

间歇式高速摄影机双付曲柄摇块抓片机构的分析

杨 绪 罔

摘要: 文中对几种典型抓片机构的性能进行了简单的分析比较,重点分析了双付曲柄摇块抓片机构的结构特点,并寻出其运动特性方程,计算并绘出几种典型抓片机构的运动特性曲线。对具有活动定片针的抓片机构影响像质的因素和提高像质的措施进行了论述。

一、概 况

高速摄影机在现代科学技术各个领域里,做为一种行之有效的记录和测量手段发挥了重要的作用,愈来愈为人们所重视。因此,研究和改进高速摄影机抓片机构的性能,使高速摄影机在各个领域里发挥其更大的作用,将有一定的现实意义。

目前国内外间歇式高速摄影机种类比较繁多。其中以: Photo-Sonics 16mm1W; Photo-Sonics 35mm 4 E; GV63-E; Speedex; 为最有代表性,表1是这几种抓片机构的概况。

对于W型, L型及D型各抓片机构,已有文章对其进行分析。下面重点对M型抓片机构的特点及其运动特性,进行单独分析、计算、比较。图1是双付曲柄摇块(M型)抓片机构的原理示意图。

M型抓片机构与W型抓片机构,在许多地方有相近之处,如: W型抓片爪运动轨迹是个圆,因此抓片爪在入孔及退孔时垂直于胶片运动,而在胶片运动方向上的速度分量为零。这个特点保证了抓片爪能顺利地入孔、退孔,并为定片针入孔定位提供了极为有利的条件。虽然M型抓片爪的运动轨迹是个椭圆,但它的片道是以摇块回转中心M点为圆心,曲率半径为R且通过椭圆长轴两个顶点的圆弧。这就保证了M型抓片机构抓片入孔和退孔时具有W型抓片机构的特点。

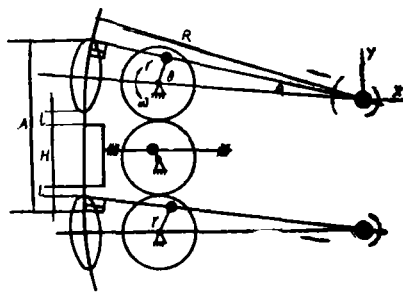


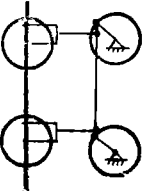
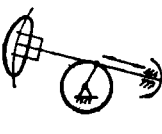
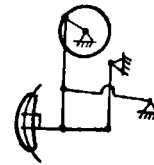
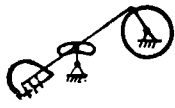




图1 双付曲柄摇块抓片机构原理图 (M型)

在动平衡方面,虽然M型难以获得像W型那样达到全平衡的效果,但经过努力,仍可以获得较满意的动平衡效果。这一点无论是D型还是L型都难以达到。

除了上述几点外, M型还有其他几种抓片机构难以相比的特点:

1. 能比较容易地将两付抓片爪分别设计在定片针上下两侧。这就使总的输片力由上下两付抓片爪分别来承担,每付抓片爪只承担总输片力的一半。
2. 由于每付抓片爪配置在定片针上下两侧,这就缩短了抓片爪与定片针之间最大工作

表1 几种抓片机构的概况表

特 点 项 目	型号 名称	W型 16mm 双曲柄圆轨迹机构 Photo-Sonics 16mm 1W	M型 35mm 双付曲柄摇块机构 Photo-Sonics 35mm 4E	L型 35mm 连杆曲柄摇杆机构 Speedex 35mm	D型 35mm 曲柄杠杆机构 GV63-E 35mm
机构原理图					
抓片爪的运动轨迹					
定片针的结构形式及数量		四枚定片针处于两付抓片爪中间，能有效地将供收两自由片环引起的振动隔离开。（活动定片针）	（同左W型）	两枚定片针处于一端只能将一端供（或收）自由片环振动隔离开。（活动定片针）	（同左L型）
抓片爪结构及数量		双付，每付为双边双爪共计8枚爪齿。	双付，每付为双边三爪共计12枚爪齿。	单付，双边双爪，共计4枚爪齿。	单付，双边三爪，共计6枚爪齿。
最高摄影频率		16mm标准画幅，稳定在500~600帧/秒。实验室可达800~1000帧/秒	35mm标准画幅，稳在360帧/秒，实验室最高可达420帧/秒	35mm标准画幅最高可达240帧/秒	35mm标准画幅最高可达270帧/秒
动平衡效果		经过努力仔细平衡可达全平衡。	比较容易平衡，但达不到全平衡。	动平衡性能差，有振动。	动平衡性能差，振动严重。
运动付润滑及磨损情况		除定片针外，其他各付皆为滚动，润滑较好。	（同左W型）	全部都是滑动摩擦付润滑困难，磨损严重，精度丧失的快。	有滑动付、润滑及磨损情况介于W、M型与型L之间。
特 点		不可调	有可调环节	不可调	不可调

距离 A ，如图 1 所示。这对抓片机构适应胶片的收缩率和片孔的制造精度是有利的。但最大工作距离 A 不可任意的缩短，它受以下几个结构参数的限制：

$$A = 2[(n-1)t_n + e] + H$$

式中 n —— 抓片爪爪齿数； t_n —— 胶片片孔距 ($t_n = 4.75\text{mm}$)

H —— 画幅距 (标准画幅 $H = 19\text{mm}$)； e —— 在抓片终了时，抓片爪距定片针之间最近距离。

由于结构上的限制，在抓片终了时，抓片爪与定片针之间一般隔一个片孔。故 $l = 9.5\text{mm}$ 。这样 A 值只取决于抓片爪爪齿数 n 。从理论上讲，为了提高摄影频率，减少片孔间隔所承担的输片力，希望抓片爪爪齿数 n 尽可能多些。实际上由于片孔和抓片爪都有制造误差增多爪的齿数，不仅不能使抓片爪与片孔间受力按入孔的先后次序呈算术级数减少，相反由于抓片爪齿数多和 A 值的增大，会对胶片片孔的制造精度和收缩率提出更高的要求，造成许多困难。

下面讨论一下反收缩率带来的影响。例如：对双付，每付为双边三爪即 $n = 3$ 时，可算出 $A = 57\text{mm}$ 。

当胶片收缩率 $K = 0.1\%$ 时，在尺寸 $A = 57\text{mm}$ 长度上，由收缩率造成的胶片收缩量 Δ_s 为：

$$\begin{aligned} \Delta_s &= K \cdot A \\ &= 0.057\text{mm} \end{aligned}$$

这个收缩量，对于间歇抓片机构是不容忽视的。任何一种间歇抓片机构，一旦按某一收缩率胶片调定后，它只能适应这种收缩率的胶片，允许其变化范围不应超过 $\pm 0.025\%$ 。例如：当抓片机构是按收缩率 0.1% 的胶片调定的，这个抓片机构只能适应收缩率为 $0.1\% + 0.025\%$ (即 $0.075\% \sim 0.125\%$) 的胶片。胶片收缩率这个因素引起戳孔及断片现象。

3. 摇块 M 点 (见图 1) 在 M 型抓片机构中，是个非常活跃的调整环节。沿着 x 方向调整摇块 M 点，可以获得准确的画幅尺寸 H ，沿着 Y 方向调整 M 点，可以获得抓片爪与定片针之间准确的相对位置尺寸。目前在几种典型间歇式高速抓片机构中，无论是 Photo-Sonics 1W 还是 GV63-E, Speedex, 都不具备这个特点。由于这个调整环节使得 M 型抓片机构具有很好的装配和调整工艺性，且有可能降低某些零件的加工精度。

二、M型间歇式高速抓片机构运动特性的分析及比较

任何摄影机的抓片机构，其运动特性是衡量抓片机构性能的一个极为重要的指标。因此分析其运动特性是有很重要意义的。

下面对 M 型抓片机构的运动特性加以分析比较，图 2 是 M 型抓片机构的双付之一原理图。

在图 2 中，已知 r ， e ， R 以及曲柄以 ω 绕 O 做匀速旋转，根据图 2，可以比较容易推导出 φ 与其他参量的关系。那么对 φ 一次微分就可以求出抓片爪的角速度，对 φ 二次微分就可以求出抓片爪的角加速度。求出抓片爪的角速度及角加速度，自然抓片爪在片道中的速度 v 和

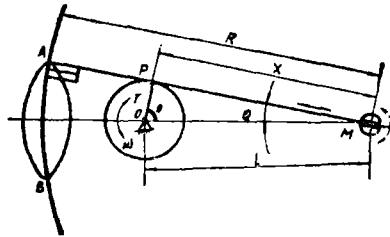


图 2 M型抓片机构的双付之一

R —片道曲率半径，其曲率中心在摇块支点 M 上， r —曲柄半径 x — PM 瞬时长度 l — OM 之间距离 θ — OP 与 OM 之间的瞬时夹角 φ — AM 与 OM 之间的瞬时夹角

加速度 a 也就求出来了。

曲柄 r 绕 O 做匀速旋转运动，其角速度为 ω 即：

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$

求出 $\frac{d\theta}{dt} = \omega$ ，则抓片爪沿片道 \widehat{AB} 的速度与加速度为：

$$v = \frac{d\varphi}{dt} \cdot R$$

$$a = \frac{d^2\varphi}{dt^2} \cdot R$$

从图 2 几何关系中可知：

$$x^2 = r^2 + l^2 - 2rl \cos\theta \quad (1)$$

$$r^2 = x^2 + l^2 - 2xl \cos\varphi$$

$$\cos\varphi = \frac{x^2 + l^2 - r^2}{2xl} \quad (2)$$

(1) → (2)

$$\begin{aligned} \cos\varphi &= \frac{r^2 + l^2 - 2rl \cos\theta + l^2 - r^2}{2l\sqrt{r^2 + l^2 - 2rl \cos\theta}} \\ &= \frac{l - r \cos\theta}{\sqrt{r^2 + l^2 - 2rl \cos\theta}} \end{aligned} \quad (3)$$

从图 2 中又有：

$$\begin{aligned} \frac{r}{\sin\varphi} &= \frac{x}{\sin\theta} \\ \sin\varphi &= \frac{r \sin\theta}{\sqrt{r^2 + l^2 - 2rl \cos\theta}} \end{aligned} \quad (4)$$

(3) 等式两端对 t 微分：

$$\begin{aligned} \frac{d \cos\varphi}{dt} &= -\sin\varphi \frac{d\varphi}{dt} \\ &= -\omega \left[\frac{r \sin\theta \sqrt{r^2 + l^2 - 2rl \cos\theta} - \frac{rl \sin\theta (l - r \cos\theta)}{\sqrt{r^2 + l^2 - 2rl \cos\theta}}}{\sin\varphi (r^2 + l^2 - 2rl \cos\theta)} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

(4) → (5)

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dt} &= -\omega \left[\frac{r \sin\theta \sqrt{r^2 + l^2 - 2rl \cos\theta} - \frac{rl \sin\theta (l - r \cos\theta)}{\sqrt{r^2 + l^2 - 2rl \cos\theta}}}{r^2 + l^2 - 2rl \cos\theta} \right] \cdot \frac{\sqrt{r^2 + l^2 - 2rl \cos\theta}}{r \sin\theta} \\ &= \omega \cdot \frac{rl \cos\theta - r^2}{r^2 + l^2 - 2rl \cos\theta} \end{aligned} \quad (6)$$

则

$$v = R \cdot \omega \frac{rl \cos\theta - r^2}{r^2 + l^2 - 2rl \cos\theta} \quad (7)$$

(7) 对 t 微分得加速度 a :

$$a = \frac{dv}{dt} = R\omega^2 \sin\theta \frac{r^2 - l^2}{(r^2 + l^2 - 2rl \cos\theta)^2} \quad (8)$$

此外由图 2 中还可以求出抓片爪在片道 \widehat{AB} 中的位移 S 为:

$$S = \frac{\pi}{180^\circ} R\varphi \quad (\text{此处}\varphi\text{为角度})$$

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{r}{\sqrt{r^2 + l^2 - 2rl \cos\theta}} \cdot \sin\theta \right)$$

故:

$$S = \frac{\pi}{180^\circ} R \arcsin \left(\frac{r}{\sqrt{r^2 + l^2 - 2rl \cos\theta}} \cdot \sin\theta \right) \quad (9)$$

当 $\theta = \theta_0$ 时, (θ_0 为初相位) 抓片爪开始入孔抓片, 由图 2 可以清楚看出, 该机构的抓片工作角为 $360^\circ - 2\theta_0$, 其停片角则为 $2\theta_0$ 。

又因 $\theta = \omega t$, (ω 为曲柄角速度), 当考虑抓片爪开始入孔抓片时的初相位 θ_0 时, 则 $\theta = \omega t + \theta_0$ 。将其代入 7、8、9, 这时抓片机构在片道中的位移 S , 速度 v , 和加速度 a 为:

$$S = \frac{\pi}{180^\circ} R \arcsin \left[\frac{r}{\sqrt{r^2 + l^2 - 2rl \cos(\omega t + \theta_0)}} \cdot \sin(\omega t + \theta_0) \right]$$

$$v = R\omega \cdot \frac{rl \cos(\omega t + \theta_0) - r^2}{r^2 + l^2 - 2rl \cos(\omega t + \theta_0)}$$

$$a = R\omega^2 \sin(\omega t + \theta_0) \frac{r^2 - l^2}{[r^2 + l^2 - 2rl \cos(\omega t + \theta_0)]^2}$$

根据上述方程, 就可以将 M 型抓片机构的运动特性曲线求出来。

表 2 是当画幅 $H = 19\text{mm}$ 时, 几种不同的抓片机构, 在不同的摄影频率时, 计算出来的最大加速度。

表 2

加 速 度 米/秒 ² 频 率	型 号	W型 16mm	M型 35mm	L型 35mm	D型 35mm	S型 35mm
		双曲柄圆轨迹机构	双付曲柄摇块机构	连杆曲柄摇杆机构	曲柄杠杆机构	三角凸轮机构
24		220	232	232	465	432
40		611	645	644	1292	1200
80		2444	2510	2578	5167	4800
160		9778	10327	10311	20667	19202
240		22000	23235	23200	46500	43205

图3是画幅 $H = 19\text{mm}$ ，摄影频率 $f = 240\text{帧/秒}$ 时，经计算得到的几种有代表性抓片机构的运动特性曲线。1、2、4、5分别为W型、M型、D型及S型速度曲线。I、II、III、IV及V分别为W型、M型、L型、D型及S型的加速度曲线。

从图3的运动特性曲线和表2中最大加速度的比较中不难看出：在这几种抓片机构中，以M型和W型的运动特性最好，其最大加速度也最小。且M型抓片机构加速度变化有一个很大的特点，在抓片过程中，它完全是在近似线性段变化的。这个特点在高速抓片过程中保证惯性输片力是均匀变化的，而且没有冲击。这可能成为M型抓片机构提高摄影频率一个很重要的潜在因素。

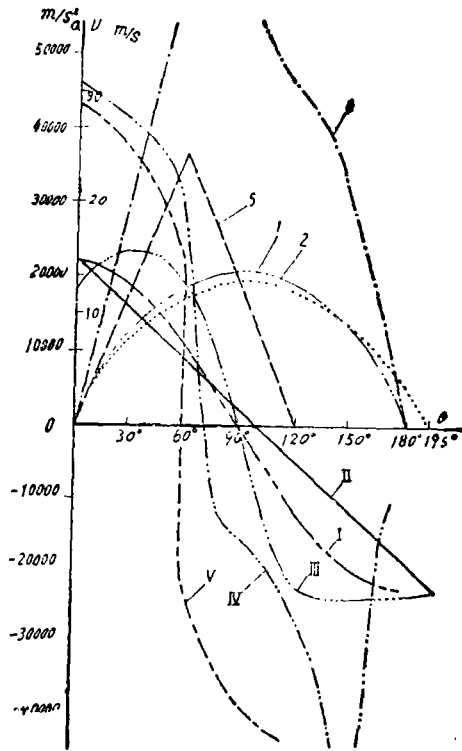


图3 几种不同的抓片机构 $H = 19\text{mm}$ $f = 240\text{帧/秒}$ 时的运动特性曲线

三、提高成像质量的措施

在间歇式高速摄影机抓片机构

中，都是活动定片针，对分布在画幅四周具有四枚定片针的抓片机构，虽然能有效地将前后片环的自由抖动对成像质量带来的危害隔离开，但由于定片针是活动的，在整个定片过程中，在垂直胶片的的方向上，始终有按正弦规律变化的相对运动。当摄影频率 $f = 300\text{帧/秒}$ 时，定片机构的偏心 $e = 1.5\text{mm}$ 时，定片针垂直胶片的最大相对速度可达 $v_{max} = 15\text{m/s}$ 。片道间隙一般控制在 0.25mm ，胶片厚度一般为 $0.12 \sim 0.16\text{mm}$ 之间。这样胶片在片道里仍存在 $0.09 \sim 0.12\text{mm}$ 的间隙。胶片在定片曝光过程中，乳剂面并非始终保持在理论像面上。如果摄影机的实际像面调在前片台的片道面上，胶片在定片针往复运动的作用下，乳剂面的最大瞬时离焦量 $\Delta f = 0.09 \sim 0.12\text{mm}$ 。考虑到这种影响，将实际像面调在距前片台片道面 0.06mm 的位置上，这时最大离焦量 $\Delta f = 0.03 \sim 0.06\text{mm}$ 。总之，只要胶片在片道里存在着间隙，曝光时，胶片在定片针垂直往复运动的带动下，乳剂面决不可能保持在一个始终不变的位置上。这是影响像质的一个很关键因素。这个因素随着快门开口角的减小（即缩短曝光时间），会有所改善，但这不是解决问题的根本措施。而且缩短曝光时间与高速摄影是相矛盾的。最彻底解决办法是在曝过程中，使胶片相对片台没有任何相对移动，乳剂面始终保持在实际像面位置上。目前解决问题的最先进措施是采用吸气展平法。其原理是在后片台对应画幅的位置上，设计一个“真空”负压气室，拉片时气室里与外面气压一样。当拉片终了定片针开始定位时，在阀门和气泵的作用下使气室处于“真空”状态，胶片被紧紧地吸附在后片台上，即使定片针与胶片有垂直相对运动，胶片也不会被定片针带动起来。在整个曝光过程中，胶片始终被吸附在后片上，只要胶片的片基厚度不变，那么它的像面位置（即乳剂面

位置)也始终保持不变。这就克服了由于片道间隙和定片针与胶片存在垂直相对运动造成离焦,对成像质量所带来的危害。但由于摄影频率很高,必须严格控制气室的吸气和断气时间,如果时间控制的不准确,吸气还没结束,胶片还被吸附在片台上就开始拉片,片孔会在抓片爪的作用下被撕裂。如果曝光还没全部结束,吸气就提前结束了,那么片道间隙和定片针相对胶片运动的部分影响仍然还会起作用,而使像质有所下降。因此有了吸气展平机构后,还必须特别注意抓片、定片、快门开口角及吸气泵阀门开、关之间的严格相位匹配关系。否则不但达不到预期效果,反而还会带来很多麻烦。

结构上由于M型抓片机构的两套抓片爪是分布在画幅的前后两处,对实现吸气装置也会带来很大的方便。

参 考 文 献

- [1] "SPIE 14 th Annual Technical Symposium Proceedings Volume 2".1960.
- [2] C·M·普罗沃尔诺夫著,孙延禄译,电影机的零件与机构,电影工业出版社。

Analysis on the Pulldown Film Mechanism with Crank Swing Block of the Intermittent High Speed Camera

Yang Xukai

Abstract

In this paper a comparison of and discussion about the performances for several typical pulldown film mechanisms has been shown in brief.

This paper analyses emphatically the structural character of the pulldown film mechanism with crank swing block, deduces its movement equation and plots the curves of related movement performance as well.

It also discusses the influence of some factors, which mainly come from the moveable registry pin, on the quality of the picture, and how to improve the quality of the picture.