

国家计量技术规范

《光纤光栅拉索索力测量系
统校准规范》

编制说明

(征求意见稿)

规范编制组

2024年1月

目 录

一、任务来源.....	1
二、编制背景.....	1
1、概要.....	1
2、制定意义	1
3、国内外研究现状	2
4、发展趋势及研究基础	4
三、编制过程.....	4
1、编制原则	4
2、工作进程	5
3、人员分工	5
四、编制依据.....	6
五、主要技术内容说明	6
1、概述.....	6
2、计量特性与校准条件	7
3、校准方法	7
六、试验验证分析	8
七、不确定度评定	8
八、其他应予说明的事项	8

一、任务来源

根据国家市场监管总局办公厅关于下达的《2024 年国家计量技术规范制定、修订及宣贯计划》的通知，由交通运输部公路科学研究所主持承担，北京市建筑工程研究院有限公司、中国计量科学研究院、北京迈石科创监测技术有限公司等单位承担国家计量技术规范《光纤光栅拉索索力测量系统校准规范》的制订工作。

二、编制背景

1、概要

随着桥梁技术的不断发展和人们对于桥梁审美要求的不断进步，促进了拉索结构桥梁的快速发展。拉索作为高效地承受拉力的结构构件，被运用于各种桥梁工程中，如斜拉桥、悬索桥等。这些桥梁结构具有整体刚度及抗风性能好造型优美、建设相对容易等优点。但在水汽、海水及盐雾等环境下，索体系桥梁中的索结构容易腐蚀生锈，从而导致事故的发生。2001 年宜宾南门大桥的承重钢缆生锈，导致吊杆突然断裂，桥面两端发生坍塌，造成了巨大损失和恶劣的影响。事故调查发现大桥的钢缆吊杆中的对出现断裂，而这均为短索(吊杆)。可见监测拉索的状态，准确测定桥梁索结构拉索索力具有重要的实际意义。随着索力监测手段的丰富，一种内嵌光栅的桥梁拉索得到较多的科研运用，其良好的协同变形能力，准分布测试能力和内嵌高耐久性等优势得到较好的反馈。

2、制定意义

斜拉桥的拉索、系杆拱桥的吊杆、悬索桥和索道的缆索等构件是桥梁、索道等结构的核心构件，素有“生命线”之称。由于环境的影响，当前的钢丝拉索容易生锈腐蚀、疲劳损伤，服役期往往比预先设计的短得多。近几年来，拉索的断损和换索的事例，国内外时有发生。拉索的换索费用是很高的，一般在原桥总造价的一倍以上，为原拉索造价的数十倍。如德国 KohibrandEstuary 桥，建成3年后换索，耗资 6000 万美元，为原造价的 4 倍。可以说，拉索的损伤将会造成经济上的巨大损失甚至会给人类带来巨大的灾难，因此如何开发新型拉索是一个极其重要且急需解决的课题。

另一方面，如何实现对拉索长期工作状态的实时监测，确保使用期内拉索安全运行，也是拉索技术发展的关键。目前对索的受力测试和损伤评价主要采用加速度测试、腐蚀检测、磁圈检测等技术，这些技术存在精度低、可操作性差、受

干扰影响大、稳定性差、不能实现在线实时监测等缺点。随着技术的进步，采用光纤光栅技术对桥梁拉索进行索力测试的方案得到极大的发展和推广。

一般普通单模光纤的直径较小（ $225\ \mu\text{m}$ ）、抗剪能力差、极易折断，直接将其作为敏感元件无法适应土木工程结构粗放式施工方式与恶劣的服役环境，严重地制约了光纤传感器的大规模工程应用。因此，低成本的高耐久性封装和布设工艺是制约其推广应用的重要环节。增强纤维复合（Fiber Reinforced Polymer/FRP）材料自20世纪40年代问世以来，在航空、航天、船舶、汽车、化工、医学和机械等领域得到广泛的应用。增强纤维复合材料由高性能纤维和基体材料组成，纤维为增强材料，起加劲作用，基体起粘结、传递剪力的作用。哈尔滨工业大学欧进萍、周智等（2004，2007）考虑光纤传感器与FRP材料特性的天然相容性，在控制FRP筋过程中，在筋的中间位置埋入光纤传感器，制成光纤增强纤维智能复合筋。并根据工程实际需要，将智能筋与拉索复合成智能结构，应用于天津永和大桥斜拉索中，对拉索施工和服役过程中的应力值进行了监测。

光纤光栅拉索在桥梁工程运用过程中，主要的监测参数主要依赖于索厂的出厂拉伸数据。光纤光栅拉索的标定主要是拉索超张拉过程中的数据进行拟合计算，从而完成标定工作。实际中索厂千斤顶的可靠性、精确度、试验次数和分级情况均无法达到计量标定的要求。因此出厂标定数据的准确性、公正性和权威性均得不到保证，故亟待提出一种基于光纤光栅拉索索力测量装置，用于该类拉索的精度、重复性等指标的计量工作。

3、国内外研究现状

光纤传感技术是随着光通信技术的发展而迅速发展起来的，与传统电测传感技术相比具有抗电磁干扰，分布式、绝对测量，耐腐蚀，抗疲劳，灵敏度、精度高等优点。在短短的10多年时间里已成为传感领域发展最快的技术，并成功应用到很多领域，如航空航天、复合材料、土木工程、高压输电线、核电站、油田、消防等。按照工作原理和解调方式，光纤传感技术主要分为强度型、干涉型、波长型和散射型，其中，波长型的光纤布拉格光栅和散射型的光纤布里渊监测技术愈来愈成为结构损伤监测的最有效技术。

1989年Morey等人首次针对光纤光栅的应变与温度传感性能进行了研究。时至今日，光纤光栅传感元件已从实验室走向实际工程，其已经被广泛应用于土木

工程结构健康监测中，如：加拿大卡尔加里的Beddington Trail大桥、美国俄亥俄州的巴特勒的桥梁、德国德累斯顿高速公路的预应力混凝土桥、比利时根特的环城运河预应力混凝土桥梁、挪威的Skarnsundet斜拉桥、丹麦的Faroe跨海斜拉桥、英国的Flintshire独塔斜拉桥等。

我国的光纤光栅传感技术的研究起步较晚。自20世纪末起，各所高校（清华大学、重庆大学、武汉理工大学、哈尔滨工业大学等）在这一领域投入了大量的人力物力。其研究成果显著，而且已经有较大范围的示范工程应用，如香港青马大桥、徐浦大桥、江阴长江大桥等。为了推动智能传感元件的研究开发和产业化，哈尔滨工业大学欧进萍、周智等人将所研发的系列光纤光栅传感部品应用到10余项重大工程的结构健康监测中，例如：黑龙江省呼兰河大桥、胜利油田CB32A海洋平台、南京长江三桥、广州体育西路人防工程、奥运场馆国家游泳中心“水立方”、天津永和大桥等。

同样地，光纤布里渊监测技术的研究与应用也有了长足的进步。1989年，日本学者Horichui和英国学者Culverhouse分别首次发现光纤布里渊频移与应变和温度成线性关系。第一套BOTDA测试系统于1989年问世，拉开了光纤布里渊分布式传感技术测量应变和温度的序幕。自从20世纪末，瑞士的Smartech公司分别在Pizzante污水站、Geneva湖床、德国柏林盐水管道路等工程采用布里渊测试技术监测应变和温度，取得了较好的效果。在我国，南京大学的施斌等人将光纤布里渊传感技术应用于实际结构（南京市鼓楼隧道、玄武湖隧道、云南嵩待公路白泥井3号隧道等）健康监测中，对实际结构的服役状态进行了把握。哈尔滨工业大学欧进萍、周智等人在其研制的纤维增强复合传感筋的基础上开发适合实际工程应用的系列传感探头，并已将其应用到大庆某公路、油井套损监测和广州地铁人防工程等实际结构中去。

光纤光栅传感技术和光纤布里渊传感技术已经成为现阶段结构健康监测的首选。但是考虑它们各自的特性可知，光纤光栅传感器为局部测试元件，虽然具有精度高、采样频率高等优点，但同时也具有容易漏检、成本高、线路复杂的缺点，无法满足实际结构分布范围广的特点。相反地，光纤布里渊传感技术的显著优点就是传感探头成本低、可实现时间和空间上的三维信息把握等。并以此优点成为目前的研究热点（Bao, 1994-2008；Inaudi, 2005-2006；施斌, 2002-2008；

张俊义，2005；Ou，2006-2008）。但是，受到现有商业化测试系统的限制，其仍具有精度和采样频率低等缺点，无法满足实际工程的高精度和实时性的要求。综合以上光纤光栅和光纤传感技术的优缺点分析可知，以上两种传感技术具有良好的互补。将上述两者融合，充分发挥其优点、规避缺点，形成一种兼顾全尺度的较高精度测试和局部高精度、高稳定性测试的共线技术是有效的和可行的。从上世纪90年代起，通过相关研究学者的努力，针对这一技术已经取得了部分有益成果，如美国学者Davis和Kersey (1996)分别采用光纤光栅监测系统和光纤布里渊测试系统对同一根写有光纤光栅的光纤进行测试，实现温度和应变的同时采集；刘德华（2005）尝试将分布式光纤传感器和多根光纤光栅传感器集成到一根光缆中去，构件光纤光栅和光纤布里渊融合系统。欧进萍、周智等（2006，2008）提出了光纤布里渊和光纤光栅共线系统。工作时将布里渊传感器布设到待测区域，而光纤光栅传感器位于应力热点位置。通过光纤布里渊传感器获得被测区域的大规模整体信息，与此同时，通过光纤光栅获得热点位置高精度的局部信息，从而实现满足实际工程需要的大规模整体信息和局部高精度信息的把握。

4、发展趋势及研究基础

总结当前的国内外发展现状，可以得到如下的发展趋势：

（1）对光纤光栅拉索索力测量系统的成体系测试方法亟待加强。

目前，尚未存在成体系的光纤光栅拉索索力测量系统综合管理、操作、评估、量值保障体系，在实际运行的过程中面临全生命周期管理、异常报警缺失等挑战。因此，需要对光纤光栅拉索索力测量系统的特性、重要影响因素与测量不确定度方面进行更为深入扎实工作。

（2）业界逐渐开始探索实际工况下光纤光栅拉索索力的测量系统快速便捷校准方法。许多实际服役的测量系统受制于服役环境（如高湿度等），无法在使用过程中实现便捷快速的参数校准，是业界近几年的研究热点之一。

目前国内外交通领域针对光纤光栅拉索索力测量系统尚未有统一可行的计量技术方案，但随着行业的迫切需要，制定出针对光纤光栅拉索索力测量系统的计量技术方案势在必行。

三、编制过程

1、编制原则

项目组对国内外生产厂家、运营机构、业主单位、研究院、高校等单位就光纤光栅拉索索力测量系统的技术参数及重要指标进行了广泛的调研。确定了相关技术指标和方法，形成了相关计量技术规范。编制原则如下：

(1) 科学性

规范的编制，在国内外技术调研、理论分析及试验验证的基础上，科学规定光纤光栅拉索索力测量系统的相关计量技术指标及测试方法。

(2) 适用性

规范的编制应充分考虑国内市场大多数仪器设备的测试需求，对国产设备和进口设备的技术特点具有共同的适用性。

2、工作进程

2024年5月规范制定计划下达，编制组立即着手进行任务分工，正式启动编写工作。

首先进行资料搜集，汇总分析国内外与光纤光栅拉索索力测量系统相关的标准规程规范等；同时对相关桥梁结构规程及标准规范进行研读，并初步进行必要的试验验证。

2024年9月，第一编写人组织编写组完成征求意见稿初稿，组织项目组进行内部讨论，明确需要进一步通过试验进行验证的校准条件、校准项目和校准方法等技术内容。

3、人员分工

表 1 主要起草人承担工作情况表

序号	姓名	单位	主要工作
1	彭璐	交通运输部公路科学研究所	负责规范引言、1 范围、2 引用文件的编制及全文统稿
2	唐煜	交通运输部公路科学研究所	负责规范 7 校准项目和校准方法的编制
3	冯笑凡	交通运输部公路科学研究所	负责规范 6 校准条件、7 校准项目和校准方法的编制
4	崔建军	中国计量科学研究院	负责规范 6 校准条件的编制
5	兰春光	北京市建筑工程研究院有限责任公司	负责规范 8 校准结果、9 复校时间间隔的编写

6	钱林峰	北京市建筑工程研究院有限责任公司	负责规范附录 B 的编制
7	仇海亮	北京迈石科创监测技术有限公司	负责规范 8 校准结果的编制

四、编制依据

JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》、JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》和 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》共同构成本规范制定的基础性系列规范。

五、主要技术内容说明

按照 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》要求，本规范包括 9 个章节和 3 个附录，主要章节有 1 范围、2 引用文件、3 术语和定义、4 概述、5 计量特性、6 校准条件、7 校准项目和校准方法、8 校准结果、9 复校时间间隔，以及附录 A 校准记录表格式、附录 B 光纤光栅拉索索力测量系统校准证书信息及内页式样、附录 C 光纤光栅拉索索力测量系统测量不确定度评定示例。

1、概述

光纤光栅拉索索力测量系统是用于桥梁拉索索力的设备，用于桥梁结构健康监测与检测，利用紫外曝光等技术在光纤芯中引起折射率的周期性变化和分布，这种光纤内部折射率分布的周期性结构就是光纤光栅。测量过程是通过光源和光纤光栅传感器拉伸形成某一特定波长光的反射，从而形成光纤光栅的反射谱。光纤光栅拉索索力是在索体捻制过程中将最中心的平直钢丝（或钢绞线）替换为内嵌 Bragg 光栅（Fiber Bragg Grating, FBG）的 CFRP 传感筋（或钢绞线），借助拉索受力状态下端部的锚固和扭转效应，智能筋被自然握裹，达到智能筋（或钢绞线）和普通拉索钢丝（钢绞线）协同变形的效果。光纤光栅拉索索力测量系统可以将索力或微裂等外部长度变化或温度变化产生的长度参数转换为光纤光栅波长的变化，通过解调仪测出其当前波长，再经过计算求出其索力值。

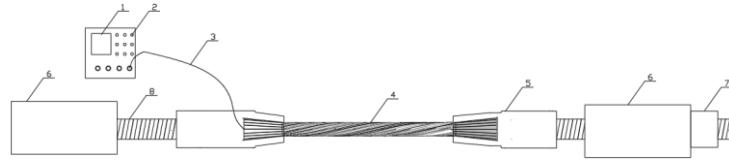


图 1 光纤光栅拉索索力测量系统结构示意图

1——显示模块；2——光源信号发射及采集端口；3——光纤线缆；4——光纤拉索；5——锚具；6——反力台座；7——张拉千斤顶（含压力传感器）

2、计量特性与校准条件

编写组经过与专家、业主单位、主管机构和生产厂家调研后，确认了计量特性为：温度示值误差应不大于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ；线性度应不大于 $\pm 1\%FS$ ；重复性应不大于 $0.5\%FS$ 。

校准的环境温度应在 $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，湿度不大于 $85\%RH$ ；同时，内嵌拉索张拉限位极限抗拉荷载应大于测试索力的 1.5 倍，反力装置变形量小于 5mm ；温度测量范围应包含 $-20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ ，分度值不大于 0.1°C 。

3、校准方法

对于温度示值误差，将内嵌光纤光栅拉索测点区域放入恒温槽中，启动恒温槽，将其温度设定为 -20°C ，待恒温槽恒定后，用标准温度计测量恒温槽的温度，记为 T_{Ri} ，同时记录内嵌光纤光栅拉索索力测量系统的示值，记为 T_i ；重复测量 3 次，分别在 0°C 、 20°C 、 40°C 、 60°C 时进行测量，在每个设定温度重复采集记录 3 次，取 T_i 的算术平均值作为测量结果 \bar{T}_i ；温度示值误差的结果为 $\Delta T_i = \bar{T}_i - T_{Ri}$ 。

对于索力示值误差，将内嵌光纤光栅拉索索力测量系统的传感端固定在测长装置上，开启测量系统；将内嵌光纤光栅拉索索力测量系统满量程拉索力按 10% 分档，从满量程的下限开始，单向进给应变至满量程上限，读取并记录每个档位测长装置的位移值，记为 F_{Ri} ；记录内嵌光纤光栅拉索索力测量系统应变波长示值并换算为应变变量，记为 λ_{Si} ；直至测量值致 100% 满量程。

对于线性度，测试方法同索力示值误差类似，采用 $\gamma = \frac{\Delta F_i}{F_{FS}} \times 100\%$ 进行计算，取绝对值最大的，作为线性度的测量结果。

对于测量重复性，选取内嵌光纤光栅拉索索力测量系统满量程应变量的 60%

位值，从满量程的下限开始单项加载，重复测量 3 次，计算每次测量的示值误差，将示值误差的最大值记为 ε_{simax} ，最小值记为 ε_{simin} ，按下式计算测量重复性：

$$c_{V\varepsilon} = \left[\frac{\frac{(F_{simax} - F_{simin})}{F_{FS}}}{C_n} \right] \times 100\%$$

若测量系统有多根内嵌光纤光栅拉索，则选择需要重复校准的内嵌光纤光栅拉索，直至所有测量系统完成校准。

六、试验验证分析

规范编写过程中，对光纤光栅拉索索力测量系统的计量特性所涉及的具体指标进行了试验验证，见附件《光纤光栅拉索索力测量系统校准规范》试验验证报告。

七、不确定度评定

对光纤光栅拉索索力测量系统进行了不确定度评定，见规范附录 C《光纤光栅拉索索力测量系统不确定度评估示例》。

八、其他应予说明的事项

无。