

单螺杆泵构造原理的分析

——转子与定子的形状及其配合

辽宁冶金地质勘探公司机修厂 吕丰农

单螺杆泵已经在许多勘探队推广使用,从使用情况看,它比往复式泥浆泵有明显的优点。

虽然不少单位已经制造和使用了单螺杆泵,但对它的基本构造原理仍普遍理解不深,所以难免有不同的看法。关键在于对单螺杆泵的定子与转子的形状和配合有些误解。例如,有的单位将定子从中心纵向切开,然后将转子放入,发现二者并非处处相吻合,于是就认为这是加工制造上误差形成的,认为这就是泵压升高时水量迅速下降的原因所在,因为这些“间隙”漏水。基于这种认识试制了一种轴向截面上处处吻合的转子定子付,耗费了人力、物力和时间,终归于失败。所以把有关这方面的理论问题分析讨论清楚,对设计、改进和提高单螺杆泵的工作性能都有直接意义。

转子的形状—曲面及截面

单螺杆泵转子是一个螺距为 t 的单头特殊波形螺杆。它的任一垂直于轴线的横截面都是一个圆,其圆心与轴线相距为 e ,如图1。

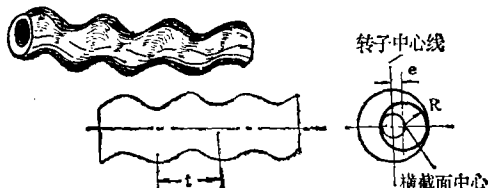


图1 转子

转子的外形就是这个半径为 R 、圆心距轴线为 e 绕轴线做螺旋运动的圆而形成的空间曲面。现设一平面动座标 XO_1Y , 其坐标原点 O_1 在一空间座标 $O_1x_1y_1z_1$ 的 z_1 轴上,

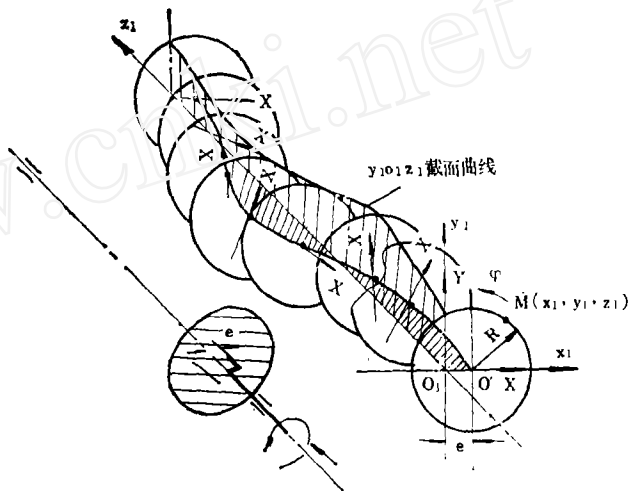


图2 转子及其截面曲线形状

XO_1Y 面垂直于 z_1 轴,并令其绕 z_1 轴逆时针方向匀速转动并移动;在平面动座标上有一个圆心不在原点上的圆,即转子横截面圆,半径 R ,圆心 O_1 在 X 轴上距 O_1 为 e ,见图2。根据解析几何可写出该圆在 XO_1Y 平面座标上的方程式:

$$(X - e)^2 + Y^2 = R^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

又根据座标变换公式,将平面座标值转换为空间座标值:

$$X = x_1 \cos \varphi + y_1 \sin \varphi \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$Y = y_1 \cos \varphi - x_1 \sin \varphi \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$z_1 = \frac{\varphi}{2\pi} \cdot t \quad \dots\dots\dots (4)$$

将(2)、(3)代入(1)后,整理得:

$$(x_1 - e \cos \varphi)^2 + (y_1 - e \sin \varphi)^2 = R^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

由(4)得: $\varphi = 2\pi \frac{z_1}{t}$

代入(5):

$$\left(x_1 - e \cos \frac{2\pi z_1}{t} \right)^2 + \left(y_1 - e \sin \frac{2\pi z_1}{t} \right)^2 = R^2$$

$$+ \left(y_1 - e \sin \frac{2\pi z_1}{t} \right)^2 = R^2$$

此即为转子曲面方程式。

其中： φ —截面圆所在 XO_1Y 座标绕 z_1 轴做螺旋运动相对于定座标转过的角度。

t —转子螺距，即动座标 XO_1Y 转过 $\varphi = 2\pi$ 时，其在 z_1 轴方向移动的距离。

根据曲面方程式可以求出任一过 z_1 轴（即转子中心线）的转子轴向截面曲线的方程式，例如求 $y_1O_1z_1$ 截面曲线方程式，即令 $x_1 = 0$ 代入(5)式即得：

$$y_1 = e \sin \varphi \pm \sqrt{R^2 - e^2 \cos^2 \varphi} \quad \dots\dots\dots (6)$$

其中

$$\varphi = 2\pi \frac{z_1}{t}$$

如求 $x_1O_1z_1$ 截面曲线方程式，则令 $y_1 = 0$ ，于是可得：

$$x_1 = e \cos \varphi \pm \sqrt{R^2 - e^2 \sin^2 \varphi} \quad \dots\dots\dots (7)$$

比较(6)式与(7)式可知，二者形状一样，仅相差 $\pi/2$ 而已。这方程式对检验螺杆外形是有用处的。其中“ $\pm$ ”号表示同一位置的上、下（或左、右）对应的二点。

定子的形状—空腔曲面与截面

定子的空腔曲面是一个导程 $T = 2t$ 的双头螺旋曲面。它的任一垂直于轴线 z 的横截面是两个半径为 R 的半圆和一个 $4e \times 2R$ 矩形平面连接组成的，见图3。定子空腔曲面就是该规则平面图形绕 z 轴做螺旋运动而形成的。由于平面图形是由两种曲线连接而成的（一种是两个圆心相距为 $4e$ 的半圆，另一种即连接两半圆的两条平行的外公切线），所以空腔曲面也是由两种不同的曲面圆滑连接起来的。

同样用座标回转变换方法，可求出其曲面与截面曲线表达式，设在一平面动座标 XOY 上该规则平面图形对称于 X 、 Y 轴， XOY 座标原点 O 在固定空间座标 $Oxyz$ 的 z 轴上且垂直于 z 轴，令平面动座标 XOY 载着规则平面图形绕 z 轴做螺旋运动，于是规则平面图形扫过的空间即为定子空腔，圆滑连接起来的两半圆曲线和其两条外公切线在空间的轨迹即组成空腔曲面，见图4。

由两个半圆曲线形成的曲面参数方程式与转子相似，且对称于 z 轴：（推导从略）

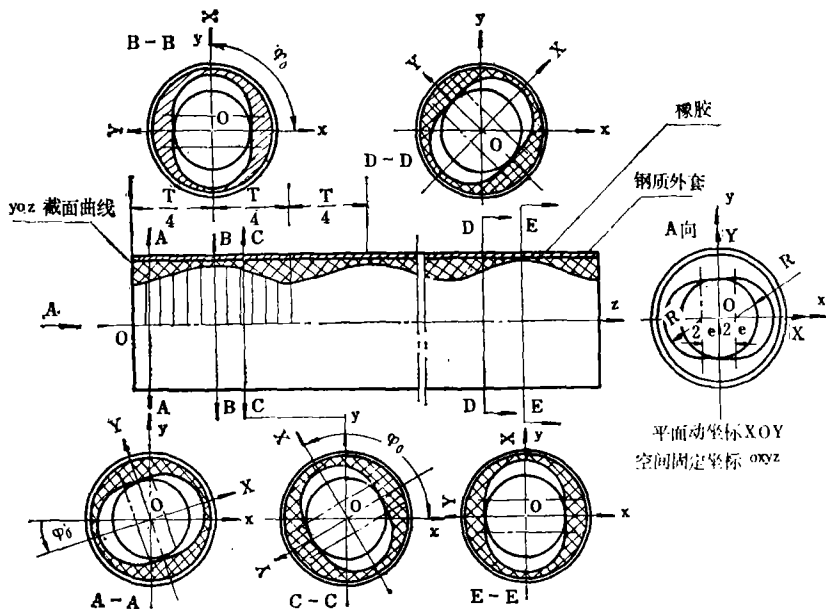


图3 定子及其截面曲线

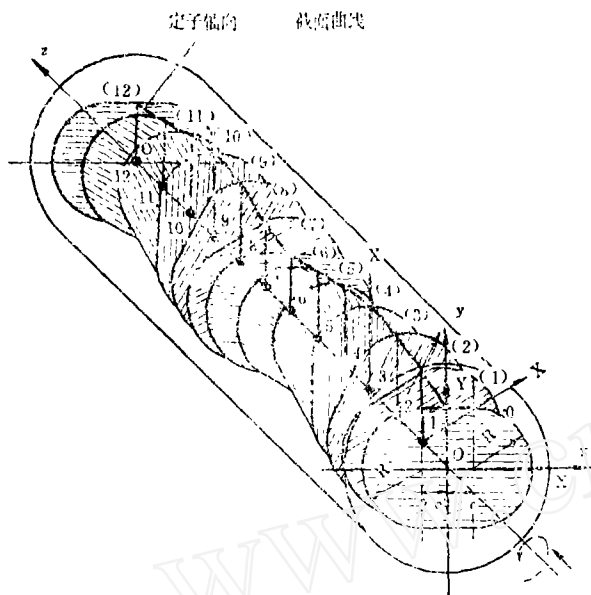


图4 定子腔曲面形成原理图
动座标绕固定座标z轴逆时针回转并移动
每个图示截面相距30°

$$(x - 2e \cos \varphi_0)^2 + (y - 2e \sin \varphi_0)^2 = R^2 \quad \dots\dots (8)$$

式中 $\varphi_0 = 2\pi \frac{z}{T} \quad \dots\dots (9)$

φ_0 —半圆所在动座标XOY 相对于定座标的平面转角 R —

T —导程，动座标转过 2π 时，沿 z 轴移动的距离

另一部分，即由上述两条外公切线（切点至切点段）绕 z 轴做同样运动过程 在空间

形成的一种曲面，见图5。

4个切点座标，按解析几何两点式列出其方程如下：

$$\frac{Y - Y_1}{X - X_1} = \frac{Y_2 - Y}{X_2 - X}$$

其中各切点座标分别为 $a(-2e, R)$, $b(2e, R)$, $c(-2e, -R)$, $d(2e, -R)$ ，代入上式可得：

$$\left. \begin{aligned} Y &= \pm R \\ -2e &\leq X \leq 2e \end{aligned} \right\} \dots\dots (11)$$

用座标旋转移动变换方法，可求得曲面方程式：

$$y \cos \varphi_0 - x \sin \varphi_0 = \pm R \quad \dots\dots (12)$$

$$z = \frac{\varphi_0}{2\pi} T \quad \dots\dots (13)$$

在平面座标上，此两条外公切线亦可视为半径是 R 、圆心在 X 轴上 $(-2e \sim 2e)$ 移动的圆曲线族的包络线（这时将圆心座标视为变量），见图5a。

可以看出，在形成曲面过程中只有 Y 轴上 U 、 V 两点距 z 轴最近 (R) ，回转后在空间形成两条相互绞扭的“脊线”，它紧紧依附、夹紧于转子表面，起密封作用。

既然定子腔曲面是两种曲面圆滑连接组成，所以通过其中心的纵向截面曲线也是两

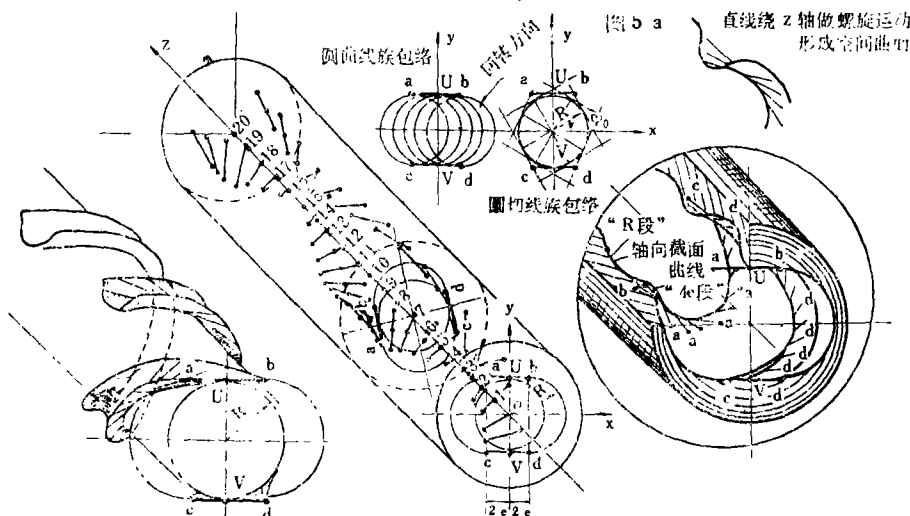


图5 两平行直线做螺旋运动形成空间曲面

种曲线连接组成, 这可以用作图方法或数学方法求出。

(一) 半圆做螺旋运动形成的截面曲线。以下简称“R段曲线”。

由定子曲面方程式(8)、(9), 令 $x=0$ 则得: (推导从略)

$$y^2 - 4e \sin \varphi_0 y + 4e^2 - R^2 = 0 \dots (14)$$

其中:

$$\operatorname{tg}^{-1} \frac{2e}{R} \leq \varphi_0 \leq \operatorname{tg}^{-1} \frac{2e}{R} + 2 \operatorname{tg}^{-1} \frac{R}{2e}$$

$$\varphi_0 = 2\pi \frac{z}{T}$$

此即为“R段”定子曲面 yoz 截面曲线方程式。同理, 如令 $y=0$, 则可得出 xoz 截面曲线方程式:

$$x^2 - 4e \cos \varphi_0 x + 4e^2 - R^2 = 0 \dots (15)$$

$$\text{其中, } 0^\circ \leq \varphi_0 \leq \operatorname{tg}^{-1} \frac{R}{2e}$$

$$\varphi_0 = 2\pi \frac{z}{T}$$

(二) 由两外公切线转化构成部分, 以下简称“4e段”。

由方程式(12)、(13), 如令 $x=0$, 则:

$$y \cos \varphi_0 = \pm R$$

$$y = \pm \frac{R}{\cos \varphi_0} = \pm R \sec \varphi_0$$

如改写为 $y = f(z)$ 形式则为:

$$y = \pm R \sec \left(\frac{\pi}{t} z \right) \dots (16)$$

在整个定子轴向截面曲线上, 上述两种曲线交替出现, 见图6、图4。如图示位置, 若X轴逆时针方向转动, 在 ycz 截面上

$0 \sim \operatorname{tg}^{-1} \frac{2e}{R}$ 区间出现“4e段”, 继续转动

$\operatorname{tg}^{-1} \frac{2e}{R} \sim 2 \operatorname{tg}^{-1} \frac{R}{2e}$ 就是“R段”, 接下去又

是“4e段”——“R段”, 如此循环而已。整个曲线对称于 z 轴, 其周期 $z = t$, 对应动座标转角 $\varphi_0 = \pi$ 。

既然轴向截面如此, 那么定子型腔曲面模芯的外形完全可以在普通车床或铣床上用类似加工螺纹方法制造。它的各部尺寸都可以按公式计算求得。

定子与转子轴向截面曲线的差异

从以上分析可以看出定子与转子的轴向截面曲线是不一样的。

将定子通过中心纵向切开, 放入转子后, 在截面上两者是不应该处处吻合的。其间存在着不吻合的间隙, 并不是因此间隙而“漏水”, 泵压、泵量上不去也决不是因此处存有间隙的缘故^[4]。因为截面曲线并不是单螺杆泵各封闭腔的密封线。截面曲线的不吻合并不意味着泵“封闭”不严。有的单位不理解不承认这个道理, 设计了一套制造两者完全吻合的加工工艺程序, 即先铣出转子, 然后按转子外形(即轴向截面曲线)做仿形样板, 再加工定子型腔的模芯, 使定子

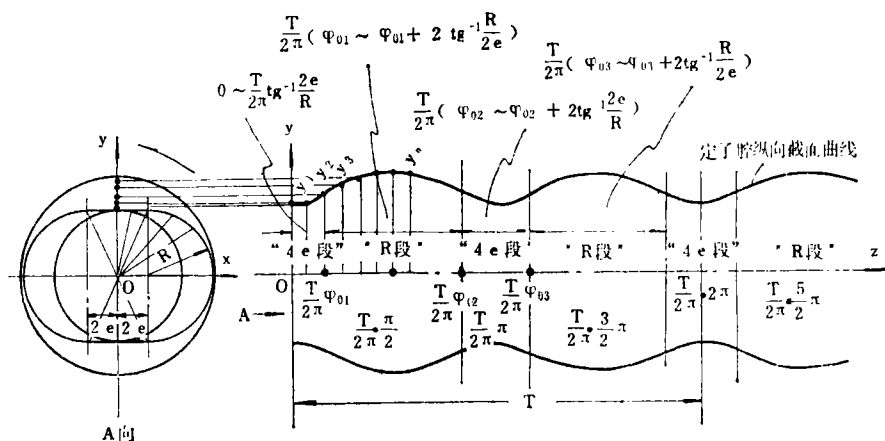


图6 定子截面曲线 $y = f(z)$ 分布图

与转子在轴向截面曲线上完全一致，用这样方法制造出来的定子与转子相配，幸好定子是橡胶制的，否则可能根本装不到一起，即或装在一起，大概也难于转动。因为这样做完全违反了单螺杆泵的基本原理和基本几何关系。

任何一个定子转子付，任意剖切一些横断面，我们可以看到，定子与转子只有两种接触状态，第一种就是转子截面圆未与定子截面半圆吻合接触；第二种状态即转子截面圆恰与定子两半圆中的一个完全吻合；无论哪种状态，转子截面圆始终与两外

公切线相切，即夹于两外公切线之间。除此无其他接触状态可言。见图 7。第二种接触状态，在其长度上（即 z 轴上），每隔 t 出现一处，此外所有横断面的接触都是两切点接触；所有这些对应的接触切点构成了两条螺旋接触密封线。

定子转子付任意横截面如图 8 所示，其中 $\varphi_0 = \varphi/2$ ，即转子转角为定子转角二倍（在定子转子付同一长度的横截面上）。

见图 8 下面部分，设一平面座标 XOY （定）载着定子与转子横截面绕 z 轴做导程为 T 的螺旋运动，在平面座标 XOY （定）上， $M(X, Y)$ ， $N(X_1, Y_1)$ 为转子截面圆与定子截面的两接触点，由图知 $M(2e\cos\varphi, R)$ ， $N(2e\cos\varphi_0, -R)$ 。

根据坐标回转变换公式，即将 $M(X, Y)$ ， $N(X_1, Y_1)$ 转换为 $M(x, y, z)$ 可求出两接触点在空间座标 $Oxyz$ 上形成的两条螺旋接触线方程式，因为：

$$X = x\cos\varphi_0 + y\sin\varphi_0$$

$$Y = y\cos\varphi_0 - x\sin\varphi_0$$

$$z = \frac{\varphi_0}{2\pi} T$$

将 $X = 2e\cos\varphi$ ， $Y = \pm R$ 代入上式整理后得（推导略）：

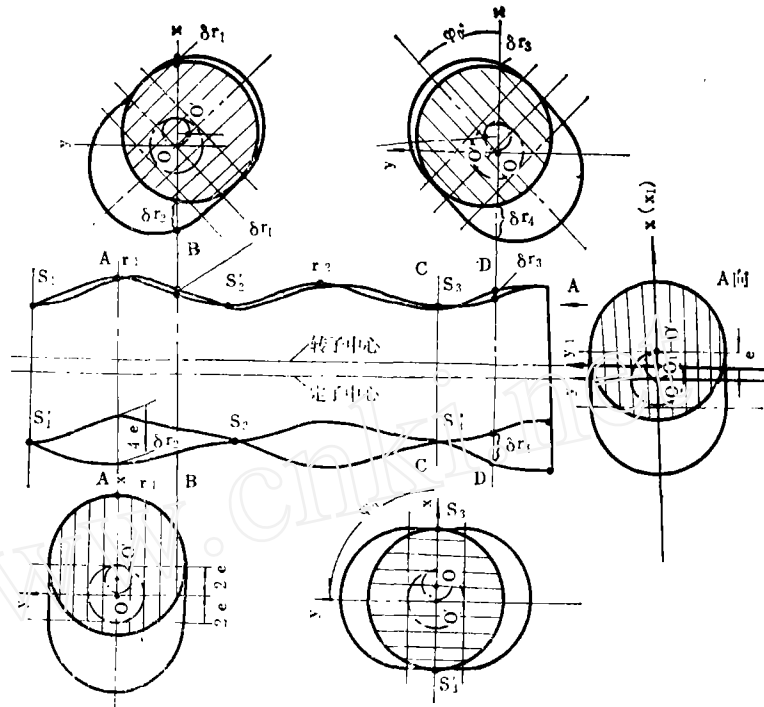


图 7

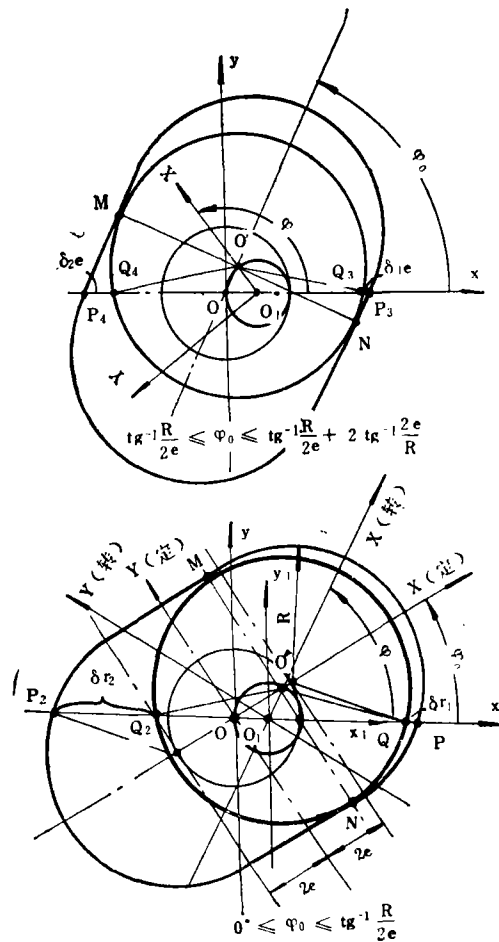


图 8

$$\begin{cases} y = e \sin 2\varphi_0 \pm R \cos \varphi_0 \cdots \cdots (17) \\ x = 2e \cos^2 \varphi_0 \pm R \sin \varphi_0 \cdots \cdots (18) \\ z = \frac{\varphi_0}{2\pi} T \cdots \cdots (19) \end{cases}$$

此即为单螺杆泵定子转子付两条(±)螺旋接触线参数方程式,从上述各数学表达式也可以看出,定子转子付的截面曲线与接触线完全是两回事。图9即为转子定子付接触线在XOY面上的投影。

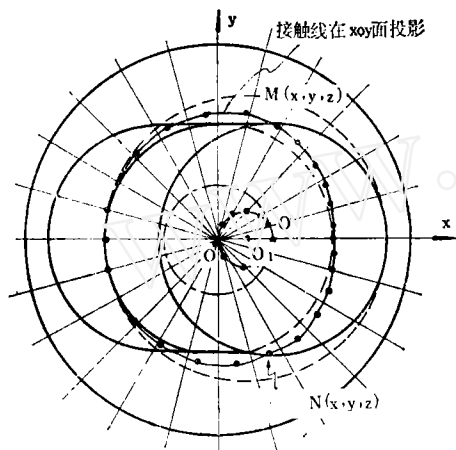


图9

接触线在纵向截面中,每2t长度内只显示出六个接触点, \$S_1\$、\$S_2\$、\$S_3\$ 是同一条螺旋接触线被截面截遇的三点; \$S'_1\$、\$S'_2\$、

\$S'_3\$ 是另一条接触线显示的三个接触点; \$r_1\$、\$r_2\$ 则是转子截面圆与定子截面半圆在垂直于轴线方向上完全吻合时表现的二个接触点,即半圆接触线在轴向截面上显示的点。至于其余各处都应存在着间隙 \$\delta\$。

在各轴向截面中接触点的座标可由(17)、(18)、(19)式求得。

从图7与图8中的几何关系,可以求出转子与定子轴向截面上表现的间隙值,例如,

$$\begin{aligned} \delta r_1 &= OP_1 - OQ_1 \\ OP_1 &= 2e \cos \varphi_0 + \sqrt{R^2 - (2e \sin \varphi_0)^2} \\ OQ_1 &= 2e \cos \varphi_0 \cdot \cos \varphi_0 \\ &\quad + \sqrt{R^2 - (2e \cos \varphi_0 \cdot \sin \varphi_0)^2} \\ &= 2e \cos^2 \varphi_0 + \sqrt{R^2 - (e \sin 2\varphi_0)^2} \\ \therefore \delta r_1 &= OP_1 - OQ_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 2e \cos \varphi_0 (1 - \cos \varphi_0) \\ &\quad + \sqrt{R^2 - (2e \sin \varphi_0)^2} \\ &\quad - \sqrt{R^2 - (e \sin 2\varphi_0)^2} \\ &\cdots \cdots (20) \end{aligned}$$

同理可得,

$$\begin{aligned} OP_1 &= OP_2 \\ \delta r_2 &= OP_2 - OQ_2 = 2e \cos \varphi_0 (1 + \cos \varphi_0) \\ &\quad + \sqrt{R^2 - (2e \sin \varphi_0)^2} \\ &\quad - \sqrt{R^2 - (e \sin 2\varphi_0)^2} \cdots \cdots (21) \end{aligned}$$

当 \$\varphi_0\$ 转过 \$tg^{-1} \frac{R}{2e}\$ 之后,如图8之上

图所示

$$\begin{aligned} OP_3 &= \frac{R}{\sin \varphi_0}, \quad OP_3 = OP_4 \\ OQ_3 &= 2e \cos^2 \varphi_0 \\ &\quad + \sqrt{R^2 - (2e \cos \varphi_0 \cdot \sin \varphi_0)^2} \\ &= 2e \cos^2 \varphi_0 + \sqrt{R^2 - (e \sin 2\varphi_0)^2} \\ \therefore \delta_{1e} &= OP_3 - OQ_3 = \frac{R}{\sin \varphi_0} \\ &\quad - 2e \cos^2 \varphi_0 \\ &\quad - \sqrt{R^2 - (e \sin 2\varphi_0)^2} \\ &\cdots \cdots (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{而 } \delta_{2e} &= \delta_{1e} + 4e \cos^2 \varphi_0 \cdots \cdots (\text{推导略}) \\ &\cdots \cdots (23) \end{aligned}$$

由(22)、(23)知,只有当 \$\varphi_0 = 90^\circ\$ 时, \$\delta_{1e} = \delta_{2e} = 0\$, 无间隙。

从上述四式,我们可以计算出任一 \$\varphi_0\$ 角或与其对应的 \$z\$ 值处定子与转子截面曲线间的距离(或间隙)。当然也可以按定子与转子的轴向截面方程式,分别计算出二者同一位置的纵座标值(\$y\$或\$x\$),然后将转子计算值加\$e\$,比较二者的差,以确定它们的接触与间隙情况。

下表中所列数值即为 \$e=6.75\$ 毫米, \$R=32.5\$ 毫米, \$t=65\$ 毫米的一螺杆付计算值,即 XOY 平面座标值(见图7)。

从表中所列计算值可以看出两者间隙存在的情况;实际上,由于定子是弹性物质,当转子带有一定过盈量装入定子后,二者的接触比理论上要多一些、间隙值要小些,但却不会没有间隙。

(φ_0) 度 (z)毫米	$\varphi_0 = 0^\circ$										
	$z = 0$	5°	30°	45°	50°	52°	$72^\circ 17'$	90°	$107^\circ 43'$	135°	180°
x(毫米)											
定子	47.5	47.442	45.496	43.20	42.293	41.92	37.793	36	37.79	$(-)43.2$	$(-)47.5$
转子	41.75	41.648	38.528	35.53	34.553	34.17	31.16	30.25	31.29	35.53	41.75
间隙	0	0.043	1.22	1.92	1.99	1.9967	0.88	0	0.75	1.92	0

定子与转子的配合以及密闭腔的构成

单螺杆泵也是一种容积泵，凡属容积泵，在排送介质过程中，都有一个以上的密闭腔体的形成及其容积随时间的变化。不同型式的泵的密闭腔形成和构成方式以及变化过程也不一样。例如，往复式活塞泵，其输液的密闭腔是由活塞与缸筒的圆环状接触密封带“a”，及拉杆圆环密封带“b”和四个阀的接触密封带组成。见图10。

单螺杆泵与此颇相似，它有多个密闭腔，密闭腔个数 $n = L/t$ ， L 为螺杆长度，即每 t 平均一个密闭腔，但每个密闭腔长度却

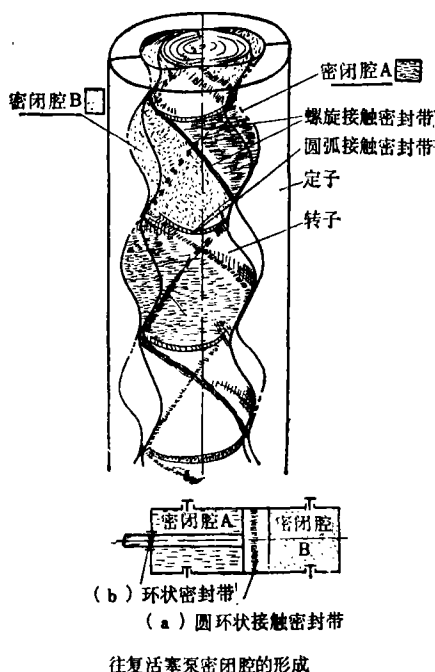


图10 往复式活塞泵密闭腔与单螺杆泵密闭腔的接触密封带

等于 $2t$ ，因其绕转子交互相叠而存在。定子由两条平行的外公切线形成的两条螺旋状“脊峰”，缠绕并夹紧转子的表面，构成了各密闭腔的两个侧面密封带，而各腔的前后两端密封带即为转子某一截面圆与定子截面半圆相吻合的半圆曲线，半圆曲线每 t 一个，恰与两条螺旋状接触密封线相接，于是围成一个个交错排列的密闭腔。所以说，单螺杆泵的各密闭腔就是转子与定子表面按一定规律分布排列的接触带围成的，这些腔体随螺杆转子转动，沿螺旋轨迹向前推移。

我们仔细分析一下单螺杆泵任一横断面中转子截面圆运动情况，从中看出，它类似一个特殊的平面的曲柄连杆机构组成的往复双作用活塞泵，它的活塞就是转子截面圆（缸筒即定子截面），活塞在定子横截面中作往复运动，定子中心与转子中心连线 OO_1 类似曲柄，转子中心与截面圆圆心连线相当于连杆（ O_1O' ）；曲柄 OO_1 绕 O 转动， O' 圆沿定子截面的长轴方向做非匀速直线运动。其特殊之处是曲柄与连杆等长，所以当曲柄 OO_1 转到 90° 位置时，出现特殊“死点”。但实际上转子圆是主动，所以一旦移过这点后，其运动情形又与曲柄连杆机构的返回行程类似，只是方向有别，这特殊情况好似 OO_1 在 $0 \sim 90^\circ$ 时与正常曲柄连杆机构 $0 \sim 180^\circ$ 相仿， $90 \sim 180^\circ$ 时与 $180 \sim 360^\circ$ 相仿。

如是，无数个“平面”往复泵（素）螺旋状地串联排列起来，即构成单螺杆泵了，见图11。所以说二者在基本原理方面颇为相似；把单螺杆泵的每个“平面曲柄往复泵素”拿出来与曲柄往复泵对照分析，还可以进一步分析和解释单螺杆泵的参数设计、动力学和运动学以及实际性能特性方面的许多问题，限于篇幅不加赘述。

往复式泥浆泵的活塞与缸筒间的接触密

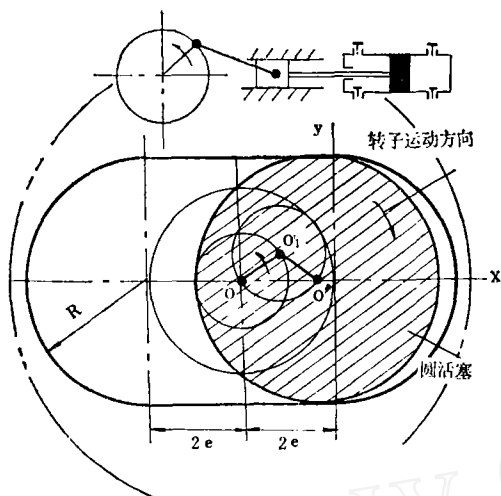


图11 单螺杆泵与曲柄连杆往复泵原理

封犹如单螺杆泵中每个转子圆与定子截面间的接触密封一样，对泵的压力、排量有直接影响，是研究、设计、造制和使用必须注意的地方。例如在某样机设计中，为了增加排量，将 e 值选得过大。从图11中分析可知 $4e$ 过长时，势必受液体压力大、受压变形大和本身收缩变形则不易保证密封，水量、压力都不易保持。试车结果也证明这点。将 e 值缩小后效果好转。

特别应从制造方面注意保证单螺杆泵的密封性能，例如控制定子橡胶腔成型尺寸和保证橡胶硬度（改进橡胶配方，研究橡胶成型收缩规律，补偿不均匀的收缩等等）；提高转子制造精度（偏心距 e 、 R 、 t 的尺寸精度）以及表面光洁度；选择合理的过盈量等。这些地方由于对该泵的原理理解不深往往不被重视。我们测量一批定子尺寸，两条螺旋状的接触密封带的脊峰在直径方向应等于 $2R$ ，实际总是两端小、中间大，相差1毫米以上。另外转子中心线的不直度、转子偏心 e 的误差都在 $0.2\sim 0.4$ 。捷克 Sigma Lutin 厂专门生产单螺杆泵，它的注塑设备

和生产过程的控制很先进。据报道，它的定子误差在 X 、 Y 方向均不大于 0.06 毫米，它生产的转子是按捷克专利生产，工艺是少切屑加工〔6〕；日本这方面也有些专利，如公布的特开昭53—122903，单螺杆泵的中空转子〔7〕等等。这说明提高制造质量对改进单螺杆泵性能很重要。这些技术措施我们经过努力都是可以做到的，只怕不被重视。

单螺杆泵的接触密封弱点就在于这些空间曲线密封带，受压力大时会产生变位，向减弱密封方向退让，磨损了不能自行补偿。

在深入理解泵的原理的基础上，合理选择参数；在制造工艺方面着眼于保证泵的密封接触，就不难保证泵的可靠性能。有关参数设计选择和制造工艺方面的问题，限于篇幅不一一讨论了。

参 考 文 献

- 〔1〕刘济生，地质与勘探，8（1973），44
- 〔2〕北京石油机械厂设计科，石油钻采机械通讯，1（1974），3
- 〔3〕鞍钢地质勘探公司，螺杆泥浆泵试验研制报告，1975
- 〔4〕Давыдов А.П., Резиновые подшипники в машиностроении, Ленинград, "Машиностроение", 1976, стр.131
- 〔5〕吉田惠介，ポンプ工学，1969 V. 5, No. 5, p.13
- 〔6〕通用机械文摘，科学文献出版社，2（1980），10
- 〔7〕日本公开专利文摘，科学技术文献出版社，2（1980），14
- 〔8〕Igor J. Karassik etc., Pump Handbook, McGRAW-HILL BOOK COMPANY, pp. 3~48
- 〔9〕苏联机器制造百科全书，机械工业出版社，1956，第十二卷 1章 67页