



数据加载失败，请稍后重试！

惯导测试设备原理与设计

姜复兴 庞志成 主编

哈尔滨工业大学出版社
哈 尔 滨

内容提要

本书由机械篇和电控篇组成。主要内容包括惯导测试设备的现状和发展,结构设计中的一些主要问题,转台测试方法、角度测量原理与设计,控制系统及转台的应用。本书是作者们多年教学、科研经验和成果的总结,是有关专业科技人员的参考书。

惯导测试设备原理与设计

Guandao Ceshi Shebei Yuanli yu Sheji

姜复兴 庞志成 主编

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨工业大学印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 19 字数 430 千字

1998年12月第1版 1998年12月第1次印刷

印数 1~1000

ISBN 7-5603-1377-9/V·5 定价 28.00 元

前　　言

惯导测试设备是一种专用高精度测试设备。它可以为被测的惯性导航仪表及惯性导航系统提供精确的方位和速率等输入信号，同时又可以配备数据采集系统，用来精确地测量被测器件的输出信号。

由于航天、航空、航海和地球物理探测等不同领域对于制导、导航和定位的精度要求越来越高，对相应的测试设备的精度的要求也越来越高。转台的测角精度已向 $0.1''$ 进军，离心机转速的稳定性已达到 10^{-7} 。因此，惯导测试设备的研制已不仅仅是机械设计和控制方面的问题，它涉及到气浮、液浮及密珠轴承设计、支撑动态特性及结构刚度分析、精密轴系检测技术、高精度角度和速度传感器、电磁兼容技术及新器件等领域。它在一定程度上反映了一个国家的科技水平。

哈尔滨工业大学有关人员经过26年的艰苦奋斗，研制成功各种类型的转台，并获得多项奖励，本书就是多年经验的总结，并被列为国家“九五”重点图书。由于时间仓促，篇幅有限，尚有许多内容没有涉及，今后有机会再加以补充。

本书共分机械、电控两篇。

机械篇由庞志成主编，其中第一章由陈希军、庞志成、姜复兴编著，第二章由庞坦、王瑜、迟伟编著，第三章由庞志成、陈世家、庞坦、王瑜编著，第四章由庞坦、庞志成、陈世家、迟伟编著，第五章由庞志成、陈世家、庞坦编著，第六章由陈世家编著。

电控篇由姜复兴主编，第七章由任顺清、陈世杰编著，第八章由游文虎、秦嘉川编著，第九章由曾庆双编著，第十章由姜复兴、秦嘉川编著，第十一章由姜复兴、王卫阳编著。

吴广玉教授和王广雄教授对本书电控篇内容提出了不少宝贵意见，在此表示衷心感谢。

对于书中不足之处，敬请国内同行专家给予指正。

作　者

1998.11

目 录

机 械 篇

第一章 绪论	(3)
第一节 惯性导航与惯导测试设备	(3)
第二节 惯性仪表及系统测试专用设备	(4)
第三节 惯导测试设备发展现状	(11)
第四节 惯导测试设备的研究与展望	(12)
第二章 支承部件刚度	(16)
第一节 轴的刚度	(16)
第二节 框架刚度	(23)
第三节 螺栓联接刚度	(25)
第三章 液体静压轴承	(28)
第一节 概述	(28)
第二节 液体静压轴承工作原理	(28)
第三节 定压供油系统节流器结构形式	(30)
第四节 定量供油系统恒流调压元件结构	(38)
第五节 静压轴承结构	(40)
第六节 定压供油径向静压轴承设计计算	(45)
第七节 推力静压轴承设计计算	(65)
第八节 静压轴承系统功率消耗及温升	(69)
第九节 液体静压轴承供油系统结构	(70)
第十节 液体静压轴承动态特性	(71)
第四章 空气静压轴承	(87)
第一节 概述	(87)
第二节 气体静压润滑原理	(89)
第三节 气体静压轴承设计	(101)
第四节 气体静压轴承的稳定性	(111)
第五节 空气静压轴承供气系统	(117)
第五章 滚动轴承	(121)
第一节 滚动轴承的几何参数	(121)
第二节 滚动轴承的运动学	(126)
第三节 滚动轴承接触应力及弹性变形	(133)
第四节 滚动轴承中的载荷分布	(138)

· I ·

第五节	滚动轴承的刚度	(141)
第六节	滚动轴承的摩擦力矩	(147)
第七节	滚动轴承的选择计算	(151)
第八节	密珠轴承设计计算	(157)
第六章	辅助部件	(161)
第一节	夹紧微调机构	(161)
第二节	测试设备调平机构	(164)
第三节	测试设备平衡机构	(165)

电 控 篇

第七章	惯性导航测试设备综合测试技术	(169)
第一节	转台轴系回转精度测试技术	(169)
第二节	电气测角精度检测技术	(176)
第三节	正交轴系间相邻轴线垂直度的测试技术	(181)
第四节	多轴系统轴间相交度的测试技术	(186)
第五节	转台的速率精度测试技术	(189)
第八章	转台控制指令给定系统	(192)
第一节	总线简介	(193)
第二节	小键盘给定模块	(197)
第三节	计算机远地控制模块	(202)
第九章	转台角位置测量系统	(208)
第一节	感应同步器运行方式及误差分析	(208)
第二节	各种运行方式的变换误差分析	(216)
第三节	双相正余弦激磁电源的设计	(226)
第四节	感应同步器角位置编码系统	(234)
第五节	双通道测角系统中的粗精耦合问题	(243)
第六节	感应同步器测角系统的误差调整与补偿	(251)
第七节	定角计时功能的设计	(255)
第十章	转台控制系统	(257)
第一节	概述	(257)
第二节	转台控制系统的传递函数	(258)
第三节	控制系统电路	(264)
第十一章	惯导测试设备的应用	(273)
第一节	概述	(273)
第二节	惯性仪表误差数学模型	(274)
第三节	陀螺仪测试技术	(277)
第四节	加速度计测试技术	(289)
主要参考文献		(294)

机 械 篇

第一章 絮 论

第一节 惯性导航与惯导测试设备

惯性仪表(陀螺仪和加速度计)的功能是通过测量弹(箭)的运动参数来确定其离开地面后的瞬时位置和速度,以供制导系统导引它们按预定轨道飞行。因此,惯性仪表性能的指标,直接决定弹(箭)的命中精度及卫星的同步定点运行精度,这就导致对惯性仪表提出越来越高的精度要求。为此,加强惯性仪表的测试技术,准确评定其性能精度,并通过误差补偿措施来提高惯性仪表的实际使用精度,已成为研制、生产惯性仪表的关键环节。

惯性导航(简称惯导)是一种自主性强、精度高、安全可靠的精密导航技术。它能够及时地输出各种导航数据,并且能为运载体提供精确的姿态基准,在航空、航海和宇航技术领域有着极其广泛的应用。惯性导航以力学原理为基础,通过加速度计敏感、测量运载体的加速度,经过计算(一次积分和二次积分),求出运动轨道(运载体运动的速度和距离);通过陀螺仪敏感、测量运载体的位置和姿态。通过这些导航信息完成导航任务。它可以不依靠任何其他信息而独立地完成导航功能;提供包括位置、航向、速度、加速度,以及姿态角转动角速率,甚至角加速度在内的全部导航和制导信息。

实现惯性导航的关键部件是加速度计和陀螺仪,加速度计敏感运载体的加速度,陀螺仪敏感运载体的姿态。无论是平台式惯导系统,还是捷联式惯导系统,都是由加速度计和陀螺仪组合而成。因此,惯性导航的精度在很大程度上取决于陀螺仪和加速度计的精度。在短期的工作过程中,加速度计的精度直接影响导航精度,而在长期的连续工作中,加速度计和陀螺仪的误差所引起的导航误差是随时间积累的。可见,提高惯性仪表的精度对于提高惯性导航的精度是十分重要的。

目前,提高惯性仪表和惯导系统的精度主要有两条途径:

1. 改进仪表的结构设计和加工工艺,探索新型的惯性仪表。
2. 对惯性仪表和惯导系统进行测试,建立模型方程,通过误差补偿来提高仪表的实际使用精度和系统的导航精度。这就要加强对惯导测试技术的研究。

惯导测试技术包括惯导测试装置(设备),测试方法、程序和数据处理技术三个方面。惯导测试技术是在惯性导航技术的基础上发展起来的一门新兴学科,也是现代武器系统中的一项基本支撑技术。

根据不同要求和工况,惯性仪表的测试目的及目标如下:

1. 评价惯性仪表的性能、精度,考核是否满足设计规定及使用要求。
2. 通过惯性仪表在测试中出现的问题,进一步研究改进仪表性能的途径。
3. 建立惯性仪表模型方程,利用计算机模拟使用条件,计算出仪表的规律性误差,并给予补偿,以提高仪表的实际使用精度。
4. 确定惯性仪表误差的随机分布规律,作为制定火箭、导弹等实际使用(作战)规范的

依据。

随着科学技术的发展,对惯性仪表的要求越来越高。然而,单靠改进仪表设计来提高惯性仪表器件精度的方法,在加工、制造、装配及调试中,遇到的困难越来越多。因此,利用软件补偿来提高实际使用精度变得更有重要意义。这样,惯性仪表的测试技术日益被重视,不惜以高昂投资来研制高精度测试设备。根据测试数据,通过补偿措施,使原来不合格仪表恢复到具有实用价值,满足惯性导航系统的使用要求。这种行之有效的趋势,使惯性仪表的设计思想,由原来片面追求降低仪表的绝对误差,转为重点保证其性能稳定并减少随机误差。惯导测试设备是标定、测试和检验惯性导航仪表或惯性导航系统的设备,它包括高精度分度头、单轴伺服转台、双轴伺服转台、三轴伺服转台、仿真台、角振动台、离心机、火箭橇等。

无论哪种惯导测试设备都是模拟现场实际情况,为被测件提供一些输入量,只是输入量的形式不同而已。但是,随着输入量的形式不同,被测件输出量中含有的信息量是不一样的。研究如何在输入量允许范围内选择较少的输入个数和适当的分布形式使得输出量中含有的信息量最大,就是实验设计的内容。除此之外,每套设备都必须配备计量被测件输出量的仪器或设备,称之为数据采集系统。采集的数据要用计算机进行分析和处理。

第二节 惯性仪表及系统测试专用设备

惯性器件测试所涉及的专用设备较多,下面简介几种典型的测试设备。

一、自动控制分度转台

在陀螺仪、加速度计进行单轴阶跃翻滚试验时,该转台能自动提供各种不同的重力加速度分量。转台主轴能按给定程序自动作出 360° 翻滚,并在翻滚一周内按给定的 $2, 4, 8, 12, 24, 36, 72$ 个等分位置(即角间距为 $180^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 30^\circ, 15^\circ, 10^\circ, 5^\circ$)自动停转,其定位精度小于 $1''$ 。台面与主轴的垂直度不大于 $2.5''$,并附有微调机构,调整后垂直精度可达 $0.36''$ 。用于陀螺仪测试时,主轴可调准到试验室已标定的地球极轴方向。

转台主轴轴系采用密珠支承,以提高支承刚度和运动精度。分度转台的定位精度主要由一对端齿盘保证,通过力矩电机带动螺旋付传动,控制齿盘搭合或分离。

二、单轴位置速率转台

如图1-1所示,工作台8用螺钉组固定在主轴11端面上,主轴用一对角接触球轴承7支承。为保证主轴运动精度,选用超B级精度轴承,并通过内、外套筒12、13及螺母14实现轴承预紧。1为滑环,3为旋转变压器,4为直流测速电机,5为力矩电机,9为感应同步器,10为微调夹紧装置。6为上台体,其上与轴承配合的两个内孔的尺寸精度、形位精度及粗糙度要求较高,以满足主轴及工作平台的工作要求。2为下台体,其下面装有转台水平调整装置15。

三、低频线振动台

低频线振动台属于摆式积分陀螺加速度表专用振动台。振动台的台体固联在垂直的主轴上,主轴在两个空气静压轴承间窜动,产生垂直方向的直线正弦运动。为了获得稳定

的线振动,台体、主轴组件与扭力轴联接构成一个量值很小的弹性阻尼系统。线振动是由小功率电机及两个按试验台运动方向而交替轮流工作的电磁离合器,并通过伺服系统控制,实现振动台运动的。

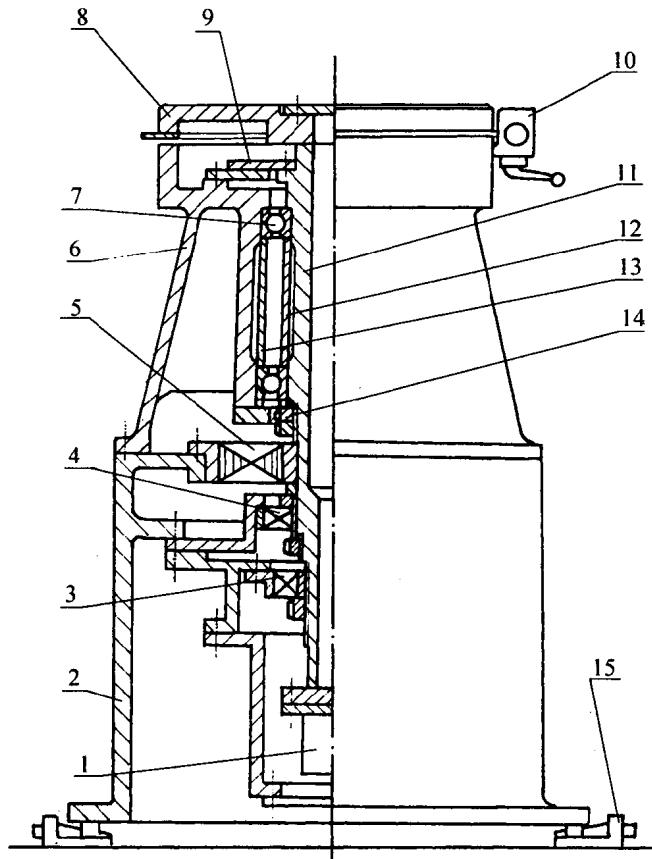


图 1-1 单轴位置速率转台

1—滑环;2—下台体;3—旋转变压器;4—直流测速电机;5—力矩电机;
6—上台体;7—角接触球轴承;8—工作台;9—感应同步器;10—微调夹紧
装置;11—主轴;12—内套筒;13—外套筒;14—螺母;15—水平调整装置

四、角振动台

惯性仪表及惯导系统的运载体,在实际飞行中存在着复杂的、有时强度较大的振动,角振动台就是模拟飞行振动状态对惯性仪表进行动态性能的测试和标定。

角振动台分单轴、双轴及三轴结构形式,以模拟一维、二维及三维角运动状况。单轴角振动台结构如图 1-2(a)所示。工作台 1 材料为 IC4(超硬铝),采用减震加筋的结构,使其转动惯量小,而结构刚度较大,并降低漏磁。增大工作台与主轴 10 的联接刚度,除了增大联接半径之外,主轴与工作台内孔采用轻过盈配合,并以推销定位。

为了保证主轴有较高的回转精度,采用 B 级精度的角接触球轴承 3,轴承间距适当加大。轴承与其配合的轴颈及轴承座孔,采用微过盈配合,并通过内外套的长度差实现轻预紧装配,以增加轴承的支承刚度及回转精度。

台体由上台体和下台体两部分组合而成,安装轴承的上台体加工精度较高,特别是轴颈孔的尺寸精度和形位精度,要保证设计要求。上台体安装轴承的中心支座上均布六个筋板,以增加结构刚度。下台体尺寸及壁厚较大,从而增加了转台的稳定性。

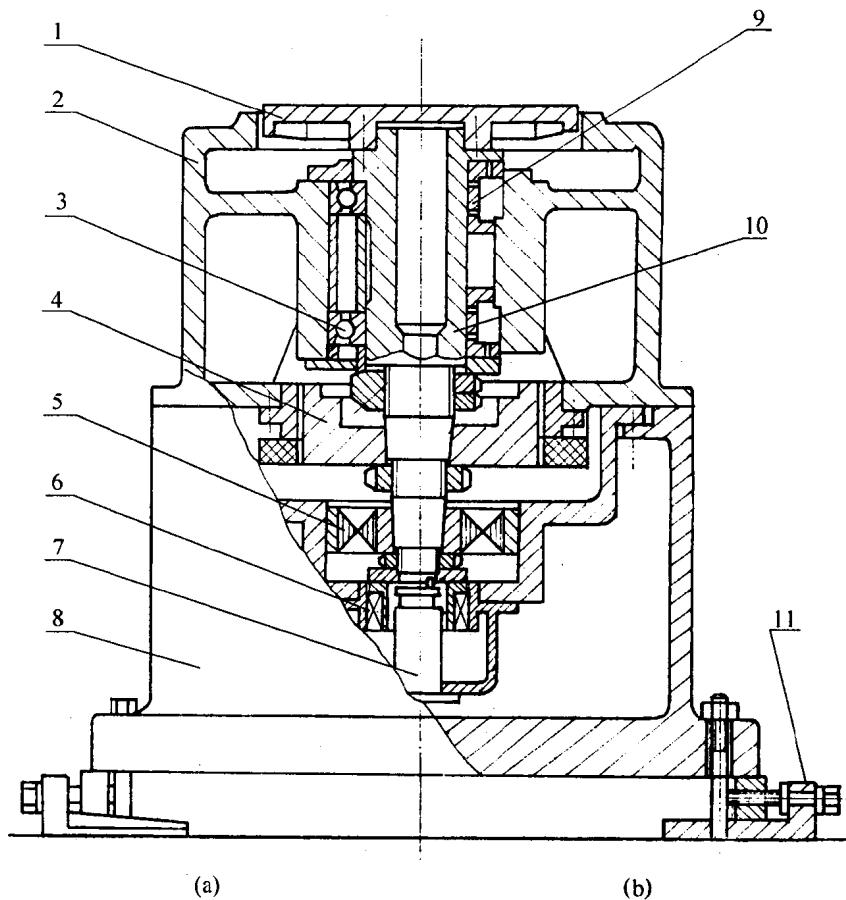


图 1-2 单轴角振动台

1—工作台;2—上台体;3—轴承;4—力矩电机;5—测速电机;6—旋转变压器;
7—滑环;8—下台体;9—空气轴承;10—主轴;11—水平调整装置

图 1-2 (b)所示的角振动台,采用了空气静压轴承,其主轴支承精度,主轴扭转振动阻尼均优于滚动轴承,特别在主轴与轴承之间存在压力气膜,减震效果较好。其余结构均与图(a)相同。

三轴角振动台中的三个轴既可同时作正弦角振动,也可以相对于外轴锁定内轴、中轴于任意位置,作绕外轴的恒速转动。三轴角振动台的三轴之间的相位可以调节,以模拟惯性器件在空间的状态。

三轴角振动台机械台体部分采用三轴框架结构,相邻两轴间的垂直度小于3",每个轴上都装有力矩电机、测速电机、感应同步器、导电滑环等电器元件。外轴采用空气静压轴承支承,内轴及中轴采用滚珠轴承支承。其他方面与单轴台类似。

五、伺服转台

伺服转台是对陀螺仪进行伺服试验时的必要设备。此外，还备有速率系统及位置系统，是一种多功能的测试设备。根据转轴伺服数目，可分单轴、双轴及三轴伺服转台。

台体一般采用十字框架结构，由主轴系、水平轴系及方位轴系三部分组成。习惯上称主轴为外环轴，称水平轴为中环轴，称方位轴为内环轴。三个轴均可在 360° 范围内转动。

主轴部件主要包括：主轴系、随动滑环轴、微调锁紧装置和平衡机构等。主轴系由工作台、主轴、径向止推空气静压轴承（或密珠轴承及高精度滚动轴承）、力矩电机、感应同步器等组成。主轴系的转角采用感应同步器测量，其测角精度可达 $\pm 1''$ 以上。

水平轴系包括：左耳轴、右耳轴、随动滑环轴、微调锁紧装置、平衡装置等部分。耳轴支承可采用密珠轴承、角接触球轴承，或空气静压轴承。在双轴伺服转台的右耳轴上还装有力矩电机及用于角度测量的感应同步器。左耳轴上除了装有力矩电机外，还有光学测角装置，转角传动机构及微调锁紧机构。左耳轴端部有一个高精度锥孔（或与耳轴垂直精度很高的平面），用于安装多面棱体和垂直镜面，以完成方位的精确调整。

如图1-3(a)所示，该单轴伺服转台兼有定位和测速性能，其机械结构特点如下：

空心主轴18由空气静压轴承支承，主轴上装有工作台15，感应同步器17，力矩电机7，测速电机6及旋转变压器5。为使轴向尺寸紧凑，滑环3安装在空心主轴内部。

俯仰耳轴9用螺钉组与连轴体14联接一起，由于俯仰耳轴通过齿轮11手动驱动，其转速较低，可采用密珠轴承13来支承，以获得较高的支承刚度和回转精度。角接触球轴承只起轴向定向作用，为了不影响密珠轴承的径向支承精度，轴承12与轴承座8的内孔采用较大间隙配合。32是耳轴微调锁紧机构。调整平衡块16可使主轴系统绕耳轴及绕主轴处于平衡状态。

图1-3(b)是耳轴另一种结构，即以空气静压轴承23支承耳轴。24是感应同步器，25是耳轴微调锁紧机构。20是工作台微调锁紧机构，31是转台调平机构，2是方向轴空气静压推力轴承。

如果在耳轴上装备一套完整的陀螺伺服系统，便形成双轴伺服转台。一般地说，双轴伺服转台主轴还配置有速率系统，它可以提供正、反方向不同的恒定转速。速率范围可以做到 $0.0001^{\circ}/s$ 至 $500^{\circ}/s$ ，速率稳定度为0.02%。转台主轴和水平轴各有一套定位系统，可在 360° 范围内按所要求的角位置自动定位，其定位精度可达 0.0001° ，角度的伺服刚度为 $60 \sim 80 N \cdot m/(")$ 。

三轴伺服转台结构如图1-4所示，三轴伺服转台主要机械部件包括：外框架5，其上用螺栓组固定外环轴6；中环框架17，其上固定中环轴1；内环框架18，其中固定内环轴。由于在外环、中环及内环轴上，均安装一套完整的伺服系统（包括力矩电机、测速电机、旋转变压器及感应同步器等），因此，三个轴系既可同时实现伺服运动，也可锁定其中某个轴系，其余轴系作伺服运动，来模拟惯性仪表在载体中的状况。

为了提高转台的运动精度，一方面要求转轴与其支承付的摩擦阻力要小，多采用空气静压轴承；另一方面要求框架的惯量小、结构刚度大，为此框架采用硬铝材料，并设计成空心结构。在设计时通常要综合考虑框架结构刚度、转轴与框架的联接刚度及空气轴承的气膜刚度等，以满足转台设计精度要求。值得注意的是外框架上的外环轴处于悬臂状态，

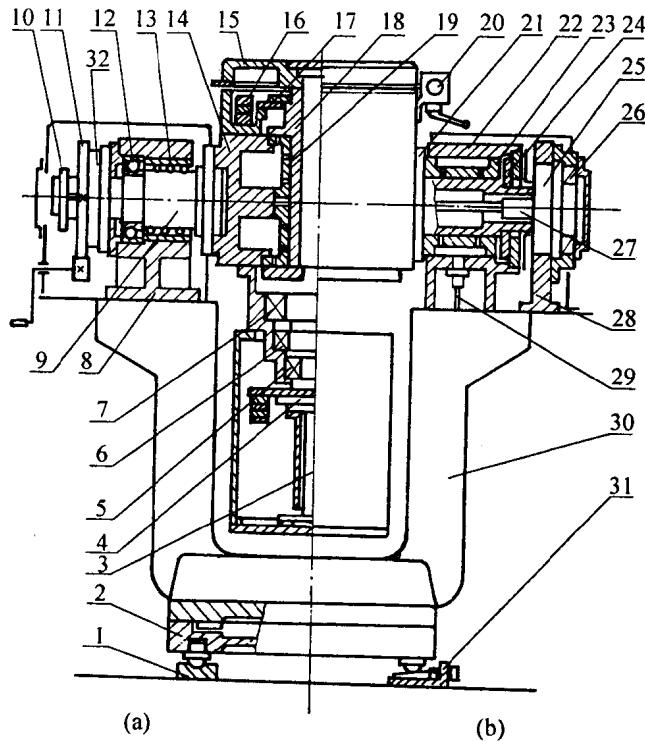


图 1-3 单轴伺服转台

1—台体支脚;2—空气推力轴承;3—滑环;4—感应同步器;5—旋转变压器;
6—测速电机;7—力矩电机;8—耳轴座;9—耳轴;10—端面镜;11—
齿轮传动付;12—角接触轴承;13—滚珠轴承;14—连轴体;15—工作台;
16—平衡块;17—感应同步器;18—主轴;19—空气轴承;20—微调锁紧机
构;21—耳轴;22—耳轴支座;23—空气轴承;24—感应同步器;25—微调
锁紧机构;26—旋转变压器;27—滑环;28—支座;29—管路;30—台体支
架;31—调平支脚;32—微调锁紧机构

在设计轴及轴承结构及尺寸时,一定要进行综合刚度分析。在外环轴系中,在感应同步器9与力矩电机11之间,要安装屏蔽板,以隔离磁干扰。在中环轴系中,一端安装力矩电机4和旋转变压器3,另一端安装感应同步器和旋转变压器,以消除力矩电机对感应同步器的影响,如有必要,在旋转变压器与感应同步器之间也装屏蔽板。

转台的电气控制部分主要包括以下线路:

- (1) 频标和形成各种频率脉冲信号的线路;
- (2) 角度测量装置,包括激磁电源;
- (3) 定位、恒速及角振动控制线路;
- (4) 计算机给定及控制线路;
- (5) 功率放大和校正线路。

六、离心机

离心机是在高过载条件下,标定加速度计输出性能的设备。加速度计输出性能,包括仪表的非线性模型方程中的各项高次项系数等。离心机主要由臂架、主轴及轴承、主驱动

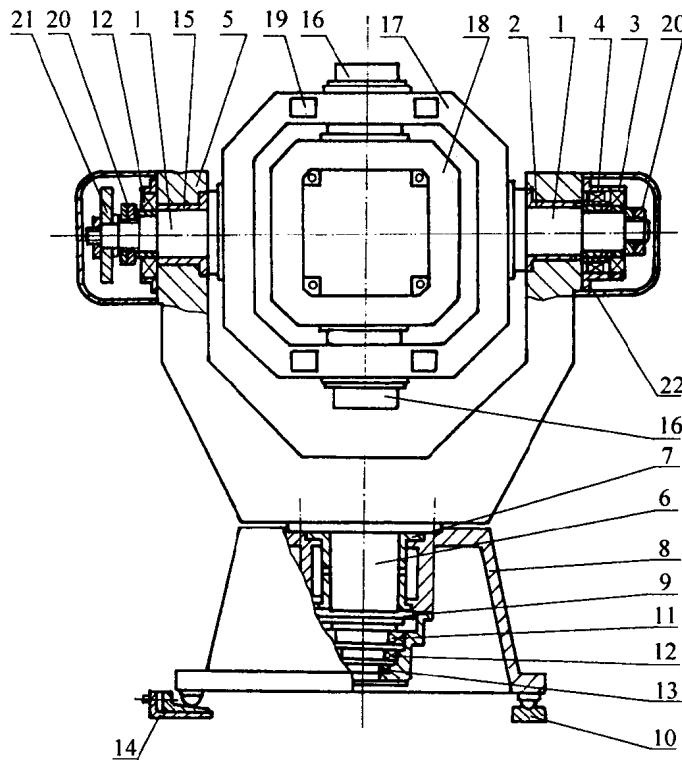


图 1-4 三轴伺服转台

1—中环轴；2—空气轴承；3—旋转变压器；4—力矩电机；5—外框架；6—外环轴；7—空气轴承；8—台座；9—感应同步器；10—支脚；11—力矩电机；12—测速电机；13—旋转变压器；14—调平支脚；15—空气轴承；16—内环轴系；17—中环框架；18—内环框架；19—接线孔；20—螺母；21—多面体；22—中环轴罩

电机、主副集流环、试件舱、平衡舱以及半径测量装置、驱动控制系统、测速系统、平衡机构、反转平台同步传动机构等部分组成，其结构简图如图 1-5 所示。

离心机主轴 11 固定在底座 15 上，主轴套 12 与电机 2 转子固联一起，主轴与轴套间采用两个液体静压径向轴承 13 及 16 来支承。主轴套与臂架 8 用螺栓组联在一起，由主电机驱动。离心机较大的轴向（垂直）载荷由液体止推静压轴承 3 来支承，主轴下端的止推静压轴承 13 是作为辅助支承而承担部分载荷。

当主驱动电机转动时，可直接带动臂架 8 旋转，臂架一端装有可旋转的试件舱，另一端固定平衡舱 9，使整个臂架及其上所有部件处于转动平衡状态。试件舱与臂架的同步旋转是通过固定在主轴 11 上部的锥齿轮付 6、传动轴 17 与试件舱上部的锥齿轮 18 的传动而实现的。在主轴及试件舱上部分别安装主集流环 7 和副集流环 19，以传递功率及测试信号。在主轴上部及试件舱下端分别安装测速磁盘 20 及 21，以测量转动过程中的实际转速，并将测量信号反馈到控速系统。

由于臂架是珩架焊接结构，在转动中对周围空气搅动剧烈而产生涡流，致使臂架颤振，直接影响转动平稳性，因此在臂外围可安装盘式蒙皮，以减轻涡流及风阻。在臂架上部装有支架来支撑能精密测量臂架转动半径的块规 22。

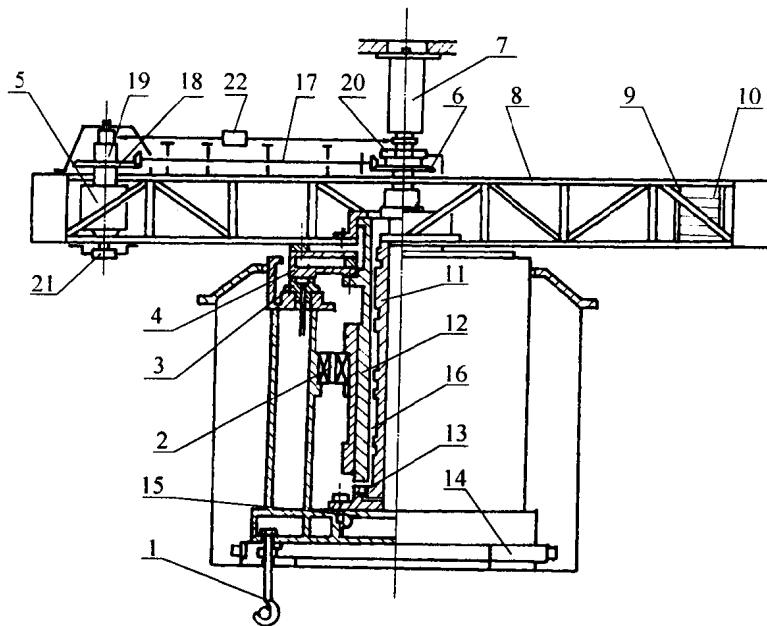


图 1-5 液体轴承离心机

1—地脚螺栓；2—主驱动电机；3—静压推力轴承；4—推力盘；5—试件舱；6—锥齿轮付；7—主集流环；8—臂架；9—平衡舱；10—平衡块；11—主轴；12—主轴套；13—主轴辅助推力轴承；14—机体调平装置；15—底座；16—径向静压轴承；17—锥齿轮传动轴；18—锥齿轮；19—副集流环；20—测速磁盘；21—测速磁盘；22—臂架转动半径测量块规

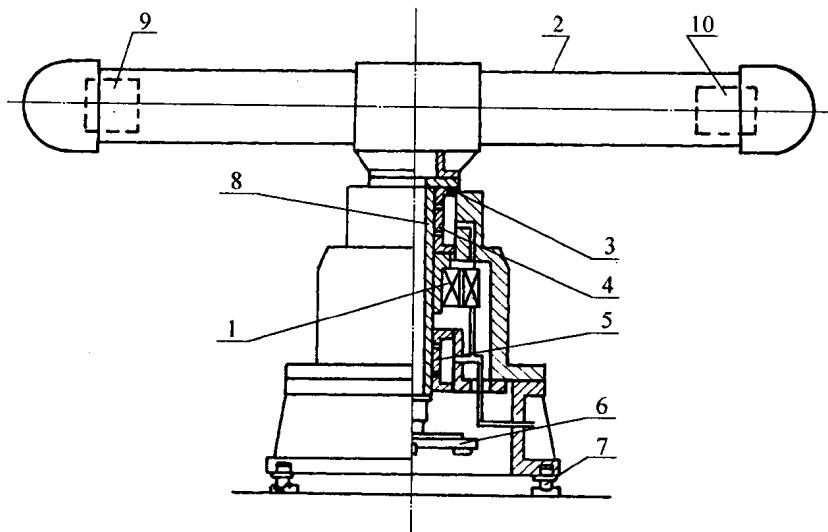


图 1-6 空气轴承离心机

1—驱动电机；2—筒状转臂；3—静压推力轴承；4—静压径向轴承；5—静压径向轴承；6—主动平衡机构；7—支脚；8—主轴；9—试件舱；10—平衡舱

图 1-6 所示的是离心机另一种结构形式，其结构特点主要有：

1. 以玻璃钢筒状转臂代替珩架臂架，既可减轻重量，又可降低风阻。

2.采用空气静压轴承,其优点是运动阻力小;作为润滑介质的空气,在工作中温度变化小,亦即机械构件的热变形小,测量精度较高。

3.空气轴承不污染环境,维护较简单。

4.在相同尺寸条件下,空气轴承的气膜刚度远小于液体轴承,在设计时必须精确计算,以满足支承精度的要求。

5.空气轴承气膜的动态稳定性较差,在设计计算时,要进行参数优化分析,以获得稳定的动态支承精度。

其他机械机构及部件基本相同,从略。

离心机主传动采用直流力矩电机或直流无刷电机。采用码盘或光栅输出转速信息,用块规和内径测微仪测量静态转动半径,用照相法、激光测距法测定转动中的动态半径。

尽管惯导测试设备类型较多,但从以上所介绍的转台和离心机等设备中,不难看出机槭结构是类似的,其中最重要的轴系部件直接关系到设备的机械性能,它们共同的设计要求是:回转精度高、支承刚度大、运动阻力小、动态稳定性好以及加工工艺精度保证性好,等等。因此,惯导测试设备中的轴系设计不同于普通机械设计而具有自己的特点。

惯导测试设备中最主要的机械结构是轴系,包括转轴、液体静压轴承、空气静压轴承、密珠轴承、滚动轴承,以及轴上零部件的联接、调整、固定、平衡机构等。

第三节 惯导测试设备发展现状

在惯导测试设备这一领域,美国和俄罗斯居于领先地位,我国在这方面的研究已经取得了长足进展,但是由于起步较晚,距世界先进水平还有一定差距,主要是测试设备品种少,精度和可靠性距世界先进水平还有相当差距,对隔振、恒湿、恒温、隔音和磁屏蔽等高标准的测试实验条件的研究也不深入。测试理论的研究,各种惯性仪表的误差模型研究,误差补偿方法的研究距世界先进水平也有一定差距。

美国是空间技术发展最快、起步最早的国家之一,其从事惯性技术和测试转台的研制已有五十多年的历史,在研制和使用惯导测试设备方面有很强的实力。目前,美国在转台制造方面,无论在数量、品种还是测试精度及测试自动化方面,都居世界领先地位,代表了当今世界惯导测试转台的最高水平。

美国最早研制成功的转台是 1945 年由 MIT 仪表试验室研制的 A 型转台,它采用普通滚珠轴承,轴的驱动直接采用交流力矩电机,位置分辨率为角分级。随后在 1950 年投入使用的 B 型转台和 1953 年投入使用的 C 型转台是 A 型转台的改进,用精密齿轮系代替了直接驱动装置。D 型转台在 1954 年投入使用,这种转台采用精密锥形滚珠轴承支承,角位置读出装置采用光电测角系统,标志着转台设计进入了一个高级阶段。E 型转台去掉了原有结构中的磁性材料,采用复式光电传感器,转台轴支承为一种压力补偿液体轴承,倾斜轴的支承用空气轴承,转台轴在任何方位上的定位精度都是 3"。

美国 60 年代初期和中期的转台改进之处主要在于采用空气轴承和交流力矩马达直接驱动,因摩擦减小而大大提高了转台的位置精度和速率平稳性。例如 1965 年交付使用的由菲克公司研制的 352 型惯性器件和系统测试台,可测试 $0.000\ 1^{\circ}/h$ 漂移速率的陀螺,