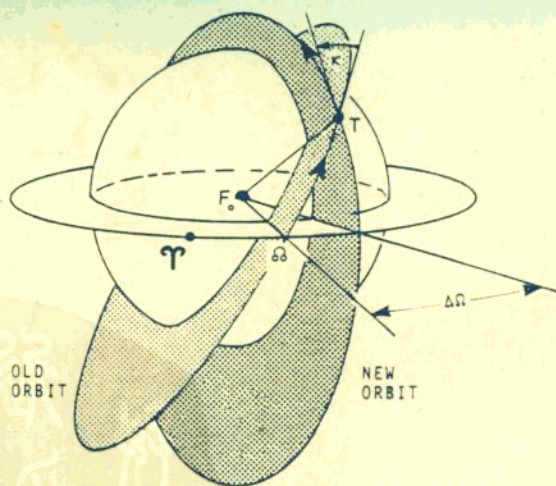


轨道动力学引论

F·P·J· 吕慕劳 著

叶开沅 俞焕然 冯燕伟 译



兰州大学出版社

轨道动力学引论

F. P. J. 吕慕劳 著

叶开沅 俞焕然 冯燕伟 译

兰州大学出版社

(甘)新登字第 08 号

轨道动力学引论

F. P. J 吕慕劳 著

叶开沅 俞焕然 冯燕伟 译

兰州大学出版社出版

(兰州大学校内)

武威市印刷厂印刷

甘肃省新华书店发行

开本:850×1168 毫米 1/32

印张:9.25

1993 年 11 月第 1 版

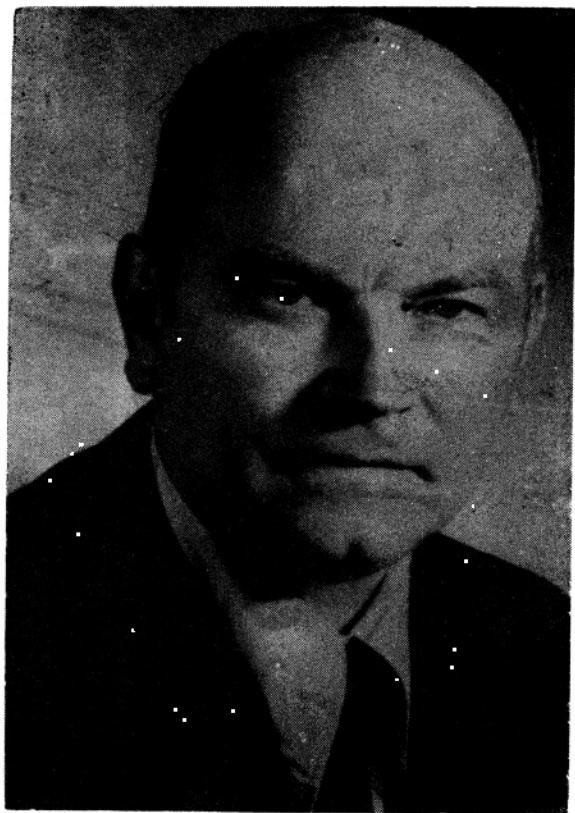
1993 年 11 月第 1 次印刷

字数:231 千字

印数:1-1000 册

ISBN7-311-00721-6/O.98

定价:7.90 元



(1927年8月4日一)

F.P.J.吕慕劳(F.P.J.Rimrott)教授近照

序

《轨道动力学引论》(*Introductory Orbit Dynamics*)一书是近期西方介绍卫星轨道动力学各书中最受欢迎的一种。该书只用初等微积分和微分方程,讲述了轨道动力学中的轨道迁移、轨道变化、轨道周期变化、空气和太阳风摄动,地月系统的卫星轨道以及 *Hill* 曲线等宇航工程人员普遍关心的问题。

在最近 30 年来,由于航天技术的发展,轨道动力学有了飞速的进展,文献资料非常丰富。有不少数学巨著专攻轨道动力学,如日本 Yusuka Nagihara 教授的名著“天体力学”(英文)共 4 卷 8 册,达 4000 页之巨(1975 年)。该书记录的轨道动力学文献每册都达几千种。因此,“轨道”成为宇航工程技术人员的畏途,但又无法完全不管。这本书就是尝试解决这一问题的。

本书每章都附有重要文献,作为读者深入研究时的主要参考书。同时,每章都附有习题,最后还有习题答案。因此,它又可以用来作为高等学校有关专业的高年级和研究生的有关教材或教学参考用书。本书最后附有宇航用的各种空间技术数据,有关太阳系、地、月和行星的数据,和宇航的标准数学代符,这对读者都是有幫助的。

我国的航天事业正在发展着,我们的航天技术人员同样需要这样的参考用书。

本书作者 Fred. P. J. Rimrott 教授是加拿大多伦多大学机械系教授,兼加拿大宇航中心分析研究组组长。

本书在联邦德国 Wiesbaden 市 Vieweg 出版社 1989 年出版,是该社工程科学的基础和进展丛书的第四种,原文是英文。

本书译者叶开沅教授，是兰州大学力学系名誉系主任，现在加拿大多伦多大学任客座教授。

钱伟长

1991年4月12日

钱伟长先生（Professor Qian Weizang）的《金史》（The History of Jin）一书，是金史研究中的一部重要著作。该书不仅对金史进行了系统的整理，而且对金史进行了深入的探讨。全书共分五卷，分别对金史进行了系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨。

该书共分五卷，分别对金史进行了系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨。全书共分五卷，分别对金史进行了系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨。全书共分五卷，分别对金史进行了系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨。

该书共分五卷，分别对金史进行了系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨。全书共分五卷，分别对金史进行了系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨。全书共分五卷，分别对金史进行了系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨。

该书共分五卷，分别对金史进行了系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨。全书共分五卷，分别对金史进行了系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨。全书共分五卷，分别对金史进行了系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨。

该书共分五卷，分别对金史进行了系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨。全书共分五卷，分别对金史进行了系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨。全书共分五卷，分别对金史进行了系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨。

该书共分五卷，分别对金史进行了系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨。全书共分五卷，分别对金史进行了系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨。全书共分五卷，分别对金史进行了系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨、系统的整理、深入的探讨。

自序

对学生,同样地对讲授者,卫星动力学具有罕有的吸引力。它不但是一个可用一些力学基本原理解释的符合逻辑的课题,而且最初对力学理论的系统化作出过贡献,并且仍在继续作出贡献。

1957年10月4日,苏联发射了地球卫星1号,当时工程师们已出色地进入了这个领域。航天器动力学的研究,作为工程力学中的一个科目,也取得了它应有的地位。

本教程的首要目的是为了使学工程的学生熟悉航天器轨道动力学的基础。它是为大学高年级学生,研究生以及宇航工业中不同部门的工程师们而写的。

使用这一教程的学生需要掌握天文学的基础、初等动力学、微积分学以及矢量和矩阵代数。由于矩阵公式不但很适合于计算机程序,而且它还能很快对所研究的问题给出明确的估计,这对工程实际是很重要的,因而本书的矢量和张量均以矩阵形式出现。

航天器动力学在今天是用电子计算机求解的。这就要求工程师彻底地掌握基础理论,以便给出问题的公式而进行有效的计算,且在计算后能根据理论验证计算机的输出结果以及很快地得到近似的结果。

本书没有过分详细地对公式进行推导。由于它是为工程实际而写的,因此本教程假定天文学的数据是已知的,而且是适用于航天器设计的。在这样的要求下,本教程的内容的处理就不同于物理学或天文学。在那里,典型的目的是为了导出和确定这些

数据。

本教程讨论的轨道动力学,主要是关于点卫星的。首先讨论它在点中心体场中的情况,然后又讨论了在任意形状的中心体场中的情况。对于开普勒轨道,作了较为彻底的讨论。随后讨论了卫星轨道的变轨以及对于点卫星在球形中心体场中的变分。

本教程也讨论了点卫星受二个中心体作用的行为,导出了希尔曲线、平动点以及洛希极限。

每个重要公式导出后均给有实例,这是为了使学生们了解典型的情况、典型的结果以及典型的数据。为了同样的目的。在每章后附有一些习题。所选习题的类型既包括了适用于自学教材的典型问题,也包括了在工程实际应用中的问题。

最重要的工程和天文学的数据、专用名词、以及习题的解答包括在附录中。

在本书中没有按照习惯详细地引用参考文献,这是由于它的导论的本质所决定的。各章的后面有标题为“建议读物”的出版物的目录,它们是为对该学科的历史发展有兴趣以及对所研究的内容作进一步研究的人而列出的。

撇(')在本教程中用来表示本质相似于没有撇的量。例如,在处理圆锥曲线的相关性中用了 a' 表示双曲线的半长轴,它与椭圆的半长轴相反,有 $a' = -a$ 。

每一章是自成系统的,但允许教师和读者在没有失掉相关性的情况下,在讲授上有所取舍。

作者意识到书中尚有许多不足和不完善之处,本书远没有达到完美的境界。作者将在今后竭力完善这些不足,以满足对本书关心的读者的期望。

译者的话

我与 F. P. J. 吕慕劳教授相识于 1980 年在多伦多举行的第 15 届国际理论和应用力学大会上。我发现吕慕劳教授非常谦和,作为大会的主持者有大将风度。后来我进一步了解到,他是多伦多大学机械系的教授,是国际理论和应用力学联合会的加拿大代表,是一位国际上的知名学者。

1984 年我们又在丹麦的 Lyngby 举行的第 16 届国际理论和应用力学大会上见面。

1985 年钱伟长教授在上海举办了国际非线性力学会议,吕慕劳教授参加了会议,并且我们的论文和他的论文在一起张贴,使我们更增加了了解。

1988 年 12 月到 1989 年 5 月,我在美、加访问近半年,12 月到多伦多大学机械系,吕慕劳教授接待了我。我邀请他到兰州大学力学系访问,访问日期在 1989 年 6 月以后。由于各种情况,当时许多访问计划和在中国举行的国际会议都推迟或取消了,但吕慕劳教授却如期来华。这本书的中文版在中国出版就是在这次访问中决定的。吕慕劳教授热爱中国,在他的集体中有不少中国人。在兰州时,他了解了兰州的工业后谦虚地说“中国是大国,加拿大是小国,加拿大大部分工业靠进口,因此中加合作有着广阔的前途。”

1989 年 12 月我来到了吕慕劳教授的集体中工作,我们和谐地合作了一门课程——机械设计原理。在一起工作中,我们还共同努力就本书翻译中的问题进行了探讨,改正了原书的一些印刷错误。可以预期,本书的中译本的质量会超出原书。

本书紧密地联系实际,不论是正文和每章后的习题,均来源于实际。写这样一本不深不浅的书是件吃力不讨好的事,吕慕劳教授在这方面做得很好,每个问题由浅入深,深入浅出。读了本书,将对航天器的轨道设计以及天体力学中的一些基本问题有个基本的了解。

钱伟长教授特意为本书作序,并向中国读者推荐本书,这使本书的中文版增加了光彩。钱先生早年是多伦多大学的博士,与吕慕劳教授的友谊甚笃。这本书的中文版的出版将是继白求恩医生后,中加友谊佳话中新增加的一章。

钱叶开沉 大学教师

1990年6月15日于多伦多

历史背景^①

当称自己为伏尔太(Voltaire)的 Francois-Marie Arouet (1694-1778)在他任柏林腓特烈大帝(Frederick the Great)的普鲁士科学院院士期间(1750-1753),发生了他与科学院院长[任期(1741-1756)]Pierre Louis Moreau de Maupertuis^②(1698-1759)的争执。伏尔太在他的著作“*Akasia* 博士的日记” (“*le Diatribe du Docteur Akasia*” (1753)中列举了所有他认为可笑的院长的设想。其中就有 Maupertuis 关于有一天人类要到月球上去旅行的断言。

齐奥科夫斯基(Tsiolkovsky)(1857-1935)、戈达德(Goddard)(1882-1945)和奥伯斯(Oberth)(1894-1981)这三位天才科学家的观点和他们的坚韧不拔的努力使人们进入宇宙的愿望在我们这个时代胜利地实现了。然而只是他们的同行和继承者才铭记他们和尊崇他们。

Jules Verne(1828-1905)的科幻小说,例如“由地球至月球”[“*De la terre a' la lune*”(1865)]在当时和以后的很多时期内均很流行,但是在 1896 年俄国的教师康士坦丁·爱乔图维奇·齐奥科夫斯基(Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky)发表了关于与其它行星上的人类交往的严肃的论文时却很少引起人们的注意。在同一年,齐奥科夫斯基开始对“用反作用装置进行宇宙空间的探险”(“*Exploration of Cosmic space by Means of Reaction Devices*”)的研究。但是俄国科学协会却对他的理论和他的空气动力学试验持不同的保留意见,世界的其它地方也是如此。

① 录自 *Spar news* (争论新闻), 1X, 4, 1977 年 12 月。

② Maupertuis 的声誉坚固地建立在最小作用原理的公布以及用大地测量来证明地球两极变平的事实上。

但是认识并不会终止。1919年，齐奥科夫斯基被选入科学院，并且二年以后苏联政府给予他生活退休金。

美国的 R·戈达德博士的一系列的火箭试验(他是第一个论证推力和推进可以在真空中完成，而无需空气来推动的人)延续了好多年，几乎成为不能容忍的娱乐。像戈达德这样一位博士，一位给人深刻印象的物理学家真的能实现离开地球的旅行吗？人们认为这是幻想。

今天可以说宇宙时代已经开始。这不是开始于 1957 年 10 月 4 日苏联人造地球卫星 1 号首先进入环绕地球的轨道，而是参考书上记载的时间：在 1926 年 3 月 26 日在美国马萨诸塞州的 Auburn，戈达德的 Aunt Effie 农场中发生了一个液体推进火箭的飞行。

在 1919 年，当戈达德出版他的经典专题论文“一个抵达极端高程的方法”时，并不知道齐奥科夫斯基的研究工作和实验，当时齐奥科夫斯基关于在宇宙中探险的著作在 1903 年已经出现，但没有人关注它。第三位先驱者 H·奥伯斯在 1923 年出版他的“至行星宇宙的火箭”(“Die Rakete zu den Planetenräumen”)时也没有看到戈达德的论文。

直到以后很久，三位物理学家才互相进行了交流。奥伯斯经常感谢前面二位学者在宇宙飞行的数学理论方面所做的贡献。

齐奥科夫斯基受到了忽视，戈达德受到了嘲笑，1922 年奥伯斯在 Heidelberg 大学请求博士学位时，他的关于火箭飞行的论文遭到了否决。今天他们的观点已成为现实。看看今天(或明天)的任何火箭发射的航天器，我们不禁要问，正如 Verne 1866 年的小说“云中的帆船”中的飞行员所说的：“没有他的前辈的探索性的实验，一个工程师能构思出这样完善的装置吗？”

F. P. J. 吕慕劳

加拿大，安大略省，多伦多

目 录

钱伟长序	(1)
自序	(1)
译者的话	(1)
历史背景	(1)
第一章 简化的二体问题	(1)
1.1 矢径、速度和加速度	(2)
1.2 吸引力	(5)
1.3 轨道形状	(6)
1.4 偏心率矢量	(9)
建议读物	(11)
习题	(11)
第二章 开普勒轨道	(15)
2.1 角动量	(16)
2.2 周期	(17)
2.3 活力积分	(19)
2.4 速度	(23)
2.5 势能	(28)
2.6 总能量	(31)
2.7 开普勒定律	(33)
2.8 飞行时间	(34)
2.9 近点角	(35)
2.10 通用常数	(37)
2.11 开普勒方程	(38)

2.12	朗伯特方程	(41)
2.13	轨道要素	(43)
2.14	系留卫星	(45)
	建议读物	(46)
	习题	(47)
第三章	入轨	(53)
3.1	在近拱点(或远拱点)入轨	(54)
3.2	在轨道上任一点入轨	(57)
	习题	(67)
第四章	变轨	(69)
4.1	单冲量	(70)
4.2	共面变轨	(71)
4.3	轨道平面的改变	(74)
4.4	变轨到指定的目标轨道	(76)
4.5	霍曼过渡	(78)
4.6	向大圆轨道的霍曼过渡	(80)
4.7	速度突变引起的能量增加	(82)
4.8	燃料需要量	(83)
4.9	霍曼过渡的能量增加	(84)
4.10	考虑质量损失的情况	(85)
4.11	霍曼过渡的过渡时间	(87)
4.12	多冲量、连续冲量	(88)
4.13	发射窗	(89)
	建议读物	(91)
	习题	(91)
第五章	引力势能	(99)
5.1	对于任意形状物体的势能近似表示式	(99)
5.2	对于任意形状物体的势能	(104)

5.3	对于回转物体的势能	(107)
5.4	引力势能中的摄动力	(112)
5.5	扁率	(115)
5.6	惯性矩	(117)
5.7	地球	(118)
	建议读物	(120)
	习题	(120)
第六章	几何轨道要素的变分	(125)
6.1	摄动力和速度改变	(126)
6.2	半长轴大小的改变率	(127)
6.3	偏心率的改变率	(129)
6.4	升交点的赤径的改变率	(131)
6.5	拱点线的方位的改变率	(133)
6.6	倾角的改变率	(136)
	习题	(137)
第七章	轨道要素的长期改变	(141)
7.1	轨道平面的进动	(141)
7.2	拱点线的转动	(145)
7.3	半长轴、偏心率、倾角	(147)
	习题	(148)
第八章	轨道周期	(150)
8.1	绝对周期	(150)
8.2	交点线周期	(153)
8.3	拱点线周期	(155)
	习题	(157)
第九章	其它摄动力	(158)
9.1	空气阻力	(158)
9.2	圆轨道	(160)

9.3	大气的上限	(163)
9.4	椭圆轨道	(166)
9.5	太阳风	(169)
9.6	卫星温度	(170)
	建议读物	(172)
	习题	(173)
第十章	由无穷远处来的卫星	(177)
10.1	双曲线轨道	(178)
10.2	碰撞半径	(182)
10.3	第一中心体和第二中心体	(183)
10.4	能量的获得	(188)
10.5	影响球	(188)
10.6	作为第二中心体的卫星的航天器	(189)
10.7	摄动加速度	(190)
10.8	作为第一中心体的卫星的航天器	(191)
10.9	蒂斯朗方程	(192)
	建议读物	(195)
	习题	(196)
第十一章	一般二体问题	(200)
11.1	轨道	(203)
11.2	地球—月球系统	(205)
11.3	太阳—(地球+月球)系统	(206)
	习题	(207)
第十二章	地球—月球系统中的卫星	(208)
12.1	月球	(208)
12.2	在地球—月球系统中的点卫星	(210)
12.3	在月球的轨道平面内的卫星	(217)
12.4	关于能量	(218)

12.5 希尔曲线.....	(220)
12.6 平动点.....	(222)
建议读物.....	(225)
习题.....	(225)
第十三章 潮汐力	(227)
建议读物.....	(232)
习题.....	(232)
附录 A:宇宙数据	(233)
附录 B:工程数据	(247)
附录 C:专用名词	(252)
附录 D:部分习题的答案	(255)
中英名词对照.....	(270)