

§ 4.6 速度陀螺

§ 4.6.1 转子陀螺

工作原理 图 4.6.1 和图 4.6.2 是转子陀螺式角速度传感器的工作原理图。当基座绕 y 轴(敏感轴)以角速度 ω 旋转时, 由于陀螺具有进动性, 在内环轴(x 轴)上产生一个大小与角速度 ω 成比例的陀螺力矩。在该力矩的作用下, 陀螺内环组件绕内环轴转动某一角度, 此时由弹簧产生的反力矩与陀螺力矩平衡。由于电刷固定在内环轴上, 电位器骨架固定在基座上, 所以当基座绕 y 轴旋转时, 电位器将会输出一个与角速度成比例的电压信号。

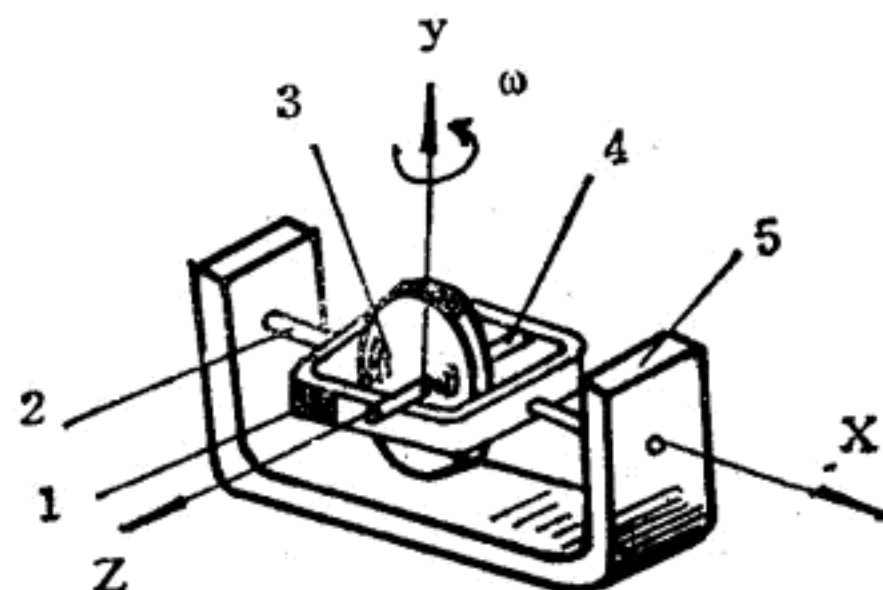


图 4.6.1 二自由度陀螺原理图

1. 内环 2. 内环轴 3. 转子 4. 转子轴 5. 基座

1. 转子陀螺角速度传感器的运动方程式

根据陀螺理论, 当陀螺转子以 Ω 的角速度旋转时(这时基座以 ω 角速度绕 y 轴旋转), 其角动量矩 H 为

$$H = J_2 \Omega$$

(4.6—1)

式中 J_2 —陀螺转动惯量矩 ($\text{g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$)。

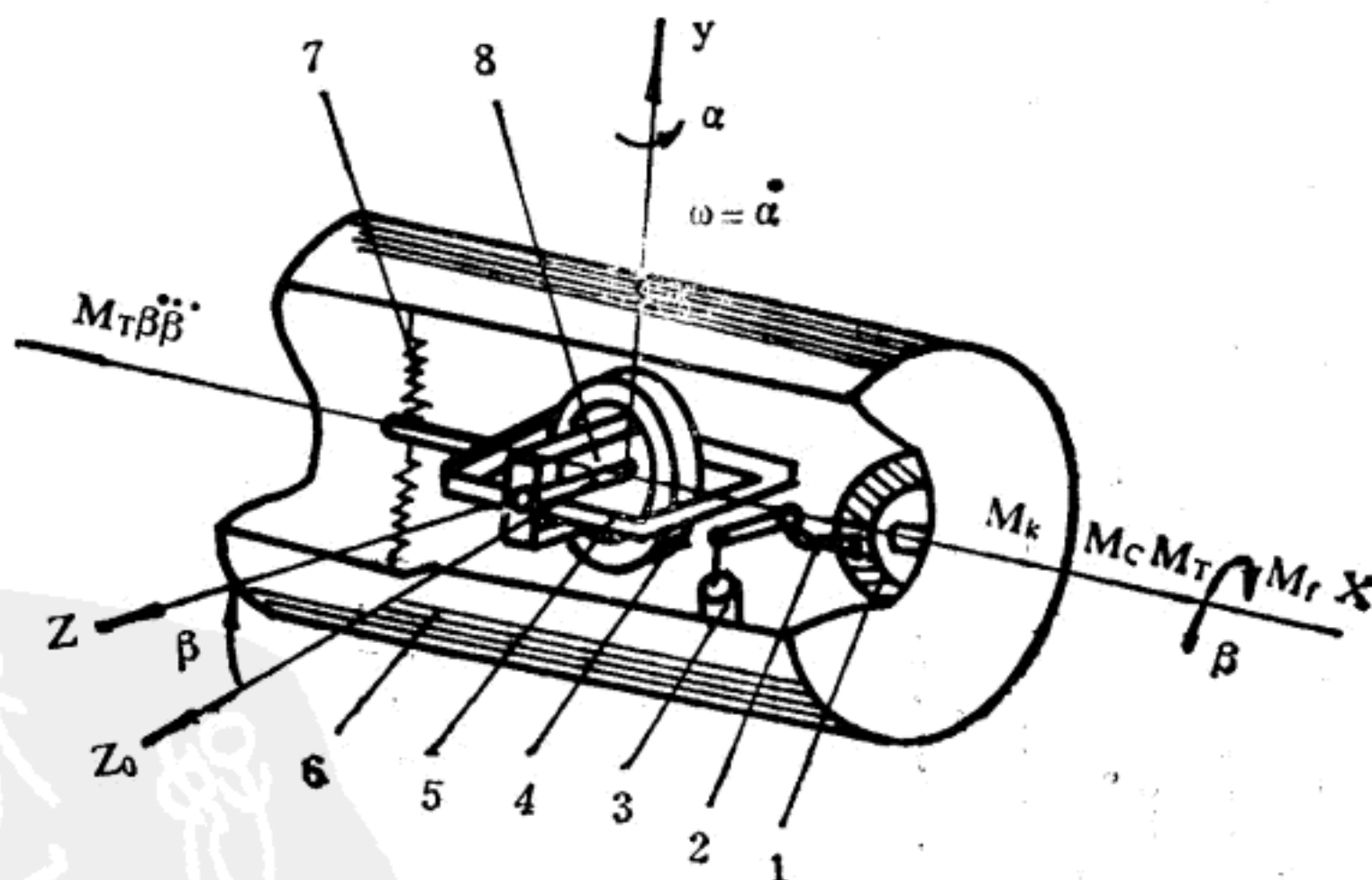


图 4.6.2 角速度陀螺传感器结构图

x. 输出轴 y. 输入轴 z. 转子轴

1. 电位器 2. 电刷 3. 阻尼器 4. 转子 5. 框架 6. 壳体 7. 弹簧 8. 定子

陀螺力矩 M_T 大小为

$$M_T = H\omega \cos\beta \quad (4.6-2)$$

式中 β —框架转轴相对其起始位置的偏离角(rad)。

弹性力矩 M_K ，它是由弹簧产生的。它起阻碍框架转动的作用，力求使框架转回起始位置。

$$M_K = K\beta \quad (4.6-3)$$

式中 K —弹簧刚度系数(g·cm/rad)。

阻尼力矩 M_C ，它是由阻尼器产生。该力矩与 $\dot{\beta}$ 成正比。

$$M_C = C\dot{\beta} \quad (4.6-4)$$

式中 C —阻尼器的阻尼系数(g·cm·s)；

$\dot{\beta}$ —陀螺框架组件绕其转轴转动的角速度(rad/s)。

惯性力矩 M_J ，它与 $\ddot{\beta}$ 成正比。

$$M_J = J\ddot{\beta} \quad (4.6-5)$$

式中 J —所有与框架一起转动的元件相对于框架转轴的惯量矩(g·cm·s²)；

$\ddot{\beta}$ —框架组件绕其转轴的角加速度(rad/s²)。

摩擦力矩 M_f ，它的大小等于当框架相对 x 轴转动时所有摩擦力矩之和。它的方向为当 $\dot{\beta} > 0$ 时取 $+M_f$ ，当 $\dot{\beta} < 0$ 时取 $-M_f$ 。如图 4.6.2 所示。

按图 4.6.2 中各力矩所示方向，可以得出陀螺框架运动方程式，即

$$J\ddot{\beta} + C\dot{\beta} + K\beta + M_f = M_T$$

$$\text{或} \quad J\ddot{\beta} + C\dot{\beta} + K\beta + M_f = H\omega \cos\beta \quad (4.6-6)$$

在实际测量中 β 角一般很小，则 $\cos\beta \approx 1$ 。因此式 (4.6-6) 变为

$$J\ddot{\beta} + C\dot{\beta} + K\beta + M_f = H\omega \quad (4.6-7)$$

只有当陀螺力矩 M_T 大于摩擦力矩 M_f 时，框架才能运动。据此，所获得传感器感受的最小角速度 ω_{min} ，也就是传感器的灵敏限，即

$$\omega_{min} = \frac{M_f}{H} \quad (4.6-8)$$

式 (4.6-8) 说明，要想灵敏地测量小的角速度，必须尽量减小摩擦力矩。

由式 (4.6-7) 可写成

$$\beta = \frac{1}{K} (H\omega - M_f - C\dot{\beta} - J\ddot{\beta}) \quad (4.6-9)$$

在平衡的情况下(即 $\dot{\beta} = \ddot{\beta} = 0$)，则

$$\beta = \frac{1}{K} (H\omega - M_f)$$

$$\text{或} \quad \beta = \frac{H\omega}{K} - \frac{M_f}{K} \quad (4.6-10)$$

当摩擦力矩与陀螺力矩相比很小可以忽略时，则

$$\beta = \frac{H}{K} \omega \quad (4.6-11)$$

上式说明，当传感器达到平衡状态时，框架的起始位置偏离角 β 与被测角速度 ω 成正比。因此，当 H 和 K 为常数时， β 与 ω 成线性关系。

2. 输出特性方程

电位器设计应保证其输出电压 U_o 与电刷转角 β 成正比，即

$$U_o = U_i \frac{\beta}{2\beta_0} \quad (4.6-12)$$

式中 U_i —电位器的端电压,
 $2\beta_0$ —电位器全程转角。

将式 (4.6-11) 代入式 (4.6-12) 得

$$U_o = U_i \frac{H}{2K\beta_0} \omega = K' \omega \quad (4.6-13)$$

$$K' = U_i \frac{H}{2K\beta_0}$$

式中 K' 称为传感器的放大系数。

式 (4.6-13) 说明电位器的输出电压 (U_o) 与角速度 (ω) 成线性关系。最大输出电压等于端电压的一半, 即

$$U_{max} = \frac{U_i}{2} \quad (4.6-14)$$

当角速度继续增大至 ω_{max} 时, 框架碰到限位器而停转, 电压停止增加。由式 (4.6-13) 和式 (4.6-14) 可得

$$\frac{U_i}{2} = U_i \frac{H}{2K\beta_0} \omega_{max}$$

$$\text{则 } \omega_{max} = \frac{K}{H} \beta_0 \quad (4.6-15)$$

从式 (4.6-13) 可知, 输出电压 U_o 与电源电压 U_i 的变化有直接关系。若将机械弹簧改用“电弹簧”即可避免这种情况。

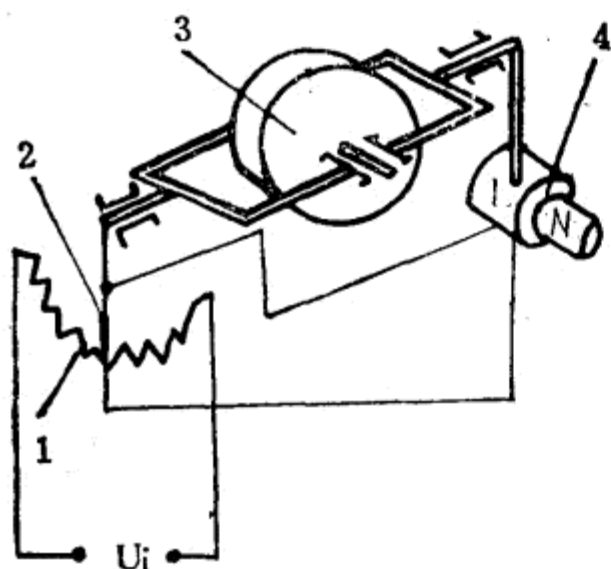


图 4.6.3 装有电弹簧角速度传感器的原理图

1. 电位器 2. 电刷 3. 转子 4. 线圈和磁铁

装有“电弹簧”的角速度陀螺传感器的测量原理见图 4.6.3。这时的陀螺力矩仍如式 (4.6-2) 所示, 即

$$M_T = H\omega \quad (\beta \approx 0)$$

该力矩由线圈 L 和永久磁铁相互作用产生的力矩 M_K'' 相平衡。力矩 M_K'' 与电位器的输出电压成比例, 即

$$M_K'' = K'' U_o \quad (4.6-16)$$

式中 K'' —“电弹簧”的刚度系数。

由平衡方程式 $M_T = M_K''$ 得

$$H\omega = K'' U_i \frac{\beta}{2\beta_0}$$

$$\text{则 } \beta = \frac{2H\beta_0}{K'' U_i} \omega \quad (4.6-17)$$

将式 (4.6-17) 代入式 (4.6-12) 得

$$U_o = U_i \frac{1}{2\beta_0} \cdot \frac{2H\beta_0}{K'' U_i} \omega = \frac{H}{K''} \omega \quad (4.6-18)$$

从上式可见, 输出电压 U_o 与角速度 ω 成正比, 与电源电压 U_i 无关。

3. 原理方框图

前面在进行方程式推导时, 曾假设 $\beta = 0$, 因而输出转角与输入角速度成线性关系。但

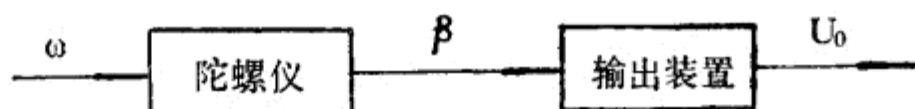


图 4.6.4 角速度陀螺传感器的原理方框图

实际上由于 $\beta \neq 0$ ，这时敏感轴 y 与被测角速度 ω 的方向不一致，因此实际所测的角速度是 ω 在 y 轴上的投影 ($\omega \cos \beta$)。当 β 达到一定数值时，所产生的分量就很明显了。所以陀螺框架转角一般限制在 $2 \sim 3^\circ$ 范围内。

对于作用在框架轴上的干扰力矩(主要是摩擦力矩和静不平衡力矩)，最终将引起内环的偏转角。这一偏转角在测量小角速度时，将引起不可忽略的误差。这是传感器灵敏限高低的主要因素。为此，应尽量减小内环轴上轴承、输电装置、阻尼器和信号输出装置的摩擦力矩，以及弹簧的迟滞干扰力矩，并对框架组件进行精细静平衡调试。对高精度的传感器一般采用液浮结构，以减小内环支承的摩擦力矩；采用液体或电磁阻尼器以避免干摩擦力矩；采用微动同步器或光电电位器以避免电刷与电位器的接触摩擦力矩。

当输出装置存在零位电压时，测量小角速度往往会和信号电压混在一起，因此必须将零位电压调至最小。为此，可采用适当的补偿线路。

从上述分析可见，在测量范围下限以最小角速度 $\omega_{\min}$ 输入时，零位电压和漂移是决定误差的主要因素；在测量范围上限以最大角速度 $\omega_{\max}$ 输入时，内环转角 $\beta_{\max}$ 是决定误差的主要因素。这些因素在设计时是必须考虑的。

结 构 角速度陀螺传感器的结构如图 4.6.2 所示。它主要由陀螺马达、陀螺框架(内环)、阻尼器、反馈弹簧、输出装置和壳体等组成。

陀螺马达 它由转子和定子组成，实际上是一部三相异步电机。为了获得高的旋转惯量矩，将转子安装在定子外面，定子轴装在陀螺框架上，转子以高速绕着 Z 轴旋转(角速度 24000 转/分)。为了得到更高的转速，可通过较高频率的交流电。这就要求滚珠轴承有足够的耐磨性。定子绕组导线经空心轴引至壳体。

陀螺框架 又称内环。陀螺马达定子固定在框架上，框架的旋转轴就是传感器的输出轴。设计时必须使框架转动的摩擦力矩尽量小，以便获得传感器的最小角速度敏感限(见式(4.6—8))。所以目前广泛采用液浮、气浮陀螺。

阻 尼 器 由式(4.6—4)，可知，阻尼力矩与框架轴转动角速度成正比。也就是说，阻尼力矩对框架的运动起了制动作用，使活动系统不出现振荡的情况。

从原理上讲，可以采用气体阻尼(类似汽缸、活塞)、液体阻尼(壳体内充满甲基硅油)和电磁阻尼。其中液浮陀螺虽具有液体阻尼的效果，但要考虑到它的温度特性。如在低温、高温宽广的范围内粘度系数不能变化太大。一般还要采用温度补偿装置。如波纹管。

弹 簧 弹簧产生与陀螺力矩相平衡的力矩，并起零位定位作用。机械弹簧结构简单，要求有好的线性(K 为常数)。“电弹簧”结构复杂，输出精度高。

输出装置 这里主要指的是电位器和电刷。它们之间的相对角位移输出与被测角速度成比例的电压信号。

主要性能 下面仅以角速度转子陀螺传感器为例，列出主要性能。

1. 外形尺寸: $\phi 40 \times 107 \text{ mm}$;

2. 重量: 0.5kg;
3. 测量范围: $\pm 30 \sim \pm 12^\circ/\text{s}$;
最小敏感角速度: $0.6 \sim 2^\circ/\text{s}$;
4. 使用电源:
三相交流电: $40 \pm 2\text{V}$, 频率 $40 \pm 1\text{Hz}$ (供给陀螺马达);
直流电: $6 \pm 0.2\text{V}$ (供给电位器);
5. 阻尼比: $0.2 \sim 2.0$;
6. 陀螺马达启动时间小于 1 分钟, 启动电流小于 0.35A, 工作电流小于 0.12A;
7. 电位器电阻: $500 \sim 800\Omega$;
8. 输出特性重复性误差: 小于电位器总阻值的 $\pm 2\%$;
9. 输出特性的线性误差: 小于电位器总阻值的 $\pm 2\%$;
10. 工作温度范围: $-40 \sim +50^\circ\text{C}$;
11. 振动过载: $30 \sim 500\text{Hz}$, 加速度 $6 \sim 8g$;
12. 冲击过载: $2g5$;
13. 离心过载: $30g$ 。

目前在航天、航空、舰艇方面广泛应用角速度陀螺仪。特别随着新型陀螺的出现, 漂移率将大大减小, 精度会大大提高, 从而为角速度测量提供了更加完美的测试手段。

§ 4.6.2 压电陀螺

压电陀螺是利用晶体的压电效应敏感角参量的一种新型固体惯性传感器。压电陀螺消除了传统陀螺的转动部分, 故陀螺寿命取得了重大突破, *MTBF* (平均无故障间隔) 达 10,000 小时以上。压电陀螺的出现, 其意义不仅是增加了陀螺的一个新品种, 更重要的是它的出现

改变了陀螺的传统概念。我国在压电陀螺的研究方面取得了重要的成果。

1. 振梁型压电角速度陀螺

工作原理 振梁型压电角速度陀螺的工作原理如图 4.6.5 所示, 其电原理方框图如图 4.6.6 所示。这种陀螺的心脏元件是一根矩形振梁, 梁的材料可以是恒弹性合金, 也可以是石英或铌酸锂等晶体材料。在梁的四个面上贴上两对压电换能器, 当其中一对换能器 (驱动和反馈换能器) 加上电信号时, 由于逆压电效应, 梁产生基波弯曲振动, 即

$$x(t) = x_0 \sin \omega_c t \quad (4.6-19)$$

式中 x_0 是振动的最大幅度; ω_c 是驱动电压频率。

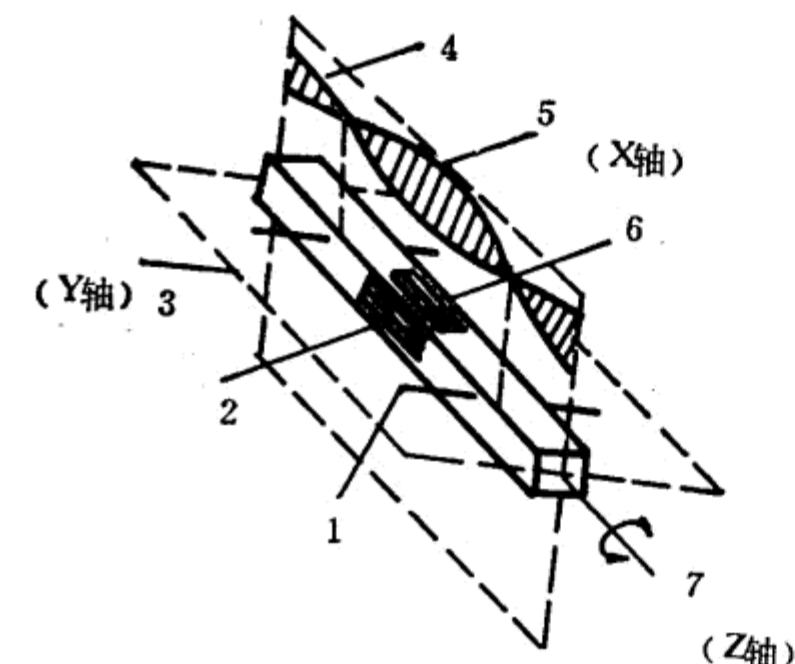


图 4.6.5 振梁型压电角速度陀螺的工作原理

1. 节点 2. 读出换能器 3. 读出平台 4. 梁振动包络
5. 驱动平面 6. 驱动换能器 7. 输入角速度

上述振动在垂直于驱动平面的方向上产生线性动量 $m\vec{V}$ ($\vec{V}$ 是质点的线速度, m 是质点的质量)。当绕纵轴 (z 轴) 输入角速度 $\vec{\omega}_z$ 时, 在与驱动平面垂直的读出平面内产生的惯性力为

$$\vec{F} = -2m (\vec{\omega}_z \times \vec{V}) \quad (4.6-20)$$

该力使读出平面内的一对换能器亦产生机械振动, 其振幅为

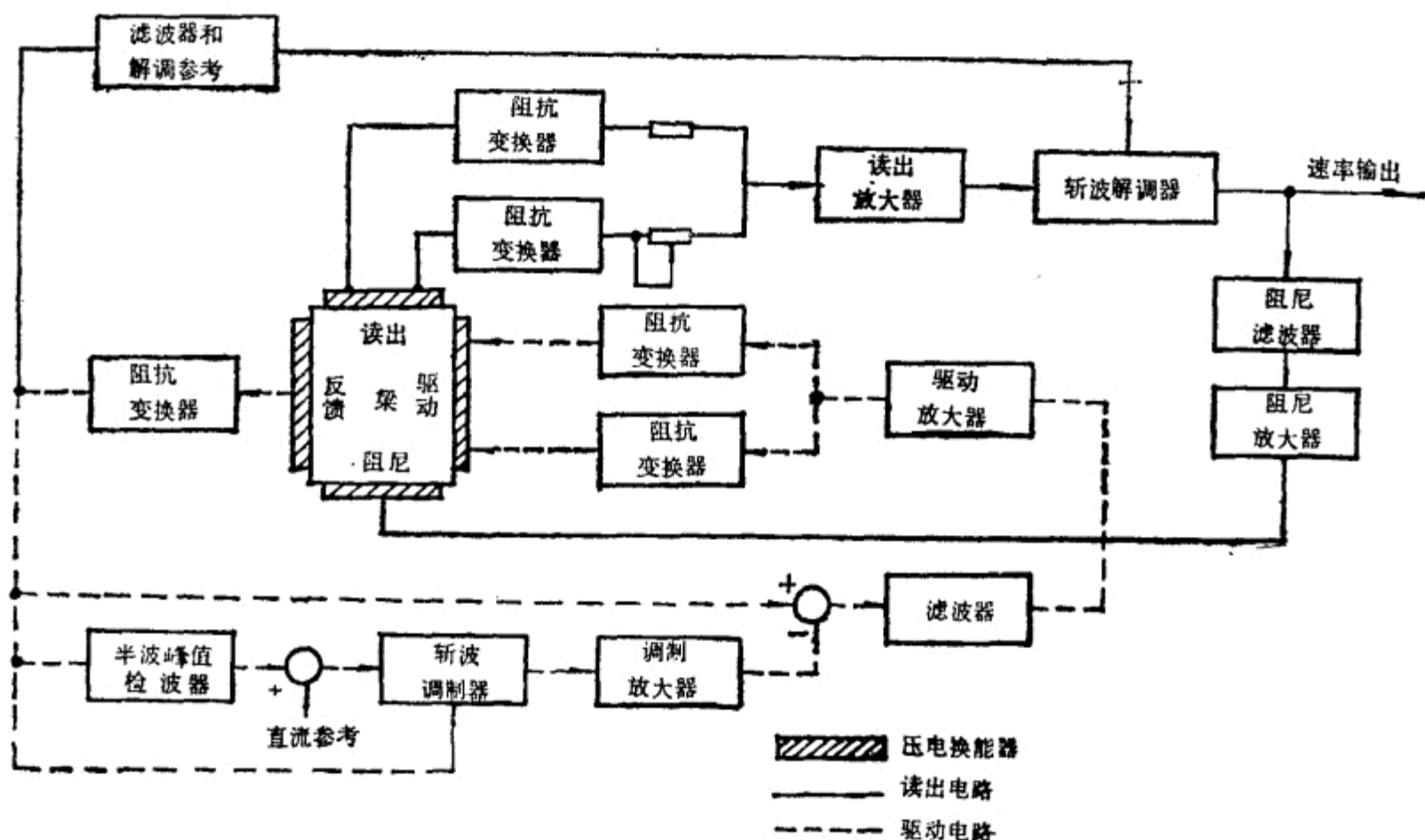


图 4.6.6 振梁型压电角速度陀螺的电原理方框图

$$y(t) = \frac{2x_c\omega_z}{\omega_c \left[\left(1 - \frac{\omega_c^2}{\omega_o^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega_c}{\omega_o Q_o}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \cos(\omega_c t - \phi_c) \quad (4.6-21)$$

式中

$$\phi_c = \arctan \left[\frac{\omega_c \omega_o}{Q_o (\omega_o^2 - \omega_c^2)} \right] \quad (4.6-22)$$

ω_o 和 Q_o 分别是读出平面的谐振频率和机械品质因素。

由于压电效应，惯性力在读出平面内产生的机械振动，使读出面内的压电换能器产生电信号输出。输出电压的量值决定于振幅 $Y(t)$ 。由式(4.6-21)和(4.6-22)可知，当振梁、压电换能器和驱动电压一定时，输出电信号的大小仅与输入角速度 ω_z 的大小有关。

结构 压电陀螺的敏感器件结构如图4.6.7所示。振梁尺寸根据使用要求确定，梁的驱动谐振频率和尺寸的关系可用下式表示：

$$f_c = \frac{ah}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{Eg}{12\rho}} \quad (4.6-23)$$

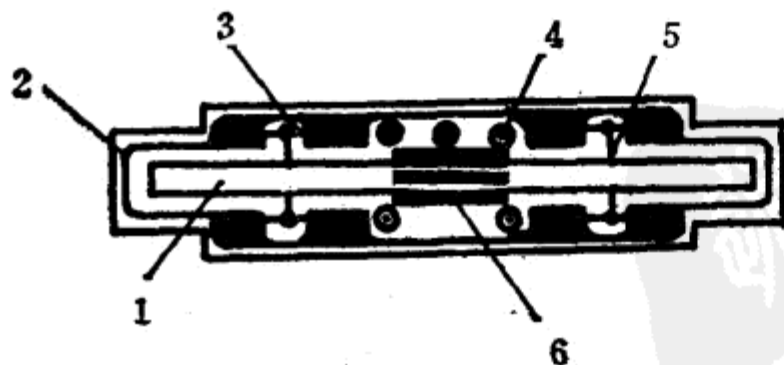


图 4.6.7 压电陀螺的敏感器件结构图

1. 振梁 2. 敏感器件外壳 3. 挂针
4. 绝缘子 5. 扣针 6. 换能器

式中 a 是与振动模式有关的常数； E 是杨氏弹性模量； L 是梁的长度，根据使用要求，可设计成30~150mm； h 是梁弯曲方向的厚度，根据使用要求，可设计成2~6mm； ρ 是梁的密度； g 是重力加速度。

压电陀螺是一个弱阻尼二阶系统，其固有频率近似于梁驱动和读出平面的谐振频率间隔。频率间隔的近似公式是：

$$f_o - f_c \approx \frac{f_o}{2\phi_c Q_o} \quad (4.6-24)$$

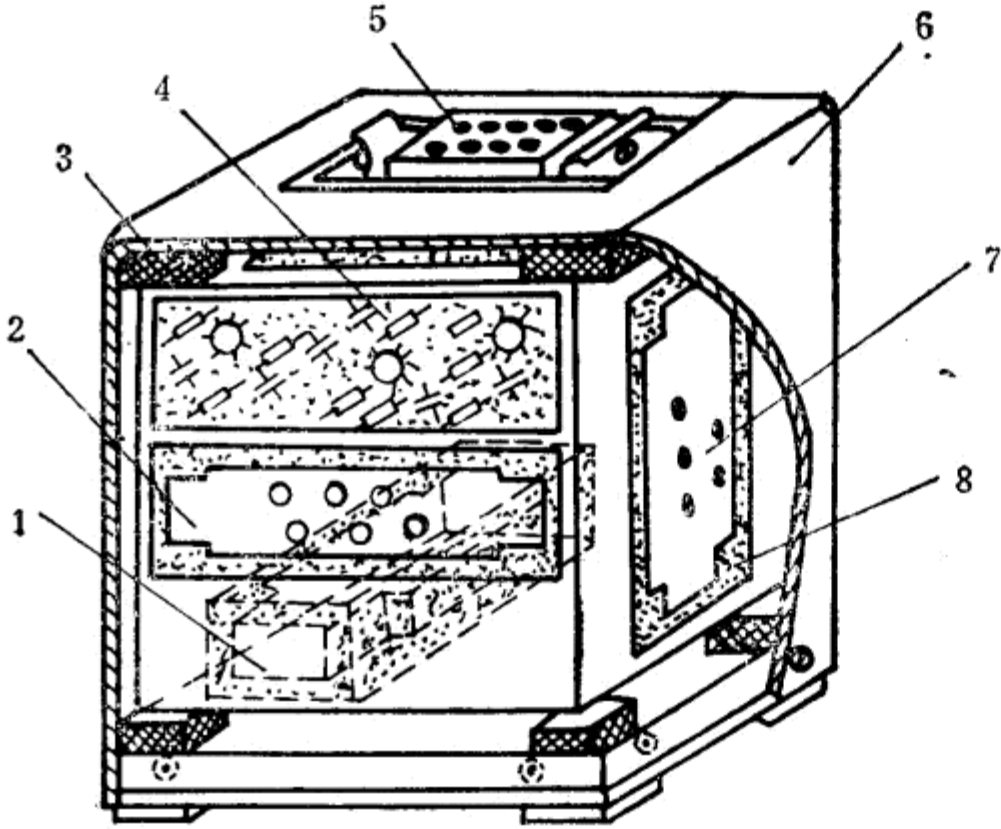


图 4.6.8 三轴压电陀螺的安装图

1.敏感器件(2) 2.敏感器件(1) 3.减振器 4.电路
5.插座 6.外壳 7.敏感器件 8.减振材料

式中 f_c 和 f_o 分别是梁驱动和读出平面的谐振频率，根据使用要求，可设计成 $1.0\sim10.0\text{ kHz}$ ； ϕ_c 是允许的最大相移，一般要求小于 1° ； Q_o 是读出平面的品质因素，一般大于1000。

将敏感器件和相应的电路组装在一起即构成一个完整的陀螺。仅安装一个敏感器件的陀螺称单轴陀螺。安装两个相互垂直的敏感器件的陀螺，称双轴陀螺。安装三个相互垂直的敏感器件的陀螺，称三轴陀螺。图4.6.8是三轴陀螺的安装图。

主要性能 根据不同的使用要求，压电陀螺可以设计成多种型号。表4.6.1列出振梁型压电角速度陀螺的主要性能。

表 4.6.1 振梁型压电角速度陀螺的主要性能

动 态 范 围	$\pm 5\sim7,200^\circ/\text{s}$ (可调)
灵敏限	$\leq 0.001^\circ/\text{s}$
比例系数	$0.5\sim1000\text{mV}/^\circ/\text{s}$ (可调)
线性度	$\leq 1\%$ (满刻度)
固有频率	$50\sim200\text{Hz}$
阻尼比	$0.2\sim1.0$
短期漂移	$\leq 0.001^\circ/\text{s}$
长期漂移	$< 0.01^\circ/\text{s/h}$
零位重复性	$< 0.2^\circ/\text{s}$
交叉耦合	$< 1\%$
工作温度	$-40\sim+60^\circ\text{C}$
MTBF(平均无故障间隔)	$> 10,000\text{h}$

压电角速度陀螺在各种遥测和控制系统中有着广泛的用途。由于压电角速度陀螺能承受恶劣环境，因此，它是各种导弹试验必不可少的遥测仪表。同时，压电角速度陀螺已成功地用于导弹的目标跟踪平台、飞机的增稳系统、舰船的雷达稳定伺服系统。图4.6.9和4.6.10分别是使用压电角速度陀螺遥测飞机上的相机平台系统和舰船的雷达稳定伺服系统方框图。

2. 双晶片型压电角速度陀螺

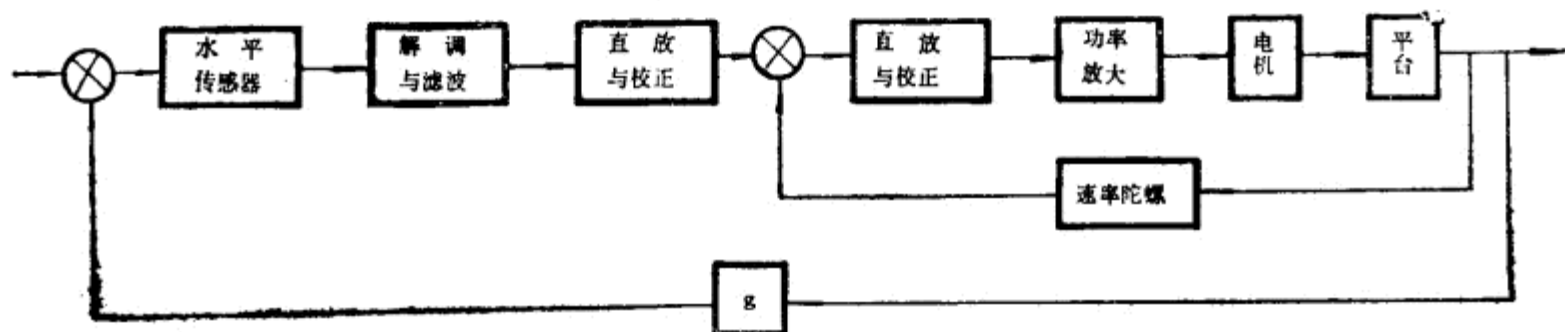


图 4.6.9 飞机上的相机平台系统图

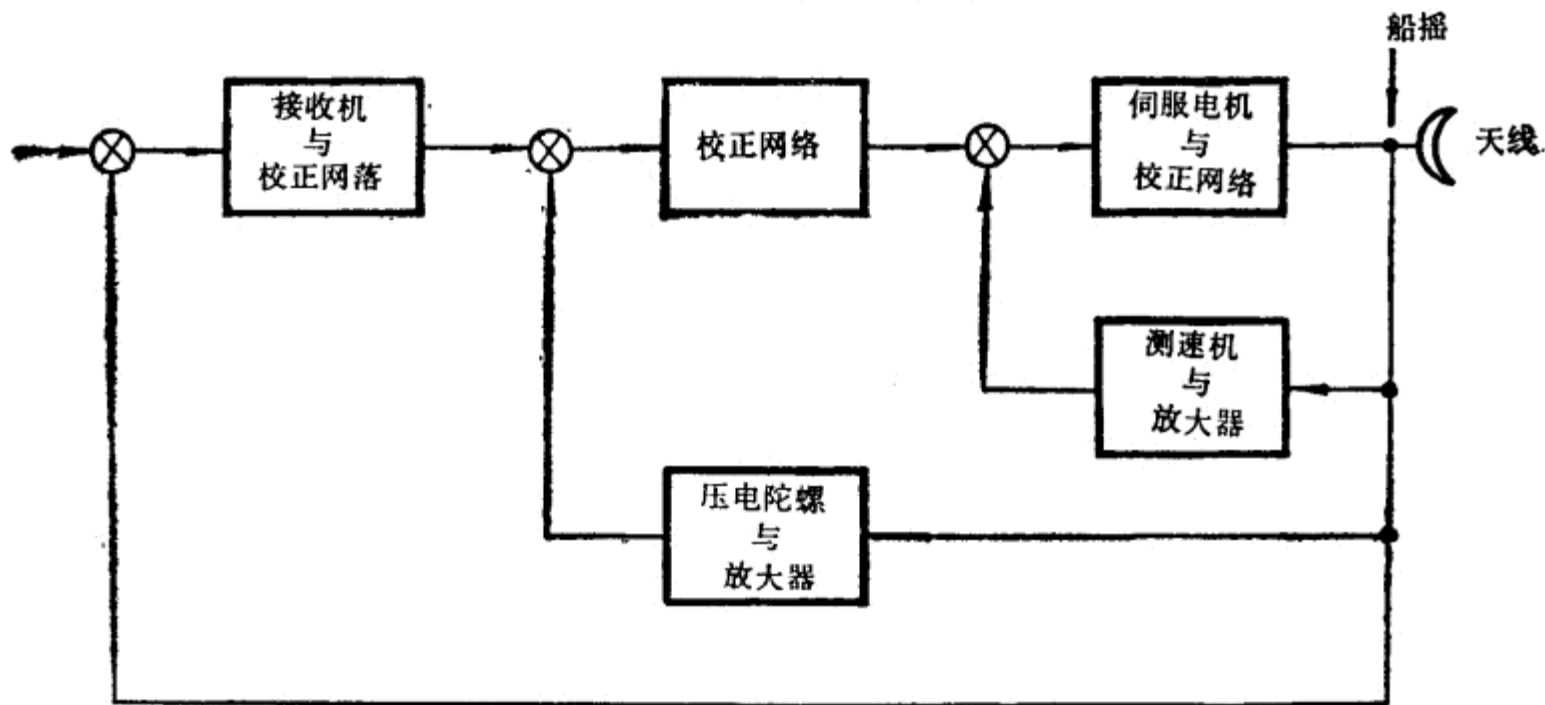


图 4.6.10 舰船的雷达稳定伺服系统图

工作原理 双晶片型压电角速度陀螺的工作原理如图4.6.11所示。图中两块弯曲振动模式型的压电元件，它们彼此端接并构成 90° 角。固定在基座上的压电元件以它的基波频率驱动，从而使敏感元件产生一个角振荡。当敏感轴处于零角速度时，敏感元件不产生弯曲，故没有输出信号。当存在旋转速度时，哥氏力引起力矩。该力矩引起敏感元件弯曲。敏感元件产生的信号，其幅度正比于角速度，而相位决定于旋转的方向。

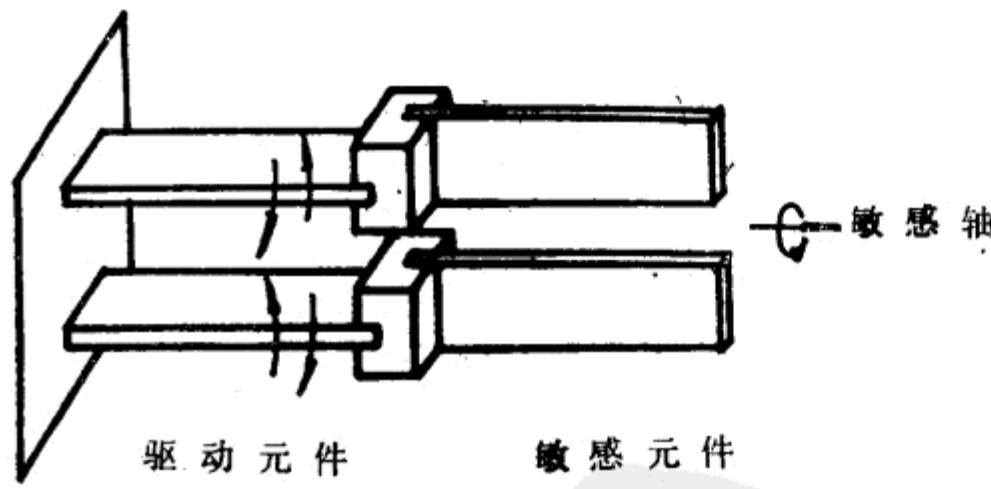


图 4.6.11 压电双晶片工作原理图

图4.6.11中音叉的两个臂是一对压电元件。这种音叉结构的特点是不敏感外部振动和加速度。在这种结构中，两个驱动元件是以相反方向驱动，故当存在角速度时，敏感元件以 180° 相位差振动。当出现振动或加速度时，它们使敏感元件同相振动。因此，两个敏感元件的信号相减。由于几乎所有线性运动都被抑制，故角运动的传感器响应得到加强。

结 构 双晶片型压电角速度陀螺的结构类似于振梁型的陀螺结构，只是敏感器件不同。和振梁型陀螺一样，由于它消除了万向架、磁转子、马达和其它大的可动部件，因此，它是一种微型固体惯性传感器。它具有体积小、重量轻和可靠性高等特点。

和振梁型压电陀螺一样，双晶片型压电陀螺的寿命长、响应快、线性度好、滞后可忽略、功耗小等优点。它有敏感单轴(X轴)、双轴(X轴和Y轴)和三轴(X、Y和Z轴)向角速度

的多种产品型号。表4.6.2列出有数字输出的单轴、双轴和三轴压电陀螺的一般性能。

表 4.6.2 双晶片型压电角速度陀螺的主要性能

名 称		性 能
无负载输出电源	单 轴	+15 VDC ± 5 %; max. 11 mA -15 VDC ± 5 %; max. 9 mA
	双 轴	+15 VDC ± 5 %; max. 22 mA -15 VDC ± 5 %; max. 18 mA
	三 轴	+15 VDC ± 5 %; max. 33 mA -15 VDC ± 5 %; max. 27 mA
输出		零角速度时, 0VDC 满角速度时, ±10VDC
灵敏度		±30°/s; ±100°/s; ±300°/s(满刻度)
输出电流		max ±10 mA
起动时间		1.0 s
系统频率		280 Hz ±10%
分辨率		0.04°/s 或 0.1% (满刻度)
精度		读数的 2 %
线性度		0.1% (满刻度)
滞后		无
温度漂移		±10% (满刻度), 重复性 < 1 % (满刻度)
加速度漂移		0.1°/s/G
交叉轴灵敏度		±1°
频率响应		70 Hz
输出噪声		15 mV RMS
工作温度		-40~+70℃
贮存温度		-55~+100℃
贮存和工作高度		不限
冲击		200 G(任意轴)
MTBF		>10,000 h(无耗损期)
重量		单轴110克; 双轴142克; 三轴170克
尺寸(不包括安装板)		单轴64×35×29 mm
		双轴54×54×32 mm
		三轴54×54×60 mm

主要性能 主要性能见表4.6.2。

双晶片型压电角速度陀螺的应用领域与振梁型压电陀螺相同。它们虽然都在不断扩大应用领域，但应用最广泛的还是双晶片型压电陀螺。双晶片型压电陀螺由于其结构简单、价格低廉(每个单轴陀螺195美元)，故大量用于航模飞机(微型遥控直升飞机)的增稳系统。图4.6.12是用双晶片型压电陀螺的航模飞机组成图。

3. 圆管型压电角速度陀螺

工作原理 圆管型压电角速度陀螺仍属振动型陀螺，其振动圆管和电原理方框图分别如图4.6.13和4.6.14所示。圆管是均匀的陶瓷或金属圆柱，其一端封闭并安装在轴架上，另一端自由振动。圆管壁的弯曲振动由它周沿上的压电换能器激励。图4.6.14示出圆管以它的基波弯曲振动，绕圆管周沿有两个弯曲振动的完整波长。这种振动由驻波组成。驻波有四个节点，节点之间有波腹。因圆柱是对称的，故其驻波的任何方向均以相同频率振动，驱动图4.6.14中的一对换能器 A 和 A' ，使其产生具有波腹的弯曲振动。用有锁相回路的反馈电路，把驱动信号的频率稳定在圆柱的弯曲谐振频率上。从监控圆柱壁位移的换能器 B 和 B' 取出输出信号，利用该输出信号提供相位反馈给锁相回路，从而使位移和驱动电压之间保持 $\pi/2$ 的相位差。

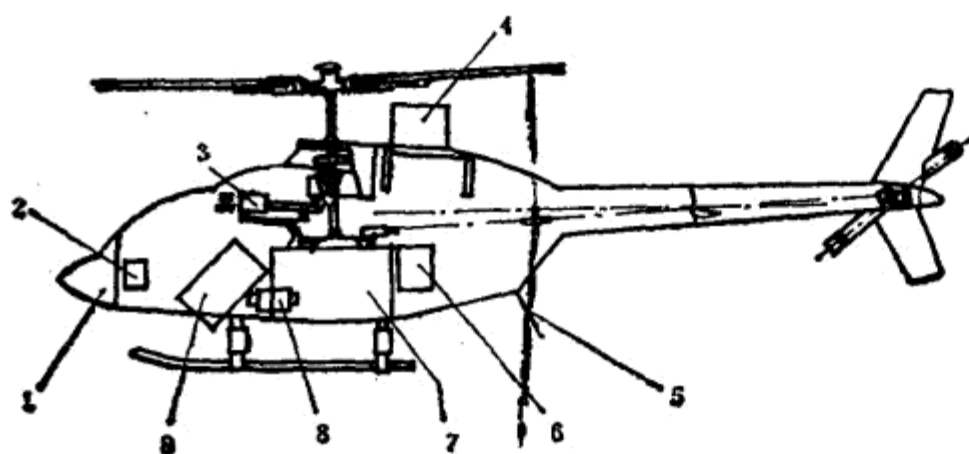


图 4.6.12 微型遥控直升飞机的组成

1. 无线电遥控设备 2. 速率陀螺 3. 遥测执行机构 4. 遥测发射机
5. 天线 6. 油箱 7. 发动机舱 8. 电视用电视盒 9. 电视摄像机

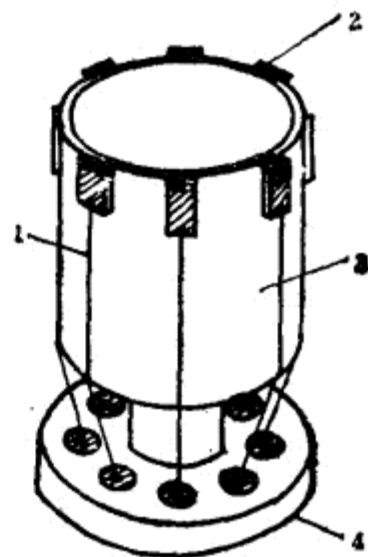


图 4.6.13 圆管型压电陀螺的振管图

1. 导线 2. 压电换能器
3. 振动圆管 4. 端头座

当圆管不动时，驻波的方位也不动，而波节和波腹的位置保持在圆柱周沿的固定点上。当圆柱绕其中心轴旋转时，弯曲振动的驻波就不再相对于圆柱保持不动，而是波节和波腹的位置在圆管的表面上移动。检测这些角位移就能推断圆管的角运动，从而把圆管当作一个陀螺来检测相对于惯性坐标系的运动角速度。

产生角位移的原因，可通过研究圆管旋转时作用在圆管上的哥氏力效应来定量地解释。由图4.6.15可看出，若圆管以恒角速度 ω 绕其中心轴旋转时，在圆管表面 A 点的切线方向产生哥氏力 f_c ，而在 A' 点也产生同样大小的哥氏力，但方向相反。这样，两个哥氏力绕圆管轴产生一个力偶。在两个中点 B 和 B' 圆管壁速度的径向分量相等，但跟 A 和 A' 处的分量反向，故这两个点产生的哥氏力也相等，而方向跟 A 和 A' 处哥氏力反向，在相反方向产生一个力偶。两个力偶之和产生一个力的分量。该力沿与驱动力方向成 45° 的径向作用在圆管壁上。因此，在与原哥氏力成 45° 的圆管壁上产生一个弯曲振动的分量。这个分量的大小与角速度成正比。旋转引起的分量与初始振动的矢量和使驻波位置产生一个小的角偏移，从而

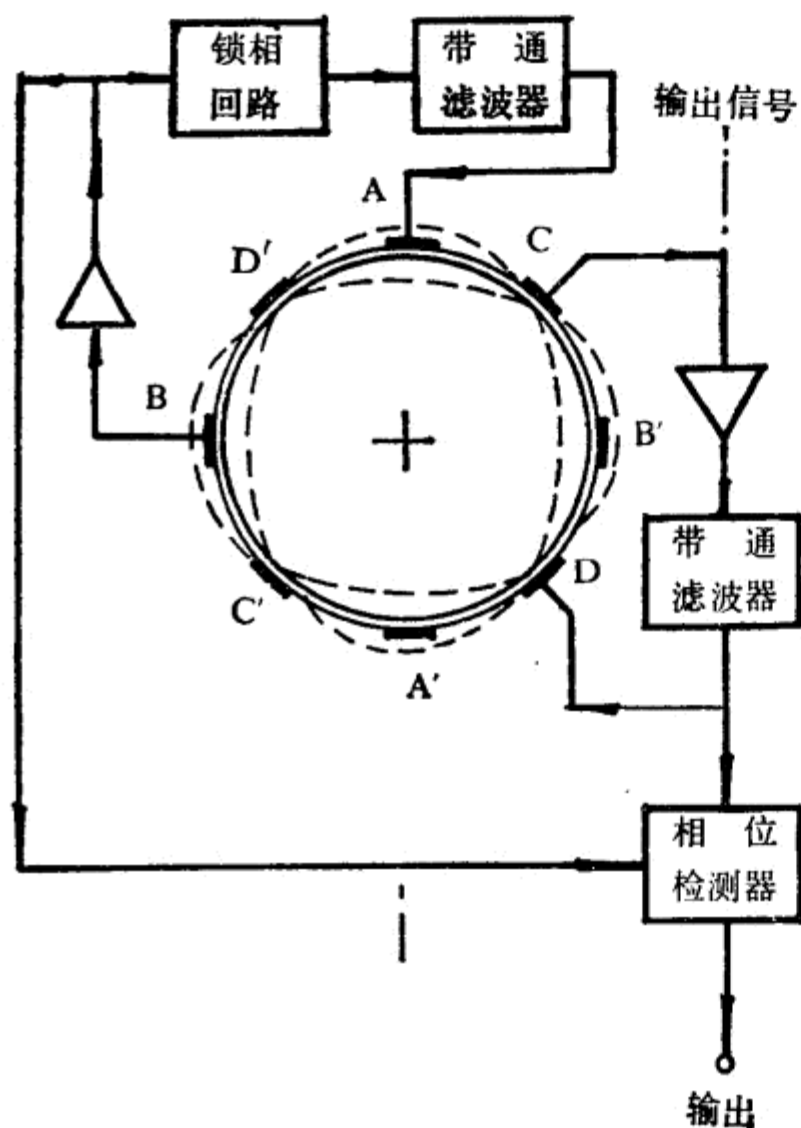


图 4.6.14 圆管型压电陀螺的电原理方框图

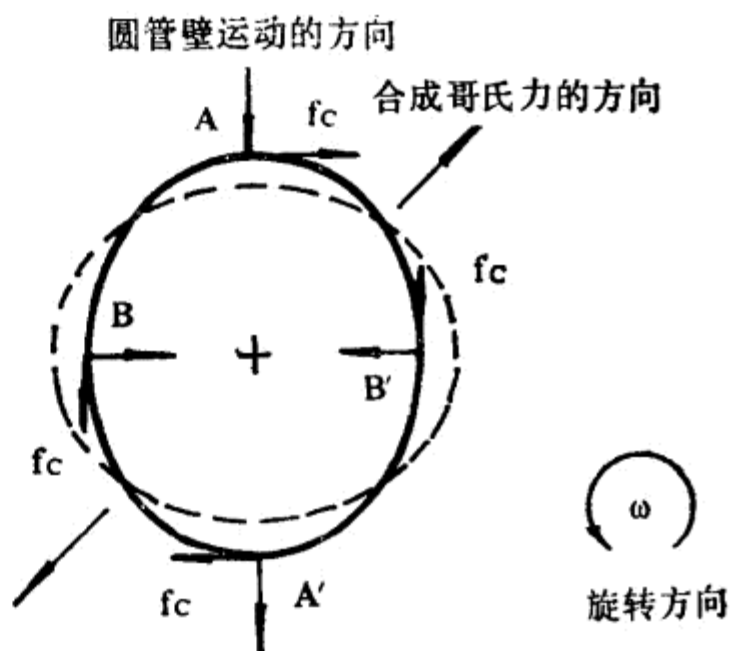


图 4.6.15 圆管转动时的受力状态图

使圆管表面上波节点的位置产生一个位移。

获得角速度输出的简便方法是在圆管表面波节点上安装压电换能器来测量振动的径向分量。当有输入角速度时，压电换能器敏感哥氏力引起运动的径向分量，而哥氏力的大小与角速度成正比。用相敏整流器或以驱动信号作参考的双平衡调制器，对交流输出信号进行整流，从而得到一个与输入角速度成正比的直流信号。

结 构 圆管型压电角速度陀螺包括三部分：一是维持振动的驱动振荡器和锁相回路，二是放大角速度时电信号的低噪声放大器，三是把交流变成直流的相位检测器。在实用的装置中还必须控制敏感器件的响应时间，以便响应快速变化的角速度。圆管由于内部机械阻尼而使其振动衰减十分缓慢。为了获得快速响应而加外阻尼，这可通过图4.6.14中压电换能器 D 和 D' ，把负反馈加到由于输入角速度产生的圆管振动上来实现。与输入角速度有关的换能器 C 和 C' 的输出信号被放大，并以一定相位加到换能器 D 和 D' 上，从而在 D 和 D' 上产生阻止圆管运动的驱动力。因此，振动的衰减时间可通过反馈回路中的增益来调整。

圆管型压电陀螺的振管实例如图4.6.13所示。图中的圆管是直径13~75mm金属管。驱动和读出换能器是PMS等压电陶瓷薄片。换能器加电压后即产生轻微收缩,从而在圆管壁上引起一个弯曲力矩。只要几伏的交流驱动信号就能保持振动,故敏感元件的驱动功率相当低。

八片相同的压电换能器对称地安置在圆管上，其中两片用作驱动，两片用作敏感谐振频率，两片用作提供输出信号。最后两片用作阻尼。贴好压电换能器后，圆管要经过修整才能获得最佳灵敏度。修整的方法是，首先从圆管上不同点处去掉少量的材料，使各个驱动方向的振动频率相同，其次是在圆管周围改变振动驻波的方位，使零角速度输入时的读出换能器输出为零。用很细的贴在圆管上的金属线连接换能器和敏感元件。整个振管装置密封在真空盒里。陀螺电路由一小块集成电路和少量无源元件组成，故有可能把电路装在圆管内。

主要性能 圆管型压电陀螺的一般技术性能跟前两种压电陀螺的性能类似, 图4.6.16和4.6.17分别示出该陀螺的线性度和零位漂移。由图可看出, 当动态范围为 $\pm 60^\circ/\text{s}$ 时, 线性度小于0.3%, 长期零位漂移小于 $0.02^\circ/\text{s}$ 。

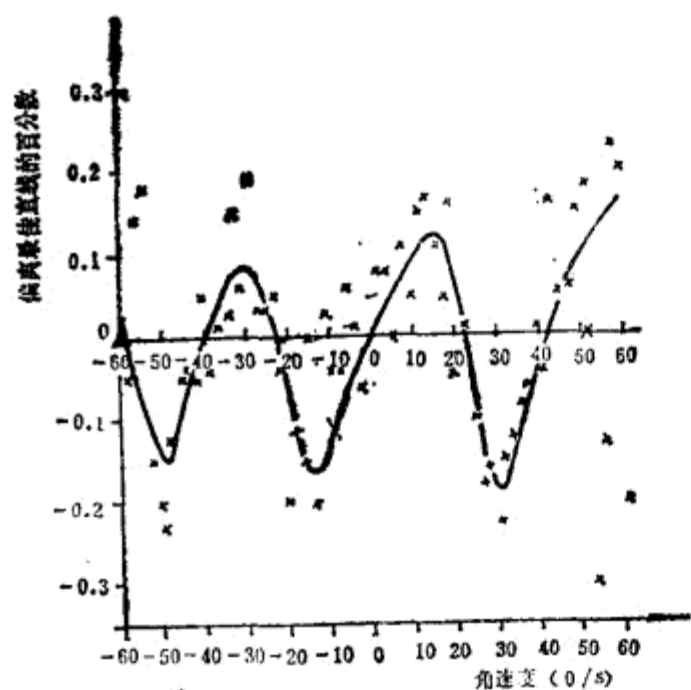


图 4.6.16 圆管型压电陀螺的线性度

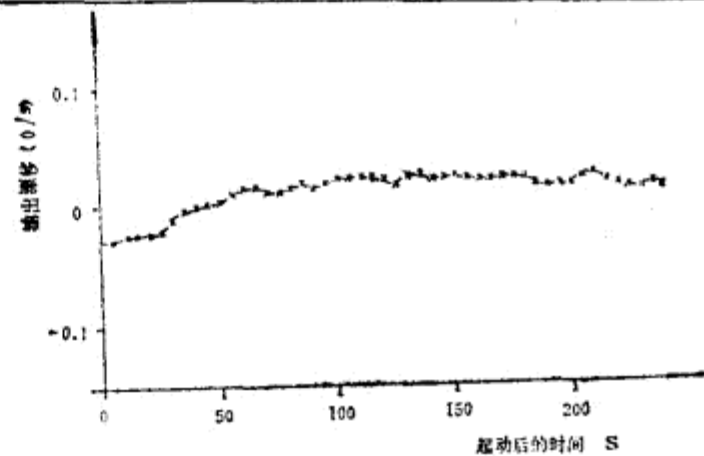


图 4.6.17 圆管型压电陀螺的零漂

圆管型压电陀螺的结构简单，易批量生产，且具有可靠性高、成本低等优点。所以，这种陀螺被广泛的应用，它特别适用于精度要求不太高的稳定系统中。原因是，一个惯导用转子陀螺成本通常达5000美元，而一个圆管型陀螺的成本仅为100美元。

可以将压电角速度陀螺的输出端与微分器和积分器相连，组成压电角加速度陀螺，或组成压电积分陀螺即压电增稳器。不仅可以输出角速度信号，还可以输出角位移和角加速度信号，应用于导弹、飞机和舰船的控制和稳定系统。

§ 4.6.3 激光陀螺

工作原理 如图4.6.18所示，激光陀螺是利用环形干涉仪来测量转速。图中 M_1 、 M_2 、 M_3 为反射镜； S 为分光器； P 为光电探测器。

调节分光镜位置，使顺逆时针方向的两束激光之间有一个相位差 ϕ ，在探测器位置处得到一组平行的干涉条纹，并由光电探测器转换为电信号。

当干涉仪绕轴 O 转动时，由于在转动方向上激光通过环路所需时间要长，而光程差增加；而在与转动方向相反的方向上，激光通过环路所需时间要短，因而光程差较小。从而使干涉条纹的移动频率正比于转速 ω 。测得干涉条纹移动频率，便可知对应的转速 ω 。

结 构 利用环形干涉仪原理，可构成如图4.6.19所示的三角形环形激光器。激光腔内

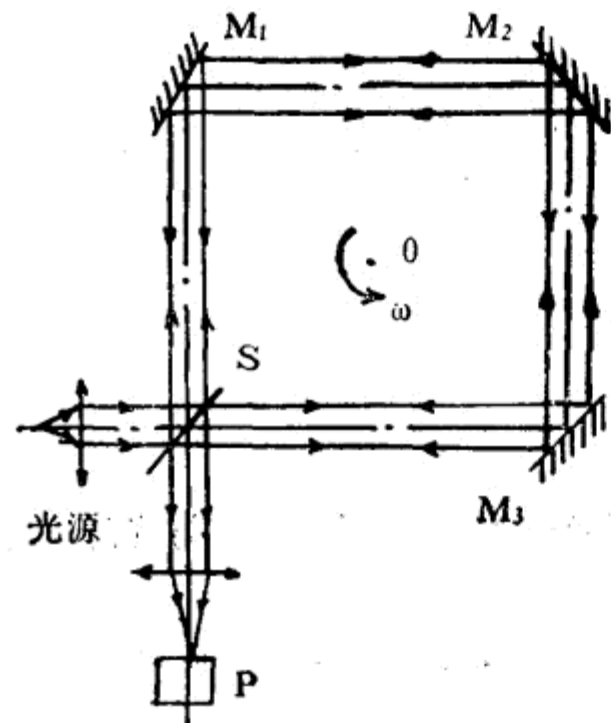


图 4.6.18 环形干涉仪

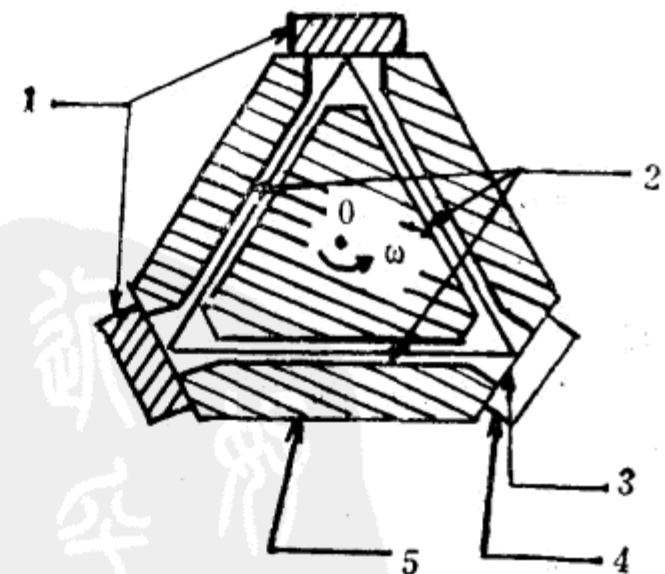


图 4.6.19 三角环形激光器结构图

1. 反射镜 2. 激光腔 3. 分光器 4. 探测器 5. 硅块

的激活介质为氦—氖混合气体，腔长度为绕环一周，可用硅块或石英块打孔办法处理，电极可安装于腔内。反射镜和分光器可用胶合办法固定。激光器受激后所产生沿顺、逆时针方向的两束激光在环形腔内传播，并由反射镜反射，从而在探测器上接收到两束相干的光。它们的频差 Δf 正比于绕轴 O 的转动角速度 ω ，即

$$\Delta f = \frac{\psi A \omega}{\lambda L} (Hz) \quad (4.6-25)$$

式中 A —环的面积(厘米²)；

λ —波长(厘米)(对于氦—氖激光器， $\lambda = 0.6328$ 微米)；

L —环的周长(厘米)；

ψ —与结构有关的系数；

ω —角速度(弧度/小时)。

式(4.6-25)说明，当用频率计测得 Δf 后，便可知对应的 ω 。

主要性能 对于每边长10厘米的等边三角形氦—氖环形激光器，在频差 $\Delta f = 2.5 Hz$ 时，可得到0.1弧度/小时的转速。当测更低的角速度时，则要受到限制。产生这种限制的原因是当两个光频彼此相接近时出现闭锁效应，差频消失。

环形激光器可望代替惯性导航中的机械陀螺。它的优点是灵敏度高，输出可直接进行处理，而不需要精密的机械运动零部件。它的缺点是由于电极的蒸发和内壁气体的吸收会污染反射镜，从而降低使用寿命。

§ 4.6.4 光纤陀螺

工作原理 光纤陀螺工作原理如图4.6.20所示。

激光器1发出的激光束，经分光镜2分成两束耦合到单模光纤环中。两束激光在光纤环中分别沿顺时针和逆时针方向传播。如果光纤环以角速度 ω 旋转，根据萨古纳克(Sagnac)效应，两光束将产生非互易的光程差为

$$\Delta L = \frac{4\pi R^2 \omega}{C} \quad (4.6-26)$$

两光束对应的相位差 $\Delta\theta$ 为

$$\Delta\theta = \frac{4\pi LR}{\lambda C} \omega \quad (4.6-27)$$

图 4.6.20 光纤陀螺测角速度的原理图

1. 激光器 2. 分光镜 3. 光纤耦合器 4. 单模光纤
5. 光电接收器 6. 信号处理电路

式中 L —环形光纤长度；

R —光纤环半径；

λ —真空光波长；

C —真空光速；

ω —光纤环旋转角速度。

在激光波长、光纤环长度和半径确定的情况下，两光束之间的相角差 $\Delta\theta$ 与光纤环旋转角速度 ω 成比例关系，从而可进行光纤环随同旋转物体旋转的角速度测量。

具有相角差 $\Delta\theta$ 的两光束又经分光镜2会合导入同轴光路，传送到光电接收器5上， $\Delta\theta$ 将对应于两光束形成的干涉条纹移动，光电接收器5处的光强与 $\Delta\theta$ 的关系为

$$I = \frac{1}{2} I_0 (1 + \cos \Delta\theta) \quad (4.6-28)$$

从上式可知, I 与 $\Delta\theta$ 也即与 ω 是非线性关系, 而且在 ω 较小时, $\Delta\theta$ 很小, I 的变化也很小, 测量灵敏度较低。为了提高传感器测速灵敏度, 通常将顺、逆时针旋转的两光束的相位角设定为 $\pi/2$, 而使光电接收器 5 处的干涉光强变化为

$$I = \frac{1}{2}I_0(1 - \sin\Delta\theta) \quad (4.6-29)$$

从上式可知, 前述的两个缺点得以克服。当然也还可以采用其他技术措施。如使顺、逆时针旋转的两光束分别经过中心频率不同的两个声光调制器, 使两光束具有一定的频率差。这是一种较先进的方法。

光纤陀螺具有一些优点: 它没有活动部件, 没有非线性效应和低转速时激光陀螺的“死区”, 可以用增加光纤长度 (即增加光纤环圈数) 的方法提高测速灵敏度, 而且性能价格比高。

光纤陀螺的稳定性已达到的水平见表4.6.3。

表 4.6.3

光纤陀螺的稳定性

年 份	稳 定 性
1979	16°/h
1980	0.2°/h
1982	长期 $n \cdot 10^{-1}$ °/h; 短期0.002°/h
1983	短期0.03~0.04°/h

主要性能 目前光纤陀螺的测量精度还远没有达到理论上的予期值。如采用 He-Ne 激光器, $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$, 输出功率 2 mW, 单模光纤长 $L = 1.56\text{km}$, 光纤环半径 $R = 10\text{cm}$, 测量精度可达 $0.0078^\circ/\text{h}$ 。影响其测量精度的主要因素有: 除待测转动之外的非互易性相移、相位偏置的不稳定性、光纤元件的偏振稳定性、各种背向散射和反射、光源及光电接收器的噪声等。现在美、日、英等国在进行广泛的研究。我国许多部门也积极开展研究工作。随着半导体激光器及光集成技术的发展, 光纤激光陀螺仪将逐步趋于更加精密化、小型化和实用化, 作为高精度、高稳定性的惯性导航陀螺仪是很有前途的。