

文章编号:1673-5005(2012)03-0155-04

螺杆泵转子三维运动仿真分析及型线优化设计

安永生¹, 宋 扬¹, 张德实², 马露霞³, 孙春龙²

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 北京 102249; 2. 大庆油田 采油工程研究院, 黑龙江 大庆 163002;

3. 东北石油大学 石油经济研究所, 黑龙江 大庆 163318)

摘要:利用三维有限元模型计算螺杆泵在过盈条件下的转子运动轨迹,分析在液压条件下液压力对定、转子相互作用的影响,得到液压条件下转子的运动规律,解释螺杆泵在运行过程中转子运动轨迹发生变化的机制。以改善螺杆泵的运行特性、降低扭矩为目的,提出同时改变螺杆泵转子节圆直径与偏心距的型线优化设计方法。结果表明,新方法能够较好地修正螺杆泵转子在定子内部的运动轨迹,提高螺杆泵的举升特性,延长螺杆泵的使用寿命。

关键词:螺杆泵; 转子; 定子; 三维仿真; 有限元分析; 型线; 优化

中图分类号:TE 933 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2012.03.027

Three dimensional motion simulation and locus optimization design of progressive cavity pump rotor

AN Yong-sheng¹, SONG Yang¹, ZHANG De-shi², MA Lu-xia³, SUN Chun-long²

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Research Institute of Oil Production Engineering of Daqing Oilfield Company Limited, Daqing 163002, China;

3. Oil Economic and Management Research Institute, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: The three dimensional finite element analysis model was conducted to study the rotor's movement locus in the interference fit condition. It was conducted to simulate the contact and interaction between the stator and rotor under the hydraulic condition. The rotor's movement locus under pressure was gotten. The mechanism of the changed rotor's movement locus was explained. For improving the movement characteristic of progressive cavity pump and declining the torque, a locus optimization method was given by which pitch circle diameter and eccentricity of rotor can be changed. The results show that this method can fix the trajectory of rotor inside the stator, optimize the working characteristic and extend the life of progressive cavity pump.

Key words: progressive cavity pump; rotor; stator; three dimensional simulation; finite element analysis; locus; optimization

随着油田举升技术的进步,螺杆泵采油技术在中国已经得到规模化应用。不仅应用在含砂和稠油油井,而且应用于稀油井和排水采气井,在大排量井中也得到了应用。因此,对螺杆泵的技术要求也越来越高^[1-2]。由于井下采油螺杆泵的工况条件复杂、影响螺杆泵工作性能的因素较多,对螺杆泵工况诊断分析仍然非常困难^[3-5]。与国外的技术相比,国内螺杆泵采油技术在系统优化、橡胶配方等方面仍有差距,以往的应用技术主要以实际经验为主,对

于工况条件下螺杆泵运动规律及受力特点的研究有待于进一步提高。如何通过现场数据的分析,得出螺杆泵内部运动和相互作用机制^[6],前人已经进行了大量的研究^[7-12]。应用数值模拟技术对螺杆泵运行特性进行分析是一种十分有效的方法。笔者利用三维有限元模型计算分析螺杆泵定子型线产生非均匀变形的条件下,转子在定子内部的运动规律及定、转子的受力情况,由此提出新的螺杆泵定、转子过盈优化设计方法,旨在对设计的型线进行优化,使螺杆

收稿日期:2012-03-02

基金项目:中国石油天然气集团公司重大科技专题项目(2011e-24-01)

作者简介:安永生(1979-),男(汉族),山东广饶人,讲师,博士,从事采油工程理论与技术方面的教学与研究。

泵定、转子受力状态得到改善,提高螺杆泵的运行效率。

1 螺杆泵的工作原理及运动规律

采油螺杆泵分为单头和多头螺杆泵,本文中主要进行单头螺杆泵的三维运动仿真分析。单头螺杆泵转子的轮廓为单线螺旋面,定子橡胶内表面为双线螺旋面。螺杆泵转子的任一截面圆的半径为 R ,整个转子的形状是由多个半径为 R 的圆盘叠加而成的,这些圆盘的圆心以偏心距 e 围绕螺杆的轴线旋转,一边旋转一边按照一定的螺距向一侧延伸。由螺杆泵的运动原理可知,螺杆泵转子的运动可以视作一个行星运动,其原理见图 1。

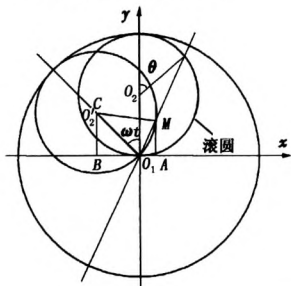


图 1 转子截面圆心的运动规律

Fig. 1 Motion law of rotor cross-section

如图 1 所示, M 为滚圆上的任意一点^[13], 经过 t 时刻后, M 点的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = AB - O_1B = e \sin(\theta + \omega t) - e \sin \omega t = \\ 2e \cos\left(\omega t + \frac{\theta}{2}\right) \sin \frac{\theta}{2}, \\ y = MA = e \cos \omega t - e \cos(\omega t + \theta) = \\ 2e \cos\left(\omega t + \frac{\theta}{2}\right) \cos \frac{\theta}{2}. \end{cases} \quad (1)$$

式中, e 为滚圆半径; mm; θ 为 M 点相对于坐标系 xO_2y 的转角, rad; ω 为滚圆旋转的角速度, rad/s; t 为 M 点的运动时间, s。

由式(1)可以求得 O_1M 的直线方程为 $x/y = \tan \frac{\theta}{2}$, 它表示的是滚圆圆周上任意一点通过定子圆心 O_1 的一条直线。因此, 可以求得 M 点的速度为

$$\begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} = -2e\omega \sin \frac{\theta}{2} \sin\left(\omega t + \frac{\theta}{2}\right), \\ v_y = \frac{dy}{dt} = -2e\omega \cos \frac{\theta}{2} \sin\left(\omega t + \frac{\theta}{2}\right). \end{cases} \quad (2)$$

由此可得

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = 2e\omega \sin\left(\omega t + \frac{\theta}{2}\right). \quad (3)$$

由此可知转子在定子内腔中的运动规律为转子以角速度 ω 绕其轴线自转, 与此同时, 转子的轴线以相同的角速度绕着定子中心反转, 转子任一截面的圆心以速度 $2e\omega \sin\left(\omega t + \frac{\theta}{2}\right)$ 作直线运动。

2 螺杆泵定、转子三维运动仿真分析

根据螺杆泵的工作原理可知, 转子的运动轨迹理论上为一条直线, 但受过盈力和液压力的共同影响, 转子的实际运动轨迹并非直线, 利用结构力学与计算流体动力学的方法对转子的运动轨迹进行计算分析。

2.1 定子对转子的作用

为了保证螺杆泵运行过程中的密封性, 螺杆泵定、转子之间存在着一定过盈量。因此, 定、转子之间将产生作用力, 使转子在运行过程中偏离理论轨迹, 其偏移量跟定子的刚度和过盈量有关。针对定子对转子的作用, 采用三维有限元模型进行计算分析, 分析对象选用 GLB500 型单头螺杆泵系统。计算条件为: 转子顶部在轴向上的位移固定, 定子的外表面固定, 两端取对称边界条件, 导程取一个定子导程 400 mm, 过盈为 0.6 mm。

通过仿真计算, 转子的移动情况如图 2 所示。

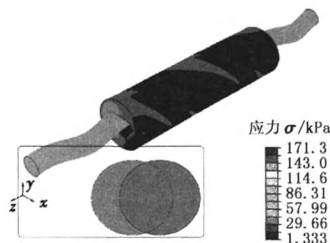


图 2 装配后刚性转子的移动情况

Fig. 2 Motion situation of rigid rotor after assembly

计算结果表明, 在 x 方向上转子移动了 0.1446 mm, 在 y 方向上转子移动了 -0.00026 mm。移动的结果使转子的运动轨迹呈椭圆形, 而非并非沿着直线作简谐运动。转子横截面中心点的运动轨迹如图 3 所示。这种椭圆形运动轨迹的短半径越大时, 会增加转子对定子的挤压力, 引起定子的受力不均匀, 使橡胶过早失效。

计算表明, 由于定、转子之间的作用力, 致使转子在运动过程中对定子直线段处两侧的作用具有明显的差异性。对于 GLB500 型单头螺杆泵而言, 由于 y 方向的位移很小, 仅为 -0.00026 mm, 可忽略不计, 因此定子一侧的过盈为 0.7446 mm, 而另一侧的

过盈为 0.4554 mm。

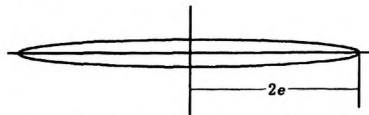


图 3 转子中心点运动轨迹示意图

Fig.3 Schematic diagram of rotor central point path

2.2 液压对转子的作用

由于实际工作中的螺杆泵系统是密闭的,在螺杆泵运转的过程中,对于液压力与定、转子作用方式的分析是难以实现的。通常情况下是通过对油井测试数据的分析得出规律,以此判断螺杆泵定、转子的运动方式和相互作用的机制。

采用计算流体动力学的方法进一步分析螺杆泵定、转子内在的作用机制。首先利用 CFD 软件建模,以得到螺杆泵内部整个连通的流场分布。将转子直径减小 0.6 mm,使它与定子之间有 0.3 mm 的均匀间隙,吸入口处给定压力为 0,出口处给定压力为 1 MPa,黏性系数为 10 kg/(m·s)。在这种条件下,计算稳态时螺杆泵转子的压力分布,计算结果如图 4 所示。

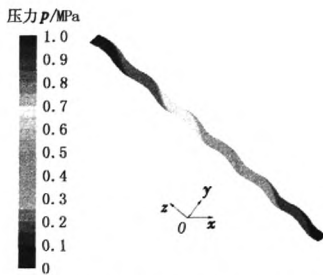


图 4 转子上的压力分布

Fig.4 Pressure distribution on rotor

3 种不同导程长度的液压力作用模拟计算结果见表 1。通过计算结果与理论解的对比,验证了所建立模型的正确性。

进一步利用有限元方法分析了液压力对螺杆泵系统的影响。把液压作用等效成主矢和主矩施加到转子上,转子在这些力的作用下与定子橡胶产生相互作用。在这种情况下,考察定子的变形和受力情况,分析得出的应力分布如图 5 所示。

从分析可知,液压力的主要作用是产生较大的 x 方向力。在 x 方向上的位移量是 0.995 mm,比过盈量大 0.395 mm。这个力对螺杆泵系统的作用是主要的,它的作用结果使转子在定子内运动的过程中偏向一侧“挤压”,导致转子横截面中心点的运动

轨迹呈椭圆形,这种作用进一步增强了因过盈而产生的影响效果。

表 1 液压力对不同导程长度的作用模拟计算结果

Table 1 Simulation result of fluid pressure on different lead length

导程 长度	液压力 F/N			扭矩 $T/(N \cdot m)$		
	F_x	F_y	F_z	T_x	T_y	T_z
理论解	0	5273.89	-1241.00	-527.39	-335.92	79.11
3 个定子	7.06	5240.58	-1143.03	-3121.65	-246.90	75.79
1 个定子	15.70	5217.60	-1150.38	-1051.33	-248.90	75.83
1 个转子	4.28	5190.07	-1157.59	-519.14	-251.87	75.86

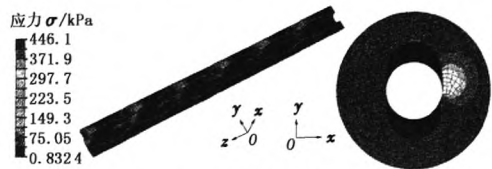


图 5 定子上的应力分布

Fig.5 Stress distribution on stator

3 型线优化设计

转子在定子中运动轨迹的椭圆度在计算中可以利用定、转子的摩擦扭矩来表示,而在实际工作中,随着转子的运动,这种因为实际工况与设计条件不同而产生的附加扭矩会给转子的运动带来负面影响。可以通过有限元计算得出摩擦扭矩,以指导型线的优化,从而提高螺杆泵的工作特性。模拟分析仍采用 GLB500 型单头螺杆泵系统,由于改变转子的偏心距与改变节圆直径都会对转子型线产生影响,所以分别对两个参数进行了调整。摩擦扭矩模拟计算结果见表 2。

表 2 螺杆泵摩擦扭矩模拟计算结果

Table 2 Friction torque simulation results of progressive cavity pump

偏心距 e/mm	过盈量 δ/mm	摩擦扭矩 $M/(N \cdot m)$
7.50	0.30	3.10
7.50	0.60	11.40
7.40	0.30	2.17
7.30	0.60	7.50

通过计算结果的分析,过盈量对扭矩的影响较大,且过盈量对扭矩的影响不是线性的。因此认为,随着定、转子过盈量的增加,不仅转子对定子的正应力增加,而且定、转子之间接触面积增大,由此导致过盈量对扭矩的影响呈现非线性。当定子形状不变,只减小转子的偏心距时,会相应地减小扭矩值,这不是因为相对的过盈量变小而引起的,而是由转

子运动轨迹的改变、转子与定子圆弧段接触量变小而引起的,此时直线段的过盈量保持不变。

根据三维运动仿真的输出及分析,通过调整螺杆泵转子的节圆直径和偏心距对型线进行优化,这种设计方法能够较好地修正螺杆泵转子在定子内部的运动轨迹,进而提高螺杆泵的运行特性。

4 现场应用效果

截至2011年底,把优化设计的螺杆泵现场应用

于51口井,最长免修期达610 d,平均动液面为660 m,平均泵效75.6%,系统平均效率38.7%,运转状况良好(图6)。

水驱区块同泵型优化泵与试验区常规泵平均值对比:平均动液面加深203 m、平均泵效提高约5%。由于泵效提高,51口井每日增油18.2 t,年增油的直接经济效益达到2650万元。

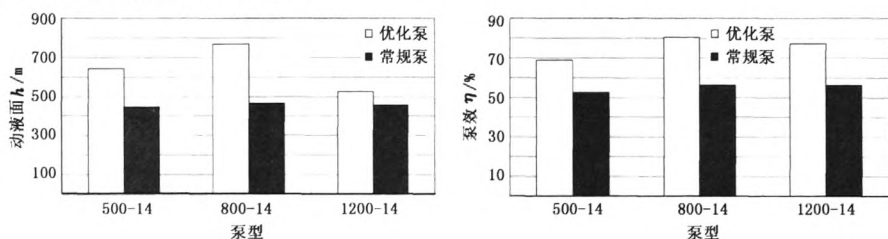


图6 水驱区块试验井与常规井性能对比

Fig. 6 Comparison of performance between test well and conventional well

5 结论

(1)在螺杆泵运转过程中,转子在定子内部的运动轨迹呈椭圆形。在有初始过盈的条件下,液压力作用下产生的横向力是使转子在运动过程中偏向一侧而使转子的运动轨迹呈椭圆形的的主要原因。

(2)作用在转子上的液压力与过盈产生的作用力是转子运动轨迹发生变化的主要原因。同时调整节圆直径与偏心距的螺杆泵型线优化设计方法可以修正转子的运动轨迹,改善定、转子之间的相互影响和作用,提高螺杆泵的运行效率,延长其使用寿命。

(3)采用该方法设计的螺杆泵在保证高泵效的同时,实现了油井液面的深抽。与同区块生产井数据相比,系统平均效率提高了约5%,充分发挥了螺杆泵高效举升的优势。

参考文献:

- [1] 黄有泉,何艳,曹刚. 大庆油田螺杆泵采油技术新进展[J]. 石油机械, 2003,31(11):65-69.
HUANG You-quan, HE Yan, CAO Gang. New evolve of progressing cavity pump technology in Daqing Oilfield[J]. China Petroleum Machinery, 2003,31(11):65-69.
- [2] DENNEY D. Fourteen years of progressing cavity pumps[J]. Journal of Petroleum Technology, 2003,55(5):63-65.
- [3] 陈丽英. 螺杆泵抽油杆柱工况诊断与断脱失效分析[J]. 石油矿场机械, 2010,39(10):86-89.

CHEN Li-ying. Analysis sucker rod in progressive cavity pump working condition diagnosis and fracture failure[J]. Oil Field Equipment, 2010,39(10):86-89.

- [4] 王伟章,闫相祯. 螺杆泵井驱动杆柱的偏磨和断裂动力学分析[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2008,32(2):97-101.

WANG Wei-zhang, YAN Xiang-zhen. Dynamics analysis on partial abrasion and fracture of driving rod in screw pump wells[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(2):97-101.

- [5] 吕彦平,吴晓东. 单螺杆泵采油系统启动扭矩动力学模型研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2006,30(6):68-70.

LÜ Yan-ping, WU Xiao-dong. Startup torque dynamic model of single progressive cavity pump in surface-driven pumping system[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006,30(6):68-70.

- [6] 王永昌,杜香芝. 螺杆泵试验转速和温度对水力特性的影响[J]. 石油矿场机械, 2011,40(4):65-69.

WANG Yong-chang, DU Xiang-zhi. Test rotation speed and temperature of PCP for the effect of hydraulic characteristics[J]. Oil Field Equipment, 2011,40(4):65-69.

- [7] OLIVET A, GAMBOA J, KENYERY F. Experimental study of two-phase pumping in a progressive cavity pump metal to metal[R]. SPE 77730, 2002.

- [8] PALADINO Emilio E, LIMA Joao A. Computational modeling of the three-dimensional flow in a metal licstator progressing cavity pump[R]. SPE 114110, 2008.

(下转第164页)

- points in large oil tank structures[J]. *Petroleum Refinery Engineering*, 1995, 25(5): 38-40, 43.
- [10] 吴天云. 油罐应力分析的新方法及其计算验证[J]. *石油化工设备*, 1997, 26(5): 15-19.
- WU Tian-yun. A new stress analysis method for petroleum storage tanks and its calculation verification[J]. *Petro-Chemical Equipment*, 1997, 26(5): 15-19.
- [11] WU Tian-yun. More accurate method devised for tank-bottom annular plate design[J]. *Oil and Gas Journal*, 1996, 94(21): 81-83.
- [12] 陈志平. 大型非锚固油罐应力分析与抗震研究[D]. 杭州: 浙江大学材料与化工学院, 2006.
- CHEN Zhi-ping. Stress analysis and anti-seismic research of the large unanchored oil storage tank[D]. Hangzhou: College of Materials and Chemical Engineering, Zhejiang University, 2006.
- (编辑 沈玉英)

(上接第154页)

- [7] BAZ A, POH S, GILHEANY J. A control of the natural frequencies of Nitinol-reinforced composite beam[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1995, 185: 171-185.
- [8] LI Y, CUI L S, ZHENG Y J, et al. DSC study of the reverse martensitic transformation in prestrained TiNi shape memory alloy in different composites[J]. *Materials Letters*, 2001, 51(1): 73-77.
- [9] TSOI K A, STALMANS R, SCHROOTEN J. Transformational behavior of constrained shape memory alloys[J]. *Acta Materialia*, 2002, 50(14): 3535-3544.
- [10] ZHENG Y J, SCHROOTEN J, TSOI K A, et al. Qualitative and quantitative evaluation of the interface in activated shape memory alloy composites[J]. *Experimental Mechanics*, 2003, 43(2): 194-200.
- [11] ZHENG Y J, SCHROOTEN J, TSOI K A, et al. Thermal response of glass fibre/epoxy composites with embedded TiNiCu alloy wires[J]. *Materials Science and Engineering*, 2002, A335(1/2): 157-163.
- [12] ZHENG Y J, CUI L S, SCHROOTEN J. Basic design guidelines for SMA-epoxy smart composites[J]. *Materials Science and Engineering*, 2005, A390(1/2): 139-143.
- [13] PIAO M, MIYAZAKI S, OTSUKA K, et al. Effects of Nb addition on the microstructure of Ti-Ni alloys[J]. *Materials Transactions JIM*, 1992, 33(4): 337-345.
- [14] OTSUKA K, REN X. Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys[J]. *Progress in Materials Science*, 2005, 50(5): 511-678.
- [15] TANG W J. Thermodynamic study of the low-temperature phase B19' and the martensitic transformation in near-equiatomic Ti-Ni shape memory alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1997, 28(3): 537-544.
- [16] ORTÍN J, DELAHEY L. Hysteresis in shape memory alloys[J]. *International Journal of Non-linear Mechanics*, 2002, 37: 1275-1281.
- [17] ORTÍN J. Preisach modeling of hysteresis for a pseudoelastic Cu-Zn-Al single crystal[J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 71: 1454-1461.
- [18] ZHENG Y J, CUI L S, SCHROOTEN J. Temperature memory effect of a nickel-titanium shape memory alloy[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(1): 31-33.
- [19] MADANGOPAL K, GANESH R K, BANERJEE S. Reversion stresses in NiTi shape memory alloys[J]. *Scripta Metallurgica*, 1988, 22(10): 1593-1598.
- (沈玉英)

(上接第158页)

- [9] GAMBOA J, OLIVET A, ESPIN S. New approach for modeling progressing cavity pumps performance[R]. SPE 84137, 2003.
- [10] GAMBOA J, OLIVET A, GONZÁLEZ P, et al. Understanding the performance of progressive cavity pump with a metallic stator; proceedings of the 20th International Pump Users Symposium[C]. 2002.
- [11] 马贤圣. 地面驱动螺杆泵抽油井生产系统优化设计方法研究与应用[D]. 北京: 中国石油大学石油工程
- 学院, 2008.
- MA Xian-sheng. The study and application of progressive cavity pump with surface-driving oil well's production system optimum design[D]. Beijing: Faculty of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, 2008.
- [12] 万邦烈. 单螺杆式水力机械[M]. 东营: 石油大学出版社, 1993.
- (编辑 沈玉英)