高压电缆分布式光纤测温装置性能评估方法研究

刘佳鑫，韦德福，唐红，郎业兴
（国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院，辽宁 沈阳 110006）

摘　要：针对高压电缆分布式光纤测温装置无法系统化开展仪器校验与性能评估的问题，提出了一种分布式光纤测温装置性能评估方法。基于该方法，研究开发了一套基于自动化温度控制与采集的智能校验平台，利用可编程序的循环恒温水浴搭建了分布式光纤测温装置校验环境，同时对系统的温度测量准确度、空间分辨率、温度分辨率和定位准确度等主要技术指标进行校验。采用该方法对辽宁地区高压电缆分布式光纤测温装置开展自动化性能检测与评估，横向对比结果表明各台装置的温度测量准确度、温度分辨率和温度测量重复性校验数据均满足规范要求，但不同装置之间数据一致性较差。结合评估结果对分布式光纤测温装置准确度提升方法和现场标定方法提出了若干建议。

关键词：高压电缆；分布式光纤测温；在线监测；性能评估；系统标定

Research on performance evaluation method of distributed optical fiber temperature sensing device for high voltage cable

LIU Jiaxin, WEI Defu, TANG Hong, LANG Yexing
(Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110000, China)

Abstract: In view of the problem that the distributed optical fiber temperature measurement device of high voltage cable cannot systematically carry out instrument calibration and performance evaluation, in this paper, a performance evaluation method of distributed optical fiber temperature measurement device is proposed. Based on this method, an intelligent verification platform based on automatic temperature control and acquisition is developed, where the calibration environment of distributed optical fiber temperature measurement device is built by using the programmable constant temperature water bath. At the same time, the main technical indicators of the system, such as temperature measurement accuracy, spatial resolution, temperature resolution and positioning accuracy, are verified. This method is used to make automatic performance evaluation for distributed optical fiber temperature measurement device for high-voltage cables in Liaoning Province. The results of horizontal comparison show that the accuracy, resolution and repeatability of temperature measurement of each device meet the specification requirements, but the data consistency between different devices is poor. Combined with the evaluation results, suggestions are put forward for accuracy improvement method and field calibrating method of distributed optical fiber temperature measurement device.

Key words: high voltage cable; distributed optical fiber temperature measurement; online monitoring; performance evaluation; system calibration

国网辽宁省电力有限公司科技项目（2019 YF-56）

0　引言

交联聚乙烯绝缘高压电缆具有优良的绝缘性能和长期运行可靠性，是城市电网中重要的一次电力传输设备，常用于城市综合管廊等地下电网[1-2]。高压电缆投运前可能会因设计、工艺、运输和安装各环节遗留的微小缺陷而导致绝缘性能下降，从而无法满足运行条件[3]，但在高压电缆故障潜伏期或投运初期难以有效发现其内部绝缘缺陷。研究表明，电缆运行温度可以较为直观地反映出电缆本体及附件的健康状况，能提早发现并有效避免由于材料老化所引发的绝缘失效等问题，保证电力系统安全稳定运行[4-6]。

目前，高压电缆运行维护中已应用多种在线监测技术手段。实践证明，通过应用电力电缆分布式光纤测温（Distributed Temperature Sensing，DTS）来提前发现电缆的某些潜在故障是有效的。DTS 装置多采用光时域或频域反射技术原理对线型测温光缆中不同点的温度进行计算，从而反映出电缆的实时运行温度，由测温光缆、测温主机及监测后台等部分组成。由于反射光对于温度变化较为敏感，测温光缆感知温度的同时能将沿着测温光缆反射回的光信号传递回测温主机，经过光电转换、放大、滤波和去噪等处理后，即可利用光时域反射原理计算出温度点位置和温度值，最终得出测温光缆覆盖范围内的实时温度场。对于电力工业而言，近年来随着检测技术的不断进步，各类 DTS 在线监测系统已广泛兴起，然而对于这些新兴装置和系统的校准评估尚缺乏系统化的手段和相应的设备[7-10]。

本文针对分布式光纤测温系统性能评估方法开展研究，建立一套高压电缆 DTS 在线监测性能评估系统，采用恒温水浴装置对 DTS 装置开展校验和性能评估，并对校验数据和结果进行统计分析。本系统研制后，应用于辽宁地区高压电缆分布式光纤测温系统的自动化性能检测与评估，有效提高了仪器校验的工作效率和智能化程度，对于保证分布式光纤测温系统在高压电缆运维工作中的有效应用具有重要意义。

1　DTS 测温原理

DTS 系统多是基于光纤拉曼散射和光时域反射原理来进行温度测量的。在光纤中注入一定能量和宽度的激光脉冲信号，其在光纤中传输所产生的散射信号是连续的，通过获取背向拉曼散射光波强度与入射光脉冲信号之间的时间间隔，解调出散射点的温度变化和位置信息，即可获得整条光纤的温度分布情况。由于背向拉曼散射光波强度微弱，因此需要采用高频信号采集和微信号处理技术，经光学滤波、光电转换、放大和模数转换等处理单元后，由信号处理器解调出光纤各测温点的温度值，并将采集的温度数据传送到计算机系统进行数据处理，展示出各测温点的温度值和变化状态，实现电缆温度的实时监测和预警。其原理示意图如图 1 所示。

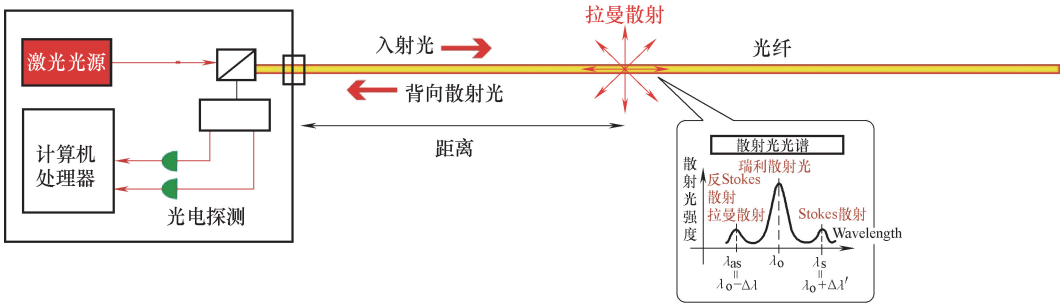

图 1　DTS 测温原理示意图

Fig. 1　Schematic diagram of DTS temperature measurement principle

2 智能校验平台

2.1 校验标准依据

现行电力行业标准 DL/T 1573—2016《电力电缆分布式光纤测温系统技术规范》中规范了电力电缆分布式光纤测温系统的技术指标要求、试验检测项目及试验方法等[11]，主要适用于安装在单芯电力电缆上的光纤测温系统。其中对于主要技术指标的相关要求如表 1 所示。

表 1 DTS 测温主机技术指标

Tab. 1 Technical indexes of DTS temperature measurement host

技术参数名称	技术指标要求值
温度测量准确度	≤±1 ℃
空间分辨率	≤2 m
温度分辨率	≤0.5 ℃
定位准确度	≤±1 m

2.2 基本原理

为解决目前 DTS 校验效率低且智能化水平不足的问题，本文研究开发了一套基于自动化温度控制与采集的智能化校验平台，主要由智能校验控制系统、可编程序循环恒温水浴箱、智能温度巡检仪和被校验 DTS 测温主机等几部分组成，如图 2 所示。由于测温光纤属于线型感温元件，因此检测系统需要预设不同的恒温环境对测温光纤的测温准确性进行校验，且给定长度的测温光纤需盘绕后完全浸入恒温环境中。水浴具有温度稳定性好、受环境影响小等优点，且温度范围为 0~100 ℃，相比于空气浴和油浴等恒温控制方法，更贴近于高压电缆测温光纤的现场实际运行工况。因此对于温度的控制，本文的研究工作中采用了一种基于可编程序循环恒温水浴箱的水浴环境温度动态控制系统，由处理器自动控制可编程序循环恒温水浴箱按预设温度和温升速率进行水浴加热/冷却，用于 DTS 测温主机的校验。依靠智能温度巡检仪实时监测水浴环境温度，当达到预设恒定温度后，自动与 DTS 测温主机监测结果进行比对，实现仪器校验流程化、自动化及无纸化。

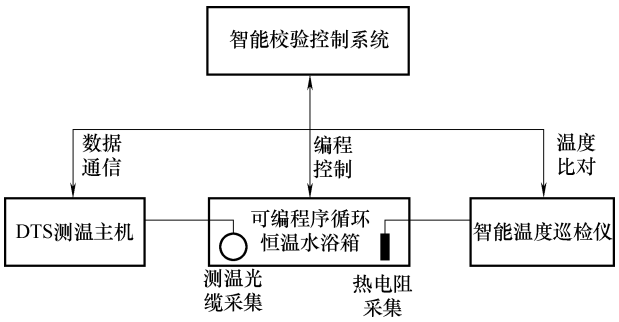

图 2 DTS 测温系统智能校验平台结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of intelligent verification platform for DTS temperature measurement system

2.3 校验方法

高压电缆 DTS 装置的最主要指标包含温度测量准确度、定位准确度、温度分辨率和空间分辨率等方面。各项指标校验的主要依据 DL/T 1573—2016《电力电缆分布式光纤测温系统技术规范》所要求的实验方法，结合定义及计算公式，分析出被校验 DTS 装置的具体指标参数。

（1）温度测量准确度测试

测温准确度是指在一定温度范围内光纤测温装置所测得的温度值与标准温度计的测量值之间的最大偏差值。将测温光缆放入恒温装置，待温度稳定后，读取放入恒温装置中的光缆各个测量点（不少于 10 个）的温度及温度偏差值。恒温装置的温度从 0~100 ℃每间隔 5~10 ℃选取一点，0 ℃宜采用冰水混合物形式实现恒温参考。其具体校验流程如下：

1）在测温光缆的远端位置任取连续不少于 50 m 长度，盘绕成直径 30 cm 的圆圈后放置于恒温水浴环境中，其余测温光缆均放置于水浴环境之外。

2）智能校验控制系统设定恒温水浴箱目标温度，并启动水浴箱恒温控制和智能温度巡检监测。

3）水浴环境温度达到设定值后，连续5 min内单通道温度巡检监测结果变化不超过±0.1 ℃且各通道间温度差值不超过0.1 ℃时，可判断水浴环境温度恒定，此时智能校验控制系统开始测温准确性校验，并将各通道温度平均值作为水浴环境温度标准值。

4）智能校验控制系统读取DTS装置在水浴环境范围内测温光纤上各测量点的温度，并计算与水浴环境温度标准值的差值，分布式光纤测温系统温度测量值与对应水浴环境温度标准值的差值平均值应不大于±1 ℃。

5）改变恒温水浴箱目标温度，重复步骤2）~步骤4）。

（2）定位准确度测试

定位准确度是指对测温光缆上的某温度变化段（或点）与测量原点的距离，光纤测温装置的测量长度值与标准尺测量值之间的最大偏差值。选择光纤远端位置任取一定长度的测温光缆，对该位置进行加热。用测温装置测量该点的位置，读取光纤测温装置测量值1，用该值作为参考标准。在此测量点的基础上用标准尺沿光纤向后测量10 m位置进行再次加热，读取光纤测温装置测量值2。测量不少于3组数据，取差值大者为定位误差值。其具体校验流程如下：

1）在光纤的远端位置任取一定长度的测温光缆，将某位置放置于恒温水浴箱的水浴环境中，其余测温光缆均放置于水浴环境之外。

2）通过自动校验控制平台设定恒温水浴箱目标温度开始加热，并启动恒温控制和水浴环境温度监测。

3）水浴环境温度恒定后，自动校验控制平台自动识别并记录该点在分布式光纤测温装置中的位置，记录为L_1。

4）以该点为基础，用标准尺向光纤远端延伸10 m后再次选择某位置放置于恒温水浴箱的水浴环境中，其余测温光缆均放置于水浴环境之外。

5）通过自动校验控制平台设定恒温水浴箱目标温度开始加热，并启动恒温控制和水浴环境温度监测。

6）水浴环境温度恒定后，自动校验控制平台自动识别并记录该点在分布式光纤测温装置中的位置，记录为L_2；定位误差值=L_2-(L_1+10 m)，其测量结果应不大于±1 m。

（3）温度分辨率测试

选择远端位置取不少于10 m长的测温光缆放入控温准确度不超过0.5 ℃的恒温装置中，取5个温度点，读取光纤测温装置的温度测量值。调整恒温装置温度使在这5个温度点的温度变化不超过0.5 ℃，静置待温度稳定后，再次通过光纤测温装置读取温度测量值，并计算两次读取的温度的偏差值。取偏差值大者为温度分辨率。

（4）空间分辨率测试

空间分辨率是指在测温光缆上某点出现温度阶跃变化时，光纤测温装置所能测得的该温度阶跃变化值的10%~90%之间的距离长度，如图3所示。选择远端位置取不少于30 m的测温光缆放入20 ℃恒温装置，剩余测温光缆放入60 ℃的恒温装置中。根据光纤测温装置的显示结果读取温度在24~56 ℃之间这一段的光纤长度。然后分别取29.5 m和30.5 m长

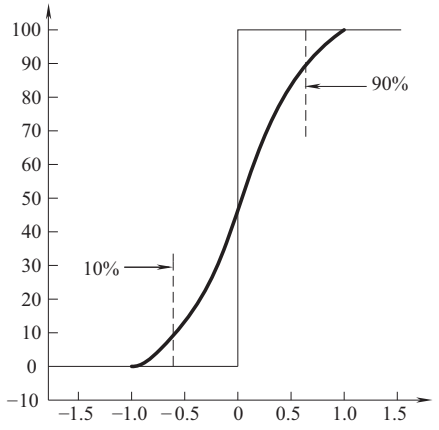

图3 测温光缆温度的阶跃变化

Fig. 3 Step change of temperature of temperature measuring optical cable

测温光缆重复进行试验，并读取温度上升值10%~90%对应的光纤长度，取长度值大者为空间分辨率。

3 校验结果分析

本文结合某台高压电力电缆DTS装置的实验室校验工作，重点对涉及温度测量性能的各项测试数据进行了对比和分析，校验过程中环境温度保持在22~24 ℃。

3.1 温度测量准确度测试结果

该台DTS装置的温度测量准确度结果如表2所示，按式（1）计算被校验仪器的测量误差为

$$\Delta_e = T_{meas} - T_{set} \tag{1}$$

式中，Δ_e为被校验仪器的测量误差；T_{meas}为被校验仪器温度测量值；T_{set}为水浴环境温度值。

可以看出，总体上该台DTS温度测量准确度不超过±1 ℃，满足标准规范要求。

3.2 温度分辨率测试结果

在温度测量准确度测试的基本方法下，选取5组温度值（每组温度值由预设温度T_1和T_2组成，其中$T_2 = T + 0.2$ ℃）和5个测温点，按照设定的温度依次调整水浴设定温度，得到该台DTS温度测量结果如表3所示，按式（2）计算被校验仪器的温度分辨率

$$T_r = |T_2 - T_1|_{max} \tag{2}$$

式中，T_r为被校验仪器的温度分辨率；T_1和T_2为被校验仪器的温度测量值。

可以看出，总体上该台DTS温度分辨率小于0.5 ℃，满足标准规范要求。

3.3 重复性测试结果

在温度测量准确度测试的基本方法下，选取3个温度值和5个测温点，按照设定的温度依次调整水浴设定温度并循环3次，该台DTS温度测量结果如表4所示，按式（3）计算被校验仪器的重复性

$$T_g = |\overline{T} - T_i|_{max} \tag{3}$$

式中，T_g为被校验仪器的温度测量重复性准确度；$\overline{T}$为被校验仪器温度测量值的算术平均值；T_i为第i次的仪器温度测量值。可以看出总体上该台DTS温度测量重复性不超过0.504 ℃，仍然满足温度测量准确度要求。

表2 某台DTS温度测量准确度测试结果

Tab. 2 Test results of temperature measurement accuracy of a DTS

水浴温度/℃	温度测量值/℃										平均误差/℃
	5 m	10 m	15 m	20 m	25 m	30 m	35 m	40 m	45 m	50 m	
9.9	10.53	10.31	9.97	9.39	9.44	9.59	9.78	9.89	10.11	10.33	0.034
19.7	20.30	19.97	19.65	19.42	19.29	19.32	19.28	19.35	19.51	19.82	−0.109
29.7	29.80	29.46	29.46	29.28	29.18	29.06	28.96	29.03	29.31	29.86	−0.360
39.7	39.35	39.25	38.87	38.81	39.16	39.19	39.23	39.54	39.64	39.61	−0.435
49.7	49.79	49.53	49.33	49.24	48.84	48.89	48.99	49.26	49.90	50.21	−0.302
60.2	59.99	59.52	59.28	59.36	59.41	59.54	59.74	59.95	60.33	60.42	−0.446
70.0	69.49	69.36	69.25	69.31	69.36	69.24	69.37	69.77	69.48	69.39	−0.598
80.0	79.74	79.97	79.38	79.28	79.34	79.38	79.34	79.3	79.65	80.13	−0.449
87.2	87.14	86.56	86.50	86.88	86.66	86.72	86.91	86.52	86.70	87.12	−0.429
95.3	95.71	95.52	95.37	94.97	94.97	94.53	94.64	94.42	94.63	94.45	−0.379

表3 某台DTS温度分辨率测试结果

Tab. 3 Test results of temperature resolution of a DTS

组别	水浴温度/℃	温度测量值/℃					差值平均值/℃	差值最大值/℃
		2 m	4 m	6 m	8 m	10 m		
I	T_1：34.9	34.83	34.61	34.67	34.79	34.76	0.332	0.43
	T_2：35.1	35.19	34.97	34.85	35.12	35.19		

（续）

组别	水浴温度/℃	温度测量值/℃ 2 m	4 m	6 m	8 m	10 m	差值平均值/℃	差值最大值/℃
Ⅱ	T_1：49.7	49.48	49.46	49.46	49.55	49.61	0.324	0.41
	T_2：50.9	49.75	49.82	49.87	49.81	49.93		
Ⅲ	T_1：65.1	65.39	65.32	65.27	65.16	65.11	0.278	0.39
	T_2：65.3	65.59	65.62	65.66	65.41	65.36		
Ⅳ	T_1：80.0	79.74	79.97	79.87	79.90	79.84	0.384	0.43
	T_2：80.2	80.14	80.36	80.30	80.28	80.16		
Ⅴ	T_1：90.1	89.74	89.97	89.90	89.91	89.98	0.358	0.45
	T_2：90.3	90.14	90.26	90.35	90.18	90.36		

表 4　某台 DTS 温度测量重复性测试结果

Tab. 4　Temperature measurement repeatability test results of a DTS

水浴温度/℃	温度循环	温度测量值/℃ 10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	平均值/℃	最大误差/℃
24.9	Ⅰ	24.88	24.70	24.53	24.43	24.65	24.638	0.242
	Ⅱ	25.08	24.99	24.60	24.62	24.79	24.816	0.264
	Ⅲ	24.80	24.65	24.35	24.56	24.81	24.634	0.284
50.0	Ⅰ	49.85	49.64	49.30	49.43	50.13	49.670	0.460
	Ⅱ	49.97	49.40	49.41	49.32	49.54	49.528	0.442
	Ⅲ	49.99	49.52	49.43	49.31	49.51	49.552	0.438
75.1	Ⅰ	75.49	75.36	75.15	75.11	75.96	75.414	0.546
	Ⅱ	75.44	75.30	75.18	74.98	74.57	75.094	0.524
	Ⅲ	75.79	75.26	75.05	74.88	75.06	75.208	0.582

3.4　对比分析

采用相同的校验方法和步骤，对某厂家生产的同型号同批次 4 台高压电缆 DTS 装置开展集中校验工作，并对各项测试数据进行对比和分析。由 4 台 DTS 装置在 10～100 ℃范围内的误差可以看出，总体上各装置的温度测量准确度均符合规范要求，平均误差均小于±1 ℃，如图 4 所示。同时校验结果说明了各台 DTS 在 10～100 ℃范围内各个温度段的测量结果均较为准确，能够满足 XLPE 电缆现场测温的应用要求。4 台 DTS 装置温度分辨率在 0.38～0.47 ℃范围内不等，满足规范要求，温度分辨率均小于 0.5 ℃，如图 5 所示。4 台 DTS 装置的温度测量重复性介于 0.15～0.7 ℃之间，如图 6 所示，说明各装置在重复测试条件下的温度测量准确度仍满足规范要求。

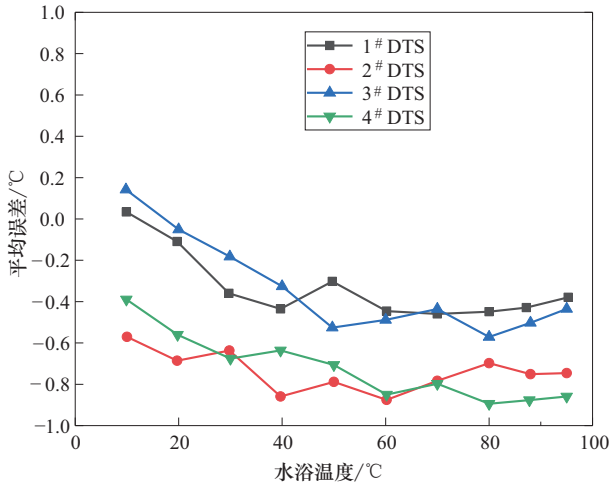

图 4　DTS 装置温度测量准确度对比

Fig. 4　Comparison of temperature measurement accuracy of DTS device

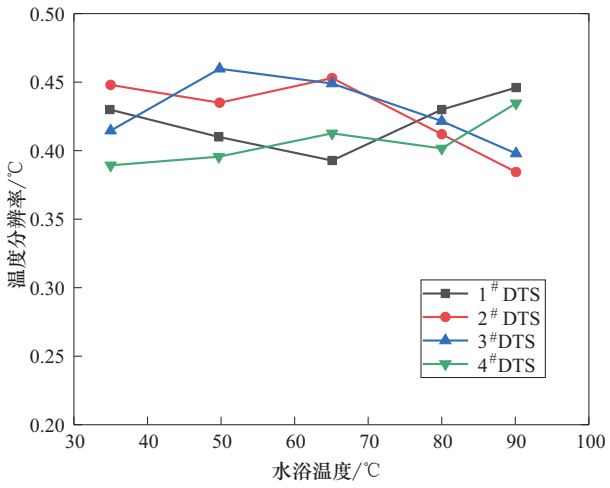

图 5　DTS 装置温度分辨率对比

Fig. 5　Temperature resolution comparison of DTS device

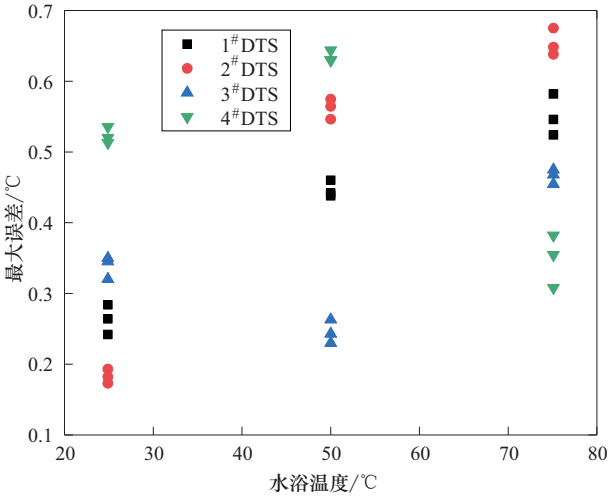

图 6　DTS 装置温度测量重复性对比

Fig. 6　Comparison of temperature measurement repeatability of DTS device

对各台 DTS 的校验结果进行横向对比，结果表明各台装置的校验数据虽满足规范要求，但不同仪器之间数据一致性较差。DTS 成套装置温度测量误差会受到系统标准温度、光纤传播衰减、光电转换噪声以及 A-D 转换准确度等多方面因素的影响[12]。由于温度解调过程中整条光纤上的温度分布状况是依靠参考温度 T_0 来确定的，因此参考光纤的选取和参考温度的准确度均会对温度标定效果产生影响，进而影响到 DTS 测温准确度。通常 DTS 内部会预留不少于 50 m 尾纤作为参考光纤，并采用实时环境温度作为参考温度 T_0，T_0 的微小误差会使温度解调产生较大波动，使系统产生温度漂移，影响 DTS 测温准确性[13]。一般在实验室校验中，环境温度较为恒定，系统温度漂移较小；现场应用中，为了减小环境温度变化造成的误差，可对 DTS 进行温度补偿，以降低其对环境温度的敏感度。

3.5　DTS 装置的现场校准

对于分布式光纤温度传感器，由于厂家、型号和批次等参数差异造成的影响，建议在投运前或定期进行现场校准，以确定其温度响应系数。常用的温度标定方法是通过提升硬件条件或改进算法[14-15]，利用恒温装置设定一定范围内的离散温度点，记录分布式光纤温度传感器与标准温度计等的对比关系，对各点标准温度和分布式传感光纤传感器测量数据进行数据拟合处理，获得温度响应系数，以此来提高 DTS 测温准确度。由于电缆正常运行时导体允许的长期最高温度为 90 ℃[16]，运行中电缆导体产生的热量经热路模型传递后，实际电缆外护套温度会较电缆导体温度更低[17]。因此建议现场 DTS 装置在常温和高温（60～70 ℃）两种温度水浴内通过数据拟合的方式进行校准和标定，提高 DTS 装置现场校准的可操作性。该现场校准方式已在辽宁电网五爱电缆隧道的高压电缆 DTS 系统进行现场试用，并取得较好的温度监测效果。

4　结束语

本文提出了一种高压电缆 DTS 装置性能评估方法。利用恒温水浴和智能校验平台设计了自动化校验装置，对辽宁电网内 DTS 装置开展性能评估试验。校验结果表明，DTS 装置性能均满足规范中提出的校验要求，建议在实验室内依照技术规范书对新购置 DTS 装置严格开展到货验收检验工作。不同装置间一致性较

差，因此需在使用前开展现场标定，建议在应用现场利用常温和高温两种水浴对测温光缆的温度响应系数进行标定和校准。下一步将针对环境温度影响导致的系统温漂开展研究。由于实验室校验过程需对恒温水浴设置多个温度循环，下一步还将考虑利用地热水资源改进检测系统，以节省相关检测成本。EA

参 考 文 献

[1] 柴玉华，巩彦江，杨刚，等．基于接地电流高压电缆交叉互联故障分析［J］．电测与仪表，2016，53（1）：96-100，116.

[2] 刘哲，苏菲，王兴振，等．基于分布式无线TEV传感器的电缆终端局部放电监测系统［J］．电测与仪表，2019，56（17）：102-108.

[3] 孙茂一，杨林，周志通，等．基于SLLE的电缆附件局部放电模式识别［J］．电测与仪表，2018，56（22）：25-30，102.

[4] 徐伟强，魏云冰，路光辉．电力电缆及隧道在线监测与移动巡检协同策略探讨［J］．电测与仪表，2019，56（19）：121-125.

[5] 刘毅刚，罗俊华．电缆导体温度实时计算的数学方法［J］．高电压技术，2005（5）：52-54.

[6] 赵建华，袁宏永，范维澄，等．基于表面温度场的电缆线芯温度在线诊断研究［J］．中国电机工程学报，1999（11）：53-55，69.

[7] 彭超，赵健康，苗付贵．分布式光纤测温技术在线监测电缆温度［J］．高电压技术，2006（8）：48-50.

[8] 张振鹏，赵健康，饶文彬，等．电缆分布式光纤测温系统测量结果符合性的比对试验［J］．高电压技术，2012，38（6）：1362-1367.

[9] 杨耿杰，苏爱国，郭谋发，等．应用GPRS及光纤测温技术的电力电缆监测系统［J］．电力系统及其自动化学报，2009（4）：104-109.

[10] 罗俊华，周作春，李华春，等．电力电缆线路运行温度在线检测技术应用研究［J］．高电压技术，2007（1）：169-172.

[11] 电力电缆分布式光纤测温系统技术规范：DL/T 1573—2016［S］.

[12] 董林翰．分布式光纤测温系统及其温漂研究［D］．北京：中国计量大学，2017.

[13] 宁枫．分布式光纤拉曼测温系统空间分辨率即稳定性研究［D］．重庆：重庆大学，2012.

[14] 张利勋，欧中华，刘永智，等．分布式光纤喇曼温度传感器的循环解调法［J］．光子学报，2005（8）：1176-1178.

[15] 吕安强，李永倩，李静，等．分布式传感光纤应变和温度同时标定方法［J］．光子学报，2014，43（12）：110-114.

[16] 额定电压220 kV（U_m=252 kV）交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件第2部分：电缆：GB/T 18890.2—2015［S］.

[17] 刘刚，王鹏宇，周凡，等．电力电缆暂态热路模型中绝缘层的优化［J］．高电压技术，2018，44（5）：1549-1556.

作者简介

刘佳鑫

刘佳鑫（1985—），男，博士，高级工程师，主要从事输变电设备状态检测与评价技术研究工作。

（收稿日期：2020-03-16）