

声发射技术在长大桥缆索断丝监测中的应用

许凤旌

美国物理声学公司 (PAC) 北京代表处

摘要 本文在总结中国近年来长大桥建设高速发展的基础上提出长大桥断丝问题的潜在问题和实施断丝监测的重要意义;介绍了一种新的结构健康监测 (SHM) 声发射技术的原理及其国外在役长大桥断丝监测的应用案例;提出将声发射方法用于国内长大桥断丝监测以及结构健康监测的应用设想及实施方案;为国内长大桥断丝监测提出一种有效可行的解决方案。

关键词 声发射 结构健康监测 (SHM)

一、 缆索断丝在线监测的意义与背景

随着中国改革开放的深入和基础设施建设的加快,在长江、黄河、珠江等流域以及中国的沿海海湾上建设了一大批结构新颖、技术复杂、设计和施工难度大、现代化品位和科技含量高的大跨径悬索桥、斜拉桥(悬吊体系桥梁),目前在建或处于设计期的超大跨径悬索桥和斜拉桥也不下三十余座,我国的悬索桥和斜拉桥的建设和设计水平已跻身于国际先进行列。

由于中国现代大跨度斜拉桥和悬索桥的设计、建桥历史仅有30年左右,针对悬索桥和斜拉桥,在大桥建成后的养护和维护管理经验方面相对西方发达国家的管养水平明显不足。我国20世纪80年代建造的斜拉桥,由于国内现有的传统监测和检测技术跟不上和日常养护管理措施的不到位,以及缺乏权威可靠的监测、检测和评估技术,造成部分斜拉索、吊索、主缆及预应力缆索部分构件的严重锈蚀,如济南黄河大桥、广州海印大桥的斜拉索在远未达到他们的设计寿命下提前断裂,被迫全部更换,造成很大的安全隐患和经济损失,缠身和不良的社会影响。由于缆索是悬吊体系桥梁最重要的承载部件,其完整性、安全性是桥梁结构健康的基本保障。为此,行之有效的缆索体系损伤(如腐蚀和断丝等)的监测技术、监测设备和相应的损伤评估方法是维护、监督悬吊体系桥梁长久安全运行的最重要的技术保障。

实际上,桥梁健康与人体健康一样,寿命越长,其健康水平将变得越来越差。经常性的体检并建立人身健康档案或病历,将有助于早期发现病状并实施近早的、有针对性的治疗。同理,如果能对桥梁建立起健康档案,并采取有针对性的桥梁维修、维护方案将极大地提高桥梁的健康水平,预防突发性事故的发生。事实上,在役时间越久的桥梁,其早期的健康档案资料就越加珍贵。尤其是对于悬吊体系桥梁的缆索崩断问题来说,相对于其它类型的结构健康问题还有其特殊性。表现为缆索崩断为瞬态发生的,稍纵即逝。与大多数的裂纹或腐蚀问题不同,缆索的崩断是在包裹住的主缆内部发生的,难以直接观察,甚至是用各种检测仪器也难以有效检测断丝的数量与位置,尤其与桥梁结构连接部位的锚固端部位。但缆索的数目是可数的、有限的。一旦缆索崩断达到一定数量或占到缆索总数的一定百分比,这有可能对整个主缆及至整个桥梁的健康运行产生颠覆性的影响。另外,

腐蚀与裂纹的问题更侧重于当前的腐蚀与裂纹状态，而断丝问题则不仅仅是当前的断丝情况，更重要的是由桥梁建立之始的累积的断丝根数及断丝的位置。不仅断丝的数量会对缆索健康状态产生重要影响，而且，即使在断丝数量较少的情况下，如果断丝集中发射在同一位置，如不尽早进行修复，其后果也将不堪设想。为此，基于我国在役悬吊体系桥梁的国情，尽早上线监测系统并建立缆索崩断历史档案数据库对保障大型悬索桥与斜拉桥的安全运行有着重要的意义。典型的悬吊体系桥梁缆索结构见图1。

二、悬索桥与斜拉桥概况

悬索桥与斜拉桥（统称为悬吊体系桥梁，其缆索结构如图1）是目前大跨度桥梁的主要形式之一。悬索体系桥梁的特点是利用悬挂式缆索或斜拉式缆索通过索塔及锚固来承担桥梁的主要负荷。

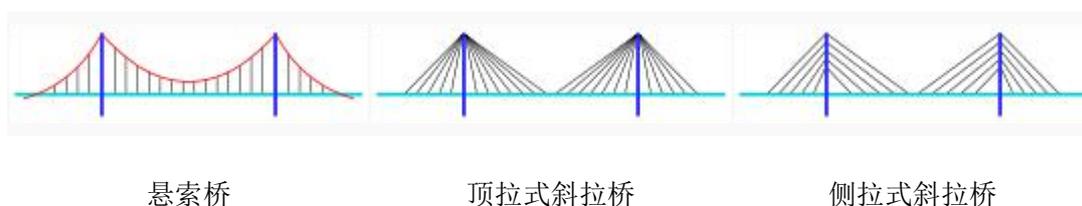


图1. 典型的悬吊体系桥梁缆索结构简图

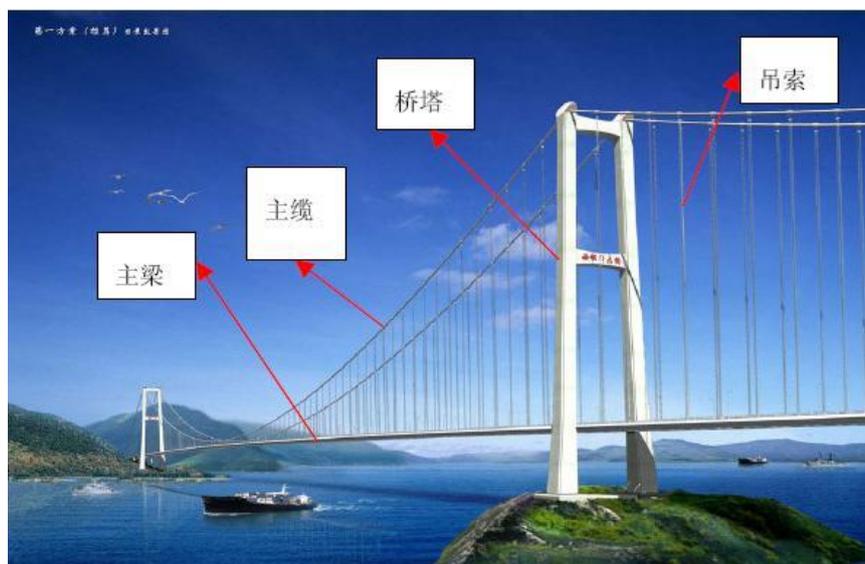


图2. 典型的悬索桥结构图

图2是一典型的悬索桥照片。悬索桥是特大跨径桥梁的主要型式之一，悬索桥优美的造型和宏伟的规模，人们常称之为“桥梁皇后”。当跨径大于800 m时，悬索桥方案有很大的竞争力。中国

在 20 世纪 90 年代前，虽然也修建了 60 多座悬索桥，但跨径小、桥面窄、荷载标准低；在 20 世纪 90 年代后期，中国相继建造了一批如广东虎门大桥、厦门海沧大桥和江苏江阴大桥等在世界上有很大影响的悬索桥。悬索桥由缆索体系（主缆和吊索）、塔架、加劲梁和锚碇等四大部分组成。塔架形式一般采用门式框架，材料用钢或混凝土；加劲梁有钢桁架梁和扁平钢箱梁；锚碇有重力式锚碇和隧道岩锚；主缆的材质有平行钢丝或钢绞线，以空中送丝法或预制束股法施工；吊索的材质有平行钢丝或刚丝绳。目前我国悬索桥的单根主缆长度范围在 500–2500 米，单根吊索的长度范围在 3–500 米。

图3是一座典型的斜拉桥。斜拉桥作为一种拉索体系桥梁，比传统梁式桥有更大的跨越能力。由于拉索的自锚特性而不需要象悬索桥那样巨大的锚碇，加之斜拉桥有良好的力学性能和经济指标，已成为大跨度桥梁最主要桥型，在跨径200–800m的范围内占据优势，在跨径800–1100m 的特大跨径桥梁中也开始扮演重要角色，如已经建成主跨为1088m 的苏（州）-（南）通大桥，贵州鸭池河大桥跨度达1240m，沪通长江大桥跨度达1092m等。

斜拉桥由索塔、主梁、斜拉索组成，选择不同的结构外形和材料可以组合成多姿多彩、新颖别致的各种形式。索塔形式有A 型、倒Y 型、H 型和独柱等，材料有钢、混凝土等，主梁有混凝土梁、钢箱梁、结合梁和混合式梁等，斜拉索布置形式有单索面、平行双索面、斜索面等，拉索材料有热挤PE 防护平行刚丝索和PE 外套防护钢绞线索。目前世界上斜拉桥的单根拉索的长度范围在 50–600m。

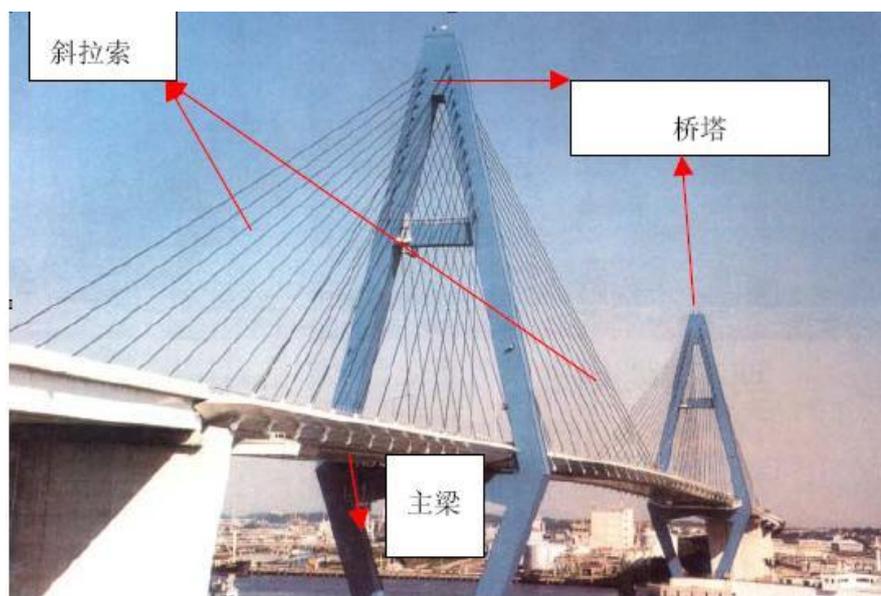


图3. 典型的斜拉桥结构图

三. 悬吊体系桥梁安全维护的主要问题

由于悬吊体系桥梁缆索承载着极大的负荷，因此对缆索状态的监测就显得十分重要。从目前的技术来说，要从包裹着的缆索外部观察缆索丝的腐蚀极为困难，至今世界上并没有开发出任何有效的缆丝腐蚀检测或监测方法。通常的做法是对局部缆丝进行定期抽检。检查过程极为复杂，需要在局部的较短的缆索长度范围内悬空搭一个工棚如图 4 所示。然后，施工人员须在悬空工棚的工作环境下将缆索的缠绕包裹层拆开，并在缆丝组中打入楔块以内眼观察楔块撑起的部位是否有较严重的腐蚀与断丝。由于缆索的直径为数百毫米不等，缆丝的直径为几毫米，同一横截面的缆丝数目可达几千根。因此，用肉眼所能观察检测的缆丝数量只能是被拆开部位缆丝的 2-3%。由于每次检查被拆开的部位是整个缆索的极小一部分长度（如十几米），故每移动一次检查工棚所能得到的信息只占不到整个桥梁的 0.01%。不但费时，费力，费钱（在美国检查一次要花数百万美元），并影响正常交通运行，还无法得到完整的桥梁缆索状态信息。



图4. 对缆索进行目视检测的悬空工棚及通过打楔块观察断丝数目

鉴于以上，一个在技术与实际操作上均可行的获知缆索状态的方案是对缆索的断丝进行在线监测。在线监测的意义不但是对缆索断丝本身，更重要的是可以对缆索的健康状况进行跟踪并建立永久性的健康档案或病历。该档案可历史性地记录如下信息，即，什么时候（年.月.日.分.秒）发生了断丝？在什么部位（精确到 ± 0.5 米）发生了断丝？每一次断了几根？整个缆索累计断了几根？在某个部位累计断了几根？断丝的概率是多少？断丝是否受气象因素的影响？在一些水文与地质灾害的情况下对桥梁缆索断丝有没有造成影响？这些健康历史档案信息将为业主制定有的放矢的维修维护方案提供极大的帮助并极大地降低或消除业主对于缆索断丝状态毫无了解、毫无把握的担

忧。尤其是对使用年限越长的桥梁，这种健康历史档案或桥梁病历就越有价值。它有助于有目的地对大桥进行维修，维护，保证大桥的安全运行与人民生命财产的安全，同时亦将极大地减少维修，维护成本。

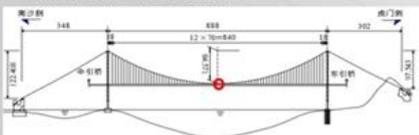
近期案例一：虎门大桥线索桥吊索断丝情况调查

关注岩土新鲜事，更多资源。

1 工程概况

虎门大桥悬索桥——检测结果

吊索
上游侧38号吊索钢丝绳断裂，发生于钢箱梁内侧锚头处，旧索从内而外发生锈蚀。已拆除吊索又发现多根出现锈蚀。



虎门大桥悬索桥总体布置示意图



西行38号吊点病害吊索拆除前



拆卸下来的西行38号吊点病害吊索

吊索
对更换完成的双向33号至40号吊点旧吊索进行初步外观检查，发现共有12根吊索有断丝现象（均位于吊索根部或吊索与索夹交汇区），其余吊索均有不同程度锈蚀情况。



其它锈蚀断丝病害吊索



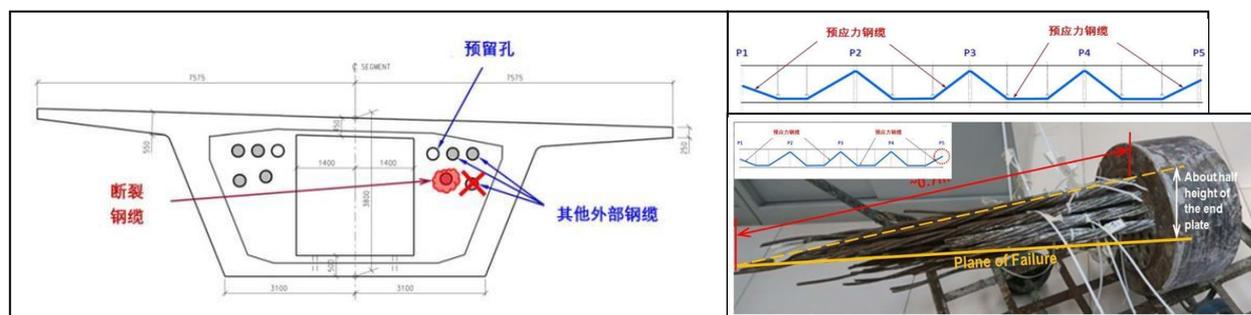
其它锈蚀病害吊索

虎门大桥的一次检测中发现高达 12/16 的吊索服役期间发生断丝（铆头部位）

近期案例二：深圳湾大桥体外预应力混凝土结构缆索断丝事件

（建设的深圳（三）深圳湾大桥钢缆断裂大调查——绝命尘埃

<http://www.360doc28.net/wxarticlenew/952144064.html>）



深圳湾大桥香港段 2020 年曾经发生体外预应力缆索整体（断丝）拉断事故，引起香港路政署高度重视。更换缆索后已于 2020 年底加装了一套美国物理声学公司 78 通道断丝监测系统，现已经在运行。这是中国第一个加装缆索断丝监测系统的在役大桥，由香港路政署组织实施完成。以此为

基础，香港路政署正在考虑在运行中的青马大桥上加装声发射缆索断丝监测系统。虽然青马大桥在建之初就已经安装了很先进的结构健康监测 SHM 系统，但像其他 SHM 系统一样，都是基于振动、位移等传统的 SHM 技术，无法有效监测断丝行为。

四. 国外悬吊体系桥梁断丝监测概况

由于悬吊体系桥梁断丝是在主缆内部发生，而且具有突然出现，瞬间消失的特性，其信号频率较高，但能量比结构整体振动要小，故传统的振动监测及应力，应变监测方法对断丝监测均没有实际效果。目前真正在国外悬吊体系桥梁实用的在线监测技术为声发射技术。该技术所监测信号的频率通常为 10KHZ 以上。声发射系统可以连续跟踪捕捉瞬态的突发信号，并根据突发信号到达不同通道的时间差来计算断丝的位置。

最早将声发射技术用于断丝监测的是美国物理声学公司于 1972 年对美国加州大姆巴顿所进行的断丝试验。尽管该实验证实了声发射技术的可行性，但在很长一段时间内，由于声发射一直为模拟信号系统，难以解决在实际应用中的噪声干扰问题。故声发射断丝在线监测在一段较长的时间内没有应用到实际桥梁上去。

实际上，自数字声发射系统自 90 年代初问世以来，声发射的信号处理技术与应用领域不断扩展。2000 年有 75 年历史的美国费城的富兰克林大桥第一次安装了由美国物理声学公司提供的悬索桥断丝监测系统，至今已连续运行了 10 年。该系统记录了 10 年来桥梁的断丝状况，为业主提供了极为有价值的信息，使得业主可以有针对性地对桥梁进行维修维护，既减少了成本，工时及施工时对正常交通的影响。又提高了业主对桥梁安全的信心。



图五、国外在悬索桥安装声发射传感器与电缆的照片

Lists of Some AE Monitored Bridges in US

- Woodrow Wilson Bridge, Washington DC
- Brooklyn Bridge, New York City
- Manhattan Bridges, New York City
- Queensborough Bridge, New York City
- Williamsburg Bridge, New York City
- Dunbar Bridge, West Virginia
- Bryte Bend Bridge Sacramento California
- I-10 Mississippi River Bridge, Louisiana
- I-205 Willemette River Bridge, Oregon
- Route 1 Occoquan River Bridge, Virginia
- Knapps Narrow Bridge, Maryland
- Ben Franklin Bridge, Pennsylvania
- Ship Canal Bridge
- Bay Bridge, San Francisco
- St. Louis Bridge, Michigan
- Harris Bridge, Pennsylvania
- Texas Intercoastal Canal Bridge, TX
- Martin Luther King Memorial Bridge, Texas
- West Lynn Bridge, Oregon
- Poplar Street, St. Louis , Missouri
- Route 95 Bridge, Connecticut
- St. Louis Bridge, Michigan
- Many Concrete & Steel Structures

美国 PAC 公司截止到 2020 年以前所做的以断丝监测为主的部分在役桥梁监测项目

自 2000 年以来，悬吊体系桥梁的断丝监测比前几十年有较快的发展。近几年又有多座悬吊体系桥梁已安装或正在安装声发射断丝在线监测系统，其中包括世界第五长的英国翰波（Humber）悬索桥，英国萨文（Severn）悬索桥，美国纽约曼哈顿（Manhattan）的曼哈顿的悬索桥，美国弗及尼亚的威内纳思（Varina-Enon）斜拉桥等。图五显示了国外在悬索桥安装声发射传感器与电缆的照片。所有这些桥梁的监测，除使用了全天候的声发射监测系统外，还装备了智能化的缆丝崩断自动识别与报警软件。该智能化软件可通过互连网络或手机短信向业主报告断丝发生的时间、地点、数量，使业主可以在第一时间掌握断丝信息并进行历史性健康记录回顾以制定有针对性的维修、维护措施。

Ongoing Mistras AE Bridge Monitoring Project - 2020					12/4/2020
#	Bridge Name & Location	Bridge Type	Monitored Structure	Total # of AE Sensors	Deployment Schedule
1	Pont Normandia bridge, France	Cable-Stay bridge	Post tensioning (anchorgaes, all) and stay cables (all)	705	Q4, 2020
2	深圳湾大桥 (香港段), Hong Kong	Concrete viaduct	External pre-stressed tendons at the anchroages	78	Q4, 2020
3	George Washington Bridge, New York, USA	Suspension bridge	(4) main cables	316	2021-2023
4	Varina-Enon, Virginia, USA	Cable-Stay (harp), Concrete	Box girders, piers, cable stay anchorages, pylons	469	Q4, 2020
5	Eltham bridge, Virginia, USA	Concrete	Post tensioning in concrete I-beams	280	Q4, 2020
6	Lord Delaware, Virginia, USA	Concrete	Post tensioning in concrete I-beams	280	Q4, 2020
7	Galecopper, Netherland	Cable-Stay bridge	Steel girder, cables	32	Q2, 2020
8	Elsen Bridge, Germany	Concrete bridge	Post tension cable	59	Q3, 2020
9	Clifton Viaduct, UK	Concrete bridge	Post tension cable	90	Q1, 2020
10	Woodrow Wilson Bridge, Washington D.C.	Concrete, Bascule	Post tension tie beams - V Piers & bascule	410	2015-2025
11	Ben Franklin Bridge, Philadelphia, USA.	Suspension	Main cable	108	Q2, 2021

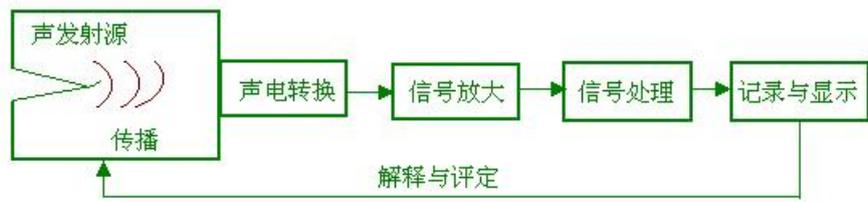
该公司 2020 年一年内所进行的以断丝监测为主的声发射部分在役桥梁监测项目。表明全球范围内在役长大桥断丝监测的市场需求已经到了爆发性增长时期，而且技术成熟度已经解决。

在过去的 20 年中，美国物理声学公司 (PAC) /Mistras 集团已经在全世界 28 座斜拉桥、悬索桥 (cable bridge) 上安装声发射长期断丝监测系统，总通道数为 3708 个声发射通道。到 2020 年底，共监测到 1, 774 根断丝事件。

五. 悬吊体系桥梁缆丝崩断监测技术简介

目前真正用于悬吊体系桥梁主缆断丝在线监测的技术为声发射技术。声发射 (Acoustic Emission 或 AE) 亦称为应力波发射，是指材料局部因能量的快速释放而发出瞬态弹性波的现象。声发射是一种常见的物理现象，大多数材料变形和断裂时有声发射发生，如果释放的应变能足够大，就产生可以听得见的声音，如在耳边弯曲锡片，就可以听见劈啪声，这是由于锡受力产生孪晶变形的发声。大多数金属材料塑性变形和断裂时也有声发射发生。缆丝崩断正是一种典型的能量瞬间释放过程。

一般来说，许多材料的声发射信号强度很弱，人耳不能直接听见，需要借助灵敏的电子仪器才能检测出来。用仪器探测、记录、分析声发射信号和利用声发射信号推断声发射源的技术称为声发射技术。声发射技术是一种新兴的动态无损检测技术，涉及声发射源、波的传播、声电转换、信号处理、数据显示与记录、解释与评定等基本概念，基本原理如图六所示。



图六、声发射技术基本原理

声发射源发出的弹性波，经介质传播到达被检体表面，引起表面的机械振动。经声发射传感器将表面的瞬态位移转换成电信号。声发射信号再经放大、处理后，形成其特性参数，并被记录与显示。最后，经数据的解释，评定出声发射源的特性。

声发射波的频率范围很宽，从次声频、声频直到超声频，可包括数 Hz 到数 MHz；其幅度从微观的位错运动到大规模宏观断裂在很大的范围内变化，按传感器的输出可包括数 μV 到数百 mV，不过，多数为只得用高灵敏传感器才能探测到的微弱振动。用最灵敏的传感器，可探测到约为 10^{-11}mm 表面振动。缆丝崩断的声发射能量相对于材料疲劳裂纹产生的声发射能量比较起来要大得多。因此，可使用较低频的声发射传感器在较长距离的范围内监测到缆丝的崩断。

声发射检测、监测的主要目标是：(1) 确定是否有声发射产生；(2) 确定声发射源的部位；(2) 分析声发射源的性质；(3) 确定声发射发生的时间或载荷；(4) 评定声发射源的严重性。一般而言，对超标声发射源，要用其它无损检测方法进行局部复检，以精确确定缺陷的性质与大小。

由于声发射检测是一种动态无损检测方法，而且，声发射信号来自缺陷本身，因此，用声发射法可以判断缺陷的严重性。一个同样大小、同样性质的缺陷，当它所处的位置和所受的应力状态不同时，对结构的损伤程度也不同，所以它的声发射特征也有差别。明确了来自缺陷的声发射信号，就可以长期连续地监视缺陷的安全性，这是其它无损检测方法难以实现的。

除极少数材料外，金属和非金属材料在一定条件下都有声发射发生，所以，声发射检测几乎不受材料的限制。

声发射技术与其它无损检测方法相比，具有两个基本区别：(1) 检测动态缺陷，如缺陷扩展，而不是检测静态缺陷；(2) 缺陷本身发出缺陷信息，而不是用外部输入对缺陷进行扫查。这种区别导致该技术在断丝的监测上具有极大的优越性。与应变测量、振动测量等方法的比较，应变是一种完全局部的检测方法，应变测量只反映所测位置的应变（应力）信息，而并不反映缺陷信息；而声发射技术则直接反映的是缺陷（包括裂纹/断丝等）的信号。应变测量只反映所测位置的应变（应力）水平，对其他没有贴应变片的位置无法测量；而声发射方法则全面监测传感器所覆盖区域内所有位置的缺陷的全面信息，无法用于缆索的监测。

尽管振动测量是一种全局的监测方法，但振动测量只有当缺陷，比如断丝，严重到一定程度时

才有可能对信号有所反应。对于多束钢筋组合构成的钢索其中的一根或少数的钢丝崩断，振动信号一般是没有反应的，而且也不能确定断丝的位置。与之相反，声发射技术对于单根钢丝断裂则非常敏感，而且由于声发射有时差定位功能，它可以实时定出断丝位置并记录断丝的数量等发生发展过程及严重程度，并进行破坏预报。另外，振动测量由于监测频率较低(<20 千赫)，故极易受噪声影响而无法有效进行断丝监测。

六. 关于对悬索桥与斜拉桥缆索进行在线监测立项的建议

尽管国外已开发了商业化的缆索在线监测系统并成功地应用于多座在役悬吊体系桥梁，但国内除了在实验室对此有所研究外，尚未有监测系统直接应用于在役桥梁。这其中除了对技术不了解，信心不足以外，另一个重要原因是安装监测系统将提高业主在桥梁安全维护上的成本，但由此为业主带来的对桥梁有的放矢进行安全管理的信心提高即日常维修、维护成本的降低却难以直观感受，故尚没有业主有意愿对安装缆索崩断在线监测系统做第一个尝试。为了提高我国桥梁安全运行与维护管理水平，有效预防可能发生的桥梁重大事故，有必要通过国家立项，采用试点方式引进、消化、吸收国外成功的、成熟的大型悬吊体系桥梁的结构健康在线监测技术。该立项可对研究部门与业主的共同课题予以资金支持，以求验证国外商业化系统并在此基础上开发具有国内自主知识产权的监测方法或系统。

项目可选择在新桥或 10 年以上的悬索桥、拱桥的吊杆或斜拉桥上进行，尤其重点监测锚固端等连接部位。因为这些部位一来因腐蚀等因素容易产生断丝行为，二来这些部位的断丝行为无法检测，危害也更大。根据所监测到的断丝情况进行——

(1.) 改进、完善桥梁结构健康监测 (SHM) 的现有方法，使传统的基于振动、位移、应变等状态参数的 SHM 技术向包含关键损伤信息的有效监测，智能监测方向发展。

(2.) 根据上述原则，基于大 IOT、数据、云计算等现代工业互联网技术，推动在役桥梁尤其长大桥的传统维修、养护方式向智慧维养方向发展。

所谓智慧维养，重点解决如下两方面的问题：

其一：该维修的必修，勿漏修。

其二：不必修的少修，减少误修。在保证安全的前提下降低过度维修的损失和交通影响。