

PSD(Position Sensitive Device)测距原理

(1) PSD元件

检测入射光点的位置

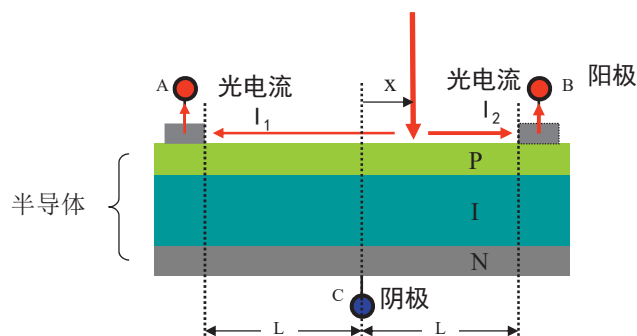
P层: A、B两电极、

N层: C电极

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{L-x}{L+x}$$

$$x = L \left(\frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2} \right)$$

: 入射光线的重心

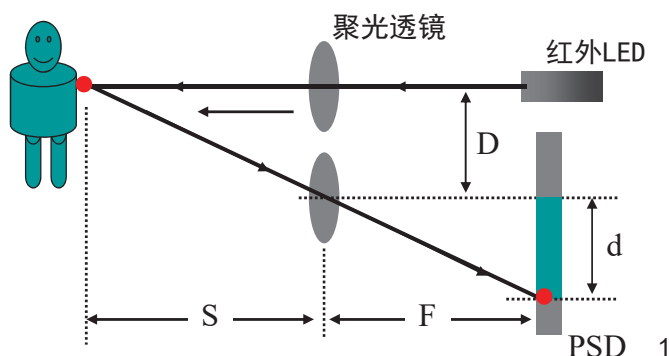


(2) PSD三角测量

已知焦距F和基线长D,

PSD输出漫反射光点的位置d

- 一> 求距离S ($S=FD/d$)
- 一> 为了提高测距灵敏度, 应如何设计D? (适当增大D)
- 一> 抗干扰光的措施?



同步积分的原理

$$y(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) \cdot \sin 2\pi f_s \tau d\tau$$

设 $T = N / f_s$

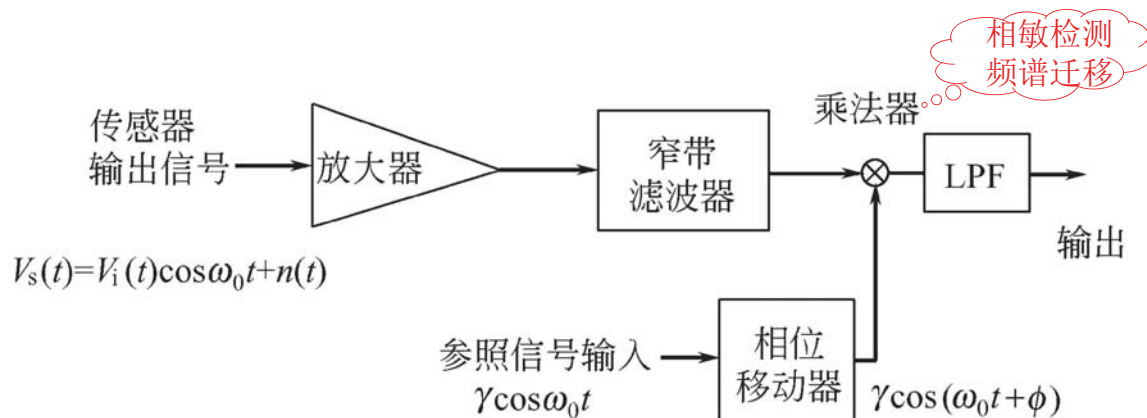
$$\begin{aligned} x(t) &= A \sin(2\pi f_s t + \theta_1) + B \sin(2\pi f_n t + \theta_2) \\ &= A \cos \theta_1 \cdot \sin 2\pi f_s t + A \sin \theta_1 \cdot \cos 2\pi f_s t + B \sin(2\pi f_n t + \theta_2) \end{aligned}$$

则 $y(t) \approx \frac{A}{2} \cos \theta_1$

接收信号与发光信号同步积分结果:

- 输出直流成分、与发光信号同频率同相成分的大小成比例。
- 主动改变 θ 角一> 调出最大输出一> 求A。 (微弱信号检测)
- A不变一> 求 θ 角; (相位差测量)

基于锁定放大器的微弱信号检测原理



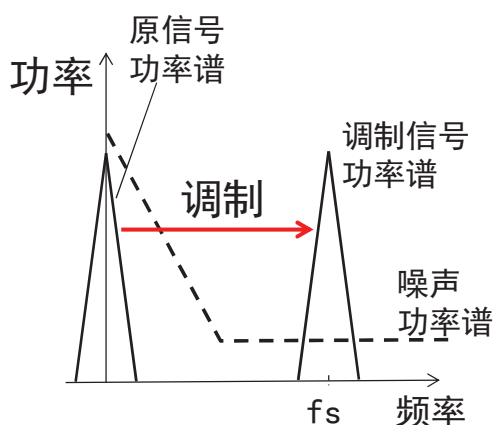
$$V_s(t) = V_i(t)\cos\omega_0 t + n(t)$$

$$V_o(t) = r\cos(\omega_0 t + \phi)(V_i(t)\cos\omega_0 t + n(t))$$

$$= r\frac{1}{2}V_i(t)[\cos\phi + \cos(2\omega_0 t + \phi)] + rn(t)\cos(\omega_0 t + \phi)$$

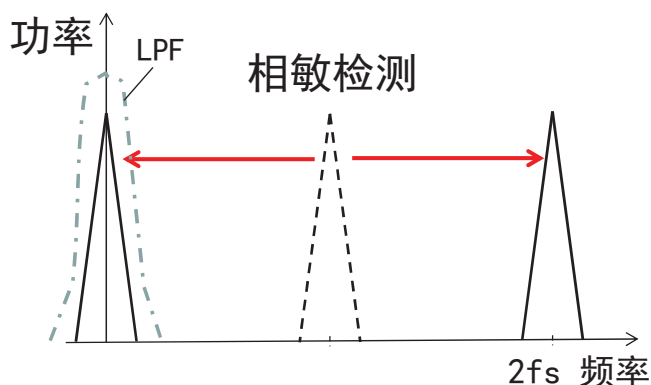
3

调制和解调信号的频谱迁移过程



(a) 调制过程

$$V_s(t) = V_i(t)\cos\omega_s t + n(t)$$



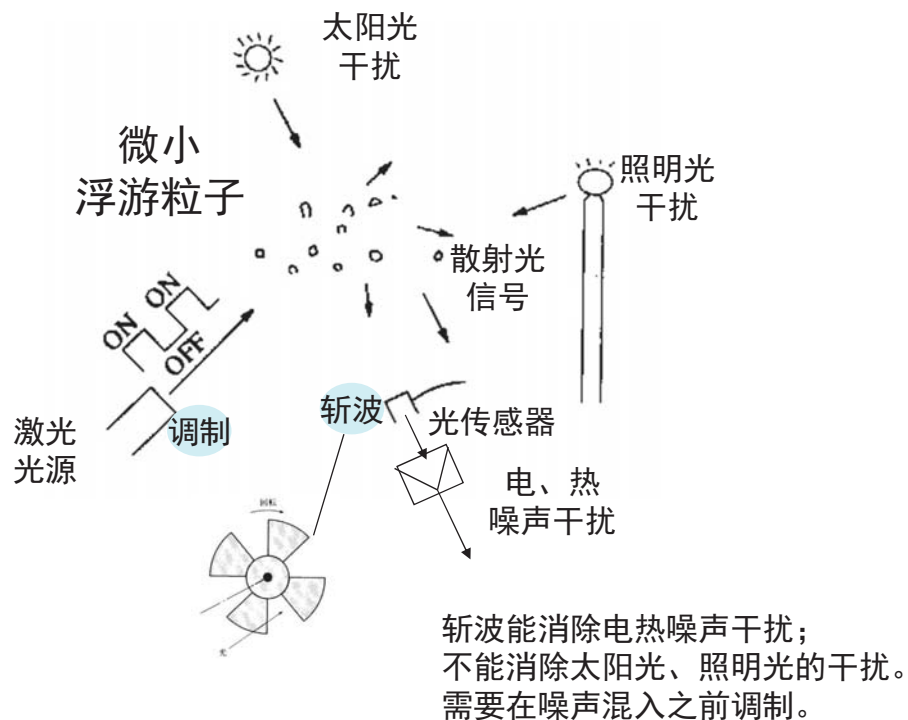
(b) 解调过程

$$V_o(t) = r\cos(\omega_s t + \phi)(V_i(t)\cos\omega_s t + n(t))$$

$$= r\frac{1}{2}V_i(t)[\cos\phi + \cos(2\omega_s t + \phi)] + rn(t)\cos(\omega_s t + \phi)$$

4

光的调制：决定调制部位



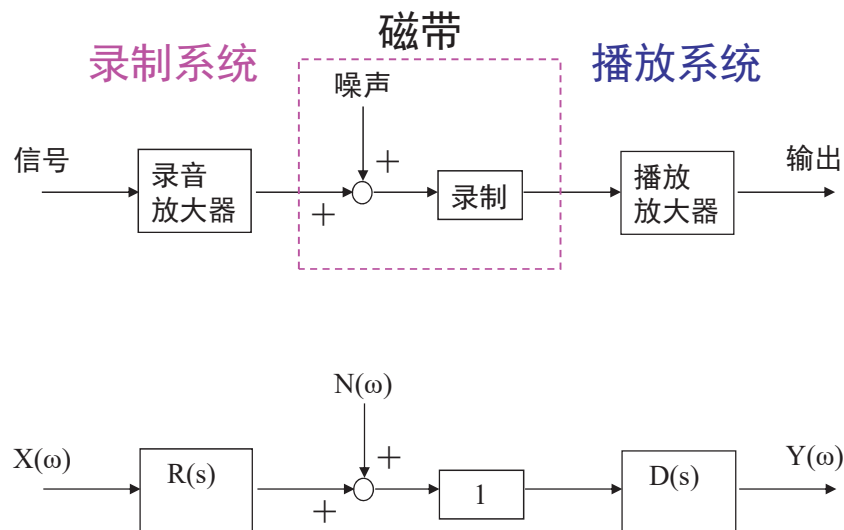
5

录制与播放系统的降噪方法

- 噪声特点：
 - 高频、与信号独立、不可避免；
 - 与信号进入的顺序不同。
- 理想的录制播放系统：
 - 信号频带域有平坦的增益特性(设Gain=1)；
 - 但尽可能抑制噪声。

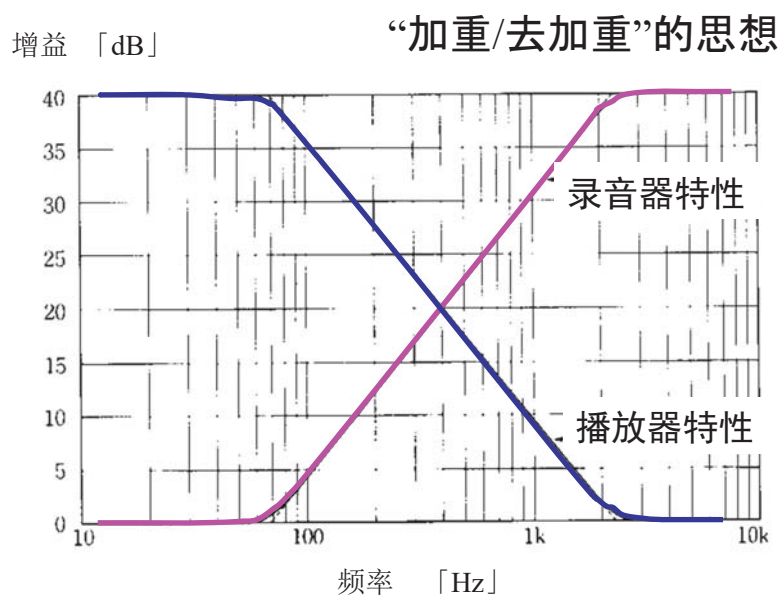
6

磁带录制与播放系统



7

杜比降噪系统各放大器的频率特性



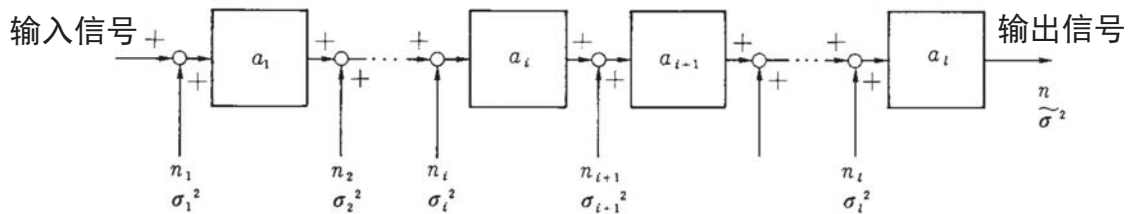
8

运放串联连接与噪声传递

运放串联：提高放大倍数

放大倍数：与放大器的串联排列顺序无关

输出噪声：与放大器的串联排列顺序有关



第*i*个放大器：放大倍数 a_i ，

内部噪声 n_i 相互独立、按 $N(0, \sigma_i^2)$ 分布

输出噪声的方差：
$$\sigma^2 = \sum_{j=1}^l \left(\prod_{k=j}^l a_k^2 \right) \sigma_j^2$$

9

思考题 6-5

(接上页)

- 使输出噪声方差最小的放大器排列顺序？

- Hint:

调换其中两个放大器、比较调换前后的输出噪声方差、求方差小的两个放大器排列顺序。依次类推。

$$\frac{(1 - 1/a_i^2)}{\sigma_i^2} \text{ 此数值大的排在前面。}$$

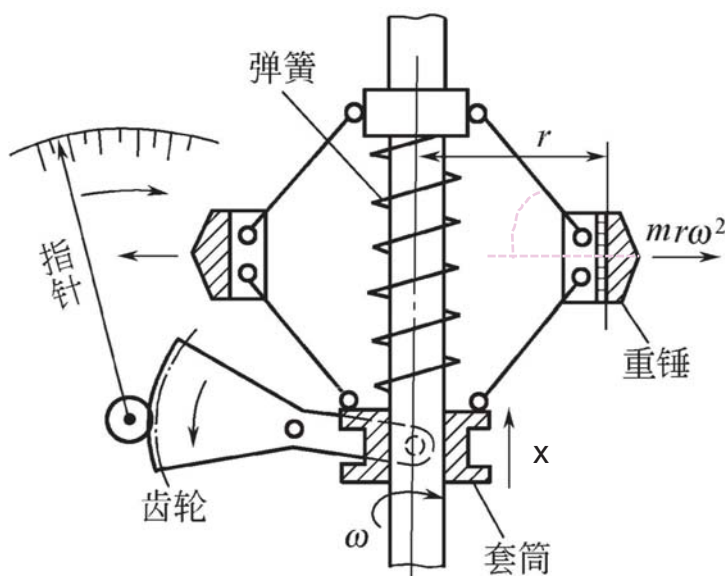
10

速度测量原理

- 离心式转速表
 - 转速码盘：光电耦合器＋光电码盘
 - 光纤陀螺角速度测量
 - MEMS陀螺仪
-
- 脉冲飞越时间法和频率计数法测速
 - 频差法和时差法测速
 - 激光测距测速法
 - 相关法测速

11

离心转速测量仪（机械方式）



应用1：转速检测

$$x = f(\omega)$$

应用2：蒸汽发动机的
自动调速

Engine governor :

套筒上升是阀门关闭方向
低速控制时：

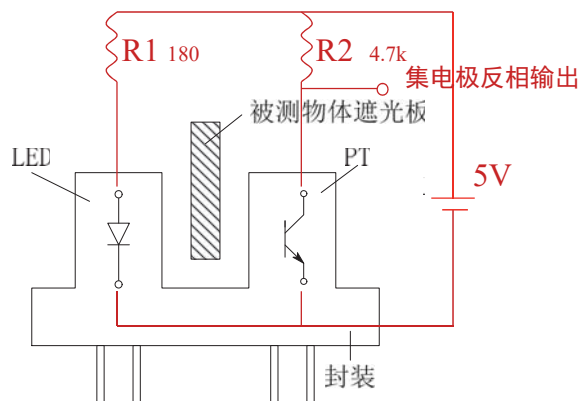
加重或者拉杆向上移；

高速控制时：

减负或者拉杆向下移。

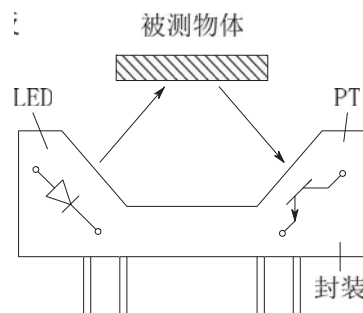
12

光电耦合器 (Photo Coupler)



(a) 透射型

输出脉冲信号；
测量转速。



(b) 反射型

接近开关；
测量至反射物体的距离
(光反射系数一定的情况下)

13

光电码盘转速测量

- 光电耦合器 + 光电码盘
- 码盘： (Absolute Encoder, Incremental Encoder)
 - 绝对码盘 - 转速, 转角, 转向
 - 增量码盘 - 转速

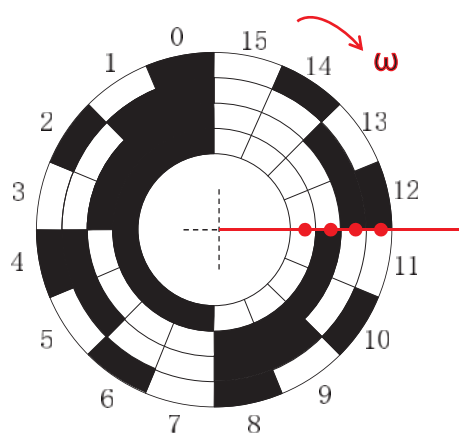
ABZ三相

- 增量码盘 **====>** 转速, 转角, 转向

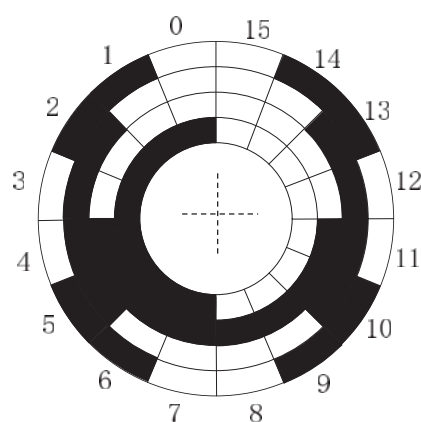
- 应用领域：电机转速测量，伺服电机

14

绝对码盘及其编码方式



(a) 二进制编码

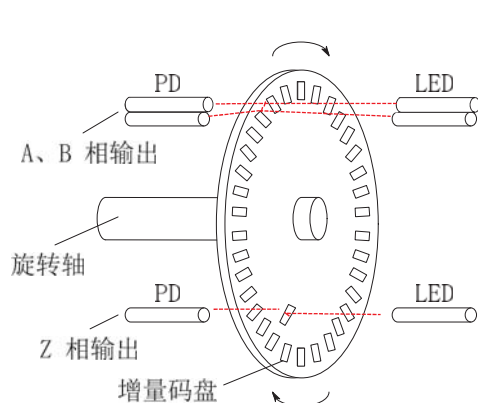


(b) 循环编码

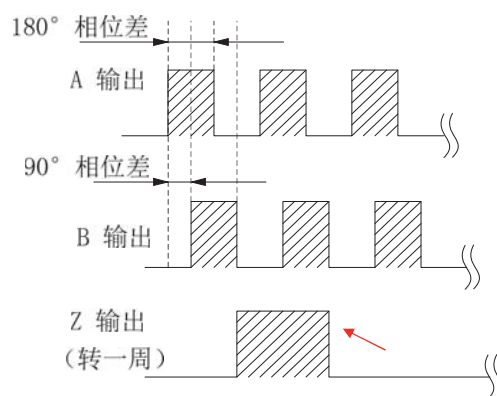
⇒ 方便校验

15

增量码盘及其改进方法



(a) 转角增量码盘

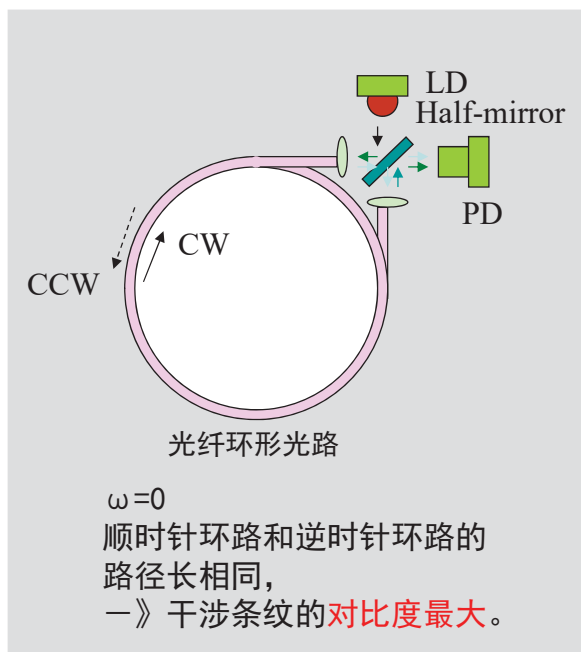


(b) A, B, Z三个输出信号的波形

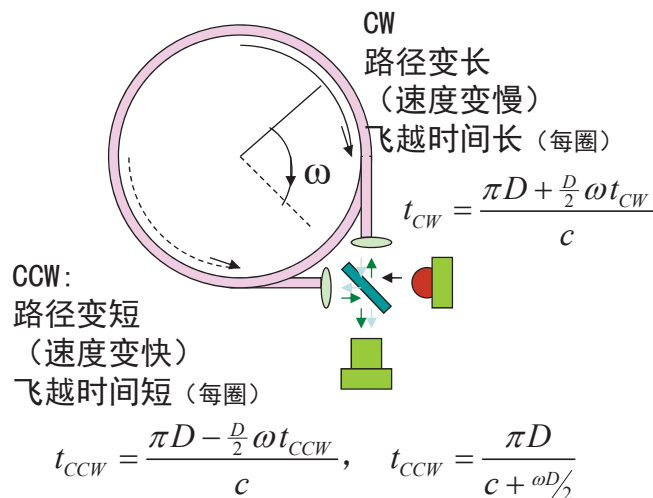
⇒ 转速、转向、绝对角度

16

光纤陀螺原理--Sagnac效应



光速与光路运动无关，光速不变，光路长变化



$\omega \neq 0$ ，转过一定角度时
到达光电传感器的两束光的相位差：

$$\varphi_S = N 2\pi \frac{c}{\lambda} (t_{CW} - t_{CCW}) \longrightarrow \varphi_S = \frac{2\pi L D}{c \lambda} \omega$$

17

光纤陀螺应用—测量惯性角速度

假设：测量地球自转角速度 ω ($15^\circ/\text{h}$, $7.3 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$)，
光纤线圈的直径 D 为 80mm，总长度 L 为 100m，
光波在真空中的速度 c 为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，光纤中 $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，
波长 λ 为 820nm，

求：Sagnac 相位 φ_S 是多少？ ($2.23 \times 10^{-5} \text{ rad}$)

- 一般光纤陀螺角速度分辨率可以达到 10^{-4} rad/s 。
- 增加匝数 N 和直径 D 都可以显著提高灵敏度。
- 转动轴垂直于光纤环面即可，不需要通过光纤环的中心。
- 应用领域：航空、航天、交通等。

18

MEMS陀螺仪（角速度检测）

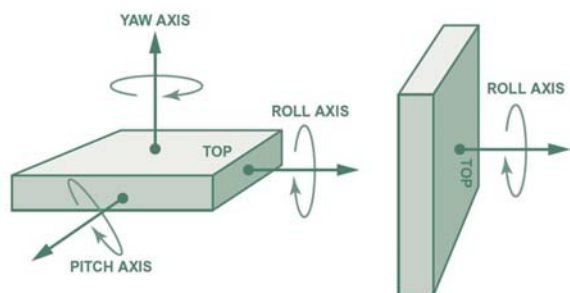


Figure 1. Gyro axes of rotational sensitivity. Depending on how a gyro normally sits, its primary axis of sensitivity can be one of the three axes of motion: yaw, pitch, or roll. The ADXRS150 and ADXRS300 are yaw-axis gyros, but they can measure rotation about other axes by appropriate mounting orientation. For example, at the right: a yaw-axis device is positioned to measure roll.

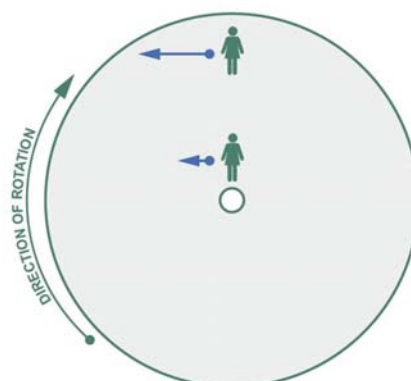


Figure 2. Coriolis acceleration example. A person moving northward toward the outer edge of a rotating platform must increase the westward speed component (blue arrows) to maintain a northbound course. The acceleration required is the *Coriolis acceleration*.

在旋转体系中做直线运动，
科里奥加速度： $2\Omega v$

19

MEMS陀螺仪（角速度检测）

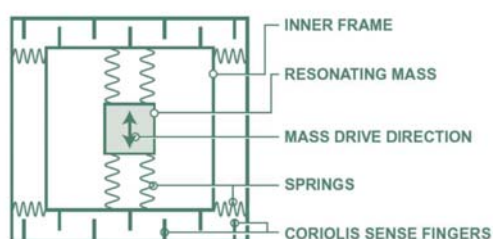
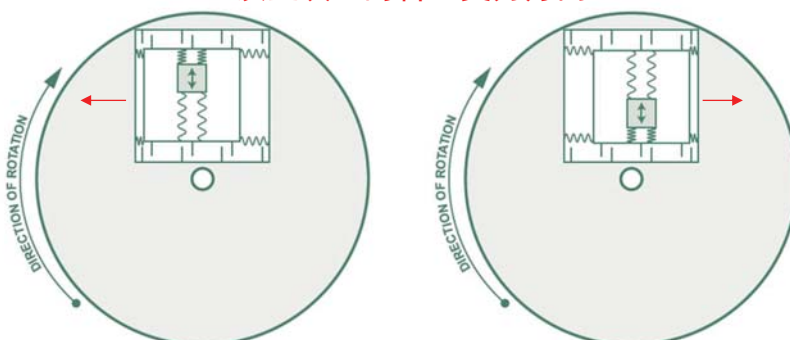


Figure 4. Schematic of the gyro's mechanical structure.

质量块上的科里奥力方向



20

MEMS陀螺仪（角速度检测）

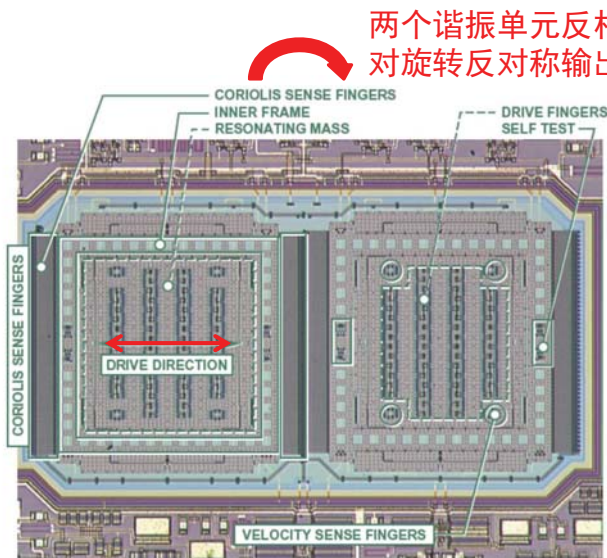


Figure 6. Photograph of mechanical sensor. The ADXRS gyros include two structures to enable differential sensing in order to reject environmental shock and vibration.

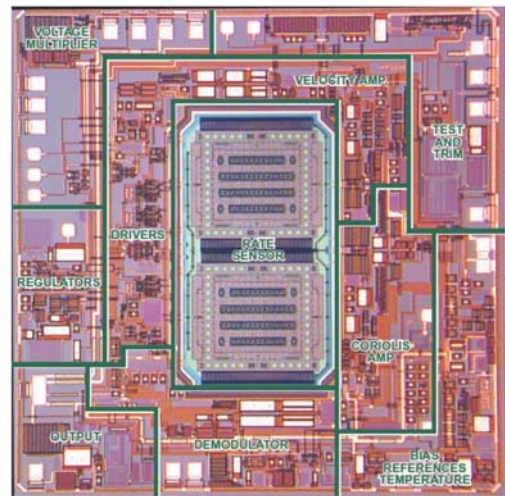


Figure 7. Photograph of ADXRS gyro die, highlighting the integration of the mechanical rate sensor and the signal conditioning electronics.

对振动干扰对称输出。

21

最多可选2项

设置

选择正确的描述：

- A 陀螺仪测量角速度时，敏感轴要与转轴平行
- B MEMS陀螺仪的差分结构可以放大旋转，抵消平动
- C 科里奥加速度的方向平行于振子的振动方向
- D 光纤陀螺通过干涉条纹的光强检测相位差

提交

22

MEMS陀螺仪（角速度检测）

$$z = re^{i\theta}$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{dr}{dt}e^{i\theta} + ir\frac{d\theta}{dt}e^{i\theta}$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \left[\frac{d^2r}{dt^2}e^{i\theta} + i\frac{dr}{dt}\frac{d\theta}{dt}e^{i\theta} \right] + \left[i\frac{dr}{dt}\frac{d\theta}{dt}e^{i\theta} + ir\frac{d^2\theta}{dt^2}e^{i\theta} - r\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2e^{i\theta} \right]$$

径向加速度

科里奥加速度

切向加速度

向心加速度

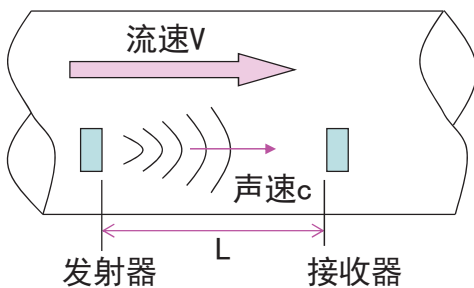
$$\text{If } \frac{d\theta}{dt} = \Omega \quad \text{and} \quad \frac{dr}{dt} = v,$$

$$\text{then } \frac{d^2z}{dt^2} = i2\Omega ve^{i\theta} - \Omega^2 re^{i\theta}$$

参考资料—MEMS角速度传感器: gyro_ADXRS150

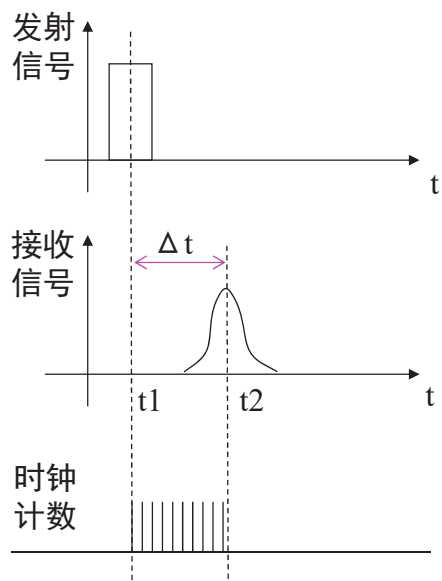
MEMS加速度传感器: adxl202 Dual Axis, Low g, Fully Integrated Accel

基于脉冲飞越时间的速度测量



$$\frac{L}{c + V} = t_2 - t_1$$

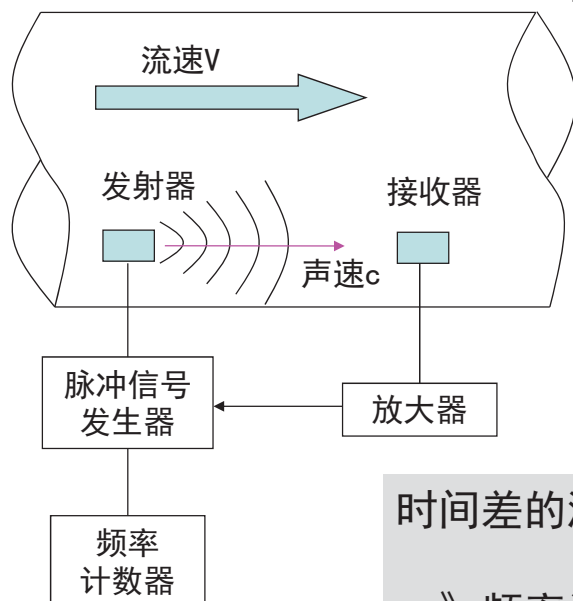
$$V = \frac{L}{\Delta t} - c$$



Flight Time 与 Sing Around

• 脉冲触发和频率计数

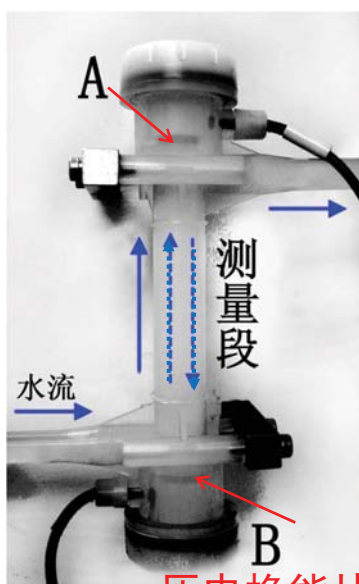
sing around method 声环法
sing-around velocimeter 环鸣声速仪



时间差的测量：差小，不容易分辨，
 需要高频时钟。
 =》频率计数：利用周期性，累积计数

25

超声流速测量



压电换能片

逆流到达时间： $t_u = \frac{L}{C - V}$

顺流到达时间： $t_d = \frac{L}{C + V}$

频差法： $\Delta f = \frac{1}{t_d} - \frac{1}{t_u} = \frac{2V}{L}$

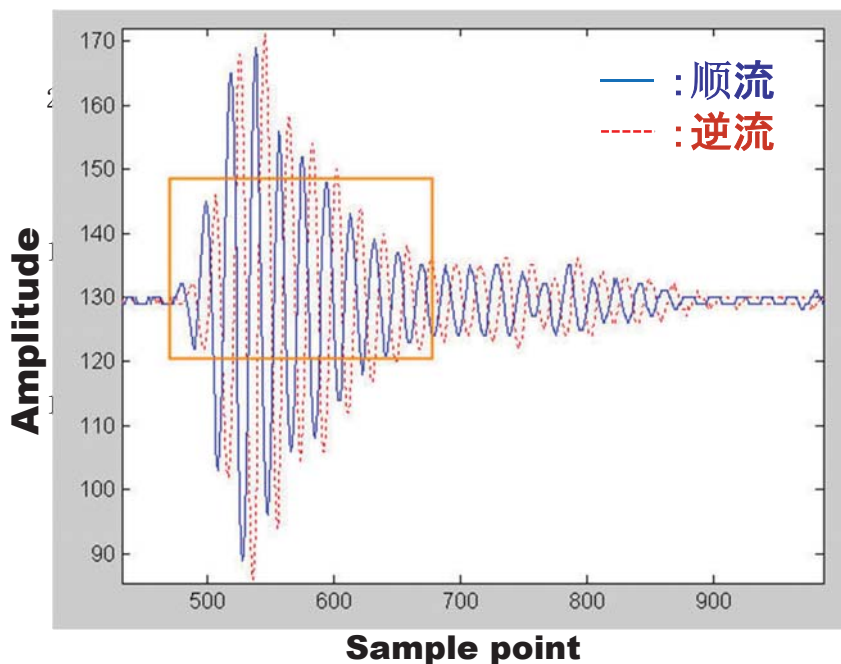
时差法： $\Delta t = t_u - t_d = \frac{2LV}{C^2 - V^2} \approx \frac{2LV}{C^2}$

$$t_u + t_d = \frac{2LC}{C^2 - V^2} \approx \frac{2L}{C} = 2t_0$$

L: 换能片距离
 C: 声速
 V: 流速

26

超声信号的实际接收波形



2MHz激励
40MHz采样

时间差检测：
波形互相关
+插值处理。

到达时间检测：
阈值
+过零点。

27

超声流速测量的不确定度

- 频差法和时差法的测量不确定度分析

$$V_f = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{t_d} - \frac{1}{t_u} \right)$$

$$V_{\Delta t} \approx \frac{C^2}{2L} \Delta t = \frac{L}{2t_0^2} \Delta t$$

$$\sigma_{V_f}^2 = \left(\frac{dV_f}{dt_u} \right)^2 \sigma_{t_u}^2 + \left(\frac{dV_f}{dt_d} \right)^2 \sigma_{t_d}^2 = \frac{L^2}{4} \left(\frac{1}{t_u^4} \sigma_{t_u}^2 + \frac{1}{t_d^4} \sigma_{t_d}^2 \right)$$

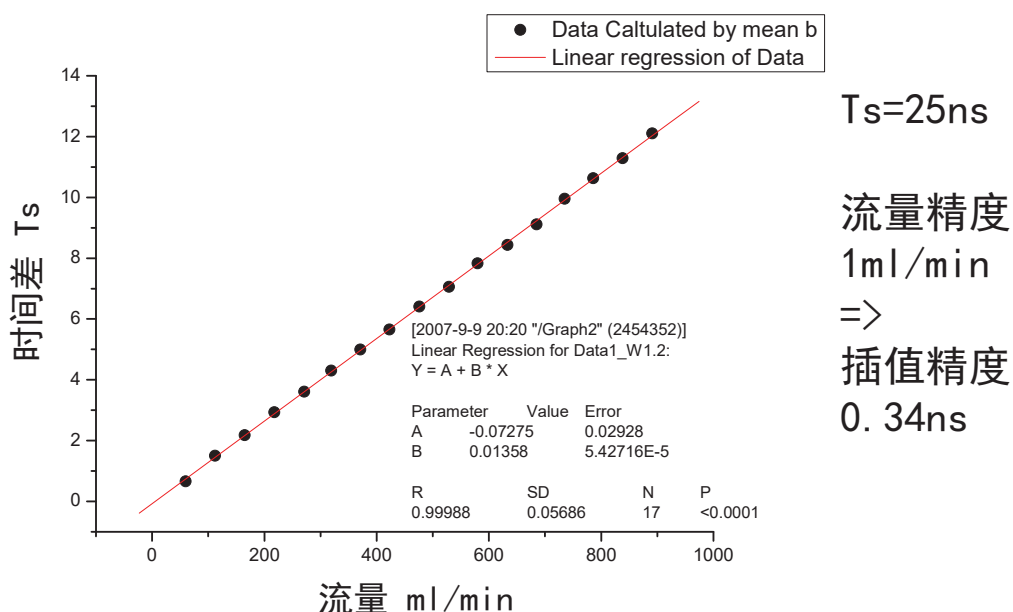
$$\sigma_{V_{\Delta t}}^2 = \left(\frac{dV_{\Delta t}}{d\Delta t} \right)^2 \sigma_{\Delta t}^2 + \left(\frac{dV_{\Delta t}}{dt_0} \right)^2 \sigma_{t_0}^2 = \frac{L^2}{4} \left(\frac{1}{t_0^4} \sigma_{\Delta t}^2 + \frac{4\Delta t^2}{t_0^6} \sigma_{t_0}^2 \right)$$

- 结论

- 时差法测量不确定度远小于频差法
- 粗测顺逆流时间、细测时间差

28

流量和时间差的实验结果



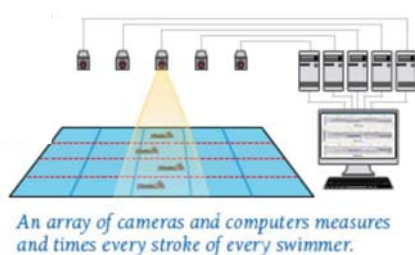
29

百米速度曲线—测距测速法

百米短跑速度测量方法

1) 人工测量方法：

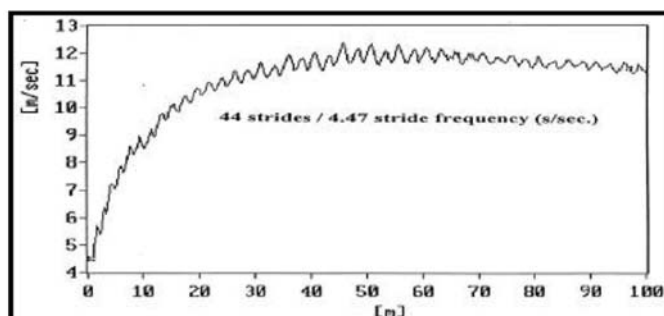
每10米一台摄像机，
60帧每秒播放，
同时重叠1/1000秒的时钟，
计算每10米的平均速度。



2) 激光测速法：

激光枪对准运动员背上的反射板，
每10msec发射一个脉冲，
检测接收回波的时间。

- 奥运选手100米速度测量结果（9.84sec）



百米竞技的关键：加速、最高速度、维持速度

激光测距测速仪 LDM-300C 性能指标

- 测距范围：0—400m（使用白纸），
0—1500m（使用反射板）
- 测速范围：0—70m/sec
- 测速精度：10m/sec以下，0.1m/sec；
10m/sec以上，0.3m/sec

例：百米平均速度10m/sec，
即10msec平均移动0.1m，
光程差0.2m，也就是时间差0.67nsec。

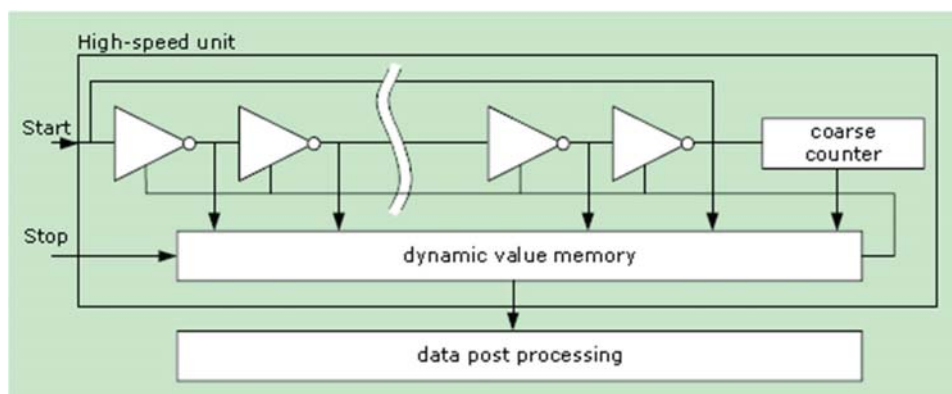
＝》需要有其至少十倍的时间测量分辨率。20GHz时钟0.05nsec。

关键技术：50psec级的时间差测量技术，
例如：专用芯片TDC-GP2，利用门电路传输延迟时间
（约50psec）进行时间数字转换，
即TDC（Timer Digital Converter）。

31

高分辨率时间差测量

TDC原理：由Start信号触发，Stop信号停止，
用其间通过的门电路的个数表示时间差。
最高可达20位（1ns），再叠加环形振荡器粗测的结果。
一个门电路传输延迟时间即1LSB 约50psec。
CMOS数字集成电路制造工艺。



32

选择正确的描述：

- ☐ A 激光测速仪是以测距为基础，测得的是平均速度。
- ☐ B 时差法和频差法的流速测量不确定度等级相同。
- ☐ C TDC可以测量比1nsec还小的时间差。
- ☐ D 声环法测速的频率输出f是飞越时间的倒数。

提交

33

相关法与相关函数

- **自相关函数** (Auto-correlation Function) :

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)x(t+\tau)dt$$

一个随机过程在相隔 τ 的两个不同时刻取值的相关程度；
分析传感器输出信号的规律性 \Rightarrow 分析信号或噪声的周期性

- **互相关函数** (Cross-correlation Function) :

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)y(t+\tau)dt$$

两个随机过程在相隔 τ 的两个不同时刻取值的相关程度；
分析两传感器输出信号的相似性 \Rightarrow 移动速度检测

自相关函数的性质

- 自相关函数是偶函数。

$$R_{xx}(\tau) = R_{xx}(-\tau)$$

- $R_{xx}(0)$ 是自相关函数的最大值, 等于均方值。

$$\max[R_{xx}(\tau)] = R_{xx}(0) = \Psi^2 = \sigma^2 + m^2$$

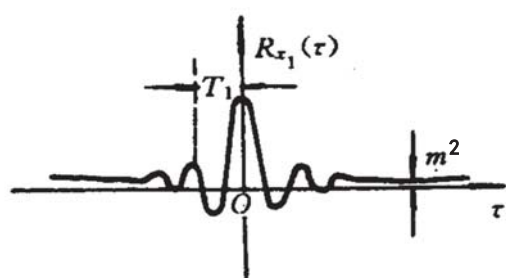
- $R_{xx}(\infty)$ 是自相关函数的最小值, 等于均值的平方。

$$\min[R_{xx}(\tau)] = R_{xx}(\infty) = m^2$$

- 周期信号 $x(t)$ 的自相关函数也是周期函数, 且两周期相同。

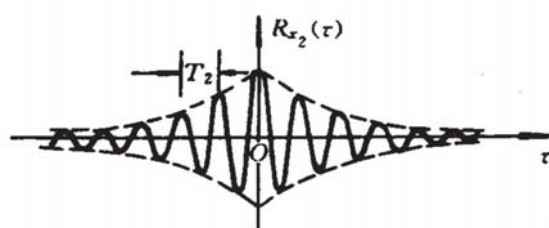
35

两个自相关函数的比较



$x_1(t)$ 的自相关函数:

- 有周期 T_1 的信号成分;
- $m \neq 0 \Rightarrow$ 有直流分量;
- 衰减快 $\Rightarrow \tau=0$ 以外相关性小
 \Rightarrow 含宽带噪声



$x_2(t)$ 的自相关函数:

- 有周期 T_2 的信号成分;
- $m=0 \Rightarrow$ 没有直流分量;
- 衰减慢 \Rightarrow 相关性大
 \Rightarrow 含窄带噪声

Wiener-Khintchine定理 : 自相关函数的F变换 = 功率谱

36

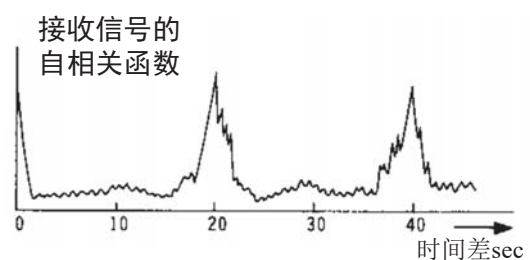
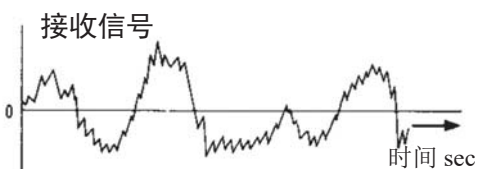
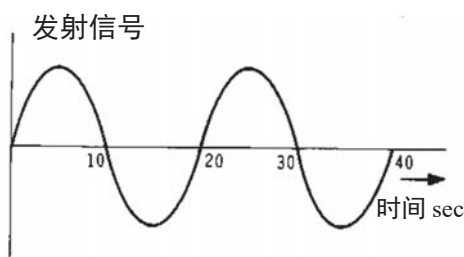
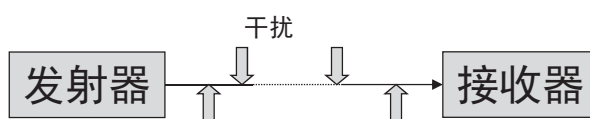
相关法的特点

- 可以将信号有效信息从随机噪声中提取出来
- 对于 $x(t)$ 进行重复观测, 得样本集合 $\{x(t)\} = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_{i-1}(t), x_i(t)\}$
- 平稳的随机过程
某时刻的平均值 = 任意时刻的平均值 = 任意样本的平均值
- 平均值: $m = E[x(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$
- 均方值: $\Psi^2 = E[x^2(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt$
- 方差: $\sigma^2 = E[(x(t) - m)^2] = \Psi^2 - m^2$

37

识别随机噪声中的周期信号

-----自相关函数的应用



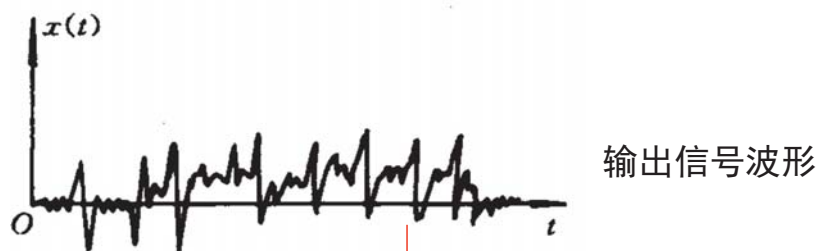
自相关函数= \rangle

接收器输出信号波形中隐含着
20秒的周期性信号

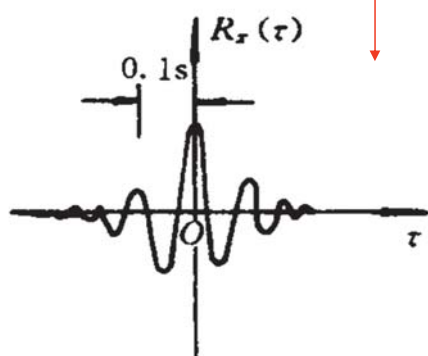
38

汽车加速度传感器的输出信号分析

——自相关函数的应用



有无周期性的振动?



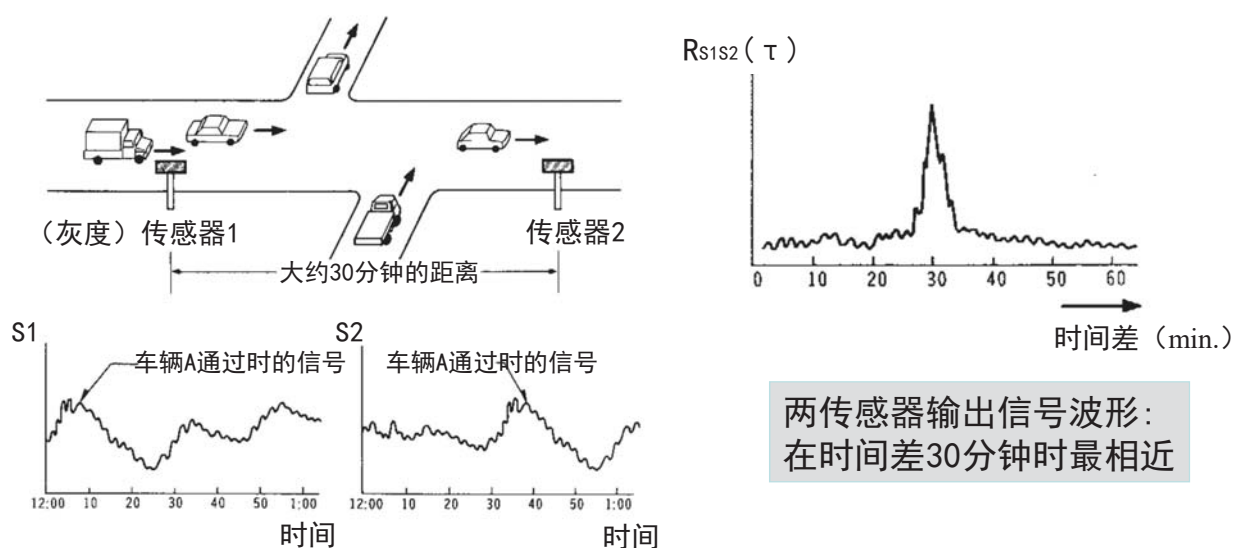
自相关函数 =>

车身存在 $T=0.1\text{sec}$, $f=10\text{Hz}$ 的周期性振动—> 沙石路面的凸凹?

39

互相关函数的应用

——测量时间迟延

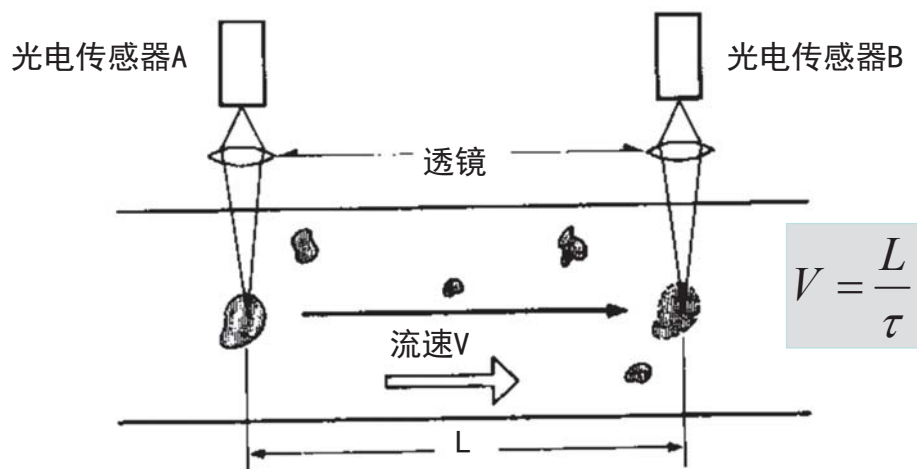


思考：如何利用离散的采样时间序列值求互相关函数值？

40

互相关函数的应用

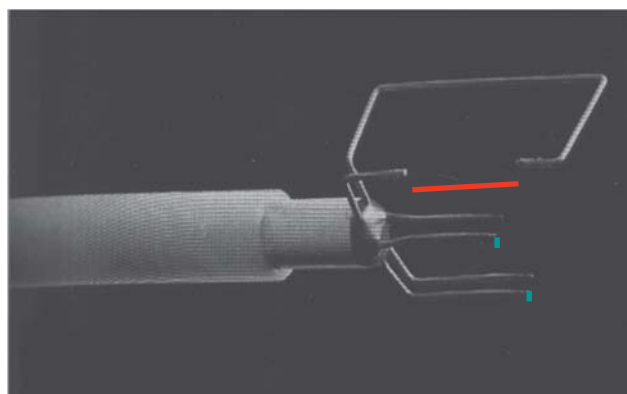
——测量流速



- 不规则信号，移动中仍保持有相似性，取适当的距离L。
- 主动生成随机的标识，如墨水、荧光示踪剂等。

41

热线相关风速计



一个加热电阻丝
脉冲加热
或M序列加热

两个热敏电阻丝

相关式热线风速计：

利用下游两个热敏电阻感应到的热脉冲的互相关。
(受热扩散影响)

普通热线风速计：

只有一个电阻丝，气流吸收其热量，使其温度降低、阻值发生变化。有恒流式和恒温式两种工作方式。

42

思考题

- 7-1 列举两种转速测量方法，并指出其主要应用领域。
- 7-2 为了使增量码盘不仅能输出转速，而且还能输出正反转方向以及绝对角度，应如何配置码盘和光耦？
- 7-3 激光测距测速方法的关键技术在哪里？为什么？
- 7-4 设传感器A和传感器B处所观测到的离散信号序列分别为

$$f_A(i\Delta t), f_B(i\Delta t) \quad \text{其中 } (i = 0, 1, 2, \dots, n-1)$$

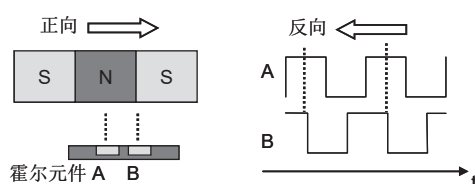
求两信号的互相关函数值，注意标出函数取值范围和取平均的数值个数。

$$R_{AB}(k) = \frac{1}{n-k} \sum_{i=0}^{n-1-k} f_A(i) \times f_B(i+k) \quad \text{其中 } (k = 0, 1, 2, \dots, n-1)$$

43

思考题

- 7-5 利用传感器输出的自相关函数可以分析信号的（ ）；
利用空间相隔一定距离的两传感器输出的互相关函数可以测量（ ）。
- 7-6 白噪声发生器能产生连续的随机噪声，指出白噪声的自相关函数的特点。
(白噪声的自相关函数为 δ 函数。)
- 7-7 如图所示，利用霍尔元件进行测速，两个霍尔元件应该如何放置？

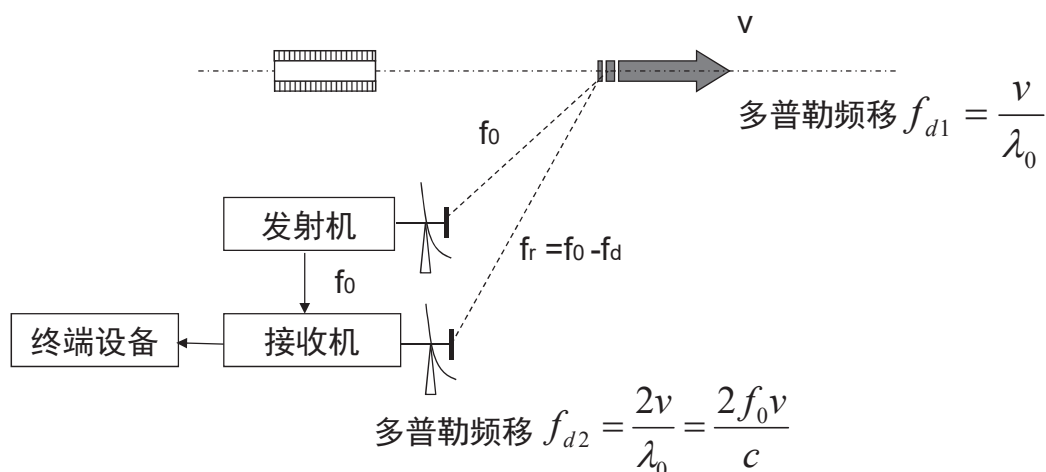


44

多普勒效应测速

多普勒测速雷达：发射电磁波频率为 f_0

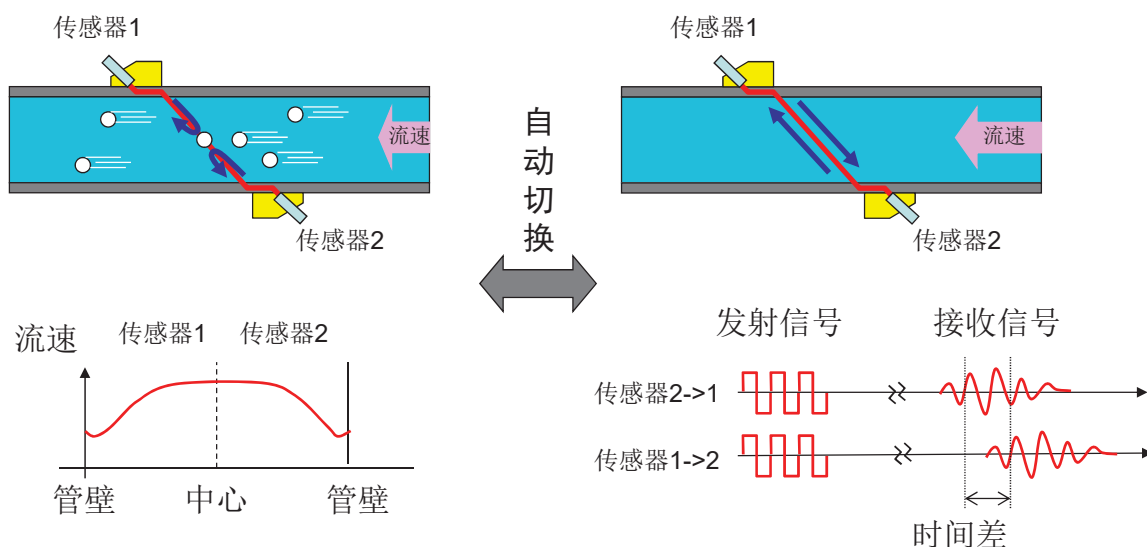
接收电磁波频率为 f_r



45

多普勒和飞越时间的混合式流速检测

- 接收气泡或固体颗粒的反射波
- 分析频移成分，可测管壁内流速分布
- 检测顺逆流的时间差
- 可测超声传播路径上的平均流速



46