



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102997061 A

(43) 申请公布日 2013. 03. 27

(21) 申请号 201110271993. 2

(22) 申请日 2011. 09. 14

(71) 申请人 中国石油天然气集团公司

地址 100007 北京市东城区东直门北大街 9  
号中国石油大厦

申请人 中国石油天然气管道局

(72) 发明人 张金权 王小军 王飞 刘素杰  
崔海龙 任培奎 刘春平 黄现玲  
彭妍 赵敏琴

(74) 专利代理机构 北京市中实友知识产权代理  
有限责任公司 11013  
代理人 金杰 任清汉

(51) Int. Cl.

F17D 5/06 (2006. 01)

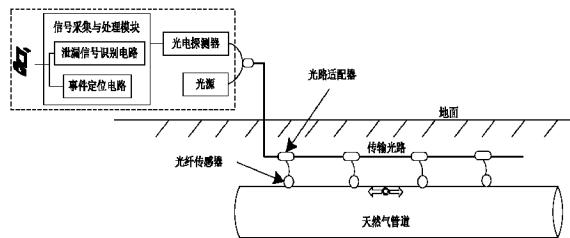
权利要求书 3 页 说明书 10 页 附图 6 页

(54) 发明名称

一种基于光纤传感的天然气管道泄漏监测系统

(57) 摘要

本发明是一种光纤传感天然气管道泄漏监测系统。它包括光路系统和电路两部分，在管道本体上每隔一定距离安装一个光纤传感器，相邻的多个光纤传感器构成一个光纤传感器组，各光纤传感器组共用一根发射光纤与光源连接，每个光纤传感器组使用一根回传光纤与光电探测器连接；光电探测器输出接包括泄漏信号识别和事件定位功能的信号采集与处理模块，信号采集与处理模块输出通过外部接口接微机。本发明灵敏度高、定位准确度高。



1. 一种基于光纤传感的天然气管道泄漏监测系统,其特征是它包括光路系统和电路两部分,在管道本体上每隔一定距离安装一个光纤传感器,相邻的多个光纤传感器构成一个光纤传感器组,各光纤传感器组共用一根发射光纤与光源连接,每个光纤传感器组使用一根回传光纤与光电探测器连接;光电探测器输出接包括泄漏信号识别和事件定位功能的信号采集与处理模块,信号采集与处理模块输出通过外部接口接微机;

由光源发出激光,经传输光路实现分束后传输到安装在管道壁上的光纤传感器组,光纤传感器组拾取沿管道传播的泄漏振动信号以及噪声后,再次经传输光路传回至系统的光电探测器,由信号采集与处理模块进行泄漏信号解调与识别分析,并对泄漏信号进行时延估计实现对泄漏点的定位。

2. 根据权利要求 1 所述的一种基于光纤传感的天然气管道泄漏监测系统,其特征是所述光路系统是基于频分复用原理,由光路适配器、传输光缆和光纤传感器三部分构成;光路适配器由光分束器和光合束器组成;光纤传感器采用马赫曾德干涉仪或迈克耳逊干涉仪;每个光纤传感器由两根光纤接一个光路适配器,所有光路适配器依次串接,由距接收端最近的光路适配器接系统主机。

3. 根据权利要求 2 所述的一种基于光纤传感的天然气管道泄漏监测系统,其特征是所述光路系统具体是激光器发出的探测激光输入传输光缆中的输入光纤进入传感器组后到达第一个光路适配器,由该光路适配器的光分束器分为两束激光:一束经输入光纤进入第一个光纤传感器,另一束光经延时光纤传到下一个光路适配器,再由下一个光路适配器中的光分束器分为两束激光,一束进入第二个光纤传感器,另一束再经传输光纤传输到下一个光路适配器,以此类推,直到激光到达最后一个光纤传感器;相邻的多个光纤传感器分为一组,组内各光纤传感器的干涉信号通过光合束器接入回传光纤,传回到系统接收端;在传感器组的最后一个光纤传感器,激光不再通过光路适配器,直接进入光纤传感器;而经过各光纤传感器后的光信号,通过各自相应的光路适配器中的光合束器,与后面传过来的光信号合束,最终经相对应的传感器组的回传光纤传至监测系统的光电转换模块;

所述光路适配器集合了光分束器和光合束器;发射光纤与回传光纤使用的是同一根传输光缆中的两根不同的纤芯;传输光缆将所有光路适配器串联起来;管道上相邻的两个传感器之间的发射光纤和回传光纤的长度均要大于激光器相干长度的 1/2,以防止传感器之间发生信号串扰。

4. 根据权利要求 1 所述的一种基于光纤传感的天然气管道泄漏监测系统,其特征是所述光源是一种包括适合复用和调制解调的专用光源系统,由光频可调的激光器和专用调制信号发生模块构成;激光器调制输入接调制信号发生模块中的 D/A 输出,调制信号发生模块有频率调节、幅度调节和锯齿波 / 倒锯齿波选择输入;通过编程选择如锯齿波或倒锯齿波调制信号类型,调整设置信号幅度和频率;调制信号作用在激光器,输出光频随调制信号波形同步变化的激光。

5. 根据权利要求 4 所述的一种基于光纤传感的天然气管道泄漏监测系统,其特征是所述专用调制信号发生模块主要由运算放大器 U7、DFB 激光器 U8、运算放大器 U9 和 2 个三极管 Q4、Q5 组;U7 的 7 端接 VDC,6 端接电阻 R18 后与二极管 D8、电容 C41 串联后与电容 C38 并联的电路再串联,6 端接电阻 R19 后接 VDC,同时再接二极管 D4、D5、D6、D7 的串联到地,4、7、8、9、10 端接地,3 端经电阻 R17 后接地,2 端与接 U8 的端;U8 的 1、14 端接地,12 端经电

容 C34 接地,5、11 端接 VDC,4 端接 PDne,6 端接 TEC+,3 端经扼流圈 L3 与电阻 R20 串联后接三极管 Q4 的集电极,同时 3 端经扼流圈 L3 与电阻 R21 串联后接三极管 Q5 的集电极;U9 的 1、2 端之间并联电阻 R22 和电容 C39 后由 1 端接电阻 R25 到 6 端,Pdne 接电阻 R30 再串联电阻 R27 接 U9 的 3 端,同时接 Pdne 的电阻 R30 与电位器阻 R31、电阻 R32、电容 C43 三者并联后串联接地,5 端经电阻 R24 接 VREF,7 端经电阻 R28 与 8 端经电阻 R26 共接电容 C45 到地;从电容 C45 的上端接出经二极管 D11、D12 至 Q4 的基极,同时基极接电容 C44 到地,同时经二极管 D10 与电阻 R29 串联也到地,Q4 的基极接 Q5 的基极,而 Q4、Q5 的发射极接地。

6. 根据权利要求 1 所述的一种基于光纤传感的天然气管道泄漏监测系统,其特征是所述信号采集与处理模块包括信号调理单元、信号采集单元、处理单元、终端显示和外部接口,处理单元包括识别电路和定位电路;光电探测器输出的信号依次串接信号调理单元、信号采集单元和处理单元;处理单元对采集单元采集的信号进行解复用和解调获得原始振动波信号,然后在识别电路和定位电路中分别进行泄漏信号的识别和泄漏点的定位;处理单元输出有显示终端和外部接口。

7. 根据权利要求 6 所述的一种基于光纤传感的天然气管道泄漏监测系统,其特征是所述信号调理单元电路主要由运算放大器 U14、光电二级管 U15 组成;U15 的 1、5、8 端悬空,3、4 端接地,2 端经电阻 R39、电容 C60 二者并联后接 6 端,6 端经电阻 R43 接 U14 的 3 端,7 端接 U14 的 8 端;U14 的 4 端接地,5 端悬空,6、7 端共接 AD\_VINI,1 端接 AD\_OUT 口,2 端经电阻 R42 接地,1、2 端之间接电阻 R40、电容 C59 二者的并联。

8. 根据权利要求 6 所述的一种光纤传感天然气管道泄漏监测系统的泄漏点定位系统,其特征是所述处理单元包含识别电路和定位电路,其中识别电路由数字信号处理器 U1B 及外围电路组成,U1B 的 NC1-NC15 管脚悬空;AVDD、AGND 为模拟电源输入,AVDD 通过磁珠 FER1 接 1.3V 电源,并在 AVDD 和 AGND 间并联 3 个电容 C22、C23、C24 进行去耦滤波;DAI1、DAI3、DAI4 分别与定位电路数字信号处理器 U10 的 DROPR1、RSCLK0、RFS0 连接用于数据的传输;DAI9-DAI20 为扩展接口;DPI9、DPI10 接外部接口电路;定位电路主要由数字信号处理器 U10 及外围电路和接口组成,U10 的 DROPR1、RSCLK0、RFS0 分别与识别电路数字信号处理器 U1B 的 DAI1、DAI3、DAI4 连接用于接收数据,RX、TX、MOSI、MISO、SCK 接显示终端接口,TCK、TDO、TDI、TMS、TRST#、EMU# 为调试接口。

9. 根据权利要求 1 所述的一种基于光纤传感的天然气管道泄漏监测系统,其特征是所述光纤传感器的结构分为测管道径向振动信号的 I 型结构和测管道轴向振动信号的 II 型结构;测管道径向振动信号的光纤传感器 I 型结构包括:弹性圆柱体、光纤干涉仪和尾纤盘纤盒;其中,在弹性圆柱体外周上均匀有序的缠绕光纤干涉仪的干涉臂,并用粘合剂将光纤与圆柱体粘合在一起,缠绕后剩余的光纤干涉仪及其相关器件将整齐的盘绕在尾纤盘纤盒内;尾纤盘纤盒通过粘合剂固定在弹性圆柱体顶部;所述弹性圆柱体底部内凹,且弧度与管道外表面一致;测管道轴向振动信号的光纤传感器 II 型结构由长方形弹性片、光纤干涉仪以及尾纤盘纤盒组成;在长方形弹性片的上面,将光纤干涉仪的光纤干涉臂以正弦波的形状均匀布设,并用粘合剂将光纤紧贴在长方形弹性片上,剩余的光纤干涉仪及其相关器件将整齐的盘绕在尾纤盘纤盒内;尾纤盘纤盒通过粘合剂固定在长方形弹性片上面;所述的长方形弹性片是一个底部内凹且弧度与管道外表面一致的钢制薄板。

10. 根据权利要求 1 所述的一种基于光纤传感的天然气管道泄漏监测系统,其特征是

所述光路复用结构的原理框图为：专用调制信号发生模块发出的调制信号作用接光源调制输入，光源输出接发射光纤，发射光纤串接多个光路适配器，每个光路适配器由一条光纤接一个光纤传感器，多个光纤传感器为一光纤传感器组，每一光纤传感器组的光纤传感器各由一条光纤并接后再由一条回传光纤接至光电探测器，光电探测器输出接信号采集与处理模块。

## 一种基于光纤传感的天然气管道泄漏监测系统

### 技术领域

[0001] 本发明是一种基于光纤传感的天然气管道泄漏监测系统。涉及机械振动的测量、冲击的测量和管道系统技术领域。

### 背景技术

[0002] 目前,世界上建成的管道总长达到 250 万公里,已经超过铁路总里程成为世界能源主要运输方式,发达国家和中东产油区的油品输运已全部实现管道化。我国管道在近年也得到了较快发展,总长也超过 7 万公里,已初步形成横跨东西、纵贯南北、覆盖全国、连通海外的能源管网大格局,管道运输成为油气等战略能源的调配输送的主要方式。

[0003] 管道由于跨越地域广,受自然灾害、第三方施工破坏等原因,导致了较多的管道泄漏事故发生。国外管道安全情况也非常不容乐观,美国 2010 年 9 月 9 日圣布鲁诺市发生天然气管道大爆炸,爆炸在路面造成一个长 51 米、宽 9 米的大坑。一段长约 8 米、直径 76 厘米的管道被炸上天,飞出大约 30 米远,并引发大范围火灾,导致 4 人死亡,3 人失踪,至少 52 人受伤,过火面积 4 公顷,数十栋房屋被烧毁。近年来人们安全、环保意识显著提升,作为高危行业的管道输运安全问题也得到越来越多的重视。

[0004] 目前成熟的技术中对于天然气管道泄漏监测只有声波监测法较为有效,但为了提高对泄漏监测的实时性和漏点定位的准确性,必须在管线上加大传感器的布设密度,同时增加相应的供电、通信设备,造成系统成本以及安装维护费用高昂。

[0005] 随着传感技术的发展国外如美国 CSI、ATMOSI、欧洲 TER 等公司开展了 SCADA 泄漏监测系统研究,Sensornet 公司也开发了基于分布式光纤温度传感器的泄漏监测系统,部分产品在国内也申请了专利保护;国内天津大学、清华大学、中国人民解放军后勤工程学院等单位也对管道的泄漏监测方法做了深入研究。

[0006] 专利 CN200410020046.6 公开了一种基于干涉原理的分布式光纤油气管道泄漏监测方法及监测装置。该监测系统要求在管道附近沿管道并排铺设一根光缆,利用光缆中的光纤组成一个光纤微振动传感器。专利 CN200620119429、CN200610113044.0 均为基于 Sagnac 光纤干涉仪的管道泄漏监测装置,专利 CN200610072879.6 是一种基于分布式光纤声学传感技术的管道泄漏监测装置及方法。

[0007] 《传感器与微系统》第 26 卷第 7 期的“基于分布式光纤传感器的输气管道泄漏检测方法”公开了一种基于分布式光纤传感器的输气管道泄漏检测装置和方法。

[0008] CN1837674A 公开了一种基于分布式光纤声学传感技术的管道泄漏检测装置及方法。

[0009] US2006/0225507A1 公开了一种基于分布式光纤传感器的管道泄漏检测装置及方法。

[0010] 上述技术均属于分布式光纤传感监测方法。但该类技术监测泄漏时受到管道周围所发生的干扰事件的影响,具有很高的系统虚警率,抗干扰能力较差。

## 发明内容

[0011] 本发明的目的是发明一种灵敏度和准确度高、虚警率低、不易受环境因素影响的基于光纤传感的天然气管道泄漏监测系统。

[0012] 鉴于上述几类泄漏检测、监测技术存在的灵敏度低、虚警率高、易受环境因素影响等问题，本发明是提供一种基于光纤传感的高灵敏度准分布式泄漏振动监测系统，采用高灵敏度传感器使得可以在当管道发生微漏、渗漏等泄漏初级阶段时被及时监测到，并结合泄漏事件的时域、频域特征有效降低了干扰引发的系统虚警率，该技术方案克服了此前监测技术中的准确性差和安装工艺复杂的不足，使得相关维护人员能够及时采取应对措施，避免造成更大的安全事件。

[0013] 管道泄漏后会产生各频段的声波，波长比较短的超声波在距离声源不太远的位置就逐渐被介质吸收了，而且波长越短，吸收衰减的也越快，只有低频声波和次声波传播的距离较远，能传播几千米至几十千米。目前采用在较长管道两端安装次声波传感器的系统由于可用信号频段较窄，对泄漏信号的定位准确性效果还不够。

[0014] 本发明提出了一种具有高灵敏度的准分布式光纤传感泄漏振动监测方法，它是在管道本体上每隔一定距离安装一个高灵敏度光纤干涉型泄漏传感器，连续实时监测沿管道本体传播的泄漏振动波信号，对采集的振动波信号进行分析处理，包括类型识别和泄漏振动源定位，其中类型识别为通过对振动波特征的提取分析判别其是否属于泄漏类型，同时根据振动波传播到相邻几个光纤传感器的时间延迟结合振动波在管道本体上的传播速度实现对振动波源所在位置的确定，实现上述的对振动波信号分析处理后对泄漏事件进行报警同时提供泄漏点的位置信息。本发明在采用高灵敏度光纤传感器提高对泄漏事件监测灵敏度的基础上适当增加了光纤传感器的数量，扩展了可拾取监测信号的频段，并结合多个光纤传感器进行的时延估计定位方法保证了系统定位的准确性。

[0015] 在本发明中，传感器是实现管道泄漏监测的关键，当管道发生泄漏时，泄漏激发的振动波将沿管道向泄漏点两侧传播。在管道本体上每隔一定距离安装一个传感器，用来监测管道上的泄漏振动波。传感器采用光纤干涉仪结构，可以为光纤迈克耳逊干涉仪或者光纤马赫曾德干涉仪，为了增加对泄漏振动的感应灵敏度可以通过增加传感光纤长度的方式，其输出的光强信号经光电转换后可以写成：

$$V_0 \propto 1 + V \cos(\Phi_s + \Phi_n + \Phi_0) + V_n \quad (1)$$

[0017] 其中， $V_0$  是输出的电压信号， $V$  是干涉仪的可视度， $V_n$  是电路附加噪声， $\Phi_s$  为由泄漏振动波引起的相差信号，即为要探测的泄漏振动波信号， $\Phi_0$  为干涉仪的初始相位，是个常量， $\Phi_n$  为位相差的低频漂移，是一个不确定量，随温度和外界环境影响而变化。通过与光源调制方式相匹配的解复用技术能够实现泄漏振动波信号  $\Phi_s$  的获取，并对该信号  $\Phi_s$  到达相应的传感器的时间延迟进行估计，结合振动波沿管道传播的速度  $v$  实现了对振动波源即泄漏点位置的确定。

[0018] 为了节省投入，在基于光纤传感的天然气管道泄漏监测方法中采用光纤传感器复用 / 解复用方法。该方法综合频分复用和空分复用的方法，采用对可调激光器进行光频调制的方法产生泄漏探测光，使用迈克耳逊干涉仪作为泄漏传感器，传感器的布设结构是在天然气管道外壁上每隔一定距离安装一个泄漏传感器，多个传感器构成一个传感器组，每个传感器组的光信号使用一根光纤传回系统主机。传感器组内的每个传感器都制作成光臂

差不同的迈克耳逊干涉仪或马赫-曾德干涉仪，使每个泄漏传感器所产生的传感光信号频率均不相同，由此利用频分复用原理可将每组的多个传感器不同频率的光信号复用在一根光纤中传回系统的接收端；而多个传感器组之间采用空分复用方式分别接入系统主机。接收到的每个传感器组的光信号使用单独的光电转换通道实现光信号到电信号的转换，转换后的传感信号使用分频方式实现传感器组内各传感器的解复用，并采用相位载波技术解调出管道泄漏的原始声波信号，再经过泄漏信号的识别和定位分析，最终可准确获取管道泄漏点信息。泄漏声波信号的相位载波解调方法是将接收到的干涉信号，先进行带通滤波，一路输出与  $\cos(\omega_0 t)$  相乘后进行低通滤波与微分处理，另一路与  $\sin(\omega_0 t)$  相乘后进行低通滤波与微分处理；前一路的微分输出与后一路的低通滤波输出相乘后，再与后一路的微分输出与前一低通滤波输出相乘的结果相减，之后依次经积分、高通滤波处理，最终输出原始泄漏振动波信号。

[0019] 实际上，迈克耳逊干涉仪光纤中与两偏振模相应的折射率  $n_x$  和  $n_y$  不相等，同时由于光纤的微弯、扭曲、环境温度的变化使  $n_x$  和  $n_y$  随机变化，导致光纤输出偏振态随机变化，反映在干涉信号可视度  $V$  在  $0 \sim 1$  之间随机变化，此现象即干涉仪的偏振诱导信号衰落现象。此现象将导致迈克耳逊干涉仪传感器检测灵敏度和信噪比的降低和不稳定。为了克服传感器组的偏振衰落，在基于光纤传感的天然气管道泄漏监测方法中采用天然气管道泄漏检测传感器组的抗偏振衰落方法。本天然气管道泄漏检测传感器组的抗偏振衰落方法是在管道本体上每隔一定距离安装一个迈克耳逊干涉仪结构的传感器，由若干个迈克耳逊干涉仪结构的传感器通过光分束器和合束器并联接在发射光纤和回传光纤之间；迈克耳逊干涉仪的两臂不等长，每个迈克耳逊干涉仪使用两个法拉第旋转镜作为反射镜，旋转角度为 45 度，使反射光的偏振态变化正好抵消入射光的偏振态变化，从而使干涉仪的可视度保持为 1。

[0020] 另外，式(1)中，由于低频干扰  $\Phi_n$  随机变化，且幅度大，受  $\Phi_n$  变化影响，系统输出的信噪比在变化，且当  $\sin \Phi_n = 0$  时，信号完全消隐，此即称为干涉仪的相位衰落现象。

[0021] 为了消除传感器的相位衰落现象，采用相位载波技术来检测泄漏声波信号。具体如下：

[0022] 制作迈克耳逊干涉仪时，使干涉仪两臂不等长，两臂长差为  $\Delta L$ ；

[0023] 将锯齿波或倒锯齿波信号作为调制信号，频率为泄漏声波频带宽度的两倍，作用到光频可调的激光器，激光器输出光频按照调制信号同步变化的激光，输入到迈克耳逊干涉仪，由于两臂不等长，通过两臂的激光将产生时延差，从而参与干涉的两束激光除了在锯齿波下降沿处外，其他时刻的光频差均为一个常数，因此，干涉仪输出的干涉信号为一个近似单频的余弦信号，角频率  $\omega_0$  与干涉仪两臂长差  $\Delta L$  成正比， $\Delta L$  越大，干涉信号频率越高；

[0024] 使用带通滤波器对干涉信号进行滤波，滤波器中心频率为干涉信号中心频率，带宽与锯齿波调制信号频率相同。滤波之后即可获得该干涉仪的载波信号，按照前述的相位载波解调方法解调可消除信号的相位衰落问题，获得原始泄漏声波信号。

[0025] 为了克服传感器组的相位衰落，在基于光纤传感的天然气管道泄漏监测方法中采用一种针对天然气管道泄漏光纤检测系统的抗相位衰落方法。本天然气管道泄漏光纤检测系统的抗相位衰落方法是：在管道本体上每隔一定距离安装一个迈克耳逊干涉仪或马

赫-曾德干涉仪结构的传感器,由若干个传感器通过光分束器和合束器并联接在发射光纤和回传光纤之间;基于锯齿波或倒锯齿波调制的激光器作为光源,以及不等臂长的迈克耳逊干涉仪或马赫-曾德干涉仪作为传感器,在传感器信号中产生近似单频的余弦信号载波,传感器组信号载波为各传感器载波信号的线性叠加,通过分频方法将各传感器载波信号分离,使用与各传感器载波信号同频的余弦和正弦信号对载波信号进行解调,得到各传感器的原始泄漏声波信号。

[0026] 为了能准确定位管道泄漏的位置,在基于光纤传感的天然气管道泄漏监测方法中采用一种基于准分布式光纤传感技术天然气管道泄漏事件的多传感器定位方法,当管道泄漏事件发生时,泄漏激发振动波并沿管道向两相反方向传播,系统根据泄漏信号传播到相邻几个传感器的时延差实现对泄漏点的定位。当泄漏发生时,泄漏激发管道产生振动波,振动波以速度  $v$  沿管道传播,其中两个相邻的传感器间隔为设定值  $L$ ,设信号传播至传感器  $n$  的时间为  $t_n$ ,传播至传感器  $n+1$  的时间为  $t_{n+1}$ ,信号传播至传感器  $n-1$  的时间为  $t_{n-1}$ ,传播至传感器  $n+2$  的时间为  $t_{n+2}$ ,有下式(2)成立:

$$[0027] X_1 = \frac{1}{2}[L - v \times (t_{n+1} - t_n)]$$

$$[0028] X_2 = \frac{1}{2}[v \times (t_{n-1} - t_{n+1})] \quad (2)$$

$$[0029] X_3 = L - \frac{1}{2}[v \times (t_{n+2} - t_n)]$$

$$[0030] X_4 = \frac{1}{2}[L - v \times (t_{n+2} - t_{n-1})]$$

[0031] 其中未知参量  $(t_{n+1}-t_n)$ 、 $(t_{n-1}-t_{n+1})$ 、 $(t_{n+2}-t_n)$  和  $(t_{n+2}-t_{n-1})$  分别是泄漏振动波到达传感器  $n$  和  $n-1$ 、传感器  $n+1$  和  $n-1$ 、传感器  $n$  和  $n+2$ 、传感器  $n-1$  和  $n+2$  的时延差,通过对对应几个传感器接收到的信号进行相关分析得到,这样就形成了对同一未知量事件发生位置  $X$  的四次检测,测量值分别为  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ ,对这四次测量值取统计平均值,即得到最终的测量值  $X$ 。联合连续多个传感器接收信号时间差,相比仅采用两个传感器的时间差测量方式具有更为准确的定位效果。该定位方法可以监测突发或已发泄漏信号,具有定位准确性好、性能稳定等优势。

[0032] 为了对环境随机振动干扰进行抑制,在基于光纤传感的天然气管道泄漏监测方法中采用一种天然气管道泄漏事件的智能识别方法。以管道正常运行和泄漏状况信号的时域特征  $P_t$ 、频域特征  $P_f$  和当前管道传播信号的噪声特性  $P_n$  并结合波形识别综合进行分析,建立泄漏置信度函数模型:  $R = a_1 P_t + a_2 P_f - a_3 P_n$ ,对拾取的振动波信号进行泄漏评估来判断管道是否发生泄漏,根据现场管道特点设置不同算法参数  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  调节置信度模型。该识别方法有效区分了随机偶发振动和突发性、持续性泄漏信号,提高了系统报警的准确率。

[0033] 为了测定管道泄漏振动波传播速度,在基于光纤传感的天然气管道泄漏监测方法中采用一种天然气管道泄漏振动波传播速度测定方法:是建立在光纤传感的天然气管道泄漏监测方法的基础上;用天然气管道泄漏监测系统,选择某一个已知传感器点通过敲击管道等形式模拟管道泄漏引发振动,依据工程施工和验收资料中使用的管道段的数量,对传播到两个相邻的传感器的泄漏信号进行时延估计并结合已知的管道长度实现对泄漏振动

波速度的测定,准确给出当前测试点距离两个相邻的传感器点的距离,将该模拟测试点位置 X 代入 : $X = L - [v \times (t_{n+2} - t_n)] / 2$ , 反解出 : $v = 2(L-X) / (t_{n+2} - t_n)$ , 实现根据已知的传感器间隔距离和测定的信号传播时间测定振动波沿管道传播的速度。

[0034] 同时还提供了一种天然气管道绝对长度的测定方法,首先挖开待测位置的管道埋土,在该点敲击管道模拟管道泄漏振动,根据已知的模拟泄漏振动波沿管道传播的速度和测定的信号传播时间测定模拟地点的位置, $X = [L - v \times (t_{n+1} - t_n)] / 2$ ,从而实现了管道绝对距离的测量。

[0035] 基于光纤传感的天然气管道泄漏监测系统的构成见图 1,它包括光路系统和电路两部分;在管道本体上每隔一定距离安装一个光纤传感器,相邻的多个光纤传感器构成一个光纤传感器组,各光纤传感器组共用一根发射光纤与光源连接,每个光纤传感器组使用一根回传光纤与光电探测器连接;光电探测器输出接包括泄漏信号识别和事件定位功能的信号采集与处理模块,信号采集与处理模块输出通过外部接口接微机。经信号采集与处理模块的处理,基于频分复用方式混合的传感器组信号实现了传感器组内各传感器的解复用,获得原始泄漏振动波信号。

[0036] 为了保护光纤传感器,在光纤传感器外安装有光纤传感器护罩 16;光纤传感器护罩 16 为一个底部内凹且弧度与管道外表面一致的罩。

[0037] 由光源发出激光,经传输光路实现分束后,部分光被传输到安装在管道壁上的光纤传感器组,光纤传感器组拾取沿管道传播的泄漏振动信号以及噪声后,再次经传输光路传回至系统的光电探测器,由信号采集与处理模块进行泄漏信号解调与识别分析,并对泄漏信号进行时延估计实现对泄漏点的定位。

[0038] 本天然气管道泄漏监测系统的光路系统(见图 4)主要是基于频分复用原理而设计,由光源、光路适配器、传输光缆和光纤传感器三部分构成;光路适配器由光分束器和光合束器组成;光纤传感器采用马赫曾德干涉仪或迈克耳逊干涉仪;每个光纤传感器由两根光纤接光路适配器,所有光路适配器用传输光缆依次串接,由距接收端最近的光路适配器接系统主机。

[0039] 整个光路系统的流程是:光源经传输光缆中的发射光纤发出探测激光,到达第一个光路适配器后,由该光路适配器的光分束器分为两束激光:一束经发射光纤进入第一个光纤传感器,另一束光经延时光纤传到下一个光路适配器,再由下一个光路适配器中的光分束器分为两束激光,一束进入第二个光纤传感器,另一束再经光纤传输到下一个光路适配器,以此类推,直到激光到达最后一个光纤传感器;在传感器组的最后一个光纤传感器,激光不再通过光分束器,直接进入光纤传感器;而经过各光纤传感器后的光信号,通过各自相应的光路适配器中的光合束器,与后面传过来的光信号合束,最后经相对应的传感器组的回传光纤传回至监测系统的信号接收端。其中所述的光路适配器集合了光分束器和光合束器;发射光纤与回传光纤使用的是同一根传输光缆中的两根不同的纤芯;传输光缆将所有光路适配器串联起来;管道上相邻的两个传感器之间的发射光纤和回传光纤的长度均要大于激光器相干长度的 1/2,以达到防止传感器之间发生信号串扰的目的。

[0040] 针对上述天然气管道泄漏光纤监测系统,本发明公开了一种适合光波复用以及调制解调的专用光源系统。该光源系统由光频可调的激光器和专用调制信号发生模块构成(见图 2);调制信号发生模块中产生的信号通过 DA 输出,接激光器调制信号输入端;调制

信号发生模块输出信号具有频率调节、幅度调节和锯齿波 / 倒锯齿波选择功能, 通过编程可选择如锯齿波或倒锯齿波调制信号类型, 调整设置信号幅度和频率; 调制信号作用在激光器上, 可输出光频按照调制信号波形规律变化的连续激光。

[0041] 所述光源是一种包括适合复用和调制解调的专用光源系统, 光源中的激光器采用光频可调制的半导体激光器, 调制信号作用在激光器注入电流上, 实现光频的调制; 激光器相干长度需要大于所有传感器干涉仪臂长差, 并小于相邻两个干涉仪之间发射光纤和回传光纤上的延时光纤长度之和。调制信号模块输出到激光器的调制信号为锯齿波信号或倒锯齿波信号, 频率不小于待检测泄漏声波信号频率的两倍; 在注入锯齿波或倒锯齿波光频调制激光时, 各传感器输出的干涉信号为单频余弦信号或近似单频余弦信号, 传感器组输出的干涉光信号为传感器组内各传感器输出的近似单频余弦信号的叠加, 其频谱由多个独立的谱线组成, 谱线数量与传感器组内传感器数量相同;

[0042] 光源中的调制信号发生模块采用数字方式实现, 即通过数字方式根据波型、信号幅度、频率参数计算获得一个周期的调制信号片断, 然后通过数模转换 (DA) 方式输出, 输出的模拟调制信号连接到激光器上, 通过参数配置可选择如锯齿波或倒锯齿波调制信号类型, 可调整设置信号幅度、直流偏置和频率; 调制后的激光器输出光频随调制信号波形同步变化的激光, 输入到传感光路中, 可实现传感器的复用、形成多个传感器的信号载波。

[0043] 其中光源调制电路如图 3 所示, 它主要由运算放大器 U7、DFB 激光器 U8、运算放大器 U9 和 2 个三极管 Q4、Q5 组; U7 的 7 端接 VDC, 6 端接电阻 R18 后与二极管 D8、电容 C41 串联后与电容 C38 并联的电路再串联, 6 端接电阻 R19 后接 VDC, 同时再接二极管 D4、D5、D6、D7 的串联到地, 4、7、8、9、10 端接地, 3 端经电阻 R17 后接地, 2 端与接 U8 的端; U8 的 1、14 端接地, 12 端经电容 C34 接地, 5、11 端接 VDC, 4 端接 PDne, 6 端接 TEC+, 3 端经扼流圈 L3 与电阻 R20 串联后接三极管 Q4 的集电极, 同时 3 端经扼流圈 L3 与电阻 R21 串联后接三极管 Q5 的集电极; U9 的 1、2 端之间并联电阻 R22 和电容 C39 后由 1 端接电阻 R25 到 6 端, PDne 接电阻 R30 再串联电阻 R27 接 U9 的 3 端, 同时接 PDne 的电阻 R30 与电位器阻 R31、电阻 R32、电容 C43 三者并联后串联接地, 5 端经电阻 R24 接 VREF, 7 端经电阻 R28 与 8 端经电阻 R26 共接电容 C45 到地; 从电容 C45 的上端接出经二极管 D11、D12 至 Q4 的基极, 同时基极接电容 C44 到地, 同时经二极管 D10 与电阻 R29 串联也到地, Q4 的基极接 Q5 的基极, 而 Q4、Q5 的发射极接地。

[0044] 相对该光源系统的调制原理, 天然气管道泄漏光纤监测系统采用了光纤传感器复用 / 解复用方法的振动波解调原理框图见图 13, 干涉信号输出接带通滤波, 带通滤波输出一路与  $\cos \omega_0 t$  相接 (相乘) 后接第一低通滤波, 该低通滤波输出接第一微分电路, 另一路与  $\sin \omega_0 t$  相接, 相乘后接第二低通滤波, 该低通滤波输出接第二微分电路; 第一微分电路输出与第二低通滤波输出相接, 相乘后再与第二微分电路输出与第一低通滤波输出相接, 相乘后再相接, 相减后依次经积分、高通滤波, 输出声波信号。

[0045] 所述信号采集与处理模块的构成见图 6, 它包括信号调理单元、信号采集单元、处理单元、终端显示和外部接口, 处理单元包括识别电路和定位电路; 光电探测器输出的信号依次串接信号调理单元、信号采集单元和处理单元, 处理单元对采集单元采集的信号进行复用和解调获得原始振动波信号, 然后在识别电路和定位电路中分别进行泄漏信号的识别和泄漏点的定位; 处理单元输出有显示终端和外部接口;

[0046] 其中调理单元电路如图 7 所示,它主要由运算放大器 U14、光电二级管 U15 组成;U15 的 1、5、8 端悬空,3、4 端接地,2 端经电阻 R39、电容 C60 二者并联后接 6 端,6 端经电阻 R43 接 U14 的 3 端,7 端接 U14 的 8 端;U14 的 4 端接地,5 端悬空,6、7 端共接 AD\_VINI,1 端接 AD\_OUT 口,2 端经电阻 R42 接地,1、2 端之间接电阻 R40、电容 C59 二者的并联;

[0047] 处理单元内的识别电路如图 14 所示,它主要由数字信号处理器 U1B 及外围电路组成,U1B 的 NC1-NC15 管脚悬空;AVDD、AGND 为模拟电源输入,AVDD 通过磁珠 FER1 接 1.3V 电源,并在 AVDD 和 AGND 间并联 3 个电容 C22、C23、C24 进行去耦滤波;DAI1、DAI3、DAI4 分别与定位电路数字信号处理器 U10 的 DROPRI、RSCLK0、RFS0 连接用于数据的传输;DAI9-DAI20 为扩展接口;DPI9、DPI10 接外部接口电路;

[0048] 处理单元内的定位电路如图 15 所示,它主要由数字信号处理器 U10 及外围电路和接口组成,U10 的 DROPRI、RSCLK0、RFS0 分别与识别电路数字信号处理器 U1B 的 DAI1、DAI3、DAI4 连接用于接收数据,RX、TX、MOSI、MISO、SCK 接显示终端接口,TCK、TDO、TDI、TMS、TRST#、EMU# 为调试接口。

[0049] 所述传感器采用迈克耳逊干涉仪。每个光纤传感器按照等间距安装在管道表面;每 2-10 个相邻的传感器组成一个传感器组,每组中各传感器采用并联方式连接到传输光纤(即发射光纤和回传光纤),各传感器与传输光纤连接的地方使用光分束器和合束器实现光的分束与合束(即光路适配器),相邻两个传感器之间的传输光纤长度要大于激光器相干长度的 1/2;每个传感器组对应一个独立的将各传感器组的干涉光信号转换为电信号的光电转换通道。

[0050] 所述光纤传感器的 I 型结构见图 10,I 型结构是测管道径向振动信号的,每个传感器包括:弹性圆柱体、光纤干涉仪和尾纤盘纤盒;其中,在弹性圆柱体外周上均匀有序的缠绕光纤干涉仪的干涉臂,并用粘合剂将光纤与圆柱体粘合在一起,缠绕后剩余的光纤干涉仪及其相关器件将整齐的盘绕在尾纤盘纤盒内;尾纤盘纤盒通过粘合剂固定在弹性圆柱体顶部。所述的弹性圆柱体底部内凹,且弧度与管道外表面一致。天然气管道泄漏时产生的径向振动让弹性圆柱体发生形变,带动弹性圆柱体外周缠绕的光纤干涉仪也发生形变,由此改变光纤内传输的光的状态,以致被泄漏监测设备检测到。

[0051] 另一种用于天然气管道泄漏监测轴向振动信号的光纤传感器 II 型结构见图 11,该光纤传感器由长方形弹性片、光纤干涉仪以及尾纤盘纤盒组成;具体结构是在长方形弹性片的上面,将光纤干涉仪的光纤干涉臂以正弦波的形状均匀布设,并用粘合剂将光纤紧贴在长方形弹性片上,剩余的光纤干涉仪及其相关器件将整齐的盘绕在尾纤盘纤盒内;尾纤盘纤盒通过粘合剂固定在长方形弹性片上面。所述的长方形弹性片是一个底部内凹且弧度与管道外表面一致的钢制薄板;天然气管道泄漏时产生的轴向振动让长方形弹性片发生形变,带动长方形弹性片上面盘绕的光纤干涉仪也发生形变,由此改变光纤内传输的光的状态,以致被后端设备检测到。

[0052] 其中两种传感器的外壳内附有海棉层,主要起隔离管道壁外界干扰信号和固定保护传感器的作用。

[0053] 基于光纤传感天然气管道泄漏监测系统光路复用结构的原理框图见图 12,光源经专用调制信号发生模块后接发射光纤,发射光纤串接多个光路适配器,每个光路适配器由一条光纤接一个光纤传感器,多个光纤传感器为一光纤传感器组,每一光纤传感器组的光

纤传感器各由一条光纤并接后再由一条回传光纤接至光电转换器，光电转换器输出接信号采集与处理模块。

[0054] 本发明以无需供电的光纤传感器作为泄漏信号的拾取装置，利用与管道同沟铺设的光纤以及光复用技术实现光纤振动传感器的信号远距离传输，解决了电传感器供电及远距离通信的难题，可以较为密集地布设光纤振动传感器，多传感器联合进行时延估计提高对泄漏点的定位精度；此外光纤振动传感器的灵敏度是传统声传感器的数倍，可以显著提高对天然气管道微小泄漏检测的准确度；

[0055] 且虚警率低、不易受环境因素的影响。

## 附图说明

- [0056] 图 1 光纤传感天然气管道泄漏监测系统原理框图
- [0057] 图 2 光频可调型光源的调制原理图
- [0058] 图 3 光源调制电路图
- [0059] 图 4 光纤传感天然气管道泄漏监测系统光路系统
- [0060] 图 5 光路适配器结构和传输光路图
- [0061] 图 6 信号采集与处理模块结构图
- [0062] 图 7 信号采集与处理模块中信号调理单元电路图
- [0063] 图 8 迈克尔逊干涉仪型传感器原理图
- [0064] 图 9 马赫曾德干涉仪型传感器原理图
- [0065] 图 10 光纤传感器 I 型结构图
- [0066] 图 11 光纤传感器 II 型结构图
- [0067] 图 12 光纤传感天然气管道泄漏监测系统光路复用结构图
- [0068] 图 13 光纤传感天然气管道泄漏监测系统振动波解调原理框图
- [0069] 图 14 信号采集与处理模块中信号处理单元识别电路图
- [0070] 图 15 信号采集与处理模块中信号处理单元定位电路图
- [0071] 其中 1,1-1,...,1-n- 光分束器 2,2-1,...,2-n,15- 光纤传感器
- [0072] 3,3-1,...,3-n- 光合束器 4,5,6,7,8,9- 延时光纤
- [0073] 10- 尾纤盘纤盒 11- 传输光缆
- [0074] 12- 弹性圆柱体 13- 传感光纤
- [0075] 14- 长方形弹性片 16- 传感器护罩
- [0076] 17- 管道本体 18- 天然气管道外表面涂层
- [0077] 19- 天然气管道外钢管壁

## 具体实施方式

[0078] 结合附图和实施例对本发明进行进一步说明，但不应以此限制本发明的保护范围。

[0079] 实施例。本例的构成如图 1 所示，在管道本体上每隔 1.5km 安装一个光纤传感器，共计安装 10 个传感器，前 5 个传感器和后 5 个传感器分别构成一个传感器组，所有光纤传感器组共用传输光缆中的一根光纤与系统光源连接，作为发射光纤，同时每个光纤传感器

组又独自使用传输光缆中的一根光纤与系统光电探测器连接,作为回传光纤;光电探测器输出端接包括泄漏信号识别和事件定位功能的信号采集与处理模块,信号采集与处理模块输出通过外部接口接微机。

[0080] 本例的光路系统(见图4)是基于频分复用原理而设计,每个光纤传感器由两根光纤接光路适配器,所有光路适配器用传输光缆依次串接,由距接收端最近的光路适配器接系统主机;具体光路由光路适配器、传输光缆和光纤传感器三部分构成;光路适配器由光分束器和光合束器组成;光纤传感器采用迈克耳逊结构的干涉仪。

[0081] 所述光路系统中各光器件间的具体连系如图5所示,光源发出的探测光经过传输光纤进入光路适配器中的分束器1-1,该分束器1-1采用分光比为9:1,其中比例为9的输出光继续沿延时光纤4传播,直至光路适配器1-2,而输出比例为1的输出光进入第一个传感器2-1,传感器2-1采用迈克尔逊干涉仪结构,臂差为5m,将该干涉仪一个臂上3m长光纤绕制在橡胶材料的弹性体上,弹性体紧贴管道壁,采用防护罩固定;光路适配器1-2中的分束器12采用8:1的分光比,其中比例为8的输出光继续沿延时光纤传播至下一个光路适配器,而输出比例为1的输出光进入第二个传感器2-2,该传感器同样采用迈克尔逊干涉仪结构并且控制干涉仪臂差在7.5m,将一个臂上3m长的光纤绕制在橡胶材料的弹性体上,弹性体紧贴管道壁固定;以此类推,其余传感器臂长差分别为10m、12.5m、15m,相应的适配器内的分束器分光比分别为7:1、6:1、5:1、4:1、3:1、2:1、1:1,到最后一个传感器时,激光经延时光纤后直接进入传感器;第一个传感器组内的传感器(2-1)-(2-4)的输出分别与前四个适配器内的合束器与一根回传光纤连接,4个合束器的分光比分别是4:1、3:1、2:1、1:1,各传感器均与合束器比例为1的输入端连接,传感器25输出连接回传光纤,然后再连接第四个适配器内的合束器;类似地,第二个传感器组内的五个传感器的臂长差分别为5m、7.5m、10m、12.5m、15m,同样通过适配器内的合束器与另一根回传光纤连接,合束器分光比分别是4:1、3:1、2:1、1:1;两个传感器组共使用两个回传光纤分别与光电转换模块的两个转换通道连接;

[0082] 所述光源是一种包括适合复用和调制解调的专用光源系统,由光频可调的激光器和专用调制信号发生模块构成(见图2);光源所加调制信号为频率10kHz、幅度±1.4V的锯齿波信号,传感器组输出的干涉信号频谱主要由40kHz、60kHz、80kHz、100kHz、120kHz五条谱线构成;分别使用中心频率为40kHz、60kHz、80kHz、100kHz、120kHz,带宽均为4.5kHz的带通滤波器对干涉信号进行滤波,得到五个传感器的载波信号,对应的主频率分别为40kHz、60kHz、80kHz、100kHz、120kHz;对五个载波信号使用同频的余弦和正弦信号进行解调,获得五个传感器的泄漏振动波信号;

[0083] 其中光源调制电路如图3所示,它主要由运算放大器U7、DFB激光器U8、运算放大器U9和2个三极管Q4、Q5组;U7的7端接VDC,6端接电阻R18后与二极管D8、电容C41串联后与电容C38并联的电路再串联,6端接电阻R19后接VDC,同时再接二极管D4、D5、D6、D7的串联到地,4、7、8、9、10端接地,3端经电阻R17后接地,2端与接U8的端;U8的1、14端接地,12端经电容C34接地,5、11端接VDC,4端接PDne,6端接TEC+,3端经扼流圈L3与电阻R20串联后接三极管Q4的集电极,同时3端经扼流圈L3与电阻R21串联后接三极管Q5的集电极;U9的1、2端之间并联电阻R22和电容C39后由1端接电阻R25到6端,PDne接电阻R30再串联电阻R27接U9的3端,同时接PDne的电阻R30与电位器阻R31、电阻R32、

电容 C43 三者并联后串联接地,5 端经电阻 R24 接 VREF,7 端经电阻 R28 与 8 端经电阻 R26 共接电容 C45 到地;从电容 C45 的上端接出经二极管 D11、D12 至 Q4 的基极,同时基极接电容 C44 到地,同时经二极管 D10 与电阻 R29 串联也到地,Q4 的基极接 Q5 的基极,而 Q4、Q5 的发射极接地;

[0084] 其中:运算放大器 U7 选 AD623;激光器 U8 选内调制半导体光源;运算放大器 U9 选 AD8572;三极管 Q4、Q5 选 NPN9014;

[0085] 所述信号采集与处理模块的构成见图 6,它包括信号调理单元、信号采集单元、处理单元、终端显示和外部接口,处理单元包括识别电路和定位电路;光电探测器输出的信号依次串接信号调理单元、信号采集单元和处理单元,处理单元对采集单元采集的信号进行解复用和解调获得原始振动波信号,然后在识别电路和定位电路中分别进行泄漏信号的识别和泄漏点的定位;处理单元输出有显示终端和外部接口;

[0086] 其中调理单元电路如图 7 所示,它主要由运算放大器 U14、光电二级管 U15 组成;U15 的 1、5、8 端悬空,3、4 端接地,2 端经电阻 R39、电容 C60 二者并联后接 6 端,6 端经电阻 R43 接 U14 的 3 端,7 端接 U14 的 8 端;U14 的 4 端接地,5 端悬空,6、7 端共接 AD\_VINI,1 端接 AD\_OUT 口,2 端经电阻 R42 接地,1、2 端之间接电阻 R40、电容 C59 二者的并联;

[0087] 其中:运算放大器 U14 选 AD8572;光电二级管 U15 选 OPA380AID;

[0088] 处理单元内的识别电路如图 14 所示,它主要由数字信号处理器 U1B 及外围电路组成,U1B 的 NC1-NC15 管脚悬空;AVDD、AGND 为模拟电源输入,AVDD 通过磁珠 FER1 接 1.3V 电源,并在 AVDD 和 AGND 间并联 3 个电容 C22、C23、C24 进行去耦滤波;DAI1、DAI3、DAI4 分别与定位电路数字信号处理器 U10 的 DROPRI、RSCLK0、RFS0 连接用于数据的传输;DAI9-DAI20 为扩展接口;DPI9、DPI10 接外部接口电路;其中,数字信号处理器 U1B 选 ADSP-21369;

[0089] 处理单元内的定位电路如图 6 所示,它主要由数字信号处理器 U10 及外围电路和接口组成,U10 的 DROPRI、RSCLK0、RFS0 分别与识别电路数字信号处理器 U1B 的 DAI1、DAI3、DAI4 连接用于接收数据,RX、TX、MOSI、MISO、SCK 接显示终端接口,TCK、TDO、TDI、TMS、TRST#、EMU# 为调试接口;其中数字信号处理器 U10 选 BF561。

[0090] 所述传感器结构 I 型如图 10,由弹性圆柱体 12 和传感光纤 13 组成;在管道上安装使用时将弹性圆柱体贴在天然气管道上;传感器结构 II 型如图 11,由传感光纤 13、盘纤盒 10 和弹性片 14 组成,制作方式按照图 11 的形式绕制而成,安装时用粘结胶粘贴在刨开防腐层的管道表面,安装方式如附图 12 所示,实现对管道本体振动的拾取;

[0091] 当传感器 n 和传感器 n+1 之间的管道发生泄漏时,泄漏引发的振动波沿管道传播经过一定的时间分别被传感器 n-1、n、n+1 和 n+2 拾取,根据相邻多个传感器接收到泄漏信号的时间差,并结合振动波在管道中的传播速度可以更准确的实现泄漏点的定位。

[0092] 本例经多次试验,通过在管道壁上安装泄漏振动敏感干涉型传感器能够实现对沿管道传播的任何扰动行为的监测,通过对信号分析处理以及智能识别能够实现对泄漏事件报警并给出泄漏点位置,系统灵敏度高,通过对泄漏的智能识别极大程度上降低了偶发事件导致的系统虚警率。

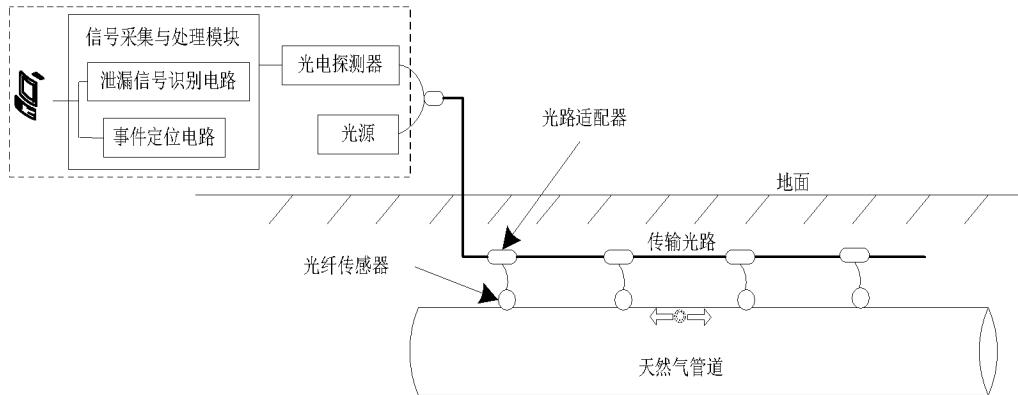


图 1

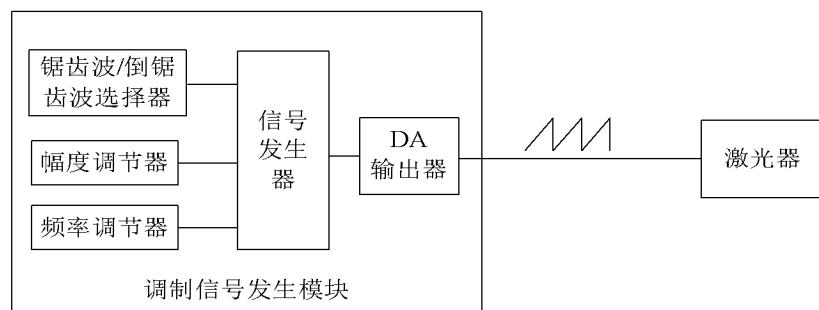


图 2

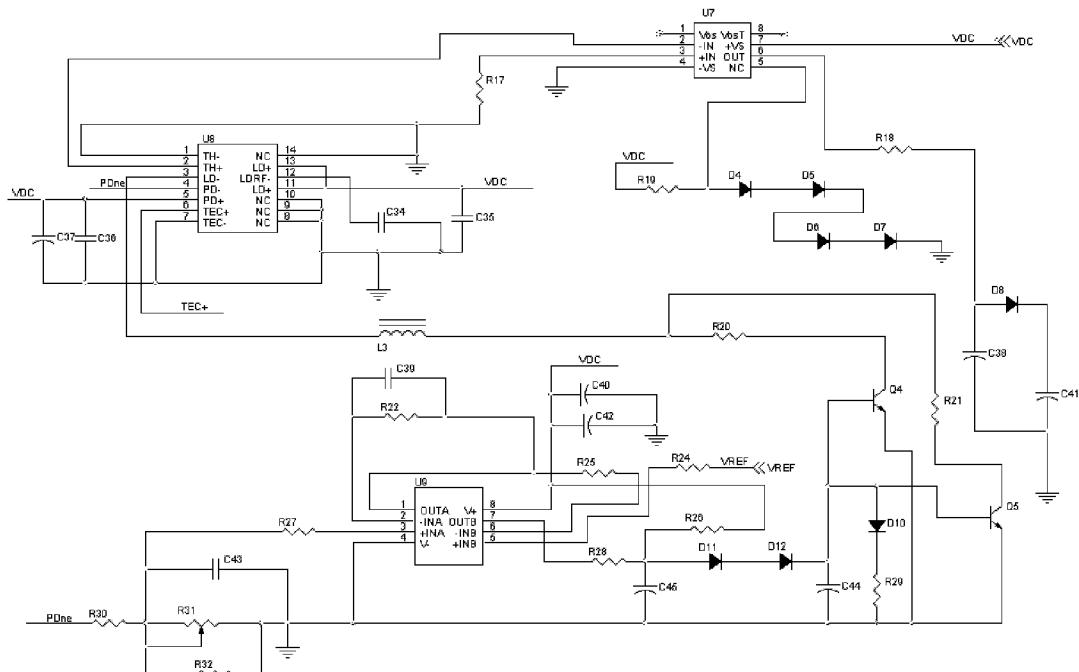


图 3

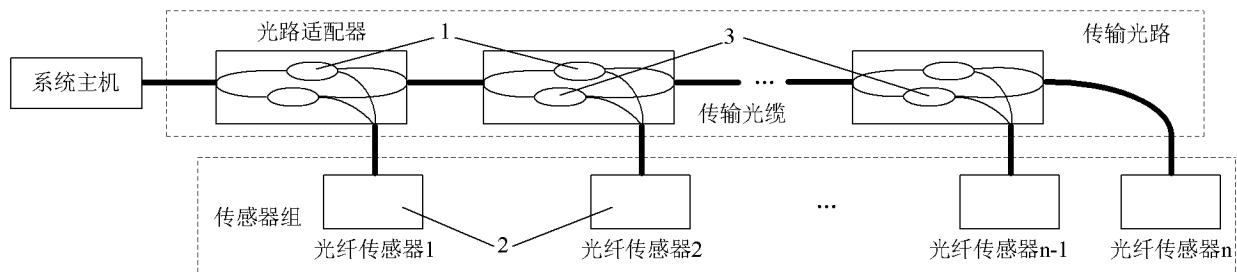


图 4

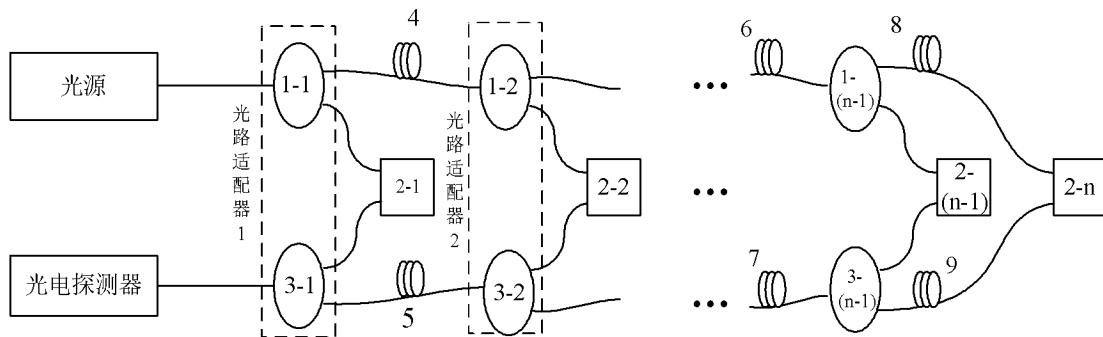


图 5

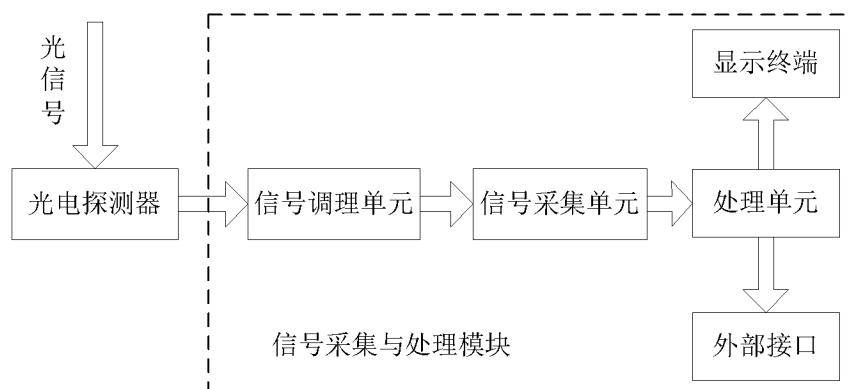


图 6

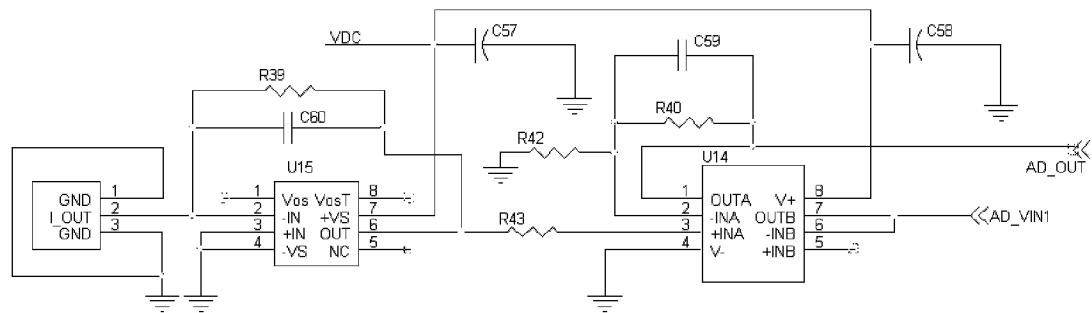


图 7

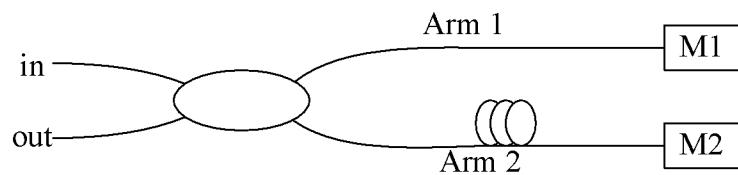


图 8

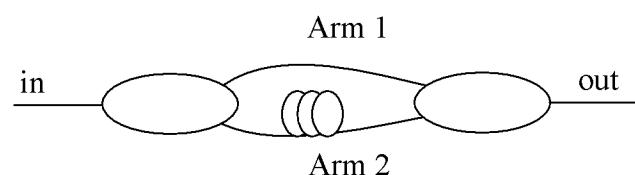


图 9

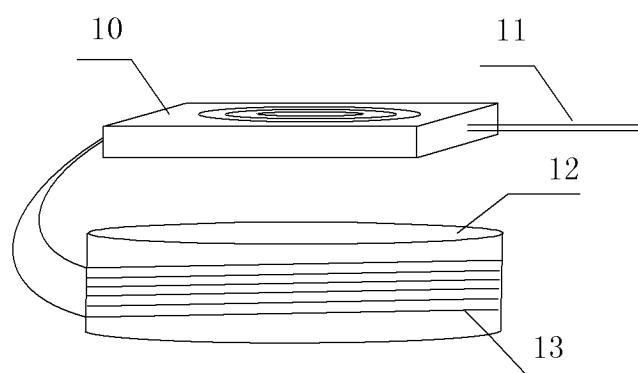


图 10

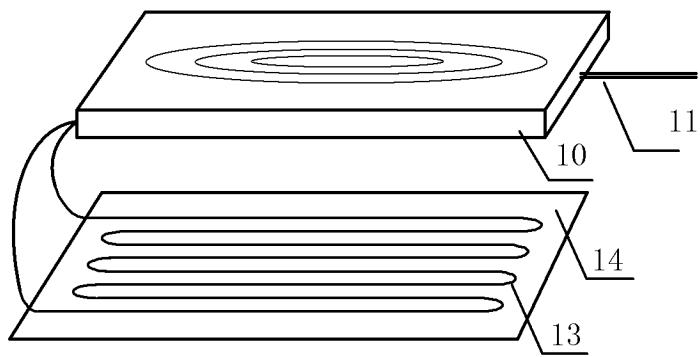


图 11

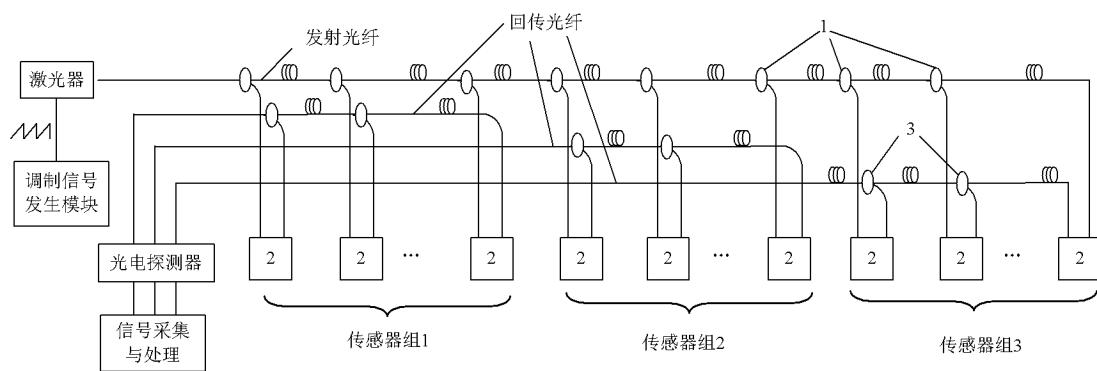


图 12

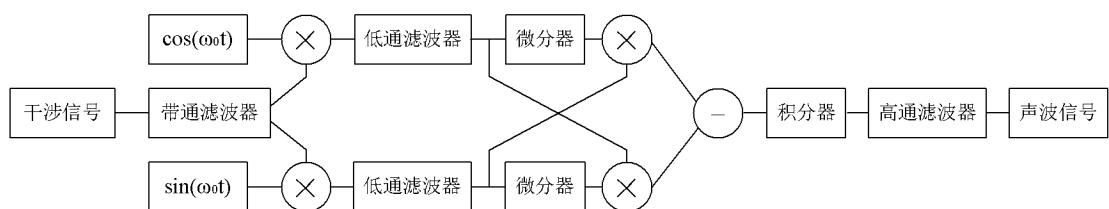


图 13

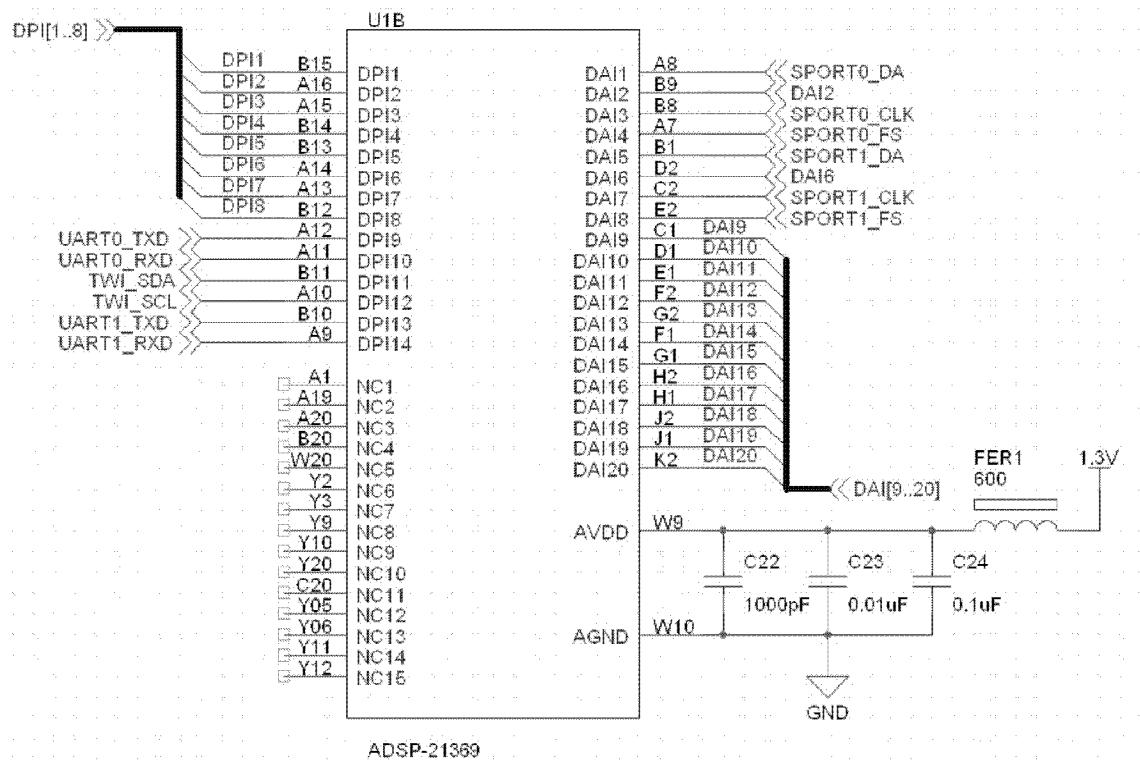


图 14

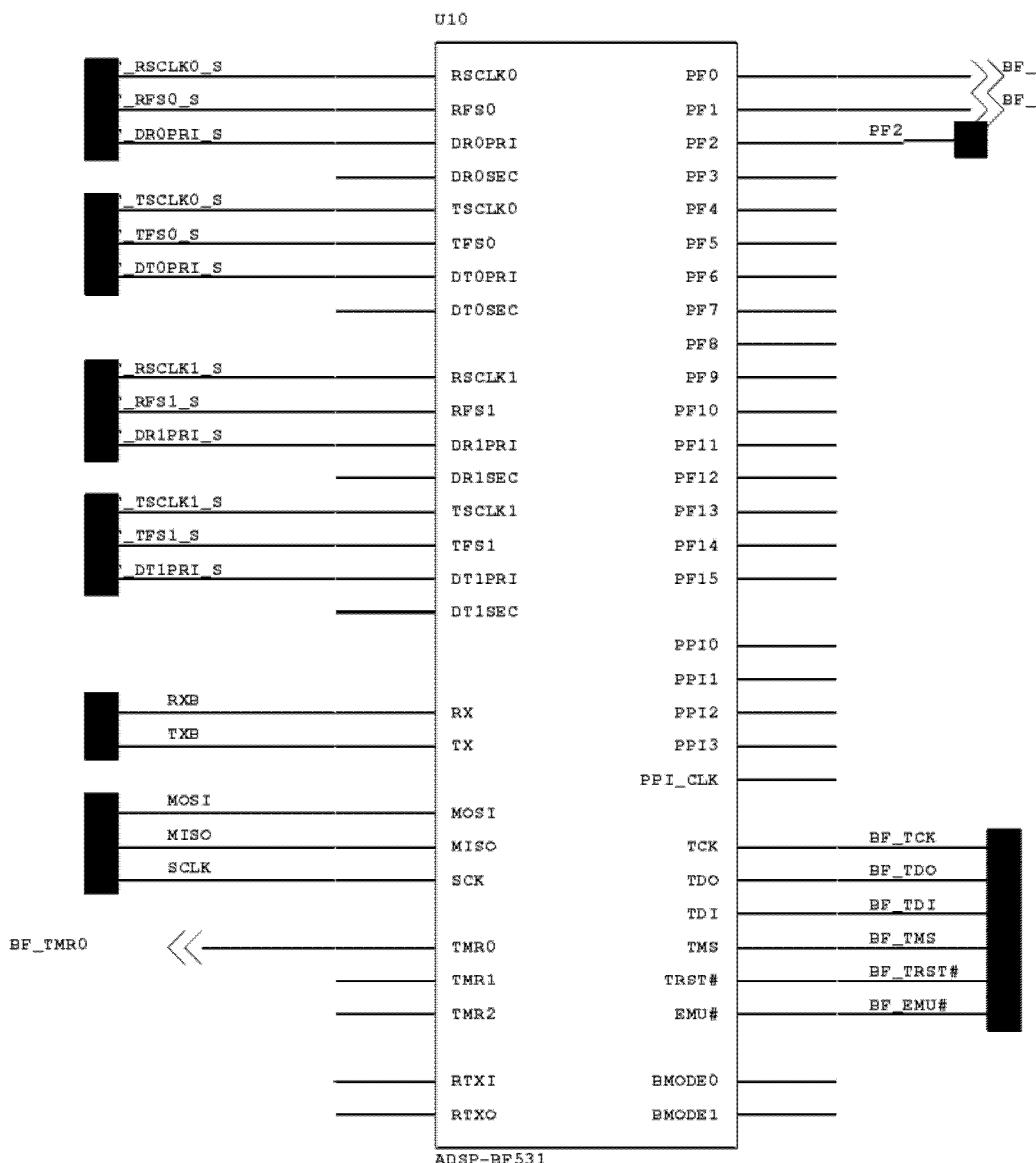


图 15