

陀螺仪表零件与元件

[苏联] H. Ф. 巴巴耶娃 等著



国防工业出版社

陀螺仪表零件与元件

[苏联] H. Ф. 巴巴耶娃 等著

王光大等译

李泽民校



国防工业出版社

1965

內 容 簡 介

本书討論了陀螺仪表典型零件和元件：陀螺馬达、支架軸承、主軸承、供能装置、修正装置、鎖紧装置、陀螺仪表随动系統与指示量取装置設計与計算的某些問題。

本书可供仪表制造的工程技術人員閱讀，并可作为有关院校的参考教材。

ДЕТАЛИ И ЭЛЕМЕНТЫ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ
ПРИБОРОВ

〔苏联〕Н. Ф. Бабаева

СУДПРОМГИЗ 1962

*

陀螺仪表零件与元件

王光大等譯

李澤民校

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/32$ 印張 15 $3/16$ 389千字

1965年11月第一版 1965年11月第一次印刷 印数：0,001—1,750册

統一书号：15034·1023 定价：(科七) 2.50 元

譯 者 的 話

在目前的尖端科学技术中，陀螺仪占有重要的地位。在宇宙飞船和導彈的制导系統中；在飞机和各种舰船的导航及控制系統中；在地面某些軍用車輛和矿井內的定向裝置中，以及在火炮的射击指揮系統中都已广泛地采用了陀螺仪。許多国家都在极力探討和研制各种作用原理的新型陀螺，但并不放弃对已有普通陀螺及其各种元件的改进工作。

我国的陀螺研制工作，在党和政府的領導与关怀下，已取得飞快的发展。越来越多的人对陀螺仪发生了兴趣。同时也大量地編譯了外国出版的有关书籍。但有关元件的計算与設計方面的資料还比較少。本书在一定程度上能弥补这方面的不足，所以我們决定譯出，供讀者参考。

本书对有关的一些典型零件及元件的計算和設計方面的資料进行了整理。它对有关方面的工程技術人員及高等院校师生有一定的参考价值。但我們也建議讀者在利用此书的計算和設計方法时，一定要結合实践，只有实践才是認識事物真理性的标准。大家知道，每种計算公式都有其局限性，何况本书作者在序言中也說明了“不可能对討論到的所有問題都讲得很完整、很詳細”。

由于水平所限，很可能有許多錯誤之处，望讀者多多提出宝贵意見。

参加本书譯校人員为：王光大、楊明尧、雷傳琪、刘德鈞、毛菊芬、洪侑、謝和持、馬明等同志。

全部譯文由李澤民校訂和統一譯名。

譯 者

1965 年 2 月

目 录

作者序	8
-----------	---

第 I 章 陀螺马达	9
------------------	---

§ I. 1 引起陀螺仪漂移的主要因素	9
§ I. 2 陀螺马达的主要型式	12
§ I. 3 不承受加速度作用的陀螺仪轉子結構参数間的 最佳关系	15
§ I. 4 側壁和軸对陀螺马达轉子轉动慣量的影响	22
§ I. 5 承受加速度作用的陀螺仪轉子結構参数的确定	25
§ I. 6 陀螺马达轉子轉动慣量的确定	35
§ I. 7 陀螺马达轉子的强度計算	45
§ I. 8 气动陀螺马达轉子的計算	48
§ I. 9 陀螺马达的空气动力的某些問題	55
§ I. 10 陀螺马达轉子軸的計算	60
§ I. 11 陀螺马达零件的彈性变形	64
§ I. 12 电动陀螺马达	71

第 II 章 彈性摩擦支承、液体支承和气体支承	76
-------------------------------	----

§ II. 1 概述	76
§ II. 2 扭力悬挂支承和彈性悬挂支承的結構方案	79
§ II. 3 扭杆与撑杆的計算	83
§ II. 4 彈性悬挂支承的計算	95
§ II. 5 液体支承和气体支承的結構	103
§ II. 6 液体与气体悬挂支承的計算	112
§ II. 7 浮动陀螺仪和浮子式陀螺仪	130
§ II. 8 陀螺仪主軸承的空气动力支承	145
§ II. 9 空气动力支承的計算	148

第Ⅲ章 滚动摩擦支承	155
§Ⅲ.1 陀螺仪表中应用的滚动摩擦支承	155
§Ⅲ.2 陀螺仪的悬挂支承	172
§Ⅲ.3 陀螺仪主軸軸承	191
§Ⅲ.4 作用在球軸承鋼球上的力的确定	198
§Ⅲ.5 球軸承的寿命	209
§Ⅲ.6 球軸承的摩擦扭矩	212
§Ⅲ.7 球軸承的實驗研究成果	224
§Ⅲ.8 刀口支承	236
§Ⅲ.9 减小悬挂支承摩擦的方法	239
第Ⅳ章 陀螺仪表的輸电装置和供气装置	250
§Ⅳ.1 概述	250
§Ⅳ.2 輸电装置	251
§Ⅳ.3 定子(电樞)及仪表的供电	261
§Ⅳ.4 供气装置	263
第Ⅴ章 修正装置	265
§Ⅴ.1 陀螺系統修正作用的基本原理	265
§Ⅴ.2 测量机构的方程及其分析	272
§Ⅴ.3 敏感陀螺仪偏离磁子午面的测量机构	281
§Ⅴ.4 敏感陀螺仪偏离水平面的测量机构	285
§Ⅴ.5 气动式工作机构	295
§Ⅴ.6 电磁式工作机构	298
§Ⅴ.7 磁电式和动鉄式工作机构	305
§Ⅴ.8 修正电机	310
第Ⅵ章 陀螺仪轉动自由的限动装置	313
§Ⅵ.1 概述	313
§Ⅵ.2 彈簧限动器的計算	315
§Ⅵ.3 阻尼器及其計算	321
第Ⅶ章 鎖紧装置	330
§Ⅶ.1 手动控制鎖紧装置	330

§ VI.2 远距控制鎖紧装置	336
§ VI.3 保証鎖紧装置工作的力和力矩的确定	338
第VII章 陀螺仪指示量取装置	343
§ VII.1 对指示量取装置的要求	343
§ VII.2 电位計式傳感器的結構及制造电位計式傳感器 所采用的材料	345
§ VII.3 电位計式傳感器綫路中的基本关系式	349
§ VII.4 减小电位計式傳感器特性曲綫非綫性度的方法	356
§ VII.5 按給定的特性曲綫的斜率計算电位計式傳感器	359
§ VII.6 热电阻式傳感器	362
§ VII.7 电感傳感器的差动綫路与桥式綫路	367
§ VII.8 变压器式电感傳感器	374
§ VII.9 旋轉变压器	381
§ VII.10 框架感应式傳感器	387
§ VII.11 作为电感式傳感器的微动同步器的工作	389
§ VII.12 电容式傳感器	391
§ VII.13 气压式傳感器	396
§ VII.14 陀螺仪綫路中远距傳輸装置的用途。基本定义	401
§ VII.15 流比計式远距离傳輸装置	402
§ VII.16 自平衡式远距傳輸装置	406
§ VII.17 感应式远距傳輸装置	412
第IX章 陀螺仪表中的随动系統	425
§ IX.1 陀螺仪表中的自动系統	425
§ IX.2 用于陀螺仪表中的随动系統的特点	433
§ IX.3 随动系統的运动方程	436
§ IX.4 随动系統的工作分析	442
§ IX.5 随动系統的計算方法	451
§ IX.6 時間常数的求法	466
§ IX.7 随动系統的計算和分析举例	475
参考文献	481

作 者 序

装备在飞行器和船舶上的整套仪表设备中，陀螺仪表占有重要的地位。陀螺仪表是一种复杂的装置，有大量的各种各样元件。

在现有的陀螺仪表文献中，很少考虑仪表各元件的计算和设计。本书想系统地整理一下陀螺仪表中一些典型零件和元件计算与设计方面的资料。

本书内容包括陀螺马达、支架轴承与主轴承、供能装置与指示量取装置、修正装置与锁紧装置，以及陀螺仪表随动系统等零部件的计算与设计问题，但本书不可能对讨论到的所有问题都讲得很完整、很详细。

本书第 I 章由 Н. Ф. 巴巴耶娃和 К. Н. 雅夫连斯基编写；第 I、II 和 VI 三章由 И. М. 西瓦柯年科和 К. Н. 雅夫连斯基编写；第 IV 章和第 VII 章由 Н. Ф. 巴巴耶娃编写；第 V 章和第 VIII 章由 Ю. М. 霍万斯基编写；第 IX 章由 В. М. 耶罗费也夫编写。

作者对技术科学博士 В. А. 巴甫洛夫、技术科学副博士 В. В. 赫努肖夫在编写本书时提出的许多宝贵意见表示深切谢意，对技术科学博士 П. И. 萨伊托夫、技术科学副博士 Э. И. 斯力夫、工程师 Ю. А. 谢尔巴可夫校阅本书时提出的许多有益意见，以及技术科学副博士 П. П. 柯甫加也夫、工程师 В. П. 奥尔洛夫在编辑本书时付出的劳动表示深切谢意。作者衷心地欢迎读者提出的一切意见。

第 I 章 陀螺馬達

§ I.1 引起陀螺儀漂移的主要因素

任何一个高速旋轉体，把它悬挂起来，使其自轉軸的位置能相对于周圍物体而变化，都可以广义地叫做陀螺儀。

所謂工程陀螺儀，一般都是指有支架的高速旋轉的轉子，支架的作用是保證轉子另有一个或两个自由度。

陀螺馬達就是一个轉子轉速极高的电动机。从結構上看，陀螺馬達可以有密封的（或未密封的）壳体，也可以沒有这种壳体（如球形垂直陀螺儀和某些轉弯指示器）。

在无定位陀螺儀中，陀螺馬達与壳体所組成的系統的重心，同支架軸的交点极准确地相重合；在摆式陀螺儀中，系統重心不在支架軸的交点上，而偏离交点一定的距离。

所謂陀螺儀的漂移，通常是指陀螺儀的自轉軸对給定方向的偏差，这是由于支架系統軸承中与导电裝置中的摩擦、靜平衡不精确而引起重心对支架点的位移，仪表在具有綫加速度与振动加速度的基座上引起的彈性变形而使重心偏移，以及角度傳感器与力矩傳感器中張力的影响所引起的各种有害力矩作用的結果。

必須指出，有球軸承支承的浮子式和非浮子式陀螺儀的精度，会随時間而变化，因为球軸承的磨損将会引起額外的不平衡；此外，由于陀螺儀各結構元件的綫脹系数与受热的不同，也会逐漸地使溫度失去平衡。

陀螺仪表主要是应用在运动的基座上，基座的速度在某些情況下可能会超过音速。無論是在等速直綫运动与大加速（綫加速度和振动加速度）运动的条件下，都必须保證仪表可靠地工作。

目前，慣性导航系統对陀螺儀的精度要求，靠球軸承支承的

一般陀螺仪是保证不了的。在现有的惯性系统中浮子式陀螺仪占有绝对的地位。而在高精度的陀螺系统中已成功地应用了空气支承的陀螺仪。

在基座作直线和等速运动条件下工作的非浮子式陀螺仪，如果基座没有过大的振动而且运动速度很小，漂移主要是由陀螺仪支架轴中的球轴承、导电装置、系统静不平衡与动不平衡产生的有害力矩引起的。这种陀螺仪的陀螺马达转子和其它结构元件参数的选择，通常是以该有害力矩所引起的漂移为最小来考虑的。

当基座作大加速运动和承受振动作用时，浮子式和非浮子式陀螺仪将受到本身结构元件非刚性和非等刚性的极大影响。

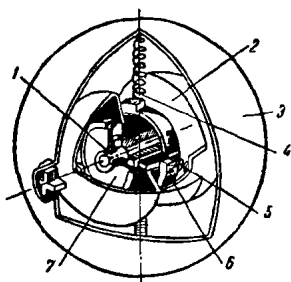


图 I.1 三自由度浮子陀螺仪

1—陀螺组合件；2—壳体；

3—球；4和5—金属丝线；

6—环；7—转子。

在浮子式陀螺仪（图 I.1）中，密封陀螺组合件 1 在液体中处于随遇平衡状态，液体充满了陀螺组合件的密封壳体 2 和球 3 之间的空间。陀螺组合件靠穿在导线内的金属丝线 4 和 5 相对于球来定心，这种支承几乎全部消除了摩擦力矩，而且金属丝线也起了定心元件的作用。因此，在指示式的浮子陀螺仪中，支架中的摩擦力矩不是引起陀螺仪漂移的决定因素。

这种陀螺仪的漂移是由其他一些原因引起的，如重心同浮心以及支架轴的交点不重合、支承液体工作温度变化时浮力的变化等。

在线加速度与振动加速度作用下，由于结构的非等刚性使重心偏离支架轴也是所有类型（浮子式和非浮子式）的陀螺仪漂移的一个原因。

由于加工精密陀螺仪有许多技术上的困难，目前已开始从原理上发展一些新型的精密陀螺仪：如粒子陀螺仪、静电陀螺仪和超导电陀螺仪〔23, 39〕。

在粒子陀螺仪中，利用了原子单元微粒的旋转效应代替一般

的轉子。原子中的电子有磁性，在磁場中要受到定向磁矩的作用。恒定的磁場可以保証单元微粒的磁矩矢量与机械力矩矢量在空間的初始方向不变，这种力矩使微粒具备了陀螺仪的性能：空間的稳定性与进动性。

当极化光束通过恒定磁場中的液体氦时，在运动体作直綫运动的情况下，光束将保持其光强。当运动体轉弯时光束将改变它对液体氦的定向单元微粒的位置，此时光强的变化正比于底座轉动的速度。根据已公布的資料，粒子陀螺仪的漂移为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 度/时[23]。

超导电陀螺仪（图 I .2）是具有有限角位移的陀螺仪，其旋轉的轉子采用了磁性軸承悬挂的方法。轉子由具有超导性的材料作成。仪表是在溫度接近于絕對零度的真空中工作的。轉子的旋轉根据感应电动机或磁滞电动机应用的原理，是靠附加磁場的作用。在磁場的作用下超导体中将产生电流引起反作用力使轉子自轉（轉速約为 21000 转/分）。轉子 1 在真空度为 10^{-6} 毫米水銀柱大气压的壳体内旋轉。

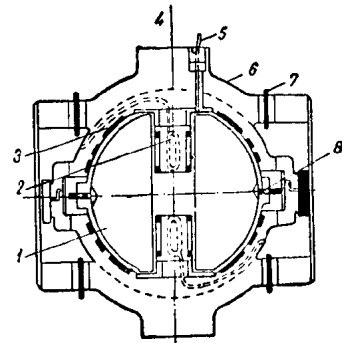


图 I .2 超导电陀螺仪

1—轉子；2—力矩傳感器繞組；3—磁性支承系統繞組；4—陀螺仪轉子的自轉軸；5—光束；6—壳体；7—密封接引处；8—电动机繞組。

由于角位移受到限制，需要应用随动系統。在已研究出的超导电陀螺仪中，其失調傳感器采用的是光学式的傳感器。

仪表要求有理想的絕热性，以保持其內部的溫度接近于絕對零度。

根据已有的資料，超导电陀螺仪的漂移可能为 0.0001 度/时，即比浮子陀螺仪小 100 倍[39]。

目前，在文献中沒有任何确切的資料討論这类新型陀螺仪的

特点和它们的实际优点。

§ 1.2 陀螺马达的主要型式

陀螺马达是任何陀螺仪的一个主要元件，所以，它的制造精度在很大程度上决定了整个陀螺仪表的工作精度。

对任何一种陀螺马达都有以下一些主要要求：在最小体积下有最大的转动惯量；最高的自转角速度；能源的状态变化时转子的转数不变；最小的气动阻力矩；周围介质温度变化和基座作各种运动时重心的位置不变；仪表启动到工作状态的时间短；使用可靠。

现代陀螺仪表的陀螺马达，按能源特性可以分为以下几种：电动的、气动的、反推力式的（火药式的等）、弹簧式的、电磁式的（超导电陀螺仪、粒子陀螺仪）。

目前大多数陀螺仪表都是直流或交流的电气仪表。电气陀螺仪中会产生磁场，但在某些特殊用途的系统中，是不容许有磁场存在的。所以，在不愿用电气陀螺仪表的情况下可以用气动式的仪表，气动仪表靠空气或某种气体实现转子的旋转。

在电动陀螺马达中常用到鼠笼式短路转子的高速三相异步电动机，因为其结构简单、制造的价值便宜。目前这类陀螺马达供电电流的频率是 300；400；500 和 1000 赫芝。

在航空陀螺仪表中广泛应用的异步陀螺马达有以下几种：ГМ-4、ГМ-4М、СГМ-4、ГМ-05、ГМ-02、ГС-01。

在航海电罗经中应用的异步陀螺马达有ГА-18/10、“Гиря”电罗经陀螺马达、“Курс”电罗经陀螺马达等。以上几种陀螺马达的某些特性列于表 I.1。

直到目前，还应用了并激直流陀螺马达。АИ-5 自动駕駛仪和航向陀螺仪纵横稳定器的陀螺组合件中就应用了一种并激直流陀螺马达。

图 I.3 和 I.4 所示的具有交流和直流陀螺马达的陀螺组合件的结构，只是现代陀螺马达的几种型式。

表 I.1 陀螺馬達轉子特性

陀螺馬達型式	轉子材料	能源状态		动量矩 克·厘米·秒	轉子 轉速 轉/分	極轉動慣量 克·厘米·秒 ²	外徑 毫米
		电 伏	压 頻 率 赫				
ГМ-4	黃銅ЛС-59-1	36	400	4000	21500	1.76	55
ГМ-4М	黃銅ЛС-59-1	36	400	4000	21900	1.76	55
СГМ-4	鋼 4X13	36	400	4000	21500	1.71	56
ГМ-05	鋼 4X13	36	400	500	21500	0.213	37
ГМ-02	鋼 20	36	400	200	21500	0.087	32
ГС-01	黃銅ЛС-52-1	36	400	100	24000	0.044	27
ГА-18/10	—	120	500	$6.54 \cdot 10^5$	10000	625	180
ГМ“Курс”型	合金鋼	120	330	$1.1 \cdot 10^5$	20000	52.6	130
ГМ“Гиря”型	合金鋼	120	500	$3.1 \cdot 10^4$	30000	10.0	96
Г-5/30	—	120	500	$2 \cdot 10^3$	30000	0.71	50
Г-7/15	—	120	500	$6.45 \cdot 10^3$	15000	4.67	70
Г-7/30	—	120	500	$12.9 \cdot 10^3$	30000	4.67	70
ГА-7.5/16.5	—	65	275	$7.5 \cdot 10^3$	16500	5.0	75

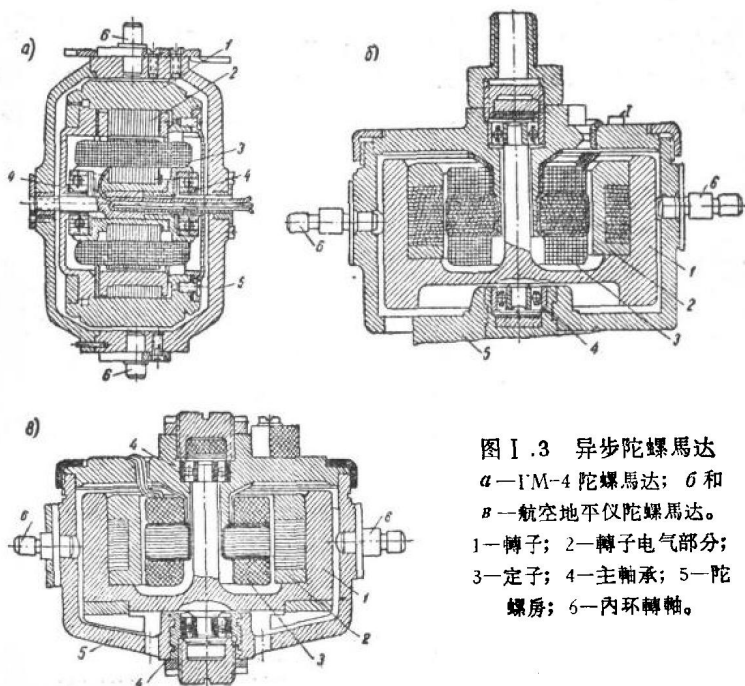


图 I.3 异步陀螺馬達

а—ГМ-4 陀螺馬達; б) 和

в—航空地平日陀螺馬達。

1—轉子; 2—轉子电气部分;

3—定子; 4—主軸承; 5—陀

螺房; 6—內环轉軸。

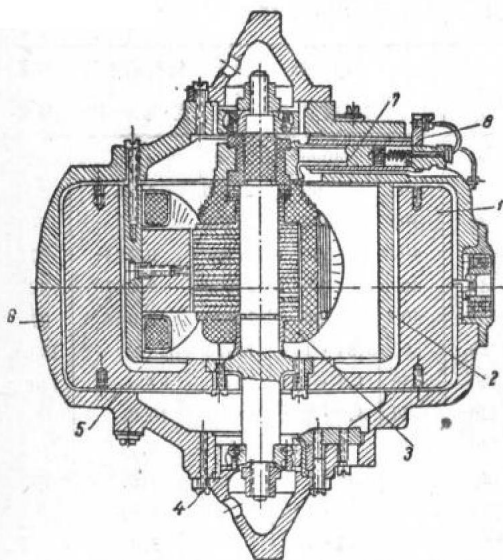


图 I.4 直流陀螺马达

1—轉子；2—杯；3—陀螺马达电枢；4—主軸承；
5—定子线圈；6—壳体；7—集流环电刷；8—电
刷支持架。

图 I.5 介绍了
气动陀螺航向指示器
的构造。

现代高精度陀螺
仪表的工作准备时
间，主要决定于陀螺
仪加温到最佳温度达
到平衡时所需要的
时间。

精度要求不太高
的转弯指示器式的陀
螺仪表，其工作准备
时间决定于轉子加速
到工作轉速的时间。

航海电罗经的工
作准备时间决定于陀

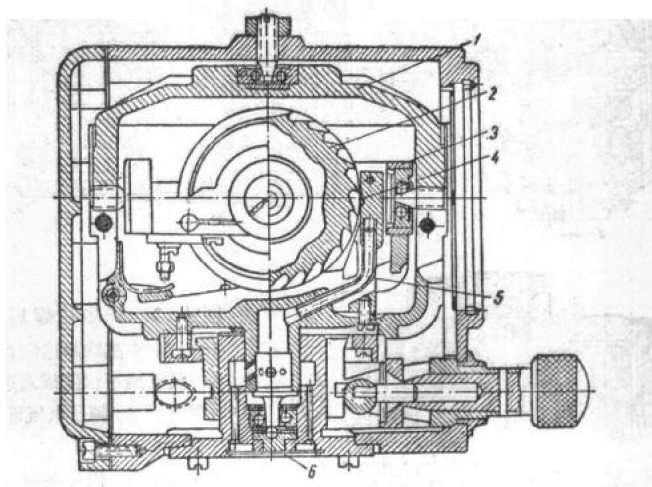


图 I.5 气动陀螺仪

1—外环；2—陀螺马达；3—内环；4—喷口；5—空气导管；6—空气过滤器。

螺仪回复到子午面的時間。如果将系統加速修正到子午面，这个時間将决定于仪表加溫到最佳溫度动平衡时所需要的時間。

工作准备時間需要保証在几秒或几分之一秒內的陀螺仪表，利用电动陀螺馬达、气动陀螺馬达等实际上是办不到的。在这种仪表中可以成功地利用火药式陀螺馬达或彈簧式陀螺馬达。

火药式陀螺馬达靠噴口排出气体的反推力来推动旋轉。装在有二个半部組成的陀螺馬达內的火药垫圈靠电导火管燃点。火药燃燒时形成的气体沿馬达本体內的槽道以极高的速度噴于大气中。所产生的反作用力矩可以拖动轉子旋轉。由于火药是在瞬間燃燒的，火药式陀螺馬达几乎能在极短的時間內就能达到所需的轉速。

§ I.3 不承受加速度作用的陀螺仪轉子 結構参数間的最佳关系

陀螺仪的动量矩 H 决定于陀螺馬达轉子对其对称主軸的极轉动慣量 J 与轉子自轉角速度 Ω 的乘积：

$$H = J\Omega. \quad (\text{I.1})$$

为了提高陀螺仪表的精度，希望尽量地加大陀螺仪的动量矩。

增加陀螺馬达轉子轉动慣量 J 可以增加动量矩，这就要加大轉子的尺寸和用比重最大的材料来制造轉子。因为物体对軸的轉动慣量决定于物体质量 m 与慣性半徑 ρ 的平方之积，可以适当地將轉子的质体分布在离其自轉軸較远的地方。正因为如此，才把陀螺馬达作成倒置式的，把定子放在轉子里面。

如果注意一下图 I.6，其中表示的是一个陀螺半罗盘的运动原理图，我們可以看到，增加质量（因而增加了轉子的重量）会增加支架内外环旋轉軸軸承上的压力，这将导致陀螺馬达支架軸上摩擦力矩的增加，因而加大了陀螺仪偏离預定方向的偏差，这是我們所不希望的。因此，用增加质量的办法提高轉子的轉动慣

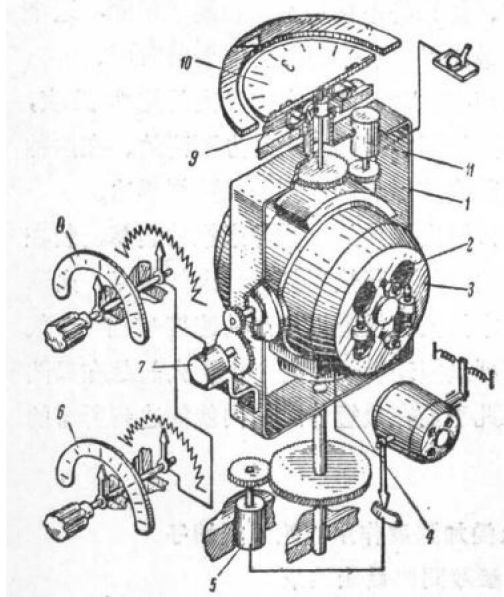


图 I.6 陀螺半罗盘的运动示意图

1—外环；2—陀螺马达；3—壳体（内环）；4—液体摆式开关；5—水平修整器；6—电气平衡电位计；7—方位修整器；8—“纬度”电位计；9—三抽头式电位计；10—刻度盘；11—刻度盘转动电机。

量有严格的要求。可以这样说：用这种方法增加动量矩不会使精度提高，反而会降低陀螺仪表的精度。

另一种常用的提高陀螺仪动量矩的方法，是增加陀螺马达转子的转数。但是过份地增加转子转数又会显著地加大气动阻力矩，减少主轴承寿命并使陀螺马达过热。

为了减少气动阻力矩和过热，可以把陀螺马达的壳体作成密封式的。将壳体内腔抽空到实际所能达到的真空

度。由于真空不能保证很好的散热和陀螺马达各元件受热的均匀，为改善散热性和降低陀螺马达各元件间的温差，在某些情况下转子与壳体之间的空间可以充氩或氦。

B. A. 巴甫洛夫教授对非浮子式陀螺仪陀螺马达转子结构参数进行了研究，并确定了在给定尺寸下保证实际陀螺系统精度最高（理想工作条件下）转子结构参数间的最佳关系〔63〕。

任何陀螺仪转子的质量，都可以看成分布在由万向支架环所限制的球形容积中。为得到最高精度，可以将转子的质量这样分布：使转动惯量 J 最大而又要保证陀螺马达支承系统轴承中的摩擦力矩最小。

支架轴中的摩擦力矩 M_f 为导电装置中的常值力矩 M_c 与支