第17卷 第5期
2017年10月

交通运输工程学报
Journal of Traffic and Transportation Engineering

Vol. 17 No. 5
Oct. 2017

文章编号:1671-1637(2017)05-0027-12

双塔钢桁斜拉桥结构强健性计算方法

郑小博,赵 煜,贺拴海,张 岗

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为了确保双塔钢桁斜拉桥的结构强健性,依托新疆果子沟大桥,基于现场结构试验,开发了全方位多点温度补偿系统,测量了特定加载工况下钢桁主梁应变、挠度与斜拉索索力增量,确定了钢桁主梁与斜拉索重要构件的具体位置;基于试验结果,借鉴广义结构刚度理论,采用桥梁结构有限元模型分析了斜拉桥弦杆与斜拉索的重要性系数,研究了桥梁最不利破坏模型。研究结果表明:各工况下钢桁主梁应变实测数据规律性较好,钢桁主梁应变与挠度的实测值与理论计算值的比值小于1.0,表明主梁承载能力与抗变形能力符合设计要求,具有足够的安全储备;主梁在各工况下的最大挠度均发生在中跨跨中,达到237 mm,具有较强抗变形能力;斜拉索索力增量实测值与理论计算值的比值小于1.0,表明斜拉索具有一定的安全储备;钢桁主梁控制截面处弦杆与特定斜拉索为重要性系数较高的构件,斜拉索的重要性系数大于弦杆的重要性系数,其中弦杆的重要性系数分布集中于主塔附近与中跨跨中;通过斜拉索重要性系数的分布可知单根斜拉索的破损不会造成整体结构的坍塌,但多于2根斜拉索失效可能会导致整体结构的连续倒塌;主跨最长斜拉索和中跨跨中、边跨支座处与靠近主塔处弦杆失效对于整体结构较为不利。

关键词:桥梁工程;双塔钢桁斜拉桥;结构强健性;弦杆;斜拉索;现场试验;广义结构刚度;重要性系数

中图分类号:U448.27 **文献标志码**:A

Calculating method of structural robustness of double-tower cable-stayed bridge with steel truss girder

ZHENG Xiao-bo, ZHAO Yu, HE Shuan-hai, ZHANG Gang

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to ensure the structural robustness of double-tower cable-stayed bridge with steel truss girder, all-round multipoint temperature compensation system was developed based on the Xinjiang Guozigou Bridge and field structure test. The strain, deflection and cable force increment of steel truss girder were measured under specific loading conditions, and the specific locations of important components of steel truss girder and stay cables were determined. Based on the experimental result and the generalized structural stiffness theory, the robustness importance factors of cables and chords were analyzed by using the finite element model of bridge structure, and the most critical failure model of cable-stayed bridge was studied. Study result shows that the regularities of the measured data of steel truss girder strain under various working conditions are good, and the ratios of measured and theoretical values of strain and deflection are less than 1.0, so the bearing capacity and anti-deformability of steel truss girder meet the design requirements, and the girder has sufficient safety reserve. The maximum deflection of the girder under each

收稿日期:2017-07-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51308056)

作者简介:郑小博(1986-),男,陕西西安人,长安大学工学博士研究生,从事桥梁结构研究。

导师简介:贺拴海(1962-),男,陕西洛川人,长安大学教授,工学博士。

loading case is at the middle of main span and can reach to 237 mm, so the girder has strong anti-deformability. Because the ratios of the measured increments of cable force and theoretical values are less than 1.0, the stay cables have safety reserve to a certain extent. The chords at control sections and the specific stay cables of the girder have higher importance factors, the factors of stay cables are larger than the values of the chords, and the importance factor distributions of the chords concentrate in the middle of main span and nearby areas of main pylons. According to the distributions of importance factors of stay cables, the damage of single stay cable can causes the collapse of overall structure, and the failures of more than two stay cables will result in the progressive collapse of entire structure. The failures of the longest stay cable of main span and the chords at its middle, as well as the chords at the supports of side spans and near the main towers, are more adverse to the entire bridge. 9 tabs, 14 figs, 25 refs.

Key words: bridge engineering; double-tower cable-stayed bridge with steel truss girder; structural robustness; chord; stay cable; field test; generalized structural stiffness; importance factor

Author resumes: ZHENG Xiao-bo(1986-), male, doctoral student, zhengshi.yan@163.com; HE Shuan-hai(1962-), male, professor, PhD, 1943811337@qq.com.

0 引 言

在环境污染的腐蚀、自然灾害与人为破坏等诸多极端事件中桥梁结构的安全适用性成为新的研究课题,目前,由于结构局部构件的破坏,进而导致相邻构件失效,并引发更多构件破坏,最后出现结构的整体破坏或与初始破坏不成比例的大面积倒塌连锁反应[1],这些灾害的发生基本是因为桥梁强健性不足。强健性是指桥梁结构在其中一个构件失效后的继续承载能力,即桥梁拥有相当的安全储备以使结构不会在个别构件失效后出现连续破坏。美国土木工程协会指出:美国有 77 000 座桥梁由于结构性缺陷或缺乏强健性需要紧急维修,其中 76 000 座桥梁需要更换,50 年前修建的桥梁存在较多的问题[2]。如果桥梁结构缺少强健性,整体桥梁结构在一些主要构件发生损伤后会出现连续倒塌。

Ghosn 等阐述了强健性理论在桥梁上部结构的应用,并在可靠理论基础上总结出了常规桥梁(多主梁简支与连续梁桥)体系因子评定表,以及对于非常规复杂结构桥梁强健性的评定方式,即逐步计算法[3];Liu 等进一步将强健性理论应用于评定桥梁下部结构,提出了桥梁下部结构强健性的评定指标与分析方法,计算并总结了适用于桥梁常规下部结构的体系因子评定表[4];Ghosn 等分析了强健性在桥梁整体结构中的应用,并将体系因子应用于更多种类的中小型桥梁在横、竖向荷载作用下的强健性评定,并总结计算得出了破损桥梁在竖向荷载作用下的体系因子[5];Kudsi 等针对桁架桥梁提出一种结构强健性分析方法,描述了构件由串联和并联配置的构件组成的代表结构系统或桁架桥的框图所需的步骤,所提出的方框图说明了与系统中非冗余构件串联的并行配置的系统强健性和冗余构件组合的可能数目,并推导出系统的可靠性指标和破坏概率的故障前和故障后阶段的通用公式[6];Gharaibeh 等提出了在不同材料行为和不同刚度等因素下的可靠性评定方法,对结构体系中的重要构件进行识别和排名[7],所提出的结果可用于制定结构系统中关键构件预测的合理方法,提出的 2 种重要因素:构件可靠性因素与构件故障后重要性因素系统可靠性对构件故障后行为变化的敏感性,可用来更好地预测结构构件在公路桥梁和海上平台中的可靠性与重要性;赵煜等针对锈蚀损伤对索桁组合连续钢桥承载力进行了综合评定[8];Zhu 等提出了一种评估交通和地震负荷造成的时间依赖风险的方法,并建立桥梁的最佳预防和基本维护策略,根据可用的维护选项和相关成本,开发了总体风险缓解的最佳预防性维护策略,同时,基于风险分析评估了桥梁在车辆及地震荷载作用下各时间段的风险,建立了桥梁的最佳预防和基本维护方案,计算了桥梁养护和加固的费用,并制订了相应的桥梁加固措施[9];Ghosn 等提出制定和实施结构系统和基础设施网络性能标准的建议,扩大关于可靠性结构性能指标的应用范围,研究了结构强健性概念以及网络性能指标,揭示了将结构和基础设施设计流程从传统的基于组件级可靠性的方法转变为跨尺度(从结构系统到跨社区的互连基础设施网络)的需求,这些指标影响结构和基

础设施系统的使用周期、安全性、可靠性和抗风险，可作为系统自恢复性能的组成部分[10]；李源等分析了中承式系杆拱桥吊杆重要构件与易损构件失效时整体能量变化值，确定结构各个构件的重要性系数，与结构的最不利损伤模型[11]；Yang 提出一种量化桥梁体系强健性的方法，并校准可与设计检验方程结合使用的系统因子，以考虑承受横向载荷和垂直载荷的典型桥梁结构的强健性[12]，方法还扩展到处理复杂大跨桥梁结构，为了设计具有各种吊装安全系数和不同损坏情况的示例桥梁，说明了校准过程，叙述了在桥梁工程中为常规使用确定性的风险信息和基于绩效的设计标准；Miao 等提出一种可应用式的概率渐进叠加分析和校准公路桥梁增量分析标准的方法，考虑了荷载的不确定性和成员以及系统的承载能力[13]，可用于为与荷载和抗力因子设计方法原则相一致的桥梁提出连续倒塌分析指南；Ghosn 等基于可靠性理论，通过对比设计和评估规范，评估了结构构件的强度、适用性和抗疲劳性，评估结果显示，各种结构构件和材料强度的目标可靠性水平存在较大差异[14]，且高温作用下的混凝土桥梁安全性也引起了结构工程界的广泛关注；张岗等开展了针对混凝土空心薄壁墩的环境火灾场景的研究，通过分析焰流场结构耦合模型，获得了混凝土空心薄壁墩三维空间火温时变分布规律[15]，采用热力场耦合计算方法，研究了不同火灾模式下预应力混凝土 T 形截面梁桥的破坏模式，跟踪了不同火灾模式下预应力混凝土 T 形截面梁的梁肋变形和翼缘板变形路径[16]。

以上方法主要以结构可靠度理论作为基础，较具体地考虑了桥梁自身特性、荷载作用与所处环境风险的因素，但可靠性理论较难直接应用于实际桥梁的评估和设计中。

双塔斜拉桥广泛应用于公路与铁路交通中。目前，中国现行标准并未引入结构强健性的设计理念。为了提出正确的桥梁设计及加固方案，防止桥梁突然发生连续性破坏，急需对在役双塔斜拉桥进行结构强健性评定。本文以新疆果子沟大桥为例，基于现场结构试验，采用广义刚度理论评定双塔钢桁斜拉桥的整体结构强健性。

1　工程概况

1.1　果子沟大桥介绍

新疆果子沟大桥为双塔双索面钢桁梁斜拉桥，见图 1[17]，跨径为 170 m＋360 m＋170 m＝700 m，主梁由钢桁梁构成，N 形主桁架间距为 26 m，高度为 6 m，节间长度为 6 m，主桁采用焊接整体节点形式。钢桁弦杆为箱形截面，斜杆及竖杆截面均为 H 形。全桥共 104 根斜拉索，采用双索面扇形分布，锚固于主塔锚固区内壁的锯齿块与主桁节点处。桥面板采用混凝土预制桥面板，纵桥向分为 3 段，横桥向分为 4 段。1、2 号主塔高度分别为 209.5、215.5 m，结构为阶梯形钢筋混凝土，塔柱截面为单箱单室，材料为 C50 混凝土。主塔分为上层塔架、中塔墩、下层塔墩，上、中部分高度分别为 133.5、38.0 m，下层 Z1、Z2 号塔墩高度分别为 38、44 m。



图 1　果子沟大桥

Fig. 1　Guozigou Bridge

1.2　有限元模型分析方法

根据主桥结构总体布置与构造特点，采用 ANSYS进行仿真分析，桥梁 ANSYS 的空间三维有限元模型见图 2。

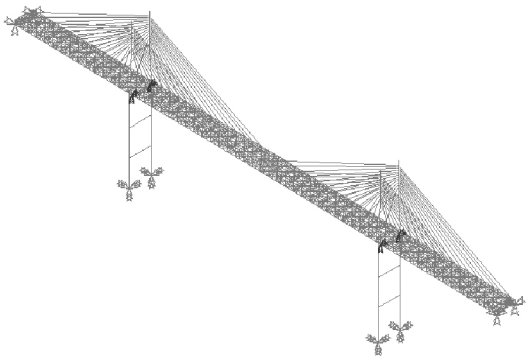


图 2　桥梁有限元分析模型

Fig. 2　Finite element mode of bridge

主塔底边界条件在承台处采用固结约束，主梁端支撑处用一般约束限制桥梁纵向、竖向与横向 3 个平动位移，主梁在桥塔支撑处采用节点耦合的方式将钢桁梁支撑节点与主塔横梁支座节点进行竖向与横向平动位移耦合。可用 3D 有限应变 Beam189 梁单元模拟主塔与钢桁梁，该单元基于铁木辛柯梁结构理论，计入了剪切变形对梁的影响，适于分析线性、大角度转动和非线性大应变问题，可应用于分析一般细长梁与铁木辛柯深梁。用 3D 有限应变 Link180 桁架单

元模拟斜拉索，该单元可承受轴向拉、压，但无法抵抗弯矩，可用于分析桁架、连杆、索和弹簧等[18]。

2 斜拉桥结构现场试验设计

现场结构试验主要测定在试验荷载作用下，桥梁整体结构各控制截面的应力和变形。

2.1 测试内容

在特定荷载作用下，斜拉桥钢桁主梁控制截面的应变与挠度，对于索力较大的斜拉索进行内力增量测试，以上试验基于应变、挠度实测值与理论计算值的比较评定桥梁整体结构对于设计荷载的承载能力[19]。各测试控制断面分布见图 3：截面 Ⅰ-Ⅰ 为小桩号侧边跨主梁最大正弯矩与挠度控制截面；截面 Ⅱ-Ⅱ 为主梁 Z1 墩顶负弯矩控制截面；截面 Ⅲ-Ⅲ 为中跨主梁 $L/4$（L 为跨度）截面正弯矩与挠度控制截面；截面 Ⅳ-Ⅳ 为中跨主梁 $L/2$ 截面最大正弯矩与挠度控制截面。

2.2 试验荷载设计

基于控制截面应变与挠度影响线，选择最不利荷载作用形式，斜拉桥现场试验需要 300 kN 载重车 24 辆，在试验荷载效应（应变和挠度）分析中，试验荷载纵横向轴距与轮距见图 4。

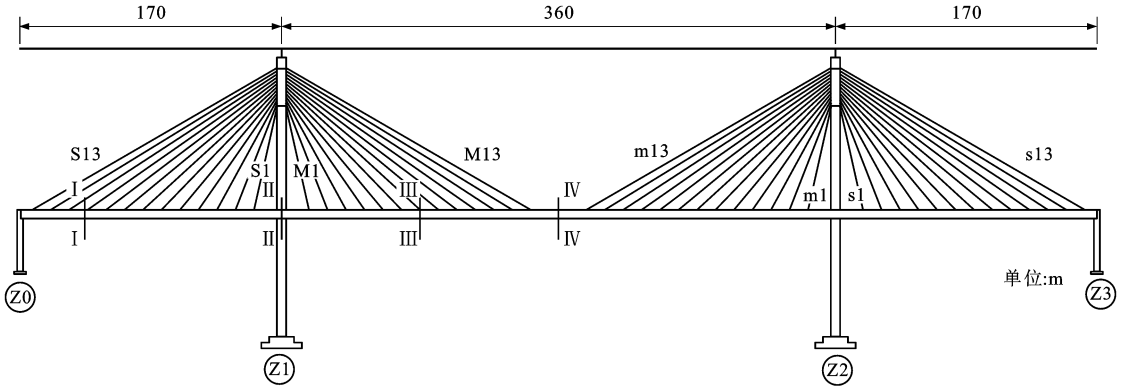
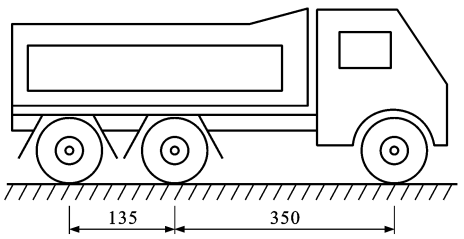
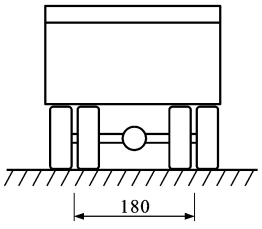


图 3 桥梁测试断面

Fig. 3 Test sections of bridge



(a) 轴距



(b) 轮距

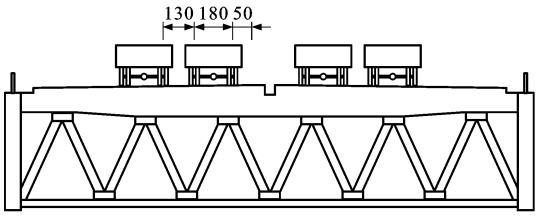
图 4 试验用加载车辆（单位：cm）

Fig. 4 Test loading vehicle (unit: cm)

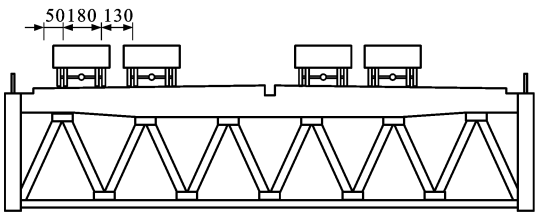
2.3 试验工况与加载位置

2.3.1 试验工况

按各测试截面的弯矩或变形最不利位置布载，共分为 7 种试验荷载工况，分别为：工况 1，主梁截面(Ⅰ-Ⅰ)正弯矩最不利位置中载布置；工况 2，主梁截面(Ⅰ-Ⅰ)正弯矩最不利位置偏载布置；工况 3，主梁截面(Ⅱ-Ⅱ)负弯矩最不利位置中载布置；工况 4，主梁截面(Ⅲ-Ⅲ)正弯矩最不利位置中载布置；工况 5，主梁截面(Ⅲ-Ⅲ)正弯矩最不利位置偏载布置；工况 6，主梁截面(Ⅳ-Ⅳ)正弯矩最不利位置中载布置；工况 7，主梁截面(Ⅳ-Ⅳ)正弯矩最不利位置偏载。试验车辆沿横桥向四列对称布置，见图 5。



(a) 中载布置



(b) 偏载布置

图 5 试验车辆横桥向布置（单位：cm）

Fig. 5 Lateral layouts of test vehicles (unit: cm)

2.3.2　**加载位置**

根据计算模型可得各控制截面内力影响线，根据影响线加载，可得各工况下的试验荷载纵桥向布载位置，见图 6。

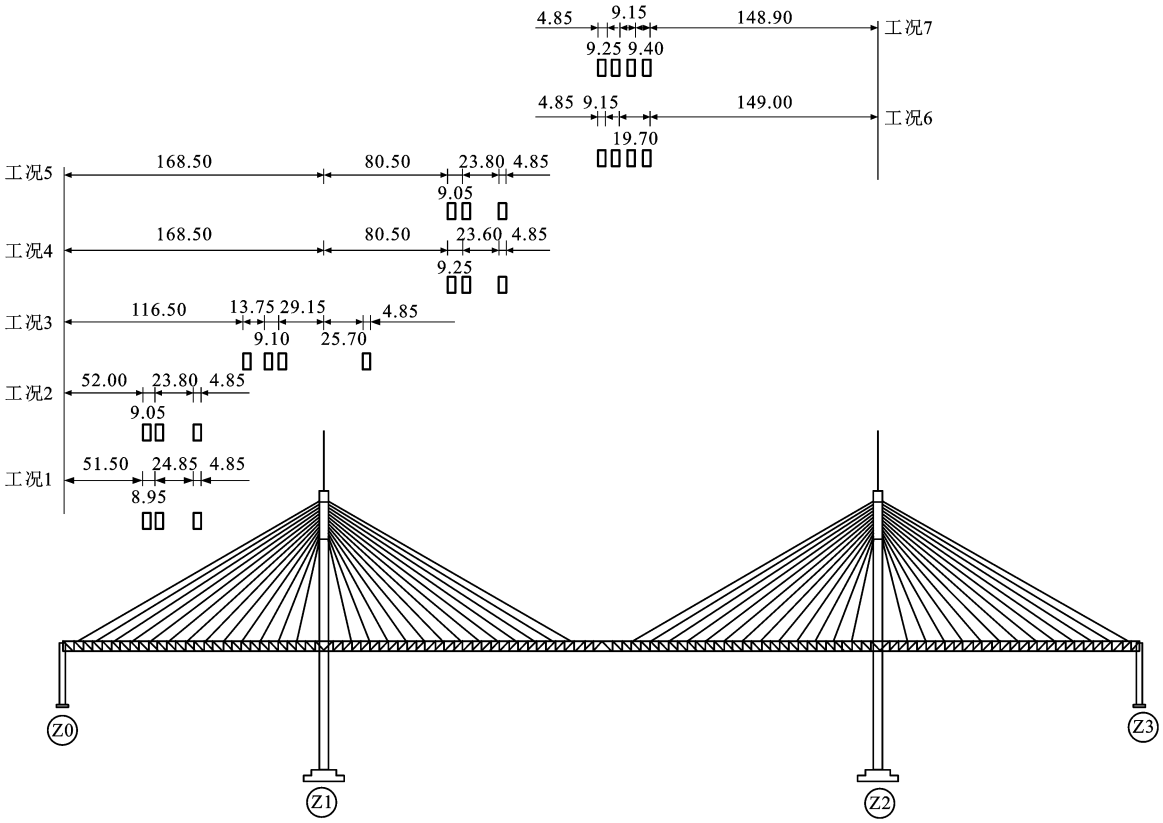


图 6　试验车辆纵桥向布置（单位：m）

Fig. 6　Longitudinal layout of test vehicles (unit: m)

3　试验监测系统

3.1　斜拉索恒载索力测定

恒载作用下斜拉索的受力状态是评价桥梁质量状况的一项重要内容，根据斜拉索拉力与索的振动频率存在对应关系，采用振动频率法测量索力。在信号采集时，用专用夹具将加速度传感器固定在拉索上[20]。具体测试原理见图 7，采用低频索力测试设备测试恒载条件作用下全桥所有斜拉索恒载索力。

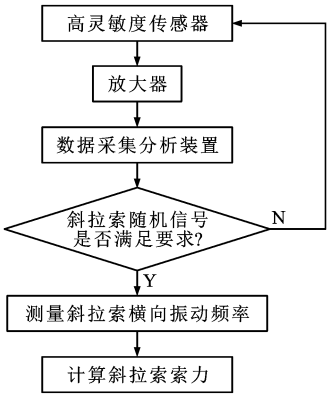


图 7　斜拉索索力测试系统

Fig. 7　Test system of cable tension

3.2　测点布置

3.2.1　**主梁应变测点**

在两纵梁相应测试截面上下弦布设纵桥向应变测点，主梁共设置 4 个测试截面，每个测试截面布置 16 个应变测点，共 64 个主梁应变测点。典型主梁测试截面应变测点布置与现场应变数据收集分别见图 8、9。

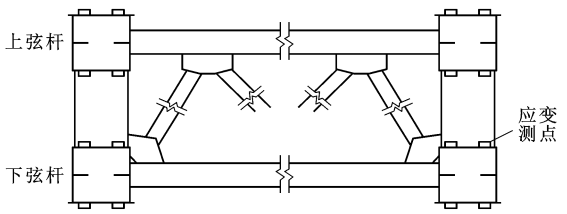


图 8　测试截面弦杆应变测点布置

Fig. 8　Layout of strain measuring points

3.2.2　**主梁挠度测点**

在主梁各跨最大正弯矩控制截面处设置挠度测点控制截面，纵向位置见图 3，测点布置在大桥上行



图 9 应变测试

Fig. 9 Strain test

线和下行线主梁防撞护栏底座上，果子沟大桥挠度测点横向布置见图 10。

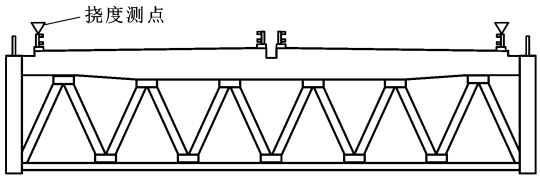


图 10 挠度测试断面测点布置

Fig. 10 Layout of deflection measuring points

4 试验方法研究

(1)试验前，测量试验车辆荷载。

(2)采用全自动应变挠度扫描系统测量钢桁梁与斜拉索的应变与位移增量。

(3) 分析果子沟大桥应变监测系统积累下的海量数据，发现应变传感器受温度影响较明显，对此提出了全方位多点温度补偿系统以补偿温度场对于测量结果的影响。系统结构见图 11。系统采用模块化设计方法完成了新温度补偿系统的硬件和软件设计，由单片机与少数外部电路组成了温度补偿系统的数据处理模块，通过识别、记录各通道上的温度传感器及其 ID，进而在传感器上进行数据交换，达到温度数据读取、转换和上传的目的[21]。

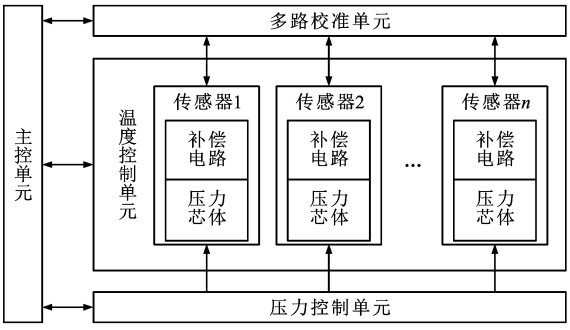


图 11 系统结构

Fig. 11 Structure of system

(4)将测试仪器用导线与传感器连接，联机调试仪器确定信号可以正确无误返回。

(5)进行预加载，以确定整体结构安全性与试验仪器的工作性能。

(6)必须等待各工况的每一次加载完全稳定后进行数据采集，2 次加载需间隔 10 min 以上，等待结构弹性变形充分恢复，以减小结构的残余变形。

(7)各工况均按横向每排试验车辆逐级加载，每级荷载之间须间隔 5 min 以上。

5 试验结果分析

5.1 斜拉桥恒载索力测定

采用振动频率法对全部 104 根斜拉索索力进行测量，斜拉索编号见图 3。其中上、下行线的区分按照里程桩号由小到大定义，即自奎屯向霍尔果斯方向为上行线，反之为下行线。根据对称原则，现选择上行线斜拉索作为研究对象，实测索力与理论值对比见图 12。

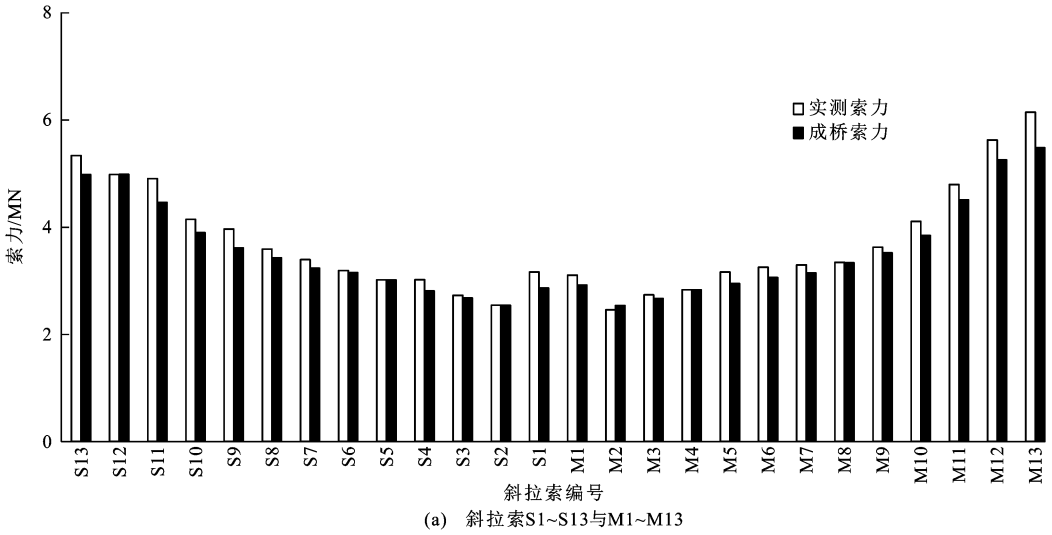
图 12 的恒载索力测试结果表明：果子沟大桥斜拉索实测索力与设计值较为接近，整体索力分布较均匀；从纵桥向索力分布来看，自长索向短索方向索力逐渐减小，索力分布符合斜拉桥拉索一般规律；跨中位置 M13 与 m13 斜拉索实测索力偏大 12.1%～15.7%；上行线编号为 m1、m2、m3、m4、m5、m6 的斜拉索索力偏大 13.4%～21.1%，其余索力差值基本在 10%以内，虽然斜拉索安全系数较大，能够保证斜拉索的安全工作，但是，仍然建议在必要的时候对斜拉索索力进行调整，以保证全桥索力的均匀性和结构受力的合理性；果子沟大桥斜拉索索力基本处于正常工作状态，满足正常使用阶段安全运营要求。

5.2 静载试验结果分析

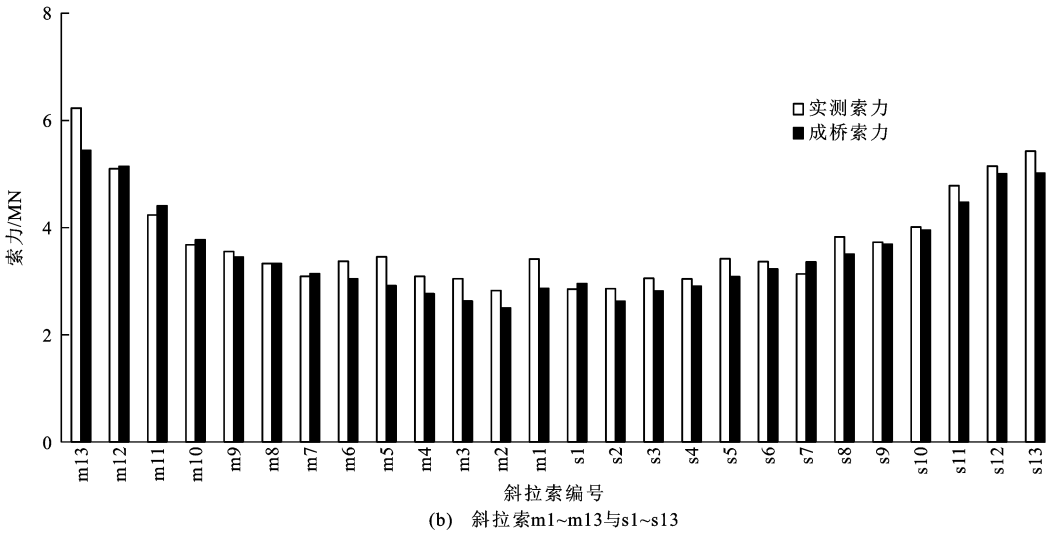
静载试验测试结果包括各测试工况下的测试截面应变、主梁挠度与典型斜拉索索力增量。根据对称原则，现选择上行线弦杆与斜拉索作为研究对象。

5.2.1 主梁控制截面应变

桥梁在试验荷载作用下工况 1、3、4、6 控制截面应变实测值与理论计算值对比分别见表 1～4。其中应变以拉为正，压为负，“/”表示因测点损坏而剔除的数据。由表 1～4 中数据对比可以得到：各工况下主梁测试截面应变实测数据规律性较好，符合理论计算一般规律，说明结构实测参数反映了实际桥梁结构的受力特点，主梁受力性能符合设计要求；主梁各控制截面的应变测点比值最大为 0.99，说明钢



(a)　斜拉索S1~S13与M1~M13



(b)　斜拉索m1~m13与s1~s13

图 12　索力对比

Fig. 12　Comparison of cable force

表 1　工况 1 下边跨主梁截面 Ⅰ-Ⅰ 应变比较

Tab. 1　Comparison of strains at girder section Ⅰ-Ⅰ under loading case 1

测点位置		实测值/10^{-6}	计算值/10^{-6}	比值
上弦杆	上缘	−134	−150	0.96
		−105	−120	0.95
	下缘	−68	−70	0.98
		−76	−79	0.97
下弦杆	上缘	159	165	0.97
		144	149	0.97
	下缘	167	180	0.93
		162	173	0.94

表 2　工况 3 下主梁截面 Ⅱ-Ⅱ 应变比较

Tab. 2　Comparison of strains at girder section Ⅱ-Ⅱ under loading case 3

测点位置		实测值/10^{-6}	计算值/10^{-6}	比值
上弦杆	上缘	36	40	0.90
		33	39	0.86
	下缘	/	23	/
		/	23	/
下弦杆	上缘	−29	−32	0.92
		−19	−21	0.93
	下缘	−32	−34	0.96
		−28	−29	0.98

桁加劲梁处于正常工作阶段，并且具有一定的安全储备。

5.2.2　主梁控制截面挠度

中载与偏载工况下主梁控制截面挠度实测值与理论值对比分别见表5、6，其中挠度以竖直向下为正，竖直向上为负。由表 5、6 可得到：主梁在各个工况下的挠度规律与理论分析结果基本一致；各工况下主梁的最大挠度均发生在中跨跨中截面，中载工况下中跨跨中最大挠度为 237 mm，偏载作用下中跨跨中最大挠度为 234 mm；在中载和偏载作用下，

表 3 工况 4 下主梁截面Ⅲ-Ⅲ应变比较

Tab. 3 Comparison of strains at girder section Ⅲ-Ⅲ under loading case 4

测点位置		实测值/10^{-6}	计算值/10^{-6}	比值
上弦杆	上缘	−87	−90	0.97
		−93	−97	0.96
	下缘	−41	−45	0.92
		/	−56	/
下弦杆	上缘	75	79	0.96
		74	76	0.97
	下缘	113	125	0.90
		112	128	0.88

表 4 工况 6 下主梁截面Ⅳ-Ⅳ应变比较

Tab. 4 Comparison of strains at girder section Ⅳ-Ⅳ under loading case 6

测点位置		实测值/10^{-6}	计算值/10^{-6}	比值
上弦杆	上缘	−228	−231	0.99
		−209	−231	0.90
	下缘	−112	−135	0.83
		/	−145	/
下弦杆	上缘	190	204	0.93
		200	204	0.98
	下缘	262	282	0.93
		252	262	0.96

表 5 中载工况下控制截面挠度比较

Tab. 5 Comparison of deflections at control sections under middle loading cases

工况	截面	实测值/mm			理论值/mm			比值
		上行线	下行线	平均值	上行线	下行线	平均值	
1	Ⅰ-Ⅰ	89	89	89	97	97	97	0.92
4	Ⅲ-Ⅲ	107	107	107	118	118	118	0.91
6	Ⅳ-Ⅳ	231	243	237	236	236	236	1.00

表 6 偏载工况下控制截面挠度比较

Tab. 6 Comparison of deflections at control sections under biased loading cases

工况	截面	上行线			下行线		
		实测值/mm	理论值/mm	比值	实测值/mm	理论值/mm	比值
2	Ⅰ-Ⅰ	95	101	0.94	87	92	0.95
5	Ⅲ-Ⅲ	/	182	/	101	104	0.97
7	Ⅳ-Ⅳ	234	243	0.96	214	221	0.97

主梁各截面挠度的横向分布规律与理论计算一致，表明主梁的横向刚度满足设计要求。

5.2.3 索力增量测试

在各测试工况下，在典型截面进行最大索力增量测试，根据活载作用下的索力增量计算结果，选择了典型拉索进行了索力增量测试。典型工况下索力增量实测值与理论计算值对比见表 7。

由表 7 中各个工况的索力增量测试对比结果可知，斜拉索索力增量实测值整体上小于理论计算值，说明斜拉索有一定的安全储备。

表 7 索力增量比较

Tab. 7 Comparison of cable force increments

工况	1		2		4		5		6		7	
斜拉索编号	S8	S9	S8	S9	M7	M8	M7	M8	M13	m13	M13	m13
理论索力增量/kN	154	65	248	104	328	359	353	363	449	430	573	530
实测索力增量/kN	/	61	244	96	313	354	349	354	460	427	552	513

各工况下主梁应变实测数据符合理论计算一般规律，说明结构实测参数反映了实际桥梁结构的受力特点，主梁受力性能符合设计要求。主梁各控制截面的应变测点比值最大为 0.99，说明钢桁加劲梁处于正常工作阶段，并且具有一定的安全储备。由主要控制截面的挠度对比结果可知：主梁在各个工况下的挠度规律与理论分析结果基本一致；各工况下主梁的最大挠度均发生在中跨跨中截面，中载作用下最大挠度为 237 mm，偏载作用下最大挠度为 234 mm；在中载和偏载作用下，各工况下挠度实测值整体上小于理论计算值，表明主梁抗弯曲变形能力较强。各工况下的索力增量测试对比结果表明斜

拉索索力增量实测值小于理论值计算值，说明斜拉索有一定的安全储备。

通过以上对比结果，可以确定截面Ⅰ-Ⅰ、Ⅱ-Ⅱ、Ⅲ-Ⅲ、Ⅳ-Ⅳ处的下弦杆和斜拉索 S9、M8 和 M13 为较薄弱构件，其中Ⅳ-Ⅳ截面下弦杆在最不利荷载作用下增量为 2.62×10^{-4}，M13 在对应最不利荷载作用下索力增量达到 552 kN。

6　结构强健性计算方法研究

构件重要性是指构件的变化（破损与失效等）对整体结构的影响[22]。结构内部有效传力路径不仅与结构自身特性，如几何构成和刚度分布等相关，还受到荷载作用形式的影响。荷载作用下的结构体系的传力路径受到构件刚度的影响，且传递荷载比例较大的路径上的构件重要性明显较大。通过对特定荷载工况下结构进行分析，对内部各传力路径进行荷载传递计算，可获得各构件重要性数值。

6.1　构件重要性计算方法

外力对于保守系统所做的功等于结构应变能的增量，弹性结构受到外荷载 $\boldsymbol{F}$ 作用为

$$\boldsymbol{F}=F_{\max}\boldsymbol{v} \tag{1}$$

式中：$F_{\max}$为最大荷载向量；$\boldsymbol{v}$ 为荷载分布向量。

荷载 $\boldsymbol{F}$ 作用下结构的应变能 U 为[23]

$$U=\frac{1}{2}\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}=\frac{1}{2}\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}^{-1}\boldsymbol{F}=\frac{1}{2}F_{\max}^{2}\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}^{-1}\boldsymbol{v} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{D}$ 为荷载 $\boldsymbol{F}$ 作用下结构位移向量；$\boldsymbol{K}$ 为结构刚度矩阵。

可定义广义力 F_s 为结构上荷载分布，产生相应的结构位移分布为广义位移 D_s，则广义结构刚度 K_s 可表示为

$$K_s=F_s/D_s \tag{3}$$

由此产生的整体结构应变能为

$$U=\frac{1}{2}F_sD_s=F_s^2/2K_s \tag{4}$$

比较可知，广义结构刚度 K_s 与 $\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}^{-1}\boldsymbol{v}$ 成反比，即 K_s 变为

$$K_s=\frac{1}{\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}^{-1}\boldsymbol{v}} \tag{5}$$

代入式(3)可得

$$U=F_s^2/2K_s \tag{6}$$

$$K_s=F_s^2/2U$$

式(6)通过计算确定荷载作用下结构的应变能获得广义结构刚度 K_s，其与结构刚度矩阵 $\boldsymbol{K}$ 有本质上的区别。结构刚度矩阵 $\boldsymbol{K}$ 仅受结构自身特性影响，外荷载作用对其不产生影响，而广义结构刚度 K_s 是对整体结构抵抗荷载作用下变形能力的表征，同时受到结构自身属性与外在荷载作用形式的双重影响。根据式(6)，提出了基于结构广义刚度的构件重要性系数

$$I=\gamma I_0=\gamma\left(1-\frac{K_d}{K_0}\right) \tag{7}$$

式中：γ 为结构整体重要性系数；I_0 为结构重要性原始评价指标；K_0 为完好结构的广义结构刚度；K_d 为退化结构的广义结构刚度；I 为结构重要性指标综合值。

式(7)的结构重要性原始评价指标 I_0 的取值为 0～1，I_0 为 0 反映在特定荷载作用下，构件的失效不会对整体结构性能产生影响，即对于结构内部的传力没有任何作用；I_0 为 1 表示构件极其重要，其失效会导致结构在给定荷载的作用下发生连续倒塌。由此可见，式(7)中的评价指标 I 包含了不同交通等级下的安全设计储备。根据《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153—2008)中交通等级划分，可将桥梁安全分为 3 个等级，所对应的重要性系数 γ 分别为 1.1、1.0、0.9[24]。

6.2　双塔钢桁斜拉桥结构强健性研究

结构系统中各结构构件（或子结构）的重要性评价对于结构设计的合理性与安全性有重要意义，与外在荷载形式对应的结构内部传力路径与构件重要性紧密相关[25]，基于结构广义刚度的概念，可以获得各构件的重要性评价指标。

斜拉桥上部结构构件可分为 2 类：钢桁主梁杆件和斜拉索构件。相应地根据影响线施加最不利荷载并将其转化为荷载列阵，根据式(4)、(6)可计算出相应的结构广义刚度和构件重要性系数。

6.2.1　钢桁主梁杆件重要性系数

斜拉桥钢桁主梁承受巨大轴向压力，各杆件最可能出现的失效模式为受压失稳。杆件编号从小桩号侧自 1 开始增加至 116，根据各构件影响线形状，选择 4 个较为典型的杆件加载模式，定义 x 坐标轴为以主梁中跨跨中为原点，沿主梁纵向大桩号方向为正，具体加载方法见表 8。

将荷载换算成荷载列阵，代入式(6)可求得钢桁主梁下弦杆各杆件的重要性系数，见图 13。由图 13 可以看出：斜拉桥钢桁主梁中跨下弦杆的重要性系数在跨中达到最大值（约为 0.099），然后向两侧递减至索塔附近；主塔附近钢桁主梁重要性系数显著增大（约为 0.090），然后向边跨支点处逐渐递增

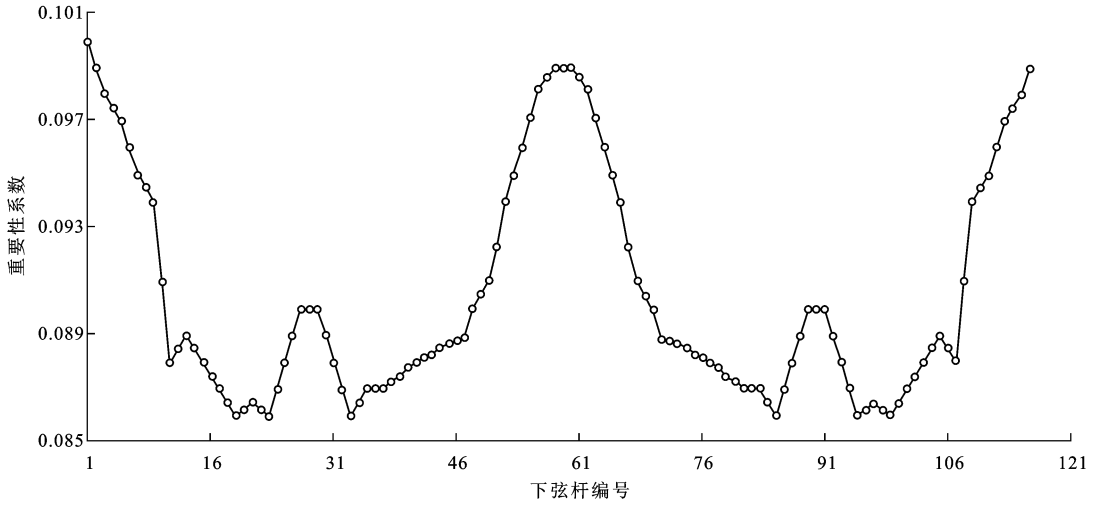


图 13 下弦杆重要性系数

Fig. 13 Importance factors of lower chords

表 8 钢桁主梁加载方法

Tab. 8 Loading methods of steel truss girder

杆件编号	加载方法
8	小桩号侧边跨满载，集中力作用于 $x=-306$ m 处
29	均布荷载作用于小桩号侧边跨与中跨 $x=-180\sim-60$ m，集中力作用于 $x=-218$ m 处
44	均布荷载作用于中跨 $x=-180\sim-40$ m 处与大桩号侧边跨满布，集中力作用于 $x=-90$ m 处
59	均布荷载作用于中跨 $x=-60\sim60$ m 处，集中力作用于 $x=0$

(约为 0.100)。

6.2.2 斜拉索的重要性系数

斜拉桥索承受巨大轴向拉力，各构件最可能出现的失效模式为受拉屈服。根据各构件影响线形状，选择 3 个较为典型的杆件加载模式，根据定义的坐标确定荷载纵桥向位置 x，具体加载方法见表 9。

表 9 斜拉索加载方法

Tab. 9 Loading methods of stay cables

斜拉索编号	加载方法
S9	均布荷载作用于小桩号侧边跨、中跨，集中力作用于 $x=-294$ m 处
M8	均布荷载作用于小桩号侧边跨与中跨，集中力作用于 $x=-78$ m 处
M13	均布荷载作用于小桩号侧边跨与中跨 $x=-66\sim180$ m，集中力作用于 $x=-18$ m 处

将荷载换算成荷载列阵，代入式(6)可求得各斜拉索的重要性系数，见图 14。拉索的重要性系数由接近主塔位置向两侧增大，靠近主跨跨中的斜拉索最为重要，其重要性系数达到 0.36；锚固于两侧边跨跨中的斜拉索也较为重要，重要性系数约为 0.32；端锚索由于对于整体结构的变形有至关重要的作用，重要性系数略大于最靠近主塔的拉索，约为 0.27。

6.2.3 结构最不利破坏模型

根据广义结构刚度理论确定的结构强健性重要系数的分布，在恒载与设计荷载作用下，斜拉索的重要性系数大于钢桁主梁弦杆。斜拉索 M13、S9、S13 与中跨钢桁梁跨中、边跨支座处及靠近主塔处弦杆失效对于整体结构较为不利，会造成桥梁结构整体性下降，抗变形和承载能力不足。

7 结 语

(1)通过桥梁现场结构试验确定双塔钢桁斜拉桥的易损构件，基于结构广义刚度确定了斜拉桥钢桁主梁杆件和拉索在最不利荷载作用下的重要性系数，得到了结构的最不利损伤模型。

(2)通过桥梁现场结构试验确定了果子沟大桥在特定加载工况下钢桁主梁控制断面上、下弦杆的应变，以及相应截面的挠度与重要斜拉索的索力增量。确定了桥梁整体结构的受力状态与设计荷载作用下的承载能力。

(3)开发并应用的全方位多点温度补偿系统有效弥补了新疆伊犁地区温度场分布不均对测量结果造成的严重影响。

(4)基于结构广义刚度理论确定了荷载作用下结构的强健性评定指标，并与《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153—2008)中规定的桥梁结构整体重要性系数相结合，研究了最不利荷载作用下钢桁主梁与斜拉索的构件重要性系数，确定了整

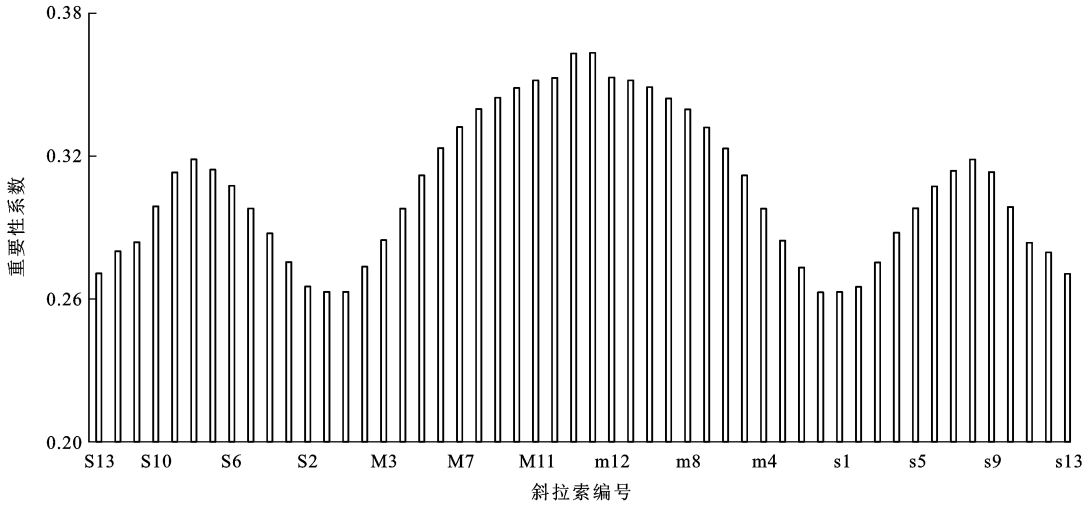


图 14　斜拉索重要性系数

Fig. 14　Important factors of stay cables

体结构的最不利破坏模型。

(5)主梁受力性能符合设计要求，具有较强的抗弯曲能力。各工况下斜拉索索力增量实测值均小于理论计算值，表明拉索已具备相当的安全储备。

(6)基于广义刚度的重要性系数计算方法较为具体、综合地反映了桥梁的安全等级、荷载作用形式与具体的结构特性，包含结构的几何分布、材料属性与构件的截面特性等。由此计算的重要性系数分布也有较大差别。在将来的研究工作中，应该注重钢桁斜拉桥在设计荷载与环境共同作用下的破坏机理与倒塌过程，并提出可操作的设计、养护与加固建议。

参 考 文 献：

References：

[1] 谷　音，范立础，叶建仁. 基于结构易损性的斜拉桥多灾害安全性能研究[J]. 福州大学学报：自然科学版，2010，38(3)：401-407.
GU Yin，FAN Li-chu，YE Jian-ren. The assessment method of safety performance of cable-stayed bridge under multi-hazard based on structure vulnerability[J]. Journal of Fuzhou University：Natural Science Edition，2010，38(3)：401-407. (in Chinese)

[2] ASCE. 2005 report card for America's infrastructure[R]. Reston：ASCE，2005.

[3] GHOSN M，MOSES F. Redundancy in highway bridge superstructures (report 406)[R]. Washington DC：National Academy Press，1998.

[4] LIU W D，GHOSN M，MOSES F. Redundancy in highway bridge substructures (report 458)[R]. Washington DC：National Academy Press，2001.

[5] GHOSN M，YANG Jian，BEAL D，et al. Bridge system safety and redundancy[R]. Washington DC：TRB，2014.

[6] KUDSI T N，FU C C. Redundancy analysis of existing truss bridges：a system reliability-based approach[C]//IABMAS. IABMAS'02 First International Conference Bridge Maintenance，Safety and Management. Stresa：IABMAS，2002：1-9.

[7] GHARAIBEH E S，FRANGOPOL D M，ONOUFRIOU T. Reliability-based importance assessment of structural members with applications to complex structures[J]. Computers and Structures，2002，80(12)：1113-1131.

[8] 赵　煜，贺拴海，宋一凡. 在役索桁组合连续钢桥承载力综合评估方法[J]. 长安大学学报：自然科学版，2005，25(5)：47-50.
ZHAO Yu，HE Shuan-hai，SONG Yi-fan. Evaluation methodology for existing truss cable composite continuous steel bridge[J]. Journal of Chang'an University：Natural Science Edition，2005，25(5)：47-50. (in Chinese)

[9] ZHU Ben-jin，FRANGOPOL D M. Risk-based approach for optimum maintenance of bridges under traffic and earthquake loads[J]. Journal of Structural Engineering，2013，139(3)：422-434.

[10] GHOSN M，DUEÑAS-OSORIO L，FRANGOPOL D M，et al. Performance indicators for structural systems and infrastructure networks[J]. Journal of Structural Engineering，2016，142(9)：F4016003-1-18.

[11] 李　源，贺拴海. 基于吊杆损伤失效的飞燕式拱桥鲁棒性研究[J]. 合肥工业大学学报：自然科学版，2014，37(10)：1254-1258.
LI Yuan，HE Shuan-hai. Research on robustness performance of swallow type arch bridge based on suspender damage[J]. Journal of Hefei University of Technology：Natural Science，2014，37(10)：1254-1258. (in Chinese)

[12] YANG Jian. Structural redundancy and system reliability of highway bridges[D]. New York：City University of New York，2015.

[13] MIAO Feng，GHOSN M. Reliability-based progressive collapse analysis of highway bridges[J]. Structural Safety，2016，63：33-46.

[14] GHOSN M, FRANGOPOL D M, MCALLISTER T P, et al. Reliability-based performance indicators for structural members[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(9): F4016002-1-13.

[15] 张 岗,贺拴海,王翠娟. 焰流效应下混凝土空心薄壁墩火温时变分布[J]. 交通运输工程学报,2014,14(1):26-34.
ZHANG Gang, HE Shuan-hai, WANG Cui-juan. Time-dependent variation distribution of fire temperature for concrete hollow thin-walled pier affected by flame fluid[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(1): 26-34. (in Chinese)

[16] 张 岗,朱美春,贺拴海,等. 火灾下预应力混凝土 T 形截面梁破坏模式研究[J]. 中国公路学报,2017,30(2):77-85.
ZHANG Gang, ZHU Mei-chun, HE Shuan-hai, et al. Failure model analysis of prestressed concrete T girder exposed to fire[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(2): 77-85. (in Chinese)

[17] 赵 煜,周勇军,周 敉,等. G30 线连霍高速公路赛里木湖至果子沟口段果子沟大桥桥梁静动载试验报告[R]. 西安:长安大学,2016.
ZHAO Yu, ZHOU Yong-jun, ZHOU Mi, et al. Static and dynamic load test report on Sailimu Lake to Guozigou Bridge of Guozigou section of G30 Lianhuo Expressway[R]. Xi'an: Chang'an University, 2016. (in Chinese)

[18] 王新敏. 基于 ANSYS 的舰船设备抗冲击之 DDAM 研究[J]. 国防交通工程与技术,2013(1):1-5,59.
WANG Xin-min. ANSYS-DDAM study for the shock response of shipboard equipments[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defense, 2013(1): 1-5, 59. (in Chinese)

[19] CHEN Chien-Chou, WU Wen-Hwa, LIU Chun-Yan, et al. Diagnosis of instant and long-term damages in cable-stayed bridges based on the variation of cable forces[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2017: 1-15.

[20] ZHOU Yu-fen, CHEN Su-ren. Framework of nonlinear dynamic simulation of long-span cable-stayed bridge and traffic system subjected to cable-loss incidents[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(3): 04015160-1-17.

[21] 刘 坤. 关头坝大桥应变监测系统研究[D]. 西安:长安大学,2013.
LIU Kun. Researches on the strain monitoring system of Guantouba Bridge[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)

[22] HUNLEY C T, HARIK I E. Structural redundancy evaluation of steel tub girder bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(3): 481-489.

[23] 叶列平,林旭川,曲 哲,等. 基于广义结构刚度的构件重要性评价方法[J]. 建筑科学与工程学报,2010,27(1):1-6.
YE Lie-ping, LIN Xu-chuan, QU Zhe, et al. Evaluating method of element importance of structural system based on generalized structural stiffness[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(1): 1-6. (in Chinese)

[24] GB 50153—2008,公路工程结构可靠度设计统一标准[S].
GB 50153—2008, unified standard for reliability design of engineering structures[S]. (in Chinese)

[25] ZHOU Yu-fen, CHEN Su-ren. Dynamic simulation of a long-span bridge-traffic system subjected to combined service and extreme loads[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(9): 04014215-1-18.