

“十二五”国家重点图书·重大出版工程规划
航空航天精品系列图书

陀螺仪表动态测试用 精密控制转台

ПРЕЦИЗИОННЫЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ
СТЕНДЫ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ
ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Д.М.Калихман [俄] 著
杨亚非 张明华 译



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

014011032

V241.5
32

“十二五”国家重点图书·重大出版工程规划
航空航天精品系列图书

陀螺仪表动态测试用 精密控制转台

ПРЕЦИЗИОННЫЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ
СТЕНДЫ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ
ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Д.М.Калихман [俄] 著

杨亚非 张明华 译



北航

C1697279



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

V241.5
32

内容简介

本书研究检测陀螺仪表静态性能的精密控制转台的构建原理。在分析现代各种类型和工作原理陀螺仪表的精度性能以及俄罗斯国内外主要的转台设备生产企业的原理方案的基础上,提出了构建转台原理技术方案的一般概念。

详尽研究了将各种工作原理的精密角速度测量仪和表观线加速度测量仪用作惯性敏感元件的单轴标定控制转台和三轴仿真标定控制转台的原理技术方案。在构建原理技术方案的一般概念基础上,研究了带有惯性敏感元件的转台的广义数学模型,并得出作者提出的每个技术方案的机械部分的数学模型。

研究了一系列带有惯性敏感元件的精密控制转台调节器的综合问题,评价了它们在干扰作用条件下的动态性能和精度性能。

书中例举了作者所在企业生产条件下实现的控制转台的结构,以及生产中采用的转台原理技术方案的试验研究结果。

本书适用于科研与工程技术工作者,以及“仪表制造”和“自动控制系统”专业研究生和高年级本科生。

图书在版编目(CIP)数据

陀螺仪表动态测试用精密控制转台/杨亚非,张明华译. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2013.7

ISBN 978-7-5603-3568-1

I. ①陀… II. ①杨…②张… III. ①航空仪表-陀螺仪
IV. ①V241.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 058494 号

策划编辑 甄森森

责任编辑 范业婷

封面设计 刘长友

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂

开 本 880mm×1230mm 1/16 印张 15 字数 360 千字

版 次 2013 年 7 月第 1 版 2013 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-3568-1

定 价 88.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

译者序

惯性导航系统是具有自主、实时、连续、隐蔽、不受干扰,无时间、地点、环境限制的运动信息感知设备,是现代精确打击武器的关键信息源之一,其在航空、航海、航天及民用领域有着广泛应用。能够满足超长航时性能指标要求的高精度惯性导航系统一直是制约我国国防和航天技术发展的瓶颈,因此要获得高精度惯性导航系统,提高作为惯性导航系统关键组成部件的陀螺仪的精度势在必行。

陀螺仪的精度主要由两方面决定:一是其自身的加工制造精度,受仪表材料选材、结构设计、加工制造与装配等各个环节条件限制,从现有的技术水平看,其提高的潜力非常小;另一个是其测试与标定精度,是由陀螺测试转台的精度决定的。从现有的技术水平看,提高陀螺测试转台的精度是提高陀螺仪精度的唯一可行途径。长期以来,如何利用陀螺测试转台来提高陀螺仪测试与标定精度一直是国内外惯性技术领域研究的重要课题。

对于陀螺仪测试来说,陀螺测试转台实际上是一个提供高精度速率基准的设备,其速率精度和速率平稳性是其重要的技术指标,其数值大小直接影响被测试与标定陀螺仪的精度,提高转台的速率精度和速率平稳性是保证陀螺测试转台精度的关键。

近些年来,我国在陀螺测试转台研制和提高陀螺测试转台的速率精度、速率平稳性方面做了很多工作,也制定了一些测试标准和规范。但是,在转台瞬时角速率测量机理上与国外有很大差异,这种差异决定了我国的转台与国外转台在精度上的差距。我国的转台普遍采用测角元件通过定角测时法或定时测角法来确定转台的角速率,此角速率不是严格意义上的瞬时角速率,而是某一角度间隔或某一时间段上的平均角速率,角速率精度取决于测角元件的精度和时间基准的精度。瞬时角速率真正反映转台的速率精度和速率平稳性。要提高转台的速率精度和速率平稳性就要提高转台瞬时角速率的测量精度,并通过先进控制算法实现转台速率和速率平稳性的精确控制,从而提高转台的精度,进而达到提高陀螺仪测试与标定精度的目的。

本书作者卡里赫曼研究员所在的俄罗斯萨拉托夫市“外壳”科研生产联合体研制的转台是比较有代表性的。该单位研制的转台利用惯性元件(高精度陀螺仪和加速度计)来测量转台的瞬时角速率,将高精度惯性元件加入到转台速率测量与控制系统中,实现转台高精度、高稳定性速率控制。此陀螺测试台的优点是机械结构简单、速率精度和稳定性高、重量轻、体积小、功耗低。可以说,本书是作者多年研究成果和成功经验的总结,对我国从事陀螺仪表测试和陀螺测试转台研制的科研工作者具有非常大的学习和借鉴意义。

随着计算机技术、数字技术、新型传感器技术的高速发展,陀螺测试转台技术有了显著进步,计算机和新型传感器成为转台控制系统中的一个重要环节,又由于陀螺仪精度越来越高、重量越来越轻、体积也越来越小,促使陀螺测试转台向着数字化、高精度、高稳定性、小体积、低能耗的方向发展。采用高精度惯性元件作为转台速率测量与控制系统中的敏感元件来保证转台的速率精度和速率平稳性以提高陀螺测试转台的精度也必将成为今后测试转台的发展趋势。本书译者力图通过本译著将俄罗斯陀螺测试转台研制的成功经验介绍给国内同行,为我国高精度陀螺测试转台研制和

陀螺仪的测试与标定方法研究提供有价值的科学理论参考,以缩小与国外在转台研究水平上的差距,提高我国陀螺仪表测试与标定精度。

感谢哈尔滨工业大学出版社社长、总编及甄森森编辑等人极具前瞻性的眼光,将此书及三十余本俄罗斯航空航天经典图书列为哈尔滨工业大学出版社的“航空航天精品系列图书”出版计划,并已经获得国家“十二五”重大出版工程规划项目支持,才使得本书有机会面世。译者在此对哈工大出版社上述人员及编辑人员在编辑此书过程中所付出的辛苦深表谢意。

由于译者水平和专业知识有限,释义不当和疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

译者
2012年9月

作者前言

20 世纪末至 21 世纪初,计算技术的蓬勃发展在很大程度上决定了惯性导航控制系统构建原理的变化,其中陀螺稳定仪被捷联惯性导航系统所取代,后者使用了不同等级和工作原理的角速度测量仪作为敏感元件。同时,捷联惯性导航系统中所使用的角速度测量仪的精度参数不断完善,尺寸/质量参数和功耗也不断降低。

因此,20 世纪 90 年代初,作者产生了使用惯性敏感元件,即角速度测量仪和表观加速度测量仪来制造转台的想法,以陀螺稳定仪制造原理为基础,将其用于空间转动模式。众所周知,单轴陀螺稳定仪首次由俄罗斯工程师、战斗机飞行员、第一次世界大战英雄斯捷潘·安德烈耶维奇·诺兹德洛夫斯基(1888—1949)研制,并于 1924 年取得专利权。所以,在某种意义上,作者是该技术的继承者,且有所创新。

为了将按随动系统传统原理制造的转台与带有惯性敏感元件的转台有所区别,作者将后者称为控制基座(译者注:本书正文中,依然按照中国读者习惯上的叫法,将其称为控制转台)。在作者分别于 1993 年和 2002 年答辩通过的副博士和博士的两篇学位论文中,研究了控制基座的原理技术方案,构建了其数学模型,并综合了能实现各种技术方案的调节器,取得了许多专利。通过原理样机试验,证明了该理论和方法是正确的。所以说,本专著是作者 20 年工作经验的总结。

第 1 章提出控制基座的设计问题。分析了先进的角速度测量仪和表观加速度测量仪的精度特性,以确定它们能否用作所设计控制基座的敏感元件。此外,对用于检测不同等级和工作原理的角速度测量仪的转台精度特性进行了估计。介绍了国外主要公司现有的转台,并分析了其参数。

第 2 章介绍了控制基座的不同原理技术方案。研究了广义物理模型,根据所用不同惯性敏感元件,得到控制基座的不同原理技术方案。列举了单轴标定控制基座的结构。

第 3 章推导了带有惯性敏感元件的控制基座广义物理模型的广义数学模型,由广义物理模型可得到所有原理的不同数学模型。由于所提出的方法具有广义性,使得本方法可以用于研究任何原理技术方案及其数学模型,甚至是超出本书研究范围的原理技术方案及其数学模型。

第 4 章是单轴标定控制基座的调节器综合,并估计调节器的动态精度特性。

第 5 章介绍了单轴标定控制基座样机的试验研究结果。

第 6 章介绍了三轴仿真-标定控制基座的构建原理,并对其进行研究。

本书所面向的读者是工科院校的大学生、研究生及教师、仪表制造企业的工程技术人员、精密仪器制造和计量学领域的科研工作者等。

对于任何运动对象的控制系统,尤其是航天器的控制系统,导航仪表是必不可少的,这就需要有测试设备。可以按照本书所介绍的原理在生产惯性敏感元件的任何工业企业制造这些测试设备。众所周知,开发宇宙空间是全人类的任务,这一领域的技术进步将最终依靠这个星球所有居民的努力来实现。

最后,想跟大学生和研究生分享中国伟大哲学家孔子的一句话:“学如不及,犹恐失之”。作者相信,遵循这一原则,年轻人在成年时就能在科学上走向成功。

作者谨向哈尔滨工业大学的杨亚非和张明华深表谢意,两人在相当短的时间里将本书译成中文。没有两位的执着和辛劳,本书未必能呈现在如此广大严谨的读者面前。相信本书不仅对学习技术有所裨益,也必将成为增进中俄两国人民相互理解和加深友谊的纽带。

作者

2012年3月26日

于俄罗斯拉斯托夫市

前言

本书用于解决仪表制造企业在研制各种工作原理的角速度传感器时使用的角速率转台——新型试验设备的制造问题。随着用于解算运动方程和解析构建惯性坐标系的便携式计算机的出现,使得捷联惯性导航系统能够用于航天、航空和航海的运动控制系统,石油、天然气管道监测装置,以及测斜装置,因此,近几十年,角速度传感器具有特殊功用。

在捷联惯性导航系统的仪表中,角速度传感器直接固联于仪表的壳体上,形成具有三个正交轴的三轴测量装置。为了保证对象控制系统精度,角速度传感器的精度参数,包括其转换系数,均有确定值。将安装有角速度传感器的测试转台的平台旋转角速度作为输入信号,通过测量角速度传感器的输出信息来测量角速度传感器的转换系数。显然,角速度传感器转换系数的测量精度取决于测试转台平台旋转角速度的精度及该角速度随时间的稳定性。

国内外速率转台的制造实践决定了其外形。这是在大外壳内安装有由平台驱动电机旋转支承的机械装置。所再现的平台旋转角速度随时间的稳定性是由平台大惯量来保证的。这一原理是各种结构类型速率转台的工作基础:从最初的带滚珠轴承支承和由驱动电机至平台的减速器的转台到带有气浮轴承、无刷电机、水银滑环、非接触式测量仪,以及使用旋转平台超精密平衡和干扰力矩稳定方法等的最先进转台。近年来,出现了新一代转台,其速率给定精度和稳定性是由使用激光测角仪作为测量装置的高精度电机控制系统来保证的。门捷列夫计量院生产的平面角动态再现国家原始基准,就是基于这一原理制造的。

本书介绍测试转台的新方向,其速率再现随时间的高稳定性不是由旋转平台的大惯量保证的,而是由在旋转平台控制系统中使用惯性敏感元件来保证的。因此,能够制造出小型化、低能耗的转台,并且在速率精度和稳定性方面超过目前以传统原理制造的先进高精度转台。如果考虑到现代的角速度传感器的小型化,制造这样的小型化转台是非常有意义和及时的。在分析了单轴、双轴、三轴陀螺稳定仪的工作原理的基础上提出了利用惯性敏感元件作为转台控制系统敏感元件的想法。在 20 世纪 70~80 年代,陀螺稳定仪广泛用在航空、航天的惯性控制系统中。如果在单轴陀螺稳定仪中将积分陀螺用作角速度传感器,并加入必要的元件和功能回路,那么可以制造出给定角速度按任何规律变化(包括常值)的单轴转台。陀螺稳定仪的研制工作积累了大量的技术方案,不只是制造基于按程序翻转的陀螺稳定仪原理的测试转台的想法,也有制造陀螺稳定仪元件——测量范围为 360° 的角度传感器、无刷电机、支承框架的想法,在制造高精度小型转台时都会用到它们。这时,应该考虑 20 世纪 70~80 年代近地卫星控制与导航系统中广泛使用的单轴陀螺稳定仪,已不

再使用,已经被基于角速度测量仪的由机载计算机处理信息的仪器所替代。已经研制出用于单轴陀螺稳定仪的最小刻度为 $0.31''$ 的高精度光电角度传感器、无刷电机-位置传感器、稳定装置元件、导电装置,这些都是国家仪表制造的科技储备,可以用于研制新一代测试转台。

本书介绍作者研究出的“带有惯性敏感元件的控制转台”的制造理论。该理论是在广义数学模型的基础上构建的,由该广义数学模型作为个例(通过消去相应的坐标)可以得到基于不同惯性敏感元件(液浮陀螺角速度传感器、光纤陀螺、线加速度计等)构建的单轴和三轴转台的数学模型,可用于检测各种工作原理的角速度传感器。特别关注的是单轴标定控制转台,为此提出了一系列功能-运动学原理图,它们使用液浮陀螺角速度传感器、光纤陀螺和石英摆式加速度计作为敏感元件,加速度计是用于测量转台平台上其安装位置处切向加速度和向心加速度的。介绍了控制系统设计方法、参数选择建议、数学仿真与试验结果,以及单轴转台一系列可实现的功能原理的结构实例。第6章用于研究制造基于新原理能够再现被测角速度传感器工作对象振动的三轴仿真标定转台的可能性。

如果不依靠联邦单一国有制企业“外壳”生产联合体(萨拉拉夫市)设计室全体研究人员多年工作成果,就不可能写出此书,也不可能制造出新一代转台。该企业研制出多种类型的单轴陀螺稳定仪,以及作为陀螺稳定仪组件的元件、传感器、电动机,在设计单轴测试转台时都会用到这些设计方案。由该企业研制出的KX79-060型浮子式角速度传感器、KX67-041型石英摆式线加速度计都已成功用在“联盟-TMA”和“进步-M”号飞船的控制系统中,这些仪表在制造单轴测试转台时也被选为主要的惯性敏感元件。此外,在最近15年中该生产联合体研制出一系列光纤陀螺试验样机,可用作单轴及三轴控制转台中的惯性敏感元件,本书中同样会提到。

作者非常感谢联邦单一国有制企业“外壳”生产联合体设计室为新一代转台设计作出决定性贡献的研究人员们。作者真诚感谢本书的评阅人工学博士阿纳托利·伊万诺维奇·斯卡隆教授(圣彼得堡国立航天仪表制造大学)、工学博士尤里·弗拉基米罗维奇·菲拉托夫(圣彼得堡电工大学),他们在本书准备出版时给出了宝贵的评价。作者特别感谢国家科学中心俄罗斯联邦“电气仪表”中央科研所所长弗拉基米尔·格里戈里耶维奇·佩舍霍诺夫院士,由他审校,本书才得以面世。

目 录

第 1 章 用于检测陀螺仪表的控制转台设计问题	1
1.1 不同物理工作原理的陀螺仪表的参数检测问题	1
1.2 检测陀螺仪静态参数的现有方法和控制转台原理综述	13
第 2 章 用于检测各种物理工作原理陀螺仪的控制转台的功能 - 运动学原理	21
2.1 控制转台的功能 - 运动学原理和工作原理	21
2.2 控制转台的结构实例	44
第 3 章 控制转台的数字建模	61
3.1 选择控制转台广义数学模型的依据, 元件的依据	61
3.2 控制转台 - 被测仪表系统的功能元件自由度数的选择依据	65
3.3 坐标系	72
3.4 广义动力学模型的微分方程	74
3.5 用于仪表不同测试模式的单轴标定控制转台和三轴仿真标定控制转台的运动 微分方程	96
第 4 章 单轴标定控制转台 - 被测仪表系统数学模型研究	106
4.1 给出与控制转台结构特性有关的干扰模型的研究方法	106
4.2 控制转台调节器与作为敏感元件工作自检模式的电反馈角速度传感器的综合	108
4.3 带有电反馈角速度传感器的控制转台在试验时将同一类型角速度传感器作为 敏感元件时其调节器的综合	123
4.4 在绕平台旋转轴给定正弦振荡模式下原理 1.4 和 1.5 控制转台的调节器的综合 ...	129
4.5 在测试光纤陀螺仪并将光纤角速度测量仪作为敏感元件时的控制转台调节器的综合	133
4.6 在测试电反馈角速度传感器情况下使用测量切向加速度的加速度计作为敏感元件的 控制转台的调节器综合	142
4.7 用作控制转台敏感元件的线加速度测量仪的输出信息补偿方法	150
4.8 具有电反馈角速度传感器作敏感元件和测量切向及向心加速度的加速度计的 控制转台调节器的综合	155

第 5 章 控制转台精度特性的试验研究	183
5.1 对应于功能原理 1.4 和原理 1.5 单轴标定控制转台的试验验证	183
5.2 原理 1.2 转台的被补偿加速度计信号叠加原理的试验处理结果	188
5.3 用于确保高精度转台控制系统对转台旋转轴不铅垂度的不变性的石英加速度计 补偿效果的试验验证结果	191
5.4 研究原理 1.12 转台平台转角的辅助信息形成的原理方案,自动选择随动机构步进 电机的工作模式	191
5.5 石英线加速度计必须恒温调节的依据	195
5.6 符合功能 - 运动学原理 1.12 的单轴标定控制转台的试验验证	196
第 6 章 仿真标定控制转台研究	199
6.1 将被试电反馈角速度传感器作为敏感元件的三轴仿真标定控制转台的研究	200
6.2 在测试电反馈角速度传感器时用光纤陀螺作为 T 轴电机控制系统敏感元件的 原理 2.2 的三轴仿真标定控制转台的运动方程	206
结论	222
术语索引	223
参考文献	227

第1章 用于检测陀螺仪表的控制转台设计问题

为了研究用于检测各种陀螺敏感元件和仪表主要技术参数的控制转台设计理论基础和原则,同时在制造这些控制转台时也使用这些元件和仪表,考虑到未来陀螺仪表技术特性参数的改善趋势,必须对控制转台的参数提出基本的技术要求。这只有在对陀螺敏感元件和仪表所达到的和所期望的主要参数值进行分析和综合的基础上才能做到。

1.1 不同物理工作原理的陀螺仪表的参数检测问题

为了对控制转台的技术要求提供根据,以便综合评价陀螺仪表的精度特性,下面分析国内(注:指俄罗斯)外在航空、航天火箭惯性导航和定位系统中使用较好的敏感元件和陀螺仪表样机的技术参数。

用于捷联定位与导航系统的角速度测量仪,包括浮子式角速度传感器、固体波动陀螺、动力调谐陀螺、光纤陀螺、激光陀螺、微机械陀螺。

浮子式角速度传感器按技术特性水平可分为三组:精密的、中等精度的和主要用于遥测系统的低精度的。

国内主要企业研制的精密浮子式角速度传感器:角速度测量范围为 $\pm(0.5 \sim 6(^{\circ})/s)$,转换系数为 $0.2 \sim 2(^{\circ})/bit$,与过载无关的单次启动随机漂移分量为 $\pm(0.003 \sim 0.005(^{\circ})/h)$,与过载无关的多次启动随机漂移分量为 $\pm(0.03 \sim 0.05(^{\circ})/h)$,与过载有关的单次启动随机漂移分量为 $\pm 0.05(^{\circ})/h$,与过载有关的多次启动随机漂移分量为 $\pm 0.2(^{\circ})/h$,与过载的平方有关的漂移为 $\pm 0.03(^{\circ})/h$,转换系数的非线性为 $\pm(0.001\% \sim 0.003\%)$,转换系数的不稳定性不大于 0.003% ,寿命为 $100\,000\text{ h}$,单测量通道质量为 $0.5 \sim 0.7\text{ kg}$ 。

以上所指的高水平精度性能(与过载无关的随机漂移分量、转换系数的非线性和不稳定性)只是在小的角速度测量范围才有可能。

属于这类仪表的有:库兹涅佐夫应用力学研究所研制的陀螺:КИ99-110型(测量范围为 $\pm 6(^{\circ})/s$,单次启动随机漂移分量为 $0.014(^{\circ})/h$,转换系数稳定性为 0.01% ,质量为 $1\,200\text{ g}$),КИ79-132型(测量范围为 $\pm 15(^{\circ})/s$,单次启动随机漂移分量为 $0.006(^{\circ})/h$,转换系数稳定性为 0.01% ,质量为 850 g),КИНД99-003型(测量范围为 $\pm 0.5(^{\circ})/s$,单次启动随机漂移分量为 $0.003(^{\circ})/h$,转换系数稳定性为 0.004% ,质量为 300 g)。КИ99-110型和КИ79-132型陀螺所需功率不超过 3 W ,而КИНД99-003型所需功率不超过 1.8 W 。



陀螺仪动态测试用精密控制转台

1985 年到 2003 年,库兹涅佐夫应用力学研究所研制了一类精密浮子式机电角速度测量仪作为敏感元件的捷联惯性单元。转子气动支承、支承的磁定心和复杂的恒温装置可以确保仪表的高精度性能,使其可用在 25 个不同类型航天对象上。“和平号”空间站上使用过 КИ34-2A 型三轴捷联惯性单元(测量范围为 $\pm 6(^{\circ})/s$, 单次启动随机漂移分量为 $0.03(^{\circ})/h$, 转换系数稳定性为 0.03%, 质量为 32 kg), 而在国际空间站“星辰号”舱段目前使用 КИНД34-020 型四轴捷联惯性单元(测量范围为 $\pm 0.5(^{\circ})/s$, 单次启动随机漂移分量为 $0.003(^{\circ})/h$, 系数稳定性为 0.005%, 质量为 12.5 kg), 其精度性能不逊于工作在哈勃太空望远镜控制系统上的被认为是世界上最精密的系统之一的美国 RSV 型四轴捷联惯性测量单元(测量范围为 $\pm 3(^{\circ})/s$, 单次启动随机漂移分量为 $0.015(^{\circ})/h$, 转换系数稳定性为 0.013%)。2002 年为拉沃奇金科研生产联合体研制了 КИНД34-011 型六轴捷联惯性测量单元(测量范围为 $\pm 0.2(^{\circ})/s$, 单次启动随机漂移分量为 $0.01(^{\circ})/h$, 转换系数稳定性为 0.02%, 信息离散度为 0.008”, 质量为 21 kg)。

中等精度的浮子式角速度传感器的角速度测量范围为 $\pm (10 \sim 36(^{\circ})/s)$, 转换系数不大于 $6(^{\circ})/bit$, 单次启动与过载无关的随机漂移分量为 $\pm (0.05 \sim 0.36(^{\circ})/h)$, 多次启动与过载无关的随机漂移分量为 $\pm (0.3 \sim 1(^{\circ})/h)$, 多次启动与过载有关的随机漂移分量为 $\pm 2(^{\circ})/h$, 转换系数的非线性为 $\pm (0.03\% \sim 0.13\%)$, 寿命为 20 000 ~ 100 000 h, 角速度传感器的质量为 0.5 ~ 0.7 kg, 三通道仪表的质量为 5 ~ 9 kg。

“和平号”空间站上使用的中等精度角速度传感器单元(“定位基准”), 能确保控制系统在空间站机动下工作。“进步-M”号货运飞船和“联盟-TMA”载人飞船上的定位是由联邦单一国有企业“外壳”生产联合体(萨拉托夫市)研制的中等精度的角速度传感器单元来保证的(测量范围为 $\pm 10(^{\circ})/s$, 单次启动随机漂移分量为 $0.36(^{\circ})/h$, 转换系数稳定性为 0.05%, 质量为 10 kg)。这一单元同样用在现有的国际空间站。

20 世纪 70 年代末, 美国德雷珀实验室研制出浮子式角速度传感器单元, 其技术性能水平与上面所列出的俄罗斯的精密角速度传感器和中等精度角速度传感器的性能水平类似。目前美国的定位系统主要使用动力调谐陀螺和光纤陀螺。

遥测系统中使用的浮子式角速度传感器: 角速度测量范围为 $\pm (0.12 \sim 1500(^{\circ})/s)$, 随机漂移分量小于 $100(^{\circ})/h$, 转换系数非线性不大于 4%, 通常用于评定 1 ~ 15 Hz 范围内的动态误差(幅频特性和相频特性), 仪表的质量小于 0.5 kg。属于这类遥测陀螺的是根据带有转动框架的三自由度陀螺原理构建的带有转子-浮子的流体动力陀螺, 用于测量与飞行器固联的坐标系中的角速度和角度。通常该类仪表用在大过载条件下短时间工作的对象(可控炮弹等)中。联邦单一国有企业“合金”科研生产体(图拉市)研制的 И-1 型和 И-2 型陀螺属于这类陀螺仪表, 其技术指标为: 测量范围为 $\pm 5(^{\circ})$, 灵敏度为 0.03% ~ 0.05%, 测量通道数为 2。

预计未来浮子式角速度传感器的技术性能水平列于表 1.1。

表 1.1 未来浮子式角速度传感器的技术性能

参数名称	精密浮子式 角速度传感器	中等精度浮子式 角速度传感器	遥测浮子式 角速度传感器
角速度测量范围/ $[(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}]$	$\pm(3\sim5)$	$\pm(10\sim50)$	A: $0.1\sim30$ B: $0.1\sim1\,500$
转换系数/ $[(^{\circ})\cdot\text{bit}^{-1}]$	$0.02\sim2$	$1\sim6$	
与过载无关的随机漂移分量/ $[(^{\circ})\cdot\text{h}^{-1}]$			
单次启动	24 h 内 $\pm(0.003\sim0.005)$	$\pm(0.02\sim0.03)$	—
多次启动	$\pm(0.03\sim0.05)$	$\pm(0.2\sim0.3)$	A: 0.3 B: 50
与过载有关的随机漂移分量/ $[(^{\circ})\cdot\text{h}^{-1}]$			
单次启动	≤ 0.05	—	—
多次启动	≤ 0.2	$\leq(0.5\sim1)$	—
与 g^2 有关的随机漂移分量/ $[(^{\circ})\cdot\text{h}^{-1}]$	± 0.03	—	—
转换系数的非线性/%	$0.001\sim0.003$	$0.01\sim0.03$	A: $0.1\sim0.3$ B: 2
转换系数的不稳定性/%	± 0.003	—	—
1~15 Hz 范围内			
幅频特性误差/%	—	—	≤ 1
相频特性误差/Hz	—	—	≤ 0.5
单通道质量/kg	$\leq 0.5\sim0.7$	$\leq 0.5\sim0.7$	0.1
寿命/h	150 000	100 000	100~10 000

浮子式角速度传感器测试的主要问题是,在整个角速度工作范围内,给出绕角速度传感器敏感轴的高稳定性常值角速度,以检测转换系数(静态性能),对于遥测角速度传感器,给出绕敏感轴按谐波规律变化的角速度,以检测角速度传感器的动态性能——幅频特性和相频特性。根据推测,测试设备的精度应该比被测仪表的精度高一个数量级,所以要检测浮子式角速度传感器必须达到以下对控制转台的要求(表 1.2)。

表 1.2 用于检测浮子式角速度传感器的控制转台的技术性能

控制转台的技术性能	用于控制		
	精密浮子式 角速度传感器	中等精度浮子式 角速度传感器	低精度浮子式 角速度传感器
控制转台支承框架的轴数	1	1	1
给定角速度范围/ $[(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}]$	≤ 10	$\leq 30\sim50$	A: ≤ 50 B: $\pm 1\,000$
最小给定角速度/ $[(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}]$	± 0.1	± 1	最大值的 1%
控制转台支承框架轴的角度信息 离散度/ $[(^{\circ})\cdot\text{bit}^{-1}]$	$0.04\sim0.08$	0.62	—



续表 1.2

控制转台的技术性能	用于控制		
	精密浮子式 角速度传感器	中等精度浮子式 角速度传感器	低精度浮子式 角速度传感器
给定角速度的稳定性/ $[(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}]$	0.000 01	0.000 05 ~ 0.000 01	0.001 ~ 0.005
给定角速度测量误差/%	≤ 0.001	≤ 0.003	A: ≤ 0.03 B: ≤ 0.2
谐振的给定误差			
幅值/%	—	—	0.1
相位/Hz			0.1
负载能力/kg	≤ 20	≤ 20	≤ 20

在美国和俄罗斯,动力调谐器陀螺广泛应用于各类飞行器的定位与导航系统。

Litton 公司研制的 G-1200 型陀螺用于 LN-30(民用飞机和军用飞机、导弹和有翼导弹)、LN-35、LN-35M、LN-37A 系统。美国 1976 年开始使用机电陀螺——动力调谐陀螺,而此时苏联主要使用浮子式角速度传感器。

除了 Litton 公司外,从事动力调谐陀螺研究的公司还有 Zinger-Kirfortt、Kollins、Nortrop、Sazhem、Ferranty、Sperry、Sperry-Marcony。在俄罗斯从事动力调谐陀螺研究的有库兹涅佐夫应用力学研究所(莫斯科)和“电机”科研生产联合体(车里亚宾斯克州米阿斯市)。俄罗斯企业与国外的公司研制的动力调谐陀螺的精度水平大致相同。

应用力学研究所研制的精密动力调谐陀螺,例如 КИНД-05-049 型陀螺,其角速度测量范围为 $0 \sim 10(^{\circ})/\text{s}$,随机漂移分量为 $0.01 \sim 0.005(^{\circ})/\text{h}$,转换系数稳定性为 $0.005\% \sim 0.01\%$,敏感元件质量为 600 g,每一通道的质量为 2.8 kg,寿命为 100 000 h。“星辰”厂(奥斯塔什科夫市)生产出 8 个 КИНД-05-049 型陀螺,此仪表的特点是:悬臂式方案、双环对称支架、转子传动装置为滚珠轴承支承。2000~2001 年研制出具有气体动力高速转子支承,并且使用复合材料的仪表——КИНД05-91 型陀螺,其性能指标为:质量为 120 g,角速度测量范围为 $\pm 15(^{\circ})/\text{s}$,单次启动随机漂移分量为 $0.004 \sim 0.006(^{\circ})/\text{h}$,转换系数的稳定性为 0.001% 。

近些年,具有相当高技术性能、小尺寸的中等精度动力调谐陀螺的制造得到发展。应用力学研究所研制出一类小型动力调谐陀螺 КИНД05-070(-073, -078, -081)。它们的主要性能有:质量为 53 g,功耗为 1 W,角速度测量范围为 $1.25(^{\circ})/\text{s}$,单次启动随机漂移分量为 $0.05 \sim 0.1(^{\circ})/\text{h}$ 。

“电机”科研生产联合体研制 КЕАФ05-025 型小型动力调谐陀螺,其主要技术性能有:角速度测量范围为 $100(^{\circ})/\text{s}$,单次启动随机漂移分量为 $0.05(^{\circ})/\text{h}$,质量为 51 g。Litton 公司的 G-2000 型动力调谐陀螺具有类似的技术性能,质量为 23 g,属于这类仪表。

目前,动力调谐陀螺在精度上不如精密浮子式角速度传感器。依照许多专家的看法,动力调谐陀螺用于捷联惯性导航系统将得以发展和应用。角速度测量范围为 $100 \sim 1\,000(^{\circ})/\text{s}$ 、随机漂移为 $0.01(^{\circ})/\text{h}$ 、转换系数稳定性为 $0.01\% \sim 0.05\%$ 的动力调谐陀螺可能得以发展。目前在美国和俄罗斯研制出的大量程动力调谐陀螺的随机漂移较大,转换系数稳定性较差。

如同所有角速度测量仪一样,动力调谐陀螺测试的主要问题是给定稳定的常值角速度量值。由于动力调谐陀螺有两个敏感轴,所以为了保证检测的完整性,应使控制转台在给定角速度时允许将被测动力调谐陀螺安装到各种角位置,也就是确保每个敏感轴相对转台旋转轴有不同的定向。平台不转动时,可以检测动力调谐陀螺的所有漂移分量。

对用于检测动力调谐陀螺的控制转台的技术要求列于表 1.3。由表 1.3 可见,这些要求应当由检测俄罗斯国内先进的动力调谐陀螺(测量范围小于 $10(^{\circ})/s$ 、转换系数稳定性为 $0.01\% \sim 0.005\%$)的控制转台保证,这些要求也满足表 1.2 所列的用于精密浮子式角速度传感器的控制转台的技术性能。考虑未来将研制量程为 $100 \sim 1\,000(^{\circ})/s$ 、随机漂移分量值降到 $0.1(^{\circ})/h$ 、转换系数误差降到 $0.1\% \sim 0.5\%$ 的动力调谐陀螺,可以推测有必要研制高速控制转台,其性能与表 1.3 所列性能相比要有所改善。

表 1.3 检测动力调谐陀螺的控制转台的技术性能

控制转台的技术性能	用于检测	
	先进精密动力调谐陀螺	未来大量程动力调谐陀螺
提供旋转的框架轴数	1	1
固定角位置	2	2
给定角速度范围/ $[(^{\circ}) \cdot s^{-1}]$	10	$\leq 1\,000$
测试时给定的最小角速度/ $[(^{\circ}) \cdot s^{-1}]$	0.1	1
控制转台支承轴角度信息离散度/ $[(^{\circ}) \cdot bit^{-1}]$	0.04 ~ 0.08	2 ~ 6
给定角速度的稳定性/ $[(^{\circ}) \cdot s^{-1}]$	0.000 5 ~ 0.000 01	0.005 ~ 0.01
给定角速度测量误差/%	0.001	0.005
绕第 2 和第 3 框架轴给定的固定转动角度范围/ $(^{\circ})$	± 180	
固定转动角的对准精度/ $(^{\circ})$	± 30	
绕第 2 和第 3 框架轴的角位置稳定性/ $(^{\circ})$	± 5	
负载能力/kg	20	

光纤陀螺被看作定向与惯性导航系统的有前景的角速度测量仪。目前俄罗斯国内的光纤陀螺属于中等精度的角速度测量仪。

在俄罗斯,“物理光学”科研生产联合体研制一系列小型光纤陀螺的技术性能见表 1.4。

表 1.4 小型光纤陀螺的技术性能

参数名称	БГ-900	БГ-941-3	БГ-941 3AS	БГ-951 (БГ-951D)	БГ-991D
量程/ $[(^{\circ}) \cdot s^{-1}]$	± 200	± 500	± 600	± 80	± 150
单次启动随机漂移分量/ $[(^{\circ}) \cdot h^{-1}]$	15	50	36	0.3	3
转换系数稳定性/%	0.3	0.5	0.2	0.1	0.05
质量/g	120	50	30	700	300



这类陀螺的特点是零漂随温度显著变化,从 $\text{BF}-941-3$ 型的 $1\,800(^{\circ})/\text{h}$ 到 $\text{BF}-991$ 型的 $30(^{\circ})/\text{h}$ 范围内波动。此外,“物理光学”科研生产联合体研制出一个瞬时启动的三轴光纤角速度测量仪的试验样机(量程为 $\pm 600(^{\circ})/\text{s}$, 单次启动随机漂移分量为 $30(^{\circ})/\text{h}$, 质量为 200 g)。

这些陀螺可用于短时间内完成主要任务的定向系统。

“光链”公司(俄罗斯)生产带模拟和数字输出的中等精度单轴、三轴光纤陀螺的技术性能见表 1.5。

表 1.5 中等精度单轴、三轴光纤陀螺的技术性能

参数名称	SRS-1000	SRS-500	SRS-200	TRS500	ТИУС-500М
量程/ $[(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}]$	± 30	± 100	± 200	± 500	± 500
单次启动随机漂移分量/ $[(^{\circ})\cdot\text{h}^{-1}]$	0.1	1	10	10	1
转换系数稳定性/%	0.02	0.02	0.05	0.5	0.03
质量/g	800	800	800	1 100	1 100

此外,“光链”公司研制了 2 km 长光纤回路的精密光纤陀螺试验样机 SRS-2000(量程为 $\pm 10(^{\circ})/\text{s}$, 单次启动随机漂移分量为 $0.01(^{\circ})/\text{h}$, 转换系数稳定性为 0.01% , 质量为 $1\,200\text{ g}$)。

“外壳”生产联合体自 1987 年开始研制光纤陀螺。20 世纪 90 年代研制出一系列中等精度的光纤陀螺的技术性能见表 1.6。

表 1.6 中等精度光纤陀螺的技术性能

参数名称	KX34-015	KX34-018	KX34-014 M (三轴角速度测量仪)
量程/ $[(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}]$	± 10	± 30	± 20
单次启动随机漂移分量/ $[(^{\circ})\cdot\text{h}^{-1}]$		0.1	36
无温度补偿	1		
有温度补偿	0.14		
转换系数稳定性/%	0.1	0.05	5
质量/g	1 300	1 300	1 500

目前根据俄罗斯航天局任务研制中等精度的三轴捷联惯性单元(量程为 $150(^{\circ})/\text{s}$, 转换系数稳定性为 0.1% , 单次启动零点随机漂移分量为 $1(^{\circ})/\text{h}$, 质量为 $1\,200\text{ g}$)。

美国和德国从 20 世纪 70 年代中期开始研制光纤陀螺。Sel 公司(德国)生产量程为 $400(^{\circ})/\text{s}$, 随机漂移达 $50(^{\circ})/\text{h}$, 转换系数稳定性为 0.5% 的光纤陀螺。Teldix 公司(德国)生产量程为 $200(^{\circ})/\text{s}$, 随机漂移达 $0.3(^{\circ})/\text{h}$, 转换系数稳定性为 0.08% 的光纤陀螺。

德国 IMAR 公司生产一系列光纤陀螺作为角速度测量仪、微机械加速度计作为表现加速度测量仪的捷联惯性导航系统。该系统配备处理器模块,有 RS-232/422 标准的数字输出。IMAR 公