

李延斌◎著



三轴气浮台不平衡力矩分析及 台体优化设计

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



三轴气浮台不平衡力矩分析 及台体优化设计

李延斌 著

机械工业出版社

本书介绍了气浮台的用途、构成、分类及国内外研究现状,通过研究平台自重变形引起的质心弹性位移和由此产生的弹性不平衡力矩,分析了弹性不平衡力矩变化规律,提出了重力与弹性不平衡力矩的补偿方法,分析了补偿后最大不平衡力矩的变化规律。

论述了刚体对通过定点的任意轴的惯性张量、刚体对通过质心轴的转动惯量和刚体的转轴定理等特性;介绍了测量转动惯量的常用方法并对三轴气浮台的转动惯量在线识别算法进行了深入的研究。

分析了气浮台平台自重变形对平台转动惯量矩阵的影响。研究了气浮台平台惯性张量的变化对其指向精度的影响。分析了气浮台平衡过程中配重与平台重量的比例关系,建立了以平台单位重量静平衡刚度最大为目标函数的最佳平台重量优化数学模型,并给出优化实例。最后对气浮台平台计算模型进行了实验验证。

本书可作为航天器地面仿真研究人员和大专院校相关专业师生的教材和参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

三轴气浮台不平衡力矩分析及台体优化设计 / 李延斌著. —北京:机械工业出版社, 2016.11

ISBN 978-7-111-55086-0

I. ①三… II. ①李… III. ①气浮装置—研究
IV. ①TS734

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 243214 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 朱 历 责任编辑: 陈大立

封面设计: 付海明 责任印制: 陈大立

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2016 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·13 印张·255 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-55086-0

定价: 30.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

前 言

气浮台是目前最先进的卫星控制系统全物理仿真手段。国内外在卫星研制过程中都力求对姿态控制系统进行全物理仿真实验,以期在尽可能真实的环境下全面考核其功能、性能指标和运行的可靠性。欧洲和美国各航天公司一般都应用仿真技术在地面上对卫星控制系统进行长达几个轨道周期的闭环仿真实验。

由于三轴气浮台在地面环境下对卫星运动全物理仿真实验,就不可避免的受许多因素的干扰。当干扰力矩大于卫星在太空中的扰动力矩时将导致仿真实验结果失真,甚至使气浮台难以平衡,在各项干扰力矩中台体产生的不平衡力矩为最大,这是目前限制气浮台使用的最主要因素,仅这一项就超过同步轨道卫星所受的扰动力矩。尽量减小不平衡力矩是三轴气浮台研究中要解决的一个关键问题。

卫星在外层空间中为完成赋予给它的使命必须相对于地球或其他天体精确地定向。当其使命为拍摄云层照片、对准望远镜、对准天线等时,精确的定向尤为重要。在应用三轴气浮台进行卫星姿控系统全物理仿真研究时,为了在地面模拟卫星的姿态运动,不但要求其回转中心与重心重合,而且要求气浮台各轴与对应卫星各轴具有相等的转动惯量,实现 1:1 模拟,再根据相似原理确定仿真时的动力学控制参数,使气浮台和卫星的角加速度相一致,以模拟卫星在外层空间所受干扰很小的力学环境。

本文通过研究随气浮台姿态变化,气浮台不平衡力矩产生机理及变化规律,并以此为基础对三轴气浮台体优化设计,力图在设计阶段减小或消除弹性不平衡力矩对气浮台仿真精度的影响。同时,研究气浮台转动惯量在线识别方法及台体自重变形对转动惯量矩阵及惯量主轴方向的影响,为消除气浮台惯量不平衡对控制精度的影响提供有效的方法。

感谢王祖温教授和包钢教授对本文研究内容的悉心指导,也感谢杨庆俊、王海涛、郭良斌、向东、许剑、吕彦东等给予我的无私的帮助和大力支持。

李延斌
2016 年 5 月

目 录

前言

第 1 章	气浮台用途、构成及分类	1
1.1	气浮台的用途	1
1.2	气浮台的构成	5
1.2.1	气浮轴承	5
1.2.2	模拟卫星或称台体	7
1.2.3	目标模拟器	7
1.2.4	气浮台姿态测角装置	8
1.2.5	自动平衡系统	8
1.2.6	其他辅助系统	9
1.3	气浮台分类	9
1.3.1	单轴气浮台	9
1.3.2	平面气浮台	10
1.3.3	旋转气浮台	10
1.3.4	组合气浮台	11
第 2 章	气浮台的国内外研究现状	14
2.1	气浮台的国外研究现状	14
2.2	气浮台的国内研究现状	24
2.3	气浮台台体结构的国内外研究现状	27
2.3.1	桌面式结构	28
2.3.2	伞形结构	30
2.3.3	哑铃型结构	34
2.3.4	“戴森”球形结构	35
2.4	气浮台转动惯量测量的国内研究现状	37
2.5	气浮台转动惯量测量的国外研究现状	40
第 3 章	三轴气浮台的动力学分析	44
3.1	欧拉角及坐标变换矩阵	44
3.2	三轴气浮台运动学方程	45
3.3	三轴气浮台动力学方程	46
第 4 章	三轴气浮台台体自重变形引起的不平衡力矩的计算和分析	49
4.1	引言	49

4.2	台体有限元模型的建立及单元质心公式的推导	49
4.2.1	台体的力学分析及有限元模型的建立	49
4.2.2	平面应力四节点矩形单元质心偏移公式的推导	52
4.2.3	矩形薄板单元质心偏移公式的推导	54
4.3	基于运动弹性动力学方法的台体质心变化量公式的推导	56
4.4	气浮台不平衡力矩的计算	60
4.5	计算结果与分析	62
4.6	气浮台台体绕惯性系 X 轴转动时的不平衡力矩	62
4.7	气浮台台体绕惯性系 X 轴转动时质心位移轨迹	66
4.8	气浮台台体绕惯性系 Y 轴转动时不平衡力矩及质心位移轨迹	67
4.9	气浮台为任意姿态时台体的不平衡力矩	69
4.10	本章小结	71
第 5 章	三轴气浮台台体自重变形引起的不平衡力矩的补偿	72
5.1	引言	72
5.2	不平衡力矩公式的推导	73
5.3	气浮台台体绕惯性系 X 轴转动时的补偿	75
5.4	气浮台台体绕惯性系 Y 轴转动时的补偿	78
5.5	气浮台台体绕 X - Y 平面内任意轴转动时的补偿	79
5.6	计算实例	83
5.7	本章小结	84
第 6 章	测量转动惯量的常用方法	85
6.1	转动惯量的基本概念	85
6.1.1	刚体惯性参量的概念	85
6.1.2	任意轴定理	87
6.1.3	移心与转轴定理	88
6.2	转动惯量测量的常用方法	90
6.2.1	单摆周期法	90
6.2.2	扭摆法	90
6.2.3	三线摆法	92
6.3	本章小结	93
第 7 章	三轴气浮台转动惯量在线识别方法	94
7.1	引言	94
7.2	转动惯量在线识别方法	94
7.3	矩阵 D 元素的求解	95
7.4	本章小结	97

第 8 章 三轴气浮台转动惯量在线测量	98
8.1 引言	98
8.2 气浮台自转角速度的获取	98
8.2.1 当质心偏移位置已知时角速度的获取	99
8.2.2 质心偏移量未知时求解自转角速度的方法	100
8.2.3 气浮台做微小摆动时气浮台自转角速度的求解	102
8.2.4 气浮台做大角度摆动时自转角速度的求解	104
8.3 矩阵 D 求解	105
8.4 矩阵 A 的求解	107
8.5 本章小结	108
第 9 章 三轴气浮台台体自重变形对转动惯量矩阵及惯量主轴方向的影响	109
9.1 引言	109
9.2 自重变形后台体的转动惯量矩阵	109
9.3 姿态准确度误差的计算	112
9.4 台体自重变形对转动惯量矩阵及惯量主轴方向的影响	114
9.4.1 气浮台台体绕惯性系 X 轴转动时转动惯量的变化	114
9.4.2 气浮台台体绕惯性系 Y 轴转动时转动惯量的变化	115
9.4.3 气浮台台体为任意姿态时转动惯量的变化	116
9.5 本章小结	120
第 10 章 三轴气浮台台体优化数学模型的建立	121
10.1 引言	121
10.2 气浮台台体结构优化目标函数的建立	121
10.2.1 气浮台结构平衡点的讨论	121
10.2.2 平衡敏感性的分析	128
10.3 气浮台台体结构优化设计变量的选择	134
10.3.1 桁架圆管壁厚变化对结构刚度的影响	135
10.3.2 桁架圆管外径变化对结构刚度的影响	136
10.3.3 台体台面厚度变化对结构刚度的影响	136
10.3.4 台体台面半径变化对结构刚度的影响	137
10.3.5 下端圆环半径变化对结构刚度的影响	137
10.4 气浮台台体结构优化的约束条件	139
10.5 混合离散变量优化问题的数学模型	139
10.6 本章小结	140
第 11 章 气浮台台体的优化设计	141
11.1 气浮台台体优化设计方法	141

11.1.1	遗传算法实施过程	141
11.1.2	等式约束条件的处理	144
11.1.3	遗传算法算例	146
11.2	关于气浮台配重问题的分析	148
11.2.1	配重问题的描述	148
11.2.2	配重问题分析优化数学模型的建立	148
11.2.3	计算条件及流程	149
11.2.4	优化结果与分析	150
11.3	关于气浮台台体最佳重量的讨论	151
11.3.1	问题的描述	151
11.3.2	气浮台台体重量分析优化数学模型的建立	151
11.3.3	计算条件	152
11.3.4	优化结果与分析	152
11.3.5	最佳台体重量优化数学模型的提出	154
11.3.6	计算实例	155
11.4	本章小结	155
第 12 章	三轴气浮台台体计算 模型验证实验	156
12.1	实验目的	156
12.2	实验原理	156
12.3	实验用三轴气浮仿真台	156
12.3.1	圆柱板式气浮台台体	156
12.3.2	气浮球轴承	158
12.3.3	气源系统	159
12.3.4	加载及称量部分	161
12.3.5	调节平衡系统	162
12.3.6	气浮台支撑机构	163
12.3.7	静态数字应变仪	163
12.3.8	地面总控制台及其他配套设备	163
12.4	姿态测量系统的标定	163
12.4.1	倾斜台	164
12.4.2	倾角计	165
12.4.3	最小面积法	166
12.5	扰动力矩分析及消除措施	167
12.5.1	气流的影响	167
12.5.2	台体载荷分布的影响	167

12.5.3	磁场及温度的影响	167
12.5.4	台体变形的影响	167
12.6	平衡的调节	168
12.6.1	手动调平衡	168
12.6.2	自动调平衡	169
12.6.3	重心的确定	169
12.6.4	确定配重块及移动滑块质量	171
12.6.5	重心的校正	173
12.6.6	平衡失稳现象及解决措施	175
12.6.7	平衡的调节过程	176
12.7	控制软件开发环境	177
12.8	台体自重变形的测试	178
12.8.1	测点的选择	178
12.8.2	应变片的选择	179
12.8.3	粘结剂的选择	179
12.8.4	应变片的布置	180
12.8.5	应变片的粘贴工艺	180
12.8.6	调试过程中遇到的问题及处理方法	181
12.8.7	测试	181
12.9	实验结果分析	181
附录	本书中各变量的物理含义	184
参考文献		191

第 1 章 气浮台用途、构成及分类

1.1 气浮台的用途

三自由度姿态控制仿真气浮台是卫星控制系统一种重要的全物理仿真手段。卫星姿态控制系统是保障卫星实现预定功能、性能指标和卫星成败的关键分系统，国内外在卫星研制过程中都力求对姿态控制系统进行全物理仿真实验，以期在尽可能真实的环境下全面考核其功能、性能指标和运行的可靠性^[1]。欧洲和美国各航天公司一般都应用仿真技术在地面上对卫星控制系统进行长达几个轨道周期的闭环仿真实验。1976 年美国军方半年的地面仿真实验和仿真分析，救活了国防气象卫星（布洛克-50 卫星发射后，姿态控制系统出现了故障，使卫星不能正常工作）。1989 年欧洲太空局大型通信卫星 Olympos 发射后，卫星红外地平仪发生故障，卫星姿态失控，经过采用地面仿真实验找出对策方法，应用射频敏感器代替红外地平仪，从而使这颗价值 8 亿美元的通信卫星重新正常工作。20 世纪 90 年代以来，出现了不同于以往的新型现代小卫星，采用新的设计思想，强调功能集成、系统集成，并且广泛采用现代微电子技术、微机械技术和纳米技术等高新技术，具有高技术含量、成本低、质量小、体积小、性能好、功能多等特点。如近年来科学家们提出的分离模块航天器（Fractionated Spacecraft Modules）概念，希望把一个在轨服务航天器按功能分解为有效载荷、动力、能源、通信等专门的小卫星模块，这些小卫星模块物理分离，通过编队飞行和无线传输方式构成一颗虚拟的大卫星，以完成特定的任务。美国利物浦劳伦斯国家实验室的科学家和工程师们，正在研制小型敏捷的空间微小卫星（Microsatellites），这些小卫星将在太空轨道中自治运行，作为将来太空探测中的一种多元化的手段，去检测近地星体的运动，以便帮助我们处理来自太空中潜在的危险（如小行星撞击地球）。另外，它们还可以方便地观测其他卫星等航天器，或者直接去维修出故障的卫星^[2]。近年来，NASA 和 MIT 也开展了类似的研究工作^[3-5]，如 NASA 正在进行的类地行星发现计划“Terrestrial Planet Finder”，打算批批发射一组小卫星，进入太空之后进行编队飞行及动作组成大型的太空望远镜阵列，如图 1-1 所示，用以搜寻太阳系外适合人类生存的类地行星或者找寻太空中的生命物体。

2009 年 2 月 11 日 0 时 55 分，美国铱卫星公司的“铱 33”卫星与俄罗斯已报废的“宇宙 2251”军用卫星在西伯利亚上空相撞，如图 1-2 所示，产生了大量的

2 三轴气浮台不平衡力矩分析及台体优化设计

太空碎片，这些碎片以及此前人类太空活动中所产生的的大量太空垃圾也会对我们的卫星等航天器带来威胁^[6-7]，开发利用小卫星观测太空中的空间碎片并记录其飞行轨迹或者直接控制卫星等航天器进行变轨飞行，以规避碰撞也成为日益发展的航天事业亟需研究的一个问题。

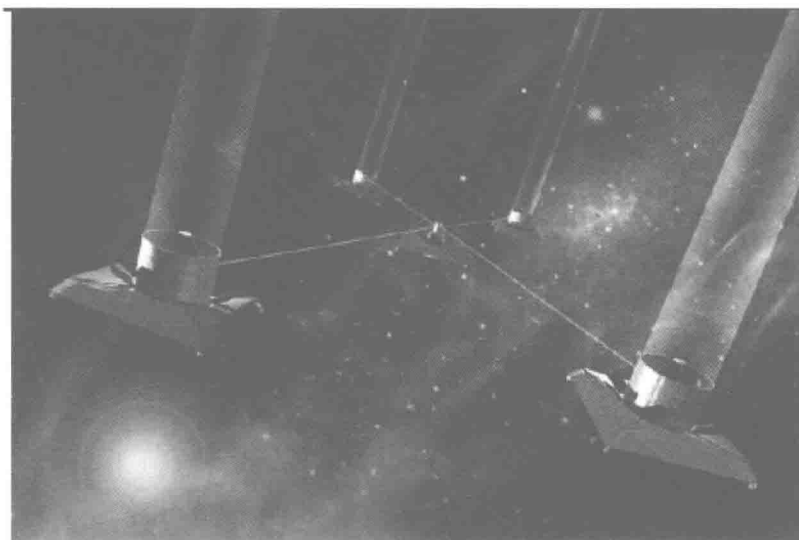


图 1-1 NASA 类地行星发现计划示意图^[5]

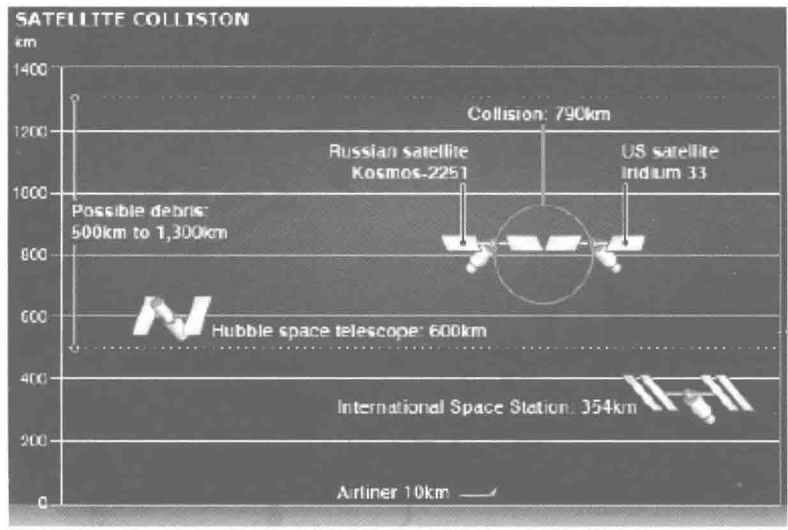


图 1-2 美俄卫星相撞模拟图^[7]

上述新型小卫星或卫星模块基本都需要具有智能性、敏捷性及多功能性等特点，之所以具有如此多的特点，是来源于其上多项复杂先进技术的支持，各种传

传感器、制导与导航控制装置、电子设备、电力和推进系统都必须可靠地工作并紧密联系才能让小卫星发现、跟踪、锁定并与目标物会合，即使它们的目标也是在运动的。由于这些新型小卫星等航天器空间任务的复杂性，所以在其进入太空之前，对这些控制设备和相应的轨道及姿态控制算法必须在地面完成功能的仿真验证。仿真形式有三种，即数学仿真、半实物仿真验证及全物理仿真验证。

数学仿真完全基于数学模型、约束条件。数学模型一般建立起来的阶次比较高，模型复杂，计算量大，而且理论成立的前提与假设条件比较多，实际指导价值不大。

半物理仿真别名物理-数学仿真，又叫作半实物仿真。与数学仿真不同的是，半物理仿真在进行系统研究时，将某些内容物理化。它将被研究对象的一部分内容用物理模型的形式引进回路。研究的仿真对象系统的另外部分内容用数学模型表示。数学模型又被转化为仿真计算模型，从而实现数学与物理的联合仿真。

全物理仿真将整个控制回路引入实物系统进行仿真。全物理仿真的好处十分明显。全物理仿真摆脱了使用模型来描述被控对象和控制系统的限制。这样，卫星的实物动力系统直接参与对系统的控制，可以有效发现在控制系统设计阶段的问题，一些构件的实际物理模型存在的问题也会被发现。另外，一些系统中的实物构件建立模型比较困难，而全物理仿真则避免了建模的困难。

全物理仿真需要提供太空的微重力、零摩擦等物理条件，最好的地面测试环境是尽可能地模仿卫星等航天器在太空飞行时自由运动的环境，由于地球外部太空环境具有大气非常稀薄、微重力等特点，而地面仿真实验设备常处于 $1g$ 的引力加速度作用下，要在地面模拟出太空中微重力、微力矩约束的动力学环境无疑是非常困难的^[8]。虽然采用落塔装置^[9]或飞机的抛物线运动能够获得微重力的实验环境，但由于其时间过短（仅几十秒），或者设备和手段过于特殊，对于我国的航天器地面实验来说意义不大。水下实验，对于训练宇航员在失重环境下的飞行操作很有帮助，例如我国神七航天员太空漫步前就是在一个特制水槽中进行失重训练^[10]，如图 1-3 所示，但是卫星等航天器上的电子设备众多，并不适合完全浸泡在水中实验。

另一种在地面模拟太空失重环境的方法是采用气浮仿真实验台，这是研制卫星等航天器过程中特有的一种仿真方法，亦称卫星控制系统全物理仿真。实验时，气浮仿真实验台上的气浮轴承喷射出的高压气体形成反作用力，与实验台重力相抵消并产生气体润滑，使得气浮仿真实验台的运动可以近似模拟出外太空环境下航天器微重力、零摩擦的空间活动。与数学仿真相比，全物理仿真用气浮仿真实验台作为航天器运动模拟器直接接入控制回路，其上可配置航天器上的实际零部件，避免了某些部件难于建立精确数学模型的困难，这些部件对控制系统的性能及影响也将直观而有效地反映在仿真实验中，这对于验证卫星控制系统方案设计

4 三轴气浮台不平衡力矩分析及台体优化设计

的正确性、检验实际控制系统的功能和性能十分重要。美国 NASA 自 1975 年以来的空间飞行任务成功率极高，这与其所坚持的“航天器控制方案须经过气浮仿真实验台全物理仿真验证，星上控制产品须经过半物理仿真闭环检验”这样一套研制程序是分不开的^[11]。



图 1-3 三种在地面获得失重环境的方法^[10]

气浮台全物理仿真是卫星控制系统仿真的一种重要手段，其特点是控制系统部件采用星上实物，卫星动力学采用物理模型，即由气浮台来模拟卫星在太空中近似无摩擦和失重状态下的姿态运动^[13]。气浮台全物理仿真的用途大致分为五个方面^[14-17]：

1) 自旋稳定卫星动力学仿真。1968 年初为确定“东方红一号”卫星鞭状短波天线伸展对章动的影响和天线对章动阻尼的作用，进行了自旋卫星章动仿真实验。通过仿真实验，观测天线伸展对章动的影响。结果表明：利用鞭状短波天线伸展减速的稳定方案是可行的。

2) 喷气作为执行机构的三轴稳定卫星动力学仿真。对于用冷气推力器作为执行机构的三轴稳定卫星，需着重对喷气控制规律、极限环和开关速度进行仿真实验研究。气浮台仿真不但能够有效验证控制方案，还可得到仿真时的实际耗气量。

3) 飞轮作为执行机构的三轴稳定卫星动力学仿真。在卫星采用零动量反作用飞轮、偏置动量轮或框架动量轮作为执行机构时，由于飞轮产生的控制力矩直接作用在气浮台上，通过气浮台仿真，对于验证轮控系统方案的正确性，发现模型上存在的问题直观有效，而且特别适合于对轮子转速过零、轮子动摩擦力矩、轮子动量卸载等问题的研究。

4) 挠性结构卫星动力学仿真实验研究。北京某研究所利用挠性卫星单轴气浮台全物理仿真系统，基于变结构控制、 H_∞ 控制、自适应控制、分力合成控制等各种方法，成功地进行了挠性结构卫星振动抑制和大角度机动控制实验，取得了很好的实验效果。

5) 液体晃动仿真研究。在星体自旋情况下，液体晃动引起的能量耗散问题必须充分重视，否则将导致卫星姿态失控。反映液体晃动与卫星刚体运动相互耦合

并影响星体稳定性的是与章动角发散有关的时间常数。气浮台仿真对液体晃动的能量耗散及发散时间常数的实验研究提供了手段。

1.2 气浮台的构成

以三轴气浮台为例,气浮台的主要构成^[18]部分如图 1-4 所示。

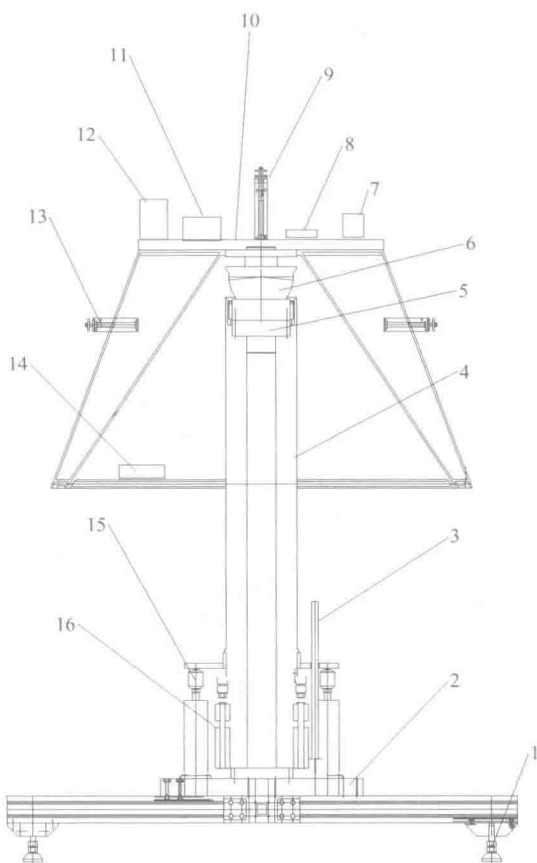


图 1-4 卫星姿态控制三轴仿真气浮台^[18]

- 1—水平调节旋钮 2—基座 3—导向杆 4—升降筒 5—轴承支撑组合件 6—球面气浮轴承 7—磁强计
8—2 轴倾角计 9—竖直调节滑块 10—气浮台框架 11—星载计算机 12—角速度测量系统
13—水平调节滑块 14—配重块 15—升降气缸 16—千斤顶系统

1.2.1 气浮轴承

气浮轴承是气浮台的关键部件,由一球面和一个球缺状球窝组成。气浮轴承

的作用是使模拟卫星在空气中悬浮起来,这种悬浮是轴承腔内导入的压力空气来实现的,泄压的缝隙极小,保证了模拟卫星的悬浮,提供绕三轴(当然也可绕一轴或两轴)的无摩擦的角运动,可在任意偏转角下平衡。气浮轴承具有高速度、高精度度,无摩擦力,无磨损及不需要润滑油的特点,所使用的球直径大约 70~600 mm,可承受 15~10 000 kg 的负载。为了降低涡流和摩擦力矩,球度和表面粗糙度都应严格要求。气浮轴承采用无磁性材料,大多数采用不锈钢和硬铝,为了保证气孔的精度也有用红宝石的。与滚动轴承及液体油膜轴承相比,其支承精度提高 2 个数量级,功耗降低 3 个数量级,而轴承的工作寿命则增长了数十倍。当然气浮轴承也存在一些缺点。

1. 气浮轴承的主要缺点

1) 制造精度和造价高。由于气膜一般在几微米到几十微米之间,故对轴承部件的加工精度要求较高,有时需使用特殊材料或工艺,因而造价较高。

2) 工作条件严格。气浮轴承从加工到装配,都需要全面净化,其工作环境也要求清洁和干燥;另外,轴承工作时必须严格遵守操作规程;这些条件在一定程度上限制了气浮轴承的推广。

3) 承载力和刚度相对较低。由于气体的工作特点,气源压力不可过高,同尺寸的气浮轴承承载力比液体轴承约低一二个数量级,故气浮轴承适用于轻载精密轴承。

4) 可靠性较差。气浮轴承容易失稳,且超载时易磨损。

2. 气浮轴承的基本形式

气浮轴承支撑组合件上方安装气浮轴承球窝级锁定环,并配有压缩空气控制装置及管路。根据球面与球窝间隙内气膜压力的产生原理,气浮轴承可以分为四种基本形式^[19]:

1) 静压气浮轴承。加压气体经过节流器进入间隙,在间隙内产生压力气膜使物体浮起的气浮轴承。当轴承间隙改变时,间隙内的压力分布也随之改变。静压轴承具有工作稳定、使用寿命长、承载力大、加工方便的特点,因而得到了十分广泛的应用。

2) 动压式气浮轴承。两表面有相对运动,间隙呈楔状,沿移动方向间隙逐渐变小,气体由于粘性的作用进入楔间隙中,从而产生压力,构成动压悬浮的气浮轴承。这种形式的轴承不需要外部气源,结构简单,但较难达到长的使用寿命。

3) 动静压混合式气浮轴承。既采用加压气体供气,又利用楔形间隙效应产生一定的承载能力的气浮轴承。这种形式的轴承兼有静压轴承和动压轴承的优点,但其设计计算也更为复杂。

4) 挤压膜式气浮轴承。具有一定间隙的两个相对表面通过在法线方向上的振动,使间隙内的平均压力高于环境压力,从而产生一定承载能力的气浮轴承。

1.2.2 模拟卫星或称台体

气浮台依靠压缩空气在气浮轴承与轴承座之间形成的气膜,使模拟台体浮起,从而实现近似无摩擦的相对运动条件;对于3自由度气浮台,为模拟卫星在外层空间环境,要求台体的回转中心与质心重合,以消除地面上重力梯度的影响。当然,绝对的重合是不存在的。由于太空中也存在重力梯度、太阳光压力和地球磁场等引起的扰动力矩,所以气浮台台体的回转中心与质心某种程度的不重合是允许的。但这种不重合导致重力产生的不平衡力矩必须小于太空中存在的扰动力矩,通常在 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}$ 数量级。假设气浮台台体及其上附加设备为100 kg,则台体的质心与回转中心的偏离只允许在 $0.01 \sim 0.10 \mu\text{m}$ 。如果台体的刚度不是足够大时,随着气浮台台体姿态的改变,将使台体的变形,从而使台体质心产生的偏移量远远大于 $0.1 \mu\text{m}$,由于重力作用产生的不平衡力矩将远远大于要求的精度,导致气浮台不能达到在要求精度内的静态平衡。另外,由于气浮轴承的承载力的限制,要求台体的质量尽量小,刚度好,不易产生温度变形。因为台体变形将严重影响气浮台的不平衡力矩(关于这一点以后几章将详细论述)。

仿真卫星(包括控制系统实物)的重量和转动惯量根据被仿真卫星确定。模拟卫星在空间中的姿态运动中,不但要求台体回转中心与重心重合,而且要求台体各轴与对应卫星各轴具有相等的转动惯量,实现1:1模拟,或者两者的惯量比等于实验时执行机构与实际卫星执行机构控制力矩之比,使两者的角加速度相一致,则执行机构的控制力矩矢量与实际卫星相同;对于大型卫星,气浮台有时难以满足真实卫星的要求。一般只能按比例缩小,使作用于卫星上的力矩与转动惯量之比保持不变,姿态运动特性就不变。但对气浮台允许的扰动力矩则有极严格的限制。

模拟卫星或称台体由装载被仿真控制系统部件用的台体及相应测量和控制部件组成。台体上配有高精度测角速度计、逻辑变换装置,台体自动调平衡及冷气喷气装置等。台体通过机械接口与球面气浮轴承的上方固定连接。

1.2.3 目标模拟器

目标模拟器是针对卫星姿态敏感器的特点而设计的一种专用设备,提供姿态敏感器的基准或模拟器。卫星在外层空间依靠太阳、地球、恒星等作参考目标来确定自己的姿态,分别用太阳敏感器、地球敏感器、星敏感器作姿态测量,在仿真实验中,这些敏感器需要相应的目标敏感器配合才能工作^[14]。

1) 太阳模拟器。太阳模拟器是模拟太阳光辐射的一种设备,理想的太阳模拟器应在辐射强度、光谱分布、准直角、光稳定性和均匀性等方面与太阳相同,由于技术上的限制很难各项指标都同时得到满足。

2) 地球模拟器。地球模拟器利用地球的热辐射作为参考目标来确定卫星相对于当地水平的俯仰和滚动姿态误差, 目前已有多种形式的地球敏感器用于姿态测量, 如圆锥扫描式地球模拟器、摆动扫描式地球模拟器、静态地球模拟器等。

3) 星敏感器。卫星利用恒星作参考目标来确定姿态, 可以达到秒级的精度, 这是目前所有姿态测量中具有最高精度的一种方法。星敏感器测量恒星在空间飞行器坐标系中的坐标, 并使这些被观测到的信息与星表中的已知数据进行比较, 得到卫星的姿态信息。

1.2.4 气浮台姿态测角装置

为了不受被仿真系统姿态敏感器误差的影响, 气浮台本身必须具备测角装置, 这套测角装置也可作为自动平衡系统不平衡力矩的测量装置。气浮台姿态测角装置采用无接触测量方式, 要求其测量精度高于被仿真卫星的姿态精度, 测量范围要大于姿态敏感器的视场或测量范围。主要测量方法有^[1]:

1) 照相机法。通过相机直接照出气浮台姿态变化图形。这种方法比较简单, 精度也不低。但是要对照片进行信息处理后才能转换为姿态角, 这很麻烦, 而且不能实时。

2) 采用光学方法测量绘制在球面上的码图。由于球面很小, 难以提高精度, 而且在球面上刻划码图影响球的光洁度, 增加气浮台扰动力矩。

3) 在气浮台周围安置光敏管。在仿真卫星的三个正交坐标轴上发射出光束, 然后由光敏管接收。这种方法需要大量光敏管, 而且测量范围很有限, 当姿态进行大角度变化时, 测量困难增大。

4) 在气浮台水平面上成 90° 装两个反射镜。与气浮台联在一起的内、外两半圆弧臂可以绕气浮台垂线转动, 在半圆弧臂上各装一个滑架。滑架上装有光学零件敏感器, 它发出的光束经过反射镜投射到滑架的光电阻上, 光电阻变化转换成两个信号, 一个用于驱动滑架, 使滑架上下移动, 另一个用来驱动半圆弧臂, 使它改变方位角, 最后达到可以在大角度范围内跟踪气浮台的反射镜。两个弧臂和两个滑架共测出四个参数, 然后经过球面坐标转换, 可以得到气浮台姿态角。

1.2.5 自动平衡系统

它保证三轴气浮台的不平衡力矩在某一个水平 (如 $5 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}$) 以下, 并能自动调整。气浮台自动平衡系统由不平衡力矩测量装置、计算机和执行机构三部分组成。敏感器测出与不平衡力矩有关的信息, 通过遥测从气浮台传送到地面, 经过计算机处理后, 把这些信息变为不平衡力矩, 相应算出消除这些不平衡力矩所需要的补偿质量, 即滑块移动量。最后再经过遥控把这些指令送到气浮台上, 移动相应滑块。一般是三轴按三个通道进行调整。减小不平衡力矩是三轴气浮台