

·信号与信息处理·

光纤传感器振动信号特征提取研究

盛媛媛, 刘俊承, 金佳颖, 程鹏申, 胡 通

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206)

摘要: 由于环境干扰等问题造成振动光纤的漏报和误报是限制光纤应用推广的重要原因。如何提取能准确反映振动信号类型和强度的特征是降低系统误报率的关键。研究了基于马赫-泽德干涉原理的光纤传感器振动信号时域和频域的特征提取方法, 分析了常见振动源时频特征参数变化的规律, 并通过实验确定了常见振动源特征参数的阈值。实验表明, 通过对振动信号时频特征参数设定多重阈值可以准确识别振动信号的类型, 验证了文中特征参数提取方法的有效性和可靠性。

关键词: 马赫-泽德干涉仪; 特征提取; 时域特征; 频域特征

中图分类号: TP212.9

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-06-0045-06

Research on Vibration Signal Feature Extraction on Optical Fiber Sensor

SHENG Yuan-yuan, LIU Jun-cheng, JIN Jia-ying, CHENG Peng-shen, HU Tong

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, BeiJing 102206, China)

Abstract: The false alert caused by environmental disturbances is the main reason for application limitation of vibration optical fiber. One of the key issues to reduce the rate of false alert is how to extract features sensitive to the type and amplitude of vibrations. The feature extraction method of vibration signals of an optical fiber sensor on time-domain and frequency-domain based on the Mach-Zehnder interferometric principle is researched. The variation rules of common vibration source time frequency feature parameters are analyzed, and the thresholds of features of common vibration source are determined through experiments. The experiments show that the types of vibration signals are identified correctly through setting multiple thresholds for time domain and frequency domain of the vibration signals, and the effectiveness and reliability of the proposed method for extracting the feature parameters are validated.

Key words: Mach-Zehnder interferometer (MZI); feature extraction; time-domain feature; frequency-domain feature

光纤振动传感器由于其良好的抗电磁干扰和电绝缘性以及传感器无源等优点, 成为了安防系统研究的热点, 并且被广泛应用于检测和保护机场、军事基地、监狱等方面。然而自然界中存在着各种各样的环境干扰, 如大风、下雨、打雷等, 由于这些环境干扰同样会使光纤传感器振动并产生电信号, 造成不必要的误报现象。如何获取振动信号的类

型、振动信号的强度以及区分振动信号中人为干扰和环境干扰并降低系统误报率成为当下研究的一个难点。解决这个难点的关键环节是提取能有效反应振动信号性质、强度等特性的属性特征。如文献[3]采用小波变换方法将光纤信号在不同尺度上展开, 提取信号在不同频段变化特征, 然而工程现场环境复杂, 难以确定最合适的小波基, 且小波分

收稿日期: 2015-10-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金(2014ms24)

作者简介: 盛媛媛(1989-), 女, 河北保定人, 硕士, 主要从事光纤传感方面研究; 导师简介: 刘俊承(1977-), 男, 四川乐山人, 讲师, 主要从事监测技术及模式识别方面的研究。

解的最佳分解层数也难以确定;文献[5]采用短时傅里叶变换运算方法提取光纤信号短时间内能量最高频率为属性特征,虽然有一定抗干扰能力,然而由于傅里叶变换受测不准原理限制,对于突变信号的频率提取效果并不好。同时,由于实际应用中光纤振动信号处理一般在嵌入式系统中运行,复杂度太高的算法难以满足嵌入式系统计算实时性的要求。

针对上述问题,对振动光纤信号进行时域和频域分析,提出基于时域和频域特征参数提取的方法,并分析各个参数在不同振动信号下的变化特征,为振动源的识别提供分析依据。最后利用文中介绍的特征参数对不同振动干扰条件下的光纤数据进行实验分析与识别,实验结果表明,这些时频特征能有效的识别信号的干扰类型。

1 马赫-泽德干涉仪构成和工作原理

1.1 马赫-泽德干涉仪的构成

文中振动光纤采用马赫-泽德干涉仪结构。其结构主要由激光器、耦合器C1、耦合器C2、信号臂、参考臂、探测器组成。如图1为马赫-泽德干涉仪结构图。

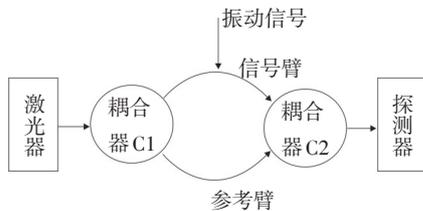


图1 马赫-泽德干涉仪结构图

1.2 马赫-泽德干涉仪的工作原理

马赫-泽德的工作原理为:从激光器发出的直流相干光进入光纤耦合器C1后,等功率分为1:1的两路光束,一束通过信号臂到达耦合器C2,一束通过参考臂到达耦合器C2,两束光在耦合器C2处重新进行干涉混合,然后由光电探测器接收混合后光信号的光强变化。然而,当光纤信号臂受到外界的压力或振动时,会引起光纤信号臂的几何长度和折射率等参数发生变化,从而导致信号臂中传输光波的相位发生变化。因为参考臂中的传输光波相位并不发生变化,所以信号臂和参考臂内传输的两束

光之间产生了相位差,在耦合器C2处汇合时会发生干涉,干涉光强的变化由探测器接收并转化为电信号。

2 光纤振动信号的特征提取

2.1 光纤振动信号的时域分析

时域分析是指直接在时间域中对系统信号的幅度、周期、相位等基本参数进行分析,具有直观和准确的优点。一般情况下,系统在未受到干扰时,由于只受到噪声影响,信号长时间处于一种平稳的状态。当产生入侵事件时,信号的振幅会发生较大的跳变,然而弱扰动信号介于噪声与入侵信号之间,同样具有幅度跳变,但强度较弱。如图2所示为光纤在无干扰、风吹、晃动下信号的振幅变化。

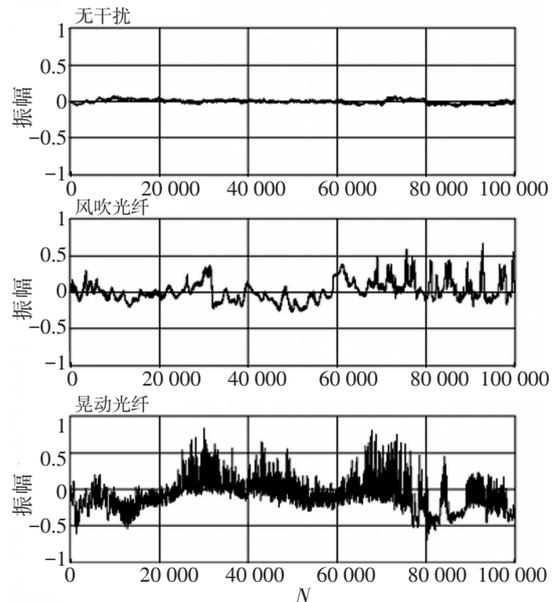


图2 不同振动下信号振幅变化

从图2可以看出,不同振动源对光纤信号幅值变化的影响是不一致的。一般情况下,振动干扰引起信号变化的幅度要远大于噪声干扰引起信号变化的幅度。因此,理论上可以通过在时域内设定幅度阈值的方法来确定信号是否受到扰动。然而环境干扰有时也会使系统振幅发生大幅度跳跃,造成系统误报,而信号的能量变化可以很好的避免这一影响。

(1) 信号均方根值

信号均方根值可以很好地反映振动信号能量

变化的大小,可以在一定程度上反应振动幅度的大小。许多振动光纤都将该特征作为有无振动的主要判断依据。均方根计算公式为

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} \quad (1)$$

其中, x_{rms} 表示信号均方根; n 是输入序列 X 中的元素个数。

图3给出了系统信号在无干扰、风吹光纤、晃动光纤的情况下,光纤信号的均方根值随时间变化的典型波形图。

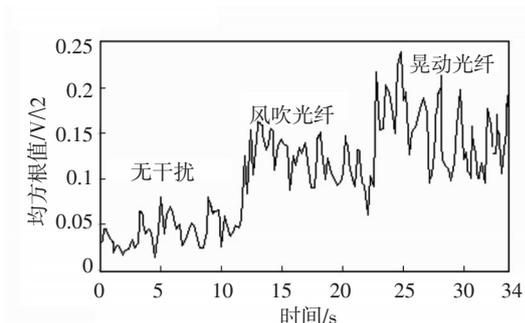


图3 均方根图

如图3所知,均方根值可以准确显示系统受到外界振动信号的干扰情况。当系统在未受到外界振动干扰时,信号均方根值较低,基本上都是噪声信号产生能量;当系统受到风吹、晃动等连续干扰信号时,信号均方根值也发生连续变化,且变化幅度与所受外界干扰信号的振动剧烈程度成正比。

由于均方根只能反映信号变化的能量大小,无法反映振动信号的类型,同时,如果信号有干扰,也会造成均方根的剧烈变化,极易造成误报。文中选择利用波动系数来描述振动信号的时域变化特性。

(2)波动系数

如图2所知,信号振幅变化的剧烈程度与所受干扰振动强度成正比。由图2可以看出,风吹和晃动光纤均引起信号振幅的变化,然而单位时间内晃动光纤引起的波动次数明显多于风吹造成的光纤信号波动次数。有些文献利用过零率来描述信号的变化特性,但是过零率对噪声信号极为敏感,易引起误报。

文中以波动系数作为识别系统振动类型的特征参数。波动系数定义为单位时间内信号中同一上升/下降趋势中幅度差值大于一定阈值的个数。波动系数公式为

$$\beta = \sum Num \{ |A_1 - A_2| > A \} \quad (2)$$

其中, β 表示波动系数; A_1 、 A_2 表示波形同一上升/下降趋势的幅值; A 表示固定值,一般可取波形1/2峰峰值。图4给出了固定值在0.2时,无干扰、风吹光纤、晃动光纤下信号的波动系数图。

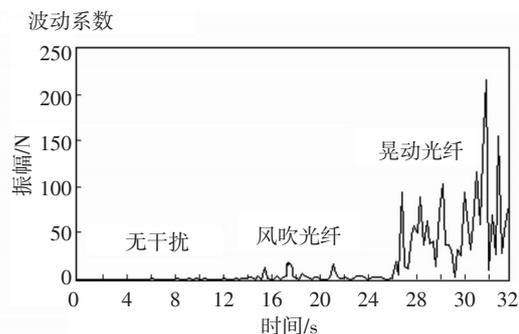


图4 波动系数图

由于对信号变化的幅度设定了相应的阈值,可以很好地滤除干扰信号。由图4可明显看出,系统在无干扰时,波动系数基本上为0;当系统受到干扰时,随着干扰振动强度增加,系统波形系数有明显变化。根据波动系数可以大概确定振动信号是缓慢变化还是剧烈变化,从而一定程度上确定振动的类型。

时域特征仅从波形上分析了信号的特征,有时很难直接判断振动信号的类型。频域分析对干扰光纤信号的振动源更为敏感,通过频域分析,信号在时域内隐藏的现象和特征可以在频域内显现出来。

2.2 光纤振动信号的频域分析

由于振动信号自身频谱成分和介质传导吸收不同,所以系统在不同干扰信号的作用下信号的频率分布也不同。通过对不同类型的干扰信号进行频谱分析可以看出,一般情况,光纤信号频谱上主要为低频分量,这是由于光纤一般只受到噪声信号的干扰,噪声信号干扰为非光芯干扰,且频率主要集中在高频段,高频信号在传导过程中被包在光芯外面厚厚的外包层严重吸收,所以反应在信号频谱上主要为低频分量,高频分量较少;当光纤受到振动干扰时,随着振动信号强烈程度的增加,信号频域上的中频和低频分量也随之增加,这是因为强烈振动触动了光芯发生振动,光芯振动时频谱丰富,

且高频分量较多。

(1) 高频能量系数

某些情况下,弱扰动信号也可能触发光芯振动,其产生的频率分布与人为干扰产生的频率分布的区别并不明显,很容易造成误报。而功率谱可以在数据频域内提取被淹没在噪声中的有用信号,使其更加突出明显。当系统受到振动干扰时,振动干扰对系统信号在各频率上的能量影响十分明显。一般来讲,当没有振动发生的时候,光纤信号能量主要集中在低频,振动信号的能量主要集中在高频。信号的功率谱描述了信号能量在各个频率上的分布大小,是从能量的角度对信号进行研究。所以,文中以信号的功率谱高频能量系数作为识别干扰信号的依据。高频能量系数反映了振动信号在高频段的能量大小,公式如下

$$S_{xx} = \sum_{f_{\min}}^{f_{\max}} \frac{|X(f)|^2}{n^2}, f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \quad (3)$$

其中, S_{xx} 为高频能量系数; $X(f)$ 是输入序列 $X(t)$ 的傅里叶变换; n 输入序列的采样数; f_{\min} 是选取的频率段的起始频率; f_{\max} 是选取的频率段的截止频率。

图5为光纤振动信号在无干扰、风吹、晃动情况下,频率在300~25 000 Hz内的高频能量系数图。

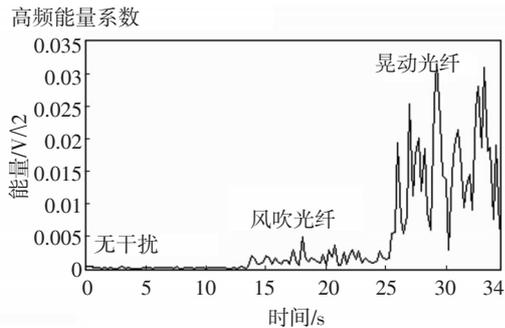


图5 高频能量系数图

当系统没有受到外界干扰时,由于只存在噪声信号,所以信号能量非常低;当光纤受到振动干扰时,由于干扰信号较噪声信号有更为丰富的高频分量,所以系统信号高频能量增加,随着振动信号的强烈程度不同,信号高频的能量系数变化也不尽相同。当受到风吹等较弱的振动干扰时,信号高频能量和变化幅度较小;当光纤受到强烈的振动信号时,信号高频能量有较大幅度变化且变化范围较广。通过选取不同的 f_{\min} , f_{\max} ,并根据不同高频能量系数可以较好的区分不同的振动信号类型。

(2) 截止频率

由以上分析可知,光纤在不同振动干扰情况下,信号能量在高频段变化范围有明显不同,晃动光纤时信号功率趋于平稳的频率明显高于无干扰和风吹光纤时功率趋于平稳的频率。为了更精确表示振动信号频率范围,选择截止频率作为另一个频域特征。截止频率描述了功率谱中信号趋于稳定时的频率值。截止频率公式为

$$\lim_{f \rightarrow f_p} S_{xx}(f_p) - S_{xx}(f) = 0 \quad (4)$$

其中, S_{xx} 表示输出序列的功率; f_p 是趋于功率平稳值的截止频率; $S_{xx}(f)$ 是选定的功率平稳值参数。作为判别信号是否受到干扰的属性特征,经过大量实验分析,确定功率平稳值 $S_{xx}(f)$ 为干扰时功率平均值的1/100。图6为功率平稳值设定为0.000 1时,信号在无干扰、风吹、晃动光纤下的截止频率图。

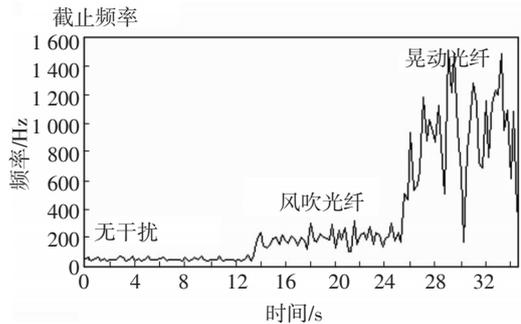


图6 截止频率图

(3) 持续时间

常见振源其干扰持续时间通常不同,如风吹、下雨、晃动光纤等产生的振动信号均具有一定的持续时间,一般情况下,风吹、下雨等自然干扰持续时间与晃动、触摸光纤持续时间也不尽相同,自然干扰持续时间相对较长;敲击光纤、滴水等脉冲式振源不具有长时间特性,信号持续时间较短。当振动信号的时频特征参数接近时,信号持续时间可以很好地区分不同类型的振动信号。例如脉冲干扰信号的时频特征和敲击光纤产生的振动信号在较短的采样时间内,前文所述的时频特征参数很接近,难以直接利用设定阈值的方法区分。所以文中以振源持续时间作为识别干扰信号特征参数。信号持续时间公式为

$$T = T_d - T_0 \quad (5)$$

其中, T_0 表示振动信号满足设定阈值范围开始时间; T_d 表示振动信号偏离设定阈值范围的结束时间; T

表示信号持续时间。

3 实验与结果分析

由于采用特征提取方法计算简单,非常适合于嵌入式系统。基于前文介绍的特征方法,开发了基于TI DSP的嵌入式光纤振动检测系统。根据马赫-泽德干涉原理搭建了直线型分布式光纤传感系统,系统主要有马赫-泽德干涉型光纤传感结构、数据采集、数据处理、振动报警等几部分组成,其中光纤传感结构如图1所示。该系统探测器输出为电压信号,调理后变化范围为0~1 V,DSP数据采集为12位A/D精度,采样频率为400 kHz采样,采样长度为100 K。本系统在无干扰、风吹光纤、晃动光纤等条件下进行试验,实时记录和处理实验数据,经过多次的实验数据处理,最终总结光纤在不同干扰下特征值的变化,如表1。

表1 特征值变化

特征值	信号		
	无干扰	风吹光纤	晃动光纤
x_{rms}/V^2	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.25
β/N	0	0~50	50~250
S_{xx}/V^2	0	0~0.005	0.005~0.035
f_p/Hz	0~100	100~300	300~1 600
T/ms	-	>100	>30

由表1可以看出,不同原因引起的振动干扰在均方根值、波动系数、高频能量系数、截止频率、持续时间上存在较大差异,可以作为识别干扰类型的依据。

(1)人为入侵具有明显的时域特征,其典型特征是能量高、振幅波动幅度大,波动系数最大可达230个,均方根值达0.25 V²,频域上高频能量系数可至0.035 V²,截止频率最高为1 600 Hz,然而晃动光纤和敲击光纤在持续时间上有明显不同,敲击光纤属于脉冲式干扰持续时间较短,一般只有5 ms,而晃动光纤持续时间较长。

(2)风吹、下雨等环境干扰均有振幅和能量变化,且其产生的振动信号均方根较小,在0.2 V²以内,波动系数最高在25以内,高频能量系数在0.005 V²,截止频率最大值300 Hz。然而下雨干扰为无数个脉冲干扰,虽然持续时间较长,但是是由无数个短时间

的脉冲信号组成,而风吹干扰则为持续不间断干扰。

(3)当系统未受到外界干扰时,通过设定合适的阈值,当系统只受到噪声信号干扰时,信号波动系数和高频能量系数基本上为0;均方根值在0~0.1;而截止频率在100 Hz以内。

通过对系统时域和频域上多个特征参数分析与研究,设定多重阈值门限来区分系统受到的干扰类型,从而进行报警信号的筛选。最终得到环境干扰和人为入侵的预警值,如表2。

表2 各特征参数的预警值

特征值	信号	
	环境干扰	人为入侵
x_{rms}/V^2	0.1	0.18
β/N	10	70
S_{xx}/V^2	0.001	0.005
f_p/Hz	100	400
T/ms	100	30

通过对时域和频域特征参数的阈值设定,可以有效区分晃动、敲击、风吹、下雨以及无干扰等不同的外界激励。

4 结论

在马赫-泽德干涉原理的基础上,搭建了分布式光纤振动传感器,并根据该结构选取了多个时频特征参数作为判断不同振动信号的主要依据。经过大量的实验和反复的观察,得到各时频特征参数对应于不同类型振动信号的变化规律。对不同的特征参数设定特定的阈值可以有效的分辨环境干扰和人为干扰的信号。基于文中提出的特征参数方法开发的嵌入式光纤入侵检测系统已在多个现场使用,在非极端天气情况下(非台风、冰雹等极端天气),误报率可以达到<1次/月。实验和现场应用情况验证了文中特征参数提取方法的有效性和可靠性。

参考文献

- [1] 李国相. 基于光纤振动安全预警系统的振源识别算法研究[D]. 北京:北方工业大学,2014.
- [2] 王思远, 姜淑琴, 梁生, 等. M-Z干涉仪型光纤分布式扰

- 动传感系统模式识别方法[J]. 红外与激光工程, 2014(8):2613-2618.
- [3] 朱程辉, 瞿永中, 王建平. 基于时频特征的光纤周界振动信号识别[J]. 光电工程, 2014(1):16-22.
- [4] 周正仙, 段绍辉, 田杰, 等. 分布式光纤振动传感器及振动信号模式识别技术研究[J]. 光学仪器, 2013(6):11-15.
- [5] 王思远. M-Z干涉仪型光纤分布式扰动传感系统模式识别方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [6] 孙琪真. 分布式光纤传感与信息处理技术的研究及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [7] 崔文华, 陈志斌. 分布式光纤温度监测与报警系统的研究[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(2): 175-178.
- [8] 刘辛, 吴薇, 秦正. 小波分析在恶劣环境光线传感中的应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 655-659.
- [9] 张嵩. 光纤周界安防系统的振动信号识别研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [10] 何毅. 分布式相位调制型光纤振动传感器信号处理技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [11] 王乾娟. 基于DSP的光纤传感振动信号处理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [12] 杜志泉, 倪锋, 肖发新. 光纤传感技术的发展与应用[J]. 光电技术应用, 2014, 29(6):7-12.
- [13] 王贺, 孙琪真, 李晓磊, 等. 干涉型分布式光纤振动传感技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013(2):30-41.
- [14] 李彩华, 滕云田, 李小军. 分布式光纤振动传感系统中数据采集及信号处理系统设计[J]. 地震工程与工程振动, 2012(1):161-167.
- [15] 王文刚. 马赫-曾德分布式光纤振动传感系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [16] 唐璜. 光纤振动传感技术在周界安防领域的应用方法研究[D]. 上海: 复旦大学, 2012.
- [17] 张森. 光纤马赫曾德干涉仪系统的理论与应用分析[J]. 光电技术应用, 2007, 22(6):15-19.
- [18] 张珊珊. 新型光纤M-Z干涉传感结构及特性研究[D]. 天津: 南开大学, 2014.
- [19] 张睿. 基于MZI的光纤周界防区系统的研究[D]. 武汉: 武汉邮电科学研究院, 2012.
- [20] 夏东明, 娄淑琴, 温晓栋, 等. 干涉型光纤传感器相位载波解调技术研究[J]. 光电技术应用, 2011, 26(5):47-50.
- [21] 王剑. 基于LabVIEW的数据采集及分析系统的开发[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2004.
- [22] 杨洁. 基于光纤振动安全预警系统的定位算法研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2014.
- [23] 陈怡. 光纤振动传感系统的实时信号处理[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [24] 李泉. 分布式光纤传感器的周界安防系统入侵信号识别[D]. 湖南: 湘潭大学, 2013.
- [25] 陈志伟, 谭中伟, 闫俊芳, 等. 光纤光栅传感系统的信号解调[J]. 光电技术应用, 2012, 27(2):47-52.
- [26] 许海燕. 分布式光纤振动传感器及其定位技术研究[D]. 上海: 复旦大学, 2011.
- [27] 周正仙, 肖石林, 仝芳轩. 基于M-Z干涉原理的定位式光纤振动传感器[J]. 光通信研究, 2009(5):67-70.

版权声明

本刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊,并加入中国光学期刊网,所刊载的文章在国内外数据库检索机构及网站(包括纸板、光盘版、网络版)报道时,不再征求作者意见。稿件刊登录用后作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给,并赠送当期样刊两份。