

力学与工程

——21世纪工程技术的发展对力学的挑战

主编 李国豪 何友声

上海交通大学出版社

庆祝上海市力学学会成立 40 周年

力 学 与 工 程

——21 世纪工程技术的发展对力学的挑战

李国豪 何友声 主编
上海市力学学会组稿

上海交通大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

力学与工程:21 世纪工程技术的发展对力学的挑战/
李国豪主编. - 上海:上海交通大学出版社,1999
ISBN 7-313-02250-6

I. 力… II. 李… III. 力学-应用-工程技术 IV. 03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 26530 号

力学与工程

——21 世纪工程技术的
发展对力学的挑战

主编 李国豪 何友声

上海交通大学出版社出版发行

上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030

电话 64281208 传真 64683798

全国新华书店经销

常熟市印刷二厂·印刷

开本:850×1168(mm) 1/32 印张:14.5 字数:374 千字

版次:1999 年 8 月 第 1 版

印次:1999 年 8 月 第 1 次

ISBN 7-313-02250-6/O·151

定价:40.00 元

本书任何部分文字及图片,如未获得本社书面同意,
不得用任何方式抄袭、节录或翻印。

(本书如有缺页、破损或装订错误,请寄回本社更换。)

序 言

近代力学渊源于 19 世纪及更早的经典力学。它的蓬勃发展始于 20 世纪初,一个根本原因在于主动与工程技术发展相结合,为生产、经济、军事服务,获得巨大推动力,于是如一轮红日,喷薄而出。它与航空、航天工业的相互依赖和促进已成了技术科学发展史中的一个范例,影响面已广及机械、动力、交通运输、能源、材料、土木、水利、环境、生物、气象、海洋、地质等许多领域,深入到人类生活的各个方面。

20 世纪即将结束,人类面临和平与发展的新挑战,经济全球化、知识经济初见端倪、经济与社会可持续发展都对科学技术提出了更高的要求。力学界的同行们感到压力、困惑甚至彷徨,21 世纪的力学往何处去已成了同行中经常关注的议题。

21 世纪力学的兴衰取决于两个方面,一是力学在传统的工程技术中能否一如既往走创新之路,解决新问题,对经济、生产和技术的发展真正起到促进作用,作出相应的贡献。这方面还有大量工作要做。产品要改进,要更新换代,以满足人们对生活质量的更高要求,这就给力学工作者提供了广阔的用武之地。美国通用汽车公司的研究开发部拥有大量的力学博士,并且作为主力,这是一个有力的明证。二是力学能否深入到新兴产业和高新技术

中去,开拓出新的天地,孕育出新的生长点,为发展新兴产业作出贡献。应该承认,当前力学工作者对生物技术、新材料、新能源、电子信息技术的发展还甚少介入,迫切需要主动积极参与,犹如早年的航空力学创建者和近年的生物力学开拓者一样,披荆斩棘,闯出一条新路来。

任何科学技术的发展都离不开社会的需要。不然将成为无根之木、无源之水。上海是国家的现代工业、新兴产业的重镇,作为本地区的力学工作者,为地区经济服务,为上海的支柱产业发展作贡献,责无旁贷。我们的重要职责之一就是要与地区社会经济发展命运与共,做好服务工作;把力学融化在各行各业之中应成为上海力学界的特色之一。

值此上海力学学会成立 40 周年之际,我们特地邀请本市工程与力学界的一些前辈和专家,就上海市正在发展的有关领域与力学的关系以及进入 21 世纪所面临的挑战作相应的介绍和展望。我们希望这些论述和见解对广大力学工作者有所启迪,对力学界的研究生选择方向有所帮助,并就教于各方面有关专家。

本书承上海交通大学出版社鼎力协助出版,何福保教授和叶其琪高级工程师为本书的顺利出版尽心尽责,在此一并深表谢忱。

李国豪
何友声

1999 年 5 月 1 日

目 录

力学与航空航天

- 1 力学与航天 孙敬良
- 40 现代飞机结构设计中的若干强度问题 方如华 徐晓飞

力学与核电工程

- 53 反应堆力学与核电工程 翁智远
- 66 力学与核电工程 韩良弼 徐定耿

力学与环境工程

- 88 大型河口复杂流动研究
——兼论长江口水环境、航道整治等问题 何友声 刘 桦
- 119 上海市苏州河整治中的环境水力学问题研究 王道增
樊靖郁

力学与动力工程

- 143 力学与汽车发动机 范 荫
- 173 光测力学与动力机械工程 张 熹 王海峰

力学与现代建筑

- 191 现代力学与东方明珠 江欢成
- 205 21 世纪建筑工程及技术对力学的挑战 沈祖炎
- 230 近代重大工程分析中的关键力学问题研究 曹志远
- 250 力学与建筑结构诊断、加固 王孔藩

力学与地下工程

- 278 力学与地下工程 孙 钧
304 软土深基坑考虑时空效应的空间计算分析 刘建航 范益群 孙 巍 刘国彬

力学与风工程

- 318 力学与风工程 项海帆
330 风工程力学研究最新进展和 21 世纪展望 张相庭

力学与船舶海洋工程

- 253 世纪之交的船舶力学 吴有生

力学与材料工程

- 400 固体力学与材料科学 匡震邦

力学与生物工程

- 421 生物力学及其应用 柳兆荣 章开荣

力学与交通工程

- 435 流体力学在交通领域的应用与发展 陈康民 顾国庆

力学与软件工程

- 443 多体系统动力学的回顾与展望 刘延柱 洪嘉振
452 编后记

力学与航天

孙敬良

(上海航天技术研究院)

1 前言

航天技术是人类探索、开发和利用太空及地球以外天体的综合性工程技术,是本世纪科学技术的重大成就之一。从 19 世纪后期到 20 世纪初,涌现了许多勇于探索的航天先驱者。如俄国科学家齐奥尔科夫斯基在 1903 年基于动量守恒原理推导出火箭运动的基本公式,从理论上证明了在当时的技术条件下,可以通过采用多级火箭提高质量比,在较高的喷气速度下获得一定的速度,从而克服地球引力进入太空,奠定了航天学的基础。此后,美国的戈达德把航天理论与工程技术相结合,研制出世界上第一枚液体火箭。德国的奥伯特,论述了火箭飞行的数学理论,提出了许多关于火箭结构和飞行的新概念,陆续开展了小型液体火箭的研制工作。随后近代空气动力学、弹道学、飞行器结构力学、推进技术、控制理论和电子技术等取得了长足进步,为现代航天的发展准备了强有力的技术基础和条件。

从齐奥尔科夫斯基导出火箭运动的基本公式以来,经过了半个世纪,1957 年前苏联发射了第一颗人造地球卫星,然后航天技术发展迅速。1961 年前苏联宇航员加加林驾驶“东方一号”宇宙飞船第一次飞出大气层,进入太空;1969 年美国宇航员阿姆斯特朗乘坐“阿波罗”号宇宙飞船第一次登上了月球;1971 年前苏联建

立了第一座长时间留空的“礼炮一号”空间站；1981 年美国发射了第一架载人“哥伦比亚”号航天飞机；90 年代美国实现了火星探测计划；国际空间站第一个舱于 1998 年 11 月 20 日升空，这个名叫曙光号的功能货舱是由俄罗斯质子-K 火箭发射入轨的。入轨后，它展开了天线和太阳能电池板，并于 11 月 24 日借助自己的发动机工作在近地点 386km、远地点 404km 的预定轨道上。在下世纪初，美国与俄罗斯、西欧、加拿大、日本等合作，可望联合建成大型国际空间站。

我国于 1970 年发射了中国第一颗人造地球卫星；1975 年首次成功发射返回式卫星；1981 年首次用风暴一号运载火箭实现了一箭三星；1984 年用长征三号运载火箭发射地球静止轨道通信卫星；70 年代以来，自行研制了长征系列运载火箭，已发射了 50 多颗地球卫星，如图 1 所示。目前，我国的运载火箭近地轨道运载能力达 11 吨，地球同步转移轨道运载能力达 5 吨，我国的运载火箭技术已跻身于世界先进行列。

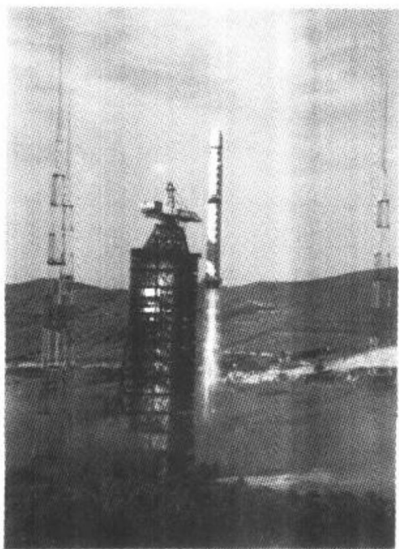


图 1 长征四号运载火箭

航天高科技的发展，同时也带来了巨大的政治、经济、科学和社会效益。利用应用卫星已经建成了信息高速公路、GPS 定位系统、空间灾害防救系统，实现了环境资源探测，卫星云图和其他气象资料使天气预报准确率大为提高。利用太空的失重和高纯净条件，生产出高质量和高纯度的药物、半导体材料和玻璃制品，大大提高了劳动生产率。在未来还可以实现月球开发、对地交通管制和太空旅游等。

但是人类探索外层空间的活动,是当代最具有风险的活动,几十年来人类航天活动不仅涌现了一幕幕激动人心的伟大成功的画面,也记载了一次次惊心动魄的悲壮失利场景。举世瞩目的事件有前苏联联盟号飞船飞回大气时船毁人亡,美国挑战者号航天飞机起飞不久凌空爆炸,世人记忆犹新。1996年2月我国“长征3乙”运载火箭首飞升空爆炸,紧接着欧洲“阿里安”5型运载火箭又起烟云。

历次航天失利,人类领受的不仅仅是悲哀和痛惜,还有更宝贵的警醒和振奋,这对航天事业振兴和发展都是至关重要的。而航天与力学的关系是十分密切的,例如,联盟号飞船由于跨音速气动特性不理想导致了第一次飞行中船毁人亡;我国第一枚中近程导弹由于设计方案中将弹性弹体按刚性体处理,导致了试飞中姿态失控而坠毁。美国在为“阿波罗”登月计划研制“土星V”火箭过程中,由于控制系统的速率陀螺安装位置不合适,明显感受到弹性振动,而导致“土星V”飞行故障。多年来,航天作为需求牵引,力学作为航天技术的推动因素之一,两者相互促进,相得益彰。

由于航天所涉及的力学问题非常广,本文仅对近40年来轨道动力学、姿态动力学、多体系统动力学、运载器结构动力学、气体动力学和火箭推进技术的成就及下世纪的发展作些介绍。

2 力学在航天领域的应用与展望

2.1 轨道动力学

航天器的轨道运动理论以牛顿力学为基础,以天体力学中的轨道摄动理论为依据,研究航天器的质心运动。航天器轨道动力学研究范畴包括:轨道摄动、轨道设计及其优化、轨道测量等。

2.1.1 轨道摄动

航天器在轨道运动中所受到的力不仅是中心引力,还受到各种摄动力的作用。尽管摄动力远小于中心引力,但是摄动力长期累积的作用使航天器的实际运行轨道偏离开普勒轨道。因此,轨道摄动的研究已经成为航天器的轨道确定、观察预报、轨道改进和轨道设计等工作的基础。

航天器受到的主要摄动力有中心体非球形摄动力、大气阻力、太阳辐射压力和其他天体引力等。40多年来,航天器在运行过程中受到的作用力模型已逐步精化。地球引力场模型已从全球地心坐标的500m精度发展到GEM系列地球重力场模型。应用人造地球卫星精密轨道测定所达到的卫星空间位置误差为米级。大气阻力的计算误差是卫星轨道测量的主要误差之一。国外早在60年代就开展了大气模式的研究,得到了如CIRA-86,MSIS-90等著名的大气模式。这些模式的大气总密度误差为10%,这一精度已达目前大气密度测定的极限。大气密度的研究,主要使用了卫星的大气阻力资料。这些资料积累时间较长,包括了许多太阳活动周期,在地面高度、地理位置和时间分布上较为合理,但受阻尼系数、卫星面积质量比不准的影响及测轨误差的限制。国内从60年代末起,也开展了大气模式的研究,主要研究卫星的大气阻力摄动的计算方法等。60年代,人们发现“回声”1号(echo-I)等人造地球卫星的运动规律异常,开始注意太阳辐射压力;此外,中心天体以外的其他天体对航天器的引力也是一种摄动力。近年来,随着星座技术的发展,人们开始注意研究星座的稳定性问题。星座中各卫星受到的光压力、其他天体摄动力的差异是影响星座稳定性的主要原因,因而对这两项摄动力的计算精度要求在不断地提高。轨道测定精度的不断提高,一些量级更小的摄动因素,诸如固体潮、海潮摄动、地球反照辐射摄动、地球磁场摄动、相对论效应、坐标系附加摄动以及小推力摄动等也在一些要求高精度测轨、定位

的卫星中得以应用。

从 N 体问题出发得出摄动运动方程,是轨道摄动理论的基础。在惯性坐标系中, n 个天体的摄动运动方程为 $6n$ 阶常微分方程组,由这一方程组可得到 10 个初积分,其中 6 个为质量中心运动积分,三个为动量矩积分,一个为能量积分,要完全解出方程组,应求出其余的 $(6n - 10)$ 个积分。1889 年,邦加雷(poincare')证明:如用轨道根数作变量,则三体问题不存在新的单值解析积分。虽然到目前为止,并没有把寻找新积分的路堵死,但至今尚没找出来。在讨论一个小质量天体(如人造地球卫星)在两个大质量天体引力下的运动时,可忽略小天体对这两个大质量天体的引力,只讨论小天体在它们的引力作用下的运动,这样的问题就称为限制性三体问题。在对月球或其他行星甚至飞出太阳系的星际航行任务中,除了必须用力学知识进一步描述天体自身的运动规律外,还需对 N 体问题及限制性三体问题作进一步研究。虽然雅可比(Jacobi)对限制性三体问题求得了一个正确的积分解,但并不是初始条件和时间的解析函数。事实上,由于限制性三体问题是一个非线性动力学系统,取得封闭解是困难的。 N 体问题的解算更加困难,需作进一步的探索、研究。

2.1.2 轨道设计及优化

航天器轨道设计的任务是,按照航天器的使命,利用动力学特性,选择最有利的运行轨道。40 多年来,已有了多种可供选择的实用轨道,例如,地球静止轨道、太阳同步轨道、星下点回归轨道等。对于某些应用,需多颗卫星组成卫星星座,如低轨道的子午仪卫星星座由 4~5 颗卫星组成,以保证全球任何地方的用户都能在平均间隔为 1.5 小时左右时间内利用卫星定位一次。

轨道设计在应用卫星的任务分析中占有重要的地位,在轨道设计中必须考虑星下点轨迹、对地覆盖、卫星星食对电源及热控系统的影响、发射窗口对观测质量、星上电源、姿态测量的影响等。

经过 40 多年的发展,有关地面覆盖、电源、发射窗口、热控等因素的计算都已有了比较完善的计算机软件。

有的卫星有轨道机动的要求。轨道转移和空间交会是轨道机动的两种主要形式。轨道转移的先期研究主要基于冲量假设。对于推力较大变轨时间较短的情况,这种假设是适用的;对于具有太阳能帆板和天线的卫星,其推力水平较低,为此必须考虑有限推力作用下的轨道转移问题。高性能的液体火箭发动机被广泛采用后,有限推力轨道转移变得尤为迫切。特别对于同一推进系统,变轨节省的燃料可以用于延长卫星寿命,因此最省燃料的轨道转移研究具有格外重要的意义。最普遍的轨道机动是在同平面内改变轨道的高度。因为初始轨道和目标轨道并不相交,因而要求有一个转移轨道,即在两圆轨道之间燃料最省的霍曼(Hohmann)“转移轨道”。解决最省燃料轨道转移问题至少有两个途径:一个途径是研究有效的求解非线性两点边值问题的迭代算法;另一途径是研究合适的建模方法,简化两点边值问题,用已经成熟的算法求解。对于最省燃料的多弧段轨道转移,研究有效快捷的迭代算法是一件有价值的工作。对于空间交会对接的轨道机动问题,由于飞船所带燃料是有限的,在变轨过程中尽量减少燃料消耗,可以增加有效载荷,提高经济效益。因而最省燃料的有限推力交会对接问题是目前交会对接领域里的热门话题之一。随着广泛投入应用的卫星星座的发展,星座的稳定性研究及星座形状控制,即卫星间相对位置的控制和保持已经成为一个重要的技术课题,采用轨道控制技术可以防止卫星间碰撞、敏感器的干扰、太阳电池阵的遮挡等。此外,建立具有我国特色的导航卫星星座也将是我国 21 世纪初期的迫切任务。

自美国阿波罗(Apollo)计划实现了人类的登月愿望后,美、欧、日、俄等国正在实施一系列月球、火星探测计划,至今已发射了近百个不载人的深空探测器。深空探测主要包括地月飞行、行星际航行、恒星际飞行三类使命。如果略去太阳的摄动,则地月飞行

就是限制性三体问题。在行星际航行中,航天器同时受到太阳和各行星的引力作用,属于多体问题。通常用近似分析方法处理这类问题。在引进引力作用球(在地月系统,月球的引力作用球半径约为 66000 公里;在日地系统,地球的引力作用球半径约为 922000 公里)概念的前提下,将它们简化为多个二体问题。例如行星际飞行轨道分割为三段(三个二体问题):出发行星引力作用球部分(逃逸轨道)、太阳引力作用球部分(日心过渡轨道)和目标行星引力作用球部分(俘获轨道)。由于行星引力远小于太阳引力,航天器在日心过渡轨道飞行的时间最长,因而在轨道设计中,总是选定了日心轨道以后再反过来确定逃逸轨道。如美国的“海盗”号探测器在历时 11 个月的飞行中,经过了 2000 多次自主轨道调整,最后在火星表面软着陆,落点精度为 50 公里。显然,利用上述方法设计、计算的轨道是近似的,利用数值积分方法计算比较精确,但计算量大,且受到力学模型、天文常数精度的限制,也会引入误差。恒星际飞行只有在掌握了光子火箭(飞行速度接近光速)技术以后才有可能实现,相对论则是恒星际飞行的理论依据。

在 21 世纪的深空探测使命中,需进一步研究月球和各大行星自身的运动规律;需研究目标天体的表面大气状况;轨道设计的优化问题也要引起重视(例如,为了节省能量,可以利用再入大气层时所受的阻力来改变飞行轨道,或利用另一颗行星的重力场来实现对目标行星的探测等);随着飞行时间、距离的增大,轨道控制、测量技术出现的一些新问题也需要研究解决。此外,对 N 体问题及限制性三体问题也需作进一步的研究,等等。

2.1.3 轨道测量

轨道测量是利用对航天器的跟踪资料来确定航天器的空间位置、速度,这一信息除了可为航天器的应用服务(如导航、定位等)以外,还可检验、精化航天器轨道动力学的模型。动力学模型的精化又可反过来促进轨道测量技术的发展。

至 60 年代后期,航天器轨道运动的一阶摄动理论获得完整的解析解,为轨道设计优化、轨道测量提供了精确的计算依据,并应用于我国第一颗人造卫星“东方红”1 号以及以后卫星任务的轨道设计、测量工作中。

航天器的迅猛发展,对轨道测量提出了越来越高的要求。一方面要求定轨方法具有很强的实时性;另一方面对轨道测定精度的要求越来越高。60 年代定轨精度为百米级,70 年代提高到米级,80 年代已达到分米级,90 年代又向厘米级定轨精度努力。与此同时,轨道跟踪测量的精度也在不断提高。70 年代高精度照相跟踪数据的测角精度为 2 角秒,多普勒测速精度为 $2\sim 3\text{cm/s}$,而今天的激光测距数据的精度已达到 2cm ,多普勒测速精度可达到 3mm/s ,轨道测量技术的发展为航天器轨道确定方法的进展打下了坚实的基础。自 80 年代起,我国已能同时获得航天器的方位、仰角、距离、视向速度信息,测量精度也明显提高。综合利用这些信息,进行加权处理的航天器轨道测定方法,自 90 年代初开始在我国逐步建立起来,并在提高航天器初始轨道测定精度方面起了良好的作用。

目前,卫星轨道理论已基本完善,剩下的问题主要是动力模型的精化和统计定轨方法的应用与不断改进。由于观测精度的不断提高,那些曾被忽略的影响卫星轨道动力学的因素(如相对论效应等)必须重新仔细考查。模型的精化,将会对相应的轨道理论提出新问题,这些都是当今卫星轨道力学中的一个重要研究内容。由于测量手段的改进,现在可以在短时间内提供大量的高精度的观测资料,这将有助于定轨精度的提高,同时也促使寻求新的定轨方法。在此背景下,最优估计理论(统计定轨)很自然地被引用到卫星定轨中。因而统计规律本身的问题又是今后研究的重点。

近年来,利用星载 GPS 接受机进行卫星自主定位成为卫星轨道测定的一个有效途径。这种方法实际上是一种几何方法,它避免了动力学模型误差对测轨精度的影响。但是,这种方法也有很

大的局限性,例如,它只能静态地确定观测时刻相对于一组导航星的距离及其变化率,也不能对卫星轨道作出预报,在使用 GPS 测量数据定轨过程中也离不开轨道的动力学模型,这些都是必需重视的问题。此外,不依赖于外部信号的完全自主的卫星导航问题也将是一个重要的研究课题。

2.2 姿态动力学

姿态是物体相对于观测者几何角度关系的统称。航天器的姿态运动是航天器绕其自身质心的转动运动,姿态动力学是论述和分析航天器姿态运动的固有特性——动力学特性的学科。姿态动力学是结构设计和姿态控制系统设计的基础。航天器保持正确的姿态对于航天器的有效载荷,如天线、太阳帆板、探测仪器、航天机械臂等的正常工作至关重要。本节围绕着姿态动力学的建模和力矩对航天器姿态的影响两个方面进行论述。

2.2.1 姿态动力学建模

进行姿态动力学分析,首先要确定模型。常用的航天器模型有刚体、准刚体、弹性体、多刚体、刚体弹性体混合体、刚体液体混合体等。早期的航天器体积小,结构简单,刚性好,在动力学研究中将它们作为刚体模型考虑,但刚体模型只是一种近似模型,实际的航天器常存在变形或包含液体等。1958 年美国发射的人造地球卫星“探险者 1 号”,是一个长圆柱体,带有四根横向伸出的挠性鞭状天线,姿态控制系统是以刚体模型为基础进行设计,由于天线变形,在实际飞行过程中出现了事先没有预计到的翻滚现象,使人们意识到这些变形虽然很小,但却影响到航天器的姿态运动。由于经典力学中的刚体不存在内阻尼,因此这类带有变形或液体的刚体模型已不符合经典力学中刚体的严格定义,故可称为准刚体模型,即内部有能量耗散的近似刚体模型。准刚体模型是对刚体模型的修正。利用准刚体模型,就可解释“探险者 1 号”发生的翻

滚现象。60年代中期,对重力梯度稳定卫星可伸展薄壁杆在日光照下的热弹性振动研究,以及对带挠性天线的自旋卫星稳定性分析表明,结构的挠性振动不仅是姿态控制的干扰,而且是受控对象特性的一部分,由此带动了柔性多体系统模型动力学研究。70年代开始对复杂多体系统模型的离散化与模态截断准则进行研究,提出了以刚体运动参数和振型坐标相结合的混合坐标法,结构柔性效应被并入到动力学方程之中,为带挠性体附件的航天器控制系统和结构的设计提供了有效的工具。70年代末,以刚体为主的航天器姿态动力学已基本解决。80年代,由于美国航天飞机以及俄罗斯“和平号”空间站的相继使用,变拓扑结构、带大型挠性附件的航天器动力学研究渐渐成为航天器姿态动力学研究的主要课题。

航天器模型确定之后,针对模型建立动力学方程并进行动力学分析。一个最基本最直接的方法是动量矩定理,除此之外,还可利用的方法有:达朗贝尔原理、拉格朗日原理、哈密顿正则方程、玻耳兹曼-海曼(Hamel)方程、吉布斯方程、凯恩(Kane)方法。目前用得较多的是欧拉-牛顿法、拉格朗日法和凯恩法。如美国的喷气推进实验室(JPL)选择在欧拉-牛顿方程基础上发展起来的扩体重心法建立动力学方程,马丁·马利埃塔公司(Martin Marietta)和约翰·霍普金斯的应用物理实验室采用拉格朗日原理列写动力学方程,洛克希德导弹和空间公司采用凯恩方法列写方程。对于简单的航天器而言,利用上述原理或方程得到的动力学方程都比较简单,但随着航天器的复杂、刚体数目增多,在进行动力学分析时,各种原理或方程表现出各自的优点,得到的动力学方程大不相同,实际使用时应根据航天器特点和分析的目的加以选择。

2.2.2 力矩对航天器姿态的影响

在地球引力场中飞行的航天器受到的力矩来自两个方面,即环境和航天器本身。来自环境的力矩有气动力矩、重力梯度力矩、