



$$\begin{aligned}I_1 \dot{\omega}_1 &= (I_2 - I_3) \omega_2 \omega_3 + g_1 \\I_2 \dot{\omega}_2 &= (I_3 - I_1) \omega_3 \omega_1 + g_2 \\I_3 \dot{\omega}_3 &= (I_1 - I_2) \omega_1 \omega_2 + g_3\end{aligned}$$



国家“十一五”出版规划重点图书
空间飞行器设计专业系列教材
航天一线专家学术专著

航天器动力学

SPACECRAFT DYNAMICS



耿长福 编著

中国科学技术出版社

V412.4

455

1-

- 国家“十一五”出版规划重点图书
- 空间飞行器设计专业系列教材
- 航天一线专家学术专著

航天器动力学

SPACECRAFT DYNAMICS

耿长福 编著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

航天器动力学/耿长福编著. —北京:中国科学技术出版社,2006.9
(空间飞行器设计专业系列教材)

· ISBN 7-5046-4444-7

I. 航... II. 耿... III. 航天器-动力学-高等学校-教材 IV. V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 081292 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书。

中国科学技术出版社出版
北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081
电话:010-62103208 传真:010-62183872
<http://www.kjbooks.com.cn>
科学普及出版社发行部发行
北京长宁印刷有限公司印刷

*

开本:787 毫米×960 毫米 1/16 印张:32.75 字数:630 千字
2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷
印数:1—1500 册 定价:46.00 元

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

内 容 提 要

本书系统地阐述了航天器姿态动力学和轨道动力学的基本概念、基本理论和建模的基本方法。全书共分 18 章,其中第 2 章至第 11 章围绕姿态动力学,介绍了刚体、陀螺体、自旋双旋系统、挠性体和充液航天器的动力学建模和稳定性分析的方法。第 12 章至第 18 章系统地讲解了二体、多体问题,奔月及行星际轨道和轨道摄动理论,交会对接和再入返回的有关问题。

本书是航天专业研究生教材,也可以作为从事航天器姿态和轨道控制系统设计的中高级科研人员的参考书。

作者简介

耿长福 1941年出生,研究员,1964年毕业于中国科学技术大学自动化系。1968年中国科学院自动化研究所运动物体控制专业研究生毕业。1980年至1982年作为访问学者在加拿大不列颠哥伦比亚大学(UBC)机械系进修。1989年至1990年作为访问学者在慕尼黑德国航天中心(DLR)工作。多年从事卫星姿态和轨道控制系统设计、试验和发射工作,以及航天器动力学的教学和科研工作。

总 序

我国航天技术走过了 40 多年的光荣历程,正面临着 21 世纪更加蓬勃发展的形势,需要人才,需要知识。

空间飞行器即航天器,包括卫星、飞船、空间站、深空探测器等等。空间飞行器设计专业是航天技术领域的一门主要学科,它所涵盖的知识面很宽,涉及光、机、电、热和系统工程等,是一门多学科交叉综合和工程性很强的新型学科。

本丛书是根据空间飞行器设计专业培养研究生的课程教学需求,同时考虑到空间技术领域的在职中、高级技术人员研究生水平进修的需要而编写的。因此,本丛书全面讲授空间飞行器设计专业领域的基础理论和系统的专门知识,在内容上具有足够的纵深度和宽广度、前沿性和前瞻性。

本丛书的作者都是从事了几十年航天工程的高级设计师和研究员,他们把自己丰富的知识和经验很好地融入到这套丛书中,理论与实践密切结合,使本丛书具有很高的学术水平和工程实用价值。

本丛书将陆续出版。它的出版是非常值得祝贺的,相信它不仅是一套不错的研究生教材,能够为培养高级航天技术人才服务;同时又是一套优秀的学术专著,将对我国航天科学与技术的发展做出贡献。

阎桂荣

2001 年 9 月

前 言

航天器动力学主要研究航天器在空间环境里的运动规律,包括研究质心的运动,即轨道动力学和绕质心转动的姿态动力学。本书用矢量分析法,系统介绍了刚体、陀螺体绕其质心转动的姿态运动学和姿态动力学,并运用李雅普诺夫方法分析了航天器姿态运动的稳定性。在讲述分析力学的基本原理后,详细推导了带挠性附件航天器和充液航天器动力学模型的建立方法,为姿态控制系统设计打下了坚实的理论基础。在轨道动力学中,从牛顿力学和万有引力定律出发,导出了航天器绕地球轨道、登月和行星际飞行轨道、空间交会对接和返回轨道的运动规律,并对航天器在各种扰动力作用下的轨道摄动也作了较详细的说明。

为帮助读者了解稳定性的基本分析方法,附录中用较多篇幅描述了李雅普诺夫稳定性理论。另外书后为相关章节配置了习题,希望通过习题帮助读者加深对书中基本理论的理解。

在本书编写过程中得到了中国空间技术研究院神舟学院的大力支持,特别是吴宏鑫院士和谭维炽研究员不断鼓励并提供帮助。严拱添研究员为全书做了审校,飞行器设计专业教研组的各位专家和同事们也给予了很多帮助,在此一并深表谢意。

作者

2006年9月

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
第 2 章 转动运动学	(4)
2.1 参考坐标系和转动	(5)
2.1.1 正交矩阵	(6)
2.1.2 旋转阵	(6)
2.1.3 Euler 定理	(7)
2.1.4 从 C 求 \vec{a} 和 ϕ	(10)
2.1.5 主轴旋转	(11)
2.2 角位移参数	(12)
2.2.1 两次连续的角位移	(13)
2.2.2 Euler 参数	(14)
2.2.3 Euler 角	(15)
2.2.4 无穷小角位移	(17)
2.3 角速度	(18)
2.3.1 方向余弦的变化率	(19)
2.3.2 轴/角参数	(20)
2.3.3 Euler 参数	(21)
2.3.4 Euler 角	(21)
2.3.5 无穷小角位移	(23)
2.4 各姿态参数的选用	(23)
第 3 章 姿态运动学方程	(25)
3.1 点质量 \mathcal{P} 的运动方程	(25)
3.1.1 矢量运动方程	(25)
3.1.2 标量运动方程	(26)

3.2	质点系 $\sum_{n=1}^N \mathcal{P}_n$ 的运动学方程	(27)
3.2.1	矢量运动方程	(28)
3.2.2	动能	(31)
3.2.3	旋转参考坐标系	(31)
3.2.4	标量运动方程	(32)
3.2.5	系统的惯量矩阵 \mathcal{M}	(33)
3.2.6	连续体——质点系的极限	(35)
3.3	刚体 \mathcal{B} 的运动方程	(37)
3.3.1	矢量运动方程	(38)
3.3.2	标量运动方程	(39)
3.3.3	动能及拟拉格朗日方程	(40)
3.3.4	系统惯量矩阵 \mathcal{M}	(41)
3.4	含阻尼器的刚体 $\mathcal{B} + \mathcal{P}$	(42)
3.4.1	矢量运动方程	(43)
3.4.2	标量运动方程	(45)
3.5	双旋系统 $\mathcal{B} + \mathcal{W}$	(46)
3.5.1	矢量运动方程	(47)
3.5.2	标量运动方程	(49)
3.6	简单的多刚体系 $\mathcal{B}_1 + \mathcal{B}_2$	(50)
3.6.1	矢量运动方程	(52)
3.6.2	标量运动方程	(54)
3.7	多刚体系动力学	(56)
3.7.1	建模	(56)
3.7.2	公式的建立	(56)
3.7.3	运动方程结构	(58)
第4章	刚体姿态动力学	(60)
4.1	基本运动方程	(60)
4.2	轴对称自由刚体运动	(62)
4.2.1	解 $\bar{\omega}(t)$	(63)
4.2.2	方向余弦 $C(t)$ 的解	(63)
4.2.3	几何解释	(65)
4.2.4	Euler 参数	(68)

4.3	非对称自由刚体的运动	(69)
4.3.1	$\omega(t)$ 的解析解	(70)
4.3.2	$\omega(t)$ 的几何解释	(71)
4.3.3	方向余弦阵 $C(t)$	(74)
4.3.4	几何解释 $C(t)$	(74)
4.4	刚体 \mathcal{R} 的运动稳定性	(77)
4.4.1	李雅普诺夫(Ляпунов)第二种方法, ω 的稳定性	(77)
4.4.2	姿态稳定性:无穷小分析	(78)
4.4.3	惯量比 k_1 和 k_3	(79)
4.4.4	方向稳定性	(82)
4.4.5	结论	(83)
4.5	外力矩作用下刚体的运动	(84)
第5章	自旋刚体内能耗散对方向稳定性的影响	(86)
5.1	具有能汇的准刚体 Q	(87)
5.1.1	方向稳定性——最大轴原理	(89)
5.1.2	Landon 准则	(91)
5.2	含有点质量阻尼器的刚体运动	(91)
第6章	多自旋体航天器的方向稳定性	(97)
6.1	陀螺体 $\mathcal{R} + \mathcal{R}'$	(97)
6.1.1	运动方程	(97)
6.1.2	含有多个旋转体	(99)
6.1.3	自由陀螺体	(99)
6.2	载体角速度为零的陀螺体	(100)
6.3	零动量陀螺体	(103)
6.4	一般情况	(104)
6.4.1	能量及转子转速固定	(104)
6.4.2	角动量和飞轮转速固定	(107)
6.4.3	简单旋转的稳定性	(110)
6.4.4	飞轮的转轴平行于惯量主轴	(112)
6.4.5	参数平面 $k_1 - k_3$ 稳定区图	(113)
6.4.6	两个等效陀螺	(114)
6.5	同轴飞轮系统	(115)
6.5.1	单飞轮	(116)

	6.5.2 扩展到 N 个飞轮	(117)
第 7 章	内能损耗对陀螺体方向稳定性的影响	(120)
7.1	采用能汇法分析陀螺体	(120)
7.1.1	渐近 ω 稳定	(121)
7.1.2	渐近方向稳定	(123)
7.1.3	非自旋载体	(125)
7.1.4	飞轮轴平行于主轴	(126)
7.1.5	对称陀螺	(129)
7.1.6	单一准刚性飞轮 Q_w	(130)
7.1.7	准刚体飞轮和刚体飞轮 $Q_{w1} + \mathcal{M}_2$	(134)
7.1.8	同轴准刚性飞轮系	(137)
7.1.9	扩展到二个准刚体系	(140)
7.2	带有阻尼器的陀螺体	(141)
7.2.1	带一个阻尼器的陀螺体	(141)
7.2.2	带两个阻尼器的对称陀螺体	(146)
第 8 章	航天器力矩	(148)
8.1	引力力矩	(148)
8.1.1	一般考虑	(148)
8.1.2	基本结果	(149)
8.1.3	几个天体	(153)
8.1.4	非球形天体	(154)
8.2	气动力矩	(156)
8.3	太阳辐射压力	(158)
8.4	磁力矩	(159)
第 9 章	分析力学	(160)
9.1	约束和虚位移	(160)
9.1.1	约束及分类	(160)
9.1.2	虚位移	(161)
9.2	理想约束与虚功原理	(162)
9.2.1	理想约束	(162)
9.2.2	虚功原理	(163)
9.3	达朗贝尔原理和拉格朗日第二类方程	(164)
9.3.1	达朗贝尔原理	(164)

9.3.2	广义坐标,广义力	(165)
9.3.3	完整系统的第二类拉格朗日方程	(168)
9.3.4	保守系统的拉格朗日方程	(170)
9.4	能量积分与循环积分	(173)
9.4.1	能量积分	(173)
9.4.2	循环积分	(175)
9.5	哈密顿(Hamilton)正则运动方程	(178)
9.6	凯恩(Kane)方程	(181)
9.6.1	广义速度,偏速度,偏角速度	(181)
9.6.2	广义主动力、广义惯性力	(184)
9.6.3	凯恩动力学方程	(187)
第10章	挠性体动力学	(194)
10.1	集中质量法	(194)
10.1.1	平衡点附近的线性化方程	(194)
10.1.2	自由振动的特征解	(196)
10.1.3	固有振型的性质	(197)
10.1.4	方程的解耦	(198)
10.1.5	强迫振动的情况	(198)
10.2	连续系统的小振动	(199)
10.2.1	梁的弯曲变形	(199)
10.2.2	梁的平衡	(200)
10.2.3	梁的弯曲振动	(201)
10.2.4	固有振型的性质	(204)
10.2.5	振型坐标方程	(206)
10.2.6	强迫振动	(207)
10.2.7	一般弹性体的振动	(207)
10.3	带挠性附件航天器的凯恩(Kane)法	(207)
10.4	带挠性附件航天器的混合坐标法	(218)
10.4.1	带挠性帆板的航天器动力学	(218)
10.4.2	例题	(225)
10.4.3	模态截断和溢出	(227)
10.4.4	混合坐标法的优点	(227)

第 11 章	充液航天器姿态动力学	(228)
11.1	流体的运动学和动力学	(228)
11.1.1	流体运动学方程	(228)
11.1.2	流体动力学方程	(230)
11.1.3	伯努利方程	(232)
11.1.4	边界条件	(233)
11.2	全充液非自旋航天器	(234)
11.2.1	斯托克斯 - 儒科夫斯基势函数	(234)
11.2.2	等效刚体	(234)
11.2.3	轴对称腔体	(236)
11.3	充液自旋航天器的平衡状态及稳定性	(238)
11.3.1	纯自旋平衡状态	(239)
11.3.2	充液航天器的动势	(241)
11.3.3	鲁米扬采夫动势定理	(243)
11.3.4	动势定理线性化表示	(243)
11.3.5	充液航天器的稳定性准则	(245)
11.4	有加速度时充液航天器的微幅运动	(247)
11.4.1	平衡状态和微幅运动	(247)
11.4.2	固定腔体中理想流体的横向运动	(249)
11.4.3	圆柱腔情况	(250)
11.4.4	航天器和液体的耦合运动	(252)
11.5	轴对称贮箱常重力晃动建模	(255)
11.5.1	等效力学模型	(256)
第 12 章	轨道动力学基础——二体问题	(262)
12.1	二体问题的一般解	(262)
12.2	有心力运动	(265)
12.3	开普勒时间方程	(269)
第 13 章	轨道控制	(273)
13.1	轨道的建立	(273)
13.1.1	偏心率和真近点角的确定	(273)
13.1.2	小偏心率轨道	(276)
13.2	共面变轨和机动	(277)
13.2.1	单冲量机动	(277)

	13.2.2 Hohmann 转移	(279)
	13.2.3 其他共面变轨	(284)
13.3	非共面变轨	(286)
13.4	静止卫星的人轨控制	(287)
	13.4.1 静止卫星轨道	(287)
	13.4.2 静止卫星的人轨过程	(289)
第 14 章	多体问题	(295)
14.1	天体力学	(295)
	14.1.1 分布质量的势	(295)
	14.1.2 n 体问题	(297)
	14.1.3 干扰二体运动	(299)
	14.1.4 影响球	(301)
14.2	圆锥曲线轨道上的位置和速度	(303)
	14.2.1 圆锥曲线的几何性质和动力学性质	(303)
	14.2.2 位置和速度公式	(305)
	14.2.3 用类似的方法推导椭圆轨道的相应表达式	(307)
14.3	测轨	(310)
	14.3.1 时间测量	(311)
	14.3.2 站位置	(312)
	14.3.3 轨道基本要素及其变换	(316)
第 15 章	奔月及行星际轨道	(318)
15.1	限制三体问题	(318)
	15.1.1 地球—月球系统中的卫星	(318)
	15.1.2 在月球轨道平面内的卫星	(322)
	15.1.3 希尔曲线	(324)
	15.1.4 平动点	(326)
15.2	月球的轨道要素	(328)
	15.2.1 轨道要素	(328)
	15.2.2 月球的天平动	(329)
15.3	简单的奔月轨道	(329)
	15.3.1 飞行时间及入轨速度	(330)
	15.3.2 最小能量飞行轨道	(330)
15.4	奔月轨道似近拼接	(331)

15.4.1	转移轨道	(332)
15.4.2	圆锥曲线拼接点的条件	(334)
15.4.3	进入月球引力场的轨道	(335)
15.5	非共面奔月轨道	(337)
15.5.1	奔月轨道和地球卫星轨道设计的区别	(337)
15.5.2	轨道设计的约束条件	(338)
15.5.3	地心扫角的确定	(339)
15.5.4	选择发射日期	(341)
15.5.5	奔月轨道实例	(343)
15.6	行星际轨道	(346)
15.6.1	轨道要素	(346)
15.6.2	日心转移轨道	(347)
15.6.3	飞离时的相角	(349)
15.6.4	逃逸出地球的影响球	(351)
15.6.5	到达目标行星	(353)
15.6.6	有效碰撞截面	(354)
15.6.7	非共面行星际飞行变轨	(356)
第 16 章	轨道摄动	(359)
16.1	地球引力摄动力	(359)
16.1.1	椭球形中心体的势能	(359)
16.1.2	任意形状物体的势能	(362)
16.1.3	回转体的势能	(363)
16.1.4	引力势能中的摄动力	(366)
16.2	轨道要素的变分	(368)
16.2.1	摄动力和速度改变	(369)
16.2.2	半长轴的变化率	(370)
16.2.3	偏心率的变化率	(371)
16.2.4	升交点赤径的变化率	(371)
16.2.5	拱点线方位的变化率	(373)
16.2.6	轨道倾角的变化率	(375)
16.3	轨道要素的长期改变	(376)
16.3.1	轨道平面的进动	(376)
16.3.2	拱点线的转动	(378)

16.4	大气摄动	(381)
16.4.1	圆轨道	(382)
16.4.2	椭圆轨道	(384)
16.5	日月摄动	(387)
16.6	太阳光压摄动	(390)
16.7	摄动计算方法	(392)
16.7.1	Cowell 方法	(392)
16.7.2	Encke 法	(393)
16.7.3	广义摄动法	(396)
第 17 章	再入和着陆	(397)
17.1	再入和着陆的过程	(398)
17.2	再入航天器的分类	(399)
17.3	返回卫星的再入和着陆控制	(401)
第 18 章	空间交会对接	(404)
18.1	交会对接的目的和阶段划分	(404)
18.1.1	交会对接的目的	(404)
18.1.2	交会对接的阶段划分	(405)
18.2	交会对接动力学方程	(410)
18.2.1	坐标系	(410)
18.2.2	相对轨道动力学方程	(412)
18.3	远程导引阶段	(417)
18.4	近程导引阶段	(421)
18.4.1	第一种导引方法	(421)
18.4.2	第二种导引方法	(422)
18.5	停靠和对接	(425)
18.6	交会对接的控制	(426)
习题	(430)
附录 1	稳定性理论基础	(459)
附录 2	矢量运算法则	(489)
附录 3	四元数法	(498)
参考文献	(505)

第1章 绪论

动力学是研究物体运动和它所受作用力之间关系的科学。研究大气层外,行星际或恒星际空间中人造航天器(卫星、飞船、航天飞机、空间站等)的动力学称为航天器动力学。它有两个分支,姿态动力学和轨道动力学。

航天器姿态动力学是研究航天器在环境力和内力作用下,围绕其质量中心运动的规律。它既研究航天器整体的姿态运动,即刚体式的转动,也研究其各部分之间的相对运动。如天线,太阳帆板等绕轴承和铰链的相对转动,结构弹性变形的振动等。航天器为完成科学试验,天文观测,军事侦察,通讯等任务,经常要求本体或一部分部件(如天线、观测平台、天文望远镜、照相机等)在轨道运行期间保持某个确定的姿态,如对准地球、太阳、恒星等。这就要完成姿态控制,为确定姿控方案就必须了解航天器在各种内力、内力矩、外力、外力矩作用下姿态运动的规律,这就是航天器姿态动力学要解决的问题。

18世纪在天体力学研究中达朗贝尔(D'Alembert)和欧拉(Euler)关于地球自转进动、章动和岁差理论,以及拉格朗日(Lagrange)关于月球绕质心的天平动理论就是航天器姿态动力学的前身。它们是针对非球形地球、月球在太阳和地球的平方反比律引力场中姿态运动的问题。

早期航天器规模小刚度大,可近似为六自由度的刚体。因此其姿态动力学的建模问题可直接应用经典的刚体动力学理论来研究,且可得到满意的分析结果。然而刚体模型的假设也可能导致任务的失败。最典型的例子是1958年美国发射的第一颗卫星探险者一号,卫星的姿态控制采用刚体自旋稳定的原理。卫星入轨后很快就失稳而翻倒,其根本原因是:卫星带有四根鞭状天线,而仍被看作刚体。由于建立在刚体动力学模型基础上的控制方案缺乏理论上的严密性,存在失稳的可能性。后来人们提出了准刚体的模型,用以修正刚体模型。用此模型分析研究早期卫星的失稳原因,得到较好的结果。

随着卫星应用的不断发展,航天器的规模不断扩大,对姿态控制的精度和稳定性要求也越来越高。由于航天器的质量受运载工具的限制,使航天器的结构刚性较低,因此结构振动的影响不能忽略。同时航天器上携带大量的液体燃料、