[美] D. Halliday
R. Resnick 著

《物理学》第二卷 第二册

习题解答

南京工学院物理教研组
《物理学》习题解答编写组

1981.7

本习题解答工作由恽瑛、颜兴滂、朱君哲、宋玉亭等同志负责，参加本册解题工作的同志有：

解题：冯珞玗、陈小凤、凌甘宁

校对：颜兴滂

绘图：叶善专

目　　录

第四十二章　光的本性与传播

1．（a）在多大的波长处，眼睛的灵敏度为其最大值之半？（b）眼睛最敏感的光的频率与周期各为何？

［**解**］（a）由课文中图 42—1 看出，波长约为 510 纳米和 610 纳米处，眼睛的灵敏度为其最大值之半。（b）最敏感的波长$\lambda=556$纳米。故最敏感的频率为

$$\nu=\frac{C}{\lambda}=\frac{3\times10^{8}}{556\times10^{-9}}=5.40\times10^{14}\text{赫兹}$$

相应的最敏感的周期为

$$T=\frac{1}{\nu}=1.85\times10^{-15}\ \text{秒}$$

2．从太阳射到地球的辐射的强度为1400瓦/米^2，假设地球象一个与太阳光线成正交的平圆板，并且所有入射到地球的能量都被地球吸收。试计算由于辐射压力而作用在地球上的力，并将此力与太阳的万有引力相比较。

［**解**］已知太阳射到地球的辐射强度$S=1400$瓦/米^2，辐射能量全部被地球吸收时，地球受的辐射压力为

$$F_{\text{辐}}=\frac{P}{\Delta t}=\frac{u}{C\Delta t}=\frac{S\cdot\pi R^2\Delta t}{C\Delta t}=\frac{S\cdot\pi R^2}{C}$$

$$=\frac{1400\times3.14\times(6.37\times10^{6})^2}{3\times10^{8}}=5.96\times10^{8}\ \text{牛顿}$$

太阳与地球的万有引力为

$$F_{\text{引}}=G\frac{M_SM_E}{r^2}=6.67\times10^{-11}$$

$$\times\frac{598\times10^{22}\times2\times10^{30}}{(1.5\times10^{8}\times10^{3})^{2}}=3.53\times10^{22}\text{牛顿}$$

而

$$\frac{F_{辐}}{F_{引}}=\frac{5.96\times10^{8}}{3.53\times10^{22}}\doteq1.7\times10^{-14}$$

可见光压是非常小的。

3. 离 500 瓦灯泡 1.0 米远的地方，辐射压力有多大？假定受到压力的这个表面正对着灯泡，而且是完全吸收的表面，而灯泡是向所有各个方向均匀辐射的。

［**解**］ 离光源 r 处的辐射强度 $S=\frac{500}{4\pi r^{2}}$，则在离光源 1 米处，光照面积 A 上的总压力

$$F=\frac{500}{4\pi C}\times A$$

单位面积上的辐射压力为

$$\frac{F}{A}=\frac{500}{4\pi\times3\times10^{8}}=1.32\times10^{-7}\text{牛顿/米}^{2}$$

4. 试证：对垂直入射到平表面上的平面波来说，作用在这个表面上的辐射压力与这表面外边波束中的能量密度相等，不论入射能量有多大一部分被反射，这个关系都成立。

［**解**］ 设入射光的能量密度为 w，则全吸收时的光压

$$\frac{F}{A}=\frac{P}{A\Delta t}=\frac{U}{AC\Delta t}=\frac{w\cdot A\cdot C\cdot\Delta t}{A\cdot C\cdot\Delta t}=w$$

而全反射时的光压则为

$$\frac{F}{A}=\frac{2P}{A\Delta t}=2w$$

当反射面的反射系数为 $\rho(0<\rho<1)$ 时，则反射的波束的能量密度为 ρw，吸收波束的能量密度为 $(1-\rho)w$，这时总光压为

$$\frac{F}{A}=2\rho w+(1-\rho)w=(1+\rho)w$$

而$(1+\rho)w$正为此时平表面外波束的能量密度，即得证。

5. 试证：对垂直射到平表面上的子弹流来说，假定子弹完全被这表面“吸收”，则这种子弹流的“压力”等于该表面外子弹流的能量（动能）密度的二倍。请将子弹流的情形与课文中习题 4 中光的情形相比较。

［**解**］ 一个子弹的动能

$$E_K=\frac{1}{2}mv^2$$

而相应的动量

$$P=mv=\frac{2E_K}{v}$$

若子弹完全被平表面“吸收”，则平表面受的冲力

$$F=P/\Delta t$$

设子弹的平均速率为 $\overline{v}$，n 个子弹的总动量

$$P_{总}=nm\overline{v}$$

相应的总能量为

$$(E_K)_{总}=\frac{1}{2}nm\overline{v}^2$$

于是，平表面上单位面积受的力为

$$\frac{F}{A}=\frac{nm\overline{v}}{A\Delta t}=\frac{2nm\overline{v}^2}{2A\Delta t\overline{v}}=2\frac{(E_K)_{总}}{V}=2w$$

即证得子弹流的“压力”等于该表面外子弹流能量密度的二倍。与前一习题比较，光压却等于表面外光波的能量密度，说明机械运动与辐射的情形不同。

6. 证明对于平行光束完全吸收的物体其表面上的辐射压强由 $P=S/C$ 给出。式中 S 是坡印廷矢量的大小，C 是真空中

的光速。

［**解**］ 坡印廷矢量S的大小为单位时间内通过单位面积上波的能量。所以，对于平行光束，完全吸收的物体表面受的压力为

$$P=\frac{F}{A}=\frac{1}{A\Delta t}\cdot\frac{U}{C}=\frac{S\cdot A\cdot\Delta t}{CA\Delta t}=\frac{S}{C}$$

即得证。

上式中U为Δt时间内所吸收的能量，$\frac{U}{C}$则为平行光束给予物体的动量。

7． 有人提议在宇宙飞船上安装一个由铝箔作成的大帆，利用大帆受的辐射压力的推进作用，使宇宙飞船在太阳系中航行。如果辐射力的大小等于太阳引力，这帆必须要多大？假设船与帆的质量共有1500千克，帆是完全反射的，且帆取向于与太阳光垂直。太阳质量为1.97×10^{30}千克（附：美国国家航空和航天管理局计划建立一个“宇宙飞船”，在1986年，当哈莱慧星下一次进入太阳系内时截住它。基本的设计是用聚合物薄膜，膜上涂有几个原子厚的铝膜，帆的面积有100英亩，空间飞船装有能自动检测的仪器。）

［**解**］ 太阳对飞船的引力为

$$F_{引}=G\frac{mM}{r^2}$$

太阳辐射对飞船上帆的压力为

$$F_{辐}=2\frac{SA\Delta t}{C\cdot\Delta t}=\frac{2SA}{C}$$

当引力与辐射力相等时

$$G\frac{mM}{r^2}=\frac{2SA}{C}$$

则帆的面积

$$A=\frac{GmMC}{2r^2S}$$

$$=\frac{6.67\times10^{11}\times1.5\times10^3\times1.97\times10^{30}\times3\times10^8}{(1.5\times10^8\times10^3)^2\times2\times1400}$$

$$=9.4\times10^5\ 米^2$$

8. 在太阳系内的一粒子处在太阳的引力和由于太阳的光线所引起的辐射力的联合作用下，假定粒子是一个密度为1.0克/厘米^{3}的球体，所有入射光都被吸收。(a)证明所有其半径小于某个临界半径 R_0 的粒子都将被吹出太阳系(b)计算 R_0 (c)R_0 是否依赖于地球到太阳的距离？

[**解**] (a) 设粒子半径为R，则粒子质量

$$m=\rho V=\frac{4}{3}\pi R^3\cdot\rho$$

太阳对粒子的引力

$$F_{引}=G\frac{mM}{r^2}=G\frac{4\pi R^3\rho M}{3r^2}$$

太阳光线对粒子的辐射推力

$$F_{辐}=\frac{S\pi R^2}{C}$$

当 $F_{辐}>F_{引}$ 时粒子即被吹出太阳系，则有

$$\frac{S\pi R^2}{C}>G\frac{4\pi R^3M\rho}{3r^2}$$

故 $$R<\frac{3r^2}{4G\rho M}\cdot\frac{S}{C}=R_0$$

R_0 为临界半径，即 $R<R_0$ 时粒子被吹出太阳系。

(b)

$$R_0=\frac{3r^2S}{4CG\rho M}$$

$$=\frac{3\times1.4\times10^{3}\times r^{2}}{4\times6.67\times10^{-11}\times1.0\times10^{3}\times1.97\times10^{30}\times3\times10^{8}}$$

$$=2.7\times r^{2}\times10^{-29}\text{米}$$

(c) R_0依赖于粒子到太阳的距离r，即$R_0\propto r^2$，而同地球到太阳的距离无关。

9. 证明 $\varepsilon_0 C(\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B})$ 具有 $\dfrac{\text{动量}}{\text{面积}\cdot\text{时间}}$ 的量纲，而 $\dfrac{1}{\mu_0}\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 则具有量纲$\dfrac{\text{能量}}{\text{面积}\cdot\text{时间}}$。$\left(\text{如像}\boldsymbol{S}=\dfrac{1}{\mu_0}\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}\text{计}\right.$算能流的方式，可以用矢量$\varepsilon_0 C(\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B})$ 计算动量流。$\left.\right)$

［**解**］ $\left[\dfrac{\text{动量}}{\text{面积}\cdot\text{时间}}\right]=MLT^{-1}\cdot L^{-2}\cdot T^{-1}=ML^{-1}T^{-2}$

$$[\varepsilon_0 c(\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B})]=[\varepsilon_0]\cdot[c]\cdot[E]\cdot[B]$$

$$=M^{-1}L^{-3}T^{4}I^{2}\cdot LT^{-1}\cdot MLT^{-3}I^{-1}\cdot MT^{-2}I^{-1}$$

$$=ML^{-1}T^{-2}$$

即证一。

$$\left[\frac{\text{能量}}{\text{面积}\cdot\text{时间}}\right]=ML^{2}T^{-2}\cdot L^{-2}\cdot T^{-1}=MT^{-3}$$

$$\left[\frac{1}{\mu_0}(\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B})\right]=\left[\frac{1}{\mu_0}\right]\cdot[E]\cdot[B]$$

$$=M^{-1}L^{-1}T^{2}I^{2}\cdot MLT^{-3}I^{-1}\cdot MT^{-2}I^{-1}$$

$$=MT^{-3}$$

即证二。

10. 有一条小的空中飞船，连同乘客驾驶员等一起，质共为1500千克，这条船在没有引力场的外层空间漂游着。如果在这船上开亮一架探照灯，此灯向空中辐射的功率是 10^4瓦，由于光速带走动量，这条船就要受着与该动量相联系的反作用力。试问，由于这个反作用力，这条船在一天中将获得多大的

速率？

［**解**］ 飞船一天辐射的总能量为

$$U=Nt=10^4\times24\times3600=8.64\times10^8\ \text{（焦耳）}$$

飞船所受的反作用力为

$$F=\frac{P}{t}=\frac{U}{c\cdot t}$$

故飞船一天所获得的速率为

$$v=at=\frac{U}{m\cdot c\cdot t}\cdot t=\frac{U}{mc}$$

$$=\frac{8.64\times10^8}{1500\times3\times10^8}=1.92\times10^{-3}\ \text{米/秒}$$

11．在真空中传播的平面电磁波，由下述电场和磁场描述： $E_X=E_0\sin(KZ-\omega t)$， $B_Y=\frac{E_0}{C}\sin(KZ-\omega t)$， $E_Y=E_Z=B_X=B_Z=0$。(a)波传播的方向如何？(b) 求单位面积的平均功率(c) 如果有一面积为A的完全吸收表面垂直于波的传播方向，则单位时间内向A面积上传递的动量是多少？

［**解**］ (a) 在右旋笛卡儿直角坐标系中，$\boldsymbol{S}$ 的方向由 $\boldsymbol{S}=\frac{1}{\mu_0}(\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B})$ 决定，故波的传播方向为Z轴正方向。(b) 由于 $\boldsymbol{E}\perp\boldsymbol{B}$，所以坡印廷矢量大小为

$$S=\frac{1}{\mu_0}E_0\sin(KZ-\omega t)\frac{E_0}{C}\sin(KZ-\omega t)$$

$$=\frac{E_0^2}{\mu_0C}\sin^2(KZ-\omega t)$$

单位面积的平均功率为

$$\overline{S}=\frac{E_0^2}{\mu_0C}\frac{1}{T}\int_0^T\sin^2(KZ-\omega t)dt$$

因为

$$\frac{1}{T}\int_0^T \sin^2(KZ-\omega t)\,dt=\frac{1}{2}$$

故

$$\bar{S}=\frac{E_0{}^2}{2\mu_0 C}$$

(c)由题 42—9 知，单位时间向单位面积传递的动量为

$$|\varepsilon_0 C(\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B})|=\varepsilon_0 CE_0\sin(KZ-\omega t)\frac{E_0}{C}\sin(KZ-\omega t)$$

$$=\varepsilon_0 E_0{}^2\sin^2(KZ-\omega t)$$

则单位时间内向A面积上传递的动量为

$$P=|\varepsilon_0 C(\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B})|A=\varepsilon_0 E_0{}^2 A\sin^2(KZ-\omega t)$$

故

$$\bar{F}=\varepsilon_0 E_0{}^2 A\cdot\frac{1}{T}\int_0^T\sin^2(KZ-\omega t)dt=\frac{1}{2}\varepsilon_0 AE_0{}^2$$

12．一平面电磁波，波长为3.0米，在真空中沿X轴正方向行进，其电矢量$\boldsymbol{E}$的振幅为 300 伏特/米，方向沿y轴。(a)波的频率ν是多少？(b)与波相联系的$\boldsymbol{B}$场的振幅是多少？(c)若$E=E_m\sin(KZ-\omega t)$，此波的K和ω的值是多少？(d)与此波相联系的每单位面积能流的时间平均率是多少？(e)如果波落在一个面积为A的完全吸收的薄片上，每秒钟传递给薄片的动量及作用在薄片上的辐射压强是多少？

［**解**］ (a)已知在真空中平面电磁波的波长$\lambda=3.0$米，则波的频率

$$\nu=\frac{C}{\lambda}=\frac{3\times10^8}{3.0}=1.0\times10^8\quad\text{赫兹}$$

(b) 由于$\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon_r}\,E_m=\sqrt{\mu_0\mu_r}\,H_m$

故

$$B_m=\mu_0\mu_r H_N=\sqrt{\mu_0\mu_r\varepsilon_0\varepsilon_r}\,E_m=\frac{E_m}{C}$$

$$=\frac{300}{3\times10^8}=1\times10^{-6}\text{特斯拉}$$

(c)若 $E=E_m\sin(KZ-\omega t)$

$$\omega=2\pi\nu=2\times3.14\times1.0\times10^8=6.28\times10^8\ \text{弧度/秒}$$

$$K=\frac{\omega}{C}=\frac{6.28\times10^8}{3\times10^8}=2.09\ \ 1/\text{米}$$

(d) 利用题 42—11 的结果

$$S=\frac{E_m{}^2}{2\mu_0 C}=\frac{(300)^2}{2\times4\pi\times10^{-7}\times3\times10^8}$$

$$=1.19\times10^2\text{焦耳/米}^2\cdot\text{秒}$$

(e) 每秒钟传递给薄片的动量

$$P=\frac{U}{C}=\frac{S\cdot A\cdot t}{C}=\frac{1.19\times10^2}{3\times10^8}\cdot A$$

$$=4.0\times10^{-7}\times A\text{千克}\cdot\text{米/秒}$$

辐射压强$\dfrac{P}{A}=4.0\times10^{-7}$牛顿

13. 在课文中第 926 页上光速C测量值的误差为±0.0012千米/秒，在附录B中为百万分之±0.004，证明二者是同一的。

［**解**］ 在附录B中，相对误差为百万之0.004，故绝对误差

$$\Delta C=3\times10^8\times0.004\times10^{-6}=0.012\times10^2\text{米/秒}$$

$$=0.0012\text{千米/秒}$$

14. 光速的数值在课文中 926 页（及附录B）上，测量的误差是多少呎/秒？光在一秒钟传多少呎

［**解**］ $\Delta C=0.0012\text{千米/秒}=1.2\text{米/秒}=3.9\text{呎/秒}$

光在 1 秒钟传播的距离为

$$C=2.99792458\times10^{8}\times3.281$$
$$=9.83618883\text{ 呎/秒}$$

15．假设光在1哩的基线上行进的时间已算出，而其速率已量到926页上所引用的准确度。假设其它来源的误差可以忽略，试问：在这基线的长度上可以容许的误差有多大？

［**解**］ 假设在 $l=1$ 哩的基线上测光速

$$C=\frac{l}{t}$$

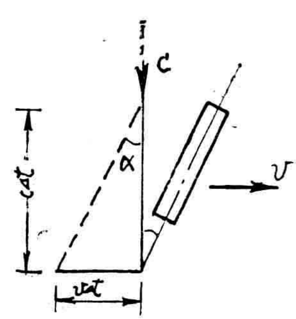
当只考虑长度测量引起的误差时，则

$$\Delta C=\frac{\Delta l}{t}$$

故 $\Delta l=\Delta C\cdot t=\Delta C\cdot\frac{l}{c}=\frac{\Delta C}{C}\cdot l$

$$=0.004\times10^{-6}\times1.609\times10^{3}=6\times10^{-6}\text{米}=6\text{微米}$$

16．测定光速的布莱特里（Bradley）方法，考虑一颗星位于通过太阳的直线上，图中垂线垂直于地球绕太阳的轨道平面。地球与星的距离远大于地球的轨道半径。证明：由于光速是有限的，通过望远镜观察到这颗星必须向地球运动方向倾斜，与垂线夹角20.5″。这种称作“光行差”的现象在1729年首先由 *J*·布莱特里（James Bradley）所解释。（提示：相似于人撑着伞在雨中行走。）



习题 42—16

［**解**］ 地球绕太阳运动平均速率

$$v=29.77\text{千米/秒}$$

由图可见

$$\mathrm{tg}\,\alpha=\frac{v\Delta t}{C\Delta t}=\frac{29.77\times10^{3}}{3\times10^{8}}$$

$$=9.92\times10^{-5}$$

$$\alpha=9.92\times10^{-5}\quad 弧度=20.5''$$

17．假设我们能同离我们最近的恒星（α－Centauri）上假想的居民建立无线电通讯，该星体离我们有4.2光年，我们要多长时间才能收到对我们信息的答复？对于位于银河系内离我们2×10^6光年的紧邻重复上述计算。

［**解**］ 离地球$L=4.2$光年的星球，收到地球发射的无线电波再给地球回答，无线电波走的路程为$2L$，故地球收到回答所需的时间

$$t=\frac{2L}{C}=2\times4.2=8.4\ 年$$

同理，收到远离地球2×10^6光年的星体的回答所需时间为

$$t'=\frac{2L'}{C}=2\times2\times10^6=4\times10^6年$$

18．迈克耳逊和他的合作者们所报导的四个光速测定值（如课文中表42—1中所列）中的哪一个值，与附录B中给出的（即通常采用的）C值吻合得最好？考虑到测量误差，可以以适当的比例作出取差柱状图，以说明其它三个C值及其误差。

［**解**］ 略

19．利用雷达波在月球上反射所测得的月球距离的误差约为0.8千米，假定这个误差仅仅与波经历时间的测量有关，问这时间的误差有多大？

［**解**］ 假设地球到月球的距离为l，雷达波从发射到反射回来共需时间t，则

$$l=\frac{1}{2}Ct$$

$$\Delta l=\frac{1}{2}C\Delta t$$

故

$$\Delta t=\frac{2\Delta l}{C}=\frac{2\times0.8\times10^{3}}{3\times10^{8}}=5.3\times10^{-6}\text{秒}$$

20. 测量光速的罗麦方法，在于观察木星的某个卫星的表观公转时间。卫星的实际公转周期为 42.5 小时，(a)当地球在其轨道上从课文中图42—10中的 x 点运动到 y 点时，在考虑到光速为有限的情形下，表观的公转时间如何变化？(b) 为了计算光的速率，你需要作些什么观测？木星在其轨道上的运动可以忽略不计。课文中图42—10不是按比例画出的。

［**解**］ 略

21. 假设在课文中方程42—14与 42—15 中，$v'=u$；二表达式相差 1.0%时，速度 u 的数值是多大？

［**解**］ 方程（42—14）为

$$v=v'+u$$

方程（42—15）为

$$v=\frac{v'+u}{1+\frac{v'u}{c^{2}}}$$

当 $v'=u$ 时，用上述二公式计算 v 结果相差 1.0%

即 $$v=2u$$

和 $$v=\frac{2u}{1+\frac{u^{2}}{c^{2}}}$$

二者相差 1.0%，即

$$1-\frac{1}{1+\frac{u^{2}}{c^{2}}}=0.01$$

解出 $$u=0.1\,c$$

22. 证明多普勒频移为1千赫的时候，能够转换成的视线速度为 -0.211千米/秒

［**解**］ 略

23. 一只火箭飞船以$0.2C$的速率飞离地球，火箭飞船中的光，对该船上乘客呈现蓝色，试问：此光对于地球上的观察者呈现什么颜色？（见课文中图 42—1）

［**解**］ 由图 42—1 知篮色波长

$$\lambda=470\text{纳米}$$

$$\frac{\nu'}{\nu}=\frac{1-\frac{u}{c}}{\sqrt{1-\frac{u^2}{C^2}}}=\frac{1-0.2}{\sqrt{1-0.04}}=\frac{0.8}{\sqrt{0.96}}=0.82$$

$$\lambda'=\lambda\frac{\nu}{\nu'}=\frac{470}{0.82}=576\text{纳米}\quad\text{（黄橙色）}$$

24. 利用入射的微波波束与从（接近的或离开的）汽车上反射回来的微波波束两者之间的波长差，来测定公路上汽车的速率。(a) 求证：如果v是汽车的速率，ν是入射波束的频率，则频率变化近似地等于，$2v\nu/C$，这里C是电磁辐射的速率。(b)对于频率为 2450兆周/秒的微波来说，对于每1哩/小时的速率，频率的变化有多大？

［**解**］ (a) 由于汽车速率比光速小很多，故在汽车上接收到的微波频率ν'可用公式$\nu'=\nu\left(1-\frac{v}{c}\right)$。而汽车上反射的微波被发射者回收到时，其频率$\nu''$应为$\nu''=\nu'\left(1-\frac{v}{c}\right)$

即
$$\nu''=\nu\left(1-\frac{v}{c}\right)^2=\nu\left(1-\frac{2v}{c}+\frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$\doteq\nu-\frac{2\nu v}{c}$$

故证得

$$\Delta\nu=\nu-\upsilon''=\frac{2\nu v}{c}$$

(b)　对于　$\nu=2450\times10^{6}$赫兹

$$v=1\text{ 哩/小时}=0.447\text{ 米/秒}$$

$$\Delta\nu=\frac{2\nu v}{c}=\frac{2\times2450\times10^{6}\times0.447}{3\times10^{8}}=7.3\text{赫兹}$$

25．太阳在其赤道处的自转周期为 24.7 天；赤道半径为 7.0×10^{8}米，对于从太阳光盘边缝上发射出来的波长在5500 Å附近的标识波长来说，多普勒波长有多大？

［**解**］ 太阳赤道上的线速率

$$u=\frac{2\pi r}{T}=\frac{2\times3.14\times7.0\times10^{8}}{3600\times24\times24.7}=2.1\times10^{3}\text{米/秒}$$

与光速相比 u 仍为低速，故可得

$$\Delta\lambda=\frac{u}{c}\lambda \qquad \text{(参看题42—28)}$$

$$=5500\times10^{-10}\times\frac{2.1\times10^{3}}{3\times10^{8}}=3.8\times10^{-12}\text{米}$$

$$=3.8\times10^{-2}\text{ Å}$$

26．有一地球卫星，以 18000哩/小时的速率在一个无线电接收站正上空 250 哩高处飞过：卫星以频率 40×10^{6} 周/秒（精确地）发射无线电波，试描绘（因多普勒效应而产生的）频率变化的时间函数，取卫星飞到接收站正上空的时刻为 $t=0$。［提示：多普勒公式中的速率不是卫星的实在速度，而是该速度在接收站方向上的分量。请利用非相对论公式（课文中方程42—17 a），并忽视地球与卫星轨道的曲率。］