

GUO WAI

GUAN XING

JI SHU SHOU CE

---

# 国外惯性技术手册

《陀螺仪与惯性导航专业情报网》 编

518339

国防工业出版社

518339

707077A  
10

# 国外惯性技术手册

《陀螺仪与惯性导航专业情报网》 编

HL52/30



国防工业出版社



C0231275

## 内 容 简 介

这是一部介绍美、英、法、西德和日本等十二个国家研制和生产惯性导航与惯性制导系统、惯性元件、测试设备及导航计算机等的专业技术手册。全书共分三大部分：第一部分简述了惯性技术的基本知识；第二部分综述了国外惯性技术的发展概况；第三部分按国别和机构分类编排，评论和介绍了国外研制与生产惯性系统及元件的有关公司、院校和学会的地址、机构概况及其发展水平。书末编排了机构与型号索引以及英汉惯性技术常用专业术语与缩略语等六个附录。

本手册可供研制、生产和使用惯性导航与惯性制导系统及其元件的管理人员、研究人员、教学人员和人员阅读参考，也可以作为本专业研究生和高年级大学生的参考书。

### 国外惯性技术手册

《陀螺仪与惯性导航专业情报网》编

责任编辑 王 洪

\*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 36 843 千字

1983年5月第一版 1983年5月第一次印刷 印数：0,001—3,200册

统一书号：15034·2510 定价：5.45元

## 编者的话

为了适应国内惯性技术蓬勃发展的需要，使惯性技术在实现四个现代化中发挥应有的作用，为了填补惯性技术工具书方面的空白，《陀螺仪与惯性导航专业情报网》决定组织力量编写“国外惯性技术手册”。

本手册是在大量搜集、阅读和分析国内外有关科技文献的基础上编纂成册的。书中的第一篇简明扼要地阐述了惯性技术的基本知识；第二篇给出了国外惯性技术综述和美、苏、英、法发展惯性技术的概况；第三篇介绍了美国、英国、法国、西德、意大利、日本、瑞典、挪威、加拿大、荷兰、澳大利亚十二个国家研制惯性导航与惯性制导系统、惯性元件、惯性测试设备及导航计算机的机构与水平。为了使读者使用和查找方便，手册中按国别和机构进行分类编排。此外，手册的最后附有《主要机构索引》、《型号索引》、《采用惯导的主要载体名称英汉对照》、《美国军用武器和设备命名规则及代码含义》、《惯性技术常用英语缩略语》和《英汉惯性技术常用专业术语》等共计六个附录。

在本手册编写过程中，主要搜集了最近二十年来有关国家研制惯性导航和制导的情况，其中以最近使用型号为主，对早期和初期的型号则酌情进行取舍，重点给出性能数据和结构特点，考虑到篇幅和其他因素，手册中未编入与惯性技术有关的各种照片。在编写型号索引时，仅编排有性能数据和结构特点的型号。

本手册在编写过程中得到了网内各有关单位的大力支持。参加编写工作的有张孝俊、何传五、夏三广、许国祯、杨甫余等同志。宋国有同志做了大量的编写组织工作。

在本手册编写过程中，三机部第三情报网曾给予支持和帮助。本稿经章燕申同志审读并提出了修改意见。在审定过程中，陆元九同志曾多次给予指导，提出了许多宝贵意见。在此，一并向这些单位和同志致以衷心的感谢。

由于编者水平所限，加之时间仓促，手册中的缺点错误在所难免，热忱欢迎读者批评指正。

一九八〇年十二月

## 目 录

## 第一篇 惯性技术的基本知识

一、惯性导航的原理·····	2	四、导航计算机·····	18
二、惯性元件·····	6	五、惯性系统的工程设计问题·····	19
三、惯性系统·····	14	六、组合导航系统·····	21

## 第二篇 发展概况

一、国外惯性技术综述·····	24	四、英国惯性技术发展概况·····	44
二、美国惯性技术发展概况·····	31	五、法国惯性技术发展概况·····	46
三、苏联研究惯性技术概况·····	40		

## 第三篇 研究机构与水平

美国·····	50	分析科学公司·····	255
德雷珀实验室公司·····	50	马丁-马丽塔宇航公司·····	257
罗克韦尔国际公司·····	65	汤·腊·伍防卫和空间系统集团·····	260
霍尼韦尔公司·····	80	通用电气公司·····	262
利顿工业公司·····	98	国际商业机器公司联邦系统分公司·····	265
本迪克斯公司·····	122	休斯飞机公司航空空间集团·····	266
斯佩里公司·····	139	汉弗莱公司·····	267
辛格公司基尔福特分公司·····	149	麦克唐纳-道格拉斯公司·····	268
诺思罗普公司·····	159	洛克希德导弹与空间公司·····	269
贝尔宇航得克斯特朗分公司·····	171	波音公司·····	270
联合工艺公司哈密尔顿标准分公司·····	175	格鲁门宇航公司·····	272
利尔-西格勒公司·····	181	陀螺仪系统公司·····	273
雷锡恩公司·····	189	宇航公司·····	274
特里达因系统分公司·····	192	鲍尔航空空间系统分公司·····	276
通用汽车公司台尔柯电子设备分公司·····	197	埃沃格林航空中心·····	277
博希-阿玛工业公司阿玛分公司·····	207	东部系统公司·····	277
康特维斯-戈尔兹公司·····	212	埃多公司·····	278
卡克电子设备公司·····	243	康拉克公司·····	278
森德斯坦德公司·····	248	航空系统公司·····	279
赛斯特朗-唐纳公司·····	250	航空系统国际公司·····	279
动力研究公司·····	253	阿维克系统分公司·····	280
		美洲宇航设备公司·····	280

- 应用设备公司 .....281
- 通用动力公司波莫那分公司 .....281
- 通用设计公司 .....281
- 哈里斯电子系统分公司 .....282
- 福斯特-米勒联合公司 .....282
- 伊利诺斯工学院研究所 .....282
- 航空喷气液体火箭公司 .....283
- 航空营业国际公司 .....283
- 航空喷气通用公司 .....283
- 空间机动实验室公司 .....284
- 微波设备公司 .....284
- 空间制导公司 .....284
- 系统研究公司 .....285
- 费伦梯电气公司 .....285
- 桑迪亚实验室 .....286
- 英科赛姆公司 .....288
- 分析力学联合公司 .....289
- 格尼斯克技术公司 .....290
- 黑兹尔坦公司 .....292
- 英特梅特里克斯公司 .....292
- 沃特公司 .....293
- 中央惯性制导试验室 .....294
- 宇航制导和计量中心 .....297
- 惯性系统数据交换联合服务部 .....298
- 奥本大学 .....299
- 加州理工学院 .....300
- 哈瓦德大学 .....302
- 弗兰克·杰·塞勒研究所 .....303
- 伊阿华州科技大学 .....305
- 约翰斯·霍普金斯大学 .....306
- 麻省理工学院 .....307
- 俄克拉何马州立大学 .....309
- 斯坦福大学 .....310
- 田纳西大学 .....312
- 图福茨大学 .....315
- 加利福尼亚大学 .....316
- 伊利诺斯大学 .....318
- 圣克拉腊大学 .....318
- 犹他大学 .....319
- 美国海军研究生学校 .....321
- 美国导航学会 .....322
- 英国 .....323
- 费伦梯有限公司 .....323
- 斯佩里有限公司 .....336
- 英国宇航动力集团精密产品部 .....342
- 马可尼航空电子设备系统有限公司惯性  
导航分公司 .....350
- S. G. 布朗有限公司 .....355
- 史密斯工业有限公司 .....356
- 皇家飞机研究院 .....359
- 海军部罗经研究所 .....361
- 克兰菲尔德理工学院 .....363
- 女王玛丽学院 .....369
- 英国皇家导航学会 .....369
- 国际导航学会联合会 .....370
- 法国 .....371
- 通用机械电气公司 .....371
- 法国航空导航设备公司 .....385
- 测试仪器制造公司 .....387
- 科鲁兹公司 .....393
- 通用电气公司集团 .....396
- SV2 集团 .....398
- 国家航空研究院 .....399
- 弹道与空气动力研究所 .....401
- 法国导航学会 .....402
- 西德 .....403
- 利顿技术公司 .....403
- 博登湖技术公司 .....408
- 泰尔迪克斯公司 .....412
- 安修茨公司 .....422
- 斯坦海尔-利尔·西格勒公司 .....424
- 卡·普拉特公司 .....425
- 电子系统公司 .....426
- 梅塞施米特-伯尔科-布洛姆有限公司  
.....428
- 西德航空航天研究试验院 .....430

西德定位与导航学会 .....	432	挪威国防研究院 .....	453
意大利 .....	433	加拿大 .....	455
利顿意大利公司 .....	433	利顿系统加拿大有限公司 .....	455
微型技术公司 .....	434	杰吉威系统有限公司 .....	457
意大利航空公司 .....	435	雅克布斯仪表有限公司 .....	457
伽利略公司 .....	435	荷兰 .....	458
意大利导航学会 .....	435	国家宇航研究所 .....	458
日本 .....	436	荷兰信息设备公司 .....	461
航空宇宙技术研究所 .....	436	特文特技术大学 .....	461
日本航空电子工业有限公司 .....	440	澳大利亚 .....	462
东京仪表有限公司 .....	442	康达斯航空有限公司 .....	462
东京航空仪表有限公司 .....	443	澳大利亚导航学会 .....	462
东京芝浦电气有限公司 .....	444	附录 .....	463
三菱精密有限公司 .....	445	附录 I 主要机构索引 .....	463
北辰电机制造有限公司 .....	446	附录 II 型号索引 .....	471
多摩川精机有限公司 .....	447	附录 III 采用惯导的主要载体	
日本导航学会 .....	448	名称英汉对照 .....	486
瑞典 .....	449	附录 IV 美国军用武器和设备	
瑞典飞机公司阿克泰伯洛格		命名规则及代码含义 .....	493
分公司 .....	449	附录 V 惯性技术常用英语缩	
瑞典飞利浦斯公司 .....	450	略语 .....	504
瑞典国防研究院 .....	451	附录 VI 英汉惯性技术常用	
挪威 .....	452	专业术语 .....	538
罗伯逊无线电-电子公司 .....	452		

## 第一篇 惯性技术的基本知识



# 一、 惯性导航的原理

## (一) 地 球

### 1. 形状

把地球看作是具有半径为  $R$  的球体，这是一般工程技术中所采用的。但实际上地球的形状是一个不规则的几何体，可近似地看作是一个旋转椭球体。在这样一个椭球体的球面上进行三维运动，将会引起以下三方面的影响：

- (1) 产生附加的有害加速度；
- (2) 对陀螺仪的补偿信号将有所改变；
- (3) 相应的经纬度数值将有所改变。

由于存在这些因素，要求在定位计算中进行地球形状的修正。

### 2. 重力

地球的重力由万有引力（或地心引力）和地球自转的离心力所合成，假设地球为一理想的球体，则重力加速度  $g$  将沿此合力的方向。当载体在地球表面航行时，其所受重力的方向和大小均随载体所在位置的不同而变化。

加速度计不仅测量重力，同时也测量载体的加速度。因此，重力异常和垂线偏差角都将影响惯性测量的准确度，必须加以修正。

### 3. 自转

地球相对惯性空间有自转，因此，当地水平面和子午面都有地球自转引起的旋转角速度，这就是地球自转角速度的水平和垂直分量，它们都与当地纬度值有关，在长期运行的惯性系统中应考虑纬度的变化。此外，地球自转是惯性导航的物理基础之一，可以采用陀螺仪来跟踪地球自转角速度的方向。而在陀螺跟踪地球自转轴方向时，惯性导航系统可直接给出当地纬度信号，并且定位误差不会随时间而发散。

## (二) 座 标 系

### 1. 惯性空间

惯性空间是指绝对静止或作等速直线运动的坐标系。这是牛顿定律所确定的参考坐标系。惯性坐标系指原点在太阳中心、三个坐标轴指向空间确定的恒星。但是，由于人们生活在地球上，绝大部分载体是相对地球表面运动的，因此需要在地球上建立一个惯性坐标系。把原点移到地心、三轴指向确定的恒星，这种参考系称为地心惯性坐标系。

### 2. 导航坐标系

导航坐标系指导航系统在进行运动量测及定位计算时的参考坐标系，它相对于惯性空间是一个动坐标系。

在惯性导航系统中，由于要求加速度计的跟踪方向不同，系统机械编排的方案也有很大差别，而选取适当的导航坐标系有时可大大简化系统的构成。

确定载体相对地球定位的坐标系通常有地心坐标系、地理坐标系（即经纬度坐标系）、大圆坐标系等。一般来说，导航坐标系的选择应考虑以下两方面的问题：

（1）由实际元件测得的加速度来计算该坐标系的位置变量（即所谓机械编排）是否方便？

（2）在保持平台方向上控制是否方便？

### 3. 时间

一般来说，任意一个周期性运动均可以作为时间标准，关键在于要求该运动稳定且便于测量。地球的自转符合这样的要求，因此长期以来被当作一个有用的时间标准。

对惯性导航系统来说，重要的是地球相对惯性空间的转速而不是它相对太阳的转速。为方便起见，我们把除太阳以外的某一恒星连续两次通过当地子午面的时间间隔定为一个恒星日，恒星日比平均太阳日约短 0.3%，地球在一个恒星日内准确转动  $15^\circ$ 。

## （三） 惯性导航系统

惯性导航系统是一个自主的空间基准保持系统，从原理上说，各种惯性导航系统都应当用几何学的观点来解释，它包括以下两个组成部分。

1) 指示当地地垂线方向的分系统，它通过测定载体所在地的重力方向，再对重力偏差角进行修正，以获得大地参考椭球上该点的位置。

2) 保持惯性空间基准的分系统，它通过指示地球自转轴的方向，来确定地心惯性坐标系。

地球自转轴和当地地垂线方向之间的几何关系即确定了导航所需的经纬度。在惯性导航系统中，用加速度计来指示当地地垂线的方向，用陀螺仪来指示地球自转轴的方向。把所测到的这些参数连同事先给出的时间、引力场、初始位置和初始速度一起送入导航计算机，即可算出载体相对所选择的导航参考坐标系的位置。因此可以说陀螺仪和加速度计是惯性导航系统的核心。

从物理意义上来解释，惯性导航是一门信息科学。根据牛顿惯性定律，当载体相对惯性系以加速度  $\bar{a}$  运动时，在载体中加速度计量测的力

$$\bar{F} = m\bar{a} - m\bar{G}$$

式中  $\bar{F}$  —— 加速度计检测质量受到的作用力；

$m$  —— 感受加速度的检测质量；

$\bar{a}$  —— 运动加速度；

$\bar{G}$  —— 地球的引力加速度。

上式表明，可以通过加速度计来测出比力，也就是说，在载体内部不必依赖外界信息而只是通过惯性元件即可测得载体相对惯性坐标系的加速度，并在得知了初始位置和初始速度后，对加速度进行两次积分就可以分别先后获得定位所需的速度和位置信息。

根据上述基本原理，对惯性导航系统提出如下基本要求：

- 1) 必须建立进行比力（惯性加速度与引力加速度的向量差）测量的导航参考坐标系；
- 2) 必须测量在所选取的导航参考坐标系中的比力分量；
- 3) 必须在测量得到的比力分量中把惯性加速度分离出来；

4) 必须实现对分离出的惯性加速度的两次积分。

以上分析只是说明惯性导航的原理。这里假设载体作最简单的平面运动,并且两个加速度计严格对准导航参考坐标系的两根轴。实际的惯性导航问题当然要复杂得多。

首先,载体是在一个球面上进行运动的,而安装加速度计的平台不可避免地存在着方位失调角和水平失调角。为解决这一问题,应使陀螺稳定平台在有加速度扰动时仍能始终保持在当地水平面内,以保证加速度的测量不受地球重力场的影响,这是通过舒拉调谐使平台跟踪当地地垂线而实现的。

舒拉调谐原理如下:如果单摆或复摆,或任何机械的摆式系统具有84.4分钟的振荡周期,且运动开始前系统处于平衡位置,即当地垂线位置,则当它沿地球表面运动时,不论其悬挂点具有何种加速度,它都不会偏置瞬时的地垂线位置(即新的平衡位置)。形象地说,这种摆的质心是处在地球中心位置上,臂长则等于地球的半径。将陀螺稳定平台做成一个机械摆式振荡系统,就可以保证做到这一点。这时其自振周期等于舒拉周期,惯性导航系统就是这样一个机械摆式振荡系统。实现的方法是把加速度计放在平台上,使其敏感轴与陀螺自转轴相垂直,加速度计的信号经过积分,以一定比例关系加于陀螺而使其进动,陀螺自转轴始终与当地垂线方向相一致。如果平台偏离当地水平面,加速度计将给出信号使平台以84.4分钟周期绕当地水平面振荡。

#### (四) 惯性系统的组成

惯性系统通常由以下五部分组成,即:惯性基准装置(IRU);控制显示装置(CDU);状态选择装置(MSU);导航计算机;电源。

根据已有的技术规范,在目前国外生产的惯性导航系统中,一般都把惯性平台、电子线路、计算机、各种数字子系统以及电源等主要部分组装成一体,构成所谓惯性导航部件。以飞机惯性导航系统为例,一般情况是:惯性导航部件安放在仪表舱内,控制显示装置装在驾驶舱仪表板上,状态选择装置安装在驾驶舱顶部或其它适当的地方。

#### (五) 惯性系统主要参数表示法

##### 1. 精度

惯性系统的精度可以四个指标来描述,即定位精度,用圆概率误差(CEP)来表示,CEP值通常指一个圆半径,这个圆包含了50%的实际测量位置,定位精度的量纲为海里/小时;速度精度用\*/秒表示;姿态精度(即横滚、俯仰和偏航的姿态角)用角分表示;航向精度用度或角分表示。

##### 2. 可靠性

惯性系统的可靠性以平均故障间隔时间(即MTBF)来表示,其计算方法是:

$$MTBF = \frac{T}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4}$$

式中  $T$ ——总的使用期限,如飞行次数;

$n_1$ ——现场修理的故障次数;

$n_2$ ——车间修理的故障次数；

$n_3$ ——修理站修理的故障次数；

$n_4$ ——被认为不适用的故障次数。

可靠性的量纲为小时。

### 3. 反应时间

反应时间也称启动时间，指“接通”电源到可以转为“导航”工作状态的总时间，包括加温、陀螺启动、陀螺修正和其它调整时间，其量纲为秒、分或小时。

### 4. 成本

惯性导航系统的成本一般包括购置费用及维护费用两大部分，可以公式表示为：

综合成本 = 最佳性能 + 可生产性 + 可靠性 + 可维护性

## 二、惯性元件

### (一) 角偏差接受器

角偏差接受器是惯性元件之一，应包括各种陀螺仪和陀螺稳定平台，它们敏感导航参考坐标系相对惯性坐标系的角偏差，并将这个信号提供给惯性系统。本节叙述各种陀螺仪。

#### 1. 陀螺仪及其分类

一般来说，陀螺仪（简称陀螺）是指安装在万向框架中高速旋转的转子，转子同时可以绕垂直于自转轴的一根轴或两根轴进动。这样的装置具有两个特性：

(1) 稳定性：在框架轴承无摩擦的理想情况下，如果没有外力矩的作用，则陀螺自转轴相对于惯性空间的方向将保持不变。

(2) 进动性：当绕框架的一根轴施加外力矩时，转子将绕与之相垂直的另一根轴进动，这就是陀螺的进动性。

利用这两个特性制成了敏感角速度的速度陀螺和敏感角偏差的位置陀螺。现在习惯上把在惯性系统中可完成陀螺功能的装置统称为陀螺，而在前面冠以其特点的名字，比如激光陀螺、挠性陀螺、静电陀螺等。为了将敏感的角度或角偏差转换成惯性系统可用的信号，在陀螺仪中需要安装信号器（即传感器），为了使陀螺能按一定规律进动，还应加装力矩器，此外在陀螺仪中尚包括其它电子线路（如温度控制、磁悬浮等电子线路）。

陀螺仪的种类很多，可根据不同的原则来进行分类。下面的简表列出了一种分类方法。先以动量矩的型式分类，然后再以框架（安装高速旋转转子的装置）的自由度数进行分类，最后以框架支承型式和转子支承型式进行细分。以动量矩型式对陀螺进行分类，见表 2.1；对单自由度陀螺进行分类，见表 2.2；对二自由度陀螺进行分类，见表 2.3。

表 2.1

动 量 矩 型 式	陀 螺 名 称
无动量矩	激光陀螺，粒子陀螺
线动量矩	音叉陀螺，压电振动陀螺
角动量矩	单自由度陀螺，二自由度陀螺

表 2.2

框 架 支 承 型 式	转 子 支 承 型 式	陀 螺 名 称
液浮 + 宝石轴尖	滚珠轴承	单自由度液浮陀螺
液浮 + 滚珠轴承	滚珠轴承	单自由度液浮陀螺
液浮 + 宝石轴尖 + 磁悬浮	动压气体轴承	单自由度三浮陀螺
静压气体支承	滚珠轴承	单自由度静压气浮陀螺
静压液体支承	动压气体轴承	单自由度静压液浮陀螺

表 2.3

框架支承型式	转 子 支 承 型 式	陀 螺 名 称
滚珠轴承 液浮 + 宝石轴尖	滚珠轴承 滚珠 (或动压气体) 轴承 挠性轴承 动压气体支承 静电支承	二自由度陀螺 二自由度液浮陀螺 二自由度挠性陀螺 二自由度动压陀螺 静电陀螺

## 2. 单自由度陀螺

### (1) 单自由度液浮陀螺

单自由度液浮陀螺主要由转子组件、浮子组件、传感器组件、力矩器组件、馈电装置、浮液、壳体等组成。陀螺电机一般为磁滞同步电机，其转速通常为 30000 转/分。转子与定子间的支承一般为有预载的角接触滚珠轴承，为了提高精度与寿命，目前多采用动压气体轴承。浮子组件一般为密封圆柱体或球体，圆柱体两端装有轴，称为输出轴。转子装在浮子内，转子自转轴与输出轴垂直。浮子浸泡在比重与之相近的液体（一般为氟氯油或氟溴油）中。输出轴轴承为宝石轴尖支承，为了提高输出轴轴承的刚度和改善仪表的性能，增设了磁悬浮，这样浮子同时受到了液体悬浮和磁悬浮的作用，又由于转子由动压气体轴承悬浮，故这种陀螺可称为单自由度三浮陀螺。角度传感器、力矩器及电磁支承中的转子分别装在浮子的两端。装有温度控制器，以保证浮力与重力相等，而整个陀螺是密封的。

当陀螺壳体绕输入轴（按右手法则垂直于自转轴和输出轴）有一个角速度时，由于存在进动特性，浮子绕输出轴转动，相对于壳体转动的角度由传感器转换成电信号。由于浮液的阻尼作用很强，当直接使用这个电信号时，它与输入角速度的积分成正比，这时陀螺工作在速率积分状态，绕输出轴所受到的陀螺力矩为  $H\omega$ ，浮子所受到的阻尼力矩为  $C\dot{\theta}$ 。二者达到平衡，即

$$H\omega = C\dot{\theta}$$

$$\theta = \frac{H}{C} \int_0^t \omega dt + \theta_0$$

其中  $H$ ——转子的角动量；

$C$ ——绕输出轴的阻尼力矩系数；

$\theta$ ——浮子相对壳体的转角；

$\theta_0$ ——初始转角。

如果传感器的电信号先接至电子线路进行处理，而后接至力矩器，则通到力矩器的电流可作为输出信号。这时力矩器的电流将正比于输入角速度，陀螺工作在速率状态。在稳态情况下，浮子上受到的陀螺力矩和力矩器产生的力矩相等，即

$$K_r I = H\omega$$

$$I = \frac{H}{K_r} \omega$$

其中  $K_r$ ——力矩器的标度因数；

$I$ ——输送给力矩器的反馈电流。

在平台系统中，上述陀螺是工作于速率积分状态；而在捷联式惯性系统中，则陀螺是工作

于速率状态。目前在航天、航海和航空中均广泛使用这类陀螺。

为了说明这种陀螺的性能，需要用一些参数来表征。其中最常用的参数为漂移。当陀螺的输入角速度为零时，陀螺的输出为不等于零的某一数值，这个数值等效于有一个输入的作用，称之为漂移。可按照漂移的不同性质进行分类：

① 与比力（指重力与惯性反作用力的矢量和）无关的漂移。引起这个漂移的原因多半为弹性力矩、传感器的反作用力矩等。其量纲为度/小时或梅鲁（meru<sup>●</sup>）。

② 与比力一次方成正比的漂移。引起这个漂移的原因多半为浮子的质量不平衡，或温度变化引起浮心和重心的变化。其量纲为度/小时/g。

③ 与比力平方成正比及与两相互垂直的比力分量乘积成正比的漂移。由于对浮子组件结构的刚度设计不合适，将存在与比力平方有关的漂移。其量纲为度/小时/g<sup>2</sup>。

④ 常值漂移与随机漂移。对于单自由度液浮陀螺来说，目前通用的误差数学模型如下：

$$W_d = D_F + D_I(SF)_I + D_S(SF)_S + D_O(SF)_O + D_{II}(SF)_I^2 + D_{SS}(SF)_S^2 + D_{OO}(SF)_O^2 \\ + D_{IS}(SF)_I(SF)_S + D_{OS}(SF)_O(SF)_S + D_{IO}(SF)_I(SF)_O$$

其中  $W_d$ ——陀螺的总漂移率，单位为meru；

$D_F$ ——与比力无关的陀螺漂移率，单位为meru；

$D_I, D_S, D_O$ ——分别为正比于沿输入、自转和输出各轴的比力的漂移率系数，单位为meru/g；

$D_{II}, D_{SS}, D_{OO}$ ——分别为正比于沿输入、自转和输出各轴的比力平方的漂移率系数，单位为meru/g<sup>2</sup>；

$D_{IS}, D_{OS}, D_{IO}$ ——分别为正比于沿输入和自转、输出和自转、输入和输出各轴的比力的乘积的漂移率系数，单位为meru/g<sup>2</sup>；

$(SF)_I, (SF)_S, (SF)_O$ ——分别为沿输入、自转和输出各轴方向的比力，单位为g。

为了求得这些系数，一般在1g状态下，在陀螺测试台上进行测试。要试验在高g值下的情况，就要进行离心试验和振动试验。

应当着重指出，影响陀螺漂移的物理因素是大量的，而且是随机性的。因此，上述陀螺漂移数学模型中的每一项系数都是一个随机变量，不能用一个确定性的数据来表征。与此相对应，对陀螺漂移系数的测试也不能只进行一次，必须每次进行较长时间，并多次启动陀螺进行测试，以判断漂移系数的稳定性。

另一方面，从陀螺在惯性系统中使用的情况来看，也需要测定陀螺各项漂移系数的统计特性，对于其中的常值部分可以在惯性系统中进行开环补偿，对于其中的随机部分，则可通过滤波器进行闭环观测并加以消除。当然，不能设想陀螺漂移作为随机变量可以完全加以补偿，但是通过实时的滤波器，在惯性系统中可以补偿其中相当大的一部分。

按照以上陀螺漂移的随机特性和在惯性系统中对漂移进行观测和补偿的要求，通常可把陀螺各项漂移系数分为两部分。

① 常值漂移。不一定是常数，可能有随机游动和随机斜坡，这是由长时间测试数据

● meru是地球自转速度的千分之一，1meru = 15.041 × 10<sup>-8</sup>度/小时。

的均值来表征的，分一次启动和多次启动时的均值，二者往往是有差别的。这种差别可以看作是常值漂移的稳定性，即一次启动和多次启动时陀螺各项漂移系数常值部分的稳定性。

② 随机漂移。不一定是白噪声，可能有指数型的相关函数。这是由长时间测试的方差和相关函数来表征的。通常这一部分叫做陀螺的随机漂移，又称马氏漂移。

虽然陀螺的漂移误差系数项目很多，且每项误差系数的稳定性都很重要，但从惯性系统使用陀螺的要求来看，最基本的漂移误差则是随机漂移，它代表陀螺漂移中噪声的水平。因此，通常陀螺的漂移精度主要由随机漂移来表征。对于陀螺的常值漂移，则应尽量在惯性系统初始校准的过程中加以补偿。

此外尚有一些参数对说明陀螺的特性也很重要，比如：

① 标度因数。它是陀螺（或元件）的输入和输出之间的比例系数，对于在速率状态下运行的陀螺，输入为角速度，而输出为电流，因此标度因数的量纲为毫安/度/小时。

② 角动量。陀螺的角动量是指绕转子自转轴的转动惯量与转子转速的乘积，其量纲为克·厘米<sup>2</sup>/秒或达因·厘米·秒。

③ 阻尼系数。它是由单位框架角速度所引起的阻尼力矩，其量纲为达因·厘米·秒。

④ 弹性约束系数。它是绕输出轴的框架约束力矩与输出角的比值，其量纲为达因·厘米/弧度。

⑤ 时间常数。对于单自由度速率积分陀螺来说，时间常数在数值上等于绕输出轴的框架转动惯量与绕输出轴的阻尼系数的比值，其量纲为秒。

## （2）单自由度静压气浮（液浮）陀螺

静压气浮陀螺与液浮陀螺的主要不同之处在于浮子支承的区别。气体（或液体）在外部泵的作用下，通过过滤器、节流阀流到狭窄的间隙中（间隙由浮子上的轴颈和壳体上的轴承座来形成），从而产生支承力。从具体结构来说，将浮筒装在套筒和两边的端板中间，压缩气体从套筒壁上和两头端板上的小孔进入浮子与套筒之间的间隙。气体的出口位于圆柱浮筒两头端板的中心处。经过仔细设计，可以做到绕输出轴的干扰力矩很小。这种陀螺的缺点是要用一个高压气源或循环泵，因而增加了功耗和重量。为了克服这个缺点，现在改为静压液浮支承，用低粘度液体来代替气体，泵和陀螺组成一个密闭系统。这种陀螺对温度控制的要求不像液浮陀螺那样严格。

## 3. 二自由度陀螺

在二自由度陀螺中，转子组件可以绕内环轴和外环轴旋转，在没有外加力矩的情况下，转子自转轴在惯性空间保持稳定。如果沿某一轴加力矩，如内环轴，转子自转轴将绕另一轴（如外环轴）进动。外加力矩与进动角速度符合公式 $M = \omega \times H$ ，其中 $H$ 为转子的角动量。为了施加力矩与输出进动角信号，每根轴上均装有力矩器和传感器。为了减少内外环轴承的摩擦力矩，可采用不同的支承，由此得出各种类型的陀螺。

### （1）二自由度液浮陀螺

二自由度液浮陀螺是目前最常用的陀螺之一。这种陀螺的转子有两种支承形式，一种是采用滚珠轴承，另一种是采用动压气体轴承。而陀螺框架的支承采用液浮和宝石轴尖。由于液浮是其主要特点，因而一般称之为二自由度液浮陀螺。

### （2）二自由度动压陀螺



在说明动压陀螺之前，先简单说明一下动压轴承的原理。在一个移动部件与另一个不动部件之间有一层很薄的楔形空气层。当移动部件带动它附近的空气层作高速运动时，则空气层中气体的动压力将与运动速度的平方有关。当移动部件与不动部件两者之间的距离减小时，空气的流速将增大，而气体的动压力亦随之增大，作用在移动部件上的作用力亦相应增大；反之，若两者之间的距离增大，则空气的流速减低，而气体的动压力以及作用在移动部件上的作用力都将减低。利用这一原理，可以把轴颈依靠自转产生的气体动压膜支承起来。假如没有轴向流动，那么当转子旋转时，轴颈与轴孔将形成一个空气楔，它对转子有一个气体动压力。由于转子在负载作用下其下边的间隙比上边间隙小，因而气体给予下面的动压力将增大，这样就给转子一个向上的推力。至于止推轴承，则完全利用空气楔效应，将端面加工成螺旋槽的形状，这样当转子旋转时，空气将进入螺旋槽中而产生支承力。

在动压陀螺的结构中，中间的圆球是固定的，外面为转子，与圆球接触的表面作成两个半圆球形，止推轴承采用螺旋槽型式，驱动电机为感应式异步电机，力矩器为涡流式力矩器，传感器则采用电容式传感器。这种陀螺一般只能工作在零位附近很小的角度中。

对二自由度陀螺的性能表示方法，可考虑为一对单自由度陀螺，因而存在两个陀螺漂移模型，在每个模型中，依据漂移和比力的关系，主要有两种漂移，即与比力成正比的漂移和与比力平方成正比的漂移。

### (3) 动力调谐式挠性陀螺

动力调谐式挠性陀螺是目前应用得比较广泛的一种挠性陀螺。电机驱动转子和平衡环一起旋转，转子和平衡环、平衡环和驱动轴之间均用扭杆连接，内外扭杆相互垂直，而内扭杆与驱动轴垂直。扭杆的旋转刚度很低，而在其它方向则刚度很高。这是一种二自由度陀螺，若要求它成为自由陀螺，就必须做到在没有外力矩时陀螺转子不受任何约束，达到自由状态。但在挠性陀螺中，转子和自转轴之间是挠性连接的，因而当壳体相对转子轴线有一偏差角时，自转轴每旋转一周，平衡环相对自转轴绕内扭杆轴有一个振荡运动，产生两种效应：一种是绕内外扭杆轴有弹性力矩，另一种是平衡环产生的惯性力矩。这两种力矩在壳体坐标系中可表示为：

$$K_r - \left( A - \frac{C}{2} \right) \dot{\theta}^2$$

其中  $K_r$ ——内外扭杆的弹性力矩；

$A$ ——平衡环的赤道转动惯量；

$C$ ——平衡环的极转动惯量；

$\dot{\theta}$ ——转子的转速。

只要  $A > \frac{C}{2}$ ，选择适当的转速  $\dot{\theta}$  就可使上式为零，即达到自由陀螺状态。由于只在某一转速时才能达到自由陀螺状态，故称为动力调谐式挠性陀螺。

这种陀螺是由磁滞电机、滚珠轴承、永磁力矩器、信号器、转子、平衡环所组成。为了保证精度，将驱动轴、平衡环、转子的一部分与内外扭杆全都作成整体式，并采用同一种弹性材料。

这种陀螺仍和其它二自由陀螺一样，按与比力的关系来表示它的精度。