

237956

航空陀螺仪表 原理

A.C. 柯兹洛夫著



3

国防工业出版社

統一書號

15034·312

定價1.80元

航空陀螺仪表 原理

A.C.柯兹洛夫著
凌志勤、朱德庄译



国防工业出版社

內 容 簡 介

本書闡述陀螺儀一般理論的原理。討論利用陀螺重心的偏位來表示垂綫和子午綫；闡述陀螺儀修正系統的作圖原理；討論底座固定和活動時被修正陀螺的性質，同時也討論航空地平儀，航向陀螺儀和速度陀螺儀的理論；附帶增添動力陀螺系統的基本知識。

本書分析了有關修正系統作圖原理和底座固定和活動時被修正陀螺性質的一些問題，如對所有陀螺儀表的一般性的問題。書中特別值得注意的是與陀螺儀表在飛行中使用有關的一些問題：縱向加速度飛行時、轉彎時和飛機作其他的機動飛行時陀螺儀表的誤差及消除這些誤差的方法。

本書可供航空院校特設專業師生和有關的工程技術人員閱讀。

蘇聯A. C. Козлов著‘Теория авиационных гироскопических приборов’(Оборонгиз 1956第一版)

國防工業出版社

北京市書刊出版業營業許可証出字第074號
北京西四印刷廠印刷 新華書店發行

*

850×1168 $\frac{1}{32}$ ·印張9·245千字

1959年3月第一版

1959年3月第一次印刷

印數：0,001—2,100冊 定價：(11) 1.80元

№ 2555

目 录

序言	5
緒論	7
第一章 陀螺現象及其特性	12
§ 1.1. 所看到的陀螺現象	12
§ 1.2. 所看到的陀螺現象之間的关系	15
§ 1.3. 陀螺反作用的物理基础	15
§ 1.4. 陀螺力矩的大小	18
第二章 陀螺仪运动基本方程式的推导及分析	22
§ 2.1. 对称陀螺仪的动量矩	22
§ 2.2. 萊查定理	24
§ 2.3. 陀螺仪运动向量形式的近似方程式的推論	26
§ 2.4. 陀螺仪运动近似方程式的分析形式	29
§ 2.5. 陀螺仪运动方程式的完整形式	30
§ 2.6. 外加赤道力矩作用下的陀螺仪的运动	33
§ 2.7. 陀螺仪运动的能量平衡	38
§ 2.8. 相对于地球坐标軸的运动方程式的变换	39
§ 2.9. 地球的旋轉和飞机相对于地球的位移的影响	42
第三章 定位陀螺仪作用原理的概述	47
§ 3.1. 无定向陀螺仪	47
§ 3.2. 具有移动重心的定位陀螺仪	48
§ 3.3. 具有修正器的定位陀螺仪	50
第四章 陀螺摆原理	54
§ 4.1. 无阻尼的陀螺摆在不考虑地球旋轉的固定支座上的动作	54
§ 4.2. 有液体阻尼器时陀螺摆的动作	62
§ 4.3. 陀螺摆的偏差	64
§ 4.4. 盘旋对陀螺摆的影响	69
第五章 陀螺罗盘理論的基本知識	74
§ 5.1. 无阻尼陀螺罗盘在相对于地球为不动的支座上的动作	74
§ 5.2. 速度和加速度对陀螺罗盘动作的影响	76

第六章 修正系統的示意圖和特性曲綫	80
§ 6.1. 修正系統的示意圖	80
§ 6.2. 气动式修正系統的示意圖和特性曲綫	82
§ 6.3. 电气徑向修正系統的示意圖和特性曲綫	89
§ 6.4. 机械式修正系統	100
§ 6.5. 修正系統特性曲綫的分析表达式	101
第七章 当支座固定不动以及修正系統无干扰状态时的稳定过程	104
§ 7.1. 概論	104
§ 7.2. 运动方程式	105
§ 7.3. 比例修正特性曲綫下的稳定过程	108
§ 7.4. 在常数修正特性曲綫下的稳定过程	122
§ 7.5. 复合修正特性曲綫下的稳定过程	134
第八章 修正系統周期性扰动对陀螺仪稳定的影响	137
§ 8.1. 概論	137
§ 8.2. 具有比例特性曲綫的修正系統的扰动对陀螺仪稳定的影响	138
§ 8.3. 具有常数特性曲綫的修正系統的扰动对陀螺仪稳定的影响	142
第九章 航空地平仪的偏差	155
§ 9.1. 由于地球旋轉和飞机相对于地球的位移所引起的偏差	155
§ 9.2. 航空地平仪的盘旋偏差	160
§ 9.3. 冲击偏差	222
§ 9.4. 电动航空地平仪	228
第十章 航向陀螺仪的偏差	255
§ 10.1. 陀螺半罗盘 (ГПК)	255
§ 10.2. 远距离陀螺磁罗盘	270
第十一章 速度陀螺仪和加速度-速度陀螺仪	276
§ 11.1. 作用原理	276
§ 11.2. 速度陀螺仪平衡环的运动方程式	279
§ 11.3. 加速度-速度陀螺仪的运动	289
第十二章 陀螺动力稳定装置的基本理論概念	293
§ 12.1. 陀螺动力稳定装置的原理	293
§ 12.2. 具有陀螺动力稳定装置的装置圖	296
§ 12.3. 动力陀螺地平仪的稳定过程	301

序 言

航空陀螺仪在最近10~15年間获得了很大的發展。如果要談到这个發展的主要方向，則是力求提高与增加陀螺仪表及其附件的工作可靠性和准确性。这个發展方向是根据飞行距离、速度和高度的不断增加而确定的。試驗証明，航空电动陀螺仪的發展是提高陀螺仪表及附件的工作可靠性和准确性最有效的途徑。我国的設計师和生产者們都已清楚地認識到了这一点，因之他們在1936~1937年間就能保証用于自动駕駛仪中的全部电动定位陀螺仪的成批生产，而自动駕駛仪对陀螺仪工作的可靠性和准确性的要求是特別严格的。

我国的航空陀螺仪是依据創立陀螺仪表理論的俄国古典派的力学家們，以及苏联学者和專家們的著作而發展起来，这种理論現在已形成了一門独立学科。这里首先要指出的是苏联科学院院士克雷洛夫 (А. Н. Крылов)●和通訊院士布尔加柯夫 (Б. В. Булгаков)●的巨著，这些論文由于內容丰富，而主要是由于其中将高深的理論分析和所研究的問題的工程观点結合为一体，直到現在仍然是空前的。毫不夸大地說，苏联現代陀螺学派就是在研究与發展这些著作思想的基础上成長和壮大起来的。

但是，應該指出，航空陀螺仪的許多教材和参考著作中普遍存在一个缺陷：就是它們只是專門論述个别的陀螺仪表，而缺乏适当的教學上的綜合。虽然所提到的克雷洛夫 (А. Н. Крылов) 和布尔加柯夫 (Б. В. Булгаков) 的著作以及本書所引用的其他苏联作者的許多著作提供了編写綜合教材和航空陀螺仪表理論發展

● А. Н. Крылов, Общая теория гироскопов, АН СССР, 1939.

● Б. В. Булгаков, Прикладная теория гироскопов, ГОНТИ, 1939.

史所需的足够資料，可是并未加以利用，这是很遺憾的事。

本書正是試圖弥补这个缺陷。

本書系根据儒柯夫斯基空軍工程学院出版的 **柯茲洛夫**

(А. С. Козлов) 关于航空陀螺仪表理論方面的著作編写而成的。

近几年来，由于航空陀螺仪表理論和技术的发展，有必要充实本書的理論部分和增添有关最新仪表构造原理的一系列問題，而这一項工作是由柯茲洛夫 (М. С. Козлов) 完成的。

参与本書出版准备工作的有：鮑德涅尔 (В. А. Боднер) 教授，克拉索夫斯基 (А. А. Красовский) 教授，弗里德連杰尔 (Г. О. Фридлендер) 教授和柯莫茨基 (Р. В. Комоцкий) 講師。

緒 論

在航空上应用以陀螺特性作为基础的仪表有：

1. 飞机相对地球的位置指示器，即飞机諸軸与和地球相連的相应諸軸所构成的角度指示器。陀螺航向指示器和航空陀螺地平仪就屬於这一类仪表。

2. 飞机繞自身軸旋轉的角速度和角加速度指示器和測量器。屬於这一类仪表的有大家所熟知的“轉弯指示器”，即飞机繞其垂直軸旋轉的角速度指示器。这里，也包括自动駕駛仪中应用的飞机繞其自身軸旋轉的角速度和角加速度測量器。

所有陀螺仪表的共同点是每种仪表都有一个轉子，它繞自身的旋轉軸或振動軸作高速旋轉或振動，同时相对于其自身旋轉軸具有足够大的轉動慣量。装有这种轉子的仪表所具有的諸特性，以及由它們所引起的現象称为陀螺特性和陀螺現象，而轉子本身称为陀螺仪。

轉子的旋轉或者是靠气流，或者是靠电能来保証，因此，陀螺仪又可分为气动式陀螺仪和电动式陀螺仪。

陀螺仪表內所采用的轉子通常有三个或二个自由度，它們是由具有两个平衡环或一个平衡环的万向支架来确定。

在第一組仪表內，即在陀螺測角器內，支持轉子軸的万向支架平衡环称为內环，而支持內环軸的平衡环称为外环。繞轉子軸旋轉的一个自由度与万向支架的自由度相加，結果轉子的質点的总自由度等于三。

因此，通常把万向支架內的轉子称为三个自由度陀螺仪。

如果在这种陀螺仪內，系統的重心与支架的支承点相重合，那末在这种情况下我們把它称为平衡陀螺，因为重力不会影响陀螺轉子軸的位置。

如果进一步假定万向支架的軸承內沒有摩擦以及当陀螺仪位置改变时也沒有将力矩加在陀螺上的系統存在，那么我們便得到一个通常所謂的“自由”陀螺仪，这說明此种陀螺不仅当轉子軸处于任何位置时是这样，而且当支架基座改变到任何位置时也是这样，且不受某种力和力矩的影响。

在第二組仪表內，即在确定角速度的仪表內或測量角速度的仪表內，轉子的支架只有一个平衡环，其位移受到彈簧的反作用的限制。这种陀螺仪称为二自由度陀螺仪[●]。

在用于自动駕駛仪內同时測量角速度和角加速度的仪表中，轉子的支架有两个平衡环，其位移均受彈簧的反作用的限制。

在測量角度的仪表中，加在陀螺上的力矩，其功用是使轉子軸具有方向的选择性，这个方向是由这种仪表来确定。

上述目的或者是利用陀螺的重力来达到，也就是利用重心对支承点相应的位移来达到，或者是利用加在陀螺仪上的特殊的附加系統来达到，这个系統称为修正系統。

根据修正系統中产生定位力矩所采用的能量形式的不同，可分为机械式、气动式和电动式修正系統。

不論是为了判讀的目的，或是为了自动駕駛的目的，航空陀螺仪表的問題过去和現在都与要求确定飞机相对于地球軸——地理子午綫和当地地垂綫位置相联系着。換句話說，这就是人工陀螺地平仪和罗盤的問題，即表示地平面位置的仪表和表示地理子午綫方向的仪表的問題。

还在航空上决定需要应用这些仪表以前，这种用途的仪表在航海的實踐中便已具备与应用了。然而以航海陀螺罗盤（摆式陀螺罗盤）和航海陀螺地平仪（陀螺摆垂直器）为基础的原理不能用于航空上。

这个原因有三种情况：飞机的加速度很大，摆式陀螺罗盤和

● 有时候也称为“进动”陀螺，但是我們不用这个名称，因为任何一个陀螺仪都是“进动”的。

陀螺摆垂直器所具有的体积和重量在飞机上的安装条件是不适宜的，这些仪表所具有的长时间的过渡状态不能满足航空上使用条件的要求。

现在具有确定地垂线和子午线方向的其他方法，即应用某一种形式的物理摆来确定地垂线，与应用磁针来确定航向。应该指出，磁针，即磁罗盘在航空上的应用有它一定的地位，而且迄今尚未丧失它本身的作用。但是，它没有全部解决航空罗盘的问题。因为，罗盘方位不够稳定；因为飞机的盘旋和加速度对磁罗盘有严重的影响；当飞机航向改变时，相对于方位具有它自己位置的钢质零件的机件对磁罗盘的影响；外来磁场（电气设备和无线电设备）对磁罗盘同样地也有影响，所以罗盘的方位不稳定，由于这一切便促使我们必须采用与上面所列举的磁罗盘的缺点无关的陀螺仪表来代替磁罗盘，或者作为磁罗盘的附加仪表。至于在飞机上应用物理摆来确定地垂线方向的问题，虽然作过试验，但证明它是无效的。换句话说，只有解决适合于航空实际应用的人工陀螺地平仪问题才是解决在飞机上确定地垂线方向问题的唯一方法。

这个问题和航空陀螺罗盘的问题都是在应用了陀螺仪的定位修正系统的途径才获得了解决。

这个途径首先保证了，在重量和体积较之摆式陀螺罗盘和摆式陀螺垂直仪所要求的小得多的条件下，获得十分满意的准确度。同样地，长时间的过渡状态的问题在这个途径的基础上也解决得很满意。因而，具有修正系统的陀螺地平仪（航空地平仪）和具有修正系统的陀螺罗盘（航向陀螺仪）成了飞机设备不可缺少的一部分，并且是自动驾驶仪灵感系统的基础。

因此，这些陀螺仪表的理论对航空技术来说，自然是特别重要的。一般可以这样说：航空陀螺仪表的理论首先就是具有修正系统的定位陀螺仪的理论。

这个理论问题的论述也是本书的任务。

如果在前一个阶段，对定位陀螺仪表的指示准确度沒有提出严格要求的話，那末随着飞行距离和速度的增加以及某些新任务的提出，便提高了这些要求。

利用电能来保持轉子的旋轉和达到修正的目的，这仅仅是部分地滿足了对提高定位陀螺仪表指示准确度的要求。問題在于定位陀螺仪表所承受的負載对它起着不良的影响。因此必須从与指示系統或自动装置系統切切相关的方面来考虑尽可能减少对这种陀螺仪的反作用。虽然如此，完全消除这种联系的不良影响是沒有得到成功的。

正如苏联科学家們，首先是布尔加柯夫 (Б. В. Булгаков) 及其学生們[●]的著作中所指出的，具有动力稳定装置的多陀螺系統可以給出这个問題根本的解答，而具有动力稳定装置的多陀螺系統現在在航空陀螺技术中已开始占据显著的地位。因此我們必須談到与这些系統有关的一系列問題。

飞机旋轉角速度的陀螺測量器，即我們所說的速度陀螺仪在航空上起着極其重要的作用。

大家所熟知的“轉弯指示器”就是这类仪表的代表。由于这种仪表对飞机轉弯角速度的反应，它正像是預告駕駛員飞机将进入破坏状态。这些仪表对駕駛自动器來說亦有着重大的作用，因为把它們用作为駕駛自动器的輔助灵感机构，便有可能获得飞机运动的人工阻尼作用，这一点从保証自动驾驶过程所应有的質量的观点來說也是極其重要的。測量飞机旋轉角速度和角加速度的加速度-速度陀螺仪，对駕駛自动器來說，也是非常重要的。

本書同时也叙述了速度和加速度-速度陀螺仪表的理論基础。

現在，我們来談一下我国航空陀螺仪發展的几个历史时期。

当航空陀螺仪的問題达到足够成熟时，我国便已經拥有解决航空陀螺仪所必需的人材。这是由于，虽然在革命前的俄国根

● Я. Н. Ройтенберг, Многогирскопная вертикаль. Прикл. матем. и мех., т. X, вып. 1, 1948.

本沒有陀螺儀工業，但是陀螺儀的問題（特別是航空陀螺儀的問題）在當時却已引起了許多俄國學者和發明家的注意。

我們指出，還在1911年儒柯夫斯基（Н. Е. Жуковский）[●]正是為了航空的利益便已從事這些問題的研究。

早在1928~1929年就設計和製造成功了第一批用空氣作用的方法來保證轉子旋轉和修正器工作的航空陀螺儀，並且在自動駕駛儀中獲得了應用。

1936~1937年具有全部電氣式修正定位陀螺儀的制成是蘇聯設計思想和航空儀表工業的重大成就。這項工作是由于在這些年內制成全部電氣式自動駕駛儀而完成的，而且它是解決電氣式自動駕駛儀問題中的主要問題。在全部電動式定位陀螺儀問題本身當中，主要的就是電氣修正的問題。這個問題是在蘇聯發明家所提出的感應式修正原理的基礎上而解決的。

在航空電氣陀螺儀領域內，蘇聯陀螺儀工作者最近的工作是特別有成績的，由於這個結果，因此我們現在已經擁有整套的國產電氣陀螺儀表。

● Н. Е. Жуковский, Полное собрание сочинений. Лекции, вып. 2, 1939.

第一章 陀螺現象及其特性

§ 1.1. 所看到的陀螺現象

我們來研究無定向陀螺儀（圖1.1）。位於由內平衡環3和外平衡環4組成的萬向支架內的轉子2稱為陀螺儀；在無定向陀螺儀內，陀螺儀的重心與中心 O ——支架平衡環軸的交叉點相重合。

當陀螺儀的轉子尚未旋轉之前，我們不能從它的裝置中察覺出它與通常的非陀螺體有任何不同的現象。關於非陀螺體，在這裡和今後我們所指的是在試驗以前不具有動量矩的物體。

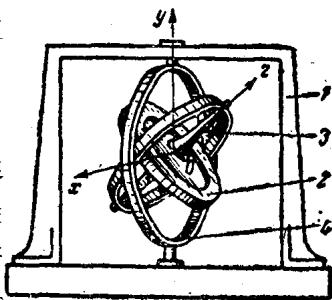


圖1.1 無定向陀螺儀。

例如，由於支架內摩擦的影響，陀螺儀支座1的轉動會引起它的轉子極軸 Oz 位置的改變。施於萬向支架任意平衡環上的力矩都將促使該平衡環繞其旋轉軸轉動。沖擊平衡環也會引起平衡環沿沖擊方向的旋轉。

現在我們使無定向陀螺儀的轉子以高速繞其極軸 Oz 旋轉。我們將這種旋轉稱為陀螺儀轉子的自轉。有了這種自轉，便意味著所研究的機構已由非陀螺體轉變為陀螺體。此後我們再重複轉子不轉動時所做過的各項動作。這時我們就會發現以下的現象。

陀螺儀的“慣性”現象

陀螺儀轉子軸具有“慣性”：當支座轉動時，雖然萬向支架軸內的摩擦曾經改變過極軸 Oz 的位置，而且還要繼續起作用，但是現在極軸位置的改變是不容易覺察得出來。同樣，用同樣的方法將

一个从前足以使陀螺仪平衡环转动好几周的冲击加于平衡环上，现在却不会产生任何明显的效果。

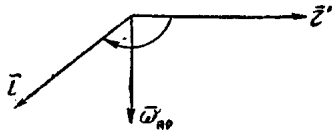
进动现象

在外加力矩作用下，陀螺仪运动的特性发生变化：加在陀螺仪外平衡环上的力矩会引起陀螺仪绕内平衡环轴而旋转，反之，加在内平衡环上的力矩会引起陀螺仪绕外平衡环轴而旋转。当外加力矩的方向改变时，则平衡环的转动方向也随之改变。

上述陀螺仪绕其平衡环轴的旋转称为陀螺仪的进动。

在观察陀螺仪转子自转的方向和外加力矩的方向之后，我们就得出下面的陀螺仪进动方向的定律：陀螺仪的进动—— ω_{mp} 力求使转子自转角速度向量 $\vec{\omega}_r$ 与引起这个进动的外加力矩的向量 $\vec{L}$ 相重合（图1.2）

继续观察就容易得出，除了外加力矩和旋转方向之间的“非一般”关系之外，进动还具有与非陀螺体所固有的运动所不同的其他特性。



这些特性如下：

1. 当转子自转的角速度一定

图1.2 陀螺仪的进动。

时，一定大小的进动角速度对应于一定大小的外加力矩；对于非陀螺体，一定大小的角加速度对应于一定大小的外加力矩。

因此，当外加力矩和转子自转的角速度均为一定不变时，进动角速度也将是一个定值；对于非陀螺体，当作用力矩为一定不变时，旋转角速度将要增加。

由此可见，虽然有着一定的作用力矩，但陀螺系统的能量在后一情况下却仍然保持不变的。这是很明显的：由外加力矩所产生的进动的平面垂直于该力矩所作用的平面。换句话说，维持进动的外加力矩是不做功的，即进动是一种不消耗能量的运动。

2. 当外加力矩大小为一定时，进动的角速度随着转子自转角

速度的增大而减小，并随后者的减小而增大。

当轉子自轉角速度大小为一定时，进动角速度随着外加力矩的增大而增大，并随后者的减小而减小。

3. 对应于一定大小的外加力矩和轉子自轉角速度的进动角速度，是在力矩加上时瞬間發生，而在撤去力矩时瞬間消失。

与此相同地，当力矩的大小改变时，进动角速度也就会沒有延遲地产生相应的改变。

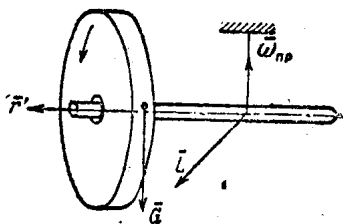
換句話說，进动是“无慣性的”。

然而，进动的这种特点与系統的能量在力矩作用下瞬时变化是不可能的概念發生矛盾，虽然所观察到的进动的产生在这种情况下意味着是系統能量有瞬間变化。

由此可見，进动的“无慣性”是一种表面上看到的現象。除了进动以外，外加力矩还产生一种观察不到的运动，在这个过程中力矩作功，它用来保証系統的能量增加到进动能量的值。这个运动称为章动，詳見 § 2.5, 2.6 和 2.7。

現在我們来研究带手柄的輪子运动的情况，它的軸固定在手柄的軸承內。

我們使輪子自轉，这样一來，它就变成了陀螺体。在由观察所建立的陀螺仪的进动現象基础上，應該可以預料到：这些运动將發生在垂直于重力 $\vec{G}$ 的力矩 $\vec{L}$ 作用平面的平面內（圖1.3）。这一現象实际上圖1.3 在重力力矩作用下的进动。是会發生的：如果將輪子手柄系于繩上悬挂起来，輪子不会下落，且在水平面內旋轉；完全一样地，如果將手柄立于桌上，輪子也不下倒，却以軸在空間画圓錐形而旋轉。



陀螺反作用現象

上面我們已經看到，外加力矩在垂直于力矩作用平面的垂直

面上引起进动运动。根据达朗贝尔 (Д'Аламбер) 原理: 作用于物体上的外力系或外加力矩系产生这样一种加速度运动, 在这种加速度所引起的惯性力系或惯性力矩系与外力系或外加力矩系大小相等, 方向相反。

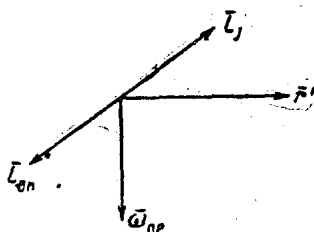


圖1.4 进动和陀螺反作用之間的关系。

由此可見, 进动运动时, 物体質点作加速运动的。由这些加速度产生的惯性力矩称为陀螺力矩或陀螺反作用力矩 $\overline{L}_j$ (圖1.4)。

§ 1.2. 所看到的陀螺現象之間的关系

当陀螺仪以足够大的速度自轉时, 支架的摩擦力矩在陀螺仪內引起的进动速度非常小, 以致于陀螺仪轉子軸的在观察時間不長內所出現的偏离实际上是看不出来。

由于冲击陀螺仪或者以类似方法在陀螺仪上加以有限外加力矩的結果而引起的进动角速度在很短的时间間隔內可能有相当大的值, 但是由于这种进动运动产生的轉子軸的偏离角实际上将是无法察觉出来, 因为冲击时进动的時間非常短促, 且等于加外加力矩的作用時間。

§ 1.3. 陀螺反作用的物理基础

正如已經指出的, 陀螺力矩乃是一种由加速度所产生的惯性力矩, 而此类加速度又是由于陀螺仪同时存在两种旋轉——繞轉子極軸的旋轉和自身軸的旋轉时所产生的。

現在我們来求这些加速度。

取一个以角速度 $\vec{\omega}$ 繞自身極軸旋轉的轉子。

在圖上 (圖1.5) 我們画出該轉子的赤道平面, 我們將这个平面視為垂直于轉子極軸并通过支承中心, 亦即通过陀螺仪的固定点的平面。在赤道平面上, 作相互垂直的軸 Ox 与 Oy , 但使它