

国家计量技术规范
《公路基础设施分布式光纤传感
系统校准规范》

编制说明

(征求意见稿)

规范编制组

2022年8月

目 录

一、任务来源.....	3
二、编制背景.....	3
三、编制过程.....	10
四、编制依据.....	11
五、主要技术内容的论据.....	12
六、试验验证分析.....	14
七、其他应予说明的事项.....	14

一、任务来源

根据国家市场监管总局办公厅关于下达的《2022 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，中国计量科学研究院、武汉理工大学光纤传感技术与网络国家工程研究中心、哈尔滨工业大学等单位承担国家计量技术规范《公路基础设施分布式光纤传感系统校准规范》的制定工作。

二、编制背景

1、概要

中共中央、国务院《交通强国建设纲要》提出，推广应用交通装备的智能检测监测和运维技术。强化交通基础设施养护，加强基础设施运行监测检测，提高养护专业化、信息化水平，增强设施耐久性和可靠性。

围绕着行业发展的需求，交通运输部决定在“十四五”期间开展“交通基础设施长期性能科学观测网”和“公路长大桥梁结构健康监测系统”两项重点专项行动。意味着面向基础设施结构监测领域的量传溯源及测试服务需求持续增长。

目前国内已有 400 多座大型桥梁建有健康监测系统，少量特殊结构路段建有长期观测点。2021 年 3 月，交通运输部印发《公路长大桥梁结构健康监测系统建设实施方案》。到 2021 年底，完成 11 座试点桥梁系统建设，制定出台《公路桥梁监测技术规范》。到 2022 年底，基本建成长大桥梁结构数据平台，已建成的单桥系统和省内长大桥梁结构健康监测平台开始运行并接入数据平台。到 2023 年底，基本建成数据平台、监测平台和全国统一标准的系统，实现结构状况实时监测、数据自动采集分析、结构状况评估等功能，为桥梁日常运行和养护管理工作提供支撑。

公路基础设施安全服役性能是针对结构的整体性能，其响应的感知应聚焦于整体结构物。但是，目前公路基础设施的传感系统多为基于“点式”测量的传感系统，所涉及到的传感器，如加速度计、应变计等都是“点式”的传感器，只能得到结构物结构上某一点位的状态情况，无法反映结构的整体状况。为全面获取结构状态，只能通过增加布设测点进行，这不仅带来了巨大的经济压力，同时也给数据的传输、同步带来了很大的挑战。同时，由于位置空间的原因，众多的“点

式”传感器无法有效的布设。

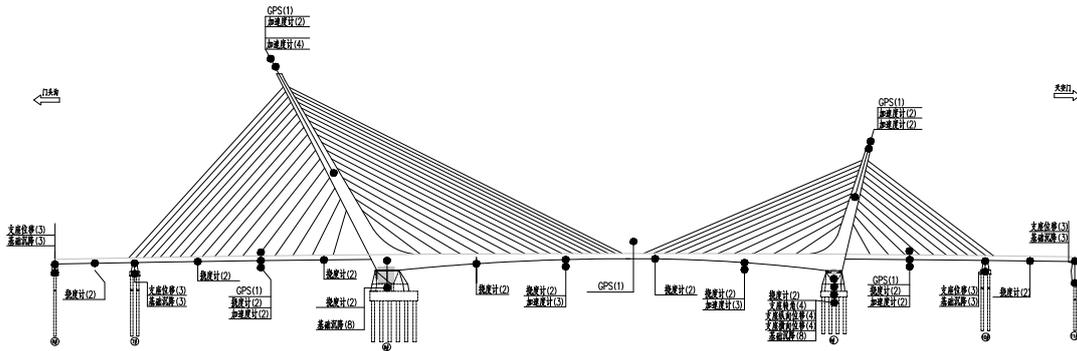


图 1. 结构监测系统

光纤光栅传感器由于其精度高、测量采样频率高，非常适合于公路基础设施的长距离动态测试，近年来，作为“线状”变形测试传感器，长距离分布式监测的光纤传感技术开始应用于公路基础设施，例如基于布里渊光时域反射/分析 (BOTDR/A) 技术的分布式传感体系等，可以满足结构应变、温度等监测指标的空间分辨率/监测布点密度需求。但是由于我国针对传感型光源的生产能力较弱，而公路基础设施监测系统面临着长寿命、长距离、多参量的要求，业界正向着分布式光纤监测系统校准装置与校准规范标准化方面努力。目前，国内外相关研究成果均分别从不同的角度围绕光纤监测系统的某项监测参量数据校准或者光纤成缆工艺展开研究，并提出了对应的校准或者修正方法。但是，业界目前尚无系统化、规范化的量值溯源体系。

2、制定意义

通过本项目的成功实施，可以完全掌握公路基础设施分布式光纤传感系统的应变、应力、温度敏感度建模及校准方法，完全掌握可工程化推广的公路基础设施分布式光纤传感系统校准装置与面公路基础设施分布式光纤传感系统现场校准的模拟试验装置的全部技术，将有助于形成公路基础设施分布式光纤传感系统的测试、校准、分析等科技服务能力、产品化和装备化的应用研发能力，推动公路基础设施分布式光纤传感系统的统一化、标准化以及应用的规范化。本项目有助于突破国内在公路基础设施分布式光纤传感系统工程化检测校准方面的技术瓶颈，降低我国对国外技术依赖的风险，同时经济可行性良好，规范公路基础设施分布式光纤传感系统的工程化应用技术体系，支撑“交通基础设施长期性能科

学观测网”和“公路长大桥梁结构健康监测系统”两项重点专项行动。提高国内公路基础设施分布式光纤传感系统的行业总体竞争力。

3、国内外研究现状

在计量技术规范方面，目前国、内外尚缺少行之有效的分布式光纤测量系统相关的标准规范体系。本技术规范是现阶段桥梁结构监测系统全面推进和数字化基础设施升级的主要技术支撑。

光纤传感器拥有耐腐蚀、耐高温、防爆等优点进而被大量运用于工程实际当中。对于新型研制的传感器，光纤光栅应变监测系统静态的性能测试和试验分析是其运用于工程实际前的必然步骤，而现在针对应变传感器的标定研究还比较少^{[1]~[5]}。

基于瑞利散射的分布式光纤传感技术在 21 世纪初开始迅速发展，其空间分辨率目前已经达到毫米级，瑞利散射光可识别光纤上的突变和非均匀性^[6]。瑞利散射是由光纤长度方向上折射率的波动导致的，若光纤状态不变，便总是产生同样波长的反射光；反之，反射光发生变化^[7]。瑞利散射局部周期的变化会造成局部反射光谱中的时间和光谱发生位移，因此基于波长扫频干涉法（SWI）解调技术的解调仪能够实现分布式光纤传感器稳定的温度测量和应变测量。

现阶段，长距离分布式光纤传感系统可以为公路基础设施结构监测和温度监测提供行之有效的解决方案。2010 年，瑞士联邦工学院的 Soto 等人首次将脉冲编码技术引入到布里渊光纤传感中，有效的提高了系统信噪比，实现 50Km 布里渊光纤传感，空间分辨率为 1m，远端测量精度为 2.2℃或 44 $\mu\epsilon$ ^[8]。2012 年，Soto 等人又提出利用预放大技术^[9]和拉曼放大技术^[10]进一步提高传感距离，实现了 120km 长距离分布式布里渊光纤传感。2012 年加拿大渥太华董永康提出基于频分复用技术的长距离分布式布里渊光纤传感技术^[11]，结合中继放大技术实现 2m 空间分辨率 150km 超长距离传感。2016 年西班牙 Mompou 等人提出采用宽带频率调制的探测光进行长距离布里渊光纤传感，在布里渊衰减谱的系统中脉冲光得到平坦增益，增强远端信噪比同时避免非局域效应，实现 100km 高性能分布式布里渊光纤传感^[12]。同年瑞士 Luc 课题组实现基于图像处理的高性能长距离分布式布里渊光纤传感，在不改变硬件的基础上，50km 传感距离信噪比提高了 14db^[13]，

利用图像处理降噪算法实现 200km 超长距离布里渊光纤环路传感, 空间分辨率为 2m^[14]。

光纤的物理长度和折射率对环境非常敏感, 在光纤测试中发现, 其主要受温度和应变的影响, 因此光纤传感器应变系数和温度系数是影响测量结果的主要因素^{[15][16]}。由于不同类型的分布式光纤传感器的制造工艺不同, 造成光纤传感器的应变系数和温度系数不同, 且厂家采用的应变系数和温度系数是对大量光纤传感器进行实验得到的均值, 因此, 对于需要精确测量的工程实验, 实验之前对同一批次生产的光纤传感器进行应变系数和温度系数的校准是十分必要的。贾喜鸽等利用温控箱和位移台对基于布里渊散射的光纤传感器测量系统的性能参数进行标定, 测量了光纤传感器的应变系数和温度系数^[17]。王蕾在不改变光纤传感器测量系统应变系数和温度系数的情况下, 利用恒温水浴槽对基于拉曼散射的光纤传感器测量系统的性能参数进行了标定^[18]。虽然各国学者针对分布式光纤测量系统研究很多, 但是, 鲜见关于标定方法和原理、相关参量获得的基本方法。因此, 很有必要研发一套分布式光纤测量系统的标定系统, 以科学、准确、实用的技术方案对分布式光纤测量系统进行量值溯源。

综合来看, 近几年来对光纤光栅应变监测系统的校准研究主要集中在两个方面, 一是从解调系统硬件自身进行校准以期提高系统精度^{[19]~[25]}, 二是通过相关仪器用比较法来对系统结果进行标定后修正结果^{[26]~[34]}。

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) 对分布式光纤测量系统的建模工作亟待加强, 逐渐成为研究热点。

目前, 相关工作均建立在试验、测试结果的数学处理与经验分析的基础上。缺乏理论上的提升、凝练与概括。在这一点上, 国外相关高校、科研院所所做的工作在深度、广度上超过了国内相关机构。因此, 国内急需进行分布式光纤传感系统的特性、敏感因素与测量不确定度方面进行更为深入扎实的建模工作。

(2) 业界正在分布式光纤传感系统校准技术的标准化、可移植、普适性等方面努力前进。目前, 国内外相关研究成果均分别从不同的角度围绕分布式光纤

传感系统的某项数据或者工艺展开研究，并提出了对应的校准或者修正方法。但是，业界目前尚无一种能够广泛适用于不同传感器的普适性参数校准装置，也缺乏系统化、规范化的校准规程。

(3) 业界逐渐开始探索应用于实际工程中的分布式光纤传感系统的现场校准方法。许多应用于实际工程中的分布式光纤传感系统受制于应用环境、测试手段等限制，无法在使用过程中实现定期的参数校准，这也是业界近几年提出的热门研究方向之一。

目前国内外针对分布式光纤传感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，制定计量技术方案势在必行。

5、参考文献

[1] 毕卫红. 光纤应变传感器的研究现状与发展[J]. 激光与光电子学进展, 1999(12): 1-6.

[2] 张森, 刘孟华, 王臻, 等. 光纤传感器的研究及应用[J]. 光通信研究, 2007(3): 62-65.

[3] 赵立. 光纤传感器市场发展前景分析[J]. 光通信研究, 2014(1): 45-48.

[4] 李乐, 候正信. 光纤应变传感器的设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2004, 18(4): 70-76.

[5] 李之中, 李杰, 郑水华, 等. 位移、应变类传感器自动标定装置的研制[J]. 水电自动化与大坝监测, 2012, 36(3): 54-57.

[6] 郝英奇, 丁勇, 何宁. 分布式光纤传感测试系统(BOTDA)用于H型钢梁变形监测的实验研究[J]. 实验力学, 2011, 26(4): 447-456.

[7] 孙良新, 徐宁光. 复合材料结构内埋光纤网络测试其内部损伤试验研究[J]. 实验力学, 1996, 11(3): 6.

[8] Soto M A, Bolognini G, Pasquale F D, et al. Simplex-coded BOTDA fiber sensor with 1 m spatial resolution over a 50 km range[J]. Optics Letters, 2010, 35(2): 259-261. doi: 10.1364/OL.35.000259

[9] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F. Long-range simplex-coded BOTDA sensor over 120km distance employing optical preamplification[J]. Optical Letters, 2011, 36(2): 232-234. doi: 10.1364/OL.36.000232

[10] Soto M A, Taki M, Bolognini G, et al. Simplex-coded BOTDA sensor over 120-km SMF with 1-m spatial resolution assisted by optimized bidirectional Raman amplification[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(20): 1823-1826. doi: 10.1109/LPT.2012.2212183

[11] Dong Y K, Chen L, Bao X Y. Time-division multiplexing-based BOTDA over 100km sensing length[J]. Optics Letters, 2011, 36(2): 277-279. doi: 10.1364/OL.36.000277

[12] Mompó J J, Urricelqui J, Loayssa A. Brillouin optical time-domain analysis sensor with pump pulse amplification[J]. Optics Express, 2016, 24(12): 12672-12681. doi: 10.1364/OE.24.012672

[13] Soto M A, Ramírez J A, Thévenaz L. Intensifying the response of distributed optical fibre sensors using 2D and 3D image restoration[J]. Nature Communications, 2016, 7: 10870. doi: 10.1038/ncomms10870

[14] Soto M A, Ramírez J, Thevenaz L. 200 km fiber-loop conventional Brillouin distributed sensor with 2 m spatial resolution using image denoising[C]//Asia Pacific Optical Sensors Conference, 2016: Th3A. 4.

[15] 冯健, 邵立国. 压力场中光纤应变测量方法研究[J]. 实验力学, 1998, 13(2):6.

[16] Froggatt M E, Gifford D K. Rayleigh Backscattering Signatures of Optical Fibers—Their Properties and Applications[C]// Optical Fiber Communication Conference & Exposition & the National Fiber Optic Engineers Conference. IEEE, 2013.

[17] 贾喜鸽, 李素贞, 赵鸣. 受激布里渊光时域测试系统性能标定实验研究[J]. 电子测量技术, 2011, 34(3):6.

- [18] 王蕾. 分布式光纤传感温度测试系统性能标定方法[J]. 中国计量, 2016(2):4.
- [19] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C et al. Photosensitivity in optical fiber waveguide: application to reflection fiber fabrication. Appl. Phys. Lett. 1978, 32(10):647~649.
- [20] Meltz G, Morwy M M, Glenn W H, Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. Opt. Lett. 1989, 14(5):823~825.
- [21] Hill K O. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV expose through a phase mask. Appl. Phys. Lett. 1993, 62(10):1035~1037.
- [22] 朱晶晶, 蒋玉蓉, 薛唯. 光纤布拉格光栅激光器的传感应用[J]. 光学技术. 2008, (34):18-23.
- [23] Giles C R. Lightwave applications of fiber Bragg gratings. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8):1391-1404.
- [24] Kim S C, Kwon J J, Kim S W, et al. Multiplexed strain sensor using fiber grating tuned fiber laser with a semiconductor Optical amplifier[J]. IEEE photonics technology letters, 2001, 13(4): 350-351.
- [25] 董小伟, 许鸥, 鲁韶华等. 双光栅耦合器型上下话路滤波器的设计和实验[J]. 中国激光, 2007, (8):1106-1109.
- [26] Reyes P I, Litchinitser N, Sumetsky M, et al. 160-Gb/s tunable dispersion slope compensator using a chirped fiber Bragg grating and a quadratic heater. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(4), 831-833.
- [27] 恽斌峰. 布拉格光纤光栅应变监测系统理论与实验研究[D]. 东南大学, 2006.
- [28] 郭金光. 罐群参量分布式光纤检测系统研究[D]. 大庆石油学院,

2006.

[29] 程树春, 张艳平. 光纤光栅漏油传感器在石油工业健康监测中的应用[J]. 应用光学, 2008, (3):441-443.

[30] 张文涛, 孙宝臣, 杜彦良. 基于光纤光栅的青藏铁路冻土路基地温监测试验研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 2005, (4):49-51.

[31] Rao Y J, Jackson D A, Zhang L et al. Strain sensing of modern composite materials with a spatial/wavelength multiplexed fibre grating network. Opt. Lett. 1996, 21:683~685.

[32] 付建伟. 分布式光纤 Bragg 光栅波长校准方法[J]. 光学技术. 2006, 32(6):903-905.

[33] 张翠. 标定方法提高布拉格光栅解调系统测量精度研究[J]. 激光与红外. 2006, 36(6):483-486.

[34] 陈亮, 黄俊斌, 顾宏灿, 谭波. 一种实时校准的光纤 Bragg 光栅传感器解调系统[J]. 传感器与微系统. 2009, 28(7):89-91.

三、编制过程

1、编制原则

项目是在交通运输部长大桥健康监测系统建设的基础上, 对国内外生产厂家、健康监测系统集成服务机构、业主单位、研究院、高校等单位进行了广泛的调研和征求意见。确定了技术指标和方法, 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, 科学规定分布式光纤测量系统的相关计量技术指标及测试方法。

(2) 应急性

相关计量技术指标和测试方法适应于十四五期间交通运输部长大桥健康监测系统的专项工作的相关要求, 在各省大量布设安装的背景下, 开展了规范的编制工作, 并对校准方法进行了大量的试验验证。

(3) 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

2022年7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,汇总分析国内外分布式光纤传感系统相关的标准规程规范等;主要进行国内外公路基础设施分布式光纤传感系统调研,重点查阅国外相关知名公司产品规格的详细要求,并结合我国工程应用的情况,分析国内外产品的技术差异。对调研信息进行归纳整理,研究存在的共性问题,对规程的校准参数进行逐项分析确认。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。

2022年8月,根据国内外公路基础设施分布式光纤传感系统测量技术水平、发展趋势、测量能力,深入探讨应变原理,分析公路基础设施分布式光纤传感系统各种测量不确定度影响因素,研究确定主要计量技术指标。

第一编写人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计量要求和计量方法等技术内容。

2022年9月,开展相关试验验证,修改和完善征求意见稿。

2022年9月,开展征求意见,并将征求意见稿发送行业专业、生产厂家、检测机构等广泛征求意见。

3、人员分工

窦光武(交通运输部公路科学研究所):负责规范的统筹。

崔建军(中国计量科学研究院):负责试验方法研究及组织试验验证。

彭璐(交通运输部公路科学研究所):负责规范的理论分析。

周次明(武汉理工大学):负责计量方法的研究。

董永康(哈尔滨工业大学):负责部分试验验证工作

陈恺(中国计量科学研究院):负责测量不确定度评定、附录编制。

冯笑凡(交通运输部公路科学研究所):负责试验方案建立。

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 1059.1-2010《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。同时引用了以下标准规范：

JT/T 1037 公路桥梁结构安全监测系统技术规程

GB 50982 建筑与桥梁结构监测技术规范

GB/T 18459 传感器主要静态性能指标计算方法

JJF 1305 线位移传感器校准规范

五、主要技术内容的论据

按照 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》要求，本规范包括 8 个章节和 3 个附录，主要章节有 1 范围、2 引用文件、3 概述、4 计量特性、5.校准条件、6 校准项目和方法、7 校准结果、8 复校时间间隔，以及附录 A 原始记录格式、附录 B 校准证书页格式、附录 C 校准结果通知书内页格式。

1. 概述

公路基础设施分布式光纤传感系统是由于结构物应变测量的设备系统，一般由光纤传感器、解调仪、安装座光缆、外壳等部分组成，其主要结构如图 1 所示。光纤是公路基础设施分布式光纤传感系统的核心元器件，由于光纤沿线的应变及温度等外部参数变化，其折射率分布发生变化进而影响其布里渊频移量，通过解调仪测量布里渊频移量的变化并进行计算，可实现空间上应变和温度等参数的连续测量，其具有监测距离远、监测点位多的特点。

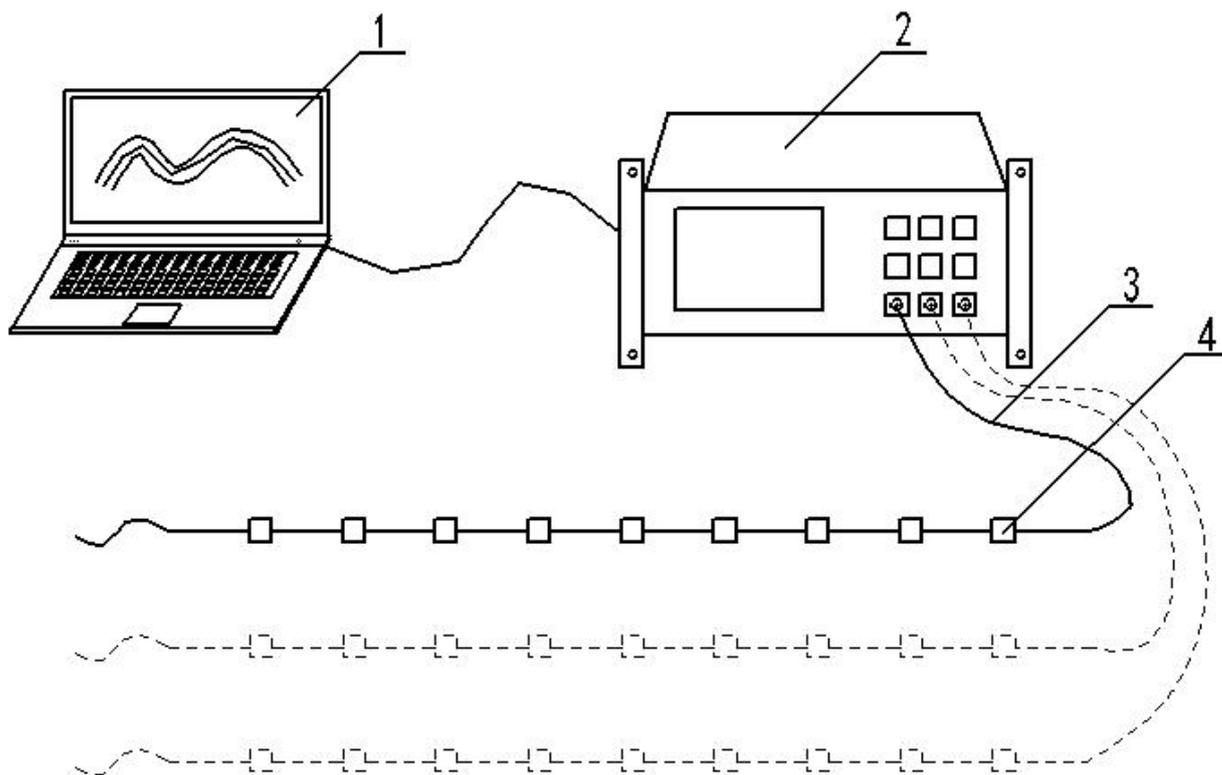


图 2. 公路基础设施分布式光纤传感系统结构示意图

1——数据处理电脑；2. 分布式光纤采集仪；3. 光纤线缆；4. 电缆接头

2. 计量特性

编写组经过与专家、业主单位、主管机构和生产厂家调研后，形成了以下的计量特性：

a) 温度示值误差

公路基础设施分布式光纤传感系统的测量温度示值误差建议应不大于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

b) 应变示值误差

公路基础设施分布式光纤传感系统的测量示值误差建议应不大于 $\pm 20\mu\epsilon$ 。

c) 应变重复性

公路基础设施分布式光纤传感系统的重复性建议应不大于 $\pm 4\mu\epsilon$ 。

d) 线性度

光纤传感系统的线性度不大于 $\pm 1\%FS$

e) 定位示值误差

光纤传感系统定位示值误差不大于 0.1m。

为实现以上指标的验证,编写组经过大量试验以后确定采用结构监测用分布式光纤测量系统校准装置和恒温槽及温度计的方式进行校准,具有以下优势,一是便于工程量的直接表征和溯源,二是便于对温度性能进行验证。

六、试验验证分析

规范编写过程中,在实验室内及现场均对分布式光纤测量系统的计量特性所涉及的具体指标进行了试验验证,并与生产厂家和监测机构开展了广泛调研,确定指标可以服务于现阶段计量测试工作。

七、其他应予说明的事项

无。