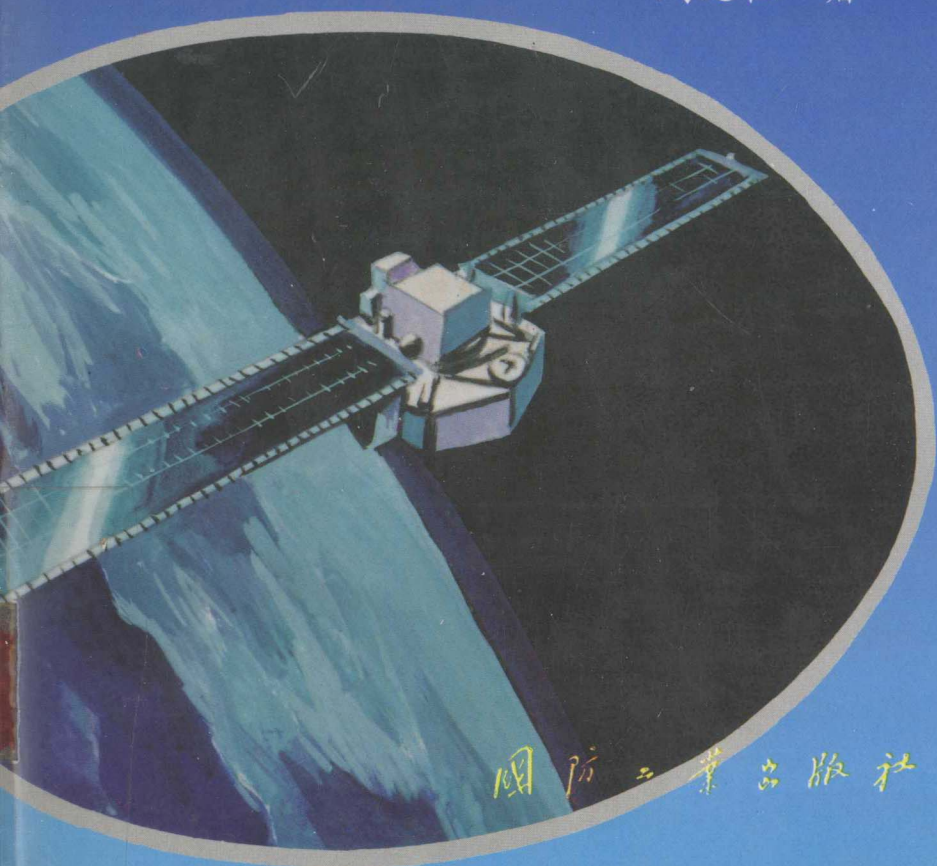


# 航天器姿态动力学

刘延柱 著



国防工业出版社

V412.4  
1006

V412.4  
1006-1

# 航天器姿态动力学

刘延柱 著



一九九六年九月廿七日



\*30753167\*

国防工业出版社

·北京·

753167

图书在版编目(CIP)数据

航天器姿态动力学/刘延柱著. —北京:国防工业出版社, 1995. 12

ISBN 7-118-01517-2

I. 航… II. 刘… III. 航天器-姿态飞行控制-动力学  
IV. V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 13585 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 12 $\frac{3}{8}$  323 千字

1995 年 12 月第 1 版 1995 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 21.30 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容明确、具体、有突出创见,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的高科技内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的新技术、新工艺内容的科技图书。

4. 填补目前我国科学技术领域空白的薄弱学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展评审工作,职责是:负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开

放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

#### 国防科技图书出版基金

评审委员会

# 国防科技图书出版基金 第一届评审委员会组成人员

主任委员：冯汝明

副主任委员：金朱德 太史瑞

委员：尤子平 朵英贤 刘瑄德  
(按姓氏笔画排列)

何庆芝 何国伟 张汝果

范学虹 金 兰 柯有安

侯 迁 高景德 莫悟生

曾 铎

秘 书 长：刘瑄德

《国防科技图书出版基金·全国高等院校图书馆工作委员会

会员委员会

主任委员

副主任委员

委员

秘书长

## 《全国高技术重点图书》 出版指导委员会

主任：朱丽兰

副主任：刘 杲 卢鸣谷

委员：(以姓氏笔划为序)

王大中	王为珍	王守武	牛田佳	卢鸣谷	叶培大
刘 仁	刘 杲	朱丽兰	孙宝寅	师昌绪	任新民
杨牧之	杨嘉墀	陈芳允	陈能宽	张兆祺	张钰珍
张效祥	罗见龙	周炳琨	欧阳莲	赵忠贤	顾孝诚
谈德颜	龚 刚	梁祥丰			

总干事：罗见龙 梁祥丰

## 《全国高技术重点图书·航天技术领域》 编审委员会

主任：任新民

委员：(以姓氏笔划为序)

王永志	刘琯德	吴大观	胡文瑞
顾诵芬	黄志澄	屠善澄	

## 序 言

自从1957年人类第一颗人造地球卫星上天以来,航天技术取得了飞速的发展。航天实践的成功证实了关于人类征服太空的科学预言,而这一切预言都是在严格的力学分析基础上建立起来的。可以认为,航天技术从诞生时刻开始就与力学有着不可分割的联系。作为一般力学的分支学科,航天器动力学以航天器为对象,研究其运动规律,包括质心的轨道运动和绕质心转动的姿态运动。航天器的轨道动力学脱胎于天体力学,以牛顿动力学定律和万有引力定律为基础。但它超越了天体力学单纯解释或预测客观现象的局限性,而有可能根据客观规律主动地设计和控制其运动。航天器的姿态动力学建立在经典刚体动力学基础之上,但随着航天器结构的日趋复杂化,简单的刚体或陀螺体模型已不能正确反映航天器的实际,于是多刚体模型、带挠性体和带液体的复杂模型应运而生,并提出了新的理论研究课题。因此现代航天器姿态动力学不仅属于一般力学范畴,而且与结构动力学、流体力学、控制理论等学科有着密切联系而形成多学科的交叉。

笔者于1962年开始为清华大学工程力学系一般力学专业开设人造卫星动力学课程,并编写讲义。1979年在上海交通大学对原讲义修改后作为一般力学专业的研究生教材。1984年编写了多刚体系统动力学和充液系统动力学讲义,以弥补原教材局限于质点和刚体模型的不足。本书在以上教材的基础上,系统地总结经典航天器动力学的基本内容,同时介绍与复杂航天器相关的现代研究进展,包括笔者的研究成果。鉴于国内已有不少轨道动力学方面的著作出版,本书重点论述姿态动力学。除经典的刚体和陀螺体模型以外,以较多的篇幅叙述多刚体模型、带挠性体和带充液腔的复



杂模型的航天器姿态运动。

本书共分八章。第一章简要叙述经典的二体问题和限制性三体问题。第二章简要介绍轨道运动的摄动理论,推导轨道根数摄动方程。讨论各种扰动因素引起的摄动规律时,着重于定性地阐明摄动规律的物理涵义。关于实际航天器的轨道计算问题,读者必须参阅更详细的专著。考虑到自旋与非自旋航天器的姿态运动有着明显区别,因此分作两章讨论。第三章叙述万有引力场中非自旋刚体航天器姿态运动的基本规律,在此基础上讨论星体姿态的被动控制和主动控制的力学原理。第四章讨论自旋和双自旋航天器姿态运动的基本规律。当自旋角速度足够大时,忽略外力矩作用而简化为欧拉情形的刚体和陀螺体。一般情况下则必须考虑万有引力矩的影响。这一章还讨论了起旋、消旋运动,以及与内部能量耗散有关的最大轴原则。在关于姿态稳定性的讨论中,综合应用了开尔文-台特-契塔耶夫定理、劳恩-霍尔维茨判据、李雅普诺夫直接法、相平面定性理论、能量衰减法、弗洛克理论等各种方法,使读者掌握各种稳定性分析方法的特点和应用条件。第五章讨论无控制条件下自旋航天器姿态运动在各种扰动因素作用下的摄动规律。第六章介绍多刚体动力学的基本概念和有代表性的几种建模方法,即牛顿-欧拉方法、罗伯逊-魏滕堡方法、旋量方法和凯恩方法。以太阳帆伸展运动和空间机械臂的运动作为具体算例,对模型作了适当简化以避免过于繁琐的公式推导。实际航天器的建模工作应由计算机来完成。第七章讨论挠性航天器姿态运动,介绍浮动坐标系概念,并分别讨论挠性联结双体系统、带离散挠性附件的自旋体和双旋体,以及带挠性杆和挠性板的航天器姿态运动。采用模态离散化方法,以便于导出解析形式稳定性条件。关于另一种离散化方法,即有限元法,读者可参阅数值计算方面的专著。这一章还给出挠性多体航天器数学模型的普遍形式。第八章讨论充液航天器的姿态运动,简要介绍必要的流体力学知识以后,就无旋和有旋两种情况分别讨论全充和半充液体的航天器姿态运动。叙述作为重要理论基础的斯托克斯-儒科夫斯基等效刚体概念和均匀涡旋运动

概念,以及普费弗的近似理论。对于液体晃动的分析也采用了模态离散化方法。最后讨论了微重条件下表面张力对液体晃动的影响。在附录中介绍正文叙述中需重复使用的数学工具,以及必要的刚体运动学和运动稳定性理论的基本知识。由于书中涉及的领域较广,造成符号表达的复杂性,为此在正文前附有符号表,以方便读者阅读。书末列出与本书内容直接有关的有代表性的文献,而远非详尽的文献索引。

本书的主要对象是高等理工院校的一般力学和航天技术专业的研究生和教师,以及在航天技术领域内从事研究和设计工作的科技工作者。作为力学著作,本书不讨论具体航天器的设计和计算,而只是叙述与航天器运动有关的最基本的动力学理论。书中避免过多的数学推导,读者只要具备一般的高等数学和理论力学知识,都可以顺利阅读。

在本书写作过程中得到各方面的鼓励和帮助,并得到“国防科技图书出版基金”资助出版。与内容有关的研究工作得到国家自然科学基金和高等学校博士学科点专项科研基金的支持。王照林教授对书稿作了详细的审阅并提出了宝贵意见。作者谨表深切的谢意。

限于水平,且编写时间短促,对书中的错误与不妥之处,请读者不吝赐正。

**刘延柱**

于上海交通大学

# 目 录

符号表	(1)
第一章 航天器的轨道运动	(9)
§ 1.1 万有引力场	(9)
§ 1.2 二体问题	(13)
§ 1.3 开普勒运动	(19)
§ 1.4 轨道的射入和转移	(27)
§ 1.5 限制性三体问题	(37)
第二章 航天器轨道运动的摄动	(47)
§ 2.1 轨道根数摄动方程	(47)
§ 2.2 非中心引力场引起的摄动	(55)
§ 2.3 大气阻力引起的摄动	(58)
§ 2.4 第三天体引起的摄动	(62)
§ 2.5 太阳光压引起的摄动	(68)
第三章 非自旋航天器的姿态运动	(71)
§ 3.1 刚体动力学方程	(71)
§ 3.2 星体的平面天平动	(78)
§ 3.3 星体的空间天平动	(85)
§ 3.4 星体姿态的被动控制	(96)
§ 3.5 星体姿态的主动控制	(105)
第四章 自旋航天器的姿态运动	(111)
§ 4.1 无力矩自旋体	(111)
§ 4.2 无力矩双旋体	(120)
§ 4.3 万有引力场中的自旋体	(128)
§ 4.4 万有引力场中的双旋体	(139)
§ 4.5 自旋体的起旋与消旋	(142)
§ 4.6 自旋体的能量耗散	(150)

第五章 航天器姿态运动的摄动 .....	(157)
§ 5.1 姿态要素摄动方程 .....	(157)
§ 5.2 万有引力场引起的摄动 .....	(165)
§ 5.3 大气阻力引起的摄动 .....	(170)
§ 5.4 地球磁场引起的摄动 .....	(176)
第六章 多体航天器的姿态运动 .....	(182)
§ 6.1 多体系统的结构 .....	(182)
§ 6.2 多体航天器的运动学 .....	(185)
§ 6.3 无力矩多体航天器 .....	(190)
§ 6.4 多体系统的动力学普遍方程 .....	(206)
§ 6.5 旋量方法 .....	(212)
§ 6.6 凯恩方法 .....	(222)
第七章 挠性航天器的姿态运动 .....	(228)
§ 7.1 变形体的浮动坐标系 .....	(228)
§ 7.2 挠性联结的双体航天器 .....	(236)
§ 7.3 带离散挠性附件的自旋体 .....	(250)
§ 7.4 带离散挠性附件的多旋体 .....	(253)
§ 7.5 带挠性杆的航天器 .....	(262)
§ 7.6 带挠性板的航天器 .....	(271)
§ 7.7 挠性多体航天器 .....	(285)
第八章 充液航天器的姿态运动 .....	(294)
§ 8.1 流体的运动学和动力学 .....	(294)
§ 8.2 全充液的非自旋航天器 .....	(300)
§ 8.3 全充液的自旋航天器 .....	(307)
§ 8.4 万有引力场中的充液航天器 .....	(321)
§ 8.5 非自旋航天器的液体晃动 .....	(324)
§ 8.6 自旋航天器的液体晃动 .....	(337)
§ 8.7 表面张力影响 .....	(343)
附录 .....	(348)
附录一 矢量、并矢、旋量与四元数 .....	(348)
附录二 刚体运动学基础 .....	(354)
附录三 运动稳定性理论基础 .....	(364)

附录四 相平面的奇点理论 .....	(368)
汉英名词、人名对照索引 .....	(370)
参考文献 .....	(379)
.....	.....
(371) .....	.....
(372) .....	.....
(373) .....	.....
(374) .....	.....
(375) .....	.....
(376) .....	.....
(377) .....	.....
(378) .....	.....
(379) .....	.....
(380) .....	.....
(381) .....	.....
(382) .....	.....
(383) .....	.....
(384) .....	.....
(385) .....	.....
(386) .....	.....
(387) .....	.....
(388) .....	.....
(389) .....	.....
(390) .....	.....
(391) .....	.....
(392) .....	.....
(393) .....	.....
(394) .....	.....
(395) .....	.....
(396) .....	.....
(397) .....	.....
(398) .....	.....
(399) .....	.....
(400) .....	.....

## 符号表

$a$	轨道长半轴
$A$	星体相对 $x$ 轴的主惯量矩
$A^{(ij)}$	方向余弦矩阵
$\hat{A}^{(ij)}$	旋量变换矩阵
$b$	轨道短半轴, 梁截面宽度
$B$	星体相对 $y$ 轴的主惯量矩, 邦德数
$B_i$	第 $i$ 刚体
$B_i^*$	第 $i$ 增广体
$B_0$	零刚体
$C_D$	大气阻力系数
$C$	星体相对 $z$ 轴的主惯量矩
$C^*$	双旋体的等效惯量矩
$C_P$	主体极惯量矩
$C_R$	转子极惯量矩
$C$	体较矢量矩阵
$d$	通路矢量矩阵
$D$	阻尼系数, 阻尼阵
$D_i$	参数平面内的分区域
$e$	轨道偏心率
$e$	偏心率矢量, 基矢量列阵
$e_j$	$x_j$ 轴的单位矢量
$E$	能量积分常数, 总机械能, 弹性模量, 单位矩阵
$E'$	偏近点角

- $E''$  双曲线轨道的偏近点角  
 $E$  单位并矢  
 $f$  单位质量的体积力  
 $F$  星体的作用力  
 $F_j^n$  第  $j$  铰的理想约束力  
 $F_j^a$  第  $j$  铰的主动控制力  
 $F_j^h = F_j^n + F_j^a$  第  $j$  铰的约束合力  
 $\hat{F}_i$  第  $i$  刚体的力旋量  
 $\hat{F}_i$  第  $i$  刚体的力旋量列阵  
 $F^{(r)}$  第  $r$  广义主动力  
 $F^{*(r)}$  第  $r$  广义惯性力  
 $g$  重力加速度  
 $G$  万有引力常数, 陀螺阵  
 $h$  面积积分常数, 梁截面高度, 板的厚度, 自由液面波高  
 $H_m$  地球磁场强度  
 $H$  星体相对质心的动量矩  
 $H^{(1)}$  刚性腔的动量矩  
 $H^{(2)}$  腔内流体的动量矩  
 $\mathcal{H}$  赫斯函数  
 $i$  轨道面倾角  
 $i$   $x$  轴的基矢量  
 $I$  星体的磁矩  
 $I_i$  第  $i$  刚体相对总质心的等效惯量张量  
 $j$   $y$  轴的基矢量  
 $J_n$  地球引力场带谐系数  
 $J_{ij}$  星体的惯量积  
 $J$  星体的惯量张量  
 $J_P$  主体的惯量张量  
 $J_R$  转子的惯量张量

- $\bar{J}$  梁截面对中性轴的二次矩  
 $J^*$  液体的等效刚体惯量张量  
 $J^{(1)}$  刚性腔的惯量张量  
 $J^{(2)}$  腔内流体的惯量张量  
 $J_* = J^{(1)} + J^*$   
 $J' = J^{(2)} - J^*$   
 $k$   $z$  轴的基矢量  
 $k_j$  第  $j$  铰的滑移轴基矢量列阵  
 $k_c$  控制力矩系数  
 $K$  弹簧刚度系数, 第一类完全椭圆积分, 液面的二倍平均主曲率  
 $K_{ii}$  第  $i$  增广体的中心惯量张量  
 $K$  以  $K_{ij}$  为元素的张量方阵  
 $L$  天平动点  
 $L_0$  环形腔的中心线  
 $L_w$  湿润腔壁的母线  
 $L_f$  自由液面的母线  
 $m$  航天器质量  
 $m_1$  刚性腔质量  
 $m_2$  腔内流体质量  
 $\bar{m}$  多体系统的质量对角阵  
 $m_e$  地球质量  
 $M$  质量阵  
 $M$  星体的作用力矩  
 $M_c$  控制力矩  
 $M_d$  阻尼力矩  
 $M_j^n$  第  $j$  铰的理想约束力矩  
 $M_j^a$  第  $j$  铰的主动控制力矩  
 $M_j^h = M_j^n + M_j^a$  第  $j$  铰的约束合力矩



$n$	地磁场中星体摆动的固有频率
$\mathbf{n}$	腔壁曲面法线的基矢量
$N$	动量矩矢量摄动角速度
$O$	系统总质心
$O_e$	地球中心
$O_i$	第 $i$ 刚体的质心
$O_j$	第 $j$ 铰
$p$	半轴参数, 流体压强
$p$	梁或板的分布荷载
$p_j$	第 $j$ 铰转轴基矢量列阵
$P$	任意点的位置, 陀螺体的主体
$\tilde{P}$	变形前点的位置
$P_n$	勒让德多项式
$P$	控制力矩冲量
$q_j$	第 $j$ 邻接刚体相对运动广义坐标, 第 $j$ 模态坐标
$q$	广义坐标列阵
$Q_i$	第 $i$ 刚体的动量
$Q^{(1)}$	刚性腔的动量
$Q^{(2)}$	腔内流体的动量
$\hat{Q}_i$	第 $i$ 刚体的动量旋量
$\hat{Q}_i$	第 $i$ 刚体的动量旋量列阵
$r_\pi$	近地点距离
$r_a$	远地点距离
$\tilde{r}$	引力作用半径
$r$	点的柱坐标
$r$	点的矢径
$r'$	微元质量矢径
$r_0$	星体质心的矢径
$R_e$	地球的赤道半径