

# 变截面梁与自锚式悬索组合体系桥梁参数分析

王雨威<sup>1</sup>, 殷永高<sup>2</sup>, 任伟新<sup>1\*</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省交通控股集团有限公司)

**摘要:**以某变截面梁与自锚式悬索组合桥梁为研究对象,运用有限元分析方法进行参数分析。结果表明:随着垂跨比的减小,主梁跨中挠度、主缆恒载轴力以及主梁弯矩增大,主塔水平位移减小;随着边中跨比的增大,主梁跨中挠度、主塔水平位移均增大,主梁跨中弯矩变化较小,而主缆轴力减小;随着主缆刚度的增加,主梁跨中挠度、主塔水平位移以及主梁跨中弯矩减小,主缆恒载轴力增大。所得结果对此类组合桥梁的设计具有一定的参考价值。

**关键词:**变截面梁与自锚式悬索组合体系桥梁;垂跨比;边中跨比;主缆抗拉刚度;主梁跨中挠度

变截面梁与自锚式悬索组合体系桥梁作为一种新型的桥梁结构体系,能够充分发挥连续梁桥刚度大和自锚式悬索桥跨越能力强的特点,并且造型美观,结构新颖,适用跨径灵活多变,具有广阔发展前景。

胡建华、沈锐利等以佛山平胜大桥为依托,研究了钢混结合梁的悬吊单跨自锚式悬索桥在外力作用下的响应;D. Cobo del Arco 和 A. C. Aparicio 将数值方法应用挠度理论方程对三跨悬索桥进行了扩展分析;江南、沈锐利以建立有限元模型的方式研究了垂跨比对悬索桥结构刚度的影响;陈淮、王艳等以刚性索自锚式悬索桥为依托分析了垂跨比等设计参数对桥梁力学性能的影响规律;罗世东、夏正春等以某海湾三跨悬索桥研究为实例,分析了边中跨比和垂跨比等设计参数对桥梁体系力学性能的影响规律;孙永明、张连振等分析了主缆和吊索抗拉刚度对吊索目标索力的影响。

该文以安徽省罗埠河大桥为依托,进行垂跨比、边中跨比以及主缆抗拉刚度对桥梁受力性能的影响分析。

## 1 工程背景

罗埠河大桥为变截面梁与自锚式悬索组合体系桥,地处合肥市庐江县内,桥梁跨越引江济巢段菜子湖线。主桥全长 325 m,跨径布置为(70+185+70) m,如图 1 所示。跨中为 78 m 等截面钢箱梁,截面如图 2 所示,其余梁段为预应力变截面混凝土箱梁,截面如图

3 所示,跨中梁高 3 m,根部梁高 6 m。混凝土箱梁采用单箱三室结构。桥塔采用单柱式混凝土桥塔,上下同宽。悬索采用双塔单索面对称布置,采用  $\phi 7$  mm 的平行钢丝,主缆锚固在边跨两端,中间共设置 17 根吊杆,塔梁固结,下部采用双肢薄壁墩接群桩基础,主梁通过支座将力传到桥墩上。设计荷载采用公路—I 级。主桥的垂跨比约为 1/7,边中跨比约为 0.4。

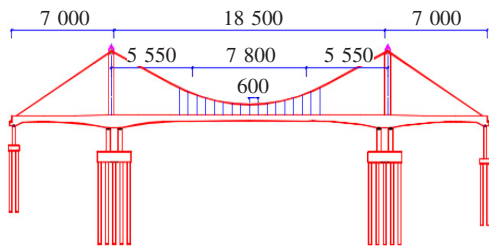


图 1 主桥立面布置图(单位:cm)

## 2 有限元模型建立

采用 Midas/Civil 2017 软件建立桥梁有限元计算模型。主缆锚固在主梁两端,梁端与主缆采用刚性连接,边墩支座使用滑动支座约束,吊杆和钢箱梁采用刚性连接,从而保证协同变形。混凝土梁和钢箱梁结合处以共用节点的方式模拟刚结。主塔和主梁固结,以共用节点的方式模拟。左边中墩采用固定支座约束,右边中墩采用固定铰支座约束。桥塔桥面以上高

收稿日期:2020-05-17(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2016YFC0701400);国家自然科学基金资助项目(编号:51478159)

作者简介:王雨威,男,硕士研究生, E-mail:1305048400@qq.com

\* 通信作者:任伟新,男,博士,教授, E-mail:renwx@hfut.edu.cn

32.326 m,顶部与主缆刚性连接。

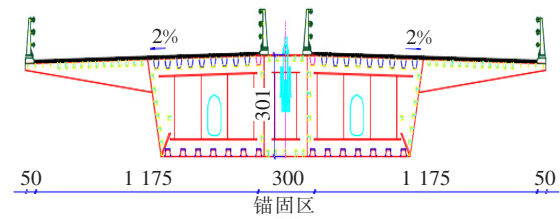


图 2 钢箱梁横截面(单位:cm)

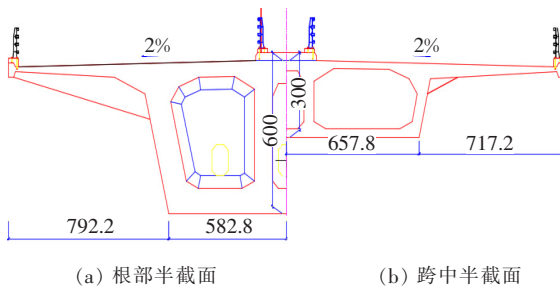


图 3 混凝土梁横截面(单位:cm)

主缆及吊杆采用桁架单元模拟,主梁、主塔采用空间梁单元模拟。全桥共 214 个梁单元,37 个桁架单元,总共 251 个单元,238 个节点。单元参数见表 1、2。混凝土梁部分二期恒载经计算取 67.74 kN/m,钢箱梁部分二期恒载取 62.30 kN/m,活载采用公路—I 级荷载。

表 1 梁单元参数

结构名称	材料种类	弹性模量/MPa	泊松比	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )
混凝土梁	C50 混凝土	$3.45\times10^4$	0.2	25.0
钢箱梁	Q345qD	$2.06\times10^5$	0.3	78.5
主塔	C50 混凝土	$3.45\times10^4$	0.2	25.0

表 2 桁架单元参数

结构名称	材料种类	弹性模量/MPa	泊松比	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	截面直径/m
主缆	镀锌铝高强钢丝	$1.95\times10^5$	0.3	78.5	0.252
吊杆	镀锌高强钢丝	$2.05\times10^5$	0.3	78.5	0.038

3 垂跨比影响分析

变截面梁与自锚式悬索组合体系桥梁中主缆直接锚固在主梁上,从而主梁承担了主缆的全部水平向分

力。梁端的截面要加大以保证主梁两端应力不至于太大。而且为了整体稳定性,垂跨比不能太大。一般认为,垂跨比减小,结构刚度会增大;垂跨比增大,结构刚度会减小。桥梁发展至今,完工的自锚式悬索桥的垂跨比大都为 1/6 左右。下文将垂跨比分为 1/9、1/8、1/7、1/6、1/5 共 5 种情况,将每种情况下桥梁的响应统计成表(表 3),从而研究垂跨比的变化对组合体系结构力学性能的影响规律。在该研究中,仅考虑垂跨比对组合体系内力以及刚度的影响情况。

表 3 垂跨比对结构内力和刚度的影响

垂跨比	主梁跨中挠度/m	塔顶水平位移/m	主缆恒载轴力/( $\times10^4$ kN)	主缆恒活载轴力/( $\times10^4$ kN)	主梁跨中弯矩/( $2\times10^4$ kN·m)
1/5	0.060	0.013	2.638	2.750	0.744
1/6	0.064	0.011	2.999	3.106	0.941
1/7	0.066	0.009	3.334	3.434	1.087
1/8	0.069	0.008	3.802	3.895	1.237
1/9	0.070	0.006	4.191	4.277	1.332

由表 3 可以看出:

(1) 随着垂跨比的减小,主梁跨中挠度值、主缆恒载轴力和主缆恒活载轴力以及主梁弯矩越来越大,呈上升趋势。主缆恒活载轴力和主缆恒载轴力的变化基本一致。并且主梁弯矩上升的速度比跨中挠度值和主缆轴力的上升速度要大,如垂跨比为 1/9 时的主梁弯矩比垂跨比为 1/5 时扩大了 79.01%,而同等条件下跨中挠度仅扩大了 16.67%,主缆轴力扩大了 58.87%。这说明随着垂跨比的减小,桥梁的竖向刚度也在减小。

(2) 随着垂跨比的减小,塔顶水平位移越来越小,呈明显的下降趋势。垂跨比为 1/9 时的塔顶水平位移比 1/5 时下降了 53.85%。分析原因是,随着垂跨比的减小,主塔的高度逐渐减小,其水平向抗推刚度逐渐增大。

(3) 当垂跨比为 1/7 时,跨中挠度为 66 mm $\approx$  L/2 803,远小于规范容许值 L/150;主缆最大应力为 669.16 MPa,远小于容许应力,故均满足规范要求。

4 边中跨比影响分析

如果自锚式悬索桥边跨跨度较小,那么对增大结构刚度、减小受力有利;但是反过来过小的边跨使得锚

固处主缆的竖向分力增大。已建成的悬索桥边中跨比大多为 0.2~0.4。特殊情况下边中跨比也设置为 0.4~0.5。一般而言,随着边中跨比的增大,桥梁的刚度减小,变形随之增大。因此,边中跨比一般很少超过

0.5。故该节分别以边中跨比为 0.2、0.3、0.4 和 0.5 建立 Midas 模型,并把每种情况下的内力和位移统计成表(表 4),得出其对桥梁受力性能以及刚度的影响。

表 4 边中跨比对结构刚度和内力的影响

边中 跨比	主梁跨 中挠 度/m	主塔水 平位 移/m	中主缆恒载 轴力/ ( $\times 10^4$ kN)	边主缆恒 载轴力/ ( $\times 10^4$ kN)	中主缆恒活 载轴力/ ( $\times 10^4$ kN)	边主缆恒 活载轴力/ ( $\times 10^4$ kN)	主梁跨中弯 矩/( $2\times 10^4$ kN·m)
0.2	0.066	0.008	3.298	4.044	3.400	4.169	1.067
0.3	0.068	0.009	3.287	3.520	3.394	3.634	1.077
0.4	0.072	0.011	3.271	3.337	3.379	3.447	1.097
0.5	0.077	0.012	3.075	3.021	3.179	3.122	1.036

从表 4 可以看出:

(1) 随着边中跨比的增大,主梁跨中挠度、主塔水平位移也在增大,主梁跨中弯矩变化较小。对于跨中挠度来说,增长的速度越来越快,为非线性增长。而主塔水平位移在边中跨比为 0.5 时比边中跨比为 0.2 时提高了 50%,增长幅度最大。说明随着边中跨比的增大,桥梁的刚度在减小。

(2) 随着边中跨比增大,主缆恒载轴力和主缆恒活载轴力均呈现下降趋势。其中,边主缆轴力下降的速度要快于中主缆。随着边中跨比的增大,边主缆轴力由一开始大于中主缆变为最终两者基本持平。

(3) 当边中跨比为 0.4 时,主梁跨中挠度为 72 mm $\approx L/2\ 569$ ,远小于规范容许值  $L/150$ ;主缆最大应力为 656.52 MPa,远小于容许应力,说明大桥的设计是合理的。

5 主缆抗拉刚度影响分析

提高构件抗拉刚度通常有两种方式:① 提高其材料的弹性模量;② 增加主缆的截面积。若主缆的截面积增加,则主缆荷载集度随之增加,使得情况变得更加复杂,不利于分析。故仅将主缆材料的弹性模量改变,使得主缆抗拉刚度分别以 0.4、0.7、1.0、1.3、1.6 倍率发生变化,分析刚度和内力的变化,结果如表 5 所示。

从表 5 可以看出:

(1) 随着主缆抗拉刚度的增加,主梁跨中挠度、主塔塔顶水平位移以及主梁跨中弯矩呈下降趋势。主梁跨中挠度减小,说明组合体系的竖向刚度增大。在主缆抗拉刚度为 0.4~1.0 倍时,主塔水平位移随主缆抗

拉刚度增加而减小,说明桥梁横向抗推刚度增加;为 1.0~1.6 倍时,主塔顶水平位移基本维持不变,说明在此范围内主缆抗拉刚度对桥梁横向抗推刚度影响很小。

表 5 主缆抗拉刚度对结构刚度和内力的影响

主缆抗 拉刚度 倍率	主梁跨 中挠 度/m	塔顶水 平位 移/m	主缆恒载 轴力/ ( $\times 10^4$ kN)	主缆恒活 载轴力/ ( $\times 10^4$ kN)	主梁跨中 弯矩/ ( $2\times 10^4$ kN·m)
0.4	0.072	0.010	3.303	3.347	1.392
0.7	0.068	0.009	3.318	3.390	1.193
1.0	0.066	0.008	3.337	3.438	1.087
1.3	0.063	0.008	3.397	3.517	0.855
1.6	0.060	0.008	3.422	3.563	0.711

(2) 随着主缆抗拉刚度增加,主缆恒载轴力以及主缆恒活载轴力均增大。但最大的增大幅度仅为 3.6%,影响较小。

6 结论

以某变截面梁与自锚式悬索组合体系桥梁为对象,采用有限元方法分析了垂跨比、中跨比、主缆刚度变化对桥梁结构内力的影响,得到如下结论:

(1) 随着垂跨比的减小,主梁跨中挠度值、主缆恒载轴力以及主梁弯矩越来越大;而塔顶水平位移越来越小。

(2) 随着边中跨比的增大,主梁跨中挠度、主塔水平位移均在增大;主梁跨中弯矩变化较小;而主缆恒载轴力和主缆恒活载轴力均呈现下降趋势。

# 基于概率跳跃粒子群算法的钢桁拱桥结构线形优化

康俊涛, 刘开, 张亚州

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:**钢桁拱桥的拱肋线形对结构的应力分布起关键作用,为了使钢桁拱桥的受力更加均匀,选取钢桁拱的线形影响变量,同时将结构应变能作为目标函数,采用智能优化算法寻找最优拱肋线形。为了避免寻找到局部最优解,提出了概率跳跃因子,同时根据粒子的聚集度和进化速度来确定粒子跳跃的时机。最后分别采用数值算例和工程案例验证了所提算法的寻优精度和寻优效率。结果表明:所提算法能有效改善标准粒子群陷入局部最优的现象,经过修正后,结构的应变能有明显下降,结构受力更加合理。

**关键词:**桥梁工程; 刚桁拱桥; 结构优化; 粒子群算法; 随机跳跃

钢桁拱桥拱肋的线形是拱桥概念设计的重要参数,它直接影响了整个桥梁的受力性能、应力分布、整桥重量。目前确定拱轴线形的方法多是通过荷载产生的压力线来确定,即设计线形,使得拱上只承受压力,不承受弯矩,由于实际结构承受的荷载复杂,理想的拱轴线是无法得到的,因此,现在常用的方法多为“五点重合法”,即拱肋上几个关键点的压力线与拱轴线相重合。首先只采用5个关键点对结构线形控制不能保证

选择的线形为最优方案,即使增加关键点数,采用“多点重合法”,也无法解决有限点数带来的误差,且增加了计算的复杂度,使得问题更加难以采用理论解法给出最优方案;其次,现有拱肋线形的确定具有一定的经验成分,如抛物线次数、圆曲线半径等控制因素多为离散经验值,无法对所有解空间进行全部的探索,从而导致可能遗漏最优方案现象的发生。

近年来,越来越多的学者将智能优化算法应用于

\*\*\*\*\*

(3) 随着主缆抗拉刚度的增加,主梁跨中挠度、主塔水平位移、主梁弯矩均呈下降趋势;而主缆恒载轴力以及主缆恒活载轴力均在增大。

(4) 该文所得到的影响规律与现有研究结果基本一致,但跨中挠度有所减小。在垂跨比为1/7、边中跨比为0.4以及现有主缆抗拉刚度的条件下,主梁挠度、主缆轴力、主塔水平位移、主梁恒活载轴力以及主梁弯矩均符合规范要求,说明设计是合理的。

## 参考文献:

- [1] 肖汝成,等. 桥梁结构体系[M]. 北京:人民交通出版社, 2013.
- [2] 胡建华,沈锐利,张贵明,等. 佛山平胜大桥全桥模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2007(5).
- [3] D Cobo del Arco, A C Aparicio. Preliminary Static Analysis of Suspension Bridges [J]. Engineering Structures,

- 2001(23):1 096-1 103.
- [4] 江南,沈锐利. 矢跨比对悬索桥结构刚度的影响[J]. 土木工程学报, 2013(7).
- [5] 陈淮,王艳,朱倩. 设计参数对刚性索自锚式悬索桥受力性能的影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2016(13).
- [6] 罗世东,夏正春,严爱国. 超大跨度公铁悬索桥结构体系参数分析[J]. 铁道工程学报, 2014(6).
- [7] 孙永明,张连振,李忠龙. 自锚式悬索桥吊索目标索力影响参数分析[J]. 桥梁建设, 2015(4).
- [8] 贾丽君. 大跨度悬索桥体系及其性能研究[D]. 同济大学博士学位论文, 2009.
- [9] 邹存俊. 自锚式悬索-斜拉组合结构体系桥梁静力学性能与施工关键技术研究[D]. 长安大学博士学位论文, 2009.
- [10] 康俊涛,胡杰,董培东,等. 三塔自锚式悬索桥动力特性参数影响分析[J]. 武汉理工大学学报, 2017(4).

收稿日期:2020-03-28(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51608408);湖北省自然科学基金资助项目(编号:2015CFB393)

作者简介:康俊涛,男,博士,教授. E-mail:jtkang@163.com