

# 格构式钢塔斜拉桥动力测试及动力影响分析

刘 鹏<sup>1</sup>, 蔡颖颖<sup>2</sup>, 吴 振<sup>1</sup>

(1.西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068; 2.陕西省交通运输厅, 陕西 西安 710075)

**摘 要:**为研究格构式钢塔斜拉桥的动力特性,以宝鸡市陆港大桥为背景,采用脉动测试法对桥梁的动力特性现场测试,与有限元模型值进行对比分析;在此基础上,分析主塔刚度、主梁刚度、边跨辅助墩、主塔高度等参数变化对该桥动力特性的影响。结果表明:实测模态振型与理论振型基本一致,实测频率值略大于理论值;格构式钢塔斜拉桥塔梁振型容易被同时激发,互相耦合,互相牵动,不利于抗震;桥塔整体扭转刚度大,有利于提高结构的抗风能力;边跨辅助墩可以大幅提高桥梁纵向刚度和竖向刚度,能增强结构抗风性能,并提高行车舒适性;就其动力特性方面,此种桥型最佳索塔高跨比介于1/3~1/2.5之间。

**关键词:**格构式钢塔斜拉桥;动力特性;脉动测试;参数分析;频率;振型;辅助墩

**中图分类号:**U411

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-7716(2021)09-0054-04

## 0 引言

斜拉桥的动力特性主要包括结构自振频率、振型等,反应了桥梁的刚度指标,其取决于结构的组成体系、刚度、质量分布,以及支承边界条件等,它对于正确地进行桥梁结构抗震设计、车振分析、抗风稳定性研究等,有重要的意义。

国内外的学者对该桥型的动力特性进行了大量研究。朴泷以港珠澳大桥为例,分别对桥面系、斜拉索和塔柱基础采用不同方式进行模拟分析,寻求合乎精度要求的模型,为桥梁抗震提供参考<sup>[1]</sup>;陈水生研究了波形钢腹板多塔斜拉桥在不同约束条件下的动力特性<sup>[2]</sup>;黄平明研究了不同边界条件对独塔斜拉桥动力特性的影响<sup>[3]</sup>;刘旭政以独塔双索面斜拉—连续协作体系桥为例,分析此种协作体系桥梁特殊的动力特性<sup>[4]</sup>;吴兴邦、吕云研究了主要结构参数对非常规斜拉桥动力特性的影响,研究结果表明中等跨度三塔斜拉桥的结构整体扭转刚度大,扭弯频率比高<sup>[5]</sup>;康俊涛研究一双拱塔斜拉桥的动力特性,研究表明拱塔扭转与主梁竖弯对动力响应起主导作用<sup>[6]</sup>;郭翠翠分析了倾角、初始扰动、阻尼对斜拉索振动效应的影响<sup>[7]</sup>;刘祖军、葛耀君以大跨斜拉桥为例分析了下部结构与水体的流固耦合作用对该桥动力性能的影响<sup>[8]</sup>;王颀对钢公铁斜拉桥自振特性进行研究,分析认为主塔刚度和主桁斜竖杆刚度是斜拉桥面内

和面外稳定的主要力学参数<sup>[9]</sup>;张无畏对箱桁组合梁铁路斜拉桥动力特性有限元建模方法进行研究,结果表明空间板梁组合模型和空间板壳模型得到的频率及主梁等效质量基本相同<sup>[10]</sup>。

格构式钢塔斜拉桥以格构式钢作为主塔结构,塔型新颖,塔柱镂空设计有效改善风荷载下主塔驰振稳定性。这种特殊塔型斜拉桥动力特性有不同于其它桥型的特殊性,其在抗风、抗震、车振性能等方面均有自身的特点。现以一格构式钢塔斜拉桥为例,对其动力特性进行现场测试,并采用MIDAS/Civil软件建立有限元模型,计算分析格构式钢塔斜拉桥的动力特性,供今后此类斜拉桥设计借鉴。

## 1 工程概况

宝鸡市陆港大桥主桥采用三跨双塔双索面格构式钢塔斜拉桥,跨径为(102+208+102)m,半飘浮体系,是国内首座格构式钢塔斜拉桥,其桥型布置图如图1所示。主梁采用分离式扁平双边箱钢主梁,桥梁中心线处梁高3m,顶板分别向两侧按照1.5%的横坡降低,底板保持水平,断面全宽37m,底板水平段宽25.4m,两侧斜底板各宽5.8m,倾斜底板与水平底板之间夹角 $\alpha=17^\circ$ 。主梁断面如图2所示。主塔采用格构式钢塔,塔高96.5m,下塔柱高21.5m,为混凝土结构,上塔柱高75m,为格构式钢结构,桥塔效果图如图3所示。主塔下部设置钻孔灌注桩群桩基础。全桥共设32对拉索,采用平行钢绞线拉索体系,标准强度1860MPa,双索面扇形竖直布置。

收稿日期:2021-01-20

作者简介:刘鹏(1982—),男,工学硕士,高级工程师,从事桥梁设计及研究工作。

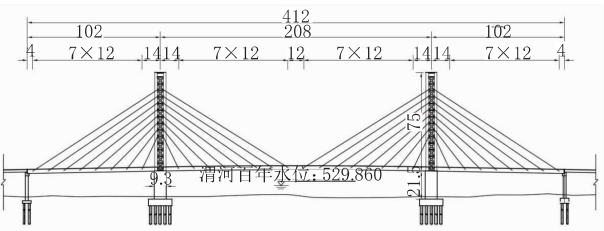


图 1 陆港大桥桥型布置图(单位:m)

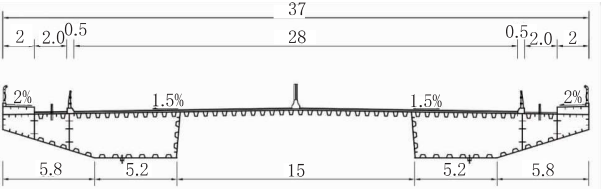


图 2 陆港大桥主梁标准断面图(单位:m)



图 3 桥塔之实景

2 有限元模型

斜拉桥动力模型建立时, 需要充分考虑如何有效模拟结构的刚度、质量和边界条件等问题, 其模型一般有单主梁模式、双主梁模式、三主梁模式等。现在计算时采用单主梁模式中的脊梁模式进行动力特性分析, 将原主梁处理为桥纵轴线位置处的单主梁和横鱼骨, 主梁与横鱼骨均由三维梁单元模拟; 拉索用线弹性杆单元来模拟。由于拉应力和自重垂度的影响, 索表现出非线性刚度特性, 索锚固点定为主梁单元的自然节点, 主梁单元的每个节点通过与主梁纵轴垂直的两根刚度较大的横鱼骨与索单元相连, 两点间为主—从约束关系, 从而使得横鱼骨只出现刚体转动; 主塔用三维梁单元模拟, 截面变化处和索锚固点为梁单元的自然结点; 该桥支座采用摩擦摆球型支座, 根据其力学特性, 在软件中采用滞后系统单元进行模拟; 模型中同时考虑了下部桩基础及桩土效应。

采用 MIDAS 有限元程序建立如图 4 空间三维有限元计算模型, 对该桥进行动力分析, 全桥结构共划分 2 226 个单元, 1 573 个节点。

3 动力测试方法及测点布置

脉动测试法也称环境随机振动法, 是一种获取

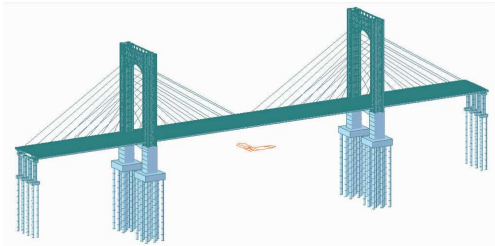


图 4 计算模型

桥梁动力特性(频率, 振形, 阻尼比)快速、简便的实用方法, 在大跨度桥梁的动力测试中应用广泛。它通过超低频加速度传感器拾取大桥各测量部位的环境振动响应, 通过预先计算确定前 n 阶振型中振幅较大的点, 在这些点布置传感器, 得到全桥的振动响应。该桥的动力测试采用脉动测试法, 桥面横桥向左、右两侧对称布点, 边跨在四分点布点, 中跨测试在十六分点布点, 测点布置如图 5 所示。

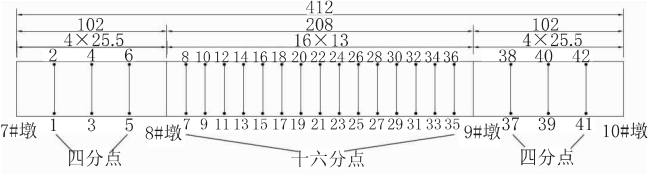


图 5 测点布置图(单位:m)

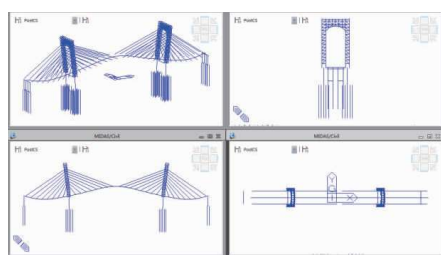
4 固有频率与振型

表 1 列出前 8 阶振型的主要特征、计算频率及实测频率, 理论与实测振型图见图 6 所示(由于篇幅原因只列出部分振型)。

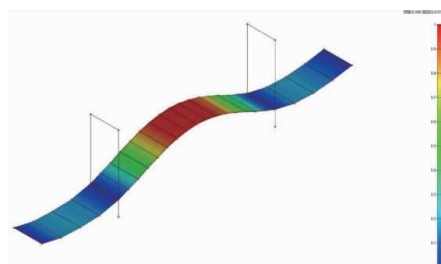
表 1 固有频率和振型一览表

| 编号 | 振型主要特征                   | 自振频率 /Hz | 实测频率 /Hz |
|----|--------------------------|----------|----------|
| 1  | 主梁纵漂 + 主塔纵向弯曲            | 0.373    | 0.395    |
| 2  | 主梁 1 阶正对称竖弯 + 主塔纵向弯曲     | 0.569    | 0.586    |
| 3  | 主梁 1 阶反对称竖弯 + 主塔纵向弯曲     | 0.836    | 0.879    |
| 4  | 主塔横向弯曲(两塔同向) + 主梁横向正对称弯曲 | 1.006    | —        |
| 5  | 主塔横向弯曲(两塔反向) + 主梁横向扭转    | 1.022    | —        |
| 6  | 主梁 2 阶正对称竖弯              | 1.170    | 1.172    |
| 7  | 主梁 2 阶反对称竖弯              | 1.382    | 1.413    |
| 8  | 主塔扭转                     | 1.399    | —        |

由表 1 和图 6 得知: 该桥实测频率与理论计算值吻合度较高, 实测频率值略大于理论值。此桥一阶自振周期为 2.678 s, 小于 6 s, 位于短周期范围内。该桥多个振型为主梁与主塔互相耦合振型, 不利于结构抗震, 这与主梁采用分离式扁平双边箱钢、主塔采用格构式钢塔等有关。此桥前 8 阶中有 6 阶振型与主塔相关, 说明在抗风抗震分析中, 主塔振动占有很



(a)二阶理论振型



(b)二阶实测振型

图6 典型振型图

大的比重,分析认为与主塔的特殊型式有直接关系。主塔扭转频率 1.399 HZ,说明此桥有良好的抗风性能,能保证较高的颤振临界风速。

## 5 结构参数对自振特性的影响分析

结构的动力特性主要取决于结构的组成体系、刚度、质量分布,以及支承边界条件等结构参数。对于斜拉桥而言,当结构体系不变时,影响该类桥型动力特性的主要结构参数有:主塔刚度、主梁刚度、边跨辅助墩、主塔高度等。

### 5.1 主塔刚度影响

保持各肢抗弯惯性矩和截面面积不变,通过改变主塔的材料特性来调整主塔刚度。当主塔刚度分别按 1~10 的倍率发生变化时,由图 7 可以看出,主塔刚度对于前 8 阶的影响可以分为三个阶梯,第一阶梯以主塔振型为主的第 4、5、8 阶频率,这三阶频率几乎随着主塔刚度的增长呈线性增长状态;第二阶梯为振型中耦合了主塔纵向弯曲的第 1、2、3 阶频率,在主塔刚度增长 3 倍之前,这三阶频率的增长较快,之后增长趋于平缓,到 8 倍之后,几乎不再增长;第三阶梯为以主梁振型为主的 6、7 阶频率,主塔刚度变化对这两阶频率几乎没有影响。以上分析发现,主塔刚度对该桥整体的横向刚度、纵向刚度影响最大,对桥梁竖向刚度的影响微乎其微。对于该类型桥型,增加主塔刚度能显著增强桥梁的横向刚度、纵向刚度。

### 5.2 主梁刚度影响

保持主梁抗弯惯性矩和截面面积不变,通过改

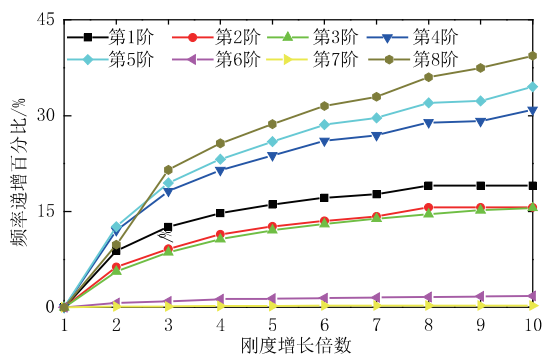


图7 主塔刚度对频率的影响曲线图

变主梁的材料特性来调整主梁刚度。当主梁刚度分别按 1~10 的倍率发生变化时,由图 8 可以看出,当主梁刚度增大时,以竖向弯曲振型为主的 2、3、6、7 阶频率增长明显,接近线性速率;1、8 阶频率前期有一定增长,但当主梁刚度增长 5 倍之后,频率几乎不在变化;以主塔横向振动为主的 4、5 阶频率基本没有变化,说明主梁刚度对桥梁横向刚度基本没有影响。由此可见,对于格构式钢塔斜拉桥,增加主梁刚度能显著增加桥梁的竖向刚度。

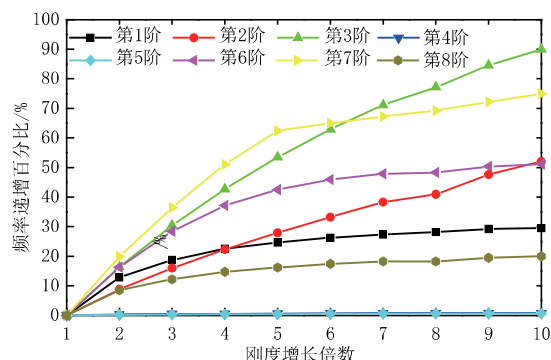


图8 主梁刚度对频率的影响曲线图

### 5.3 边跨辅助墩影响

通过分析辅助墩对格构式钢塔斜拉桥动力特性的影响,研究设置和不设置辅助墩两种情况,辅助墩位于边跨跨中位置。

由频率影响柱状图 9 可以看出,边跨辅助墩对桥梁纵向刚度以及竖向刚度有显著贡献,设置辅助墩后桥梁纵向刚度提高 23%,桥梁竖向刚度提高 18%~48%。辅助墩对主塔横弯及扭转刚度几乎没有影响,分析认为主要是由于四肢格构柱式钢架门型主塔提供了较大的横向刚度和扭转刚度,辅助墩的贡献相对而言就微乎其微。

### 5.4 主塔高跨比影响

主跨跨径保持不变,改变主塔的高度,高跨比变化范围为 1/5~1/2。由频率变化曲线图 10 可以看出,随着高跨比减小,反映桥梁纵向刚度的第 1 阶、反映桥梁横向刚度的第 4 阶和第 5 阶、反映主塔扭

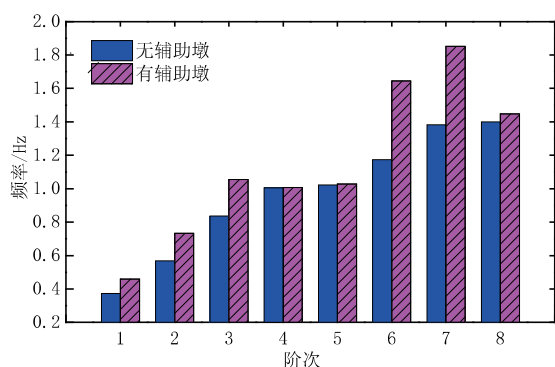


图9 边跨辅助墩对频率的影响柱状图

转刚度的第8阶频率,随着主塔高度的减小,这些刚度总体呈增大趋势;当高跨比介于 $1/3 \sim 1/2.5$ 之间时,刚度变化较为平缓,超出此区间时,刚度变化显著。

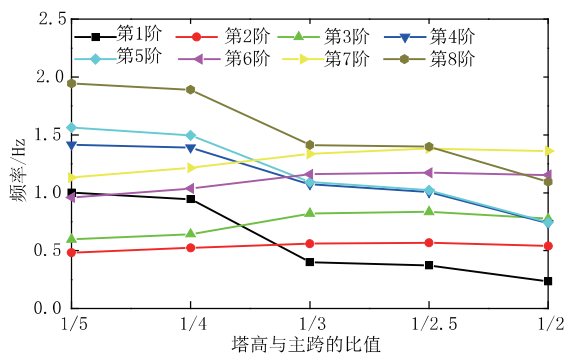


图10 主塔高度变化对频率的影响曲线图

主塔高跨比对桥梁竖向刚度的影响主要体现在支撑刚度上,不考虑主梁弯曲刚度的贡献,索和塔则决定了主梁的支撑刚度,每一座斜拉桥,都有一个最佳塔高,使拉索和塔对主梁的支撑刚度达到最大。根据主要体现竖向刚度的第2阶、第3阶、第6阶、第7阶频率变化可以看出,高跨比介于 $1/3 \sim 1/2.5$ 之间时,竖向刚度变化平缓,基本保持不变;高跨比小于 $1/3$ 时,桥梁的竖向刚度随着主塔高度增加而减小;高跨比大于 $1/2.5$ 时,桥梁的竖向刚度随着主塔高度增加而增大。由以上分析可以得出结论,对于格构式钢塔斜拉桥,索塔高跨比介于 $1/3 \sim 1/2.5$ 之间比较合理。

## 6 结论

本文以国内首座格构式钢塔斜拉桥为工程背景,对其动力特性进行了测试,与理论值进行比较。在此基础上,对在结构参数影响下的桥梁动力特性进行了分析研究,得到了如下结论:

(1)桥梁实测模态振型与理论计算振型一致,实测频率值略大于理论值,说明实际刚度与设计刚度

基本一致,测试方法和计算模型合理。

(2)格构式钢塔斜拉桥由于主塔的特殊性,在各阶频率中,塔梁振型互相耦合,设计中要引起重视;各阶频率的大小,由主振型对应的刚度类型决定。

(3)格构式钢塔有较强的抗扭刚度,为桥梁提供良好的抗风性能,保证结构有较高的颤振临界风速。

(4)增加主塔刚度能显著增加桥梁的横向刚度、纵向刚度,对桥梁竖向刚度的影响较小;增加主梁刚度能显著增加桥梁的竖向刚度,对桥梁纵向刚度影响较小。设计中注意优化主梁、主塔刚度,尽量避免梁塔振型耦合,提高结构的抗风、抗震稳定性。

(5)设置边跨辅助墩对提高桥梁纵向刚度和竖向刚度作用显著;由于主塔为桥梁提供了较大的横向刚度和扭转刚度,辅助墩对这两种刚度的贡献相对而言就微乎其微。

(6)主塔高度对桥梁的各向刚度均有影响,其中桥梁纵向、横向刚度和主塔扭转刚度与主塔高度变化呈反向变化;主塔高度对桥梁竖向刚度的影响主要体现在支撑刚度上,对于每一座斜拉桥,都有一个最佳塔高,使拉索和塔对主梁的支撑刚度达到最大,对于此种桥型,索塔高跨比介于 $1/3 \sim 1/2.5$ 之间比较合理。

### 参考文献:

- [1] 朴洵.大跨度斜拉桥不同动力分析模型比较[J].公路工程,2013,38(3):200-204.
- [2] 陈水生,钟汉清,桂水荣,钟志斌.波形钢腹板多塔斜拉桥动力特性分析[J].桥梁建设,2016,46(2):31-35.
- [3] 黄平明,刘旭政.独塔斜拉桥在不同边界条件下的动力特性分析[J].公路,2007(8):1-5.
- [4] 刘旭政,俞坚扬,刘新民,陈晔.斜拉-连续协作体系桥梁的静动力特性研究[J].中外公路,2016,36(6):78-82.
- [5] 吴兴邦,吕云.三塔斜拉桥动力特性影响参数分析[J].公路工程,2015,40(6):125-128+155.
- [6] 康俊涛,别思汗,邵光强,秦世强,曹鸿猷.双拱塔斜拉桥动力特性参数分析[J].公路,2017,62(4):88-94.
- [7] 郭翠翠,王波,张华兵.斜拉桥索-塔-梁耦合参数振动[J].公路工程,2010,35(3):52-57.
- [8] 刘祖军,葛耀君.斜拉桥考虑下部结构与水体相互作用的动力建模研究[J].公路工程,2009,34(4):11-15.
- [9] 王颀.钢拱桥斜拉桥动力特性参数分析[J].武汉理工大学学报,2009,31(20):73-77.
- [10] 张无畏,胡腾飞,陈长胜,荣浩.箱桁组合梁铁路斜拉桥动力特性有限元建模方法研究[J].世界桥梁,2016,44(2):58-63.