物理

第四册

〔美〕U. 哈伯-沙姆等 著

科学出版社

物　　　理

（第四册）

〔美〕U. 哈伯-沙姆等 著
《PSSC物理》翻译组 译
喀兴林 校

科 学 出 版 社
1 9 8 0

内 容 简 介

本书原为美国物理教学研究会组织编写的中学物理教材«PSSC 物理»一书的补篇部分，原名为«高等课题补充教材»。中译本编为«物理»第四册出版。本册包括四个独立内容：角动量、统计物理、狭义相对论和量子物理。本册所用数学也略深一些，要求读者具有自然对数和一些初等微积分的知识。

本书可供中学师生和具有中等文化水平的读者阅读。

U. Haber-Schaim, J. B. Cross,
J. H. Dodge, J. A. Walter

PSSC PHYSICS

Advanced Topics Supplement

D. C. Heath, 1972, 3rd. ed.

物　　理

（第 四 册）

〔美〕U. 哈伯-沙姆等 著

«PSSC物理»翻译组 译

喀兴林 校

*

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行　各地新华书店经售

*

1980 年 9 月第 一 版　开本：787×1092 1/32

1980 年 9 月第一次印刷　印张：8 7/8

印数：0001—71,600　字数：201,000

统一书号：13031・1325

本社书号：1843・13—3

定价：0.72 元

中译本前言

本书是美国物理教学研究会(简称 PSSC)为改革美国中学物理课程而组织编写的中学物理教材《物理》(PSSC 物理)一书的补篇部份,原名为《高等课题补充教材》,中译本编为《物理》第四册出版,以示和其他各册的联系.本书介绍物理学的一些高等课题,包括角动量(第一章)、统计力学(第二、第三章)、狭义相对论(第四、第五章)和量子物理学(第六、第七章).作者编写本书的原则和精神与《物理》其他各册完全相同,但所用的数学工具略深一些,要求读者具有自然对数和一些初等微积分的知识.本书可作为进一步学习的材料.

本书四个课题独立成篇,可以分开单独学习.但和《物理》第二、第三册的有关内容有一定联系,可以配合学习.例如,本书第一章"角动量",可以放在第二册第十六章"势能"后学习.本书第二章"不可逆过程"和第三章"熵"可以放在第二册第十七章"热、分子运动和能量守恒"后学习.本书第四章"速率、能量和质量"与第五章"速率、时间和长度",可以放在第三册第二十五章"光子"后学习.本书第六章"原子、分子和原子核"与第七章"原子的变化和原子核的变化",可以放在第三册第二十七章"物质波"后学习.

本书所讲的内容在中学课程中一般是不讲授的.但作者在这里采用浅显易懂的语言,使读者不需要多少数学知识,就能够了解这些高等课题的基础知识,这是本书的一个特点.本书可以作为《物理》前三册的补充,可供读者进一步学习之用.

本书由《PSSC 物理》翻译组译出,留润州、王喜山同志协助审阅,喀兴林同志校订.译文不当之处,请读者批评指正.

目　　录

中译本前言
第一章　角动量和角动量守恒…………………………… 1
1.1　等面积定律 ………………………………………… 1
1.2　角动量 ……………………………………………… 4
1.3　能量、角动量和轨道 ……………………………… 5
1.4　一个特殊情况——卫星的运动 …………………… 7
1.5　角动量是矢量吗? ………………………………… 10
1.6　相互作用的物体的角动量守恒 …………………… 13
1.7　刚体的转动 ………………………………………… 16
1.8　刚体的角动量；转动惯量 ………………………… 18
1.9　力矩——角动量的变化率 ………………………… 24
1.10　轨道角动量和自旋 ……………………………… 27
1.11　角动量守恒的普遍性 …………………………… 33
第二章　不可逆过程……………………………………46
2.1　几个事例 …………………………………………… 46
2.2　弹珠试验 …………………………………………… 47
2.3　弹珠试验的定性解释 ……………………………… 51
2.4　关于几率的几个基本概念 ………………………… 52
2.5　状态和分布 ………………………………………… 54
2.6　最可能的分布 ……………………………………… 57
2.7　气体的自由膨胀 …………………………………… 64
2.8　定量讨论 …………………………………………… 67
2.9　密度起伏 …………………………………………… 69
2.10　非弹性碰撞和热传导 …………………………… 70
第三章　熵………………………………………………79

3.1 宏观状态 …………………………………………… 79
3.2 可逆过程 …………………………………………… 80
3.3 气体振荡器 …………………………………………… 82
3.4 绝热过程和等温过程 …………………………………… 89
3.5 理想气体的自由膨胀和等温膨胀 ……………………… 91
3.6 熵 …………………………………………… 95
3.7 真实热池 …………………………………………… 97
3.8 非弹性碰撞中熵的变化 ……………………………… 97
3.9 等容热传导引起的熵变化 …………………………… 99
3.10 体积和温度都有变化时理想气体的熵 ……………… 101
3.11 扩散；理想气体的熵 ……………………………… 103
3.12 热力学第二定律 …………………………………… 106
第四章 速率、能量和质量…………………………… 113
4.1 极限速率 …………………………………………… 113
4.2 速率和动能 …………………………………………… 116
4.3 动量 …………………………………………… 122
4.4 光子的动量；光压 …………………………………… 125
4.5 康普顿散射 …………………………………………… 128
4.6 电子与正电子的湮没 ………………………………… 132
4.7 核反应；总能守恒 …………………………………… 135
4.8 质量和能量 …………………………………………… 138
4.9 关于光子质量 …………………………………………… 141
第五章 速率、时间和长度…………………………… 153
5.1 光的速率：一个普适恒量 …………………………… 153
5.2 菲索实验 …………………………………………… 154
5.3 相对论的速度合成 …………………………………… 156
5.4 实验验证 …………………………………………… 158
5.5 对于不同观测者的时间；同时性 …………………… 159
5.6 时间和长度的近似变换 ……………………………… 163
5.7 洛伦兹变换 …………………………………………… 166
5.8 时间延迟 …………………………………………… 167

5.9 用μ介子作实验 …… 170
5.10 运动物体的长度 …… 175
5.11 迈克尔孙-莫雷实验：历史的评述 …… 176
本章附录 关于孪生兄弟的佯谬 …… 181
第六章 原子、分子和原子核 …… 190
6.1 氢原子：能级和大小 …… 190
6.2 氦离子和氦原子 …… 192
6.3 锂原子 …… 195
6.4 吸收光谱 …… 199
6.5 电离能 …… 203
6.6 原子的大小 …… 205
6.7 电子壳层 …… 207
6.8 泡利原理 …… 208
6.9 泡利原理和"箱"的粒子 …… 209
6.10 化学键结合 …… 211
6.11 氘核 …… 213
6.12 核力 …… 215
6.13 复杂核 …… 216
第七章 原子的变化和原子核的变化 …… 228
7.1 能量守恒 …… 228
7.2 动量守恒和角动量守恒 …… 231
7.3 其它守恒定律 …… 232
7.4 裂变 …… 233
7.5 进一步研究α衰变 …… 235
7.6 经典波动模型；寿命和势垒穿透 …… 239
7.7 α衰变和势垒的穿透 …… 243
7.8 寿命和能量分散 …… 245
7.9 光子的散射 …… 248
本章附录 漏泄对于能级锐度的影响，一个模拟演示 …… 250
附录一 带†号习题的解答 …… 258
附录二 带*号习题的答案 …… 271

第一章　角动量和角动量守恒

1.1　等面积定律

我们已经学过两个转动的例子：匀速圆周运动和行星绕日的椭圆运动．虽然作用在这两种运动物体上的力不同，但这些作用力却有一个共同性质，即都是**有心力**，就是说，每一作用力都指向空间一个定点．在上面两个例子中，定点分别是圆心和椭圆的一个焦点．已经发现，开普勒等面积定律在这两个例子里都是成立的．这就是说，从固定的力心到运动物体的位置矢量，在相等的时间间隔内扫过的面积相等．

图 1.1 示出悬挂在天花板上的一个棒形磁铁在另一个固定棒形磁铁的场中运动的两个例子．图 1.2 是装置的详图．如

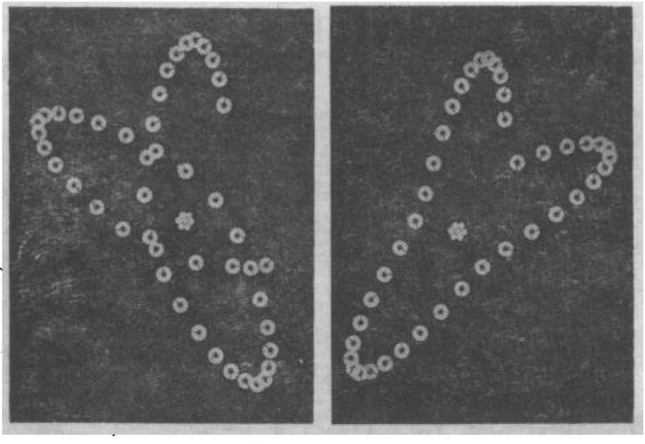

图 1.1　悬挂在天花板上的一个棒形磁铁在另一个固定磁铁的场中运动的两张闪光照片．详细装置见图 1.2．

果你在照片上进行必要的测量，就能确信等面积定律对这两个例子也是适用的.

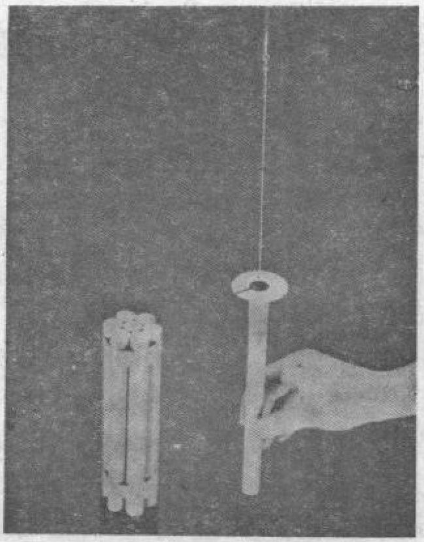

图 1.2　图 1.1 中所用的磁铁的特写照片.

你会很自然地想到，等面积定律在任何有心力作用下的一切运动都会成立. 确实是这样的. 我们能够证明,等面积

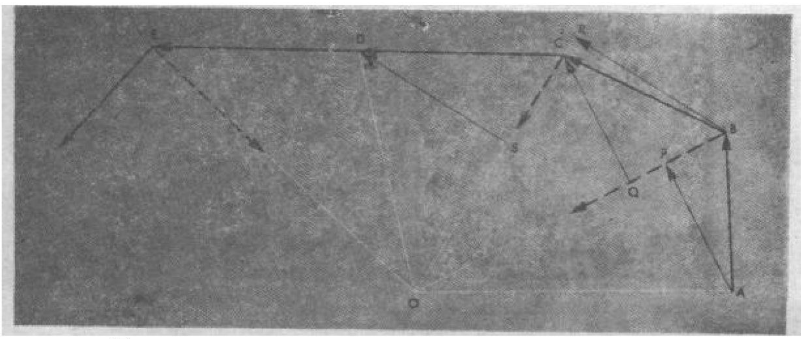

图 1.3　受到几个向心冲击力作用的物体的运动. 粗折线表示冲击力引起的速度变化. 在 D 点没有受到冲击力.

定律是直接从牛顿运动定律推出的．为了证明这一点，让我们首先考虑一个受到一系列持续时间极短的冲击力作用的物体的运动．设想一个运动物体，每隔例如一秒钟受到一次急剧的推动．每次推动都指向着一个固定的中心，但推动力的大小可以是任意的．

图 1.3 是在这样情况下物体所经历的一个可能轨道．物体从 A 出发，以匀速经单位时间移动到 B 点．它在 B 点受到向着 O 的力推动，从而以另一个匀速移动到 C 点．它在 C 点再次受到另一个向着 O 的推动力，使它移动到 D．因为每次冲击力都相隔相等的时间，所以我们可以选取一种特定的速度尺度，使得在适当单位制里矢量 $\overrightarrow{AB}$，$\overrightarrow{BC}$……能够直接表示物体的速度．图中用点线示出的矢量是在 B，C，… 各点冲击力所引起的速度改变 $\triangle\mathbf{v}$．

因为物体在 B 点受到冲击力是在 $\overrightarrow{BO}$ 方向，所以速度矢量 $\overrightarrow{AB}$ 垂直于 $\overrightarrow{BO}$ 的分量保持不变．即是冲击前矢量 $\overrightarrow{AB}$ 的分量 $\overrightarrow{AP}$ 与冲击后矢量 $\overrightarrow{BC}$ 的分量 $\overrightarrow{QC}$ 应相等．同理，在 C 点，冲击前速度矢量 $\overrightarrow{BC}$ 的分量 $\overrightarrow{BR}$ 应等于冲击后速度矢量分量 $\overrightarrow{SD}$．

位移矢量在单位时间内所扫过的面积，等于三角形 OAB，OBC，OCD，……的面积．我们首先研究三角形 OAB 和 OBC．它们有公共的底 OB，而且我们刚刚讲过它们的高 AP 和 QC 是相等的，所以二者的面积相等．再研究三角形 OBC 和 OCD，我们看出它们也有公共的底 OC 和相等的高 $BR = SD$，所以 $OCD = OBC = OAB$．同样的推理证明，以后的所有三角形都有相等的面积．因此，我们看到等面积定律成立．

上述证明中的关键步骤的根据是相继的冲击力都是有心力，即一切冲击力都指向 O 点．每秒钟冲击多少次，以及冲

击力多大都不关紧要．例如，在 B、C 和 D 各点的冲击力都不相等，而且在 D 的冲击力还是零．由于冲击力是有心力，使我们确信，速度矢量在垂直于向心连线方向上的分量是不变的．

现在，实际情况是物体在有心力的连续作用下沿着曲线路径运动．但是，我们总是能够用许多短直线段组成的路径来近似地表示这样路径，并对这种短直线构成的曲折路径应用我们的证明．使直线段越来越短（线段数目越来越多），曲折路径就会越来越接近真实路径，接近到我们所希望的程度．因此，我们证明了等面积定律对于在有心力作用下的一切运动都是成立的．

1.2 角 动 量

我们可以把等面积定律看作是伽利略惯性定律的推广．在任何（不平衡的）力都不出现时，一个物体的速度保持不变．在有心力出现时，物体的速度要改变，但从力心引出的位移矢量与速度的垂直分量的乘积却保持不变，即 $rv_\perp=$ 恒量（这恒量等于在单位时间内位移矢量所扫过的面积的两倍）．运动物体的质量既不出现于等面积定律中，也不出现于伽利略惯性定律中．

当我们描述物体的运动时，我们用象 v 和 $rv_\perp$ 这样的量．当我们想使运动与力相联系时，质量就成为一个重要的量了．我们引用过动量 $\mathbf{p}=m\mathbf{v}$，并且发现相互作用着的物体的动量之和守恒，虽然它们的速度之和并不守恒．同样地，我们引入一个量 $L=rp_\perp=mrv_\perp$，并称之为角动量[1]．我们不久就会了解在适当情况下，相互作用着的物体的角动量之和也是

1）角动量也称为动量矩，动量 $\mathbf{p}$ 有时称为线动量，用以同角动量相区别．我们以下简称 $\mathbf{p}$ 为动量．

保持恒定的，而各个 $rv_\perp$ 之和并不守恒(节 1.6)。

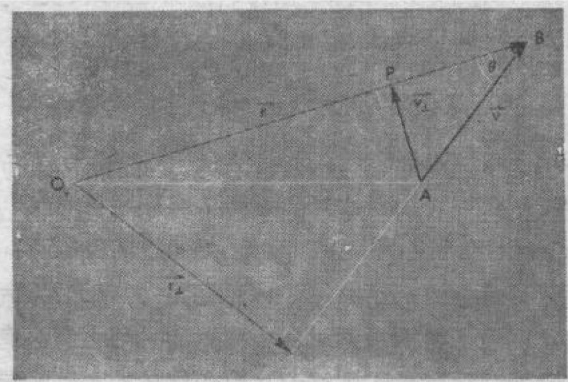

图 1.4 $rv_\perp = r_\perp v = rv\sin\theta = OAB$ 面积的两倍.

我们注意到图 1.4 里的乘积 $rv_\perp$ 等于乘积 $r_\perp v$，因为两个乘积都等于三角形 OAB 面积的两倍. 我们也能将这相等的乘积直接写作 $rv\sin\theta$. 我们利用这一点，按照我们的表示法，将 L 写成 $L = mrv_\perp = mr_\perp v = mrv\sin\theta$. 注意角动量的定义中含有从一个给定点量起的距离 r. 于是，甚至以匀速运动的单个物体，一般也会有不同的角动量，它取决于参考点的位置.

1.3 能量、角动量和轨道

在有心力场中运动的物体，轨道上各点的总能量(动能加势能)保持不变，相对于力心的角动量也保持不变. 那么，能量和角动量分别取不同值的物体应该有不同的轨道.

作为例子，我们研究 α 粒子在金原子核的场中的运动. 在金核附近，α 粒子是在有心斥力场中运动(见《物理》第三册，第二十四章). 当 α 粒子更靠近金核时，它的动能减小，势能增

大. α 粒子会怎样靠近金核呢？能量守恒原理告诉我们，当 α 粒子的原始动能（在远离核时所具有的）全部转变成势能时，它所处的位置离核最近，即满足

$$\frac{1}{2}mv^2_{\text{初始}} = U.$$

α 粒子在这个距离的地方将是静止的，因而没有角动量．角动量守恒又告诉我们，这样的 α 粒子开始运动时就应当是没有角动量的，即 $mrv_\perp = 0$．因为 $r \neq 0$，所以 $v_\perp = 0$，即 α 粒子是正对着金核运动的(图 1.5)．另一方面，若以同一速度运动的 α 粒子开始不是正对着金核运动，那么它必有一个角动量．设瞄准距离是 b，则这个 α 粒子绕核的角动量是

$$L = mrv_\perp = mvr_\perp = mv_{\text{初始}}b.$$

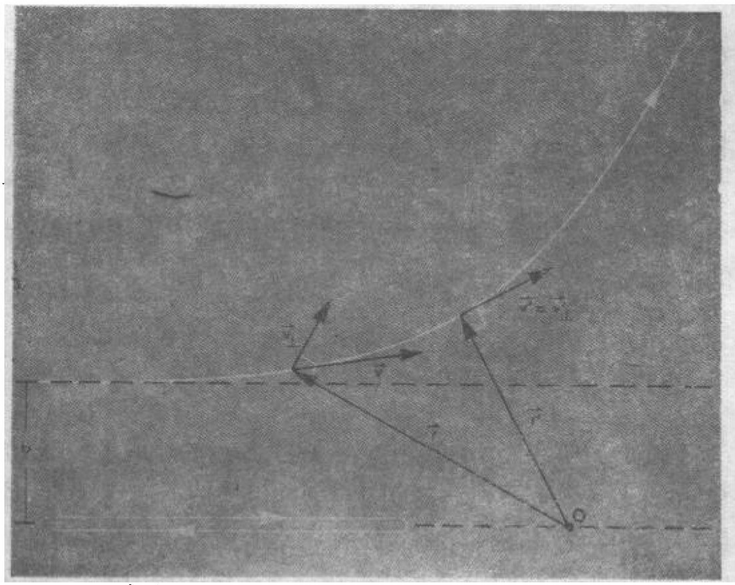

图 1.5　在位于 O 处的核附近 α 粒子的两条轨道（白色线所表示的）．在两种情况中，α 粒子的初始速度一样，但对下面的轨道来说，最靠近核的距离较短．

我们立刻看出，这个 α 粒子不能像前一个那样靠近核了，因为在最靠近核的 r' 距离处，α 粒子应有一个速度 $\mathbf{v}'$，才能使 $mr'v'_{\perp} = mv_{初始}b$。结果是这个 α 粒子总是会有些动能的，在斥力的情况下，这就是说 α 粒子决不会象没有角动量那样靠近核（图 1.5）。我们看出，沿相同方向、用相等动能向着同一个核靠近的两个 α 粒子，若它们相对于核有不同的角动量，则它们要有不同的轨道。

1.4 一个特殊情况——卫星的运动

上节我们定性地讨论了在有心力场中运动的物体的能量、角动量与轨道之间的关系。对于卫星的运动，我们能够详细地研究这个关系。在计算过程中，我们仅仅用引力的平方反比性质，因此我们的结论对于任何其他平方反比的力都能适用，具体讲，它也适用于电力。

象我们所知道的那样，地球卫星是在一个以地球为一焦点的椭圆轨道上运行。椭圆的定义是这样的动点 P 的轨迹，从

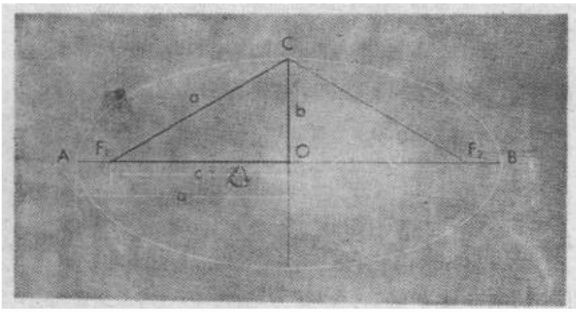

图 1.6 因为 A 在椭圆上，所以 $AF_1 + AF_2 = 2a$。从对称性得出 $AF_1 = F_2B$；因而 $AB = 2a$，于是半长轴等于 a。因为 C 也在椭圆上，所以 $CF_1 + CF_2 = 2a$。再从对称性得 $CF_1 = CF_2$，因而 $CF_1 = a$。又因为 OCF_1 是直角三角形，所以有 $b^2 = a^2 - c^2$。

动点 P 到二定点(称为焦点)的距离之和等于常量 $2a$(图1.6)。每个椭圆都可以用这个不变的长度与二焦点的间隔 $2c$ 来表征。一个椭圆也可以用半长轴 a 与半短轴 b 来描述。图 1.6 示出这两种描述法之间的关系。

a 和 b 怎样与卫星的总能 E 和角动量 L 相联系呢？让我们首先求出 E 和 L 相联系的方程。

我们将卫星速度 v 分解成平行于位置矢量的分量与垂直于它的分量：

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_r + \mathbf{v}_\perp$$

(图 1.7)。于是 $v^2 = v_r^2 + v_\perp^2$，而且我们可以将动能写成

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv_r^2 + \frac{1}{2}mv_\perp^2.$$

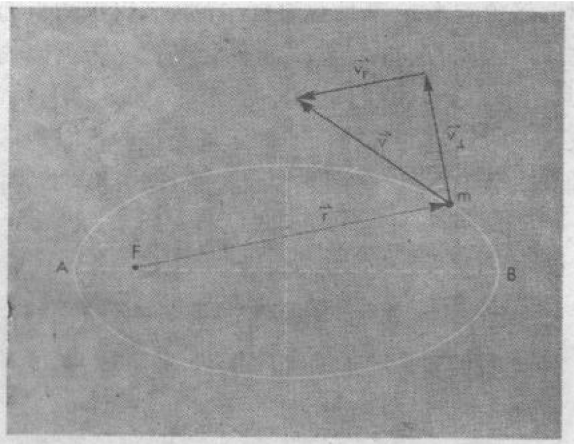

图 1.7 速度 $\mathbf{v}$ 分解成平行于 $\mathbf{r}$ 的分量 $\mathbf{v}_r$ 和垂直于 r 的分量 $\mathbf{v}_\perp$。

现在我们用角动量 L 表示 $v_\perp$：

$$v_\perp = \frac{L}{mr}.$$

将 $v_\perp$ 代入 E_k 的表示式中，

$$E_k = \frac{1}{2} m v_r^2 + \frac{1}{2} \frac{L^2}{m r^2},$$

于是总能化为

$$E = E_k + U_r = \frac{1}{2} m v_r^2 + \frac{1}{2} \frac{L^2}{m r^2} - G \frac{Mm}{r},$$

这里M和m分别是地球和卫星的质量，G是普适引力常数.这个能量表示式对于轨道上的所有点都成立．在离地球最远和最近的两点，$v_r = 0$．我们用r_0表示其距离．于是在这两点上E的表示式简化为

$$E = \frac{L^2}{2 m r_0^2} - G \frac{Mm}{r_0},$$

用$\frac{r_0^2}{E}$乘全式，得到r_0的一个二次方程

$$r_0^2 + \frac{GMm}{E} r_0 - \frac{L^2}{2mE} = 0.$$

按照图 1.6，我们知道这个方程的两个解是

$$r_0 = a + c, \quad r_0 = a - c$$

此外，二次方程的理论告诉我们，二解之和等于r_0的系数的负值，对于我们的情况，有

$$(a + c) + (a - c) = -\frac{GMm}{E}.$$

又，二解的乘积等于常数项

$$(a + c)(a - c) = \frac{-L^2}{2mE}.$$

从第一个方程得

$$2a = -\frac{GMm}{E}, \text{ 或 } a = -\frac{GMm}{2E},$$

利用a，c和半短轴b之间的关系（参考图 1.6），从第二个方程得

$$a^2 - c^2 = b^2 = \frac{-L^2}{2mE},$$

即
$$b = \frac{L}{\sqrt{-2mE}}.$$

因为卫星受到约束，所以总能 E 是负值．因此，我们是在求一个正量的平方根．（参阅《物理》第二册第十六章、节 16.6）

这两个方程指出了椭圆轨道是怎样取决于卫星的能量和角动量的．需要注意，椭圆的半长轴只取决于能量．在我们发射卫星时，椭圆轨道的长轴只决定于卫星脱离运载器的位置以及在脱离时刻的速率，而与卫星的运动方向无关．

另一方面，半短轴将取决于脱离时刻卫星的运动方向．因为 $L = mrv\sin\theta$，并且在能量一定的情况下 b 与 L 成正比，所以当速度垂直于位置矢量时，b 将取最大值．

卫星离地球最近的距离是

$$r_{最小} = a - c = a - \sqrt{a^2 - b^2}.$$

若 b 很小，开方根项接近于 a，于是 $r_{最小}$ 也很小．在这种情况下，椭圆是很扁的，它的两个焦点非常靠近长轴的两端．对于适当的能量值，b 所能够得到的最大值可以是 a．于是 $r_{最小} = a$，椭圆就化为圆，椭圆的两个焦点与圆心重合．因为 b 与 L 成比例，所以我们得出：在已知能量情况下，圆形轨道时有最大的角动量．

1.5 角动量是矢量吗？

前节我们已经学过，用卫星的能量和角动量能够决定卫星椭圆轨道的形状，但只有形状并不能完全确定轨道．椭圆位于一个平面内，但能量和 $rp_{\perp}$ 这两个量并不能告诉我们这