

基于偏振分集技术的分布式光纤声波传感系统

孙廷玺¹,徐龙海²,王升¹,谢峰²,黄毓华¹

(1.广东电网有限责任公司珠海供电局,广东 珠海 519000;2.无锡联河光子技术有限公司,江苏 无锡 214000)

摘要:分布式光纤声波传感(DAS)系统中的单模光纤存在双折射现象,导致光纤输出的光偏振态发生变化,与参考光偏振状态不匹配从而产生偏振衰落现象。设计了一套基于偏振分集技术的DAS系统,将瑞利散射光分别与2种状态的偏振参考光相干后进行光/电转换和数据采集,消除了偏振衰落现象的产生,从而减少DAS系统的漏、误报率,大幅提升了系统的实用性。实验结果表明:在DAS系统中,采用偏振分集技术可以完全消除光纤沿线由于偏振衰落造成的系统误判,提高DAS系统报警准确度。

关键词:偏振衰落;光纤传感;瑞利散射;衰落噪声;振动检测

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)08-0005-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.08.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Distributed optical fiber acoustic sensing system based on polarization diversity technology

SUN Tingxi¹, XU Longhai², WANG Sheng¹, XIE Feng², HUANG Yuhua¹

(1. Zhuhai Power Supply Bureau, China Southern Power Grid, Zhuhai Guangdong 519000, China;

2. Allian Stream Photonics Technology Co. Ltd., Wuxi Jiangsu 214000, China)

Abstract: In distributed optical fiber acoustic sensing (DAS) system, the birefringence of single-mode optical fibers results in the polarization state change of the output light in the optical fibers, which is not matched with the polarization state of the reference light, resulting in the polarization fading phenomenon. This paper designs a DAS system based on polarization diversity technology. The Rayleigh scattering light interferes with the reference light in two polarization states, and then photo-electric conversion and data acquisition are carried out. The polarization fading phenomenon is removed, and therefore the false alarm rate of DAS system is reduced, which makes the system much practicable for real applications. Experiment results show that in DAS system, the polarization diversity technology can eliminate the system misjudgment caused by polarization fading phenomena along the fiber, and can improve the alarm accuracy of the DAS system.

Key words: polarization fading; optical fiber sensing; Rayleigh scattering; fading noise; vibration detection

0 引言

分布式光纤声波传感(DAS)技术是一种利用光纤后向瑞利散射干涉效应实现声波信号连续分布式探测的新型传感技术^[1-2]。作为光纤测量和光纤传感的核

心技术,DAS利用相干瑞利散射光的相位而非光强来检测声波频率范围内的振动信号,其特点是利用相位幅值大小可以线性测量振动信号强度信息,从而可以定量分析光纤所受振动强度大小。

DAS系统中,由于光纤中输出光的偏振态与参考光偏振状态不匹配,导致产生偏振衰落现象。偏振衰落现象具体表现为信号光和参考光的拍频信号幅度随机涨落,严重影响了系统的漏、误报率。目前,解决偏振衰落的方法主要有保偏光纤消偏振法^[3]、法拉第旋镜法^[4]、输入偏振态控制法^[5]和高速偏振调制法^[6]等。其中,保偏光纤消偏振法要求必须使用保偏光纤,导致系统价格昂贵,不适合用于长距离测量;法拉第旋

收稿日期:2020-04-21。

基金项目:广东电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20172837、030400KK52170062)资助。

作者简介:孙廷玺(1962—),男,山西临猗人,工学硕士,高级工程师,电力行业电力电缆技术标准委员会委员,CIGRE中国委员会B1委员会委员。主要研究方向是输电运行管理及输变电设备检测试验,所负责的项目曾获中国南方电网科技进步一等奖1项、中国电力科技创新一等奖1项。



镜法可以彻底解决偏振衰落问题,但它只适用于 Michelson 干涉仪中,使用范围有限;输入偏振态控制法通过调节输入偏振态实现光纤的抗偏振衰落,但是在光反射仪测量时,它无法实现所有通道的抗偏振衰落;高速偏振调制法虽然可以在输入端实现抗偏振衰落,但是无法消除传输光纤偏振扰动带来的相位噪声^[7-14]。基于此,本文采用偏振分集技术来消除偏振衰落现象,从而降低 DAS 系统漏、误报,提升系统实用性。

1 DAS 系统实现与理论分析

1.1 DAS 原理

本文设计的基于偏振分集技术的 DAS 系统原理图如图 1 所示。窄线宽激光器作为光源,它的输出功率为 40 mW,线宽为 100 Hz。发射出的连续光经过 1×2 耦合器后分别通过 2 条支路:一路光作为探测光经过声光调制器(AOM),AOM 将连续光调制成脉冲光并产生 80 MHz 频移。脉冲光经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大后由环形器耦合进入待测光纤。另一路光作为参考光,其有待测量光纤返回到环形器的瑞利散射光在偏振分集模块中分成 2 路 P 光和 2 路 S 光(P、S 是光的 2 个偏振态)。其中,P 光与 P 光相干、S 光与 S 光相干后分别输入到光/电转换模块。光/电转换模块将其拍频信号转成电信号并传输给平衡探测器,然后经数据采集卡采集,再传输到计算机处理。

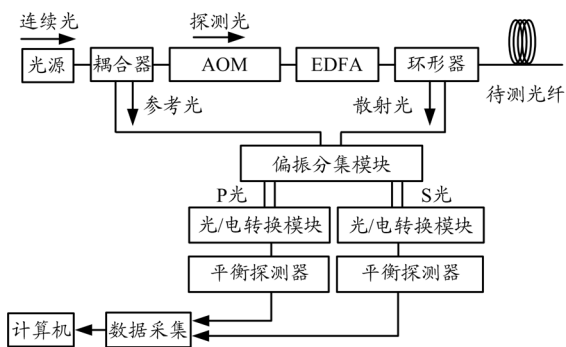


图 1 基于偏振分集技术的 DAS 系统原理图

偏振分集模块由空间光学器件构成,主要器件包括 2 个反射镜、一个 45°起偏器以及一个偏振分束器(PBS)。如果待测光纤稳定,反射回来的瑞利散射信号统计特征是固定不变的,所以散射回来的瑞利信号是不变的。一旦待测光纤有外界振动,振动会引起光纤长度变化或者折射率变化,最终表现在瑞利散射曲线上是振动点位置的相位信号发生变化。如果可以线性还原光纤中的相位变化量,就能准确测得振动强度。

在未使用偏振分集模块前,如果瑞利散射信号与参考光的偏振状态不匹配,在某些位置上的信号强度会接近于 0,信号淹没在噪声中,导致系统出现漏、误报,影响系统性能。本文使用了偏振分集模块后,瑞利散射信号分成了 S 光和 P 光分别与参考光的 S 光和 P 光相干涉,在光纤的某些位置上,当 S 路相干光接收到的强度接近于 0 时,其 P 路相干光接收到的强度会变大,反之亦然。通过算法可将同一位置点解调出来的 P 光和 S 光信号联合处理,选取强度较大的信号,实现抗偏振衰落,从而解决 DAS 系统的漏、误报问题。

1.2 基于偏振分集技术的 DAS 系统理论分析过程

光/电转换模块中任意一路输出的电流信号可以表示为:

$$I(t)=E_0R(t)\cos[2\pi f_0t+\theta_{in}(t)+\theta(t_0)-\theta(t)] \quad (1)$$

其中, E_0 表示激光器出射光的场强, t_0 表示初始时间, $R(t)$ 表示光纤的瑞利散射系数, f_0 为拍频频率, $\theta(t)$ 为激光器输出的激光相位信号, $\theta_{in}(t)$ 表示外界信号振动导致的被测光纤相位改变量, $\theta(t_0)-\theta(t)$ 表示激光器的相位噪声。随着探测光纤的长度增加, $\theta(t_0)-\theta(t)$ 的值会不断增大,干扰到瑞利散射光的相位信号,其表现形式是系统的相位噪声随着光纤长度增加而增加,最终淹没瑞利散射光的相位信息,所以系统需要选用窄线宽激光器以降低这一部分的相位噪声。

对式(1)进行希尔伯特变换后,拍频信号会加上 90°的相移,可以表示为:

$$H(t)=E_0R(t)\sin[2\pi f_0t+\theta_{in}(t)+\theta(t_0)-\theta(t)] \quad (2)$$

根据式(1)和式(2),可以求得相位信号 $\varphi(t)$ 和幅度信号 $A(t)$ 分别如下:

$$\begin{cases} \varphi(t)=\arctan(H(t)/I(t)) \\ A(t)=\sqrt{H(t)^2+I(t)^2} \end{cases} \quad (3)$$

另外,平衡探测器噪声也会对相位的提取产生影响,对相位提取的信号可以表示为:

$$S(t)=A(t)\cos(2\pi f_0t+\varphi)+N(t) \quad (4)$$

其中, φ 表示提取出来的相位, $N(t)$ 表示平衡探测器的电噪声。

经过相位提取后,可以计算待测光纤上任意 2 个采样点时间(t_1, t_2)之间的相位信号差分值为:

$$\Delta\varphi(t_1, t_2)=\theta_{in}(t_1)-\theta_{in}(t_2)-[\theta(t_1)-\theta(t_2)] \quad (5)$$

激光器相位噪声正相关于时间差 t_0-t (t 为 t_1 或 t_2),即两点探测距离。如果时间差减小到一定值以下,则相位噪声可以被抑制到一定范围内,其提取到的相位信号可以得到较好的信噪比。因此,采用高速率数据采集卡可以使两点之间时差减小,从而得到较高信

噪比,但与此同时数据处理量也会成倍提高,影响系统实时性。

根据系统中脉冲宽度大小以及数据采集卡的采样速率,本文将若干个采样点相位做累加。例如,数据采集卡采样率是 250 MS/s,系统脉冲宽度是 100 ns(定位精度 10 m),则将 25 个采样点(采样一个点时间为 4 ns,对应脉冲宽度 100 ns 需要 25 个采样点时间 $t_1 \sim t_{25}$)为一组求相位和,表达式为:

$$\begin{cases} \varphi(t^1) = \varphi(t_1) + \varphi(t_2) + \varphi(t_3) + \dots + \varphi(t_{25}) \\ \varphi(t^n) = \varphi(t_{n+1}) + \varphi(t_{n+2}) + \varphi(t_{n+3}) + \dots + \varphi(t_{n+25}) \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\varphi(t_1), \varphi(t_2), \varphi(t_3), \dots, \varphi(t_{25})$ 表示 25 次采样的相位, $\varphi(t^n)$ 表示第 n 组采样后 25 次采样点的相位和。

由于采用偏振分集接收, P 光和 S 光 2 路光获得类似相位信息,本文在相位和上加入 P 和 S 的下标以示区别,最终相位信号 $\varphi_{P,S}(t^n)$ 为 2 个光信号(P 光、S 光)相位相加:

$$\varphi_{P,S}(t^n) = \varphi_P(t^n) + \varphi_S(t^n) \quad (7)$$

相邻两组数据间的相位差表示其相位变化量大小的表达式为:

$$\Delta\varphi_{P,S}(t^n) = \varphi_{P,S}(t^n) - \varphi_{P,S}(t^{n-1}) \quad (8)$$

数据采集卡触发一次采集一组数据,多次采集得到多组数据。求每组数据中相邻两组间的相位差后得到一个二维矩阵 R_{MN} (M 是数据采集卡采样组数, N 是数据采集卡采样一次后通过上述运算得到的相位差的数量),将矩阵转置为 R_{NM} 矩阵,求其相位标准差就能获得最终振动信号。

2 结果和分析

为了验证偏振分集后的效果,本文使用模态激振器、功率放大器和信号发生器进行实验,实验环境搭建如图 2 所示。将一段光纤用扎带固定在模态激振器上,信号发生器为模态激振器提供正弦波振动信号,

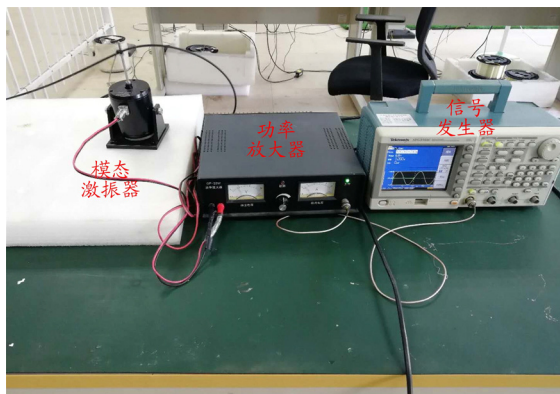
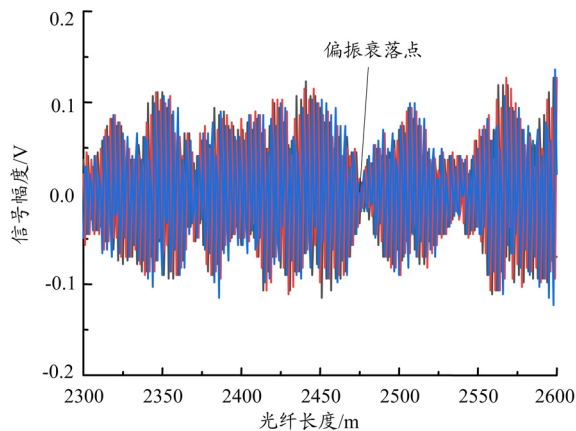


图 2 实验环境图

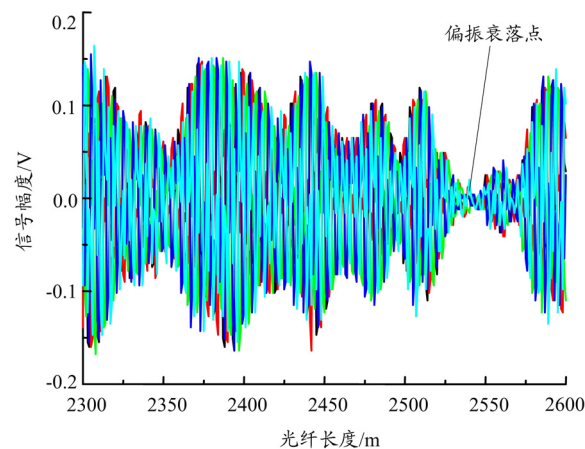
其输出频率即为模态激振器的振动频率,信号幅度即为模态激振器的振动强度。

图 3(a)和图 3(b)分别是同一时间下采集的多组 P 光和 S 光原始波形图(图中多种颜色曲线表示多组波形)。可以看出,瑞利散射光和参考光相干后,信号幅值在同一偏振状态下,基本呈现出相似的空间变化,但不同偏振状态下曲线相差较大。另外,从图 3 中可以看到明显的偏振衰落现象,并且不同偏振状态下发生偏振衰落的位置不一致。图 3(a)中,2475 m 处偏振衰落很明显,幅度接近于 0,但在 2540 m 处则没有发生偏振衰落;图 3(b)中,2475 m 处没有发生偏振衰落,信号幅值较大,但在 2540 m 处偏振衰落很明显。

本文通过 2 路信号联合处理,选取强度较大的信号可以极大降低偏振衰落的机率,减少系统的漏、误报现象。图 4 是系统在外界扰动状态下数据处理后得到的相位变化标准差图。图 4(a)和图 4(b)中由于信号强度较低,相位变化标准差经处理后会有一些尖峰,



(a) P 光



(b) S 光

图 3 原始信号波形图

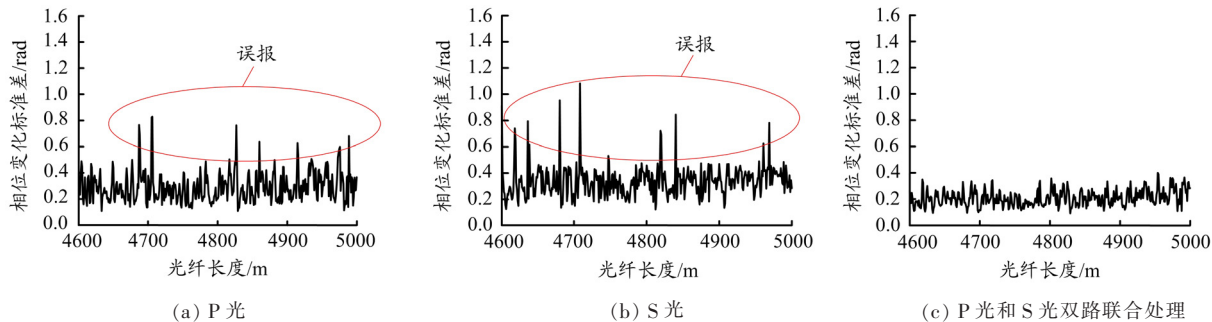


图4 相位变化标准差图

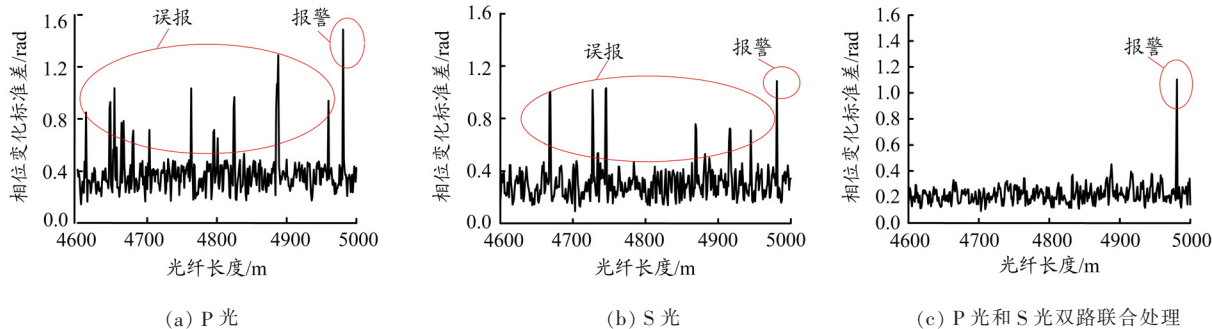


图5 振动信号图

导致误报警;图4(c)的相位噪声水平明显小于图4(a)和图4(b),而且信号变化平稳,没有出现如图4(a)和图4(b)中的尖峰,因此可以避免产生误报信号。

本文用模态激振器对探测光纤4985 m处施以40 Hz的正弦振动信号,对采集到的P光和S光原始波形进行相位提取和求取相位变化标准差后得到的波形如图5所示。从图5(a)和图5(b)可以看出,模态激振器振动使其解调出的相位标准差在4985 m处有很大的波峰信号,但同时在探测光纤的其它位置也出现了较大波峰信号,一旦超过选取阈值,系统就会出现误报;而图5(c)是对P光和S光原始波形进行相位提取和双路相位合并处理后得到的相位标准差波形。由于采用了偏振分集技术,使得P光和S光同时发生偏振衰落的机率大大减少,只有在真正的振动位置4985 m处才出现较大波峰,完全消除了光纤沿线由于偏振衰落造成的系统误判。

按照以上原理制作的样机实物图如图6所示。整个系统分成光路部分和电路部分,上面2U蓝色机箱为光路部分,下面4U机箱为电路部分。光路部分包括光源、AOM、EDFA、偏振分集和光/电转换模块等光学模块。其中,光/电转换模块将光信号转换成电信号,然后传输到电路部分,再进行数据采集处理。整个样机完全消除了光纤沿线由偏振衰落造成的系统误判。



图6 样机实物图

3 结束语

DAS系统中,由于瑞利散射光和参考光干涉时本振光与瑞利散射光偏振状态不匹配,导致相干波形幅值发生起伏变化,其发生偏振衰落的位置就是波形幅值较低的位置。本文采用偏振分集技术,将瑞利散射光和参考光分成2种偏振状态分别干涉,避免2路相干波形在探测光纤同一位置发生偏振衰落。将采集到的P光和S光解调出相位后合并求取相位标准差,最终解决了偏振衰落对系统造成的影响。实际测试证明了该方法可以有效降低偏振衰落造成的系统漏、误报,

大幅提升 DAS 系统相位解调的准确性。此外,本方法较为简单,且具有成本优势,因此有望应用于实际 DAS 系统中以减少漏、误报率,对 DAS 系统在海底电缆状态监测方面的推广应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] 蔡海文,叶青,王照勇,等. 分布式光纤声波传感技术研究进展[J]. 应用科学学报, 2018(36): 41-58.
- [2] FAN Xinyu, LIU Qingwen, DU Jiangbing. Prototype development of phase-sensitive coherent optical time domain reflectometry for distributed vibration measurement [C]//Proc Asia Communications & Photonics Conference & Exhibition (ACP2014), November 11-14, 2014, Shanghai, China. Shanghai: OSA, 2014: AF11.6-1-AF11.6-3.
- [3] JUAREZ J C, MAIER E W, KYOO Nam C, et al. Distributed fiber-optic intrusion sensor system[J]. Journal Lightwave Technology, 2005, 23(6): 2081-2087.
- [4] PENG F, DUAN N, RAO Y, et al. Real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive OTDR [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2014, 26(20): 2055-2057.
- [5] PENG F, WU H, JIA X, et al. Ultra-long high-sensitivity phi-OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines [J]. Opt. Express, 2014, 22(11): 13804-13810.
- [6] MILLER D, PARKER T, KASHIKAR S, et al. Vertical seismic profiling using a fibre-optic cable as a distributed acoustic sensor[C]//74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC, June 4-7, 2012,

Copenhagen, Denmark. Copenhagen: SPE EUROPEC, 2012: 1-5.

- [7] MATEEVA A, LOPEZ J, POTTERS H, et al. Distributed acoustic sensing for reservoir monitoring with vertical seismic profiling [J]. Geophys. Prospect, 2014, 62(4): 679-692.
- [8] MASOUDI A, NEWSON T P. Analysis of distributed optical fibre acoustic sensors through numerical modelling [J]. Opt. Express, 2017, 25(25): 32021-32040.
- [9] LU Y, ZHU T, CHEN L, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-otdr [J]. Journal Lightwave Technology, 2010, 28(22): 3243-3249.
- [10] QIN Z, ZHU T, CHEN L, et al. High sensitivity distributed vibration sensor based on polarization-maintaining configurations of phase-OTDR[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2011, 23(15): 1091-1093.
- [11] QIN Z, CHEN L, BAO X. Wavelet denoising method for improving detection performance of distributed vibrationsensor [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2012, 24(7): 542-544.
- [12] PAN Z, YE Q, CAI H, et al. Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection [J]. SPIE-OSA-IEEE Asia Communications and Photon., 2011, 8311: 83110S-1-83110S-6.
- [13] YANG G, FAN X, WANG S, et al. Long-range distributed vibration sensing based on phase extraction from phase-sensitive otldr [J]. IEEE Photon., 2016, 8(3): 1-12.
- [14] DONG Y, CHEN Y, LIU E, et al. Quantitative measurement of dynamic nanostrain based on a phase-sensitive optical time domain reflectometer[J]. Appl. Opt., 2016, 55(28): 7810-7815.

2020 年第 20 届 IEEE 通信技术国际会议 (ICCT 2020)

2020 年 10 月 28~31 日 中国·南宁

本次会议由 IEEE, 广西大学, 北京邮电大学联合主办, 广西大学计算机与电子信息学院承办。

通信技术国际会议由中国通信学会与中国电子学会于 1986 年联合发起, 已经成功召开了 19 届, 会议关注通信技术的新技术及其应用, 为通信技术及相关研究领域的专家、学者交流最新研究成果、探讨学术发展方向提供一个广泛的交流平台。欢迎广大从事通信技术的新理论及其应用教学、科研人员和学生踊跃参加。大会网站: www.ieee-icct.org

征稿主题

★网络与无线通信★光通信★超大规模集成电路和系统设计★多媒体★网络信息安全★射频前端电路及系统★智能移动设备设计★微波/毫米波/太赫兹电路与系统★物联网和大数据★5G 通信与网络★绿色通信系统★电磁兼容天线设计★其他通讯相关课题。更多主题, 请访问: <http://www.ieee-icct.org/cfp.html>

投稿截止时间

2020 年 8 月 20 日

投稿方式

全文投稿(Easy Chair 投稿系统 - PDF 格式)

<https://easychair.org/conferences/?conf=icct2020>

摘要投稿: submission@ieee-icct.org

投稿说明

1. 投稿论文需满足会议格式要求, 格式请参照论文格式模板。
2. 投稿论文需为原创高水平学术论文, 并且无任何出版记录。
3. 英语为大会唯一官方语言, 大会仅接受英文投稿, 会议现场报告也需为英文。
4. 若文章有出版需求, 大会仅接受全文投稿。如果不需出版, 仅参会做报告, 可接受摘要投稿。

欢迎筹建 Special Sessions

Special session 提案提交: 2020 年 7 月 1 日

Special Session 投稿提交: 2020 年 8 月 20 日

详细信息请见: <http://www.ieee-icct.org/cfp-special.html>

联系方式

投稿

肖老师, 邮箱地址: submission@ieee-icct.org

注册, 邀请信, 问题以及建议

李老师, 邮箱地址: registration@ieee-icct.org

申请加入组委会

罗老师, 邮箱地址: committee@ieee-icct.org

查询文章录用状态请联系此邮箱