

基于 VB 和 Matlab 的光杆起升系统的动力学仿真

Dynamic simulation of polished rod hoisting system based on VB and matlab

王二化，刘宏伟，孙新国

WANG Er-hua, LIU Hong-wei, SUN Xin-guo

(南阳理工学院, 南阳 473004)

摘要：本文建立了光杆起升系统的动力学模型，并对其进行仿真计算。给出了起升系统的各阶固有频率及相应的主振型，给出了开始起升工况下起升系统各部件的载荷曲线、最大动载和动载系数，分析了各输入参数对动载系数的影响。以上理论分析，能为光杆起升系统的优化设计提供一定的理论依据。

关键词：光杆；起升系统；动力学仿真

中图分类号：TH113

文献标识码：B

文章编号：1009-0134(2009)06-0116-04

0 引言

有杆泵抽油是当前国内外应用最广泛的机械采油技术。目前世界上机械采油井数已超过总生产井数的90%以上，80%左右的机械采油井都采用有杆泵抽油模式；我国则有80%左右的生产井是采用有杆泵抽油模式，随着各主要油田相继进入中后期开发阶段，深部油层和难动用油藏也逐渐投入开发，这个比例还将呈上升趋势。

在有杆泵抽油系统中，光杆起升系统是其关键组件之一，简图如图1所示。光杆起升系统起升杆柱过程中，光杆起升系统由液压马达直接驱动滚筒主轴，带动滚筒旋转，使得钢丝绳在滚筒上一次次地缠绕、拉紧，提升游车和大钩系统，由于抽油杆柱与大钩相连，从而起升抽油杆柱。

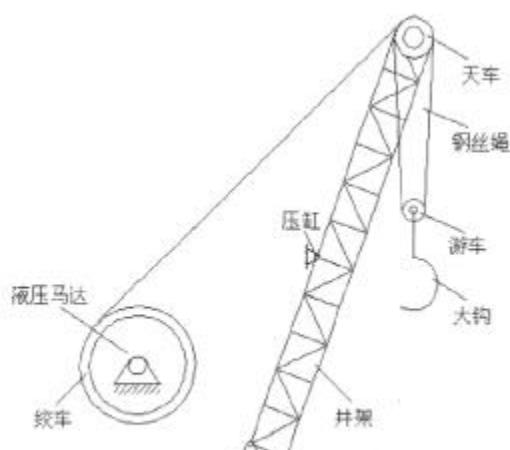


图1 光杆起升系统简图

起升系统的工作特点是间歇、重复和循环。频繁的启动、制动过程中，机构和结构承受着强烈的冲击振动。在起升系统设计的动力选择、机构设计和零部件设计等仍多是以动载系数来考虑动力载荷的影响而采用静力计算方法的。动载系数是指在起升或下放光杆及杆柱过程中出现的短时尖峰载荷与稳定载荷之比。动载系数表明在起升或下放过程中，起升系统部件里可能出现的最大载荷高出静载荷的倍数，据此确定起升系统的载荷情况，作为强度设计的依据。

1 建模^[1,2]

对于由绞车、井架、天车、游车、钢丝绳、大钩和其它辅助设备组成的这样一个多级传动的光杆起升系统，研究时对其进行必要的质量集中和简化，建立起多质量多自由度的动力学模型。

建立仿真模型时，作如下假设：

- 1) 不考虑起升系统中轴的横向振动，只考虑它的扭转振动；
- 2) 不考虑钢丝绳与滑轮接触段的钢丝绳弹性及摩擦损失；
- 3) 钢丝绳缠绕在滚筒上，假定钢丝绳在滑轮槽中不打滑；
- 4) 井架等效为等直弹性杆；
- 5) 忽略了起升系统中各转动构件扭转对液压马达机械特性的反馈影响。

利用质量集中法可以将起升系统各部件折算

收稿日期：2008-11-17

作者简介：王二化（1981-）男，讲师，主要从事优化设计和动力学仿真的研究。

为：把滚筒主轴和滚筒集中为质量 M_a ，简称滚筒主轴；把天车架和天车简化为质量 M_1 ，简称天车；把游车、大钩折算为质量 M_2 ，简称游车；把要起升的杆柱折算为质量 M_3 ，简称吊重。

其中， J ：绞车的等效转动惯量， $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ； m_1 ：天车的质量， kg ； m_2 ：游车和大钩的质量， kg ； m_3 ：起升杆件质量， kg ； K_1 ：井架刚度， N/m ； K_2 ：滑轮组钢丝绳的刚度， N/m ； K_3 ：大钩的刚度， N/m ； C_1 ：井架的等效阻尼系数， $\text{N} \cdot \text{s/m}$ ； C_2 ：钢丝绳的等效阻尼系数， $\text{N} \cdot \text{s/m}$ ； C_3 ：大钩的等效阻尼系数， $\text{N} \cdot \text{s/m}$ ； M_a ：液压马达对绞车的驱动力矩， $\text{N} \cdot \text{m}$ ； M_f ：滚筒主轴的运动阻力矩 ($M_f = C_f \dot{\theta}$, C_f 是滚筒主轴的等效阻尼系数， $\text{N} \cdot \text{s/rad}$)， $\text{N} \cdot \text{m}$ ； θ ： J 的转角， rad ； x_1 ： m_1 的线位移， m ； x_2 ： m_2 的线位移， m ； x_3 ： m_3 的线位移， m ； r ：滚筒半径， m ； n ：滑轮组倍率。

开始起升工况下，利用隔离体分析法，可建立起下列振动微分方程：

$$\begin{aligned} J\ddot{\theta} &= M_a - C_f \dot{\theta} - K_2 \left[\frac{r\theta}{n} - (x_1 - x_2) \right] \frac{r}{n} \\ m_1 \ddot{x}_1 &= K_2 \left[\frac{r\theta}{n} - (x_1 - x_2) \right] - K_1 x_1 - C_1 \dot{x}_1 \\ m_2 \ddot{x}_2 &= -K_2 \left[\frac{r\theta}{n} - (x_1 - x_2) \right] - K_3 (x_2 - x_3) - C_2 \dot{x}_2 \\ m_3 \ddot{x}_3 &= K_3 (x_2 - x_3) + m_3 g - C_3 \dot{x}_3 \end{aligned} \quad (1)$$

写成矩阵形式：

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F(t) \quad (2)$$

式中

$$M = \begin{bmatrix} J & & \\ & m_1 & \\ & m_2 & \\ & & m_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$K = \begin{bmatrix} \frac{K_2 r}{n^2} & -\frac{K_2 r}{n} & \frac{K_2 r}{n} \\ -\frac{K_2 r}{n} & K_1 - K_2 & -K_2 \\ \frac{K_2 r}{n} & -K_2 & K_2 - K_3 - K_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_f & & \\ & C_1 & \\ & C_2 & \\ & & C_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$F(t) = [M_a \ 0 \ 0 \ m_3 g] \quad (6)$$

$$X = [\theta \ x_1 \ x_2 \ x_3]^T \quad (7)$$

2 动力学仿真计算

由于VB软件具有可视化的设计平台，而Matlab工程计算功能十分强大，本文选择VB结合Matlab的方式进行动力学方程的求解。

2.1 求解光杆起升系统的固有频率和振型

由于M和K均为正定矩阵，所以，所建模型是正定系统。利用MATLAB软件求M, K的广义特征值矩阵和特征向量矩阵。

$$[\Phi, D] = \text{eig}(M, K, "chol") \quad (8)$$

由式(8)可以求出M, K的广义特征值矩阵D和特征向量矩阵 Φ 。

广义特征值和固有频率有如下关系：

$$\lambda_n = \frac{1}{\omega_n^2} \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可以求出起升系统各阶固有频率和对应的主振型。

2.2 利用模态叠加法求解光杆起升系统的动态响应

根据开始起升工况下的初始条件 $t=0$: $x(0)$ 和 $\dot{x}(0)$ 和相对阻尼系数 ζ ，可求出瞬态响应。把动力学方程化简成龙格-库塔方法要求的格式，利用四阶龙格-库塔方法，分别对各个解耦过的方程进行求解，这样可以求出主坐标下的动力学系统的稳态响应。最后将瞬态响应和稳态响应在各个坐标上分别叠加，就可以求出所建起升系统动力学模型的响应。

3 仿真程序实现及仿真结果

利用VB和Matlab编制动力学仿真软件，仿真结果如下所示。

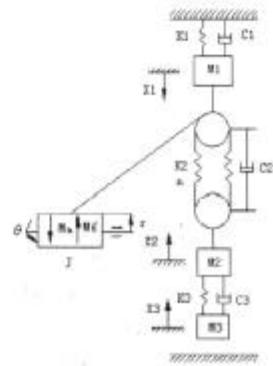


图2 光杆起升系统动力学仿真模型

3.1 模态分析结果

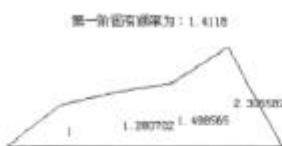


图3 第一阶振型



图4 第二阶振型

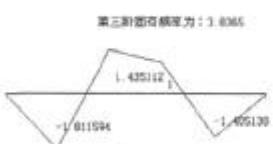


图5 第三阶振型

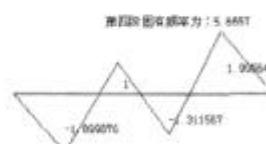


图6 第四阶振型

和表1数据相比,可以看出,起升系统工作频率远离系统的各阶固有频率,说明工作时不会发生共振现象,且偏于安全,由各阶振型可以看出,起升系统整体的刚度和质量分布较为均衡,无明显的薄弱部位和过剩部位,这些都有利于整个光杆起升系统的动力学性能。

表1 起升系统各转动轴的转速

转动轴名称	发动机主轴	分动箱输出轴	液压泵主轴	液压马达主轴
转速 (r/min)	4500	1500	1500	600

3.2 仿真计算及结果分析

经过仿真计算,可得起升系统开始起升工况下的载荷曲线、最大动载和动载系数。图7~图10为光杆起升系统开始起升工况下滚筒主轴、井架、钢丝绳和大钩的载荷曲线。表2所列为开始起升工况下滚筒主轴、井架、钢丝绳和大钩的最大动载和动载系数。

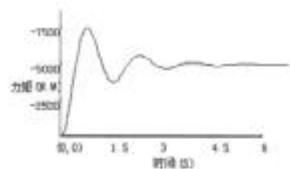


图7 滚筒主轴的载荷曲线

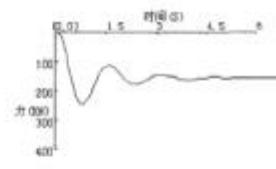


图8 井架的载荷曲线

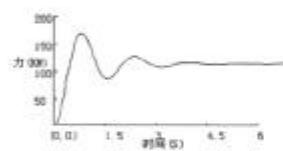


图9 钢丝绳的载荷曲线

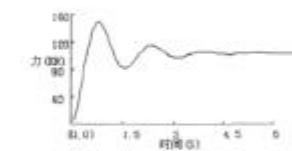


图10 大钩的载荷曲线

由图7所示,滚筒主轴上的扭矩随液压马达传递扭矩的增大而增大,由于液压马达转速低,并且运行平稳,所以,滚筒主轴没有太大的振动载荷。由图9和图10所示,大钩和钢丝绳的动载系数在起升

过程中的变化与滚筒主轴类似。

由表2所示,开始起升工况下动载系数较大,这是因为,钢绳拉紧的那一刻,起升系统各部件都已经有了初速度,瞬间加载,就会有相当大的冲击力。

由表2,可以看出,起升速度越高,则滚筒主轴部分的动载荷越大,动载系数也随之增大,滚筒主轴以后部件的动载和动载系数也随起升速度的提高而增大。

表2 开始起升工况下的各部件的最大动载和动载系数

部件类别	滚筒主轴 (N·M)	井架 (kN)	钢丝绳 (kN)	大钩 (kN)
静载荷	4807.513	168.475	112.632	100
0.1m/s	最大动载	7408.542	245.472	169.157
起升	动载系数	1.541	1.457	1.502
0.05m/s	最大动载	6545.088	208.067	150.123
起升	动载系数	1.312	1.235	1.302

3.3 参数对性能的影响

为了研究各输入参数对光杆起升系统动力学性能的影响情况,通过程序可以计算各输入参数按照一定步长改变时对起升系统重要性能参数的影响情况,如动载系数等。经过综合分析,决定选取井架刚度 k_1 、滑轮组钢丝绳刚度 k_2 、大钩刚度 k_3 、天车质量 m_1 、游车质量 m_2 、大钩质量 m_3 和阻尼系数 A ($A=B$) 等输入参数为研究对象,表3为各输入变量的初始值和计算步长,步数为5步,仍以开始起升工况为例,表4~表7为所选各输入变量对滚筒主轴、井架、钢丝绳和大钩动载系数的影响数据表格。

表3 输入参数的初始值和计算步长

输入参数	k_1 (N/m)	k_2 (N/m)	k_3 (N/m)	m_1 (kg)	m_2 (kg)	m_3 (kg)	A
初始值	3245000	200453	321222	1500	1000	120	0.07
计算步长	300000	20000	30000	150	100	12	0.01

表4 输入参数对滚筒主轴动载系数的影响

输入参数	k_1	k_2	k_3	m_1	m_2	m_3	A
初始值	1.541	1.541	1.541	1.541	1.541	1.541	1.541
第1步	1.632	1.572	1.550	1.532	1.550	1.547	1.562
第2步	1.703	1.597	1.558	1.524	1.558	1.551	1.469
第3步	1.756	1.616	1.567	1.517	1.565	1.554	1.442
第4步	1.771	1.631	1.575	1.511	1.571	1.556	1.417
第5步	1.792	1.648	1.582	1.504	1.578	1.556	1.394

表5 输入参数对井架动载系数的影响

输入参数	k_1	k_2	k_3	m_1	m_2	m_3	A
初始值	1.457	1.457	1.457	1.457	1.457	1.457	1.457
第1步	1.528	1.476	1.465	1.441	1.477	1.462	1.387
第2步	1.593	1.491	1.471	1.426	1.493	1.466	1.326
第3步	1.639	1.502	1.475	1.417	1.506	1.469	1.285
第4步	1.682	1.509	1.479	1.409	1.517	1.471	1.271
第5步	1.705	1.512	1.481	1.403	1.525	1.472	1.264

表6 输入参数对钢丝绳动载系数的影响

输入参数	k_1	k_2	k_3	m_1	m_2	m_3	A
初始值	1.502	1.502	1.502	1.502	1.502	1.502	1.502
第1步	1.557	1.567	1.567	1.497	1.523	1.510	1.434
第2步	1.602	1.619	1.619	1.493	1.704	1.516	1.382
第3步	1.636	1.661	1.661	1.490	1.719	1.522	1.336
第4步	1.663	1.693	1.694	1.488	1.735	1.521	1.301
第5步	1.685	1.715	1.526	1.487	1.582	1.521	1.275

表7 输入参数对大钩动载系数的影响

输入参数	k_1	k_2	k_3	m_1	m_2	m_3	A
初始值	1.484	1.484	1.484	1.484	1.484	1.484	1.484
第1步	1.536	1.523	1.492	1.478	1.508	1.488	1.399
第2步	1.585	1.554	1.498	1.475	1.529	1.491	1.327
第3步	1.618	1.579	1.502	1.472	1.547	1.193	1.278
第4步	1.647	1.491	1.505	1.470	1.562	1.495	1.249
第5步	1.665	1.702	1.507	1.469	1.576	1.496	1.228

由表4~表7可以看出输入参数对光杆起升系统各部件动载系数的影响情况,对起升系统各部件动载系数影响较大的是: k_1 、 k_2 、 m_2 和A。因而在机构改造或优化设计时,应合理选择设计变量,从而以较低的改造成本获得较佳的起升系统性能。

4 结论

根据仿真结果,可得出以下结论:

【上接第105页】

表2 不同调度算法的结果比较

算法	项目1持续	项目2持续	项目3持续	项目4持续	项目5持续	总工期	加权和
	时间	时间	时间	时间	时间		
基于贪心策略的多项目调度算法	35	21	27	30	17	35	32.20
基于贪心策略的多项目调度算法+关键链识别算法 ^[6] +缓冲区设置算法 ^[6]	30	21	34	28	17	34	31.14
多优先级算法 ^[7]	34	24	30	28	20	35	32.52
遗传算法 ^[8]	31	22	33	26	18	34	31.30
LSSA ^[9]	32	31	35	29	20	37	34.48
MAXTWK ^[10]	29	26	32	25	40	36.98	

ward-forward heuristics for resource-constrained multi-project scheduling[C].Proceedings of the Eight International Workshop on Project Management and Scheduling,2002,April:244-248.

- [3] J.F.Goncalves,J.J.M.Mendes,M.G.C.Resende.A genetic algorithm for the resource constrained multi-project problem [J].European Journal of Operational Research,2007.
- [4] 寿涌毅.资源约束下多项目调度的迭代算法[J].浙江大学

1)光杆起升系统固有频率远离抽油机各部件工作频率,不会发生共振,起升系统整体的刚度和质量分布较为均衡,无明显的薄弱部位和过剩部位;

2)动载系数随起升和下放速度的增大而增大,速度越高,变化越快;

3)由输入参数对动载系数的影响表格数据,可以看出,对动载系数影响较大的参数有 k_1 、 k_2 、 m_2 和A。

以上分析结果可以为光杆起升系统零部件的设计提供动力学方面的理论依据,对系统的优化设计也具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 邵忍平,何大为,黄欣娜.机械系统动力学[M].北京:机械工业出版社,2005.83-148.
- [2] 陈如恒,陈朝达.钻机起升动力学的研究[J].石油矿场机械,1982,11(3):1-11.
- [3] 侯勇俊,杜小平,艾志久,等.XJ350起升系统动力学仿真模型[J].西南石油学院学报,1998,20(4):59-62.
- [4] 韩守习,张大可.基于SIMULINK的起重机起升机构动态仿真[J].重庆建筑大学学报,2003,25(6):67-73.
- [5] 倪振华.振动力学[M].西安:西安交通大学出版社,1989.35-337.
- [6] 邓林义,林焰,金朝光,陈明.资源约束下多项目调度的拓扑优化方法[J].系统仿真学报,2007,19(16):3846-3849.
- [7] 刘士新,宋健海,唐加福.基于关键链的资源受限项目调度新方法[J].自动化学报,2006,32(1):60-66.
- [8] 廖仁,陈庆新,毛宁.资源约束下多项目调度的启发式算法[J].管理工程学报,2002,16(增刊):100-103.
- [9] Tsai D M , Chiu H N. Two heuristics for scheduling multiple projects with resource constraints[J].Construction Management and Economics,1996,14:325-340.
- [10] Kurtulus I,Davis E W. Multi-project scheduling: Categorization of heuristic rules performance[J].Management Science,1982,28(2):161-172.