5 船用陀螺罗经的认知与维护保养

5.1 船用陀螺罗经的指北原理及误差（4）

（一）陀螺仪及其特性

（二）陀螺仪主轴空间指向描述

（三）自由陀螺仪在地球上的视运动

（四）变自由陀螺仪为陀螺罗经的方法

（五）摆式罗经等幅摆动和减幅摆动

（六）电磁控制式陀螺罗经

（七）陀螺罗经的误差及其消除

（五）摆式罗经等幅摆动和减幅摆动

- **主轴指北端在投影面上的运动轨迹：**

其运动轨迹为一椭圆，分析如下假定为北纬某处：

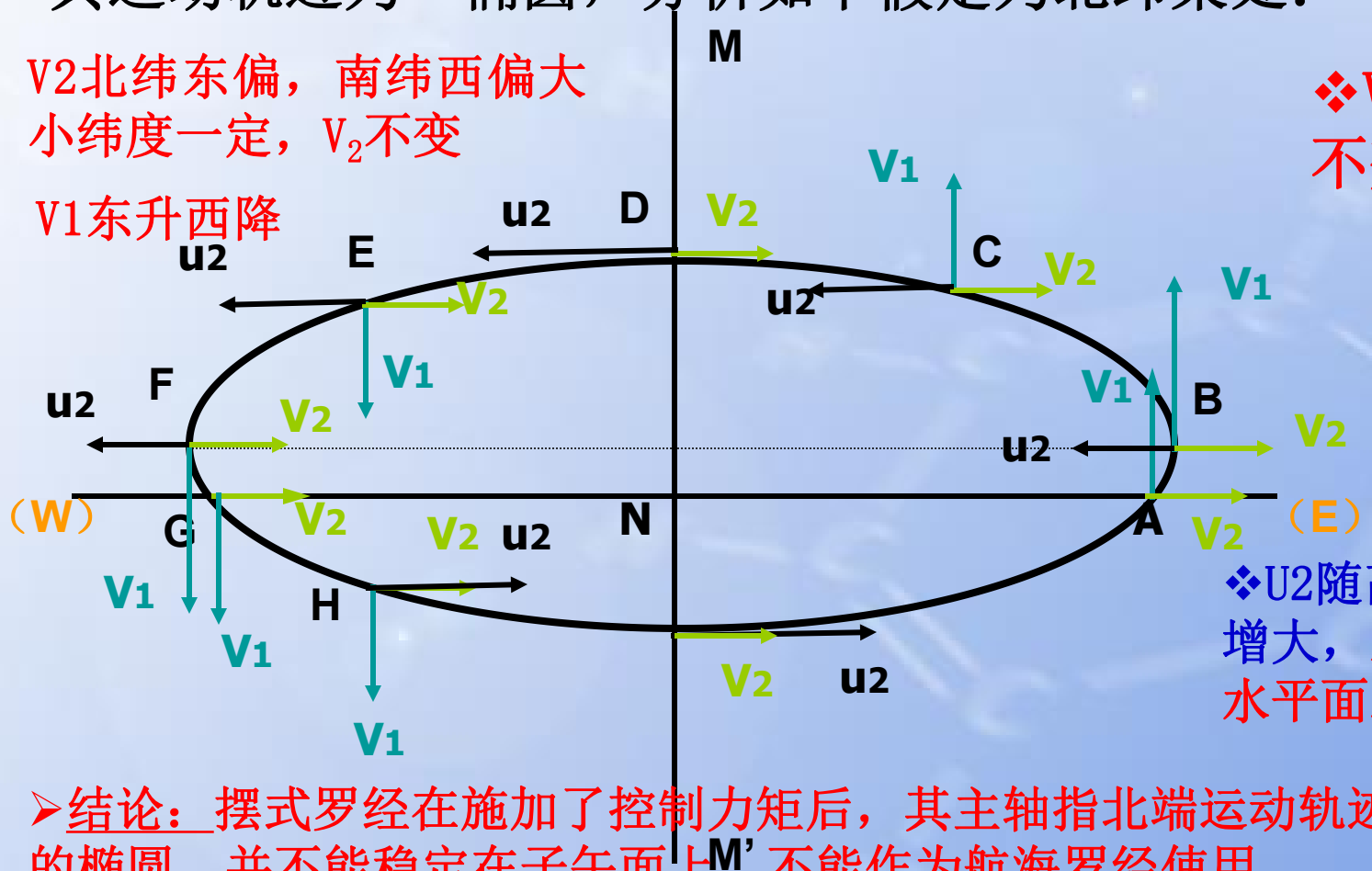
V2北纬东偏，南纬西偏大
小纬度一定，V_2不变

V1东升西降

❖V2大小方向不变

❖V1随方位角的增大而增大东升西降

❖U2随高度角的增大而增大，水平面之上偏西，水平面之下偏东



➢结论：摆式罗经在施加了控制力矩后，其主轴指北端运动轨迹为一等幅摆动的椭圆，并不能稳定在子午面上。不能作为航海罗经使用

一、船用陀螺罗经指北原理

（五）摆式罗经等幅摆动和减幅摆动

2.摆式罗经的减幅摆动

1）什么是阻尼力矩

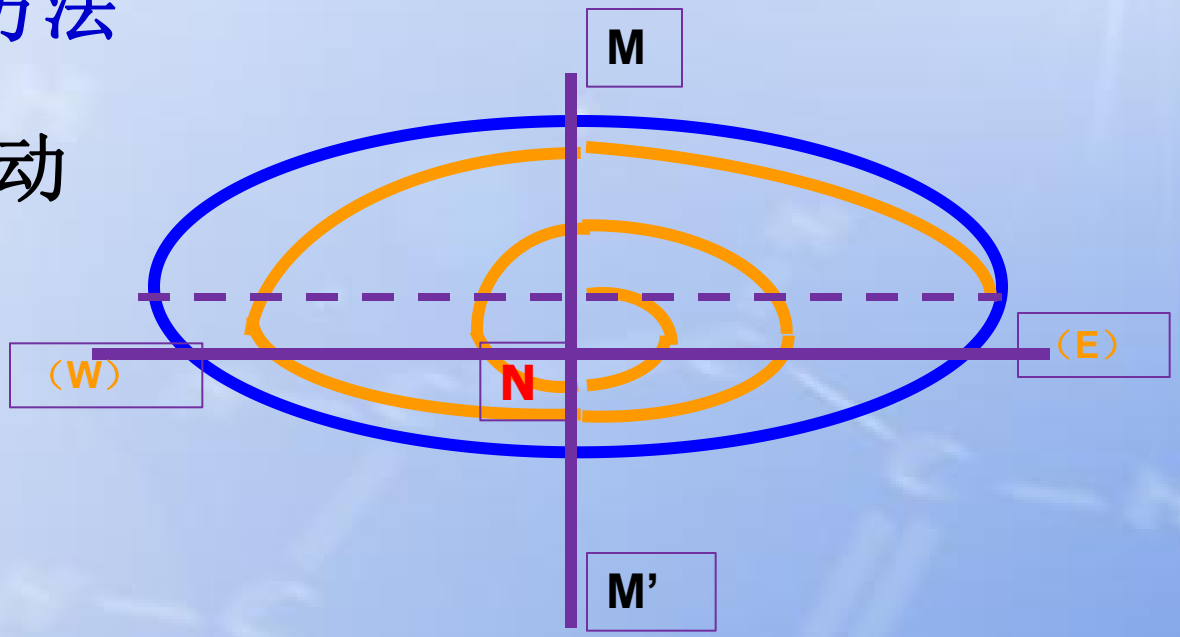
阻尼力矩（damping moment）：为了使陀螺罗经稳定指北而对陀螺仪施加的力矩。阻尼设备（damper阻尼器）：陀螺罗经产生阻尼力矩的设备（器件）

阻尼的目的：将等幅运动变为减幅运动，最后衰减至子午面上的某个稳定位置，以实现稳定指北。

2. 摆式罗经的减幅摆动

2）加阻尼力矩的方法

摆式罗经的减幅摆动



2. 摆式罗经的减幅摆动

2）加阻尼力矩的方法

压缩长轴法——水平轴阻尼法
压缩短轴法——垂直轴阻尼法

2. 摆式罗经的减幅摆动

（1）水平轴阻尼法

（为下重式罗经所采用）

B 作用：

➢要求阻尼力矩引起的进动线速度（u3)总是指向子午面。

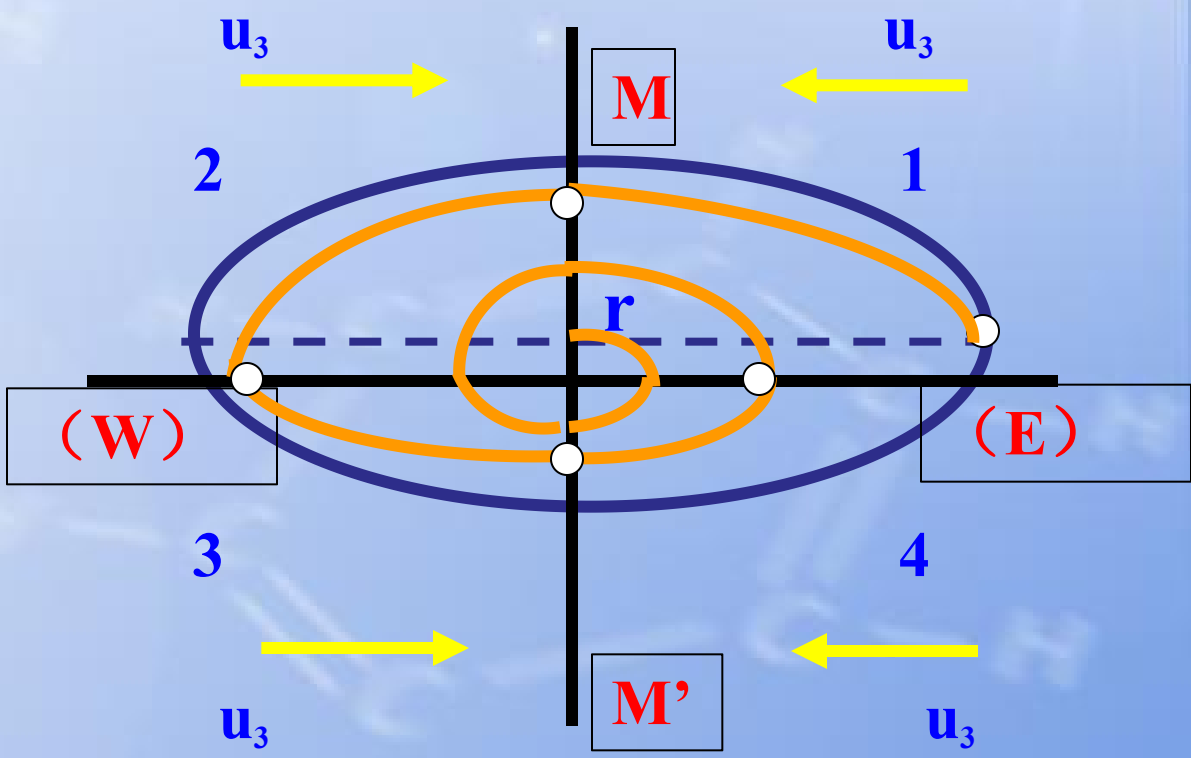
➢1、3象限

高度角—$\theta_{减幅} < \theta_{等幅}$

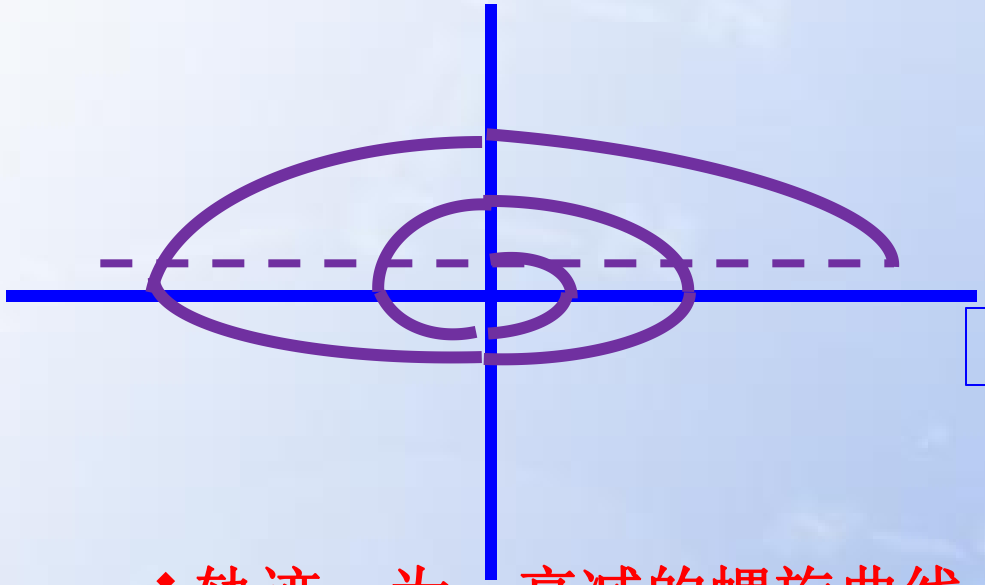
2、4象限

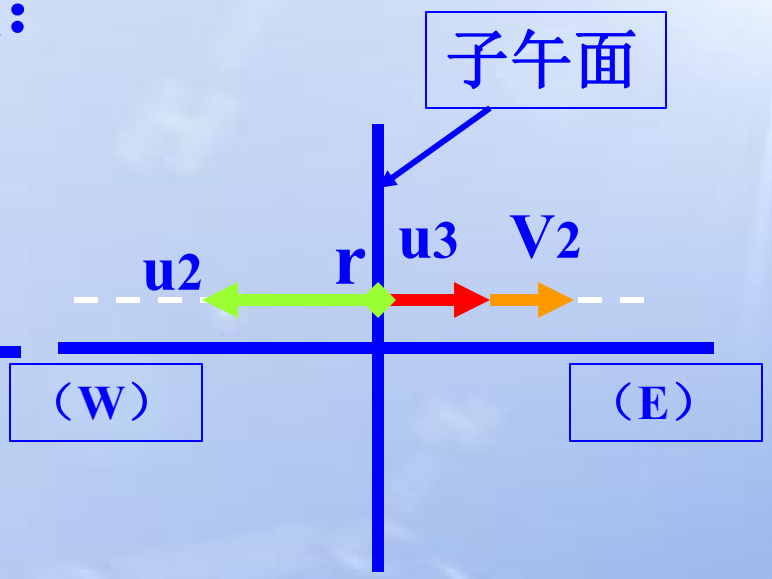
方位角—$\alpha_{减幅} < \alpha_{等幅}$

➢渐次衰减至稳定位置r



③ 阻尼运动轨迹及稳定位置：





❖轨迹：为一衰减的螺旋曲线。

❖稳定位置（r）：

北纬——指北偏上

南纬——指北偏下

❖稳定位置公式：

$$\begin{cases} \alpha_r = 0 \\ \theta_r = -\dfrac{H\omega_2}{M - C} \end{cases}$$

•结论：下重式罗经主轴指北端在水平轴阻尼力矩的作用下，将等幅运动变为衰减运动，最后稳定于子午面上。

（2）垂直轴阻尼法

（为液体连通器罗经所采用）

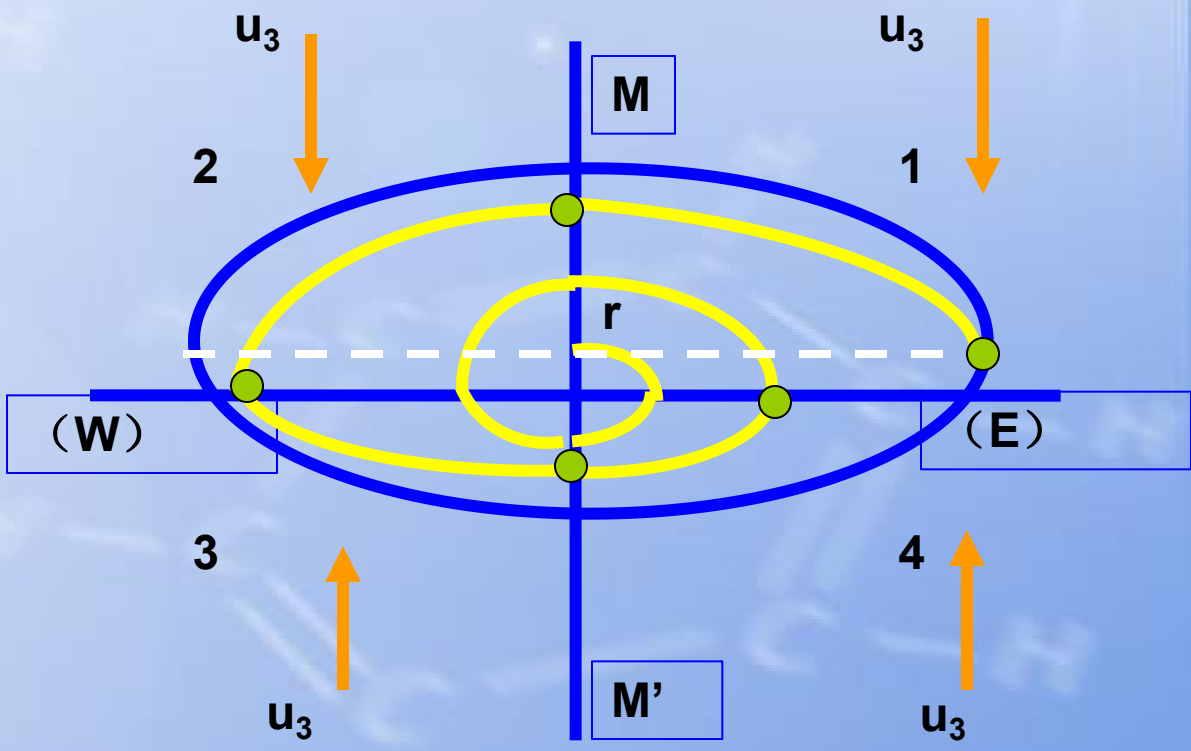
垂直轴阻尼法的结构特点：

➢要求阻尼力矩引起的进动线速度（u_3）总是指向水平面。

➢1、3象限—θ 减幅＜θ 等幅

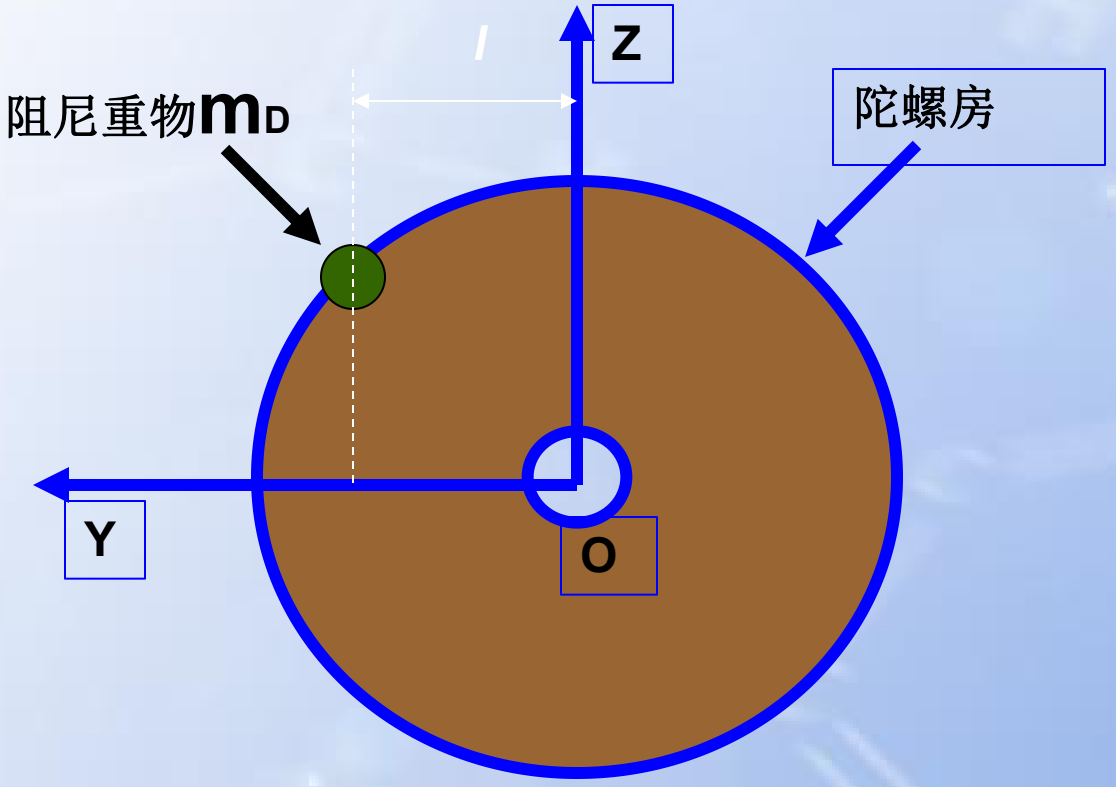
2、4象限—α 减幅＜α 等幅

➢渐次衰减至稳定位置r



3.液体连通器罗经垂直轴阻尼法的实现：

A阻尼器：陀螺房西侧放置一阻尼重物。



B.阻尼重物产生垂直轴阻尼力矩（MzD）：

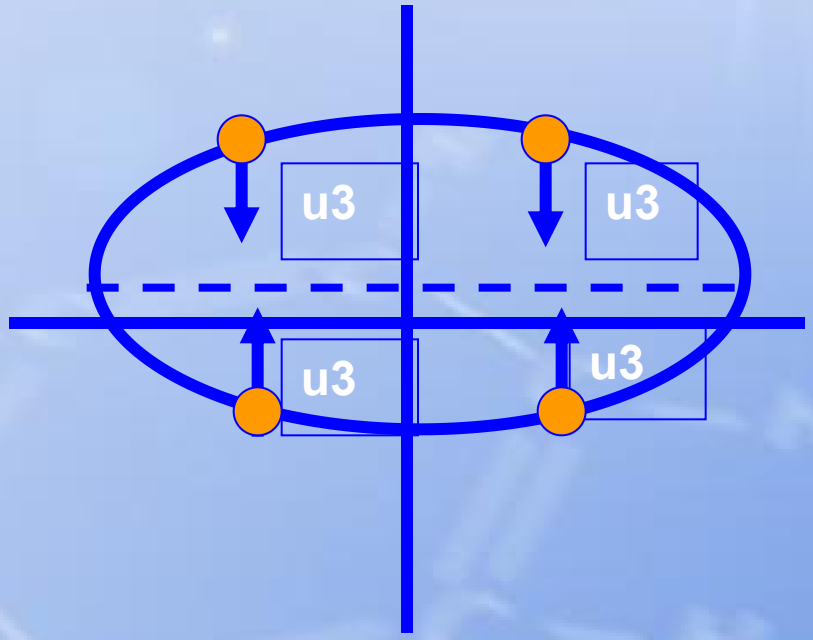
•主轴指北端在水平面之上:

MZD向上，指北端产生的进动u3向下；

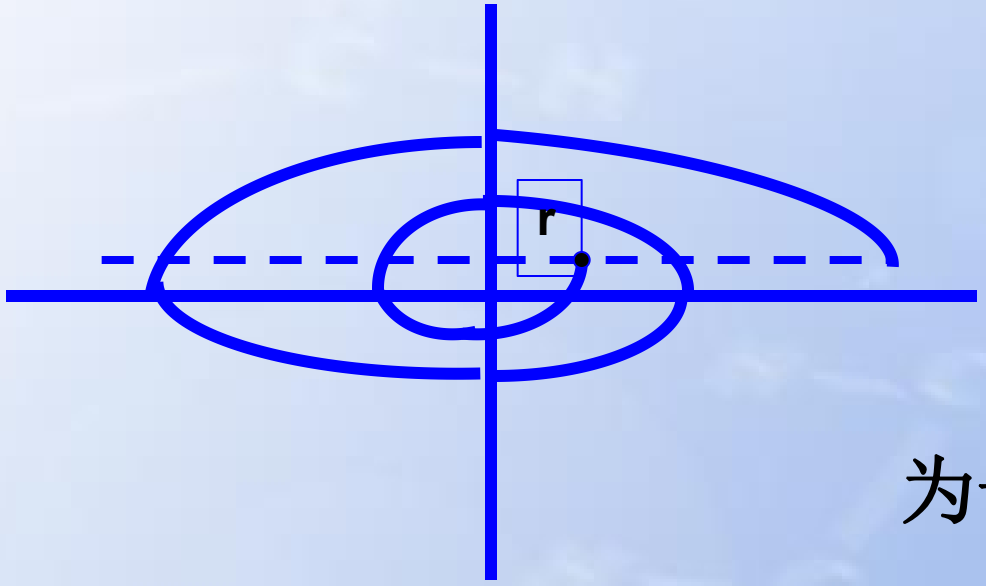
•主轴指北端在水平面之下:

MZD向下，指北端产生的进动u3向上。

所以，可实现垂直轴阻尼。



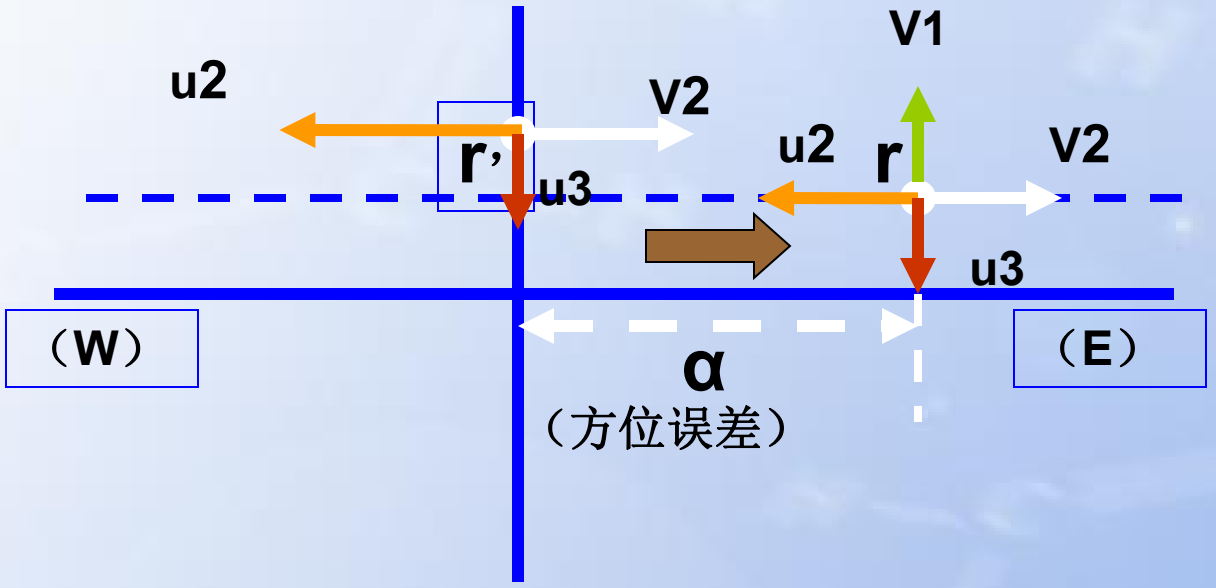
C.阻尼运动轨迹及稳定位置：



❖轨迹：

为一衰减的螺旋曲线。

❖稳定位置的分析：



➢稳定位置：

北纬——偏东偏上

南纬——偏西偏下

稳定位置公式：

$$\begin{cases} \alpha_r = -\dfrac{M_D}{M}\tan\varphi \\ \theta_r = -\dfrac{H\omega_2}{M} \end{cases}$$

➢结论：液体连通器罗经由于采用了垂直轴阻尼法，指北端在子午面上无法稳定，因此产生了指向上的误差。

4. 阻尼运动及参数

（1）阻尼运动曲线

- 下重式罗经的阻尼曲线：

罗经启动80min后，主轴开始作减幅摆动，经过4~6h后达到真北（附近的）稳定位置。

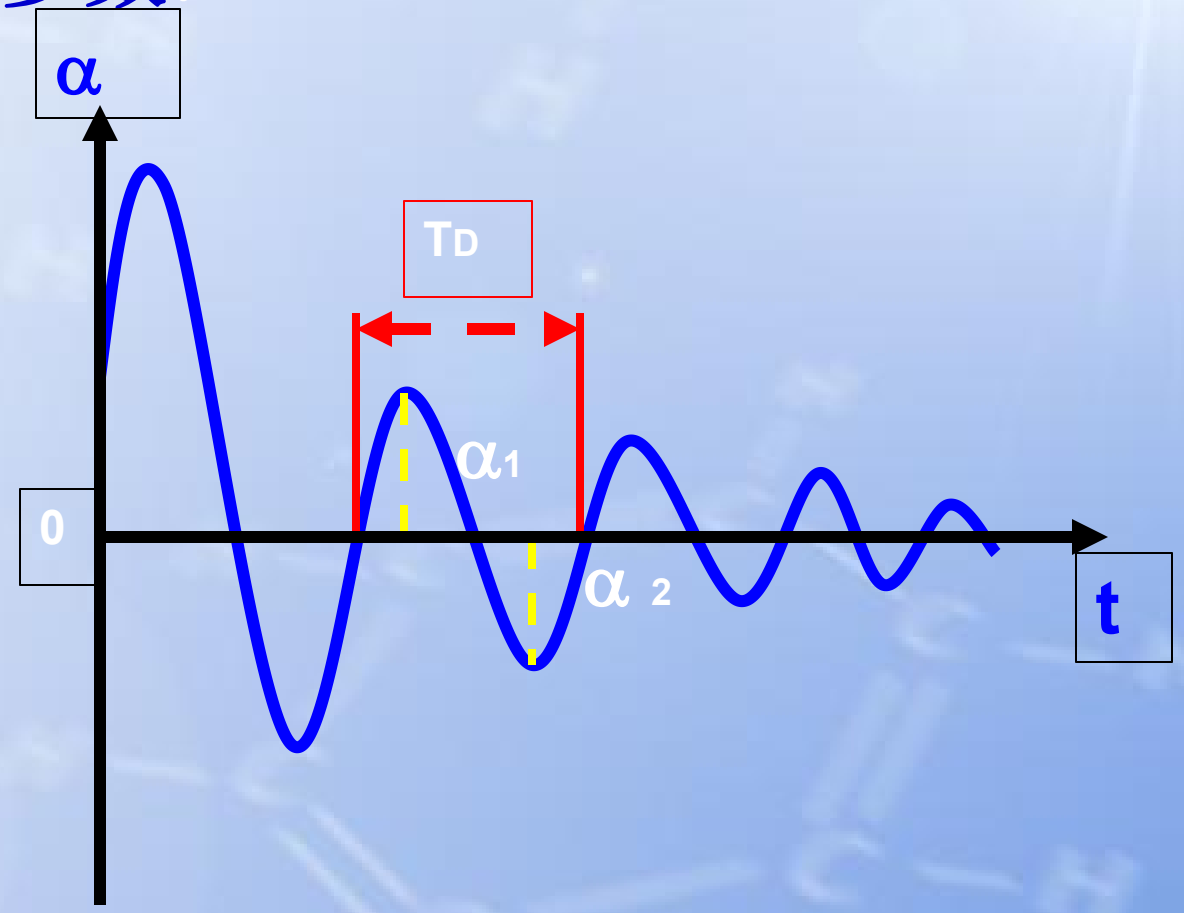
- 阻尼曲线的获得：利用航向记录器或由驾驶员直接按时间记录方位角变化的数值并在坐标纸上绘制成曲线。
- 作用：判断罗经性能的好坏。

- 液体联通式罗经幅度按指数规律衰减的周期性减幅摆动曲线

4. 阻尼运动及参数：

1）阻尼摆动曲线

陀螺仪的主轴在方位上的运动规律



α→t关系曲线

4. 阻尼运动及参数

2）衰减因数

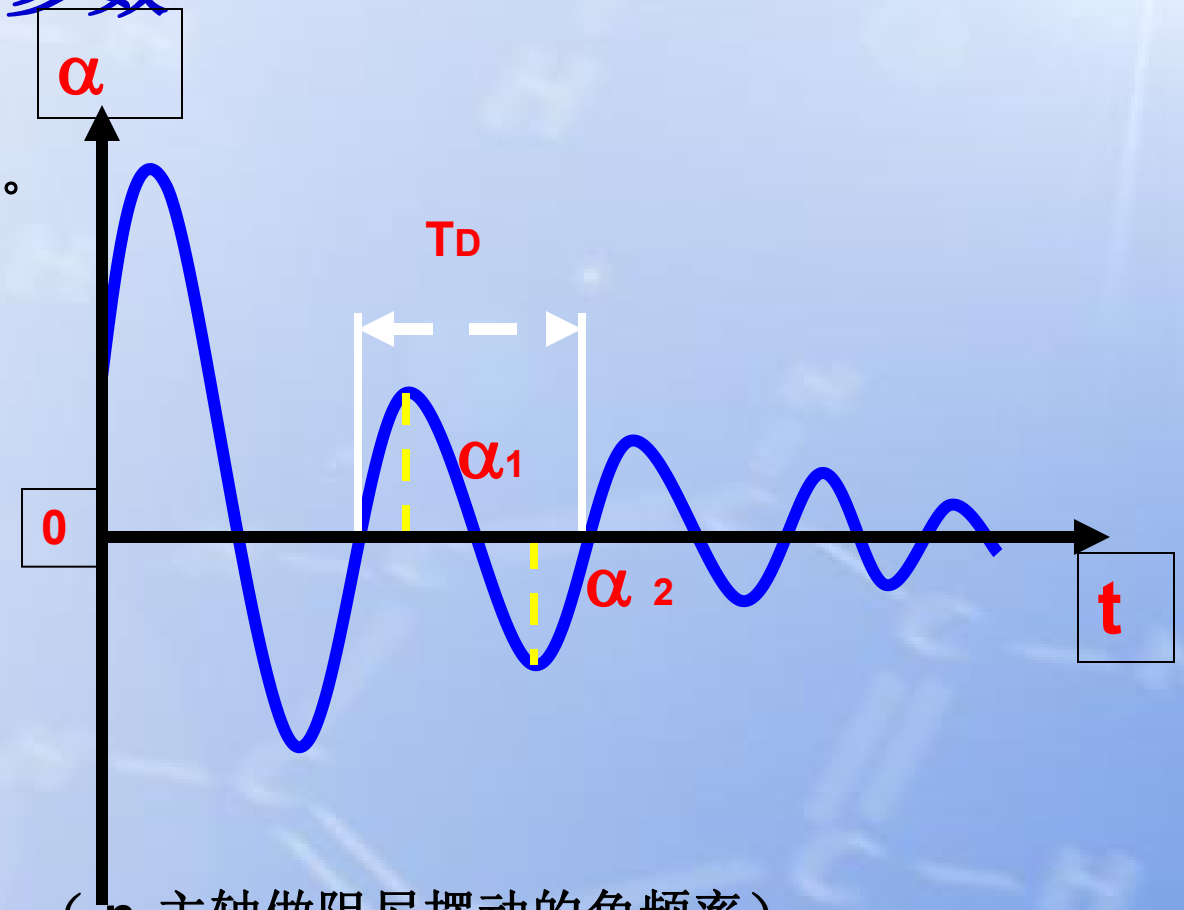
- 它表示阻尼快慢程度。
- 阻尼因数f

f= α 1 / α 2

= α 2 / α 3

=…

= α n / α n+1



3）阻尼周期 TD =2π/n_1 （ n_1主轴做阻尼摆动的角频率）

4）罗经稳定时间t ： 自罗经启动到主轴经减幅摆动使其指向精度满足航海精度（±1⁰）要求的时间。

（六）电磁控制式陀螺罗经

1.结构

平衡陀螺仪

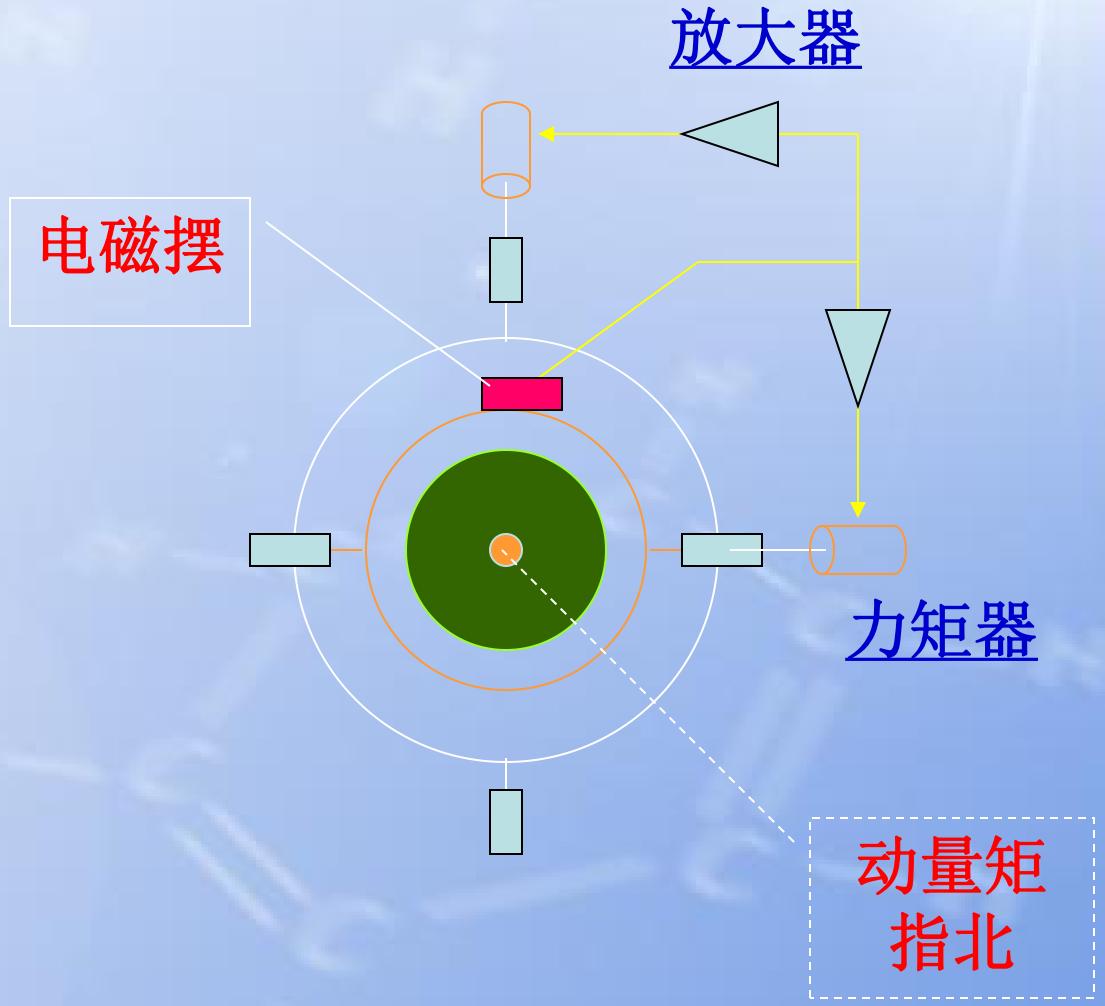
三个自由度

电磁摆

放大器

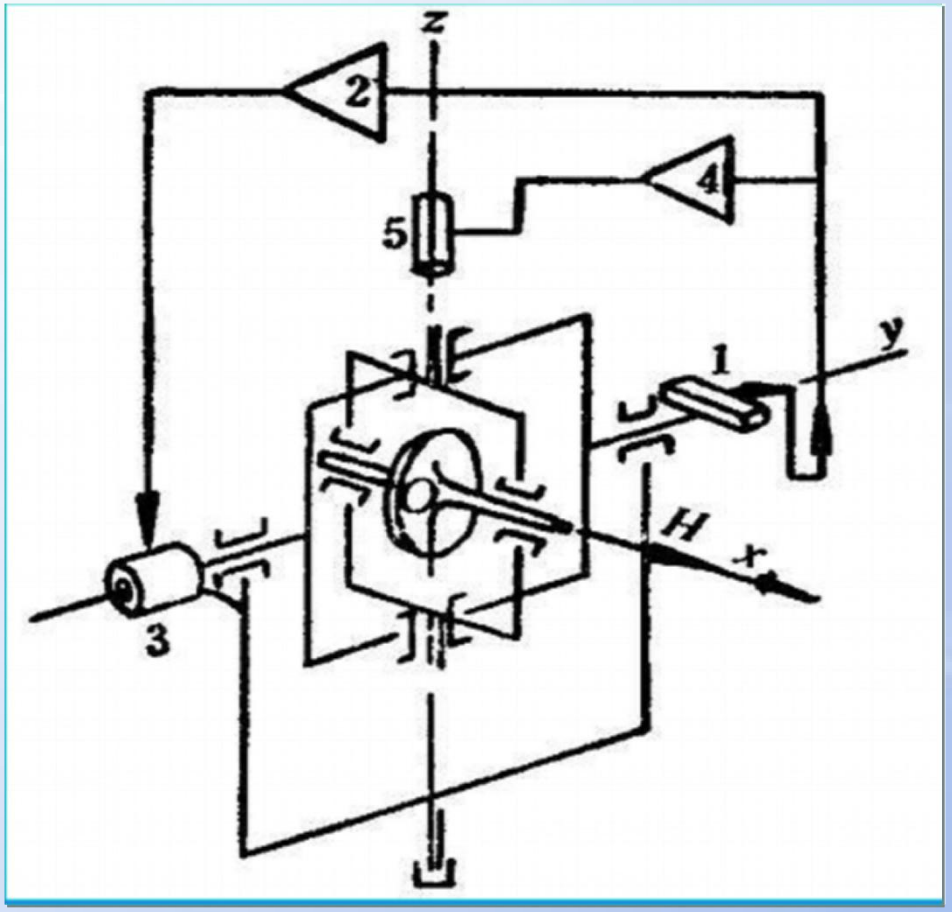
力矩器

通过电磁控制装置
间接施加控制力矩



（六）电磁控制式陀螺罗经

1.结构



➢ 电控式罗经的控制力矩

1.结构：强阻尼电磁摆和水平扭丝力矩器。即将电信号转化为机械力矩。

2.控制力矩的形成： $M_y = -K_Y\theta$ 由2方位放大器水平力矩器3 产生

➢ 电控式罗经的阻尼力矩：

1. 结构：强阻尼电磁摆和垂直扭丝力矩器

2. 阻尼力矩的形成：$M_Z = K_Z\theta$ 由倾斜放大器4垂直力矩器5产生

（六）电磁控制式陀螺罗经

2. 电磁控制式罗经的主要优点

- 其结构参数的选择不受舒拉条件的限制,并可根据需要予以改变
- 启动时,增大施加于水平轴和垂直轴的力矩电控系数K_y与K_z之值,即减小阻尼周期T_D之值,使电磁控制式罗经工作于强阻尼状态,用以缩短其稳定时间
- 主轴接近其稳定位置时,再将K_y和K_z值恢复至正常工作的数值,使电磁控制式罗经工作于弱阻尼状态,用以提高罗经的指向精度
- 在消除ω_2的影响、补偿和消减有害力矩的干扰等均可用电路实现,这将有利于简化罗经的机械结构和提高指向精度

（六）电磁控制式陀螺罗经

3.原理

- 采用电磁摆(electromagnetic pendulum)和水平力矩(horizontal momentat device)的间接控制法获得控制力矩（阿玛-勃朗系列罗经、国产CLP-2型）。通过电磁摆和力矩器获得的电磁控制力矩

- 控制力矩的产生方式：阿玛-勃朗系列罗经的控制设备由电磁摆和位于陀螺球水平轴上的力矩器组成。

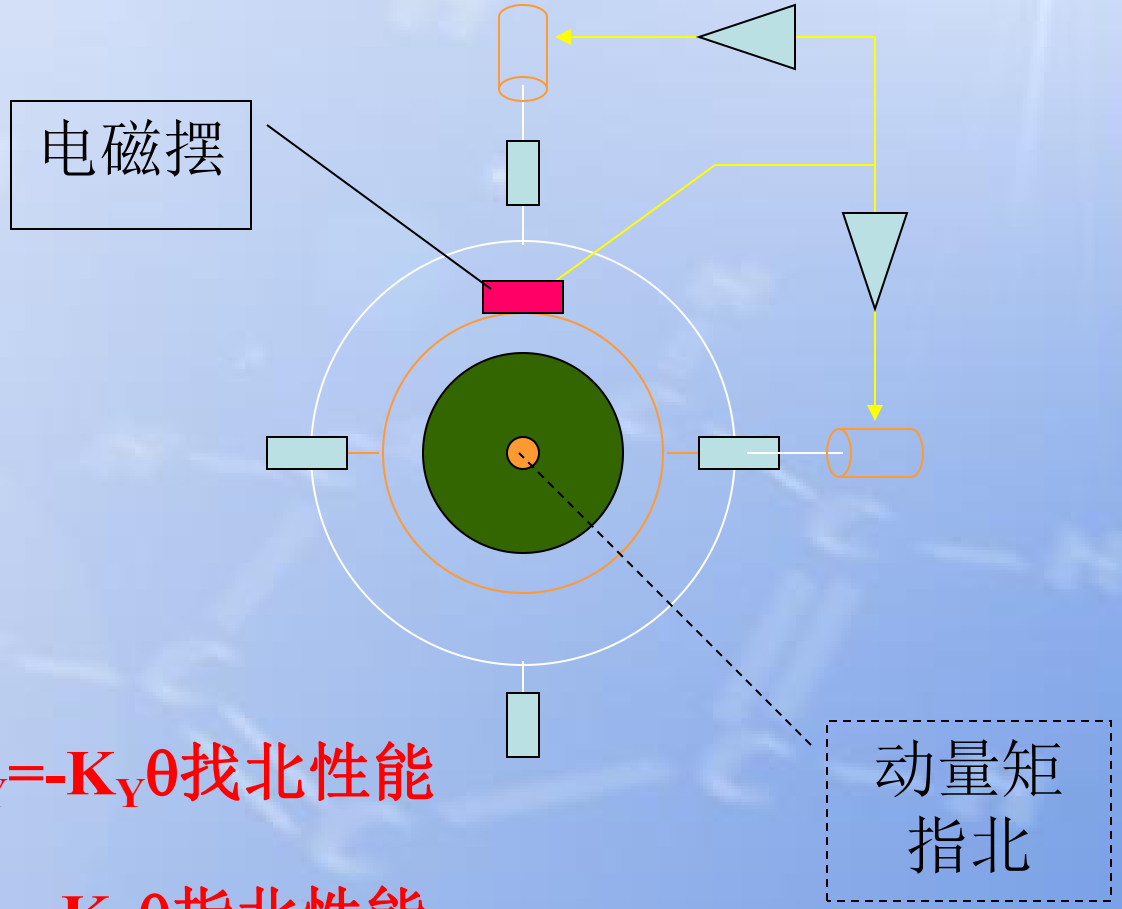
当陀螺球工作，t = t1时，若设陀螺球主轴水平指东，θ = 0，电磁摆不输出摆信号，陀螺球水平轴的力矩器不工作，不向陀螺球施加控制力矩。

- 陀螺罗经在控制力矩作用下能够自动找北，在此基础上，在阻尼力矩作用下，经过一定的时间就能够稳定指北。陀螺罗经的适用纬度一般为80°以下，否则罗经指向精度降低或不能正常指向

（六）电磁控制式陀螺罗经

3.原理

当主轴高度角存在时,电磁摆输出摆信号,经放大器放大后,驱动力矩器产生水平轴和垂直轴力矩,控制主轴找北并指北.



- 控制力矩——水平轴$M_Y=-K_Y\theta$找北性能
- 阻尼力矩——垂直轴$M_Z=K_Z\theta$指北性能

（六）电磁控制式陀螺罗经

3.原理：

- 采用电磁摆(electromagnetic pendulum)和垂直力矩器(vertical momental device)的间接阻尼法产生阻尼力矩。
- 阻尼力矩的产生方式：阻尼设备由电磁摆和位于陀螺球垂直轴上的垂直力矩器组成。当罗经主轴自动找北时，主轴有高度角θ，电磁摆输出摆信号，一部分摆信号经垂直放大器放大后，送到垂直力矩器，垂直力矩器工作，向陀螺球垂直轴施加电磁阻尼力矩M_{ZD}，垂直轴阻尼方式。
- 电磁摆和垂直力矩器产生的阻尼力矩，使罗经主轴向水平面进动，阻尼力矩使主轴进动的速度用u_3表示，在使主轴高度角θ减小的同时也按比例减了主轴的方位角a，最终使主轴偏离子午面一个很小的方位角a稳定指北

（六）电磁控制式陀螺罗经

4. 稳定位置：

电磁摆和垂直力矩器产生的阻尼力矩，使罗经主轴向水平面进动，阻尼力矩使主轴进动的速度用u_3表示，在使主轴高度角θ减小的同时也按比例减了主轴的方位角a，最终使主轴偏离子午面一个很小的方位角a稳定指北

$$\alpha_r = -\frac{K_Z}{K_Y} tg\varphi$$

$$\theta_r = -\frac{H\omega_2}{K_Y}$$

罗经小结：

罗经种类	陀螺仪	控制设备	阻尼设备
下重式 安休斯系列	动量矩指北	重心下移	液体阻尼器
液体连通式 斯伯利系列	动量矩指南	液体连通器	西侧重物
电磁控制式 阿玛勃朗	动量矩指北	电磁摆力矩器	电磁摆力矩器

总结：

罗经的指北原理 陀螺罗经＝陀螺仪＋地球自转＋控制力矩＋阻尼力矩

（七）陀螺罗经误差及其消除

1、纬 度 误 差(latitude error)

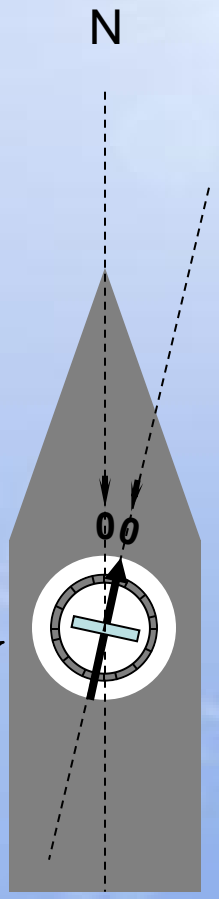
（1）纬度误差的定义：

采用垂直轴阻尼的罗经，其主轴指北端的稳定位置不在子午面内，而是偏离子午面一个角度

$\alpha_{r\varphi}$，该角度在罗经参数确定后，将随罗经所在纬度的正切变化而变化，故称为纬度误差。

$$\alpha_{r\varphi} = MD/M \tan\varphi$$

纬 度 误 差(latitude error)



（2）纬度误差的消除

（a）外补偿法：转动罗经基线或刻度盘。

（b）内补偿法：对罗经施加补偿力矩，使主轴返午面。

垂直补偿力矩，水平补偿力矩

两种方法下，主轴稳定位置的区别？

陀螺罗经误差及其消除

2、速　度　误　差(speed error)

（1）速度误差的定义

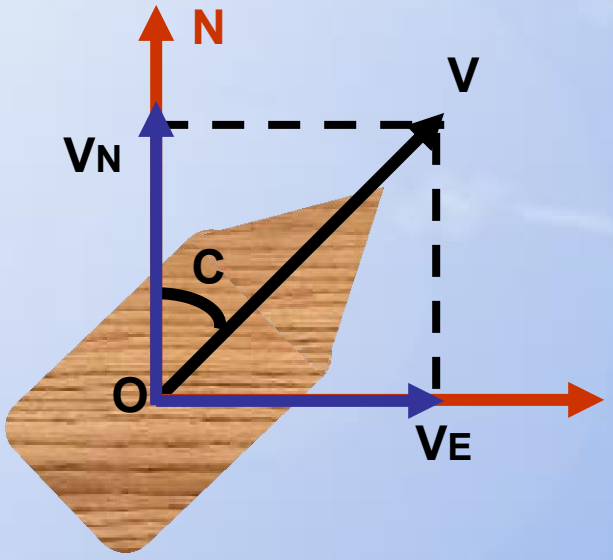
- 船舶作恒速恒向航行时，陀螺罗经主轴稳定位置与船静止时稳定位置的方位差角。

速度误差与船舶航速、航向和地理纬度有关。

陀螺罗经误差及其消除

速　度　误　差(speed error)

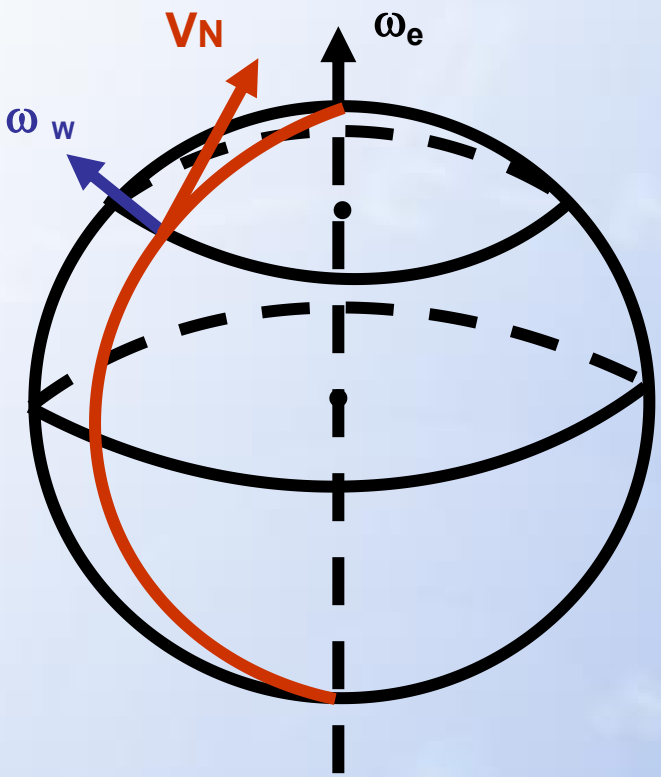
（2）　船舶作恒速恒向运动时的旋转角速度及其在地理坐标系各坐标轴上的分量；



·设船偏北航行，航速V，航向C。

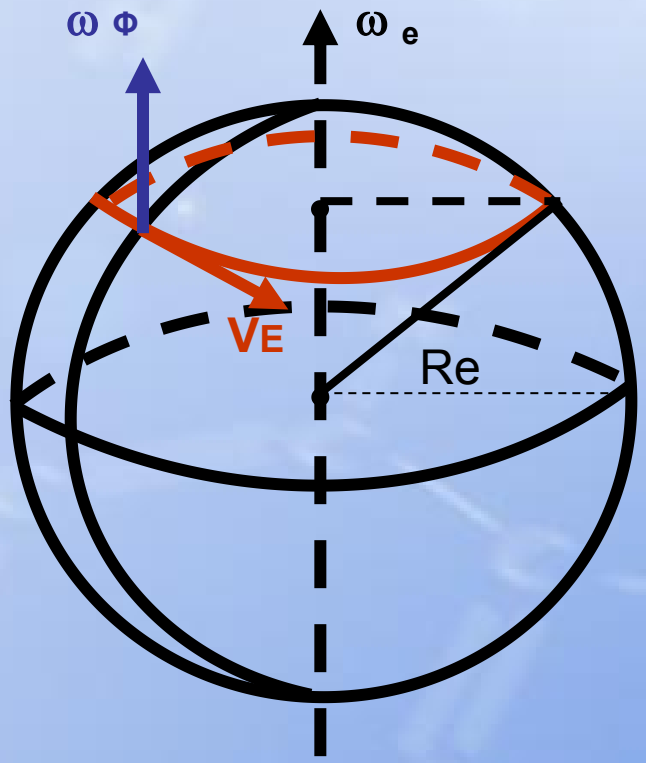
$$VN=VCosC$$
$$VE=V\ SinC$$

•V_N引起的角速度：



$\omega_w = V_N/Re = V\cos C/Re$

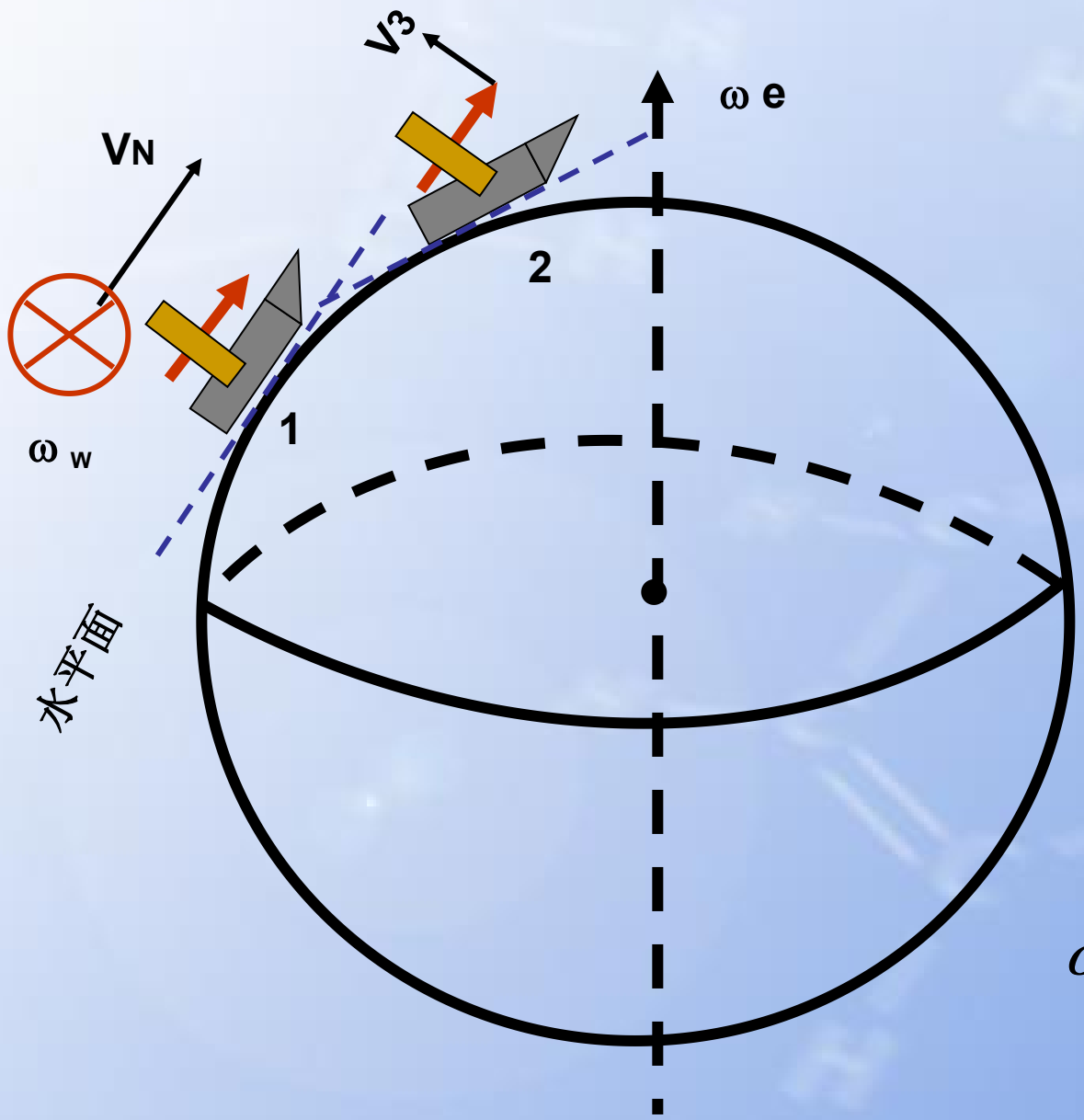
•V_E引起的角速度：



$\omega_\Phi = V_E/(Re\cos\varphi)$

（ω_Φ相对于ω_e很小，可忽略不计。）

ω $_w$对主轴的影响



- ω $_w$使水平面北端不断下沉，而主轴指北端由于定轴性，故产生了相对水平面不断上升的视运动线速度。
- V3=H ω $_w$ =H VcosC/Re
  - V3打破了原有的平衡，迫使主轴必须偏向子午面的西侧，利用西降的视运动（V1）与V3抵消。
  - 因此而产生了一个方位偏差—速度误（α_{rv}）。

$$\alpha_{rv} = \frac{V\cos C}{R_e \omega_e \cos\varphi}$$

陀螺罗经误差及其消除

速 度 误 差(speed error)

（3）速度误差的数学表达式及速度误差的特性

$$\alpha_{rv} = \frac{V\cos C}{R_e \omega_e \cos\varphi}$$

（a）仅取决于航速（V）、航向（C）、和地理纬度（φ），与罗经结构参数无关。任何罗经均会产生速度误差。

（b）随船速（V）、纬度（φ）的增大而增大。
若φ超过70⁰时，$R_e \omega_e \cos\varphi$变得很小，与VsinC接近，应采用完整式计算速度误差。

（c）航向偏北，$\alpha_{rv}>0$,西误差；
航向偏南，$\alpha_{rv}<0$,东误差。
东西航向无误差，南北航向误差最大。

陀螺罗经误差及其消除

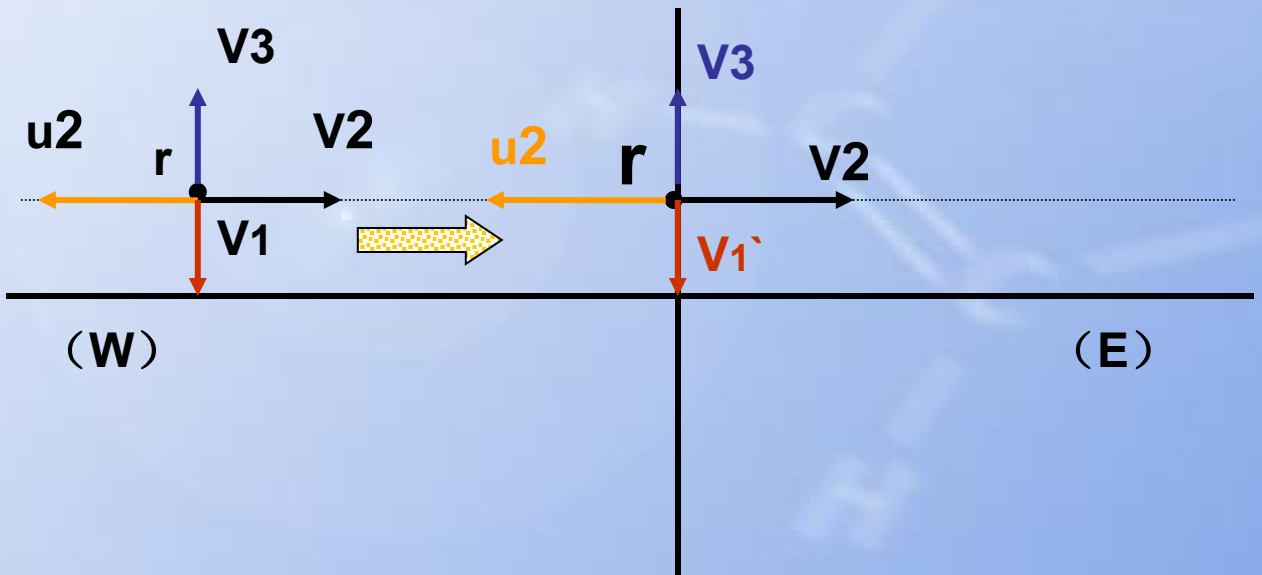
速　度　误　差(speed error)

（4）速度误差的消除

（a）查表法：速度误差校正表

（b）外补偿法：移动刻度盘。

（c）内补偿法：施加补偿力矩。



•可施加垂直轴补偿力矩，产生V1`以抵消V3。

3、冲 击 误 差(Ballistic error)

（1）冲击误差的定义：

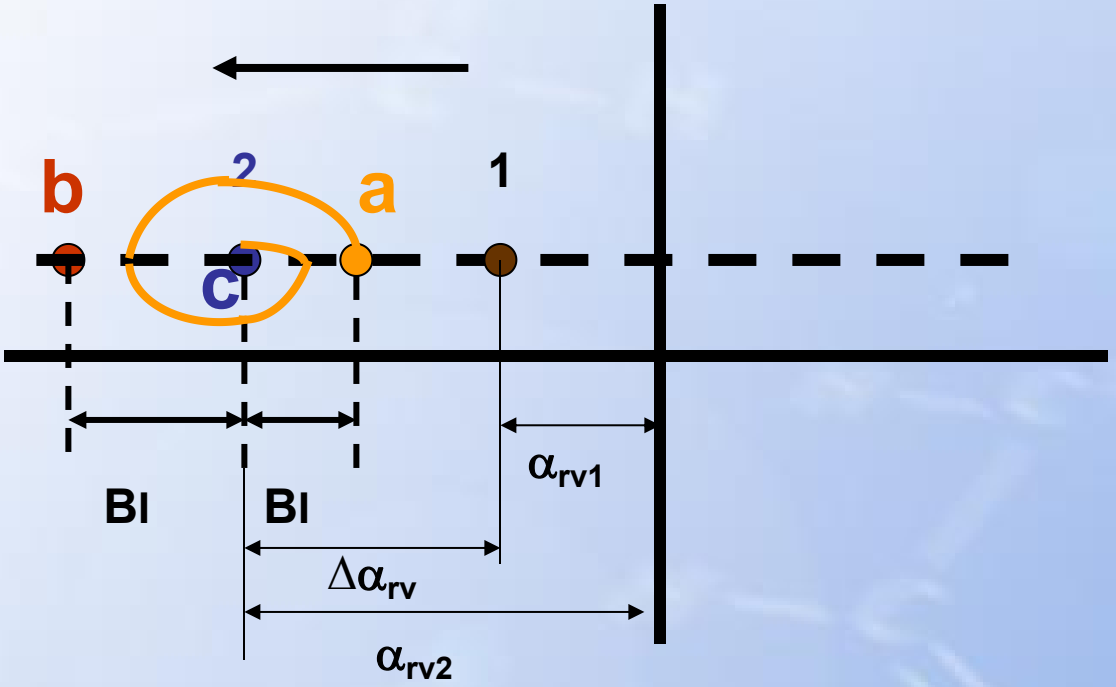
船舶在机动航行过程中，由于惯性对陀螺罗经的影响而引起的误差。

（2）冲击误差的分类：

第一类冲击误差（BI ）： 惯性力作用于控制设备上。

第二类冲击误差（BII ）： 惯性力作用于阻尼设备上。

（a）第一类冲击误差：　（以下重式罗经为例）



➢BI在加速终了后经过约3/4个TD（约1小时）自动消失。

•设船北纬、加速、北航（V2>V1）

•主轴由稳定位置1向2进动：

a:冲击不到，有BI

b:冲击过头，有BI

c:冲击正好，无BI

➢不产生第一类冲击误差的舒拉条：

当罗经的等幅摆动周期等于一摆长为地球半径的数学摆的摆动周期时，不产生第一类冲击误差。

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{H}{M\omega_e \cos\varphi}} = 2\pi\sqrt{\frac{R_e}{g}} = 84.4\,\mathrm{min}$$

对应的纬度（φ ）称为设计纬度（ φ 0）

（b）第二类冲击误差：（BII）

➢第二类冲击误差是由于惯性力作用于阻尼设备上而产生的。

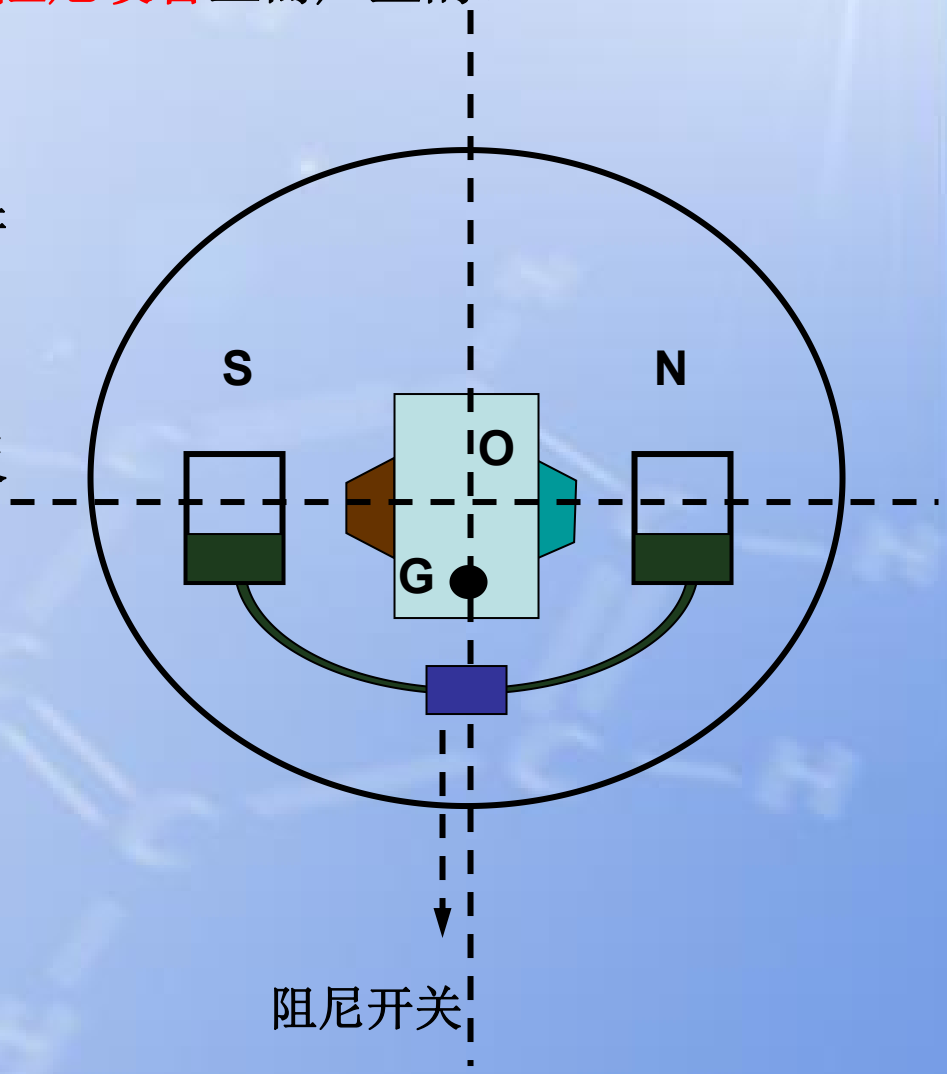
➢冲击误差的消除：

❖高于和等于设计纬度时， BI与BII符号相同，$B=B_I+B_{II}$,

❖可关闭阻尼器，减小总的冲击误差。

❖低于设计纬度时， BI与BII符号相反，$B=B_I-B_{II}$,

❖不做处理



4、其他误差

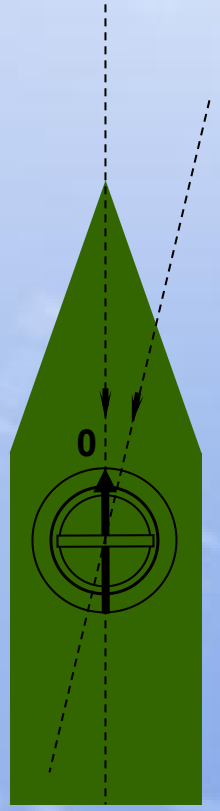
（1）摇摆误差

（a）定义：船舶摇摆时所产生的惯性力作用于罗经的控制设备上而引起的罗经的示度误差。

（b）摇摆误差的消除：

- 下重式（安许茨）罗经：采用双转子。
- 液体连通器（斯伯利）罗经：采用高黏度硅油。
- 电磁控制系列陀螺罗经：电磁摆 硅油

（2）基线误差：

因陀螺罗经的基线安装与船首尾线不平行所引起的读数误差。

·特性：为固定误差，与罗经本身无关。