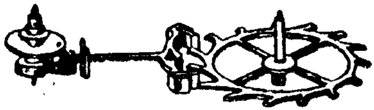
〔苏〕Ф. В. 德洛兹多夫教授著

计时仪器

摆輪—游絲调速器計祙



輕工业出版社

內 容 提 要

本書着重論述了鐘表擒縱机構對擺輪-游絲系統的作用，并對帶有擒縱机構的擺輪-游絲系統提供足够的計算資料；同时，還提出了擒縱机構的評價標准。這些材料在國內外的技术文献中尙不多見，對我國進一步提高鐘表机構的設計質量將有很大帮助。

本書可供精密儀器工業的設計师、鐘表設計人員，以及高等院校师生等參考之用。

ПРОФ.Ф.В.ДРОЗДОВ

ПРИБОРЫ ВРЕМЕНИ

ОБОРОНГИЗ—1940

本書根据蘇聯國防工業出版社莫斯科1940年版譯出

計 时 仪 器

擺輪-游絲調速器計算

〔蘇〕Ф.В.德洛玆多夫教授著

刘季民譯　范乘德校

*

輕工业出版社出版

（北京市广安門內白广路）

北京市書刊出版業營業許可證出字第 [illegible] 号

輕工业出版社印刷厂印刷

新華書店發行

*

787×1092公厘 1/32 · $3\frac{10}{32}$ 印張 · 1插頁 · 72,000字

1959年8月第1版

1959年8月北京第1次印刷

印數：1—2,600 定价：(10)0.50元

統一書號：15042-672

計时仪器

擺輪—游絲調速器計算

〔苏〕Ф.В.德洛兹多夫教授著
刘季民譯 范垂德校

輕工业出版社

目　錄

緒　　言

測量时間可以根据在同一条件下多次重复的、亦即具有相同持續时間的某种周期現象来進行，如地球繞自軸的旋轉，摆的振盪，音叉振盪(后者用於測量短时間)等。大家都知道早在远古时代，人們即已利用地球的自轉来測量时間，因为地球的自轉在天穹中造成一种星球的視运动，而且这种自轉与地面上各个观測地点的局部条件无关。現在是把地球繞自軸旋轉一周的持續时間作为时間的基本单位，叫做一晝夜。由於对地球旋轉的計算方法不同，一晝夜的持續时間也不同，故有恒星时与太阳时之区分。

地球繞自軸旋轉一周的持續时間，等於某顆恒星两个連續上中天的时間間隔叫恒星日。春分点(春分时太阳在天穹中所在的那一点)的上中天时刻为恒星日的起点。恒星时用於日常生活很不方便，因为它不符合太阳的視运动和晝夜的划分。

地球繞自軸旋轉一周多（对宇宙而言）的持續时間，等於太阳日两个連續上中天之时間称为眞太阳日。太阳上中天的时刻叫眞中午。眞太阳时也不实用，因为眞太阳日的持續时間在一年之內是不相等的。

为了避免上述缺点，另引用一个按平太阳上中天計的平太阳时。这是假想的一点，它沿着天穹赤道运动，并且能以太阳繞黃道不均匀运动所需的时間(一年)在天穹旋轉一周。平太阳时和眞太阳时之另一区别，是它的一天系从平太阳下中天时刻（平午夜）开始計起，这就符合民用的計时法。必須指出，在1925年以前，平时的天文計时法每天是从平正午

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

时刻（平太阳的上中天）計起；此后天文計时法即与民用計时法一致了。

由於地球除自轉外尚有公轉，所以恒星和太阳两个連續上中天的时間間隔是不相等的，即恒星日不等於平太阳日。在平太阳两个連續上中天的时間間隔內，对恒星而言，地球轉了一周外另大約等於4分鐘的角度。換句話說，地球每年对太阳所轉的圈数比对恒星的少一圈，所以太阳时比恒星时每年少一尺，即每天少4分鐘。恒星日和平太阳日的关系如下：

24恒星时＝23小时56分4.099秒平太阳时，

24平太阳时＝24小时3分56.555秒恒星时。

測量长时間間隔不用日做单位，而用回归年，它等於362.2422平太阳日。測量短时間用小於1秒的时間为单位，如用微秒（等於0.001秒）。

測量时間的仪器不論过去或現在都是根据各种不同的原理来制造的。

計时仪器中多半都有一个能完全等时振盪的物体（如摆錘、摆輪、彈性金属片）；根据振盪次数来測量时間。但一般并不是非安装这种物体不可。如加强石英鐘內用以产生定頻率振盪的来源是加强石英①；薩宾（Сабин）式計时記錄仪是用电容器电荷的数量来測量时間的；布兰日（Буланже）式記时記錄仪是根据物体由一定高度往下墮落的时間来測量时間的，等等。

本書所研究的計时仪器是在其結构中带有产生定頻率振盪的零件或組合体。在这个完成振盪的零件上增加一个振盪次数的計数装置，就可以指示出比一个周期时間还长的时間

① 从水晶礦石結晶體中切出的石英片，在交流電場作用上具有很高的振盪頻率。

間隔。显然，这种仪器測量的最小时間間隔不能小於半个振盪周期。

因为凡是在有阻力存在的情况下物体所完成的都是阻尼振盪，所以必須有一个能保持系統振盪的裝置。显而易見，要保持振盪和帶动計数机构就必然要消耗能量，所以計时仪器中应有能量的来源。因此，标准的机械式計时仪器（鐘表机构）应有下列几个主要部分：

1. **調速器** 用来完成严格的等时振盪。这种調速器可以是：摆錘，摆輪-游絲，擒縱矛，彈簧金属片等。

2. **能源** 用来克服机构内部的阻力和保持調速器振盪。可以作为这种能源的有：重物下落的重力，彈簧的彈力，电磁鉄的吸引力等等。

3. **机构** 用来把調速器的振盪运动变为計数器的旋轉运动，幷周期地将保持其振盪所必需的冲量傳給調速器。这种机构叫做擒縱机构（通常擒縱机构的概念中尙包括調速器）。

4. **振盪次数的計数器** 它是由齿輪系統組成（称为鐘表机构的齿輪系統）。此机构的每根軸在各自的时間間隔中都有一定的轉数，以便計算时、分、秒，有时也計算长时間单位，如日、月、年或短时間单位，如0.1、0.01、0.001秒。

有时在計时机构上增加些补助裝置来确定时間：打点机构，带演奏的打点机构，信号和触点机构等等。

如上所述，机械式計时仪器中可以采用下面調速器的任何一种：

（1）摆錘；（2）摆輪-游絲系統；（3）彈性金属片；（4）擒縱矛。

摆錘作为調速器仅仅用在固定式鐘表机构中；彈簧片（格普片）用在計量十分之几秒的計时仪器中，它只工作很

短一段时間間隔，即在长时間內取用一段时間間隔。擒縱矛沒有自振的頻率，它一定要和擒縱輪一起工作。擒縱矛在計时仪器中很少用，工作时間不长，可以用来确定十分之几秒的时間間隔。

在計时仪器中最常用的是摆輪-游絲系統。这种調速器用在一般准确度的固定式或携带式机构中，也可以用在每晝夜准确度达到 0.01 秒的精密机构中。摆輪-游絲系統允許选擇振盪頻率的范圍很广，所以在标准振盪周期的一般鐘表中和計算到0.01秒的机构中都采用它。此調速器不仅在一般鐘表中和航海天文鐘內广泛应用，而且在有鐘表机构的仪器中（自动記錄仪，繼电器，信管，測速仪等等）也广泛应用。

有关摆輪游絲系統的振盪理論問題，在技术文献中已有詳尽的闡述。但是它們大都把摆輪-游絲系統看作是和擒縱机构不相关的，而对擒縱机构对系統的作用注意的也不够。因此得出的結論幷不是完全正确的，因而就不提供出足够的計算資料。

本書是“計时仪器”課程之一部分，曾在莫斯科鮑曼机械制造学院講授过。本書提出了带有擒縱机构的摆輪-游絲系統的計算方法，以及評价擒縱机构好坏的标准。据作者所知，本書所闡述的材料是在国內外的技术文献中都不曾見过的。

一、摆輪-游絲系統的諧振盪及其在相面上的表示法

标准鐘表机构中，最常用作調速器的振盪系統是由摆輪-游絲組成的（图 1）。此系統只有一个自由度，因此若采用

广义座标(按拉格兰日)来表示，譬如以离开系統平衡位置的偏角φ来表示，那么我們即完全可以决定此系統所有各点的位置。系統的振盪是由於扭紧游絲最后所儲存的位能，而产生的力之作用結果。因此力含有位能，故若以V来表示位能，而以Q表示相应於φ角的广义力，则有：

$$Q=-\frac{\partial V}{\partial \varphi}$$

因为振盪系統是在含有位能的力作用下，而且系統中的相互关系并不直接与时間有关，所以这种系統是独立的貯藏系統。这样的系統，我們用拉格兰日方法可以把它写成广义座标φ的运动微分方程式。

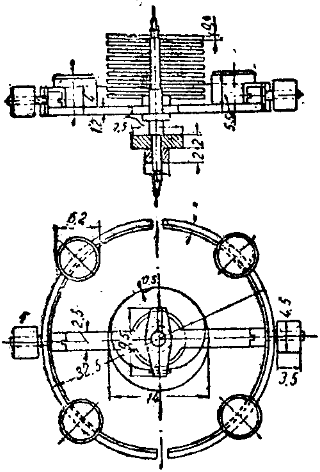


图1 航海鐘的摆輪游絲系統

此方程式为：

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\varphi}}\right)-\frac{\partial K}{\partial \varphi}=Q,$$

式中 K——系統的动能；

φ——广义座标；

Q——广义力。

摆輪游絲系統的动能等於：

$$K=\frac{1}{2}J_6\omega_6^2=\frac{1}{2}J_6\dot{\varphi}^2,$$

式中 J_6——摆輪轉动慣量；

ω_6——摆輪角速度。

系統的位能为:

$$V=\frac{1}{2}M_0\varphi^2,$$

式中　M_0——游絲扭轉一个弧度所产生的力矩。

有了动能和位能方程式可以写出运动方程式来。先求出:

$$\frac{\partial K}{\partial\dot{\varphi}}=J_6\dot{\varphi};\quad \frac{\partial K}{\partial\varphi}=0;\quad \frac{\partial V}{\partial\varphi}=M_0\varphi.$$

按拉格兰日定理得:

$$\boxed{J_6\ddot{\varphi}+M_0\varphi=0,} \tag{1}$$

这就是諧振盪运动的二阶微分方程式，玆取:

$$\frac{M_0}{J_6}=n^2,$$

式中　$n=\frac{2\pi}{T}$——周期的頻率，则可得出通解:

$$\varphi=A\cos(nt)+B\sin(nt);$$

当 $t=0$，即相当於$\varphi=\varphi_0$时，得:

$$A=\varphi_0$$

取導函数:

$$\dot{\varphi}=-A\cdot n\sin(nt)+B\cdot n\cos(nt);$$

当　$t=0$，即相当於$\dot{\varphi}=\dot{\varphi}_0$时，得:

$$\dot{\varphi}_0=B\cdot n,$$

或者

$$B=\frac{\dot{\varphi}_0}{n}.$$

於是其通解改成:

$$\boxed{\varphi=\varphi_0\cos(nt)+\frac{\dot{\varphi}_0}{n}\cdot\sin(nt).} \tag{2}$$

通解同样可以写成下列形式:

$$\boxed{\varphi=C\cdot\cos(nt+\alpha);} \tag{3}$$

$$\boxed{\dot{\varphi}=-C\cdot n\cdot\sin(nt+\alpha),} \tag{4}$$

由此

$$\left(\frac{\varphi}{C}\right)^2+\left(\frac{\dot{\varphi}}{C\cdot n}\right)^2=1,$$

或者

$$\frac{A^2+B^2}{C^2}=1,$$

由此可得:

$$C=\sqrt{A^2+B^2}=\sqrt{\varphi_0^2+\left(\frac{\dot{\varphi}_0}{n}\right)^2};$$

$$\tan\alpha=-\frac{\dot{\varphi}_0\cdot C}{C\cdot n\cdot\varphi_0}=-\frac{\dot{\varphi}_0}{n\cdot\varphi_0}=-\frac{B}{A}.$$

由此可見，在摆輪游絲系統中，摆輪对平衡位置的偏角可以用正弦綫来表示，而为了表示这个运动，必需已知下列因素:

C——最大的偏角或者摆輪的振幅;

n——周期的頻率(在2π秒中的振盪次数);

α——初始相位。

如果在x座标軸上取φ值，在y座标軸上取$\dot{\varphi}$值，則所得之座标图为相面图。φ和$\dot{\varphi}$所組成的面叫相面。这个面

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

上的一点就相当於系統的一个状态，而系統的一个完全已定的状态就相当於相面上的一个点。

由諧振盪运动方程式中消去时間 t 后：

$$\varphi = C\cdot\cos(nt+\alpha);$$

$$\dot{\varphi} = -Cn\sin(nt+\alpha);$$

由此得：

$$\boxed{\frac{\varphi^2}{C^2}+\frac{\dot{\varphi}^2}{C^2n^2}=1.} \qquad (5)$$

利用这个方程式可以把諧振盪运动表示在相面上。不难看出这是，一些有一定半軸比例关系的相似橢圓方程式（图2）。只要給 C 一个数值，就可以得到一个相当於一定初始条件的橢圓。整个相面上充滿着一个个相互套着的橢圓。

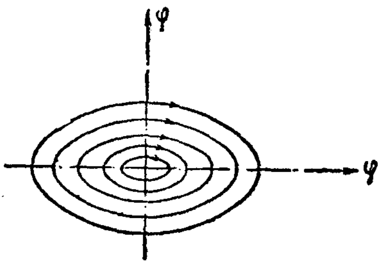


图2 諧振盪运动在相面上的表示法

当$\dot{\varphi}=0$ 和$\varphi=0$ 时，橢圓是一个点。在座标軸方向已选定的情况下，相面上的点将顺时針运动，因为当$\dot{\varphi}>0$时φ增加，当$\dot{\varphi}$为負值时($\dot{\varphi}<0$)，φ減少。

若将角速度$\dot{\varphi}$的比例选得使

$$\frac{\dot{\varphi}^2}{n^2}=\dot{\varphi}_1^2$$

則得：

$$\boxed{\varphi^2+\dot{\varphi}_1^2=C^2.} \qquad (6)$$

这个关系式是一个半徑为C的圓周方程式(6)，而C是振

盪的振幅：$C=\varphi_0$（图3）。

由三角形OAB（图3）得：

$$(OA)^2=(OB)^2+(AB)^2$$

或用其值代替OA，OB和AB：

$$\varphi_0^2=\dot{\varphi}_1^2+\varphi^2=$$

$$=\frac{\dot{\varphi}^2}{n^2}+\varphi^2,$$

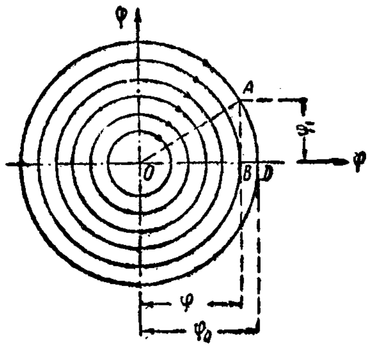


图3　表示諧振盪的特殊情况

由此

$$n^2(\varphi_0^2-\varphi^2)=\dot{\varphi}^2,$$

於是求得 B点的角速度$\dot{\varphi}=\omega$：

$$\boxed{\omega=\dot{\varphi}=\sqrt{\frac{M_0}{J_6}}\cdot\sqrt{\varphi_0^2-\varphi^2}.} \tag{7}$$

当　$\varphi=0$时，最大的角度是在O点，即：

$$\boxed{\omega_{max}=\varphi_0\sqrt{\frac{M_0}{J_6}}.} \tag{8}$$

当　$\varphi=\varphi_0$时，最小的角速度是在D点，即：

$$\omega_{min}=0.$$

沿橢圓（或圓周）轉一整周所需的时間 $T=\frac{2\pi}{n}$，由此：

$$\boxed{T=2\pi\sqrt{\frac{J_6}{M_0}}} \tag{9}$$

把方程式（9）中之$\sqrt{\frac{M_0}{J_6}}$值代入公式（7）和（8），得：

$$\omega=\frac{2\pi}{T}\cdot\sqrt{\varphi_0^2-\varphi^2}; \tag{7'}$$

$$\omega_{max}=\frac{2\pi}{T}\cdot\varphi_0 \tag{8'}$$

这些关系式也可以直接由諧振盪运动方程式(1)中求得：

$$J_6\ddot{\varphi}+M_0\varphi=0.$$

由此求$\ddot{\varphi}$，得：

$$\ddot{\varphi}=-\frac{M_0}{J_6}\cdot\varphi=\frac{d\omega}{dt};$$

因为

$$\omega=\frac{d\varphi}{dt};\qquad dt=\frac{d\varphi}{\omega},$$

故

$$\omega d\omega=-\frac{M_0}{J_6}\cdot\varphi\ d\varphi,$$

或積分得：

$$\omega^2=-\frac{M_0}{J_6}\cdot\varphi^2+C.$$

当　$\varphi=\varphi_0$和$\omega=0$时；

$$C=\frac{M}{J_6}\varphi_0^2.$$

故

$$\omega^2=\frac{M_0}{J_6}(\varphi_0^2-\varphi^2),$$

由此

$$\omega=\sqrt{\frac{M_0}{J_6}(\varphi_0^2-\varphi^2)}=\frac{2\pi}{T}\sqrt{\varphi_0^2-\varphi^2}.$$

和

$$\omega_{max}=\varphi_0\sqrt{\frac{M_0}{J_6}}=\frac{2\pi}{T}\cdot\varphi_0,$$

这和前面得出的（7），（7'）和（8），（8'）关系式是一样的。

如果我們按照已知在一定时間內（一般一小时）鐘表机构的摆輪碰撞数（半周期数），則这些关系式可以使我們求出摆輪由平衡位置偏移任意一角度的摆輪角速度。

由这些关系式中，可以很容易的求出，摆輪偏移不同角度所需的时間即：

$$\omega=\frac{d\varphi}{dt}=\sqrt{\frac{M_0}{J_6}}\cdot\sqrt{\varphi_0^2-\varphi^2},$$

由此

$$dt=\sqrt{\frac{J_6}{M_0}}\cdot\frac{d\varphi}{\sqrt{\varphi_0^2-\varphi^2}}.$$

積分得：

$$t=\sqrt{\frac{J_6}{M_0}}\cdot\arcsin\frac{\varphi}{\varphi_0}+C.$$

如果由平衡位置开始算起，当$\varphi=0$时，則 $t=0$和$C=0$；此时上述关系式可改写如下：

$$t=\sqrt{\frac{J_6}{M_0}}\arcsin\frac{\varphi}{\varphi_0}=\frac{T}{2\pi}\arcsin\frac{\varphi}{\varphi_0}. \qquad (9)$$

如果由摆輪偏移的極限位置算起，即根据 $\varphi=\varphi_0$时 $t=0$，的条件得：

$$t_1=\sqrt{\frac{J_6}{M_0}}\arccos\frac{\varphi}{\varphi_0}. \qquad (9')$$

二、擒縱机構工作情况，吸引力和釋放力

鐘表机构正常工作时，由擒縱輪傳递給擒縱矛和摆輪系

統的衡量功A_H应等於这个系統損失的总和。如果摆輪、擒縦矛和擒縦輪在各种位置上都是完全平衡的，則其損失是：

1. 把擒縦矛由極限位置移动到开始傳递冲量位置所需要的功。

这个功可能是：（1）純粹摩擦力的功，这是发生在擒縦輪处於静止的情况下（如格拉哈姆擒縦机构）；（2）把擒縦矛从擒縦輪压力下釋放出所需的功，这是在擒縦輪在擒縦矛运动的过程中被迫稍微倒轉以便使擒縦矛由擒縦輪的齿下釋放出来的情况下发生的（如矛形擒縦机构、天文鐘的擒縦机构等等）。此功以A_0表示。

2. 把擒縦矛从擒縦輪压力下釋放出来时产生的碰撞所消耗的功此功以A_y表示。

3. 摆輪和擒縦矛在軸承中的摩擦功，以及摆輪同空气的摩擦功和游絲的彈性滞后功。

这些功分别以下面符号表示

$$A'_T + A''_T + A_T = A_T.$$

这样我們可以写出：

$$\boxed{A_0 + A_y + A_T = A_H.} \qquad (1)$$

必須注意：鐘表机构的调速器是一个具有与初始条件无关的固定振幅的振盪系統(假若此时初冲量有一定的数值)。在初冲量小的情况下，振盪过程不稳定；当此冲量值相当大时，稳定了的振幅就与初冲量大小无关了。初冲量是使振盪系統進行运动所不可缺少的，而以后的冲量是为补偿机构在工作过程中的損失所必需的。（参見前面所述）初冲量可能是在启动时从外面作用在系統上的一个某种力，例如，用外

力把摆錘由平衡的位置上移开，或是通过机构傳递給擒縱輪一个力形成的。在后一种情况下，应事先使机构处於傳递冲量所需的位置上。

擒縱輪是装在鐘表机构最后一根旋轉軸上，在上面作用的有旋轉力矩MX·K。但是擒縱輪的旋轉受擒縱矛的限制，擒縱矛的端部（卡瓦）伸在擒縱輪齿的中間。当擒縱矛摆动时，可以由調速器（摆，摆輪）通过擒縱矛控制擒縱輪，使它每次轉过一定的角度。控制着发条鼓輪使它按时間放松，并使它在一定的短小时間間隔內轉过所需要的角度，而且傳給調速器以能量。能完成这样任务的机构叫做擒縱調速器机构。它由下列基本元件組成：調速器（摆錘，摆輪——游絲），中間零件（擒縱矛卡瓦）和擒縱輪（图4和4a）。

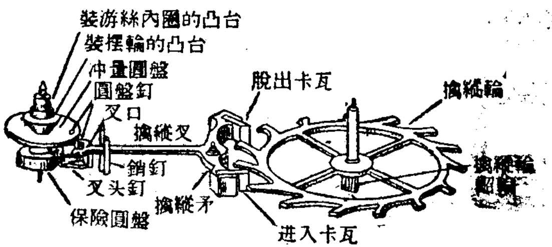


图4　瑞士式擒縱机构示意图

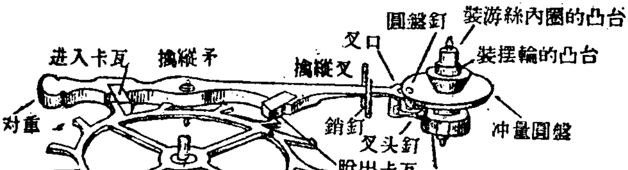


图4a　瑞士式擒縱机构图

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com