

第9章 光敏传感器



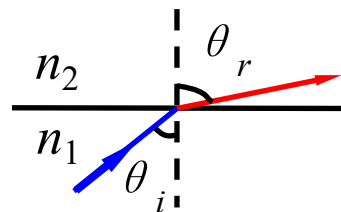
光敏传感器中典型的是**光纤传感器**(FOS, Fiber Optical Sensor)是20世纪70年代中期发展起来的一种基于**光导纤维**的新型传感器。它是光纤和光通信技术迅速发展的产物，它与以电为基础的传感器有本质区别。

光纤传感器用**光**作为敏感信息的**载体**，用**光纤**作为传递敏感信息的**媒质**。因此，它同时具有**光纤**及**光学**测量的特点。

- ①电绝缘性能好。
- ②抗电磁干扰能力强。
- ③非侵入性。
- ④高灵敏度。
- ⑤容易实现对被测信号的远距离监控。

光纤传感器可测量**温度**、**位移**、**速度**、**加速度**、**液位**、**应变**、**压力**、**流量**、**振动**、**电流**、**电压**、**磁场**等物理量

一、光导纤维导光的基本原理



(a)光的折射示意图



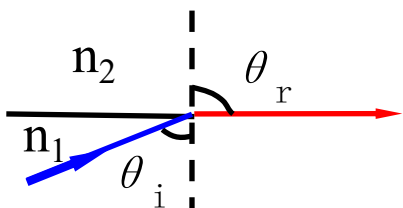
光是一种电磁波,一般采用波动理论来分析导光的基本原理。然而根据光学理论指出:在尺寸远大于波长而折射率变化缓慢的空间,可以用“光线”(即几何光学)的方法来分析光波的传播现象,这对于光纤中的多模光纤是完全适用的。为此,采用几何光学的方法来分析。

1、斯乃尔定理 (Snell's Law)

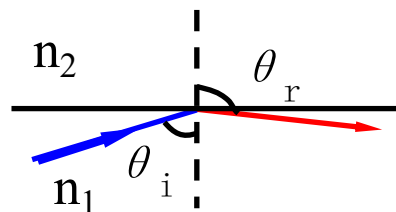
如图(a),当光由光密物质(折射率大)入射至光疏物质时(折射率 $n_1 >$ 折射率 n_2),发生折射,其折射角 θ_r 大于入射角 θ_i ,即 $\theta_r > \theta_i$ 。

n_1 、 n_2 、 θ_r 、 θ_i 之间的数学关系为:	$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r$
---	---

可见,入射角 θ_i 增大时,折射角 θ_r 也随之增大,且始终 $\theta_r > \theta_i$ 。



(b)临界状态示意图



(c)光全反射示意图

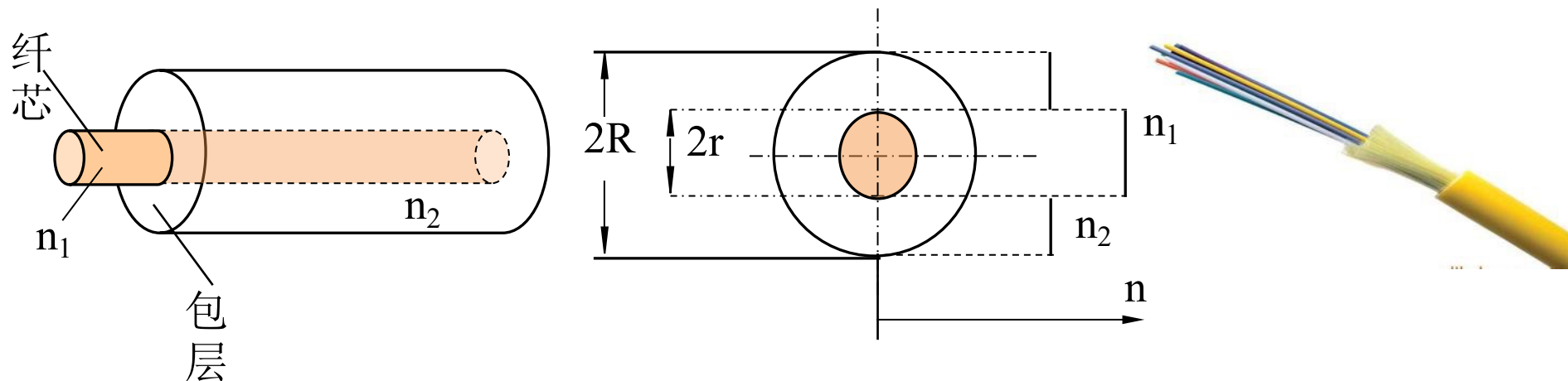
如图(b)，当 $\theta_r=90^\circ$ 时， θ_i 仍 $< 90^\circ$ ，此时，**出射光线沿界面传播**，称为**临界状态**。这时有： **$\sin \theta_r = \sin 90^\circ = 1$**

临界角表示为 θ_{i0} ，则有： **$\sin \theta_{i0} = n_2/n_1$**

$$\theta_{i0} = \arcsin(n_2/n_1)$$

如图(c)，当**入射角** $\theta_i >$ **临界角** θ_{i0} 并继续增大时，则 $\theta_r > 90^\circ$ ，此时发生**全反射**现象，其**出射光**不再折射而**全部反射**回来。

2、光纤结构

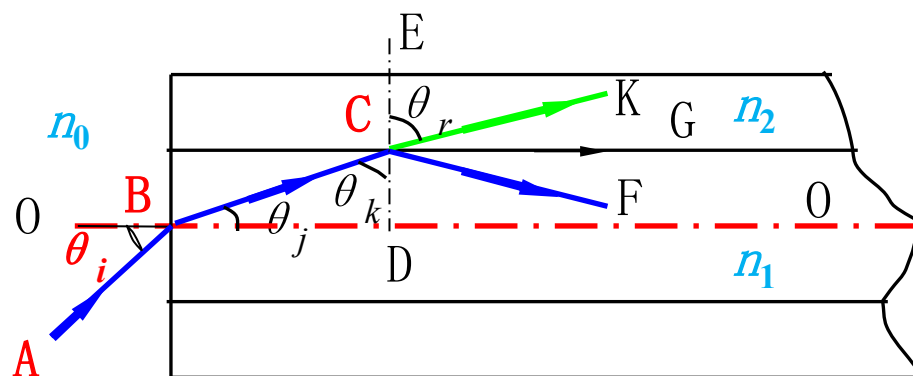


光纤结构

分析光纤**导光原理**，除了应用**斯乃尔定理**外还须结合**光纤结构**来说明。光纤呈**圆柱形**，它由**玻璃纤维芯** (纤芯) 和**玻璃包层**两个同心圆柱的双层结构组成。

纤芯位于光纤的中心部位，**光**主要在这里传输。**纤****心****折射率** n_1 比**包层折射率** n_2 稍大些。两层之间形成良好的**光学界面**，光线在这个界面上**反射**传播。

3、光纤导光原理及数值孔径 NA



光纤导光示意图

如图， n_0 为入射光线AB所在空间的折射率（一般为空气时 $n_0 \approx 1$ ）， n_1 为纤芯折射率， n_2 为包层折射率，入射光线AB与纤维轴线00相交角为 θ_i ，入射后折射（折射角为 θ_j ）至纤芯与包层界面C点，与C点界面法线DE成 θ_k 角，并由界面折射至包层，CK与DE夹角为 θ_r 。则：

$$\begin{aligned} n_0 \sin \theta_i &= n_1 \sin \theta_j \\ n_1 \sin \theta_k &= n_2 \sin \theta_r \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sin \theta_i &= (n_1/n_0) \sin \theta_j \\ \sin \theta_k &= (n_2/n_1) \sin \theta_r \end{aligned}$$

因为 $\theta_j = 90^\circ - \theta_k$ 所以：

$$\sin \theta_i = \frac{n_1}{n_0} \sin(90^\circ - \theta_k) = \frac{n_1}{n_0} \cos \theta_k = \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \sin^2 \theta_k}$$

$$\sin \theta_i = \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \sin \theta_r \right)^2} = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2 \sin^2 \theta_r}$$

n_0 为入射光线AB所在空间的折射率，
一般为空气，故 $n_0 \approx 1$ ，当 $n_0 = 1$ 时：

$$\sin \theta_i = \sqrt{n_1^2 - n_2^2 \sin^2 \theta_r}$$

当 $\theta_r = 90^\circ$ 的临界状态时， $\theta_i = \theta_{i0}$ 所以有： $\sin \theta_{i0} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

则 $\sin \theta_{i0}$ 为“数值孔径” NA (Numerical Aperture)。由于 n_1 与 n_2 相差较小，即 $n_1 + n_2 \approx 2n_1$ ，故又可因式分解为

$$\sin \theta_{i0} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad \Delta = (n_1 - n_2)/n_1 \text{ 称为相对折射率差。}$$

当 $\theta_r = 90^\circ$ 时， $\sin \theta_{i0} = \text{NA}$ $\theta_{i0} = \arcsin \text{NA}$

当 $\theta_r > 90^\circ$ 时，光线发生全反射，则： $\theta_i < \arcsin \text{NA}$

当 $\theta_r < 90^\circ$ 时， $\sin \theta_i > \text{NA}$ ， $\theta_i > \arcsin \text{NA}$ ，光线消失。

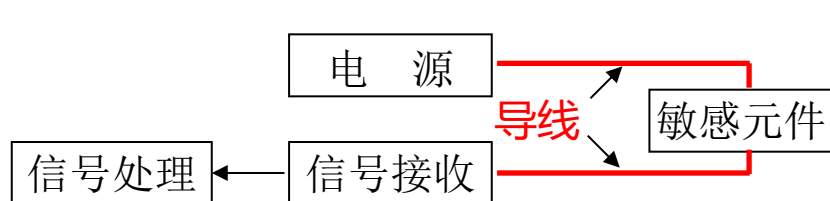
这说明 $\arcsin \text{NA}$ 是一临界角，只有入射角 $\theta_i < \arcsin \text{NA}$ 的光线才可进入光纤被全反射传播；相反，凡入射角 $\theta_i > \arcsin \text{NA}$ 的那些光线进入光纤都不能传播而在包层消失。

作为传感器的光纤， $0.2 \leq \text{NA} \leq 0.4$ ， $11.5^\circ \leq \theta_i \leq 23.5^\circ$

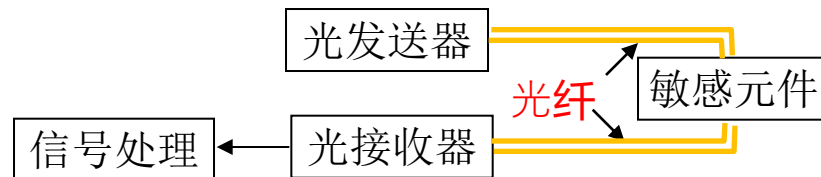
二、光纤传感器结构原理及分类



1、光纤传感器结构原理



(a) 传统传感器



(b) 光纤传感器

如图(a)，前面各章中以电为基础的传统传感器是一种把测量的状态转变为可测的电信号的装置。它的电源、敏感元件、信号接收和处理系统以及信息传输均用金属导线连接。

*光纤传感器则是一种把被测量的状态转变为可测的光信号的装置。如图(b)，由光发送器、敏感元件(光纤或非光纤的)、光接收器、信号处理系统以及光纤构成。

由光发送器发出的光经光纤引导至敏感元件。这时，光的某一性质受到被测量的调制，已调制的光经接收光纤耦合到光接收器，使光信号变为电信号，最后经信号处理得到所期待的被测量。

可见, 光纤传感器与以电为基础的传统传感器相比较, 在测量原理上有本质的差别。传统传感器是以机-电测量为基础, 而光纤传感器则以光学测量为基础。

光是一种电磁波, 其波长从极远红外的1mm到极远紫外线的10nm。它的物理作用和生物化学作用主要因其中的电场而引起。

因此, 讨论光的敏感测量必须考虑光的电矢量 E 的振动, 即:

$$E = A \sin(\omega t + \phi)$$

A ——电场 E 的振幅矢量; ω ——光波的振动频率;

ϕ ——光相位; t ——光的传播时间。

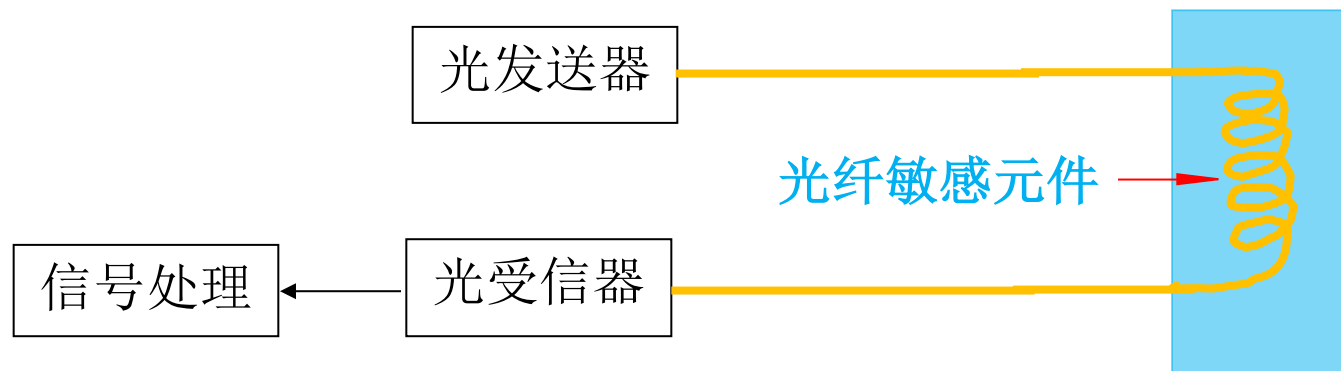
只要使光的强度、偏振态(矢量 A 的方向)、频率和相位等参量之一随被测量状态的变化而变化或受被测量调制, 那么, 通过对光的强度调制、偏振调制、频率调制或相位调制等进行解调, 获得所需要的被测量的信息。

2、光纤传感器的分类

传感器		光学现象	被测量	光纤	分类
干涉型	相位调制光线传感器	干涉（磁致伸缩）	电流、 磁场	SM、PM	a
		干涉（电致伸缩）	电场、电压	SM、PM	a
		Sagnac效应	角速度	SM、PM	a
		光弹效应	振动、压力、加速度、位移	SM、PM	a
		干涉	温度	SM、PM	a
非干涉型	强度调制光纤温度传感器	遮光板遮断光路	温度、振动、压力、加速度、位移	MM	b
		半导体透射率的变化	温度	MM	b
		荧光辐射 、黑体辐射	温度	MM	b
		光纤微弯损耗	振动、压力、加速度、位移	SM	b
		振动膜或液晶的反射	振动、压力、位移	MM	b
		气体分子吸收	气体浓度	MM	b
		光纤漏泄膜	液位	MM	b
	偏振调制光纤温度传感器	法拉第效应	电流、 磁场	SM	b,a
		泡克尔斯效应	电场、电压、	MM	b
		双折射变化	温度	SM	b
型	频率调制光纤温度传感器	光弹效应	振动、压力、加速度、位移	MM	b
		多普勒效应	速度、流速、振动、加速度	MM	c
		受激喇曼散射	气体浓度	MM	b
		光致发光	温度	MM	b

注：MM多模；SM单模；PM偏振保持；a,b,c功能型、非功能型、拾光型

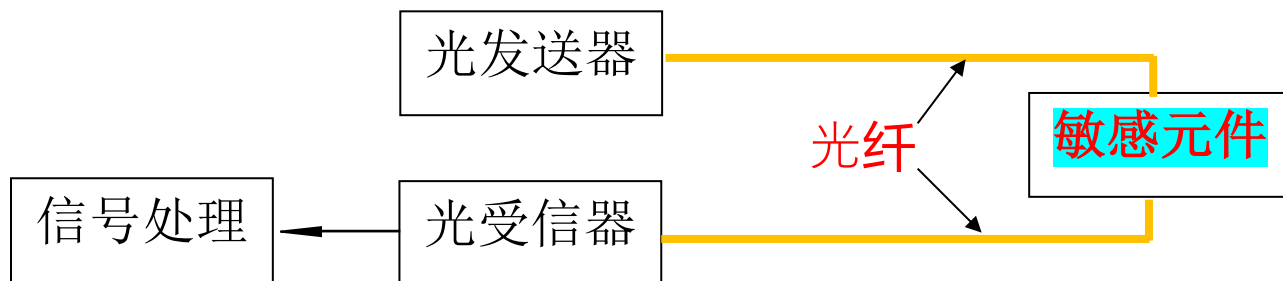
(1) 根据光纤在传感器中的作用



光纤传感器分为**功能型**、**非功能型**和**拾光型**三大类。

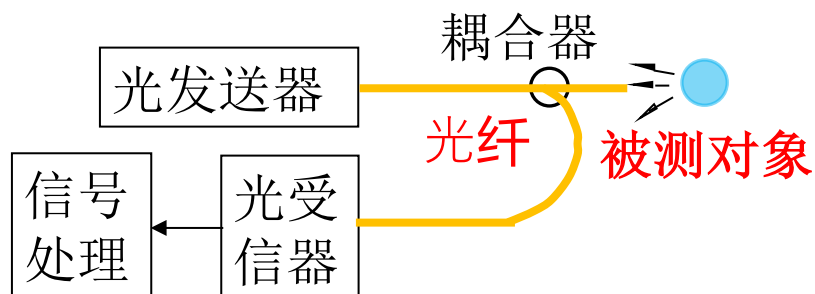
1) **功能型**（全光纤型）光纤传感器

利用对外界信息具有敏感能力和检测能力的**光纤**(或**特殊光纤**)作传感元件，将“**传**”和“**感**”**合为一体**的**传感器**。光纤不仅起**传光**作用，而且还利用**光纤**在外界因素(弯曲、**相变**)的作用下，其光学特性(光强、相位、**偏振态**等)的**变化**来**实现**“**传**”和“**感**”的功能。因此，传感器中光纤是连续的。由于光纤连续，增加其**长度**，可提高灵敏度。



2) 非功能型（或称传光型）光纤传感器

光纤仅起导光作用，只“传”不“感”，对外界信息的“感觉”功能依靠其他物理性质的功能元件完成。光纤不连续。此类光纤传感器无需特殊光纤及其他特殊技术，比较容易实现，成本低。但灵敏度也较低，用于对灵敏度要求不太高的场合。



3) 拾光型光纤传感器

用光纤作为探头，接收由被测对象辐射的光或被其反射、散射的光。其典型例子如：光纤激光多普勒速度计、辐射式光纤温度传感器等。



(2) 根据光受被测对象的调制形式



形式：强度调制型、偏振调制、频率调制、相位调制。

1) 强度调制型光纤传感器

是一种利用被测对象的变化引起敏感元件的折射率、吸收或反射等参数的变化，而导致光强度变化来实现敏感测量的传感器。具体有：利用光纤的微弯损耗；各物质的吸收特性；振动膜或液晶的反射光强度的变化；物质因各种粒子射线或化学、机械的激励而发光的现象；以及物质的荧光辐射或光路的遮断等来构成压力、振动、温度、位移、气体等各种强度调制型光纤传感器。

优点：结构简单、容易实现，成本低。

缺点：受光源强度波动和连接器损耗变化等影响较大。

2) 偏振调制光纤传感器

是一种利用光偏振态变化来传递被测对象信息的传感器。具体有：利用光在磁场中媒质内传播的法拉第效应做成的电流、磁场传感器；利用光在电场中的压电晶体内传播的泡尔效应做成的电场、电压传感器；利用物质的光弹效应构成的压力、振动或声传感器；以及利用光纤的双折射性构成温度、压力、振动等传感器。

这类传感器可以避免光源强度变化的影响，因此，灵敏度高。



3) 频率调制光纤传感器

是一种利用单色光射到被测物体上反射回来的光的频率发生变化来进行监测的传感器。具体有：利用运动物体反射光和散射光的多普勒效应的光纤速度、流速、振动、压力、加速度传感器；利用物质受强光照时的喇曼散射构成的测量气体浓度或监测大气污染的气体传感器；以及利用光致发光的温度传感器等。



4) 相位调制光纤传感器



其基本原理是利用被测对象对敏感元件的作用，使敏感元件的折射率或传播常数发生变化，而导致光的相位变化，使两束单色光所产生的干涉条纹发生变化，通过检测干涉条纹的变化量来确定光的相位变化量，从而得到被测对象的信息。

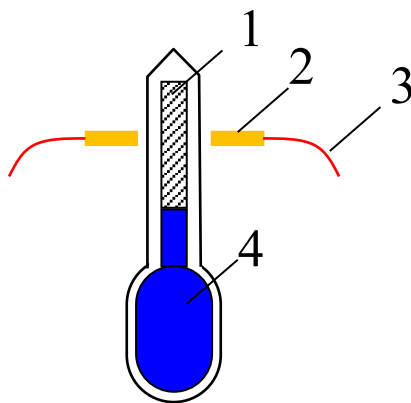
具体有：利用光弹效应的声、压力或振动传感器；利用磁致伸缩效应的电流、磁场传感器；利用电致伸缩的电场、电压传感器以及利用光纤赛格纳克（Sagnac）效应的旋转角速度传感器（光纤陀螺仪）等。这类传感器的灵敏度很高。但由于须用特殊光纤及高精度检测系统，因此成本高。

三、光纤传感器的应用

(一) 温度的检测

光纤温度传感器有功能型和传光型两种。

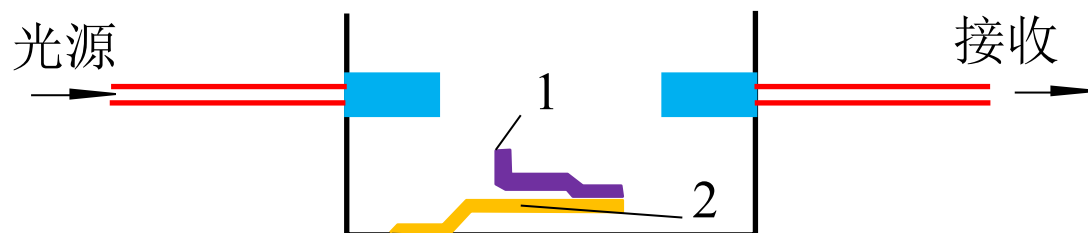
1、遮光式光纤温度计



1-浸液；2-自聚焦透镜；3-光纤；4-水银

水银柱式光纤温度开关

如图，是一种简单的利用温度变化使水银柱升降的光纤温度开关。可用于对设定温度的控制，温度设定值灵活可变。



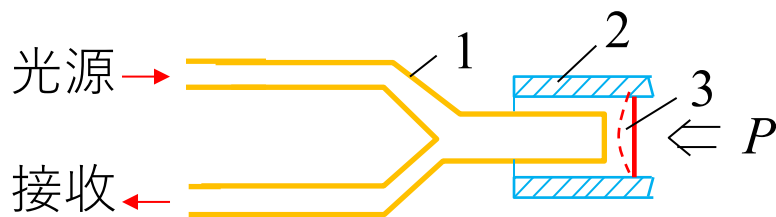
1-遮光板；2-双金属片

热双金属式光纤温度开关

如图为利用**双金属热变形**的遮光式光纤温度计。当温度升高时，双金属片的变形量增大，带动**遮光板**在垂直方向产生**位移**从而使输出**光强发生变化**。这种形式的光纤温度计能测量 **$10^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$** 的温度。检测精度约为 **$0.5^{\circ}\text{C}$** 。

它的缺点是输出**光强**受**壳体振动**的影响，且响应时间较长，一般需几分钟。

(二) 压力的检测



1-Y形光纤束；2-壳片；3-膜片
膜片反射式光纤压力传感器示意图

1、采用弹性元件的光纤压力传感器

如图为简单的利用Y形光纤束的膜片反射型光纤压力传感器。利用弹性体的受压变形，将压力信号转换成位移信号，从而对光强进行调制。因此，只要设计好合理的弹性元件及结构，就可以实现压力的检测。

在Y形光纤束前端放置一感压膜片，当膜片受压变形时，使光纤束与膜片间的距离发生变化，从而使输出光强受到调制。

弹性膜片材料是恒弹性金属，如：殷钢、铍青铜等。但金属材料的弹性模量有一定的温度系数，因此，要考虑温度补偿。若选用石英膜片，则可减小温度的影响。

膜片的安装采用周边固定，焊接到外壳上。对于不同的测量范围，可选择不同的膜片尺寸。一般膜片的厚度在0.05mm~0.2mm之间为宜。对于周边固定的膜片，在小挠度($y < 0.5t$, t 为膜片厚度)的条件下，膜片的中心挠度 y 为：

$$y = \frac{3(1 - \mu^2)R^4}{16Et^3} p$$

R —膜片有效半径；

t —膜片厚度；

p —外加压力；

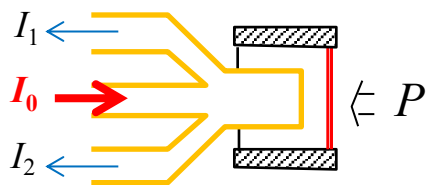
E —膜片材料的弹性模量；

μ —为膜片的泊松比。

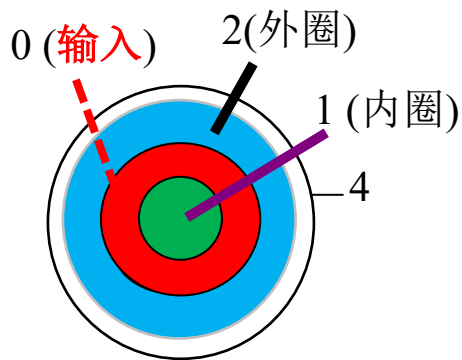


可见，在一定范围内，膜片中心挠度与所加的压力呈线性关系。若利用Y形光纤束检测位移特性的线性区，则传感器的输出光功率亦与待测压力呈线性关系。

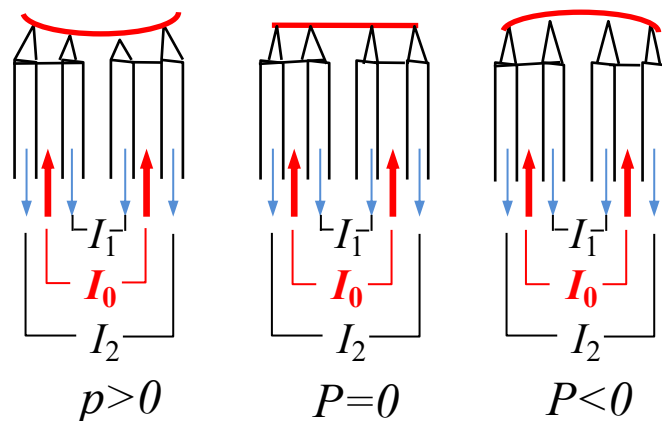
这种传感器结构简单、体积小、使用方便，但如果光源不稳定或长期使用后膜片的反射率下降，影响其精度。



(a)传感器结构



(b)探头截面结构



(c)测量原理

如图(a), **改进型**的膜片反射式光纤压力传感器的结构。这里采用了特殊结构的光纤束, 光纤束的一端分成**三束**, 其中一束为**输入光纤**, 两束为**输出光纤**。

如图(b), 三束光纤在**另一端结合成一束**, 并且在**端面成同心环**排列分布。其中最里面一圈“1”为**输出光纤束**, 中间一圈“0”为**输入光纤束**, 外面一圈“2”为**输出光纤束**。

如图(c)中间图, 当**压差**为零时, 膜片不变形, 反射到两束输出光纤的**光强相等**, 即 $I_1 = I_2$ 。当膜片**受压变形**后, 使得处于**里面一圈**的**光纤束1**接收到的反射光强减小, 而处于**外面一圈**的**光纤束2**接到的反射光强增大, 形成**差动输出**。

两束输出光的光强之比为:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{1 + Ap}{1 - Ap}$$


A ——与膜片尺寸、材料及输入光纤束数值孔径等有关常数;
 p ——待测量压力。

可见, 输出光强比 I_2 / I_1 与膜片的反射率、光源强度等因素均无关, 因而可有效地消除这些因素的影响。

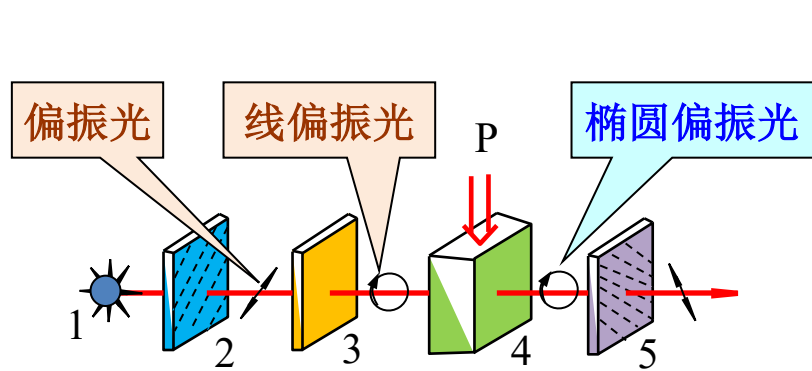
将上式两边取对数且满足 $(Ap)^2 \leq 1$ 时, 等式右边展开后取第一项, 得到:

$$\ln \frac{I_2}{I_1} = \frac{p}{2A}$$

这表明待测压力与输出光强之比的对数呈线性关系。因此, 若将 I_1 、 I_2 检出后分别经对数放大后, 再通过减法器即可得到线性的输出。

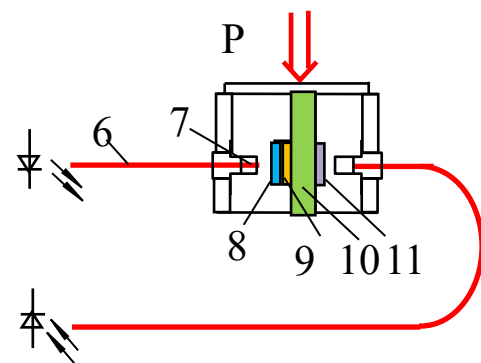
若选用的光纤束中每根光纤的芯径为 $70\mu\text{m}$, 包层厚度为 $3.5\mu\text{m}$, 纤芯和包层折射率分别为 1.52 和 1.62, 则该传感器可获得 115dB 的动态范围, 线性度为 0.25%。采用不同的尺寸、材料的膜片, 即可获得不同的测量范围。

2、光弹性式光纤压力传感器



1-光源；2-起偏器；3-“1/4波长板”；
4-光弹性元件；5-检偏器

(a)检测原理

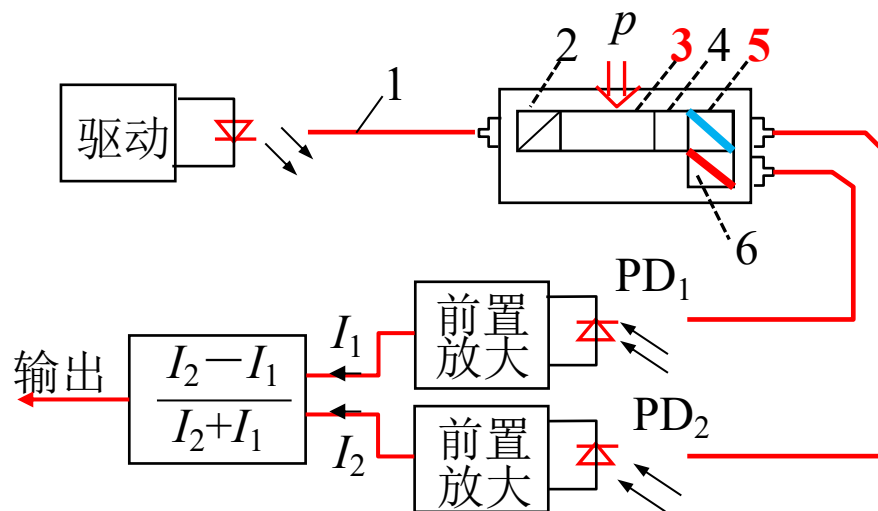


6-光纤；7-自聚焦透镜；
8-起偏器；9-“1/4波长板”；
10-光弹性元件；11-检偏器

(b)传感器结构

晶体在受到压力后其折射率发生变化，呈现双折射的现象称为光弹性效应。如图，利用光弹性效应测量压力的原理及传感器结构。

发自LED的入射光经起偏器后成为直线偏振光。当有与入射光偏振方向呈 45° 的压力作用于晶体时，使晶体呈双折射，从而使出射光成为椭圆偏振光，由检偏器检测出与入射光偏振方向相垂直方向上的光强，即可测出压力的变化。其中，“1/4波长板”用于提供“偏置”，使系统获得最大灵敏度。



1-光纤； 2-起偏器； 3-光弹性元件；
4-“1/4波长板”； 5-偏振分光镜； 6-反射镜

光弹性式光纤压力传感器的另一种结构

为了提高传感器的精度和稳定性，如图，为另一种检测方法的结构。

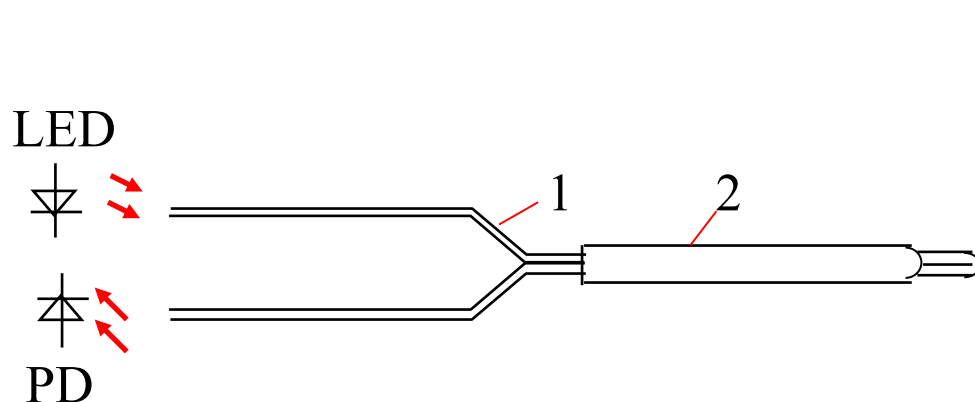
输出光用偏振分光镜分别检测出两个相互垂直方向的偏振分量；并将这两个分量经“差/和”电路处理，即可得到与光源强度及光纤损耗无关的输出。该传感器的测量范围为 $10^3\text{Pa} \sim 10^6\text{Pa}$ ，精度为 $\pm 1\%$ ，理论上分辨力可达 1.4Pa 。

这种结构的传感器在光弹性元件上加上质量块后，也可用于测量振动、加速度。

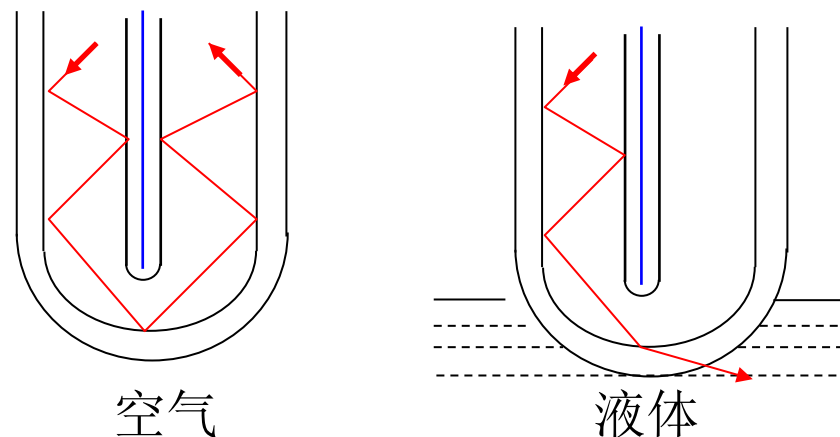
(三) 液位、流量、流速的检测

1、液位的检测技术

(1) 球面光纤液位传感器



(a) 探头结构



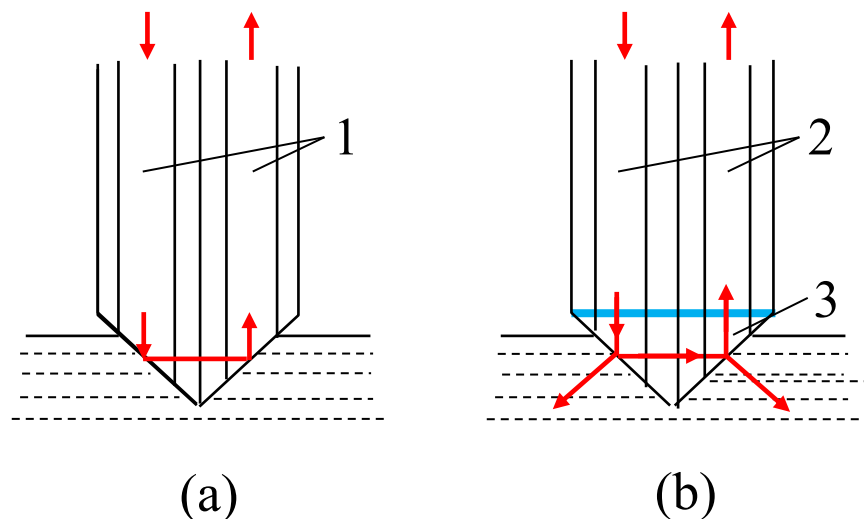
(b) 检测原理

光由光纤的一端输入,在球状对折端部一部分光透射出去,而另一部分光反射回来,由光纤的另一端导向探测器。

反射光强的大小取决于被测介质的折射率。被测介质的折射率与光纤折射率越接近,反射光强度越小。显然,传感器处于空气中时比处于液体中时的反射光强要大。

因此,该传感器可用于液位报警。若以探头在空气中时的反射光强为基准,再根据接触水时反射光强变化 $-6\text{dB} \sim -7\text{dB}$,接触油时变化 $-25\text{dB} \sim -30\text{dB}$,即可判定液位变化。

(2) 斜端面光纤液位传感器

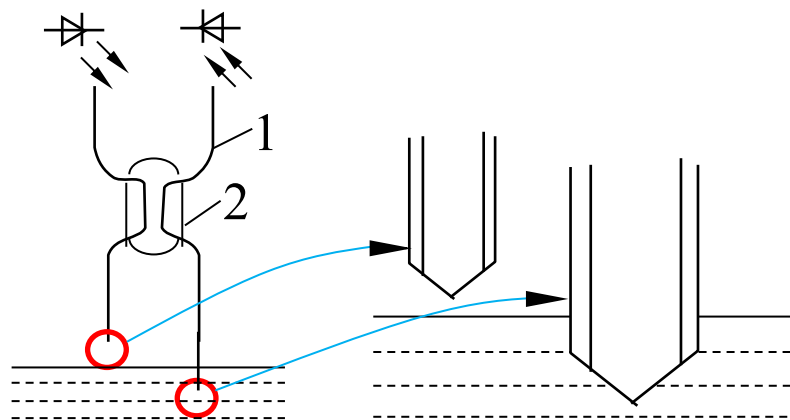


1、2-光纤；3-棱镜

斜面反射式光纤液位传感器

如图为反射式斜端面光纤液位传感器的两种结构。同样，当传感器接触液面时，将引起反射回另一根光纤的光强减小。这种形式的探头分别在空气中和水中时，反射光强差约在20dB以上。

(3) 单光纤液位传感器



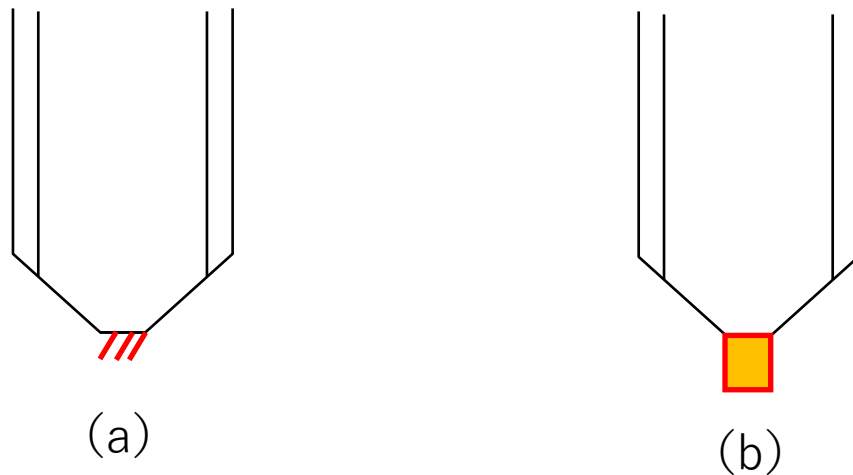
1-光纤；2-耦合器
单光纤液位传感器结构

单光纤液位传感器的结构如图所示，将光纤的端部抛光成45°的圆锥面。

当光纤处于空气中时，入射光大部分能在端部满足全反射条件而返回光纤。

当传感器接触液体时，由于液体的折射率比空气大，使一部分光不能满足全反射条件而折射入液体中，返回光纤的光强就减小。

利用X形耦合器即可构成具有两个探头的液位报警传感器。同样，若在不同的高度安装多个探头，则能连续监视液位的变化²⁵



改进的光纤液位探头

前面讲述的探头在接触液面时能快速响应，但在探头离开液体时，由于有液滴附着在探头上，故不能立即响应。

为了克服这个缺点，可将探头的结构作一些改变，如图所示。

将光纤端部的尖顶略微磨平，并镀上反射膜。这样，即使有液体附着在顶部，也不影响输出跳变。进一步的改进是在顶部镀反射膜外粘上一突出物，将附着的液体导引向突出物的下端。这样，可以保证探头在离开液位时也能快速地响应。

2、流量、流速的检测

(1) 光纤涡街流量计

当一个非流线体置于流体中时，在某些条件下会在液流的下游产生有规律的旋涡。这种旋涡将会在该非流线体的两边交替地离开。当每个旋涡产生并泻下时，会在物体壁上产生侧向力。这样，周期产生的旋涡将使物体受到一个周期的压力。若物体具有弹性，它便会产生振动，振动频率近似地与流速成正比。即振动频率为：

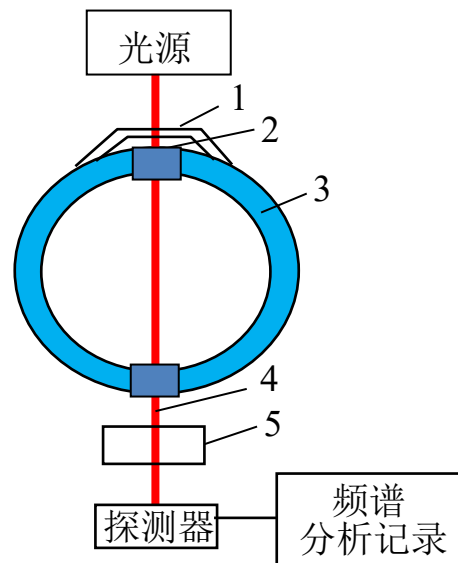
$$f = sv / d$$

式中： v ——流体的流速；

d ——物体相对于液流方向的横向尺寸；

s ——与流体有关的无量纲常数。

因此，通过检测物体的振动频率便可测出流体的流速。光纤涡街流量计便是根据这个原理制成的。



1-夹具；2-密封胶；3-液体流管；4-光纤；5-张力载荷

光纤涡街流量计便是根据这个原理制成的，其结构如图所示。

在横贯流体管道的中间装有一根绷紧的多模光纤，当流体流动时，光纤就发生振动，其振动频率近似与流速成正比。由于使用的是多模光纤，故当光源采用相干光源（如激光器）时，其输出光斑是模式间干涉的结果。

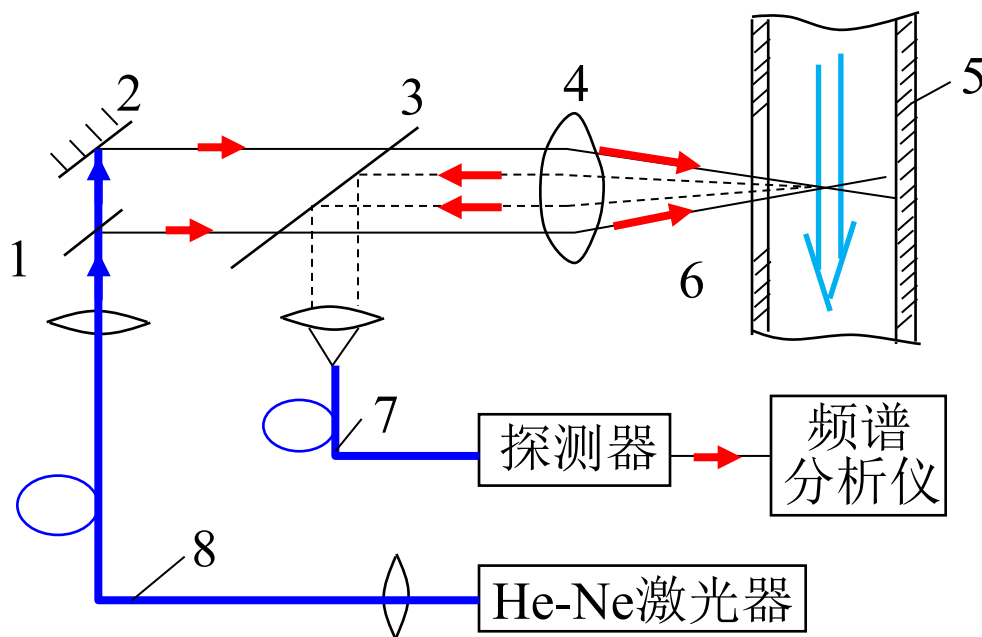
当光纤固定时，输出光斑花纹稳定。当光纤振动时，输出光斑亦发生移动。

对于处于光斑中某个固定位置的小型探测器，光斑花纹的移动反映为探测器接收到的输出光强的变化。

利用频谱分析，即可测出光纤的振动频率。根据实验标定得到流速值，在管径尺寸已知的情况下，即可计算出流量。

光纤涡街流量计特点：可靠性好，无任何可动部分和联接环节，对被测体流阻小，基本不影响流速。但在流速很小时，光纤振动会消失，因此存在一定的测量下限。

(2) 光纤多普勒流速计



- 1、3——分束器；
- 2——反射镜；
- 4——透镜；
- 5——流体管道；
- 6——窗口；
- 7、8——光纤

光纤多普勒流量计结构

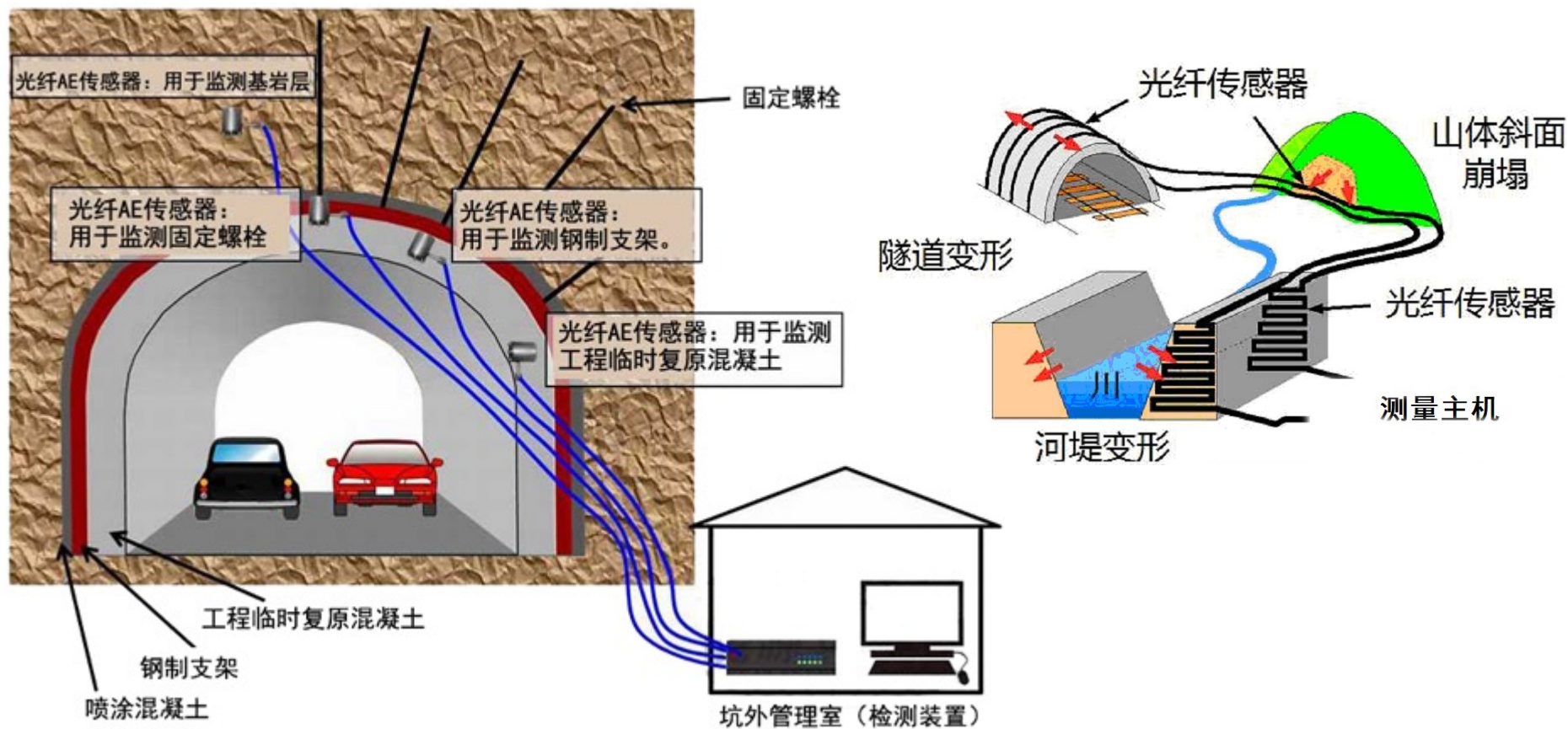
如图为利用**光纤多普勒计**来测量**流体流速**的原理。当待测流体为**气体**时，散射光将非常微弱，此时可采用大功率的**Ar激光器**（出射光功率为2W， $\lambda = 514.5\text{nm}$ ）以提高信噪比。

特点：**非接触测量**，不影响待测物体的**流动状态**。

分布式光纤测温系统



分布式光纤测温仪

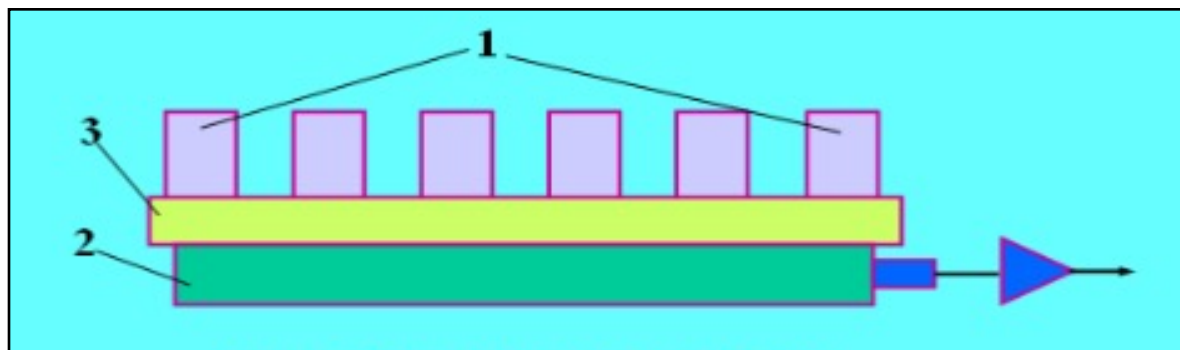


可在湿度较高或者有气体喷出危险等检测条件较差的隧道等环境中，对结构物产生的变化进行长期观测。

四. 固态图像传感器

功能上：图像传感器是一个能把受光面的光像分成许多小单元(称为像元)，并将它们转换成电信号，然后顺序输送出处的器件。

构造上：图像传感器是一种小型固态集成元件，它的核心是电荷耦合器件(CCD)。CCD由阵列式排列在衬底上金属氧化物-硅(MOS)电容器组成，它具有光生电荷、积蓄和转移电荷功能。在控制脉冲电压作用下，CCD中依次排列相邻的MOS电容中的信号电荷，将有次序地转换到下一个电容中，实现电荷并行构成。光敏元1和CCD2之间有一转换控制栅3(见图)，其中CCD作为读出移位寄存器，



线型CCD图像传感器

光敏元→MOS电容(正对着CCD上一个电容)→电荷(与光照度、积蓄时间成正比)→转移光栅打开→光敏光电荷并行移到CCD→关闭光栅→上一次一串电荷信号沿移位寄存器顺序地转换并在输出端串行出。

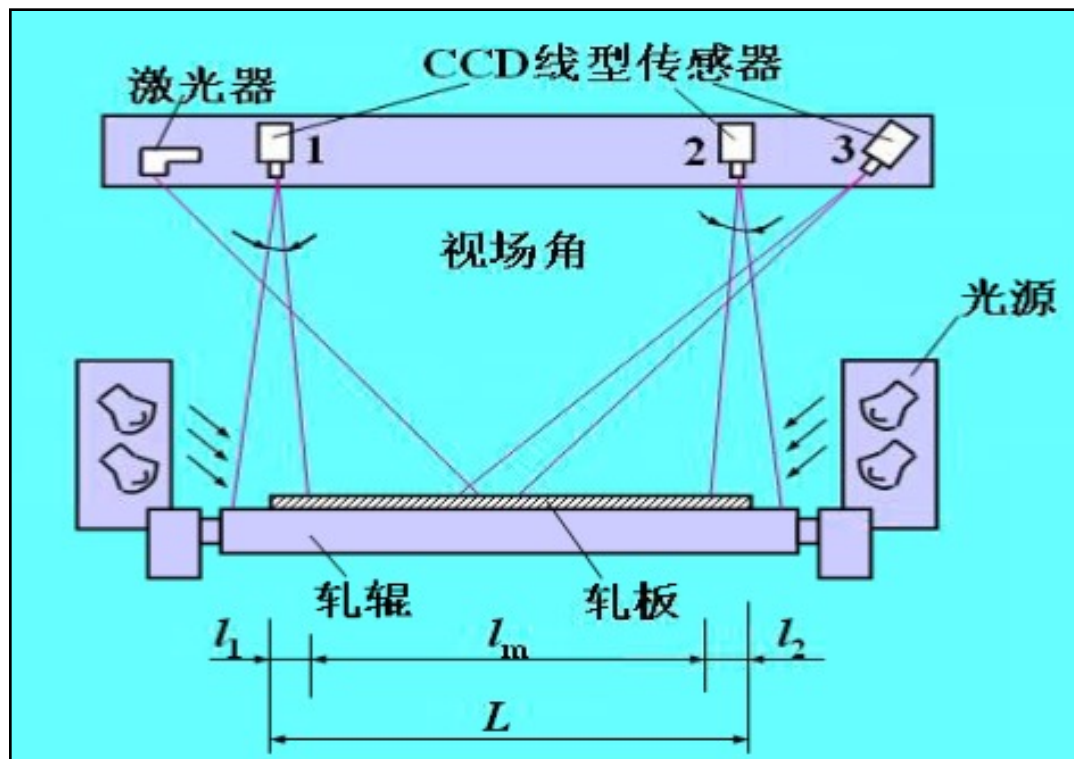
特点：小型、轻便、响应快、灵敏度高、稳定性好、寿命长。

用途：（1）物位、尺寸、形状、工件损伤等测量。
（2）光学信息处理的输入环节，如电视摄像、仿真技术、文字识别、图像识别。
（3）自动生产过程的控制敏感元件。

类型：（1）线型1024，1728，2048，4096像素
（2）面型 32*32,100*100,320*244,490*400,
以及28~38万像素

用于热轧铝板宽度检测的实例（图示）。

准确度可达板宽 $\pm 0.025\%$



热轧铝板宽度自动检测原理