

文章编号: 1005-8893 (2002) 02-0004-04

# 凸轮机构 3 缸单作用恒流量往复泵特性分析<sup>\*</sup>

张慧峰<sup>1</sup>, 董怀荣<sup>1</sup>, 裴峻峰<sup>2</sup>

(1. 胜利石油管理局 钻井工艺研究院, 山东 东营 257017; 2. 江苏石油化工学院 机械工程系, 江苏 常州 213016)

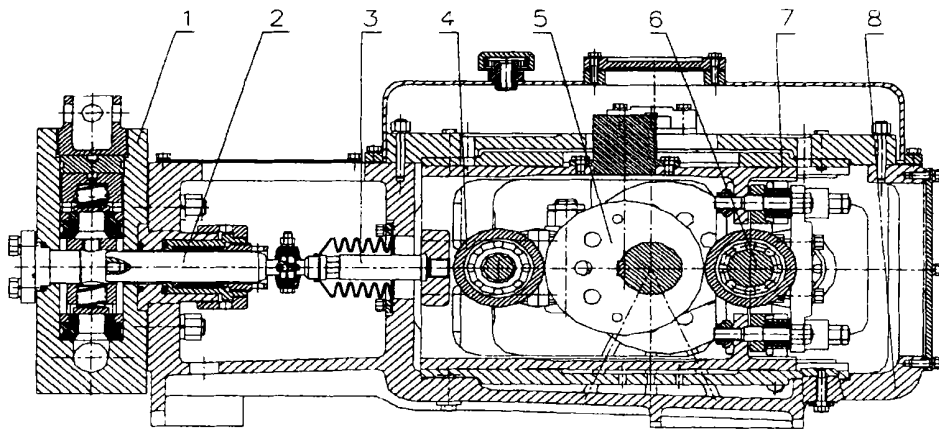
摘要: 新型 3 缸单作用恒流量往复泵的动力端采用特殊廓线的凸轮传动机构取代传统往复泵中曲柄连杆机构, 理论上实现了吸入与排出总管内流量恒定、压力无波动, 从而改善了泵的性能。通过理论分析可知, 柱塞运动规律是等加速—等速—等减速组合运动规律, 任一时刻各缸流量叠加后为恒定常数。它更适用于要求振动小、无压力波动、流量稳定的场合 (如输送聚合物溶液时)。

关键词: 恒流量; 往复泵; 凸轮机构; 特性分析

中图分类号: TH 321 文献标识码: A

曲柄连杆机构往复泵作为一种容积式往复泵, 其动力端采用曲柄连杆机构, 具有较高的可靠性和容积效率。在石油、石化行业应用非常广泛。其最为显著的特点是: 柱塞的运动规律类似于正弦或余弦曲线的规律变化, 导致流量是瞬变的, 形成排出系统和吸入系统的压力脉动; 柱塞运动加速度是瞬变的, 且泵速越高, 加速度就越大, 最大值正好发生在吸入过程始点, 恶化了往复泵的自吸性能, 恶化了泵阀、柱塞及柱塞密封圈等运动密封件的工作

条件<sup>[1]</sup>。多年来, 人们在对传统往复泵工作原理的研究逐步深入并取得了积极成果的同时, 也开始认识到传统的曲柄连杆机构所决定的运动与动力特性局限了往复泵的应用范畴及其发展。通过几年的研究, 现已成功研制出了以凸轮传动机构为动力端的恒流量无压力波动的往复泵 (如图 1 所示)。此泵获得中国石油天然气集团公司科技进步二等奖, 并获中国发明专利 (专利号 92106453.5), 现已形成系列产品, 得到了广泛应用。



1-阀箱总成 (液力端) 2-柱塞 3-连杆 4-左滚子 5-凸轮 6-右滚子架总成 7-复位框架总成 (动力端) 8-泵壳总成

图 1 凸轮机构恒流量往复泵

收稿日期: 2002-03-13

作者简介: 张慧峰 (1952-), 男, 山东宁阳人, 高级工程师, 主要从事石油机械研究及技术管理工作。

1 凸轮机构恒流量往复泵原理与结构

如图 1 所示为凸轮机构恒流量往复泵简图。主要有液力端、柱塞、介杆、前滚子、凸轮、后滚子、复位框架和泵壳等组成<sup>[2]</sup>。该泵动力端采用特殊廓线的凸轮传动机构取代传统往复泵动力端的曲柄连杆机构，3 个凸轮以相位角  $2\pi/3$  装在传动轴上，每个凸轮与通过凸轮中心水平布置两个直径相同的滚轮对滚，两滚轮中心距为定值，其中一滚轮为复位滚轮，另一滚轮连接介杆、柱塞等往复运动件。随着凸轮转动，带动复位框架、介杆、柱塞等运动件作往复运动，从而完成吸排液过程。对于要求连续运转且泵速较高、传递力较大的往复泵来说，采用了对心直动滚轮推杆的盘形凸轮传动机构，从而减少了凸轮与滚轮之间的磨损，保证具有长期的使用寿命。

2 运动特性分析

往复泵的运动特性分析主要研究柱塞的运动规律。由于这种新型恒流量往复泵的动力端采用了一种特殊廓线的凸轮传动机构取代了传统的曲柄连杆机构，从而改变了柱塞的运动规律<sup>[3]</sup>。在一个冲程范围内，就某一缸而言，柱塞运动分为三个阶段：匀加速运动、匀速运动、匀减速运动。凸轮转角在  $0\sim\pi$  范围，泵排出液体：凸轮转角在  $0\sim\pi/3$  范围，柱塞作匀加速运动；在  $\pi/3\sim2\pi/3$  范围，柱塞作匀速运动；在  $2\pi/3\sim\pi$  范围，柱塞作匀减速运动。凸轮转角在  $\pi\sim2\pi$  范围，泵吸入液体：凸轮转角在  $\pi\sim4\pi/3$  范围，柱塞作匀减速运动；在  $4\pi/3\sim5\pi/3$  范围，柱塞作匀速运动；在  $5\pi/3\sim2\pi$  范围，柱塞作匀加速运动。为保证泵能连续吸入与排出液体，在各运动段衔接点处柱塞运动位移与速度是连续的，但加速度是不连续的。经推导单缸柱塞运动位移见 (1) 式。

式中  $S_0$  表示泵冲程长度，即凸轮最大升程（或最大回程）； $\phi$  表示凸轮转角。通过对柱塞运动位移  $S$  求导，可得到柱塞运动速度及加速度，详见文献 [3]。在各个运动阶段冲程长度  $S_i$  如下：在  $[0, \frac{\pi}{3}]$  范围， $S_1=S_0/4$ ；在  $[\frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}]$  范围， $S_2=S_0/2$ ；在  $[\frac{2\pi}{3}, \pi]$  范围， $S_3=S_0/4$ ；

在  $[\pi, \frac{4\pi}{3}]$  范围， $S_4=S_0/4$ ；在  $[\frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}]$  范围， $S_5=S_0/2$ ；在  $[\frac{5\pi}{3}, 2\pi]$  范围， $S_6=S_0/4$ 。

$$S=\begin{cases} \frac{9S_0}{4\pi^2}\phi^2 & \phi\in[0, \frac{\pi}{3}] \\ -\frac{S_0}{4}+\frac{3S_0}{2\pi}\phi & \phi\in[\frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}] \\ S_0-\frac{9S_0}{4\pi^2}(\pi-\phi)^2 & \phi\in[\frac{2\pi}{3}, \pi] \\ S_0-\frac{9S_0}{4\pi^2}(\phi-\pi)^2 & \phi\in[\pi, \frac{4\pi}{3}] \\ -\frac{S_0}{4}+\frac{3S_0}{2\pi}(2\pi-\phi) & \phi\in[\frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}] \\ \frac{9S_0}{4\pi^2}(2\pi-\phi)^2 & \phi\in[\frac{5\pi}{3}, 2\pi] \end{cases} \tag{1}$$

以 SL3ZB-22.5H 型 3 缸单作用恒流量往复泵为例，基本参数分别为：冲程  $S_0=51\text{ mm}$ ，冲次  $n=160\text{ r/min}$ ，功率为  $22.5\text{ kW}$ 。其柱塞运动曲线如图 2、图 3、图 4 所示， $\phi$  轴表示凸轮转角。 $\phi$  轴上方是凸轮升程即为泵的排出冲程， $\phi$  轴下方是凸轮回程即为泵的吸入冲程。规定柱塞运动方向由动力端指向液力端为正向，与此方向一致的速度、加速度为正；与此方向相反的为负值。柱塞运动位移的零点取在排出过程起始位置后死点处。

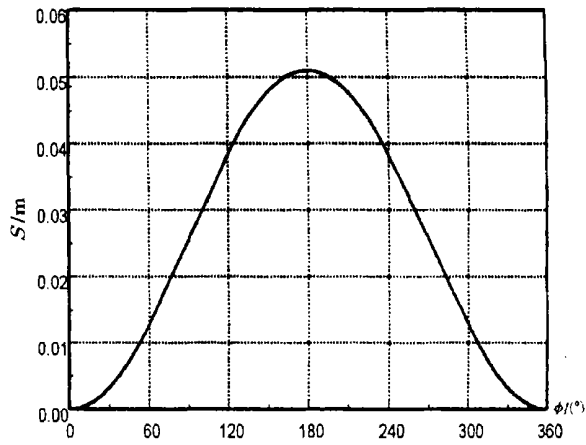


图 2 凸轮机构恒流量往复泵柱塞运动位移曲线

3 流量变化规律的理论分析

由于柱塞运动速度是变化的，每个液缸内的流量也是变化的，因此引入瞬时流量的概念。就单缸而言，其瞬时流量等于柱塞的有效截面积  $A$  与其运动速度  $v$  的乘积。就某一特定的泵而言，柱塞的

有效截面积  $A$  是一个常数, 而柱塞运动速度  $v$  是一个变量, 因此单缸内流量变化规律与柱塞运动速度变化规律是一致的。以 SL3ZB-22.5H 型 3 缸单作用恒流量往复泵为例,  $Q_{缸}$  变化规律见式 (2)、

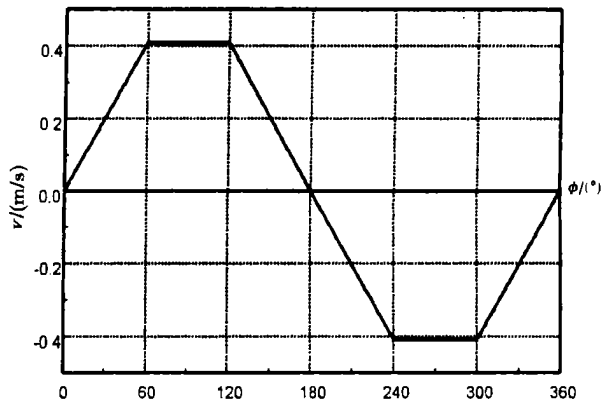


图 3 凸轮机构恒流量往复泵柱塞运动速度曲线

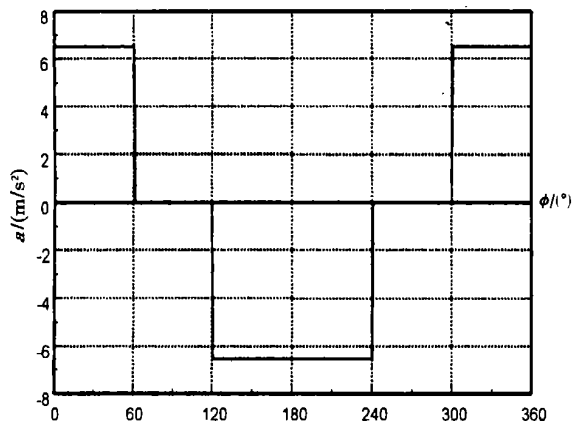


图 4 凸轮机构恒流量往复泵柱塞运动加速度曲线

式 (3) (柱塞直径  $d=50\text{ mm}$ )。正负号约定如下: 当凸轮转角范围为  $\phi=0\sim\pi$  范围内, 泵处于排出过程,  $Q_{缸}$  为正; 凸轮转角范围为  $\phi=\pi\sim 2\pi$ , 泵处于吸入过程,  $Q_{缸}$  为负。由柱塞运动速度可得在凸轮转角  $0\sim 2\pi$  范围内的  $Q_{缸}$  表达式。

$$Q_{缸} = \begin{cases} \frac{9AS_0\omega}{2\pi^2}\phi & \phi \in [0, \frac{\pi}{3}] \\ \frac{3AS_0\omega}{2\pi} & \phi \in [\frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}] \\ \frac{9AS_0\omega}{2\pi^2}(\pi-\phi)^2 & \phi \in [\frac{2\pi}{3}, \pi] \\ -\frac{9AS_0\omega}{2\pi^2}(\phi-\pi) & \phi \in [\pi, \frac{4\pi}{3}] \\ -\frac{3AS_0\omega}{2\pi} & \phi \in [\frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}] \\ -\frac{9AS_0\omega}{2\pi^2}(2\pi-\phi) & \phi \in [\frac{5\pi}{3}, 2\pi] \end{cases} \quad (2)$$

(3)

其中  $Q_{缸}$  表示各个运动阶段单缸的理论流量,  $\omega$  表示凸轮转动角速度。

关于总管内瞬时流量变化规律及恒流量特性证明:

泵轴转动一周范围内, 各缸按一定的规律交替进行吸入与排出, 总管内流量就是同一时刻各缸瞬时流量的叠加, 如图 5 所示。在任一时刻, 以相位

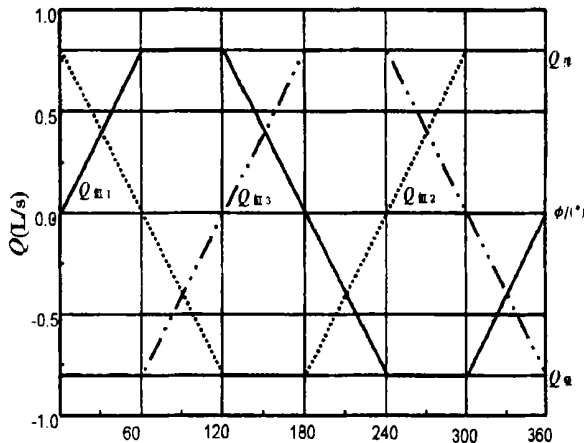


图 5 SL3ZB-22.5H 型恒流量往复泵理论流量曲线

角  $2\pi/3$  的 3 缸流量相叠加, 可得其流量曲线为一条直线。根据各缸柱塞运动状态以及吸入与排出情况的交替变化, 以凸轮转角  $\phi$  为统一自变量, 则总管内排出与吸入流量表达式为:

$$Q_{排} = \begin{cases} Q_{缸1} + Q_{缸2} & \phi \in [0, \frac{\pi}{3}] \\ Q_{缸1} & \phi \in [\frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}] \\ Q_{缸1} + Q_{缸3} & \phi \in [\frac{2\pi}{3}, \pi] \\ Q_{缸3} & \phi \in [\pi, \frac{4\pi}{3}] \\ Q_{缸2} + Q_{缸3} & \phi \in [\frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}] \\ Q_{缸2} & \phi \in [\frac{5\pi}{3}, 2\pi] \end{cases} \quad (4)$$

$$Q_{吸} = \begin{cases} Q_{缸3} & \phi \in [0, \frac{\pi}{3}] \\ Q_{缸2} + Q_{缸3} & \phi \in [\frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}] \\ Q_{缸2} & \phi \in [\frac{2\pi}{3}, \pi] \\ Q_{缸1} + Q_{缸2} & \phi \in [\pi, \frac{4\pi}{3}] \\ Q_{缸1} & \phi \in [\frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}] \\ Q_{缸1} + Q_{缸3} & \phi \in [\frac{5\pi}{3}, 2\pi] \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $Q_{\text{吸}}$ ——吸入总管内叠加流量,  $Q_{\text{排}}$ ——排出总管内叠加流量。

以 1 号缸的凸轮转角在  $0 \sim \pi/3$  范围内为例, 此时吸入与排出流量分别为:

$$Q_{\text{吸}} = Q_{\text{缸3}} = A \cdot v_{\text{缸3}} = A \cdot \left[ -\frac{3S_0\omega}{2\pi} \right] \quad (6)$$

其中:  $\omega = 2\pi n = \text{常数}$ ,  $n$  为泵转速。代入上式可得:

$$Q_{\text{吸}} = -3AS_0n = \text{常数} \quad (7)$$

排出总管内流量  $Q_{\text{排}}$  等于 1 缸和 2 缸内流量相加, 即

$$\begin{aligned} Q_{\text{排}} &= Q_{\text{缸1}} + Q_{\text{缸2}} = A (v_{\text{缸1}} + v_{\text{缸2}}) = \\ &A \left[ \frac{9S_0\omega}{2\pi^2} \phi_{\text{缸1}} + \frac{9S_0\omega}{2\pi^2} (\pi - \phi_{\text{缸2}}) \right] = \\ &\frac{9AS_0\omega}{2\pi^2} (\phi_{\text{缸1}} + \pi - \phi_{\text{缸2}}) \end{aligned} \quad (8)$$

由于 3 个缸之间相位差为  $2\pi/3$ , 因此  $\phi_{\text{缸2}} = \phi_{\text{缸1}} + 2\pi/3$  再代入 (8) 式可得:

$$\begin{aligned} Q_{\text{排}} &= \frac{9AS_0\omega}{2\pi^2} \left[ \phi_{\text{缸1}} + \pi - (\phi_{\text{缸1}} + \frac{2\pi}{3}) \right] = \\ &\frac{9AS_0\omega}{2\pi^2} (\pi - \frac{2\pi}{3}) = \frac{3AS_0\omega}{2\pi} = 3AS_0n = \text{常数} \end{aligned} \quad (9)$$

从以上证明得出的吸入与排出流量表达式 (7) 和式 (9) 可知: 在凸轮转角  $[0, \pi/3]$  范围内, 任一时刻吸入和排出流量与凸轮转角  $\phi$  无关, 均为常数, 且绝对值相等, 负号仅表示在  $\phi$  轴下方, 为吸入流量。同样可以证明, 在整个凸轮转角  $[0, 2\pi]$  范围内, 吸入与排出总管内流量始终保持常数, 均等于  $3AS_0n$ 。这就从理论上证明了以凸轮

传动机构为动力端的往复泵具有无波动恒流量的输送特性。输送的液体在吸入与排出管内是稳定的匀速流动。同样可以证明叠加加速度始终为零, 无液流惯性损失。因而, 对输送怕剪切的聚合物溶液来说特别有利, 这也是恒流量泵对液体介质的粘度保留率具有较高水平的重要原因。因为它不象曲柄连杆机构往复泵那样, 液体介质始终处于不稳定的运动状态, 总是受到冲击和振荡, 液流惯性损失和流量波动较大。

## 4 结束语

新型 3 缸单作用恒流量往复泵的动力端采用特殊廓线的凸轮传动机构取代传统往复泵的曲柄连杆机构, 理论上实现了吸入与排出总管内叠加流量不均度为零, 压力无波动, 从而改善了泵的性能。通过理论分析可知, 凸轮传动机往复泵的柱塞运动规律是等加速—等速—等减速组合运动规律, 这是实现恒流量的基础。本文从理论上证明了任一时刻各缸流量叠加后为恒定常数, 它更适用于要求振动小、无压力波动、流量恒定的场合。

## 参考文献:

- [1] 万邦烈, 李继志. 石油矿场水力机械 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1990. 3—80.
- [2] 张慧峰. 注聚合物用恒流量往复泵中凸轮机构优化设计 [J]. 石油矿场机械, 2001, 30 (4): 30—33.
- [3] 张慧峰. 新型凸轮传动三缸单作用恒流量往复泵的研制 [J]. 石油钻探技术, 2001, 29 (4): 46—48.

## Performance Analysis of Triplex Single Constant Flow Reciprocating Pump with the Cam—drive Mechanism

ZHANG Hui—feng<sup>1</sup>, DONG Huai—rong<sup>1</sup>, PEI Jun—feng<sup>2</sup>

(1. Drilling Technology Research Institute, Shengli Petroleum Administration, Dongying 257017, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Jiangsu Institute of Petrochemical Technology, Changzhou 213016, China)

**Abstract:** The special cam—drive mechanism which has replaced traditional crank—connecting rod mechanism is used as the power end of the new triplex single—function constant flow pump, which results theoretically in constant flow and no pressure fluctuation in the total pipeline, and which has improved the performance of reciprocating pump. Through theoretical analysis, we know that the plunger motion law is a combination of uniform accelerated motion, uniform velocity motion and uniform retarded motion, and that the sack flow is a constant.

**Key words:** constant flow; reciprocating pump; cam—drive mechanism; performance analysis