

文章编号: 0253-2697(2017)04-0468-07 DOI:10.7623/syxb201704011

再制造抽油杆纵向共振模糊可靠性分析

宋玉杰 彭惠芬 夏 晔

(东北石油大学机械科学与工程学院 黑龙江大庆 163318)

摘要:针对再制造抽油杆设计参数的高散性和共振准则的模糊性,所导致的再制造抽油杆疲劳强度设计偏于危险的缺陷,将模糊可靠性理论引入再制造抽油杆疲劳强度设计中,根据再制造抽油杆实际工况,从实验出发,研究再制造抽油杆弹性变形应力刚化对其振动特性的影响,并以实验为基础,建立并验证再制造抽油杆纵向振动数值模型;基于随机有限元理论,采用一次二阶矩法推导了再制造抽油杆固有频率的均值及方差;利用正态型隶属函数描述再制造抽油杆共振边界的模糊性,推导了具有多阶固有频率再制造抽油杆模糊可靠度计算公式,数值算例验证了该方法的有效性和可行性。在此基础上,研究了变异系数和隶属度对再制造抽油杆振动模糊可靠度的影响,分析了不同阻尼比下再制造抽油杆共振产生的悬点处附加动反力和纵向位移响应特性曲线,为再制造抽油杆合理疲劳强度设计提供理论基础。

关键词:再制造抽油杆;模糊可靠性;纵向共振;变异系数;隶属度

中图分类号:TE933

文献标识码:A

A fuzzy reliability analysis on the longitudinal vibration of remanufacturing sucker rod

Song Yujie Peng Huifen Xia Ye

(School of Mechanical Science and Engineering, Northeast Petroleum University, Heilongjiang Daqing 163318, China)

Abstract: Due to the discreteness of design parameters and the fuzziness of resonance criterions for remanufacturing sucker rod, a deficiency exists, i. e., the fatigue strength design of remanufacturing sucker rod tends to a failure, so that fuzzy reliability theory is introduced to the fatigue strength design of remanufacturing sucker rod. Based on the actual working condition of remanufacturing sucker rod, the impacts of initial elastic deformation stress stiffness of remanufacturing sucker rod on vibration characteristics are studied by experiments. Then, on the basis of experimental results, a numerical model is established and verified for longitudinal vibration of remanufacturing sucker rod. With the help of stochastic finite element theory and the first-order second moment method, both the mean and variance of inherent frequency are derived for remanufacturing sucker rod. The fuzziness of resonant boundary conditions for remanufacturing sucker rod is described using normalized membership function, and then fuzzy reliability formula for remanufacturing sucker rod is derived with multiple inherent frequencies. The effectiveness and accuracy of above method are validated by numerical cases. On this basis, the impacts of variation coefficients and membership on fuzzy reliability of vibration are studied for remanufacturing sucker rod. The additional dynamic constraint reaction force at the suspension point caused by the resonance of remanufacturing sucker rod is analyzed as well as the response characteristic curve for longitudinal displacement under different damping ratios, providing a theoretical basis for the reasonable fatigue strength design for remanufacturing sucker rod.

Key words: remanufacturing sucker rod; fuzzy reliability; longitudinal vibration; variation coefficient; membership degree

引用:宋玉杰,彭惠芬,夏晔.再制造抽油杆纵向共振模糊可靠性分析[J].石油学报,2017,38(4):468-474.

Cite: SONG Yujie, PENG Huifen, XIA Ye. A fuzzy reliability analysis on the longitudinal vibration of remanufacturing sucker rod [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(4): 468-474.

由于国际油价急剧下跌,中国各大油田开展“降本增效”工作,大量旧抽油杆经过再制造加工后被再次利用。作为采油系统的关键部件,再制造抽油杆的振动特性是影响其自身疲劳寿命的最重要因素^[1-4]。抽油杆不合理的结构设计,往往使抽油杆发生共振现象,产生较大附加动反力,降低抽油杆的疲劳寿命。为此,许

多研究人员对抽油杆的振动问题进行了研究^[5-8],这些研究成果为再制造抽油杆的疲劳强度设计奠定了理论基础。

再制造抽油杆的几何参数及材料参数具有较大的离散随机性,共振准则具有一定的模糊性,导致传统的确定性疲劳强度设计已难以满足再制造抽油杆疲劳强

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 11502051)“采油螺杆泵漏失机理的刚柔螺旋曲面与液膜多场耦合研究”资助。

第一作者:宋玉杰,男,1968年12月生,1990年获大庆石油学院学士学位,2008年获大庆石油学院博士学位,现为东北石油大学教授,主要从事机械设计制造方面的研究工作。Email: syjdqpi@163.com

通信作者:彭惠芬,女,1969年4月生,1992年毕业于大庆石油学院,2012年获吉林大学博士学位,现为东北石油大学副教授,主要从事小波有限元数值分析、复合材料力学方面的研究工作。Email: phfdaqing@163.com

度设计的可靠性和安全性要求。因此,寻求一种更实际可靠的疲劳强度设计方法,提高再制造抽油杆疲劳寿命具有十分重要的工程实际意义。

基于随机有限元理论^[9-13]的模糊可靠性分析是将随机有限元与模糊理论相结合,既考虑了疲劳强度设计中各设计参数的随机离散性,同时又考虑了共振边界的模糊性,使结构的疲劳强度设计更加安全、贴近工程实际^[14-21]。

Sudret等^[22]将不同的随机有限元可靠性设计方法进行了比较,为随机有限元理论的工程应用提供了理论基础;王社锋等^[23]采用改进的一次二阶矩法对车辆结构可靠性进行了分析,给出了各设计变量对结构设计制造可靠性的影响程度;严心池等^[24]对具有多随机变量结构可靠性力学模型的选取及安全余量灵敏度分析等问题进行了研究,为复杂结构系统可靠性分析提供了新思路;张功学等^[25]利用模糊可靠性方法对共振机械进行了模糊可靠性检验和设计,提出了提高共振机械模糊可靠度的方法;周海浪等^[18]将该方法应用到具有多阶固有频率的可靠性分析中,解决了结构振动的模糊可靠性问题;江涛等^[26]对连续型随机应力和离散型模糊强度的模糊可靠度公式进行了研究,提出了一种简洁的模糊-随机干涉模型可靠度计算公式;张萌等^[27]针对航空发动机叶片固有频率受众多复杂因素影响,利用截集理论建立了发动机叶片模糊可靠性评估模型。

由以上分析可见,模糊可靠性理论已广泛应用于工程领域,并取得了较大成就,但采油机械疲劳强度设计大多数停留在传统的疲劳强度设计阶段。笔者将该方法引入采油系统可靠性分析中,根据再制造抽油杆实际工况,采用实验与数值模拟相结合方法,研究了再制造抽油杆弹性变形应力刚化效应对其固有频率的影响,在此基础上,建立了再制造抽油杆合理振动数值模型,考虑再制造抽油杆设计变量的随机性和共振准则的模糊性,推导出再制造抽油杆模糊可靠度计算公式,分析了变异系数及隶属度对再制造抽油杆模糊可靠度的影响,数值算例验证了该方法的有效性和可行性,同时研究了不同阻尼比下柱塞上端液柱载荷导致再制造抽油杆振动,分析了再制造抽油杆悬点处附加动反力和纵向位移响应特性曲线,为再制造抽油杆合理结构设计提供理论指导。

1 实验分析与数值模拟

在实际工作中,再制造抽油杆从上冲程开始到液柱载荷加载完毕的过程中要发生弹性伸长,内部将产生应力刚化效应^[28]。为准确分析抽油杆的振动特性,

笔者采用实验和数值模拟相结合方法研究再制造抽油杆弹性变形对其振动特性的影响。

1.1 实验分析

为研究再制造抽油杆弹性变形对其固有频率的影响,开展室内实验。实验试样直径为10 mm,长度为100 mm,材质为经过再制造加工后的20CrMoA;实验共分6组,每组6根试样。首先采用CMT5105电子万能试验机进行静载拉伸实验(图1),载荷分别为0 kN,5 kN,10 kN,15 kN,20 kN,每组试样在载荷作用下将发生弹性变形,弹性变形结束后,用力锤敲击试样进行动态测试,采用具有3个正交方向的TSC-1M-4加速度传感器(图1)和相应的数据采集系统及分析软件,获得试样前四阶固有频率与载荷变化关系(表1)。



图1 CMT5105 拉伸装置

Fig.1 CMT5105 stretching device

从表1可以看出,试样振动各阶固有频率随载荷的增加变化较小,其中横向振动固有频率的最大变化率为0.19%,纵向振动固有频率的最大变化率为0.013%,这表明试样在拉伸载荷下,载荷数值大小对结构固有频率几乎没有影响。

图2为6组试样一阶固有频率随载荷变化关系图,彩色点分别代表各组试样数据。从图2可以看出,固有频率具有一定的离散性,导致数据离散的主要原因是再制造抽油杆试样几何尺寸、材料参数具有离散性。为此,采用概率统计方法进行再制造抽油杆振动可靠性分析是十分必要的。

表1 不同载荷下试样横向及纵向振动前四阶固有频率

Table 1 The first four orders of inherent frequencies for transverse and longitudinal vibration of samples with different loads

振型	阶数	固有频率/Hz					最大变化率/%
		载荷 0 kN	载荷 5 kN	载荷 10 kN	载荷 15 kN	载荷 20 kN	
横向振动	第一阶	7 558.8	7 562.5	7 566.2	7 570.0	7 573.7	0.1900
横向振动	第二阶	17 587.6	17 592.6	17 598.8	17 604.8	17 609.8	0.1260
横向振动	第三阶	29 522.8	29 529.8	29 535.8	29 542.7	29 549.8	0.0910
横向振动	第四阶	42 278.8	42 886.9	42 294.9	42 302.8	42 310.9	0.0760
纵向振动	第一阶	25 317.8	25 318.1	25 319.1	25 320.4	25 321.2	0.0130
纵向振动	第二阶	50 631.7	50 633.2	50 635.2	50 636.9	50 637.8	0.0120
纵向振动	第三阶	75 936.8	75 939.5	75 943.5	75 945.5	75 946.2	0.0120
纵向振动	第四阶	101 271.2	101 274.8	101 276.9	101 279.9	101 283.2	0.0118

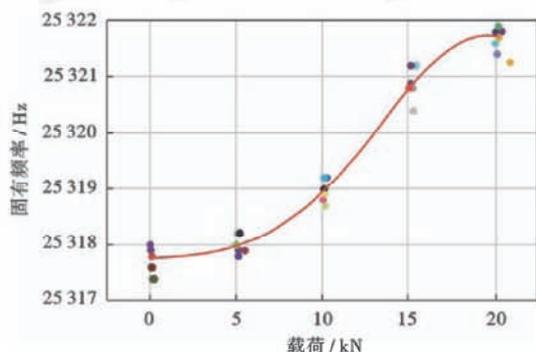


图2 6组实验试样一阶固有频率随载荷变化关系

Fig. 2 Relationship between the first order inherent frequency of 6 samples and loads

1.2 数值模拟

由于井下实际空间结构较为复杂,为简化模型进行如下假设:

- ①再制造抽油杆为均质、各向同性的弹性直管;
- ②再制造抽油杆轴线与井眼轴线重合;
- ③忽略再制造抽油杆振动过程中转动惯量和剪切变形的影响;
- ④忽略螺纹连接处和局部孔、槽对再制造抽油杆振动特性的影响。

基于上述假设,将再制造抽油杆划分为100个杆单元,边界条件为两端固定,数值模拟与实验结果比较见表2。

表2 不同计算方法下实验试样固有频率与载荷关系比较

Table 2 Contrast in the relationship between inherent frequency and loads of experimental samples using different methods

阶数	计算方法	固有频率/Hz					最大相对误差/%
		载荷 0 kN	载荷 5 kN	载荷 10 kN	载荷 15 kN	载荷 20 kN	
第一阶	实验解	25 317.8	25 318.1	25 319.1	25 320.4	25 321.2	1.23
	数值解	25 620.3	25 625.9	25 628.6	25 630.9	25 632.6	
第二阶	实验解	50 631.7	50 633.2	50 635.2	50 636.9	50 637.8	1.28
	数值解	51 278.8	51 279.1	51 283.3	51 294.8	51 302.2	
第三阶	实验解	75 936.8	75 939.5	75 943.5	75 946.5	75 948.2	1.86
	数值解	77 333.8	77 341.6	77 323.5	77 358.4	77 362.3	
第四阶	实验解	101 271.2	101 274.8	101 276.9	101 279.9	101 283.2	1.06
	数值解	102 263.3	102 269.6	102 271.3	102 289.2	102 301.9	

从表2可以看出,实验解与数值解的最大相对误差为1.86%,说明所建数值模型的正确性。利用此数值模型对再制造抽油杆进行模态分析,再制造抽油杆几何参数和材料参数如下:杆直径为0.025 m,杆长度为1000 m,密度为7800 kg/m³,弹性模量为206 GPa,泊松比为0.3,再制造抽油杆在静载下前四阶固有频率随载荷变化见图3。

从图3可以看出,再制造抽油杆初始载荷引起的弹性变形对再制造抽油杆各阶纵向振动固有频率几乎没有影响,在再制造抽油杆纵向共振分析中可忽略不计。

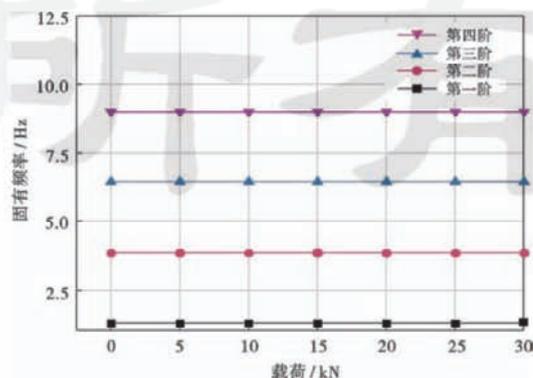


图3 再制造抽油杆固有频率与载荷关系

Fig. 3 Relationship between inherent frequency and loads of remanufacturing sucker rod

2 纵向振动的固有频率和方差

再制造抽油杆纵向振动模态的概率特征可由随机有限元法求得,再制造抽油杆有限元纵向自由振动微分方程的矩阵形式为:

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = 0 \quad (1)$$

变换后其特征矩阵方程为:

$$(K - \omega_{ni}^2 M)u = 0 \quad (2)$$

式(2)中各参变量均为随机变量,由机械振动理论可知,杆的纵向振动固有频率 ω_{ni} 为各随机变量 E, l, ρ 的函数,即 $\omega_{ni} = \omega_{ni}(E, l, \rho)$ 。

对 ω_{ni} 按中心点法作 Taylor 级数展开,保留常数项和线性项,有:

$$\begin{aligned} \omega_{ni} &= \omega_{ni}(\bar{E}, \bar{l}, \bar{\rho}) + \frac{\partial \omega_{ni}}{\partial E}(E - \bar{E}) + \\ &\frac{\partial \omega_{ni}}{\partial l}(l - \bar{l}) + \frac{\partial \omega_{ni}}{\partial \rho}(\rho - \bar{\rho}) \end{aligned} \quad (3)$$

则固有频率 ω_{ni} 的均值为:

$$\bar{\omega}_{ni} = \omega_{ni}(\bar{E}, \bar{l}, \bar{\rho}) \quad (4)$$

固有频率 ω_{ni} 的方差为:

$$\sigma_{\omega_{ni}}^2 = \left(\frac{\partial \omega_{ni}}{\partial E} \sigma_E\right)^2 + \left(\frac{\partial \omega_{ni}}{\partial l} \sigma_l\right)^2 + \left(\frac{\partial \omega_{ni}}{\partial \rho} \sigma_\rho\right)^2 \quad (5)$$

式中: $\sigma_E = \delta \bar{E}, \sigma_l = \delta \bar{l}, \sigma_\rho = \delta \bar{\rho}$, 其中 δ 为变异系数。

3 纵向共振模糊可靠性模型

3.1 隶属函数的确定

当激振频率 ω_j 与固有频率 ω_{ni} 相等,即共振比 $\lambda = 1$ 时,系统将发生共振现象。然而在工程实际中,这种理想共振情况是办不到的,一般取 $\lambda = 0.9 \sim 1.1$ 作为共振区,该共振区边界具有一定的模糊性,是频率论域上的一个模糊子集,为描述这种模糊状态需用隶属函数来表示。

令 $Z_{ij} = \omega_j - \omega_{ni}$, 则隶属函数 $\mu(Z_{ij})$ 应具有以下特点:①共振与非共振相互渗透;②共振区中点的隶属度为 1;③共振区与非共振区的交点处模糊性最大,隶属度为 0.5。根据隶属函数以上特点,采用正态型隶属函数,其表达式为:

$$\mu(Z_{ij}) = \exp\left[-\left(\frac{Z_{ij}}{0.12011\bar{\omega}_{ni}}\right)^2\right] \quad (6)$$

3.2 纵向振动模糊可靠性分析

假设再制造抽油杆各设计变量服从正态分布,据式(3),则再制造抽油杆固有频率 ω_{ni} 服从正态分布,若激振频率也服从正态分布,据统计学理论, Z_{ij} 服从正态分布,其概率密度函数为:

$$f(Z_{ij}) = \frac{1}{\sigma_{Z_{ij}} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(Z_{ij} - \bar{Z}_{ij})^2}{2\sigma_{Z_{ij}}^2}\right] \quad (7)$$

其中,

$$\bar{Z}_{ij} = \bar{\omega}_j - \bar{\omega}_{ni}$$

$$\sigma_{Z_{ij}} = \sqrt{\sigma_{\omega_j}^2 + \sigma_{\omega_{ni}}^2}$$

根据应力强度干涉理论建立频率干涉模型,如图 4 所示。图 4 可以反映出 2 个概率曲线相交的可能失效区域。

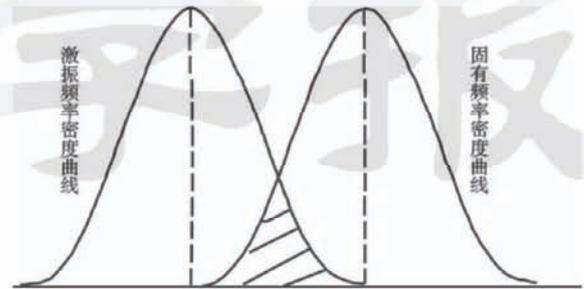


图 4 频率干涉模型示意

Fig. 4 Frequency interference model

用来描述再制造抽油杆相应状态(可靠性状态或失效状态)的隶属函数为:

$$Z_{ij} = \begin{cases} \omega_j - \omega_{ni} \neq 0 & \text{可靠性状态} \\ \omega_j - \omega_{ni} = 0 & \text{失效状态} \end{cases} \quad (8)$$

应用模糊事件的概率公式,可得结构共振的模糊失效概率为:

$$p_i^j = \int_{-\infty}^{+\infty} \mu(Z_{ij}) f(Z_{ij}) dZ_{ij} \quad (9)$$

在结构系统中,只要存在一个激振频率与固有频率接近,就会使再制造抽油杆发生共振,因此再制造抽油杆振动应为串联系统,其模糊失效概率为:

$$p_i = 1 - \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n (1 - p_i^j) \quad (10)$$

模糊可靠度为:

$$R = 1 - p_i = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n (1 - p_i^j) \quad (11)$$

4 数值算例

已知某再制造抽油杆各随机变量服从正态分布,其均值分别为:杆直径 $\bar{d} = 25 \text{ mm}$, 杆长度 $\bar{l} = 1000 \text{ mm}$, 弹性模量 $E = 206 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.3$, 密度 $\bar{\rho} = 7800 \text{ kg/m}^3$, 各随机变量的变异系数 δ 均为 0.03, 抽油杆在流体中的阻尼比 $\zeta = 0.012$ 。假设外激振载荷的频率也服从正态分布,其均值 $\bar{\omega}_i = 1.735 \text{ Hz}$, 标准差 $\sigma_{\omega_i} = 0.06 \text{ Hz}$ 。

将再制造抽油杆划分为 100 个杆单元,边界条件为上端固定,下端自由。利用所提出的方法,得到再制造抽油杆纵向振动的前四阶固有频率及标准差(表 3)。

利用模糊可靠性方法计算再制造抽油杆振动模糊可靠度为 0.969,而常规可靠性方法计算结果为 0.986。由

表3 再制造抽油杆前四阶固有频率及标准差

Table 3 The first four orders of inherent frequencies and standard deviations of remanufacturing sucker rod

阶数	固有频率/Hz	标准差/Hz
第一阶	1.285	0.137
第二阶	3.854	0.273
第三阶	6.424	0.410
第四阶	8.993	0.548

此可看出,模糊可靠性数值小于常规可靠性数值结果,出现计算结果误差的原因在于常规可靠性设计未考虑共振区域的模糊性,导致计算结果偏大,说明模糊可靠性设计用于再制造抽油杆疲劳寿命预测更加准确可靠。

图5表示模糊可靠度 R 与变异系数 δ 的关系。由图5可见,当隶属度一定时,随着再制造抽油杆各设计变量变异系数的增加,模糊可靠度将有不同程度的减小。当变异系数 δ 在0.3~0.8范围时,模糊可靠度下降幅度较大;当变异系数 δ 在0.8~1.0范围时,模糊可靠度变化趋于平缓;当变异系数 δ 等于1时,即设计变量离散性最大,模糊可靠度数值最小,约为0.852。

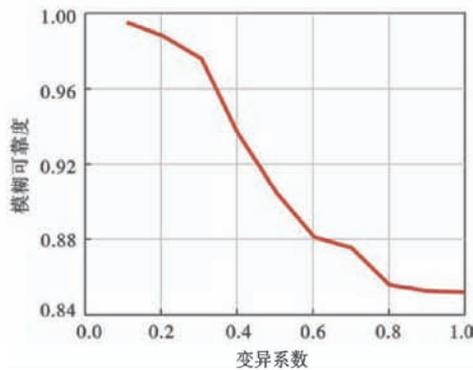


图5 模糊可靠度与变异系数关系

Fig. 5 Relationship between fuzzy reliability and variation coefficient

图6为模糊失效概率 p_f 与隶属度 $\mu(Z_{ij})$ 关系。由图6可知,当变异系数 δ 一定时,随着隶属度的增加,即共振区域模糊性逐渐减小时,模糊失效概率 p_f 呈上升趋势,当 $0.1 < \mu(Z_{ij}) < 0.6$ 时,模糊失效概率 p_f 变化较大,当 $\mu(Z_{ij}) > 0.6$ 时,隶属度对模糊失效概率 p_f 的影响趋于平缓。

图7为隶属度 $\mu(Z_{ij})$ 为1,不同阻尼比下,再制造抽油杆一阶固有频率附近纵向位移均值响应值。从图7可以看出,当激振频率接近1.285 Hz,即接近再制造抽油杆一阶固有频率时,再制造抽油杆产生共振现象,此时纵向位移响应值最大,易于实现超冲程,但这将引起较大的附加动反力(图8),降低再制造抽油杆疲劳寿命,因此,在再制造抽油杆疲劳设计中应综合考

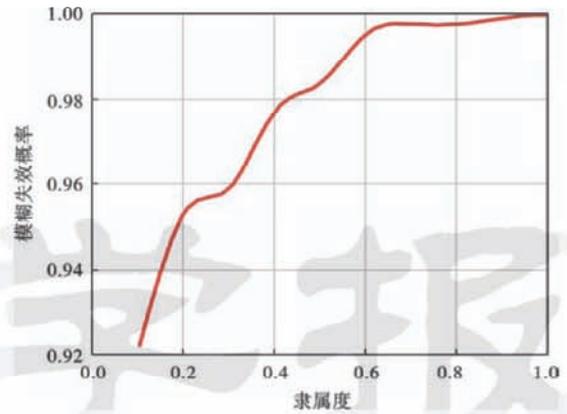


图6 模糊失效概率与隶属度关系

Fig. 6 Relationship between fuzzy failure probability and membership degree

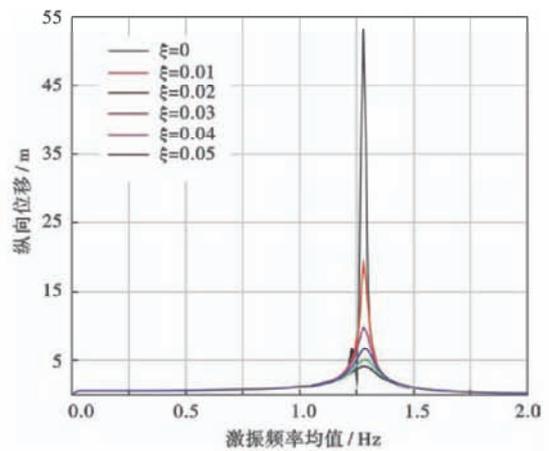


图7 不同阻尼比下一阶固有频率处纵向位移均值响应值
Fig. 7 Longitudinal-displacement mean response values for the first order of inherent frequency under different damping ratios

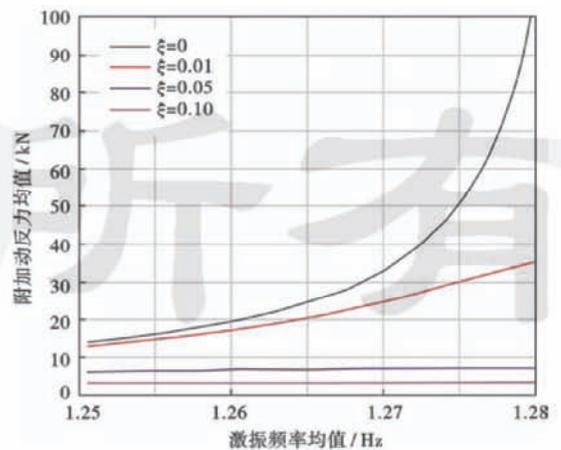


图8 不同阻尼比下一阶共振频率悬点处附加动反力均值响应值

Fig. 8 Mean response values of additional dynamic responses at the suspension point under different damping ratios

虑,即不产生较大附加动反力的前提下,使激振频率接近共振频率,实现超冲程。同时可看出,在激振频率和固有频率比值不变条件下,增大阻尼比可减小共振区纵向位移响应值。

图8为不同阻尼比下,再制造抽油杆达到一阶共振频率时悬点处附加动反力均值响应值。从图8可以看出,在激振频率接近一阶固有频率时,在无阻尼下,附加动反力随激振频率的增加急剧增大,在阻尼比较小时变化平缓,但最小附加动反力接近37.8 kN,这将导致悬点载荷急剧增大,降低抽油杆疲劳寿命。因此,在再制造抽油杆设计中,应准确计算再制造抽油杆振动模糊可靠度,避免再制造抽油杆产生共振现象。

图9为不同阻尼比下,再制造抽油杆冲数为6次/min时再制造抽油杆悬点处附加动反力均值响应值。从图9可以看出,在激振频率远小于固有频率时,由液柱载荷引起杆件振动产生的附加动反力随激振频率的增大逐渐增大,随阻尼比的减小逐渐增大,最大数值不超过6 kN。

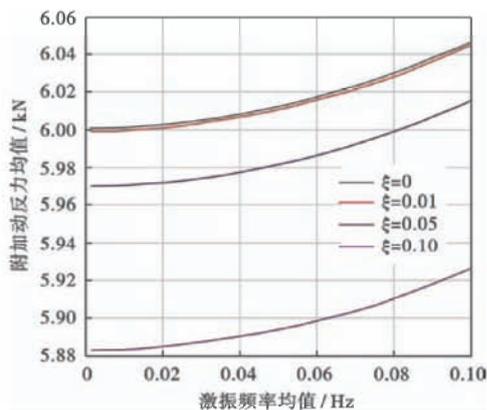


图9 不同阻尼比下 $\omega_j < 0.1$ Hz 时悬点处附加动反力均值响应值

Fig.9 Mean response values of additional dynamic responses at the suspension point when $\omega_j < 0.1$ Hz under different damping ratios

5 结论

(1) 变异系数和隶属度是影响再制造抽油杆纵向共振模糊可靠度的两个重要因素。当隶属度一定时,变异系数越大,模糊可靠度值越小;当变异系数一定时,隶属度越大,共振边界模糊性越小,模糊可靠度值越小。

(2) 当激振频率接近再制造抽油杆固有频率时,固有频率处纵向位移响应值最大,会产生较大附加动反力,减小再制造抽油杆的使用寿命,改变固有频率与激振频率比值,可避免发生共振;阻尼比对共振影响很大,增大阻尼比可使纵向共振位移及附加动反力响应值明显降低。

(3) 模糊可靠性评估方法克服了常规疲劳强度设计偏于危险的弊端,使再制造抽油杆疲劳强度设计更加安全可靠。

(4) 共振点处纵向位移响应值很大,易于实现超冲程,但同时也产生了较大的附加动反力,降低再制造抽油杆疲劳寿命,因此,再制造抽油杆疲劳设计时应在不产生较大附加动反力的前提下,使激振频率接近固有频率,实现超冲程。

符号注释: $\omega_{ni}, \bar{\omega}_{ni}$ —再制造抽油杆第 i 阶固有频率及其均值, Hz; F —实验载荷, kN; M —再制造抽油杆总质量矩阵; \ddot{y}, \dot{y}, y —再制造抽油杆加速度矩阵、速度矩阵、变形矩阵; C —常系数; K —再制造抽油杆总刚度矩阵; u —再制造抽油杆振型矩阵; E, \bar{E} —再制造抽油杆弹性模量及其均值, GPa; l, \bar{l} —再制造抽油杆长度及其均值, m; $\rho, \bar{\rho}$ —再制造抽油杆密度及其均值, kg/m^3 ; $\sigma_{\omega_{ni}}$ —再制造抽油杆第 i 阶固有频率方差, Hz; σ_E —再制造抽油杆弹性模量方差, GPa; σ_l —再制造抽油杆长度方差, m; σ_ρ —再制造抽油杆密度方差, kg/m^3 ; δ —变异系数; $\omega_j, \bar{\omega}_j$ —再制造抽油杆第 j 阶激振频率及其均值, Hz; λ —共振比; $\mu(Z_{ij})$ —隶属度; Z_{ij}, \bar{Z}_{ij} —再制造抽油杆激振频率与固有频率之差, 即隶属函数及其均值, Hz; $f(Z_{ij})$ —概率密度函数; $\sigma_{Z_{ij}}$ —隶属函数方差, Hz; σ_{ω_j} —再制造抽油杆第 j 阶激振频率方差, Hz; p_i^l —第 i 阶激振频率与第 j 阶固有频率接近共振的模糊失效概率; p_i —模糊失效概率; p_j^j —第 i 阶激振频率与第 j 阶固有频率接近共振的概率; R —模糊可靠度; \bar{d} —再制造抽油杆直径均值, m; $\bar{\mu}$ —再制造抽油杆泊松比均值; ξ —阻尼比; $\bar{\omega}_i$ —外激振载荷频率均值, Hz; σ_{ω_i} —外激振载荷频率标准差, Hz; S —纵向位移, m; $\bar{\omega}$ —再制造抽油杆激振频率均值, Hz; \bar{F} —附加动反力均值, kN。

参考文献

- [1] LI Bi, WANG Xudong. The research of vibration characteristic about sucker rod string[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 130-134: 2789-2794.
- [2] LIU Xinfu, QI Yaoguang. A modern approach to the selection of sucker rod pumping systems in CBM wells[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 76(3/4): 100-108.
- [3] 陈军, 蔡耀光, 刘新福, 等. 基于弹性体振动理论的抽油杆柱三维振动分析[J]. 石油矿场机械, 2009, 38(2): 15-19.
CHEN Jun, QI Yaoguang, LIU Xinfu, et al. Study on 3-D vibrations of sucker rod string based on the elastic body vibration theory[J]. Oil Field Equipment, 2009, 38(2): 15-19.
- [4] 薛廷, 刘延柱, 陈立群. 超细长弹性杆的分析力学问题[J]. 力学学报, 2005, 37(4): 485-492.
XUE Yun, LIU Yanzhu, CHEN Liqun. On analytical mechanics for a super-thin elastic rod[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2005, 37(4): 485-492.

- [5] 张宏,刘海浪,孙应民.定向井有杆泵抽油系统的有限元分析[J].石油学报,2000,21(6):102-106.
ZHANG Hong, LIU Hailang, SUN Yingmin. FEM analysis of sucker-rod pumping system for directional well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(6): 102-106.
- [6] 董世民,赵力朋,王胜杰,等.聚合物驱抽油机井杆柱纵向振动的仿真模型[J].系统仿真学报,2008,20(2):309-313.
DONG Shimin, ZHAO Lipeng, WANG Shengjie, et al. Simulation models of longitudinal vibration of sucker rod string of polymer flooding rod pumping systems[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(2): 309-313.
- [7] 董世民,姚春东.抽油杆柱纵向振动共振条件的质疑与力学模型的修正[J].振动工程学报,2003,16(3):389-392.
DONG Shimin, YAO Chundong. Doubting the resonance condition of the longitudinal vibration of the sucker rod string introduced by APIRP11L and improving of the mechanical modeling [J]. Journal of Vibration Engineering, 2003, 16(3): 389-392.
- [8] 李子丰.油气井杆管柱力学研究进展与争论[J].石油学报,2016,37(4):531-556.
LI Zifeng. Research advances and debates on tubular mechanics in oil and gas wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(4): 531-556.
- [9] GANJI A, JOWKARSHORJIJEH L. Advance first order second moment (AFOSM) method for single reservoir operation reliability analysis; a case study [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2012, 26(1): 33-42.
- [10] DU Xiaoping. Reliability-based design optimization with dependent interval variables [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2012, 91(2): 218-228.
- [11] 张义民,吕春梅,周娜,等.动态结构系统可靠性的频率灵敏度分析[J].力学学报,2008,40(5):716-720.
ZHANG Yimin, LÜ Chunmei, ZHOU Na, et al. Frequency sensitivity analysis for dynamic structural systems reliability[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008, 40(5): 716-720.
- [12] DUAN Wei, WANG Zhangqi. Vibration reliability analysis of turbine blade based on response surface method; Proceedings of Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)[C]. Chengdu, China: IEEE, 2010: 1-4.
- [13] 张义民,苏长青,闻邦椿,转子系统的频率可靠性分析[J].振动工程学报,2009,22(2):218-220,
ZHANG Yimin, SU Changqing, WEN Bangchun. Natural frequency reliability analysis of rotor system[J]. Journal of Vibration Engineering, 2009, 22(2): 218-220.
- [14] WANG Zhonglai, HUANG Hongzhong, LI Yanfeng, et al. An approach to system reliability analysis with fuzzy random variables[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 52: 35-46.
- [15] WONG C N, HUANG Hongzhong, LI Nan. Fourier series based reliability analysis of aeroengine turbine blade under linear fuzzy safety state[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 31: 268-280.
- [16] 尼早,邱志平.结构模糊区间可靠性分析方法[J].计算力学学报,2009,26(4):489-493.
NI Zao, QIU Zhiping. Structural fuzzy interval reliability analysis method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(4): 489-493.
- [17] 邱志平,张旭东.复固有频率问题的模糊变分原理[J].固体力学学报,2015,36(1):8-19.
QIU Zhiping, ZHANG Xudong. The fuzzy variational principle of complex natural frequency[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2015, 36(1): 8-19.
- [18] 周海浪,曾庆元.结构振动的模糊可靠性分析[J].中南大学学报(自然科学版),2003,34(6):645-647.
ZHOU Hailang, ZENG Qingyuan. Fuzzy reliability analysis of structure vibration[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2003, 34(6): 645-647.
- [19] 樊恒,闫相祯,冯耀荣,等.基于分项系数法的套管实用可靠度设计方法[J].石油学报,2016,37(6):807-814.
FAN Heng, YAN Xiangzhen, FENG Yaorong, et al. Practical reliability design method of casing based on partial coefficient method[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(6): 807-814.
- [20] 张鹏,彭杨.考虑随机变量相关性的腐蚀管道失效概率[J].石油学报,2016,37(10):1293-1301.
ZHANG Peng, PENG Yang. Failure probability of corroded pipeline considering random variables correlation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(10): 1293-1301.
- [21] 林红,陈国明,朱本瑞,等.海洋石油平台结构全寿命周期动态鲁棒性分析[J].石油学报,2015,36(2):246-252.
LIN Hong, CHEN Guoming, ZHU Benrui, et al. Dynamic robustness analysis of the offshore platform in the whole life cycle[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(2): 246-252.
- [22] SUDRET B, DER KIUREGHIAN A. Comparison of finite element reliability methods[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2002, 17(4): 337-348.
- [23] 王社锋,赵洪伦.基于随机有限元的车辆结构可靠度分析研究[J].同济大学学报:自然科学版,2010,38(11):1631-1634.
WANG Shefeng, ZHAO Honglun. Reliability analysis of railway vehicle structure based on stochastic finite element[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(11): 1631-1634.
- [24] 严心池,华渊.基于随机有限元法的结构系统可靠性分析[J].武汉理工大学学报,2010,32(9):69-71.
YAN Xinchu, HUA Yuan. Structural system reliability analysis based on stochastic finite element method[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(9): 69-71.
- [25] 张功学,孟志强,朱均.共振机械的模糊可靠性理论分析[J].机械设计,2001,18(1):27-29.
ZHANG Gongxue, MENG Zhiqiang, ZHU Jun. Fuzzy reliability analysis of resonance mechanical[J]. Journal of Machine Design, 2001, 18(1): 27-29.
- [26] 江涛,陈建军,刘德平.一种简洁的模糊-随机干涉模型可靠度计算公式[J].机械科学与技术,2005,24(7):835-838.
JIANG Tao, CHEN Jianjun, LIU Deping. Equivalence between weighted average method and method based on fuzzy event probability in fuzzy random reliability context[J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24(7): 835-838.
- [27] 张萌,陆山,李波.模糊固有频率下的叶片抗共振可靠性分析[J].机械强度,2014,36(3):383-387.
ZHANG Meng, LU Shan, LI Bo. The reliability analysis of blade to avoid resonance with fuzzy inherent frequency[J]. Journal of Mechanical Strength, 2014, 36(3): 383-387.
- [28] 苏荣华,王碧珺,丁文文,等.旋转轮盘应力刚度效应对模态特性影响分析[J].工程设计学报,2009,16(4):292-296.
SU Ronghua, WANG Bijun, DING Wenwen, et al. Influence analysis of stress stiffening effect of rotating wheel-disc on its modal characteristics[J]. Journal of Engineering Design, 2009, 16(4): 292-296.