

## § 4.2 磁电式

### § 4.2.1 感应式速度传感器

**工作原理** 感应式速度传感器工作原理图如图 4.2.1 所示。图中  $m$  是芯轴、线圈和阻尼环的质量和。  $K$  为弹簧刚度，它是传感器中两个圆形薄弹簧片的并联值。阻尼  $C$  则是由阻尼环在磁隙中运动所产生的电磁阻尼。

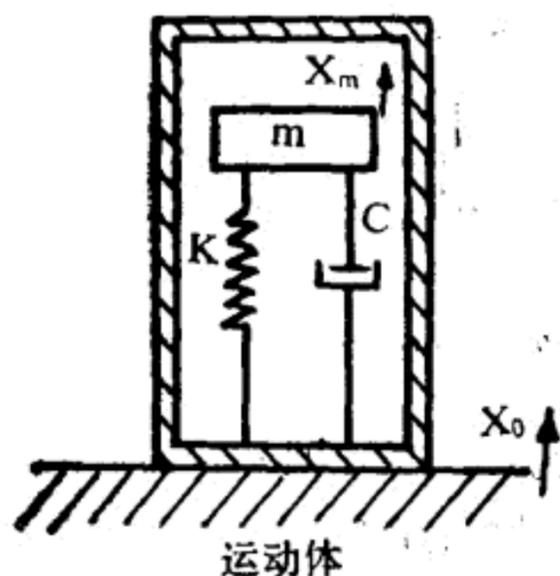


图 4.2.1 感应式速度传感器  
工作原理图

设  $x_0$  为振动体的绝对位移；

$x_m$  为线圈绝对位移。

线圈与传感器壳体(振动体)之间的相对位移  $x$  为

$$x = x_m - x_0$$

由牛顿定律可得

$$m \frac{d^2 x_m}{dt^2} = -C \frac{dx}{dt} - Kx \quad (4.2-1)$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + Kx = -m \frac{d^2 x_0}{dt^2} \quad (4.2-2)$$

应用微分算符  $D = \frac{d}{dt}$ ，上式可改写为

$$(mD^2 + CD + K)x = -mD^2 x_0$$

由此得传递函数

$$\frac{x}{x_0}(D) = \frac{-D^2}{D^2 + 2\xi\omega_0 D + \omega_0^2} \quad (4.2-3)$$

设  $\xi = \frac{C}{2\sqrt{mK}}$  称为阻尼比；

$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}}$  称为固有角频率。

若输入信号  $x_0$  为正弦波时，取  $D = j\omega$ ，则得到频率传递函数为

$$\frac{x}{x_0}(j\omega) = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)j} \quad (4.2-4)$$

其振幅比(幅频特性)为

$$\left| \frac{x}{x_0} \right| = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)\right]^2}} \quad (4.2-5)$$

相位差(相频特性)为

$$\varphi = -\tan^{-1} \frac{2\xi \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad (4.2-6)$$

由式(4.2-5)和(4.2-6)可分别绘制出传感器的幅—频特性图(图 4.2.2)和相—频特性图(图 4.2.3)。

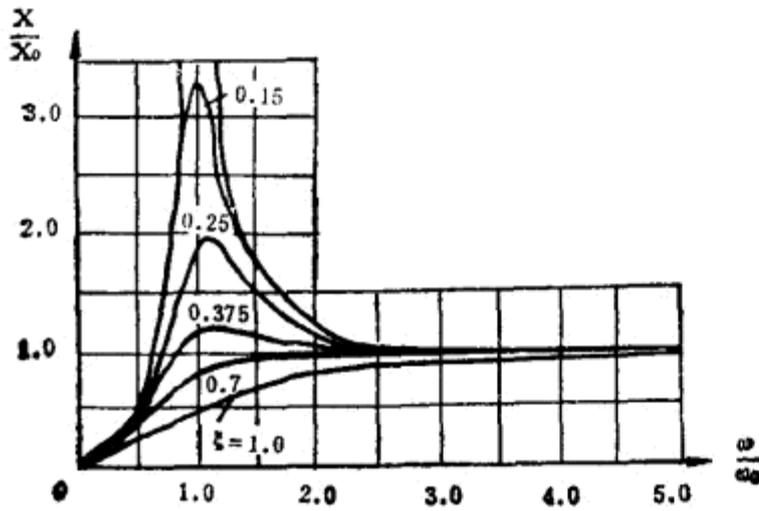


图 4.2.2 幅—频特性图

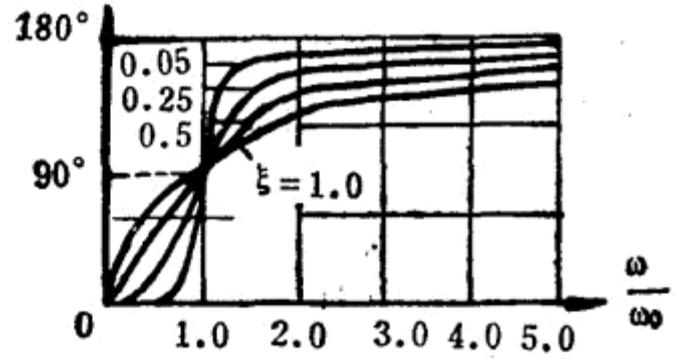


图 4.2.3 相—频特性图

由图 4.2.2 和图 4.2.3 可看出, 当  $\omega$  远大于  $\omega_0$  时, 振幅比接近于 1, 且相位滞后  $180^\circ$ 。也就是说, 若振动体的振动频率远高于传感器的固有频率时, 线圈与壳体之间的相对位移接近于振动体的绝对位移。那么线圈与磁钢之间的相对运动速度也就与振动体的振动速度接近或相等。由法拉第电磁感应定律可知, 线圈绕组上感应出的电动势为

$$E = Bnlv \times 10^{-8} \text{ (毫伏)} \quad (4.2-7)$$

式中  $B$ —磁通密度(高斯);

$l$ —每匝线圈的平均长度(厘米);

$v$ —线圈绕组相对于磁钢的运动速度(厘米/秒);

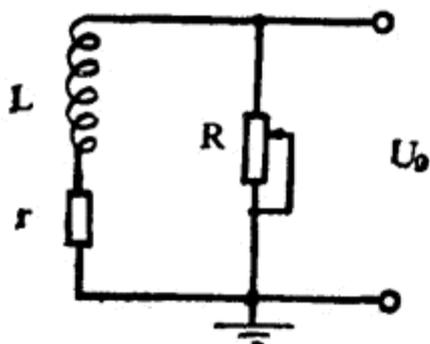
$n$ —线圈匝数。

对于已经选定的结构, 式(4.2-7)中的  $Bnl \times 10^{-8}$  是一个常数, 令它等于  $K$ 。那么线圈绕组中的感应电动势  $E$  就正比于振动速度  $v$ , 即

$$E = Kv \quad (4.2-8)$$

感应式速度传感器正是基于上述原理进行振动速度测量的。

为了使同一型号的传感器的灵敏度一致, 常在传感器线圈的两端并联一个可调的电阻  $R$ 。如图 4.2.4 所示。图中  $L$  为运动线圈的自感。



传感器输出电压为

$$u_0 = \frac{R}{R+r} \cdot E \quad (4.2-9)$$

式中  $u_0$ —传感器输出电压(伏特);

$r$ —线圈电阻(欧姆);

$R$ —并联可调电阻(欧姆);

$E$ —传感器线圈的感应电动势(伏特)。

改变  $R$  的大小, 即可控制传感器的输出灵敏度。可调电阻  $R$  由生产厂家标定固好。

图 4.2.4 灵敏度调试电路图

结构图 4.2.5 为感应式速度传感器的结构图。它有一个钢制的圆柱形外壳，里面有高磁能永久磁钢，并和外壳坚固地构成一体。磁钢中间有一小孔，两端带有线圈架和阻尼环的芯轴贯穿其中。芯轴两端用圆形片弹簧支承以保持线圈架和阻尼环在磁钢气隙中定位。

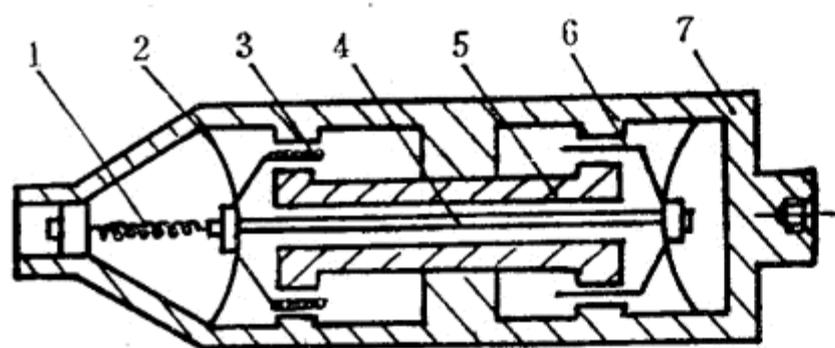


图 4.2.5 感应式速度传感器结构图

1. 输出线 2. 弹簧片 3. 线圈 4. 芯轴  
5. 磁钢 6. 阻尼环 7. 壳体

在测量振动体的绝对振动时，传感器壳体因刚性地固定在振动物体上，与物体一起振动。而由芯轴、线圈和阻尼环构成的质量弹簧系统相对于惯性空间接近静止不动。线圈与磁钢之间相对运动，使线圈切割磁力线，从而感应出相对振动速度的电压信号。

还有一种是相对式的感应式速度传感器。其基本原理如图 4.2.6 所示。该传感器的线圈不再是惯性安装，而是通过芯杆、连接球纹、传振球座等固定在被测振动物体上。传感器壳体固定在不动的物体上。当被测物与传感器壳体作相对运动时，由于芯杆和磁钢间的磁场发生变化，因而感应在线圈上有一感生电压信号，作为传感器的输出。

不动。线圈与磁钢之间相对运动，使线圈切割磁力线，从而感应出相对振动速度的电压信号。

还有一种是相对式的感应式速度传感器。其基本原理如图 4.2.6 所示。该传感器的线圈不再是惯性安装，而是通过芯杆、连接球纹、传振球座等固定在被测振动物体上。传感器壳体固定在不动的物体上。当被测物与传感器壳体作相对运动时，由于芯杆和磁钢间的磁场发生变化，因而感应在线圈上有一感生电压信号，作为传感器的输出。

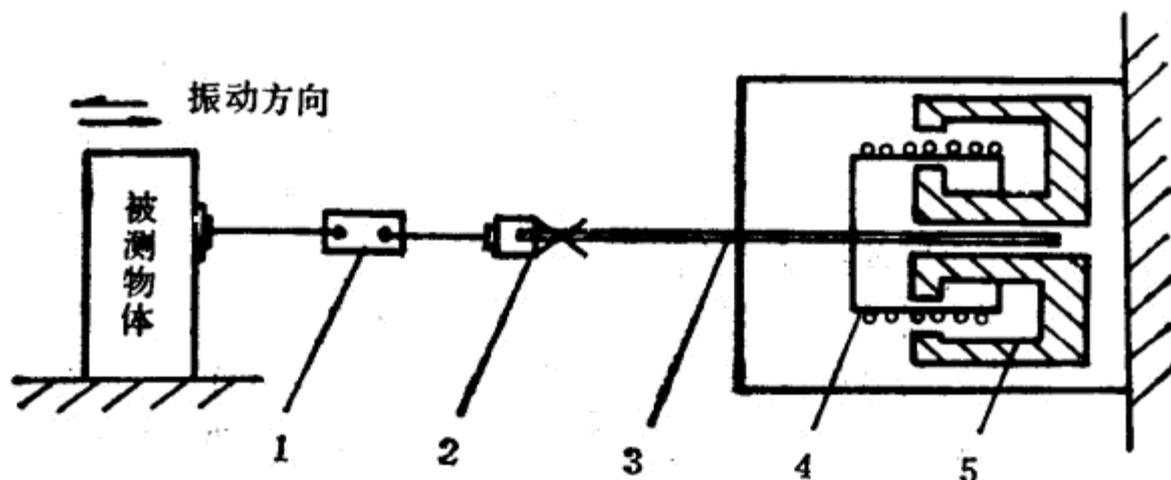


图 4.2.6 相对式感应式速度传感器原理图

1. 振动球座 2. 连接球铰 3. 零位标 4. 线圈 5. 磁钢

电路 一般感应式速度传感器测量电路的方框图如图 4.2.7 所示。

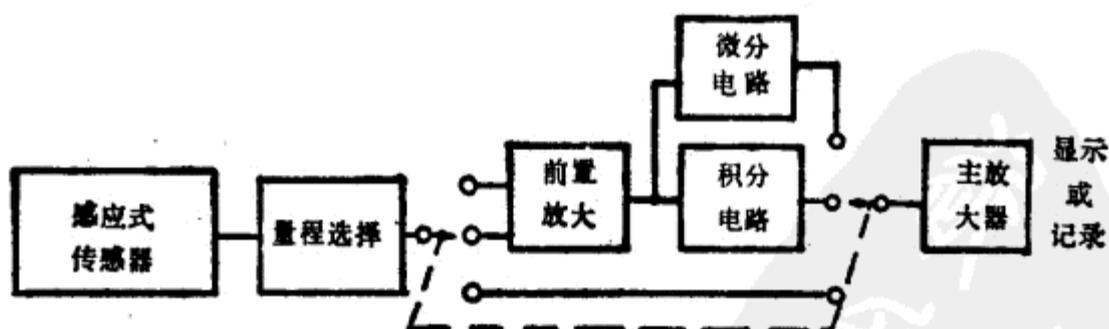


图 4.2.7 感应式速度传感器测量电路方框图

主要性能 见表 4.2.1。

表 4.2.1 感应式速度传感器的主要性能

型 号	CD-1	CD-4
频 率 范 围	10~500 Hz	0~300 Hz
最 大 可 测 位 移	$\pm 1$ mm	+15 mm
最 大 可 测 加 速 度	5 g	—
速 度 灵 敏 度	604 mV/cm·s	604 mV/cm·s
测 量 误 差	$\leq 10\%$	—
线 圈 内 阻	1.9 k $\Omega$	8 k $\Omega$
使 用 方 式	绝对式	相对式

感应式速度传感器在实验室、故障诊断以及原型测试中都得到广泛的应用。它的突出特点是灵敏度高，输出电压与速度成线性关系，性能稳定，具有一定的带宽，应用较广泛。其不足之处是可测的频率下限受到限制，传感器体积、重量大。

#### § 4.2.2 动铁式

动铁式速度传感器其线圈固定在传感器的壳体上，可动部分为磁钢体。传感器的典型结构如图 4.2.8 所示。

动铁式传感器由于线圈与传感器的壳体固定在一起，而永久磁铁通过柔软的弹簧与壳体相连，因此，当振动体的频率远高于传感器的固有频率时，永久磁铁就接近静止不动，而线圈随振动体一起振动。这样，永久磁铁与线圈之间的相对位移接近于运动体的绝对位移，线圈和动铁之间的相对运动速度就接近运动体的运动速度。

由于在工程应用中常遇到一些超低频率，大位移的运动测量，特别是在桥梁建筑和水坝工程当中，超低频大位移的测量就更为突出，一般频率在 0.5~200 Hz，位移 1 微米至几十毫米。这样的参数，对于通常质量—弹簧系统的动铁或感应式传感器，都难以满足要求。因此，出现了动铁式摆式结构速度传感器。

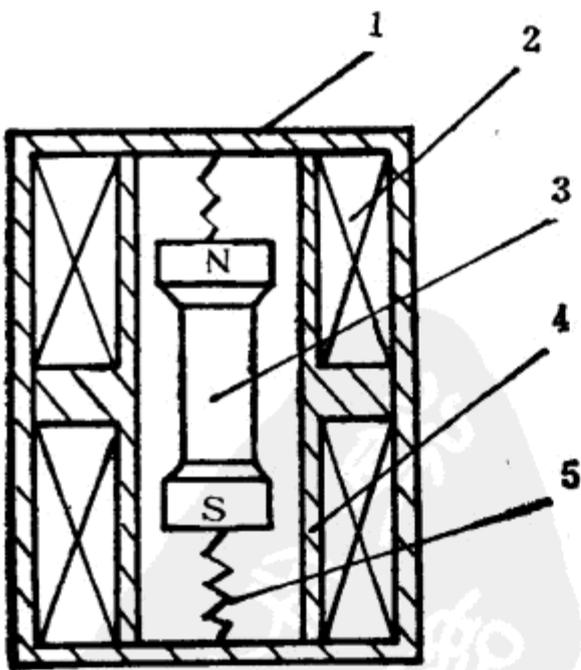


图 4.2.8 动铁式速度传感器结构图

1. 外壳 2. 线圈 3. 永久磁铁  
4. 框架 5. 弹簧

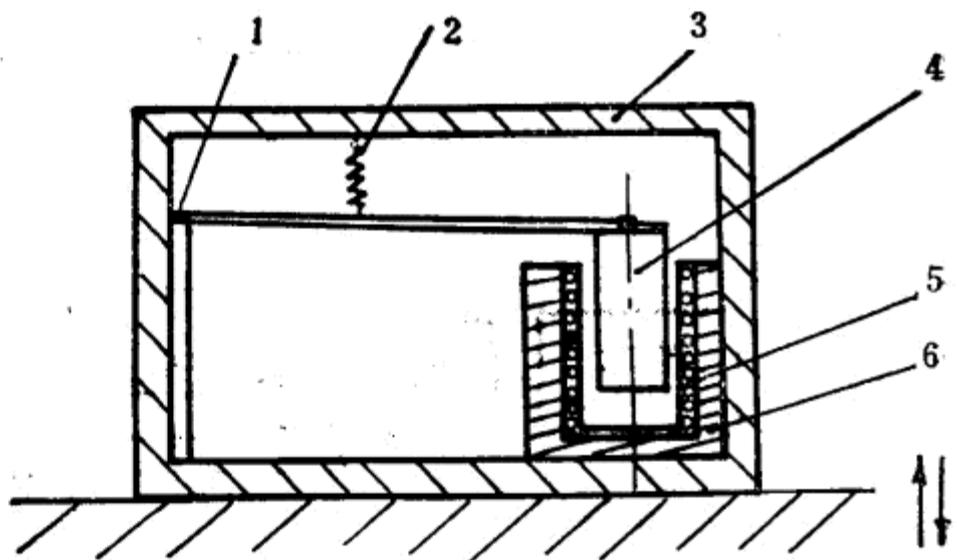


图 4.2.9 摆式速度传感器原理图

1. 转动中心 2. 悬吊弹簧 3. 壳体  
4. 永久磁铁 5. 线圈 6. 软铁

摆式传感器的动磁钢做得相当重，用较硬的弹簧与之配合，可得到自振周期在 2~3 秒以内。其原理图如图 4.2.9 所示。

由图中可知，当传感器基座随测点作振动运动时，与壳体固定的线圈和悬吊动磁钢产生相对运动。相对运动的位移量与外界被测点的绝对运动的振动成正比。线圈在磁场中运动而产生的感应电动势，其大小与线圈切割磁力线的速度成正比，即与被测的绝对输入运动速度成正比。

阻尼线圈与输出线圈绕在同一骨架上，并可调整阻尼值。阻尼比一般控制在 0.7 左右。

### § 4.2.3 磁电式转速传感器

**工作原理** 非接触磁电式转速传感器的原理图如图 4.2.10 所示。

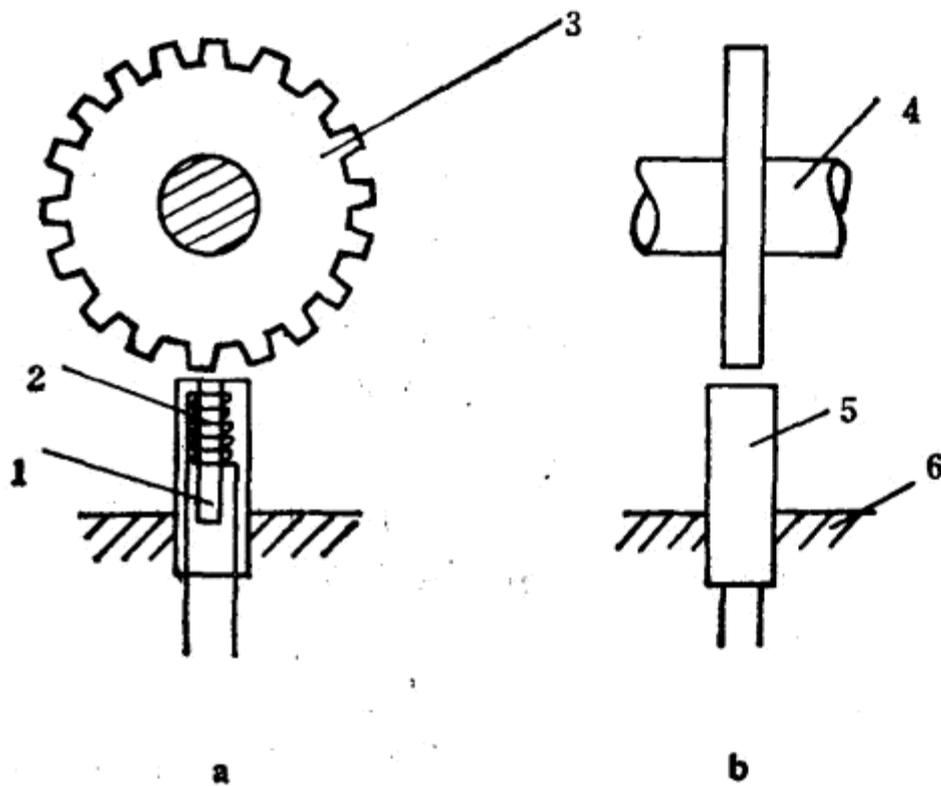


图 4.2.10 磁电式转速传感器的原理图

1. 永久磁铁 2. 线圈 3. 齿轮 4. 输出轴 5. 速度传感器 6. 支架

在永久磁铁组成的磁路中，如果改变其磁阻(如空气隙)的大小，则磁通必将随之改变。这个磁路通过的感应线圈，在磁通发生突变时，将感应出一定幅度的脉冲电势，而这个脉冲电势的频率则等于磁阻(气隙)变化的频率。为了产生气隙变化，在被测轴上装一个由软磁材料做成的齿盘并和轴一起旋转，而传感器靠外壳上的螺纹固定在支架上，并在齿盘径向上靠近齿盘。当被测轴转动齿盘也跟着转动时，齿盘中的齿和间隙交替通过永久磁铁的磁场，从而不断地改变这个磁路的磁阻，使铁芯中的磁通发生突变，在线圈内产生了一个脉冲电动势。感应出的电压脉冲频率与被测转

轴的转速成正比。如齿盘周边有等距分布的  $N$  个齿，它的转速是  $n$ (转/分)，产生的电压脉冲信号的频率就是  $N \cdot n/60$ (Hz)。这种转速传感器为开磁路形式，脉冲信号较弱。有时也把磁路作成闭合形式，即把永久磁铁的两极同时对准转齿，每转过一个齿就使磁路闭合一次。这样得到的电压脉冲信号较强，抗干扰能力也比较强。接触式磁电转速传感器就是一种闭磁路形式，它在使用时通过联轴节与被测转轴连接，其原理结构图如图 4.2.11 所示。

永磁体的两个磁极分布在内外圆上。感应齿轮和感应齿座分别又是两个磁极的磁轭部分。在传感器内部，感应齿轮的齿和感应齿座的齿靠得很近。当被测轴转动感应齿轮也跟着转动时，由于感应齿座是和外壳固定的，这时感应齿轮和感应齿座就有相对角位移。于是磁路中磁阻变化引起磁通量的变化。在感应线圈内产生感应电动势，输出脉冲信号。

**结构** 非接触式磁电转速传感器由永久磁铁、缠绕在线圈架的线圈、传感器插座和外壳组成。结构图如图 4.2.12 所示。

永磁体的主要参数是矫顽力  $H_c$ ，剩余磁感应强度  $B_r$  和最大磁能  $(BH)_m$ 。永磁体的磁性能是否稳定，将直接关系到传感器的测量精度。因为永磁材料的磁性会受时间、外界磁场、温度、振动和冲击的影响，所以应采取必要措施，使永磁材料的磁性能基本稳定。磁电转速传感器使用的是磁性强，稳定性高的铸造铝镍钴永磁合金。线圈是装在磁体的软磁部

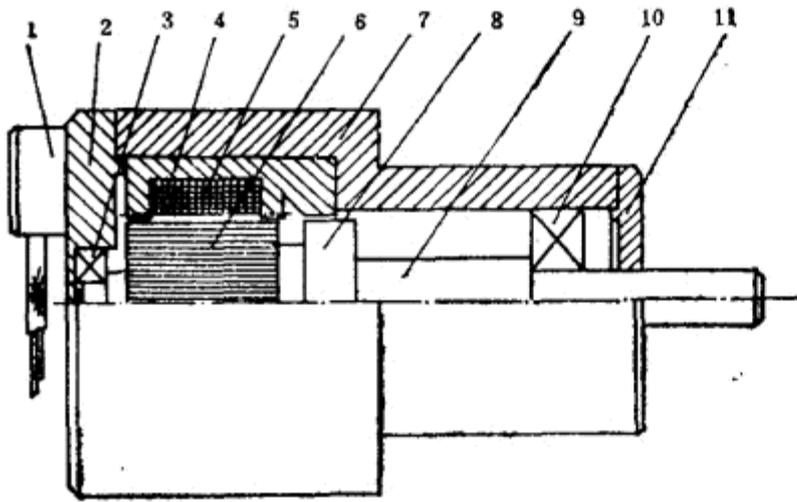


图 4.2.11 磁电转速传感器原理结构图

- 1. 引线座 2. 后盖 3. 轴承 4. 感应齿轮 5. 线圈
- 6. 感应齿轮 7. 外壳 8. 永久磁铁 9. 轴 10. 轴承 11. 前盖

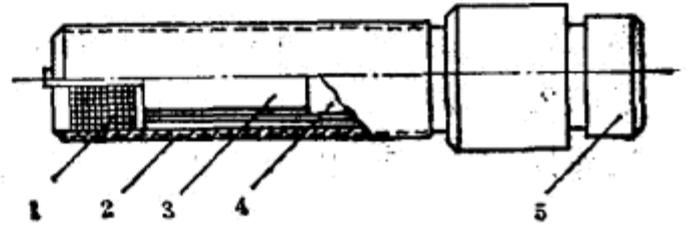


图 4.2.12 磁电转速传感器结构图

- 1. 线圈 2. 外壳 3. 永久磁铁
- 4. 填料 5. 传感器插座

分，此处的磁场最强。在磁通发生变化时，使线圈的感应电势较大。传感器外壳是由不锈钢管做成，把永磁铁和线圈用环氧树脂封装在钢管里，以提高防蚀、抗振能力。

**电 路** 磁电式转速传感器如果直接配上数字测速仪，可直接读出转速和频率。如配上外接测频仪，可把转速直接变成电压  $0 \sim 18 \text{ V}$  (转速为  $0 \sim 4000 \text{ 转/分}$ )，也可变成线性电流  $0 \sim 5 \text{ mA}$  供光线示波器显示 (振子为  $20 \Omega$ )。传感器输出信号还能输送到控制系统中去。

**主要性能** 某种非接触磁电式转速传感器的特性如下：

- 1. 磁电式转速传感器的  $U_0-n$  特性曲线 (被测齿盘  $A_3$  钢，间隙  $0.75 \text{ mm}$ )

从图 4.2.13 中可以看出，转速传感器在空载时，转速和输出电压基本上成线性关系。 $U_0$  为电压有效值。

- 2. 磁场对转速传感器的  $U_0-n$  特性的影响 (被测齿盘  $A_3$  钢，间隙  $0.75 \text{ mm}$ )

从图 4.2.14 中看到，改变永磁材料的磁性能后，传感头表面磁场强度不同，输出电压也不同，磁场强度越大感应出的电压也越大。

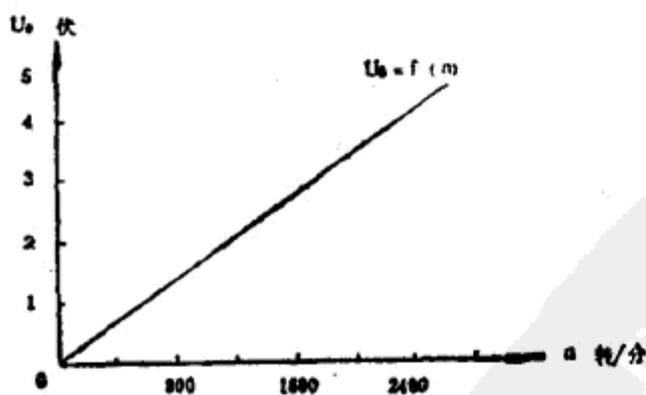


图 4.2.13 磁电式转速传感器  $U_0-n$  特性图

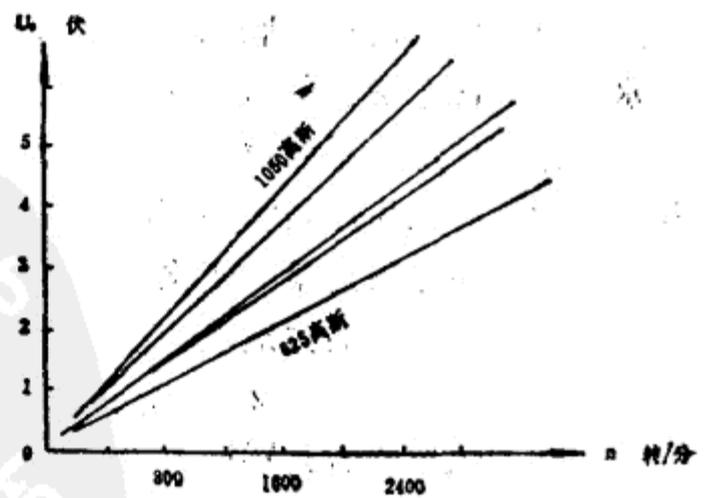


图 4.2.14 永磁对  $U_0-n$  特性的影响  
被测齿盘  $A_3$  钢，间隙  $0.75 \text{ mm}$

3. 线圈匝数对  $U_0-n$  特性也有影响。线圈的匝数越多, 在同样的间隙下输出电压也越大。

#### 4. 间隙的大小对输出电压的影响

转速传感器和齿盘的齿的间隙越小, 输出的电压越大。从图 4.2.15 中可以看出, 同一传感器在同一转速下, 间隙越小, 输出电压越大, 而且输出电压与间隙的平方成反比。传感器与齿轮之间的间隙在  $0.1\text{ mm}$  或更小时, 可以获得最大输出电压。但间隙也不易过小, 因为过小时, 当齿盘安装有一点偏心时, 容易造成齿盘和传感器产生卡死现象。但由于磁场对小间隙的变化最敏感, 所以传感器应在不影响齿轮正常转动的情况下尽可能调整到间隙最小, 以获得最大的输出电压。

#### 5. 输出电压的波形

输出电压的波形决定于齿轮的形状。不同的齿轮形状, 输出电压的波形不同。如使用易加工的渐开线齿轮, 输出电压的波形近似为正弦波。通过脉冲线路可得到所需要的矩形波、方波等。

上述的非接触磁电式转速传感器的体积小。它们共同的优点是性能稳定, 结实可靠, 寿命长, 使用方便, 在比较恶劣的环境下能正常工作, 适用于测量各种转动轴的转速。转速传感器可测导磁材料的齿轮、叶轮、带孔圆盘等的转速和线速度。这些传感器的主要技术性能见表 4.2.2。

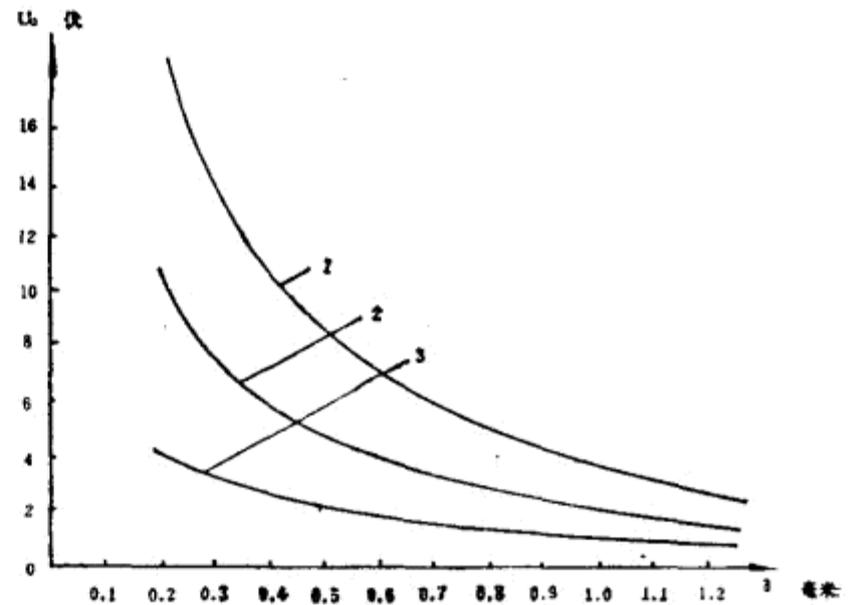


图 4.2.15 间隙对输出电压的影响

1. 2000 转/分 2. 1000 转/分 3. 500 转/分

表 4.2.2

磁电式转速传感器的主要性能

	SC—5 磁电转速传感器	SZMB—3 磁电转速传感器
磁路形式	开磁路形式	闭磁路形式
输出脉冲数	输出脉冲数与测试齿轮齿数有关	输出脉冲数为 60 脉冲/转
输出脉冲值	50 转/分时 $\geq 100\text{ mV}$ (间隙 $\delta = 0.75$ , 被测齿模数 $m = 3$ , 齿数 $z = 60$ , 材料为电工钢)	50 转/分时 $\geq 120\text{ mV}$ (有效值)
测量范围	50~4000 转/分	50~5000 转/分
使用温度	-40~+100℃	-10~50℃
使用时间	连续使用	连续使用
	无触头工作, 可检测金属构件的转速	同左

#### § 4.2.4 电涡流式

**工作原理** 电涡流传感器是一种位移型传感器。如果在轴上开一键槽或装上一个键, 并将传感器靠近轴表面安装, 轴转动时便能测得传感器与轴表面的间隙变化。通过电路可以得

到与转速成正比的脉冲频率信号。如图 4.2.16 所示。

图中，1 为带键槽或键的被测轴，2 为传感器，3 为前置器。脉冲频率信号可以用示波器显示。用频率计可测得脉冲频率从而确定轴的转速。若频率计指示 1 Hz，则表明轴的转速为 1 周/秒。若轴上有 60 个齿，则频率计所指示的频率数值即为轴的转速 60 转/分。

**结构** 测转速的电涡流传感器的结构与测位移的电涡流传感器是完全一样的，二者是通用的。只是为了得到足够的脉冲幅值，对被测轴上的键槽或键的尺寸有一定的要求。如图 4.2.17 所示， $d$  为传感器端头的直径，键槽的长  $\times$  宽为  $2d \times 1.5d$ ，深为 1.5 mm。

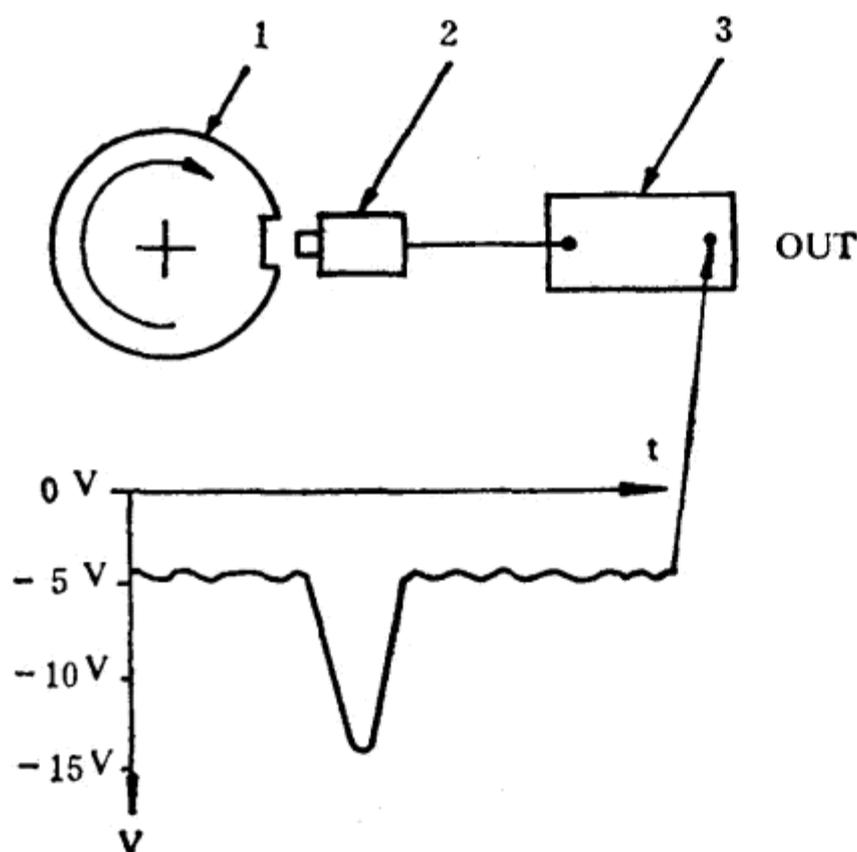


图 4.2.16 电涡流传感器测转速原理图

1. 被测轴 2. 传感器 3. 前置器

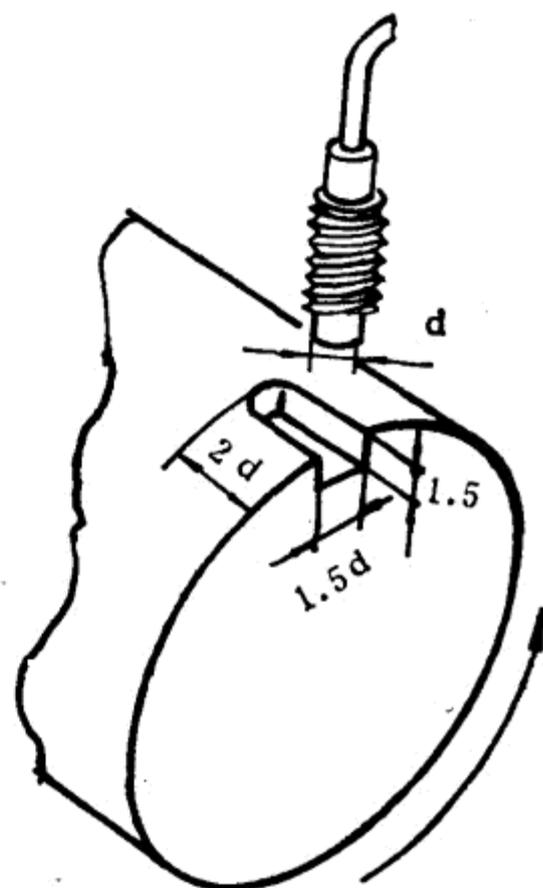


图 4.2.17 传感器与键槽尺寸关系图

**电路** 在电路设计中，只要把来自传感器的脉冲信号，经过放大、整形后，能够为频率计所接受，并指示出频率值即可。而在实际应用中，大多采用电涡流位移传感器的前置器电路，最简单的一种是调频调幅式电路。图 4.2.18 为转速测量电路方框图。

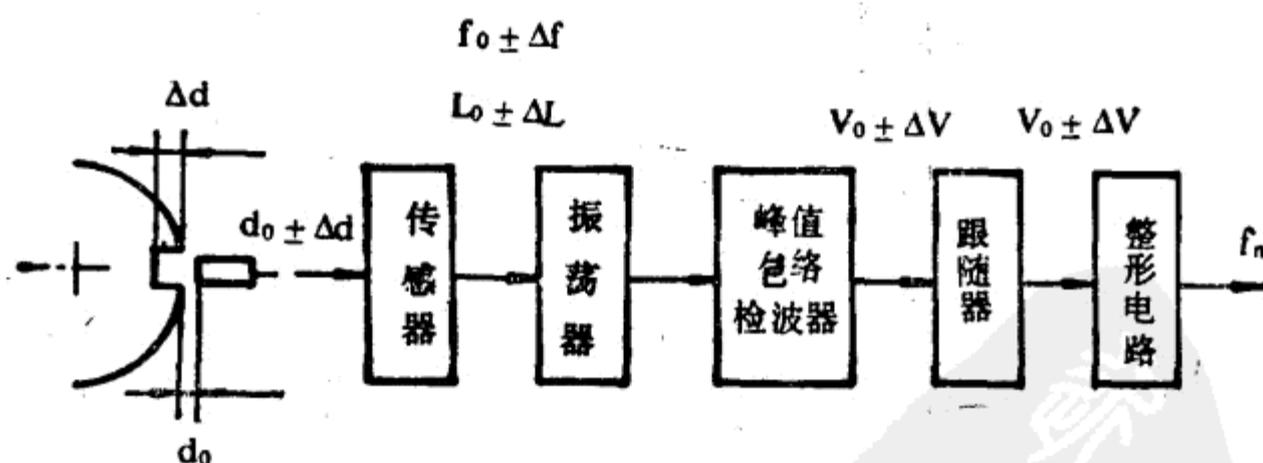


图 4.2.18 转速测量电路方框图

若轴转到如图所示的位置时，间隙变化  $\Delta d$  引起传感器线圈的电感改变  $\Delta L$ ，振荡器的电压幅值和振荡频率同时改变。经峰值包络检波器把电压幅值的改变  $\Delta V$  检出。再经跟随器、整形电路后，输出脉冲信号  $f_n$ 。把  $f_n$  接至频率计指示出频率值，或接至转速计(60 倍

频)指示转速。

**主要性能** 频率响应: 0~10 kHz (600,000 转/分)。

利用电涡流传感器测转速的主要优点是非接触测量。这种传感器坚固可靠,对油污等介质不敏感,常常永久地安装在轴边上,对转速进行长期监视。

§ 4.2.5 磁性转速表

**工作原理** 如图 4.2.19 所示,永久磁铁和被测物的转轴联在一起。当进行测量时,转轴随被测物旋转,因此永久磁铁也跟着进行同步旋转。

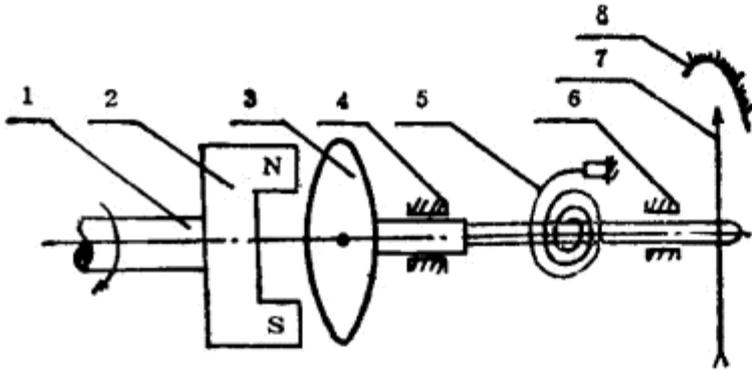


图 4.2.19 磁性转速表原理图

1. 转轴 2. 永久磁铁 3. 铝盘 4、6. 支架  
5. 游丝 7. 指针 8. 刻度盘

由于铝制圆盘靠近永久磁铁,当永久磁铁旋转时,它们二者产生相对运动(当然永久磁铁所产生的磁场也与铝制圆盘产生相对运动),因此使铝制圆盘中产生涡流。该涡流产生一个磁场,它与永久磁铁所产生的磁场相互作用后,使铝制圆盘产生一定的转矩。该转矩与被测物的转速  $n$  成正比,即

$$n = KM \text{ (转/分)} \quad (4.2-10)$$

式中  $n$ —转速(转/分);

$K$ —与结构有关的系数;

$M$ —铝制圆盘的转矩(牛顿·米)。

当铝制圆盘的转矩与游丝所产生的反力矩相平衡时,则游丝所转过的角度  $\theta$  就表示被测物的转速。 $\theta$  角度的大小则由指针在刻度盘上指出。因此有下列关系式;

$$n = K'\theta \text{ (转/分)} \quad (4.2-11)$$

式中  $K'$ —仪表常数;

$\theta$ —指针在刻度盘上的转角(角度);

$n$ —被测物转速(转/分)。

**结构** 结构见图 4.2.19。这里需说明一下仪表与被测物之间的联系问题。磁性转速表的转轴与被测物之间的联系,是采用锥形橡胶触头以摩擦力方式相联接。此外,为防止外界磁场干扰,整个表加有金属防磁罩。

**主要性能** 转速一般在 1~20000 转/分,精度为  $\pm(1.5\sim2.0)\%$ 。

磁性转速表一般作成携带式。它具有结构简单,维护、使用方便等优点。缺点是精度不高。因为它和被测物之间的联接是靠锥形橡胶触头与被测物转轴之间的摩擦力进行的。当接触压力不够大时,容易产生打滑现象。而当接触压力过大时,由于会给被测物转轴以很大阻力,因而带来附加误差。

§ 4.2.6 电磁速度传感器

**工作原理** 如图 4.2.20 所示,它是一种专门用来测量炸药爆炸时粒子速度  $v$  及与爆炸速度有关的参数的传感器。金属箔片(Π形

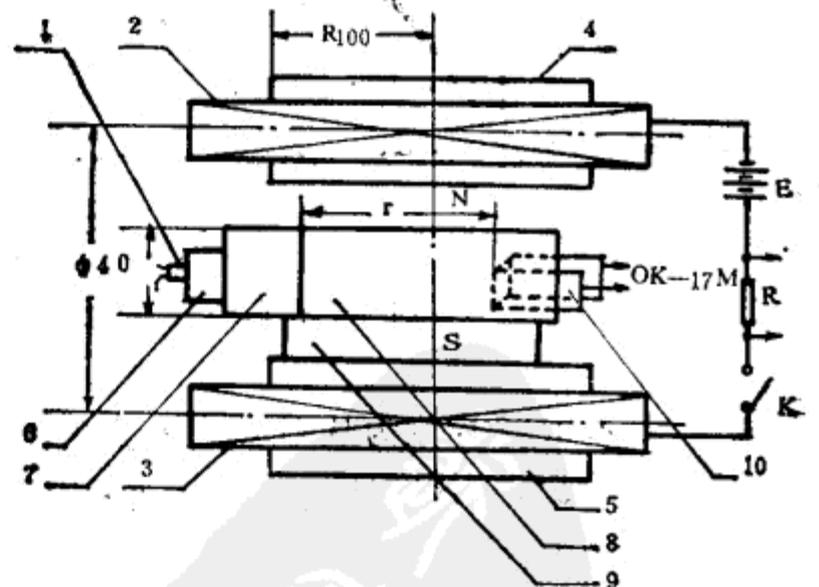


图 4.2.20 电磁速度传感器原理图

1. 雷管 2、3. 线圈绕组 4、5. 磁芯 6. 传爆炸药柱 7. 平面波发生器 8. 被测炸药柱 9. 木支架 10. “Π”形金属箔片

铜片或铝片)作为传感元件嵌入炸药之中。两组绕组线圈通电后用来形成磁场。当被测炸药通过雷管、传爆炸药柱进行爆炸时,  $\Pi$ 形传感元件在磁场中被炸药爆炸后作切割磁力线运动, 从而产生感应电势  $\xi$ , 其大小由法拉第电磁感应定律给出, 即

$$\xi = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d(\vec{B} \cdot \vec{S})}{dt} \text{ (伏特)} \quad (4.2-12)$$

式中  $\vec{B}$ —磁感应强度(韦伯/米<sup>2</sup>);  
 $\vec{S}$ —垂直于磁力线方向上的线圈面积(米<sup>2</sup>);  
 $\phi$ —通过  $\vec{S}$  面积的磁通量(韦伯),  $d\phi$  则为在时间  $dt$  内的磁通增量;  
 $dt$ —炸药爆炸瞬间的时间(秒)。

如果  $\Pi$  形传感元件运动方向垂直于磁力线方向, 则感应电势大小为

$$\xi = Blv \text{ (伏特)} \quad (4.2-13)$$

式中  $B$ —磁感应强度(韦伯/米<sup>2</sup>);  
 $l$ — $\Pi$ 形传感元件运动时切割磁力线的有效长度(米);  
 $v$ —传感元件的运动速度(米/秒)。

用  $OK-17M$  型示波器可记录感应电势  $\xi$  随时间变化的情况, 如图 4.2.21 所示。图中  $A$  点为  $\overline{BC}$  线段的延长线交于  $\xi$  轴上的一点。幅值  $OA$  的大小代表炸药爆轰波粒子在转折点处的速度  $v_j$ 。知道了  $v_j$  后, 便可确定爆轰波转折( $CJ$ )参数  $a_0$  (炸药爆轰反应区宽度)、爆轰压  $P_j$ 、爆轰产物多方指数  $\gamma$ 。由上述几个参数可以根据公式求得炸药的反应速率  $v(t)$ 。

由式(4.2-13)知, 当  $B$ 、 $l$ 、 $\xi$  知道后, 就可知  $v(t)$ 。因此我们可将  $\xi-t$  曲线转换为  $v-t$  曲线, 如图 4.2.22 所示。转换时注意图 4.2.21 中的  $A$  点( $\xi$  的大小)对应于图 4.2.22 中的  $v_j$  点的数值大小。图 4.2.22 中  $\tau$  的大小为图 4.2.21 中从  $O$  点到  $B$  点所经历的时间

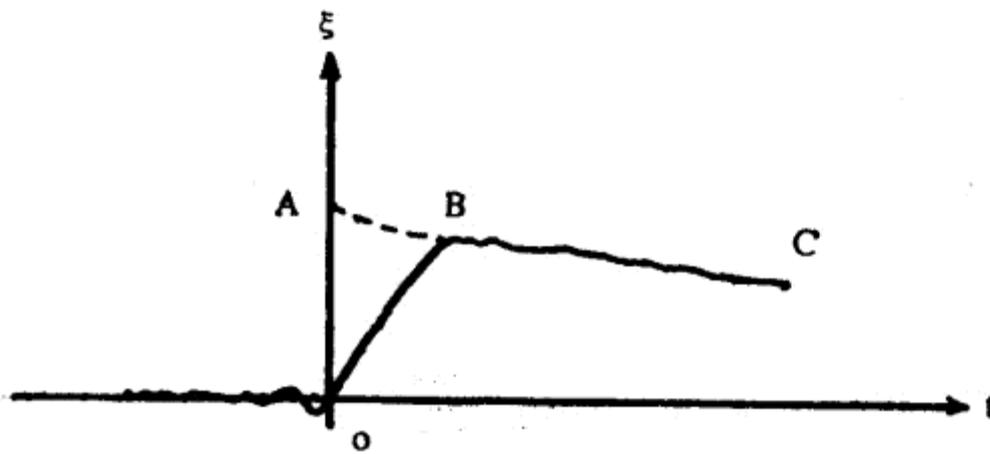


图 4.2.21  $\xi-t$  曲线

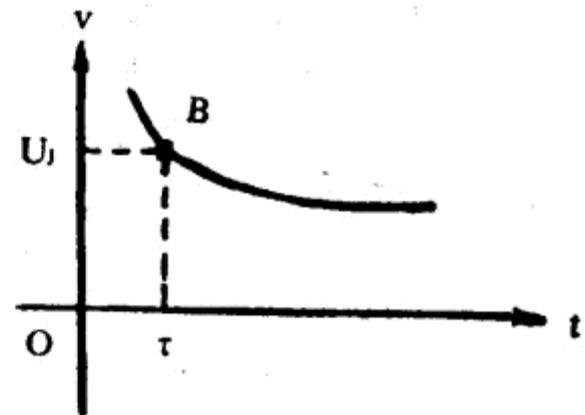


图 4.2.22  $v-t$  曲线

(秒), 在图 4.2.22 中则为从  $O$  点到  $B$  点所需时间。它反映了爆轰反应区在传感元件上所经历的时间。爆轰反应区宽度  $a_0$  则由下式表示:

$$a_0 = (u - \bar{v})\tau \text{ (厘米)} \quad (4.2-14)$$

式中  $u$ —炸药爆速(厘米/秒);  
 $\bar{v}$ —反应区中炸药质点平均速度(厘米/秒),  $\bar{v} \approx 1.3v_j$ ;

由  $u$  和  $v_j$  还可计算出爆炸压力  $P_j$  和爆轰产物多方指数  $\gamma$ , 即

$$P_j = P_0 v_j u \text{ (巴)} \quad (4.2-15)$$

式中  $P_0$ —炸药的密度(克/厘米<sup>3</sup>)。

当  $v_j$  和  $u$  的单位均用厘米/秒时, 则  $P_j$  的单位为巴。

爆炸产物的多方指数  $\gamma$  由下式表示:

$$\gamma = \frac{u}{v_j} - 1 \quad (4.2-16)$$

传感元件设置的位置  $r$  (即距起爆面的距离, 见图 4.2.20) 不同, 则示波器所记录到的  $v-t$  曲线的速率也不同。它由下式计算:

$$v(t) = \frac{2C_j}{\gamma-1} \left[ \left( \frac{t}{\frac{r}{u} + \tau} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} - 1 \right] + v_j \quad (\text{厘米/秒}) \quad (4.2-17)$$

式中  $C_j$ —为  $v-t$  曲线中转折点处(见图 4.2.22 中  $B$  点)所对应的音速(厘米/秒); 其余参数的含意同上述。

炸药的爆炸速度  $u$  可以从  $v-t$  波形上求得, 详见下述。

**结 构** 传感元件的结构形式不同, 可构成不同形式的电磁速度传感器。如图 4.2.23 所示的所谓简化反串联型传感器, 就是把传感元件作成两个  $\Pi$  形(一个正  $\Pi$  形。另一个倒  $\Pi$  形)反向串联而成。传感元件厚为  $20 \sim 50 \mu\text{m}$ 。

用这种简化反串联型传感器由示波器所测得的  $v-t$  波形图如图 4.2.24 所示。

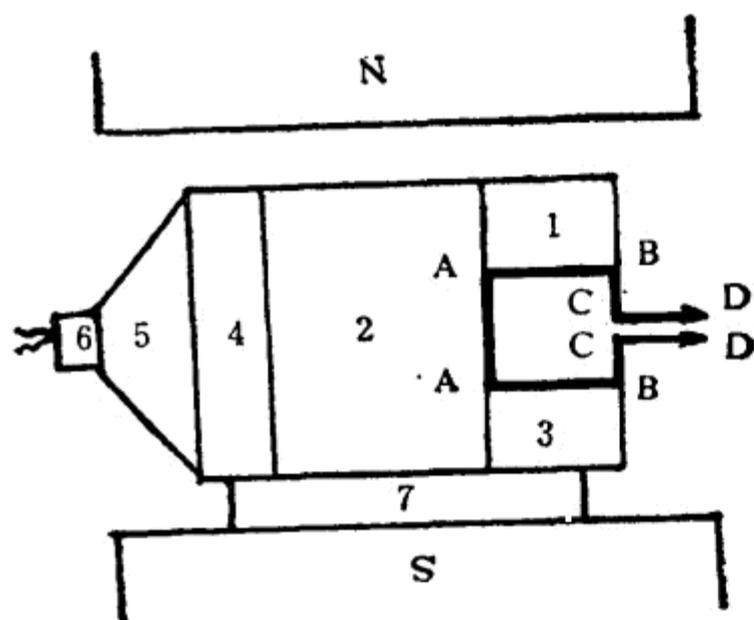


图 4.2.23 简化反串联型传感器结构图

1、2、3. 被测炸药 4. 平面波发生器 5. 传爆药柱  
6. 雷管 7. 支架(木头)

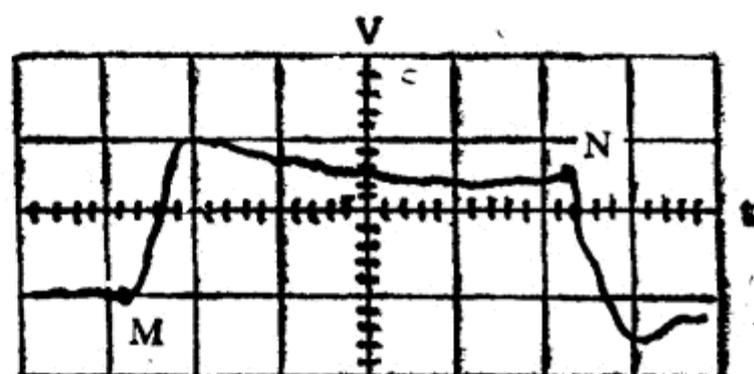


图 4.2.24  $v-t$  典型波形(示波器的垂直:  
 $1V/\text{div}$  水平:  $0.2\mu\text{s}/\text{div}$ )

由  $v-t$  波形可知, 当爆轰达到图 4.2.23 中的  $AA$  面时, 感应电势从  $M$  点突然上升; 当爆轰达到  $BB$  面时, 感应电势反向, 波形从  $N$  点突然下降。从  $M$  点到  $N$  点所需时间, 即爆轰波通过炸药柱时间。由图 4.2.24 知, 它的大小为

$$t = 25 \times 0.2 \mu\text{s} = 5 \mu\text{s}$$

对应于该时间的位移为

$$s = 45 \text{ mm}$$

因此可得出炸药的爆速  $u$  为

$$u = \frac{s}{t} = \frac{45 \text{ mm}}{5 \mu\text{s}} = 9 \text{ mm}/\mu\text{s}.$$

**主要性能** 利用图 4.2.21 的  $\xi-t$  曲线来测量  $v_j$  时, 其精度为  $\pm 3\%$ ; 利用图 4.2.22 来

测量  $\tau$  时, 其精度为 10~15%。利用图 4.2.24 测  $u$  时, 其分辨力大小主要取决于所用示波器的分辨力。

利用电磁速度传感器来测量炸药的爆炸速度、爆轰波粒子速度等参数的优点是动态响应快。缺点是测量精度不高。

电磁速度传感器不仅可以测量炸药的爆轰参数, 如  $a_0$  (爆轰反应区宽度)、 $\tau$  (爆轰反应时间)、 $v_j$  (爆轰波粒子速度)、 $P_j$  (爆轰压)、 $u$  (爆速)、 $\gamma$  (爆轰产物多方指数) 等, 而且在岩土力学、材料动态性能研究、高速碰撞、固体应力波等研究中, 也有着广泛的用途。

#### § 4.2.7 测速发电机

**工作原理** 测速发电机用来测量或自动调节电动机转速。它是根据电磁感应原理进行工作的。与发电机原理类似, 它也是把转动的机械能变换为电信号输出。有关发电机的原理可参阅有关书籍。这里着重指出它和一般发电机不同之处。

测速发电机一般和转速成线性关系, 即在工作的任一瞬时, 其输出电压均与瞬时角速度成正比, 而它的极性则随旋转方向改变而改变。输出电压  $U_{sc}$  大小为

$$U_{sc} = k\omega \text{ (伏特)} \quad (4.2-18)$$

式中  $k$ —比例常数;

$\omega$ —转轴的角速度(弧度/秒)。

根据电枢电流的种类可以分为直流测速发电机和交流测速发电机两类。直流测速发电机又分有他激式和永磁式两种。交流测速发电机又有同步式及异步式之分。

##### 1. 直流测速发电机

直流测速发电机在励磁恒定时, 其电压  $E_0$  与转速  $\omega$  成正比, 即

$$E_0 = k\omega \quad (4.2-19)$$

式中  $k$ —比例常数。

当带负载时, 直流测速发电机的输出电压  $U_{sc}$  为

$$U_{sc} = E_0 - IR_s = k\omega - IR_s \text{ (伏特)} \quad (4.2-20)$$

式中  $I$ —通过电枢电流(安培);

$R_s$ —电枢电阻(欧姆)。

若电枢压降  $IR_s$  很小, 则  $U_{sc} \approx k\omega$ , 测速误差很小。

若电枢压降较大, 或在测速过程中负载发生改变, 则测速发电机的线性特性变差。这时测得的转速有较大的误差。

不同负载电阻  $R_f$  下的输出特性曲线如图 4.2.25 所示。 $R_f$  愈大, 线性度愈好。

电刷与整流子间的接触电阻在测速发电机工作时要产生一定的压降, 它直接影响测速发电机的线性特性。当这个压降过大而转速又较小时, 使输出电压  $U_{sc}$  产生一个不灵敏区。如图 4.2.26 中所示的  $2\Delta\omega$ 。图 4.2.26 为电刷压降对输出特性的影响曲线。

##### 2. 交流测速发电机

交流测速发电机有同步式和异步式之分, 通常采用异步式。

异步式测速发电机的原理、结构如图 4.2.27 所示。

图 4.2.27(a) 为结构图。它由内、外定子及杯形转子构成。外定子为隐极式, 励磁绕组  $A$  嵌于槽内。在内定子铁芯槽内嵌有工作绕组(即输出绕组)  $B$ 。两绕组在空间相距为  $90^\circ$  电角度。非磁性的杯形转子在内、外定子间的空隙中转动。为减小因转子发热而电阻增加时引起的附加误差, 转子可用电阻温度系数较小的锰铜或锰铝合金制成。

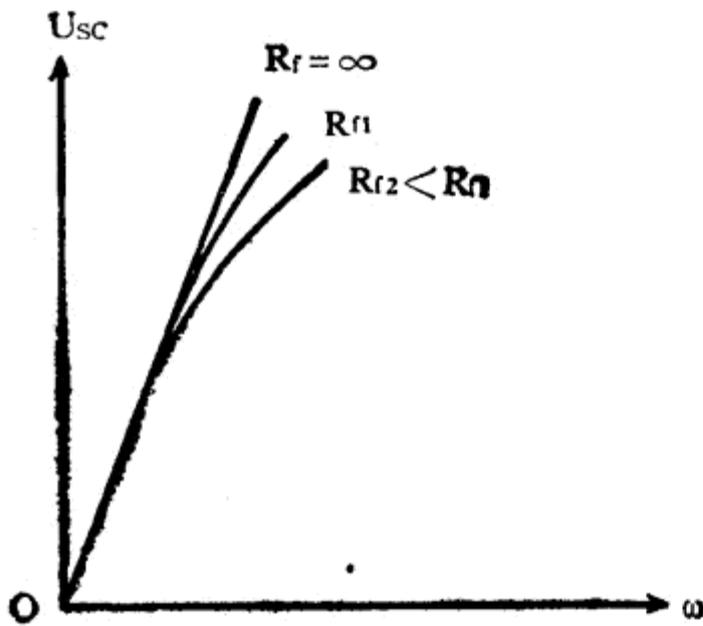


图 4.2.25 测速发电机不同负载下的输出特性曲线  
 $R_{f1}$ 、 $R_{f2}$  负载电阻  $U_{sc}$  输出电压  $\omega$  转速

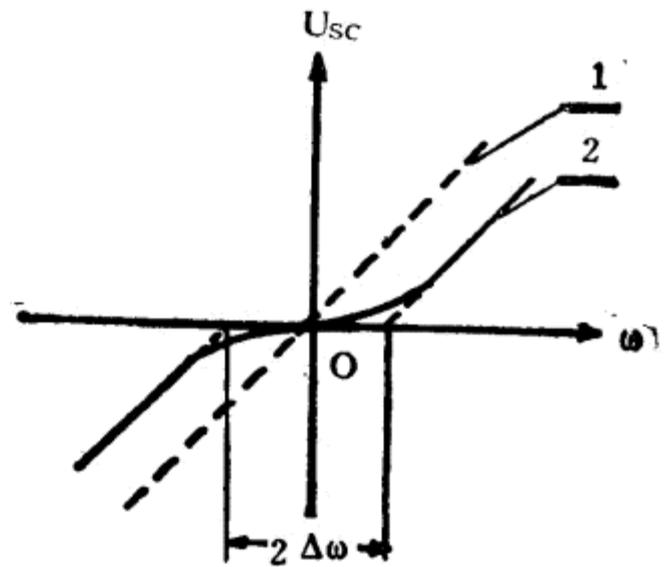


图 4.2.26 电刷压降对输出特性的影响  
 1. 电刷接触电阻为零(理想情况)时; 2. 实际有不灵敏区  $2\Delta\omega$  时。

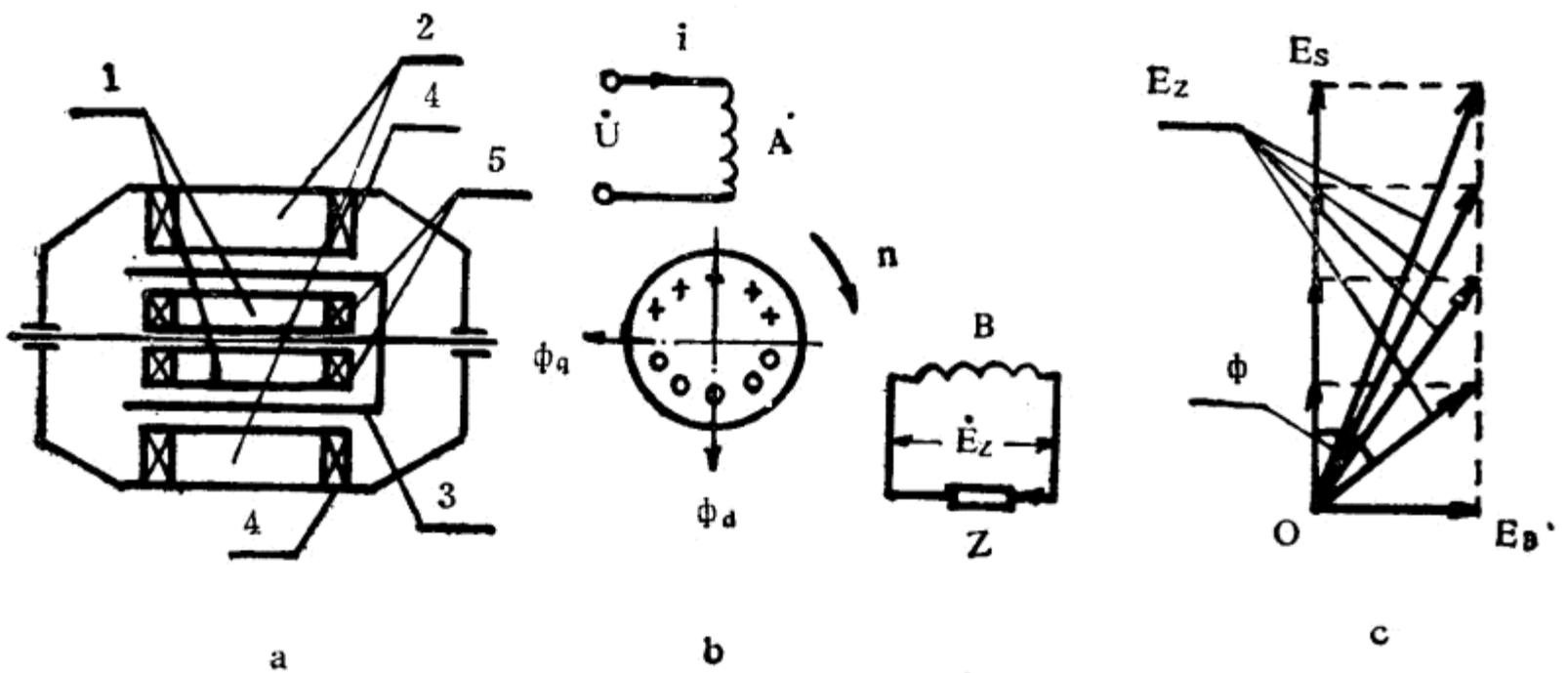


图 4.2.27 非磁性空心转子结构及原理图

a. 结构图

- 1. 内定子
- 2. 外定子
- 3. 杯形转子
- 4. 单相励磁绕组(A)
- 5. 工作绕组(B)

b. 工作原理图

- A. 励磁绕组
- B. 工作绕组
- $\dot{U}$ . 励磁电压
- $E_z$ . 负载 Z 上电势
- $\phi_q - \phi_d$ . A、B 两绕组的相位差

c. 电势矢量图

- $E_s$ . 工作绕组上的速率电势
- $E_B$ . 工作绕组上感生的附加电势
- $\phi$ . 附加相位差

图 4.2.27 (b) 为它的工作原理图。当在励磁绕组 A 两端加上电压  $\dot{U}$  时，转子旋转，在工作绕组 B 上便产生有感应电势  $\dot{E}_z$ ，它的大小与转速成正比，相位随转子转动方向而改变，频率则与  $\dot{U}$  的频率相同。

由于磁饱和的不平衡,使得  $A$ 、 $B$  两绕组并非严格地相差  $90^\circ$  电角度。这时,除了在工作绕组  $B$  上产生与转速有关的速率电势  $E_s$  外,还会产生附加的感生电势  $E_B$ 。二者矢量合成之后,使输出电压产生一个附加相位差  $\phi$  (见图 4.2.27(c))。尤其测速发电机在低速运行时,因速率电势  $E_s$  较小,  $\phi$  就更大。

**主要性能** 测速发电机种类、型号较多,它们的主要性能见表 4.2.3~4.2.7。

表 4.2.3 CK 系列测速发电机的主要性能

型 号	励磁电压 (伏)	频率 (赫)	励磁电流 (安)	励磁功率 (瓦)	灵敏度 (伏/1000 转/分)	剩余电压 (毫伏)		线性度 (%)	最大转速 (转/分)	重量 (克)
						I 级	II 级			
20CK4D0.4	20	400			0.4	20		0.2	3600	
20CK4D0.5	26	400	0.05	0.65	0.5	20	30	0.3	3600	
28CK4D2	36	400	0.1		2	60	120		4000	170
28CK4D3.5	36	400	0.13		3.5	60	120		4000	170
28CK4D4	36	400	0.08		4	80		0.5	3600	170
28CK4D0.8	36	400	0.25	5	0.8	20	30	0.5	3600	170
28CK4B2.75	115	400	0.08	3.1	2.75	40	60	0.5	3600	170
36CK4D1	36	400	0.25	5	1	15	40	0.2	3600	275
36CK4B3	115	400	0.05	3.5	3	40	80	0.3	3600	275
45CK4B3	115	400	0.22	5.7	3	40	80	0.2	2000	500
45CK5C3	110	400	0.9	6	3	25		0.5	2000	500
CK-0.5	36	50			1.5	25	40	$\pm 2$	相位移: $5^\circ$	

表 4.2.4 AT 系列测速发电机的主要性能

型 号	励磁电压 (伏)	频率 (赫)	励磁电流 (安)	最大转速 (转/分)	灵敏度 (毫 伏/转·分)	剩余电 压 (毫 伏)	静摩擦力矩 (克·厘米)	工作绕组输 出阻抗(欧)	重量 (公斤)
AT-201	220	50	0.15	3000	$3 \pm 0.35$	50	10		2.1
AT-231	110	500	0.28	4000	$5.5 \pm 0.5$		5	2300	2.1
AT-261	110	500	0.35	4000	$5.3 \pm 0.5$		10	2000	2.1

表 4.2.5

ZCF 系列测速发电机的主要性能

型 号	励磁电 流(安)	电枢电 压(伏)	负载电 阻(欧)	转速 (转/分)	输出电 压线性 度(%)	低频脉 动峰值 (%)	最 大 出 电 (安)	输 流	额定励 磁电压 (伏)	额定 电压 (伏)	重量 (公斤)
ZCF-121	0.09	50±2.5	2000	3000	±1						0.44
ZCF-121A	0.09	50±2.5	2000	3000	±1						0.44
ZCF-221	0.3	51±2.5	2000	2400	±1						0.9
ZCF-221A	0.3	51±2.5	2000	2400	±1						0.9
ZCF-221C	0.3	51±5	2000	2400	±1						0.9
ZCF-361	0.3	106±5	10000	1100	±1						2.0
ZCF-11	参考功率(瓦) 150			额定转速 (转/分) 1500	1	1	1.3或0.65		110或 220	115或 230	
ZCF-12	300			1500	1	1	2.6或1.3		同 上	同 上	
	150			1000			1.3或0.65				
	300			1000			2.6或1.3				
ZCF-21	500			1500	1	1	4.35或2.18		同 上	同 上	
	150			750			1.3或0.65				
ZCF-22	700			1500	1	1	6.1或3.05		同 上	同 上	
	300			1000			2.6或1.3				
	150			750, 600			1.3或0.65				
ZCF-31	1000			1500	1	1	8.7或4.35		同 上	同 上	
	500			750			4.35或2.18				
	300			600			2.6或1.3				
ZCC-32	1400			1500	1	1	12.2或6.1		同 上	同 上	
	500			600			4.35或2.18				



表 4.2.6 ZYS、ZYSH 系列测速发电机的主要性能(永磁式)

型 号	最高转速 时电压 (伏)	电 流 (毫安)	功 率 (瓦)	转 速 (转/分)	额定负 载电阻 (欧)	线性度 (%)	重 量 (公斤)
ZYS-231/110	110	210	23.1	1900	500		7.5
ZYS-132/110	110	120	13.2	1900	920		7.5
ZYS-44/55	55	80	4.4	1900	700		7.5
ZYSH-231/110	110	210	23.1	1900	500		13
ZYSH-132/110	110	120	13.2	1900	920		13
ZYSH-44/55	55	80	4.4	1900	700		13
ZYS-1A	55	80	4.4	0~2000		0.5	4
ZYS-3A	110	200	22	0~2000		0.5	4
ZYS-100A	100	80	8	0~1000		0.5	4

表 4.2.7 CYD系列测速发电机的主要性能(高灵敏度)

型 号	灵敏度(伏/弧 度秒)	最大转 速(转 /分)	线 性 度 (%)	不 对 称 度 (%)	纹波幅值(转速为 20转/分时)	每转纹 波频率 (赫)	最小负 载电阻 (千欧)	摩擦转 距(克 ·厘米)	重 量 (公斤)
CYD-11	11	30	≤1	≤1	≤1	79	203	≤550	2.5
CYD-6	6	100	≤1	≤1	≤1	395	50	≤550	2.5
CYD-2.7	2.7	300	≤1	≤1	≤1	395	11.35	≤550	2.5
CYD-50	40~50	20	≤1	≤1	在10转/分时≤1	298	80		18
CYD-10	10	100	≤1	≤1	≤1	342	5.6		16.5

测速发电机具有线性度好、灵敏度高、输出信号大等优点。所以在工业自动控制中广泛用它来测量和自动调节电动机转速。