

197552

发电厂汽轮机叶片 的振动試驗

苏联B.T.茹諾夫著

水利电力出版社

44
4405

發电厂汽輪机叶片的振动試驗

苏联 Б.Т. 茹諾夫著

李 振 清譯 柳 椿 生校

水 利 电 力 出 版 社

內 容 提 要

本書敘述在发电厂运行条件下汽輪机叶片振动試驗的方法和实际經驗；說明叶片和叶輪振动的基本概念；介紹作叶片振动試驗时几种最常用的仪器，以及調正叶片和叶輪的經驗。

本書可供发电厂和調正机构中从事汽輪机叶片振动試驗工作的工程技术人员使用。

本書对高等工业学校动力系和机械系汽輪机专业的大学生也有参考价值。

В. Т. РУНОВ

ВИБРАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЛОПАТОЧНОГО АППАРАТА
ПАРОВЫХ ТУРБИН НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1954

发电厂汽輪机叶片的振动試驗

根据苏联国立动力出版社1954年莫斯科版翻譯

李 振 清譯 柳 椿 生校

*

1142R239

水利电力出版社出版(北京西郊科學路二風溝)

北京市書刊出版登記證許可能出字第106号

水利电力出版社印刷厂排印 新华書店发行

*

850×1168 $\frac{1}{32}$ 开本* 6 $\frac{1}{2}$ 印張* 166千字* 定价(第10类)1.10元

1958年8月北京第1版

1958年8月北京第1次印刷(0001—2,100册)

前 言

汽輪机的实际运行經驗說明，汽輪机的事故以起因于叶片部分的最多。

叶片的安全性与許多因素有关，其中最主要的因素是：

- 1) 叶片材料的机械性能，如：疲劳极限等；
- 2) 叶片加工的质量；
- 3) 叶片的安裝质量——叶片紧固在叶輪上的质量(在叶根，叶輪槽，鎖金等处的)和叶片組的組合的质量(复环和拉金，捻铆和焊接的质量等)；

4) 运行时对叶片的扰动力的大小和該力在叶片内引起的应力的大小；

5) 叶片和叶輪从危险的共振振动中調开的程度。

由于叶片是用疲劳极限很大的高級鋼制造的，所以叶片材料的机械性能是相当高的。

应檢查叶片的制造和加工的质量是否与制造厂所规定的技术条件相符合，檢查的项目如下：

- 1) 与图紙的尺寸是否符合；
- 2) 打磨的质量(要沒有缺口、凹坑、裂紋和擦伤等)；
- 3) 在叶片的根部和頂部(铆釘处)的过渡部分是否作成圓弧形；

4) 穿拉金的孔眼有沒有刮过圓角；

5) 穿拉金的孔眼的尺寸是否正确；

6) 叶根制作的正确程度等。

檢查叶片的安裝质量时会遇到很多的困难。

檢查叶片安裝质量的主要方法如下：

- 1) 使用塞尺檢查叶片相互之間和复环与叶片之間的緊貼程

度；在相鄰兩葉根之間或葉片與隔金之間，0.04公厘厚的塞尺片應不能插入；

2) 用敲打驗聽的方法檢查復環的捻鉚質量；

3) 用銅棒撬的辦法檢查拉金的焊接強度；

4) 借助於振動試驗，比較同一級上各葉片組的頻率來檢查葉片的安裝質量。

當汽輪機運行時，有許多恆定的力及在大小和方向上交變的力作用在葉片上。恆定的力有：產生拉伸應力（有時為彎曲應力）的離心力和引起彎曲應力的蒸汽平均作用力。由這些力所引起的應力都稱之為靜應力。

關於動應力的問題，應強調地指出：用計算方法來確定在運行中作用在葉片上的交變擾動力這一問題，一直到現在還沒有能得到解決。目前只能找出擾動力是受哪些因素的影響和受影響的程度如何。問題是由于擾動力的變化與汽輪機通汽部分的構造、部件加工製造的精確程度，以及隔板和汽輪機轉子裝配的準確程度等因素有關而複雜起來了。

實際測量擾動力，是較為可靠的辦法，但需要用特殊的試驗儀器並且試驗的時間也較長。

正如所有的物體一樣，葉片和葉輪都具有一定的固有振動頻率。這種頻率有可能與相應於汽輪機轉速的激振頻率（工作頻率）相重合（也就是發生共振現象）。

共振時，即使擾動力不大，也能產生一種超過葉片金屬材料疲勞極限的應力，以致使葉片發生事故。

為了解決葉片的安全性問題，設計者經常採取的方法有二：**降低靜彎曲應力和調整葉片。**

當設計葉輪尺寸不大的葉片時（在小容量的汽輪機中），葉片能成功地設計成所受的負荷不大，即使在共振時，其應力也不致超過疲勞極限。

此外，這類葉片往往還具有較高的固有振動頻率，而與工作頻率的危險倍數距離得很遠。

第二种方法——調整叶片的方法，对于大容量汽輪机后几級的長叶片來說，是最适宜的方法，因为大容量汽輪机后几級叶片由于構造上尺寸的限制，它們的頻率不可能提得过高。

采用調整叶片的方法，便有可能簡化通汽部分的構造，縮小汽輪机的尺寸和降低造价。如果頻率的共振安全率很大，那么設計叶片时便可以允許它們承受較大的应力，因之叶片就不必要做得又重又厚。

目前，所有苏联汽輪机制造厂生产的汽机，其各級叶片都已从共振頻率中調开。

但是实际經驗說明，叶片的振动特性并不是永久不变的，而是常常发生变化。

叶片材料的疲劳极限和叶片的振动衰减率也是随着時間在下降的，这就使叶片运行的安全性降低。同样，叶片的侵蝕-腐蝕，捻鉚部分的松弛，拉金焊接的变質和叶輪槽內叶片安裝質量的变坏。都能改变叶片的頻率。

在发电厂中，当將叶片安裝好了之后，实际測得的頻率特性往往与原制造厂从計算中求得的，或者甚至是在試驗台上試驗所得的頻率特性相差极大。

因此，目前在各发电厂中就广泛地推行了汽輪机动叶片的振动試驗，以測定振动特性。

振动特性包括：

1) 叶片的各种振动頻率(切綫的、軸向的、扭轉的振动頻率)，其中包括基本音調和其他各种較高的音調；

2) 当叶片振动时，叶片的弯曲形狀。

在下列情况下应进行叶片的振动試驗：

1) 換裝叶片后；

2) 大修时；

3) 叶片发生事故时。

当判断叶片运行的安全性时，必須考虑下列各因素：

1) 設計时所采用的弯曲应力和离心力；

2) 叶片的运行历史；同一型式的叶片在其他汽輪机上曾否发生过事故；

3) 叶片部分在檢查时的状态；

4) 叶片已經运行的期限；

5) 叶片、复环和拉金的材料；

6) 叶片的振动特性；

7) 隔板和汽輪机通汽部分其他零件的状态。

对于叶片安全运行来講，另一重要条件就是要保持汽輪机的运行方式正常。

叶片振动的資料，对制造厂消除叶片部分在設計上的缺陷来講，是一有价值的参考資料。

經常監督叶片振动的安全性，可以預防叶片发生事故和檢查叶片的安裝質量等。

因之，在苏联各发电厂中推行叶片振动特性的試驗檢查工作，已成为一件完全必要的措施了。

本書研究在发电厂的生产条件下进行汽輪机叶片部分的振动試驗的問題。

書內談到作者本人的經驗和某一电力系统汽輪机校整機構的經驗，在該电力系統中，汽輪机的叶片振动試驗几乎已成为每台汽輪机在大修中不可缺少的一个組成部分。

由于发电厂工作人員在进行叶片振动試驗时，必須具有叶片和叶輪的振动以及一般振动方面的基本知識，因此，在本書的头几章內就論述了这些問題。在这几章內，还闡述了在作叶片振动試驗时将实际应用到的許多基本問題。

在第五章內，敘述了作叶片振动試驗用的各种仪器的主要类型。

因为目前在发电厂和制造厂中，以及在各科学研究和校整機構中，使用得最为广泛的仪器就是莫斯科电力系统ЛЦЭМ型(莫斯科电业局中心試驗所型)振动仪器，所以它的構造和使用方法在本書內也就講得較為詳細。

在第六，七和八章內（振動試驗的方法，試驗結果的整理和葉片的調整），敘述用各種儀器在不同的試驗方法下如何進行振動試驗的一般問題。

本書的最後兩章（九和十）對汽輪機葉片的振動試驗和調整工作作了許多具體的經驗介紹。

本書對汽輪機葉片和葉輪振動方面的各種理論性問題，未作詳細的闡述，也根本未談及葉片強度和振動的計算問題。讀者如欲深入地探討上述諸問題，可參閱 A. B. 列文所著的“汽輪機的動葉片和葉輪”一書（1953 年蘇聯動力出版社出版）。

目 錄

前言.....	(1)
第一章 振动理論的基本概念.....	(9)
1-1 振动, 振幅, 頻率, 位相.....	(9)
1-2 振动的合成。李沙如图形.....	(11)
1-3 振动时的作用力。振动类型.....	(14)
1-4 衰减振动。衰减率.....	(15)
1-5 在有周期性扰动力情况下的振动.....	(16)
1-6 当扰动力的頻率变化时, 强迫振动振幅的变化。 临界頻率和共振的概念.....	(20)
1-7 振动位相差与强迫振动頻率和固有振动頻率之比的 变化关系.....	(23)
第二章 叶片的振动.....	(24)
2-1 各种引起叶片振动的力.....	(24)
2-2 叶片的振动类型.....	(26)
2-3 單一叶片的切綫振动.....	(27)
2-4 叶片組的切綫振动.....	(28)
2-5 叶片的軸向振动.....	(33)
2-6 叶片的扭轉振动.....	(34)
2-7 叶片各种振动方式危險性的評价.....	(35)
2-8 振动倍率的概念。在各不同倍率下安全地調开 第一音調切綫振动的共振的条件.....	(37)
2-9 安全地調开叶片高頻率振动的共振的条件.....	(40)
2-10 离心力对叶片振动頻率的影响.....	(42)
2-11 临界轉速和共振安全率.....	(44)
第三章 叶輪的振动.....	(45)
3-1 叶輪的振动方式.....	(45)
3-2 离心力对叶輪軸向振动頻率的影响.....	(48)

3-3	靜止波和行進波·····	(49)
3-4	行進波和靜止波兩者危險程度的比較·····	(52)
3-5	叶輪的共振轉速和臨界轉速·····	(53)
3-6	對調開叶輪 - 叶片系統軸向振動共振的評價·····	(56)
第四章	叶片用复环和拉金作網形 (交錯) 和 環形連固后的振動特性·····	(58)
4-1	叶片用复环和拉金連固的类型和叶片的振動·····	(58)
4-2	網形和環形連接的叶片的振動类型·····	(59)
4-3	對網形連接的叶片振動安全性的評價·····	(62)
第五章	試驗汽輪机叶片振動特性用的各种裝置·····	(63)
5-1	振動試驗的任务·····	(63)
5-2	對振動試驗裝置的要求和作叶片振動試驗的基本方法·····	(64)
5-3	固定型振動試驗裝置·····	(66)
5-4	採用自由振動法和自激法的攜帶型振動試驗裝置·····	(68)
5-5	採用共振法的攜帶型振動試驗裝置·····	(76)
5-6	ΠB-2M 型万能振動試驗裝置 ·····	(77)
5-7	ΠB-3 型万能振動試驗裝置 ·····	(91)
第六章	振動試驗的方法和程序 ·····	(94)
6-1	收集各种統計資料·····	(94)
6-2	叶片和叶片組的标志方法·····	(96)
6-3	叶片部件的檢查·····	(97)
6-4	工作地点的布置·····	(101)
6-5	試驗設備的準備·····	(102)
6-6	用自由振動法进行叶片的振動試驗·····	(106)
6-7	用共振法进行叶片的振動試驗·····	(109)
6-8	用自激法进行叶片的振動試驗·····	(114)
6-9	獲得各种一定类型的和方式的振動的方法·····	(115)
6-10	对各种試驗方法的評價·····	(119)
6-11	确定汽輪机叶片的必須进行的振動試驗項目·····	(120)
6-12	某級叶片的振動頻率波帶·····	(121)
6-13	叶片的檢修·····	(122)
6-14	衰减率的測定·····	(124)

第七章 試驗結果的整理	(127)
7-1 叶片組檢查性振動試驗結果的整理	(127)
7-2 各級叶片振動特性圖的繪制	(132)
7-3 網形或環形連接的叶片檢查性振動試驗結果的整理	(133)
7-4 網形連接的叶片的共振圖	(136)
7-5 葉輪試驗結果的整理	(137)
7-6 完整的振動試驗結果的整理	(142)
第八章 叶片的調整	(144)
8-1 把叶片由第一音調切綫振動共振中調開的方法	(144)
8-2 網形連接的叶片的調整方法	(155)
8-3 調開叶片的軸向振動的共振	(157)
8-4 調開高頻率的共振振動	(158)
第九章 运行对汽輪机叶片頻率特性的影响	(161)
9-1 腐蝕-侵蝕对叶片振動的影响	(161)
9-2 長期运行对叶片振動特性的影响	(167)
9-3 正常运行方式被破坏后的影响	(171)
第十章 振動試驗工作的經驗	(175)
10-1 分組連固的叶片第一音調切綫振動共振 安全率标准在實踐中的評價	(175)
10-2 網形連接的叶片振動安全性的运行經驗	(185)
10-3 当叶輪 - 叶片系統軸向振動調整得不合格时, 有关叶片振動安全性的运行經驗	(191)
10-4 某些高頻率共振振動的危險性	(195)
結束語	(201)
附录	(203)

第一章 振动理論的基本概念

为了使本書的叙述更清楚起見，有必要先簡略地介紹一些振动理論的概念和定义，因为当論述主文时，將會涉及这些概念和定义。

1-1. 振动，振幅，頻率，位相

所謂**振动**，就是一种高速度的周期性往复运动。

例如，用橡皮錘敲一下叶片，就能引起叶片的振动。当汽輪机运行时，叶片的振动就是由脉动的蒸汽流所引起和延續的。

图 1-1 是一种簡單的諧波或正弦波形的振动，在任一瞬时 t 处， x 点（例如，叶片的自由端）的位置可用下列公式表示：

$$x = x_0 \sin \omega t \quad (1-1)$$

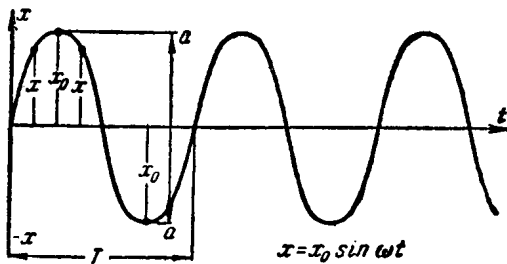


图 1-1 簡單的諧波振动图

产生振动的物体离开其中間位置的最大位移，称为**振幅**（图 1-1 中的 x_0 ）。

在振动时，两个极限位置之間的距离叫做**全振幅**。此时，全振幅就等于兩倍的振幅（距离 $a-a$ 等于 $2x_0$ ）。

完成一个完整的振动所需的時間叫做**振动的周期**。振动的周期通常用“ T ”表示，并用“秒”作为計算的單位。

在一秒鐘內所完成的振动次数叫做**振动的頻率**，以周波/秒

(14) 作为计算单位。振动频率是振动周期的倒数：

$$f = \frac{1}{T} \text{ 周波/秒。} \quad (1-2)$$

为了阐明公式 1-1 内的其余各个数值，设任意点 A (图 1-2) 沿着圆周移动。此时该点的投影 B 就相对着圆心 O 作谐波振动。这些振动的振幅与圆的半径 x_0 相符合。

很明显， B 点的某一初位置可用下列公式表示：

$$x_1 = x_0 \cdot \sin \varphi_0, \quad (1-3)$$

也就是振动的振幅与角的正弦成比例 (因而就叫做正弦波振动)。

在 t 时间内， A 点移动到位置 A_1 处，而点的投影则经过行程 $x_2 (OB_1)$ ，即等于：

$$x_2 = x_0 \sin \varphi = x_0 \sin (\varphi_0 + \omega t), \quad (1-4)$$

式中 ω —— A 点运动的角速度。

从公式 (1-3) 和 (1-4) 可以看出，在振动过程中，点的位置由 φ 角的大小决定， φ 角可顺着 A 点运动的方向从其中间位置计算起 (从图 1-2 上垂直的直径 $a-a$ 计算起)，并称之为振动的位相。

如果点的运动由位置 A 处开始，那么用以表征这个起始位置的角度就叫做振动的初位相 φ_0 。

设有两个角速度为 ω ，最大振幅各为 x_0 和 x'_0 的振动运动，该振动如以数学式表示，可写成下式 [参考公式 (1-4)]：

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 \sin \omega t; \\ x_2 &= x'_0 \sin (\omega t + \varphi). \end{aligned}$$

振动的波形如图 1-3 所示。

从图 1-3 可以看出，第一个振动的初位相等等于零；第二个振动的初位相等等于 φ 。因此，在该情况下， φ 就是两个振动的位相差，也就是说明其中的一个振动过程比另一个振动过程滞后多少。

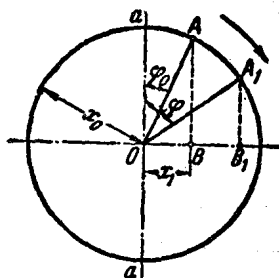


图 1-2 沿圆周运动的点的投影的谐波振动

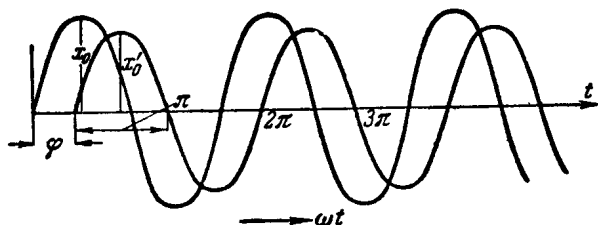


图1-3 两个位相差为 φ 的谐波振动

1-2. 振动的合成。李沙如图形

通常，物体不单纯参与一个振动运动，而是参与好几个振动运动。这些基本的简单的振动，叫做分谐波振动。当把这些简单的振动综合在一起时，就可得到合成振动或合振动。

设有一矩形的弹性棒，它的一端固定住，而另一端处于自由状态（图1-4）。

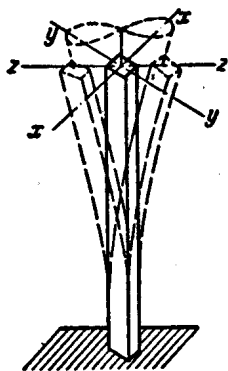


图1-4 一端固定住的棒的振动

如果沿 $x-x$ 或 $y-y$ 对称轴方向敲打这弹性棒，那么这个棒就开始产生自由振动，它的频率决定于棒在 $x-x$ 或 $y-y$ 方向上的刚度或弹性。

但是，如果沿任一方向敲打这个棒，例如沿 $z-z$ 方向，那么这个棒就开始产生一种合振动。也就是沿 $x-x$ 和 $y-y$ 两个基本方向的振动的合振动。

此时，棒端的每一点就形成各种图形，其形状决定于棒在 $x-x$ 和 $y-y$ 方向上两个频率之间的比例。这种图就叫做李沙如图形（Лиссажу），并且是一种点的组合性抛物线，这些点在同一时间内参与了两个谐波振动。

当各分谐波振动的频率相同时，那么由于位相角的关系，李沙如图形的形状是椭圆的，在个别情况下可能变成圆形的或成一直线（图1-5）。

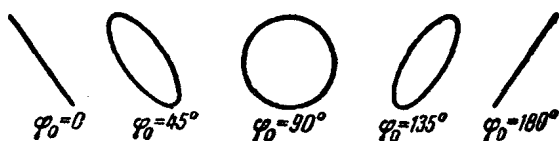


图1-5 由频率相同，而位相角不一致的正弦振动所合成的李沙如曲线图

当振幅，频率和初相位都不相同时，那么产生这两个分谐波振动的点将形成各种复杂的曲线，这些曲线的形状决定于两分谐波振动的频率比及位相差。

如果两分谐波振动的频率是可约数（即为整倍数的关系。——译者），那么李沙如图形就成一密闭形曲线，如果不是可约数——曲线就不是密闭形的。

兹以图 1-6 为例，其中示有两个分谐波振动的图解合成法，其中的一个分谐波振动频率比另一个大一倍。

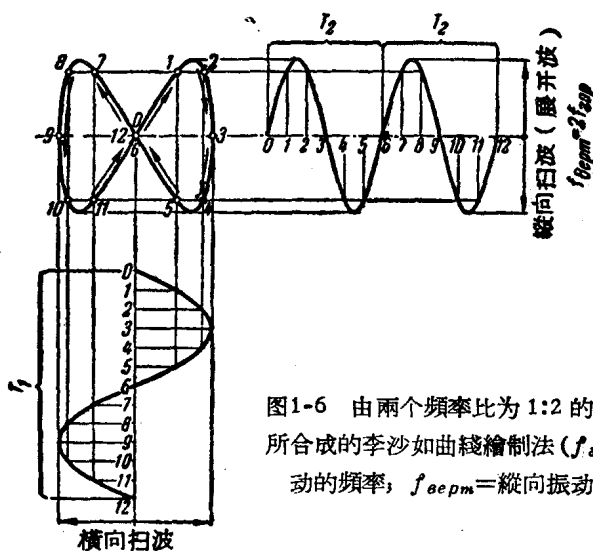


图1-6 由两个频率比为 1:2 的分谐波振动所合成的李沙如曲线绘制法 (f_{sep} = 横向振动的频率, $f_{sep} = 2f_{sep}$ = 纵向振动的频率。)

如图 1-6 所示，如果两个分谐波振动的频率比等于 1:2，那么李沙如曲线就为 8 字形。同时由于初位相不同的关系，8 字形

具有各种不同的形状(图 1-7)。

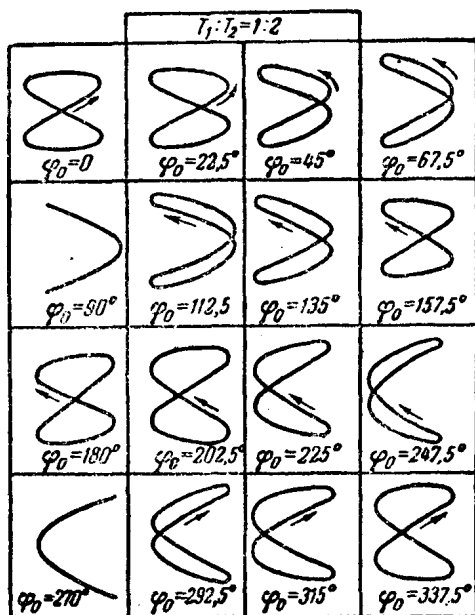


图 1-7 两个分谐波振动频率之比为 1:2 时的李沙如曲线图形

每一完全一定的李沙如图形相对应于分谐波振动频率的每一整数比例(图 1-8)。

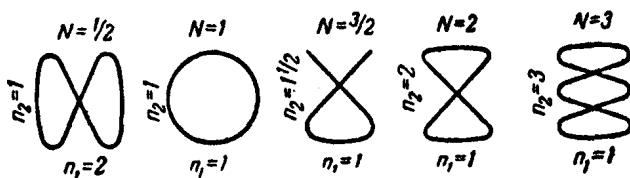


图 1-8 频率比率 $N = \frac{f_{\text{zop}}}{f_{\text{acpm}}} = \frac{n_2}{n_1}$ 时的正弦振动所合成的李沙如曲线图形

知道了李沙如曲线的特性和两个分谐波振动之一的频率后，就不难求出另一个分谐波振动的频率。

在某些情况下，由于高频率谐波的干扰，李沙如图形会变得很不规则。

例如，在图 1-9 中所示的李沙如图形，它們由两个振动波所組成，兩者的頻率相同，但其中之一为純正弦波（橫向扫波），而另一則为高频簡諧波所干扰（縱向扫波）。

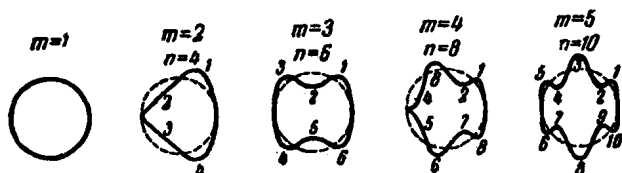


图 1-9 由两个頻率相同的正弦振动波所綜合成的李沙如图形（其中之一受到 m 次諧波的干扰）

由图 1-9 可看出，在这种情况下，要确定分諧波就不是一件毫无困难的事。

如果两个分振动的振幅一样大，但其周期稍有相差，那么就会产生拍动（图 1-10）。此时，合成的振动振幅在开始时衰减到零，然后增长到某一最大值，之后再重新衰减，这样重复不已。

拍动的頻率等于两个分振动頻率之差。

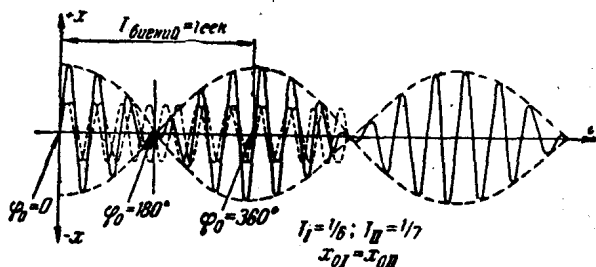


图 1-10 有拍动現象的振动曲綫

1-3. 振动时的作用力。振动类型

在一般情况下，任一振动受有三种作用力：

- 1) 維持振动的力——彈性力；
- 2) 引起振动的周期性作用力——抗动力；
- 3) 抑止振动的作用力——介質的阻力。