

直动式溢流阀的压力波动可靠性灵敏度分析

查从焱¹, 孙志礼¹, 刘勤², 董鹏飞¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国兵器科学研究院, 北京 100089)

摘要: 液压设备服役环境复杂, 常面临强振动、冲击等极端条件, 这些因素与结构相关不确定性参数耦合极易引起溢流阀调定压力波动而造成设备工作异常. 考虑环境振动及不确定性因素的影响, 提出了一种直动式溢流阀压力波动失效的可靠性分析模型. 通过建立振动环境下溢流阀的动力学模型实现溢流阀动态特性分析, 并以其调定压力波动偏差是否超过标准规定值为判别条件, 建立溢流阀压力波动失效的极限状态方程; 进一步地使用Kriging模型进行可靠性灵敏度分析以获取各参数对压力波动失效现象的贡献程度. 结果表明: 振动频率对可靠性的影响最为显著, 阀芯质量和振动幅度次之, 受控腔容积和敏感腔容积影响最小. 研究结果可为振动环境下溢流阀发生压力波动失效行为的调控提供理论参考.

关键词: 溢流阀; 振动; 压力波动; Kriging模型; 可靠性灵敏度

中图分类号: TB 114.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)12-1744-07

Reliability Sensitivity Analysis of Pressure Fluctuations for Direct-Acting Relief Valves

ZHA Cong-yi¹, SUN Zhi-li¹, LIU Qin², DONG Peng-fei¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Ordnance Science and Research Academy of China, Beijing 100089, China. Corresponding author: ZHA Cong-yi, E-mail: congizha@163.com)

Abstract: Hydraulic equipment commonly is operated under complex conditions, characterized by adverse factors such as intense vibration and impact. These factors, combined with the uncertainty of structural parameters, can easily lead to pressure fluctuations in relief valves, potentially resulting in equipment failure. To address this issue, a reliability analysis model for the pressure fluctuation failure of direct-acting relief valves is presented, considering the influence of environmental vibration and uncertainty factors. A dynamic model for the relief valve under environmental vibration is developed, and then its corresponding dynamic characteristics are analyzed. Moreover, based on the dynamic characteristics analysis of the relief valve and the released value of the national standard, a limit-state function for pressure fluctuation failure is established. Furthermore, the reliability sensitivity analysis is performed using the Kriging model to evaluate the contribution of each parameter to the occurrence of pressure fluctuation failure. The results indicate that the vibration frequency has the most significant impact on reliability, followed by the spool mass and vibration amplitude, while the controlled chamber volume and sensitive chamber volume show a minimal contribution. The research results can provide a theoretical basis for regulating the pressure fluctuation failure of relief valves under environmental vibration.

Key words: relief valve; vibration; pressure fluctuation; Kriging model; reliability sensitivity

溢流阀是液压系统中关键的控制元件, 担负调节系统压力、避免压力过载的重要任务. 然而, 液压设备服役环境通常恶劣, 存在强振动等不利因素, 这些因素是导致溢流阀调定不当引起压力

波动的重要原因.因此,振动环境下直动式溢流阀的调定压力失效分析对液压系统可靠性以及液压相关设备安全性的提升具有重要的现实意义.

目前,以溢流阀为对象的动态特性已有大量研究^[1-7].Kadar等^[2]为确保溢流阀的安全运行,在现有的线性稳定性分析基础上,进行了局部和全局的分岔分析.廖茂林等^[8]建立了流固耦合作用下的溢流阀动力学模型,并设计试验测试模型的可靠性.Liao等^[9]为溢流阀建立了一个两自由度的流固耦合模型,并基于蒙特卡洛法进行了可靠性分析和参数优化.吴万荣等^[10]通过理论与仿真分析交变压力作用下溢流阀的响应特性,得到了影响溢流阀异常开启的主要参数.Scuro等^[11]建立了一种具有多开口和入口压力的溢流阀三维模型,并利用 ANSYS/CFX 软件进行仿真分析.Hös等^[12]为探索溢流阀的颤振不稳定现象推导了相关数学模型,并获得了 Hopf 分岔数值结果.现有研究为溢流阀的可靠性灵敏度分析奠定了基础,但研究大多集中在确定性参数下的溢流阀问题上,而对实际中诸多不确定性因素引起的溢流阀相关参数随机不确定性问题缺乏认识.单个不确定性参数的影响或许较小,但是多个不确定性参数耦合可能会诱发元件性能的显著变化.

鉴于此,本文运用可靠性理论来探索不确定性参数对振动环境下直动式溢流阀的影响.将振动环境下直动式溢流阀的动力学模型及其调定压力波动过大而产生压力波动偏差失效的判定依据相结合,以其调定压力波动偏差是否超过国标规定值为判别条件,建立直动式溢流阀压力波动偏差的极限状态方程,提出了一种考虑环境振动因素影响下的压力波动失效行为的可靠性分析模型.进一步地,使用 Kriging 模型进行可靠性灵敏度分析,确定参数对压力波动失效现象的影响程度.旨在协助设计人员找到对失效概率影响较大的不确定性参数,从而有效地对失效概率进行调控以提高设备安全等级.

1 振动环境下的直动式溢流阀动力学建模

图 1 为直动式溢流阀的结构简图和阀芯的运动分析简图.如图 1 所示,在静态位置时,溢流阀为闭合状态.被控压力油通过阻尼孔进入溢流阀

的敏感腔,产生液压力.当弹簧的预压缩力小于液压力时,弹簧因阀芯上移而被进一步压缩,溢流开始.直到系统压力降低,弹簧的预压缩力大于液压力,阀芯关闭,溢流停止.

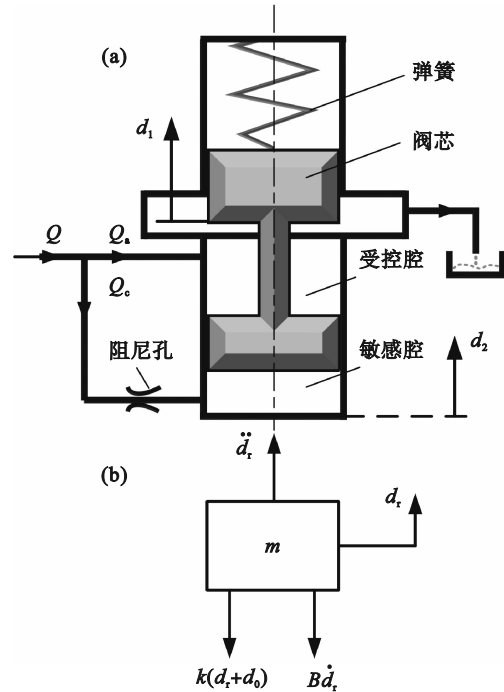


图 1 直动式溢流阀
Fig. 1 Direct-acting relief valve
(a)—结构简图; (b)—阀芯运动分析.

为构建在振动环境作用下直动式溢流阀的动力学模型,作以下假设^[7]:

- 1) 不计阀芯自重;
- 2) 不考虑泄漏、瞬态液动力、摩擦力及其他元件的影响;
- 3) 振动环境作用下,溢流阀整体作简谐运动;
- 4) 出口压力为 0 Pa.

设简谐振动方程为 $d_2 = A \sin \omega t (\omega = 2\pi f)$, A 和 f 分别为振幅和频率. d_1 和 d_2 向上为正, d_1 和 $d_r (d_r = d_1 - d_2)$ 分别为阀芯的绝对位移和相对于阀体的位移.由动静法和强迫振动理论可得阀芯振动微分方程为^[7]

$$m\ddot{d}_r + B\dot{d}_r + k(d_r + d_0) + k_s d_r p = mA\omega^2 \sin \omega t + p_c A_s \quad (1)$$

式中: m , A_s 和 k 分别为阀芯质量、阀芯下端有效作用面积和弹簧刚度; $k_s = 2C_d W \cos \alpha$ 是稳态液动力系数; B , W 和 d_0 分别为黏性阻尼系数、阀口周长和弹簧预压缩量; p_c 和 p 分别为敏感腔和受控腔的压力.

溢流阀的流量方程为

$$Q_a = \frac{V}{E} \frac{dp}{dt} + C_d W d_r \sqrt{\frac{2(p-p_0)}{\rho}} \quad (2)$$

式中： Q_a 、 V 和 p_0 分别为阀口流量、受控腔容积和出口压力； C_d 和 ρ 分别为流量系数和油液密度。

敏感腔的连续性方程为

$$Q_c = \frac{V_c}{E} \frac{dp_c}{dt} + A_v \frac{dd_r}{dt} \quad (3)$$

式中： Q_c 、 V_c 和 E 分别为通过阻尼孔的流量、敏感腔容积和油液的体积模量。

阻尼孔的流量方程为

$$Q_c = K_c(p-p_c) \quad (4)$$

式中： $K_c = \pi\delta^4/(128\mu l)$ 为阻尼液导， δ 、 l 分别为阻尼孔直径、长度， μ 为动力黏度。

泵源的流量方程为

$$Q = Q_c + Q_a \quad (5)$$

式中 Q 为溢流阀的流量。

2 压力波动可靠性灵敏度分析

2.1 压力波动可靠性极限状态函数

由GB/T 12241—2021可知^[13]，溢流阀作为安全阀，其调定压力大于1 MPa时，压力波动偏差应控制在调定压力的±3%范围内，超过此范围则影响其工作性能，严重时甚至会导致设备功能异常。相关随机变量 $\mathbf{x}=[x_1, x_2, \dots, x_n]=[m, V_c, V, A, f]$ 。建立极限状态函数：

$$G(\mathbf{x}) = 3\% - |\gamma(\mathbf{x})| = 3\% - |\gamma(m, V_c, V, A, f)| \quad (6)$$

式中： $\gamma(\mathbf{x})$ 为压力波动偏差与调定压力的比值，其值由式(1)~(5)构成的MATLAB/Simulink仿真获取，具体仿真框图见图2。图2中的5个子系统对应式(1)~(5)。

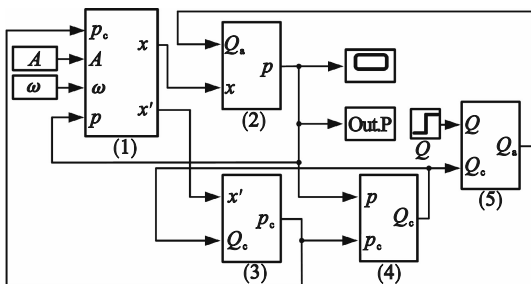


图2 溢流阀的仿真框图

Fig. 2 Simulation block diagram of the relief valve

对随机变量 \mathbf{x} 的联合概率密度函数 $h_x(\mathbf{x})$ 在失效域 $G(\mathbf{x}) \leq 0$ 求积分可得失效概率为^[14-18]

$$P_f = \Pr\{G(\mathbf{x}) \leq 0\} = \int_{G(\mathbf{x}) \leq 0} h_x(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (7)$$

采用数值模拟法获取式(7)的近似解，因为其解析解通常难以计算。Monte Carlo(MC)法是精度可以接近真值的模拟法，但其计算效率低下，尤其是遇到具有隐式的复杂工程问题时。因此，MC法常作为标准法用以检验新方法的性能^[14-18]。近年来，代理模型因兼顾计算精度和效率而被广泛应用于可靠性领域，其中Kriging模型能够提供预测均值和方差而备受关注。故本文采用Kriging模型构建输入随机变量和响应值之间的映射关系代替实际仿真来完成计算，避免过多调用仿真计算真值，提高计算效率。

2.2 Kriging模型

Kriging模型是一种半参数化模型，其基本形式为^[16-18]

$$\hat{G}(\mathbf{x}) = \mathbf{g}^T(\mathbf{x})\boldsymbol{\beta} + z(\mathbf{x}) \quad (8)$$

式中： $\mathbf{g}(\mathbf{x})=[g_1(\mathbf{x}), g_2(\mathbf{x}), \dots, g_h(\mathbf{x})]$ 为随机变量 \mathbf{x} 的多项式； $\boldsymbol{\beta}=[\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_h]$ 为回归系数向量； $z(\mathbf{x})$ 是服从正态分布 $N(0, \sigma^2)$ 的随机过程，其协方差表示为

$$\text{Cov}[z(\mathbf{x}_i), z(\mathbf{x}_j)] = \sigma^2 R(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j; \boldsymbol{\theta}) \quad (9)$$

式中： $R(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j; \boldsymbol{\theta})$ 是样本 \mathbf{x}_i 和 \mathbf{x}_j 的相关函数，具体形式如下：

$$R(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j; \boldsymbol{\theta}) = \prod_{k=1}^n \exp[-\theta_k(x_i^k - x_j^k)^2] \quad (10)$$

式中： x_i^k 和 x_j^k 分别为 \mathbf{x}_i 和 \mathbf{x}_j 的第 k 个分量； θ_k 是相关参数向量 $\boldsymbol{\theta}$ 的第 k 个分量， $\boldsymbol{\theta}$ 可通过最大似然估计法获取。

给定样本 $\mathbf{x}=[\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_m]$ 和 $\mathbf{y}=[y_1, y_2, \dots, y_m]$ ， \mathbf{y} 是 \mathbf{x} 的响应值，则未知点 \mathbf{x}^* 对应的预测值及方差可表示为

$$\hat{G}(\mathbf{x}^*) = \mathbf{g}^T(\mathbf{x}^*)\hat{\boldsymbol{\beta}} + \mathbf{r}^T(\mathbf{x}^*)\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{F}\hat{\boldsymbol{\beta}}) \quad (11)$$

$$\hat{\sigma}^2 = (\mathbf{y} - \mathbf{F}\hat{\boldsymbol{\beta}})^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{F}\hat{\boldsymbol{\beta}}) / m \quad (12)$$

式中： $\mathbf{r}=[R(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}^*, \boldsymbol{\theta}), R(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}^*, \boldsymbol{\theta}), \dots, R(\mathbf{x}_m, \mathbf{x}^*, \boldsymbol{\theta})]$ 为相关函数向量； \mathbf{F} 为 $m \times n$ 阶矩阵，由样本点处的回归模型构成； $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ 为 $\boldsymbol{\beta}$ 的估计值，其表达式为

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{g}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{g}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y} \quad (13)$$

已有大量文献对Kriging模型的相关理论作了详细解释与推导^[16-18]，不再赘述。

2.3 可靠性灵敏度分析

失效概率 P_f 对随机变量 x_i 的分布参数 $\theta_x^{(k)}$ ($i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, m$)取偏导即为可靠性灵敏度，具体表达式为^[18]

$$\frac{\partial P_f}{\partial \theta_{x_i}^{(k)}} = \int \dots \int_F \frac{\partial h_x(\mathbf{x})}{\partial \theta_{x_i}^{(k)}} \frac{1}{h_x(\mathbf{x})} h_x(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = E \left[\frac{I_F(\mathbf{x})}{h_x(\mathbf{x})} \frac{\partial h_x(\mathbf{x})}{\partial \theta_{x_i}^{(k)}} \right]. \quad (14)$$

在 MC 法求解过程中, 设从 N 个样本中抽取的第 j 个样本为 x_j , 用样本均值代替总体均值, 式 (14) 可变换为

$$E \left[\frac{\partial P_f}{\partial \theta_{x_i}^{(k)}} \right] = \frac{1}{N} \sum_j \frac{I_F(\mathbf{x})}{h_x(\mathbf{x})} \frac{\partial h_x(\mathbf{x})}{\partial \theta_{x_i}^{(k)}} \Bigg|_{x=x_j}. \quad (15)$$

假设随机变量相互独立, 对式 (15) 求期望, 可得可靠性灵敏度的数学期望为

$$E \left[\frac{\partial \hat{P}_f}{\partial \theta_{x_i}^{(k)}} \right] = \frac{\partial P_f}{\partial \theta_{x_i}^{(k)}} \approx \frac{1}{N} \sum_j \frac{I_F(\mathbf{x})}{h_x(\mathbf{x})} \frac{\partial h_x(\mathbf{x})}{\partial \theta_{x_i}^{(k)}} \Bigg|_{x=x_j} = \frac{\partial \hat{P}_f}{\partial \theta_{x_i}^{(k)}}. \quad (16)$$

上述估计为无偏估计, 用样本方差近似总体方差得估计值的方差及变异系数为

$$\text{Var} \left[\frac{\partial \hat{P}_f}{\partial \theta_{x_i}^{(k)}} \right] \approx \frac{1}{N-1} \left\{ \frac{1}{N} \left[\sum_{j=1}^N \frac{I_F(\mathbf{x})}{h_x(\mathbf{x})} \frac{\partial h_x(\mathbf{x})}{\partial \theta_{x_i}^{(k)}} \Bigg|_{x=x_j} \right]^2 - \left(\frac{\partial \hat{P}_f}{\partial \theta_{x_i}^{(k)}} \right)^2 \right\}, \quad (17)$$

$$\text{Cov} \left[\frac{\partial \hat{P}_f}{\partial \theta_{x_i}^{(k)}} \right] \approx \frac{\sqrt{\text{Var}[\partial \hat{P}_f / \partial \theta_{x_i}^{(k)}]}}{|\partial \hat{P}_f / \partial \theta_{x_i}^{(k)}|}. \quad (18)$$

为避免灵敏度数值因随机变量的单位不同具有较大的差异, 采用无量纲处理后均值和标准差的可靠性灵敏度为

$$S_{\mu_{x_i}} = \frac{\partial P_f / P_f}{\partial \mu_{x_i} / \sigma_{x_i}}, \quad (19)$$

$$S_{\sigma_{x_i}} = \frac{\partial P_f / P_f}{\partial \sigma_{x_i} / \sigma_{x_i}}. \quad (20)$$

2.4 基于 Kriging 模型的可靠性灵敏度分析

运用 Kriging 模型求解可靠性灵敏度的原理与 MC 法相近, 其区别在于 MC 法需要计算所有样本点的真实值, 而前者在构建满足精度要求的 Kriging 模型后, 只需使用 Kriging 模型估计样本真值即可. 该方法极大地减少计算时间, 尤其是针对需要借助有限元仿真或其他仿真才能获得真值的可靠性问题. 分析流程如图 3 所示, 具体计算步骤如下.

- 1) 运用拉丁超立方抽样抽取训练样本点;
- 2) 将上述样本代入图 2 所示的仿真框图中计算对应的响应值;

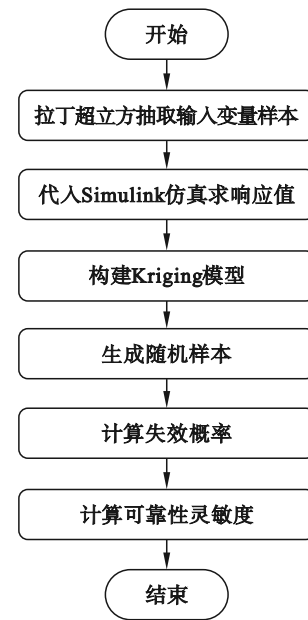


图 3 基于 Kriging 模型的可靠性灵敏度分析流程图
Fig. 3 Flowchart of the reliability sensitivity analysis based on the Kriging model

- 3) 利用步骤 1) 和 2) 的样本构建 Kriging 模型用以代替耗时的仿真;
- 4) 基于联合概率密度函数生成随机变量的样本点;
- 5) 利用步骤 3) 的代理模型和步骤 4) 生成的样本计算失效概率、均值及方差灵敏度.

3 算例分析

3.1 振动环境对溢流阀调定压力的影响

参考文献 [7] 对振动参数的取值, 取振幅 $A=0.003$ m, 频率 $f=40$ Hz. 溢流阀的其他确定性参数如表 1 所示.

表 1 溢流阀的主要参数
Table 1 Primary parameters of the relief valve

参数	数值	参数	数值
$Q/(L \cdot \text{min}^{-1})$	25	V/m^3	3.2×10^{-3}
m/kg	0.062	E/Pa	2×10^9
$B(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	700	δ/m	9×10^{-4}
$k/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1.3×10^5	A/m^2	6.2×10^{-5}
d_0/m	0.005	C_d	0.62
$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	896	W/m	0.025 1
V_j/m^3	5×10^{-6}	l/m	5×10^{-3}
$\alpha/(\circ)$	69	$\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	0.062

在振幅 $A=0.003$ m 和频率 $f=40$ Hz 的振动环境下, 溢流阀的动态特性曲线如图 4 所示.

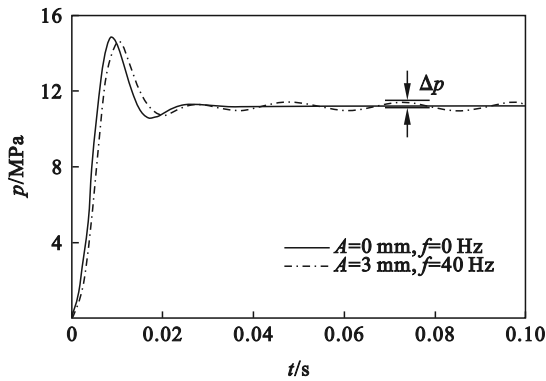


图 4 溢流阀的动态特性

Fig. 4 Dynamic characteristics of the relief valve

由图 4 可得:振动几乎不会影响压力超调量和过渡时间,但会使溢流阀的调定压力产生周期性波动.进一步地,利用控制变量法探究振幅和频率对压力波动幅值(Δp)的影响.图 5 和图 6 依次为恒定频率和恒定振幅下的压力波动幅值曲线.为避免仿真结果的偶然性,各进行 3 组仿真.

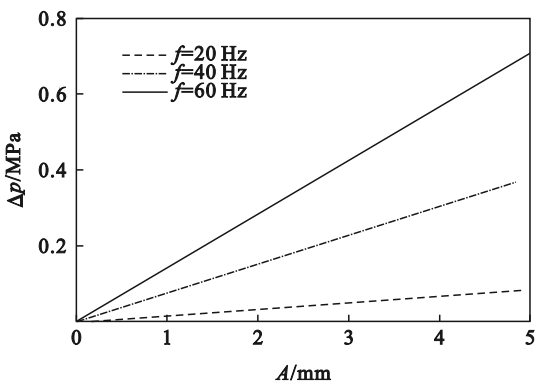


图 5 频率恒定下的压力波动幅值

Fig. 5 Pressure fluctuation amplitude at a constant frequency



图 6 振幅恒定下的压力波动幅值

Fig. 6 Pressure fluctuation amplitude at a constant amplitude

由图 5 和图 6 可知,振幅越大,溢流阀的压力波动偏差也越大且近乎线性增长.频率的增加亦引起溢流阀的压力波动偏差增大.当频率达到

80 Hz 时,压力波动偏差到达峰值.随着频率的进一步增加,压力波动偏差微弱减小.

GB/T 12241—2021^[13]和文献[7]表明,溢流阀是安全阀,当调定压力超过 1 MPa 时,压力波动偏差应控制在调定压力的 $\pm 3\%$ 范围内.因此,对振动环境下的溢流阀进行压力波动偏差可靠性灵敏度分析,找到对溢流阀失效概率贡献较大的输入变量,从而有效地调控失效概率以提高元件可靠性.进行溢流阀的可靠性灵敏度分析具有重要的实际意义.

3.2 压力波动可靠性分析

失效概率分析亦称可靠性分析,是结构分析的重要步骤之一,它对输入参数不确定性的影响进行了量化.考虑不确定性的输入变量的具体分布及相应参数如表 2 所示.

表 2 输入变量的分布及参数

Table 2 Distribution and parameters of input variables

变量	分布类型	均值	方差
m/kg	正态分布	0.062	6.2×10^{-3}
V_0/m^3	正态分布	5×10^{-6}	5×10^{-7}
V/m^3	正态分布	3.2×10^{-3}	3.2×10^{-4}
A/m	正态分布	0.003	3×10^{-4}
f/Hz	正态分布	40	4

运用拉丁超立方抽样抽取 110 组训练样本,并通过 Simulink 仿真获取上述样本对应的响应值以构建 Kriging 模型.接着,抽取 50 组测试样本,分别由 Simulink 仿真和 Kriging 模型计算样本响应值,所得结果及二者之间的绝对误差见图 7 和图 8.

由图 7 和图 8 可知,Kriging 模型的预测值与仿真计算的真实值之间的误差很小,表明 Kriging 模型已经达到所需精度.

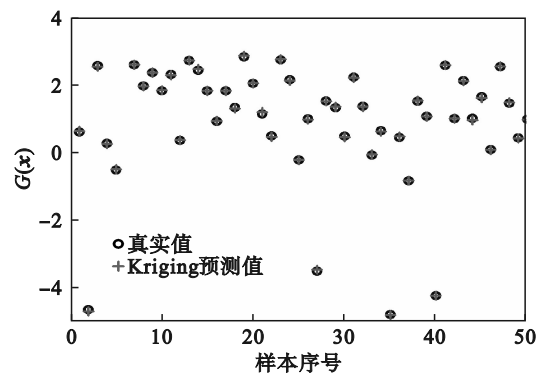


图 7 Kriging 预测值与真实值对比

Fig. 7 Comparison between Kriging predicted values and actual values

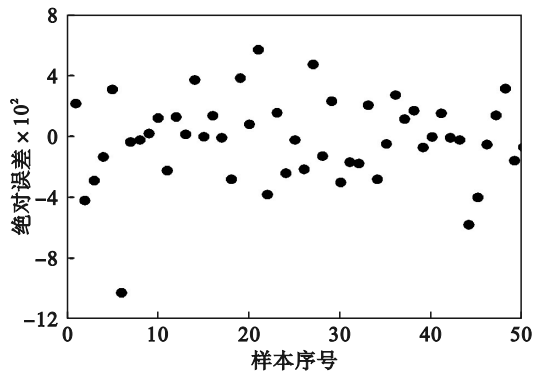


图 8 Kriging 预测值与真实值的绝对误差

Fig. 8 Absolute errors of the Kriging predicted values and actual values

基于联合概率密度函数生成 6×10^4 个样本由 MC 法计算,再由 Kriging 模型计算,所得可靠性结果如表 3 所示.其中 MC 法计算的响应值 $G(x)$ 及其频率直方图见图 9 和图 10.由表 3 可知, Kriging 和 MC 法的可靠性结果十分接近,表明基于 Kriging 模型的可靠性分析有效.此外, Kriging 模型计算时间短,效率更高.由图 10 可知,在不确定性参数的影响下,压力响应不再是确定值,而是服从近似正态分布的随机值.

表 3 不同方法的可靠性结果

方法	样本数	失效概率	时间/s
MC 法	6×10^4	0.041 6	6 073. 6
Kriging	110	0.041 1	130

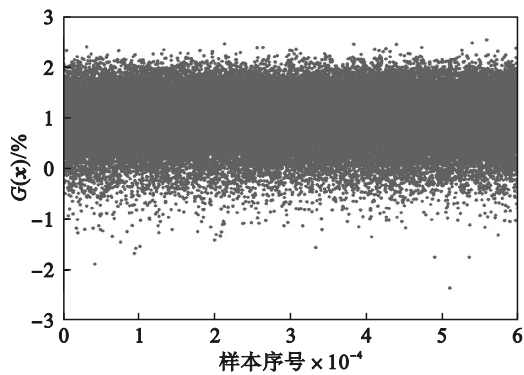


图 9 响应值 $G(x)$

Fig. 9 Response values $G(x)$

大.另外,两者在识别影响较小的参数时具有一定的差异,但这对实际需求影响较小.因为灵敏度分析通常关注影响较大的因素,对其进行调控可有效提高产品可靠性.总体上,5 个输入参数中,对失效概率的影响最明显的是振动频率(f),阀芯质量(m)和振动幅度(A)次之,受控腔容积(V)和敏感腔容积(V_c)影响最小.

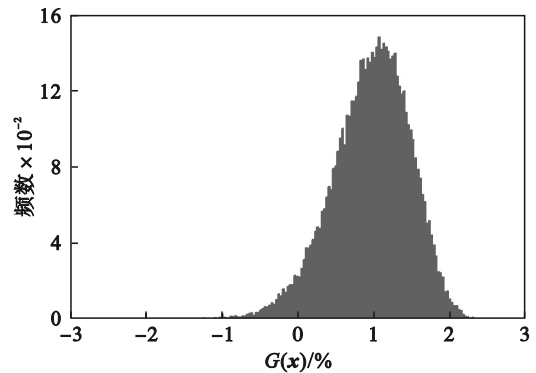


图 10 响应值 $G(x)$ 的频率直方图

Fig. 10 Frequency histogram of response values $G(x)$

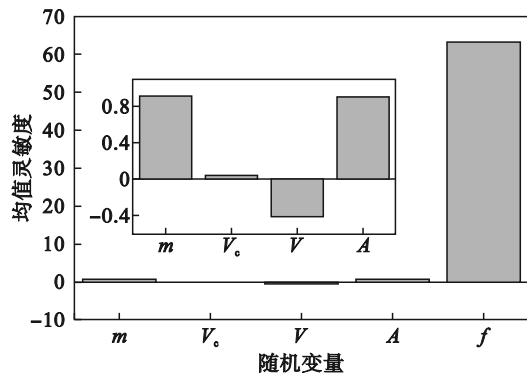


图 11 均值灵敏度分析

Fig. 11 Mean sensitivity analysis

3.3 压力波动可靠性灵敏度分析

进一步地,基于 Kriging 模型进行可靠性灵敏度分析,以探究各随机变量对可靠性的影响程度,结果如图 11 和图 12 所示.

由图 11 和图 12 可知,与各输入参数的均值相比,标准差对于溢流阀调定压力失效的影响更

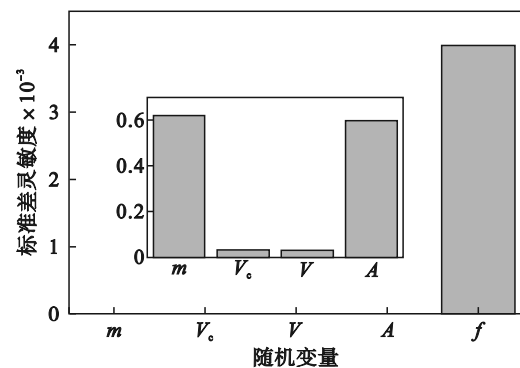


图 12 标准差灵敏度分析

Fig. 12 Standard deviation sensitivity analysis

4 结 论

1) 本文建立了振动环境下直动式溢流阀动

力学模型,并基于国家标准对溢流阀压力波动偏差的规定,考虑多个主要参数不确定性,提出了一种直动式溢流阀压力波动偏差的可靠性分析模型.该模型对防止振动环境下直动式溢流阀压力波动过大引起系统失效、提高直动式溢流阀的稳定性具有重要意义.

2) 由算例分析可知,振动频率的均值和标准差对溢流阀压力波动可靠性的影响最为显著,阀芯质量和振动幅度次之,受控腔容积和敏感腔容积影响最小.所得结果可为直动式溢流阀可靠性优化设计和工程实践提供指导.

参考文献:

- [1] Osterland S, Weber J. Analytical analysis of single-stage pressure relief valves [J]. *International Journal of Hydromechanics*, 2019, 2(1): 32–53.
- [2] Kadar F, Stepan G. Nonlinear dynamics and safety aspects of pressure relief valves [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2023, 111(13): 12017–12032.
- [3] Schröders S, Fidin A. Asymptotic analysis of self-excited and forced vibrations of a self-regulating pressure control valve [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2021, 103(3): 2315–2327.
- [4] Sharma, A K, Kumar N, Das A K. Cavitation analysis in a re-designed direct acting pressure relief valve through flow visualization method [J]. *Journal of Visualization*, 2023, 26(6): 1299–1319.
- [5] Desai S, Desai A, Karande V. Design and weight optimization of buffer relief valve using FEA with experimental validation [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 27: 1466–1472.
- [6] Osama G. Modeling of impact of the poppet element on its seat body in pressure relief valves [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2020, 235(5): 703–720.
- [7] 张怀亮,章国亮,齐征宇.基础振动下直动式溢流阀的动态特性[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(12):4181–4186.
(Zhang Huai-liang, Zhang Guo-liang, Qi Zheng-yu. Dynamic characteristics of direct operated relief valve on fundamental vibration [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(12): 4181–4187.)
- [8] 廖茂林,宋文,王晓勇,等.直动型溢流阀的流固耦合建模与动态特性研究[J].机械工程学报,2021,57(23):137–148.
(Liao Mao-lin, Song Wen, Wang Xiao-yong, et al. Fluid-structure coupling modelling and dynamic analysis of a direct-acting relief valve [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(23): 137–148.)
- [9] Liao M L, Zheng Y, Gao Z Y, et al. Fluid-structure coupling modelling and parameter optimization of a direct-acting relief valve for underwater application [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2021, 105(4): 2935–2958.
- [10] 吴万荣,田广天,郝前华.高频交变压力下先导式溢流阀主阀口异常开启分析[J].吉林大学学报(工学版),2019,49(2):451–457.
(Wu Wan-rong, Tian Guang-tian, Hao Qian-hua. Analysis of abnormal opening of main port of pilot relief valve under high frequency alternating pressure [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2019, 49(2): 451–457.)
- [11] Scuro N L, Angelo E, Angelo G, et al. A CFD analysis of the flow dynamics of a directly-operated safety relief valve [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2018, 328: 321–332.
- [12] Hös C, Champneys A, Paul K, et al. Dynamic behavior of direct spring loaded pressure relief valves: III valves in liquid service [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 43: 1–9.
- [13] 全国安全泄压装置标准化技术委员会.安全阀一般要求:GB/T 12241—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
(National technical committee for standardization of safety relief devices. Safety valves general requirements: GB/T 12241—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.)
- [14] Yi J X, Zhou Q, Cheng Y S, et al. Efficient adaptive kriging-based reliability analysis combining new learning function and error-based stopping criterion [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020, 62: 2517–2536.
- [15] Jiang C, Qiu H B, Gao L, et al. Real-time estimation error-guided active learning Kriging method for time-dependent reliability analysis [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2020, 77: 82–98.
- [16] Zha C Y, Sun Z L, Wang J, et al. A general active-learning method for surrogate-based structural reliability analysis [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2022, 83(2): 167–178.
- [17] 查从毅,孙志礼,潘陈蓉,等.面向结构可靠性分析的并行自适应加点策略[J].东北大学学报(自然科学版),2023,44(1):76–82.
(Zha Cong-yi, Sun Zhi-li, Pan Chen-rong, et al. Parallel adaptive sampling strategy for structural reliability analysis [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2023, 44(1): 76–82.)
- [18] 黄贤振,朱会彬,姜智元,等.角接触球轴承打滑可靠性灵敏度分析[J].东北大学学报(自然科学版),2021,42(12):1731–1738.
(Huang Xian-zhen, Zhu Hui-bin, Jiang Zhi-yuan, et al. Reliability sensitivity analysis of angular contact ball bearing skidding [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2021, 42(12): 1731–1738.)