




静电陀螺仪技术

高钟毓 著



清华大学出版社



静电陀螺仪技术

高钟毓 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书重点讨论静电陀螺仪获得长期运行的高精度所必须采取的相关技术。主要内容包括总体技术方案、电极电容与静电力、静电支承系统、加转阻尼恒速及剩余磁场干扰力矩、质量不平衡静电陀螺的运动、漂移误差力矩与误差模型、壳体翻滚自动补偿装置、热稳定性以及漂移误差模型辨识等。

本书不仅对从事惯性技术方面工作的工程技术人员具有重要参考价值,而且可作为高等学校惯性技术相关专业的研究生教材。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13901104297 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

静电陀螺仪技术/高钟毓著. —北京:清华大学出版社,2004.8

ISBN 7-302-08778-4

I. 静… II. 高… III. 电浮陀螺仪 IV. TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 054028 号

出版者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社总机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

组稿编辑:张秋玲

文稿编辑:陈 力

印装者:三河市春园印刷有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:153×235 印张:16 字数:268千字

版 次:2004年8月第1版 2004年8月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-08778-4/TH·126

印 数:1~2000

定 价:32.00元(平装)

48.00元(精装)

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103或(010)62795704

序

静电陀螺仪是一种自由转子陀螺仪,具有极稳定的定轴性,是长时间自主导航系统的核心敏感元件,它的发明和研制是惯性技术发展的一个里程碑。自从20世纪50年代美国伊利诺伊大学(University of Illinois)诺尔德西克(Nordseik A. T.)教授提出静电陀螺仪概念以后,美国、俄罗斯、法国都经过了20余年的研究,才分别于70、80及90年代成功研制静电陀螺仪,并先后获得实际应用。此后,静电陀螺导航仪和静电陀螺监控器一直是这些国家海洋远程运载器的主要导航设备。而且,在今后相当长的一段时期,它仍然具有生命力。

静电陀螺仪是机光电集成的超精密仪器,它的研制存在多方面的困难:多学科综合,技术复杂,研制周期长,研制投入大。静电陀螺仪的研制成功体现了一个国家在这一领域及相关科学技术领域的综合水平。

本书作者高钟毓教授参加了我国静电陀螺仪研制的全过程,他在章燕申教授等取得的科研成果的基础上,进行了正式样机的研制,为我国发展静电陀螺仪技术做出了贡献。这本专著是他多年来从事静电陀螺仪研究的总结。

本书的特点是,全面系统地论述了与静电陀螺仪精度相关的技术问题,理论分析深入,关键技术经过实践验证,为保证静电陀螺仪长时间工作精度而提出的技术措施准确,具有总结性和前瞻性。本书内容虽然针对的是静电陀螺仪技术,但对于研发其他静电式仪器,例如,静电加速度计、重力梯度仪、微机电惯性仪表等,也具有重要参考价值。它不仅是从事惯性技术研究、生产及使用的工程技术人员的一本有价值的参考书,也可作为高等学校惯性技术相关专业的研究生教材。

丁衡高

2004年2月12日

前 言

自从美国伊利诺伊大学(University of Illinois)诺尔德西克(Nordseik A. T.)教授提出静电陀螺仪概念以来,静电陀螺仪在世界范围内的研究和应用已经经历了半个世纪的发展历程。在长时间高精度应用领域,静电陀螺仪一直独占鳌头,并且,在可预见的未来,还没有其他惯性仪器可在这些应用领域取代它。

我国自1965年立项研制静电陀螺仪以来,断断续续研究了将近30年,大体经过了三个阶段:1965—1976年的原理研究,1981—1990年的精度攻关以及2000年以后的正式样机研究。从事这项研制工作的单位主要有清华大学、上海交通大学、常州航海仪器厂及天津航海仪器研究所。特别是在精度攻关的10年中,在章燕申教授领导下,我国研制成功的空心铝球转子样机经过力反馈法和双轴伺服法测试,24h样本的随机漂移精度达到了 $0.001^{\circ}/\text{h}$,为我国静电陀螺仪的发展奠定了基础。

本人自青年时期就参与了这项研究课题,亲身经历了我国静电陀螺仪研制的全过程,还指导了多位相关专业的博士研究生和博士后的论文,在理论上和实践上积累了一些体会和心得。最近几年,忙里偷闲,经过整理写出了这本拙作,目的是供后来者(特别是青年人)参考。

本书的重点是讨论与静电陀螺仪精度相关的技术,而未深入讨论关键元部件的制造工艺。主要内容包括总体方案、静电支承系统、加转阻尼恒速、漂移误差力矩与模型、壳体翻滚、热稳定性及误差模型辨识等方面的技术。结论是:保证静电陀螺仪长时间工作的高精度,必须依靠球形转子和电极碗的超精密加工、高刚度高稳定的静电支承系统、严格的磁屏蔽和超高真空、精确的平台框架伺服(含测角传感器),并附加壳体翻滚、恒速恒温控制及误差模型软件补偿等一系列技术措施。

在本书编写过程中,中国惯性技术学会理事长、中国工程院院士丁衡高教授给予了很大的鼓励和支持,并亲自为本书作序,借此机会表示衷心的感谢。

谢。同时,还要感谢过去和现在一起工作的各位老师和研究生,本书中有的内容包含了他们辛勤劳动的成果。

由于作者本人学术水平有限,书中一定存在不少错误和不足,热忱欢迎同行专家和读者予以批评指正。

作者

2004年2月

目 录

1 总体技术方案与性能分析	1
1.1 发展简史	1
1.2 空心转子静电陀螺仪	3
1.2.1 $\phi 38\text{mm}$ 空心转子静电陀螺仪	3
1.2.2 $\phi 50\text{mm}$ 空心转子静电陀螺仪	7
1.3 实心转子静电陀螺仪	9
1.4 两类静电陀螺仪技术比较	12
1.5 静电陀螺仪的一般运动特性	17
1.5.1 理想静电陀螺仪	17
1.5.2 实际静电陀螺仪	21
1.6 静电陀螺导航/监控器系统	26
1.6.1 SPN/GEANS 和 GEO/SPIN 系统	28
1.6.2 静电陀螺导航仪(ESGN)系统	29
1.6.3 静电陀螺监控器(ESGM)系统	30
2 电极电容与静电支承力计算	33
2.1 电极间隙、电容及静电力计算公式	33
2.1.1 电极间隙表达式	33
2.1.2 电极电容计算式	34
2.1.3 静电力计算式	36
2.2 6块正交圆电极电容	37
2.3 正六面体投影电极电容	39
2.4 正交6块圆电极静电支承力	43
2.5 正六面体投影电极静电支承力	53
3 静电支承系统分析与设计	60
3.1 基本工作原理、要求及分类	60
3.1.1 基本工作原理	60

3.1.2	技术指标	63
3.1.3	系统分类	64
3.2	无源静电支承系统	66
3.3	恒流控制静电支承系统	69
3.4	直流电压控制静电支承系统	78
3.5	可变预载静电支承系统	80
3.6	数字式静电支承系统	83
3.6.1	转子位移测量电路	84
3.6.2	调制式高压直流放大器	86
3.7	静电支承系统控制器设计	93
3.7.1	PID 控制器设计	93
3.7.2	反馈线性化	96
3.7.3	变结构、变预载控制	100
4	磁场加转、阻尼定中及恒速系统	104
4.1	电磁力矩基本公式	104
4.2	运动方程与“零”次近似解	106
4.3	直流磁场阻尼定中特性	107
4.4	脉动磁场的电磁力矩	109
4.5	外磁场干扰力矩与磁屏蔽	111
4.6	旋转磁场的施矩特性	113
4.7	加转-恒速控制电路	115
4.8	磁场恒速系统分析与调整	117
5	质量不平衡静电陀螺的运动	121
5.1	运动微分方程	121
5.2	“快”变量近似解	124
5.2.1	质量不平衡量表达式	125
5.2.2	静电支承力稳态解	125
5.2.3	转子中心运动轨迹	126
5.3	“慢”变量近似解	128
5.3.1	小章动角运动	129
5.3.2	陀螺摆运动	130

5.4	静电场恒速系统	131
6	静电力矩与漂移误差模型	136
6.1	转子非球形描述	136
6.2	静电力矩表达式	138
6.2.1	电压驱动静电力矩	138
6.2.2	电流驱动静电力矩	143
6.3	静电力矩与漂移角速度计算方法	145
6.4	一次静电力矩与漂移角速度	148
6.4.1	一次静电力矩	148
6.4.2	漂移角速度	153
6.5	转子失中度二次静电力矩与漂移角速度	156
6.6	电极碗装配误差二次静电力矩与漂移角速度	160
6.7	静电陀螺仪漂移误差模型	168
7	壳体翻滚自动补偿技术	173
7.1	壳体翻滚方式	173
7.2	壳体翻滚运动分析	177
7.3	壳体翻滚对磁场干扰力矩的调制平均作用	181
7.4	壳体翻滚对一次静电力矩的调制平均作用	185
7.5	壳体翻滚对二次静电力矩的调制平均作用	188
7.6	壳体翻滚条件下的漂移误差模型	190
8	静电陀螺仪的热分析与计算	196
8.1	前言	196
8.2	静电陀螺热传导模型	197
8.2.1	热传导微分方程	197
8.2.2	边界条件	198
8.2.3	初始条件	199
8.3	转子温度的简化分析	199
8.4	球形转子冷却过程与温升	201
8.5	转子温度的时域响应	206
8.6	壳体内温度分布不均匀的影响	208

8.7	结论及热设计原则	211
8.7.1	结论	211
8.7.2	热设计原则	212
9	静电陀螺漂移误差模型辨识	214
9.1	双轴伺服法测试原理与分类	214
9.2	完整的漂移误差数学模型	216
9.3	双轴伺服转台运动轨迹	217
9.3.1	极轴陀螺试验	218
9.3.2	赤道陀螺试验	220
9.4	双轴伺服试验可辨识的漂移误差模型	222
9.4.1	极轴陀螺试验的漂移误差模型	222
9.4.2	赤道陀螺试验的漂移误差模型	224
9.5	漂移误差模型系数估计算法	226
9.5.1	最小二乘估计	227
9.5.2	广义卡尔曼滤波算法	229
9.6	测试和仿真结果	232
9.6.1	极轴陀螺测试结果	232
9.6.2	赤道陀螺试验仿真结果	234
	参考文献	238

1

总体技术方案与性能分析

摘要 静电陀螺仪是一种高精度的自由转子陀螺仪,在海、陆、空、天等诸多领域都得到了很好的应用。本章的主要内容是讨论其基本原理和应用。首先,简要介绍其发展历史过程,分实心转子和空心转子两种不同的静电陀螺仪方案,叙述它们的工作原理和主要关键技术;其次,从承载能力、工作精度、加工难易等多个角度比较这两种静电陀螺仪的优缺点;再次,讨论理想静电陀螺仪和实际静电陀螺仪的一般运动特性和分析方法;最后,引用公开文献报道,叙述静电陀螺导航仪和静电陀螺监控器系统的组成和性能。

1.1 发展简史

静电陀螺仪是一种球形转子自由陀螺仪。它的基本概念是在美国大力发展战略核潜艇时代,由伊利诺伊大学诺尔德西克教授于1954年向海军研究办公室提出来的。当时,他提出的方案如图1.1所示。转子为赤道上带有土星环的空心球,它被密封在具有相似内腔但稍大一点的壳体内。转子和壳体球面部分形成静电轴承,将转子悬浮在壳体内;而土星环形成电容式角度传感器,用来测量转子主轴相对壳体的转角。同时,该方案还采用双轴伺服框架隔离载体运动,以保持壳体与转子方位一致。这种陀螺与常规陀螺不同,对转子是不施矩的。因此,除了漂移之外,转子主轴和壳体对应的轴将在惯性空间保持相同的姿态。这是一种二自由度

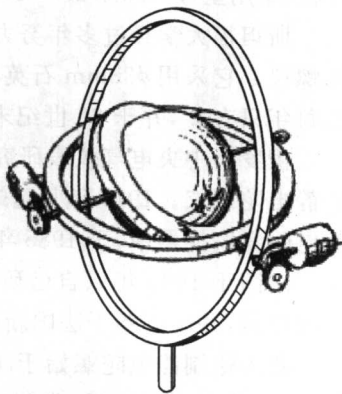


图 1.1 诺尔德西克发明的 ESG

框架式结构陀螺仪。后来经过实践研究,才逐步改进为现在的球形转子自由陀螺仪。

1955年美国海军正式立项。Honeywell公司、General Electric公司及Arma公司很快也加入了该研究项目。Rockwell跨国公司的Autonetics分公司是1959年开始静电陀螺仪研究的。在20世纪50—60年代,Honeywell公司和Autonetics分公司都曾致力于开发全姿态输出静电陀螺仪,研发捷联式静电陀螺导航系统,并尝试将其应用于航空和航天领域,但至今均未成为装备。

Honeywell公司始终采用赤道加厚的 $\phi 38\text{mm}$ 空心铍球转子光电信号器读取姿态信号的方案,1979年研制成功了静电陀螺仪四环式空间稳定平台惯性导航系统SPN/GEANS(军用型号AN/ASN—136系统)。该系统最初应用于B—52战略轰炸机,后来又应用于F—111隐形战斗轰炸机,使投弹圆概率误差和导弹系统的初始对准误差大大减小(增加重力补偿软件功能后,长时间导航误差可减少到 0.02nm/h)。20世纪80年代,SPN/GEANS经过改进成为精密惯性测量系统GEO/SPIN,广泛应用于海、陆、空大地测量,不仅能测量经纬度、高程,而且能测量重力异常。

Rockwell公司的Autonetics分公司采用 $\phi 10\text{mm}$ 实心铍球转子质量不平衡调制读取全姿态信号的方案,1974年研制成功静电陀螺监控器(ESGM)样机。1979年以后静电陀螺监控器与舰船惯性导航系统配套,陆续装备了美国“三叉戟”弹道导弹核潜艇;同时,又对拉菲特级核潜艇进行了改装,增加了静电陀螺监控器。1978年完成静电陀螺导航仪(ESGN)工程样机(军用型号AN/WSN—3),1985年开始装备攻击型核潜艇和水面舰艇。

斯坦福大学经过多年努力,研究了应用于验证爱因斯坦相对论的静电陀螺仪。它采用 $\phi 38\text{mm}$ 石英晶体转子,在空间失重状态下,定向精度可高达每年只有 $2''$,并于20世纪末完成了地面试验。

俄罗斯中央电气仪表研究所采用 $\phi 50\text{mm}$ 的空心铍球转子带壳体旋转的静电陀螺仪。1975年其陀螺漂移已达到 $0.0005^\circ/\text{h}\sim 0.0001^\circ/\text{h}$,并用于静电陀螺监控器中,于1985年装备了“台风”级导弹核潜艇。

法国于1993年以自己研制的静电陀螺为核心敏感元件组成了静电陀螺监控器,并已装备了法国新一代“凯旋”导弹核潜艇。

我国研制静电陀螺始于1965年。先后参与过该课题研究的单位有清华大学、上海交通大学、常州航海仪器厂,以及天津航海仪器研究所。1965年至1968年,主要开展方案研究和单项技术攻关。1968年至1970年,进

进行了原理样机研究。原理样机采用 $\phi 38\text{mm}$ 空心铝球转子、95% 氧化铝陶瓷电极碗、冷阴极小钛泵维持超高真空、极坐标光电测角传感器,以及方波交流静电支承电路。从 1971 年开始,开展了静电陀螺在有关方面的应用研究。例如,静电陀螺三轴稳定平台、海洋重力仪水平平台等,并且,分别在空中和海上完成了性能试验验证。

在“六五”,“七五”两个五年计划期间,以清华大学为技术抓总单位,研制重点放在提高静电陀螺仪的漂移精度上。1985 年,采用力反馈法完成随机漂移误差的测试与鉴定。1990 年,采用双轴伺服转台测试法,完成了漂移误差模型辨识,分离出了 g^0 项、 g^1 项及 g^2 项漂移误差系数。

“八五”和“九五”期间,空心铝球转子静电陀螺仪研究中断。后来,清华大学开展了铍球转子静电陀螺仪的研究,在结构、材料、工艺及系统技术等各个方面,都进行了重大改进和提高。研究结果证明:铍球转子静电陀螺仪的精度和长期工作稳定性比铝球转子静电陀螺仪好得多,达到了预定的研究目标。

1.2 空心转子静电陀螺仪

1.2.1 $\phi 38\text{mm}$ 空心转子静电陀螺仪

在美国空军支持下,Honeywell 公司在 20 世纪 60 年代初期开始研制飞机用的静电陀螺仪,前后经过 5 个回合:(1)原理模型;(2)微型静电陀螺仪(1966—1967 年);(3)工程样机;(4)改进型样机;(5)标准精密导航系统 (SPN)的静电陀螺仪。

SPN/GEANS 静电陀螺仪的原理示意如图 1.2 所示。机械部分包括:

- (1) 转子和支承电极组合件;
- (2) 极轴与赤道光电传感器;
- (3) 真空泵及真空测量装置;
- (4) 冗余轴施矩线圈;
- (5) 温度控制装置;
- (6) 磁屏蔽罩。

其中,转子为 $\phi 38\text{mm}$ 空心铍球,质量 $1 \times 10^{-2}\text{kg}$,转子转速范围为 $38400\text{r}/\text{min} \sim 43200\text{r}/\text{min}$ ($640\text{Hz} \sim 720\text{Hz}$)。静止时,转子为一长球,极轴方向直径约比赤道方向直径长 50×10^{-6} 倍,即 $50 \times 10^{-6} \times 38 \times 10^3 = 1.9(\mu\text{m})$ 。工作转

速时,离心力使转子变成圆球。注意,转子采用铍的原因主要是它具有比重轻、杨氏模量高、温度膨胀系数小等优良的特性。

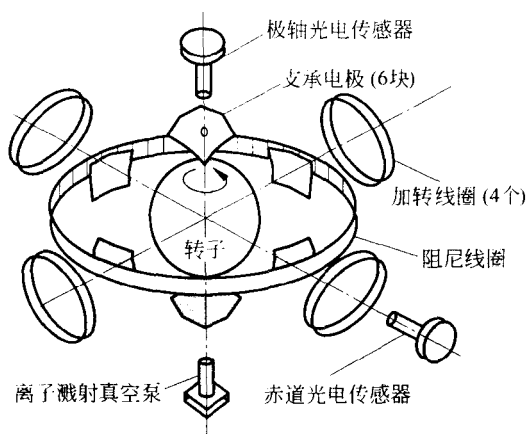


图 1.2 静电陀螺仪示意图

支承电极碗的材料为氧化铝陶瓷。内球面六面体投影电极由金属化工工艺形成。上、下电极碗装配后的非球度误差小于 $1\mu\text{m}$, 电极与转子间的间隙为 $50\mu\text{m}$ 。电极球腔内的真空度为 $2.25 \times 10^{-6} \text{Pa}$, 由热阴极小钛泵维持, 热阴极小钛泵寿命为 75000h。

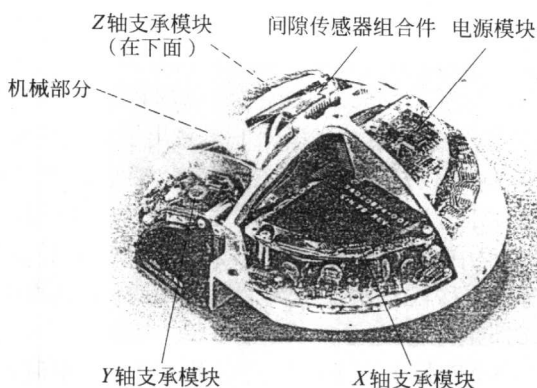
极轴光电传感器给出正弦波误差信号, 其幅值与转子自转轴相对传感器光轴的偏角成正比。转子上有两条子午线方向的刻线, 转子每转 1 圈, 赤道光电传感器给出 4 个脉冲信号, 用来作为光电测角解调器的参考信号。

电极碗的温度控制在 $82^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ($180\text{F} \pm 2\text{F}$)。在温控装置的测温点上, 要求温控精度为 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 。电极碗上的加热器功率为 15W。当静电陀螺仪启动时, 需要采用 75W 的加热器。

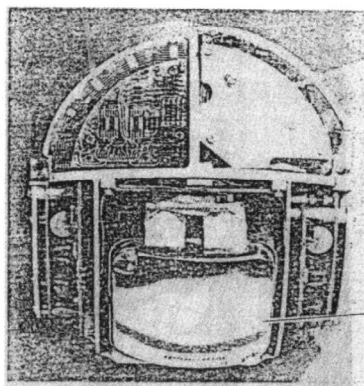
SPN/GEANS 静电陀螺仪采用模块式结构, 如图 1.3 所示。

机械部分为组装式结构。其中, 光电传感器、冗余轴加矩线圈以及真空泵安装在陶瓷电极碗组合件上。加转线圈和阻尼线圈也组装成一体。机械部分全部封装在磁屏蔽罩内。

电路部分包括 5 个模块(见图 1.3(a)): ①三轴支承控制, 每轴 1 块, 共计 3 个模块; ②电源模块 1 块, 它包括直流 $\pm 6\text{V}$ 电源, 由直流逆变器产生; ③电容电桥与测量电路模块 1 块, 它包括交流 6V, 2MHz 的三相测量电源和三相 20kHz(后来改为 2kHz)的支承电压调制器电源。



(a)



(b)

图 1.3 SPN/GEANS 静电陀螺仪照片

(a) 总装图; (b) 正视图

外部电源为+37V 直流,并有+35V 直流电池作为备用电源。二者用二极管隔开,一旦外部电源断电,电池可保证静电陀螺仪工作 5min,并使转子停转。

支承电路由混合集成电路组成。转子位移采用电容电桥测量。电桥的输出信号经过放大和解调,产生与转子位移成比例的直流信号。这一直流信号再经过 PID 控制器后,调制成 20kHz 的交流电压。然后,经过高压变压器升压,产生所需的支承高压,并加到对应的支承电极上。支承系统刚度为 $3.85\text{N}/\mu\text{m}$ 。X,Y,Z 三轴支承电压控制电路相同,每一轴的电路为

1 个模块,且具有互换性。各个电路模块之间(包括支承高压的连线在内)均采用带状软导线和 25 芯的接插件连接,而不采用焊接方式。5 个电路模块上都有相应的测试点,以便于查错。静电陀螺仪的机械部分与电路部分之间也通过接插件连接。关键电路在接插件上还采用了双线连接。

SPN/GEANS 静电陀螺仪没有恒速控制和壳体翻滚装置。在真空中工作时,衰减速率为 0.01Hz/h,静电陀螺仪可连续工作一星期,才需要校正。静电陀螺在工作过程中,转速逐渐衰减而偏离额定值时,转子的非球度误差将发生变化,从而使漂移误差系数增大。因此,在标定过程中,应当采用两种不同的转速来测定漂移误差系数值。

当 SPN/GEANS 静电陀螺仪用于四环式空间稳定平台中时,一只静电陀螺仪的冗余轴由冗余轴线圈锁定。它对陀螺的另一根工作轴会产生耦合误差,必须加以校准和补偿。

法国 SAGEM 公司与海军合作研制的静电陀螺仪,吸收了 Honeywell 空心铍球转子方案,但其他结构及控制电路基本上是依据 Autonetics 分公司的实心铍球转子(见 1.2.2 节)所采用的原理。该静电陀螺仪原理结构如图 1.4 所示。

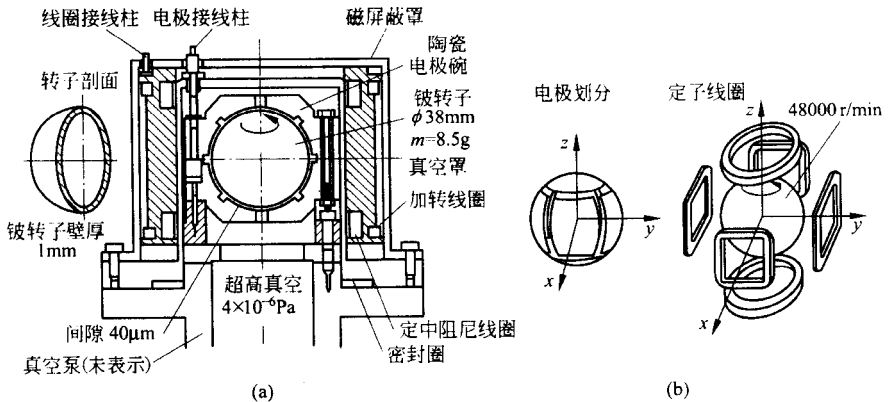


图 1.4 法国静电陀螺仪结构方案

空心铍球转子外径 $\phi 38\text{mm}$,平均壁厚 1mm,质量 $8.5 \times 10^{-3}\text{kg}$ 。依靠赤道环加厚形成转子最大惯性主轴。转子外表面加工成长球,在额定转速 48000r/min(800Hz)时,依靠离心变形成为圆球。

陶瓷碗内表面采用金属化工艺制成 6 块正交电极,电极与转子表面之间的间隙为 $40\mu\text{m}$ 。静电支承系统采用一个三相电源同时解决转子位移测量和对转子施加静电控制力的方案。

真空密封采用不锈钢钟罩。它套在陶瓷电极碗的外面,陶瓷碗安装在真空法兰盘上。法兰盘与钟罩之间依靠金属丝实现真空密封。钟罩内由离子溅射泵维持 4×10^{-6} Pa 的真空度。

定子线圈套在钟罩的外面,用于转子加转、制动及章动阻尼。陀螺仪启动后,定子线圈断电,停止使用。

转子具有径向质量偏心。采用质量不平衡调制法测量转子自转轴相对电极壳体的转角。

该陀螺研制成功后,应用于空间稳定四环平台式静电陀螺监控系统。

1.2.2 $\phi 50$ mm 空心转子静电陀螺仪

俄罗斯(前苏联)在 20 世纪 60 年代有多家军工研究所从事静电陀螺仪研究,分别为航空、航天及航海服务。但是,直到 80 年代,只有中央电气仪表研究所一家获得了成功,并且在核潜艇上得到实际应用。其余数家在苏联解体后先后下马。

中央电气仪表研究所的静电陀螺仪带壳体翻滚装置(自动补偿装置),型号为 Д-15,其结构和外形尺寸如图 1.5 所示。外形尺寸 $\phi 148 \times 230.4$,质量 ≤ 9.6 kg。其中,静电陀螺仪本身(不带壳体翻滚装置)为 $\phi 134 \times 152$,质量 6 kg。

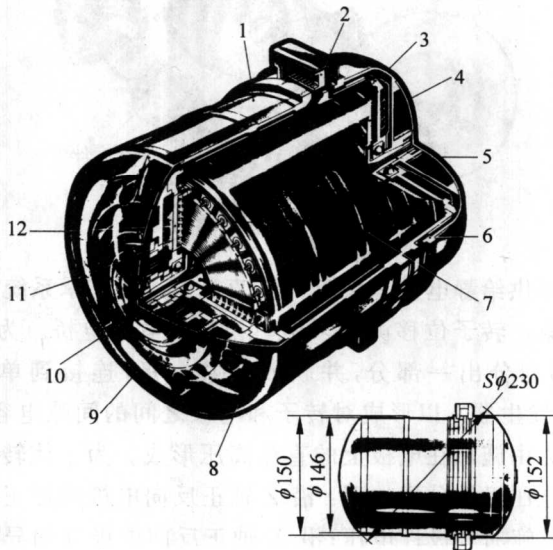


图 1.5 俄罗斯 Д-15 静电陀螺仪