

初級物理學

第 四 冊

(振 動 和 波)

主編者 Г. С. 蘭茨別爾格

譯 者 嚴忠鐸 周恆濤

上海中外書局出版

初 級 物 理 學

第 四 冊

(振動和波)

主 編 者 Г.С. 蘭茨別爾格
(蘇聯科學院院士)

譯 者 嚴忠鐸 周恆濤

上 海 中 外 書 局 出 版

初 級 物 理 學

(第四冊 振動和波)

原書名 ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ УЧЕБНИК ФИЗИКИ ЧАСТЬ
ЧЕТВЕРТАЯ (КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ)

原 主 編 [蘇聯] Г. С. ЛАНДСБЕРГ

原 出 版 者 ГОСТЕХИЗДАТ

原出版版次 1952 年版

譯 者 嚴 忠 鐸 周 恆 濤

出 版 者 中 外 書 局

發 行 者 上海中山東一路18號

印 刷 者 東 南 印 書 館

上海新開路566弄24號

版權所有 ★ 不可翻印

書號: 0041—4 開本: 787×1092, 1/25 印張: 6

字數: 126千字 定價: ¥ 8,500

1955年2月第一版第一次印刷 印數 0001—2000 冊

目 錄

第四篇 振動和波

第一章 基本概念.機械振動

§ 1-1.	週期運動. 週期.....	1
§ 1-2.	振動系統. 自由振動.....	1
§ 1-3.	擺; 它的振動運動學.....	3
§ 1-4.	音叉的振動.....	4
§ 1-5.	諧振動. 頻率.....	6
§ 1-6.	相位差.....	9
§ 1-7.	擺振動的動力學.....	11
§ 1-8.	擺的週期公式.....	12
§ 1-9.	彈性振動.....	15
§ 1-10.	扭振動.....	17
§ 1-11.	摩擦的影響. 阻尼.....	18
§ 1-12.	受迫振動.....	20
§ 1-13.	共振.....	22
§ 1-14.	摩擦對於共振的影響.....	23
§ 1-15.	共振的例子.....	24
§ 1-16.	在非諧和週期性力作用下的共振.....	26
§ 1-17.	週期性振動的形式以及它和振動諧波的關係.....	29

第二章 聲音振動

§ 2-1.	聲音的振動.....	32
--------	------------	----

§ 2-2.	聲學	33
§ 2-3.	樂音、響度和音調	34
§ 2-4.	音品	35
§ 2-5.	共鳴	37
§ 2-6.	錄音和聲音的重發	39
§ 2-7.	聲音的分析和合成	40
§ 2-8.	噪聲	41

第 三 章 電 振 盪

§ 3-1.	電振盪和它的觀察方法	44
§ 3-2.	振盪電路	47
§ 3-3.	電振盪和機械振動的相似。湯姆孫公式	49
§ 3-4.	電共振	53
§ 3-5.	無阻尼的振動。自激振動系統	55
§ 3-6.	電子管電振盪發生器	58
§ 3-7.	振盪理論	60

第 四 章 波 的 現 象

§ 4-1.	波的現象	64
§ 4-2.	波的傳播速度	68
§ 4-3.	無線電定位。水聲定位和聲音測量	67
§ 4-4.	繩上的橫波	69
§ 4-5.	空氣柱中的縱波	72
§ 4-6.	液面波	74
§ 4-7.	波的能量轉移	77
§ 4-8.	波的反射	79
§ 4-9.	繞射	81
§ 4-10.	定向發射	83

第五章 波的干涉

§ 5-1.	波的疊合	86
§ 5-2.	波的干涉	86
§ 5-3.	形成最大點和最小點的條件	88
§ 5-4.	聲波的干涉	90
§ 5-5.	駐波	91
§ 5-6.	彈性物體上的駐波	93
§ 5-7.	絃的自由振動	94
§ 5-8.	在板上和在四邊受到拉力的物體上的駐波	96
§ 5-9.	在許多固有頻率存在時的共振	99
§ 5-10.	聲音的良好輻射條件	100
§ 5-11.	雙耳效應，聲音定向	102

第六章 電磁波

§ 6-1.	電磁波	104
§ 6-2.	電磁波良好輻射的條件	105
§ 6-3.	振子和天線	106
§ 6-4.	赫芝的電磁波產生和研究的實驗，П.Н.列伯吉夫實驗	111
§ 6-5.	光的電磁論，電磁波譜	113
§ 6-6.	電磁波的實驗	116
§ 6-7.	波波夫發明無線電	123
§ 6-8.	現代的無線電通訊	126
§ 6-9.	無線電的其他應用	129
§ 6-10.	無線電波的傳播	132
§ 6-11.	最後的評論	135

第四篇 振動和波

第一章 基本概念 · 機械振動

§ 1-1. 週期運動. 週期。 在我們周圍所發生的各種機械運動中，常常遇到重複運動。例如任何勻速轉動就是一種重複運動：勻速轉動的物體上任何一點每一轉所經過的位置都是相同的，並且具有同一的順序和相等的速度。可是，不僅轉動是重複的。如果我們看一看，樹枝、樹幹受到風吹後怎樣擺動，船在波浪上怎樣搖盪，鐘擺怎樣走動，蒸汽機或柴油機的活塞與活塞桿怎樣來回運動，縫紉機的針怎樣上下跳動；如果我們看到，海潮的輪流漲落，行走與賽跑時腳步的輪換和兩手的揮動，心臟或脈搏的跳動，那末在所有這些運動中，我們觀察到同一個特徵——同一運動週的多次重複。

重複不是永遠的，也不是在任何條件之下都是完全相同的。在某些情形下，每一新週很準確地重複以前的一週（擺的擺動，在恆定速度運轉下機器部件的運動）；在另一些情形下，可以看出接連各週間相互的差別（漲潮或落潮，樹枝的搖擺，機器部件在啓動或停止時的運動）。

實際上有些運動和真正的重複運動之間的差別常常很小，可以略去不計，因而這種運動可以看做是真正的重複運動，就是把它當作週期運動。

每一週和任何另一週完全相同的重複運動，叫做週期運動。

經過一週所需的時間，叫做週期。

顯而易見，勻速轉動的週期等於轉過一轉所經過的時間。

§ 1-2. 振動系統. 自由振動。 在自然界裏，特別在技術方面，能够

自己作週期運動的物體與機件佔非常重要的地位。所謂“自己”，是說：這一週期性的動作沒有受到外力的強迫。所以這樣的振動叫做自由振動，以區別於在外力作用下所發生的受迫振動。

例如，把門週期性地來回推拉，那它將忽而關、忽而開，就是作週期性的受迫運動。可是它不能自己作週期運動：如果把門推開一下而任它自己運動，那末運動將不再重複。如果把懸掛在繩索上的重物推動一下或使它離開垂直的位置，以後讓它自己運動，這是另外一回事。它將開始擺動，就是自己作週期運動，這也就是自由振動。與這相似，由於起初推動一下就產生週期振動的有：杯中的水，掛在彈簧上的重物，在本身裝有彈簧的車廂或馬車，鞦韆，一端固定着的金屬片，拉緊的絃，指南針等等（圖 1-1）。

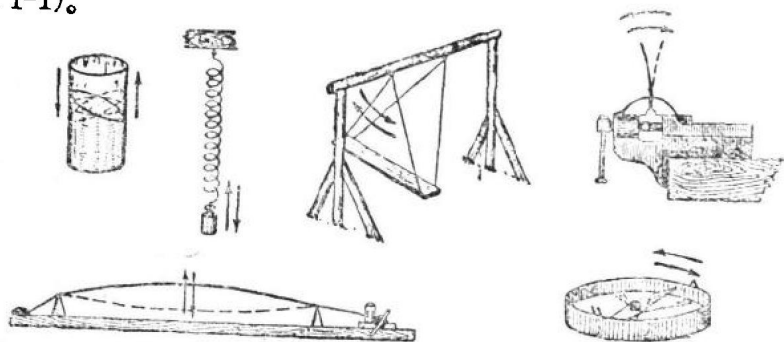


圖 1-1. 振動的例子。

所有這些能够自己作週期運動或振動的物體或物體組，叫做振動系統。上面已指出，在這些系統裏沒有外力的作用而產生的振動，是自由振動。

不僅在各種機器和機械（例如，鐘錶的機械）中會遇到振動系統。其次，我們看到大多數的聲源都是振動系統。聲音在空氣中的傳播祇是因為空氣本身是一種振動系統才有可能。並且，除了機械振動系統以外，還有電磁振盪系統。在這系統裏，產生了成為所有無線電技術基礎的電振盪。最後，還有很多複合的——機電的——振動系統，它們應

用在很多不同的技術範圍內。

我們的討論，從最簡單的一種機械振動系統——擺的研究開始，同時，直到 § 1-12 為止，我們祇討論自由振動。

§ 1-3. 擺；它的振動運動學。擺就是在懸掛時，重心低於懸掛點的任何物體。掛在釘上的鉤子、天平、繩索上的重物——所有這些都是振動系統，它們完全和掛鐘的擺類似（圖 1-2）。

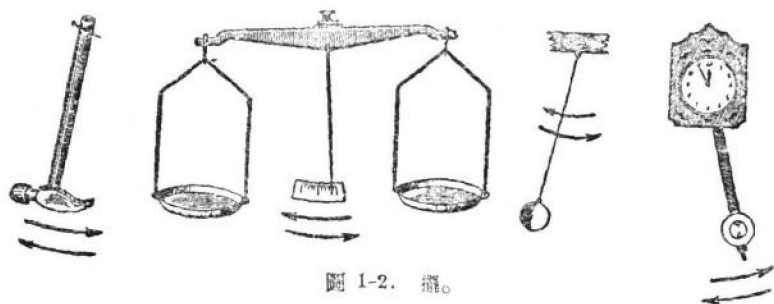


圖 1-2. 擺。

任何能够產生自由振動的系統都有穩定平衡位置。擺的穩定平衡位置就是當重心位於懸掛點所在的鉛直線上的位置。如果我們將擺從這個位置引出或推動，那它就開始振動，忽而偏向平衡位置的一邊，忽而偏向平衡位置的另一邊。擺離開平衡位置的最大偏轉，叫做振動的振幅。振幅的大小決定於最初的偏轉或使擺運動的推動力。這一性質——振幅和運動起始條件的關係——不僅用來表示擺的自由振動的特性，並且一般地用來表示很多振動系統的自由振動的特性。

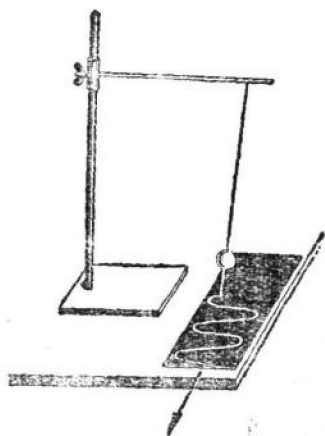


圖 1-3. 在熏煙薄片上擺振動的記錄

在擺的擺錘上固定一段細線或馬尾，並且使一塗有黑烟的玻璃片在細線下運動，如圖 1-3 所示。如果玻

璃片用固定的速度沿着和振動平面垂直的方向運動，那末細線便在玻璃片上畫出波形線(圖 1-4)。我們在這個實驗裏就有了最簡單的示波器——所謂用來記錄振動的儀器。

由示波器記錄下來的曲線，叫做波形圖。由此可見，圖 1-4 就是擺振動的波形圖。振動振幅在這波形圖上由長度 AB 來表示，它代表波形

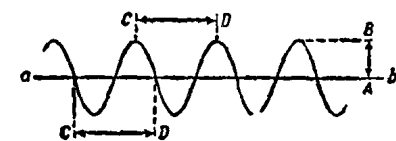


圖 1-4. 擺的振動波形圖。

AB —— 振幅； CD —— 週期。

曲線對於擺在靜止時(靜止在平衡位置)細線在玻璃片上所畫出直線 ab 的最大偏轉。長度 CD 表示週期，它等於玻璃片在擺的一個週期裏所移動的距離。

因為塗有黑煙的玻璃片是以等速移動，所以在移動期間，玻璃片的任何位移都和時間成正比。於是我們可以說，時間以一定的尺度(決定於玻璃片移動的速度)投射在直線 ab 上。另一方面，在和 ab 垂直的方向，細線在玻璃片上劃出擺的終端離開它的平衡位置的距離，也就是擺的終端從這個位置所經過的途徑。由此可見，波形圖不外是運動的線圖——途徑與時間的關係線圖。

我們知道，圖上曲線的斜度表示運動的速度(第一冊 § 1-19)。擺在通過平衡位置時速度最大。與此相當，圖 1-4 波形線的斜度在它通過直線 ab 各點時最大。相反地，在偏轉最大的時候，擺的速度變成零。與此相應，圖 1-4 波形線在離開 ab 最遠的各點，有和 ab 平行的切線，也就是斜度等於零。

§ 1-4 音叉的振動。 我們已經指出，大多數音源都是振動系統。不難相信，發聲的音叉產生振動，並且它的振動形式和擺相同。

可以仍舊利用塗有黑煙的玻璃片並將畫圖的細線固定在音叉的一股上作為示波器。

可是由於音叉的振動週期和振幅都很小，最方便是應用帶有光指示器(“光影”)的示波器和以前敘述過的(第三冊 § 18-1)鏡子掃描器。

圖 1-5 說明它是怎樣做成的。

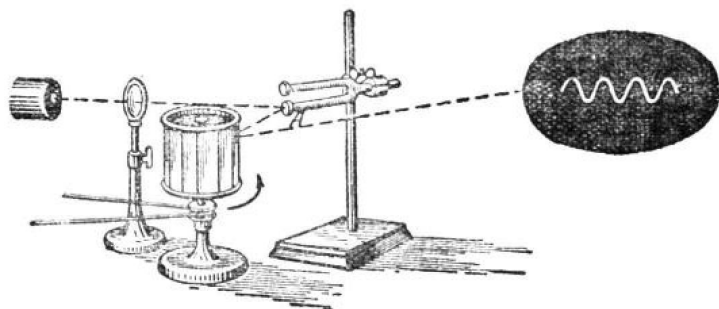


圖 1-5. 帶有鏡子振盪器的光示波器。

在音叉一股的終端上裝有輕小的鏡 A 。光線射到鏡上，然後再經鼓形鏡反射到壁上成為光點（光指示器）。如果將音叉敲擊一下，那我們將看到光點在直立平面裏上下移動起來。這是由於鏡片 A 隨音叉的一股一同振動的關係。

如果現在將鼓形鏡轉動，那末橫的移動就傳送到光指示器上，於是長條便展成我們所熟悉的波形線。

振幅與週期不能完全代表週期運動的特性。完全不同的週期運動可能具有相同的振幅和週期，而在振動形式上却是完全不同的。圖 1-6 所示，是這種運動波形圖的一些例子，用來代表一些機械振動系統的振盪和電振盪系統的振盪。

但在這些形式不同的振動中，擺或音叉的振動具有特別的意義。這種振動的形式表示出大多數振動系統的特性。如果我們將畫圖的細線固定在振動的金屬薄片上或在彈簧上振動的重物上，我們得到了和擺相同的波形圖。交流電（第三冊 § 18-2）的波形圖顯示同一形式的振動。

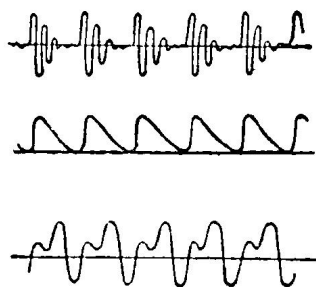


圖 1-6. 週期相同而形式不同的振動的例子。

所以必須更詳細地了解已經說過的一些振動方式。在下一節中，我們將看到像擺這樣的振動和沿圓周的勻速運動有着很簡單的聯繫。這樣使得我們能夠用圖解法作出擺的波形圖。

§ 1-5. 諧振動. 頻率. 在勻速轉動圓盤的小柱上固定一小球，並從側面用燈光來照射(圖 1-7)。當圓盤轉動時，球影將來回振動。這種振動不難用圖表示出來：在圖 1-8 上劃出 16 個球的連續位置，就是經過每一全轉(一週期) 16 分之 1 的位置，並寫上號碼。用從 1 到 16 的同一數字將壁 AB 上影子的位置寫上號碼；這些點子是用從圓周上各點的垂直線投到直線 AB 上的方法得來的。如果用平行的光線對着球來照射，就得到投射在壁上的影子。

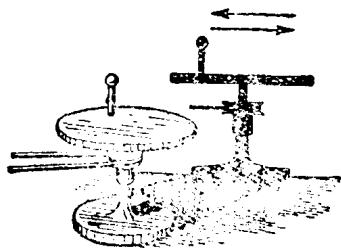


圖 1-7. 球沿圓周運動時的射影。

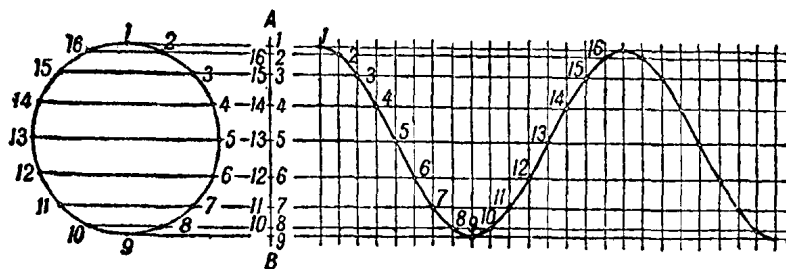


圖 1-8. 諧振動展開圖的作法。

爲了展開球射影的振動，使它和在鼓形鏡的情形所得結果類似起見，劃出許多彼此間距離相等並與 AB 平行的直線。現在我們不是將射影的連續位置 1、2、3、……16 畫在同一條直線上，而是畫在彼此相連續的一些直線上，正如圖 1-8 的右邊所示。用這樣方法，通過記出各點畫成連續的曲線，於是我們便得到表示球影的連續位置的波形線，也就是球的運動圖。這樣一來，我們就得到球射影振動的“波形圖”。

當一點沿圓周作勻速運動時，該點在任何直線上的射影的振動叫

做諧振動(或簡單振動)。

由此可見，諧振動是一個特別形式的週期振動。這個特別形式的振動非常重要，因為在很多不同的振動系統裏，常常遇到。彈簧上重物的振動、音叉的振動、擺的振動、一端固定的金屬薄片的振動，在形式上正都是諧振動。應該注意，在振幅很大的情形下，上面所說各系統的振動方式比較複雜；振動的振幅愈小，它們愈接近諧振動。

與諧振動非常接近的振動，可以藉助於圖 1-9 所示的機械來產生。在手柄勻速轉動下，被拉緊的線端 A 週期性地上下移動。如果線的長度 l 比半徑 r 大得很多，那末 A 點的運動將非常接近諧振動。我們今後將利用這一簡單的裝置。

注意在決定諧振動時，所指的是平行射影，就是沿圓周運動的各點位置藉助於相互平行並對 AB 垂直的線來劃在直線 AB (圖 1-8) 上。

如果依照下述作法作一圖線，就是沿水平軸表示出中心角 α (圖 1-

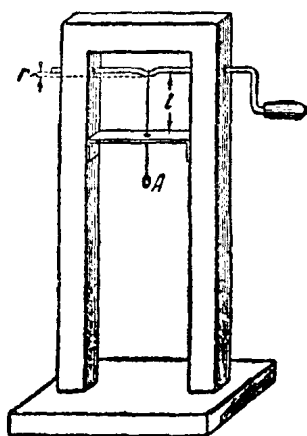


圖 1-9. 用來求得諧振動的機械。轉動手柄時，小環 A 在垂直方向作諧振動（線的長度 l 比軸的凹曲部份的 r 愈大，準確度愈高）。

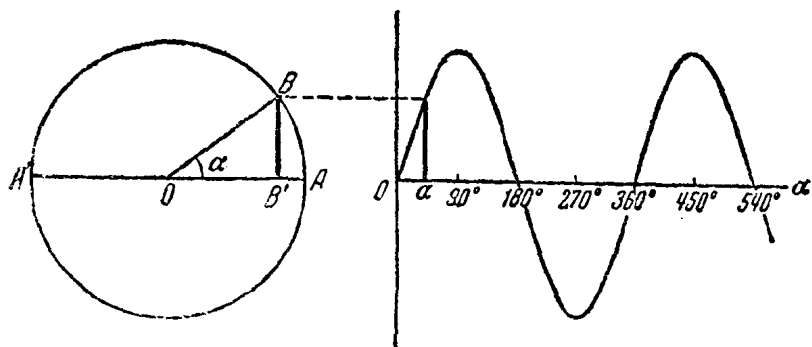


圖 1-10. 正弦曲線的作法。

10), 而沿鉛直軸表示出從轉動半徑 OB 的終端到固定的直徑 AA' 上的垂直線 BB' (角 α 從固定的半徑 OA 算起), 那就得出一曲線叫做 正弦曲線。對每個橫坐標 α , 這曲線的縱坐標 BB' 與角 α 的正弦成正比, 因為

$$\sin \alpha = \frac{BB'}{OB}.$$

將這個作圖與剛才敘述的諧振動的展開圖比較一下, 不難看出, 它們是完全相同的。由此可見, 表示諧振動的“波形曲線”是 正弦曲線。所以諧振動或簡單振動也常常叫做 正弦振動。

在一秒鐘內所完成的諧振動的週數, 叫做這個振動的 頻率。如果擺的週期等於 1 秒 (秒擺), 那末頻率也等於 1。頻率的單位叫做 週 (一秒鐘裏的週數) 或 赫芝——這是為了紀念發現電振盪的赫芝*。關於電振盪我們將在以後談到。通常應用冠詞 千 與 兆 表示一千倍與百萬倍的更大單位:

$$1 \text{ 千週 (千赫) } = 1000 \text{ 週,}$$

$$1 \text{ 兆週 (兆赫) } = 1000000 \text{ 週}$$

$$= 1000 \text{ 千週.}$$

如果週期等於 5 秒, 頻率便是 $\frac{1}{5}$ 週。一般用 T 代表以秒數表示的週期時間, 用 n 代表以週或赫芝表示的頻率, 將有:

$$n = \frac{1}{T}.$$

由此可見, 對於諧振動, 週期 T 的值也就決定了頻率 $n = \frac{1}{T}$ 。但是, 應該記住, 這種頻率與週期間的關係祇說明諧 (正弦) 振動的特性。在另一形式的非諧週期振動中, 雖然它有固定的週期 T , 但沒有一個確定的頻率。以後我們會知道這是什麼意思 (§ 1-17)。所以, 在我們談到帶有 確定頻率的振動時, 永遠是指 諧振動, 而不是指任意形式的週期振動。

* 赫芝 (1857-1894) —— 德國物理學家。

在自然界及工程上，會遇到具有頻率特別不同的機械振動。例如掛在列寧格勒的伊沙基爾輔教堂屋頂下、用來表演傅科*實驗的擺具有約 20 秒的週期 T ，也就是頻率 $n=0.05$ 週；鐵道上車廂在它的彈簧上發生振動的頻率近於 1 週；音叉振動的頻率可以從幾十週到幾千週。物理學家能夠得到所謂超聲振動（我們以後還要談到它），它的頻率可達幾十兆週。分子裏所發生的原子振動可以到達幾百萬兆週。因此機械振動的頻率範圍很大。

在列舉的振動例中，每當談到頻率時，我們總是指所討論的振動是諧振動。

§ 1-6. 相位差。我們要問，用什麼方法能夠區別兩個振幅和頻率都相同的諧振動？拿兩個相同的擺來，並且使它們和鉛直線偏轉的角度相同。如果現在將它們放掉，那末我們得到兩個振幅和頻率相同的諧振動。看起來它們之間沒有任何區別。

但是，如果不是同時將兩擺放掉，我們馬上就看出區別來：兩個振動在時間上將有了差別。在開始時先放掉一個擺，而在它通過平衡位置時，再將第二個擺放掉。也就是 $\frac{1}{4}$ 週期以後，兩個擺將以 $\frac{1}{4}$ 週期的時間差繼續地振動下去（圖 1-11）。

如果我們在離第一個擺開動時半個週期而將第二個擺放掉，兩個振動便相差了半個週期：這時，兩個擺在同一時間通過平衡位置，可是永遠以相反的方向運動着；在它們中，一個向右達到最大的偏轉時，另一個向左達到最

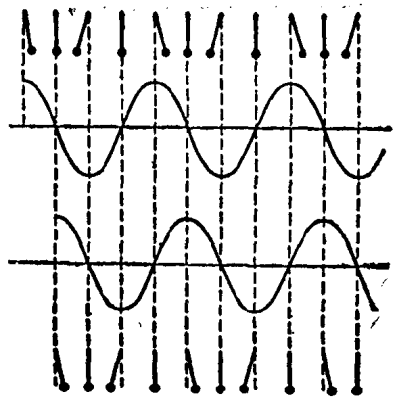


圖 1-11. 相差 $\frac{1}{4}$ 週期的兩個擺的振動。

* 傅科實驗是用擺的擺動平面的轉動來表明地球的自轉。

大的偏轉，倒轉過來說也是一樣(圖 1-12)。

在射影的實驗裏，不難得到這樣時間差的振動。如果把兩個球分別固定在勻速轉動圓盤直徑的兩端(圖 1-13)，那末它們的影子將以半個週期的差別振動着，也就是永遠彼此面對面地運動着，並在同一時間通過當中位置。如要得到 $\frac{1}{4}$ 週期的差別，就必須把兩個球分別固定在彼此夾一 90° 中心角的兩條半徑的端上(圖 1-14)。在這種情形下，當一個影子通過當中位置時，另一個影子是在偏轉最大的位置上。一般情形，影子振動的差別要看兩個球所固定的兩半徑間的夾角佔到整個圓周(360°)部份的大小，也就是所佔週期部份的大小。

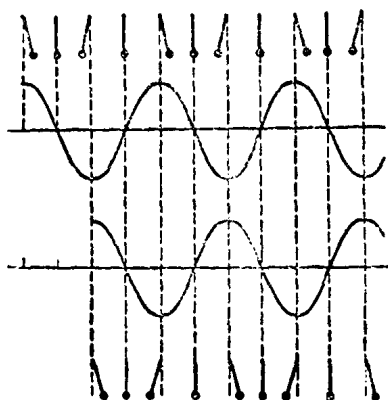


圖 1-12. 移動半個週期的兩個擺的振動。

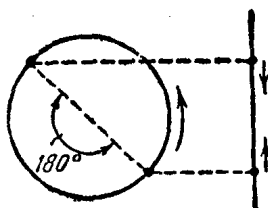


圖 1-13. 180° 相位差的影子的振動。

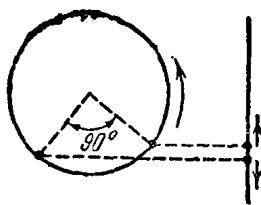


圖 1-14. 90° 相位差的影子的振動。

對於頻率相同，可是在時間上有差別的兩個振動，那就說它們有了相位差。時間上的差別是用週期的部份來表示的，而相位差則是用角的度數來表示的。

如果第二個振動比較第一個振動遲了 $\frac{1}{8}$ 週期，這就是說它在相位上滯後 $360 \times \frac{1}{8} = 45^\circ$ ，或者說相位差是 -45° 。如果第二個振動在第

一個振動前面 $\frac{1}{8}$ 週期。那就說它在相位上超前 45° ，或者相位差是 $+45^\circ$ 。

如果兩個振動相互間沒有遲滯發生，那末它們叫做同相振動，或者說，它們是同相位的。如果它們當中有一個遲了半個週期，就說振動發生反相。

我們看到，相位差的概念是表示兩個諧振動在時間對比關係上的特性。但也可以說到一個單獨諧振動的相位。從任意選定的時刻，用角度來量度所經過的時間叫做諧振動的相位。顯然，這時一個振動週期仍然含有 360° 。

由此可見，振動的相位決定於用作時間計算起點的那一時刻。兩個振動的相位差和這個任意選定無關，它表示存在於所研究的兩個振動之間一定差別的特性。

§ 1-7. 擺振動的動力學。現在我們來看一看，當擺用任一方法（推動、偏轉）被迫離開平衡位置以後，有什麼力使擺發生振動。

當擺靜止在平衡位置時，鉛直向下作用在擺錘上的重力和擺線的張力互相平衡。在偏轉的位置（圖 1-15）時，重力 P 和沿擺線方向的張力 Q 成一角度。將重力分解成兩部份：沿擺線的（ P_2 ）及和擺線垂直的（ P_1 ）。分力 P_2 和線的張力 Q 互相平衡。分力 P_1 總指向平衡位置；它好像企圖回復到這個位置上，所以它常常叫做回復力。擺的偏轉愈大， P_1 的數值也愈大。

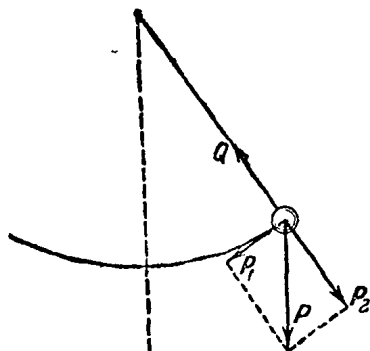


圖 1-15. 作用於擺上的力。

於是，在振動中的擺開始離開了平衡位置時（譬如說向右），就出現了使它運動減速的力 P_1 ，偏轉愈遠，這一減速力也就愈大。最後這力使它停止並強迫它回轉到平衡位置。但是，在接近這個位置的時候，力