

# 卫星轨道与 姿态动力学分析

WEIXING GUIDAO YU ZITAI DONGLIXUE FENXI

董云峰 著



北京航空航天大学出版社  
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

# 卫星轨道与 姿态动力学分析

董云峰 著

北京航空航天大学出版社

---

## 图书在版编目(CIP)数据

卫星轨道与姿态动力学分析/董云峰著. — 北京:  
北京航空航天大学出版社, 2014. 12

ISBN 978 - 7 - 5124 - 1652 - 9

I. ①卫… II. ①董… III. ①卫星轨道②卫星姿态—  
动力学 IV. ①V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 281857 号

版权所有,侵权必究。

## 卫星轨道与姿态动力学分析

董云峰 著

责任编辑 董 瑞 张艳学

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:850×1168 1/32 印张:3.25 字数:76 千字

2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978 - 7 - 5124 - 1652 - 9 定价:16.00 元

---

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:  
(010)82317024

## 内 容 简 介

本书主要是讨论利用矢量图对卫星轨道和姿态进行力学分析的基本原理和方法。

书中介绍了卫星轨道与姿态的基本概念,介绍了速度脉冲理论,分析了地球引力、日月引力、光压与大气阻力等主要摄动因素对卫星轨道的影响。讨论了最省燃料的霍曼变轨和可在任意两点内完成拦截任务的兰伯特变轨。分析了静止轨道的倾角控制、定点经度漂移与偏心率耦合控制多种策略,介绍了近地轨道高度保持与轨道进动速率的调整方法。利用动量矩理论,分析了重力梯度、光压、气动与地磁对姿态产生的干扰力矩。介绍了整星零动量卫星姿态控制与姿态机动的原理,分析了偏置动量轮卫星的运动学特性和利用进动控制姿态角偏差的方法。讨论了太阳同步轨道卫星动量轮与磁力矩器的联合控制策略。介绍了动量交换装置卸载所需施加的力矩与磁矩分析方法。

本书重点是帮助读者掌握力学分析的基本思路和方法,是科研工作者和在校学生了解卫星轨道与姿态控制基础知识的参考资料。

## 前 言

航天工程具有复杂性、庞大性和高度综合性的特点，是多个部门和人员协作完成的系统工程。人与人之间的信息交流和传递是完成这项工作的核心要素。

卫星是靠一个比它大得多的运载工具送上天的，运行期间基本处于无动力飞行状态，它的飞行轨道和姿态是不能轻易改变的。正是由于这种状态不能轻易改变，其他相关部门的人员必须根据轨道与姿态运动规律来安排自己的工作，所以大部分卫星设计和使用人员都需要了解卫星轨道与姿态运动的基本知识。

对于卫星轨道与姿态运动，大部分专著重点介绍了相关概念、数学描述方法、数字仿真流程与数字仿真结果，专门研究地面试验的专著也常有出版。不过，重点讲力学分析的专著并不常见。

个人认为人类认识工程问题分为概念理解、动力学分析、数学描述、数字仿真、地面试验、工程实践六个层次。人与人的交流也是按这个层次像金字塔一样逐步深入，上一个层次的错误会在下一个层次放大。

动力学分析关系到对运动变化与发展的正确描述和理解，是仅处于建立正确概念的第二个主要环节。动力学分析过程可以帮助人们理解问题的实质，抓住问题的主要矛盾。

从认识问题各层次上讲，动力学分析向上延伸可以帮助人们理解多个耦合在一起的工程概念的相互关系。

向下延伸可以指导人们寻找合适的数学语言和数学工具,根据问题的主要矛盾评判数学模型的完备性。

动力学分析是在脑子里做试验的过程。首先是想像出场景的静态画面,再按时间顺序形成动态过程,这很符合人类对知识的认识和记忆模式。经常看到的运动过程的动画演示实际上就是把创作者的动力学分析过程采用虚拟现实技术进行展示,所以动力学分析是一个很好的教学工具和手段。

为了缩减读者的阅读量,本书刻意省略了常用概念的介绍,并尽可能的缩减了参考文献的数量。

在本书的书写过程中,刘聪同学负责了本书的制图,录入,编排等工作,栗双岭,李畅,刘记君等多名学生参与了本书的文字校对工作。

卫星轨道与姿态动力学分析对思考问题方法与角度的抽象提炼能力要求很高,作者水平有限,书中如有疏漏和错误,恳请读者批评指正。

著 者

2014年11月26日

## 符号说明

$n$ —平面法线	(1.1)
$r$ —位置矢量	(1.3)
$v$ —速度矢量	(1.3)
$i$ —轨道倾角	(1.4)
$\Omega$ —升交点赤经	(1.4)
$a$ —轨道半长轴	(1.4)
$e$ —轨道偏心率	(1.4)
$e$ —偏心率矢量	(1.4)
$\omega$ —近地点幅角	(1.4)
$f$ —真近点角	(1.4)
$i$ —轨道倾角矢量	(1.4)
$S_0$ —轨道坐标系	(1.5)
$S_b$ —本体坐标系	(1.5)
$\psi$ —偏航角	(1.5)
$\theta$ —俯仰角	(1.5)
$\varphi$ —滚转角	(1.5)
$\Delta v$ —速度脉冲增量	(2.1)
$\Delta e$ —偏心率变化增量	(2.1)
$\Delta i$ —倾角变化增量	(2.3)
$\Delta n$ —轨道法线变化增量	(2.3)
$J_{22}$ —地球引力势的二阶四谐系数	(3.2)
$\lambda$ —经度	(5.2)
$J_2$ —地球引力势的二阶带谐系数	(5.3)
$m$ —质量	(6.1)
$F$ —力	(6.1)

<b><math>M</math></b> —力矩 .....	(6.1)
<b><math>m</math></b> —磁矩 .....	(6.4)
<b><math>B</math></b> —磁感应强度 .....	(6.4)
<b><math>H</math></b> —角动量 .....	(7.3)
<b><math>G</math></b> —重力 .....	(7.3)
<b><math>\Delta H</math></b> —角动量变化量 .....	(7.3)

注：上面列出了本书用到的数学符号，括号中的内容表示该符号在书中首次出现或者首次被定义的位置。



# 目 录

第 1 章 动力学分析预备知识	1
1.1 动力学分析概念介绍	1
1.2 天球的基本概念	6
1.3 卫星的轨道平面	10
1.4 轨道根数定义	11
1.5 坐标系与姿态角定义	15
第 2 章 轨道机动的速度脉冲理论	19
2.1 切向速度脉冲对轨道的影响	19
2.2 径向速度脉冲对轨道的影响	23
2.3 法向速度脉冲对轨道的影响	27
第 3 章 轨道摄动	31
3.1 地球扁率引起的轨道摄动	31
3.2 地球 $J_{22}$ 项引起的轨道摄动	39
3.3 日月引力引起的轨道摄动	41
3.4 太阳光压摄动	46
3.5 大气阻力摄动	48
第 4 章 轨道机动	51
4.1 同平面霍曼变轨	51
4.2 不同平面霍曼变轨	53
4.3 兰伯特变轨	55

<b>第 5 章 轨道保持</b> .....	59
5.1 轨道保持的余量设置 .....	59
5.2 静止卫星轨道保持 .....	60
5.2.1 南北位置保持 .....	61
5.2.2 漂移速度控制策略 .....	62
5.2.3 偏心率控制策略 .....	64
5.2.4 二次切向机动能力 .....	66
5.2.5 东西位置保持 .....	68
5.3 近地卫星轨道保持 .....	69
5.3.1 轨道高度保持 .....	70
5.3.2 轨道进动调整 .....	70
<b>第 6 章 姿态摄动</b> .....	71
6.1 重力梯度力矩 .....	71
6.2 太阳光压力矩 .....	73
6.3 气动力矩 .....	74
6.4 地磁力矩 .....	74
<b>第 7 章 姿态控制</b> .....	77
7.1 整星零动量姿态控制 .....	77
7.2 整星零动量姿态机动 .....	80
7.3 恒定力矩下的进动分析 .....	82
7.4 偏置动量姿态角耦合 .....	85
7.5 偏置动量姿态控制 .....	87
7.6 太阳同步轨道卫星偏置动量轮与磁力矩器联合控制 ..	90
7.7 动量交换装置卸载 .....	93
<b>参考文献</b> .....	95

# 第 1 章 动力学分析预备知识

## 1.1 动力学分析概念介绍

简化是动力学分析最基本的原则,必须尽可能地忽略次要因素,某些情况下,能否正确地忽略次要因素直接关系到分析的成败。

以小球沿斜板下滑分析为例,展示一下动力学分析过程。

首先假定有一表面无限光滑、质量分布均匀、几何尺寸完美的小球。表面无限光滑的斜板固定在表面无限光滑的水平地面上,斜板与地面由一无限光滑的圆角沿切线方向相接。在地面上正对斜板固定一完美弹簧。

真实的工程实践中一定会存在摩擦,特别要强调的是,这里为了得出分析结果,抓住机械能守恒这个主要特点,就是要定义小球、斜板、地面、圆角都为无限光滑,就是要忽略所有的次要因素。

将小球放在斜板  $A$  点,圆角与地面的相切点为  $B$  点,弹簧接触点为  $C$  点。假定在某一时刻,对小球进行无任何冲量的释放,如图 1-1 所示。

力学分析就是要在脑子里想出小球未来的运动情况。

小球沿斜板下滑的核心是势能与动能的转换。小球在  $A$  点,重力势能最大,动能为零,所有机械能表现为重力势能。下滑过程中重力势能不断转为动能,速度越来越大,到达  $B$  点后,重力势

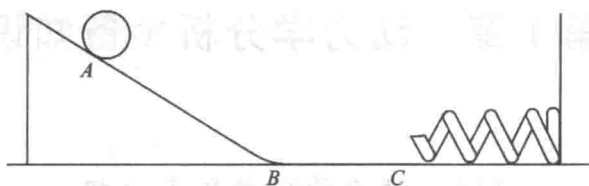


图 1-1 小球沿斜板下滑初始场景图

能再不能减少了,动能达到最大,所有机械能表现为动能,如图1-2所示。

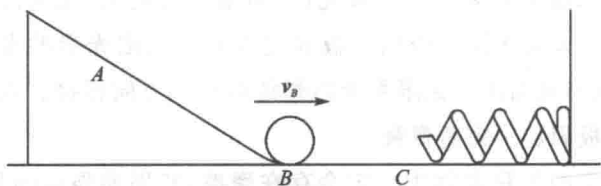


图 1-2 小球在 B 点时动能最大

小球由 B 点向 C 点的运动过程中,重力势能和动能不变,小球保持匀速运动,如图 1-3 所示。

小球过了 C 点后,由于弹簧的作用,动能减小,弹簧势能增加,直到 D 点,动能为零,弹簧势能最大,所有机械能表现为弹簧势能,如图 1-4 所示。

小球在弹簧作用下,反向运动,动能增加,弹簧势能减小,直到 C 点,弹簧势能为零,所有机械能又表现为动能。由于机械能

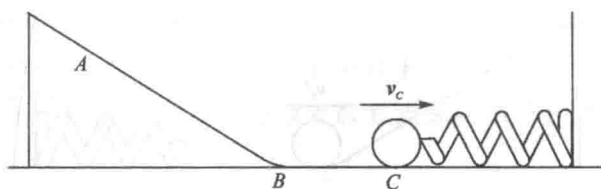


图 1-3 小球在 C 点时动能不变

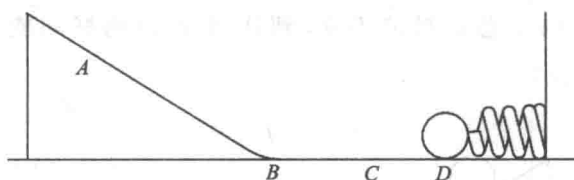


图 1-4 小球在 D 点时动能为零弹簧势能最大

保持不变,小球的速度大小与初次到达 C 点时相同,只是方向相反,如图 1-5 所示。

小球匀速到达 B 点,如图 1-6 所示。

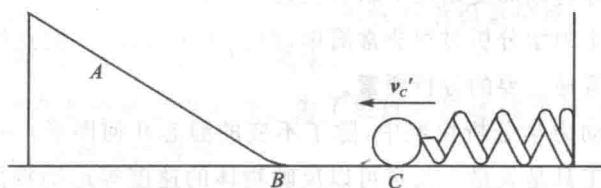


图 1-5 小球回到 C 点弹性势能转化为动能

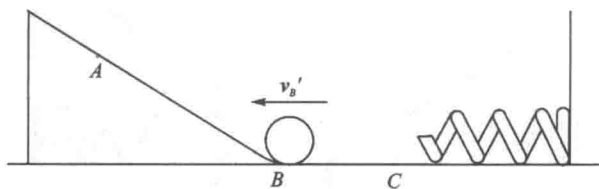


图 1-6 小球到 B 点动能不变

由 B 点向 A 点运动过程中,动能转为重力势能,速度减小,高度增加。由于总机械能不变,到达 A 点时刚好动能为零,如图 1-7 所示。

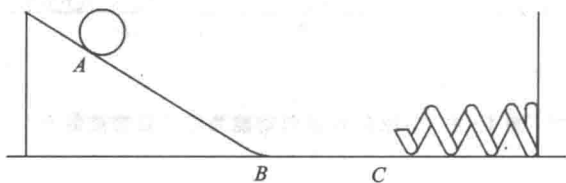


图 1-7 小球回到 A 点初始状态

小球将周而复始地不断重复这个过程。

这个力学分析过程非常简单,但包含了假设、关键点快照、动画过程等最主要的分析要素。

在动力学分析快照中,除了不变的静态几何图形,一个非常重要的工具是矢量。矢量可以反映物体的速度等运动特征,增强快照的表现力。更重要的是,矢量与坐标系无关,这可以帮助分

析人员将精力集中在力学分析,摆脱更低一层的数学描述。

小球沿斜板下滑过程中,假设 A 点到 B 点间还有 E 点和 F 点。小球先经过 E 点到 F 点,E 点高于 F 点,在 E 点和 F 点用矢量画出小球速度,可以很好地表达 E 点速度小于 F 点速度,如图 1-8 所示。

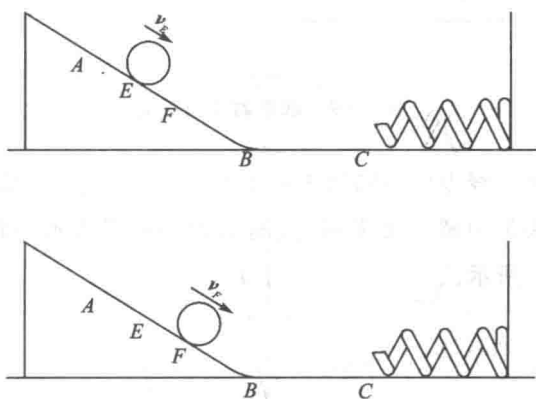


图 1-8 小球在 E 点和 F 点的速度矢量

快照一定是一个二维图形,卫星是在三维空间中飞行,所以选择投影方向也是非常重要的技巧。

小球沿斜板下滑过程中,所有的快照沿铅垂剖面,所以图形非常简洁,简洁的图形有助于思考。

一些矢量会和剖面垂直。为了更好地描述这些和剖面垂直的矢量,引入纸面的概念。

书的每一页定义了一个平面,称为纸面。先有白纸后印字,纸在下字在上,定义由纸指向字的方向为由里向外,由字指向纸

的方向为由外向里。纸面法线用  $n$  来描述,每一页纸面的法线方向为由里向外,如图 1-9 所示。

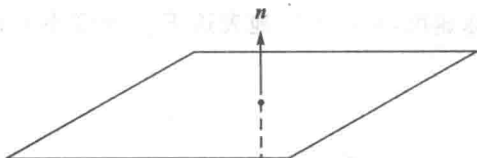


图 1-9 纸面的法向定义

与纸面法线方向相同的矢量用圈加点来描述,与纸面法方向相反的矢量用圈加叉来描述,圈的大小可以表示矢量的大小,如图 1-10 所示。

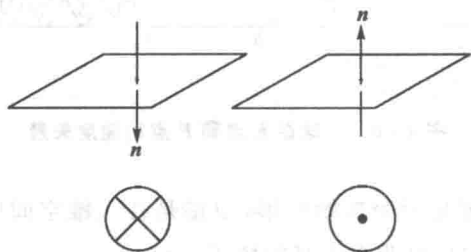


图 1-10 垂直于纸面的矢量定义

## 1.2 天球的基本概念

天球是人类进行天文观测时形成的概念。由于天文观测很难确定距离,可以认为天球上各个天体到观测点的距离都是一样



的,这样就形成了一个距离为 1 的球。

晚上用照相机对天空玩过长时间曝光的人都有体会,所有的天体都是一圈一圈的同心圆,这是由于地球自转造成的,由这些同心圆可以在天球上定义出自旋轴和赤道,如图 1-11 所示。

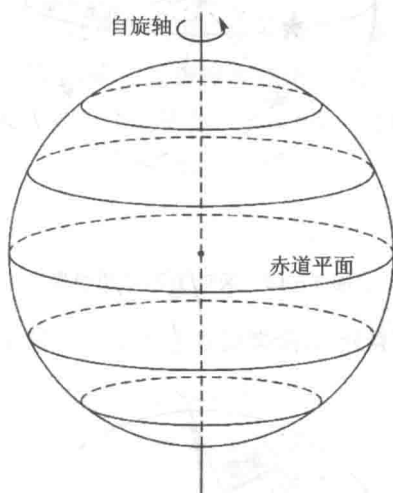


图 1-11 天球上的自旋轴和赤道

假想自己站到地球中心,也就是天球的球心,这时地球自转就不影响你的观测了,这时候再观测天球,绝大多数天体都不动,这些不动的天体称之为恒星,如图 1-12 所示。

所有运动的天体中,最夺目的是太阳。太阳不在天球上乱跑,只在一个平面上运动,这个平面称之为黄道平面,黄道平面与天球的交线就是黄道。黄道平面与赤道平面约有  $23^\circ$  的夹角。黄道平面和赤道平面的交线叫黄赤交线,黄赤交线在天球上有两个交点,按太阳飞行