混凝土裂缝	◎	◎	◎	◎
	钢桥疲劳裂缝	◎	◎	◎	◎
	腐蚀	◎	◎	◎	◎
整体性能与异常事件	船撞	●	●	●	●
	火灾	●	●	●	●
	主梁涡振	◎	◎	●	●
	行车舒适度	●	●	●	●
	冲击系数	●	●	●	●
	钢桥疲劳损伤	●	●	●	●
	频率变化	●	●	●	●
阻尼衰减	-	-	●	●	

	主梁持续下挠	●	◎	●	◎
注：●为应报警项；◎可选报警项；-为无需报警项					

- 8.2.2 桥梁安全报警阈值设定应根据桥梁结构在役状态，结合桥梁结构力学分析、设计规范容许值、材料强度标准值以及长期监测数据规律等综合考虑合理设定。宜按照 JT/T 1037 的超限报警阈值设定表进行。
- 8.2.3 宜采用 AI 技术，构建检监测元数据与预警指标体系的映射关系，对设定的预警指标体系进行在线主动识别计算，实现实时预警。
- 8.2.4 运维安全预警应建立预警准确性确认的误报警消减机制，宜构建基于多通道监测传感数据时空关联分析的预警算法，提升预警的准确性。
- 8.2.5 预警系统应根据不同的预警级别，结合桥梁结构类型、预警类型等针对性地编制应急预案，提供处置建议。
- 8.2.6 桥梁应急预案应与结构安全预警机制配套，应建立与公安交警、路政执法、养护管理、120 救护、119 消防等各相关方联动的信息渠道，形成联动机制。
- 8.2.7 应定期对应急预案有效性进行检查评估；桥梁结构安全预警后应快速启动相应的应急预案，统筹协调运维系统的预警管理机制，及时采取相应的应急响应措施，预防桥梁坍塌等恶性事故发生。
- 8.2.8 预警发生后应形成预警报告，预警报告应包含预警时间、预警指标、预警传感器所在位置等信息。预警处置后，应按照预警消除的程序，解除预警。
- 8.2.9 穿越高风险地灾区域的桥梁结构宜建立不经过运维后台确认的桥梁垮塌等重大事故的自动化现场闭环反馈警示系统，避免灾害引发重大人员伤亡。

8.3 桥梁性能评估

- 8.3.1 桥梁性能评估宜充分融合检查、监测等多源异构数据，包括技术状况评估、耐久性评估、承载能力评估。
- 8.3.2 宜构建桥梁服役性态和服务能力评价的桥梁智慧运维性态指标体系。运维性态指标体系宜考虑物理安全、服务功能、耐久长寿等不同维度设置多层次多要素指标体系。桥梁运维性态指标体系及数据源见表 6。

表 6 桥梁运维性态指标体系及数据源

序号	一级指标	二级指标	三级指标	检监测数据源	
1	安全性评价指标体系：面向承载能力极限状态评估	承载力可靠度指数	应变	在线监测	
2			位移	在线监测	
3		结构压屈失稳	受压杆件应变	在线监测	
4			受压杆件位移	在线监测	
5		拉索断裂	索力	在线监测	
6			索体振动加速度	在线监测	
7			索体损伤	巡检、定检、特殊检查	
8		钢结构疲劳失稳	动应变	在线监测	
9			疲劳裂纹扩展	在线监测	
10		桥梁倾覆	支座反力、支座位移	在线监测	
11			梁体位移	在线监测	
12		发散振动	主梁加速度	在线监测	
13			动位移	在线监测	
14			动应变	在线监测	
15			风速风向	在线监测	
16		长期下挠	主梁位移	在线监测	
17		其他危险服役状态指数	冲刷、洪水、地震、台风、极端气候	在线监测、巡检、定检、特殊检查	
18		适应性评价指标体系：面向正常使用极限状态评估	结构刚度	主梁竖向位移	在线监测
19				主梁自振频率	在线监测
20				桥塔水平位移	在线监测

21	耐久性评价指标体系：面向寿命评估	涡振	主缆竖向位移	在线监测	
22			主梁振动加速度	在线监测	
23			风速风向	在线监测	
24		异常振动	主梁振动加速度	在线监测	
25			动位移	在线监测	
26			动应变	在线监测	
27		行车舒适度	振动加速度	在线监测	
28			动位移	在线监测	
29			动应变	在线监测	
30		冲击性能	动位移	在线监测	
31			动应变	在线监测	
32			桥面平整度	巡检、定检	
33		伸缩性	伸缩缝位移	在线监测	
34			伸缩缝高差	巡检、定检、特殊检查	
35			伸缩缝破损	巡检、定检、特殊检查	
36		约束边界条件	支座位移	在线监测	
37			支座反力	在线监测	
38			限位阻尼位移	在线监测	
39			支座表观状况	巡检、定检、特殊检查	
40		钢筋锈蚀	碳化深度	巡检、定检、特殊检查	
41			氯离子含量	巡检、定检、特殊检查、 在线监测	
42			电位势	巡检、定检、特殊检查、 在线监测	
43			裂 缝	巡检、定检、特殊检查、 在线监测	
44			钢结构	涂层劣化	巡检、定检、特殊检查
45				锈迹	巡检、定检、特殊检查
46				裂纹	巡检、定检、特殊检查
47			混凝土结构	蜂窝破损	巡检、定检、特殊检查
48				裂缝	巡检、定检、特殊检查、 在线监测
49				冻融损伤	巡检、定检、特殊检查
50				混凝土碳化	巡检、定检、特殊检查
51				碱骨料反应	巡检、定检、特殊检查
52		主缆	空气湿度	巡检、定检、特殊检查、 在线监测	
53			表面防护开裂	巡检、定检	
54			钢丝锈蚀	巡检、定检	
55		拉索、吊索	PE 防护破损	巡检、定检	
56			钢丝锈蚀	巡检、定检	
57			锚头锈蚀	巡检、定检	

8.3.3 桥梁智慧运维系统应进行桥梁健康度的在线评估，包括整体健康度和结构构件健康度，评定依据应按照 JT/T 1037-2022 的规定执行。

8.3.4 桥梁技术状况以及耐久性评估应按照 JTG 5120、CJJ 99、JTG/T H21、CJJ/T 233 的规定开展。

8.3.5 桥梁结构承载能力评估应从结构或构件的强度、刚度、稳定性三个方面进行，桥梁结构承载力评定应符合 JTG 5120 和 JTG/T J21 的规定。

8.3.6 桥梁结构宜定期开展承载力虚拟加载评估。利用在线监测系统布设的位移及应变测点并结合标准车加载，识别桥梁结构内力和位移影响线，采用模拟加载方式计算设计荷载下响应，评价结构的承载能力。计算分析所采用的结构有限元模型应根据当前服役状态进行修正。

8.3.7 桥梁性能评估可采用基于数据的评定方法、基于有限元模型修正评定方法、数据-物理模型双驱的评定方法等。

8.3.8 智慧运维系统宜开发桥梁结构性能在线评估软件，实现桥梁性能在线动态评估，桥梁性能在线动态评估项目见表 7。

表 7 桥梁性能在线动态评估项目

类别	在线评估项目	桥梁结构类型			
		梁桥	拱桥	斜拉桥	悬索桥
安全性能	钢结构疲劳失稳	●	●	●	●
	桥梁倾覆	●	●	-	-
	压屈失稳	-	●	-	-
	异常振动	●	●	●	●
	高应力服役状态	●	●	●	●
	大变形服役状态	●	●	●	●
适用性能	结构刚度	●	●	●	●
	涡振	●	●	●	●
	行车舒适度	●	●	●	●
	冲击性能	●	●	●	●
	疲劳寿命	●	●	●	●
	伸缩性	●	●	●	●
	边界约束	●	●	●	●
	拉索状态	-	●	●	●
主缆状态	-	-	-	●	

注：●为应在线动态评估项；-为无需在线动态评估项

8.3.9 桥梁结构评估报告应明确评估方法，给出桥梁结构安全、功能、耐久性等评估结论，并对桥梁结构可能出现的安全危险状态、功能性缺陷等提出维养处治建议。评估结果以数字化信息表达，存入桥梁智慧运维系统。

8.4 桥梁智慧维养

8.4.1 桥梁智慧维养应综合分析桥梁在线监测成果与离线检查结果，制定桥梁运营管理方案和养护维修计划。

8.4.2 宜将大语言模型、强化学习等人工智能技术应用于桥梁管养辅助决策中，构建智慧决策系统，提高决策者与计算机间的交互效率，提升桥梁管养决策智慧化水平，降低人为主观影响。

8.4.3 当构件健康度或结构整体健康度为Ⅲ级中等异常或Ⅳ级严重异常时，应进行专家研判。

8.4.4 桥梁技术状况评估分为 5 级，应按照评估分级开展桥梁养护作业，分级标准及运营养护方案对策应符合 JTG 5120、CJJ 99 的规定。

8.4.5 桥梁结构承载能力评估结果不符合要求时，应进行专家研判，及时采取交通限载、维修加固措施。

8.4.6 桥梁在遭受涡振、强(台)风、悬索桥吊索、斜拉桥斜拉索、拱桥吊杆(索)等异常振动，地震、车辆超载、船撞等特殊事件时，应根据评估结果制定应急管理措施，必要时组织专家研判。

8.4.7 宜定期开展桥梁应急演练，鼓励采用机器人、无人机等智能管控技术装备，提升桥梁应急备灾救灾能力。

附录 A 桥梁智慧运维流程图

桥梁智慧运维应制定桥梁智慧感知、性态研判与预测预警、养护维修和应急处理的智慧运维流程，桥梁智慧运维流程见图A.1。

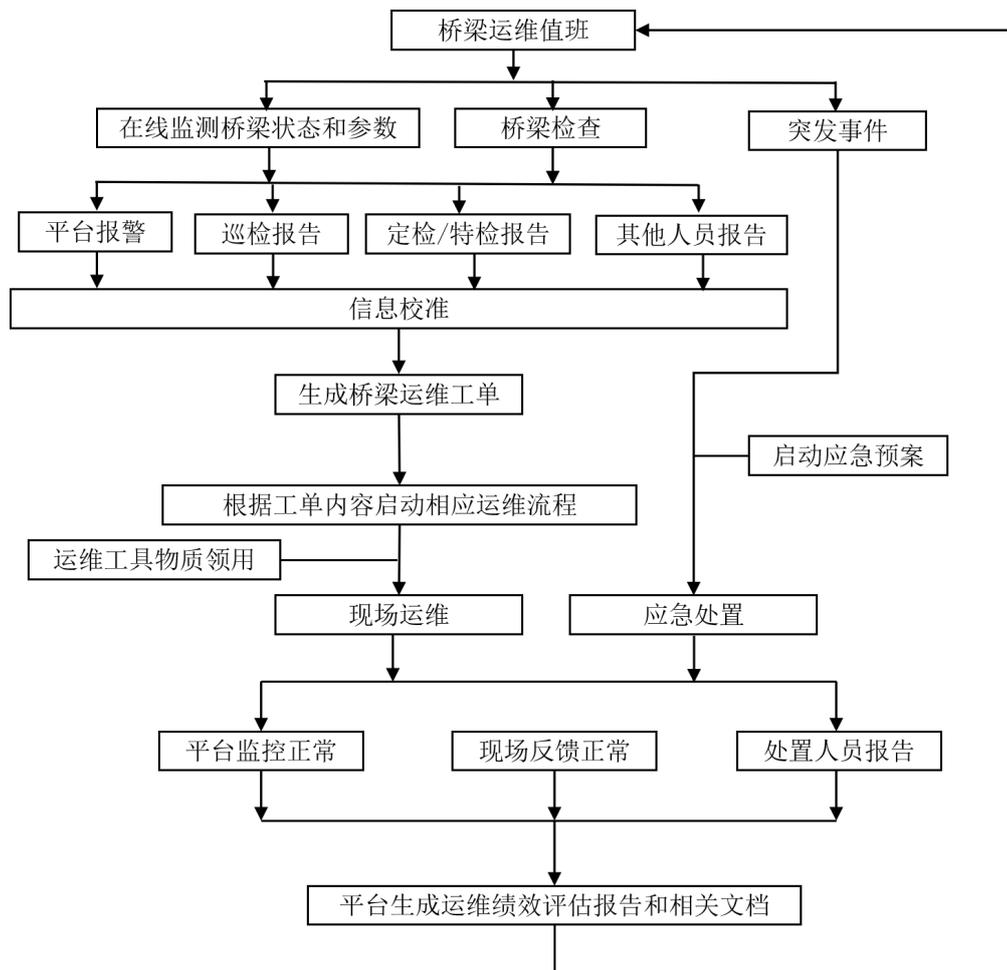


图 A.1 桥梁智慧运维流程图