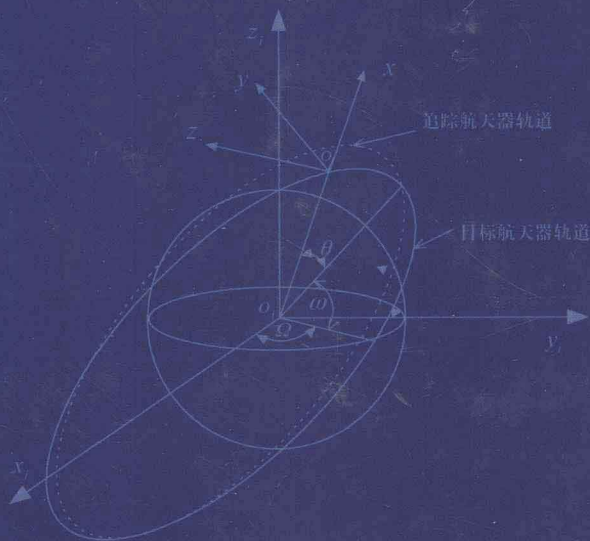




航天科技图书出版基金资助出版

航天器相对运动 轨道动力学

袁建平 李俊峰 和兴锁 冯维明 等著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

航天器相对运动轨道动力学

袁建平 李俊峰 和兴锁 冯维明 等著



中国宇航出版社

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

航天器相对运动轨道动力学/袁建平等著. —北京:
中国宇航出版社, 2013. 3

ISBN 978-7-5159-0395-8

I. ①航… II. ①袁… III. ①航天器—轨道力学—动力学—研究 IV. ①V448. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 045071 号

责任编辑 刘亚静

封面设计 文道思

出版
发行

中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号
(010)68768548

邮编 100830

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010)68371900
(010)68768541

(010)88530478(传真)

(010)68767294(传真)

零售店 读者服务部
(010)68371105

北京宇航文苑

(010)62529336

承印 北京画中国画印刷有限公司

版次 2013 年 3 月第 1 版

2013 年 3 月第 1 次印刷

规格 880 × 1230

开本 1/32

印张 18

字数 501 千字

书号 ISBN 978-7-5159-0395-8

定价 150.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

序

运动是指“宇宙中发生的一切变化和过程”，它是“物质的固有属性”和“存在的方式”。而相对运动只是考察、度量、研究运动时带有参照性的表述。

在哲学范畴内所述的“物质的运动”，其形态是多样的，例如，星体的运行、万物的生长、山石的风化、分子的迁移和裂变，甚至人类的进化和社会的发展，从广袤的宇宙到基本粒子，而本书只限于讨论物体的运动之航天器的运动。

运动没有相对性则无以表达、无从认识、无法研究。当运动从哲学的、抽象的领域进入到物理的、数学的领域被人认识和研究时，本书所指的“相对运动”出现了：一个飞行器相对于另一指定系统（物体、飞行器）的运动。显然，一个飞行器的运动可以被表述为不同的相对运动，因为可以指定不同的系统为参照系。

相对性原理是力学的基本原理。一个物体到另外一些物体的距离随时间发生变化。当这些“另外的”物体依然是所论物体的不可分割的背景的时候，我们就无法用数列对应于该物体的位置和位置的变化，也就是不能对物体的位置和速度施行参数化。给定一个物体，它相对于一些物体运动，标志出这些物体，然后用数列与这些距离相对应，于是这些物体就成为参照物，而给定物体到这些物体的距离之全体就成为参照空间，对应于距离的数之全体组成为一有序系统。这样同参照物联系在一起坐标系，也就被引进来了。牛顿在《自然哲学的数学原理》一书中，在其根据运动三定律得到的第五个结论里面清楚地陈述了相对性原理。但是，牛顿力学没有绝

对运动的概念是不行的：绝对运动概念是同力和加速度联系在一起。从运动学来看，力的作用不是单值的。比如在一个计算系统中力引起某个加速度，那么在另一个相对于前者是以加速运动的系统中它却可以引起另一种加速度，当然也包括加速度为零的情况。因此只有根据动力学的效应，根据引起绝对加速度的系统中的力才能把绝对运动加以标志。

不仅所有运动的描述是相对的，参照系也是可以运动的，因而出现了所谓的“多级相对运动”和“牵连运动”。相对运动具有特定的运动学特征和动力学特征，并且也有不同的表述和研究方法。这些都是本书的研究内容。相对运动有多种分类方法，在物理学范畴对相对运动的考察及其描述方法都可以产生出不同的分类。对航天器的相对运动更有意义的是按照其相关应用的分类。本书研究了多级相对运动如多自由度机械臂操作过程，卫星群的编队等；拦截、交会及其逆过程；并行相对运动——分布式卫星系统；串行相对运动——多关节机械臂；复杂相对运动等。

本书第1~4章继相对运动概念和应用的论述之后，综合介绍了相对运动的动力学和运动学基础和研究现状，接着是四元数和K-S变换用于航天器相对运动的运动学和动力学及其统一性的研究成果；第5章是关于相对运动轨道的一种新的设计方法——基于形状的逆向法，接着两章分别是基于相对轨道要素和基于参照轨道要素的卫星编队设计方法；第8章是典型的串行相对运动——多臂机器人相对运动研究，第9章是典型的并行相对运动——星座构型与巡游运动研究。最后两章介绍了更为复杂的航天器相对运动——协同交会和悬浮轨道。本书参考了本研究团队近几年的研究报告和所培养博士的论文（附于书后），每章署有著者姓名和参考文献。

作 者

2012年11月

目 录

第 1 章 相对运动的概念和应用	1
1.1 相对运动的哲学范畴	1
1.2 相对运动的表达和研究方法	4
1.3 相对运动的分类和应用	6
1.3.1 多级相对运动	6
1.3.2 拦截、交会及其逆过程	6
1.3.3 并行相对运动——分布式卫星系统	7
1.3.4 串行相对运动——多关节机械臂	8
1.3.5 复杂相对运动	8
1.4 相对运动的案例	9
1.4.1 变长度 2 级数学摆——物理现象之例	9
1.4.2 深度撞击——远程拦截交会之例	10
1.4.3 轨道快车——精准交会对接之例	11
参考文献	13
第 2 章 航天器相对运动的动力学方法	14
2.1 相对运动坐标系的描述与定义	14
2.1.1 地心赤道惯性坐标系	14
2.1.2 目标航天器轨道坐标系	14
2.1.3 目标航天器曲线坐标系	15
2.1.4 球坐标系	16
2.2 相对运动的动力学建模方法	16

2.2.1	牛顿动力学方法	17
2.2.2	拉格朗日动力学方法	19
2.2.3	哈密顿动力学方法	21
2.2.4	复合运动动力学方法	23
2.3	相对运动的动力学模型	33
2.3.1	相对于圆参考轨道的动力学模型	33
2.3.2	相对于小偏心率椭圆参考轨道的相对运动模型	35
2.3.3	相对于较大偏心率的椭圆参考轨道的相对运动模型	43
2.3.4	考虑 J_2 项摄动的精确相对运动方程	52
2.4	各种相对运动模型的适用性分析	62
2.4.1	航天器相对运动适用模型的选取	62
2.4.2	航天器相对运动模型的主要影响因素	63
参考文献		66
第3章 航天器相对运动的运动学方法		70
3.1	概述	70
3.2	基于平均轨道要素的相对运动描述方法	70
3.2.1	平均轨道要素的描述方法	70
3.2.2	相对运动坐标系定义	72
3.2.3	相对运动状态转移矩阵	72
3.2.4	基于平均轨道要素的相对运动状态转移矩阵	72
3.2.5	平均轨道要素的计算	74
3.3	基于相对轨道要素的相对运动描述方法	75
3.3.1	引言	75
3.3.2	参考坐标系	76
3.3.3	相对轨道要素	77
3.3.4	相对运动描述	81
3.4	基于参照轨道要素的相对运动描述方法	88
3.4.1	参照轨道要素描述的相对运动	88

3.4.2 主星为圆轨道时的相对运动	96
参考文献	99
第4章 非线性相对运动的四元数方法	101
4.1 二次型变换与四元数的运动学特性	101
4.1.1 二次型变换	101
4.1.2 四元数的姿态解算运用	105
4.2 二次型变换与四元数的动力学特性	107
4.2.1 二次型变换与四元数的动力学问题应用	107
4.2.2 二次型变换与四元数解动力学问题的案例	115
4.2.3 K-S变换与四元数的统一性研究	123
4.3 四元数-轨道角动量-径距变化率模型	129
4.3.1 “四元数-轨道角动量-径距变化率”要素与经典 轨道要素的等价性	130
4.3.2 “四元数-轨道角动量-径距变化率”动力学 模型	135
4.3.3 “四元数-轨道角动量-径距变化率”动力学 模型的优越性评估	139
4.4 基于对偶四元数的航天器姿轨耦合动力学与控制	142
4.4.1 对偶四元数代数	142
4.4.2 基于对偶四元数的航天器轨/姿运动学建模	147
4.4.3 基于对偶四元数的轨/姿一体化刚体动力学建模 ..	151
4.4.4 对偶四元数解姿轨耦合问题的案例	153
参考文献	158
第5章 相对轨道的逆向设计方法	160
5.1 概述	160
5.2 基于对数螺旋线的轨道设计	161
5.2.1 基于形状的轨道设计方法	161
5.2.2 对数螺旋线的基本性质	164

5.2.3	采用对数螺旋线进行轨道设计的可行性分析	167
5.2.4	基于圆初始轨道的轨道设计	171
5.2.5	基于椭圆初始轨道的轨道设计	172
5.3	基于福布斯螺旋线的轨道设计	177
5.3.1	福布斯曲线及其局限性	177
5.3.2	轨道高度随时间变化为线性的福布斯螺旋线	183
5.3.3	轨道高度随时间变化为多项式的福布斯螺旋线	186
5.3.4	轨道高度随时间变化为双曲正切形式的福布斯螺旋线	187
5.3.5	假设轨道高度随时间变化为正/余弦形式	198
5.4	基于指数正弦曲线的轨道设计	204
5.4.1	指数正弦曲线的基本性质	204
5.4.2	基于周期性指数正弦曲线的轨道设计	209
5.4.3	基于非周期性指数正弦曲线的轨道设计	216
参考文献		219
第6章 基于相对轨道要素的卫星编队		220
6.1	概述	220
6.2	相对轨道几何性质	221
6.2.1	相对轨道要素	221
6.2.2	相对轨道几何特性	221
6.2.3	相对轨道要素和经典轨道要素的比较	226
6.2.4	小结	227
6.3	编队飞行的 J_2 摄动影响	228
6.3.1	J_2 摄动对主从星轨道根数差的影响	228
6.3.2	J_2 摄动相对轨道构型的定量分析	230
6.3.3	相对运动最小 J_2 摄动条件	245
6.3.4	队形保持的脉冲控制	248
6.3.5	小结	250
6.4	队形设计与队形品质分析	251

6.4.1	基于相对轨道要素的队形设计	251
6.4.2	编队队形的摄动影响	261
6.4.3	三维编队队形设计	267
6.4.4	小结	272
参考文献		273
第7章 基于参照轨道要素的卫星编队		275
7.1	概述	275
7.2	参照轨道要素方法介绍	275
7.2.1	参照轨道要素定义	275
7.2.2	参照轨道要素与经典轨道要素的转换	276
7.2.3	相对运动的参照轨道要素描述	279
7.2.4	相对运动描述方法的比较	279
7.3	理想编队队形设计	280
7.3.1	引言	280
7.3.2	相对运动的一般特点	282
7.3.3	圆参照轨道队形设计方法	287
7.3.4	椭圆参照轨道队形设计方法	291
7.3.5	小结	299
7.4	自然编队队形设计	300
7.4.1	引言	300
7.4.2	绝对运动的 J_2 摄动分析	301
7.4.3	相对运动的 J_2 摄动分析	304
7.4.4	自然编队轨道解	307
7.4.5	自然编队队形设计	309
7.4.6	小结	313
7.5	编队队形的几何特性分析	314
7.5.1	引言	314
7.5.2	从星矢径的 4 种描述方法	315
7.5.3	星间角距与编队分布面积	318

7.5.4	编队覆盖面积	321
7.5.5	编队分布几何量度	325
7.5.6	小结	326
参考文献		328
第 8 章 多臂空间机器人相对运动		330
8.1	概述	330
8.2	柔性关节空间机器人动力学建模	330
8.2.1	柔性关节的数学表征	330
8.2.2	柔性关节机器人的动力学建模	331
8.2.3	自由飘浮空间机器人建模	334
8.3	多臂机器人相对运动的路径规划	339
8.3.1	机械臂相对运动奇异问题研究	339
8.3.2	基于快速扩展随机树算法的机器人避障路径 规划	343
8.3.3	相对运动中基座扰动最小的路径规划	347
8.4	多臂机器人物体空间相对运动协调阻抗控制	354
8.4.1	引言	354
8.4.2	多机械臂-被抓取物体相对运动的系统动力学 模型	355
8.4.3	物体空间坐标系	359
8.4.4	物体空间 6 维相对运动的虚拟弹簧表示	361
8.4.5	物体空间相对运动协调阻抗控制策略	365
8.5	本章小结	377
参考文献		378
第 9 章 星座构型及巡游运动		380
9.1	星座的基本概念	380
9.1.1	描述星座的基本参数	381
9.1.2	星座的覆盖特性	386
9.1.3	典型的星座构型	391

9.2 星座设计	397
9.2.1 星座设计准则	397
9.2.2 星座设计模型及摄动在星座设计中的考虑	398
9.3 星座的保持	402
9.3.1 星座的稳定性分析	402
9.3.2 星座构型的最优恢复	409
9.4 空间目标巡游	418
9.4.1 星座的零燃料消耗巡游轨道设计方法	418
9.4.2 星座的机动巡游轨道设计方法	422
参考文献	428
第 10 章 航天器远程协同交会	429
10.1 概述	429
10.2 连续推力轨道动力学建模	430
10.2.1 坐标系选取及转换	430
10.2.2 惯性坐标系下的连续推力动力学方程	431
10.2.3 经典轨道根数动力学方程及改进	431
10.3 轨道动力学方程的极值原理	434
10.3.1 惯性坐标系下动力学方程的极值原理	434
10.3.2 改进春分点的轨道根数动力学方程的极值原理	436
10.4 近圆开普勒轨道多脉冲协同交会	437
10.4.1 三脉冲协同交会数学模型	437
10.4.2 集群小卫星协同交会数学模型	439
10.4.3 集群小卫星轨道拦截优化	443
10.5 连续推力作用下的协同交会	446
10.5.1 差分粒子群法串联同伦算法的优化仿真分析	447
10.5.2 差分粒子群法串联遗传算法的优化仿真分析	462
10.6 本章附录	473
参考文献	478

第 11 章 航天器悬停/悬浮轨道动力学	482
11.1 概述	482
11.2 航天器悬停/悬浮轨道动力学分析	482
11.2.1 轨道动力学方程	482
11.2.2 轨道加速度分析	484
11.2.3 轨道速度增量分析	489
11.2.4 悬停/悬浮燃料消耗分析	496
11.3 多脉冲悬停/悬浮轨道动力学	504
11.3.1 目标航天器轨道为近圆轨道的多脉冲悬停/ 悬浮轨道	505
11.3.2 目标航天器轨道为椭圆轨道的脉冲推力悬停/ 悬浮轨道	513
11.4 航天器悬停/悬浮拼接轨道的规划	517
11.4.1 基于脉冲推力的悬停/悬浮拼接轨道设计	519
11.4.2 区间悬停/悬浮数值分析	527
11.4.3 基于连续小推力的悬停/悬浮拼接轨道设计	538
参考文献	560
附录 博士学位论文参考目录	563

第 1 章 相对运动的概念和应用

袁建平 李俊峰

1.1 相对运动的哲学范畴

所谓运动，如恩格斯所说，就其最一般的意义而言，即被理解为“物质的固有属性”和“存在的方式”，“它包括宇宙中发生的一切变化和过程”（《马克思恩格斯选集》第 3 卷，第 491 页）；而相对地，所谓静止，则是对物质运动的特殊形式或一时状态的表称。

运动的最基本属性是时间和空间属性。论及运动的绝对性时必然要先说明时间和空间的绝对性，它是指时间和空间作为运动着的物质的存在方式是客观实在的，不以人的意志为转移。列宁说：“唯物主义既然承认客观实在即运动着的物质不依赖于我们的意识而存在，也就必然要承认时间和空间的客观实在性。”（《列宁选集》第 2 卷，第 176 页）这种客观实在性是不变的、无条件的，因而是绝对的。所谓时间和空间的相对性，是指时间和空间作为运动着的物质的存在方式又是客观具体的，它因物质具体形态和运动速度的不同而不同，因而是相对的。

以上关于时间和空间的绝对性定义又是相对的：超越了牛顿力学范畴就有了新的解释。爱因斯坦广义相对论认为，重力场的时间和空间特性是依赖于物质的质量分布的，物质的质量愈大、分布愈密、重力场愈强，则空间的“曲率”就愈大、时间的流逝就愈慢。这说明空间特性是依赖于物质状态的，具体的空间特性是可变的。其次，时间和空间随着物质运动速度的变化而变化。爱因斯坦的狭义相对论证明，时间和空间特性会随物体运动速度的变化而变化。

当物质运动速度接近光速时，物质内部变化过程的时间就会延长，沿着物体运动方向的长度就会缩短。时间的无限性是指整个物质世界在持续性方面是无始无终的；时间的有限性是指每一个具体事物的发展过程则是有始有终的。空间的无限性是指整个物质世界在广延性方面是无边无际的；空间的有限性是指每一个具体事物的广延性则是有边有际的。

唯物辩证法既然肯定运动为物质本体所固有，世界上的一切事物（现象或过程等）都包含同一和差异于自身，并由此构成统一体运动、变化和发展的机制和原因，于是也就不言自明地承认了：物质运动的每一既成形态或具体事物，都处于生成和灭亡的不断变化之中，而世界不过是“过程的集合体”（《马克思恩格斯选集》第1卷，第8页）。依此，就物质本体及其“一般的变化”意义上的运动来说，是无始无终、无边无际的，所以说是无条件、永恒和绝对的；而从物质运动的特殊形式或静止来看，则是有始有终、有边有际的，所以说是有条件、暂时和相对的。自然科学发展史告诉我们：运动表现在静止之中，静非不动，而是运动的现实表现或形式；绝对寓于相对之中，相对并不排斥绝对，而是绝对的必然体现或环节。总之，一句话：运动是绝对的，不运动是相对的；运动和静止、绝对和相对是统一的。这就是哲学范畴中关于运动和静止、绝对和相对的基本观点。

马克思、恩格斯在着重论证运动的客观实在性的基础上，揭示了“运动和物质本身一样，是既不能创造也不能消灭的”的真理（《马克思恩格斯选集》第3卷，第99页）。与此同时，还阐明了物质、运动、矛盾三者的同一关系，即：物质是世界的本原和“一切变化的主体”（《马克思恩格斯选集》第2卷，第164页）；矛盾（同一和差异、吸引和排斥或结合和分离的矛盾）是物质固有的本性和运动的机制；而运动即是物质的本性的必然体现，或物质世界客观存在着的矛盾本身。物质运动是绝对的，而它的种种既成形态（事物、现象或过程等）则是相对的；正是物质运动的永恒性和绝对性，

决定了每一事物或过程的暂时性和相对性，而有生有灭、因而是有条件的具体事物，则不过是不生不灭的、因而是无条件的物质运动的表现与实例或环节等观点，那末，由此它也无疑包含了运动的绝对性和静止的相对性是互为逻辑补充的道理。运动应当从它的反面即从静止中找到它的量度，获得自身的规律性，因为：“从辩证的观点看来，运动表现于它的反面，即表现在静止中，这根本不是什么困难”；运动和静止的对立，正如我们已经看到的，“都只是相对的；绝对的静止、无条件的平衡是不存在的”（《马克思恩格斯选集》第3卷，第101页）。静止和平衡只是有限运动的结果，而任何有限的运动，都不过是无无限物质运动的一个环节与表现。

运动源于力。在笛卡儿的力学中，所谓物体的运动是指从物理学上区别于周围的物体运动。当笛卡儿把物体对与其相接触的空间的运动归为空间，他这种做法则是力求把物体从环绕它的空间划分出来，又要把二者视为同一。牛顿认为运动的物体有不变的惯性质量，因此他能够不考虑物体的长、宽、高而把物体看成是质点——具有一定质量的、不计尺寸大小的粒子。拉格朗日和哈密顿方程可以描述很复杂的客体的运动，它的自身同一性和个体性是以复杂的解析表示的不变性所保证。在相对论力学中所表现的是视为同一质点的属性的极为复杂的关系。但是所有情况，无论是具有静止质量的粒子还是用能量作为视为同一根据的光子，在较为广阔的、普遍的意义上来看来力学所研究的还是粒子和系统的相对运动。从这种意义说，每一个相对论的坐标表象其意义就是“力学的”表象。在研究相对论原理之具体的可以互相替代、相互补充的变更和力学的具体形式的时候，我们就能对爱因斯坦相对论是所谓“力学论”还是“物理论”的问题作出回答了。这个理论是力学的理论；然而这里所谓的力学就是物理概念本身长时间影响的结果。它所研究的决非具体的、狭隘意义的机械运动，而是无比复杂的物理客体的运动。

当运动从哲学的、抽象的领域进入到物理的、数学的领域被人认识和研究时，本书所指“相对运动”出现了。“运动”没有“相

对”性则无以表达、无从认识、无法研究。

1.2 相对运动的表达和研究方法

在哲学范畴内所述的“物质的运动”并不只是我们关心的物体的运动。其形态是多样的，例如，星体的运行、万物的生长、山石的风化、分子的迁移和裂变，甚至人类的进化和社会的发展，从广袤的宇宙到基本粒子，“世界是物质组成的，物质是运动的”。

本书由此开始，只限于讨论物体的运动之航天器的运动。

运动是绝对的，运动的表达或描述是相对的。因而，相对运动只是考察、度量、研究运动时带有参照性的表述，并不是在已定义的“运动”之外又产生的事件。我们在描述相对运动时会说“甲物体相对于乙的运动”，而描述绝对运动时是指“相对于惯性空间的运动”。（按照牛顿的解释，所谓绝对运动并不是相对于一些个别的物体，而是相对于空间。他所主张的这种绝对静止的空的空间可以看成充满整个宇宙的、数目不定的、离散存在的物质和“宇宙气”的总代表。）因而，所有运动的描述都是相对的，区别只是相对于某具体物体（或参照系）还是相对于惯性空间。

相对性原理是力学的基本原理。一个物体到另外一些物体的距离随时间发生变化。当这些“另外的”物体依然是所论物体的不可分割开来的背景的时候，我们就无法用数列对应于该物体的位置和位置的改变，也就是不能对物体的位置和速度施行参数化。给定一个物体，它相对于一些物体运动，标志出这些物体，然后用数列与这些距离相对应，于是这些物体就成为参照物，而给定物体到这些物体的距离的全体就成为参照空间。对应于距离的数之全体组成为一有序系统。这样同参照物联系在一起的坐标系，也就被引进来了。牛顿在《自然哲学的数学原理》一书中，在其根据运动三定律得到的第五个结论里面清楚地陈述了相对性原理。但是，牛顿力学没有绝对运动的概念是不行的。绝对运动概念是同力和加速度联系在一