

捷联式陀螺仪设计



国防工业出版社

捷联式陀螺仪设计

〔美〕 A. W. 劳伦斯 著

《捷联式陀螺仪设计》翻译组 译

国防工业出版社

1973

内 容 简 介

书中介绍了RI-1170捷联式陀螺仪的设计要点,探讨了陀螺元件型式及形状的选择,并给出了元件参数的计算数据;书中对陀螺仪以及陀螺马达、空气轴承浮子、电容式传感器、力矩器、软导线、磁悬浮、集成电路等进行了设计计算。但未列入实验数据。

本书可供从事陀螺仪及惯性导航系统的研究、设计工作的技术人员、工人及高等院校有关专业师生参考。

THE DESIGN OF AN ADVANCED STRAPDOWN GYROSCOPE

[美] A. W. Lawrence, et al

Hamilton Standard System Center

Farmington, Connecticut

15 February, 1970

*

捷联式陀螺仪设计

(只限国内发行)

《捷联式陀螺仪设计》翻译组 译

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

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

*

787×1092¹/₃₂ 印张 8 ¹/₁₆ 170千字

1973年12月第一版 1973年12月第一次印刷 印数: 0,001—5,000册

统一书号: 15034·1311 定价: 0.85元

出版说明

遵照伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，我们将《捷联式陀螺仪设计》一书翻译出版，供有关方面的同志们参考。本书译自美国的“NASA”报告。

捷联式惯性制导系统中的加速度计和陀螺仪是直接装在飞行器上的而不用惯性平台。它结构简单，可靠性好，成本低，寿命长，特别适合于宇宙飞船、运载火箭、弹道导弹等的制导。随着微电子技术的发展和新元件（如静电陀螺、激光陀螺等）的研制，它有可能取代目前广泛使用的平台系统。目前美国斯伯雷陀螺公司的捷联式敏感元件已经用于月球轨道飞行器的姿态控制系统，而联合飞机公司的捷联式系统则作为登月艇的备用系统，豪尼威尔公司的H-404型捷联式制导系统成功地制导了普莱姆飞行器。美国还计划在阿金纳和德尔它运载火箭上装设捷联式制导系统。国外有人认为，到七十年代后期，在宇航的惯性制导中至少将有一半采用捷联式系统。

美国联合飞机公司哈密尔顿标准中心研制的“RI-1170”捷联式单自由度陀螺仪，使用了动压支承和磁悬浮系统，并使用电容传感器等，它具有体积小、精度高、寿命长等特点，特别适合于用在捷联式制导系统中。

本书系哈密尔顿标准中心关于RI-1170捷联式陀螺仪的设计报告。书中叙述了RI-1170的设计思路，介绍了陀螺马

达、气体支承、磁悬浮、传感器及电子线路的计算方法和结果。但书中未能列入实验数据，这是其不足之处。本书可供从事陀螺仪及惯性导航系统的研究、设计工作的技术人员、工人及高等院校有关专业师生参考。

目 录

摘要	6
第一章 绪论	9
1.1 现有捷联敏感器的简述	10
1.2 RI-1170 陀螺的简述	14
第二章 陀螺设计指标——任务分析	21
2.1 要求的确定	21
2.2 任务的性能要求	23
2.3 任务的环境要求	26
第三章 陀螺设计的基本考虑	29
3.1 功率、尺寸和性能之间的关系	30
3.2 RI-1170 陀螺参数的确定	37
第四章 元件设计	40
4.1 旋转马达设计	40
4.2 气体轴承设计	57
4.3 浮子设计	92
4.4 传感器设计	96
4.5 力矩器设计	109
4.6 软导线的选择和设计	124
4.7 浮子的悬浮	132
4.8 外壳和安装面	168
4.9 再平衡电子回路	177
4.10 陀螺温度设计	239
参考文献	252

摘 要

第一代捷联式惯性导航系统是利用哈密尔顿标准中心的 RI-1139 B 陀螺制成的。此种陀螺是现代平台式陀螺的改进，主要是提高了输出力矩。虽然在阿波罗飞行任务中导航系统的性能很好，但是在飞机及助推器的工作中陀螺的应用受到限制，因此决定设计一种新的特别适用于捷联方案的陀螺 RI-1170。

由第二章中可知，现在所用加矩速率 $28^\circ/\text{秒}$ 是不适合的，而应约为 $60^\circ/\text{秒}$ 。现在陀螺浮子的悬浮刚度较低，为宝石轴承式。这种结构虽然适用于平台陀螺，但在捷联系统中，当绕输出轴的角速度大时，就不能工作。在大速率时，因存在陀螺力矩而增大了悬浮系统的负载，摩擦会使输出轴锁住。宝石轴承悬浮对阿波罗任务是适用的，因其速率低。未来任务则要求无摩擦悬浮，如磁悬浮。所以 RI-1170 陀螺用了有源磁悬浮（4.7 节），它可在 $300^\circ/\text{秒}$ 以内给出无摩擦性能。

为了减少捷联系统的费用，需要更大的可靠性及维护性。可靠性不仅要求没有意外故障，而且应长时间保持起始基准，因为捷联系统在运动体上是很难校准的。因此转子所用滚珠轴承换成气体轴承。这样不仅寿命长无故障，而且质量不平衡系数的稳定性高。RI-1170 希望每三个月校准一次，在三个月内系数稳定性为 $0.03^\circ/\text{时}$ （每个 g ），而现有陀螺为 $0.1^\circ/\text{时}$ （第二章）。为了保证达到此项目标，研究了材料

(4.3节) 及软导线 (4.6节), 以便做出最佳选择。

此外, 平台陀螺中的质量平衡调节在这里不用了, 因为它是不稳定源, 并且可以允许有大的质量不平衡及零偏绝对值。5度/时的值不会降低捷联系统的性能 (3.2节)。

维护性能要求敏感器通道可在外场更换, 而不需再校准系统。这点, RI-1170 是满足要求的, 因为采用了电、温度及机械安装面的标准化。

再平衡电子线路 (4.9节) 包括一个脉冲力矩伺服放大器, 为一调宽二位制系统, 有两个量程 ($0\sim 30$ 度/秒; $30\sim 60$ 度/秒), 装在陀螺内部。陀螺通道也是标准化的, 以给出标准输出脉冲。每个陀螺均有其自身温度控制器 (4.10节)。输入轴对准是利用三点安装法来保证的, 它确定了一个垂直于输入轴的平面。系统更换陀螺后输入轴可有 8 弧秒的误差。

为了选择所需性能的新型陀螺的正确尺寸, 研究了捷联式陀螺中功率、性能和尺寸之间的关系 (第三章)。结果陀螺动量矩选为 5×10^5 克·厘米²/秒, 尺寸为 $\phi 2.6$ 吋 $\times 5.25$ 吋 (包括再平衡回路, 温度控制器及磁悬浮电子线路, 均为微型电路)。每个敏感器通道总功率消耗最大为 18 瓦。

陀螺元件设计均按捷联式应用选择最佳参数, 例如, 力矩器是对称地放在浮子外围 (图 4), 而不是在浮子一端的悬臂方法。这样可以减小流体重力对流效应, 而且可充分利用磁性材料。结构独特的气体轴承“隙缝转子”使旋转能力超过 5 弧度/秒 (4.2节)。设计了电容式传感器 (4.4节), 以保证与悬浮系统或力矩器之间没有磁耦合。传感器经过陀螺充液部分中的微型电路前置放大器输出 (4.9节)。

本报告详细研究了元件型式及形状的选择, 并给出了元

件参数的计算值。这项工作是根据 NAS12-687 合同，并在哈伯特博士技术指导下进行的（1968.5~1969.9）。现在做出了三个敏感器通道以验证设计，第一个仪表的试验将在 1970 年年底进行，并在 1971 年 5 月完成。

第一章 绪 论

本节介绍了捷联系统的优缺点，叙述了阿波罗登月舱敏感器组合 (LM/ASA) 系统及 RI-1170 陀螺，并指出在敏感器组合 (ASA) 中用 RI-1170 代替 RI-1139 B 可使性能提高一个数量级。

近几年来，惯性测量装置或基准装置的测量精度及环境适应性已使其可以用在许多惯性导航、制导及控制系统中。这些装置最初均为平台式，它对特定运动体和特定飞行任务组合未必最佳。由于计算机技术的发展，使用捷联系统已成为可能，它有一些优点，如果适当利用，可在特定应用中成为最佳系统。在惯性测量装置中陀螺是最重要的元件。捷联式陀螺和平台式陀螺的性能是不同的。例如，捷联式陀螺具有更高的加矩速率，需承受更高的输入速率，并且其浮子应比平台陀螺具有较好的动平衡。目前捷联系统仍有缺点，因为它的陀螺是从平台仪表中演变过来的。

本报告所述陀螺，采用了集成电路包装，且特别适用于捷联系统。

本报告是哈密尔顿标准中心在 1968 年 5 月至 1969 年 9 月的工作总结。

捷联制导系统的主要优缺点如下：

优点：

- ① 敏感器可在运动体内定向以减少环境引起的误差

项目;

- ② 重量显著减轻;
- ③ 机械设计非常简单;
- ④ 易于在敏感器通道内实现重复 (提高可靠性的一种方法——译注), 例如用六个陀螺。

缺点:

- ① 陀螺质量相同时, 当系统受到严重角振动后动态误差较大;
- ② 当系统处在恶劣动态环境下, 力矩器刻度因数误差会引起明显的姿态角误差;
- ③ 陀螺限制了运动体最大可测角速度;
- ④ 使用前难以在运动体上校准捷联系统, 因此校准后要求敏感器误差源必须保持稳定。

1.1 现有捷联敏感器的简述

第一代捷联系统的陀螺只是将现有平台陀螺做很少改进而成的。例如增大液体阻尼, 增大力矩器输出, 以及调节框架使之具有等惯性。陀螺和脉冲再平衡电子线路相连以形成速率敏感器通道。

捷联系统现有技术的例子之一是哈密尔顿标准中心的阿波罗登月舱敏感器组合 (LM/ASA)。此系统有人监视, 并在过去一系列阿波罗任务中工作得很好。如图 1 所示, 在阿波罗登月舱敏感器组合 (LM/ASA) 中, 惯性仪表按正交坐标系装在铍壳内, 构成一种稳定刚性安装, 并作为装置的安装座以及内部电子线路的导热通路。有一个绝缘罩以消除温度和电的有害影响。包括安装脚和连接器的外廓尺寸为

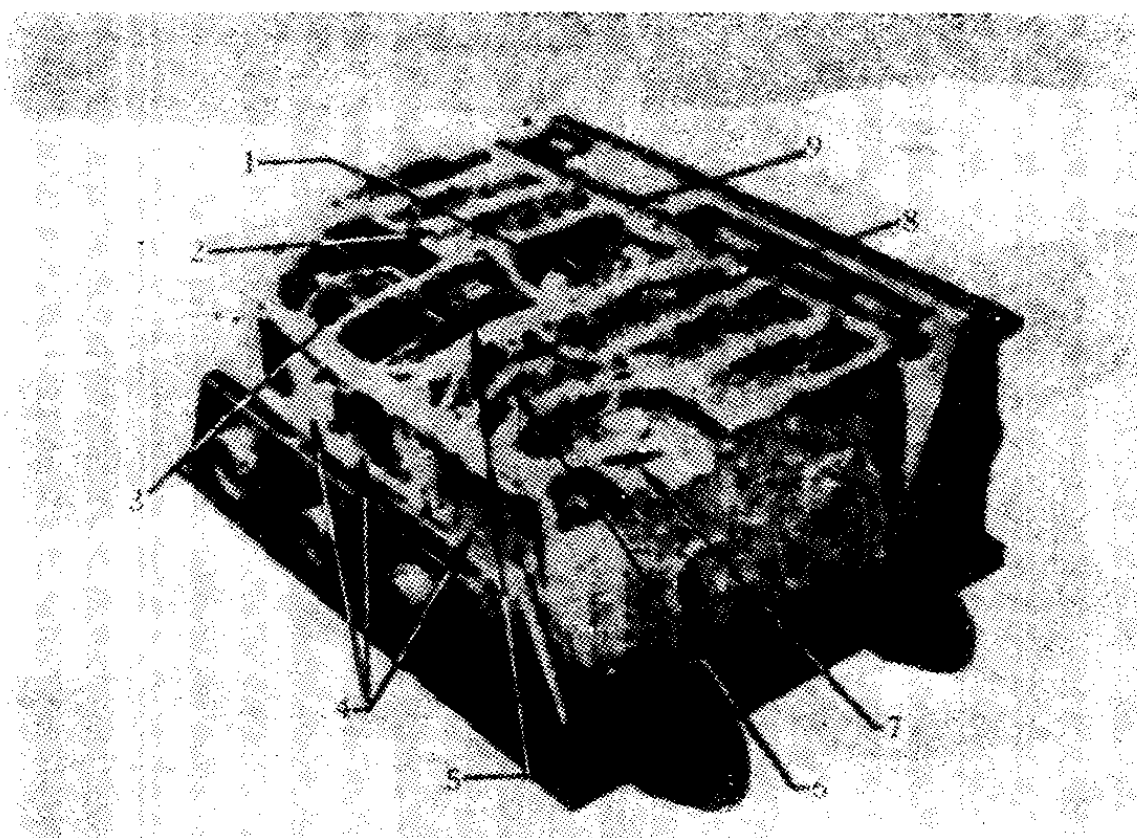


图1 阿波罗登月舱敏感器组合

1—陀螺；2—脉冲力矩伺服放大器PTSA；3—温度控制器细调；
4—内表面电子设备；5—加速度表；6—陀螺不对称模件；7—频率控制系统；8—快速加热器；9—电源。

11.5×9.0×5.06 吋，重量为 20.7 磅。

阿波罗登月舱敏感器组合 (LM/ASA) 的惯性装置的主要性能见表 1。

图 2 为系统所用的 RI-1139 B 陀螺。陀螺 (及加速度计) 的再平衡回路电子线路 (脉冲力矩伺服放大器 PTSA) 的等效零偏稳定性比现有的敏感器高一个数量级，因此保证了基本仪表的性能。由于脉冲力矩伺服放大器采用了微型电子元件及先进制造技术，故工作极为可靠。图 3 为阿波罗登月舱敏感器组合 (LM/ASA) 电子组件的散装照片图。

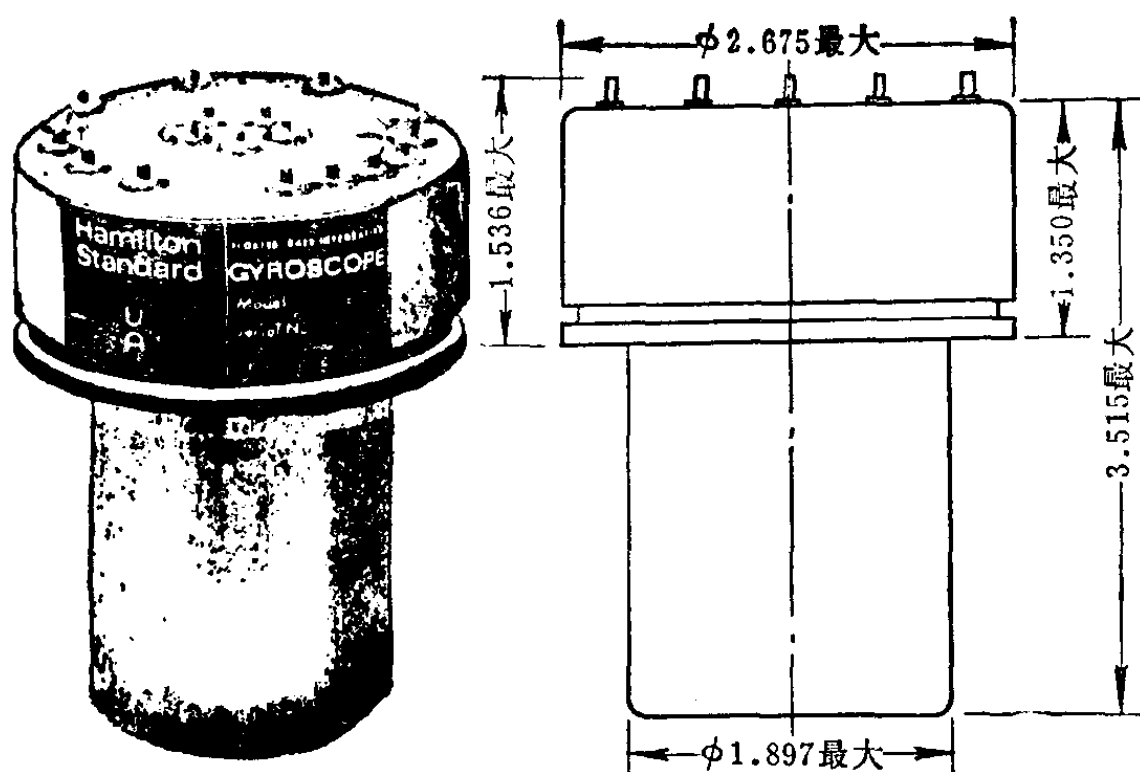


图 2 RI-1139B陀螺仪

脉冲力矩伺服放大器采用强迫极限环加矩技术，它是利用一个数字化的脉冲调制的恒流反馈信号以在敏感器中保持力矩平衡。在敏感器组合（ASA）中每一个惯性敏感器均有一个脉冲力矩伺服放大器。陀螺与加速度计的脉冲力矩伺服放大器的区别，只是其加矩功率及频率补偿网络不同。

在第二代捷联系统中，在下列方面改进了敏感器：

- ① 标准化，使陀螺易于更换；
- ② 零偏稳定性及质量不平衡系数稳定性高；
- ③ 寿命长。

概括地说，用 RI-1170 代替 RI-1139 B 及其脉冲力矩伺服放大器，可使阿波罗登月舱敏感器组合（LM/ASA）的性能提高 8 到 10 倍左右。

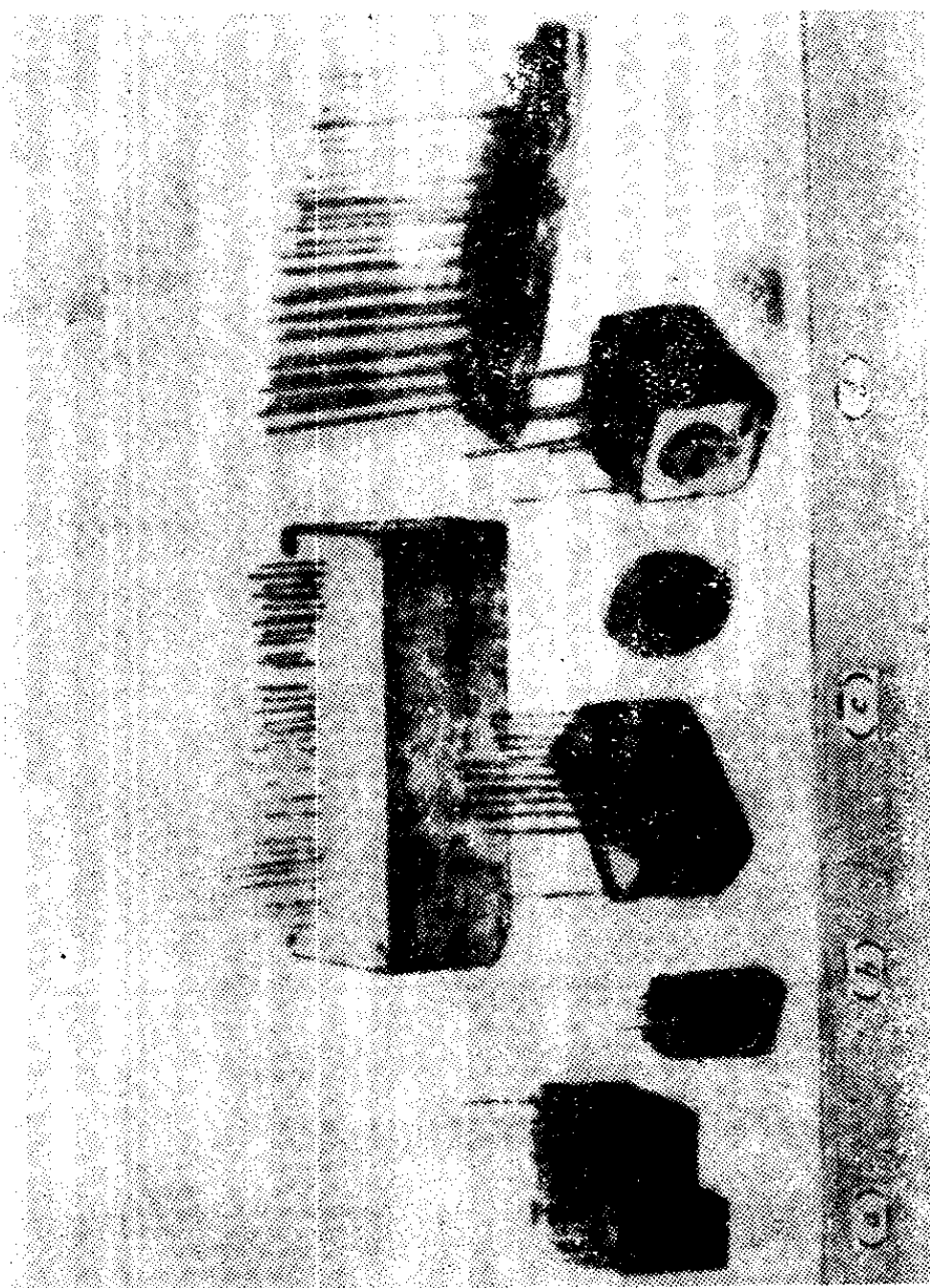


图3 LM/ASA的脉冲力矩伺服放大器 (PTSA)

a—放大器和解调器; *b*—数字转换器; *c*—电桥和驱动器; *d*—电流调制器。

表 1 LM/ASA 的性能——1 西格马值 (1σ)

速率敏感性能		加速度敏感性能	
项 目	ASA性能	项 目	ASA性能
1.陀螺/PTSA 零偏		1.加速度计/ PTSA零偏	
a.120天稳定性	0.22度/时	a.120天稳定性	$50 \times 10^{-6} g$
b.每天稳定性	0.04度/时	b.每天稳定性	$5 \times 10^{-6} g$
2.陀螺/PTSA的 刻度因数		2.加速度计/ PTSA刻度因数	
a.120天稳定性	130×10^{-6}	a.120天稳定性	30×10^{-6}
b.每天稳定性	11×10^{-6}	b.每天稳定性	2×10^{-6}
3.陀螺自转轴(SA) 的质量不平衡		3.加速度计校准	
a.120天稳定性	0.19度/时/g	a.120天稳定性	8 弧秒
b.每天稳定性	0.03度/时/g	b.每天稳定性	2 弧秒
4.陀螺输入轴(IA) 的质量不平衡		4.灵敏限	$< 5 \times 10^{-6} g$
a.120天稳定性	0.26度/时/g		
b.每天稳定性	0.03度/时/g		
5.陀螺输入轴校准			
a.120天稳定性	12弧秒		
b.每天稳定性	4 弧秒		
6.脉冲称重	3.15弧秒/脉冲		
7.速率灵敏限	0.023度/时①		

①不确定，属于估计。

1.2 RI-1170 陀螺的简述

陀螺为单自由度、液浮、速度积分仪表，是专为捷联系统设计的，它具有下列特点：

- ① 系统可更换：
 - a. 自带再平衡回路，具有标准安装面；
 - b. 自带加温器及温度控制器；

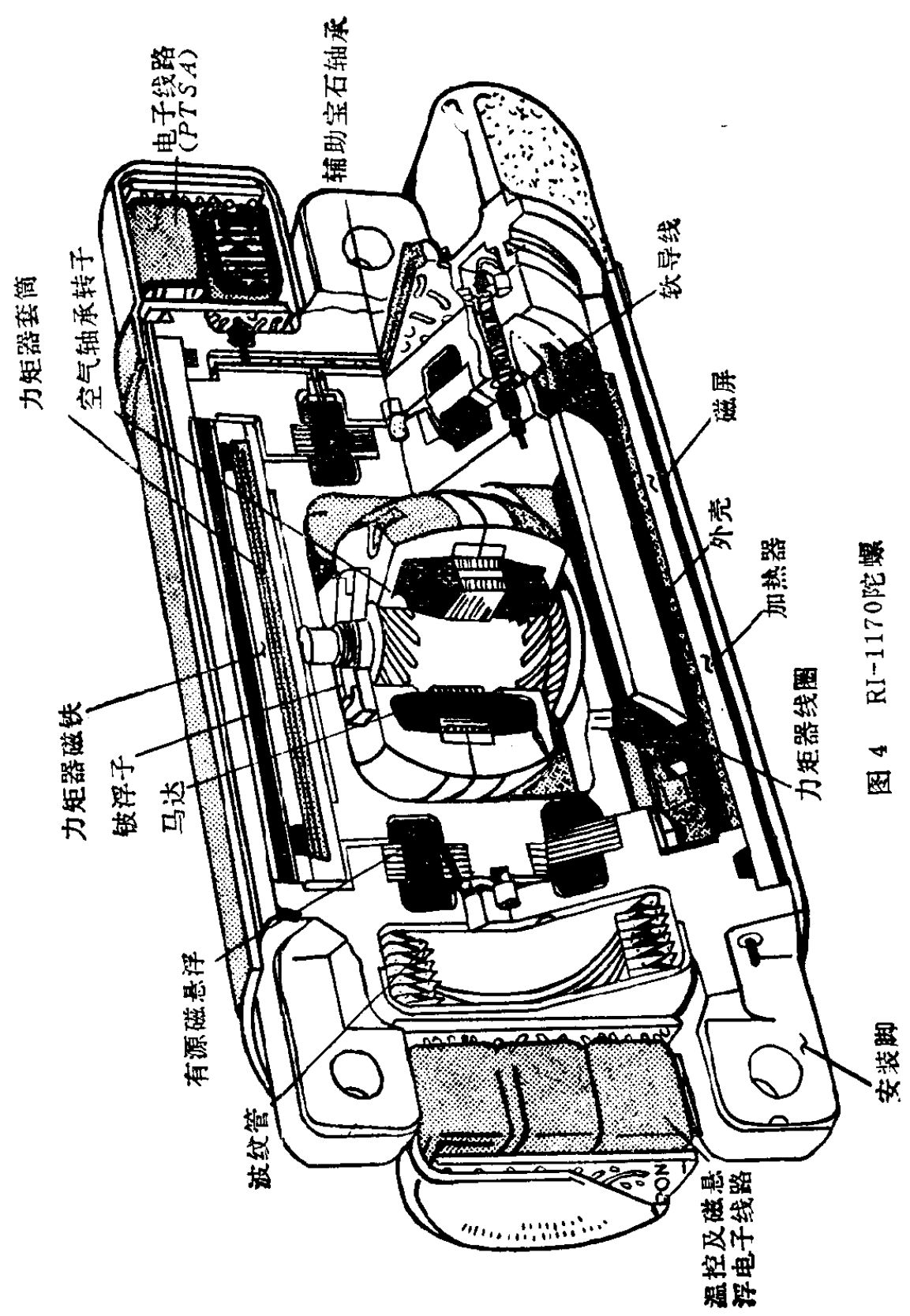


图 4 RI-1170陀螺

c. 输入轴机械对准标准化。

② 有两档精密再平衡加矩, 达 60 度/秒, 并将监控能力减低为 300 度/秒。

③ 输出轴用有源磁悬浮。

④ 具有独立的输入控制加矩能力, 可达 1 度/秒。

⑤ 动压式气体轴承转子。

⑥ 电容式传感器。

陀螺的剖面图和外廓尺寸见图 4 及 5。

陀螺的主要部件有: 陀螺马达、气体轴承转子、浮子、传感器、力矩器、有源磁悬浮、软导线、外壳及安装面、再平衡电子线路及加热器和温度控制器。

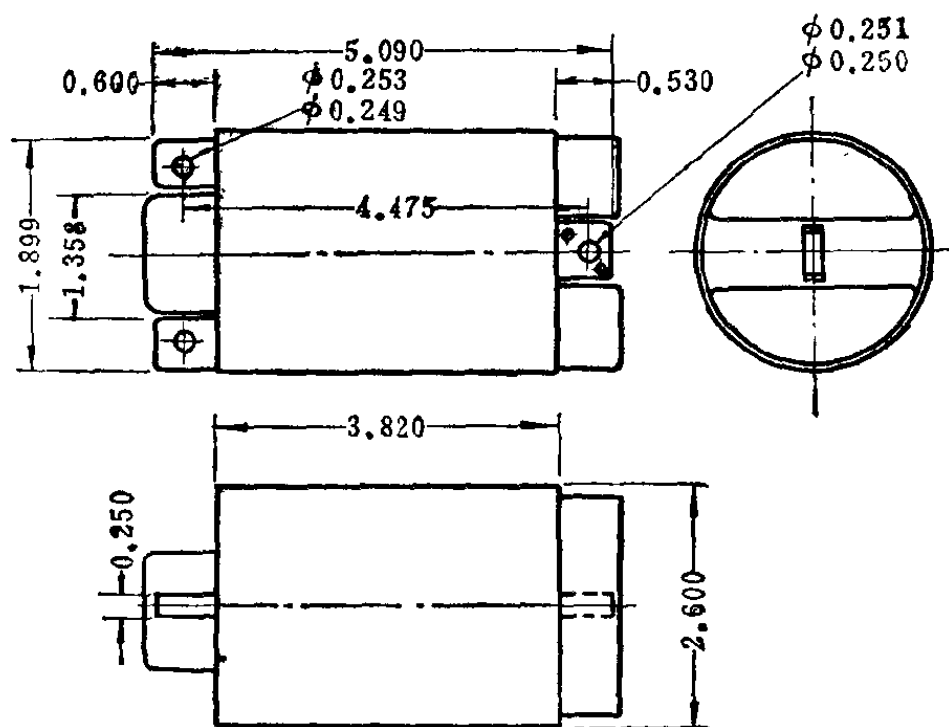


图 5 RI-1170陀螺外形图

陀螺设计的环境技术条件:

不工作时

环境温度 (°F)

-65~+160