

# 钢桁架桥预防性养护技术研究

杭京<sup>1</sup>, 杨利斌<sup>2</sup>, 沈建华<sup>1</sup>, 彭卫兵<sup>2\*</sup>

(1. 长兴县运通公路养护中心, 浙江 湖州 313100; 2. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:**浙江省湖州市长兴县属太湖流域,平原河港交织,荡漾密布,航道密集,在过去十多年间建立了一批各种类型的钢桁架桥梁。近年钢桁架桥梁由于其构件数量少、整体自重轻、跨航道施工装配快等优点而得到广泛应用。随着钢桁架桥梁服役年限的增加,部分构件出现不同程度的老化、破损等现象,导致结构承载能力无法满足运营安全需求。为保证钢桁架桥梁在长期循环荷载作用下的行车安全和交通畅通,延长桥梁使用寿命,降低周期养护成本,该文采用无人机遥感技术对长兴某座钢桁架桥梁进行结构外表病害检测,调研结果发现案例桥存在涂层劣化、钢材腐蚀、螺栓断裂脱落等典型病害。基于钢桥存在的病害,分析病害产生原因,开展预防性养护技术研究,提出钢构件防腐涂装的维护、焊缝的检查和处理、杆件弯曲及损伤的处理、伸缩缝和防撞护栏等附属结构的预防性管养维护内容。

**关键词:**钢桁架桥; 典型病害; 锈蚀; 预防性养护

**中图分类号:** U448.21

**文献标志码:** A

预防性养护是指在桥梁结构产生不同程度损伤之前,或微小病害累积过程中采取的养护措施,其目的是防止微小病害累积达到桥梁结构破坏阈值,提高桥梁使用耐久性、延长桥梁使用寿命。

早在20世纪末,AASHTO(美国公路及运输协会)<sup>[1]</sup>首次提出 Preventive Maintenance(预防性养护)在交通基础设施建设中的重要意义;随后 FHWA(美国联邦公路局)<sup>[2-3]</sup>在前者提出的预防性养护重要性基础上,将其概括为:预防性养护是延长交通基础设施使用寿命的一种经济有效的方法。同时首次将已有的部分桥梁养护措施正式纳入预防性养护体系当中。在2011年,FHWA正式制定《桥梁养护指南》,对桥梁的预防性养护给出明文条例:桥梁预防性养护是现有桥梁工程的一项有计划性、且具有高经济效益的管养维护措施。预防性养护可以有效延缓结构损伤,延长桥梁使用寿命,维护或改善桥梁初始功能,但并没有显著提高结构承载能力<sup>[4]</sup>。之后各国纷纷将预防性养护纳入交通基础设施管养条例当中,在管理养护中都取得了显著性的变化<sup>[5]</sup>。2018年,中国交通运输部也首次将预防性养护条文纳入《公路养护工程管理办法》。但是中国目前针对公路提出预防性养护条文,对于桥梁结构的预防性养护内容缺失或不完善<sup>[6]</sup>。一项

研究表明,管养单位在预防性养护投入与周期性养护改建费用相比大大降低<sup>[7]</sup>。综上所述,预防性养护是建立于结构性能退化模型、周期性养护措施和成本效益之上的一种决策方法,重点是在合理的养护时机,确定预防性养护内容、提出养护(维修)对策和给予养护效果后评估。

钢结构桥梁凭借其独特优势快速发展,建桥技术愈加成熟,钢结构桥梁数量与日俱增。参考国内外高龄钢桥病害发展,新一批钢桥采取预防性养护是大势所趋。结合钢结构桥梁特点,目前预防性养护内容主要集中在涂层劣化、钢材锈蚀、螺栓锈蚀脱落以及支座养护等<sup>[8]</sup>。该文结合某钢桁架桥病害实例,提出存在病害的预防性养护措施,给同类钢结构桥梁养护提供一定参考。

## 1 工程概况

某钢桁架桥(图1)为三跨少平联半穿式钢桁架连续梁桥,是长兴境内第一座钢桥,该类型的城市桥梁在中国也少见。桥梁采用(62+100+62)m三跨下承式连续钢桁架结构,设计车速为40 km/h,设计汽车荷载为城-A级,人群荷载为3.5 kN/m<sup>2</sup>。主桁、下平联、

收稿日期:2021-08-24

基金项目:浙江省交通运输厅科技计划项目(编号:2020022);浙江省自然科学基金资助项目(编号:LHY19E090002)

作者简介:杭京,男,大学本科,工程师。E-mail:1173469265@qq.com

\* 通信作者:彭卫兵,男,博士,教授,博士生导师。E-mail:bridge@zjut.edu.cn

横撑和桥门架为杆系结构,桥面板为组合结构。桥梁主体结构采用 Q345qD 钢,辅助结构采用 Q235B。节点采用高强度螺栓连接副连接。钢结构外表面涂装采用铁路第 7 涂装体系。结构图见图 2、3。



图 1 钢桁架桥上部结构

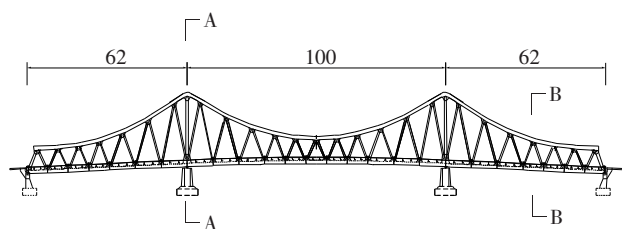


图 2 钢桁架桥立面图(单位:m)

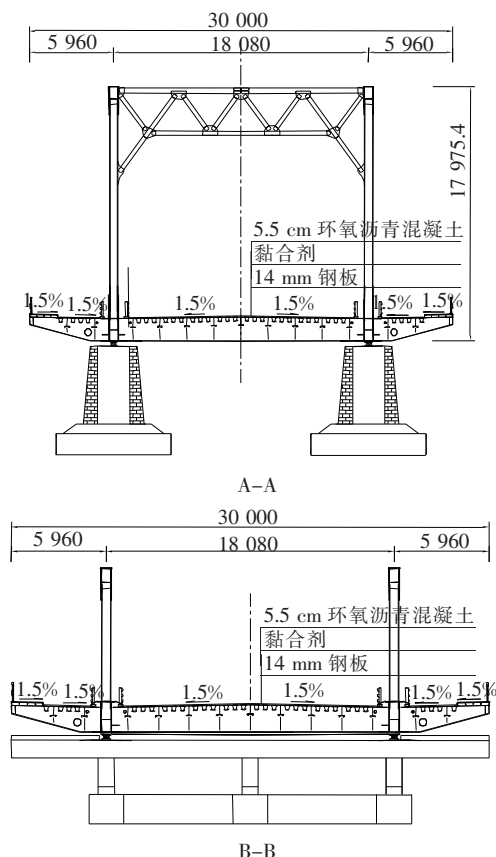


图 3 钢桁架桥剖面图(单位:mm)

## 2 典型病害分析

由于该桥病害数量群巨大,该文选取不同类别病害特征进行典型病害分析。

### 2.1 涂层劣化

(1) 涂层开裂、剥落。漆膜出现不连续的外观变化,严重处漆膜完全脱落,内部钢材裸露。

涂层开裂、剥落产生原因多为喷涂操作不规范,施工人员喷涂过程中,喷枪距离过近或移速过慢,引起涂层表面局部过热或涂层厚度不均匀,冷却后产生裂缝。而涂层劣化是造成钢构件内部锈蚀的直接原因。

(2) 涂层变色。漆膜表面颜色因环境气候原因,与其周围颜色产生异同。主要原因由于涂层里的树脂或颜料受到污染、高温干燥气候、紫外线的直射、或者光化学反应等导致涂层变色<sup>[9]</sup>。

(3) 清洁度差。部分构件表面积累油污、灰尘,清洁度较差。案例桥下平联部分由于在工程建设期间遗留建筑材料,在桥梁竣工之后未及时清理,造成大量建设施工垃圾积留,清洁程度较差。其次腹杆下端也存在大量油渍、污垢,其原因是由于在螺栓安装过程中,对螺栓连接处上润滑油后未及时清理油污,安装完成后油渍下渗,并且油污在水流的带动下不断向下延伸。横向支撑积累大量水渍,因为工字钢形成封闭凹槽累积雨水,待水分蒸发完全后留下灰尘、污垢。

### 2.2 钢材锈蚀

钢桁架桥梁钢材锈蚀的主要原因是表面涂装破坏,所处环境相对湿度较大,水气在金属表面形成水膜,空气中的氧气透过水膜到金属表面产生化学作用。锈蚀使桥梁构件表面产生缺陷,情况严重会造成截面削弱,引起构件断裂致使使用寿命降低。钢材锈蚀严重影响钢桁架桥的耐久性,增加桥梁维护成本,并威胁桁架结构安全<sup>[9]</sup>。

全桥主桁杆、腹杆、桁架横撑等构件均有不同程度的锈蚀痕迹,锈迹面积大小不等。构件表面形成锈蚀斑点、条状锈蚀、块状锈蚀(群)等,边缘处锈迹连续形成带状。

### 2.3 螺栓锈蚀、脱落

(1) 螺栓锈蚀。与钢梁钢材锈蚀相似,螺栓表面漆膜劣化,内部锈蚀。大桥部分螺栓节点出现严重锈蚀,其余螺栓节点仅表面产生轻度锈蚀。典型病害见图 4、5,图中节点螺栓锈蚀情况严重,其中严重锈蚀 47 副,中度锈蚀 104 副,其余轻微锈蚀;无螺栓副缺失。

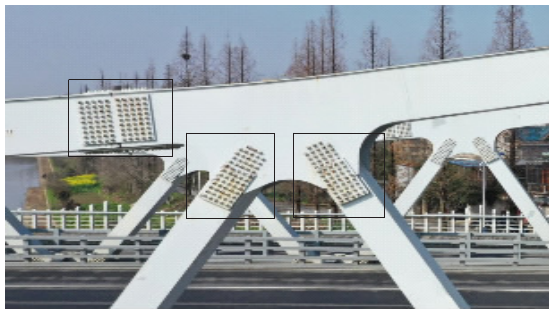


图 4 节点螺栓锈蚀程度较轻

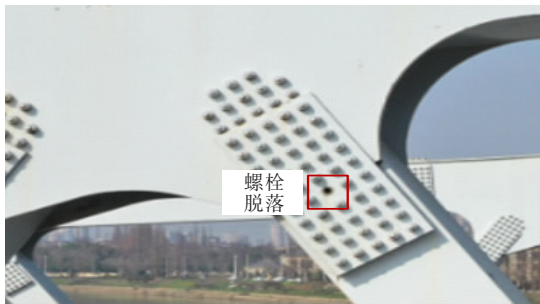


图 6 腹杆连接节点螺栓脱落



图 5 节点螺栓锈蚀程度严重

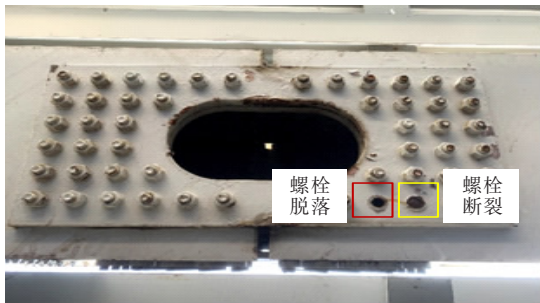


图 7 主桁底部钢梁连接节点螺栓脱落、断裂

(2) 螺栓脱落。螺栓脱落的两个原因:① 螺栓本身的质量问题。② 使用阶段的客观条件造成螺栓断裂。螺栓自身问题:在复杂生产环境下炼造高强螺栓浇筑钢液混入碎块杂质,导致高强螺栓局部出现晶界脆化,出现潜在的裂痕,随时间推移出现螺栓断裂。使用阶段的各种因素影响:一方面,桥梁在拼装过程中经常会出现对孔不精准,导致螺栓受力不均,出现螺栓断裂。或是施工时螺栓超拧值超标、摩擦面处理等施工工艺控制不精确的问题,导致螺栓在成桥后正常使用阶段,由于受到搭接板的剪切力,或是超拧后使用阶段超出螺栓抗拉强度而导致螺栓断裂;另一方面,桥梁成桥后使用阶段,线路开通运营后,钢桁架桥梁在行车循环荷载作用下,运营初期螺栓群应力重新分布,局部螺栓受力较大,超过螺栓的抗拉强度,出现断裂现象。节点螺栓无论以哪种方式破坏脱落都会影响桥梁的整体安全性能<sup>[9]</sup>。典型病害见图 6、7。

### 3 预防性养护要点

前期通过无人机拍摄采集钢桁架桥多类型病害,该类病害发展多为初期,采取预防性养护措施防止病害继续发展,延长钢桥使用寿命,减少后期大型养护成本。

#### 3.1 防腐涂装的检查与养护

钢结构的防腐涂装目的在于阻止、延缓内部钢材锈蚀破坏。漆膜劣化等同于结构破坏当中的“延性破坏”,破坏影响程度较低,可预防病害发生,且养护成本低;钢材锈蚀劣化等同于“脆性破坏”,破坏影响严重,维修更换成本增加。故在钢桁架桥运营使用阶段,需要保证防腐涂装完整,若存在涂装劣化现象,对劣化部位重新涂装,防止内部钢材锈蚀破坏。

钢结构防腐涂装的检查维修主要包括:病害定位→清理劣化部位→原涂装体系。

首先定位钢桥构件表面出现疑似涂层漆膜劣化失效位置,采用直接触摸法或渗透法判断漆膜是否失效,最后对构件漆膜失效部位重新涂装。构件重新涂装前,应首先对其表面进行清理整平,去除构件表面灰尘、油污、劣化涂层以及铁锈等杂质,目的在于增强新涂漆膜的附着力,提高油漆质量。任何氧化皮或铁锈的余痕将促使钢构件继续生锈。钢构件上使用的油漆要求防锈性能和耐候性能良好,同时保证对构件原涂装无影响,须采用原涂装体系。同时未经养护部门批准,严禁在桥梁钢结构上进行任何形式的其他构件焊接,确保桥梁防腐体系完整。

#### 3.2 高强螺栓的检查与养护

焊缝连接和高强螺栓连接是钢桁架桥两种主要连接方式,该桥使用了近 14 000 副高强度螺栓连接副,



因此,在桥梁后期运营过程中高强螺栓的使用质量情况对桥梁的正常运营和安全起着至关重要的作用。因此需要定期检查在运营使用阶段有无剪断或松动现象,其重点检查部位是受交变荷载和动力荷载作用处,同时还要兼顾发现设计和施工遗留下来的缺陷。

高强螺栓的检查,一般采用目测、手锤敲击、扳手试扳等方法来进行。主要检查螺栓是否有松动,螺栓杆有无断裂。对于承受交变荷载和动力荷载的螺栓,应定期卸开螺母,通过目测或探伤仪等方法检查螺栓杆上是否有微裂纹。

该桥连接螺栓多出现锈蚀病害,处理方法与钢材锈蚀方法类同,清理锈迹重新涂装,防止产生二次锈蚀。对于松动螺母,在检查时按原始设计力矩要求重新拧紧。此外,螺栓脱落缺失、松动螺母出现螺纹损伤,示功扳手不能拧至规定力矩、螺杆产生裂纹等必须重新更换全新配套螺栓副同时拧至规定力矩。

### 3.3 杆件弯曲及损伤的检查与养护

案例桥上部结构为全钢结构,钢构件性能的优越对整桥的质量尤为关键。桥梁钢构件在运营阶段产生大变形,则表明结构承载能力或稳定性不能满足使用需求。应及时加固养护,防止结构突然失效造成严重破坏。

若杆件产生微小弯曲、扭转,则可通过外加荷载矫正,应注意如杆件同时存在弯曲和扭转情况,首先进行弯曲矫正,其次进行扭转矫正。若杆件屈曲程度超过稳定性要求,则需要加固处理或更换杆件。如需拆卸杆件更换修理时,建议增大杆件截面尺寸,保证结构受力均衡,同时做好定期检测。部分杆件出现长期运营使用后产生裂纹或损伤,为防止其继续发展削弱杆件承载力,也应及时对破损部位进行加固或更换杆件处理。

### 3.4 焊缝的检查和处理

钢桁架连接除螺栓锚固之外,其余部分皆采用焊缝连接,所以钢桁架焊缝检测工作应当从生产出厂开始,严格检测焊缝质量,防止焊缝裂纹发展。在运营使用阶段也应注意焊缝及其附近母材的检查<sup>[12]</sup>,通过人工排查或探伤仪等方式检测焊缝质量。对严重部位需要采取及时补救措施;裂缝发展部位需要观测、监视,做好详细记录(位置、数量、大小及性质),直至达到维修要求,采取养护措施。焊缝处理主要包括:

(1) 在出厂使用之前发现焊缝有未焊透、夹渣、气孔等缺陷时,应重焊;对于焊瘤处应彻底铲除重焊;对于焊缝有咬肉、弧坑时应补焊。

(2) 在运营使用阶段焊缝出现开裂,通常采用在裂纹两端钻止裂孔或铲除裂纹的焊缝金属,进行补焊。如裂缝较大,需铲除后重焊,并做好定期监测。

预防措施:对于冷裂纹,应选择抗裂性好的钢材,采用低氢或超低氢、低强的焊条,并控制预热温度、线能量,以降低冷裂纹产生倾向;对于热裂纹,应选择含镍量高的钢材,采用精炼的方法,提高钢材的纯度,降低杂质的含量,并控制焊缝的凹度小于1 mm,降低线能量,以降低热裂纹产生倾向。

## 3.5 其他构件的养护与维修

### 3.5.1 桥面铺装

(1) 桥面应当定期清扫整理,排除桥面积水,清除遗留杂物以及泥土、石子、积雪等,保持桥面平整、清洁<sup>[13]</sup>。严禁柴油、汽油污染沥青混合料桥面,如有污染及时用洗衣粉和饮用水冲洗干净。

(2) 沥青混合料(SMA)面层出现泛油、拥包、裂缝、波浪、坑槽、车辙等病害时应及时处治<sup>[14]</sup>。

### 3.5.2 伸缩装置

在没有超载作用下,伸缩装置设计使用寿命一般为10~15年。伸缩缝维修养护之前,应明确其破坏原因,对症下药。伸缩缝的主要破坏形式有:角钢脱落、两侧混凝土破碎、橡胶带老化断裂、锚栓脱落等。

伸缩缝定期养护工作包含:清理缝内积留碎石、混凝土骨料等杂物;定期检查更换老化、损坏的橡胶带;检查锚固螺栓是否松动脱落,防止伸缩缝变形导致跳车现象;对两侧破碎混凝土重新采用高强度混凝土浇筑,防止二次损坏。如出现跳车明显,混凝土完全断裂等造成伸缩缝使用寿命终结,需重新更换伸缩缝装置且按原设计要求选型,以满足桥跨结构变形位移需求。同时维修或更换伸缩缝时,应采取相应措施维持交通安全。

### 3.5.3 支座养护

桥梁支座作为传递反力的主要构件,容易产生各类病害。一般桥梁支座的设计使用寿命为15~20年,在桥梁服役期间,应对支座进行周期性检查,防止支座破坏造成桥梁结构整体功能失效。桥梁支座的预防性养护内容如下:

(1) 通过定检及时清理支座垫石周围积留杂物,特别在低温天气情况下清理积雪和冰块,保证支座功能正常。

(2) 桥梁支座各部分应形成周期性检查维护:通过人工检查或探伤设备,重点检查支座有无裂缝、橡胶老化、钢板锈蚀等现象。

(3) 通过在支座附近安装位移监测传感设备,实时监测各支座位移量,检查相对位移是否均匀。

(4) 当支座功能降低或失效,应分析其原因,及时维修更换。

## 4 结论与展望

该文通过无人机拍摄方式,采集长兴某钢桁架桥存在的典型病害,分析产生原因并提出预防性养护意见,得出以下结论:

(1) 案例桥由于建桥时间较短,病害主要有钢结构表面涂层劣化、钢材暴露锈蚀以及螺栓连接锈蚀、缺失等。

(2) 对于表面涂层开裂,内部钢材产生严重锈蚀部位,清理构件表面灰尘、油污、劣化涂层以及锈蚀痕迹,严格采用原涂装体系,确保防腐体系完整连续;对于涂层清洁程度差、变色部位,注意定时清理检查,必要时重新涂装,预防其发展开裂。

(3) 针对锈蚀严重、产生裂纹和已经断裂的螺栓,应查明劣化原因,作详细记录并及时更换,并做好防腐涂装,防止产生二次锈蚀。对于松动的螺栓应按设计要求拧紧至规定力矩。

(4) 案例桥现阶段未出现焊缝开裂、构件弯曲、支座劣化等病害,为确保运营使用安全,秉持“预防为主”原则,仍然需要定期检查主结构连接、构件的安全情况,根据未来可能出现的病害提出预防性养护及解决措施。

### 参考文献:

[1] Federal Highway Administration (FHWA). Pavement Preservation: A Road Map for the Future[R]. Washington, D. C. : FHWA, U. S. Department of Transportation,

1999.

- [2] Federal Highway Administration (FHWA). Bridge Preservation Guide-Maintaining a State of Good Repair Using Cost Effective Investment Strategies[R]. Washington, D. C. : FHWA, U. S. Department of Transportation, 2011.
- [3] Federal Highway Administration (FHWA). Bridge Preservation Guide-Maintaining a Resilient Infrastructure to Pre-serve Mobility[R]. Washington, D. C. : FHWA, U. S. Department of Transportation, 2018.
- [4] 于利存, 马明, 张立. 钢结构桥梁预防性养护技术探讨[J]. 筑路机械与施工机械化, 2020, 37(8): 66—70.
- [5] 白山云, 陈开利. 大跨径斜拉桥的预防性养护[J]. 中国公路, 2015(21): 96—101.
- [6] 交通运输部. 公路养护工程管理办法[Z], 2018.
- [7] BALADI G Y, SVASDISANT T, VAN T, et al. Cost-Effective Preventive Maintenance: Case Studies [R]. Washington, D. C. : Transportation Research Board of the National Academies, 2002.
- [8] 王迎军, 李鹏飞, 张佳念. 公路桥梁预防性养护调查分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(9): 216—218.
- [9] 艾海清. 京珠高速官花一号桥桥面渗水预防性养护处理[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(9): 30—35, 45.
- [10] 郭文骏. 浅谈农村公路中小桥梁桥面系的养护与维修[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2013(33).
- [11] 陈一馨. 车辆载荷作用下钢桥面板细部焊接结构疲劳性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [12] 庄静. 结合龙河桥浅谈钢桁架桥日常养护[C]. 第七届华东公路发展研讨会论文集, 2012.
- [13] 张云晨, 张建东, 杨登松, 等. 公路钢桁架桥典型病害及对策研究[C]. 中国公路学会养护与管理分会第六届学术年会论文集, 2016.
- [14] 孙鹏. 干线公路现有桥梁栏杆改造方案探讨[J]. 北方交通, 2020(11): 24—27.

# 混合式组合梁斜拉桥参数分析与施工控制

张玉平<sup>1</sup>, 徐先鹏<sup>1\*</sup>, 李香梅<sup>1</sup>, 杨胜江<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 贵州交通建设集团有限公司, 贵州 贵阳 550001)

**摘要:**以某混合式组合梁斜拉桥为工程依托,建立有限元计算模型,对斜拉索索力、主梁重量和挂篮过辅助墩悬臂长度等技术参数进行分析,探讨斜拉索索力和主梁重量的施工精度和施工控制标准,论证挂篮过临时和永久辅助墩的最大悬臂长度。结果表明:该桥中跨斜拉索超张拉索力施工精度应控制在5%以内,中跨斜拉索退张拉索力应控制在1.5%以内,全桥斜拉桥最终调索索力应控制在1%以内;混凝土梁重量施工精度应控制在3%以内,即混凝土板板厚平均误差应控制在1 cm以内,组合梁重量应控制在0.6%以内;挂篮过施工临时辅助墩悬臂长度最大可为2个梁段,过永久辅助墩悬臂长度最大可为4个梁段。在施工控制过程中应以线形控制为主,索力控制为辅。

**关键词:**斜拉桥;混合梁;有限元;参数分析;施工控制;辅助墩

**中图分类号:**U448.27

**文献标志码:**A

斜拉桥施工控制的目的是使成桥后结构的实际状态(受力和线形)最大程度地逼近设计理想的状态。斜拉桥作为高次超静定结构,对其进行施工控制是一个复杂的系统工程,多种因素均可能对施工控制结果产生重要影响<sup>[1]</sup>。唐启<sup>[2]</sup>深入研究了组合梁斜拉桥施工控制参数的敏感性;李忠三<sup>[3]</sup>等分析了混合梁斜拉桥各设计参数的敏感性,应用到施工控制中取得了良好的效果;罗微巍<sup>[4]</sup>等通过有限元仿真分析明确了温度参数对混合式组合梁斜拉桥成桥状态的影响。而针对混合式组合梁斜拉桥在施工控制中对索力和主梁重量的参数分析,研究较少,目前尚无对挂篮过辅助墩悬臂长度的参数研究。

混合梁斜拉桥的施工多以边跨混凝土梁支架现浇、中跨钢梁悬拼为主,例如鄂东长江公路大桥、佛山奇龙大桥等<sup>[5-6]</sup>。也有混合梁斜拉桥主梁采用“不对称双悬臂”方案施工,即边跨混凝土梁采用牵索挂篮悬臂浇筑施工,中跨钢—混叠合梁采用吊机悬臂拼装施工,目前已建成的采用此类不对称双悬臂施工方案的混合梁斜拉桥仅有川藏公路迫龙沟特大桥,该桥桥宽13.8 m,主跨跨径430 m,于2016年通车<sup>[7-9]</sup>。但是未见相关文献对迫龙沟特大桥进行过参数分析研究,并且对于采用同类施工方案的混合梁斜拉桥,其建设

经验和研究资料均较少,对于桥宽更宽、跨度更大的情况,由于桥塔两侧更大不对称荷载的存在,其施工控制将变得更为重要,在施工控制过程中需要注意哪些问题,值得研究。鉴于此,该文以广东某36 m桥宽530 m主跨的混合式组合梁斜拉桥为工程背景,从施工控制的角度出发,基于有限元建模计算分析,探讨混合式组合梁斜拉桥在不对称双悬臂施工下的斜拉索索力、主梁重量以及挂篮过辅助墩悬臂长度等参数的施工控制要求。

## 1 工程背景

某双塔混合式组合梁斜拉桥,跨径布置为(56.8+131.2+530+131.2+56.8) m,边中跨比约0.355,全长906 m。中跨采用组合梁,边跨采用混凝土梁,钢混结合部位位于中跨过主塔8.75 m处。主梁采用半封闭箱梁断面形式,中心梁高3.5 m,桥面总宽36 m。A形索塔斜拉桥结构,斜拉索共4×24对,中跨索距10.5 m,边跨索距7.2/7.0 m,采用锌铝合金镀层高强钢丝斜拉索。斜拉索自主塔向两侧编号,边跨拉索依次编号为B1, B2, …, B24;中跨拉索依次编号为Z1, Z2, …, Z24,所有斜拉索均在塔上张拉。施工阶段在

收稿日期:2020-04-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52078059);贵州省重大科技专项计划项目(编号:[2016]3013);中电建中开高速科技项目(编号:LQKY2016-02)

作者简介:张玉平,男,博士,副教授, E-mail: zyp5032@163.com

\* 通信作者:徐先鹏,男,硕士研究生, E-mail: 401726582@qq.com