

行星运动的 奥秘

李广宇◎著



科学出版社

行星运动的奥秘

李广宇 著

国家自然科学基金
机械强度和振动国家重点实验室
资助出版

科学出版社

北京

内 容 简 介

行星的运动充满了谜。托勒密、开普勒和牛顿三位大科学家的开拓性工作帮助我们揭开了其中的奥秘。本书依据文献资料,合理想象,对他们的探索工作进行生动、具体和感人的描述,奉献给读者一幅怎样探索科学真理的画卷。

托勒密、开普勒和牛顿使用的数学方法和工具,主要是初等数学、特别是几何学的知识,微积分正是在这个探索过程中诞生的。本书追随三位大家的脚步,着重用初等几何学的方法解决问题,同时详细阐述由初等数学向高等数学过渡、提炼出微积分算法的要点,特别适合高中文化水平的读者阅读。对于学习大学低年级天文物理和数学课程的读者也能提供有益的启发。

本书适合爱好天文、物理、数学和科学史的高中和大学低年级学生阅读,对研究生和专业人士也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

行星运动的奥秘 / 李广宇著. — 北京: 科学出版社, 2018.1

ISBN 978-7-03-054668-5

I. ①行… II. ①李… III. ①行星运动-普及读物 IV. ①P134-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 238290 号

责任编辑: 昌盛 陈曰德/责任校对: 彭涛

责任印制: 师艳茹/封面设计: 迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

天津市新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 1 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018 年 1 月第一次印刷 印张: 11 1/2

字数: 130 000

定价: 69.00 元

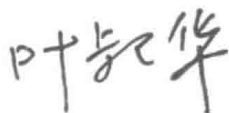
(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

李广宇送来新作，初读之时，似是一本讲解天文史的科普小册子。除了语言流畅、情节生动外，未见特别之处。再读之下，却似一杯醇酒，品味出一些特点。首先，全书以托勒密、开普勒和牛顿三位大家对天文学的开拓工作为主线，阐释了科学研究从观测、探索到构建严格理论体系的发展规律。特别强调了观测和观测数据所起的决定作用。作者并没有空洞说教，而是以丰富严谨的数据、图表阐明原理，使读者在情节的发展中自觉地接受这一基本思想。作者对三位大家遇到的困难、探索和解决问题的艰难、获得成功的喜悦做了入神的刻画。特别是对于开普勒艰难探索的阐述，层层剖析，步步深入，引人入胜。其次，作为阐释科学史的图书，书中模拟托勒密、开普勒和牛顿各自使用的数学方法和工具，着重用初等数学、特别是几何学的方法解决问题，还原了牛顿时代刚刚诞生的微积分的面貌。这些内容有别于现行天文物理教科书的写法，对于学习这些课程是有益的补充。第三，作者从加速度入手展开牛顿力学的写法有新意。引力加速度才是可以经由观测和实验测量的量，以加速度而不是力为中心，使得体系更加强调观测和实验的地位，也更加简洁。

作者能写出这样一本有深度和广度的书，得益于丰富的科研教学实践。李广宇既擅长数值计算，也善于理论思维，还富有教学经验，这为他写好本书创造了条件。他和他的团队建立了紫金山天文台盱眙观测基地，建造了近地天体探测望远镜，在太阳系数值历表、近地天体探测发现、太阳系天体物理、外太阳系天体动力学、航天器轨道优化设计等领域都取得了可喜的成就，有些还是开拓性的。

李广宇是一位多产的作家。2007年和合作者出版了夏商周断代工程专著《夏商周时期的天象和月相》，2010年出版了广受欢迎的《天球参考系变换及其应用》，今年刚刚出版了《天体测量和天体力学基础》。现在这本书可以看作是《天体测量和天体力学基础》一书的补充，主要适合于喜爱天文、物理、数学与科学史的高中和大学低年级学生阅读。研究生和专业人士也能从中获得启迪。



2017年4月

目 录

序

第1章 托勒密：本轮和偏心圆

- 1.1 不守规矩的星空漫游者 / 3
- 1.2 火星会合天象 / 8
- 1.3 本轮和均轮 / 11
- 1.4 平行四边形法则 / 12
- 1.5 科学真理从哪里来? / 14
- 1.6 金星会合天象 / 16
- 1.7 偏心圆和对位点 / 20
- 1.8 殊途同归 / 27

第2章 开普勒：天空秩序立法者

- 2.1 卡尔洛瓦街的天文学家 / 30
- 2.2 哥白尼和第谷的学说 / 34
- 2.3 奇思巧构量天尺 / 40
- 2.4 距离背后藏秘密 / 44
- 2.5 从面积定律到开普勒方程 / 47
- 2.6 撼天动地八角分 / 50

- 2.7 身在此山中 / 52
- 2.8 真相大白 / 54
- 2.9 宇宙和谐交响曲 / 58
- 2.10 今欲测地深 / 65

第3章 牛顿：速度和加速度

- 3.1 速度和导数 / 69
- 3.2 向量 / 75
- 3.3 面积速度、面积常数和比角动量 / 79
- 3.4 向心加速度——月球与苹果 / 82
- 3.5 椭圆轨道的几何性质 / 86
- 3.6 椭圆轨道上的速度和加速度 / 91
- 3.7 逆问题——几何方法 / 93
- 3.8 分析方法 / 99
- 3.9 逆问题——分析方法 / 102
- 3.10 中心差 / 106

第4章 牛顿：引力加速度

- 4.1 引力常数和质量 引力场 / 114
- 4.2 牛顿运动定律 / 116
- 4.3 二体问题 / 120
- 4.4 修正的开普勒第三定律 / 128
- 4.5 功，向量的数量积 / 130

4.6 能量积分 / 136

4.7 引力势的梯度, 偏导数 / 140

4.8 球对称天体的引力势 / 142

练习解答 / 150

主要参考文献 / 169

后记 / 171

第 1 章 托勒密：本轮和偏心圆

金乌西坠已近一个时辰，伴随着地中海上吹来的阵阵凉风，天空慢慢地暗了下来。罗马帝国治下亚历山大城的天文观测台上，一位满头卷发，身着斗篷，表情肃穆的中年学者正凝视着西方。在那蒙影尚未全退的天空背景上，一颗红色星星最先浮现出来。随着昏影的消退，渐渐变亮，直至发射出坚定而逼人的光芒。接着出现在近处的，是一颗白色的星星，亮度与红星仿佛，却不停闪烁，似乎急要诉说。中年人缓缓走到台前，操作起一架仪器，开始仔细测量和记录两星之间的角度（图 1.1）。

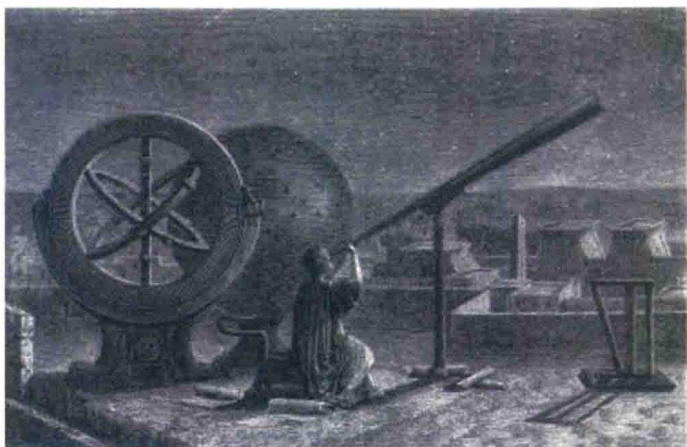


图 1.1 托勒密测量天体

这一幕发生在大约 1880 年前，正在测量的学者就是名动古今的希腊裔大天文学家托勒密，生活时代略晚于中国古代天文学家张衡生活的东汉时期。他孜孜研习先哲亚里士多德和依巴谷等人的著作，不避寒暑地从事天文观测已逾十载，正在著作鸿篇巨制《天文学大成》，意图为天空确立秩序。眼前这颗红色星星稳恒的光芒，却似在向他挑战：我就是这样，你待怎的（图 1.2）？

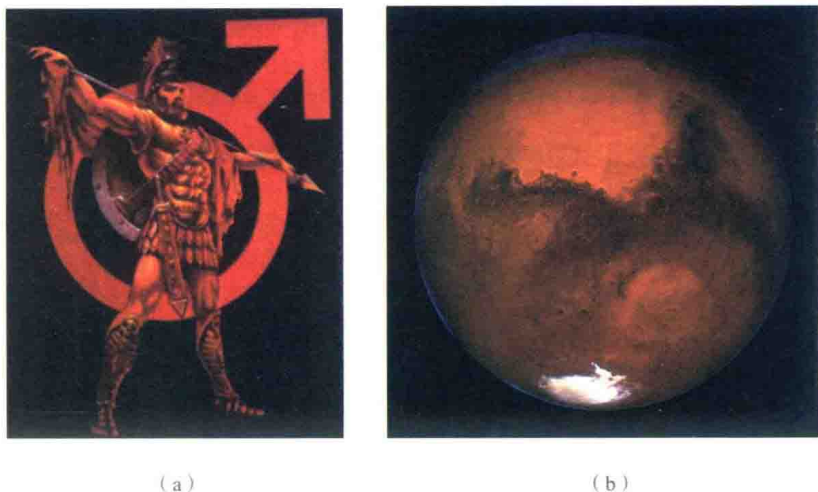


图 1.2 我就是这样，你待怎的？

(a) 罗马神话中的战神；(b) 哈勃空间望远镜在 2003 年拍摄的火星

1.1 不守规矩的星空漫游者

从地球上观看，日月行星和恒星等天体都运行在一个被称作天球的硕大无比而又无形的球面上。

这颗以希腊神话中战神马尔斯命名的行星（火星）的行止着实怪异。与太阳、月亮及水、金、木、土四颗行星一样，它也遨游在**黄道带**里（图 1.3）。黄道带是围绕天球一周宽约 18 度的窄带，好似日月五星在天球上运行的环形驰道。太阳的运行中规中矩，似乎每一步都踩在道路中心的**黄道**上，365.26 日准时走完一圈，回到出发的地方，再继续下一周期的运行。带中十余颗较亮的恒星像是矗立在驰道上的里程碑，可用做测量标志。刚刚升起的那颗青白色亮星角宿一（室女座 α ）就是其中的一颗。太阳在黄道上的位置用黄经表示，从 0 度到 360 度，以春分点作为起点。太阳离开黄道的距离用黄纬表示，向北由 0 度增加到 90 度，到达

北黄极；向南由 0 度减小到-90 度，到达南黄极。以黄道为基准的参考系叫做**黄道参考系**，黄道参考系以外，用于测量天体位置的还有赤道参考系，请参阅（李广宇，《天球参考系变换及其应用》，科学出版社，2010 年）。



图 1.3 金、火、木、水四颗行星

2015 年 10 月中旬联袂出现在晨曦初现的东方天空中

太阳的步伐还相当均匀，虽然半年超前，半年落后，但如果当作匀速计算，黄经误差不会超过 2 度。月亮的纪律性就要差许多，周期虽然维持 27.3 日的准确数值，路径却常会偏离黄道，最大可达 5 度，快慢变化也比太阳大而复杂得多。尽管如此，月亮仍然是一路由西向东，绝不逗留打圈，更不后退。

令人揪心的是金木水火土 5 颗行星，它们在黄道带里的运动可谓不规矩之至，尤以火星为甚。

托勒密从观测记录中选取了连续 2100 日的数据,将火星的位置按黄经黄纬画到黄道星图上,得到了如图 1.4 所示的路径,火星在星空中按箭头所示的方向由右向左运动。注意黄经轴的比例尺比黄纬轴的压缩了约 60 倍。为了显示视运动的快慢,路径上每隔 20 日画出了一个位置点。显然,点密集的路段火星运动较慢,点稀疏的路段火星运动较快。作为参照,图中还画出了三颗黄道亮星:角宿一、心宿二(天蝎座 α)和轩辕十四(狮子座 α)。在此期间,火星大约沿黄道运行了两周半,故横轴包含了 2 个 360 度和一个 180 度。

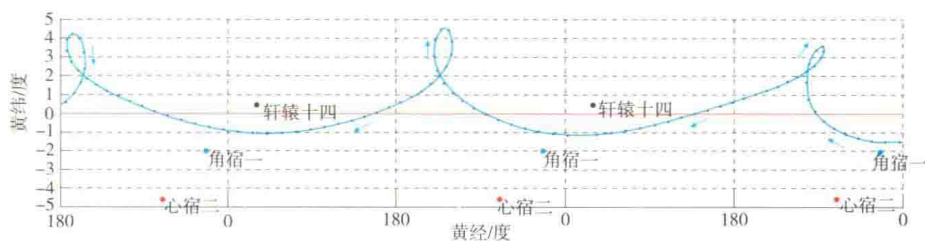


图 1.4 火星视运动的轨迹

观测数据是模拟的,实际观测由于受天气条件和与太阳相对位置的影响,不会是连续不断的

由图 1.4 可见,火星的轨迹周期性地出现倒退和打圈。选取中间时长 185 日的一个圈,放大后得到图 1.5,黄经方向仍然是压缩的,表示火星位置的圆点则改为每 5 日一个。图中火星的路径,前 50 日由西向东,黄经增加,与太阳相同,叫做顺行;随后的 75 日由东向西,黄经减小,与太阳相反,叫做逆行;最后的 60 日又是顺行。在顺行与逆行两种状态转换的时候则好像停留不动,黄经几乎不变,叫做留。

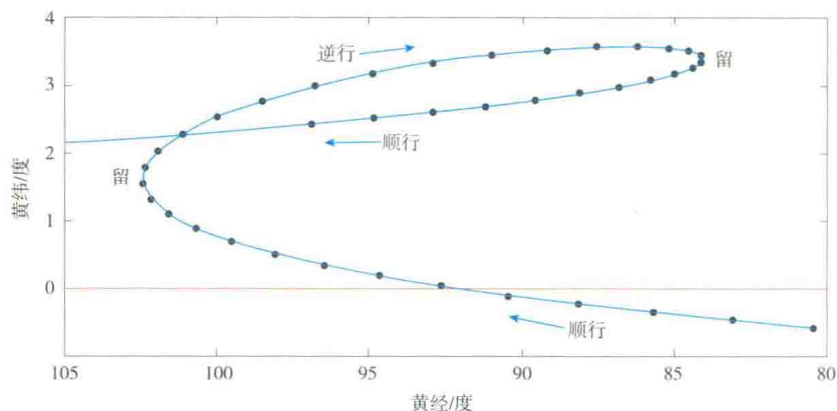


图 1.5 火星视运动，顺行、逆行和留

在轨迹图上以点标记表示位置随时间的变化虽然直观，却不是最好。另一个方法是画出图 1.6 所示的坐标关于时间的变化曲线。图 1.6 (a) 是关于黄经的，图 1.6 (b) 是关于黄纬的。在黄经曲线上，顺行、逆行和留及其经历的时间表达得十分清楚。顺行时黄经随时间增大，逆行时减小，留时保持不变。图上的灰色竖直直线表示黄经由 360 度归化为 0 度引起的跳跃。

黄纬则呈现出不过 5 度的周期变化。托勒密知道，这是由于火星轨道平面与黄道面倾斜造成的，比较容易处理。由于行星轨道的倾角都不大，本书将不涉及这个次要性问题。

先哲亚里士多德言道，天体的运动是完美无缺的，而完美无缺的运动必须是**匀速圆周运动**。所以太阳、月亮和行星的轨道应是圆周，地球就在圆周的**中心**。太阳和月亮的运动大体符合观测，根据近快远慢的经验，还可以估计它们到地球的远近。行星，例如上述火星的运动，却完全无法符合。先哲之言，一句顶一万句，怎么会错？

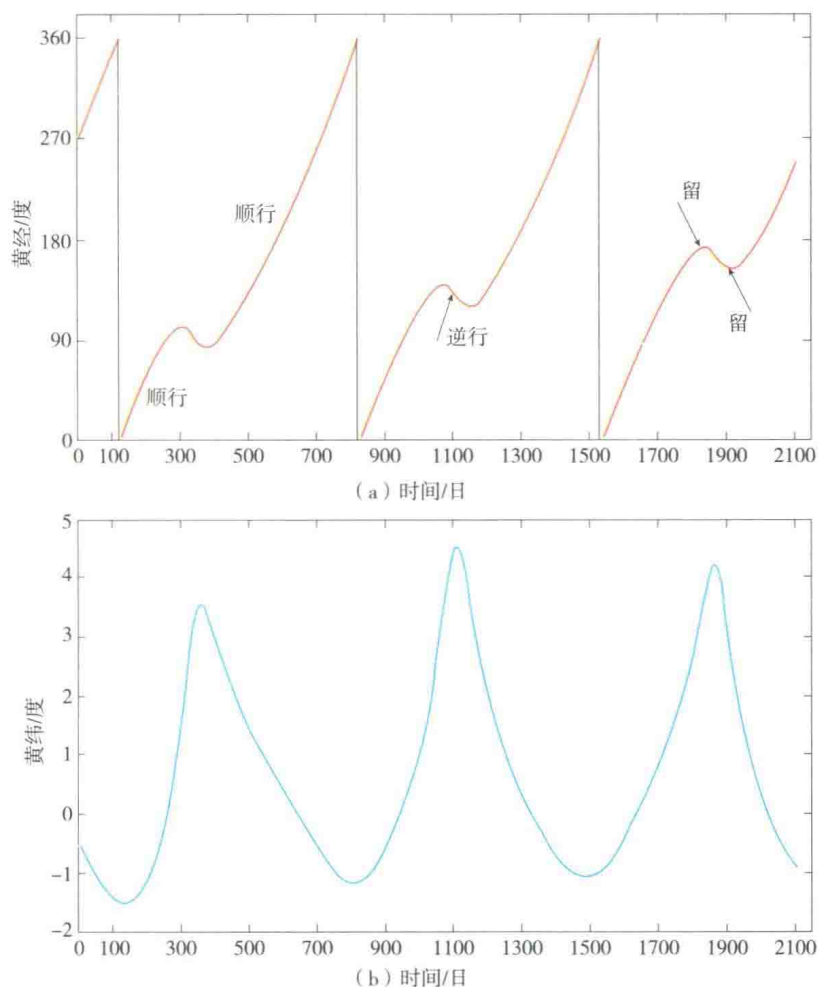


图 1.6 火星黄经和黄纬随时间的变化

(a) 黄经; (b) 黄纬

图 1.7 (a) 中, E 为地球, P 为火星, 循圆轨道围绕地球做匀速运动, 从地球上看去, 火星应如同太阳那样由西向东一路沿黄道匀速前进, 绝不能倒退打圈。先哲的圣训不能违背, 观测到的天象也是明明白白, 不容篡改。这究竟是因为什么? 托勒密百思不得其解。

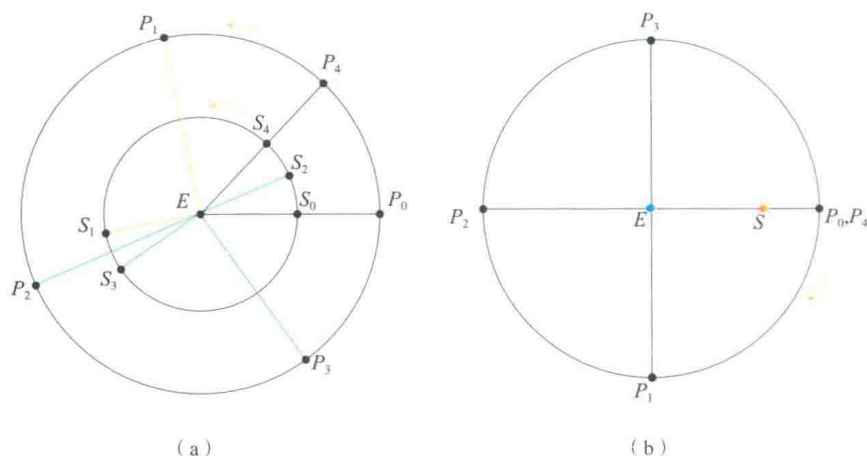


图 1.7 火星的合、冲与方照

(a) 黄道参考系；(b) 会合参考系

1.2 火星会合天象

让我们与托勒密一道来看看,从来自观测的图 1.5 和 1.6 中还可以获得哪些关于火星运动的信息。由图 1.6 可以测定,火星黄经由 0 度增加到 360 度绕黄道一周花的时间大约是 710 日,大于太阳的周期 365.26 日。托勒密已经知道,周期长的行星距离远,因而他把火星的轨道放到太阳轨道的外面。为了分析方便,他还把太阳轨道的半径也就是日地距离取作单位(即后世所称天文单位),火星轨道的半径按与周期成正比估计为 1.9,然后在图 1.7 (a) 中加进了太阳 S 和它的圆轨道。

接下来要考察的,应该就是火星的视运动与太阳的关系。太阳过于明亮,在天空中的位置不易直接测定,但可以通过测量午夜中天(即通过天球子午圈)的恒星间接推算出太阳的坐标;火星坐标则可以直接测定,托勒密对此早已驾轻就熟。总之他通过观测得到了一系列太阳和

火星的黄经，然后由火星黄经减去太阳黄经得到黄经差，再画出黄经差随时间变化的曲线图（图 1.8）：

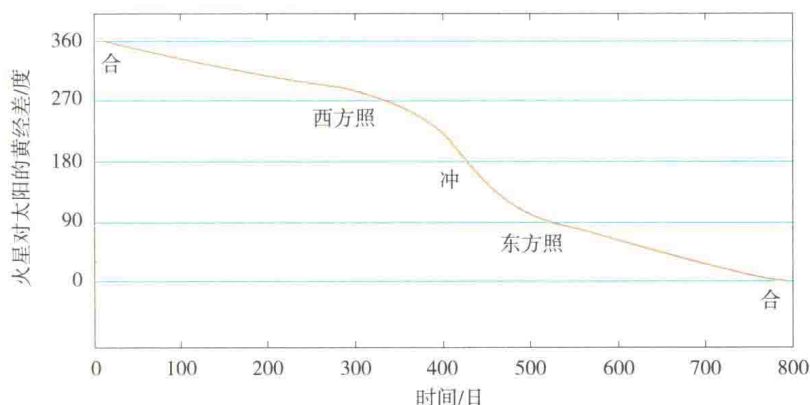


图 1.8 火星关于太阳的黄经差和会合天象

由观测可以知道，太阳沿着黄道由西向东顺行。火星大多数时间也顺行，但比太阳跑得慢。所以相对于太阳，火星是由东向西逆行的。火星对于太阳的黄经差是从太阳开始，沿轨道按逆时针方向到达火星的圆周角。每当太阳从后面赶上火星，地日火处在在同一条半径上的时候，相对位置如图 1.7（a）中的 E ， S_0 和 P_0 ；两者的黄经差等于 0 度，即 360 度，如图 1.8 中计时开始时那样。此时火星与太阳同升同落，淹没在太阳的光辉中观测不到。这种天象叫做合。

经过合以后太阳越过火星，跑到火星的前面，而且越来越远。黄经差从 360 度逐日减小。火星开始出现在日出前的晨光中，而且升起得越来越早。直到约 330 日后，黄经差减小到 270 度，火星黄经落后太阳 90 度，如图 1.7（a）中的 S_1 和 P_1 。此时火星半夜升起，日出时中天，高挂南方天空。因位于太阳的西面，叫做西方照。随后黄经差继续减小，再