

UDC

MH

中华人民共和国行业标准

P

MH ××××—20××

民用机场飞机荷载桥结构监测
技术规范

Technical specification for structural monitoring of
aircraft bridge in civil airport

(征求意见稿)

202×-××-××发布

202×-××-××施行

中国民用航空局 发布

中华人民共和国行业标准

民用机场飞机荷载桥结构监测 技术规范

(征求意见稿)

Technical specification for structural monitoring of
aircraft bridge in civil airport

MHxxxx

主编单位:

批准部门:

施行日期:

xx 出版社

2024 北 京

前 言

为满足民用机场飞机荷载桥梁结构监测需要，规范监测技术标准，保障飞机荷载桥梁安全，完善投建营一体化的系统性技术指导标准，编制本规范。

规范编制过程中，编制组深入调研，借鉴国内外有关公路、市政桥梁监测技术规范等研究成果，总结北京大兴国际机场、青岛胶东国际机场飞机荷载桥梁结构监测试点经验，在此基础上广泛征求全国相关单位和专家的意见，经过反复讨论、修改，最终定稿。

本规范的主要技术内容包括 9 章：1.总则；2.术语和定义；3.基本规定；4.监测内容；5.监测点布设；6.监测方法；7.系统实施与运维；8.数据分析与管理；9.数据应用。

本规范第 1 章由 xx 编写，……

本规范由中国民航工程咨询有限公司负责日常管理。执行过程中如有意见和建议，请函告中国民航工程咨询有限公司（地址：北京市顺义区二纬路 9 号中国服务大厦 C 区三层；邮编 100621；传真：010-64557534，电话：010-64557555；Email：chinacaec@caec.com），以便修订时参考。

主编单位：

参编单位：

主 编：

参编人员：

主 审：

参审人员：

目次

1	总则	1
2	术语和定义	2
3	基本规定	4
4	监测内容	5
4.1	一般规定	5
4.2	监测内容	5
5	监测点布设	8
5.1	一般规定	8
5.2	环境与作用测点	8
5.3	结构响应测点	9
5.4	结构变化测点	10
6	监测方法	11
6.1	一般规定	11
6.2	环境与作用监测	11
6.3	结构响应监测	12
6.4	结构变化监测	13
7	监测系统建设	15
7.1	一般规定	15
7.2	设计要求	15
7.3	实施要求	15
7.4	验收要求	16
7.5	运维要求	17
8	数据管理	18
8.1	一般规定	18
8.2	数据接入	18
8.3	数据存储	19
8.4	数据安全	19

9 数据应用.....	20
9.1 一般规定.....	20
9.2 监测数据分析.....	20
9.3 超限报警.....	21
9.4 检查指引.....	22
9.5 特殊事件应急管理.....	23
9.6 桥梁安全专项评估.....	23
附录 A 监测报告基本格式.....	24
附录 B 监测类别信息.....	27
附录 C 常见飞机荷载桥监测点布置示意表.....	28
标准用词说明.....	30
引用标准名录.....	31

1 总则

1.0.1 为规范和指导民用机场飞机荷载桥梁结构监测工作，统一监测标准和技术要求，保障飞机荷载桥梁运行安全，制定本规范。

【条文说明】目前，国内机场在役飞机荷载桥梁约 80 余座，部分桥梁使用年限已超过 30 年，部分桥梁处于“带病”工作状态，其中，北京首都国际机场滑行东桥因上部结构存在安全隐患已于 2012 年进行了翻建改造。桥梁结构监测目前在公路、铁路、市政等行业中均有较为成熟的应用，本规范规定了飞机荷载桥梁结构监测技术要求，进而建立桥梁运行期的受力状态档案，实时评定桥梁的结构安全状况，确保飞机荷载桥梁运行安全。

1.0.2 本规范适用于民用机场（含军民合用机场的民用部分）新建及在役飞机荷载桥梁的结构监测。飞行区下穿通道的结构监测可参照本规范执行。

【条文说明】飞机荷载桥梁监测宜贯穿桥梁的全生命周期。针对在役飞机荷载桥梁，应结合结构型式、荷载工况、运行环境对桥梁进行结构监测；对新建、改建桥梁，应结合监测目的选择适合的监测方法和手段。

1.0.3 飞机荷载桥梁结构监测提倡采用新技术、新方法、新设备。

1.0.4 飞机荷载桥梁结构监测除应符合本规范的规定外，尚应符合国家和行业现行有关技术标准的规定。

2 术语和定义

2.0.1 飞机荷载桥梁 aircraft bridge

位于机场内，供飞机滑行、起飞、着陆和停放的桥梁。

2.0.2 滑行道桥梁 taxiway bridge

位于机场滑行道、为跨越障碍而修建的构筑物，简称滑行道桥。

2.0.3 飞机荷载桥梁结构监测 aircraft bridge structural monitoring

一种可以对飞机荷载桥梁的关键参数进行连续、自动测量和记录，获取桥梁环境、作用、结构响应与结构变化定量数据，实现桥梁运营状态监测、数据超限报警及安全评估的多学科交叉融合技术。

2.0.4 飞机荷载桥梁结构监测系统 aircraft bridge structural monitoring systems

一种通过网络集成技术将分布在飞机荷载桥梁现场的各类传感器、数据采集与传输、数据处理与管理、数据分析与应用的硬件设备、软件模块及配套设施连接在一起，具有对桥梁设定参数连续监测、自动记录、数据显示、报警评估的功能，辅助桥梁管理和养护决策的电子信息系统。

2.0.5 环境 environmental factors

影响飞机荷载桥梁安全和功能的桥址自然环境因素。

2.0.6 作用 action

施加在飞机荷载桥梁结构上的集中力或分布力和引起结构外加变形或约束变形的原因；前者为直接作用，也称为荷载，后者为间接作用。

2.0.7 结构响应 structural response

由作用引起的飞机荷载桥梁构件、部件、结构的静力或动力响应。

2.0.8 结构变化 structural variation

以飞机荷载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现、结构力学性能发生的相对变化。

2.0.9 超限阈值 alarming threshold

对飞机荷载桥梁环境、作用、结构响应、结构变化、关键结构构件可能出现的各种级别的异常或风险，各监测点数据特征指标所设定的临界状态警戒值。

2.0.10 超限报警 over-limit alarming

监测数据的特征指标达到或超过超限阈值时，系统自动发出相应级别的警报。

征求意见稿

3 基本规定

3.0.1 飞机荷载桥梁运营期应进行结构监测。

3.0.2 飞机荷载桥梁结构监测系统（简称“监测系统”）由硬件、软件和配套工程组成。

3.0.3 飞机荷载桥梁结构监测分为监测系统建设、数据分析与管理、数据应用三个阶段。

3.0.4 应结合桥梁结构形式、上部结构材料性质、桥梁所处环境特点及荷载特性等因素，综合确定监测内容、监测点布设及监测方法，选取合理监测数据开展监测应用。

3.0.5 在正常维护和更换条件下，监测系统硬件、软件的更换与升级应保障监测数据的完整性。预埋在结构内部的传感器使用寿命不宜低于 20 年；附着安装在结构上的非埋入式传感器的使用寿命不应低于 5 年。

3.0.6 飞机荷载桥梁结构监测应出具季度数据分析报告、年度数据分析报告，发生特殊事件时应出具特殊事件数据分析评估报告。报告应按附录 A 规定的格式编写。

4 监测内容

4.1 一般规定

4.1.1 监测内容应结合监测应用目标进行确定。

4.1.2 监测内容包括环境与作用、结构响应、结构变化，并分为应选监测项、可选监测项。

【条文说明】应选监测项是结构安全监测的必选项，也是结构监测的核心部分。可选监测项可为结构健康管理提供必要的监测数据，辅助桥梁结构全生命周期的智慧管养。

4.2 监测内容

4.2.1 环境与作用监测内容应符合表 4.2.1 的规定：

表 4.2.1 环境与作用监测内容

监测类别		监测内容	监测选项
环境	环境温度	桥址区环境温度	●
		主梁内温度	●
	环境湿度	桥址区环境湿度	●
		主梁内湿度*	●
作用	车辆撞击	加速度	○
		视频影像	○
	结构温度	构件温度	●
		桥面铺装温度	○
注：●为应选监测项，○为可选监测项。			
*仅适用于钢桥及钢混组合桥。			

4.2.2 结构响应监测内容应符合表 4.2.2 的规定。

表 4.2.2 结构响应监测内容

监测类别		监测内容	监测选项
结构响应	位移	主梁竖向位移	●
		支座位移	○
		梁端纵向位移	○

		梁端横向位移	○
	应变	主梁关键截面应变	●
	支座反力	支座反力	○
	振动	主梁振动加速度	●
		桥墩振动加速度	○
注：●为应选监测项，○为可选监测项。			

【条文说明】本条规定参照《公路桥梁结构监测技术规范》(JT/T 1037)，主要依据如下：飞机荷载桥梁结构响应监测项主要包括位移、应变、支座反力、振动等。位移监测项主要包括主梁竖向位移、支座位移、梁端纵向位移、梁端横向位移等，通过位移监测数据，可以评估桥梁整体稳定性。应变监测主要包括主梁关键截面应变等，通过应变监测数据可以确定关键截面的应力状态。振动监测项主要包括主梁竖向振动、横向、纵向加速度及桥墩振动加速度等，通过振动监测数据可以判断桥梁是否发生过大的振动，识别桥梁结构频率、振型、阻尼比等动力特性。

4.2.3 结构变化监测内容应符合表 4.2.3 的规定：

表 4.2.3 桥梁结构变化监测内容

监测类别		监测内容	监测选项
结构变化	基础冲刷	基础冲刷深度	○
	桥墩沉降	桥墩竖向位移	○
	裂缝	结构裂缝	○
	腐蚀	墩身、承台氯离子浓度	○
		墩身、承台侵蚀深度	○
		钢结构腐蚀*	○
	螺栓预紧力	高强螺栓预紧力*	○

注：●为应选监测项，○为可选监测项。

*仅适用于钢桥及钢混组合桥。

【条文说明】本条规定参照《公路桥梁结构监测技术规范》(JT/T 1037)，主要依据如下：飞机荷载桥梁结构变化监测主要包括基础冲刷、桥墩沉降、裂缝、腐蚀、螺栓预紧力等。基础冲刷项主要监测基础冲刷深度，可以为评估基础承载力和桥梁稳定性提供依据。裂缝监测主要包括混凝土结构裂缝，通过监测裂缝长度、宽度和扩展速度，可以为桥梁评级提供依

据。腐蚀监测项主要包括墩身和承台的混凝土氯离子浓度、墩身和承台的混凝土侵蚀深度等，得到腐蚀速率、腐蚀深度。

征求意见稿

5 监测点布设

5.1 一般规定

5.1.1 监测点设置应根据桥梁所处环境、结构型式、材料属性及飞机荷载，综合确定监测点的数量和位置。监测点设置应兼顾代表性、经济性，并应满足长期性能监测的要求。

【条文说明】 监测点布设应遵循“技术先进、经济适用、精准预警”的原则。应根据现场调研情况并结合桥梁受力分析结果，合理确定合理的监测位置、数量和安装方式；宜利用尽可能少的传感器，满足对桥梁的监测要求；可合理利用结构的对称性原则，达到减少传感器的目的；宜减少信号的传输距离。长期监测是指在一段较长的时间或在结构整个剩余寿命期间进行的连续监测。

5.1.2 结构响应和结构变化监测的测点宜布置在受力较大、变形较大、易损、影响主要部件安全耐久和结构整体安全的位置以及已有病害和损伤的位置。对损伤劣化严重的构件，应针对性增加监测测点数量。

【条文说明】 飞机荷载桥梁宽度大，且飞机荷载集中，桥梁结构具有明显的空间受力特征，结构响应和结构变化监测点建议通过梁格或实体等精细化有限元分析方法确定极值或关键控制位置，宜考虑结构病害、损伤情况、加固措施等影响，并考虑测点数量冗余，满足系统稳定可靠和升级改造的需要。

5.1.3 横向独立分幅的飞机荷载桥梁监测点宜布置在长期承受飞机荷载的位置。测点布设可参照附录 C。

5.1.4 监测传感器应采用预埋、无损附着式安装方式，不应影响原结构安全。

5.1.5 采集设备与传感器之间应有明确的拓扑关系。数据采集站的布设应满足受环境影响小、结构响应小等原则，合理确定其位置和接入设备数量，提高信噪比和数据质量。

5.1.6 监测点应具备良好的供电、网络等基础条件。供电系统、网络传输系统应优先借助飞机荷载桥梁既有设施，无条件供电时，可采用太阳能供电方式。网络通讯应优先选择光纤接入方式，无条件时，可采用无线网络。

5.1.7 监测点布设施工过程中应采取有效措施，保障人员安全，减少对机场运行的影响。

5.2 环境与作用测点

5.2.1 桥址区环境温度和湿度的监测测点宜布设在桥梁跨中位置，可根据桥梁结构类型、联

长、跨径构造增设监测测点。

5.2.2 对于桥梁构件封闭空间，温度和湿度监测测点应布设于桥梁结构内、外温度或湿度变化较大和对温度、湿度敏感的部位。

5.2.3 车辆撞击监测测点宜布置在有车辆撞击风险的桥梁下部结构的底部。

5.2.4 结构温度监测测点应根据桥梁结构温度场分布特点并结合结构类型、联长、跨径、构件尺寸、铺装体系、日照情况等因素综合确定。宜在主梁铺装层布设温度监测测点。结构温度监测测点宜与应变监测的温度补偿测点协同布设。

5.3 结构响应测点

5.3.1 结构响应监测应根据结构型式选择受力最不利、技术状况较差、损伤缺陷突出的代表性桥跨或断面，桥梁纵向监测测点布置宜按表 5.3.1 确定。

【条文说明】我国飞机荷载桥梁一般采用钢筋混凝土或预应力混凝土结构，也有少数桥梁采用钢结构，常见结构型式有简支梁桥、连续梁桥、连续刚构桥和闭合框架桥。

表 5.3.1 桥梁纵向监测测点布设

监测内容	结构型式	布设位置
主梁竖向位移	简支梁	跨中截面
	连续梁、连续刚构	跨中截面、近 1/4 和 3/4 跨截面、最大正弯矩截面
	闭合框架	各孔跨中截面
梁端纵、横向位移	简支梁	支点截面
	连续梁、连续刚构	边支点截面
主梁关键截面应变	简支梁	跨中截面
	连续梁、连续刚构	跨中截面、中支点截面、近 1/4 和 3/4 跨截面
	闭合框架	各孔跨中截面、中墙及边墙顶截面
支座反力	简支梁	支点截面
	连续梁、连续刚构	中、边支点截面
主梁振动加速度	简支梁、连续梁、连续刚构、闭合框架	跨中截面

5.3.2 结构横向监测测点应结合结构横向受力特点、横向联系方式、飞机轮迹带位置进行布设。

5.3.3 正交异性钢桥面板动态应变监测测点应选择轮迹线对应位置，宜布设在顶板、U肋和横隔板等疲劳热点位置。

5.4 结构变化测点

5.4.1 基础冲刷监测测点布设，应根据基础冲刷风险分析确定桥墩断面和测点位置，必要时也可根据桥梁冲刷专题研究确定。

5.4.2 桥墩沉降监测测点宜布设于墩顶处。

5.4.3 裂缝监测测点应依据技术状况评定、养护维修结果确定测点位置和数量，宜对裂缝宽度和长度变化跟踪观测。

5.4.4 混凝土结构腐蚀监测测点宜布设在墩台水位变动、浪溅区的混凝土保护层内。测点位置、数量可根据氯离子浓度梯度测试要求确定。

5.4.5 高强螺栓状态监测测点位置和数量宜根据检查（测）、技术状况评定结果确定。

6 监测方法

6.1 一般规定

6.1.1 监测方法包括感知方法和数据采集方法，应与桥梁环境与作用、结构响应、结构变化监测内容匹配。

6.1.2 监测仪器设备的技术性能应符合相关标准的规定。应按规定定期进行检定、校准。

6.1.3 监测采样频率应满足采样定理，且满足监测数据分析和应用要求。

6.2 环境与作用监测

6.2.1 环境及结构温度监测宜采用热电偶、热电阻、光纤温度传感器等，传感器量程上限宜超出大气温度年极大值 30℃以上，量程下限宜低于年极小值 20℃以上，最大允许误差小于等于 0.5℃，分辨率小于等于 0.1℃。

6.2.2 环境湿度监测宜采用电阻电容湿度计、氯化锂湿度计、电解湿度计等，传感器量程应为 0~100%RH，最大允许误差小于等于 2%RH。

6.2.3 车辆撞击监测宜采用力平衡式加速度传感器、强震仪，力平衡式加速度传感器量程宜大于±2.0g，灵敏度大于等于 2.5V/g，分辨力小于等于 1×10⁻⁵g，动态范围大于等于 120dB。强震仪技术要求宜符合《数字强震动加速度仪》(DB/T 10) 相关规定。并辅助视频监控，视频图像监测宜采用 IP 网络摄像机，像素应大于等于 200 万，帧率应大于等于 25FPS 应符合《交通信息采集视频交通流检测器》(GB/T 24726) 的相关规定。

6.2.4 环境与作用采样频率应符合表 6.2.4 的规定：

表 6.2.4 环境与作用监测设备采样频率设置要求

监测类别		监测内容	采样频率
环境	环境温度	桥址区环境温度	≥1/600Hz
		主梁内温度	≥1/600Hz
	环境湿度	桥址区环境湿度	≥1/600Hz
		主梁内湿度	≥1/600Hz
作用	车辆撞击	加速度	触发采集
		视频影像	在线:25 FPS

	结构温度	构件温度	$\geq 1/600\text{Hz}$
		桥面铺装温度	$\geq 1/600\text{Hz}$

【条文说明】本条规定参照现行规范《公路桥梁结构监测技术规范》(JT/T 1037), 主要依据如下: 飞机荷载桥梁环境与作用监测一般包括温度监测、湿度监测、车辆撞击、结构温度。温度传感器、湿度传感器应根据监测构件和部位具体情况和要求综合选定。

6.3 结构响应监测

6.3.1 主梁竖向位移监测传感器宜采用激光位移传感器、图像位移传感器等, 传感器量程根据最大高差确定, 最大允许误差不大于 0.1mm。

6.3.2 主梁端部纵横向位移、支座位移监测传感器宜采用激光位移传感器、拉线式位移传感器和磁致伸缩位移传感器等, 最大允许误差小于等于预测最大值的 0.5%。

6.3.3 应变监测传感器宜采用电阻应变传感器、振弦式应变传感器、光纤应变传感器等, 静应变监测可采用振弦式应变传感器、光纤应变传感器, 动应变监测可采用电阻应变传感器、光纤应变传感器等, 量程应大于等于 $1000\mu\epsilon$, 分辨率应小于等于 $1\mu\epsilon$ 。

6.3.4 支座反力监测传感器宜采用激光位移传感器、图像位移传感器、测力支座, 量程和误差应满足桥梁支座受力要求, 位移传感器误差不大于 1mm, 测力支座误差小于等于被测支座竖向承载力的 5%。

6.3.5 结构整体动力特性监测方法宜采用加速度监测方法, 应根据结构整体动力计算分析结果、环境适应性和耐久性 etc 要求选择传感器。

6.3.6 结构响应采样频率应符合表 6.3.6 的规定:

表 6.3.6 结构响应监测设备采样频率设置要求

监测类别		监测内容	采样频率
结构响应	位移	主梁竖向位移	$\geq 1/600\text{Hz}$
		梁端纵向位移	$\geq 1/600\text{Hz}$
		梁端横向位移	$\geq 1/600\text{Hz}$
	应变	主梁关键截面动应变	$\geq 10\text{Hz}$
		主梁关键截面静应变	$\geq 1/600\text{Hz}$
	支座反力	支座反力	$\geq 1\text{Hz}$
	振动	主梁振动加速度	$\geq 20\text{Hz}$
桥墩顶部振动加速度		$\geq 20\text{Hz}$	

【条文说明】本条规定参照现行规范《公路桥梁结构监测技术规范》(JT/T 1037), 主要依据如下: 飞机荷载桥梁结构响应监测一般包括变形监测、位移监测、应变监测、支座反力监测以及结构整体动力特性监测。变形和位移监测传感器宜将安装、调试后监测仪器的初始值作为测量基准值, 监测数据应进行温度修正。应变传感器应根据被测构件的材料和结构特点选择合适的标距和传感器类型。不同传感器类型最高采样频率不同, 振弦式应变传感器只适合低频采样。采用激光位移传感器、图像位移传感器监测竖向位移反应支座反力, 测力支座安装后不应改变桥面标高, 不应改变桥梁结构与支座接触方式和接触面积, 并应具备可更换性。

6.4 结构变化监测

6.4.1 基础冲刷监测应根据桥址处水流速度、含沙量等水文参数以及设计允许冲刷深度综合选定监测设备类型, 可选用声纳传感器, 声纳传感器探头类型和数量应根据被测墩身基础类型、尺寸和水流特点确定。

【条文说明】目前, 我国的飞机荷载桥梁主要是用于跨越道路, 个别桥梁用于跨越水域。深圳宝安国际机场三跑道扩建工程和澳门国际机场的滑行道桥梁为跨越水域的飞机荷载桥梁, 针对桥底涉水的飞机荷载桥梁, 需考虑下部结构冲刷监测。

6.4.2 桥墩沉降监测宜采用在桥梁设置永久观测点并对其定期观测的方法或采用 GNSS 静态观测方法, 永久观测点应安装永久固定金属测标, GNSS 监测宜采用北斗导航技术并配置永久观测基准点。

6.4.3 裂缝监测宜采用自动监测、观测或相结合的方式, 可采用振弦式裂缝传感器、电阻式裂缝传感器等, 量程应大于裂缝宽度的 5 倍, 误差不大于 0.02mm, 分辨率小于等于 0.01mm。

6.4.4 混凝土腐蚀监测宜选用电化学方法, 传感器宜选用沿混凝土保护层深度安装多电极传感器, 监测混凝土保护层氯离子浓度和腐蚀侵蚀深度, 判断钢筋腐蚀状态。钢结构腐蚀监测宜选用电化学监测方法, 判断钢结构腐蚀状态。

6.4.5 高强螺栓预紧力监测宜选用直接测力法或间接测力法, 直接测力法宜采用振弦式或电阻式压力环式传感器, 间接测力法宜选用超声波法或螺栓应变电测法。

6.4.6 结构变化采样频率应符合表 6.4.6 的规定:

表 6.4.6 结构变化监测设备采样频率设置要求

监测类别		监测内容	采样频率
结构变化	基础冲刷	基础冲刷深度	每年 2 次
	桥墩沉降	桥墩竖向位移	$\geq 1/3600\text{Hz}$
	裂缝	结构裂缝	$\geq 10\text{Hz}$
	腐蚀	墩身、承台氯离子浓度	$\geq 1/3600\text{Hz}$
		墩身、承台侵蚀深度	$\geq 1/3600\text{Hz}$
		钢结构腐蚀	$\geq 1/3600\text{Hz}$
	螺栓预紧力	高强螺旋预紧力	$\geq 1\text{Hz}$

【条文说明】本条规定参照现行规范《公路桥梁结构监测技术规范》(JTT 1037)，主要依据如下：飞机荷载桥梁结构变化监测一般包括基础冲刷、桥墩沉降、裂缝、腐蚀以及高强螺栓预紧力监测。基础冲刷监测进行定期检测的方式。光纤光栅解调仪工作温度低于 0℃或者高于 40℃环境，应考虑放置于温和环境中或者空调型室外机柜内。

7 监测系统建设

7.1 一般规定

- 7.1.1** 监测系统应满足机场运行管理需求，安全可靠、先进适用、经济合理。
- 7.1.2** 新建飞机荷载桥梁的监测系统应与土建工程同步设计、实施、验收；在役飞机荷载桥梁的监测系统应结合机场管理需求独立设计、实施和验收。
- 7.1.3** 监测系统硬件及软件应定期维护，确保硬件设备和软件工作正常，数据质量可靠。
- 7.1.4** 监测系统应按照《信息安全技术—网络安全等级保护基本要求》（GB/T 22239）和《民用航空网络安全等级保护基本要求》（MH/T 0076）的相关规定进行系统信息安全保护。

7.2 设计要求

- 7.2.1** 监测系统设计应包括系统硬件设计、系统软件设计和配套工程。
- 7.2.2** 应结合监测布点方案开展系统硬件设计，包括传感器设备选型、采集器设备选型、采集参数设计、网络拓扑设计、采集工控机设计等。
- 1 采集器选型应与传感器设备选型相匹配，且满足采集频率、采集分辨力、数据精度、时钟同步等要求。
 - 2 硬件设备应能够适应安装位置处的环境温度、湿度、振动、电磁环境。
 - 3 采集工控机硬件配置应满足数据采集和存储需求，且支持远程运维和管理。
- 7.2.3** 系统软件设计宜包括数据采集和传输软件、监测平台软件。
- 1 数据采集和传输软件应能够连续稳定运行，应支持采集参数的配置修改，数据本地存储、数据自动续传和实时数据上报功能。
 - 2 桥梁监测平台软件宜选用 B/S 架构，具备高频采样数据图形化动态展示功能，数据相关性、趋势性统计分析功能，当数据超过报警阈值时，宜通过颜色变化、消息推送、声光警报等多种方式进行报警。
- 7.2.4** 系统配套工程应包括预留预埋、线管桥架铺设、供配电及网络通信连接、防雷接地保护安装、设备安装和集中调试。

7.3 实施要求

- 7.3.1** 系统实施不得影响机场正常运行和飞机荷载桥梁的安全耐久。

7.3.2 系统实施宜分为硬件实施、软件实施、系统调试。

7.3.3 硬件实施应包括实施准备、设备安装及防护、线缆铺设。

- 1 实施准备应对安装设备和必要工具进行数量确认、检验验收、统计编号。
- 2 设备安装应按系统设计要求进行安装定位，位置偏差宜小于 3mm，角度偏差宜小于 2°，设备安装完成后应设置固定标识牌并进行相应等级的固定防护。
- 3 通信线缆宜采用线管、桥架等进行保护，并做好标识。

7.3.4 软件实施宜分为软件开发、软件测试和软件部署。

- 1 软件开发宜采用国内成熟可靠的软件开发技术和框架，内部各模块功能独立，且代码编写结构清晰、注释规范、易于维护。
- 2 软件测试应由具备资质的软件测评单位进行测试，测试通过率不得低于 95%。
- 3 软件部署宜参照软件部署指南，过程规范有序，部署完成后应检查各功能完好性。

【条文说明】软件测试报告是描述每个测试用例的测试结果，能够评估软件的质量水平和潜在问题；对于重大功能偏离、缺陷和逻辑错误，应修复完善后再测试，直至 100% 通过。

7.3.5 系统调试宜分为硬件调试和软硬件联合调试。

- 1 硬件调试应按照系统设计要求，核对安装设备编号和安装位置对应关系，设备接线牢固，供电模块输出电压稳定，传感设备工作电压与电流稳定。
- 2 软硬件联合调试应进行数据采集校验，数据通道、数据方向、数据单位、数据精度等与系统设计要求保持一致。
- 3 用户界面软件各项功能正常，系统访问流畅，监测数据准确，数据延迟和数据完整性应满足系统设计要求。

7.4 验收要求

7.4.1 系统验收前应进行不低于 1 个月的试运行，试运行期内应开展系统使用培训、功能完善、设备基准值校正、超限阈值设置等工作。

7.4.2 系统验收应包含系统硬件验收、系统软件验收和资料验收。

7.4.3 系统硬件验收应包括传感设备标准、设备安装质量、设备工作状态验收。

- 1 传感设备的数量、规格型号、技术参数等应与系统设计文件一致，合格证、质保卡、说明书及出厂检验报告等应齐全。
- 2 设备安装位置应与系统设计文件一致，安装姿态牢固、端正，表面平整，应进行必要

的防护措施。

- 3 数据采集设备应处于正常工作状态，机柜内电力线、信号线、元器件等应布线平直、整齐、固定可靠，插头牢固，标识清晰。

7.4.4 系统软件验收应包括数据采集传输软件、桥梁监测平台软件验收。

- 1 数据采集传输软件应正常采集、连续存储、实时转发监测数据。
- 2 监测平台软件应正常展示实时数据、统计分析数据、监测报警数据、静态基础数据等。

7.5 运维要求

7.5.1 应合理制定系统运行维护计划，建立设备维护台账、备品备件清单、列支系统年度维护（含备品备件）费用。

7.5.2 系统运维内容应包含硬件设施维护和系统软件维护。

7.5.3 硬件设施维护宜包括日常检查、定期检查和应急维护。

- 1 日常检查包括传感设备的表观完好性及稳固性检查、监控中心机房计算机设备状态检查，日常检查宜不少于每季度 1 次。
- 2 定期检查包括传感设备与传输线路的接头状态检查，采集站、监控中心内等设备的除尘处理，定期检查宜不少于每半年 1 次。
- 3 在地震、洪水、火灾等特殊事件发生后，应在 24h 之内对硬件设施的完好性、工作状态等进行紧急排查。

7.5.4 系统软件维护宜包括日常检查、定期检查、应急维护。

- 1 日常检查包括各软件模块工作状态检查、实时数据及历史数据检查、超限数据检查确认，日常检查宜每月不少于 1 次。
- 2 定期检查宜包括软件系统时间同步检查、磁盘存储空间检查及清理、数据库异地备份及软件运行日志检查等，定期检查宜每季度不少于 1 次。
- 3 应急维护宜包括软件异常崩溃恢复、功能异常修复和数据异常更正等，当发现软件功能故障时，应在 24h 之内进行确认和处置。

8 数据管理

8.1 一般规定

8.1.1 数据管理包括数据接入、数据存储、数据安全。

8.1.2 监测系统结构化数据包括飞机荷载桥梁基础数据、实时数据、特征值数据、超限报警数据；监测系统非结构化数据宜包括图像、音视频及图纸等。

8.1.3 桥梁基础数据宜包括桥名、结构类型、桥长、跨径组合、荷载等级、材料等。

8.1.4 实时数据宜包含测点编号、采集时间、数值、数据单位等。

8.1.5 特征值数据宜包括最大值、最小值、平均值、均方根值等。

8.1.6 超限报警数据宜记录测点编号、超限级别、超限值、超限时间、报警处置信息等。

8.2 数据接入

8.2.1 监测测点编号应由“机场简称-桥梁编号-监测类别-构件类型-测点编号”组成。



示例：

大兴机场 3 号滑行道桥主梁振动监测项 G01 梁段第 01 个监测点编号为：DXJC-03-VIB-G01-01。

8.2.2 监测数据接入全国飞机荷载桥梁结构监测数据平台（简称“桥梁监测平台”）应满足如下要求：

- 1 监测设备应在桥梁监测平台完成注册，由桥梁监测平台分配身份验证信息，用于设备与桥梁监测平台建立连接时进行身份验证。
- 2 监测设备与桥梁监测平台传输数据，宜采用 MQTT 传输协议，且客户端宜将 Qos 设置为 1。

8.2.3 宜采用运营商虚拟专网或 4G\5G 无线网络等方式实现单桥采集站点与桥梁监测平台的网络通信。

8.2.4 应采用 SSL/TLS 协议、传输通道加密认证、数字证书、完整性校验等方式保证各级数据传输的安全性和完整性。

8.3 数据存储

8.3.1 监测数据存储模式宜分为采集站存储、监控中心机房存储或云存储。

8.3.2 采集站存储应存储原始采样频率的监测数据，宜采用文件存储方式。

8.3.3 单桥站点数据存储设备应选用抗震、防水、耐高温能力强的工业级产品，宜采用 SSD 固态硬盘。

8.3.4 监测数据存储应采用数据库技术，具备存储调度、存储监控、存储可视化管理功能，宜对桥梁结构信息、监测系统信息和监测数据进行分层、分类存储和管理。

8.3.5 监测数据应根据数据类型的不同采用适宜的存储方式，对于周期性采集的大规模时序数据，宜采用时序数据库存储；对于关系型业务数据，宜采用关系型数据库存储；对于非结构化数据宜采用对象存储服务器存储。

8.3.6 采集站数据存储宜采用循环更新存储方式，存储结构化原始数据应不小于 90 天，存储视频图像等非结构化数据应不小于 30 天。

8.3.7 监控中心机房存储结构化原始数据宜不小于 5 年，经处理后的特征值数据、超限数据存储时间宜不小于 20 年。

8.4 数据安全

8.4.1 监测系统应按照《信息安全技术网络安全等级保护基本要求》(GB/T 22239) 要求进行定级、备案、建设、测评、保护。

8.4.2 监测数据应采用机场建设行业统一的安全认证体系，实现系统身份鉴别、接入认证、访问控制和数据传输加密等功能。

8.4.3 监测平台敏感字段或业务数据的加密处理应采用国家密码管理主管部门批准的密码算法和认证核准的密码产品，宜采用数据脱敏算法对敏感信息加密。

8.4.4 监测系统应具备数据权限访问控制功能，用户数据权限应基于最小化原则配置。

8.4.5 监测系统宜采取安全审计措施实现重要事务的操作记录。

9 数据应用

9.1 一般规定

9.1.1 数据应用应包括监测数据分析、超限报警、检查指引、特殊事件应急管理和桥梁安全专项评估等内容。

9.1.2 监测数据分析宜支撑监测应用，可结合养护管理等系统的数据开展。

9.2 监测数据分析

9.2.1 监测数据分析应包括环境和作用、结构响应和结构变化数据分析，并应与桥梁检测数据分析协同、融合。

9.2.2 监测数据分析方法宜采用统计分析、相关性分析、趋势性分析、比对性分析和机器学习等方法。

9.2.3 监测数据分析样本时长应根据监测内容特征和监测应用的需求确定。

9.2.4 环境和作用监测数据分析应符合下列规定：

- 1 温度监测数据分析应包括最高温度、最低温度和最大温差等；
- 2 湿度监测数据分析应包括最大值、平均值及超限持续时间等；
- 3 车辆撞击监测数据分析应包括车辆撞击时间、车辆类型、撞击加速度等；
- 4 结构温度监测数据分析应包括最大值、最小值、最大梯度和年极值等。

9.2.5 结构响应监测数据分析应符合下列规定：

- 1 位移监测数据分析应包括主梁竖向、横向和纵向位移；主梁竖向和横向位移监测数据分析应包括平均值、最大值及变化规律等；梁端纵向位移监测数据分析应包括平均值、最大值、累计值及温度相关性变化规律等；
- 2 主梁关键截面静应变监测数据分析应包括平均值和最大值；动应变监测数据分析宜包括平均值和最大值；
- 3 支座反力监测数据分析宜包括平均值、最大值、最小值及变化规律；
- 4 主梁振动监测数据分析宜包括最大值、均方根值和频谱，宜进行模态参数识别与分析；模态参数识别应剔除环境因素的影响。

9.2.6 结构变化监测数据分析应符合下列规定：

- 1 基础冲刷监测数据宜分析累计冲刷量以及冲刷速率等；

- 2 墩身和承台沉降监测数据宜分析累计沉降量、差异沉降量、沉降变化速率和趋势；
- 3 混凝土结构和钢结构裂缝监测数据宜分析裂缝宽度及变化规律，可分析裂缝与环境、作用和结构构造的相关性等；
- 4 螺栓预紧力监测数据宜分析预紧力变化量和变化趋势等。

9.2.7 对于加固维修后的桥梁监测数据分析，宜符合下列规定：

- 1 宜分析加固板材与原主梁结构的变形协调性；
- 2 宜对比分析桥梁加固前后结构模态参数的变化。

9.2.8 监测数据分析应定期形成分析报告，应采用季度报、年报和特殊事件专项分析报告，宜包括下列内容：

- 1 桥梁结构及监测系统概况；
- 2 监测数据统计分析及结论；
- 3 超限报警分析及结论；
- 4 专项评估及结论；
- 5 结论和建议。

9.3 超限报警

9.3.1 监测系统超限报警功能应符合下列规定：

- 1 系统应具有报警参数设置，报警信息发布和解除功能，宜支持终端界面、声光报警、短信、电子邮件等报警方式；
- 2 报警级别根据超限严重程度和影响范围的差异，分为一级、二级、三级；
- 3 报警信息宜包括报警级别、报警设备编号和位置、报警监测值、报警阈值和报警时间。

9.3.2 各级超限阈值确定符合下列规定：

- 1 超限阈值应根据监测内容历史统计值、变化量值、材料允许值、仿真计算值、设计值和规范容许值设定；
- 2 宜考虑飞机通行管控建议、检查指引、特殊事件应急管理监测应用需求；
- 3 宜根据桥梁维护状况或技术状况等级进行调整。

9.3.3 报警阈值的设定宜符合表 9.3.1 的规定。

表 9.3.1 报警阈值设定

类别	报警内容	超限阈值	报警级别
环境	最高温度、最低温度	达到 1.0 倍设计值	一级

类别	报警内容		超限阈值	报警级别
与作用			达到 1.2 倍设计值	二级
	构件封闭空间内相对湿度	1 个月内相对湿度超过 50%RH 的累计时间占比达到 50%		一级
		1 个月内相对湿度超过 70%RH 的累计时间占比达到 50%		二级
	车辆撞击		出现车辆撞击	二级
结构响应	位移	主梁竖向位移	飞机自重作用下的准静态挠度与设计荷载作用下的挠度之比达到挠度校验系数常值范围上限的 0.7 倍	二级
			飞机自重作用下的准静态挠度与设计荷载作用下的挠度之比大达到挠度校验系数常值范围上限的 1.0 倍或一个月之内出现 10 次以上二级超限	三级
	梁端纵向位移	绝对值达到 0.7 倍设计值		二级
		绝对值达到设计值或一个月之内出现 10 次以上二级超限		三级
	梁端横向位移	达到 0.7 倍设计值		二级
		达到设计值或一个月之内出现 10 次以上二级超限		三级
	关键截面应变		超过历史最大值或超过设计最不利工况计算值	一级
	支座反力	绝对值达到 0.7 倍设计值		二级
		绝对值达到设计值或一个月之内出现 10 次以上二级超限		三级
	主梁振动加速度	10min 加速度均方根达到 31.5mg 且持续时间超过 30min		一级
10min 加速度均方根达到 50mg		二级		
幅值持续增大, 呈现发散特征		三级		
结构变化	基础冲刷深度	达到 0.7 倍设计冲刷深度		二级
		达到设计冲刷深度或一个月之内出现 10 次以上二级超限		三级
	桥墩沉降	桥墩均匀总沉降达到 $20\sqrt{L}$ (mm), 或相邻桥墩总沉降差值达到 $10\sqrt{L}$ (mm)		二级
	裂缝	结构裂缝宽度达到 0.2mm, 但发展速率较慢, 未达到 0.1mm/月		一级
		结构裂缝宽度达到 0.2mm, 且发展速率较快, 超过 0.1mm/月, 或结构裂缝宽度达到 0.3mm		二级
	腐蚀		腐蚀深度达到保护层深度	二级
	螺栓状态	个别螺栓松动		一级
		部分螺栓松动		二级
		较多螺栓发生严重松动或少量脱落		三级

9.3.4 监测数据超过报警阈值时应对超限数据进行研判, 同时核查监测设备的工作状态, 进行系统检查和维护, 并根据研判结果启动报警处置。

9.4 检查指引

9.4.1 一级报警表明部分监测数据接近或者超出桥梁正常使用条件下的界限值, 不会对桥梁的正常使用产生显著影响, 当出现一级报警时采取以下处理方案:

- 1 向维护和管养单位及时发布报警信息；
- 2 对报警提示的监测部件进行使用性能检查和对应处理。

9.4.2 二级报警表明监测数据超过桥梁正常使用条件下的界限值且可能对桥梁的安全性和正常使用产生显著影响，当出现二级报警时采取以下处理方案：

- 1 向维护和管养单位及时发布报警信息；
- 2 对报警传感器所在构件或区域进行特殊检查，查明报警原因，检查内容包括报警构件，相关连接构件等；
- 3 对出现报警构件进行重点监控，以确保构件的安全性。

9.4.3 三级报警表明监测数据接近桥梁结构安全界限值或者严重影响桥梁安全、正常使用，当出现三级报警时采取以下处理方案：

- 1 向维护和管养单位及时发布报警信息，并及时上报监管部门；
- 2 封闭桥梁，禁止飞机通行；
- 3 封闭通行后对桥梁监测数据进行持续跟踪记录，并及时安排专业检修人员和设备进行全桥检查并提交桥梁技术状况评估报告。

9.5 特殊事件应急管理

9.5.1 桥梁在遭受火灾、地震、车辆撞击、积水洪涝等特殊事件时，应进行特殊事件数据分析，辅助应急管理决策，并评估结构技术状况等级，必要时组织专家研判。

9.5.2 特殊事件数据分析报告内容宜包括特殊事件概况、特殊事件前后的数据对比分析结果。

9.5.3 特殊事件的确认和审核应结合监测数据、视频图像、现场检查的结果综合研判。

9.5.4 特殊事件的归档应包括监测数据、桥梁检查和处置情况等。

9.6 桥梁安全专项评估

9.6.1 存在安全风险的桥梁应进行安全专项评估，宜包括飞机荷载、主梁竖向位移、支座位移、梁端纵向位移、桥墩竖向位移、结构裂缝等。

9.6.2 结构安全评估可通过建立有限元模型，结合模型修正和损伤识别技术计算分析结构响应和变化。

附录 A 监测报告基本格式

A.0.1 封面宜采用下列各式。

<p style="text-align: center;">xxx 机场</p> <p style="text-align: center;"><u>xxx 桥结构监测系统数据分析报告</u></p> <p style="text-align: center;">(x 年 x 月)</p> <p style="text-align: center;">监测单位：</p> <p style="text-align: center;">(报告日期)</p>

A.0.2 扉页宜采用下列各式。

xxx 机场

xxx 桥结构监测系统数据分析报告

(x 年 x 月)

项目负责人：(签字)

报告编写人：(签字)

报告审核人：(签字)

报告审定人：(签字)

(监测单位名称及盖章)

(报告日期)

A.0.3 监测报告满足 3.0.6 要求，正文应包括以下内容：

- 1 工程概况；
- 2 监测目的及依据；
- 3 监测系统，包括总体设计原则、系统功能组成、监测内容、监测点布设、监测方法等；
- 4 系统实施及运行，包括监测设备、仪器安装、电力引接、网络传输、质量保障措施等；
- 5 监测数据汇总分析，包括监测数据的整理、统计、分析，超限报警分析及结论、专项评估及结论；
- 6 结构状态评估，包括目前桥梁的评估结果，以及与历年评估结果的对比，分析桥梁状况发展变化情况；
- 7 结论与建议，总结监测数据汇总分析的主要结论，并根据监测结果提出相应的养护、维修或加固建议。

附录 B 监测类别信息

B.0.1 监测类别基本信息定义见表 B.0.1。

表 B.0.1 监测类别基本信息定义表

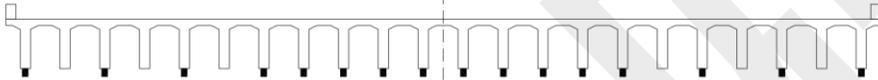
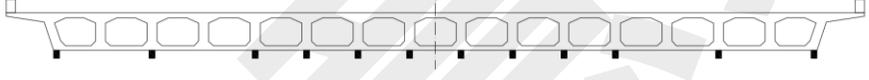
监测类别		监测类别简称	监测内容	数据单位	数据方向
环境作用	环境温度	RTS	桥址区环境温度	摄氏度(°C)	/
			主梁内温度		
	环境湿度	RHS	桥址区环境湿度	百分比(%)	/
			主梁内湿度		
车辆撞击	VID	加速度	m/s ²	/	
		视频影像	/		
结构温度	TMP	混凝土或钢结构构件温度	摄氏度(°C)	/	
结构响应	位移	DIS	主梁竖向位移	毫米 (mm)	下挠为负, 上拱为正
			支座位移		/
			梁端纵向位移		/
			梁端横向位移		/
	应变	RSG	主梁关键截面应变	微应变 (με)	负值为压应变, 正值为拉应变
	支座反力	STF	支座反力	千牛(kN)	/
振动	VIB	主梁振动加速度	m/s ²	/	
		桥墩震动加速度			
结构变化	基础冲刷	SCO	基础冲刷深度	毫米 (mm)	/
	桥墩沉降		桥墩竖向位移	/	/
	裂缝	CRK	结构裂缝	毫米 (mm)	/
	腐蚀	COR	墩身、承台氯离子浓度	千克每立方米 (kg/m ³)	/
			墩身、承台侵蚀深度	毫米 (mm)	
			钢结构腐蚀		
螺栓预紧力	BTF	高强螺栓预紧力	千牛(kN)	/	

附录 C 常见飞机荷载桥监测点布置示意表

表 C.0.1-1 主梁竖向位移（挠度）测点布置示意表

构件名称	主要截面类型	挠度测点布置示意	备注
混凝土主梁	整体式实心板		滑行中线位于主梁横截面对称轴处
	预应力混凝土 T 梁		
	分离式箱梁		
	整体式箱梁		
钢梁	钢箱梁		

表 C.0.1-2 应变测点布置示意表

构件名称	关键截面类型	应变监测点布置示意	备注
混凝土主梁	整体式实心板		滑行中线位于主梁横截面对称轴处
	预应力混凝土 T 梁		
	分离式箱梁		
	整体式箱梁		
钢梁	钢箱梁		

标准用词说明

1 为了便于在执行本规范条文时区别对待，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，在条件许可时首先这样做的用词：

正面词采用“宜”；反面词采用“不宜”。

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 本规范中指定应按其他有关标准、规范执行时，写法为“应符合……的规定”或“应按……的规定执行”。非必须按所指定的标准、规范和其他规定执行时，写法为“可参照……”。

引用标准名录

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期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。

- [1] 《民用机场飞机荷载桥梁设计指南》（MH/T 5063-2023）
- [2] 《民用机场飞机荷载桥梁技术状况评定规程》（MH/T 5074-2023）
- [3] 《民用机场飞机荷载桥梁荷载试验规程》（MH/T 5075-2023）
- [4] 《民用机场飞行区技术标准》（MH 5001-2021）
- [5] 《公路桥梁结构监测技术规范》（JT/T 1037-2022）
- [6] 《公路长大桥梁结构健康监测建设应用指南》（DB63/T 2222-2023）
- [7] 《梁式桥结构监测技术规程》（T/CECS G:031-01-2022）
- [8] 《信息安全技术—网络安全等级保护基本要求》（GB/T 22239-2019）
- [9] 《民用航空网络安全等级保护基本要求》（MH/T 0076-2020）