

波动过程、光学、原子物理 与核物理基础

〔苏联〕A. A. 齐楚林著 苏耀中 万山译

上海科学技术出版社

3
197

波动过程、光学、原子物理与核物理基础

〔苏联〕A. A. 齐楚林 著
苏耀中 万 山 译

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书为苏联高等学校物理教程的第三部分,阐述了普通物理中波动过程、光学、原子物理与核物理的基本理论。

这一次根据苏联国立数理文献出版社(Физматгиз)一九五九年修订本重译,新版中原作者除了补充若干新的内容,特别是光学和核物理部分以外,并将第一版的原书名“波动过程、光学、核物理学”改为目前的书名。本书可供高等学校物理系一、二年级学生参考之用。

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

ОПТИКА

ЭЛЕМЕНТЫ

АТОМНОЙ И ЯДЕРНОЙ

ФИЗИКИ

А. А. Чечулин

Физматгиз • 1959

波动过程、光学、原子物理与核物理基础

苏耀中 万 山 译

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可证出093号

商务印书馆上海厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1168 1/32 印张 18 22/32 插页 4 排版字数 324,000

1959年3月第1版印4次共印13,000册

1963年11月第2版, 1963年11月第1次印刷, 印数1—3,100

统一书号 13119·261 定价(十四) 2.00 元

目 录

第一部分 波动过程

第一章 振动	1
§1. 諧振动方程与图解.....	1
§2. 諧振动的合成.....	5
§3. 阻尼振动	13
§4. 受迫振动、共振和自激振动的概念.....	16
第二章 彈性振动的傳播。波	22
§5. 振动傳播的一般情形	22
§6. 波长与振动傳播速度。波动方程	25
§7. 惠更斯原理	30
§8. 波的反射与折射定律。費馬原理	32
§9. 波的干涉。駐波	37
§10. 能量以波动形式的轉移。波的群速度	42
§11. 多普勒現象与多普勒原理	51
第三章 声学	54
§12. 声振动的分类。声波的傳播速度	54
§13. 声强和声压	58
§14. 音色和声譜	64
§15. 声音在大气中及在房屋內的傳播	67
§16. 超声波	70
第四章 电磁振荡和电磁波	73
§17. 电磁波的发生和傳播机构	73
§18. 振荡电路与电磁波的激发	78
§19. 电磁波的接收	86

§ 20. 无线电定位概念	91
§ 21. 电视原理	94
§ 22. 无线电波的传播	100
§ 23. 电磁波谱	102

第二部分 光 学

第五章 引言	106
§ 24. 关于光的本性的概念之发展	106
§ 25. 光速的测定方法	112
第六章 光的干涉	120
§ 26. 杨氏实验	120
§ 27. 菲涅耳双镜和双棱镜中光的干涉	122
§ 28. 用薄膜获得干涉. 等厚条纹	125
§ 29. 等倾条纹	132
§ 30. 干涉仪	137
第七章 光的衍射	142
§ 31. 光的直线传播	142
§ 32. 会聚光的衍射现象	145
§ 33. 平行光的单缝衍射	149
§ 34. 衍射光栅	151
第八章 光的色散和吸收. 光谱	157
§ 35. 光的色散	157
§ 36. 色散理论的实验验证	164
§ 37. 光的吸收	166
§ 38. 光谱	167
第九章 热辐射与光度学	170
§ 39. 热辐射定律	170
§ 40. 光度学(光的)量	179
§ 41. 光量的单位和光度学	183
§ 42. 热辐射的技术应用	187
第十章 自然界中与技术中的颜色	192
§ 43. 自然界中的颜色	192

§ 44. 顏色的評定和測量	195
第十一章 光的反射、折射和光压	199
§ 45. 光的反射和折射	199
§ 46. 光压	202
第十二章 几何光学(射綫光学)	207
§ 47. 几何光学的定律	207
§ 48. 利用反射鏡来得到象	209
§ 49. 光綫通过平行平板和棱鏡的行程	213
§ 50. 透鏡成象	216
§ 51. 透鏡的象差和光在反射时的損失	222
第十三章 光学仪器	227
§ 52. 放大鏡, 显微鏡, 望远鏡	227
§ 53. 衍射对光学仪器分辨本領的影响	232
第十四章 偏振光	239
§ 54. 天然光与偏振光	239
§ 55. 反射与折射时的偏振	242
§ 56. 光的双折射	245
§ 57. 偏振棱鏡. 馬呂斯定律	249
§ 58. 偏振光的干涉	252
§ 59. 人为各向异性	255
§ 60. 偏振面的旋轉	256
§ 61. 沙列依勒糖量計	261
第十五章 相对論概念	263
§ 62. 迈克耳孙实验与相对論的出現	263
§ 63. 相对論最主要的一些結論	267

第三部分 原子結構和原子光学

第十六章 原子	273
§ 64. 巴耳末公式, 卢瑟福实验和原子的核模型	273
§ 65. 氢原子理論	277
§ 66. 原子結構和門捷列夫元素周期系	282
第十七章 同位素	292

§ 67. 同位素的发现和同位素分析法	292
§ 68. 同位素的分离	298
第十八章 倫琴射綫	301
§ 69. 倫琴射綫的获得、本质和性能	301
§ 70. 倫琴射綫的衍射和倫琴射綫分析法	305
§ 71. 标識射綫譜的規律性	310
第十九章 能量交換的基本过程	313
§ 72. 用电子撞击对原子进行光学激发	313
§ 73. 光致发光和某些其他形式的发光	315
§ 74. 光的并合散射	321
§ 75. 光电效应	323
§ 76. 康普頓效应和高能光子在物质中引起的某些現象	330
第四部分 核物理基础	
第二十章 放射性	335
§ 77. 放射性輻射和放射性衰变的規律性	335
§ 78. 研究放射性輻射的方法	342
第二十一章 原子核的人为轉变	349
§ 79. 原子核的人为轉变的首次实验。核反应	349
§ 80. 中子的发现和获得	353
§ 81. 正电子的发现, 人为放射性和超鈾元素的获得	355
§ 82. 核分裂	359
第二十二章 核粒子的結合能和放射性衰变机构	362
§ 83. 核內核子的結合能	362
§ 84. α 衰变	369
§ 85. β 衰变, γ 輻射和核分裂	371
第二十三章 核能的获得	374
§ 86. 利用可控制核反应来获得能量。核反应堆	374
§ 87. 利用不可控制的核反应来获得能量	378
第二十四章 带电粒子加速的方法	381
§ 88. 高压靜电加速器和脉冲发生器	381
§ 89. 带电粒子回旋加速器	384

第二十五章 宇宙射线	394
§ 90. 宇宙射线的组成.....	394
§ 91. 研究宇宙射线的方法.....	397
第二十六章 基本粒子和粒子的波动性	400
§ 92. 基本粒子.....	400
§ 93. 粒子的波动性.....	403
索 引	418

第一部分 波动过程

第一章 振 动

§ 1. 諧振动方程与图解

对于闡明本书所述的許多現象來說，諧振动的概念具有重要的意义；在普通力学課程中已經研究过它的理論，这里我們回顾一下它的一些定义和理論的基本推論。

质点、物体或物体系，在使它返回平衡位置的力的作用下所作的周期运动，如果力是和它离开平衡位置的距离成正比的話，称为諧振动。属于这种力的，首先有彈性物体变形时所产生的力——彈性力，例如，变形了的彈簧、拉紧了弦，以及弯曲了的小树枝等，都处于这种力的作用下。本质上不是彈性力，但是也与振动物体离开平衡位置的距离成正比的力，称为“与彈性力等价的力”或准彈性力。

浮在水面上的立方形木块，当它高于或低于它的平衡位置时，它所受的浮力与重力的合力，可以作为准彈性力的例子。

根据諧振动的定义和力学中众所周知的力、质量及加速度之間的关系式，可以得出下列的微分方程：

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -ky, \quad (1-1)$$

式中 y 为离开平衡位置的距离， m 为振动物体（或质点、物体系）的质量， t 为時間， k 为位移模量，亦即力与对应于此力的位移的比值。量 m 与 k 都是恒量。

方程(1-1)的解描述諧振动,称为諧振动方程式,其形式視起始条件而定.

如果从物体沿着位移軸的正方向运动而达于平衡位置时开始計算時間,則振动方程将具有下面的形式:

$$y = a \sin \left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t \right), \quad (1-2)$$

此处 a 为振动的振幅,即离开平衡位置的最大距离; $\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t$ 为振动的相位. 在一个振动周期 T 內,亦即在运动准确地重复一次所經過的时间之內,相位变化了 2π . 由此可見:

$$\sqrt{\frac{k}{m}} T = 2\pi,$$

亦即:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (1-3)$$

由公式(1-3)所确定的振动周期称为固有振动周期,如果除了上面所說的力以外,沒有別的力作用在物体(或质点、物体系)上,則它将以此周期作諧振动.

如果在式(1-2)中将 $\sqrt{\frac{k}{m}}$ 換为与其相等的 $\frac{2\pi}{T}$,則諧振动方程可以写为下列形式:

$$y = a \sin 2\pi \frac{t}{T}. \quad (1-4)$$

假如取任意的一个时刻作为計算時間的起点,則方程式(1-1)的解将不再是(1-2)那样,而是下面的形式:

$$y = a \sin \left(2\pi \frac{t}{T} + \beta \right). \quad (1-5)$$

在此情况下,振动的相位将为 $\frac{2\pi t}{T} + \beta$, 此处 β 为一恒量,它决定振动在开始計算時間的时刻(即 $t = 0$ 时)的相位. 量 β 称为初相位.

在特殊情形下, 如果取初相位等于 $\frac{\pi}{2}$, 亦即从振动物体达到位移轴正方向的最大距离时开始計算時間, 則諧振动方程将成为

$$y = a \cos 2\pi \frac{t}{T}. \quad (1-6)$$

根据公式(1-5), 可以推得确定諧振动其他各个物理量的方程如下:

确定速度的方程为:

$$v = \frac{dy}{dt} = \frac{2\pi a}{T} \cos\left(2\pi \frac{t}{T} + \beta\right). \quad (1-7)$$

确定加速度的方程为:

$$w = \frac{dv}{dt} = -\frac{4\pi^2 a}{T^2} \sin\left(2\pi \frac{t}{T} + \beta\right), \quad (1-8)$$

或者, 根据(1-5)式, 用 y 来代替 $a \sin\left(2\pi \frac{t}{T} + \beta\right)$, 得:

$$w = -\frac{4\pi^2}{T^2} y. \quad (1-9)$$

作用在作諧振动的物体上的力为:

$$f = -mw = -m \frac{4\pi^2}{T^2} a \sin\left(2\pi \frac{t}{T} + \beta\right) = -m \frac{4\pi^2}{T^2} y. \quad (1-10)$$

图 1 表示位移、速度与加速度如何随時間变化的情形。在左边的矢量图上, 从坐标原点引出三个矢量:

$$y = a, \quad v = \frac{2\pi a}{T}, \quad \text{和} \quad w = \frac{4\pi^2 a}{T^2},$$

它們的大小(每一个矢量都有它自己的尺度)相应地确定了位移、速度以及加速度的最大值。矢量 y 与 X 軸正方向所夹的角 φ' , 等于在某一时刻 t' 时振动的相位(当 $\beta = 0$ 时, $\varphi' = 2\pi \frac{t'}{T}$)。矢量 v 相对于矢量 y 在逆时針方向上轉过 $\frac{\pi}{2}$ 角, 矢量 w 則轉过了 π 角。如果設想这些矢量一起沿着逆时針方向以周期 T 繞坐标原点旋

轉,則它們在 Y 軸上的投影可以依次由方程(1-5)、(1-7)和(1-8)確定。亦即,這些投影表示了位移、速度与加速度随時間的变化。

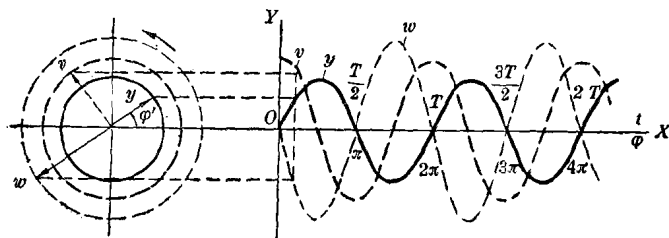


图1 位移、速度与加速度的曲线图和矢量图

图1右边的曲线表示 y 、 v 与 w 依赖于时间 t , 或相位 $\varphi = 2\pi \frac{t}{T}$ 的曲线。

作谐振动的物体的势能,等于将物体从平衡位置移到指定位置所需耗费的功,亦即等于和力 f 大小相等、方向相反的力所作的功。因而,势能等于:

$$\begin{aligned} W_{\text{势}} &= \int_0^y -f dy = \int_0^y m \frac{4\pi^2}{T^2} y dy = m \frac{2\pi^2 y^2}{T^2} \\ &= m \frac{2\pi^2 a^2}{T^2} \sin^2 \left(2\pi \frac{t}{T} + \beta \right). \end{aligned} \quad (1-11)$$

动能等于:

$$W_{\text{动}} = m \frac{2\pi^2 a^2}{T^2} \cos^2 \left(2\pi \frac{t}{T} + \beta \right). \quad (1-12)$$

总能量为:

$$W = W_{\text{势}} + W_{\text{动}} = m \frac{2\pi^2 a^2}{T^2}. \quad (1-13)$$

这就是说,作谐振动的物体(或质点、物体系),其总能量正比于振幅的平方和物体的质量,反比于周期的平方,而与时间无关。

图2所示为势能、动能和总能量随时间变化的曲线。由图可

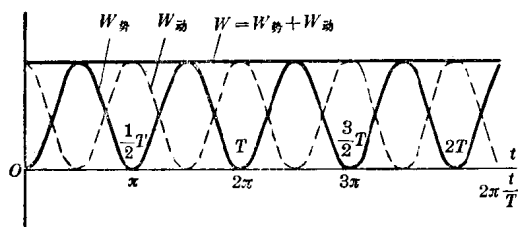


图 2 势能、动能与总能量的曲线图

見,这些量的变化周期等于諧振动周期的二分之一,而且在振动过程中,势能和动能是交替地相互轉变的,但它們的和,即总能量,是一个恒量. 这个图是取初相位等于零而繪制的.

总而言之,在諧振动中,由上述方程所决定的位移、速度、加速度和力中的每一个,都等于其相应量的最大值(亦即一个恒量)与一个角度(相位)的正弦或余弦的乘积,而这个角度綫性地依赖于時間. 以后我們將遇到一些非力学量,其变化也同样地遵守这个規律,于是我們將說,这个量在作諧振动.

§ 2. 諧振动的合成

如果振动不是由一个,而是由若干个彼此独立的原因所引起的,这些原因的每一个都引起諧振动,則振动着的量在任一时刻的值将等于諸分量的和. 倘若这个量是矢量,則这个和就为几何和;倘若是标量,其和就为代数. 这称为迭加原理. 或者称为相加原理.

現在我們利用迭加原理来研究下述問題: 若质点同时参与两个周期相等,且方向沿着同一直綫的諧振动时,此质点的合位移方程如何?

設所述两个分振动由下列方程

$$y_1 = a_1 \sin\left(2\pi \frac{t}{T} + \beta_1\right); \quad y_2 = a_2 \sin\left(2\pi \frac{t}{T} + \beta_2\right) \quad (1-14)$$

所給定。

由坐标原点 O 引出两个矢量 OD 及 OE (图 3), 使它們与 OX 軸的夹角分别为两分振动的初相 β_1 及 β_2 , 并使它們的长短, 按照某种尺度, 依次等于两分振动的振幅: $OD = a_1$, $OE = a_2$, 当此两矢量以周期 T 繞 O 点旋轉时, 它們的相对位置保持不变, 两者間的夹角始終等于两个分振动的初相之差 $\beta_1 - \beta_2$. 两分振动之振

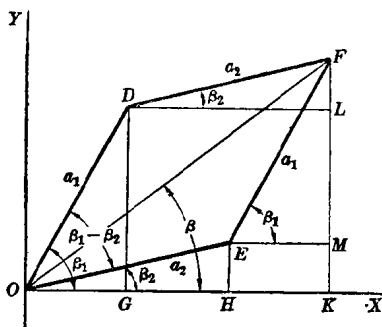


图 3 諧振动合成的矢量方法

幅在垂直軸上的投影的代数

和, 将等于以 OD 和 OE 为邻边所构成之平行四边形的对角綫 OF 在此軸上的投影。由此可見, 质点的合成运动仍是諧振动, 其周期与两分振动的周期 T 相同, 振幅 $A = OF$, 初相 β 等于矢量 OF 与 OX 軸的夹角。从图 3 中可見, $(OF)^2 = (OE)^2 + (EF)^2 - 2 \cdot OE \cdot EF \cos[\pi - (\beta_1 - \beta_2)]$, 或者:

$$A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\beta_1 - \beta_2), \quad (1-15)$$

还有:

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} FOK = \frac{FK}{OK} = \frac{LK + FL}{OG + GK} = \frac{a_1 \sin \beta_1 + a_2 \sin \beta_2}{a_1 \cos \beta_1 + a_2 \cos \beta_2}. \quad (1-16)$$

由 (1-15) 式可知: 当两分振动的初相位差为 π 的偶数倍时, 亦即当 $\beta_1 - \beta_2 = 2k\pi$ (两分振动相位相同) 时, 合振动的振幅等于两分振动振幅之和; 而当两者初相位差为 π 的奇数倍时, 亦即 $\beta_1 - \beta_2 = (2k+1)\pi$ (两分振动相位相反) 时, 合振动的振幅等于两分振动振幅之差。在后一种情形下, 如果两分振动之振幅相等, 則合振动的振幅将等于零, 这就是說, 两分諧振动中一个抵銷了另一个。因此, 如果两者的方向是沿着同一直綫的話, 則两个周期及振幅相

等而相位相反的諧振动在迭加时将互相抵銷。

矢量法可以用于任意个諧振动的合成,只要它們周期相等,方向沿着同一直綫。作为例子,我們在图 4 中画出了四个諧振动的合成。四个箭号(矢量) OA 、 AB 、 BC 和 CD 首尾相接,它們的长度正比于諸分振动的振幅,它們与任意选定的 OX 軸向的夹角等于諸分振动的初相 β_1 、 β_2 、 β_3 和 β_4 。以矢量 OD 封闭所得折綫 $OABCD$,使之成为多边形;矢量 OD 的方向与折綫中的各个矢量的方向相反。这一个矢量 OD 的长度和方向就确定了合成諧振动的振幅和初相。

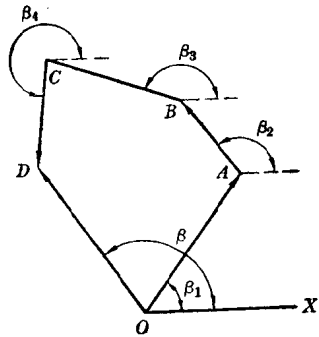


图 4 矢量多边形

对于两个方向沿着同一直綫,但周期不相等的諧振动的合成,必須对各个时刻求出离开平衡位置的位移之和。在图解上,这表现为对应于同一时刻的坐标的相加。在此情况下,合成的运动将仍是振动,但已不是諧振动了。

然而,如果分振动的周期可通約的話,則此运动将为周期性的。其周期 T 等于分振动周期的最小公倍数。設 $T = kT_1 = nT_2$, 此处 k 与 n 为整数,則在時間 T 內,第一个振动經過 k 个完整的周期,第二个振动經過 n 个完整的周期。这样,每經過 T 秒钟,同时参与两个振动的质点之运动,将完全重复一次。

因为分振动的相位差随着時間連續地改变,所以这种合振动的曲綫有时具有非常奇怪的形状。要想确定同时参与两个諧振动的质点的位移,可以利用图 3 所示的矢量图:质点的位移由矢量 OF 在 Y 軸上的投影所确定。当两个分振动的周期相同时,由于两者之相位差(即角 $\beta_1 - \beta_2$)保持一定,故矢量 OF 的长度不随时

間改变. 如果分振动的周期不同, 則矢量 OD 与 OE 以不同的速度旋轉, 且相位差 $(\beta_1 - \beta_2)$ 連續地改变, 因而, 矢量 OF 的长度也将随时而改变. 作为一个例子, 我們在图 5 上繪出了两个諧振动 $y_1 = a_1 \sin 2\pi \frac{t}{T_1}$ (虛綫) 与 $y_2 = a_2 \sin 2\pi \frac{t}{T_2}$ (細黑綫), 以及它們的和 (粗黑綫) 的曲綫. 其中第二个分振动的振幅 $a_2 = 0.25 a_1$, 周期 $T_2 = \frac{1}{3} T_1$.

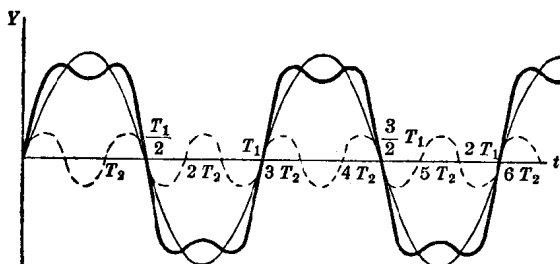


图 5 周期分别为 T 与 $3T$ 的两个分振动相合成时的图解

如果两个分振动的周期 T_1 与 T_2 彼此相差很少, 則当两者相合成时, 相位差, 亦即角 $\left(\frac{2\pi t}{T_1} + \beta_1\right) - \left(\frac{2\pi t}{T_2} + \beta_2\right)$ (图 3) 将极慢地改变, 因而每轉一周矢量 OF 的长度将改变得很少. 在此情况下, 合振动与諧振动的区别在于: 其振幅已不再保持恒定, 而将很慢地、周期性地改变. 振幅的这种周期性变化称为拍. 由此可見, 分振动彼此間的相位差相对地來說很慢的、周期性的改变乃是形成拍的原因.

如果在某一时刻, 被迭加的振动的矢量彼此間的相对位置以及对 Y 軸的相对位置都与图 3 符合, 則再經過一段時間 θ 后, 各矢量就又回到这些位置上; 在時間 θ 內, 一个矢量按相位比另一个落后了 2π ①. 这一段时间 θ 就是拍的周期. 在这一段时间內, 一

① 这里的意思是: “在这一段时间 θ 內, 一个矢量比另一个矢量多轉了一周”, 即两者之相位差由 $\beta_1 - \beta_2$ 变为 $\beta_1 - \beta_2 \pm 2\pi$, 并不是說两振动的相位差为 2π .——譯者

个矢量比另一个矢量多轉了一周。由此可見：

$$\frac{\theta}{T_1} = \frac{\theta}{T_2} + 1,$$

亦即：

$$\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = \frac{1}{\theta}, \text{ 或者 } \nu_1 - \nu_2 = \nu, \quad (1-17)$$

此处 ν 为拍的周期的倒数，叫做拍的频率，等于 1 秒钟内所形成的拍的数目。由此可知，拍的频率等于两分振动的频率之差，而拍的周期由下式确定：

$$\theta = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1}. \quad (1-18)$$

在图 6 上画出了两个振幅相等、周期相差很少的諧振动的图解，下面的曲线为合成振动的图解。

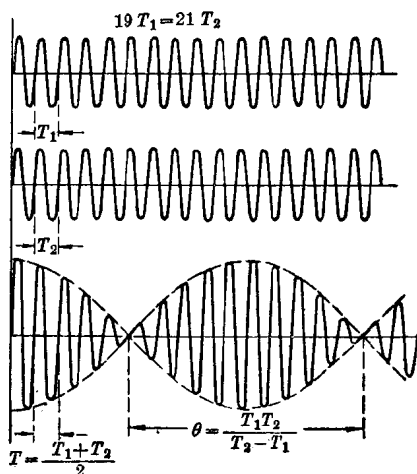


图 6 拍的图解

設有由下列两方程

$$x = a_x \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \beta_x\right), \quad y = a_y \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \beta_y\right)$$

所描述的两个相互垂直的諧振动，其周期相等，振幅为 a_x 与 a_y 。当此两振动合成时，合成运动的轨迹应当在侧边长为 $2a_x$ 及 $2a_y$ 的矩形之内。从分振动的方程消去变量 $\frac{2\pi t}{T}$ ，就得到这一轨迹的方程：

$$\frac{x^2}{a_x^2} + \frac{y^2}{a_y^2} - \frac{2xy}{a_x a_y} \cos(\beta_x - \beta_y) = \sin^2(\beta_x - \beta_y). \quad (1-19)$$

由解析几何知道，在一般情况下，这个方程是一个以坐标原点为中心的椭圆方程(图 7)。