

高栏港大桥钢箱梁吊装施工局部稳定及受力优化分析

王江浩, 徐德志, 邵加楠, 谭巨良

(广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510507)

摘要: 为分析高栏港大桥钢箱梁在吊装施工过程中的局部稳定性, 以施工单位提供的吊机结构为依据, 利用有限元软件建立了钢箱梁吊装期间最不利受力梁段的局部模型, 计算了不同吊机结构对钢箱梁稳定性的影响, 针对吊装期间钢箱梁局部稳定性不足的情况, 提出了提升结构稳定性的方法。研究表明: 不同的吊机结构力的作用位置不同, 对结构受力的影响也不同, 适当分散吊机支点位置有利于提高结构局部稳定性; 通过在钢箱梁局部失稳位置增设加劲肋, 可以有效地提高结构稳定性, 保证施工期间的结构安全。

关键词: 高栏港大桥; 钢箱梁; 吊装施工; 局部稳定

中图分类号: U445.4

文献标识码: A

Local Stability and Optimization Analysis of Steel Box Girder of Gaolangang Bridge during Hoisting Construction

WANG Jianghao, XU Dezhi, SHAO Jianan, TAN Juliang

(Guangdong Communication Planning & Design Institute Groupe Co., Ltd, Guangzhou 510507, Guangdong, China)

Abstract: To analyze the local stability of the steel box girder of Gaolangang Bridge during hoisting construction, the local model of the weakest steel box girder was established using finite element software, based on the deck derrick crane provided by the construction organization. The influence of different crane structures on the stability of steel box girder was analyzed. A method to improve the structural stability was proposed in view of the insufficient local stability of steel box girder during hoisting construction. The results show that, structural stability of the steel box girder was affected by different deck derrick crane structures, the local stability of steel box girder could be improved by scattering the crane fulcrum position. The structural stability could be effectively improved and the structural safety could be ensured by adding stiffeners at the local instability position of the steel box girder.

Key words: Gaolangang Bridge; steel box girder; hoisting construction; local stability

1 引言

钢箱梁由于其结构轻盈、抗弯抗扭刚度大等优点在大跨度桥梁中广泛应用。钢箱梁由顶板、底板、腹板、横隔板及各自对应加劲肋组成, 为薄壁结构, 在外部荷载作用下受力状态较为复杂, 稳定问题更为突出。在国内外桥梁中, 由于结构失稳引起的桥梁垮塌事件不在少数, 比如澳大利亚的 West Gate Bridge、英国的 Milford Haven Bridge, 都是在施工过程中钢箱梁板件发

生屈曲而产生垮塌^[1]。对于处于受压、受弯作用下的薄壁结构, 其局部稳定分析是桥梁结构设计的中中之重, 桥梁结构一旦发生屈曲破坏, 往往桥毁人亡, 给人民群众的生命财产安全造成巨大损失。

结构失稳是指结构在外力作用下, 稳定平衡状态开始丧失, 受垂直受力方向的微小扰动, 结构变形迅速增大, 使结构失去正常工作能力的现象。两类稳定问题分别为第一类稳定问题(平衡分支问题)和第二类稳定问题(极值点失稳问

收稿日期: 2022-12-05

作者简介: 王江浩, 工程师, 硕士, 研究方向为桥梁结构设计与计算

题)^[2], 实际结构的稳定问题均属于第二类稳定问题, 但是研究第一类稳定仍然重要, 因为: ①某些结构的极限荷载与分支屈曲荷载很接近; ②某些结构的屈曲后强度远远大于分支屈曲; ③第一类稳定问题体现了结构的刚度特征。从工程设计的角度出发, 结构往往需要取到一定的安全系数, 第一类稳定问题足以满足工程施工的需要, 因此, 本文计算均针对第一类稳定问题。

通过对国内采用吊装施工的钢箱梁、组合梁斜拉桥进行调研统计, 将斜拉桥第一类稳定系数汇总于表 1。表中所列斜拉桥的第一类稳定安全系数均大于 4.0, 满足《公路斜拉桥设计规范》(JTG/T 3365-01—2020) 中对于斜拉桥结构体系整体稳定系数的要求, 结合《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG/T D56-06—2015) 中关于局部构件稳定系数不应小于主拱弹性整体稳定系数 4.0 的要求, 钢结构斜拉桥在施工过程中的第一类稳定安全系数应大于 4.0。

表 1 斜拉桥第一类稳定安全系数汇总表		
桥梁名称	跨径布置/m	第一类稳定安全系数
嘉绍大桥主航道桥 ^[8]	70+200+5×428+200+70	4.37
重庆江津观音岩长江大桥 ^[9]	35.5+186+436+186+35.5	4.70
上元门大桥 ^[10]	84+160+488+488+160+84	4.70
江顺大桥	60+176+700+176+60	4.29
黄茅海大桥	100+280+2×720+280+100	4.03

由于施工过程中选用的桥面吊机结构形式与设计阶段不同, 会出现钢结构稳定安全系数不足的情况, 此时需要调整吊机结构形式, 采用改变吊机前支点间距, 调整支点位置、数量等方法来提高结构的稳定安全系数; 当施工现场无法调整吊机结构形式时, 可以局部调整斜拉桥钢结构, 通过局部加大支点位置横隔板板厚、增加横隔板

加劲肋数量等方法提高结构的稳定安全系数, 使其大于 4.0。

本文以黄茅海跨海通道工程高栏港大桥为背景, 对钢箱梁在吊装施工过程中的局部稳定性进行分析, 并针对吊装期间钢箱梁局部稳定性不足的情况对结构进行优化。

2 工程概况

黄茅海跨海通道工程东接鹤港高速、西接西部沿海高速及新台高速^[3], 项目对于贯彻粤港澳大湾区合作精神, 加强粤港澳大湾区内联系, 优化区域高速公路网络, 改变过江通道单一的现状, 有效促进珠西装备制造业基地集聚, 进一步强化横琴自贸区、高栏港与大广海湾经济区的联动发展具有重要意义^[4-5]。

高栏港大桥跨径设置为 110+248+700+248+110=1416 (m), 为独柱塔双索面双塔斜拉桥, 高跨比为 0.26, 边中跨比为 0.51, 采用全漂浮约束体系^[6]。大桥主梁采用流线型扁平钢箱梁, 钢材采用 Q355D。分体式钢箱梁由两个钢箱梁及横向连接箱组成。钢箱梁梁高 4.0 m。主梁分别有 A 梁段/B 梁段/B1 梁段/C 梁段/D 梁段/D0 梁段/E 梁段/F 梁段/G 梁段/H 梁段/I 梁段等十一种梁段, 标准梁段长 15 m, 实腹式横隔板间距 3.0 m。顶板厚度有 18 mm/20 mm/24 mm 三种, 底板厚度有 14 mm/16 mm/20mm/24 mm/28 mm/30 mm 六种, 外腹板厚度有 32 mm/40 mm 两种, 内腹板厚度有 14 mm/20 mm/30 mm 三种。高栏港大桥桥型布置图见图 1, 标准横断面布置图见图 2。

位于墩上的梁段均采用浮吊吊装, 其余梁段采用桥面吊机吊装。桥面吊机安装在已吊装完成的梁段上, 固定于前支点和后锚点, 进行下一个梁段的吊装。本项目四个悬臂端, 共四台吊机,

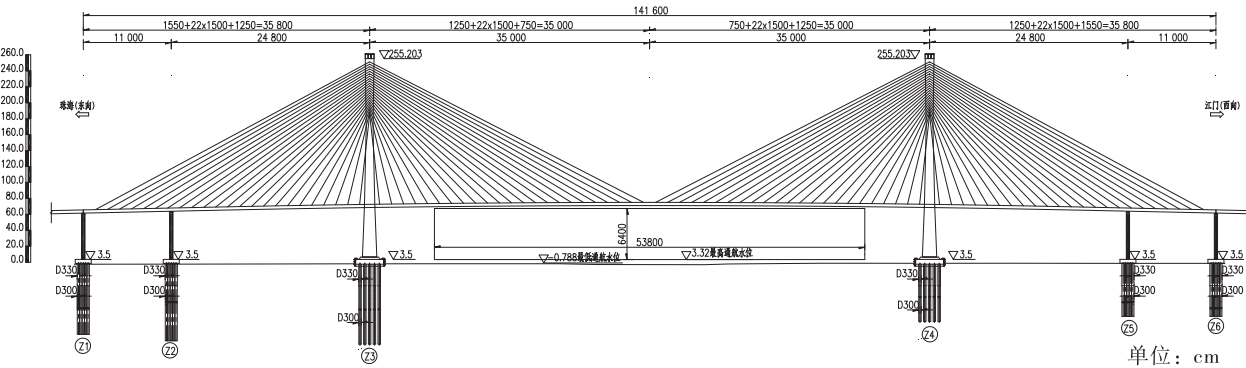


图 1 高栏港大桥桥型布置图

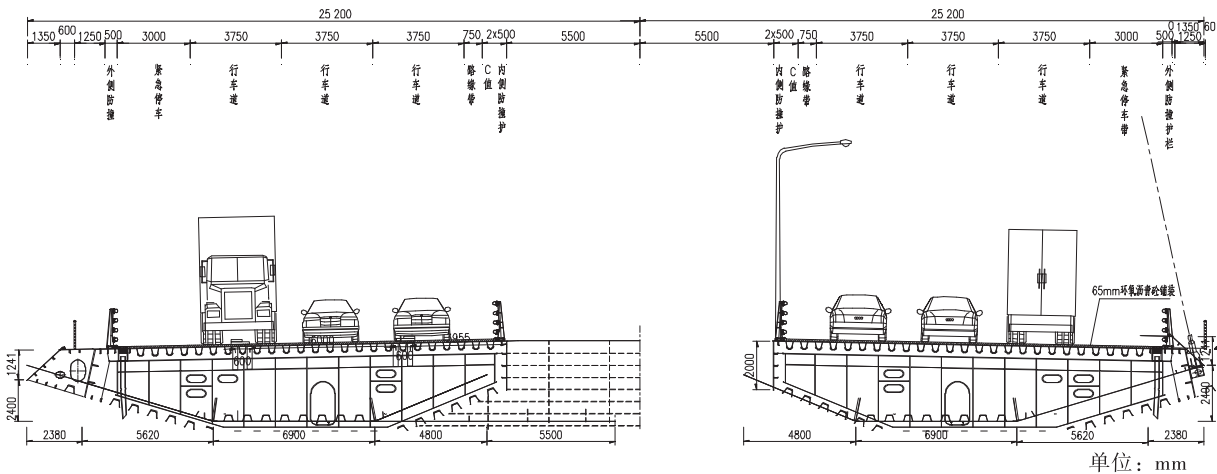


图 2 标准横断面布置图

吊机形式各不相同，以 T 四合同段桥面吊机为例，桥面吊机立面示意图见图 3，前支点横桥向位置示意图见图 4。从吊装结构分析，当前支点支反力最大，支点位置钢箱梁板厚最小的位置为设

计控制点，最容易发生局部失稳^[8]。因此，选取各板件厚度最小的 B 梁段作为研究对象，此时，待吊装梁段（G 梁段）的重量最大，受力最为不利。B 梁段各板件的详细参数见表 2。

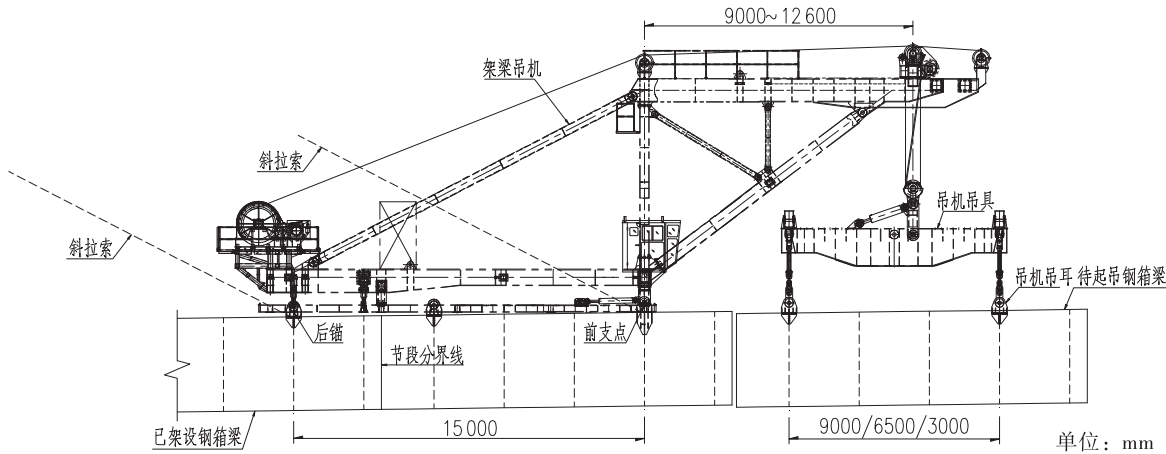


图 3 桥面吊机立面示意图

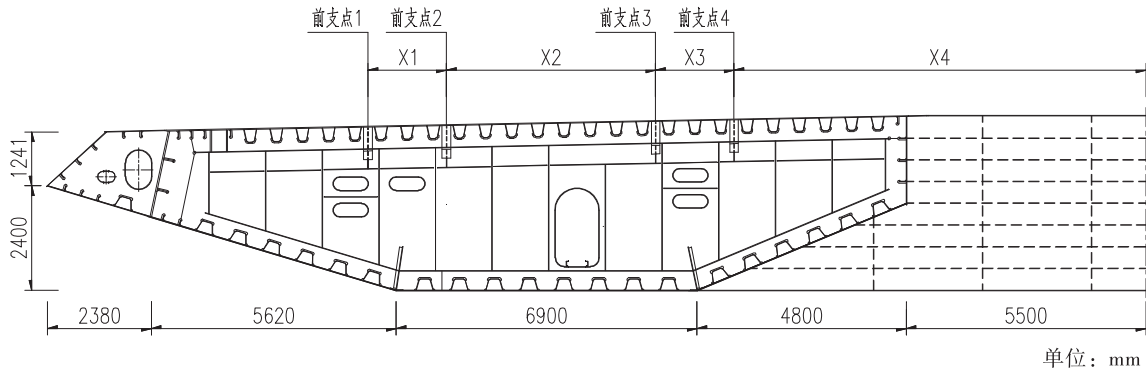


图 4 桥面吊机前支点位置示意图

3 模型建立

根据黄茅海跨海通道工程高栏港大桥施工图，采用有限元计算程序建立 B 梁段的局部分析

模型。B 梁段各板件尺寸按实际建立，前支点力作用位置进行局部单元加密。有限元模型钢箱梁末端采用固结。结构离散示意图如图 5 所示。模型中钢箱梁由恒载和活载作用，在计算屈曲荷载

表 2 B 梁段各板件厚度 单位：mm

顶板	顶板 U 肋	底板	底板 U 肋	斜底板	斜底板 U 肋
18	8	14	6	14	6
内腹板	内腹板加劲肋	外腹板	外腹板加劲肋	横隔板	横隔板加劲肋
32	28	14	14	14	12

系数时，认为恒载不变，活载（吊机前支点荷载）对应的放大系数为所求得屈曲荷载系数，即屈曲荷载 = 恒载 + $K \times$ 活载。因此，模型需要保证在屈曲分析时恒载的应力刚度不被缩放^[7]。

本次计算采用迭代的方式求解最终屈曲荷载系数，通过对初次施加恒载 + 活载的结构进行屈曲分析，得到屈曲荷载系数 K_1 ，然后将施加荷载改为恒载 + $K_1 \times$ 活载，重新进行屈曲分析，依次不断更新活载数值进行迭代分析，直至屈曲荷载系数值为 1。最终计算采用的活载放大倍数，即为实际所需的屈曲荷载系数。

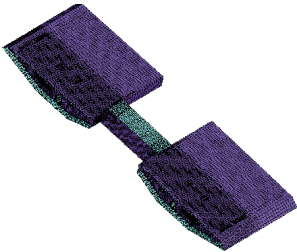


图 5 结构有限元离散模型

4 分析工况

根据施工单位提供的桥面吊机结构形式，改变前支点作用位置建立不同的工况。结合图 4，根据吊机前支点作用位置不同建立工况一、工况二。工况一：前支点荷载施加位置， $X_1 = 600\text{ mm}$ ， $X_2 = 3001\text{ mm}$ ， $X_3 = 600\text{ mm}$ ， $X_4 = 12\,450\text{ mm}$ 。工况二：前支点荷载施加位置， $X_1 = 1805\text{ mm}$ ， $X_2 = 2395\text{ mm}$ ， $X_3 = 1805\text{ mm}$ ， $X_4 = 10\,045\text{ mm}$ 。工况一、工况二中前支点加载位置示意图见图 6。

根据现场施工的具体情况，当桥面吊机结构

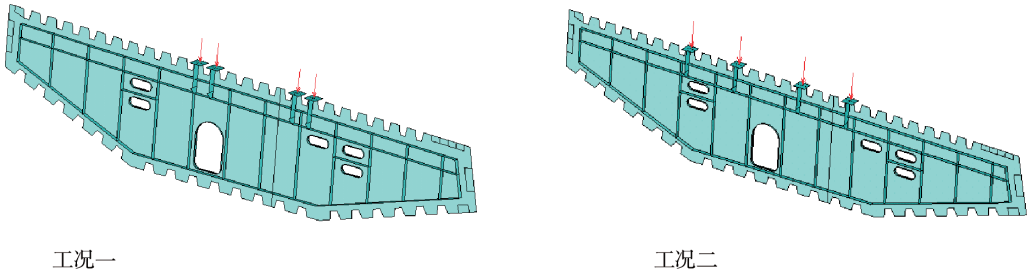


图 6 工况一、工况二前支点加载位置示意图

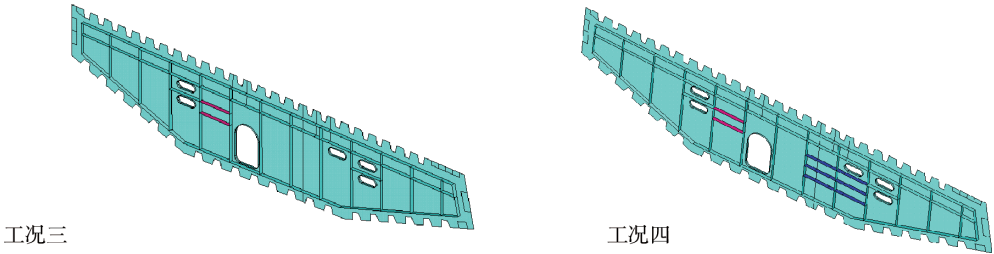


图 7 工况三、工况四横隔板其加劲肋图形

不易调整而屈曲荷载系数偏小时，可以通过增加前支点作用范围内主梁横隔板加劲肋的数量来提高结构的局部稳定性，具体施加措施：在计算得到的局部屈曲位置精细化增添加劲肋，并进一步计算优化后的结构的稳定性。基于此原理建立工况三和工况四。工况三：在工况一加载模式的基础上，于工况一屈曲位置处施加两道横隔板水平加劲肋。工况四：在工况三的基础上，于工况三屈曲位置处施加六道横隔板水平加劲肋。工况

三、工况四横隔板其加劲肋图形见图 7。

5 结果分析

对工况一 ~ 工况四进行计算，得到 B 梁段的屈曲荷载系数，见表 3，根据计算结果，发生屈曲的位置为前支点作用处的主梁横隔板，屈曲模态形状见图 8。从工况一、工况二的对比分析可知，当梁段吊装过程中两个支点位置过于接近时，梁段局部范围承担过大的集中荷载，会导致

梁段的屈曲荷载系数过小,而将支点荷载较均匀地分散在梁段横向长度上,对结果受力有利,能一定程度上改善结构的稳定性。

当受限于现场施工环境、施工器械,无法通过调整吊机支点位置来改善结构稳定性时,可以通过增加受压板件的横隔板来提高结构局部稳定性。以吊装 *G* 梁段期间 *B* 梁段屈曲荷载系数为例,对工况一、工况三、工况四的计算结构进行对比:针对工况一的失稳模态,在工况三中将横隔板失稳位置处增加两道水平加劲肋,屈曲荷载系数由 2.75 提升至 3.85,增幅 40%,失稳位置同步发生变化,在新形成的失稳位置处,继续增

加六道水平加劲肋(即工况四),屈曲荷载系数由 2.75 提升至 4.58,增幅 67%,失稳位置进一步改变。此时结构的屈曲荷载系数已经超过 4,拥有足够的安全储备。

表3 各工况结构屈曲荷载系数

工况类型	工况一	工况二	工况三	工况四
吊装 <i>G</i> 梁段期间 <i>B</i> 梁段屈曲荷载系数	2.75	3.51	3.85	4.58
吊装 <i>C</i> 梁段期间 <i>B</i> 梁段屈曲荷载系数	2.98	3.80	4.17	4.96
吊装 <i>B</i> 梁段期间 <i>B</i> 梁段屈曲荷载系数	3.48	4.43	4.86	5.78

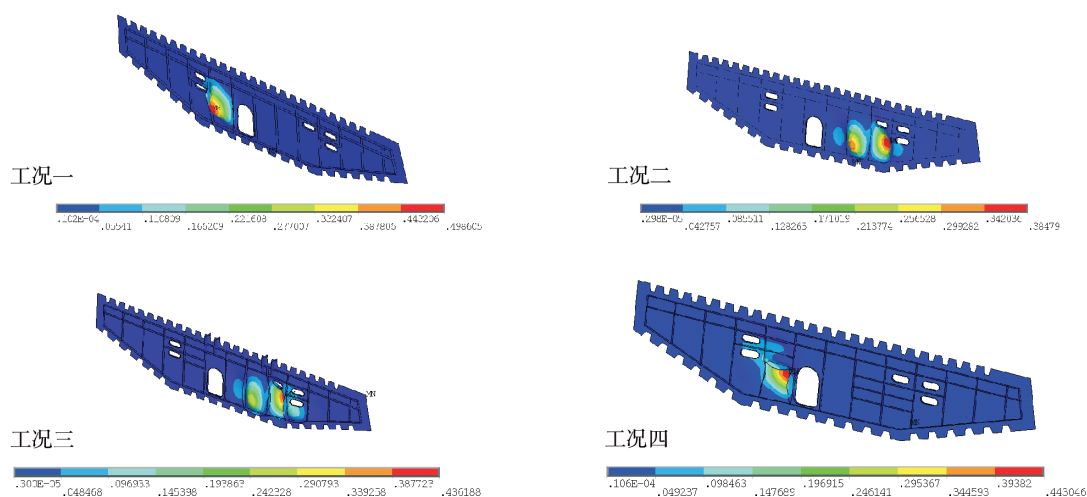


图8 工况一~工况四结构屈曲模态形状

6 结论

本文以黄茅海跨海通道工程高栏港大桥为背景,建立了钢箱梁吊装期间最不利受力梁段的局部有限元模型,模拟了不同吊机结构对钢箱梁稳定性的影响。根据计算结果,拉开吊机支点间距,将吊机结构支点荷载较均匀地分散在梁段横向长度上,避免钢箱梁承受较大的集中力,有利于提高结构的稳定性。

当受限于施工机械等外部条件无法调整吊机结构且吊装期间钢箱梁局部稳定性较差时,可以通过在钢箱梁局部失稳位置增设加劲肋的方式提高结构的局部稳定性,确保施工期间的结构具有一定的安全储备,避免结构失稳等不利情况。

参考文献:

- [1] 李立峰. 正交异性钢箱梁局部稳定分析理论及模型试验研究[D]. 长沙:湖南大学,2005.
- [2] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京:中国铁道出

版社,1992.

- [3] 徐德志,梁立农,孙向东,等. 高栏港大桥扭转 A 型索塔方案设计[J]. 公路,2021(11):161-168.
- [4] 徐德志,梁立农,孙向东,等. 珠海某跨海通道主桥方案设计[J]. 广东土木与建筑,2021(10):65-69.
- [5] 杜磊,梁立农,孙向东,等. 黄茅海跨海通道工程高栏港大桥桥塔方案设计[J]. 广东公路交通,2021(3):30-35.
- [6] 杜磊,梁立农,孙向东,等. 黄茅海跨海通道工程高栏港大桥结构体系设计[J]. 公路,2021(8):130-136.
- [7] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
- [8] 李传习,袁鹏,罗超云,等. 嘉绍大桥架设钢箱梁局部受力的不利阶段及其效应分析[J]. 中外公路,2014(2):117-120.
- [9] 雷宇. 组合梁静力稳定性研究[D]. 成都:西南交通大学,2008.
- [10] 杨兴旺,赵雷. 大跨度三塔斜拉桥稳定性分析[J]. 四川建筑,2003(8):38-40.