

套管头结构动态可靠性研究

陈 琳 金国梁 李东升

(大庆石油学院)

提 要

运用随机过程及结构可靠性的有关理论,建立了结构可靠性的动态模型及载荷预测的两种数学模型。同时提出了进行任意结构动态可靠性分析的方法,并以四川油田使用的套管头为例进行了动态可靠性分析,求出了套管头服役过程的动态可靠度曲线,提出了对其进行可靠性设计的改进意见。

关键词: 套管 套管头 数学模型 可靠性 动态模型

1 前言

结构可靠性是指结构在规定的时间内,规定的条件下,完成规定功能的能力。其中,可靠度是衡量可靠性的一个重要指标。

目前,确定结构可靠度时,一般采用应力—抗力干涉模型。在这种模型中,结构的应力和抗力都是随机变量。运用干涉模型求得的结构可靠度,是静态可靠度,它与时间参数无关。我们知道,结构可靠度是时间的函数。从结构的实际情况看,结构受载荷作用产生的应力和结构的抗力都是随机过程。因而需要建立可靠性的动态模型,通过研究瞬态可靠度或可靠度函数^[1,2]来分析可靠度随服役时间的变化规律。

2 结构可靠性的动态模型

由可靠度函数的表达式^[3]

$$R_s(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right] \quad (1)$$

可知,我们若能获得结构在某些时刻 t_1, t_2, \dots, t_m 的失效率,则相应时刻的瞬态可靠度为

$$R_s(t_i) = \exp\left[-\sum_{j=1}^i \lambda(t_j) \Delta t_j\right] \quad (1 < i < m) \quad (2)$$

式中 $R_s(t_i)$ ——结构在 t_i 时刻的瞬时可靠度; $\lambda(t_i)$ ——结构在 t_i 时刻的失效率; Δt_i —— $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ 。

欲求 $t_i (i=1, 2, \dots, m)$ 时刻的瞬态可靠度, 关键在于确定 $t_j (j=1, 2, \dots, i)$ 时刻的失效率。

某一确定时刻 t_1 的瞬态可靠度 $R_s(t_1)$ 是指结构在 $[0, t_1]$ 时段内可靠工作的概率。在某一确定时刻, 随机过程即变为随机变量。于是, 结构在 t_1 时刻的应力和抗力的随机变量可以通过干涉模型求出其可靠概率 $P_r(t_1)$ 或失效概率 $P_f(t_1)$ 。不过 $P_r(t_1)$ 并不是 t_1 时刻的瞬态可靠度。因此此时的应力和抗力仅仅是应力过程和抗力过程在该时刻的实现, 而不是 $[0, t_1]$ 时段内的应力和抗力。事实上, 某一确定时刻的概率值为零。可见, 运用干涉模型求得的 t_1 时刻的失效概率 $P_f(t_1)$ 具有失效密度和失效速率的意义。我们认为 $P_f(t_1)$ 为 t_1 时刻的失效率。下面, 我们予以说明。

$t=t_1$ 时刻的失效率为^[4]

$$\lambda(t_1) = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ N_0 \rightarrow \infty}} \frac{\Delta N(t_1)}{\Delta t} \frac{1}{N_0 - N_f(t_1)} \quad (3)$$

$t=t_1$ 时刻的失效密度为

$$f(t_1) = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ N_0 \rightarrow \infty}} \frac{\Delta N(t_1)}{\Delta t} \frac{1}{N_0} \quad (4)$$

式中, N_0 ——受试结构总数; $N_f(t_1)$ —— t_1 时刻的累积失效数; $\Delta N(t_1)$ —— $[t_1, t_1 + \Delta t]$ 内出现的失效数。

从上述失效率和失效密度的表达式可以看出, t_1 时刻的失效率是指结构在 t_1 时刻尚未失效的前提下, 而在该时刻后的单位时间内发生的失效的概率, 它是一个条件概率。而 t_1 时刻的失效密度是指结构在 t_1 时刻后的单位时间内发生失效的概率。我们知道, t_1 时刻的应力和抗力是通过应力过程和抗力过程的实现来获得的, 一旦结构失效, 我们便不可能获得该结构应力过程和抗力过程的实现。可见, t_1 时刻应力和抗力的分布规律是从该时刻尚未失效结构的应力过程和抗力过程的实现中, 通过统计分析得到的。这就是说, $P_f(t_1)$ 反映的是 t_1 时刻尚未失效的结构在该时刻后的失效情况。因此, 我们认为, 某一确定时刻 t_1 的应力和抗力随机变量通过干涉模型求得的失效概率 $P_f(t_1)$ 应为 t_1 时刻的失效率。即

$$\lambda(t_1) = P_f(t_1) = 1 - P_r(t_1) = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_s(s, t_1) \left[\int_s^{\infty} f_r(r, t_1) dr \right] ds \quad (5)$$

式中 $f_s(s, t_1)$ —— t_1 时刻应力概率密度函数; $f_r(r, t_1)$ —— t_1 时刻抗力概率密度函数。

3 载荷的预测

在工程实际中, 可以将结构几何尺寸和结构抗力近似地看作随机变量。于是, 确定结构在各服役时刻受载荷作用产生的应力是至关重要的。为了进行可靠性预测, 不仅需

要确定结构在过去服役时段的载荷分布规律,而且需要预测结构在后续服役期间所受的载荷。然后把作用在结构上的载荷转换为结构所受的应力,由干涉模型求得各服役时刻的失效率,再由式(2)即可求得各相应时刻的瞬态可靠度。

我们运用灰色系统理论^[5]和时间序列分析理论^[6]建立了载荷的两种预测模型,即载荷的灰色预测模型和时序预测模型。

我们分别收集了大庆油田 14 口油井 5 年的地层压力数据,江汉油田 17 口井 8 年的地层压力数据。四川油田 15 口油井 8 年的地层压力数据。其中时间间隔均为 0.5 年。

为了利用地层压力时间序列来分析载荷灰色预测模型和时序预测模型的实际测试精度,分别将各油田地层压力序列中的前面部分数据建立灰色模型和时序模型,预测出地层压力的后续值。然后将所预测时刻的地层压力与该时刻实际的地层压力进行比较,从而比较其预测精度。

计算结果表明(表 1~表 3):

表 1 大庆某油田地层压力的预测精度(井数 $N=14$;数据段 T_0 ,单位:a)

Table 1 The predicting precision of stratigraphic pressure
in some oil field in Daqing (the number of wells $N=14$)

后续时刻(a)	灰色预测				时序预测			
	$T_0=4(a)$		$T_0=3(a)$		$T_0=4(a)$		$T_0=3(a)$	
	均值	均方差	均值	均方差	均值	均方差	均值	均方差
	$\Delta\mu(\%)$	$\Delta\sigma(\%)$	$\Delta\mu(\%)$	$\Delta\sigma(\%)$	$\Delta\mu(\%)$	$\Delta\sigma(\%)$	$\Delta\mu(\%)$	$\Delta\sigma(\%)$
0.5	0.67	-4.86	1.16	2.10	3.03	-2.70	0.98	3.56
1	0.88	-10.4	3.08	4.82	6.36	-8.25	3.34	10.92
1.5			5.26	0.55			6.29	4.21
2			6.99	-2.6			9.19	-4.77

表 2 江汉某油田地层压力的预测精度(井数 $N=17$;数据段 T_0 ,单位:a)

Table 2 The predicting precision of stratigraphic pressure in
some oil field in Jianghan (the number of wells $N=17$)

后续时刻(a)	灰色预测						时序预测					
	$T_0=7(a)$		$T_0=6(a)$		$T_0=5(a)$		$T_0=7(a)$		$T_0=6(a)$		$T_0=5(a)$	
	均值	均方差	均值	均方差	均值	均方差	均值	均方差	均值	均方差	均值	均方差
	$\Delta\mu(\%)$	$\Delta\sigma(\%)$	$\Delta\mu(\%)$	$\Delta\sigma(\%)$	$\Delta\mu(\%)$	$\Delta\sigma(\%)$	$\Delta\mu(\%)$	$\Delta\sigma(\%)$	$\Delta\mu(\%)$	$\Delta\sigma(\%)$	$\Delta\mu(\%)$	$\Delta\sigma(\%)$
0.5	-0.91	-7.54	-1.78	-1.92	0.12	12.09	-2.19	-1.94	-2.74	5.69	-4.09	11.58
1	0.44	-5.94	-1.52	-9.65	-3.18	17.01	-2.23	6.14	-4.03	5.99	-9.28	19.23
1.5			-1.82	-11.97	-3.11	11.95			-6.69	5.64	-9.48	14.65
2			-0.60	-10.56	-2.15	1.57			-6.50	16.56	-9.32	6.60
2.5					-4.46	1.71					-9.42	2.47
3					-4.12	4.62					-9.59	3.05

表 3 四川某油田地层压力的预测精度(井数 $N=15$; 数据段 T_0 , 单位: a)Table 3 The predicting precision of stratigraphic pressure in some oil field in Sichuan (the number of wells $N=15$)

后续 时刻 (a)	灰色预测						时序预测					
	$T_0=7(a)$		$T_0=6(a)$		$T_0=5(a)$		$T_0=7(a)$		$T_0=6(a)$		$T_0=5(a)$	
	均值	均方差	均值	均方差	均值	均方差	均值	均方差	均值	均方差	均值	均方差
	$\Delta\mu(\%)$	$\Delta\sigma(\%)$	$\Delta\mu(\%)$	$\Delta\sigma(\%)$	$\Delta\mu(\%)$	$\Delta\sigma(\%)$	$\Delta\mu(\%)$	$\Delta\sigma(\%)$	$\Delta\mu(\%)$	$\Delta\sigma(\%)$	$\Delta\mu(\%)$	$\Delta\sigma(\%)$
0.5	-0.28	-0.26	-2.67	10.70	0.50	-1.85	-0.04	2.10	-2.28	9.43	0.43	-1.94
1	0.41	-1.48	-1.25	6.58	0.07	1.81	0.95	-0.41	0.12	6.09	0.49	1.14
1.5			-1.96	5.11	-2.00	9.69			-0.15	0.11	-1.35	9.50
2			-1.54	4.36	-0.40	5.48			1.11	6.70	0.49	5.36
2.5					-0.91	3.36					0.30	2.91
3					-0.30	2.20					1.06	4.48

(1) 当预测的后续时间段较短时, 两种模型的预测精度较高, 随着预测时间段的延长, 预测精度呈下降趋势。

(2) 运用载荷预测模型进行地层压力预测时, 各油田后续时刻地层的均值和均方差的相对误差均较小。均值相对误差 $< 10\%$, 均方差相对误差 $< 20\%$ 。表明两种预测模型均具有较高的预测精度, 可以用于结构后续载荷的预测。

4 任意结构的动态可靠性分析

往往难以建立复杂结构的极限状态方程解析表达式。此时, Monte Carlo 有限元法是求解其可靠度的一种有效方法^[7]。它兼有有限元法可计算任意结构的载荷响应及 Monte Carlo 法能有效模拟随机量的特点, 可用于进行任意结构的可靠性分析。

为了进行任意结构动态的可靠性分析, 可以先确定结构在过去服役时段的载荷分布规律, 并运用载荷预测模型进行结构后续载荷的预测。然后运用 Monte Carlo 有限元法求出各相应时刻的失效率, 从而得到结构服役过程的动态可靠度。

5 套管头的动态可靠性分析

套管头是用来悬挂套管, 密封套管环形空间的一种油田地面装置(图 1)。它在服役过程中, 承受套管柱的负荷作用, 以

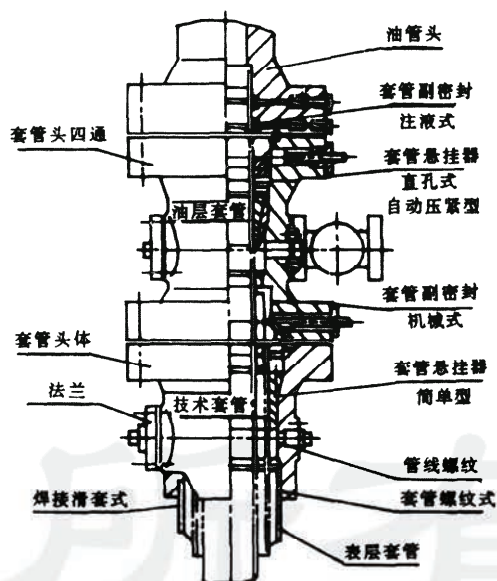


图 1 套管头系统

Fig 1 The System of casing head

及套管环形空间的内压作用。

本文将套管柱负荷近似看作常量,地层压力作为套管环形空间的内压,但将地层压力作为随机过程。以四川油田使用的套管头为例,运用前述模型,对套管头进行动态可靠性分析。收集到的四川油田 15 口油井地层压力数据如表 4。

表 4 四川某油田的地层压力(单位:MPa)

Table 4 The stratigraphic pressure in some oil field in sichuan (MPa)

序号	时间(年 月)														
	83.6	83.12	84.6	84.12	85.6	85.12	86.6	86.12	87.6	87.12	88.6	88.12	89.6	89.12	90.6
1	18.63	18.35	19.00	18.00	18.00	16.92	16.92	16.92	16.62	17.67	16.40	15.98	15.50	16.30	15.70
2	17.00	17.62	17.25	17.00	16.20	16.05	16.43	15.40	14.71	16.38	16.14	15.89	14.70	15.20	14.07
3	17.65	17.55	17.68	17.55	17.51	17.46	16.97	16.49	16.43	16.33	15.89	16.23	16.15	15.64	16.00
4	17.50	16.95	16.40	15.80	15.50	17.00	16.48	16.21	15.94	15.89	15.69	14.86	14.02	13.37	13.43
5	17.25	17.47	17.37	16.75	17.25	16.87	16.25	16.25	15.98	15.31	16.25	14.22	14.74	15.25	14.46
6	17.90	17.65	17.42	17.18	17.30	16.57	15.67	14.76	15.82	15.41	15.00	14.10	13.19	12.45	12.75
7	18.00	17.95	17.90	16.77	17.37	15.23	14.86	14.79	14.71	13.84	13.72	13.75	13.36	13.99	15.20
8	17.25	17.47	17.37	16.75	17.25	16.87	16.25	16.25	15.98	15.31	15.78	16.25	14.22	15.25	14.46
9	19.00	18.40	18.23	18.05	17.42	17.50	16.92	17.66	18.40	17.04	16.18	17.00	16.25	16.54	16.00
10	17.27	17.23	17.13	17.01	16.99	16.85	16.35	16.22	16.03	15.69	15.63	15.56	15.23	15.02	14.24
11	17.00	17.50	17.50	16.60	16.60	16.60	16.28	16.18	16.18	16.18	16.18	16.18	15.40	15.40	15.00
12	17.24	17.19	17.14	16.82	16.75	16.23	16.36	15.97	15.96	16.65	16.09	15.52	15.00	14.77	15.05
13	27.56	26.52	25.88	25.49	24.33	24.72	24.42	23.73	22.26	21.58	22.26	21.10	20.60	20.50	20.30
14	27.70	27.45	26.95	26.00	26.00	25.70	24.85	24.00	23.60	23.20	22.20	21.85	21.50	20.07	20.35
15	26.60	26.60	26.60	26.60	25.50	24.04	23.37	22.70	22.90	22.30	21.70	21.55	21.40	20.70	19.80

我们对表 4 所述的四川油田 1983—1990 年地层压力序列,运用载荷灰色预测模型和时序预测模型,分别进行了后续各时刻(时间间隔 $\Delta t=1a$)地层压力的预测,求得的各时刻地层压力统计特性如表 5 和表 6。

表 5 四川某油田地层压力的灰色预测

Table 5 The grey forecasting of the stratigraphic pressure in some oil field in Sichuan

时间(a)	均值(MPa)	均方差(MPa)	分布类型
1983	19.4600	3.8526	极值 I 型极大值
1984	18.7847	3.6893	极值 I 型极大值
1985	18.3127	3.4250	极值 I 型极大值
1986	17.6047	3.1383	极值 I 型极大值
1987	17.2520	2.8006	极值 I 型极大值
1988	16.6693	2.6597	极值 I 型极大值
1989	16.0960	2.5523	极值 I 型极大值
1990	15.6333	2.2944	极值 I 型极大值
1991	15.0740	2.1669	极值 I 型极大值
1992	14.6236	2.0440	极值 I 型极大值
1993	14.1366	1.9527	极值 I 型极大值
1994	13.6985	1.8537	极值 I 型极大值
1995	13.3167	1.7379	极值 I 型极大值

表 6 四川某油田地层压力的时序预测

Table 6 The time array forecasting of the stratigraphic pressure
in some oil field in Sichuan

时间(a)	均值(MPa)	均方差(MPa)	分布类型
1983	19.4600	3.8526	极值 I 型极大值
1984	18.7847	3.6893	极值 I 型极大值
1985	18.3127	3.4250	极值 I 型极大值
1986	17.6047	3.1383	极值 I 型极大值
1987	17.2520	2.8006	极值 I 型极大值
1988	16.6693	2.6597	极值 I 型极大值
1989	16.0960	2.5523	极值 I 型极大值
1990	15.6333	2.2944	极值 I 型极大值
1991	14.9314	2.0593	极值 I 型极大值
1992	14.3243	1.9460	极值 I 型极大值
1993	13.8883	1.7196	极值 I 型极大值
1994	13.2934	1.7094	极值 I 型极大值
1995	12.7383	1.6069	极值 I 型极大值

本文研究的套管头系统由一级、二级套管头和转换法兰三部分组成。下面以第二级套管头为例介绍动态可靠度的求解过程。

套管头材料为 ZG35CrMo, 将抗力作为随机变量, 设抗力 r 服从正态分布, 其均值为 359.7MPa, 标准差为 25.18MPa。采用 Monte Carlo 有限元法计算各时刻的失效率 $\lambda(t_i)$ 。用 20 节点等参元, 取整体结构的 1/4 进行有限元计算。求得各失效率见表 7。代入式 (2) 即可求出第二级套管头各时刻的可靠度。同理可得第一级套管头转换法兰各时刻的可靠度。若不计环心空间密封件的失效, 仅考虑套管头三部分的失效, 则套管头可看作一个串联系统。于是, 套管头系统的可靠度为

表 7 第二级套管头的失效率 $\lambda(t)$ (单位: 1/a)Table 7 The losing efficiency rate of the 2nd part of casing head $\lambda(t)$

时间(a)	灰色预测	时序预测
1983		11.9209×10^{-6}
1984		6.6757×10^{-6}
1985		3.9339×10^{-6}
1986		2.0862×10^{-6}
1987		1.1921×10^{-6}
1988		0.4768×10^{-6}
1989		0.4768×10^{-6}
1990		0.0596×10^{-6}
1991	0.0596×10^{-6}	0.0306×10^{-6}
1992	0.0578×10^{-6}	0.0217×10^{-6}
1993	0.0385×10^{-6}	0.0166×10^{-6}
1994	0.0238×10^{-6}	0.0081×10^{-6}
1995	0.0178×10^{-6}	0.0072×10^{-6}

$$R_s(t) = R_F(t) \cdot R_1(t) R_2(t)$$

式中 $R_F(t)$ —— t 时刻转换法兰的可靠度; $R_1(t)$ —— t 时刻第一级套管头可靠度; $R_2(t)$ —— t 时刻第二级套管头可靠度。

套管头服役过程的动态可靠度见表 8 和图 2。计算结果表明, 套管头的可靠度分配不太合理。各时刻转换法兰和第一级套管头的可靠度均为 1, 其安全裕度太大。可以从减少壁厚等方面来改进设计, 以节省材料。第二级套管头的可靠性决定着整个套管头系统的可靠性。应从改善轴向载荷的接触方法着手, 以提高整个套管头系统的可靠度。

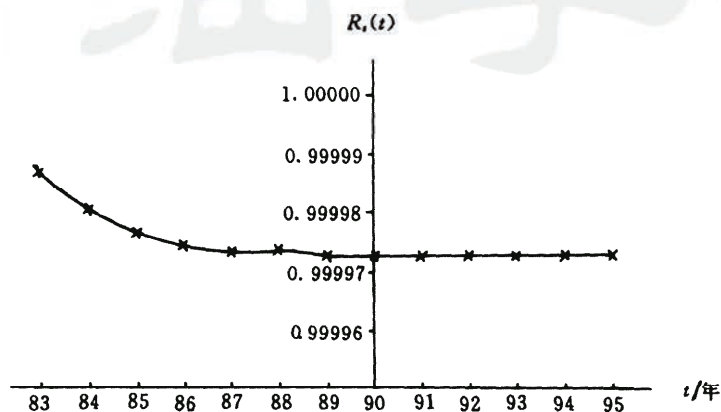


图 2 套管头服役过程的动态可靠度 $R_s(t)$

Fig 2 The dynamical reliability of casing head in its working process $R_s(t)$

表 8 套管头服役过程的动态可靠度 $R_s(t)$

Table 8 The dynamical reliability of casing head in its working process $R_s(t)$

时间(a)	灰色预测	时序预测
1983		0.999988
1984		0.999981
1985		0.999977
1986		0.999975
1987		0.999974
1988		0.999974
1989		0.999973
1990		0.999973
1991	0.999973	0.999973
1992	0.999973	0.999973
1993	0.999973	0.999973
1994	0.999973	0.999973
1995	0.999973	0.999973

6 结论

(1) 运用随机过程理论及结构可靠性理论, 建立了结构可靠性的动态模型。认为某一确定时刻的失效率可由该时刻的抗力和应力随机变量通过干涉模型求得。运用该模型可预测结构在后续服役期的可靠度, 或评估结构在预定使用期内能否可靠地工作。

(2) 运用随机过程及灰色系统、时间序列分析的有关理论,分析建立了结构载荷灰色系统预测和时序预测模型。对实际载荷的预测分析表明两种模型均具有较高的预测精度,可用于结构后续服役时刻载荷预测。

(3) 将结构可靠性动态模型与结构可靠性分析的 Monte Carlo 有限元法相结合,可进行任意结构的可靠性分析。

(4) 运用上述方法,对四川油田套管头进行了动态可靠性分析,求出了套管头服役过程的可靠度曲线。这对于套管头的设计和使用均具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] 林中民. 工程结构可靠性设计与估计. 北京:人民交通出版社, 1990.
- [2] 布劳德 BN, 张质文译. 起重机可靠性和统计动力学. 北京:中国铁道出版社, 1985.
- [3] 金国梁, 陈琳等. 可靠性与优化及其在石油工业中的应用. 北京:中国科学技术出版社, 1992.
- [4] 凌树森. 可靠性在机械强度设计和寿命估计中的应用. 北京:宇航出版社, 1988.
- [5] 邓聚龙. 灰色系统基本方法. 华中理工大学出版社, 1988.
- [6] 马逢时等. 应用概率统计(下册). 北京:高等教育出版社, 1990.
- [7] 陈琳, 金国梁, 董家梅. 结构可靠性分析的 Monte Carlo 有限元法. 非电产品的可靠性技术与应用. 北京:航空工业出版社, 1992.

STUDY ON DYNAMICAL RELIABILITY OF CASING HEAD

Chen lin Jin Guoliang Li Dongsheng

(Daqing Petroleum Institute)

Abstract

Two kinds of mathematical models, the dynamical model of structural reliability and the model of forecasting load, are established with the theory of random process and structural reliability. Meanwhile, the method of any structural reliability analysis is presented. Taking the Casing head used in Sichuan oil field for example, dynamical reliability analysis is accomplished, and the dynamical reliability curve of the Casing head which is working is solved out, the improving idea for its reliability design is presented.