

# 智能化桥梁工程施工关键技术研究

文 / 陈宝元 济宁市市政园林养护中心

**摘要：**随着数字技术同工程建设领域的不断融合，智能化施工成为桥梁工程高质量发展的主要方式。本文研究智能桥梁施工的关键技术体系，对智能化施工技术进行定义并规定范围，搭建起完整的体系框架。重点阐述智能感知与监测、自动化施工装备和机器人、数字化建模与仿真等核心技术与设备之间的应用关系。从施工管理全流程优化出发，从进度、质量、安全、成本四个方面详细分析智能化管理的实施途径，并指出技术融合、绿色可持续发展、标准化规范化建设三个发展方向。通过系统梳理智能化桥梁施工技术脉络，为行业的技术应用和升级提供借鉴。  
**关键词：**智能化施工；桥梁工程；智能感知；数字孪生；施工管理优化

## 引言

桥梁是交通基础设施的核心，桥梁施工质量与效率，决定交通安全保障能力及通行水平。传统的桥梁施工模式依靠的是人工经验，精度低、风险大、协同不够，不能满足现代大型复杂的桥梁建设需求。近几年来，物联网等新技术的发展促使桥梁施工向智能化转型。智能化施工融合智能感知技术，可以实现准确感知、智能判断和有效控制，在提高施工质量时，既能减少施工风险发生的概率，还能节约工时和工程费用。因此，研究智能化的桥梁施工关键技术体系及管理优化途径，对于提高行业和基建水平有着重要的现实意义。

## 一、智能化桥梁施工关键技术体系概述

### （一）智能化施工技术的定义与范畴

智能化桥梁施工技术是以桥梁工程施工全流程需求为出发点，将现代信息技术与传统桥梁施工技术进行融合，创建“感知-决策-执行-反馈”的闭环管控体系，达成施工全过程的智能化运转。智能化施工技术的主要特征表现为精确感知、自动装备、数字建模、协同管理和智能决策，并形成全生命周期技术链条，其中包括施工前数字化建模和仿真、施工中智能感知监测和自动化作业、施工后运维数据追溯和反馈优化。其目的在于打破传统施工瓶颈，实现高质量、高效率、低风险的可持续发展。

### （二）技术体系框架设计

智能化桥梁施工技术体系框架以分层架构、协同联动为原则，从上到下分为感知层、装备层、建模层、管理层、应用层这五个主要层次，各层次之间通过数据传输网络进行协同。感知层是利用各种传感器组成的数据采集系统；装备层是采用自动化设备、机器人等实现机械化换人、自动化减人；建模层使用BIM、GIS等技术创建数字孪生模型，实现虚拟仿真；管理层通过大数据和人工智能算法搭建全流程智能管控的管理平台；应用

层为各类桥梁提供不同种类的方案。各层次互相支撑，形成完整体系。

## 二、智能化施工核心技术与装备

### （一）智能感知与监测技术

智能感知与监测技术是实现桥梁施工智能化管控的基础，核心在于利用多源传感器融合和数据协同分析，实现施工过程全域、全时、多参数的精准感知。在结构状态感知中，用阵列式光纤光栅传感器搭建“数字索股”系统，在主缆、斜拉索等关键承重构件内部植入传感器阵列，可实时监测构件内部温度、湿度、应变等参数变化，克服了传统点状外部监测的不足，从表面抽查转变为内部全景监测。在施工环境感知中，通过部署环境传感器、毫米波雷达、GNSS定位系统等设备，实时采集桥址区温湿度、风速风向、降雨量、能见度等环境参数，精准捕捉车流信息和施工人员位置信息，为施工安全预警与工序调度提供数据支撑。监测数据经由5G或工业以太网传送到数据处理中心，经过滤波、降噪、融合分析后，生成结构健康状况评估报告和环境风险预警信息，从而实现施工进程的主动感知并进行预判。大跨径悬索桥施工过程中用智能感知系统监控主缆的除湿和应变情况，使除湿系统的运行参数更加准确，提高了主缆的耐久性，降低了其被腐蚀的风险。

### （二）自动化施工装备与机器人

自动化施工装备和机器人是桥梁施工的主要载体从人工转向了机器，其发展趋向集成化、智能化和通用化。在桥梁基础施工领域，GNSS定位和姿态感知技术可以进行自动打桩偏差校正，提高基础施工精度和效率。例如，全球最大的打桩船“二航长青”配备了5000吨级主油缸、GNSS定位和姿态感知技术，可以进行深海厘米级的精准打桩；在桥塔施工领域，第三代一体化智能筑塔机被称为“空中竖向移动工厂”，同时具备辅助调位、自动布料、智能养护等多项功能，可实现桥塔混凝土施工流水线化

作业，结构通用性由原来的 15% 提升到 75%，有效作业空间增加了大约 45%，可适应不同类型的桥塔结构施工。并且使用智能温控系统对混凝土养护环境进行精确调控，能保证混凝土零开裂；在桥面施工领域，沥青路面无人摊铺集群可利用多设备协同控制技术，完成摊铺和碾压工序的自动化作业，根据实时压实度检测的数据来动态调整作业参数，提升桥面铺装质量的均匀性。另外主塔钢筋柔性生产线、智能螺栓施拧机器人、大型桥梁智能激振设备等专用设备的应用，也能覆盖桥梁施工中重要的工序环节，实现桥梁施工全流程的自动化，大幅度降低了人工劳动的强度，提高了施工质量的稳定性。

### （三）数字化建模与仿真技术

以数字孪生为依托，用 BIM 与 GIS 技术建立起和实体桥梁实时映射、虚实同步的数字孪生体，对施工过程进行虚拟化映射和动态管控。在施工前利用 BIM 技术对桥梁结构进行精细建模，对构件的几何信息、材料属性以及施工工艺参数等要素进行全方位的信息采集并储存起来；运用仿真分析来优化施工方案，预测在施工过程

中可能发生的应力集中、碰撞等各类问题。施工过程中，及时获取工程信息和测量数据，更新数值模型，实时反馈到建筑进度、工程结构状态和质量信息中，为建设调度提供可视化支持。通过 BIM 技术，数字化扫描简阳沱江特大桥主拱的每一节拱肋，在吊装前消除尺寸误差和焊接偏差，使用智能监测设备采集提升过程中的吊点高差数据，在数字模型中动态调节提升参数，实现 2400 吨钢结构的大节段钢拱的毫米级提升。数字化仿真技术可以模拟大体积混凝土浇筑、主缆架设等工序的施工过程，在不同的施工工况下模拟结构的力学反应，调节施工顺序和控制参数从而降低施工风险。数字模型不仅是施工过程的管控载体，它所积累的施工数据还可以给桥梁运维阶段提供全生命周期的数据支持，实现施工和运维的协同联动<sup>[1]</sup>。

根据各个应用场景的核心功能和技术指标来确定数字化技术在施工各个阶段的应用重点，并详细列出了数字化建模与仿真技术的主要应用场景和技术要求（如下表），为技术落地实施提供参考。

应用场景	核心功能	技术指标要求	核心技术支撑
施工方案优化	工序仿真、碰撞检测	建模精度 ±2mm，仿真误差 ≤ 5%	BIM 精细化建模、有限元仿真
拱肋虚拟拼装	尺寸误差校验、焊接偏差预判	虚拟拼装精度 ±1mm	3D 激光扫描、BIM 模型融合
施工进度管控	进度动态更新、节点预警	进度更新延迟 ≤ 1h	BIM+GIS 融合、实时数据传输
大体积混凝土温控仿真	温度场模拟、裂缝风险预判	温度预测误差 ≤ 2℃	热传导仿真、智能算法优化

数字化建模与仿真技术的主要应用场景和技术要求表

## 三、智能化桥梁工程施工管理优化

### （一）进度智能管控

进度智能管控把数字化建模与实时数据进行融合，依靠创建“计划-执行-监测-改善”的闭环管理机制，从而达成施工进度的精确把控和动态调整。根据 BIM 技术把施工进度计划分解到各个分部分项工程和构件上，建立进度与构件之间的关系，形成 4D 施工进度模型，实现进度计划的可视化。施工期间，实时采集智能装备运行数据、人员考勤数据、工序完成数据，更新 4D 进度模型，分析对比计划进度与实际进度之间的差异，生成进度偏差分析报告。通过研究智能筑塔机在桥塔施工中的运用实例，发现筑塔机的自动布料速度、养护时长等运行数据能够实时上传到进度管理平台之中，系统可以依据构件浇筑量和设备运行效率，计算工序的完成时间。当进度滞后时，系统能自动分析滞后原因并提出相应的优化建议，如调整作业班次、改善设备参数等。

利用大数据分析技术，以历史施工数据为基础建立进度预测模型，预估后续施工进度，提前发现进度风险。通过分析不同季节、不同天气条件下桥塔施工效率数据，能预估雨季施工可能产生的进度延误问题，提前制定雨季施工预案，及时调整工序，保证按时完成。该技术不但可以提高进度管理的精确度，还能减少人工统计分析的工作量，让进度管理达到智能化、高效化的效果<sup>[2]</sup>。

### （二）质量智能追溯

质量智能追溯依靠创建全流程的质量数据链，达成施工质量的可追溯、可管控、可预警。利用 BIM 技术给每一个构件赋予唯一的身份编码，把构件从原材料进场、加工制作、现场安装到验收合格的全过程质量数据同身份编码关联起来，构建起完整的质量档案。在原材料管理方面，利用 RFID 技术对原材料的产地、规格、检测报告等进行记录，进场时使用智能检测设备对原材料的参数进行自动核验，保证原材料质量合格；在构件加工过

程中,智能生产线的加工参数、检测数据自动上传到质量管理平台,实时监控加工质量,出现加工偏差时系统自动报警并停止作业,直到问题整改完毕;施工现场使用智能螺栓施拧机器人、混凝土智能温控系统等设备,将设备运行数据与质量检测数据实时同步,将螺栓施拧扭矩、混凝土浇筑温度、养护湿度等数据记录在案,实现施工工序质量的实时管控。

以简阳沱江特大桥主拱施工为例,项目采用智能化螺栓施拧系统,给每一颗高强度螺栓分配唯一的编号,在施拧时实时采集并上传施拧扭矩和施工时间数据,在BIM模型中清楚地显示每一个螺栓的位置和拧紧状态,有效地防止漏拧、欠拧、超拧现象。当出现质量问题时,可通过身份编码快速追溯到对应的构件、工序和责任人,找到问题根源,制定整改措施,将质量问题处理结果更新到质量档案中,形成质量管控的闭环。质量智能追溯体系的创建极大地提高了施工质量的控制力度,减少了质量安全隐患<sup>[3]</sup>。

### (三) 安全智能预警

安全智能预警通过对多种监测数据进行融合分析,提前发现施工安全风险并实时预警,以确保快速响应。在施工区设置智能监测设备,实时采集施工人员位置、设备运行状况、结构力学反应、环境参数等相关安全数据,搭建安全风险监测网络。使用人工智能算法对各方面的数据进行综合分析,找到各种安全风险的特征,构建安全风险评估模型,对不同的安全风险进行分级预警。以悬索桥主缆架设施工为例,对主缆张力、吊机工作状态、风速风向等进行监测,风速超过安全阈值或主缆张力出现异常波动时,系统会发出一级预警,自动联动吊机设备会停止作业,提醒施工人员离开危险区域。

在人员安全方面使用UWB定位技术实时追踪施工人员的位置,当工人进入危险区域时,系统会立即发出声光预警并推送预警信息至管理人员手机端,实现对人员安全的实时管控。根据历史安全事故数据和施工环境数据可以构建安全风险预测模型,预测出在不同的施工阶段可能会出现的安全风险,提前做好防控措施。安全智能预警体系把被动的安全处理变为主动的风险预警,能大幅度提高桥梁施工的安全性,降低事故的发生率<sup>[4]</sup>。

### (四) 成本智能管控

成本智能管控在于对施工全流程的数据进行整合,从而达到精准核算、实时监控、改善控制的目的。以BIM模型为依据来建立成本数据库,把工程量清单、材料价格、人工费、设备租赁费等成本信息与构件模型进

行链接,形成5D成本模型,从而进行可视化成本管理。在施工过程中,利用智能装备实时采集运行、材料消耗和人工考勤的数据,自动生成实际成本,并同预算成本进行比对,生成成本偏差报告,找到成本超支或者节约的重要环节。以BIM技术在材料管理中的应用为例,采用模型精确计算材料用量、制定出材料采购计划,避免浪费材料;在施工阶段实时监控材料消耗情况,一旦发现材料超支,就通过系统的自动预警来查找原因并采取相应的对策。

大型桥梁钢箱梁施工时,用5D成本模型实时监控钢箱梁加工、运输、安装的全过程成本,对比不同的施工方案成本差异,优化施工方案,降低成本支出。利用大数据分析技术,可以依据历史成本数据建立成本预测模型,预测施工阶段的成本走向,从而提早做出成本控制策略的改变。成本智能管控能提高成本管理的精确度和效率,达到成本动态管控的目的,为项目成本优化提供数据支撑<sup>[5]</sup>。

### 结语

随着交通基础设施建设的高质量发展,对智能化桥梁工程施工关键技术体系的研究和实践具有重大意义。智能感知与监测、自动化施工装备、数字化建模与仿真等技术深度融合,有助于施工管理在进度、质量、安全、成本等各方面的智能化升级,共同形成桥梁工程智能化施工的新局面。该体系既是对传统施工瓶颈的一种突破,又是对桥梁工程精准化、高效化、安全化、绿色化的一种推动,给交通基础设施的可持续发展注入强劲动力。

### 参考文献

- [1] 王波. 某公路桥梁工程施工关键技术[J]. 交通世界, 2025(32): 181-183.
- [2] 敬子文. 高速公路桥梁工程中关键施工技术研究[J]. 科学技术创新, 2025(7): 112-115.
- [3] 段光浩. 公路施工中智能化监测技术的应用研究[J]. 智能建筑与工程机械, 2025, 7(10): 93-95.
- [4] 涂晓倩. 市政桥梁工程的关键施工技术[J]. 汽车画刊, 2024, (12): 153-155.
- [5] 李军伟. 高速公路桥梁工程关键施工技术及施工方案优化研究[J]. 中国住宅设施, 2025, (05): 215-217.

作者简介: 陈宝元, 1977年7月, 男, 汉, 山东省邹城市人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 公路与桥梁工程