



★ ★ ★
“十三五”

国家重点图书出版规划项目



国之重器出版工程
国防现代化建设

航天先进技术研究与应用系列

Attitude Dynamics and Control of Spacecraft

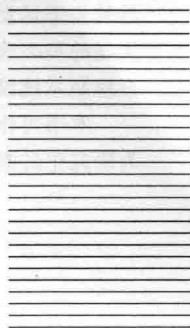
航天器姿态动力学与控制

李立涛 荣思远 编著
崔乃刚 主审



国之重器出版工程
国防现代化建设

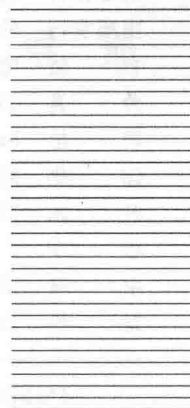
航天先进技术研究与应用系列



航天器姿态动力学 与控制

Attitude Dynamics and
Control of Spacecraft

李立涛 荣思远 编著
崔乃刚 主审



中国工信出版集团



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书以航天器的姿态动力学与控制为研究内容,系统地阐述了各种典型航天器姿态动力学的基本理论以及姿态控制系统的基本工作原理和设计方法。本书共 15 章,分别介绍航天器的姿态运动学和姿态动力学,航天器的姿态确定原理、自旋/双自旋航天器以及三轴稳定航天器的姿态确定方法,自旋/双自旋稳定航天器以及三轴稳定航天器的姿态控制设计方法,姿态控制系统设计的基本内容。

本书可作为飞行力学、飞行器控制和飞行器设计等专业的研究生或本科生教材,也可作为研究生的参考教材,对从事航天器研究与设计的专业人员也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

航天器姿态动力学与控制/李立涛,荣思远编著.
—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2019.1
ISBN 978-7-5603-6026-3

I. ①航… II. ①李…②荣… III. ①航天器—姿态
运动—动力学—研究生—教材 IV. ①V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 109679 号

策划编辑 杜 燕
责任编辑 刘 瑶
封面设计 高永利
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 固安县铭成印刷有限公司
开 本 710mm×1000mm 1/16 印张 29.5 字数 562 千字
版 次 2019 年 1 月第 1 版 2019 年 1 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-6026-3
定 价 128.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)



李立涛

博士，长期从事航天器动力学与控制，航天器轨道设计及分析，卫星姿态动力学与控制等方面的研究工作，参与国家及省部级项目 10 余项，获国家科技进步三等奖 1 项，发表论文 10 余篇。



荣思远

博士，中国宇航学会会员，哈尔滨工业大学航天学院副教授。长期从事航天器轨道设计与控制，飞行器动力学，飞行器姿态动力学与控制等方面的研究和教学工作。作为项目负责人和主要完成人，先后承担国家自然科学基金、863 项目、国防基础预研、总装预研、航天创新基金等 20 余项，发表学术论文 20 余篇。

《国之重器出版工程》 编辑委员会

编辑委员会主任：苗圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈因	郑立新	马向晖	高云虎	金鑫
李巍	李东	高延敏	何琼	刁石京
谢少锋	闻库	韩夏	赵志国	谢远生
赵永红	韩占武	刘多	尹丽波	赵波
卢山	徐惠彬	赵长禄	周玉	姚郁
张炜	聂宏	付梦印	季仲华	



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- 于全 中国工程院院士
- 王少萍 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 王建民 清华大学软件学院院长
- 王哲荣 中国工程院院士
- 王越 中国科学院院士、中国工程院院士
- 尤肖虎 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 邓宗全 中国工程院院士
- 甘晓华 中国工程院院士
- 叶培建 中国科学院院士
- 朱英富 中国工程院院士
- 朵英贤 中国工程院院士
- 邬贺铨 中国工程院院士
- 刘大响 中国工程院院士
- 刘怡昕 中国工程院院士
- 刘韵洁 中国工程院院士
- 孙逢春 中国工程院院士
- 苏彦庆 “长江学者奖励计划”特聘教授



- 苏哲子 中国工程院院士
- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨德森 中国工程院院士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原
机械工业部副部长
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士
- 郑纬民 中国计算机学会原理事长
- 郑建华 中国科学院院士



屈贤明 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任

项昌乐 “长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长

柳百成 中国工程院院士

闻雪友 中国工程院院士

徐德民 中国工程院院士

唐长红 中国工程院院士

黄卫东 “长江学者奖励计划”特聘教授

黄先祥 中国工程院院士

黄 维 中国科学院院士、西北工业大学常务副校长

董景辰 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员

焦宗夏 “长江学者奖励计划”特聘教授



前言

本书以航天器的姿态动力学与控制为研究内容,系统地阐述了各种典型航天器姿态动力学的基本理论以及姿态控制系统的基本工作原理和方法。

航天器姿态动力学是航天动力学的一个重要分支,研究航天器在内、外力矩的作用下,绕其质量中心的转动运动。在内容上,姿态动力学既研究航天器整体的姿态运动,即刚体的转动,也研究航天器各部分之间的相对运动,如绕轴承或铰链的相对转动、结构的弹性振动等。航天器的姿态控制则是一门工程技术,主要研究航天器的姿态确定和控制。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运行航天器相对于某个基准或目标的方位,姿态控制是把航天器的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,包括姿态稳定控制和姿态机动控制。

在轨运行的航天器都承担了特定的探测、开发和利用空间的任务,为完成这些任务,对航天器的姿态控制提出了各种要求。典型的航天器姿态控制系统由姿态敏感器、控制器、执行机构与航天器动力学一起构成闭环控制回路。高性能的航天器姿态控制系统是在姿态动力学、姿态确定和姿态控制建模基础上运用经典或现代控制理论和方法实现的。

本书共 15 章,第 1 章至第 6 章主要介绍航天器的姿态运动学和姿态动力学,第 7 章至第 9 章主要介绍航天器的姿态确定原理、自旋 / 双自旋航天器以及三轴稳定航天器的姿态确定方法,第 10 章至第 14 章分别介绍自旋 / 双自旋稳定航天器以及三轴稳定航天器的姿态控制;第 15 章介绍姿态控制系统设计的基本内容,以期读者能对航天器姿态动力学和控制有一个整体的认识。



本书可作为高等学校飞行力学、飞行器控制和飞行器设计等专业的研究生和本科生教材,也可供从事航天器与设计的专业人员参考。

作者学识水平有限,书中难免有不妥之处,承请读者不吝指正。

作者

2018年11月



目 录

第 1 章	航天器姿态运动学	1
1.1	矢量及矢量运算的矩阵表示	2
1.2	坐标变换	5
1.3	并矢与并矢矩阵的坐标变换	8
1.4	矢量和并矢的时间导数	12
1.5	航天器常用坐标系	14
1.6	姿态参数	19
1.7	姿态运动学方程	32
第 2 章	航天器姿态动力学基础	40
2.1	航天器姿态动力学概述	41
2.2	航天器姿态动力学建模原理	42
2.3	刚体姿态动力学与欧拉方程	45
2.4	三轴稳定航天器的简化姿态动力学方程	50
2.5	广义欧拉方程	52
2.6	多刚体航天器的姿态动力学建模	54
第 3 章	空间环境力矩	58
3.1	重力梯度力矩	59
3.2	太阳辐射力矩	62
3.3	气动力矩	65



3.4	地磁力矩	68
第4章	单自旋航天器姿态动力学	70
4.1	轴对称刚体航天器的自由转动特性	71
4.2	非轴对称刚体航天器的自由转动特性	78
4.3	绕惯性主轴旋转的稳定性	83
4.4	准刚体自旋航天器绕主轴旋转的姿态稳定性	84
4.5	单自旋稳定航天器的被动章动阻尼	87
4.6	单自旋航天器在外力矩作用下的姿态运动	91
第5章	双自旋航天器姿态动力学	99
5.1	陀螺体双自旋航天器的姿态动力学	100
5.2	轴对称双自旋航天器的章动运动	103
5.3	双自旋刚体航天器的运动稳定性	104
5.4	准刚体双自旋航天器绕主轴旋转的稳定性	106
5.5	双自旋航天器的被动章动阻尼	108
第6章	重力梯度稳定航天器姿态动力学	114
6.1	重力场中刚体航天器的姿态运动方程	115
6.2	圆轨道下航天器在重力梯度作用下的俯仰运动	117
6.3	刚体航天器在重力梯度力矩作用下的运动稳定性	119
6.4	能量损耗对重力梯度稳定航天器的影响	124
6.5	重力梯度捕获以及伸杆过程的动力学分析	130
6.6	重力梯度力矩作用下陀螺体的姿态运动	132
第7章	三轴稳定航天器姿态动力学	137
7.1	带有动量交换装置的三轴稳定航天器姿态动力学	138
7.2	带挠性附件三轴稳定航天器姿态动力学	146
7.3	充液三轴稳定航天器的姿态动力学	168
第8章	航天器姿态确定基础	173
8.1	参考矢量法	174
8.2	惯性测量姿态的确定	181
第9章	自旋、双自旋稳定航天器的姿态确定	183
9.1	自旋姿态的参考测量	184
9.2	自旋轴姿态的几何确定法	189
9.3	自旋轴姿态确定的太阳-地球方式	195
9.4	章动测量	197



第 10 章	三轴稳定航天器的姿态确定	202
10.1	三轴姿态的参考测量	203
10.2	三轴稳定航天器的几种姿态直接确定方法	214
第 11 章	航天器姿态控制及姿态控制系统概述	229
11.1	航天器姿态控制概述	230
11.2	航天器姿态控制系统分类	233
第 12 章	自旋、双自旋稳定航天器的姿态控制	241
12.1	自旋、双自旋航天器姿态控制的任务和方法	242
12.2	自旋、双自旋航天器的章动阻尼及控制	243
12.3	自旋、双自旋航天器的姿态进动控制	252
第 13 章	零动量三轴稳定航天器的姿态稳定控制	263
13.1	采用不同姿态参数的基本控制律	264
13.2	三轴姿态稳定航天器的喷气控制	267
13.3	航天器整体零动量轮控系统的姿态稳定控制	299
13.4	采用控制力矩陀螺的三轴稳定航天器姿态稳定控制	314
第 14 章	偏置动量轮控系统的姿态稳定控制	322
14.1	偏置动量三轴稳定航天器的动力学模型及分析	323
14.2	偏置动量轮控系统的基本控制原理	331
14.3	固定偏置动量轮控系统设计	337
14.4	单自由度偏置动量轮控系统设计	356
14.5	两自由度偏置动量轮控系统设计	362
第 15 章	三轴稳定航天器的姿态捕获和姿态机动控制	367
15.1	姿态捕获	368
15.2	姿态机动控制	375
习题	382
附录 1	运动的稳定性及其判据	393
附录 2	四元数的定义和性质	401
附录 3	姿态敏感器	410
附录 4	姿态控制执行机构	439
参考文献	457
名词索引	459

航天器姿态运动学是研究航天器在空间中的运动规律的一门学科。它主要研究航天器在空间中的运动规律，包括航天器的姿态运动、轨道运动、动力学、热力学、电磁学、声学、光学、力学、材料学、制造工艺、测试技术、可靠性工程、系统工程、项目管理、法律法规、标准规范、质量管理体系、环境适应性、电磁兼容性、信息安全、保密技术、知识产权保护、国际合作、学术交流、人才培养、科学研究、技术创新、成果转化、推广应用、社会效益、经济效益、环境效益、文化效益、国际影响、国内影响、行业影响、社会影响、历史影响、未来影响、发展趋势、挑战机遇、政策支持、资金投入、人才储备、技术积累、经验总结、教训吸取、持续改进、追求卓越、精益求精、工匠精神、创新意识、团队协作、沟通能力、领导才能、责任担当、奉献精神、服务意识、客户至上、诚信经营、公平竞争、合作共赢、和谐发展、共同富裕、民族复兴、国家富强、人民幸福、世界大同。



第 1 章

航天器姿态运动学

1.1 矢量及矢量运算的矩阵表示

1.1.1 矢量的定义

矢量是既有大小又有方向的物理量。在数学中，矢量通常用带箭头的字母表示，如 \vec{a} 、 \vec{b} 、 \vec{c} 等。矢量的大小称为模，记作 $|\vec{a}|$ 。矢量的方向由其箭头所指的方向决定。两个矢量的和称为矢量的加法，记作 $\vec{a} + \vec{b}$ 。两个矢量的差称为矢量的减法，记作 $\vec{a} - \vec{b}$ 。两个矢量的积称为矢量的乘法，记作 $\vec{a} \cdot \vec{b}$ 。两个矢量的叉积称为矢量的叉乘，记作 $\vec{a} \times \vec{b}$ 。

矢量的运算遵循平行四边形法则。两个矢量的和等于以这两个矢量为邻边的平行四边形的对角线。两个矢量的差等于以这两个矢量为邻边的平行四边形的另一条对角线。两个矢量的积等于这两个矢量的模的乘积再乘以它们夹角的余弦。两个矢量的叉积等于这两个矢量的模的乘积再乘以它们夹角的正弦，且方向垂直于这两个矢量所在的平面。

- 1.1 矢量及矢量运算的矩阵表示
- 1.2 坐标变换
- 1.3 并矢与并矢矩阵的坐标变换
- 1.4 矢量和并矢的时间导数
- 1.5 航天器常用坐标系
- 1.6 姿态参数
- 1.7 姿态运动学方程



航天器的姿态是指航天器相对空间的方位或指向,是航天器绕质心旋转运动的参量。用于描述航天器姿态的物理量称为姿态参数。而姿态运动学则是一门研究物体绕其质心旋转运动变量(即姿态参数)自身性质的学科,并不涉及产生运动的原因。

本章首先给出了本书所涉及的一些矢量运算及其符号,然后介绍与航天器相关的坐标系,最后讲述常用的姿态参数及姿态运动学的一般理论基础。

1.1 矢量及矢量运算的矩阵表示

1.1.1 与矢量相关的定义

1. 矢量(Vector)

矢量是由大小和方向来表征的物理量,如位移、速度、角动量、角速度和力矩等。矢量本身是与坐标系无关的。在本书中,物理矢量以加黑的斜体字母表示,如 r, v, H 等。

2. 标量(Scalar)

标量是只有数值大小的量,如质量、速率、温度、时间、矢量的长度等。本书中的标量用带正、负号的实数或非黑体的斜体字母来表示,如 a, v, H 等。

3. 单位矢量

单位矢量是长度为一个单位的矢量。单位矢量通常用于表示某矢量的方向,或者由 3 个单位矢量成组表示直角坐标系中的基矢量,如 (i, j, k) 或 (e_1, e_2, e_3) 。

4. 矢阵(Vectrix)

将标量矩阵的定义拓展,定义以单个矢量为元素的矩阵为矢阵。如矢量矩阵 \underline{A} 与矢量列阵 \underline{a} 分别定义为

$$\underline{A} \triangleq (A_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \cdots & A_{mn} \end{bmatrix}, \quad \underline{a} \triangleq \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = [a_1 \quad a_2 \quad \cdots \quad a_n]^T$$

为与矢量及字母变量相区别,本书中矢阵用带下横线的加黑斜体字母表示。

矢阵同时具有矢量和矩阵的性质。矢阵运算的定义在形式上与一般的矩阵



运算定义一致。例如,有矢阵 $\underline{e} = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T$ 与矢量 a ,则以下算式成立:

$$a \cdot \underline{e} = a \cdot \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cdot e_1 \\ a \cdot e_2 \\ a \cdot e_3 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

$$\underline{e} \cdot \underline{e}^T = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} [e_1 \ e_2 \ e_3] = \begin{bmatrix} e_1 \cdot e_1 & e_1 \cdot e_2 & e_1 \cdot e_3 \\ e_2 \cdot e_1 & e_2 \cdot e_2 & e_2 \cdot e_3 \\ e_3 \cdot e_1 & e_3 \cdot e_2 & e_3 \cdot e_3 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

$$\underline{e} \times \underline{e}^T = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \times [e_1 \ e_2 \ e_3] = \begin{bmatrix} e_1 \times e_1 & e_1 \times e_2 & e_1 \times e_3 \\ e_2 \times e_1 & e_2 \times e_2 & e_2 \times e_3 \\ e_3 \times e_1 & e_3 \times e_2 & e_3 \times e_3 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

5. 矢量基

定义3个汇交于O点的正交单位矢量(i, j, k)或(e_1, e_2, e_3)所组成的右手正交参考系,称为矢量基(简称基)。O点称为基点,这3个正交单位矢量称为这个基的基矢量。

同一基的各基矢量(以 e_1, e_2, e_3 为例)之间满足以下正交条件:

$$e_i \cdot e_j = \begin{cases} 1, & i=j, \quad i, j=1, 2, 3 \\ 0, & i \neq j, \quad i, j=1, 2, 3 \end{cases}$$

$$e_1 \times e_2 = e_3, e_2 \times e_3 = e_1, e_3 \times e_1 = e_2$$

定义基矢量(e_1, e_2, e_3)构成的矢阵 $\underline{e} = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T$ 表示这个矢量基。对于不同的基,在 \underline{e} 的右下脚加下标予以区分,例如, \underline{e}_a 和 \underline{e}_b 分别表示两个不同的基。对于矢量基 \underline{e} ,式(1.2)和式(1.3)可分别化简为

$$\underline{e} \cdot \underline{e}^T = \underline{E}_3 \quad (1.4)$$

$$\underline{e} \times \underline{e}^T = \begin{bmatrix} 0 & e_3 & -e_2 \\ -e_3 & 0 & e_1 \\ e_2 & -e_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

式(1.4)中 \underline{E}_3 表示维数为3的单位矩阵。

1.1.2 矢量的描述及矢量运算的矩阵表示

矢量的几何描述很难处理复杂运算问题,通常采用矢量的代数表达方法。对于任意一个矢量 u ,均可表示为某个矢量基 \underline{e} 的基矢量的线性组合,即

$$u = u_x i + u_y j + u_z k \quad (1.6)$$

式中, $u_x i, u_y j$ 和 $u_z k$ 分别称为矢量 u 在基矢量上的3个分矢量。3个标量系数 u_x, u_y, u_z 分别称为此矢量在3个基矢量上的坐标。这3个坐标构成一个标量列

阵,称为矢量 \underline{u} 在该矢量基上的坐标阵(或分量列阵),记为

$$\underline{u} = [u_x \quad u_y \quad u_z]^T$$

利用矩阵运算的形式,矢量 \underline{u} 可写成矩阵乘积的形式,即

$$\underline{u} = \underline{u}^T \underline{e} = \underline{e}^T \underline{u} \quad (1.7)$$

考虑到基矢量的性质,不难验证矢量 \underline{u} 的坐标列阵有如下表达式:

$$\underline{u} = \begin{bmatrix} \underline{u} \cdot \underline{i} \\ \underline{u} \cdot \underline{j} \\ \underline{u} \cdot \underline{k} \end{bmatrix} = \underline{u} \cdot \underline{e} = \underline{e} \cdot \underline{u} \quad (1.8)$$

3个坐标还可以写为一个反对称方阵,记为

$$\underline{u}^\times = \begin{bmatrix} 0 & -u_z & u_y \\ u_z & 0 & -u_x \\ -u_y & u_x & 0 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

称此方阵为矢量 \underline{u} 在该基上的坐标方阵,有些书中也称为叉乘矩阵。该矩阵为反对称阵,即

$$(\underline{u}^\times)^T = -\underline{u}^\times \quad (1.10)$$

应当指出,矢量在几何上为一客观存在的量,与矢量基(或坐标系)的选取无关。而矢量的坐标列阵则与矢量基有关。例如,有两个不同的矢量基 \underline{e}_a 和 \underline{e}_b , 矢量 \underline{u} 在这个基上的坐标阵分别记为 \underline{u}_a 和 \underline{u}_b , 则由式(1.7),有

$$\underline{u} = \underline{u}_a^T \underline{e}_a = \underline{u}_b^T \underline{e}_b \quad (1.11)$$

很显然, $\underline{u}_a \neq \underline{u}_b$, 即分量列阵与坐标系有关,而矢量则与坐标系无关。有些书中把列阵也称为矢量,或者将两者混为一谈。在本书中,将矢量 \underline{u} 与矢量在坐标系 S_a 中的分量列阵 \underline{u}_a 严格地加以区分。

为表达得更清楚,在本书中有时将坐标列阵 \underline{u}_a 写为 $(\underline{u})_a$, 将坐标方阵 \underline{u}_a^\times 写为 $(\underline{u})_a^\times$ 。

在仅使用唯一坐标系的情况下,某个矢量与其在该坐标系中的分量列阵有着一一对应关系,此时将分量列阵称为矢量也未尝不可。但在像类似姿态动力学这样的学科中,经常使用许多不同的坐标系,这时矢量与分量列阵的严格区别就是完全必要的。

下面讨论矢量的运算与在同一个基上的坐标阵运算间的关系。为简略起见,列写如下:

$$\begin{aligned} \underline{a} \underline{a} &= \underline{a} \underline{e}^T \underline{a} = \underline{e}^T \underline{a} \underline{a} \\ \underline{a} + \underline{b} &= \underline{e}^T \underline{a} + \underline{e}^T \underline{b} = \underline{e}^T (\underline{a} + \underline{b}) \end{aligned}$$