

航海仪器

(陀螺罗经、计程仪)

中国人民解放军
海军大连舰艇学院

一九九三年六月

目 录

第一篇 陀螺罗经

第一章 航海—I型陀螺罗经	1
第一节 指北原理及误差	1
第二节 主罗经	26
第三节 跟踪与同步系统	37
第四节 电源系统	45
第五节 控制电路及航海操纵箱	50
第六节 启动停止、航行值更及维护保养	55
第七节 几项专门的拆装与检查调整	59
第八节 原理电路及典型故障分析	65
第九节 整机布线图	73
第十节 综合检查试验	79
第二章 航海—III型陀螺罗经	84
第一节 主罗经构造特点	84
第二节 电源设备	86
第三节 跟踪与同步系统	88
第四节 控制仪器及航海操纵箱	91
第五节 全套设备及使用	99
第六节 8—III磁放大器工作原理	101
第七节 TPQ—20磁调频器工作原理	107
第三章 平台罗经(PL—I型)	115
第一节 主罗经	116
第二节 扶正系统	125
第三节 方位粗校回路和协调回路	128
第四节 信号发送与复示	129
第五节 使用	131

第二篇 计程仪

第一章 50型水压计程仪	139
第一节 水压计程仪的原理与组成	139
第二节 水压系统	142
第三节 中央仪器	143
第四节 电源系统及供电电路	151
第五节 使用、检查与保养	152
第二章 水压计程仪的误差及校正	164
第一节 误差的产生与分析	164
第二节 误差的测定	167
第三节 误差的消除	169
第三章 电磁计程仪的基本工作原理	177
第一节 电磁感应原理与传感器	177
第二节 速度和航程的解算	181
第四章 JD—2型电磁计程仪	188
第一节 性能和组成	188
第二节 速度解算系统	192
第三节 航程解算系统	198
第四节 航速、航程信号的发送	200
第五节 水门组与自动升降装置	202
第六节 计程仪的使用	204
第五章 电磁计程仪的误差及校正	207
第一节 误差的产生	207
第二节 误差的测定	210
第三节 误差的校正	212
第四节 用模拟法测定剩余误差	217

第一篇 陀螺罗经

第一章 航海—I型陀螺罗经

航海型罗经分为 I、II、III 等型号。它们都是利用降低陀螺仪的重心，使陀螺仪的重心低于它的转动中心，以对罗经施加力矩。这是一种重力控制的罗经，称为摆式罗经。航海型罗经与平台罗经不同，它只提供北向方位基准，以输出航向信号，不提供水平基准。它可向舰上各武器指挥仪、雷达、声纳、自动舵和卫星导航仪等提供航向信号。目前我国水面舰船上，装备航海—I型罗经者居多。

航海—I型罗经的主要技术性能如下：

- | | |
|--------------|---|
| 1. 陀螺仪转速 | 约20,000转/分。 |
| 2. 陀螺球寿命 | 不少于5,000小时。 |
| 3. 连续工作时间 | 不少于720小时（1个月） |
| 4. 正常稳定时间 | 2.5—4小时。 |
| 5. 加快稳定时间 | 约1小时（误差在 $\pm 1^\circ$ 以内）。 |
| 6. 固定基座时精度 | $\pm 0^\circ 5'$ 。 |
| 7. 等速直航向时精度 | $\pm 1^\circ 0'$ 。 |
| 8. 机动旋回时精度 | $\pm 1^\circ 0' - \pm 3^\circ 0'$ 。 |
| 9. 可带分罗经数 | 最多20个。 |
| 10. 工作海域的纬度 | $0^\circ - 75^\circ \text{ N, S.}$ |
| 11. 导电液体工作温度 | $39^\circ \pm 2^\circ \text{C}$ 或 $46^\circ \pm 2^\circ \text{C}$ （热带海域）。 |
| 12. 舰电源 | 110V直流，或220V直流，或380V50HZ 三相交流。 |
| 13. 功耗 | 2.3千伏安。 |

第一节 指北原理及误差

从陀螺罗经的一般原理中知道，要使自由陀螺仪变为罗经，必须在陀螺仪上施加三个力矩：

1. 抵消有害的惯性力矩；
2. 找北力矩；
3. 阻尼力矩。

在航海型罗经上，采用降低陀螺仪重心的办法，合并产生 1.2 两项力矩；应用油阻尼器产生阻尼力矩。以下分别说明它们的原理。

一、抵消有害的惯性力矩

（一）有害的惯性力矩

为了简化陀螺仪理论，我们曾引入一个惯性力矩的概念：在地球上分析陀螺仪的运动时，由于地球自转，会有力矩作用在陀螺仪上，这力矩称为惯性力矩。惯性力矩为： $\vec{H} \times \vec{\omega}_e$ ， ω_e 是地球自转的角速度。

为了分析方便，把地球自转角速度 ω_e 分解为垂直与水平两个分量，如图 1-1。

垂直分量 $\omega_{ez} = \omega_e \sin \varphi$ ，（ φ —纬度）

水平分量 $\omega_{eN} = \omega_e \cos \varphi$ 。

当自由陀螺仪主轴水平指北时，陀螺仪

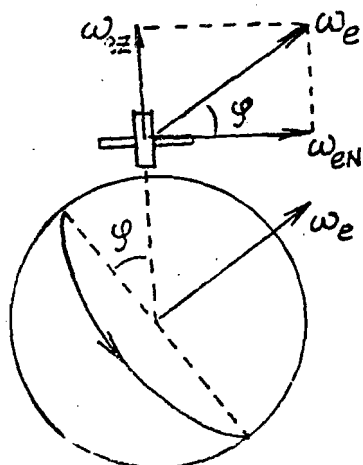


图 1-1

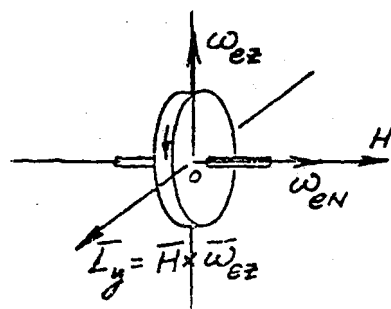


图 1-2

主轴与 ω_{eN} 矢量方向一致。这时作用在陀螺仪的惯性力矩为：

$$\vec{H} \times \vec{\omega}_{eN} = 0;$$

$$\vec{H} \times \vec{\omega}_{ez} = \vec{L}_y.$$

惯性力矩 $\vec{H} \times \vec{\omega}_{ez}$ 作用在陀螺仪 y 轴的负向，即水平向东方向，如图中 L_y 。陀螺仪在 L_y 力矩作用下，主轴将向力矩 L_y 方向进动，即水平向东进动。所以主轴不能稳定在水平指北方向。惯性力矩 $\vec{H} \times \vec{\omega}_{ez}$ 称为有害的惯性力矩。

（二）降低陀螺仪重心产生摆力矩

航海型罗经中，陀螺仪是密封在一个圆球内的，称为陀螺球，如图 1-3。陀螺球的重心

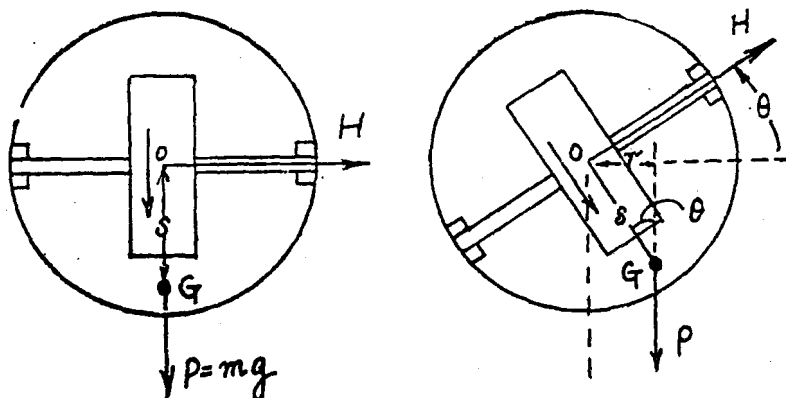


图 1-3

G并不与球的中心O重合,而是在中心下距离S上。设陀螺球的质量为m,作用在陀螺球重心G上的重力 $P = m \cdot g$ 。罗经工作时,整个球悬浮在液体中,并且可以绕着球的中心O点俯仰与旋回。

当陀螺球的主轴水平时,重力P通过球的中心O点,重力对O点无作用力矩。当主轴上仰一个 θ 角时,重力P不通过中心O点,它与中心O点的距离为 $r = s \cdot \sin\theta$ 。重力P对中心O点产生力矩,力矩矢量在y轴方向,设它是 L_P 。力矩大小为 $P \cdot r = mg \cdot s \cdot \sin\theta$ 。即

$$L_P = -mg \cdot s \cdot \sin\theta。$$

当主轴上仰, θ 为负时, L_P 在y轴的正向,所以加负号。当 $\theta = 90^\circ$ 时, $\sin\theta = 1$, $L_P = -mgs$,力矩为最大。设M为最大力矩值,即 $M = mgs$,

则 $L_P = -M \cdot \sin\theta$ 。

罗经工作时,陀螺球主轴上仰角 θ 是很小的,上式可成为:

$$L_P = -M \cdot \theta \quad (\because \sin\theta \approx \theta)。$$

L_P 力矩称为摆力矩,M为最大摆力矩。

(三) 摆力矩抵消有害的惯性力矩

当陀螺球主轴水平指北时,有害的惯性力矩 $\overline{H} \times \overline{\omega}_{ez}$ 作用在y轴的负向(即向东)。为了抵消此力矩,陀螺球主轴可仰起一个角度,使重力产生的摆力矩在y轴的正向(即向西)。另外,当主轴上仰时,主轴与 $\overline{\omega}_{en}$ 不重合,惯性力矩 $\overline{H} \times \overline{\omega}_{en}$ 不为零,它作用在y轴的正向(即向西)。

当y轴上正负两个方向的力矩相等时,对陀螺球作用的总力矩为零,主轴即稳定不动。这时可按图1-4列出:作用在y轴负向的力矩是 $\overline{H} \times \overline{\omega}_{ez}$,大小是 $H\omega_{ez}\sin(90^\circ - \theta) = H\omega_{ez}\cos\theta$ 。作用在y轴正向的力矩是 $\overline{H} \times \overline{\omega}_{en}$ 和摆力矩 L_P ,它们的大小是:

$$H\omega_{en}\sin\theta + M\sin\theta = (H\omega_{en} + M)\sin\theta。$$

当y轴正负两方向的力矩大小相等时,

$$H\omega_{ez}\cos\theta = (H\omega_{en} + M)\sin\theta。$$

$$\text{则} \quad \text{tg}\theta = \frac{\sin\theta}{\cos\theta} = \frac{H\omega_{ez}}{H\omega_{en} + M}。$$

在航海型罗经中,最大重力矩M比 $H\omega_{en}$ 与 $H\omega_{ez}$ 都大很多,所以可以把分母中 $H\omega_{en}$ 略去,而且可用 $\text{tg}\theta \approx \theta$ 来代替。上式成为:

$$\theta = \frac{H\omega_{ez}}{M}。$$

这是主轴稳定时上仰的高度角,设它是 θ_P 。根据我们设定的正负号,主轴上仰时高度角是负的,所以

$$\theta_P = \frac{-H\omega_{ez}}{M} = \frac{-H\omega_{en}\sin\varphi}{M}$$

因此,陀螺球主轴指北时,并不是稳定在水平方向,而是上仰一个很小的角度。从上式可看出,仰角是随纬度 φ 变的。北纬时, $\varphi > 0$, θ_P 为负值,主轴上仰。南纬时, $\varphi < 0$, θ_P 为

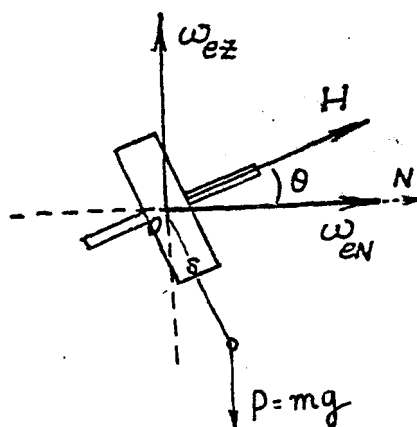


图1-4

正值，主轴下俯。同纬度值时，高度角的绝对值是相等的，列表如下：

$\varphi = 0^\circ \quad 20^\circ \quad 40^\circ \quad 50^\circ \quad 60^\circ \quad 70^\circ \quad 80^\circ$

$\theta_p = 0 \quad 2.9 \quad 3.9 \quad 4.6 \quad 5.3 \quad 5.8 \quad 5.9$

主轴在稳定位置时，主轴北端的投影如图1—5。0'点是主轴的稳定点。0'0表示主轴仰起的高度角 θ_p 。0'点的方位角 $\alpha = 0$ 。陀螺仪受东西两方向的作用力矩，分别为 $\overline{H} \times \overline{\omega}_{ez}$ 和 $\overline{L}_p$ ，这两力矩的大小是相等的。图中略去了 $\overline{H} \times \overline{\omega}_{ez}$ 力矩。

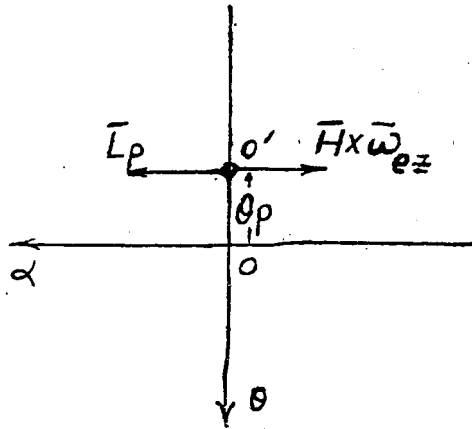


图1—5

二、椭圆运动

当陀螺球主轴的起始位置不在稳定点时，主轴将围绕稳定点作椭圆运动，它在投影面上的运动轨迹，如图1—6。为了求出运动方程式，要先求出陀螺球上所受的作用力矩。

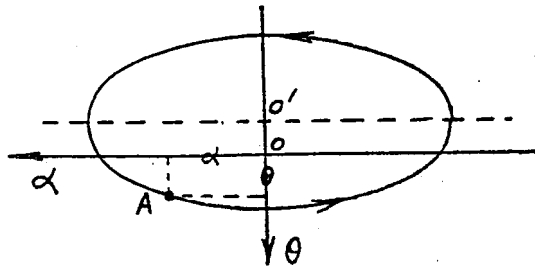


图1—6

(一) 陀螺球上的作用力矩

陀螺球上所受的作用力矩，总共有三个：两个惯性力矩 $\overline{H} \times \overline{\omega}_{ez}$ 和 $\overline{H} \times \overline{\omega}_{ez}$ ，一个摆力矩 $\overline{L}_p$ 。

假设主轴的起始位置在偏西 α 角偏下 θ 角的位置，即 α 及 θ 两角都是正的，并且假设 θ

及 α 角都比较小。上述三个力矩即可按如下简化：（图1-7）。

1. $\vec{H} \times \vec{\omega}_{ez}$ 力矩，作用在 y 轴的负向，即

$$L_{y1} = -H \cdot \omega_{ez} \cdot \sin(90^\circ + \theta) = -H \omega_{ez} \cdot \cos\theta。$$

当 θ 较小时， $L_{y1} \doteq -H \omega_{ez}$ 。

2. $\vec{H} \times \vec{\omega}_{eN}$ 力矩，可认为作用在 z 轴的负向， H 与 ω_{eN} 之间的夹角近似为 α ，

则 $L_z = -H \omega_{eN} \sin\alpha。$

当 α 较小时，

$$L_z \doteq -H \omega_{eN} \cdot \alpha。$$

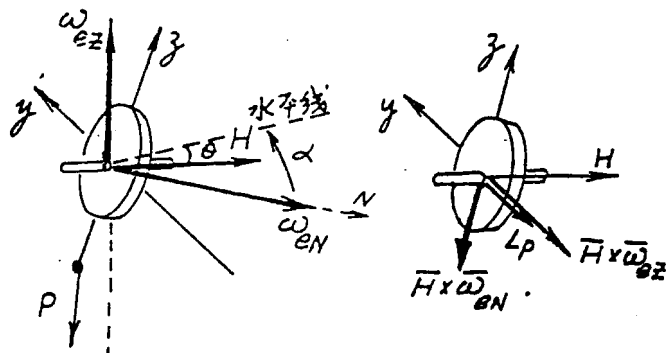


图1-7

3. 摆力矩 L_p ，作用在 y 轴的负向，根据前述结论，当 θ 较小时，

$$L_{y2} = -M \cdot \theta, \quad (M = m \cdot g \cdot s)。$$

综合以上三力矩，得到作用在 y 轴及 z 轴的力矩式如下：

$$L_y = L_{y1} + L_{y2} = -H \omega_{ez} - M \theta \quad (1-1)$$

$$L_z = -H \omega_{eN} \cdot \alpha \quad (1-2)$$

（二）求方位角与高度角的变化

作用在陀螺仪上的力矩将使陀螺仪主轴进动，主轴的方位角与高度角都将变化。 y 轴方

向的力矩，使主轴的方位角发生变化。变化的速度 $\frac{d\alpha}{dt}$ 就是主轴在方位上进动的角速度 $\omega_{进}$ 。

$\omega_{进} = \frac{L_y}{H}$ 。设 $\dot{\alpha} = \frac{d\alpha}{dt}$ ，则 $\dot{\alpha} = \frac{L_y}{H}$ 。 L_y 力矩在 y 轴正向时，即 $L_y > 0$ 时，进动角速度矢量

$\dot{\alpha}$ （即 $\omega_{进}$ ）在 z 轴的正向（向上）。

z 轴的力矩，使主轴的高度角变化。变化的速度 $\frac{d\theta}{dt}$ ，就是主轴俯仰的进动角速度 $\omega_{进} =$

$\frac{-L_z}{H}$ 。式中负号表示，当 L_z 为正，即矢量向上时，进动角速度矢量为负，即在 y 轴的负向。

设 $\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$ ，则

$$\dot{\theta} = -\frac{L_z}{H}.$$

把 L_1 和 L_2 两式代入 $\dot{\theta}$ 和 $\dot{\alpha}$ 两式, 得到:

$$\dot{\alpha} = \frac{-H\omega_{ez} - M\theta}{H} = -\omega_{ez} - \frac{M\theta}{H},$$

$$\dot{\theta} = \frac{-(-H\omega_{eN}\alpha)}{H} = \omega_{eN}\alpha.$$

即
$$\begin{cases} \dot{\alpha} + \omega_{ez} = -\frac{M}{H}\theta, \\ \dot{\theta} - \omega_{eN}\alpha = 0. \end{cases} \quad \begin{matrix} (1-3) \\ (1-4) \end{matrix}$$

(三) 解方程

取(1-3)式对时间的导数, 得到

$$\ddot{\alpha} = -\frac{M}{H}\dot{\theta},$$

即
$$\dot{\theta} = -\frac{H}{M}\ddot{\alpha}.$$

代入(1-4)式, 得到:

$$-\frac{H}{M}\ddot{\alpha} - \omega_{eN}\alpha = 0,$$

即
$$\frac{H}{M}\ddot{\alpha} + \omega_{eN}\alpha = 0,$$

$$\ddot{\alpha} + \frac{M}{H}\omega_{eN}\alpha = 0.$$

设
$$\omega_0^2 = \frac{M}{H}\omega_{eN} = \frac{M}{H}\omega_e \cos \varphi, \quad (1-5)$$

则上式成为
$$\ddot{\alpha} + \omega_0^2 \alpha = 0. \quad (1-6)$$

这方程的通解为:

$$\alpha = C_1 \cos \omega_0 t + C_2 \sin \omega_0 t \quad (1-7)$$

为了求出 C_1 、 C_2 两常数, 将上式对时间取导数, 得到:

$$\dot{\alpha} = -C_1 \omega_0 \sin \omega_0 t + C_2 \omega_0 \cos \omega_0 t \quad (1-8)$$

假设主轴的起始位置 $t = 0$ 时, 在 $\alpha = \alpha_0$, $\dot{\alpha} = 0$ 的位置。代入(1-7)(1-8)两式, 得到:

$$\begin{cases} \alpha_0 = C_1 \cos 0 + C_2 \sin 0, \\ 0 = -C_1 \omega_0 \sin 0 + C_2 \omega_0 \cos 0. \end{cases}$$

得
$$\begin{cases} \alpha_0 = C_1, \\ 0 = C_2. \end{cases}$$

把上两常数代入(1-7), (1-8)两式, 得到:

$$\alpha = \alpha_m \cos \omega_0 t, \quad (1-9)$$

$$\dot{\alpha} = -\alpha_m \omega_0 \sin \omega_0 t. \quad (1-10)$$

将(1-10)式代入(1-3)式, 得

$$-\alpha_m \omega_0 \sin \omega_0 t + \omega_z = -\frac{M}{H} \theta.$$

即

$$\theta = \frac{H}{M} \alpha_m \omega_0 \sin \omega_0 t - \frac{H}{M} \omega_z,$$

$$\theta = \frac{H}{M} \alpha_m \omega_0 \sin \omega_0 t - \frac{H}{M} \omega_e \sin \varphi. \quad (1-11)$$

设

$$\theta_m = \frac{H}{M} \alpha_m \omega_0; \quad \text{已知 } \theta_p = -\frac{H}{M} \omega_e \sin \varphi,$$

则上式成为:

$$\theta = \theta_m \sin \omega_0 t + \theta_p \quad (1-12)$$

(1-9)和(1-12)两式, 即为陀螺球主轴的运动表达式。

(四) 讨论

1. 主轴运动的投影轨迹是椭圆

把(1-9)(1-12)两式改写成下两式:

$$\begin{cases} \frac{\alpha}{\alpha_m} = \cos \omega_0 t \\ \frac{\theta - \theta_p}{\theta_m} = \sin \omega_0 t \end{cases}$$

上两式平方后相加, 得到:

$$\frac{\alpha^2}{\alpha_m^2} + \frac{(\theta - \theta_p)^2}{\theta_m^2} = \cos^2 \omega_0 t + \sin^2 \omega_0 t = 1$$

上式为一椭圆方程。椭圆的中心在 $\alpha = 0$, $\theta = \theta_p$ 的位置, 也即为主轴的稳定位置。椭圆的

两个半轴长为 α_m 和 θ_m 。而 $\theta_m = \frac{H}{M} \alpha_m \omega_0 = \frac{H \omega_0}{M} \alpha_m$ 。在罗经中, $M \gg H \omega_0$, 所以 $\theta_m \ll \alpha_m$ 。

所以这是一个扁平的椭圆。

2. 椭圆的长宽比

以椭圆的长短半轴长度的比值, 即为椭圆的长宽比, 说明椭圆的扁平程度:

$$\frac{\alpha_m}{\theta_m} = \frac{\alpha_m}{\frac{H}{M} \alpha_m \omega_0} = \frac{M}{H \omega_0}.$$

而

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{M \omega_{eN}}{H}}, \text{ 代入上式,}$$

得

$$\frac{\alpha_m}{\theta_m} = \frac{M}{H \sqrt{\frac{M \omega_{eN}}{H}}} = \sqrt{\frac{M}{H \omega_{eN}}} = \sqrt{\frac{M}{H \omega_e \cos \varphi}}.$$

在罗经中，最大重力矩M是比较大的，它使 $\frac{\alpha_m}{\theta_m}$ 约为几十倍。由于式中含有 $\cos\varphi$ ，所以 $\frac{\alpha_m}{\theta_m}$ 值随纬度变。各纬度处的比值如下：

φ	0°	20°	40°	60°	70°	75°	80°
$\frac{\alpha_m}{\theta_m}$	24	25	27	34	40	47	58

在同一纬度上，主轴的起始位置不同时，主轴作椭圆运动的大小是不同的，如图1—8。从图中看出，当主轴指北，但是仰起的高度角不是 θ_p 时，如图中a点，主轴作椭圆运动的结果，主轴在方位上偏离真北的夹角将会是很大的，如图中b点。

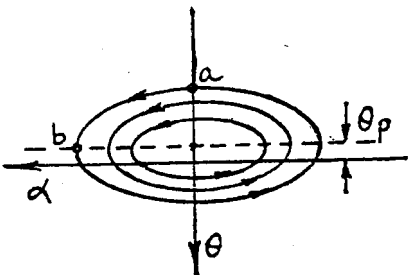


图1—8

3. 椭圆运动周期 T_0 。

从(1—9)和(1—12)两式可知，主轴作椭圆运动的角频率为 ω_0 ， $\omega_0 = \sqrt{\frac{M\omega_{sN}}{H}}$ 。设椭圆运动的周期为 T_0 ，则

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{H}{M\omega_{sN}}} = 2\pi\sqrt{\frac{H}{M\omega_s \cos\varphi}}$$

当陀螺球的动量矩H和最大重力矩M为定值时，周期 T_0 随纬度变。航海—I型罗经的椭圆运动周期 T_0 如下表：

φ	0°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
T_0 (分)	57.7	61.5	63.9	68.9	74.5	84.4	107.4	145.0

三、阻尼运动——长轴阻尼

要使下重式陀螺球在作椭圆运动的过程中它的振幅逐次减小，直至最后稳定，要在陀螺球上加一阻尼力矩。航海型罗经采用长轴阻尼的办法，阻尼力矩加在y轴方向。从原理上要求，当主轴偏东时，阻尼力矩的方向应朝西；当主轴偏西时，阻尼力矩的方向应朝东，如

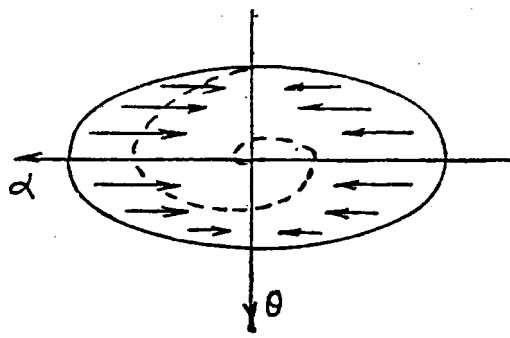


图1—9

图1—9。这就使得主轴在运动过程中，不断地减小方位角，也即不断地向子午线靠拢，直至最后稳定在真北方向。（注：图1—9是 $\varphi = 0$ 处情况）

（一）用阻尼器产生阻尼力矩

阻尼器的构造如图1—10。在陀螺球内安装有南北两容器，容器内盛有一定粘度的油。容器下部用细管联通，称为油管。容器上部，有粗管联通，称为空气管。整个部件成为一个密封的流通管路。当南北两容器的油量不相等时，油量多的一端较重，它对陀螺球中心产生力矩，即为阻尼力矩。从图中看出，多余油量的重力产生的力矩矢量在 Y 轴方向，它使主轴在水平方向进动，引起主轴方位角发生变化。

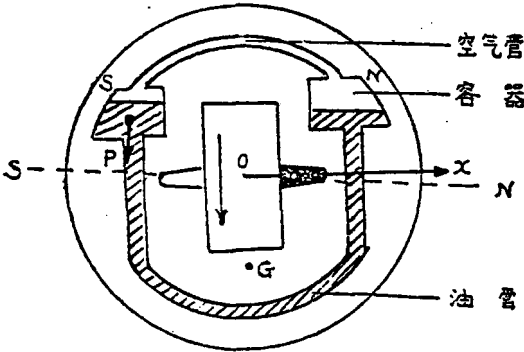


图1—10

由于南北两容器的下联通管是细而弯的，其中的油又有粘性，陀螺球与阻尼器一起俯仰时，容器中的油液并不立即随着流动，两容器的液面更不会立即流平；因为油在细管中流动的速度是比较慢的。

当主轴从水平位置 a 点，如图1—11，向上仰起到最高点 b 时，阻尼器中南北两容器的油量差别不大、几乎是相等的。所以 ab 段曲线，仍为椭圆运动曲线。在 b 点时，阻尼器中的

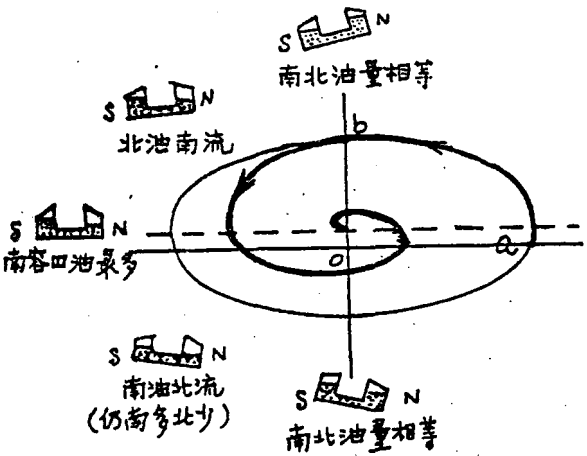


图1—11

油液已经开始从高处（北容器）向低处（南容器）流动。当主轴自b点向西向下运动时，北容器仍高于南容器，北容器的油继续往南容器流动，使南容器油量不断增多。多余油量产生阻尼力矩，力矩矢量在y轴负向。该力矩使主轴向东进动，主轴将不按原椭圆轨迹运动，而是按螺旋曲线运动，主轴逐渐向真北方向靠拢。

当主轴运动到水平位置时，南北两容器也成水平位置，北容器的油液即停止向南容器流动；而这时，南容器的多余油量已积累到一定程度，也即达到了最大值。因此，这时产生的阻尼力矩也为最大。主轴水平时，它的方位角是在最大位置，而这时阻尼器产生的阻尼力矩也为最大。这就符合长轴阻尼在理论上的要求。这样结构的阻尼器，南北容器的油量差并不与陀螺球主轴的高度角成正比，而是与主轴的方位角成正比；它产生的阻尼力矩也就与主轴的方位角成正比。阻尼器南北两容器的油量差，与主轴高度角的变化相差 $\frac{1}{2}$ 周期。实际上油的流动情况比上述分析复杂，这里是以理想情况分析的。

（二）阻尼运动与稳定位置

陀螺球内装置了阻尼器以后，主轴运动的投影如图1-11。从a点开始，第一个 $\frac{1}{4}$ 周期内，主轴上仰时，阻尼器中油尚未流动，主轴仍按椭圆轨迹运动。自b点以后，阻尼器中油开始流动，产生阻尼力矩。主轴按螺旋曲线运动。这曲线称为阻尼曲线。陀螺球作阻尼运动时，主轴在东西两侧所偏离的最大方位角在逐次减小，最后稳定在真北方向。

阻尼运动一周的时间，称为阻尼周期。航海—I型罗经的阻尼周期如下：

纬度	0°	20°	40°	60°	70°	80°	85°
阻尼周期（分）	63	68	76	115	142	253	325

下重式陀螺球的稳定位置，在未加阻尼器时，是 $\alpha = 0$ ， $\theta = \theta_p$ ，如图1-12中A点。作用在陀螺球上的惯性力矩 $H \cdot \omega_{ez}$ ，被摆力矩 $L_p = -M\theta_p$ 相平衡。加了阻尼器以后，由于原来主轴在稳定时是要上仰的，所以南容器的油一定比北容器多。阻尼器中南容器多余的油量产生的力矩是在y轴的负向（向东），设它为 L_c 。如果主轴仍上仰 θ_p 角，很明显，东西两方向的力矩不平衡。为此，主轴必将上仰到 θ'_p ，即B点，以增大摆力矩，设它为 $L'_p = -M\theta'_p$ 。当东西两方向的力矩平衡时，可列出下式：

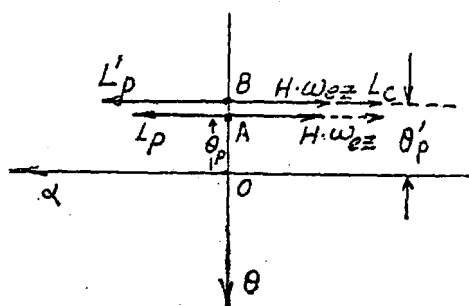


图1-12

$$M\theta'_p = H \cdot \omega_{ez} + L_c.$$

当主轴上仰角不大时，阻尼器中多余油量产生的力矩 L_c 可假设是与上仰角成正比的，即 $L_c = C \cdot \theta$ 。系数C可以定为阻尼器中多余油量产生的最大力矩。代入上式，得到：

$$M\theta'_P = H\omega_{sz} + C\theta'_P,$$

即

$$M\theta'_P - C\theta'_P = H\omega_{sz},$$

所以

$$\theta'_P = \frac{H\omega_{sz}}{M-C} = \frac{H\omega_s \sin\varphi}{M-C}.$$

为了与规定的座标符号相一致, 上式应加一负号,

即

$$\theta'_P = \frac{-H\omega_s \sin\varphi}{M-C}.$$

航海型罗经指北稳定时, 陀螺球主轴应有高度角 θ'_P 。北纬时 $\varphi > 0$, θ'_P 为负值, 所以主轴是上仰的。南纬时, $\varphi < 0$, θ'_P 为正值, 主轴是下俯的。航海型罗经在各纬度处的 θ'_P 值如下:

φ	0°	20°	40°	50°	60°	70°
θ'_P	0°	5 0	9 3	11 2	12 6	13 8

(三) 加快稳定的措施

要使罗经加快稳定指北, 可采用缩短阻尼周期, 加大阻尼因数, 和减小启动罗经时主轴的起始方位角等方法。但是摆式罗经的构造参数是固定的, 阻尼周期与阻尼因数不能改变。因此, 只能采取减小主轴起始方位角的办法。在航海型罗经上, 有一套对陀螺球施加力矩, 使陀螺球转动的装置, 称为加快稳定装置。除了减小起始方位角以外, 还应注意主轴的起始高度角。一般要求, 启动时主轴应水平为好。

四、速度自差(δ)及其校正

(一) 速度自差的产生

舰艇在地球上等速航行时, 它带着陀螺罗经在地球表面作圆周运动。这时, 陀螺仪除了随地球在空间转动以外, 又增加了一个在空间转动的角速度。因此, 对陀螺仪又增加了一个惯性力矩 $\overline{H} \times \omega'$ (舰)。若不外加力矩来抵消这新的惯性力矩, 罗经必将产生误差。这误差称为速度自差。

1. 舰速的分解与角速度

舰在任意航向 C 航行, 舰速为 V , 如图 1—13。

13. 把舰速 V 分解到北与东两个方向, 得到:

$$V_N = V \cos C,$$

$$V_E = V \sin C.$$

V_E 产生的角速度矢量在子午面方向, 它与地球自转角速度相比, 是很小的, 故可忽略不计。

V_N 产生的角速度矢量在水平向西方向, 设为 ω'_w ,

$$\omega'_w = \frac{V_N}{R} = \frac{V \cos C}{R}.$$

2. 速度自差

北向舰速 V_N 产生角速度 ω'_w , 它对陀螺仪产生惯性力矩为 $\overline{H} \times \omega'_w$ 。当陀螺仪主轴水平指北时, $\overline{H} \times \omega'_w$ 力矩作用在 z 轴正向 (即向上)。在航海型罗经上, 不能在陀螺球上增添外力矩来抵消此惯性力矩。因此, 陀螺仪主轴必定要偏离真北方向, 即偏离地球自转分角速

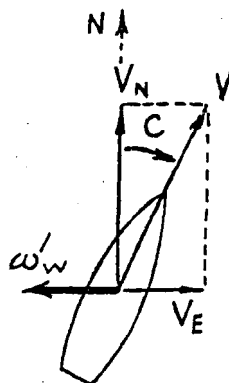


图1-13

ω_{eN} 的方向，而是指向 ω_{eN} 和 ω'_w 的合矢量 ω'_N 方向，如图 1-14。假设这时陀螺球主轴的方位角为 α ，这就是陀螺球主轴指向的误差，称为速度自差。

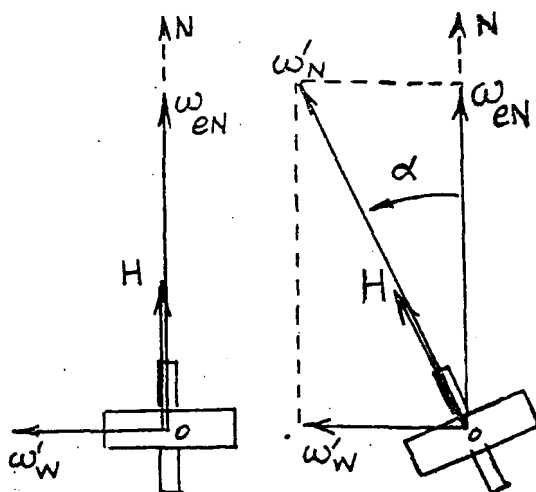


图 1-14

陀螺仪主轴所以只能指向 ω'_N 的方向，那是因为只有在此位置时， $\overline{H} \times \overline{\omega'_N} = 0$ 。或者说，只有在此位置时， ω_{eN} 与 ω'_w 对陀螺仪产生的惯性力矩才互相抵消。

ω_{eN} 对陀螺仪产生的惯性力矩为 $\overline{H} \times \overline{\omega_{eN}}$ ，力矩在 z 轴负向(向下)，大小为 $H \cdot \omega_{eN} \cdot \sin \alpha$ 。
 ω'_w 对陀螺仪产生的惯性力矩为 $\overline{H} \times \overline{\omega'_w}$ ，力矩在 z 轴正向(向上)，大小为 $H \cdot \omega'_w \cdot \sin(90^\circ - \alpha)$ 。当 z 轴上两个方向的力矩相等时，陀螺仪所受的总力矩为零，主轴即稳定不动。

航海型罗经的稳定点，当舰速为零时，如图中 A 点，在 $\alpha = 0$ ， $\theta = \theta_P$ 的位置。当舰速为 V_1 时，主轴将偏离真北一个方位角 α_1 ，如图中 B 点。这时，水平方向的两个力矩与 A 点相同，在 z 轴方向的上下两个力矩也平衡，即 $\overline{H} \times \overline{\omega_{eN}}$ 和 $\overline{H} \times \overline{\omega'_w}$ 两力矩的大小相等。

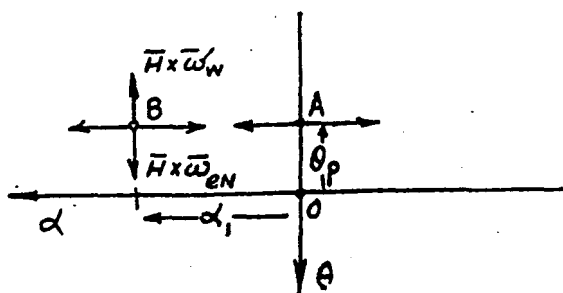


图 1-15

3. 自差公式

根据图 1-14 可直接求出主轴偏离真北的夹角 α ：

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega'_{\text{W}}}{\omega_{\text{eN}}}.$$

因为地球自转分角速 ω_{eN} 比舰速产生的角速度大很多, 所以 α 角是很小的。可用 $\alpha \approx \operatorname{tg} \alpha$ 来表示:

$$\alpha = \frac{\omega'_{\text{W}}}{\omega_{\text{eN}}} = \frac{\frac{V_{\text{N}}}{R}}{\omega_{\text{eN}}} = \frac{V \cos C}{R \omega_{\text{e}} \cos \varphi}.$$

主轴偏离真北的夹角, 就是陀螺罗经刻度盘 0° 偏离真北的夹角, 在航海上定义为自差, 用 δ 表示。航海上规定罗经刻度盘 0° 偏西时, 自差为负值。因此, 在航海上应用时, 要把上式改写成自差 δ 表达式, 即自差公式:

$$\delta = \frac{-V \cos C}{R \omega_{\text{e}} \cos \varphi}.$$

4. 讨论

根据自差公式, 可得如下几点:

(1) 速度自差与舰艇的航速成正比。

(2) 速度自差与航向 C 的余弦成正比。画出自差与航向的关系, 得到如图 1-16 的曲线。

航向在 $0^\circ - 90^\circ$, $270^\circ - 360^\circ$ 范围时, 自差为负值, 罗经的 0° 偏于真北西部。航向在 $90^\circ - 180^\circ$ 范围内时, 自差为正值, 罗经的 0° 偏于真北东部。

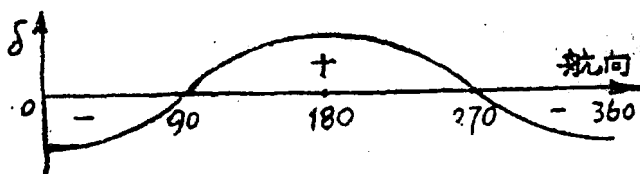


图 1-16

(3) 自差将随纬度改变。公式分母中含 $\cos \varphi$ 项, 当纬度增高时, $\cos \varphi$ 将减小, 自差将增大。

(4) 当舰速 V 用“节”作单位, $R \omega_{\text{e}} = 900$ 海里/小时, 则自差公式成为:

$$\delta = \frac{-V \cos C}{900 \cos \varphi} \quad (\delta \text{——弧度})$$

若以度为单位, 上式为

$$\delta^\circ = \frac{-V \cos C}{900 \cos \varphi} \times 57.3 \quad (1 \text{ 弧度} = 57.3^\circ = 60^\circ)$$

$$= \frac{-V \cos C}{900 \cos \varphi} \times 60$$

所以

$$\delta^\circ = \frac{-V \cos C}{15 \cos \varphi}.$$

根据速度 V (以节为单位), 航向 C 和纬度 φ , 代入上式, 即可算出自差 δ (以度为单位)。

例一：舰速 $V = 30$ 节，航向 $C = 60^\circ$ ，航行纬度 $\varphi = 33^\circ$ ，则自差 $\delta = \frac{-30 \cdot \cos 60^\circ}{15 \cdot \cos 33^\circ} =$

$-\frac{2 \times 0.5}{0.86} = -1.2$ 。例二：舰速 $V = 30$ 节，航向 $C = 0^\circ$ ，航行纬度从 0° 到 80° 间，每隔 10° 的

自差值如下：

φ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
δ	-2°	-2°	$-2^\circ 1'$	$-2^\circ 3'$	$-2^\circ 6'$	$-3^\circ 1'$	$-4^\circ 0'$	$-5^\circ 8'$	$-11^\circ 5'$

从本例看出，在高纬度时，自差增加较大。

(二) 速度自差的校正

当罗经有自差时，航海应用时就要进行向位换算，这对使用来讲总究有些不方便。为此，在航海型罗经中采用机械校正的办法，使罗经的刻度盘上不存在误差。

1. 校正速度自差的基本方法

一般罗经上，罗经刻度盘的 0° 总是与陀螺仪主轴的方向保持一致的。当陀螺仪主轴偏离真北而有误差时，罗经刻度盘的 0° 也必定偏离真北而有误差。在航海型罗经上，拨动罗经的刻度盘，使刻度盘的 0° 相对于陀螺仪主轴偏转一个 ϕ 角；这称为校正角。当校正角 ϕ 等于速度自差 δ ，而方向相反时，罗经刻度盘的 0° 即指真北。这就是航海型罗经消除速度自差的基本方法。（图1-17）

由于 $\delta = -\frac{V \cos C}{R \omega \cos \varphi}$ ，它是随航向、纬度和舰速变化的。所以要求罗经刻度盘的校正角

也应随着这三个参数变。在航海—I型罗经中，速度与纬度这两个参数由人工装定到校正器中去。航向参数，由罗经本身提供。

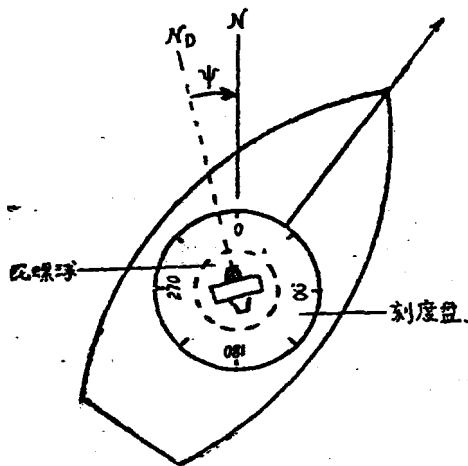


图1-17

2. 校正器的结构原理（见图1-19）。它由上、下两个圆盘组成。下盘的 N_D 方向，与陀螺球主轴方向一致，所以它含速度自差。上盘是罗经刻度盘，它可以相对下盘偏转