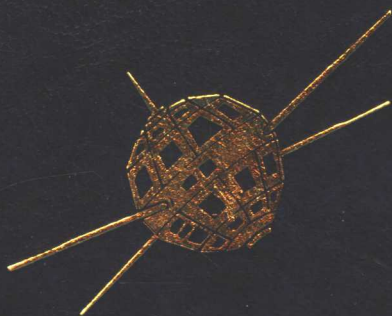


卫星姿态动力学与控制

主 编 屠善澄



宇航出版社

卫星姿态动力学与控制

主 编 屠善澄

副 主 编 陈义庆 邹广瑞

主编助理 潘科炎 李宝绶 王长龙

作 者 屠善澄 陈义庆 严拱添 李铁寿
李宝绶 刘良栋 李 捷 刘国汉
王长龙 高益军 孙承启 邵文豪
丁恩丰 倪行震

责任编辑 邱光纯



宇航出版社

内 容 简 介

《卫星姿态动力学与控制》是关于卫星姿态运动规律及其控制技术的专著。重点阐述卫星姿态运动及其控制的作用和意义,简介姿态和姿态动力学基础知识及主要空间环境力矩的数学模型,详细论述自旋和双自旋卫星、三轴稳定卫星、重力梯度稳定卫星、带挠性附件卫星以及充液卫星的姿态动力学;扼要阐明卫星姿态测量和姿态确定的基础知识,详细论述自旋卫星、双自旋卫星和三轴稳定卫星的姿态确定和控制技术以及应用空间环境力矩的姿态控制技术,最后详细介绍卫星姿态控制系统的测试技术。

本书内容丰富,其中很多内容是从研究和工程实践中归纳、综合、提炼并经过飞行验证的研究成果,实用性极强,既可作为从事卫星姿态控制系统研制的工程技术人员的参考书,也可作为高等院校相关专业的高年级学生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

卫星姿态动力学与控制/屠善澄主编. - 北京:宇航出版社,2001.12

ISBN 7-80144-375-6

I. 卫… II. 屠… III. ①卫星姿态-动力学②卫星姿态-姿态控制
IV. V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 085080 号

出 版 宇航出版社

社 址 北京市和平里滨河路1号 邮编 100013

经 销 新华书店

发行部 (010)68372924 (010)68373451(传真)

读 者 北京市阜成路8号 邮编 100830

服务部 (010)68371105 (010)68522384(传真)

承 印 北京科技印刷厂

版 次 2001年12月第1版 2002年6月第2次印刷

规 格 850×1168 开本 1/32

印 张 21 字数 563千字

印 数 1200册

书 号 ISBN 7-80144-375-6

定 价 68.00元

前 言

《卫星姿态动力学与控制》是关于卫星姿态运动及控制技术的基础理论和研究成果的专著,它是中国空间技术研究院北京控制工程研究所众多工程技术专家多年来从事卫星控制系统研制和工程实践的经验总结。本书力图根据多年来的研究、开发和实践经验,以对完成卫星总体任务具有重要应用需求的姿态控制技术为主,阐明人造地球卫星姿态的运动规律及其控制技术的基础理论和工程实践。但书中所涉及的大部分内容也适用于更广义的航天器姿态动力学和控制问题。

卫星的控制包括轨道控制和姿态控制两个方面。卫星姿态动力学研究卫星绕其质心的转动运动,而卫星姿态控制主要研究卫星姿态的确定和控制。姿态确定是利用姿态敏感器的测量数据根据姿态确定模型计算卫星相对于某个基准或目标的方位,姿态控制是把卫星姿态保持在给定方向或从原方向机动到另一要求方向的过程,它包括姿态稳定和姿态机动控制。

在轨运行的卫星都承担特定的空间探测、开发和应用的任務,为完成这类应用任务,要求卫星姿态正确地定向在给定的方向上或从原姿态机动到另一指向姿态。典型卫星姿态控制系统由姿态敏感器、控制器、控制执行机构与卫星动力学一起构成闭环控制回路。高性能卫星姿态控制系统是在姿态动力学、姿态确定和姿态控制建模的基础上运用经典或现代控制理论和方法实现的。

本书是理论和工程实践相结合的产物。全书内容丰富,其中很多内容是从研制和工程实践中归纳、综合、提炼并经过飞行验证的研究成果,实用性极强,既可作为从事卫星姿态控制系统研究、设

计、试验和应用的工程技术人员的参考书,也可作为高等院校相关专业的高年级学生和研究生的教学参考书。

本书原定篇幅甚巨,由于字数所限,最初撰写的稿件几经删节,有些作者的手稿内容甚至全部被忍痛割爱。参加本书写作的除各章署名的作者外,还有冯学义、孙全性、袁军、周文忠、孙宝祥、耿长福、吕振铎、林来兴等同志,这些卫星控制工程技术专家对本书作出了重要贡献,谨向他们表示衷心感谢。

编者

目 录

第一章 概论	屠善澄
1.1 卫星姿态控制的作用和意义	(1)
1.2 卫星姿态控制技术概述	(3)
1.3 姿态控制系统的设计和实现	(8)
1.4 发展与展望	(15)
第二章 姿态和姿态动力学基础	陈义庆
2.1 姿态参数及姿态角速度	(22)
2.2 姿态动力学和姿态动力学方程	(32)
2.3 坐标系	(42)
第三章 环境力矩	严拱添
3.1 重力梯度力矩	(49)
3.2 气动力矩	(54)
3.3 太阳辐射力矩	(61)
3.4 地磁力矩	(65)
第四章 自旋和双自旋卫星姿态动力学	李铁寿
4.1 刚体自旋和双自旋卫星姿态动力学	(75)
4.2 准刚体自旋卫星绕主轴旋转的稳定性	(85)
4.3 章动阻尼(发散)特性	(95)
4.4 自旋卫星变质量动力学	(98)
4.5 准刚体双自旋卫星绕主轴旋转的稳定性	(106)
4.6 双自旋卫星的摇摆运动	(113)
4.7 消旋过程中的动力学陷阱	(119)
第五章 重力梯度稳定卫星姿态动力学	李铁寿
5.1 重力场中刚体的运动	(136)

5.2	运动的稳定性	(142)
5.3	伸杆过程动力学分析	(147)
5.4	重力场中陀螺体的运动	(150)
第六章 带挠性附件卫星姿态动力学		李宝缙
6.1	概述	(162)
6.2	简单的带挠性附件卫星动力学	(163)
6.3	带挠性太阳帆板卫星动力学	(173)
6.4	计及推进剂消耗的带挠性太阳帆板卫星动力学	(185)
6.5	模态截断和溢出	(191)
第七章 充液卫星姿态动力学		李铁寿
7.1	基本概念和数学描述	(194)
7.2	充液自旋航天器的平衡状态及其稳定性	(200)
7.3	充液自旋航天器的微幅运动	(213)
7.4	细长体航天器的章动发散时间常数	(221)
7.5	有加速度时充液航天器的微幅运动	(233)
7.6	轴对称贮箱常重力晃动模型的建立	(243)
第八章 卫星姿态测量和姿态确定基础		陈义庆
8.1	概述	(260)
8.2	姿态测量及姿态确定的基本原理和方法	(261)
8.3	空间基准场	(271)
8.4	姿态敏感器	(277)
第九章 自旋、双自旋卫星的姿态确定		刘良栋
9.1	概述	(282)
9.2	姿态信息测量	(283)
9.3	自旋轴姿态的几何确定法	(287)
9.4	姿态确定的精度	(295)
9.5	姿态确定的几何限制	(306)
9.6	章动测量	(309)
9.7	摇摆角的测定	(314)

第十章 三轴稳定卫星的姿态确定	李捷
10.1 利用地球敏感器和太阳敏感器确定卫星 三轴姿态	(317)
10.2 利用星敏感器确定卫星三轴姿态	(330)
10.3 利用全球定位系统确定卫星三轴姿态	(336)
10.4 利用轨道罗盘确定卫星三轴姿态	(339)
第十一章 统计估计理论及其在卫星姿态确定中的 应用	李捷
11.1 统计估计的基本原理	(347)
11.2 统计估计的基本方法	(351)
11.3 中国“东方红二号”通信卫星的姿态确定	(357)
11.4 中国返回式卫星的姿态确定	(360)
11.5 中国传输型对地观测卫星的姿态确定	(370)
第十二章 自旋、双自旋卫星的姿态控制	刘国汉 王长龙 高益军
12.1 概述	(379)
12.2 自旋、双自旋卫星的运动稳定性	(381)
12.3 自旋、双自旋卫星姿态控制的任务和方法	(387)
12.4 自旋、双自旋卫星的姿态机动	(393)
12.5 章动阻尼及控制	(399)
12.6 自旋、双自旋卫星的平旋及其恢复	(405)
12.7 消旋控制系统	(410)
12.8 现状及发展前景	(419)
第十三章 三轴稳定卫星的姿态控制	严拱添等
13.1 三轴稳定卫星的喷气控制	(426)
13.2 采用角动量交换装置的姿态控制系统	(446)
13.3 带挠性附件卫星的姿态控制	(487)

13.4 姿态捕获与姿态机动 (513)

13.5 变轨机动期间的姿态控制 (519)

第十四章 应用空间环境力矩的姿态控制技术

严拱添

14.1 概述 (540)

14.2 磁力矩姿态控制系统 (541)

14.3 重力梯度控制技术 (552)

14.4 太阳辐射压力矩控制 (562)

第十五章 卫星姿态控制系统的测试

邵久豪 丁恩丰 倪行震

15.1 概述 (571)

15.2 测试系统的组成 (573)

15.3 系统测试大纲及流程 (579)

15.4 电磁兼容性试验、环境试验及可靠性试验
..... (588)

15.5 卫星姿态控制系统的测试实例 (594)

第 一 章

概 论

屠善澄

自从 1957 年 10 月 4 日第一颗人造地球卫星成功地进入地球轨道以来,航天技术有了飞速发展. 40 年的航天实践史表明:人类在不断研究、探索和利用空间的征途中已经取得巨大成就,并必将不断取得更大的成就,造福于人类. 而这一切都是建立在严格的科学分析推理和工程实践的基础之上的.《卫星姿态动力学和控制》一书试图根据多年来的研究开发实践经验,并以对完成卫星总体任务具有重要应用需求的姿态控制技术内容为主,阐述人造地球卫星的姿态运动规律及其控制技术的基础理论和实践. 但书中所涉及的大部分内容也适用于更广义的空间飞行器的姿态动力学和控制问题.

1.1 卫星姿态控制的作用和意义

在空间运行的物体,不论是自然天体或是人造天体,其运动可以分解为两部分:一部分是物体作为一个等效质点在所有外力(引力场的引力和非引力场的外力)的作用下所产生的质心平动运动,另一部分是物体在外力矩的作用下所产生的绕其质心的转动运动. 对卫星而言,前者是卫星轨道动力学的研究范畴,而后者则是

卫星姿态动力学的研究内容. 所谓姿态就是指卫星相对于空间某参考坐标系的方位或指向. 早在人造地球卫星上天之前, 天体力学家就曾对最熟悉的两个自然天体——地球和月球——的姿态运动进行了深入的研究. 例如 18 世纪对地球自旋运动的研究, 发现了地球自旋轴在空间指向的岁差和章动; 而对月球(它不自旋)姿态的研究则发展了月球的天平动理论. 人造地球卫星上天之后, 为了充分利用人造卫星执行特定空间任务, 对卫星的姿态运动提出了许多新要求、新课题, 促使卫星姿态动力学和控制的研究工作蓬勃发展.

在轨运行的卫星都承担特定的探测、开发和利用空间的任务, 为了完成这些任务, 对卫星的姿态控制提出了各种要求. 这些要求主要包括姿态稳定和姿态控制两大类.

第一类是要求将卫星上安装的有效载荷对空间的特定目标定向、跟踪或扫描. 例如通信卫星的定向天线要指向地面特定目标区, 对地观测卫星的观测仪器应瞄准地球上某目标或按一定规则对目标扫描; 空间探测卫星要求探测器指向空间某方位, 等等. 为此, 卫星需要捕获目标, 并在捕获目标后保持跟踪和定向. 这种克服内外干扰力矩使卫星姿态保持对某参考方位定向的控制任务称为姿态稳定. 另一类任务则是要求卫星从一种姿态转变到另一种姿态, 称为姿态机动或姿态再定向. 例如, 当任务要求卫星改变其运行轨道时, 必须启动通常与卫星固连的变轨发动机, 在某给定方向产生速度增量, 为此, 需要将卫星姿态从机动前状态变更到满足变轨要求的状态. 姿态稳定和姿态机动都要求姿态控制, 其目的是通过控制作用克服干扰以消除由姿态测量给出的实际姿态与期望姿态的偏差. 测量卫星相对于空间某些已知基准目标(如地球、太阳、恒星)的方位并处理出卫星姿态的过程称姿态确定. 它是姿态控制必要的组成和前提. 某些空间任务不要求对卫星进行姿态控制, 但要求对卫星进行姿态确定, 以便对卫星有效载荷所获得的数据赋予时间和空间指向标志.

除卫星本体的姿态控制外,为了完成空间任务还需要对卫星某些分系统进行局部指向控制,如要求对能源分系统的太阳电池阵进行对日定向控制,对通信分系统的天线进行对地或对其他卫星定向控制等.有时为了获得有效载荷的精确指向,还采用多级控制,即在实现卫星本体姿态控制的基础上,再利用与有效载荷本身有关的敏感器和执行机构实现更精确的指向控制.

1.2 卫星姿态控制技术概述

在轨运行的卫星,由于受到内外力矩的作用,其姿态总是在变化.作用在卫星星体的外力矩是指由卫星与周围环境通过介质接触或场的相互作用而产生的力矩,主要有气动力矩、太阳辐射压力矩、重力梯度力矩和磁力矩等.环境力矩^[1]是客观存在的,它可以成为卫星的干扰力矩,也可以被利用作为姿态稳定和控制的恢复力矩.通常情况下,气动力矩在卫星轨道较低(小于约500km)时为主要的外力矩,而太阳辐射压力矩(它与轨道高度基本无关)则在高轨道(大于约数千公里)时占优势,重力梯度力矩和磁力矩介于二者之间^[2].由卫星本身因素产生的力矩称内力矩,包括用来控制卫星姿态的控制力矩,还有诸如推力偏心、星体内活动部件运动、卫星向外的电磁辐射和热辐射,以及漏气、漏液、升华等因素造成的干扰力矩.姿态控制应在充分利用各种环境力矩的基础上,考虑各种制约因素,采取必要措施,使卫星姿态满足特定任务的需要.

按照是否需要消耗卫星上能源(电能或燃料化学能)或获得控制力矩的方式,卫星姿态控制可分为被动控制和主动控制两大类,以及介于二者之间的半被动和半主动控制.

1.2.1 被动控制

有一类卫星可利用卫星本身的动力学特性(如角动量、惯性矩),或卫星与周围环境相互作用产生的外力矩作为控制力矩源,

因此几乎可以不消耗卫星能源而实现被动姿态控制. 被动姿态控制即被动姿态稳定, 包括自旋稳定、重力梯度稳定、磁稳定和气动稳定等.

(1) 自旋稳定

自旋稳定利用卫星绕自旋轴旋转产生的动量矩在惯性空间的定轴性使自旋轴在无外力矩作用时在惯性空间定向, 在有外力矩作用时则以某角速度进动而不作加速运动. 自旋稳定方式简单、经济、可靠, 常由运载火箭末级使卫星产生自旋, 而卫星本身不需要额外手段就能实现自旋轴在惯性空间的定向. 但纯自旋稳定卫星的转速和指向完全由入轨时星-箭分离的初始条件以及此后运行过程中所受外干扰力矩的累积作用所决定, 因此需要通过主动控制措施实现转速或指向调整. 另外, 由于动力学特性, 非理想刚体自旋卫星只有在绕其最大惯量轴自旋时才是稳定的. 若在星-箭分离或其他时刻受外力矩干扰, 卫星将出现一种称为章动的运动^[3], 这时星体自旋轴不与角动量矢量重合, 需要星体自身耗散能量, 或用专门设置的章动阻尼器来促使卫星的章动及时衰减, 满足自旋稳定的要求.

(2) 重力梯度稳定

重力梯度稳定利用卫星各部分质量在地球引力场中受到不等的重力, 使绕圆轨道运行的刚体卫星的最小惯量轴趋向于稳定在当地垂线方向. 另外, 由于绕地球轨道运动时姿态参考坐标系在空间旋转, 所产生的惯性力矩(陀螺力矩)与重力梯度力矩共同作用使刚体卫星的最大惯量轴趋向于垂直轨道平面. 因此这种方式特别适用于要求卫星某一个面持续对地指向的任务. 重力梯度稳定力矩与卫星到地心距离的立方成反比, 与卫星的最大与最小惯量之差成正比, 通常只对要求指向精度不高的中低轨道卫星才适用. 为了尽可能获得大的惯量差, 通常在最小惯量轴方向伸出一根长杆, 称重力梯度杆, 在杆端设置配重或某些星上部件(如天平动阻尼器). 另外, 由于重力梯度稳定力矩随卫星最小惯量轴偏离地垂

线的偏差角按正弦规律变化,因此在无其它力矩作用时卫星将相对地垂线作不衰减的摆动——天平动.一般采用天平动阻尼器来衰减天平动.天平动阻尼器也常兼作重力梯度杆的端质量.

重力梯度稳定方式简单、可靠、成本低,适用于对地定向的长寿命卫星,曾得到广泛应用.但由于其指向精度不高,目前除廉价小卫星外,纯被动的重力梯度稳定已较少单独使用.但大型卫星及航天器在采用精度较高的主动控制技术时,仍可充分利用其本体的惯量分布特性,发挥被动重力梯度稳定的作用,降低对主动控制的要求,实现被动和主动控制相结合的混合控制.

(3)磁稳定

磁稳定依赖卫星本体的磁偶极子矩与地球磁场相互作用产生力矩,使卫星达到平衡姿态时,卫星磁偶极子矩与地球磁场同方向.采用固定磁偶极子矩实现纯被动磁稳定目前已极少见,但使用其电流可控制的电磁线圈产生磁矩的磁控方式则甚普遍,这是主动和半主动控制系统产生控制力矩的一种常用手段.除提供恢复力矩外,地磁场与卫星本体部件的相互作用还可提供磁滞阻尼和涡流阻尼力矩.确定磁力矩需要知道环境磁场的强度和方向、卫星的磁偶极子矩以及此偶极子矩相对于当地磁场矢量的方向.可以在卫星星体安装能测定当地磁场矢量的仪器——磁强计;但许多磁稳定卫星依赖建立地磁场模型并按轨道位置实现程序控制.后者在方案上有一定风险:在太阳磁暴期间地磁场矢量常出现突变,影响磁稳定的可靠性.

(4)气动稳定

卫星在轨运行时大气中气体分子与星体表面碰撞将产生气动力和气动力矩.通过设计良好的卫星质量分布特性和星体气动外形能使卫星姿态对迎面气流方向稳定,称为气动稳定方式.由于气动力矩随大气密度而变,纯被动的气动稳定只适用于低轨道,一般在轨道高度低于 500km 时才可行.例如返回式卫星,其返回舱再入大气层时的姿态主要依赖气动稳定,由返回舱气动外形及质量

分布特性的设计保证在整个返回再入过程中的姿态稳定。

(5) 辐射压稳定

卫星表面受到空间辐射源(主要是太阳)照射时,入射光对卫星表面产生一净压力,各处表面净压力的综合效应产生合成辐射压力和合成辐射压力矩。由于太阳辐射压与卫星到太阳的距离平方成反比,因此对于地球轨道上的卫星来说,辐射压力和辐射压力矩基本上与卫星轨道高度无关。对 1000km 以上或更高轨道的卫星,理论上利用太阳辐射压力矩可以实现卫星的被动姿态稳定。由于这种稳定方式受制于卫星构形及卫星表面对辐射的吸收和反射特性等因素,且稳定力矩较小,实用意义不大。但辐射压力矩作为一种干扰力矩,是高轨道卫星最大的干扰源。此外,也可利用适当安排卫星接受辐照的表面,使辐射压力矩最小,或利用辐压力矩抵消其他干扰力矩的常值分量,以减轻主动姿态控制系统的负担。^[4]

1.2.2 半被动姿态稳定和半主动姿态控制

在被动姿态稳定的基础上,施加一些附加手段以提高姿态稳定性能(但以消耗星上能源为代价)的系统称为半被动姿态稳定系统。典型的实例是在重力梯度稳定卫星的一个横向轴(垂直于指向地心的最小惯量轴)方向加一个高速旋转的飞轮(动量轮)。这种组合稳定方式利用重力梯度实现最小惯量轴指向地心,利用动量轮角动量的陀螺效应实现动量轮轴指向轨道面法线方向,这样大大改善了姿态稳定性能。为维持动量轮的旋转要付出一定的功耗,但这种半被动稳定方式仍然只依赖于卫星及动量轮的综合动力学特性在地球引力场中维持三轴姿态稳定,而并不借助于姿态敏感器和其他主动控制手段。

与此相仿,在被动稳定的基础上,再利用姿态敏感器测量姿态误差,并依此信息来实现部分主动控制的系统称为半主动姿态控制。半主动姿态控制系统的典型实例是在自旋稳定的基础上加上姿态敏感器(用以测量和确定自旋轴的指向及自旋转速和相位)和执行机构(如反作用推进系统和磁力矩器),以实现卫星自旋转速

控制和自旋轴在空间的定向和进动控制。另一种得到广泛应用的半主动姿态控制系统是在半主动自旋控制系统基础上发展起来的双自旋控制系统。这种卫星由高速旋转的自旋部分(称为转子)和通过轴承连接的低速转动或不转动的消旋部分(称消旋平台)构成。双自旋稳定卫星依靠转子的角动量维持整个卫星的自旋轴对惯性空间定向(通常指向轨道平面法线方向),又通过对消旋平台的主动伺服控制使安装在消旋平台上的有效载荷(如通信天线)指向地球。

1.2.3 主动姿态控制

利用星上能源(电能或推进剂工质),依靠直接或间接敏感到的姿态信息,按一定的控制律操纵控制力矩器实现姿态控制的方式称为主动姿态控制。按控制力矩产生的方式,主动姿态控制又可分为以下几种型式:

1)质量排出式控制 依靠反作用推进系统推力器排出的工质产生的反作用力形成控制力矩实现控制;

2)动量交换式控制 利用卫星内部高速旋转的飞轮与星体间的角动量交换实现控制;

3)磁控制 利用卫星内部通以电流的电磁线圈产生的磁矩与地磁场相互作用产生力矩实现控制。

4)利用环境力矩作为姿态控制力矩。

主动姿态控制系统由姿态敏感器、控制器、执行机构(控制力矩器)和卫星本体一起构成闭环控制回路。姿态敏感器测量和确定卫星相对于空间某些已知基准目标的方位;控制器对测得的信息进一步处理后确定卫星姿态,并根据确定的姿态按满足设计要求的控制律给出指令;控制执行机构按控制指令产生所需的控制力矩,实现卫星的姿态控制。

姿态敏感器按不同的测量基准可以分为:惯性敏感器(如陀螺仪、加速度计)、光学敏感器(如地球敏感器、太阳敏感器、星敏感器等)、射频敏感器和磁敏感器(磁强计)等。

控制器可以由模拟电子装置、数字电子装置或电子计算机实现。

控制执行机构有反作用推进系统(冷气、热燃气、电推力器等)、惯性飞轮、控制力矩陀螺和磁力矩器等。

主动姿态控制系统复杂,成本高。要实现系统的长寿命和高可靠运行,在技术上有较大难度。但由于主动控制系统精度高,反应快,能实现复杂的控制任务,并能应付不测事件,所以已成为卫星姿态控制的主流方式。

以飞轮为主要执行机构的主动姿态控制系统由于可以从太阳能电池阵电源系统持续获得能源供应,尤其适合于长期工作的卫星。这种系统当卫星受到外干扰力矩作用而产生姿态偏差时,可通过变更飞轮转速把外干扰力矩吸收掉。对周期性外干扰力矩(相对于惯性空间),可在不变更飞轮平均转速的情况下完成姿态控制。但外干扰力矩中的非零均值分量将随时间的推移使飞轮角动量不断积累或衰减,因而转速不断增加或下降,直至达到极限值——飞轮饱和。飞轮饱和后即丧失控制能力。为解决此问题,常在飞轮接近饱和前,采用适当的其它控制力矩(喷气反作用力矩、磁力矩、重力梯度力矩等)使飞轮转速回到额定范围以内。这种操作称为飞轮去饱和或卸载。

1.3 姿态控制系统的设计和实现

卫星姿态控制系统设计目的是,在考虑卫星运行环境和寿命及可靠性要求的基础上,根据控制系统部件及相关技术的发展水平,选择适当的控制系统构形,在整星的约束条件范围内,以最经济而可靠的手段满足飞行任务对卫星姿态控制系统的功能和性能要求。卫星姿态控制系统的设计大体上经历概念研究、方案设计和技术设计等三个阶段。这三个阶段并不是绝对独立的,而是互相有联系的一个反复迭代过程。