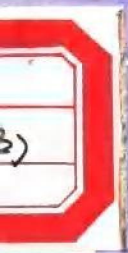


天体力学浅谈

〔苏联〕尤·阿·里亚波夫



科学普及出版社

25.2
136(272)

天体力学浅谈

[苏联]尤·阿·里亚波夫

李珩 陈晓中 译

75.3.12

科学普及出版社

内 容 提 要

这是一本介绍天体力学基本概念的中级科普读物。它对行星、卫星等的运动以及受干扰后的摄动运动，尤其是对研究这些运动的基本思想和方法，作了简明扼要的介绍。在叙述中尽量避免繁杂的数学推导，而用浅显易懂的文字表达。本书对天文、数学、物理爱好者是一本很好的辅助读物，同时对教学和科研人员也是一本较好的参考书。

天 体 力 学 浅 谈

〔苏联〕阿·里亚波夫

李 珣、陈晓中译

责任编辑：王 民

封面设计：李文进

科学普及出版社出版（北京海淀区白石桥路32号）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

密云县卫新综合印刷厂印刷

开本：787×1092毫米 1/32 印张：6 1/2 字数：141千字

1984 年11月第1版 1984 年11月第1次印刷

印数：1—5,700册 定价：0.85元

统一书号：13051·1385 本社书号：0775

导 言

我们仰望天空，可以见到恒星、行星、月亮、太阳和其它发光的天体。它们日复一日、年复一年、一个世纪又一个世纪地在天球上运行着，在天穹上描绘出错综复杂的路径。天体的复杂运动，只不过是它们在无边无际的宇宙空间里更加复杂的运动的表现而已。而且，我们居住的地球也是一个在空间运行不息的天体。

天体究竟怎样运动，这些运动彼此之间究竟有怎样的关系？自然界里有什么力量在支配着这些运动？

今天，我们对于这些问题已经能够给出相当完满的答案。我们知道，地球和行星在空间里围绕太阳运行，形成所谓**太阳系**，而太阳本身又是一个名叫银河系的巨大星系里的一个成员；太阳与其它恒星又围绕银河系的中心在空间里运行。我们还知道，地球、行星、太阳和恒星的运动，主要由它们之间的相互引力所支配。这种相互作用的定律——万有引力定律——于17世纪为伟大的英国科学家牛顿所发现。

天体力学——研究天体运动的科学——已经利用万有引力定律取得卓越的成就。现在我们已经能够对某些天体运行制订出确切的“时间表”，说明一个给定的天体于任何一个给定的时刻，到达天穹上的什么位置。而且这些天体，必然按时到达所指定的“地点”，或许比火车正点到站还要准确。

天体运行时间表，往往不是制订出一天或一年的，而是制订出几十年或几百年的。在某些情况下，我们甚至还可以

描绘出几千年前我们的远祖所看见的天体运动，并且还可以预测几十代人以后将要出现的天象。

自然，天体力学不是在一个短时间内建立起来的。若干世纪以前，人们便开始寻找天象变化的原因，并在漫长的道路上，不断出现错误和失望。而且，追求真理的斗争有时是很激烈的。即使到今天，我们对于天体运动的知识也还远没有达到完善的境界。我们还不能够制订出任何天体的运动的足够精确的“时间表”。有时，表上还会出现误差：有些天体早到，有些迟来。而且我们也并不总是能精密而确切地断定某个天体在过去若干年前或将来若干年后怎样运行。

本书的目的是为读者叙述万有引力是怎样发现的，以及我们怎样根据该引力定律来研究天体的运动。读者可以从本书了解到最遥远恒星的运动、流星的陨落以及人造卫星和宇宙火箭的飞行，这些都是遵守万有引力定律的。

最后，我们还要简略地谈谈引力的性质。

IV

目 录

导言

1 太阳、月亮、行星和恒星运动的古代概念·····	1
2 从哥白尼到开普勒的行星运动几何学·····	7
3 引力定律的发现·····	24
4 不同形状物体的引力·····	34
5 地球上物体之间引力的实验检测·····	40
6 牛顿定律——天体运动的理论基础·····	43
7 天体运动与两体问题·····	50
8 受摄运动的概念、天体力学与实用天文学·····	56
9 描述受摄运动的方法 变化的轨道·····	60
10 太阳系里的运动问题 ·····	62
11 天体运动理论中的逐步逼近法 ·····	67
12 海王星的发现 ·····	76
13 周期摄动和长期摄动 ·····	78
14 天体力学的数值方法 ·····	86
15 卫星的理论 ·····	88
16 太阳系的人造天体 ·····	92
17 人造地球卫星的无摄动运动·····	97
18 人造地球卫星的摄动运动 ·····	108
19 人造天体在行星际空间的运动 ·····	126
20 小行星的运动 ·····	145
21 行星的自转 ·····	148
22 天体力学的定性问题 ·····	161
23 恒星的运动与引力定律 ·····	171

24 万有引力是什么	176
附录	184
译后记	201

1、太阳、月亮、行星和恒星

运动的古代概念

很久、很久以前，人们已开始研究天体的运动。许多世纪以前，古人就观测天体在天空中的位置与运动，并且追求这些运动的规律，鼓励他们从事这一研究的动力，主要是实际的需要。只有通过观测天体，人们才能知道自己在海洋或沙漠中的位置，才能测定时间和预知一年四季，农业和商务以及游牧民族的迁徙，全都需要观测恒星。就是这些迫切的实际需要才产生了天文学。

天体在天穹上的视运动，在远古时代已经为众所周知了。

黑夜里人们注视布满繁星的天空，便会得到这样一个印象：上面是一个圆顶形的天球，围绕着地球旋转，每24小时一周。天穹的周日旋转，日复一日作有规律地重演，而没有什么显著的变化。

天上的恒星相对位置好象是固定不变。因此它们被称为“恒星”。许多年代以前天文学家们已经描绘出不同星座以及整个星空的天穹图。

一切天体无例外地都参与围绕地球的周日旋转。如果一个给定的天体在星星之间保持相对位置不变，它就被叫做恒星。反之还有另外一类天体除参加周日运动外，而且还横越恒星而运动，这便不是恒星。

自古以来人们就知道有七个天体，在恒星间运动的，它们叫做行星(planet这个字在希腊文里的意义是“流浪者”)。不过这里要指出两类：首先，它们之中包括五个比一般恒星明亮得多的天体，就是水星、金星、火星、木星和土星。其次，古代人们认为行星里还包括太阳和月亮，因为它们也在恒星间运动。

最容易引起人们注意的是月亮的运动，因为它比别的天体运行更快。月亮在天空上由西向东运行一周的时间只有27·3日（即每日行12至13度，或大约每小时半度）。只要连续两个夜晚，人们便可看出它在恒星间改变了位置。观测发现，月亮穿越天空的运动不是等速的，在某些区域快些，某些区域慢些。

我们不能直接观测太阳在恒星间的运动，因为白天不能看见恒星；但是太阳的运动可以通过对恒星的观测来测定。在日落后注意西方天空上某一颗恒星，并确定它的位置；这样连续几天在同一时刻观测，你便会发现，这颗星的位置不断向下移动，逐渐接近太阳。以后几天内，它便完全消逝在地平线下了，它原来的位置被另外一颗位于西天的恒星所代替。这颗星也将逐渐和太阳接近，象前一颗星那样消逝了。这说明太阳相对于恒星的位置在不断地改变。从古代开始，人们便对恒星在天球上的位置作每日的观测。这些观测使人们相当精确地了解太阳横越天穹的轨迹，于是发现太阳在恒星间由西向东运行（月亮也一样），太阳每 $365\frac{1}{4}$ 日（即一年）运行一周。太阳在恒星间的周年轨迹年复一年保持稳恒，这个轨迹叫做黄道，每天太阳在黄道上运行大约一度（即一年内约365度）。太阳的运动也和月亮运动相似，不

是均匀的，在冬季比在夏季运行较快。例如6月1日至6月30日它走了 $27^{\circ}.5$ ，但在12月1日至30日内却走了 $29^{\circ}.5$ 。

行星视运动的图象更加复杂。诸行星有一个共同的特征便是：它们常在黄道附近运动。行星分为两群，即内行星与外行星。^①

第一群里有水星和金星，第二群里便是所有另外那几颗行星。内行星的特征是它们在太阳周围绕其平均位置摆动，起初内行星在恒星间比太阳运行快，而超过了它，在达到太阳的东面最远之点后，开始比太阳运行慢些，太阳便赶上了它。在西边落后于太阳一段距离后，内行星又开始运动得比太阳快，这样周而复始地重演下去。例如金星离开太阳的最大距离约为 40° ，水星平均约为 23° （在 18° 与 28° 之间变化）。因此内行星只在早晨日出前不久在东方和日落后不久在西方才看得见。

水星围绕太阳的视摆动周期约为116日，而金星则为1年又217日。

外行星在天空上描绘出特殊的环圈。

行星在恒星间的运动与太阳和月亮一样，一般是由西向东（称为**顺行**）。可是，有时行星视运动的速率减小。以致停止不动（**留**），然后掉转方向由东向西运动（**逆行**）。每个行星自逆行复返于顺行有一定的周期。结果使行星在天空中描绘出特殊形状的环圈（图1）。火星每780日，木星399日，土星378日，各描绘一圈。

① 古代人将这两群行星叫做下行星与上行星。他们认为行星都围绕作为宇宙中心的地球运动。由于水星和金星比太阳更接近地球，因此称为下（低）行星；其它行星比太阳更远，因此称为上（高）行星。

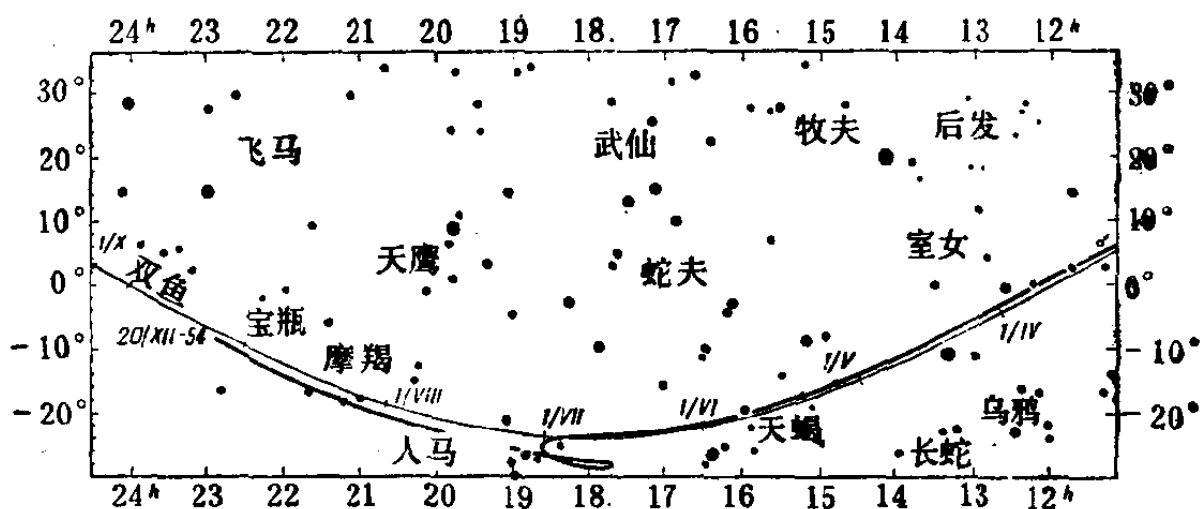


图1 1953年10月10日至1954年12月20日期间，火星的视行径，
和同年3月至10月间太阳的视行径（黄道）

这些便是从地球上看到恒星和行星在天空上的视运动。但是恒星、太阳、月亮和行星在空间里的真实运动究竟是怎样的呢？

最早试图解释观测得来的天体运动，建立起天体运动理论，以预言某个天体在一定时刻在天穹上位置的是古希腊的学者。他们的出发点，是将地球看做是不动的中心，太阳、月亮、行星和恒星都围绕它运行。

古希腊人对比了“天”与“地”的现象，认为支配“天”与“地”的规律是大不相同的。天体永恒的循环运动，在他们眼里是最完美的典范，而且由于他们认为匀速圆运动是最完美的运动，因此月亮、太阳和行星应确切无疑地作等速圆运动。可是这些天体的视运动都不是匀速运动。太阳和月亮的速率都不是均匀的，而行星还在描绘复杂的环圈。于是古代希腊天文学面临这样一个问题：在匀速圆运动的基础上去解释行星的视运动。

天体运动较精细的理论为公元二世纪时古希腊天文学家托勒玫 (Claudius Ptolemy) 所发展。他假设太阳、月亮和行星都在所谓本轮的圆周上作匀速运动，同时每个本轮的中心又在较大的圆周 (均轮) 上作匀速运动；不动的地球位于在均轮的中心 (图2)。在图中，行星在本轮上运动的速率 V_1 大于本轮中心在均轮上的运动速率 V_0 。行星P与本轮中心在同一方向上运动的一段时间内，地上的观测者E所看见的是顺行。但是如果在本轮中心与地球之间运动时，那么行星的运动与本轮中心的运动“抵消”一部分，注意 $V_1 > V_0$ ，于是从地球看去，行星便在作逆行运动。

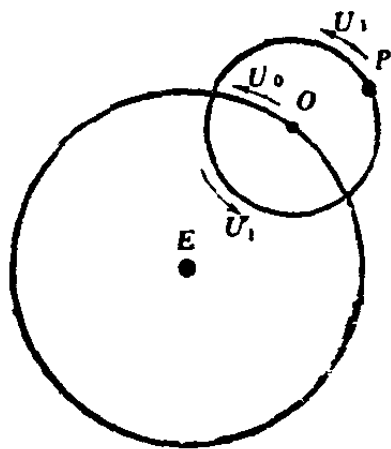


图2 本轮与均轮速度 V_1 大于 V_0

由于为太阳、月亮和每个行星选择适当的均轮和本轮的半径之比，本轮和均轮的轨道周期，以及均轮和本轮的平面的交角等要素，托勒玫不但解释了这些天体穿越天空的非均匀的视运动和行星的逆行，而且还相当准确地计算出行星、太阳和月亮穿越天空的轨迹。

托勒玫体系，以及就一般地说，若将地球看成静止的天体的学说，从2世纪至16世纪中叶盛行了十四个世纪，可是在托勒玫以前，古希腊学者如菲洛劳斯 (Philolaus, 公元前五世纪) 和萨莫斯的阿里斯塔恰斯 (Aristarchus, 公元前三世纪) 以及其它人，却曾提出过地球在空间运动，此外还绕本身的轴旋转的见解，按他们的理论，人们所看到的天球和所有恒星的周日旋转，只是地球自转的表观现象。但是这些思想家未能提出精密的计算方法，以预测行星在天球上的位置，从

而满足天文学的实际需要，因而他们光辉的臆想并没有得到普遍的接受。

托勒玫体系的长期流行，当然不仅是由于当时的科学水平低。问题是以地球在中心的宇宙适合于宗教的理想。根据宗教的教义既然人是“上帝的最高成就”那么人所居住的地球自然应当位于宇宙的中心。这样托勒玫的宇宙论就为宗教服务。当然僧侣们要对主张无神论的萨莫斯的阿里斯塔恰斯的地球运动学说进行攻击，正如18世纪基督教教士们猛烈攻击哥白尼体系一样。

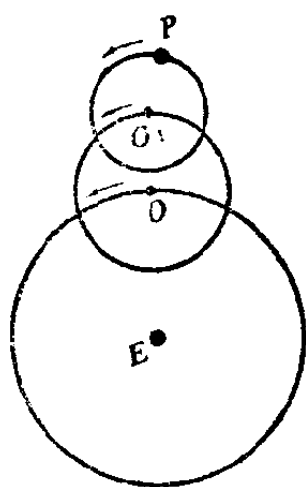


图 3 一个复杂的
本轮体系

但是托勒玫体系终于走进了死胡同，因为随着新的观测数据的积累就检验出托勒玫理论预测的行星位置与实测之间的更多不符合。为了消除这些偏离，就假设每个行星的运动不只由一个本轮，而是由一系列本轮来描述（图3）。行星运动上每次发现一个新的不规则性便要增加愈来愈多的本轮去消除它。然而理论与观测总是不能符合。

一方面这种复杂的本轮体系极端不便，显然是人为的，另一方面理论与观测总是不能符合，终于使人怀疑其真实性。天文学家终于不再设法增加本轮来“改进”托勒玫体系，而索性把它扔掉。16世纪伟大的波兰天文学家哥白尼(Nicolaus Copernicus, 1473~1543)首先提出了地球和行星都围绕太阳运动比较完满的理论。实际上这是人们认识天体在空间里真实运动的起点。

2、从哥白尼到开普勒的 行星运动几何学

认为地球是静止的主张统治了许多代人的思想，哥白尼首先扔掉了这个武断的主张。根据他的理论，地球和其它行星一样，在围绕太阳运动，同时它还绕一条被人叫做地轴的设想的直线自转。哥白尼正确地解释了恒星及其它天体在天球上的周日运动，认为这不是它们的天体运动，而是地球自转造成的现象。地球约24小时自转一周，地面上的人并不感觉到有什么运动；看见的似乎是天球带着依附在它上面的太阳、恒星和行星在旋转。

根据哥白尼体系，太阳的周年轨迹不过是地球围绕太阳在空间里运动所造成的视运动。地球围绕太阳运动，地面上的人看见太阳在比太阳遥远得多的恒星构成的背景上移动。这便是在我们眼里太阳好象是在恒星间运动的原因。

哥白尼说明，行星视运动的主要特征可以用这样一个事实来解释：行星（包括地球在内）沿相同的方向，但在不同的距离处，以一定的周期一起围绕太阳运动。

根据观测事实推断，哥白尼得出结论，所有行星和地球绕太阳运动大致在同一平面内。这解释了为什么从地球看行星的轨迹都接近黄道。既然水星和金星好象是在太阳两侧摆动，那么它们在空间的路径（用天文学的术语来说就是它们的轨道），比地球的轨道更接近太阳，因为金星对太阳的视偏离角度比水星对太阳的视偏离要大，所以金星比水星离太阳远。

其他行星与地球相比，是在更大的距离上绕太阳运动。

和地球最接近的是火星（这是很明显的，因为它在恒星间运动最快），接着依次是木星和土星。

至于行星轨道的形状和行星运动的类型，哥白尼认为，所有的行星都是在作近似匀速的圆运动，不过在匀速圆运动上迭加一些附加的摆动。更确切地说，哥白尼认为，在圆周上作等速运动的不是行星本身，而是行星在其上面运行的本轮或本轮系的中心。行星在本轮上运动，表征着它对围绕太阳的匀速圆周运动的偏离。

哥白尼是描绘出正确的太阳系图象的第一位天文学家（图4）。他确定了行星与太阳间的相对距离（以日-地间的距离为单位）以及它们围绕太阳运行的周期。以下略述他的计算方法。

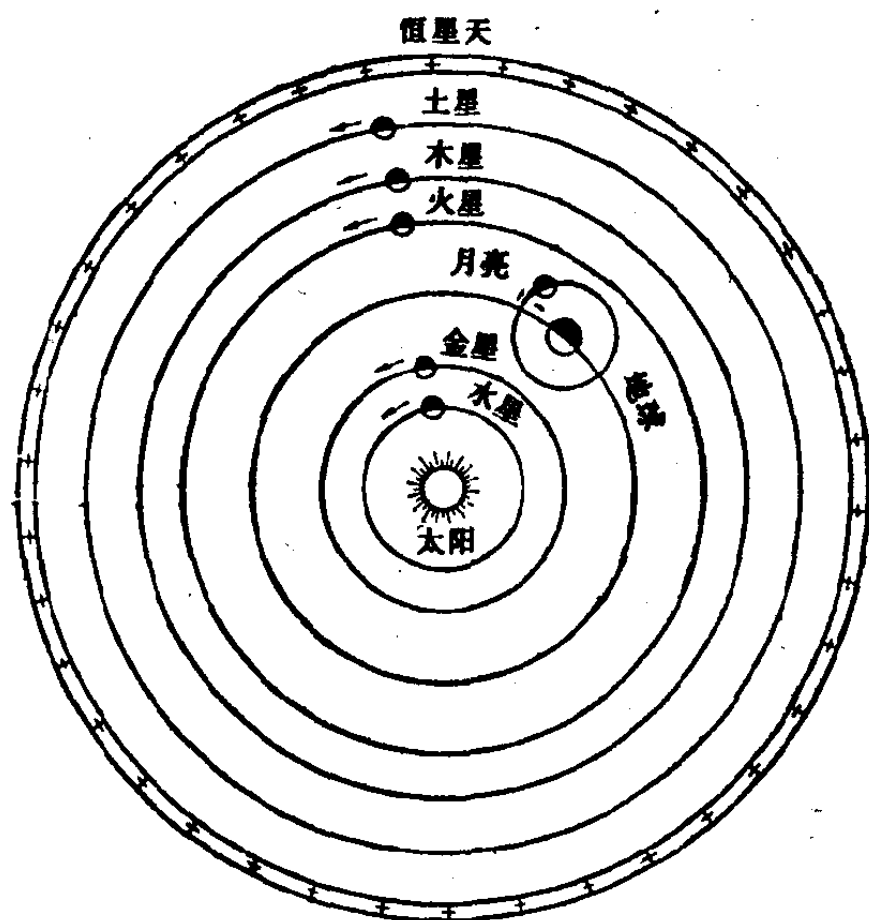


图 4 哥白尼体系

试以比地球更接近太阳的水星为例来讨论。图5的内外两圆分别表示水星和地球的轨道，箭头表示运动的方向。由图可见，从地球看，水星应当在太阳附近摆动。E₁和M₁分别表示水星在西大距时地球和水星的位置。那时水星-太阳间的角距离^①平均大约是23°（哥白尼借助于本轮说明这角距离在18°至28°之间摆动）。

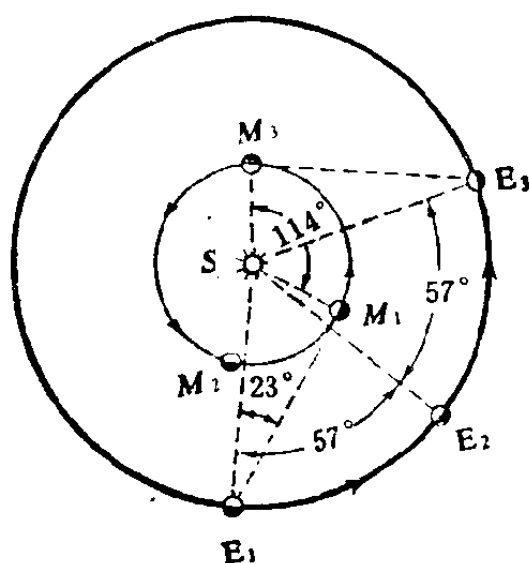


图5 决定水星-太阳间的距离和它绕太阳运行的周期

因为SE₁M₁三角形是直角三角形，所以由三角学得：

$$\frac{SM_1}{SE_1} = \sin 23^\circ \doteq 0.39$$

可见水星-太阳间的平均距离等于地球-太阳间的距离的39%。

前面曾经指出，水星围绕太阳视摆动的周期约116日。这意味着西大距以后58日水星-太阳间的角距离又出现一次极大值，但是在东方。可是地球与水星都将处在它们轨道上的其它位置，以E₂和M₂表示。E₁E₂弧的长度容易求得，因为已知地球绕太阳运行的周期为365.25日。在58日内地球在它的轨道上约运行全周的0.159，即相当于57°的弧。再经过58日，水星又到了西大距，我们以M₃和E₃分别表水星和地球那时的位置。这样在116日内地球走过的E₁E₃弧，长度为

① 从观测者的眼睛引向两个天体的直线之间的夹角叫做角距离。

$57^{\circ} + 57^{\circ} = 114^{\circ}$ 。在这段时间内，水星绕太阳走了一周多，因此它的视运动周期并不与它的轨道周期相合。但后者是容易计算的。

由图5可见， SE_1M_1 三角形的一边 SE_1 转过 114° 而到 SE_3 的位置，同时引线 SM_1 也转过了 114° 到 SM_3 ，即 $\angle M_1SM_3 = 114^{\circ}$ 。因此在116日内水星围绕太阳运动了一周加 114° ，即 474° 的弧。水星的轨道周期，即在轨道上运行一周(360°)所需要的时间，可从下列比例求得：

$$\frac{T}{116} = \frac{360^{\circ}}{474^{\circ}}$$

所以 $T = \frac{360 \times 116}{474} \div 88(\text{日})$ 。

同样，我们可以算出金星-太阳间的距离和金星轨道周期。金星的轨道周期是225日，而它对于太阳的平均距离为地一日间的距离的0.72（即72%）。

至于外行星的周期和它们与太阳的距离，可以用不同的方法确定。

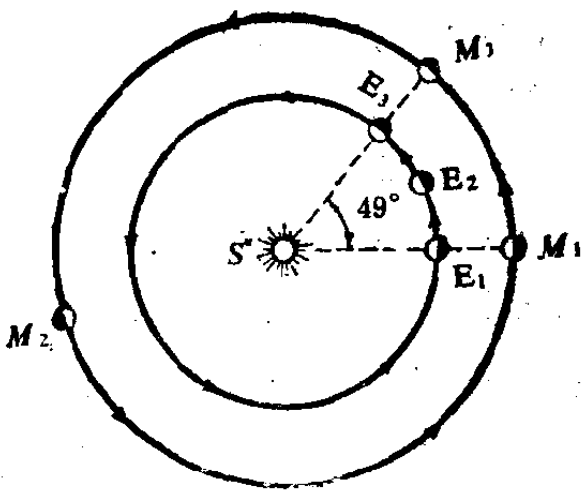


图 6 决定火星的公转周期

例如火星。在图6里，内外两圆分别表示地球和火星的轨道。设以 E_1 和 M_1 分别表示火星和太阳在一直线上地球两侧时，地球和火星的位置(这种组态叫做冲)。由观测得知每780日火星冲日一次。冲后390日地球来到 E_2 ，火星将与太阳 S 在一条直线上，并在地球的同侧（这组态叫做合）。再过了