

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.119

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



桥梁施工监测控制理论及工程应用 2019 年度研究进展

高玉峰, 杨永清, 蒲黔辉, 李晓斌

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:桥梁施工过程监测控制理论与技术研究应用,是桥梁工程质量的基本保证,已成为桥梁工程领域研究的重要内容。以近两年公开发表的有关文献成果为基础,结合团队开展的研究和工程应用实践,对该领域的发展动态进行回顾。从大跨度缆索承重桥梁(包括大跨度斜拉桥、悬索桥)控制理论的发展过程,以及特殊结构专项控制技术方面(包括大型桥梁结构转体过程控制、大型梁段纵向同步顶推过程控制、既有结构加固改造过程特殊力学问题分析与控制等)进行了总体研究进展综述与评析,并对该领域进一步的研究热点进行了展望。

关键词:桥梁;施工控制;施工监测;大跨度桥梁;特殊结构

中图分类号:U446.2 **文献标志码:**R **文章编号:**2096-6717(2020)05-0098-08

State-of-the-art review of the theory of bridge construction monitoring and control and its application in 2019

Gao Yufeng, Yang Yongqing, Pu Qianhui, Li Xiaobin

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

Abstract: Research and application of monitoring and control theory and technology in bridge construction process is the basic guarantee of bridge engineering quality, it has become an important content in the field of bridge engineering. Based on the published literature in recent two years, combined with the research and engineering practice carried out by the team, this paper briefly reviews the development of this field. Review and comment on the overall progress are carried out from the development process of control theory of long-span bridge (including cable-stayed bridge and suspension bridge) and special control technology of special structure, that including the construction process control of large bridge structure turning, the longitudinal synchronous jacking control of large beam section, and the control of special mechanical problems in the process of reinforcement of existing structures. Further research hotspots in this field are prospected.

Keywords: bridge; construction control; construction monitoring; long-span bridge; special structure

收稿日期:2020-04-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0806000)

作者简介:高玉峰(1980-),男,博士,高级工程师,主要从事桥梁施工控制、检测评估、桥梁信息化研究, E-mail: 415154249@qq.com。

蒲黔辉(通信作者),男,博士,教授,博士生导师, E-mail: qhpu@vip.163.com。

Received:2020-04-20

Foundation items:National Key R & D Projects(2017YFC0806000)

Author brief:Gao Yufeng (1980-), PhD, senior engineering, main research interests: bridge construction control, detection and evaluation and bridge informatization, E-mail: 415154249@qq.com.

Pu Qianhui(corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: qhpu@vip.163.com.

桥梁结构施工控制理论方法与技术是中国桥梁工程研究应用较早领域之一,理论研究趋于成熟并转向创新技术应用,针对不同工程条件的应用研究持续开展。笔者以近两年公开发表的有关核心期刊文献成果以及近两年学位论文研究热点为基础,结合团队开展的研究和工程应用实践,对该领域的发展动态进行简要回顾和展望。

桥梁施工过程监测控制理论与技术研究的应用,是桥梁工程尤其是特殊、大型桥梁工程质量的基本保证,已经成为桥梁工程领域研究的重要内容。随着新材料、智能感知及大数据应用等技术的发展,传统的工程控制理论和以模糊数学、灰色理论等为代表的技术方法应用不断遇到新的挑战;在未来桥梁结构工程控制理论与工程应用中,基于工程环境、材料、作用和结构效应等多因素多维智能监测和结构全寿命状态参数空间控制的监控理念正在兴起。

自 20 世纪后半叶到 21 世纪初,桥梁工程控制理论技术,以大跨度斜拉桥、悬索桥为主要应用对象,逐步发展形成了以自适应控制理论和无应力状态分析方法等为代表的较为完善的理论技术方法。从开、闭环控制方法,发展到自适应控制法,特别是 21 世纪以来以秦顺全院士提出的无应力状态控制理论为代表的状态控制理论方法得到长足发展^[1]。

随着桥梁结构理论不断发展完善、新型高强度材料广泛应用,以智慧桥梁为目标、以智能桥梁技术为依托的先进设计造桥理念和工艺技术方法得到快速发展;桥梁工程面临结构体系大型复杂化、功能指标时空系统化趋势,桥梁结构向复合体系结构和更大跨度发展,对桥梁建设提出了日益复杂、快速的工艺技术要求。这都对桥梁工程监测控制理论技术的应用提出了超越传统施工过程的更高要求。桥梁监测控制技术正在朝着以特殊、大跨径桥梁为核心,面向设计建造施工和长期运营维护全过程,以精准化、多维化和智能化等为标志的方向发展。重点在于:研究以几何控制为核心的全过程自适应控制系统,针对特殊大跨度拱系结构桥梁、斜拉桥和悬索桥工艺过程显著的多维非线性效应,发展基于全时空的数值计算方法和状态参数预测方法;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,结构环境风、浪、湿热交换作用超大空间区域、跨时段监测技术;开发适用于现代建造工艺技术的综合结构材料、环境、工艺荷载和目标荷载作用效应,以桥梁成桥后使用阶段状态参数指标导向,采用

物理力学分析模型和大数据预测分析模型相结合的预测控制方法。

桥梁结构监控理念和技术方法正在从只注重施工过程的阶段向更关注结构的全寿命周期过程转变;从只关注主要受力构件的控制到多元化复杂构件的全方位控制;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测量测试为主的技术方法到自动化、智能化的数据管理理念转变。

1 大跨度桥梁施工过程控制理论

1.1 大跨度斜拉桥

斜拉桥施工控制理论方法基本经历了开环控制、闭环控制到自适应控制方法的过程。开环控制只在施工前根据理想的成桥状态求得每个施工阶段主梁的位置和索力,在施工过程中不需要进行参数识别及模型修正,属于确定性的控制方法。

随着桥梁体系的复杂化,施工中存在的如参数误差、施工误差、测试误差等各种因素可能会导致结构状态与理想状态存在偏差。且这些偏差会随着施工的进行累积扩大,若不及时进行修正,将会影响整个施工过程的可靠性及安全性,使得成桥线形及内力与理想状态存在较大的偏差,甚至危及结构安全。因此,在实际施工过程中,可以通过某种特定的最优原则,对出现的误差及时进行修正和控制,使得结构处于一种最优状态。该方法实际上是一种闭环反馈控制过程,通常称为闭环控制法。闭环控制法是在施工状态与理想状态之间出现误差之后及时地进行纠正,而纠正的措施和控制量的大小由误差经反馈计算所决定,该方法并没有分析产生误差的原因,而是将各种误差综合在一起进行处理修正。

自适应控制是在闭环反馈控制的基础上,再加上一个系统辨识过程,整个控制系统就成为自适应控制系统误差识别过程。若将闭环控制看成是一种被动的控制方法,在该基础上发展而来的自适应控制法则可看成是主动的为施工决策提供依据的方法。在施工中结构的实际状态与理想状况之间存在差异的根本原因是有限元模型中的计算参数如材料容重、弹模、截面几何特性与理论值存在差异,因此,在施工过程中,尤其是对重复性较强的分段悬臂施工,通过关键参数的识别,对模型进行修正,经过若干阶段的计算与磨合后,适应结构实际力学状况,从而降低模型误差。该方法的最大的特点是在闭环控制的基础上,在施工中进行参数识别。

开环控制法、闭环控制法在中小跨径桥梁的施工控制中应用效果较好,对于大跨度缆索承重体系桥梁,多采用自适应控制方法。但随着桥梁跨度的不断增大,特大跨度缆索承重体系桥梁的非线性效应愈加突显,传统的自适应控制理论中参数识别与模型修正方法已难以达到理想的效果,因此,需要研究更加合理可行的控制方法。

中铁大桥设计院秦顺全院士于 2007 年提出了无应力状态控制理论^[1]。无应力状态控制法就是在一定的外荷载、结构体系、支承边界条件、单元的无应力长度和无应力曲率组成的结构,其对应的结构内力和位移是唯一的,与结构的形成过程无关。无应力长度控制法是确定分阶段形成桥梁结构过程状态与最终状态关系的方法,即在桥梁安装计算时可由最终状态直接解算施工中间状态。该方法首次建立了分阶段施工桥梁的力学平衡方程,第一次从理论上阐明了桥梁构件单元的无应力状态量是影响分阶段施工桥梁内力和线形的本质因素。无应力状态控制法认为,与一次成形结构相比,只要单元的无应力状态量确定,分阶段成形结构最终内力、位移与结构形成过程无关。该方法将传统的施工控制从安装阶段向制造加工阶段拓展,为全过程控制奠定了基础,通过无应力状态将构件的制造及成桥连接起来,从而获得高质量的施工控制。西南交通大学李乔教授团队早在 2009 年对超大跨斜拉桥的制造及施工控制进行深入研究,提出基于几何控制的全过程自适应控制系统,为大跨度桥梁的施工控制开创了一种新的控制理念^[2-3]。

近两年(2018—2019 年)发表的研究成果表明,对大跨斜拉桥施工控制方面的研究成果较为有限,研究对象除传统斜拉桥桥式外,多集中在多塔斜拉桥、钢桁梁斜拉桥等。谢明志等^[4]以鄂东大桥为背景,根据千米级混合梁斜拉桥施工控制特点及面临的问题和挑战,基于几何控制理论构建了双目标监控体系,并根据双目标控制系统关键问题,重点针对初始无应力状态量的确定、关键构件计算分析、制造浇筑及安装控制、施工期安全稳定等问题进行深入研究,得到了其计算分析及安装控制方法。刘榕等^[5]基于结构参数敏感性分析的摄动原理,通过选择合适的摄动值计算各参数对结构力学性能敏感系数,以温州瓯江特大桥为工程背景研究了多塔矮塔斜拉桥参数变化对结构内力、变形和自振特性的影响大小。余毅等^[6]以贵州平塘特大桥为背景针对三塔双索面叠合梁斜拉桥索塔高、局部结构复杂的

特点从钢-混凝土结合界面滑移的影响,结构非线性影响和混凝土结构配筋影响等几个方面进行了其施工控制过程模型修正研究。郭爱平等^[7]以忠建河特大桥为背景,对主跨为 400 m 的双塔双索面钢桁梁斜拉桥悬臂对称拼装施工过程采用 MIDAS/Civil 软件建立了全桥空间有限元模型,利用无应力状态控制法对该桥桥塔、钢桁梁和斜拉索等进行施工监控。

笔者认为,随着斜拉桥跨度及结构体系的发展,斜拉桥全过程几何控制理论、控制方法和监控手段等也需要有进一步深入研究。在跨度方面,世界范围内多座超大跨度斜拉桥相继开工或规划,大跨度引起的非线性效应需要更先进的计算手段,超长超高索力斜拉索的索力测试需要先进的方法,风、温度、波浪等环境的影响效应更为明显。在结构体系方面,钢混组合索塔的监控、超高性能材料组合截面主梁的制造和安装控制等,与传统的斜拉桥监控显著不同。此外,随着桥梁健康监测系统的进一步普及,斜拉桥施工监控系统与运营监测系统的衔接与融合也需要进一步研究^[8-10]。

1.2 大跨度悬索桥

不同于其他桥型,鉴于大跨度悬索桥主缆受力表现出强烈的几何非线性特点,针对悬索桥的施工过程控制具有其自身的独特性。最早在 20 世纪末,不少学者针对悬索桥的控制计算开展了一些研究工作。

早在 1994 年交通部公路科学研究院结合广东虎门大桥的施工监控,提出了将主缆下料长度、初始安装位置、吊杆无应力长度及主梁初始安装位置作为施工监控的重点内容,并开发了悬索桥施工控制软件 SBCC,通过有限元理论的倒拆和正装的循环,由成桥状态得到空缆或吊装状态。同一时期,同济大学、长沙理工大学、长安大学等一些学者均通过研究开发了专用的悬索桥监控计算程序。这些程序将悬索桥理想状态划分为成桥态、空缆状态和加劲梁安装等阶段,通过成桥态倒退分析(或解析方法)得到悬索部分的初态,再利用初始态形成前进分析的有限元模型进行结构分析。

沈锐利教授团队最早于 1996 年提出了主缆的解析迭代算法^[11],该方法认为主缆的线形和内力只与其上的荷载大小及分布有关,与荷载作用顺序无关。该方法能通过力的平衡和变形相容条件,考虑主缆的几何非线性。之后该团队在此基础上相继考虑了索鞍的位置计算,丝股架设线形的精确计算,主

缆的分段悬链线理论,丝股锚跨力的计算,这些理论都给出了解析解,收敛快,精度高。同时,开发了解析法施工控制软件 BNLAS,该软件可以通过成桥状态迭代出空缆位置即索股下料长度、索鞍预偏量等,也能模拟施工过程^[12]。

其他高校和研究机构也相继开发了自己的悬索桥专用计算程序,悬索桥的结构分析计算也越来越精确。但是仍然有一些公认的难题,比如索夹的模拟、鞍座-主缆切点变化、鞍座顶推的模拟、锚跨索股力的均匀性、加劲梁的刚度分配等等。

最近几年,针对悬索桥向着更加复杂体系发展的需要,中铁大桥设计院科研人员开发了最新的悬索桥施工分析与计算软件 SNAS。该软件具有卓越的处理极限非线性问题的能力,实现了在无应力状态量不变的情况下多个施工步与一次成桥结果的闭合,实现了空间梁单元的收缩徐变与几何非线性的耦合计算。该程序可精确求解空间悬链线索单元多向荷载效应,可实现空间缆悬索桥的找形计算。该程序已应用于诸如武汉鹦鹉洲长江大桥、武汉杨泗港长江大桥、五峰山长江大桥等若干座大型新型结构悬索桥的设计分析与现场控制。据悉,该成果已被鉴定为国际领先水平。

从 2019 年发表的研究成果来看,针对大跨度悬索桥监控工作开展的较深入研究成果主要包括空间索面悬索桥缆形计算、基准索股线形精确调整、及老旧悬索桥拆除工程施工控制等问题。邢德华等^[13]针对空间索面悬索桥的主缆线形计算问题,基于传统的平行索面悬索桥计算理论,为空间索面悬索桥主缆线形提出新的解析算法,并编制了相应的 MATLAB 程序,并在实际工程实施中进行了验证。为实现悬索桥基准索股现场的快速定位与调整,梁志磊等^[14]通过理论推导编制了考虑索鞍切点变化的索股线形计算程序,建立了基于悬链线理论的索股跨中标高影响公式和调索公式,并以某悬索桥为工程背景,进行参数分析,得到索股跨中标高随索股跨度、温度、两端高差变化的影响公式。慕玉坤等^[15]以某悬索桥拆除工程为背景,综合考虑结构与施工作业安全、施工工期与工程造价等影响因素,提出拆除设计控制要素。通过合理构思和有限元仿真分析,研究确定合理可行的拆除方案,并提出拆除施工控制要点。

2 专项控制技术

以上提到的内容是针对大跨度缆索称重体系桥

梁(斜拉桥、悬索桥)施工过程控制的理论发展现状概要。除此之外,近几年大规模的工程建设对桥梁结构现场控制技术也提出了各方面新的需求与挑战,笔者结合实际开展工作情况,列举部分专项控制工作进展供同行参考。如大型桥梁结构转体施工过程实时姿态控制技术、大型梁段纵向同步顶推(或竖向同步顶升)施工过程实时姿态专项控制技术、既有结构加固改造过程特殊力学问题分析与控制等。这些工程应用需求显然与上述缆索承重体系桥梁过程控制相比具有不同的特点,其更多的是体现出专项的技术应用问题。

2.1 桥梁结构转体施工过程控制

目前,中国公路桥梁数量已超过 80 万座,全国铁路运营里程已突破 13 万 km,后续将要建成的跨线桥梁工程必将越来越多地遇到跨越既有运营线路的情况。对于跨线桥的施工多采用转体施工法,转体施工技术既能保证顺利如期完成工程建设,又能保证既有线路的正常运营,减少对既有路线的干扰,从而产生明显的经济效益和社会效益。随着跨越既有线路工程的结构越来越多样复杂,近几年高速铁路通车里程越来越多,这对转体施工过程的安全性、精准性、实时性都提出了很高的要求。

目前,针对传统的转动球铰类型和常规转动系统设计的转体桥梁,有关其计算理论、监测手段及工程实践已开展了不少的研究和总结^[16-17]。但对于极不平衡转体、大跨度柔性结构转体、高墩极小半径转体的监测技术和有关方法研究尚处于探索阶段,对于转体过程实时动态可视化监测预警系统的开发也在尝试,但实际应用效果还不够理想。将来的技术开发热点在于结合市场上新型转动球铰研发,研究与其受力特点相匹配的桥体力学控制思路和方法;针对部分特殊结构形式的转体,考虑转体过程中桥梁结构的动力特性,进一步丰富监控理论和技术。

胡义新等^[18]以郑万铁路跨京广客专 T 构转体桥为依托,研究了 T 构转体桥精细化施工控制技术,通过利用全过程控制理念,明确了转体施工总体控制流程;采用精细化控制方法,分析了转体施工的受力、结构响应以及不平衡重的识别;运用信息化控制手段,促成了转体桥梁质量安全评估方法及相关体系,保障了郑万铁路 T 构转体的安全实施。唐学庆等^[19]针对主跨 200 m 的梁拱组合体系盘锦内湖大桥,介绍了主拱竖向转体施工的总布置、控制过程以及竖转系统、临时系杆的设计,为同类桥梁施工控制提供参考。从 2019 年中国研究生学位论文方

面来看,针对转体桥梁的控制分析仍然是选题的热点,除常规的 T 构转体桥外,多涉及异形桥跨结构转体(如小半径、多支点、高墩结构等)。

近年来,笔者团队主持完成了大型桥梁转体过程控制工作 10 余项,如山西太原卧虎山快速路跨石太客专和石太铁路 2×100 m 立交桥钢箱梁转体施工控制、郑州大河路快速化工程大河路跨铁路预应力混凝土梁转体施工过程监控等。卧虎山快速路立交桥上部结构钢箱梁采用单箱五室截面,扁平弯斜,几何参数影响因素多,转体总吨达 8 750 t、长度达 200 m,为当时中国之最。通过该桥控制实践,提出了改进既有的不平衡力试验方法,显著减少了对千斤顶吨位的需求,提高了现场对结构几何、力学参数控制可靠性和工艺效率。河南省郑州市大河路跨铁路转体桥梁过程控制,整幅 $85 \text{ m} + 147 \text{ m} + 85 \text{ m}$ 预应力混凝土梁转体悬臂长度达 71.75 m、单 T 转体吨位 3.16 万 t,结构转体总吨位达 6.32 万 t,为迄今同类型 T 型刚构双侧转体吨位最大。运用首次开发的实时数字化可视监控技术,监控系统可以实时掌握转体过程中关键受力及姿态参数(墩底应变、梁端位移、空间位置、转动速度、环境风速、牵引力等),大大提高转体施工过程的安全性、可靠性,双 T 构合龙误差控制在 1 cm 以内,保障转体精确就位。

2.2 桥梁顶推施工过程控制

当桥位部分区域因通航或地理环境复杂等情况不能采用落地支架法施工时,除通常采用的悬臂施工法、转体施工法外,主梁顶推施工的方法也具有其独特的优势。主梁顶推施工法是在沿桥梁纵向的台后设立一个预制场地,分段预制梁体,将预制好的节段与已经施工完成的梁体连接成一个整体的整体,然后通过水平千斤顶施力,将梁体向前顶推出预制场地,接着继续预制下一节段梁体并最终将梁体顶推到设计位置。与其它施工方式相比,顶推施工具有以下优势:1) 钢结构焊接质量相比吊装施工在现场焊接更有保证;2) 锚固处理的施工条件也相对比较好;3) 顶推过程中主梁的受力比较明确,桥体标高较容易控制。随着钢材的广泛应用,钢箱梁顶推施工法也将有着广阔的应用空间。

随着设计理论和施工水平的快速发展,目前顶推施工法不再限于传统的连续梁体结构,已扩展到斜拉桥、拱桥等各种不同桥型结构;不仅用于单一的线性结构,还可以扩展到空间曲线构型等复杂结构;不仅适用于简单的截面形式,还可以是板桁组合截面、钢槽型截面、钢-混结合梁等复杂形式。此外,顶

推法施工的顶推距离、顶推成本、顶推精度等方面也一直在进行优化提高,不断完善。随着计算机仿真模拟技术、结构有限元分析理论以及电气控制等相关技术的应用也使得顶推施工技术拥有了新的活力,能够更好地服务于桥梁顶推施工过程的安全与质量控制。

但随着被顶推梁体结构规模的扩大,对多点顶推的同步性提出很高的要求。各点顶推不同步会带来一系列问题,比如临时墩承受的水平荷载过大的问题,顶推过程中梁体横向偏移问题,纵向不到位问题等。这些误差若得不到及时的识别与调整,将不断积累最终会影响到梁体的成桥线形和结构体系的受力安全。如何及时精准地识别各顶推点的非同步性,以及如何实时高效地对梁体进行位置纠偏,还需在理论研究和现场实践中进一步探索。

贺文波^[20]针对跨高铁 800 m 半径 PC 连续箱梁顶推施工开展了相关研究,倪传志等^[21]依托跨汉洪高速公路高架桥提出了大跨度连续钢箱梁桥顶推施工全过程控制方法,从前期准备阶段、制造阶段、安装阶段对施工控制方法及控制结果进行了阐述,重点分析了主梁制造线形、安装线形控制及计算方法。此外,还有部分研究人员^[22-24]针对桥梁整体同步顶升施工过程开展了精细化监测与控制工作。

目前,正在施工的金堂韩滩双岛大桥主桥布置为 $215 \text{ m} + 430 \text{ m} + 215 \text{ m}$,主梁为全断面桁架式横隔板及带斜撑的大悬臂钢箱梁,总重量为 17 000 t。主梁采用顶推施工,顶推跨径达 50 m,单向顶推长度达 430 m,单向最大顶推重量达到 8 500 t。该桥运用“智能多点同步顶推技术”实现 18 台步履式千斤顶的实时同步性监测控制。依据理论模拟、结合扁平钢箱梁空间结构,建立以主梁为核心、包括支持体系结构的结构受力、变形位移与几何状态实时监测系统,并实现动态纠偏与自动预警;同时配合工艺过程通过 BIM 项目系统对施工过程进行实时动态校核反演。

2.3 既有结构改造过程特殊力学问题分析与控制

随着中国经济社会与基础设施建设快速发展,公路网也日益完善,一些早期建设的桥梁技术状况已不能满足行车安全和日益增长的交通量的需要。但由于资金和材料的限制,不可能大量地拆除重建,只能对既有结构提出加固改造措施从而提高其技术状况。在对既有老旧桥梁结构进行加固维修改造设计与施工过程中会遇到很多与新建工程完全不同的

特殊受力分析问题,以及现场施工过程中安全性控制问题。有时会涉及到对既有结构的局部拆除与改造,这不仅在施工过程中会不可避免地产生对主体结构的损伤,而且一旦某些施工顺序(特别是加卸载顺序)处理不当,可能会产生灾难性的后果。因此,近年来大量工程结构改造施工过程中的结构安全性控制问题越来越突出。针对各种不同类型和特点的加固改造措施,有针对性地研究其受力特点,制定相应的安全控制方案将成为该类型工程安全控制技术的核心。

近年来,已开展多座桥梁加固改造过程特殊问题分析与控制,涵盖了多跨连续拱桥拱上结构换填处治、系杆拱桥的既有系杆更换、钢管拱桥的既有吊杆更换、斜拉桥换索工程、中承式拱桥桥面系整体更新改造、城市既有立交桥整体抬升利用等^[25-29]。

2.4 其他

因桥梁施工方法的多样复杂性,桥梁施工过程控制理论与技术工作也同样呈现出各自不同的特点。除本文提到的部分热点问题外,还有很多研究者开展的有意义的工作未能一一列出。近年来一些非常规的桥跨结构(异形结构)特殊施工力学问题越来越被关注,例如,空间异形钢塔斜拉桥^[30]、曲线形独塔无背索斜拉桥^[31]、大跨度曲弦钢桁加劲连续梁^[32]、钢管混凝土异型系杆拱桥等^[33]。有越来越多的研究者尝试将建筑信息模型技术应用于桥梁施工监控过程。

3 热点与展望

目前,关于桥梁施工过程控制理论研究方面已有一定基础,最新文献研究表明,大多集中于各种专题性技术应用研究^[34-35]。结合当前桥梁技术发展的现状,笔者认为下一阶段施工过程控制研究的主要发展方向包括以下几个方面:

1)全过程自适应控制理论、无应力状态法理论在超大跨度缆索承重体系桥梁中的适应性研究。

2)大跨复杂空间缆索结构的理论控制与工程实践。

3)多构件、多元化、全过程控制体系的建立。

4)超大吨位、新型转动系统、特殊结构形式转体监控技术研究;免称重试验转体桥平衡控制技术研究。

5)桥梁结构专项施工过程(如顶推、转体)瞬时姿态实时自动化监测技术。

6)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。

7)桥梁施工过程监控与运营期安全监测一体化技术体系研究。

参考文献:

- [1] 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.
QIN S Q. Bridge construction control: Theory and practice of non-stress state method [M]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese)
- [2] 李乔, 卜一之, 张清华, 等. 大跨度斜拉桥施工全过程及几何控制概论与应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2009.
LI Q, BU Y Z, ZHANG Q H, et al. Introduction and application of whole construction process and geometric control of long span cable stayed bridge [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2009. (in Chinese)
- [3] 李乔, 卜一之, 张清华. 基于几何控制的全过程自适应施工控制系统研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(7): 69-77.
LI Q, BU Y Z, ZHANG Q H. Whole-procedure adaptive construction control system based on geometry control method [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(7): 69-77. (in Chinese)
- [4] 谢明志, 杨永清, 卜一之, 等. 千米级混合梁斜拉桥双目标控制施工监控体系[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(2): 244-252, 321.
XIE M Z, YANG Y Q, BU Y Z, et al. Construction control system for thousand-meter-scale hybrid girder cable-stayed bridge based on double target control [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(2): 244-252, 321. (in Chinese)
- [5] 刘榕, 伍英, 丁延书, 等. 多塔矮塔斜拉桥结构参数敏感性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(5): 1224-1230.
LIU R, WU Y, DING Y S, et al. Analysis of structural parameters of multi-span extra-dosed cable-stayed bridge [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(5): 1224-1230. (in Chinese)
- [6] 余毅, 彭旭民, 唐家睿. 平塘特大桥施工监控关键技术[J]. 公路, 2019, 64(9): 131-135.
YU Y, PENG X M, TANG J R. Key techniques for construction monitoring of Pingtang super large bridge [J]. Highway, 2019, 64(9): 131-135. (in Chinese)
- [7] 郭爱平, 姜阿娟, 张伟山. 恩来高速公路忠建河特大桥

- 施工监控[J]. 桥梁建设, 2018, 48(6): 110-115.
- GUO A P, JIANG A, ZHANG W S. Construction control of Zhongjian river bridge on Enshi-Laifeng expressway [J]. Bridge Construction, 2018, 48(6): 110-115. (in Chinese)
- [8] 杨兴旺. 大跨度斜拉桥施工全过程非线性行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- YANG X W. Research on the nonlinear behavior of long-span cable-stayed bridges considering overall construction process [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [9] ZHANG W M, TIAN G M, ZHAO H X, et al. Analytical methods for the assessment of hanger forces of a suspension bridge based on measured main cable configuration [J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23(7): 1423-1437.
- [10] ZHOU G P, LI A Q, LI J H, et al. Test and numerical investigations on the spatial mechanics characteristics of extra-wide concrete self-anchored suspension bridge during construction [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2019, 15(12): 155014771989156.
- [11] 沈锐利. 悬索桥主缆系统设计及架设计算方法研究[J]. 土木工程学报, 1996, 29(2): 3-9.
- SHEN R L. Calculation methods for design and erection of cable curve of suspension bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 1996, 29(2): 3-9. (in Chinese)
- [12] 唐茂林. 大跨度悬索桥空间几何非线性分析与软件开发[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
- TANG M L. 3D geometric nonlinear analysis of long-span suspension bridge and its software development [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003. (in Chinese)
- [13] 邢德华, 刘化涤. 基于 MATLAB 空间索面自锚式悬索桥主缆成桥线形精确计算[J]. 公路, 2019, 64(6): 131-135.
- XING D H, LIU H D. Accurate calculation of main cable alignment of space cable self-anchored suspension bridge based on MATLAB [J]. Highway, 2019, 64(6): 131-135. (in Chinese)
- [14] 梁志磊, 宋一凡, 闫磊. 悬索桥基准索股定位与调整方法研究[J]. 公路交通科技, 2019, 15(5): 84-90.
- LIANG Z L, SONG Y F, YAN L. Study on positioning and adjusting method of datum strands for suspension bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 15(5): 84-90. (in Chinese)
- [15] 慕玉坤, 李刚, 白鹏翔. 悬索桥拆除方案设计与仿真分析[J]. 公路, 2019, 64(5): 143-145.
- MU Y K, LI G, BAI P X. Design and simulation analysis of suspension bridge demolition scheme [J]. Highway, 2019, 64(5): 143-145. (in Chinese)
- [16] 车晓军, 张谢东, 朱海清. 基于球铰应力差法的 T 构转体桥不平衡力矩预估[J]. 桥梁建设, 2014, 44(4): 57-61.
- CHE X J, ZHANG X D, ZHU H Q. Estimation of unbalancing torque of rotationally erected T-frame bridge based on ball joint stress difference method [J]. Bridge Construction, 2014, 44(4): 57-61. (in Chinese)
- [17] 庞立. 140 m+240 m+140 m 单索面转体斜拉桥施工监控技术研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2015.
- PANG L. Research on swivel construction monitoring and control technology for single cable plane cable-stayed bridge of 140 m + 240 m + 140 m [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2015. (in Chinese)
- [18] 胡义新, 孙艳鹏, 孙远, 等. T 构转体桥精细化施工控制技术[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(4): 108-113.
- HU Y X, SUN Y P, SUN Y, et al. Fine construction control technology for T-shaped swivel bridge [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2019, 36(4): 108-113. (in Chinese)
- [19] 唐学庆, 郭子华. 盘锦内湖大桥主拱转体施工控制[J]. 中外公路, 2018, 38(1): 200-204.
- TANG X Q, GUO Z H. Rotation construction control of main arch of Panjin Lake Bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(1): 200-204. (in Chinese)
- [20] 贺文波. 跨高铁 800 m 半径 PC 连续箱梁顶推施工控制研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(8): 56-61.
- HE W B. Research on the jacking construction control of PC continuous box girder with 800 m radius across high-speed rail [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(8): 56-61. (in Chinese)
- [21] 倪传志, 宋郁民, 王成波. 基于 3G 网络的大跨度连续钢系杆拱桥顶推施工监控研究[J]. 公路, 2018, 63(12): 111-115.
- NI C Z, SONG Y M, WANG C B. Monitoring of incremental launching construction for large span continuous steel arch bridge based on 3G network [J]. Highway, 2018, 63(12): 111-115. (in Chinese)

- [22] 翁方文, 田卿, 田飞. 大跨连续钢箱梁桥顶推施工控制技术[J]. 公路, 2018, 63(3): 89-92.
WENG F W, TIAN Q, TIAN F. Research on controlling technology of incremental launching construction for large-span continuous steel box girders bridge [J]. Highway, 2018, 63 (3): 89-92. (in Chinese)
- [23] 吴毅彬, 许丽华. 城市互通立交桥大吨位同步顶升施工与控制技术[J]. 施工技术, 2017, 46(20): 31-33, 60.
WU Y B, XU L H. Construction and control technology of large tonnage synchronous jacking of urban annular overpass bridge [J]. Construction Technology, 2017, 46(20): 31-33, 60. (in Chinese)
- [24] 谭长建. 多跨连续曲线梁桥整体同步顶升监测分析[J]. 公路, 2017, 62(5): 91-94.
TAN C J. Monitoring analysis of multi-span continuous curved girder bridge on multipoint synchronous lifting [J]. Highway, 2017, 62(5): 91-94. (in Chinese)
- [25] 颜海, 陈亮, 邵长宇, 等. 公铁两用钢桁架桥原位拓宽改建设计关键技术[J]. 桥梁建设, 2019, 49(3): 91-96.
YAN H, CHEN L, SHAO C Y, et al. Key techniques for design of in-situ widening and reconstruction of rail-cum-road steel truss bridge [J]. Bridge Construction, 2019, 49(3): 91-96. (in Chinese)
- [26] 梅秀道, 李湘华, 喻越, 等. 新建江汉四桥拓宽工程斜拉桥施工控制技术[J]. 世界桥梁, 2019, 47(3): 26-31.
MEI X D, LI X H, YU Y, et al. Construction control techniques for newly-built cable-stayed bridge to expand fourth Hanjiang river bridge [J]. World Bridges, 2019, 47(3): 26-31. (in Chinese)
- [27] 王石磊. 拱桥吊杆更换施工监控方法研究[J]. 铁道建筑, 2017, 47(2): 11-15.
WANG S L. Study on monitoring method to replace suspenders of arch bridge [J]. Railway Engineering, 2017, 47(2): 11-15. (in Chinese)
- [28] 荆友璋, 吴广润. 大连北大友谊桥维修工程施工控制[J]. 桥梁建设, 2017, 47(4): 119-123.
JING Y Z, WU G R. Construction control of rehabilitation of Beida friendship bridge in Dalian [J]. Bridge Construction, 2017, 47 (4): 119-123. (in Chinese)
- [29] 王芝兴, 赵少杰, 余江昱. 某公路钢桁梁悬索桥拆除施工关键技术[J]. 世界桥梁, 2018, 46(6): 78-81.
WANG Z X, ZHAO S J, YU J Y. Key demolition techniques for a highway steel truss girder suspension bridge [J]. World Bridges, 2018, 46(6): 78-81. (in Chinese)
- [30] 王石磊. 大型空间异形钢塔斜拉桥施工监控技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2019.
WANG S L. Study on construction control technology of cable stayed bridge with large space warped steel pylons [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2019. (in Chinese)
- [31] 易云焜. 曲线形独塔无背索斜拉桥施工控制关键技术[J]. 桥梁建设, 2018, 48(2): 116-120.
YI Y K. Key techniques for construction control of a curved single pylon cable-stayed bridge without backstays [J]. Bridge Construction, 2018, 48(2): 116-120. (in Chinese)
- [32] 王佳佳. 大跨度曲弦钢桁加劲连续梁桥施工监控[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.
WANG J J. Construction monitoring of long span curved steel truss stiffening continuous beam bridge [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019. (in Chinese)
- [33] 张耀万. 钢管混凝土异型系杆拱桥施工优化及施工控制技术[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
ZHANG Y W. Study on construction optimization and construction control technology of CFST shaped tied arch bridge [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2019. (in Chinese)
- [34] 蔺鹏臻, 刘应龙, 何志刚. 高速铁路连续钢桁柔性拱桥的施工线形控制[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(11): 45-50, 73.
LIN P Z, LIU Y L, HE Z G. Construction alignment control of continuous steel truss girder and flexible arch bridge of high-speed railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36 (11): 45-50, 73. (in Chinese)
- [35] 杨三强, 孙恒飞, 刘娜, 等. 基于位移与内应力监测的钢桥拱肋受力变形[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 740-744.
YANG S Q, SUN H F, LIU N, et al. Forced deformation of arch ribs of steel arch bridge based on displacement and internal stress monitoring [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2019, 40(6): 740-744. (in Chinese)