Г. А. 斯洛棉斯基
Ю. Н. 布梁基洛夫 著

浮子式陀螺仪及其应用

国防工業出版社

浮子式陀螺仪及其应用

Г. А. 斯洛棉斯基
Ю. П. 布梁基洛夫 著
北京航空学院 譯

國防工業出版社

內 容 提 要

本書叙述陀螺特性及其用来确定某一对象(飞机、导彈等)相对于某一在空間为固定方位或者以所要求的方式在空間轉动的坐标系的方位的簡短概論；研究一般的微分与积分陀螺仪的功用及可能性。

本書詳細地研究了浮子式微分与积分陀螺仪的构造，理論和实驗方法，以及研究它們应用中的某些問題。引用了美国浮子式陀螺仪的眞实数据，給出了慣性导航系統物理基础的簡單概論。

本書可供陀螺仪表工作者、仪表專业学生，以及有关技术人員參考。

苏联 Г. А. Сломянский, Ю. Н. Прядилов 著 Поплавковые гироскопы и их применение (Государственное издательство оборонной промышленности 1958 年第一版)

*

国防工業出版社

北京市書刊出版业营业許可証出字第 074 号

北京五三五工厂印刷　　　　新华書店發行

*

850×1168 1/32　7 13/16 印張　197 千字

1959 年 4 月第一版

1959 年 4 月第一次印刷

印数：0,001—8,300 册　定价：(11) 1.46 元

№ 2763

目　录

譯者的話

浮子式陀螺仪及其应用一書中除了对陀螺仪的一般实用理論进行了叙述以外（第一章），还在很大篇幅上（第二章，第三章，第四章，第五章）对二自由度浮子式微分与积分陀螺仪的构造、理論及实驗方法作了較为广泛和全面的討論，同时，本書第六章还提供了浮子式陀螺仪在导航系統中应用的情况。全書归納与整理了浮子式陀螺仪的若干資料，对我們提供了不少这方面的参考数据与仪表的整个情况。編著者的这种努力是十分可貴的。

但正如編著者在緒論中所提到的一样，关于本書中所提到的浮子式陀螺仪构造参数及其实驗設备、实驗条件的資料均是从美国文献中整理出来的，因此很可能有夸大和故意吹嘘之处。建議讀者在閱讀此書时对書中所提到的有关資料不应盲目相信，应注意分析与辨别那些是眞实仪表工作的参数值得研究，那些是仅能作参考而有待于进一步进行考查的。我們認为，尤其是在目前国內倘缺乏这方面資料的情况下，及时提醒讀者注意到这一点是很必要的。

譯者識

緒　論

浮子式陀螺仪能够感受很小的以及足够大的絕对角速度，并且在强力振动与冲击时能可靠地工作。

浮子式陀螺仪开始只用于将飞行对象的加速度对时間两次积分以确定飞行对象（飞机、火箭、导彈等）相对于地球的位置的慣性导航系統。这种导航系統首先是由苏联Е. Б. 列溫坦在1932年制成。它在Б. В. 布尔加可夫、Г. О. 弗立得連得尔、Л. И. 得加契夫以及其他的学者与工程师的著作中获得了繼續的發展。在国外对这类系統的設計同样給予了極大的注意。

目前由于浮子式陀螺仪本身所具有的优点，已获得广泛的应用，这些应用已远远超出了慣性导航系統的范圍。

在这本書中叙述浮子式积分与微分陀螺仪构造，理論与实驗方法的基础；研究与随动傳动組合在一起的浮子式积分陀螺仪的工作（第二、三、四、五章）。在第六章中給出慣性导航系統物理基础的簡單概論。

为了說明引起制造浮子式陀螺仪的原因，以及建立它們与一般陀螺仪的联系（原理上沒有区别），在第一章中給出用来确定任何对象（飞机、导彈等）相对于在慣性空間定位的某一坐标系統的方位的陀螺仪应用的簡單概論；研究一般微分与积分陀螺仪的功用与可能性（第一章§3，4，5，6，7）。然而，在第一章中不仅研究大家早已知道的知識，而且給出許多新的結論，其中列出了考虑到俯仰角的支架誤差公式的結論，并且列出了为了迫使轉子軸以所要求的方式在慣性空間轉动而須要在一般情况下加于具有三自由度的陀螺上的力矩的表达式；对一般积分陀螺仪与随动傳动結合以后的工作情况进行了研究等等。为了使本書对于某些尙不熟識陀螺仪一般与实用理論的讀者仍然是容易接受的，在第

Ⅰ章的头一二节中給出了关于二自由度与三自由度陀螺仪的簡單知識。

关于浮子式陀螺仪的构造参数及其实驗的設备的資料是从美国文献中抄来的，这些零星的材料照例已經系統化了，概括了，并作过分析。在本書中所講的浮子式积分与微分陀螺仪的理論照顧到了这些仪表的构造特点。在分析此理論时，特别注意了确定眞实仪表工作的參数的考查与研究，同样地也注意了使这些参数能具有便于試驗研究的形式。所有的理論性結論照例都配合以仪表及其元件工作的物理性質的叙述。在研究浮子式陀螺仪理論問題时，曾利用 C. S. Draper, W. Wrigley 与 L. R. Grohe 在題为《浮子式积分陀螺仪及其用来解决在运动对象上的几何稳定問題的应用》的报告書作为出發点，这批报告是美国航空科学研究院第23次年会上的报告，并已單独出版。

在本書中对于浮子式陀螺仪的实驗方法的研究及其理論根据給予了極大的注意。

在本書中利用了一部分Г. А. 斯洛棉斯基在莫斯科航空工艺学院所写的航空仪表与自动器講义的材料。

第一、二、三、四与五章由Г. А. 斯洛棉斯基执笔，第六章由Ю. Н. 布梁基洛夫执笔，并由Г. А. 斯洛棉斯基校对以及作了某些补充（这一章是Philip I. Klass 在杂志“航空周刊”上刊出的論文的縮写与改編）。Ю. Н. 布梁基洛夫同样地完成了美国文献資料的补充翻譯，浮子式陀螺仪眞正数据是由这些資料抄来的。除此之外，Ю. Н. 布梁基洛夫完成了原稿与大部分插圖的技术修飾工作。插圖的其他部分是由В. Н. 巴别修飾的。

著者对技术科学博士，教授Г. О. 弗列得連得尔在評閱原稿时所給予的宝貴的指示表示眞誠的感激。

著者对 В. Г. 杰尼索夫与Г. Т. 阿斯塔文在选擇文献时所給予的帮助表示謝意。

第一章　关于陀螺特性与某些应用的簡要知識

应用在各种陀螺仪表与装置中的迅速旋轉的陀螺可以分为两种主要的类型：二自由度陀螺与三自由度陀螺。每一类型的陀螺都有它自身的特点与特性。三自由度陀螺获得了广泛的应用。然而近来二自由度陀螺的应用也愈来愈广泛了。下面我們将簡要地研究这两种类型陀螺的主要特性。

§1　二自由度陀螺的簡要介紹

二自由度陀螺由轉子1与框架2（圖1.1）所組成。轉子装設在安置于框架上的軸承上，并繞其对称軸 z 以常値角速度 Ω 相对于环迅速旋轉，这个角速度称为陀螺的自轉速度。这里以及以后，我們以这样的方式将角速度的向量沿着相应的軸而置放：由向量末端看去，旋轉是沿反时針方向而进行的。对于力矩以及动量矩而言，同样将依据于这个規則。

陀螺环的樞軸装設在与底座4相固联的軸承3上。这样的陀螺有两个自由度：其一为轉子以角速度 Ω 相对于环旋轉，第二个为带有轉子的框架繞組 x 相对于底座4（参閱圖1.1）旋轉。在实际的装置中，二自由度陀螺的壳体（卽仪表的壳体）多半是作为座子。

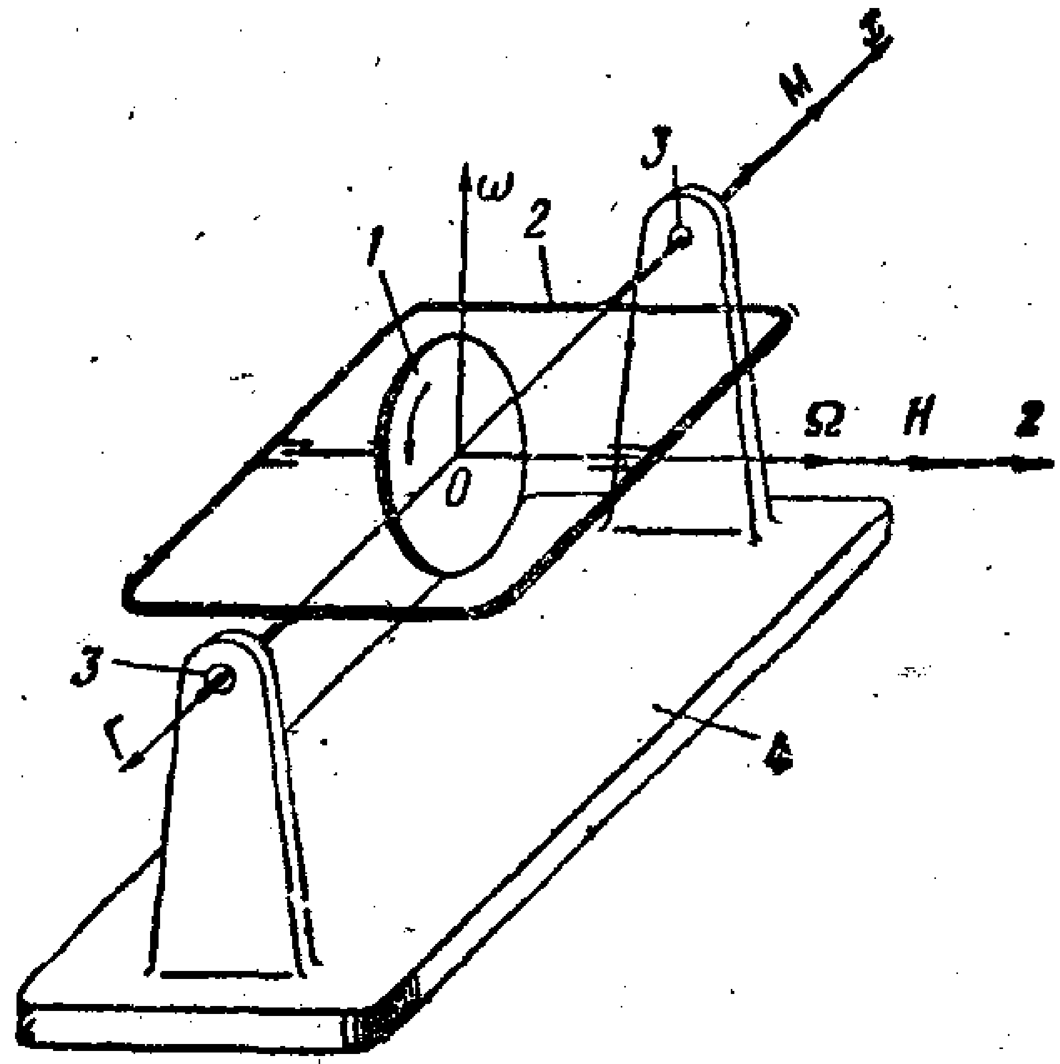

圖1.1　二自由度陀螺。
1—陀螺轉子；2—陀螺框架；
3—环的軸承；4—底座。

轉子的对称軸 z 称为陀螺的几何圖形軸。軸 z 的正向应該与陀螺自轉角速度 Ω 的向量的方向相一致。

带有轉子的环繞其旋轉軸 x 得到准确的平衡。正如已經指出的，陀螺的自轉速度总是很大，約为每分鐘 12000 和 24000 轉，甚至于更高。具有很大的自轉速度的陀螺称为迅速旋轉的陀螺。

陀螺圍繞几何圖形軸 z 的动量矩，通常称为陀螺的自轉力矩，并以 H 表示之，

$$H=C\Omega \text{克公分秒}, \tag{1.1}$$

式中　C——陀螺的軸向慣量矩（陀螺轉子繞几何圖形軸的慣量矩），克公分秒^2。

由陀螺理論得知，如果使二自由度陀螺的底座以其向量垂直于陀螺环的旋轉軸的角速度 ω 轉动，而且該角速度的向量与 H 的向量构成某一角度 θ，那么将有所謂之陀螺力矩 Γ 作用在环上，該力矩是哥賴奥利慣性力的力矩，并等于向量 H 与向量 ω 的向量积。所以，陀螺力矩

$$\Gamma=H\omega\sin\theta \text{克公分}, \tag{1.2}$$

它垂直于由自轉力矩 H 的向量与 ω 的向量所构成的平面，卽繞环的旋轉軸而作用，并向着这样的方向：H 向量力圖沿着最短的途徑与 ω 向量相重合（圖1.1）。如果陀螺力矩不受到任何的反作用，那么它将使带有轉子的环轉至向量 H 与向量 ω 相重合的位置。二自由度陀螺的底座繞着和几何圖形軸相重合的軸或繞着和几何圖形軸相平行的軸，或者繞着框架的旋轉軸旋轉，不可能引起陀螺力矩，因为在这些情况下并不产生哥賴奥利慣性力。

我們發現，在其他条件相同的情况下，陀螺力矩当角 $\theta=90°$ 时，卽当底座的旋轉角速度向量 ω 垂直于陀螺的自轉力矩的向量时具有最大的数値。这可以由公式（1.2）直接算出来。

如果使外加力矩繞环旋轉軸 x 而作用在二自由度陀螺上（圖1.1），那么在这个力矩的作用下，陀螺将使自己像一般具有不动旋轉軸（在我們的情况下卽軸 x）的剛体一样。換句話說，带有

陀螺框架繞軸 x 的旋轉在这种情况下将符合方程式(不考虑摩擦)

$$J\ddot{\beta}=M, \tag{1.3}$$

式中 J——带有陀螺的框架相对于軸 x 的惯量矩，其因次为克公分秒^2；

$\ddot{\beta}$——环繞軸 x 的轉角。

此种陀螺与剛体的差别仅仅在于：环的軸承将获得附加的負載，該負載与角速度 $\dot{\beta}$ 成比例，它是由几何圖形軸具有角速度 $\dot{\beta}$ 而产生的陀螺力矩所引起的。如果在开始瞬时 $t=0$ 时，将繞軸 x 的角速度 $\dot{\beta}_0$ 加于同样的带有陀螺的框架上，而且以后也假設它不变，那么陀螺将像一般的剛体一样繼續以这个角速度久远旋轉。实际上軸承中的摩擦以及空气的摩擦将使这个运动逐漸消失。所以，二自由度陀螺不可能稳定地保持它原有的位置。

二自由度陀螺感受角速度 ω 而产生陀螺力矩 Γ（它与 ω 成比例，并作用在陀螺框架上）的特性，在实用方面是很可貴的。因为可以用这样的陀螺作为感受角速度的元件。像微分陀螺仪与积分陀螺仪这样非常重要的陀螺仪表，就是在利用了二自由度陀螺的这个特性的基础上制成的，这些仪表以后我們将要进行研究。

§2 三自由度陀螺的簡要介紹

三自由度陀螺由轉子1，万向支架的內框架2以及万向支架的外框架3所組成（圖1.2）。轉子装設在装置的內框架的軸承上，并以常值角速度 Ω 繞着几何圖形軸 z 相对于內框架而迅速地旋轉。內框架可以相对于外框架繞軸 x 旋轉。外框架也装設在固定在底座4上的軸承上，并且可以相对于座子繞着軸 Y 而旋轉。

因此，陀螺轉子具有三个自由度：第一——轉子繞几何圖形軸 z 相对于內框架旋轉；第二——带有轉子的內框架繞軸 x 相对于外框架旋轉；第三——带有內框架与轉子的外框架繞着軸 Y 相对于底座旋轉。陀螺的几何圖形軸具有两个自由度。支架軸 x，Y 与几何圖形軸 z 的交点 O 为陀螺的固定不动点。陀螺的所有运

动都是它以某一个瞬时角速度相对于固定不动点 O 而旋轉。所以，从力学的观点上来看，三自由度陀螺是一个具有一固定不动点 O 的剛体。

三自由度陀螺构造的所有元件都应相对于万向支架框架的旋轉軸得到准确的靜力平衡，以使得轉子与支架框架的整个系統的重心和固定不动点 O 相重合。当滿足这个条件时，陀螺被称为平衡陀螺。二自由度和三自由度陀螺轉子，应繞几何圖形軸 z 作动力平衡。

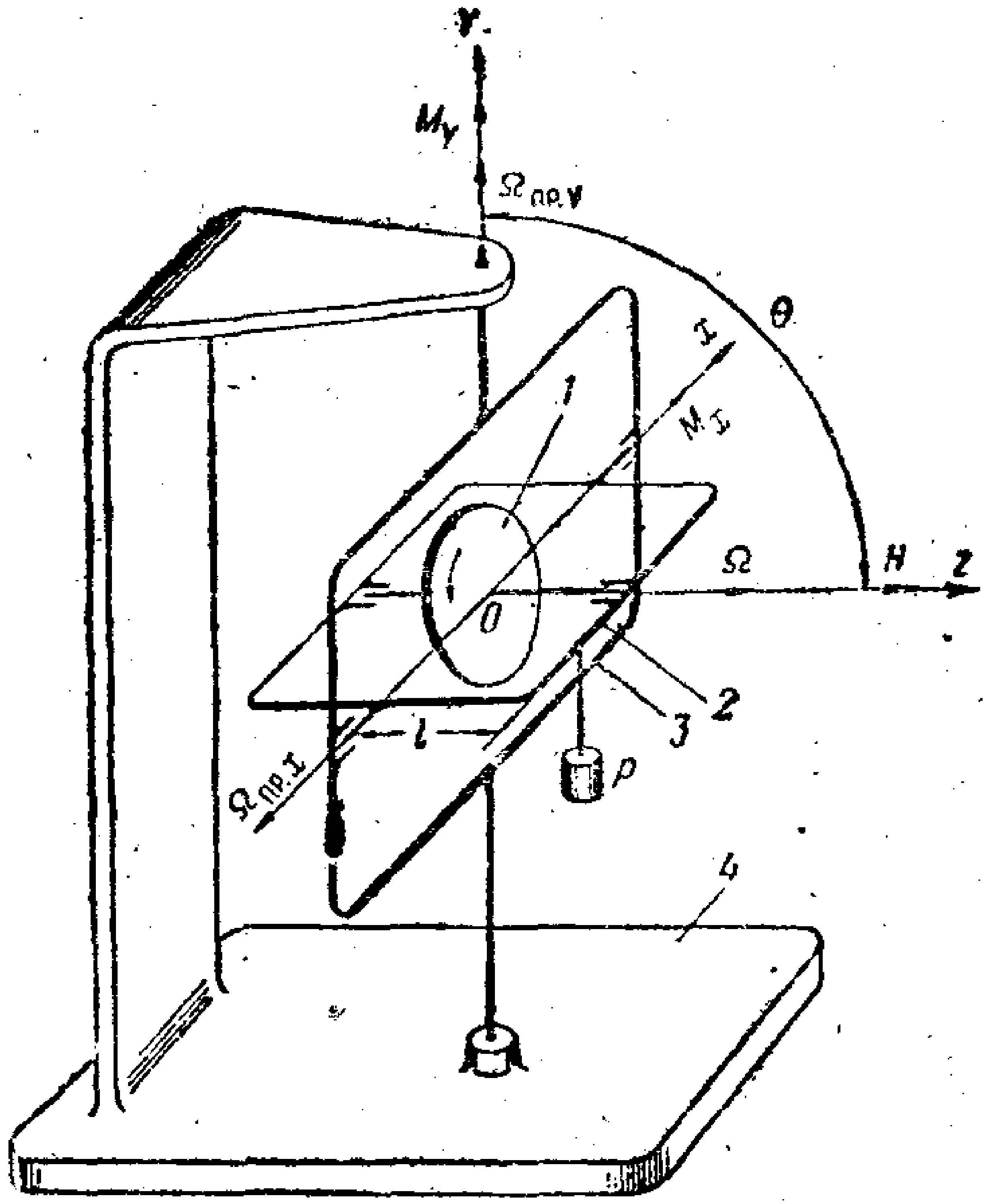

圖1.2 三自由度陀螺。

1—陀螺轉子；2—万向支架的內框架；3—万向支架的外框架；4—底座；O—陀螺固定不动点；x—万向支架內环的旋轉軸；Y—万向支架外环的旋轉軸；z—陀螺的几何圖形軸。

現在我們来研究迅速旋轉的三自由度陀螺的主要特性。

1. 如果在开始瞬时使陀螺几何圖形軸在慣性空間具有某一方向，比方說使它向着某一个恒星，并且以后使陀螺自由旋轉，而无任意外加力矩作用其上，那么它将稳定地⊖保持住它在慣性空間的給定的方向，同时它的自轉力矩 H 愈大，則愈稳定。然而，实际上不可能完全做到沒有外加力矩对陀螺作用。因而也就不能理想地保持陀螺具有給定的方向。

⊖ 这里以及以后，关于稳定性应理解为三自由度陀螺反抗外加力矩作用的特性，因此，在同样的冲击力矩作用之下，它偏离原来的位置愈小，那么稳定性也就愈大。

对这种情况做如下解釋。首先，实际上不可能制造成适当的、几乎沒有摩擦的支架軸承，因而就不可能完全避免这些軸承的摩擦力矩对陀螺的作用。其次，不可能制造出理想的平衡陀螺。由于陀螺的重心与其固定不动点O不相重合的結果，将有重力力矩作用在陀螺上，而且当底座以加速度运动时有牵連慣性力矩作用在陀螺上。

因此，任何实际的三自由度陀螺将逐漸偏离开它在慣性空間原来給定的方向。这种偏离通常称为陀螺的漂移（дрейф）。漂移的速度将与陀螺的参数以及它的制造質量有关。在实际的条件下，漂移的速度具有經常性和偶然性的两种分量。漂移速度的經常性分量可以由作用在陀螺上相当的力矩来补償。漂移速度的偶然性分量，却是无法补償的。

2. 繞着任一支架环的旋轉軸而作用在陀螺上的外加力矩M，将迫使几何圖形軸繞着另一支架旋轉軸旋轉（进动），其旋轉角速度为

$$\Omega_{\text{пр}} = \frac{M}{H \sin \theta}, \tag{1.4}$$

式中　θ——两万向支架环的夹角。

这个旋轉具有使向量H与向量M相重合的趋势。如果外加力矩M繞万向支架的外框架旋轉軸而作用，那么几何圖形軸（向量H）将逐漸地与这个环的旋轉軸相重合。如果同样的力矩M繞着內环的旋轉軸而作用，那么由圖1.2極易看出，是不会發生重合的。

当作用在陀螺上的外加力矩不与某一个万向支架环的旋轉方向相重合时，那么只有外加力矩在这两个軸上的投影，才能引起进动。公式(1.4)以及它的解釋，称为位于万向支架中的迅速旋轉的陀螺的进动定律。而以它所表示的，陀螺在外加力矩作用下的运动，称为陀螺的进动。現在我們举例来說明这个定律。

我們假設，繞万向支架內框架的旋轉軸x而作用在陀螺上的外加力矩为M_x，比方說，这个力矩是由支悬在內框架上具有力

臂为 l、重量为 P 的負載（見圖1.2）所引起的。此力矩等于

$$M_x = Pl\sin\theta,$$

式中 θ——两支架环的夹角。

根据进动定律（1.4），陀螺在外加力矩 M_x 的作用之下，将旋轉，或者說将以速度

$$\Omega_{\text{np}.Y} = \frac{M_x}{H\sin\theta} = \frac{Pl}{H}$$

繞外框架旋轉軸 Y 而进动。这个进动将一直繼續到負載 P 取下时，即力矩 M_x 不再作用时为止。

現在令作用在陀螺上的外加力矩 M_Y 是繞外环的旋轉軸（圖1.2），那么根据进动定律，陀螺将繞內框架旋轉軸以速度

$$\Omega_{\text{np}.x} = \frac{M_Y}{H\sin\theta}。$$

进动。

这个进动当力矩 M_Y 的作用时間很長时，最后将使几何圖形軸 z 与外环軸 Y 相重合起来。此时陀螺将失去一个自由度，因而将不再具有三自由度陀螺的特性，結果也就不再服从进动定律。所以，在实际的情况下，不允許两万向支架环相重合。

現在回头来研究公式(1.4)，我們發現，当二万向支架环的夹角 θ 与直角相差得愈大，在同样的沿着万向支架框架軸而作用的力矩引起的进动速度就愈大。当二万向支架环相互垂直时($\theta=90°$)，进动速度获得最小的数值。因此，当万向支架环相互垂直时，迅速旋轉的陀螺对作用在其上的干扰力矩而言具有最大的稳定性。当二环互相垂直时，陀螺进动速度的公式（1.4）具有下列形式：

$$\Omega_{\text{np}} = \frac{M}{H}。\tag{1.5}$$

三自由度陀螺在外加力矩作用下所發生的真实运动，比进动定律所描述的要复杂得多。現在我們就来研究它。

如前所述，我們沿軸 x 将外加力矩 M_x 加在陀螺上，比方說，这个力矩仍然是由負載 P 所产生（圖1.3）。我們設想，在負載 P

加上的瞬間，几何圖軸是不动的，且負載加上而不使几何圖形軸具有任何速度。根据进动定律，陀螺在力矩 M_x 的作用下将繞着軸 Y 以速度

$$\Omega_{\text{пр.}Y}=\frac{M_x}{H}。$$

进动（旋轉）。

同时几何圖形軸的末端將画出圓周的弧 aa（圖1.3）。实际上陀螺却是这样地运动：几何圖形軸的末端将画出如圖1.3粗綫所示的曲綫。几何圖形軸繞着軸 Y 将在同一个方向以大小作周期性变化的速度運動着，其平均速度在周期 T_n 內等于速度

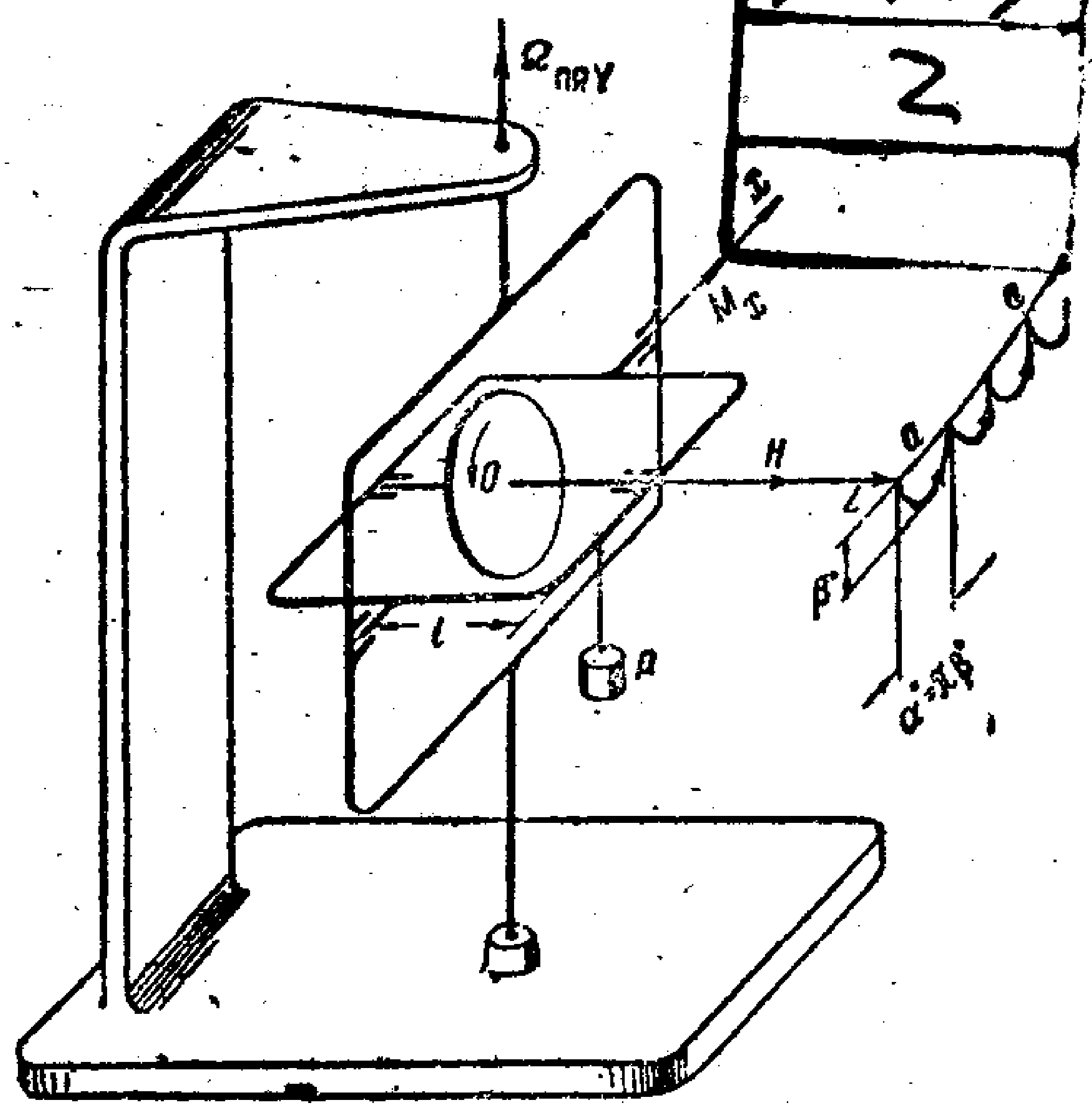

圖1.3　三自由度陀螺的进动与章动。

$$\Omega_{\text{пр.}Y}=\frac{M_x}{H}。$$

同时它将繞着外加力矩的作用軸（軸 x）以振幅 $\beta^*=\frac{M_xA}{H^2}$ 与周期 $T_n=2\pi\frac{A}{H}$ 而振蕩，其中 A——陀螺的赤道慣量矩，單位为克公分秒²；即陀螺轉子通过 O 点并垂直于几何圖形軸 z 的任何一个軸的慣量矩（万向支架环的慣量矩沒有考虑，虽然它是要影响 β^* 与 T_n 的）。

这个几何圖形軸繞外加力矩作用軸的振蕩称为章动*。由 β^* 与 T_n 的公式中可以看出，H 愈大，章动愈小。因而，陀螺的自轉速度愈大，β^* 与 T_n 愈小。几何圖形軸所描述的实际軌迹可能为圈子形状或波浪形状，这将視起始条件而定。

* Нутация（拉丁文）——点头。——譯者注

迅速旋轉的陀螺的章动振幅β^*与周期T_n是如此的小，以至于章动在实际中察覺不到。所以在研究迅速旋轉的陀螺在外加力矩作用下的运动时，通常忽略章动，即是只研究由进动定律所确定的几何圖形軸的主要的进动运动。

我們以具有不大的H的陀螺做为例子，指出这一点的正确性。我們假設，陀螺的$C=1$克公分秒²，$A=0.6C$，$\Omega=12000$轉/分$=400\pi$弧度/秒。所以，利用β^*与T_n的公式，以及公式（1.1），則得到

$$\beta^*=\frac{2\times0.6\times1}{(1\times400\pi)^2}\times M_x=76\times10^{-8}M_x,$$

或者，当M_x表示为克公分时，将β^*表示为秒，則得到

$$\beta^{*''}=0.157M_x。$$

甚至于当$M_x=100$克公分时（对于这样的陀螺是很多的）

$$\beta^*=15.7'';$$

$$T_n=2\pi\frac{0.6\times1}{1\times400\pi}=0.003\text{秒}。$$

这样的振蕩实际上不显著，因而可以将其忽略不計。在陀螺仪表中，章动是很不好的。所以設計仪表时，应使章动的振幅非常小，从而使章动实际上察覺不出来。

3. 迅速旋轉的三自由度陀螺实际上是沒有慣性的。这意味着，只要作用在陀螺上的外加力矩一旦停止，进动也馬上停止。随着进动停止而开始的几何圖形軸的慣性运动，有很小的振幅与很大的周率，以至于实际上察覺不出来。此种慣性运动由于軸承和空气的不可避免的摩擦力将很快地停止。

为了說明三自由度陀螺的慣性运动的特性，我們研究圖1.4。我們假設，陀螺具有自轉速度Ω，并使之在慣性空間固定不动。然后，沿环冲击使之具有繞軸y的附加角速度Ω_y，軸y垂直于軸x和z，并与它們构成直角三面体（在开始瞬間，軸y与軸Y重合），然后使其自由旋轉，而不在其上加用任何外加力矩。

現在既然陀螺的瞬时絕对角速度$\overline{\omega}_a=\overline{\Omega}+\overline{\Omega}_y$的方向不与几何圖形軸$z$的方向相重合，而与它成角$\psi$（参閱圖1.4）$\mathrm{tg}\psi=\Omega_y/\Omega$，所以几何圖形軸不再是在慣性空間为固定不动，而是相对于