

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.207



桥梁施工监控 2020 年度研究进展

杨永清, 高玉峰, 黄胜前, 吴斌斌

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:桥梁施工监控是桥梁施工技术的重要组成部分和确保桥梁施工质量的关键,也是桥梁建设的安全保证,已成为桥梁工程领域研究的重要内容。通过文献调研的方式,以“施工控制/监测/监控”“施工控制理论/方法”“施工监测系统”“智能监测”等为关键词,在 Web of Science、Science Direct 及中国知网上搜索、整理了 2020 年度发表的 60 余篇科研论文,主要对学者们在桥梁施工控制理论方法、施工控制参数识别和状态预测、桥梁施工监测系统与智能监测等方面取得的研究进展进行了归纳、梳理和总结,并对今后桥梁施工控制研究的热点进行了展望。

关键词:桥梁;施工监控;施工控制理论方法;施工监测系统;智能监测

中图分类号:U445 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)01-0070-09

State-of-the-art review of bridge construction monitoring in 2020

YANG Yongqing, GAO Yufeng, HUANG Shengqian, WU Binbin

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Bridge construction monitoring is an important part of bridge construction technology and the key to ensure the quality of bridge construction, as well as the safety guarantee of bridge construction, has become an important content of research in the field of bridge engineering. By means of literature research, with the keywords of "construction control/monitoring", "construction control theory/method", "construction monitoring system" and "intelligent monitoring", more than 60 scientific research papers published in 2020 were searched and sorted on Web of Science, Science Direct and CNKI. This paper mainly summarized the research progress of domestic and foreign scholars in the aspects of bridge construction control theory, construction control parameter identification and state prediction, bridge construction monitoring system and intelligent monitoring, and the hot spots of bridge construction control research in the future were prospected.

Keywords: bridge; construction monitoring; theory and method of construction control; construction monitoring system; intelligent monitoring

桥梁施工监控以设计成桥状态为实现目标,在整个施工过程中,通过实时监测结构的实际状态,获得结构实际状态与理想状态之间的偏差,运用现代控制理论方法,对引起误差的参数进行识别、调整,并对结构状态进行预测,使桥梁施工状态最大限度地接近理想状态,从而保证施工过程中结构安全、最终成桥结构逼近理想成桥状态。

随着计算机与物联网技术的发展、施工控制理论的完善以及新型高强材料的广泛应用,桥梁施工监控技术正朝着主要针对结构体系复杂的大跨桥梁,贯穿设计建造施工和长期运营维护全生命周期,以高精度、多维化和智能化等为目标的方向发展。传统的施工控制理论方法不断遇到新的挑战,

对未来桥梁施工控制理论研究与工程应用提出了更高要求。研究以几何控制为核心的全过程自适应控制系统,针对特殊大跨桥梁显著的多维非线性效应,发展改善基于全时空考虑多影响因素的数值计算方法;研究现有桥梁施工控制理论方法在超大跨度缆索承重桥梁中的适应性;开发超高索塔结构、异形空间结构和超长拉索等结构状态参数监测技术;针对多拉索结构体系发展快速精准的调索方法;结合 BIM 等技术辅助设计和施工,发展提高施工效率和施工控制精度的工艺技术方法;针对复杂大型桥梁结构,开发自动无线监测系统和智能监测系统;开发考虑结构材料、环境和目标荷载作用效应,采用物理力学分析模型和大数据预测分析模型相结

收稿日期:2021-07-25

作者简介:杨永清(1965-),男,博士,教授,主要从事桥梁结构行为研究,E-mail:yangyongqingx@swjtu.edu.cn。

高玉峰(通信作者),男,博士,高级工程师,E-mail:gaoyufeng@jdjc.net。

合的预测控制方法^[1]。

对 60 余篇论文中涉及的桥型进行统计,发现 2020 年度桥梁施工监控研究的桥型主要为大跨径缆索承重桥梁,其中斜拉桥最多,占比达到 40% 以上。针对斜拉桥,研究对象多集中在异形索塔斜拉桥^[2-3]、非对称独塔斜拉桥^[4-5]、非对称钢混组合斜拉桥^[6]和公铁两用钢桁梁斜拉桥^[7]等;针对悬索桥,研究对象主要为自锚式悬索桥^[8-9]。桥梁施工监控正从只关注主要受力构件和关键截面的内力变形控制到多元化复杂构件(如异形桥塔结构等)的全方位控制;从只关注施工阶段向关注结构全寿命周期的过程转变;从只注重桥梁整体结构的受力安全性控制到更注重各个施工细节的方案优化控制;从传统的以现场人工量测为主的技术手段到自动化、远程化、实时化、智能化的大数据管理理念转变。

1 桥梁施工控制理论方法

几十年来,随着桥梁建设的快速发展,桥梁施工控制的重要性也日益凸显,桥梁施工控制理论技术不断成熟完善,逐步发展形成了以自适应控制理论和无应力状态法^[10]等为代表的理论技术方法。在施工控制方法层面,以现代控制理论为基础,结合桥梁工程实践,桥梁施工控制方法经历了开环控制→闭环控制→自适应控制的发展历程。主要理论应用研究包括施工控制方法、施工过程模拟分析方法、施工控制结构分析方法、其他施工控制技术方法、施工控制参数识别和状态预测这几方面。

1.1 施工控制方法

现代桥梁施工控制方法有开环控制法、闭环控制法和自适应控制法。开环控制法(图 1(a))于 20 世纪 70 年代成形,其强调在施工前根据理想成桥状态求得每个施工阶段主梁的位置和索力,在施工过程中严格把控标高和索力即可,若发现结构状态与设计要求不符时,只能事后调整,该方法是单向、确定性的;闭环控制法(图 1(b))发展于 20 世纪 80 年代,对于结构复杂且跨度较大的桥梁,施工过程中桥梁实际状态与理想状态存在很大差异,且随着施工过程的推进,误差不断累积。若不及时加以修正,将导致成桥时结构内力和线形远远偏离理想成桥状态。在误差出现后就必须及时纠正,而纠正的措施和控制量的大小必须由误差经反馈计算来确定,这就形成了一个闭环反馈控制过程,通常被称为闭环控制法;自适应控制法(图 1(c))发展于 20 世纪 90 年代,该方法在闭环控制基础上引入了参数识别,根据关键参数在施工过程中的识别结果对计算分析模型进行不断修正,从而达到计算模型与实际结构磨合后能够自动适应结构实际力学行为模拟的目的。中小跨径桥梁的施工控制多采用开环控制法和闭环控制法,大跨度缆索承重桥梁的施工控制多采用自适应控制法。

在实际工程应用中,何宇^[11]等通过建立平潭海峡公铁两用大桥首座通航孔桥大小练岛水道桥的三维有限元模型,对施工全过程进行了模拟,总体上基于自适应控制原理进行斜拉桥正装及倒装的分析计算,在对应施工工序开始前作出预

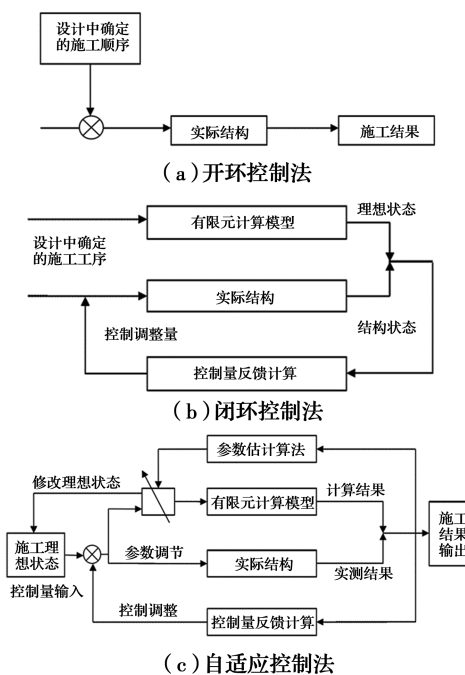


图 1 3 种施工控制方法的基本原理

测,并依据计算结果结合现场监测进行控制。

1.2 施工过程模拟分析方法

施工过程模拟分析方法有正装算法、倒装算法和无应力状态法等。廖贵星等^[12]通过 3D-Bridge 建立了武汉青山长江公路大桥主桥计算模型,基于无应力状态法确定合理目标状态,并对钢箱梁制造、架设、合龙以及斜拉索施工技术进行了研究,考虑斜拉索非线性效应,对主梁线形及索力进行双控。吴月星等^[13]采用 Midas 建立了某大跨混凝土斜拉桥的三维空间模型,基于无应力状态法与正装迭代相结合的计算方法,确定其合理施工状态,明确了考虑收缩徐变效应后无应力正装迭代收敛的本质及相关迭代规律。为保证五峰山长江大桥上部结构施工安全并具有良好的成桥线形、合理的受力状态,冯传宝^[14]采用无应力状态法计算了主缆各索股无应力长度,通过误差参数影响分析确定了索股误差范围。朱连伟等^[15]以广西平南三桥为例,根据力矩平衡法和影响矩阵法原理,通过简化力矩平衡法计算扣索索力初始迭代值,利用带修正常数影响矩阵的正装迭代法对多节段拱桥扣索索力进行了正装迭代计算。针对大跨钢管混凝土拱桥,吴海军^[16]提出了动态修正节段控制点位置的拱肋节段定位方法,同时提出了基于影响矩阵快速计算节段索力及预抬高值的方法,利用无应力状态法进行施工控制,实现成拱线形逼近目标线形。徐洪权^[17]采用无应力状态法和考虑拱肋变形的桥面系线形控制技术进行了某重载铁路中承式大跨钢管混凝土提篮拱桥的施工控制。

1.3 施工控制结构分析方法

施工控制结构分析方法包括有限元法和解析法。自锚式悬索桥的施工过程经历了频繁的体系转换和荷载变化,并伴随着复杂强烈的几何非线性和接触非线性,施工过程中结构状态的准确评估通常需要非线性有限元分析方法进行正

装迭代计算。Wang 等^[18]基于此提出了一种数值迭代与有限元分析相结合的自锚式悬索桥交互式分析框架(图 2),该框架基于无应力装配格式(图 3),避免了对正装迭代计算的依赖,克服了非线性有限元分析方法计算量大、易发散、需要人工干预等缺点,可以稳定、直接地分析任何特定的施工阶

段,且随着施工阶段增多,该算法计算效率高的优势更为显著。将该框架应用于渭河大桥的施工计算,分析结果与现场数据的比较结果表明,对于大型工程结构,该优化算法具有较高的计算精度和收敛效率。

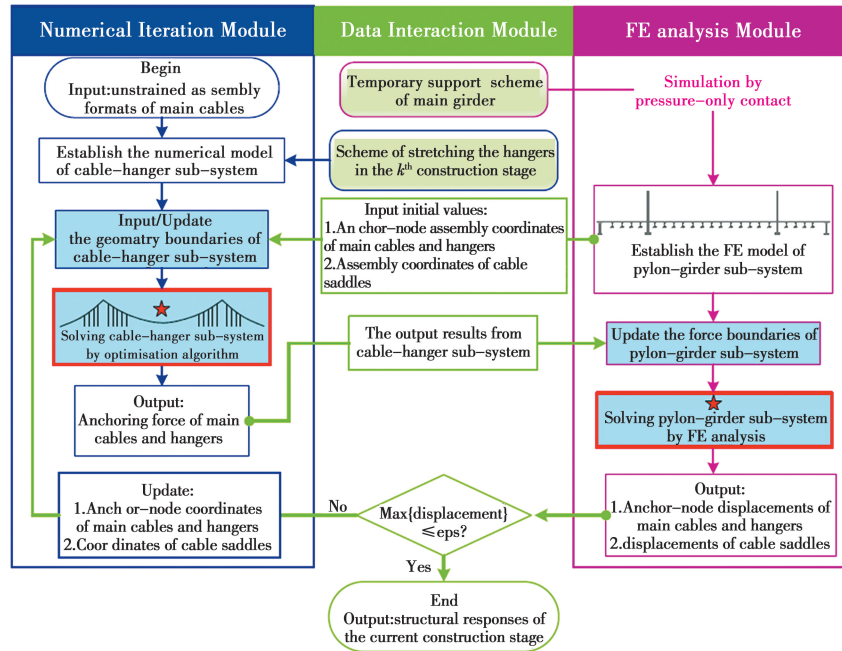


图 2 自锚式悬索桥交互式分析框架^[18]

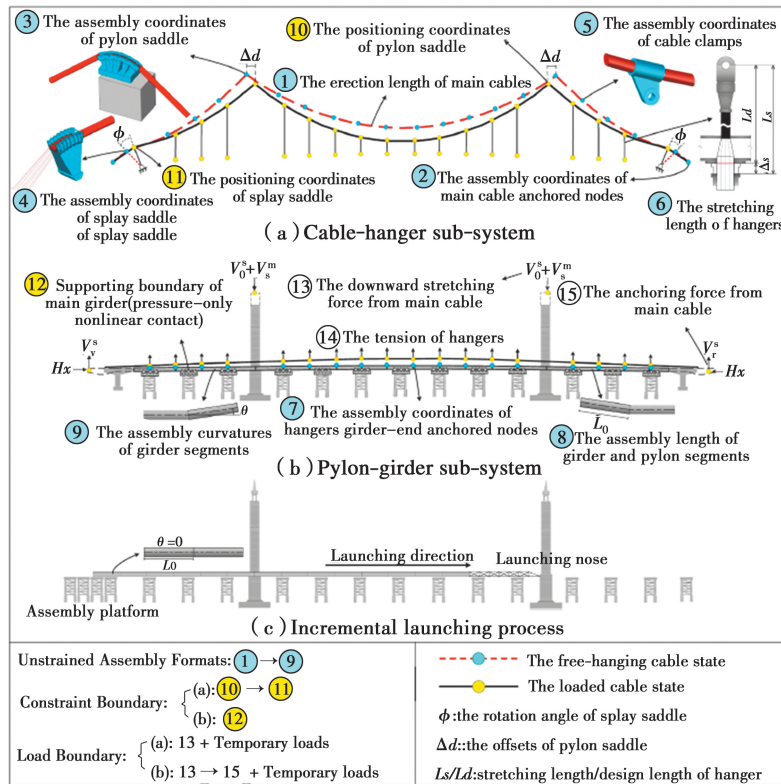


图 3 无应力装配格式、约束边界与荷载^[18]

为高效准确地控制大型复杂桥梁结构的整孔安装精度, Wang 等^[19]以港珠澳大桥连续钢箱梁桥为工程背景,采用基

于网格分离逼近技术的空间强化有限元法,并引入退化单元,以进行连续钢箱梁桥全施工阶段分析。基于结构响应,

计算相邻节段间的端面转角、节段预偏距和温差效应等关键参数以控制整孔安装施工精度,并与传统有限元法及工程实测数据进行对比验证,结果表明,相对于传统有限元法,空间强化有限元法效率和精度更高。

1.4 其他施工控制技术方法

王家林等^[20]基于指定应力法,提出了以部分拉索的非弹性收缩量为优化变量、以全部拉索索力差为目标函数的优化模型,推导了相应的计算公式;用 C++ 语言编制全桥调索计算程序,输出总刚矩阵,在 Matlab 中利用 fminimax 函数进行部分调索优化分析。苑仁安等^[21]以斜拉桥合理成桥状态为目标,提出了一种通过设定索力计算初态并利用数值优化理论确定斜拉桥目标状态索力的调索方法(图 4),并将该方法应用到荆岳铁路公安长江特大桥。其具有快速、高效、精准等优点,可推广至斜拉桥、拱桥等成桥状态和施工过程控制子目标状态的索力确定。为改善大跨钢管拱肋扣索索力常用算法迭代效率低、计算时耗长且忽略温变影响等不足,周倩等^[22]在推导出温变与拱肋位移和索力变化之间关系的基础上,利用 ANSYS 并基于零阶优化法和扣索一次张拉法,改进目前常用的索力优化算法,计入温变影响,并在各子迭代步中对程序的自动搜索实施宏观调控;应用改进算法对某钢管混凝土拱桥进行分段吊装施工控制计算,分析各扣索最优索力和主拱肋松索成拱线形。郭鑫等^[23]在刚性系杆拱桥吊杆张拉施工控制中,基于千斤顶法对频率法中吊杆的有效计算长度进行修正,并联合频率法与千斤顶法对吊杆张拉过程进行严格控制,有效减少吊杆索力调整次数,加快施工进度。

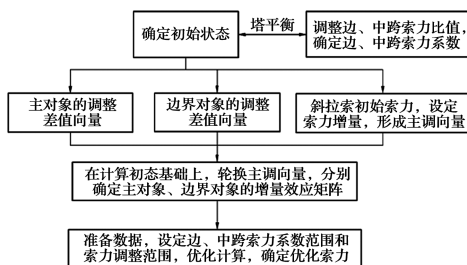


图 4 快速精准调索方法实施步骤流程^[21]

陈刚等^[24]采用车-桥耦合动力分析模型,计入索梁温差影响以进行行车动力仿真分析,联合施工方开展铁路 PC 部分斜拉桥无砟轨道分阶段单元化、动态化线形控制技术研究。陈明等^[25]为提高悬索桥索夹螺杆张拉施工质量与效率,在传统张拉工艺基础上提出了增加螺母转角作为额外辅助控制参量,优先考虑同步张拉工艺,采用超声技术测量螺杆的张拉回缩损失先修正施工荷载再完成张拉,以及适度增加有效稳压持荷时间的索夹螺杆张拉施工控制技术,该技术在五峰山长江大桥中得到了测试验证和应用。王海城等^[26]提出了一种新型自锚式悬索桥基准索股线形控制方法,该方法思路为:主梁一端纵向约束,使温差作用下的主梁伸缩累积发生在自由端。基准索尺寸较小,在夜间容易与环境温度趋于一致,而主梁尺寸较大、散热慢,难以与环境温度趋于一致。当环境温度趋于稳定,梁端约束的一跨基准索线形保持不变,梁端自由的一跨基准索线形将一直发生变化。孙洪斌

等^[27]在宁波三官堂大桥主桥施工控制中,通过设置制造预拱度、凌晨安装、采用角度法控制安装坐标、控制焊缝变形等进行预拱度控制;通过在边墩设置高强拉杆及张拉进行抗倾覆控制;采用温度配切法进行合龙控制。

在援马尔代夫中马友谊大桥主桥混合梁 V 形支腿连续刚构桥施工中,为应对海域强烈的长周期波涌浪作用,采用了大节段钢箱梁顶推合龙工艺^[28],V 形墩采用“斜拉扣挂现浇斜腿+内支架现浇 0 号块”工艺^[29];通过支点反力和导梁应力双控来保证结构安全,并通过调整混凝土梁顶部压重来控制主墩平衡弯矩;钢箱梁采用横向错位工艺合龙,实现了高精度配切合龙。

在商合杭铁路芜湖长江公铁大桥施工控制中,赵成贵^[30]采取斜拉索牵引、张拉、设置配重等一系列控制技术,消除了不平衡荷载对桥塔偏位的影响;崔巍等^[31]在自然环境“零”状态、外部荷载“零”状态下对塔柱变形进行了监测,获取施工误差引起的塔柱变形,用于修正钢锚梁定位坐标,采用相对设站法完成钢锚梁高精度、快速定位。宜宾临港长江公铁两用大桥 3 号主墩承台施工区域地质构造复杂,基础所处区域岩面起伏大,张程然等^[32]提出了采用哑铃形钢-混组合结构围堰施工,并通过 DSC 智能无线数据采集终端对组合围堰的应力和水平位移进行监控。

此外,史晶等^[33]、李忠周等^[34]、李洪坤等^[35]、叶建良^[36]、周彦文等^[37]、张志才^[38]结合有限元分析和现场实际监测分别对武汉青山长江公路大桥、洞庭湖大桥、某三跨预应力混凝土连续梁桥悬臂梁、瓯江北口大桥北引桥槽形钢梁、某大跨钢管混凝土拱桥主拱、某四跨连续刚构拱桥主梁的施工控制技术进行了研究。

总的来说,有关桥梁施工控制理论方法的研究更多的是对现有桥梁施工控制理论方法的应用和改进。施工控制方法方面的研究较少,主要是自适应控制法在大跨径斜拉桥中的应用;在施工过程模拟分析方法方面,主要是采用正装法、无应力状态法和无应力正装迭代法进行大跨斜拉桥、悬索桥和钢拱桥的施工控制;施工控制结构分析方法方面较突出的是针对自锚式悬索桥提出了一种直接、快速、不依赖于正装迭代计算的施工阶段分析方法;在斜拉索索力和大跨钢管拱桥扣索索力调整方面有新的进展,快速精准是索力调整的发展趋势;针对非缆索承重桥梁结构,主要是结合有限元分析与现场实测进行施工控制研究,在线形控制方法方面有较大进展。此外,以下方面值得进一步研究:桥梁全过程几何控制理论方法和监控手段;考虑多维非线性效应的数值计算方法;悬索桥结构分析专用程序系统开发等。

1.5 施工控制参数识别

对于参数识别,首先要确定引起桥梁结构偏差的主要设计参数,其次运用误差分析理论(如最小二乘法、神经网络法等)来分析、识别这些设计参数误差,最后得到设计参数的正确估计值,通过修正参数误差,使桥梁结构的实际状态逼近理想状态。值得注意的是,在施工控制中并不是每个设计参数都同时出现,而且不同的设计参数对桥梁结构状态的影响

程度也不同,因此需要识别对结构状态影响较大的设计参数,即进行参数敏感性分析。

参数识别和敏感性分析方面,郝俊芳^[39]等以某下承式钢桁架拱桥为工程背景,通过建立施工监控技术体系,对各施工阶段下该拱桥关键位置的应变、位移进行了监测,分析在主要吊索张拉、主梁拆架以及成桥阶段,拱肋、主梁、吊索的应力、变形与理论值之间的差值,对施工全过程结构参数进行识别并及时反馈施工信息。郭鑫^[23]等以某刚性系杆拱桥为工程背景,采用单一参数法对可能影响吊杆成桥索力的拱肋抗弯惯性矩、系杆抗弯惯性矩等设计参数进行了敏感性分析。张宪堂等^[40]以某跨海斜拉桥为工程背景,采用 MIDAS Civil 建立全桥空间杆系模型,研究了主梁自重、斜拉索索力、施工临时荷载等结构参数对成桥状态的主梁应力、主梁线形和拉索索力的敏感程度,结果表明,主梁自重和斜拉索二次张拉索力属于敏感性因素。周勇军^[41]等以某预应力混凝土矮塔斜拉桥为工程背景,借助有限元软件研究了主梁重度与刚度、斜拉索初张力与刚度、温差荷载和预应力效应对成桥状态下主梁线形的影响程度,发现正温度梯度、均匀升温、主梁重度和均匀降温对成桥状态主梁线形的影响比较大,并对该类桥梁在施工中关键参数的控制提出了合理化建议。此外,李海鸥等^[42]、张亚海等^[43]、周海涛^[44]和黄杜康^[45]借助有限元软件分别对巴河大桥主梁、某大跨度钢箱梁斜拉桥、某三跨预应力混凝土连续梁桥和某连续刚构桥的有关设计参数进行敏感性分析,分析了各参数变化对结构线形、内力等控制指标的影响。

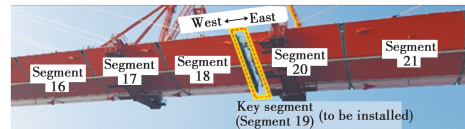
综上所述可以发现,近一年来有不少学者进行了有关桥梁结构参数识别和参数敏感性分析的研究,但大多数都是借助有限元分析软件研究关键设计参数对结构内力、线形等控制指标的影响,研究方法并无突破和较大发展。

1.6 施工控制状态预测

在桥梁结构施工过程中,可根据当前施工阶段的结构状态进行正装计算至成桥状态,预告后续施工可能出现的应力和变形状态,即结构的状态预测。桥梁施工控制中状态预测的方法主要有卡尔曼滤波法、灰色系统理论法和最小二乘法。

Kim 等^[46]提出了一种基于地面激光扫描仪(TLS)的斜拉桥快速施工方法(如图 5),并将其应用于韩国 Cheonsa 大桥的施工过程,利用 TLS 测量两个主梁节段之间的相对距离,加快了关键节段的闭合。首先使用放置在 17 节段内的单个 TLS 同时扫描 17 和 20 节段的横截面;然后自动提取代表两节段横隔板的点云数据,根据 BIMs 设计的三维模型和节段角点位置估计两节段之间的相对位移,再预测 18 节段和 20 节段之间的相对位移;最后确定关键节段(19 节段)的尺寸并预制关键段。与传统的热预应力施工方法相比,该方法缩短了 10 天工期。

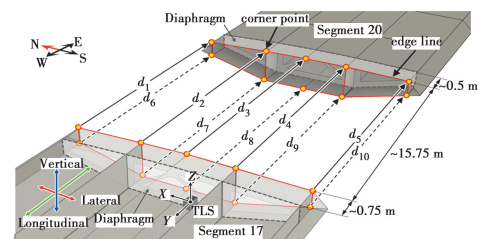
Wang 等^[47]在港珠澳大桥施工控制中应用几何状态转移法,精确预测了大截面钢箱梁的环形接头宽度和支座位置参数,可靠地计算了钢箱梁顶板和底板的制造参数,实现了



(a) Cheonsa 大桥主梁节段示意



(b) 地面激光扫描仪布置在 17 节段



(c) 地面激光扫描测量示意

图 5 基于地面激光扫描仪的斜拉桥快速施工方法^[46]

港珠澳大桥的快速准确安装,证明了利用几何状态转移法可以实现钢箱梁异位安装和多状态转换的几何状态精确控制。胡斌等^[48]基于灰色系统理论建立了某大跨刚构桥悬臂浇筑施工主梁线形抛高值的 GM(1,1) 预测模型,以该桥某节段施工过程为例,利用灰色模型对节段抛高值进行预测,并与实测数据进行对比,分析了该模型的预测精度及其影响因素。刘思勤^[49]基于灰色预测控制理论提出了混合梁斜拉桥型的施工控制预测理论,并将其应用于莲池大街斜拉转体施工中,根据该预测系统所得的控制结果与实际数据吻合度大于 90%。陈骏超^[50]以珠海市洪湾水道主航道桥钢-混凝土叠合梁斜拉桥为工程背景,采用灰色预测系统 GM(1,1) 模型对已有的主梁节段标高实测值及模型理论计算值进行了分析,并预测了未测节段标高值,得出的预测值与理论值相差仅为 11 mm。黄建波^[51]运用基于 BP 神经网络的参数识别方法对四平东丰路混合梁转体斜拉桥主要结构参数进行了误差识别分析,并修正计算模型,实现实测值和理论值的吻合。马成等^[52]推导了初始缺陷、日照温差荷载和风荷载综合因素影响下的超高墩偏位公式,以此为理论基础与无迹卡尔曼滤波方法相结合,构建了超高墩垂直度偏差预控状态方程,实现了以墩高为基准的墩身立模值预测和修正,形成一种基于无迹卡尔曼滤波的超高墩垂直度预控方法。与传统控制方法相比,该方法使垂直度控制精度提高了 4.5 倍。

综上所述可以看出,施工过程中主梁节段几何状态参数和节段之间相对位移的准确预测可以实现关键节段的精确预制和快速安装,有利于加快桥梁施工进度,缩短工期;在主梁线形、节段标高的预测中,灰色系统理论的应用较多;无迹卡尔曼滤波法的应用解决了超高墩垂直度偏差预控缺乏理论基础的问题,为保障超高墩垂直度提供了一条有效途径。

2 桥梁施工监测系统与智能监测

2.1 桥梁施工监测系统

桥梁施工控制中需根据实际施工情况和控制目标建立完善的施工监测系统,不论何种类型的桥梁,其施工监测系统一般都包括结构设计参数、几何状态、应力状态、动力特性、温度变化的监测。通过施工监测系统跟踪施工过程并获取结构的真实状态,可以修正理论设计参数,保证施工控制预测的可靠性。根据文献检索结果,2020 年度有关桥梁施工监测系统的研究主要集中在以下几方面:自动无线监测系统的开发;振弦式应变传感器和光纤光栅倾角传感器在桥梁结构位移监测中的应用;将全球卫星导航系统实时动态差分监测系统应用于大跨桥梁施工期结构位移的监测。从桥型看,研究集中在大跨度斜拉桥和钢管混凝土拱桥。针对斜拉桥,其高耸桥塔的风振问题日益突出,以往风振控制系统的研究大多针对桥梁结构运营期,有学者对施工期高耸桥塔的风振控制系统也进行了研究。

孙艳鹏等^[53]以某斜拉桥为工程背景,借助传感器系统、数据采集系统、数据通讯和传输系统及监控中心建立了自动无线监测系统(如图 6),实现了施工过程中主梁线形、关键截面应力与索力的实时监测。孙振海等^[54]针对钢管混凝土拱桥施工期人工巡检监测效率低、数据连续性差、容易忽略重要数据信息的局限性,以六律邕江大桥为工程依托,建立了钢管混凝土拱桥施工期环境作用和结构响应的自动化监测系统,实现了对施工控制内容的自动化监测,降低了施工监测的人工成本,提高了施工控制决策的效率。陈金州等^[55]针对传统采集传输数据方法存在的问题,以 GPRS 无线网络与 Internet 相结合作为数据传输与管理通道,采用 B/S 模式可由联网的任一访问机进行软件操作,构建振弦式应变传感器多通道监测系统,实现基于 GPRS 网络的无线监测与实时动态监测,该系统已应用在新建南广铁路西江特大桥的施工监测中。

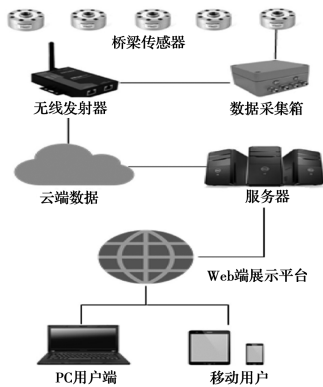


图 6 自动无线监测系统总体实施方案^[53]

全球卫星导航系统实时动态差分技术(GNSS-RTK)具有较高的相对定位精度,能同时进行三维坐标的监测,广泛应用于桥梁结构的运营期监测,但在斜拉桥悬臂施工期位移监测中的应用案例很少。梅秀道等^[56]依托武汉青山长江公路大桥全寿命期监测,为实现大跨斜拉桥施工期关键结构位

移的自动化监测,在桥塔塔顶和桥面吊机顶部布置 GNSS 测点,建立施工期 GNSS-RTK 监测系统。

基于压力变送器的连通管挠度系统(PTDMS)具有量程大、精度高、长期稳定性好等优点,在我国大型桥梁运营期监测中广泛应用,但在桥梁施工期目前未发现有实桥应用的研究。为提高大跨斜拉桥悬臂施工期主梁挠度的监测精度,梅秀道等^[57]从施工期与运营期一体化的全寿命期监测角度出发,将桥梁健康监测中常用的 PTDMS 引入武汉青山长江公路大桥施工期主梁挠度监测中。

解兵林等^[58]以某跨海大桥引桥为工程背景,对其节段梁预制及拼装全过程进行了精细的计算模拟,分析了节段梁预制和拼装线形的主要影响因素;基于 MATLAB 研发短线节段预制拼装(SL-P&A)控制系统对其施工全过程进行控制,实现了施工过程中预制阶段与拼装阶段的衔接以及施工数据与监控数据的互通,加强了数据管理的便利性以及线形控制的实时可视化。

为克服大跨悬臂桥梁施工过程中挠度监测存在的施工工序多、布线困难、数据采集不实时等不足,Zhang 等^[59]设计了一种基于“摆-等强度梁”的光纤布拉格光栅(FBG)倾角传感器,并基于倾角传感器设计了一种桥梁挠度监测系统(如图 7),可以通过倾角变化来测量挠度;并将其用于成昆铁路 2 号线沙巴安宁河大桥悬臂的施工挠度监测,验证了该系统在悬臂梁桥施工监测中的可行性。陈梓驹^[60]提出利用倾角法对斜拉桥索塔变形进行监测,进行了倾角法变形测量的验证性试验,同时对倾角法测量斜拉桥索塔变形的传感器布置方案进行了研究。

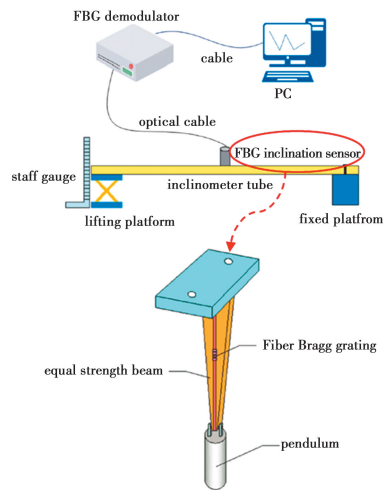


图 7 桥梁挠度监测系统示意^[59]

大跨度桥梁高耸桥塔的风振问题日益突出,这些振动会使工人不适,影响施工精度,导致工期延误,甚至引发事故。调谐质量阻尼器(TMDs)在固有频率调谐到主体结构固有频率时具有良好的风振控制性能,然而桥塔在施工过程中其固有频率不断变化,传统 TMDs 很难控制其风振。基于此,Wang 等^[61]以某高度 370 m 的钢桥塔为背景,建立其不同施工高度的分析模型并进行模态分析,根据模态分析结果设计了一种新型磁流变弹性体变刚度调谐质量阻尼器系统(MRE VSTMD),如图 8 所示。分别对非受控结构、被动控制结构

和半主动控制结构的风荷载响应进行了模拟,结果表明,所提出的 MRE VSTMD 可以使被动调谐质量阻尼器的性能提高 40% 以上,能有效地控制结构的时变固有频率。

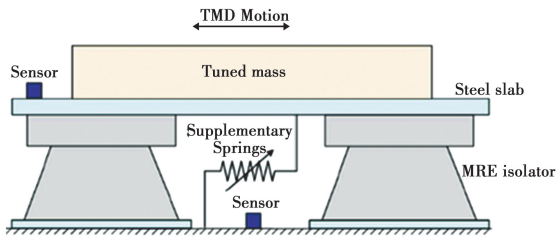


图 8 磁流变弹性体变刚度调谐质量阻尼器系统^[61]

综上,随着北斗卫星导航系统的全面部署,今后可以将 GNSS-RTK 监测系统和 PTDMS 更多地应用于大跨度桥梁施工期间的结构位移监测,形成施工期与运营期一体化的全寿命期监测。为减少施工监测的人工成本,实现监测的实时自动化,今后需针对不同桥型、不同监测目标,建立不同的无线、实时动态监测系统。施工期大跨度桥梁高耸桥塔的风振控制问题也值得进一步研究。

2.2 桥梁智能监测

以往桥梁智能监测大多是和桥梁结构运营期健康监测和安全监测联系起来的,但随着桥梁建设朝着大规模、大跨度方向发展,桥梁施工过程中产生大量的过程数据。为了使施工过程更加标准化,提高施工控制工作的效率和质量,为后续工作提供指导,亟需采用智能化、信息化手段实现对施工全过程的监测。同时,得益于计算机、大数据以及人工智能等技术的蓬勃发展,施工监测数据量大而难以处理分析、信息反馈慢等问题将迎刃而解,桥梁智能监测开始贯穿在桥梁结构全寿命周期。根据文献检索结果,2020 年度有关桥梁智能监测的研究主要有斜拉桥索力的智能监测和铁路连续梁桥智能施工解决方案。

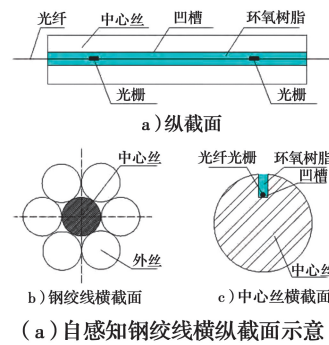
覃荷瑛等^[62]为提高光纤光栅传感器在恶劣应用环境中的成活率以及与被测基体的耦合性,在钢绞线中心丝上设置凹槽,嵌入光纤布拉格光栅(FBG)传感器(如图 9),研制成自感知钢绞线并用于拉索中,实现对拉索索力的智能监测,并应用于衡阳市东洲湘江大桥施工时的索力监测。结果表明,采用凹槽内嵌封装技术的 FBG 传感器成活率高,监测量大且误差小,稳定性良好。

铁路连续梁桥施工过程中产生的误差不断累积,将会导致主梁成桥线形和结构内力与设计严重不符,从而影响桥梁的施工质量和使用寿命。解亚龙等^[63]基于此提出铁路连续梁桥智能施工解决方案,从综合管控和关键环节管控两个方面提出智能化框架体系。经过京张高铁、京雄城际铁路全面验证了按照智能化框架体系进行管控能够有效提升工程质量和施工效率,实现施工过程质量追溯,为铁路连续梁桥施工管理提供可推广借鉴的解决方案。

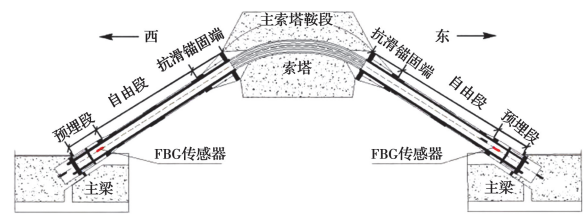
综上,近一年有关桥梁智能监测的研究较少,在以下方面值得进一步研究:针对其他桥型提出不同的智能施工解决方案或智能监测理念;开发多指标、全方位的桥梁智能监测系统,不局限于单一控制指标的智能监测;开发统筹兼顾桥梁施工建造阶段与长期运营维护阶段的桥梁智能监测系统。

2.3 BIM 技术在桥梁施工监测中的应用

桥梁工程属于大型建筑工程,结构种类复杂,各构件体



(a) 自感知钢绞线横纵截面示意



(b) FBG 传感器安装位置

图 9 衡阳市东洲湘江大桥施工时拉索索力的智能监测^[62]

型庞大,这对施工技术和管理人员提出了较高要求。传统施工技术和管理手段的问题之一是桥梁各构件部分数据量大、信息混乱或缺失严重,加大了桥梁后期运维的难度。为适应现代化桥梁建设的需求,实现高效的管理,专家和学者开始将 BIM 技术引入到桥梁建设中。BIM 技术具备着高度的真实性和可模拟性,近年来,基于 BIM 技术的桥梁施工控制已成为研究热点。根据文献检索结果,2020 年度 BIM 技术在桥梁施工监测中的应用主要集中在:利用 BIM 技术实现监测数据的三维可视化;通过二次开发将监测数据与传感器模型关联,实现监测数据的自动预警;将 BIM 技术应用于异形桥塔的施工控制、辅助设计和施工。

Ding 等^[64]采用 BIM 技术对石济客专济南黄河公铁两用特大桥施工过程进行了高效的实时安全管理。基于 BIM 技术,从模型交互、数据集成和安全评估三方面对施工过程进行了严格的安全监控:1)在三维平台上进行三维测点布置和查询,包括三维几何模型、力学解析模型和应力测点;2)对不同结构的测点进行统计管理,将测点的监测数据、应力计算值和相应的试验值进行动态集成,实现监测结果的可视化并在 BIM 平台展示;3)在对各测点进行综合分析和力学分析的基础上,建立测点监测预警分级标准,监测数据集成,自动分级预警,实时评估当前施工的安全状况。

白居易长江大桥索塔高度大,横桥向为水滴形,线形及结构复杂,杨成洪等^[2]利用 BIM 技术、函数法等解决异形桥塔模板配置、钢筋制作安装、应力控制及外形控制等难题。赵亚宁等^[65]以某预应力混凝土连续梁桥为工程依托,借助 BIM 技术直观展示监测仪器布设,辅助决策线缆排布,通过二次开发将应力监测数据与传感器模型关联,实现了应力监测数据的阈值预警,提升了施工监控的效率。李世伟^[66]将连续刚构桥主梁和相应测点按照一定的规则进行编码编号处理,通过建立各构件测点子模型,将施工监测数据输入 BIM 模型,完成了监控信息的储存和集成,同时借助 Python 程序语言实现施工监控预警系统的信息化显示。

3 热点与展望

通过对 2020 年度桥梁施工控制研究进展的综述可以看出,大跨径缆索承重桥梁仍是桥梁施工控制研究的热点桥型,有关桥梁施工控制理论的研究已趋于成熟,文献研究更多的是对现有桥梁施工控制理论方法的应用和改进。延续 2019 年度桥梁施工控制的研究热点方向,并结合当前施工监控技术的发展现状,今后可以从以下几方面开展桥梁施工控制研究。

1)桥梁施工控制理论方法层面:全过程自适应控制理论、无应力状态法在超大跨径缆索承重桥梁中的适应性研究;大跨复杂空间缆索结构的理论控制与工程实践,发展考虑多维非线性效应的数值计算方法,以及悬索桥结构分析专用程序系统的开发;多构件、多元化、全过程施工控制体系的建立。

2)桥梁施工监测系统与智能监测层面:针对不同桥型、不同监测目标,建立不同的无线自动化实时监测系统;施工期间大跨度桥梁高耸桥塔的风振控制系统研究;桥梁监测控制体系中数据自动化管理与预警系统技术研发,结合 BIM 等技术进行二次开发;针对不同桥型提出不同的智能施工解决方案或智能监测理念,开发多指标、全方位的桥梁智能监测系统,不局限于单一控制指标的智能监测;开发贯穿于大跨桥梁结构全寿命周期的一体化施工监测系统与智能监测系统。

参考文献:

- [1] 高玉峰,杨永清,蒲黔辉,等. 桥梁施工监测控制理论及工程应用 2019 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 98-105.
- [2] 刘增武,辛景舟,周水兴,等. 异形索塔斜拉桥参数敏感性分析[J]. 中外公路, 2020, 40(5): 76-80.
- [3] 杨成洪,吴道优,向冠桦. 水滴形多曲率超高斜拉桥索塔线形控制技术[J]. 施工技术, 2020, 49(3): 33-36.
- [4] 李灵. 非对称独塔斜拉桥施工监控[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52(2): 328-333.
- [5] 涂怀成. 大吨位独塔混合梁转体斜拉桥施工控制研究[D]. 北京:北方工业大学, 2020.
- [6] 裴山,陈常松. 嘉鱼长江公路大桥索塔应力及线形施工控制[J]. 中外公路, 2020, 40(3): 146-150.
- [7] 何宇. 大跨度公铁两用钢桁梁斜拉桥施工监控关键技术研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院, 2020.
- [8] 辛俊红,刘亚明,伍星. 某四跨单塔自锚式悬索桥施工控制研究[J]. 公路, 2020, 65(10): 145-150.
- [9] 薛晶. 某独塔自锚式悬索桥施工监控研究[D]. 河北邯郸:河北工程大学, 2020.
- [10] 秦顺全. 桥梁施工控制:无应力状态法理论与实践[M]. 北京:人民交通出版社, 2007.
- [11] 何宇,李永强,乐思韬,等. 平潭海峡大小练岛水道桥施工监控[J]. 铁道建筑, 2020, 60(6): 40-43.
- [12] 廖贵星,严汝辉,胡辉跃,等. 武汉青山长江公路大桥中跨钢箱梁施工控制关键技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(Sup1): 126-132.
- [13] 吴月星,张博恒,周建庭,等. 基于无应力正装迭代法的大跨混凝土斜拉桥合理施工状态分析[J]. 公路工程, 2020, 45(5): 15-20, 72.
- [14] 冯传宝. 五峰山长江大桥上部结构施工控制技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(1): 99-104.
- [15] 朱连伟,邓年春,于孟生,等. 600 m 级拱桥斜拉扣挂施工扣索索力的正装迭代优化算法[J]. 铁道建筑, 2020, 60(12): 18-21.
- [16] 吴海军,何立,王邵锐,等. 基于无应力状态法的大跨钢管混凝土拱桥拱肋线形控制方法[J]. 桥梁建设, 2020, 50(6): 20-26.
- [17] 徐洪权. 重载铁路中承式大跨钢管混凝土提篮拱桥关键技术研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(6): 61-67.
- [18] WANG X M, WANG H, SUN Y, et al. Process-independent construction stage analysis of self-anchored suspension bridges [J]. Automation in Construction, 2020, 117: 103227.
- [19] WANG J F, WU T M, ZHANG J T, et al. Refined analysis and construction parameter calculation for full-span erection of the continuous steel box girder bridge with long cantilevers [J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2020, 21(4): 268-279.
- [20] 王家林,曹珂瑞. 一种基于指定应力的斜拉桥成桥索力调整方法[J]. 公路交通科技, 2020, 37(7): 72-78, 89.
- [21] 苑仁安,秦顺全,肖海珠. 一种斜拉桥目标状态索力快速精确定义的方法[J]. 桥梁建设, 2020, 50(2): 25-30.
- [22] 周倩,周建庭,马虎,等. 钢管拱肋分段吊装扣索一次张拉索力改进算法[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(1): 92-101.
- [23] 郭鑫,颜东煌,袁晟,等. 刚性系杆拱桥吊杆张拉索力施工控制研究[J]. 中外公路, 2020, 40(5): 81-86.
- [24] 陈刚,李伟军. 城际铁路无砟轨道 PC 部分斜拉桥变形及线形控制研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(10): 62-67.
- [25] 陈明,伊建军,钟继卫,等. 悬索桥索夹螺杆张拉施工控制技术研究与应用[J]. 世界桥梁, 2020, 48(3): 74-79.
- [26] 王海城,肖军,郭湘,等. 一种新的自锚式悬索桥基准索股线形控制方法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(7): 60-65.
- [27] 孙洪斌,陈涛. 宁波三官堂大桥施工控制关键技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(5): 119-124.
- [28] 李宁,林树奎,秦明强. 强涌浪海域混合梁刚构桥钢箱梁顶推合龙技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(4): 118-123.
- [29] 郑和晖,李宁,陈少林. 援马尔代夫中马友谊大桥主桥 V 形墩施工关键技术[J]. 世界桥梁, 2020, 48(6): 27-32.
- [30] 赵成贵. 商合杭铁路芜湖长江公铁大桥斜拉索安装控制技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(4): 107-111.
- [31] 崔巍,傅新军,陈相,等. 商合杭铁路芜湖长江公铁大

- 桥2号墩桥塔钢锚梁定位测量技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(2): 110-115.
- [32] 张程然, 祝兵, 张振, 等. 临港长江公铁两用大桥3号墩组合围堰施工技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(4): 101-106.
- [33] 史晶, 梅秀道, 金红岩, 等. 全飘浮体系斜拉桥A形混凝土桥塔施工控制[J]. 桥梁建设, 2020, 50(Sup1): 119-125.
- [34] 李忠周, 朱晓亮, 周俭. 洞庭湖大桥施工监控技术[J]. 施工技术, 2020, 49(15): 48-50.
- [35] 李洪坤, 姚亚东. 呼和浩特市三环路特大桥预应力连续梁桥悬臂施工控制研究[J]. 公路工程, 2020, 45(1): 135-139, 145.
- [36] 叶建良. 瓯江北口大桥北引桥槽形钢梁顶推施工关键技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(Sup2): 115-120.
- [37] 周彦文, 李书兵, 唐剑. 大跨度钢管混凝土拱桥成拱线形控制技术[J]. 施工技术, 2020, 49(2): 55-60, 98.
- [38] 张志才. 崔家营汉江特大桥主梁合龙控制分析[J]. 世界桥梁, 2020, 48(2): 66-70.
- [39] 郝俊芳, 伍星. 某下承式钢桁架拱桥施工控制技术[J]. 公路, 2020, 65(11): 188-193.
- [40] 张宪堂, 余辉, 秦文彬, 等. 钢箱梁斜拉桥结构参数敏感性分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(5): 41-47, 55.
- [41] 周勇军, 吴领领, 刘将, 等. 预应力混凝土矮塔斜拉桥线形敏感参数研究[J]. 公路, 2020, 65(3): 86-91.
- [42] 李海鸥, 宋川, 陈平, 等. 大跨径PC连续刚构桥施工控制参数敏感性分析[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2020, 39(1): 54-59.
- [43] 张亚海, 朱斌, 郭宝圣, 等. 大跨钢箱梁斜拉桥施工期结构参数敏感性分析[J]. 中外公路, 2020, 40(5): 70-75.
- [44] 周海涛. 参数敏感性分析在预应力混凝土连续梁桥施工监控中的应用[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2020.
- [45] 黄杜康. 连续刚构桥合龙顶推施工参数敏感性分析与有限元模型修正[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- [46] KIM D, KWAK Y, SOHN H. Accelerated cable-stayed bridge construction using terrestrial laser scanning [J]. Automation in Construction, 2020, 117: 103269.
- [47] WANG J F, XIANG H W, ZHANG J T, et al. Geometric state transfer method for construction control of a large-segment steel box girder with hoisting installation [J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2020, 21(3): 382-391.
- [48] 胡斌, 李庆择. 灰色预测在大跨径刚构桥施工线形监控中的应用[J]. 铁道建筑, 2020, 60(5): 38-42.
- [49] 刘思勤. 上跨京广线斜拉桥转体稳定性分析及施工监控技术研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2020.
- [50] 陈骏超. 叠合梁斜拉桥施工方案优化与线形施工控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [51] 黄建波. 独塔混合梁转体斜拉桥参数敏感性分析与施工控制研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2020.
- [52] 马成, 时小兵, 张麒, 等. 基于无迹卡尔曼滤波的高墩垂直度偏差预控方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(3): 645-652.
- [53] 孙艳鹏, 史健, 周乐平, 等. 基于自动无线监测系统的斜拉桥转体施工监控[J]. 公路, 2020, 65(5): 87-93.
- [54] 孙振海, 唐睿楷, 解威威, 等. 六律邕江大桥施工期结构响应自动化监测系统[J]. 公路, 2020, 65(7): 199-204.
- [55] 陈金州, 张妮. 基于GPRS网络的振弦式应变桥梁施工监测系统研究[J]. 施工技术, 2020, 49(17): 1-3, 8.
- [56] 梅秀道, 钟继卫, 史晶. GNSS-RTK在大跨斜拉桥施工期位移监测中的应用[J]. 桥梁建设, 2020, 50(4): 36-41.
- [57] 梅秀道, 汤天明, 史晶. 大跨斜拉桥施工期主梁挠度的连通管监测方法研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(Sup1): 14-19.
- [58] 解兵林, 余晓琳, 胡雨, 等. 短线法节段梁预制拼装过程控制技术研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(6): 1453-1461.
- [59] ZHANG C R, GE Y X, HU Z C, et al. Research on deflection monitoring for long span cantilever bridge based on optical fiber sensing [J]. Optical Fiber Technology, 2019, 53: 102035.
- [60] 陈梓驹. 倾角传感器在斜拉桥索塔变形监测中的关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [61] WANG Q, DONG X F, LI L Y, et al. Wind-induced vibration control of a constructing bridge tower with MRE variable stiffness tuned mass damper [J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(4): 045034.
- [62] 覃荷瑛, 林勇, 姜涌, 等. 光纤光栅传感器在斜拉桥索力监测中的应用[J]. 铁道建筑, 2020, 60(10): 51-55.
- [63] 解亚龙, 王万齐, 赵静, 等. 铁路连续梁桥智能施工关键技术研究与应用[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(11): 63-68, 76.
- [64] DING S H, FANG J, ZHANG S L, et al. A construction technique of incremental launching for a continuous steel truss girder bridge with suspension cable stiffening chords [J]. Structural Engineering International, 2021, 31(1): 93-98.
- [65] 赵亚宁, 王浩, 郜辉, 等. 基于BIM的高铁连续梁施工应力监控方案设计及应用[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(11): 68-73.
- [66] 李世伟. 基于BIM的短线预制拼装连续刚构桥施工监控研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.