

双向自封快速接头操作过程的模型建立与仿真

苏毅* 赵翔 杨建勇 李著信

(中国人民解放军后勤工程学院)

苏毅 赵翔等:双向自封快速接头操作过程的模型建立与仿真,油气储运,1999,18(3) 11~15.

摘 要 双向自封快速接头基于实际操作的工作行为可离散为四个过程,即对接过程、开门过程、关门过程和拆分过程。为确定各过程中的操作力矩,建立了各过程的动力学模型,并进行了数字仿真。结果表明,双向自封快速接头具有操作力矩小、速度快、效率高的特点,非常适合于快速连接作业。

主题词 接箍 动力学模型 数字化模拟

双向自封快速接头是近来研制出来的、用于软管间相互连接的接头。它接好后可开启导通、拆开后能自动关闭,具有连接简单、拆装轻便、密封可靠、操作力小、过流面积大等特点,适用于经常拆卸而且不要求放空管内介质的场合。

一、构造和工作原理

双向自封快速接头由自封装置、连接锁紧装置和控制装置三部分组成(见图1)。

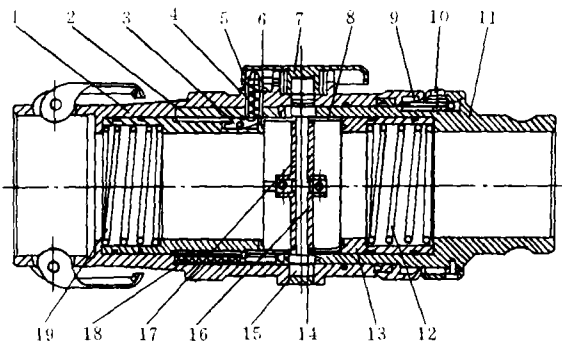


图1 双向自封快速接头结构原理图

1-阴端体;2-阴端浮动密封座;3-控制跳爪;4-控制销轴;
5-销轴复位弹簧;6-平面凸轮;7-手轮;8-控制顶套;
9-连接锁紧爪;10-锁紧控制按钮;11-阳端浮动密封座;
12-阳端主密封弹簧;13-阳端浮动密封座;14、15-转动半轴;
16-阳端活门;17-阴端活门;18-控制顶套复位弹簧;
19-阴端主密封弹簧

1、接通过程

当按照阴阳两端的连接对位指示对准位置、合拢阴阳两端时,两端的浮动密封座就被推离密封位置,解除自封状态;接拢到位时,阳端上的连接锁紧爪9在弹力作用下,跳入阴端锁紧槽内,将两端锁住。转动手轮7到限定位置的过程中,一方面使同轴转动的两活门转到平行于管道的位置;另一方面手轮底部的平面凸轮6将控制跳爪3压下,解除其对控制顶套8的作用。另外,在阳端浮动密封座11的回弹复位力作用下,控制顶套8产生小量的回复动作后就被控制销轴4锁住,保持浮动密封座与转动活门的分离状态。这时,由于阳端半轴是嵌在阴端半轴内的,因此两半轴不会分开,保证了接通后的可靠性。

2、拆离自封过程

拆离时,首先顺时针转动手轮7到限定位置,一方面使活门处于关闭位置;另一方面在手轮底部的平面凸轮及控制销轴复位弹簧5的作用下,控制销轴4往上移动,解除控制销轴对控制顶套8和阴端浮动密封座2的限制作用。在阴阳两端的主密封弹簧19、12的复位作用下,阴阳两端的浮动密封座2、11复位,将阴阳两端分别密封,然后压按锁紧控制

* 400016,重庆市大坪长江二路;电话:(023)68756471。

按钮 10, 阴阳两端即可拆离。拆离后, 控制顶套 8 在控制顶套 9、复位弹簧 18 的作用下被弹出, 处于接通前的位置。

二、操作过程运动规律的模型建立

双向自封快速接头基于实际操作的工作行为可离散为四个过程, 即对接过程、开门过程、关门过程和拆分过程。为确定各过程中的操作外力或操作力矩, 有必要建立各过程的动力学模型, 在对模型进行数字仿真的基础上, 以评价其操作性能, 并进一步优化设计。

1、对接过程的动力学模型建立

阴阳两端对接前, 各端的浮动阀座受弹簧作用, 分别顶住各自的密封门, 密封门承受顶压而处于自封状态, 截止了两端的过流通道。阳端插入一定程度后, 阴阳端内的弹簧被压缩。此过程中主要滑动部件的受力如图 2 所示。

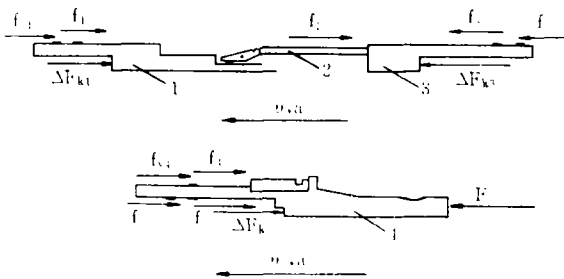


图 2 对接过程受力图

1—阴端阀座; 2—浮动套; 3—阳端阀座; 4—阳端

图 2 中 $\Delta F_{k1}, \Delta F_{k3}$ 为对接过程中弹簧力的增量; F 为操作推力; $f_{yi} (i=1, 3, 4)$ 为各密封圈与缸壁间存在的摩擦力; $f_i (i=1, 2, 3, 4)$ 为粘性阻尼力。

计算 f_{yi} 的经验公式如下:

$$f_{yi} = 1.2\pi \cdot u \cdot h_i \cdot d_i \cdot \Delta P_i \cdot Z_i \quad (1)$$

式中 u —— 摩擦系数 (对于聚四氟乙烯, 取 0.07);

h_i —— 密封圈截面厚度;

d_i —— 缸体内径;

ΔP_i —— 密封圈两侧的介质压差 (按均值考虑);

Z_i —— 密封圈数。

粘性阻尼力的计算公式为:

$$f_i = \mu \cdot A_i \cdot \frac{\Delta V_i}{\delta_i} \quad (2)$$

式中 μ —— 粘性系数, 对于一般油料可取 0.5×10^{-6} MPa;

A_i —— 滑动件之间的接触面积;

$\Delta V_i / \delta_i$ —— 沿半径方向油液流速的变化率 (按层流考虑)。

弹簧力的计算公式为:

$$\Delta F_{ki} = K_i \cdot \Delta X_i \quad (3)$$

式中 K_i —— 弹性系数, 设计值为 12 N/cm;

ΔX_i —— 弹簧受压后产生的变形量。

设开始对接的时刻为计时起点。为简化模型, 在不影响主要变量的情况下, 对对接过程作如下简化:

① $0 \sim T_1$ 阶段, 该过程中阳端阀座还未顶到阴端浮动套, 阳端以等加速 a_1 向阴端插入; ② $T_1 \sim T$ 阶段, T_1 时刻阳端阀座刚好顶到阴端浮动套, 阳端以等减速 a_2 向阴端插入。试验表明: 实际操作基本上符合上述简化模型。

根据牛顿定律, 并考虑到上述假设, 可列如下公式:

$$\begin{aligned} & (\Delta F_{k3} + f_3 + f_{y3}) - (\Delta F_{k1} + f_1 + f_{y1} + f_2) \\ & = \sum_{i=1}^3 m_i a \end{aligned} \quad (4)$$

$$F - (\Delta F_{k3} + f_3 + f_{k3} + f_4 + f_{y4}) = m_4 a_0 \quad (5)$$

式中 a —— 阴阳端浮动阀座及浮动套的加速度;

a_0 —— 相对于阴端的阳端加速度。

$T_1 \sim T$ 阶段 ($a_0 = a_2$), 联立式 (1) ~ 式 (4), 有:

$$a \approx \frac{K_{1.3} [a_1 T_1 (t - T_1) - 0.5 a_2 (t^2 - T_1^2)]}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (6)$$

从而

$$\begin{aligned} V = & \{ K_{1.3} [0.5 a_1 T_1 (t^2 - T_1^2) \\ & - 0.2 a_2 (t^3 - T_1^3) - (a_1 - 0.5 a_2) \\ & \times T_1^2 (t - T_1)] \} / (m_1 + m_2 + m_3) \end{aligned}$$

联立式 (1)、式 (3)、式 (5) 和式 (6) 求得:

$$\begin{aligned} F \approx & \sum_{i=1}^3 m_i a + m_4 a_2 + K_1 \int_{T_1}^t V dt \\ & + 4.8 \pi u h_{1.4} d_{1.4} \Delta P_{1.4} \end{aligned} \quad (7)$$

$0 \sim T_1$ 阶段 ($a_0 = a_1$), 阳端受力较简单, 其操作推力的计算公式如下:

$$F = (m_3 + m_4) a_1 + 1.2 \pi u h_4 d_4 \Delta P_4 + \frac{\pi \mu d_4}{\delta_4} V_0^2 t \quad (8)$$

综合式 (7) 和式 (8), 有:

$$F = \begin{cases} (m_3 + m_4)a_1 + 1.2\pi u h_4 d_4 \Delta P_4 + \frac{\pi \mu d_4}{\delta_4} V_0^2 t & \text{在 } 0 \sim T_1 \text{ 阶段} \\ \sum_{i=1}^3 m_i a + m_4 a_2 + K_1 \int_{T_1}^t V dt + 4.8\pi u h_{1.4} d_{1.4} \Delta P_{1.4} & \text{在 } T_1 \sim T \text{ 阶段} \end{cases} \quad (9)$$

经过适当简化,推得了对接过程操作推力的计算公式,该式即为仿真模型 1。

2、开门过程的动力学模型建立

转动手轮,耦合在一体的密封门绕手轮轴转动。初始转动过程中,手轮上的凸轮轮廓迅速挤压控制叉轴顶部的钢珠。控制叉轴受压,克服弹簧作用而快速下滑;在手轮转过约 10°时,控制叉轴下端完全顶开棘爪,担起了支托浮动套的任务。手轮转过 10°后,控制叉轴不再继续下滑,但耦合的密封门仍在绕手轮轴开启,直至全开。

设开始开门的时刻为计时起点。按上面的分析,将开门过程按两个阶段考虑,即:①0~10°阶段,该阶段中控制叉轴在快速下滑;②10°~90°阶段,该阶段中控制叉轴不再下滑。

图 3 中, F 为凸轮轮廓对控制叉轴的下压力; F_k 为弹簧作用力; f_0 为钢珠与凸轮间存在的摩擦力; M 为操作力矩; $M_i (i=1,2)$ 为轴承对手轮轴阻力矩; P 为油液作用于密封门上的压强。各种力、力矩的计算如下。

$$F_k = K(Y_0 + \Delta Y) \quad (10)$$

式中 K —— 弹性系数,设计值为 22.4 N/cm;

Y_0 —— 弹簧的初始压缩量;

ΔY —— 弹簧受压后产生的变形量。

轴承阻力矩的计算公式为:

$$M_i = \mu A_i r^2 \frac{\Delta \omega}{\delta_r} + 2.4\pi u h_r r \Delta P_r \quad (11)$$

式中 μ —— 粘性系数,对于一般油料可取 0.5×10^{-6} MPa;

A_i —— 手轮轴与滑动轴承间的接触面积;

$\frac{\Delta \omega}{\delta_r}$ —— 按层流考虑沿轴径方向油液转速的变化率;

u —— 摩擦系数,对于聚四氟乙烯,取 0.07;

h_r —— 密封圈截面厚度;

r —— 手轮轴半径;

ΔP_r —— 密封圈两侧的介质压差(按均值考虑)。

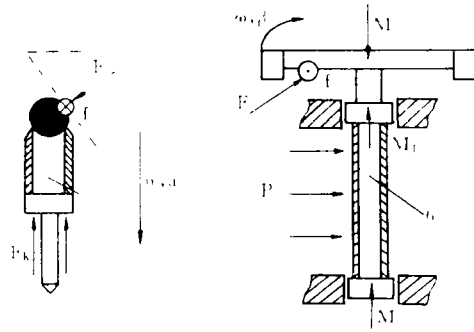


图 3 开门过程第一阶段受力图

1—控制叉轴;2—密封门与轴

为计算钢珠与手轮凸轮间的摩擦力 f_0 所产生的阻力矩 M_0 ,首先需推导控制叉轴下滑速度 V 与手轮转速 ω 间的关系。凸轮轮廓展开见图 4。

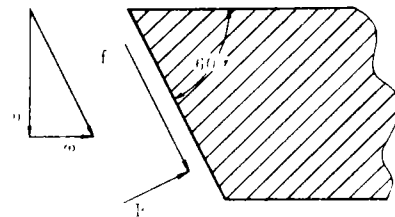


图 4 凸轮轮廓展开图

由图 4 所示的运动协调关系,不难推得:

$$V = \sqrt{3} \omega r_0$$

对上式求导、积分,有:

$$a = \sqrt{3} \beta_1 r_0$$

$$\begin{cases} \Delta Y = \frac{\sqrt{3}}{2} r_0 \beta_1 t^2 \\ Y_{max} = Y_0 + \frac{\sqrt{3}}{2} r_0 \beta_1 T_1^2 \end{cases} \quad (12)$$

式中 r_0 —— 钢珠与凸轮接触点距手轮轴的距离。

为简化分析,不妨对开门过程的两个阶段作如下简化:①0~10°阶段,以等加速度 β_1 转动手轮;②10°~90°阶段,以等加速度 β_2 转动手轮。上述简化基本上与人工的操作规律吻合。

0~10°阶段,由牛顿定律,并考虑到上述设定,可列如下公式:

$$F = 2[m_5 a + K(Y_0 + \Delta Y)]$$

从而

$$M_0 = 2u_0 [m_5 a + K(Y_0 + \Delta Y)] \cdot r_0 \quad (13)$$

式中 M_0 ——操作力矩；
 u_0 ——钢珠与凸轮轮廓间的滚动摩擦系数，
 取 0.1。

开启过程中，背压 P 作用于阴端密封门的背面。鉴于背压分布的对称性和密封门转速较小，其影响可以忽略，认为不构成阻力矩。

由牛顿定律，对密封门有如下公式：

$$M = M_1 + M_2 + M_0 + J_6\beta \quad (14)$$

式中 J_6 ——手轮、轴、密封门等折合在一起的转动惯量。

联立式(10)~式(14)，求得 $0\sim 10^\circ$ 阶段的操作力矩如下：

$$M = 2\mu A_{1.2} r^2 \frac{\beta_1 t}{\delta_r} + 4.8\pi u h_r \Delta P_r + 2u_0 [\sqrt{3} m_s \beta_1 r_0 + K(Y_0 + \Delta Y)] r_0 + J_6 \beta \quad (15)$$

$10^\circ\sim 90^\circ$ 阶段，其受力分析比较简单，操作力矩的计算公式如下：

$$M = 2\mu A_{1.2} r^2 \frac{\beta_2 t - (\beta_2 - \beta_1) T_1}{\delta_r} + 4.8\pi u h_r \Delta P_r + 2u_0 K r_0 Y_{max} + J_6 \beta \quad (16)$$

综合式(15)、式(16)有：

在 $0\sim 10^\circ$ 阶段：

$$M = 2\mu A_{1.2} r^2 \frac{\beta_1 t}{\delta_r} + 4.8\pi u h_r \Delta P_r + 2u_0 [\sqrt{3} m_s \beta_1 r_0 + K(Y_0 + \Delta Y)] r_0 + J_6 \beta$$

在 $10^\circ\sim 90^\circ$ 阶段：

$$M = 2\mu A_{1.2} r^2 \frac{\beta_2 t - (\beta_2 - \beta_1) T_1}{\delta_r} + 4.8\pi u h_r \Delta P_r + 2u_0 K r_0 Y_{max} + J_6 \beta$$

至此，经适当简化，推得了开启过程操作力矩的计算公式。该式即为仿真模型 2。

3、 关门过程的动力学模型建立

拆分接头前，先需转动手轮。手轮转动约 80° 后，一方面，密封门仍在关闭；另一方面，受弹簧回复力作用，控制叉轴沿凸轮轮廓快速上滑，解除其底部对浮动套的轴向约束。浮动套的轴向约束被解除后，因棘爪不能跳起，故阴阳端体内的浮动阀座均被弹出而顶住各自的密封门，实现拆分前的自封。

设开始关门的时刻为计时起点。按上面的分析，将关门过程按两个阶段考虑：① $0\sim 80^\circ$ 阶段，该阶段控制叉轴不下滑；② $80^\circ\sim 90^\circ$ 阶段，该阶段控制叉轴快速下滑。此阶段受力较复杂，其受力情况见图 5。

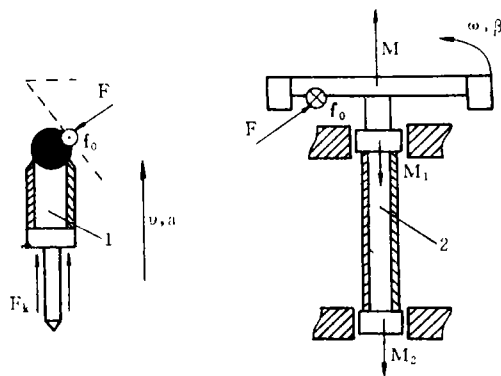


图 5 关门过程第二阶段受力图
 1—控制叉轴；2—密封门与轴

由图 5 可以看出，各符号的意义及各种力、力矩的推导基本同前，不再重复过程，直接给出操作力矩的计算公式。

在 $0\sim 80^\circ$ 阶段：

$$M = 2\mu A_{1.2} r^2 \frac{\beta_1 t}{\delta_r} + 4.8\pi u h_r \Delta P_r + 2u_0 K r_0 Y_{max}$$

在 $80^\circ\sim 90^\circ$ 阶段：

$$M = 2\mu A_{1.2} r^2 \frac{\beta_2 t - (\beta_2 - \beta_1) T_1}{\delta_r} + 4.8\pi u h_r \Delta P_r - 2u_0 [\sqrt{3} m_s \beta_2 r_0 + K(Y_{max} - \Delta Y)]$$

该式即为仿真模型 3。

4、 拆分过程的动力学模型建立

密封门完全关闭后，按下锁定按钮，解除锁紧约束后，便可抽出阳端。该过程中阳端受力见图 6 所示。

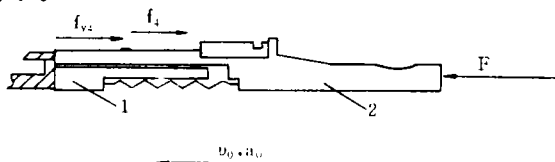


图 6 拆分过程阳端受力图
 1—阳端阀座；2—阳端

由图 6 可知，拆分中阳端受力简单。设定以匀加速度 a 进行拆分，其操作拉力如下：

$$F = (m_3 + m_4)a + 1.2\pi u h_4 d_4 \Delta P_4 + \frac{\pi a^2}{4} \mu d \frac{t^4}{\delta_4} \quad (17)$$

该式即为仿真模型 4。

三、数字仿真与分析

在建立了双向自封快速接头操作过程动力学模型后，可通过数字仿真得到模型反映的操作工况的

时域解,也可预测和估计主要参数变化时对系统操作性能带来的影响。也就是说,在输入参数确定的情况下,可定量获得快速接头的操作性能,据此,可进行结构参数的优化以获得最佳的操作性能。

用C语言作为仿真语言,仿真结果如下,其中 $V-t$ 为输入的操作规律, $F-t$ 或 $M-t$ 为相应操作规律下的性能曲线。

模型1~模型4仿真结果见图7~图10。

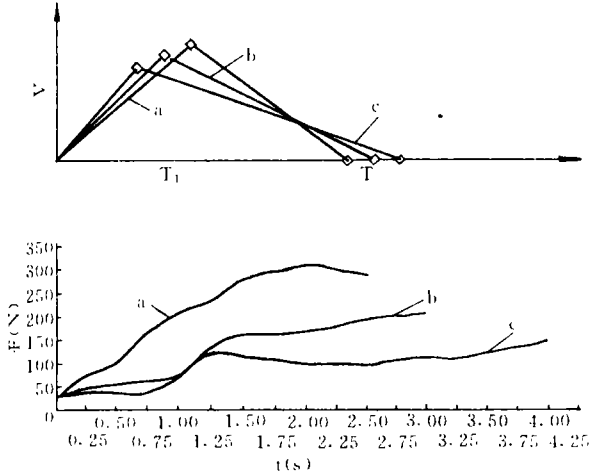


图7 模型1仿真结果

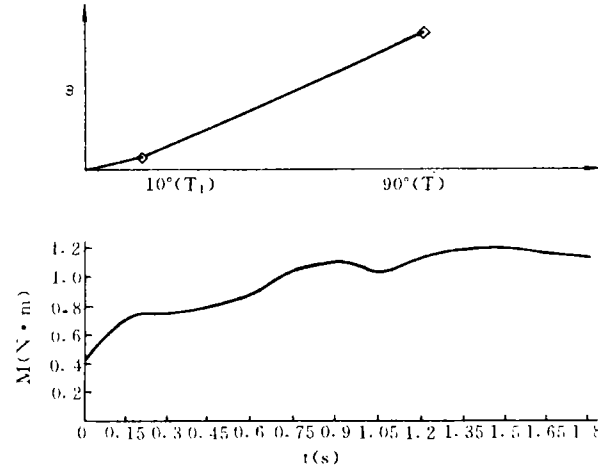


图8 模型2仿真结果

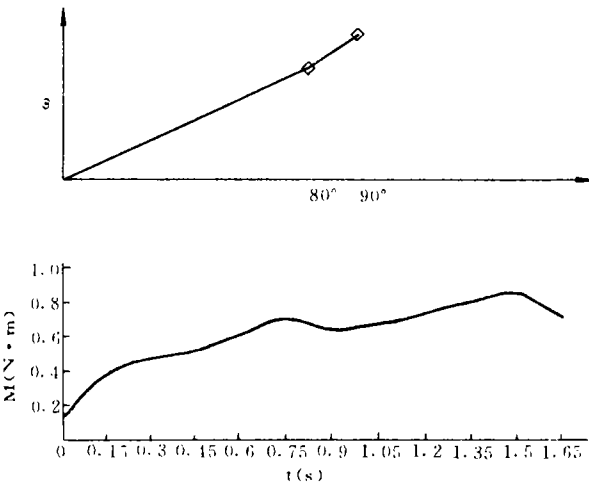


图9 模型3仿真结果

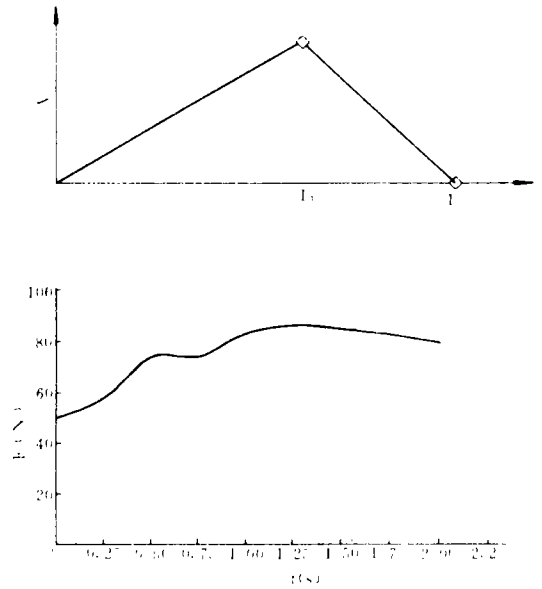


图10 模型4仿真结果

通过对仿真结果进行分析,可得出以下结论。

(1)在快速接头进行作业的四个过程中,操作外力或操作力矩的变化相对较平缓,不存在大的突变,接近操作员的操作特点。

(2)整个作业期间,最大操作推力不到 200 N(设定对接时间 3 s),最大开门力矩大约为 1.2 N·m(设定开门时间为 1.8 s),最大关门力矩大约为 1 N·m(设定关门时间为 1.5 s),最大操作

拉力不到 90 N(设定拆分时间为 2 s),操作员可直接提供,不需要多人协作或装备辅助工具。

(3)从对接开始到转入输油作业仅需 5 s,从关门开始到拆分完毕不到 4 s,相对于其它接头,具有操作速度快、操作效率高的特点,非常适合于快速连接作业。

(收稿日期:1998-09-10)

编辑:张淑英