

基于失效形式的拉索检测与安全评估

邓年春¹ 段春凯² 王晓琳³

(1 广西大学土木建筑工程学院 南宁 530004 2 中国铁建大桥工程局集团有限公司 天津 300300

3 柳州欧维姆结构检测技术有限公司 柳州 545006)

摘要:拉索是缆索支承桥梁的核心构件, 如何对桥梁拉索进行有效检测和安全评估是一项值得研究的课题。本文基于目前常用的拉索结构, 在研究其病害特点的基础上, 分析失效形式和失效部位, 提出基于失效形式, 对拉索的易损部位进行重点检测。现有拉索的安全评估主要是比较荷载水平和结构抗力的关系, 文中总结了现有的拉索荷载水平检测方法和拉索结构抗力检测方法, 指出了各种检测方法的适用性。结合拉索的失效形式, 提出了拉索的有效检测程序和方法, 并进一步提出拉索的安全评估方法和强度状态指标。文中的研究成果, 有利于对拉索检测和评估工作形成指导, 可在确保结构安全的基础上, 简化工作量。

关键词:拉索检测 索力 抗力 失效形式 安全评估

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2017.03.005

1 引言

拉索是缆索支承桥梁的核心构件, 它主要以高强材料为受力件, 外加保护系统组成。从结构组成来说, 拉索主要包括索体和锚具两部分。目前拉索的索体主要包括钢丝、钢绞线、钢丝绳、钢棒等外包防护层, 拉索锚具结构形式主要包括钢丝镦头锚、钢丝冷铸镦头锚、夹片群锚、挤压锚、热铸锚等, 拉索体系结构如图1所示。目前, 应用较为广泛的拉索结构主要有两大类: 平行钢丝冷铸镦头锚拉索和平行钢绞线夹片群锚拉索。无论哪种拉索体系, 桥梁中的拉索系统从长度上的区段结构划分, 可分成两部分: 锚固段和自由段。锚固段由锚板、支承筒、螺母组件, 以及由逐渐收缩成束的PE引导管、密封筒以及减振装置等组成。自由段, 从一端导管到另一端导管之间的距离, 主要由外套管和钢绞线组成。从拉索自身结构组件来分, 可分成保护系统、受力元件和辅助元件三部分。保护系统主要包括索体保护层、密封筒、保护罩, 受力元件主要包括钢丝、锚板、螺母, 辅助元件包括减振装置、预埋管及保护罩。

目前拉索病害的主要形式有: (1) 防护系统失效, 主要包括索体护套开裂、防水的保护罩漏水; (2) 锚具腐蚀, 主要是积水或外露的情况下, 锚具锈蚀; (3) 钢丝的腐蚀或断丝, 主要是下预埋管段及下出口段锈蚀, 因防护系统失效, 索体内积水并形成腐蚀条件, 应力腐蚀情况下甚至会断丝; (4) 拉索的松弛与振动, 因拉索松弛或结构受力的重调整, 部分拉索的索力减少, 易振动。

转自《第二十二届全国桥梁学术会议》论文集

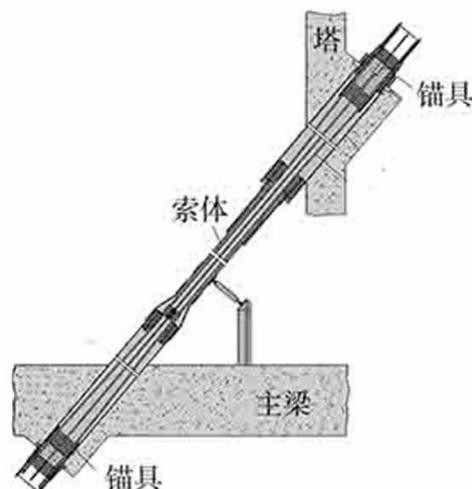


图1 拉索体系结构图

对拉索的现状进行评估和使用寿命预测, 主要是对拉索现状的安全性和劣化速度进行评估, 以便估算使用寿命。安全性评估的本质是比较抗力与荷载的关系, 严格来说, 比较过程是动态的、实时的。目前完全的实时监测, 是难以实现的, 基本是以窗口数据或点数据来进行分析。分析过程, 主要是根据拉索自身的设计和施工数据、历史检测数据、现状检测结果, 以及拉索构件在结构中与其它构件的关系等方面, 综合进行分析。现状检测内容应主要包括拉索应力状态测量、受力体抗力退化状态检测和防护系统状态检测三部分内容。

2 拉索荷载水平检测方法

拉索的荷载水平检测应包括三方面内容: 静态应力测量、动态应力测量和钢丝受力不均匀性测量。静态应力测量常常是以静态索力测量为主, 常用的索力测试方法主要有千斤顶拉拔法、弹性体测力传感器法(根据敏感元件又可分成应变片、振弦式、液压式、光纤光栅、光纤式

等)、振动频率测量法(包括加速度传感器法和视频频率测量法)、电磁测量磁通量传感器法、索体索内或锚具周向安装传感器法(包括植入FRP-OFBG筋传感器、应变片传感器、光纤光栅传感器和光纤传感器),其中的一些测试方法,同时又测量出动态数据,包括应变和光纤光栅测力传感器、植入FRP-OFBG筋法和安装封装传感器法(包括应变片式和光纤光栅式)。

2.1 轴向拉拔法

轴向拉拔法是利用轴向拉拔工具直接给拉索施加反作用力,测量出回缩力即得到索力,常用的是千斤顶拉拔法。它是利用安装于拉索张拉千斤顶上的机械压力表或电子压力传感器测得油压值,根据标定方程换算成索力值。该种测量方法需要对索进行张拉作业,是拉索施工过程中较常用的一种方法,用于既有桥梁拉索索力测量时,需轻微脱离锚垫板张拉。它的测量精度取决于千斤顶的标定精度和千斤顶安装位置前端的拉索锚具与预埋管之间摩擦力的影响。一般千斤顶标定之后,测量不确定度为2%,如结合弹性体测力传感器可获得更高精度测量。

2.2 弹性体测力传感器法

弹性体测力传感器测定法是将柱式测力传感器放置于拉索的锚具螺母和垫板之间或其它受压位置,利用承载块对传感器的柱式弹性体的挤压,测量出索力。由于柱式弹性体受到外力作用时,弹性元件产生变形,根据虎克定律,金属材料在弹性变形范围内应力和应变呈线性关系,所以弹性元件的变形是和被测力的大小成比例关系,而布设在弹性元件上的敏感元件随弹性元件一起产生变形,导致自身的输出信号发生变化,检测出敏感信号从而测出索力。为了减少偏心的影响一般在柱式弹性体上对称布设4个或8个敏感元件。测力传感器根据敏感元件的不同,分为应变片测力传感器、振弦测力传感器、光纤光栅测力传感器。另外,弹性体内充满惰性液体的液压传感器,也可归入弹性体测力传感器。

2.2.1 应变片测力传感器

应变片测力传感器是在柱式弹性体周向,对称粘贴应变片,并将应变片接成测量电桥电路。当传感器的弹性元件受外力作用时,测量电桥将产生正比于被测力的不平衡输出,因而可根据电桥输出的大小衡量被测力值。该类传感器具有良好的短期测量精度,测量精度可达0.5%F.S,该方法属于

动态测量法,采样频率可达1000HZ。常用于试验室内测试和短期试验测试,很少用于长期测量。

2.2.2 振弦测力传感器

振弦测力传感器是在柱式弹性体周向,布设拉紧的金属弦作为敏感元件,当弦的长度确定之后,其固有振动频率的变化量即可表征弦所受拉力的大小,通过相应的测量电路,就可得到弦振动频率与被测力值成一定关系的电信号。测量精度可达0.5%F.S。该方法属于静态测量。

2.2.3 光纤光栅测力传感器

光纤光栅测力传感器是在柱式弹性体周向,对称粘贴裸光纤光栅传感器或封装后的光纤光栅传感器。当被测载荷作用在弹性体上时,将引起弹性体的变形并传递给光纤光栅,导致光纤光栅的中心波长产生变化,经过光纤光栅分析仪解调出光纤光栅的波长变化量,得出被测力值。测量精度可达0.5%F.S。该方法属于动态测量法,采样频率可达1000HZ。用于长期测量时,可采用自补偿式的光纤光栅传感器作为敏感元件。

2.2.4 液压传感器

液压传感器是在弹性体内设置一空腔,空腔内充满惰性液体。当被测载荷作用在弹性体上时,荷载传递给弹性体腔内的液体,利用液压变送器精确地测量出弹性体腔内液体的压强并转化为电流信号输出。通过标定,建立外界作用力与电流值一一对应关系,实际使用时由测量得到的电流值得出外界作用力值。该类方法的测量精度可达0.5%F.S,属于动态测量法,采样频率可达10Hz。

2.3 振动频率测量法

振动频率测量法是依据索力与索的振动频率之间存在对应关系的特点,在已知索长度、两端约束情况、分布质量等参数时,测量拉索在环境振动激励下的振动信号,并进行频谱分析,得出拉索的自振频率,进而由索力与拉索自振频率之间的关系获得索力。该类方法主要有加速度传感器和视频测量法。

2.3.1 加速度传感器法

加速度传感器法将高灵敏度的拾振器绑在斜拉索上,拾取拉索在环境振动激励下的振动信号,并进行频谱分析,由索力与拉索基频之间的关系获得索力,该方法具有测量简单、安装方便、可重复测试等特点,是拉索施工监控和运营期测量中常采用的方法,但该方法的测量精度受拉索的质量、垂度及边界条件等影响较大,也不能

用于短吊杆测量和部分钢绞线拉索的索力测量。

2.3.2 视频频率测量法

振动频率测量法需要测量出拉索的基频，而测量拉索基频的最佳点是测量索中间位置的振动时程曲线。一般而言，拉索很长，加速度传感器很难放置于索中间。由此可在索附近架设高清晰度、高速度动态测量的视频自动识别系统，测量拉索中部的振动响应，进行频谱分析后得出振动基频，进而获得索力。

2.4 电磁测量法

电磁测量法是利用拉索自身的电磁效应，测量拉索索力。常用的是磁通量传感器，它基于磁弹效应测量，由激励线圈和测量线圈组成，激励线圈通入脉冲电流，通电瞬时，由于有铁芯存在，会在次要线圈中产生瞬时电流，得到一个瞬时电压。电磁感应产生的电流强度以及电压的大小依赖于铁芯材料的磁导率，铁芯材料的磁导率又与铁芯的应力状态相关，根据感应电压与应力的关系实现测量。该方法属于非接触测量、安装非常方便，测量精度达1%F.S.。钢绞线拉索在每根钢绞线上安装单根绞线磁通量传感器，又可以测量出钢绞线受力的均匀性。

2.5 植入传感器法

2.5.1 索体植入FRP-OFBG筋传感器法

将光纤光栅传感器在FRP筋加工过程中埋入其内部，制成FRP-OFBG筋，它兼有FRP筋良好的力学性能和耐腐蚀性能以及光纤传感器的传感特性。将与拉索钢丝同直径同长度的FRP-OFBG筋，与钢丝一起扭绞成型，并从拉索的锚具端引出尾纤，即可进行测量。FRP-OFBG筋中光栅的极限应变一般为8000微应变到12000微应变之间，且可以用同一根光纤复用多个OFBG传感器，由此监测沿FRP筋长度方向的应力分布。经过与索力进行标定，可实现静态和动态测量。

2.5.2 锚具周向布置光纤传感器

拉索在张拉受力过程中，拉索锚具表面的应变与索力存在线性关系，将温度自补偿的光纤光栅应变传感器直接安装在拉索锚具的表面，通过测量拉索锚具表面的应变变化就可得出拉索索力，由此实现拉索的索力测量。为了减少弯曲的影响一般在拉索锚具表面上对称布设2个或4个光纤光栅应变传感器。

3 拉索结构抗力检测方法

拉索的抗力主要指抵抗破坏的能力。当拉索

外保护破坏时，拉索的受力体钢丝或锚具产生病害，从而导致抗力降低。拉索病害的发生规律是拉索的防水防腐系统失效包括平行钢丝拉索外挤HDPE开裂，钢绞线拉索的桥面保护罩浸水且外挤HDPE开裂，导致下雨过程中雨水进入索体，并与大气接触（存在氧气）而形成拉索腐蚀的条件：水和氧气在钢索的表面积聚，形成电化学腐蚀。拉索自身受力的作用，形成应力腐蚀，导致腐蚀加速。另外一方面，防腐系统失效后，潮气进入索体，并在钢丝表面凝结，潮气混杂氧气，也形成电化学腐蚀的条件。拉索锚具部分是，索体防水防腐系统失效后，雨水沿索体往下流，流入锚具的保护罩内，水和氧气同时存在的情况下，形成电化学腐蚀，导致锚具腐蚀。对拉索抗力的检测主要方法有开窗进行人工检测和简单测量法、射线检测法、漏磁检测法、磁致伸缩导波检测、超声波检测法。

3.1 开窗测量法

检查拉索状态时，最常用的方法是，在索体开小窗口，用人工肉眼检查钢丝的情况，对钢丝腐蚀截面积损失，可用简单测量工具进行，对锚具的锚固状态检测，直接打开锚具保护罩，进行检查。根据钢丝或锚具的锈蚀程度，实行抗力折减。

3.2 射线检测法

拉索射线检测法是通过射线透照成像或摄片的方法，显示被检拉（吊）索的内部缺陷，从而可以分析缺陷的性质、大小、形状和部位。常用的有x射线和 γ 射线。x射线无损检测是通过x射线机来实现的，其射线是由x射线管加高压电激发而成，设备体积相对较大，穿透能力也较弱，适用于小索体和索体自由段的检测。 γ 射线的产生源于放射性同位素的原子核衰变，穿透能力很强，射源曝光头尺寸小，可用于拉索自由段和锚固区的检测。伽玛射线拉（吊）索无损探伤装置是由爬行装置电动控制，送 γ 射线探伤仪探头和底片往待检测区段，形成有效检测。

3.3 漏磁检测法

漏磁检测法是通过测量被磁化的拉索表面泄露的磁场强度来判定缺陷的大小。衔铁、永磁铁和拉索钢丝形成磁回路，在断丝或锈蚀凹坑处产生漏磁场，通过检测元件（霍尔元件）测出漏磁信号，以此判断钢丝情况。当被测钢索没有缺陷的时候磁力线大部分从钢索内通过没有产生漏磁场，当被测钢索上有缺陷的时候磁力线经过缺陷时

磁力线发生弯曲会有一部分漏出表面，这时通过在被测钢板上方添加磁敏传感器霍尔元件采集到漏出表面的磁力——并将其转化为电信号反馈到计算机，在计算机上通过采集软件呈现出带有漏磁信号的带状图和波形图。

3.4 磁致伸缩导波检测法

磁致伸缩效应是指铁磁性材料在磁场作用下形状会发生改变的特征，利用该特性可用来产生导波（弹性波）。信号发生器产生信号，经功率放大后，由激励线圈对钢丝绳施加瞬间的激励磁场，钢丝绳中产生的机械波将沿构件轴向传播，如有缺陷，机械波反射回来，由于逆磁致伸缩效应，接收线圈获得反射波信号，通过信号分析获得被测构件各处的损伤状况。磁致伸缩法能实现大范围非接触快速检测，可有效探测被覆盖或深埋的钢索。

3.5 超声波检测法

超声波检测可用于拉索锚固区内的钢丝断裂检测。当频率在5~10MHz时，超声波可检测锚固区2~5m长度内缆索的断丝。但要使检测结果理想，必须事先进行严格标定，尽管理论上可测定索股的非规则性和断面损失，但实践中还有较大困难。如图2所示。



图2 拉索超声波检测

4 拉索防护系统与辅助项目检测方法

由前述可知，拉索抗力是否降低，主要取决于拉索保护系统是否损坏，如没有损坏，则没有形成腐蚀条件，可认为抗力没有降低。因此对保护系统检查，是对拉索抗力检测的最前始工作。如发现损坏，可采用前述其它检测手段对拉索抗力进行有目的，有重点的检测，这样可大大减少工作量。目前拉索保护系统的检查，主要还是基于人工肉眼检测法或借助视频成像，采用人工检测。

4.1 搭设平台人工观测法

拉索常处于高空中，对拉索整个保护系统的检测，可以搭设检测平台或采用可沿拉索运动的

检测车进行检测，包括拉索自由段和锚具的检测，对锚固区隐蔽段可采用其它方法进行检测。

4.2 望远镜法

对处于高空中的拉索自由段检测，可采用高清晰度的望远镜进行表观状态检测。

4.3 视频成像法

将光电成像系统与爬索机器人结合，可实现拉索自由段检测。同时将先进的光电检测系统与图像处理相结合，利用大视场高分辨率光学镜头采集到拉索外表面缺陷图像并成像在工业相机光敏芯片上，工业相机的光敏芯片探测到图像光学信息并转换为模拟电信号，数字相机内置采集卡再将模拟信号转换成可被计算机接收的数字信号并传入计算机。将检测结果实时传往地面或进行存储，以便查看。

4.4 内窥镜法

拉索锚固段隐蔽区的检查可采用工业内窥镜，主要是运用具有可旋转操纵杆，双向前端探头搭配高清TFT液晶显示，以及前端LED冷光源，通过自带的TV-OUT接口可传输图像，继而实现迅速拍照、录像并且存储到电脑。在一定范围内，对空间狭小且肉眼无法直接看到的锚固段预埋管内拉索的常规检查，例如腐蚀、裂纹等损伤情况，工业内窥镜检查起到了一定的作用，但该方法费时费力，效率不高。

4.5 便携伸缩杆视频法

采用能实现一定长度范围内伸缩的伸缩杆，并在其前端安装集成红外光源CCD摄像头，由此伸入预埋管内进行检查，后端连接图像采集电脑，进行检测结果观测和存储。

5 基于失效形式的拉索检测方法与安全评估

目前拉索的主要失效形式为索体腐蚀断裂（主要发生在拉索自由段与过渡段交汇处，它是应力集中且振动的根部）、锚具螺母螺牙失效、锚固单元失效（夹片夹持失效）。而拉索是否腐蚀以及腐蚀程度主要取决于拉索的防腐系统，若防腐系统没有损坏，则没有形成腐蚀条件，可认为抗力没有降低。因此对保护系统检查，是对拉索抗力检测的首先需开展的工作。拉索锚具的螺牙和锚固单元检测，目前还是主要基于人工检测法。拉索重点检测区域为，拉索自由段与过渡段交汇处、拉索锚具的螺牙和锚固单元。

既有结构的状态评定是在已建成的、已具有使用历史、各种结构参数已经客观存在的条件

下,确定结构上的作用、作用效应、结构抗力以及作用效应与抗力之间的关系。对已经使用多年的既有桥梁拉索的服役状态进行评定,与拟建桥梁拉索设计有所不同:首先已有桥梁拉索已是一个客观存在的实体,其结构材料强度和横截面尺寸是确定的;其次,已有桥梁的继续使用期与待建时的设计基准期已有所不同,根据具体情况、使用目的和要求可缩短或延长;然后已有结构已成功经受了使用荷载的作用,为状态评估积累了一定的历史信息,分析中应加以应用。对拉索构件而言,通过对承载能力和施加于拉索的作用效应分析,判断拉索抗力与作用效应之间的关系,对拉索的服役状态作出评定。拉索构件可根据是否符合现行标准规范要求,按I、II、III、IV进行分级:

(1) I级:符合国家现行标准规范要求,安全适用,不必采取措施。

(2) II级:略低于国家现行标准规范要求,基本安全适用,可不采取措施。

(3) III级:不符合国家现行标准规范的要求,影响安全和正常使用,应采取措施。

(4) IV级:严重不符合国家现行标准规范要求,危及安全或不能正常使用,必须采取措施。

基于设计规范对拉索的状态进行评定,应该从静态和动态两方面来进行考虑。静力强度,可以从拉索使用期间的应力与极限强度应力的应力比量值来进行判断。根据GT/B18365-2001《斜拉桥热挤聚乙烯高强钢丝拉索技术条件》和美国后张法协会斜拉桥委员会《斜拉索设计、测试和安装条例(2001)》,静力强度的分级界限可选取拉索设计允许应力($0.4\sigma_b$)、允许应力超荷1.25倍($0.5\sigma_b$)、强度抗力系数点($0.65\sigma_b$)三个特殊点的应力比值,其具体静力强度状态指标和对应的处理方式见表1。

表1 拉索静力强度状态指标和处理方式

评价等级	状态指标	处理方式
I级	$\frac{\sigma}{\sigma_b} \leq 0.4$	安全适用, 不必采取措施 继续使用
II级	$0.4 < \frac{\sigma}{\sigma_b} \leq 0.5$	基本安全适用, 可不采取措施 改善使用
III级	$0.5 < \frac{\sigma}{\sigma_b} \leq 0.65$	影响安全和正常使用, 应采取措施 变更使用
IV级	$\frac{\sigma}{\sigma_b} \geq 0.65$	危及安全或不能正常使用, 必须采取措施 停止使用

动力强度主要是限制车辆荷载。从动态荷载效应进行判定,可以根据拉索使用期间的动应力与疲劳试验的应力幅值比量值来进行判断。根据美国后张法协会斜拉桥委员会《斜拉索设计、测试和安装条例(2001)》,动力强度的分级界限可选取拉索疲劳应力幅设计允许值($0.4\sigma_{fatigue}$)、安全系数为1.5时疲劳应力幅($0.6\sigma_{fatigue}$)、拉索疲劳试验应力幅($1.0\sigma_{fatigue}$)三个特殊点的应力比值,其具体动力强度状态指标和对应的处理方式见表2。

表2 拉索动力强度状态指标和处理方式

评价等级	状态指标	处理方式
I级	$\frac{\sigma_d}{\sigma_{fatigue}} \leq 0.4$	安全适用, 不必采取措施 继续使用
II级	$0.4 < \frac{\sigma_d}{\sigma_{fatigue}} \leq 0.6$	基本安全适用, 可不采取措施 改善使用
III级	$0.6 < \frac{\sigma_d}{\sigma_{fatigue}} \leq 1.0$	影响安全和正常使用, 应采取措施 变更使用
IV级	$\frac{\sigma_d}{\sigma_{fatigue}} \geq 1.0$	危及安全或不能正常使用, 必须采取措施 停止使用

6 结论

拉索的状态评估主要是针对承载能力和施加于拉索的作用效应分析而进行。由此对拉索的检测也主要基于索力荷载和结构抗力两方面进行。文中介绍了索力荷载和结构抗力常用检测方法,并提出了状态评估的强度状态指标。

拉索主要失效形式为索体腐蚀断裂、锚具螺母螺牙失效、锚固单元失效。拉索的腐蚀主要发生在拉索自由段与过渡段交汇处,它是应力集中且振动的根部,且是易形成腐蚀条件的部位。拉索是否腐蚀以及腐蚀程度,主要取决于拉索的防腐系统,若防腐系统没有损坏,则没有形成腐蚀条件,可认为抗力没有降低。因此对保护系统检查,是对拉索抗力检测的首先需开展工作。拉索重点检测区域为,拉索自由段与过渡段交汇处、拉索锚具的螺牙和锚固单元三方面。

参考文献

- [1] 邓年春. 新型桥梁拉索及其光纤光栅监测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学博士后出站报告, 2006.6
- [2] 杨少军. 桥梁拉索体系损伤的检测和监测方法[J]. 公路交通技术, 2005, 3: 130-134
- [3] 邓年春, 岑晓鹏, 孙利民等. 基于CFRP-OFBC筋的桥梁缆索索力测量技术研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 2010, 23(2): 81-87
- [4] 邓年春, 龙跃, 孙利民, 夏丹丹. 磁通量传感器及其在桥梁工程中的应用. 第十八届全国桥梁学术会议论文集(下册)[C]. 天津, 2008