

摄影机关键技术研究

刘建华 王守印

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 对双曲柄抓片机构的原理, 误差分析、机构平衡及实现宽频带摄影、抓片爪的设计作了简略的分析。

关键词 摄影机; 抓片机构; 误差分析; 机构平衡; 宽带摄影

摄影机是与主机配套使用的可自动调节快门的间歇式高速摄影机。它具有全自动摄影功能, 在一次执行任务中允许任意改变摄影频率(4~200 帧/秒)。从而, 拓宽了经纬仪的功能。下面就几个关键问题作简略剖析。

1 偏心调节式双曲柄抓片机构

1.1 原理及特点

偏心调节式双曲柄机构是为取得双曲柄机构优点的同时, 克服其缺点, 在双曲柄基础上改进的一种抓片机构。

偏心调节双曲柄机构就是在双曲柄机构连杆的一个铰接点处增加了一个偏心调节环节(如图1所示)。偏心调节环外缘为球面, 与抓片爪(连杆)孔配合, 回转中心在C点, 距C点e处是偏心为 $9.5\text{mm}(\frac{H}{2})$ 齿轮偏心轴轴心D。偏心轴与调节环间用滚动轴承连接, 偏心环节与爪组成三个自由度的转动副。

确切地说, 这里是增加了一个连杆DC, 使机构成为一个“特殊”的五连杆机构。当各零件没有加工误差的情况下, BC点间的距离在齿轮传动的任何相位上始终是 $BD=AE$ 。偏心调节环节不起作用, 该机构就是理想的双曲柄机构。当各零件存在误差时, CD杆就参加到调节运动中来。

机构运动时即反映出五连杆的运动规律, 保证了机构运动过程中不会卡滞、干涉, 能够顺利转

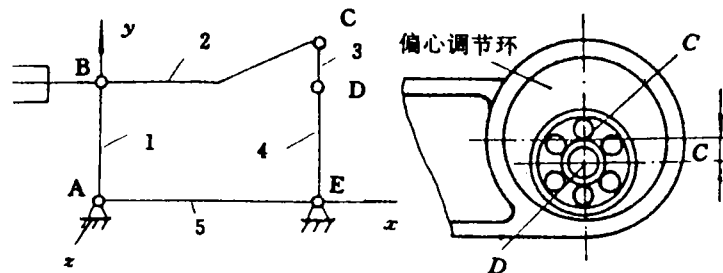


图1 偏心调节双曲柄机构

动。

1.2 误差分析

偏心调节环节可保证抓片机构顺利转动。但在零件必然存在加工误差的情况下将导致爪端产生有害的位移 Δx 、 Δy 。具体分析如下:

1) 齿轮传动误差 $\Delta\theta_1$

模数 $m=1$, 齿数 $Z=45.6$ 级精度 $D6$ 啮合形式时 $\Delta T_{\Sigma}=0.028$ (弧长)。 ΔT_{Σ} 是齿轮转动一周误差的幅值, 取最坏的情况考虑, 齿轮偏角

$$\Delta\theta_1 = \frac{21600}{2\pi r} \Delta T_{\Sigma} = 4.3'$$

2) 齿轮侧隙 ($D6$ 啮合) 造成的转角扰动 $\Delta\theta_2$

$$\Delta\theta_2 = |a_{\phi}| + \delta_{\phi}$$

中心距不可调时

$$K_a = -39.4\mu = -0.0394\text{mm}$$

$$K_s = 23\mu = -0.023\text{mm}$$

$$\Delta\theta_2 = \left| \frac{21600}{2\pi r} K_a \right| + \frac{21600}{2\pi r} K_s = 9.5'$$

3) 杆件 (抓片爪杆) 加工误差 Δl 造成 $\Delta\theta_3$ 给定 $\Delta l \leq |\overline{AE} - \overline{BD}| \leq 0.02\text{mm}$

$$\Delta\theta_3 = \frac{21600}{2\pi r} \Delta l = 3'$$

上述误差按最坏机率同向叠加时,

$$\Delta\theta = \sum_{i=1}^3 \Delta\theta_i = 16.8' = 0.2833^\circ$$

当 $\Delta\theta$ 处在不同位置时, 对爪端 F 的位置影响不同, $\Delta\theta$ 所处的位置是随机的, 但无论 $\Delta\theta$ 位置怎样变化, 对 F 点的影响都不超过以下三种情况。

a) $\Delta\theta$ 误差在后支承处 (见图 2)

b) $\Delta\theta$ 误差在前支承处

c) 爪前后支承同时存在 $\Delta\theta$

影响爪端 F 位移的最坏情况为 a 和 c , 以 a 种情况为例:

$$\Delta Y_{\max} = l_1 \sin \left\{ \arctg \frac{e}{l_2} - \arccos \frac{a^2 + (l_2 - b)^2 + l_2^2}{2 \sqrt{[a^2 + (l_2 - b)^2](l_2^2 + e^2)}} + \right.$$

$$\left. \arctg \frac{a}{l_2 - b} \right\} = 0.00042\text{mm}$$

其中: $D_1 M = a$; $MD = b$, $D_1 D = C$

$l_1 = 30.2$; $l_2 = 48$; $CD = C_1 D_1 = e = 2$

$$a = R \sqrt{2(1 - \cos \Delta\theta)} \cdot \sin \frac{\Delta\theta}{2}$$

$$b = R \sqrt{2(1 - \cos \Delta\theta)} \cdot \cos \frac{\Delta\theta}{2}$$

$$\Delta X_{\max} = 0$$

在图 2 情况下:

$$\Delta X_{\max} = R \sqrt{2(1 - \cos \Delta\theta)} \cdot \cos \frac{\Delta\theta}{2} = 0.047\text{mm}$$

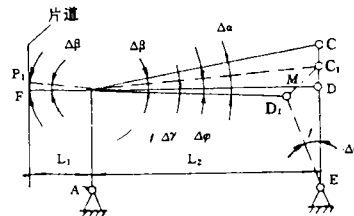


图 2 $\Delta\theta$ 误差在后支承处

$$\Delta Y_{\max} = R \sqrt{2(1 - \cos \Delta \theta)} \cdot \sin \frac{\Delta \theta}{2} = 0.0001 \text{ mm}$$

从以上分析计算可知,爪端位移误差甚小,不会影响顺利抓片,对抓片行程影响亦很小。偏心调节机构是可行的,因为 ΔX 、 ΔY 都很小,该机构仍可按双曲柄机构做运动分析和动力分析,只采用六级齿轮及 1.2 级加工精度就可达到,既保持了双曲柄机构的优点,又可以克服其缺点的目的。

1.3 机构平衡

偏心调节式双曲柄机构是一个平面机构。该机构虽然运动规律基本可以遵循双曲柄机构,但在考虑机构平衡时应按五连杆机构分析。

由于机构在正常工作状态 1,4 杆做匀速转动,2 杆基本做平动,3 杆活动量甚小,角加速度亦可忽略。因此,除启动和停机时,1,4 杆有角加速度之外,工作状态 $\epsilon=0$,这样,就可把惯性力矩平衡条件略去,该机构只要满足:

$$\left. \begin{aligned} \sum m_i x_i &= m x_c = \text{常数} \\ \sum m_i y_i &= m y_c = \text{常数} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 m_i ——机构第 i 点质量; x_i 、 y_i —— m_i 的坐标; x_c 、 y_c ——机构质心坐标。

为使机构满足(1)式条件,首先采用质量替代法将各杆件质量替代于 A、B、C、D、E 五个铰销处。

$$m_A = m_{A1}; m_B = m_{B2} + m_{B2}; m_C = m_{C2} + m_{C3}; m_D = m_{D3} + m_{D4}; m_E = m_{E4}。$$

这里采用的是二点替代法,替代公式为

$$\left. \begin{aligned} m_a &= \frac{l_b}{l} m \\ m_b &= \frac{l_a}{l} m \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

为实施方便,通常 1,4 杆不使其质心处在 A、B 点处,而是把二齿轮及偏心轴组合后平衡,使 S_1 及 S_4 移至 A、E 处,杆 3 是偏心调节环,该件的质心可以在结构设计时落在 D 点。这样,

$$m_A = m_1; m_B = m_{B2}; m_C = m_{C2}; m_D = m_3; m_E = m_4。$$

可见,这样一来,只有 B、C 点有杆 2 的替代质量,但必须指出的是杆 2 的质心不在 BC 的连线上,用公式(2)替代是不准确的。替代质量应为带有复数形式的“广义质量”,用 \tilde{m}_B 、 \tilde{m}_C 表示。替代条件为:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{m}_B + \tilde{m}_C &= m_2 \\ \tilde{m}_B \cdot r_B + \tilde{m}_C \cdot r_C &= m r_s \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

经推导可知:

$$\tilde{m}_B = \left(\frac{l-P}{l} - i \frac{q}{l} \right) m_2$$

$$\tilde{m}_C = \left(\frac{P}{l} + i \frac{q}{l} \right) m_2$$

这样,A、B、C、D、E 各点的质量和替代质量就如图 3 所示。

下一步就是根据平衡条件将各替代质量用平衡质量去平衡。如 A、B 点的质量 m_A 和 m_B 处于不动的铰链中心,因此, m_A 和 m_B 不会影响机构运动过程总质量矩的变化,亦不会引起质心变动,只有 \tilde{m}_B 、 \tilde{m}_C 、 \tilde{m}_D 为活动质量,是必须平衡的,以 \tilde{m}_B 为例:

加平衡质量 m_{p1} 用以平衡 \tilde{m}_B , 使其质心移至 A 点, 则

$$m_{p1}\bar{r}_{p1} + \tilde{m}_B\bar{r}_B = 0$$

$$\bar{r}_{p1} = \frac{r_{p1}}{r_B}(\cos\varphi_1 + \sin\varphi_1)\bar{r}_B$$

(任何一个向量可用另一向量表示)

$$m_{p1}\bar{r}_{p1} = m_{p1}\frac{r_{p1}}{r_B}(\cos\varphi_1 + \sin\varphi_1)\bar{r}_B = \tilde{m}_B\bar{r}_B$$

$$\tilde{m}_{p1} + \tilde{m}_B = 0$$

$$\tilde{m}_B = m'_B + im''_B$$

$$[m_{p1}\frac{r_{p1}}{r_B}(\cos\varphi_1 + \sin\varphi_1)] + (m'_B + im''_B) = 0$$

$$\begin{cases} m\frac{r_{p1}}{r_B}\cos\varphi_1 + m'_B = 0 \\ m_{p1}\frac{r_{p1}}{r_B}\sin\varphi_1 + m''_B = 0 \end{cases}$$

$$m_{p1}r_{p1}l = \sqrt{m'^2_B + m''^2_B} = \sqrt{(1-p)^2 - q^2} \frac{r_B}{l}$$

$$\Phi_1 = \frac{-m''_B}{-m'_B} = \text{tg}^{-1}\left(\frac{1-P}{q}\right)$$

当 r_{p1} 确定后, m_{p1} 即可得知, m_{p1} 与 m'_B 的合成质心位于 A 点。

同理可求得 m_{p3}, φ_3 及 m_{p4}, φ_4 使相应质心位于 D, E 点。

可见, 最后机构的总质心由位于 A, E 点的质量决定, A, E 为不动点, 那么 A, E 两点决定的机构的总质心(平衡后)在机构运动过程中就不会变动, 整个机构达到平衡。

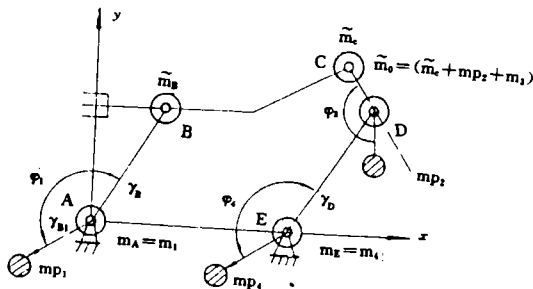


图3 A、B、C、D、E各点的质量和替代质量

2 实现宽频带摄影的关键问题

要满足宽频带摄影, 核心问题反映在无论低频还是高频摄影时, 胶片在一个输片周期内必须是被准确的移动一个实际画幅距 $H(1-\epsilon)$, 而不是 $H=19\text{mm}$, 但, 这个实际画幅距是胶片收缩率的函数, 准确移动一个实际画幅距是抓片爪不能胜任的。定位针不应仅仅起定位作用, 同时应具有辅助抓片爪移动胶片的作用, 这样, 可以解决附加位移带来的矛盾。

事实是, 胶片的运动特性与抓片的运动特性并不完全一致, 不能以抓片爪的运动规律取代胶片的运动规律来分析问题, 详细的分析及实验发现, 胶片除被抓片爪抓动外, 尚存在四种附加位移。

1) 在抓片行程的后 $\frac{1}{2}$ 行程, 由于 Δh 的存在 ($\Delta h = h_2 - h_1$, h_1 ——片孔高, h_2 ——爪齿高) 随摄影频率的变化胶片要前冲不同的距离。(用 $\Delta\delta(f)$ 表示)。

由抓片机构的运动特性可知在 $0 \sim \frac{\pi}{2}$ 这段行程中, 因爪的速度不断上升, 始终是爪的下沿抓着片孔下沿。不考虑弹性变形, 胶片与爪的运动规律相同。 $\frac{\pi}{2}$ 后, 胶片的运动特性变得复杂了, 与爪的运动规律不完全一致。由空程、摄影频率及片道摩擦三项主要因素决定了胶片的运

动规律。因 Δh 的存在可列如下方程:

$$S_{\text{片}} = V_0 t - \frac{1}{2} a t^2$$

$$S_{\text{爪}} = r \sin(\omega t)$$

式中 $V_0 = r\omega$

$r = \frac{1}{2} H$; a —— 胶片在片道摩擦力作用下的加速度

①当片道摩擦力特大或摄影频率比较低的时候,胶片在 $\frac{\pi}{2}$ 时获得的 V_0 。在摩擦力的作用下迅速减小,当其减小的速率大于或等于爪的减小速率时,爪就仍拉着胶片,或相当于拉着胶片前进。

②当片道摩擦不是很大(事实上并不大)摄影频率增加到一定值,胶片获得了足够大的初速度 V_0 ,摩擦力对其形成的减速速率小于爪的减速速率,胶片比爪齿跑的快,以至片孔后沿越过 Δh 追上爪齿后沿(多半是撞上),并“压”在上面,开始受爪齿的“制动”。

2)在 $f \geq 150$ 帧/秒时,抓片終了,由于胶片受爪齿的“制动”作用到使片孔间隔变形,胶片则整体前移。移动量大小取决于摄影频率。记做 $\Delta\delta_{\kappa}(f)$ 实验测得当 300 帧/秒时, $\Delta\delta = 0.10\text{mm}$ 。

3)由于胶片收缩率的存在,导致爪片不能将胶片送到位置,相当于产生一个附加位移量。记做 $\Delta\delta\epsilon$ 。

$$\Delta\delta\epsilon = (n+i-1) \times 4.75\epsilon$$

取 $i=6, n=1$

$$\Delta\delta\epsilon = 28.5\epsilon$$

4)抓片爪爪头圆角(或倒角)过大及其在片道中的位置不适宜,高频摄影时会增加胶片的前冲量。记做 $\Delta\delta_{\pi}$ 。这种情况应在设计时避免。

一般很容易把抓片行程的选择考虑为:抓片行程 = 画幅距 + 空程 - 胶片下冲量。

粗略的看,上式似乎是正确的。实际上,胶片下冲量是摄影频率的函数。因此,抓片行程也是摄影频率的函数,一个抓片机构总不可能选择多种抓片行程。如把上式改成:

画幅距 = 抓片行程 - 空程 + 胶片下冲量就可以明确看出,在选定的抓片行程内,随胶片下冲量不同,将移动不同的画幅距。

正确一点的考虑应该是:

$$H_{\text{实}} = H_{\text{抓}} - \Delta H_0 - \Delta H_{\epsilon} + \Delta\delta_{\pi}(f) + \Delta\delta_{\kappa}(f) + \Delta\delta(f) \pm \Delta\delta_f \quad (4)$$

式中:

$H_{\text{实}}$ —— 实际画幅距

$$H_{\text{抓}} = H(1 - \epsilon)$$

ΔH —— 抓片空程

$$\Delta H = \Delta H_0 + \Delta H_{\epsilon}$$

ΔH_0 —— 胶片收缩率为 0 时的空程(一般取为 0.02)

ΔH_{ϵ} —— 由于胶片收缩形成的空程增加量。

$$\Delta H_{\epsilon} = [1 + 0.25i_{\text{max}}] \epsilon H = 2.5\epsilon H$$

$\Delta\delta_f$ —— 定位完成的辅助位移量

$H_{\text{爪}}$ ——抓片行程

$$H_{\text{爪}} = H(1 - \epsilon_{\text{爪}}) = H(1 - 2.5\epsilon_n)$$

代入公式(4)中

$$H(1 - \epsilon) = H(1 - 2.5\epsilon_N) - \Delta H_0 - 2.5\epsilon H + \Delta\delta_{\text{爪}}(f) + \Delta\delta_{\text{爪}}(f) + \Delta\delta(f) \pm \Delta\delta_T$$

整理并改为:

$$\Delta\delta_T = H(1.5\epsilon + 2.5\epsilon_N) + \Delta H_0 - \Delta\delta_{\text{爪}}(f) - \Delta\delta_{\text{爪}}(f) - \Delta\delta(f)$$

当 $\Delta\delta_T = 0$ 时,

$$\Delta\delta_{\text{爪}}(f) + \Delta\delta_{\text{爪}}(f) + \Delta\delta(f) = H(1.5\epsilon - 2.5\epsilon_N) + \Delta H_0 \tag{2-2}$$

这个等式若成立,则定位针就不必有附加位移作用。但,等式左边均是摄影频率的函数,等式右端又是 ϵ 的函数。使定位针存在 $\Delta\delta_T = 0$ 显然是不可能的。

由公式(3),(4)清楚说明,抓片过程不能够,也不可能十分准确的完成一个实际画幅距的拉动任务。而必须同以定位针完成一定的拉片任务,即抓片爪不能精确完成的部分。

然而,定位针辅助推动胶片并不是在任何条件下都是可以的。

定位针与胶片相接触时,正具有水平最大速度 $V_{\text{max}} = r\omega$ 。因此,要撞击片孔间隔。使片孔间隔斜向受力 F 。力的大小关键取决于撞击时定位针的速度。随摄影频率 f 的提高这位针的速度成几十倍增长。

为此,设想一个办法。这就是在高频摄影时,尽量避免定位针有较大的辅助位移,在低频摄影时允许它有一定的推片任务。

事实的确是可能的。这就是设计和装调定位针时,定位针与抓片在抓片终了时刻的相对位置必须如图 4 所示。 $L_{\text{爪}} = 4.75$ 。

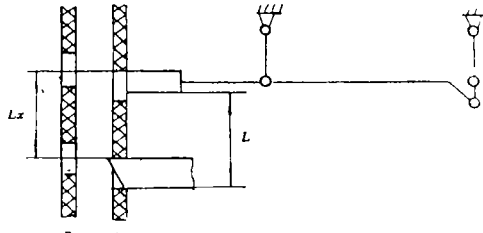


图 4 定位针与抓片终了时刻的相对位置

3 抓片爪的分析与设计

3.1 抓片爪的分析

抓片爪是抓片机构的核心零件。其处在 9.5mm 偏心位置上,在 200c/s 时所受离心加速度为 1500g。因此,它质量大小对两个铰链处轴承有着极重要的关系,其刚度的大小也决定着在高速运转情况下它的固有频率,爪端位移及时间历程响应,也就决定着是否能顺利抓片这一核心问题。

我们对抓片爪采用 CAD 通过 CAP-V 程序优化计算,这里不详述。仅就成型爪的设计复算结果简略介绍如下。

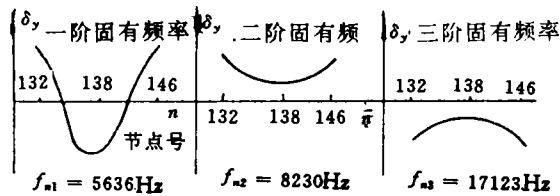


图 5 抓片爪固有频率振型

(1)固有频率及振型

因为固有频率及振型与外载荷无关,故结果对两种力学模型是完全一样的(见图 5)

显而易见,抓片爪的固有频率 f_n 是相当高的,仅就一阶频率而言 $f_{n1} = 5626\text{Hz}$, $f_{\text{工作}} = 200\text{Hz}$ 。因此,根本不必担心抓片爪在工作频率下会产生共振的问题。

(2) 抓片反力引起的动态响应

根据计算结果, 绘制由抓片反力引起的位移场如图 6 所示。

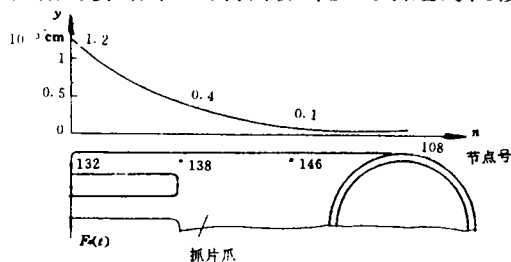


图 6 在抓片反力作用下位移场分布

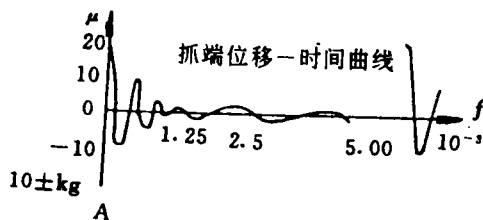


图 7 爪端位移—时间响应

由图线可看出, 抓片爪从开始抓片到 $\frac{\pi}{4}$, 爪端经历了由开始振荡到收敛的自由衰减过程, 这种迅速收敛的特点十分重要, 这可以保证下周抓片时, 不受振荡的影响, 实现反复循环的顺利入孔抓片。

(3) 惯性载荷引起的时间历程响应

可见惯性载荷引起的位移—时间历程响应分为开始的自由振荡和后段的强迫振荡, 实际算的位移 $y_{\max} = 2.5 \times 10^{-9} \text{cm}$, 完全可以忽略不计, 不会对抓片造成影响。

3.2 爪总数的选择

随着摄影频率的提高, 抓片力成平方增长, 胶片片孔间隔的受力亦成平方增长, 要实现 200c/s 一两个爪齿是绝对不够, 为将抓片力分布给多个片孔(每个片孔承力不会超过 700g), 必须采用多爪齿方案, 由于胶片的收缩在多爪齿情况下, 爪齿受力并不是平均的, 而是成等差级数关系, 胶片收缩率愈大, 差别愈大。

每个爪齿的受力为:

$$F_i = \bar{F} + F_c$$

\bar{F} ——每个爪齿平均承受的力

F_c ——胶片收缩造成的受力

其中

$$\bar{F} = \frac{1}{2} n F - 4.75 \times 10^4 \times \frac{\epsilon}{n} \sum (n-1)$$

$$F_c = 4.75 \times 10^4 \times \epsilon (i-1)$$

F ——最大抓片力

n ——单元爪齿数

ϵ ——胶片收缩率

i ——爪齿序号

(片孔间隔刚度为 10^4 克力/mm)

推导后

$$F_i = \frac{F}{2n} - 2.375 \times 10^4 (n-1-2i)\epsilon$$

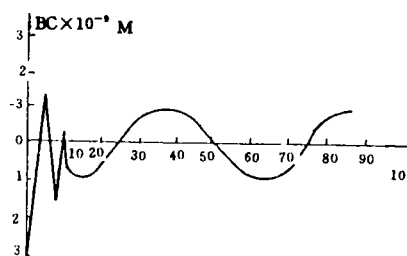


图 8 惯性载荷作用下爪端位移—时间历程响应

表 1

Fi	ε n	1			2			3			4			0		
		4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6
F ₁		322.5	220	14.37	251.2	125	25	180	30	-93.7	108.7	-65	-212.5	393.7	315	262.5
F ₂		370	267.5	191.2	346.2	220	120	322.5	172.5	48.7	298.7	125	-22.5	393.7	315	262.5
F ₃		417.5	31.5	238.7	441.2	315	215	465	315	191.2	488.7	315	167.5	393.7	315	262.5
F ₄		465	362.5	286.2	536.2	410	310	607.5	457.5	333.7	678.7	505	357.5	393.7	315	262.5
F ₅			410	33.7		505	405		600	476.2		695	547.5	393.7	315	262.5
F ₆				381.2			500			618.7			737.5	393.7	315	262.5

单位: F_i (克力), $\epsilon: \frac{X}{1000}$

由表 1 可看出,在胶片收缩率为千分之二时,单边采用 4~6 爪都可。在千分之三时尚可选用 6 爪。如果选爪齿过多将戳孔。本机选用 6 爪(单边)。

Study on Key Technique of Camera in Use for Cinetheodolite

Liu Jianhua, Wang Shouyin

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

In this paper, it is described for the theory of clawing film mechanism with dual crank, analysis of tolerance, mechanism balance and capability of photographing within wide frequency band. The design of clawing film is also analysed concisely.

Key words: Cameras, Clawing film mechanism, Mechanism balance, Tolerances, Wide frequency band photographing