

曲柄摆动导杆机构对降低 往复泵的流量波动可行性分析

黄 亦 工

(长沙探矿机械厂设计科)

通过分析现有单作用往复泵所采用的曲柄连杆机构,指出了导致这类泵流量不均匀的根本原因,以及多缸单作用具有较小的流量不均匀度的关键。提出采用曲柄摆动导杆机构取代曲柄连杆机构设想,并在理论上论证了其可行性。

关键词: 曲柄连杆机构; 曲柄摆动导杆机构

目前所用的活塞式往复泵(简称泵),不论型式如何,都不同程度地存在着流量不均匀的问题。由此引起了排出系统压力严重不稳定,水力性能差,而以单缸或双缸泵尤为突出。因此,在某些对流量不均匀、较敏感的情况下,一般均采用多缸单作用这类不均匀度较小、压力比较稳定的泵(如三缸泵等)。虽然双缸泵的水力性能比多缸泵差,但因它体积小、结构简单,装配及拆修方便,所以在实际中仍占有一定比例。

要降低双缸泵流量的不均匀性,就必须找出其产生的原因。首先分析曲柄连杆机构中活塞往复运动的规律。

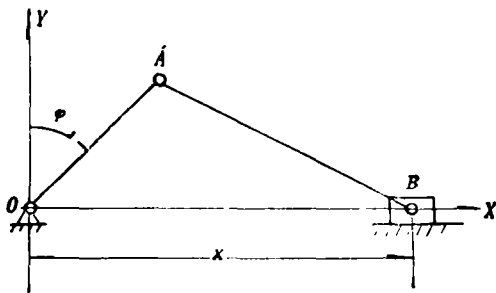


图 1

如图 1 所示,动力机带动曲柄作等速回转,曲柄又通过连杆与活塞相连,把运动传递给活塞,使之往复运动。设曲柄 AO 为 r ,

连杆 AB 为 l , 则 A 点坐标为 $(r \sin \varphi, r \cos \varphi)$, 活塞 B 坐标为 $(X, 0)$ 。则

$$(X - r \sin \varphi)^2 + (0 - r \cos \varphi)^2 = l^2$$

$$\text{即 } X = \sqrt{l^2 - r^2 \cos^2 \varphi} + r \cdot \sin \varphi \quad (1)$$

因一般有 $\lambda = r/l \leq 0.2$, 故 (1) 式简写为:

$$X = r \sin \varphi + l(1 - 0.5 \lambda^2 \cos^2 \varphi) \quad (2)$$

将 (2) 式两边同时对时间 t 取导数, 得活塞运动速度的表达式:

$$dX/dt = r(\cos \varphi + 0.5 \lambda \sin 2\varphi) d\varphi/dt$$

$$\text{即 } u(\varphi) = r\omega(\cos \varphi + 0.5 \lambda \sin 2\varphi)$$

(3)

由 (3) 式可看出, 活塞的速度是类似于正弦曲线呈周期性变化。如果设活塞面积为 F , 在不考虑其他影响的前提下, 泵的理论瞬时流量 $Q(\varphi)$ 即为:

$$Q(\varphi) = Fu(\varphi) = Fr\omega(\cos \varphi + 0.5 \lambda \sin 2\varphi)$$

显然, $Q(\varphi)$ 因 $u(\varphi)$ 也同样呈现出与之相同的变化规律。

当 $u > 0$ 时, 则 $Q > 0$, 系统处于排水状态, Q 为排出流量; 当 $u < 0$ 时, 则 $Q < 0$, 系统处于吸水状态, Q 为吸入流量。

本文所讨论的瞬时流量 $Q(\varphi)$ 仅指瞬时排出流量, 并记为 $q(\varphi)$, 那么单缸单作用泵的瞬时流量表达式为:

$$q(\varphi) = \begin{cases} Fr\omega(\cos\varphi + 0.5\lambda\sin 2\varphi) \\ \varphi = \left(2k\pi - \frac{\pi}{2}\right) \sim \\ \quad \left(2k\pi + \frac{\pi}{2}\right) \\ 0 \\ \varphi = \left(2k\pi - \frac{\pi}{2}\right) \sim \\ \quad \left(2k\pi + \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (4)$$

其瞬时流量曲线大致如图2所示。

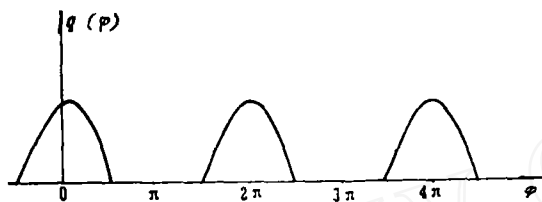


图 2

曲线形象地表明了瞬时流量随曲柄转角变化而变化的规律。正是这种变化才使流量表现出极大的不均匀，即造成流量的波动。

如上所述：活塞运动瞬时速度的不均匀性，导致了泵的瞬时流量不均匀，而活塞瞬时速度的不均匀性，又是由其本身曲柄连杆式往复机构所致。因此，活塞式往复泵的流量波动，完全是由本身这种往复机构所造成。

同样是采用曲柄连杆机构的双缸泵及三缸泵，实际使用效果却明显不同，三缸泵的流量稳定，而双缸泵却出现较大的流量波动。

对于双缸单作用泵来说，因它的两曲柄互成 180° 角，即两缸之间相位差等于 180° ，那么每隔 180° 必将重复图2所示曲线，这样就构成了双缸单作用泵的瞬时流量曲线（图3）。

图3曲线表明瞬时流量是呈脉动变化的，这就意味着泵将产生较大的流量波动。为了定量地描述流量波动的程度，在此引入“流

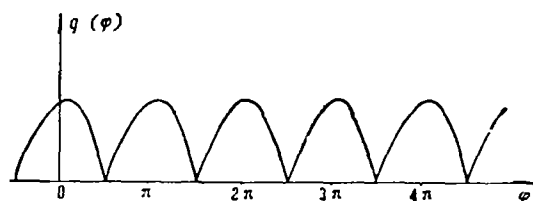


图 3

量不均匀度”这个衡量标准，它等于最大瞬时流量 $q_{\max}$ 与最小瞬时流量 $q_{\min}$ 的差值比上平均流量 q_m ，若记它为 δ ，即有：

$$\delta = (q_{\max} - q_{\min}) / q_m \quad (5)$$

从（4）式可分别求出 $q_{\max}$ 及 $q_{\min}$ ，再通过积分中值定理求得 q_m ，这就得到了双缸单作用泵的 $\delta = 1.6$ （计算过程从略）。

对于三缸单作用泵来说，因它的三个曲柄互成 120° ，即三个缸的相位差等于 120° 。那么每隔 120° 将有序重复图2所示曲线，这就构成了三缸泵的瞬时流量曲线（图4）。

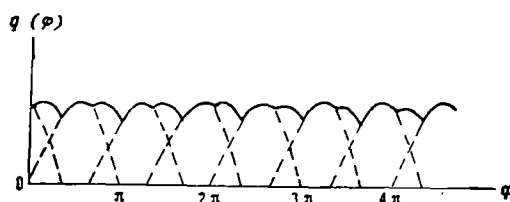


图 4

从图形可知，各个缸的瞬时流量曲线发生了相互重叠现象，意味着每个缸的流量进行相互补偿和叠加，从而使泵的瞬时流量脉动变化消失，流量变得比较平缓，泵所产生的波动也随之降低。计算得 $\delta = 0.26$ 。

通过对图2~4的分析讨论，认为只有通过各缸的流量相互补偿和递加，才能降低流量波动。因此，必须使曲柄在排水中的角位移大于各缸之间的相位差。而曲柄连杆机构对三缸泵来说恰好能达到这个目的（其他多缸也如此）。但对双缸单作用泵来说，由于两个缸的相位差等于曲柄在排水中的角位移（均为 180° ），所以两个缸的瞬时流量无法进行相互补偿和叠加。因此，设法找到这样

一种往复机构，使泵的曲柄在排水中的角位移越过 180° ，从而双缸泵才可能出现如图5所示的瞬时流量曲线。这样，泵的流量波动将大为降低，排出系统的水力性能得到改善。

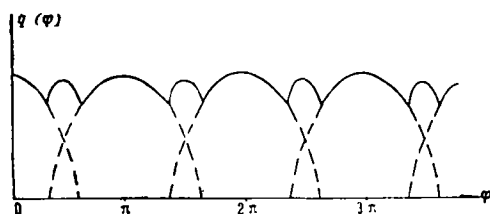


图 5

为此，本文推出“曲柄摆动导杆式往复机构”取代现有的曲柄连杆机构（图6）。

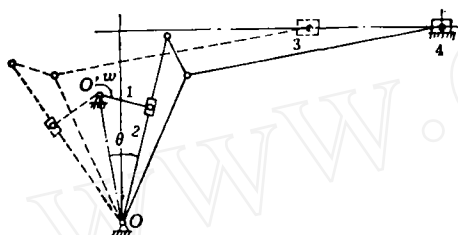


图 6

该机构是由曲柄1、摆动导杆2、连杆3和活塞4组成。曲柄在 $O'O$ 左右两边与摆动导杆垂直的位置称为导杆的极位，此时，导杆将产生最大偏摆 $|\theta|_{\max}$ 。同时，活塞也处在工作行程左右两止点位置。当导杆在顺时针转动的曲柄带动下，从左极位摆向右极位时，活塞也相应从左止点向右止点运动。此时泵处在排水过程。当导杆到达右极位时，活塞也相应到达右止点。这时，排水过程终止。当曲柄继续顺时针转动，则导杆再向左极位摆动，同时活塞也向左止点运动，这时泵再次进入吸水过程。这就是双缸泵采用新机构的工作原理。

从图6不难发现：这种泵在排水过程中，曲柄角位移越过了 $180^\circ (180^\circ + 2|\theta|_{\max})$ ，大于泵缸的相位差。这必将出现形同图5的瞬时流量曲线，这正是所期望的。下面先推导活塞的往复运动规律，再对泵的瞬时流量

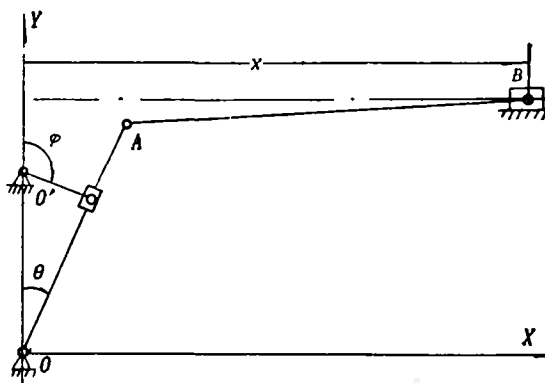


图 7

曲线进行精确描述，从理论上使它得以证实。为讨论的方便，将图6简化为图7：

设曲柄半径为 r ， OO' 为 c ，导杆 AO 为 R ，连杆 AB 为 $2R$ ，活塞 B 与 X 轴的距离恒为 R ，那么 A 点坐标为 $(R\sin\theta, R\cos\theta)$ ， B 点坐标为 (X, R) 。根据“两点距离公式”有：

$$(X - R\sin\theta)^2 + (R - R\cos\theta)^2 = 4R^2$$

$$\text{即 } X = R(\sin\theta + \sqrt{4 - (1 - \cos\theta)^2}) \quad (6)$$

因 $|\theta| \leq |\theta|_{\max}$ ，如令 $|\theta|_{\max} = 24^\circ$ ，那么可近似看作 $\sqrt{4 - (1 - \cos\theta)^2} \approx 2$ ，其误差约为0.18%，于是（6）式可写为：

$$X = R(2 + \sin\theta) \quad (7)$$

由“正弦定理”有：

$$\sin(\varphi - \theta)/c = \sin\theta/r$$

令 $e/r = A$ （即 $A = 1/\sin|\theta|_{\max}$ ），则：

$$\sin(\varphi - \theta) = A\sin\theta$$

展开后得：

$$\sin\varphi\cos\theta = (\cos\varphi + A)\sin\theta$$

等式两边平方得：

$$\sin^2\varphi(1 - \sin^2\theta) = (\cos\varphi + A)^2\sin^2\theta$$

$$\text{即： } \sin^2\theta = \sin^2\varphi / [\sin^2\varphi + (\cos\varphi + A)^2]$$

$$|\sin\theta| = |\sin\varphi| / \sqrt{\sin^2\varphi + (\cos\varphi + A)^2} \quad (8)$$

根据图7:

当 $\varphi = 0 \sim \pi$ 时, $\theta > 0$, 则 $\sin \varphi > 0$, $\sin \theta > 0$,

当 $\varphi = \pi \sim 2\pi$ 时, $\theta < 0$, 则 $\sin \varphi < 0$, $\sin \theta < 0$.

因此, (8) 式可去掉绝对值。写为:

$$\sin \theta = \sin \varphi / \sqrt{\sin^2 \varphi + (\cos \varphi + A)^2} \quad (9)$$

将 (9) 式代入 (7) 式, 得活塞的位移表达式:

$$X = R [2 + \sin \varphi / \sqrt{\sin^2 \varphi + (\cos \varphi + A)^2}]$$

将等式对时间取导数, 得瞬时速度 $u(\varphi)$ 的表达式:

$$u(\varphi) = R\omega \left[\frac{\cos \varphi + A \sin^2 \varphi / (A^2 + 2A \cos \varphi + 1)}{\sqrt{A^2 + 2A \cos \varphi + 1}} \right]$$

如果活塞的面积为 F , 则单缸的瞬时流量 $q(\varphi)$ 应为:

$$q(\varphi) = \begin{cases} Fu(\varphi) \left[\varphi = 2k\pi - \left(\frac{\pi}{2} + \frac{19}{30}\pi \right) \sim 2k\pi + \left(\frac{\pi}{2} + \frac{19}{30}\pi \right) \right] \\ 0 \quad \left[\varphi \neq 2k\pi - \left(\frac{\pi}{2} + \frac{19}{30}\pi \right) \sim 2k\pi + \left(\frac{\pi}{2} + \frac{19}{30}\pi \right) \right] \end{cases}$$

将 $q(\varphi)$ 编成程序输入计算机, 便可精确地绘出双缸单作用的瞬时流量曲线 (图8)。

将图8与图3相比较, 清楚地看到图8曲线中所反映出来的流量波动比图3要小得多。因图8所表明曲线是一条偶函数曲线, 那么只要在区间 $[0, \pi/2]$ 上求出 δ' 值, 就完全能反映出曲线在整个区间内的 δ 值。



图 8

根据图8及 $q(\varphi)$, 将 $A = 1/\sin |\theta|_{\max} = 1/\sin 24$ 代入 $q(\varphi)$, 便可得

$$q(0) = q_{\max} = 0.289FR\omega$$

$$q\left(\frac{11}{30}\pi\right) = q_{\min} = 0.211FR\omega$$

不妨设两个缸的瞬时流量分别为 $q_1(\varphi)$ 及 $q_2(\varphi)$, 则:

$$q_1(\varphi) = Fu(\varphi), \quad q_2(\varphi) = Fu(\varphi - \pi)$$

从而在 $[0, \pi/2]$ 上, 可得泵的流量为:

$$q(\varphi) = \begin{cases} q_1(\varphi) & \left(\varphi = 0 \sim \frac{11}{30}\pi \right) \\ q_1(\varphi) + q_2(\varphi) & \left(\varphi > \frac{11}{30}\pi - \frac{\pi}{2} \right) \end{cases}$$

若令 $\varphi_k = (k-1)\pi/30$ (k 为正整数), 则泵的平均流量 q_m , 可近似地表达为:

$$q_m = \sum_{k=1}^{16} q(\varphi_k) / 16$$

将 φ_k 分别代入上式, 便可得:

$$q_m \approx 0.26FR\omega$$

根据 (5) 式有:

$$\begin{aligned} \delta' &= (q_{\max} - q_{\min}) / q_m \\ &= (0.289FR\omega - 0.211FR\omega) / 0.26FR\omega \\ &= 0.3 \end{aligned}$$

将 δ' 值与图3中反映出的 δ 值相比较, 毫无疑问 δ' 要远远小于 δ (仅为 δ 的 19%)。因此, 这进一步表明新机构对双缸单作用泵流量波动的降低及对泵的排出系统水力性能改善, 确实产生了十分显著的效果。