

组合拱式管桥整体可靠性分析

姚安林 (西南石油学院, 四川省南充市, 637001)

尹家双 (江苏油田设计院 江苏省江都市 225216)

摘要 针对组合拱式管桥各构件的载荷效应和构件抗力对管桥整体结构性能的影响关系, 将组合拱式管桥简化成一个对称的由拱支墩、拱脚和拱顶 3 个单元结构组成的串联结构体系, 应用系统可靠性评价的基本方法建立起了组合拱式管桥整体可靠性分析的基本模型, 然后通过模糊综合评判法导出了计算组合拱式管桥整体可靠度的公式, 并给出了应用实例。

关键词 长输管道 管线设计 可靠性 计算 组合

1. 前言

组合拱式管桥是油气长输管线中一种常用的跨越结构型式。合理而正确地评价它的整体可靠性, 不仅对管桥结构本身, 而且对整个管输系统的安全运行都具有重要的现实意义。本文在已有的研究^[1,2]基础上, 着重研究了组合拱式管桥的整体可靠性。

常见的组合拱式管桥是由两根结构弦管和油气输送管道(运载管)一起, 通过大量腹杆体系连接成的具有三角形断面的拱式桁架结构, 拱体结构依靠两岸的拱支墩来支撑(见图 1)。

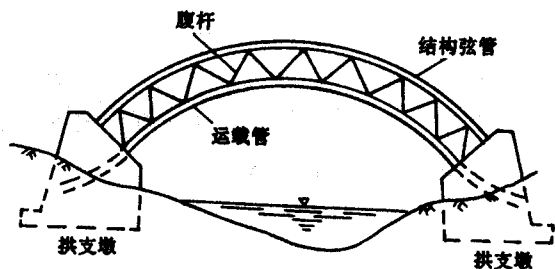


图 1 组合拱式管桥立面图及断面形状

在结构内力计算中, 一般将其作为固端圆弧拱来分析^[3]。组合拱式管桥整体可靠性分析的基本思路是: 根据管桥所受载荷的特征选取合适的概率模型来描述有关载荷, 然后在常规设计所选控制截面

上, 根据构件失效准则^[4]建立载荷效应和构件抗力的极限状态功能函数, 并利用结构可靠性分析的基本原理计算出组合拱式管桥的单项可靠指标。最后根据各控制点对管桥结构整体性能的影响关系, 建立结构系统可靠性评价的单元网络结构, 再根据单元网络系统的联结关系导出组合拱式管桥整体可靠性的计算公式。有关组合拱式管桥所受可变载荷的统计处理和单项可靠指标计算公式的建立已在文献^[5]中做过详细讨论, 这里不再赘述。

2. 组合拱式管桥整体可靠性分析的数学模型

2.1 管桥结构系统可靠性分析

根据组合拱式管桥常规设计中选取控制截面的原则可知, 拱体结构中的拱顶和拱脚是两个主要的控制截面。又因为拱支墩是支承拱体结构所有载荷的构件, 所以拱支墩也是一个重要的控制截面。如果我们将这些控制截面视为组合拱式管桥结构中的单元结构, 就可把整个组合拱式管桥简化成拱支墩—拱脚—拱顶—拱脚—拱支墩单元结构系统。由于这种系统具有结构对称性, 为了简化分析步骤, 可取拱支墩—拱脚—拱顶单元结构系统来分析。因为拱支墩、拱脚和拱顶 3 个单元结构, 任何一个失效都将导致组合拱式管桥结构的破坏, 所以分别讨论拱支墩、拱脚和拱顶这三个单元结构的可靠性。

2.1.1 拱支墩可靠性

由文献〔1〕可知, 影响拱支墩可靠性的有抗滑移、抗倾覆和地基承载力 3 个因素。如果将拱支墩抗滑移可靠指标 β_7 、拱支墩抗倾覆可靠指标 β_8 和地基承载力可靠指标 β_9 假设为 3 个单元构件, 则由这 3 个单元构件的失效对拱支墩失效的影响关系可知, 它们构成一个串联子系统。该串联子系统各单元的构件的可靠度就是 β_7 、 β_8 、 β_9 所对应的单项可靠度。根据串联系统结构可靠度的定义可知, 拱支墩的可靠度为

$$P_{r8} = p_{r7} \cdot p_{r8} \cdot p_{r9} \quad (1)$$

2.1.2 拱脚可靠性

由管桥构造知,拱脚截面为一倒三角形。由于两根结构弦管为对称设置,所以拱脚截面在几何上是对称的。拱脚的可靠性由运载管、结构弦管和腹杆3种构件的单项可靠度确定。从文献〔1〕可知,与此相关的单项可靠指标有运载管强度可靠指标 β_1 、结构弦管强度可靠指标 β_2 、腹杆强度可靠指标 β_3 和腹杆稳定性可靠指标 β_4 。由这些单元构件组成的串联子系统决定拱脚的可靠度为

$$P_{r3} = p_{r1} \cdot p_{r2} \cdot p_{r3} \cdot p_{r4} \quad (2)$$

2.1.3 拱顶可靠性

拱顶具有与拱脚相同的截面形状和构件规格,根据拱结构的载荷效应可知,影响拱顶可靠性的主要因素是拱平面内稳定性和侧倾稳定性。由于按前述分析方法可知,拱顶截面的面内稳定性可靠指标 β_6 和侧倾稳定性可靠指标 β_5 仍构成一个串联子系统。因此,拱顶的可靠度为

$$P_{r5} = p_{r5} \cdot p_{r6} \quad (3)$$

式(1)、(2)、(3)中的 p_{ri} ($i=1, 2, \dots, 9$)分别代表文献〔1〕中各单项可靠指标 β_i ($i=1, 2, \dots, 9$)所对应的可靠度。

2.2 组合拱式管桥整体可靠性计算公式

如前所述,拱支墩、拱脚和拱顶3个单元结构的可靠性是按串联系统的关系影响组合拱式管桥的整体可靠性的,所以根据串联系统可靠度的定义,容易写出组合式管桥整体可靠度的计算公式为

$$P_r = P_{r3} \cdot P_{r5} \cdot P_{r6} = \prod_{i=1}^9 p_{ri} = \prod_{i=1}^9 \Phi(\beta_i) \quad (4)$$

其中 β_i ($i=1, 2, \dots, 9$)表示组合拱式管桥的单项可靠性指标,它们的计算公式由文献〔1〕给出。

3. 模糊因素对组合拱式管桥整体可靠性的影响

对于组合拱式管桥这样一个串联结构系统来说,按式(4)所算出的整体可靠度只是系统可靠度的下界值,而系统可靠度的上界值是单元结构可靠度中的最小值〔4〕。所以,这里引入模糊综合评判法来确定组合拱式管桥的整体可靠度。下面简要分析影响组合拱式管桥整体可靠性的模糊因素。

虽然基于概率极限状态分析建立起来的结构可靠性分析方法,已使组合拱式管桥的载荷型式和构件抗力的确定更加符合工程实际。但是对于管桥这类重要工程结构来说,不仅随机因素要影响结构的性能,而且在设计、施工和后期维护管理等方面还

存在着大量人为的不确定性因素——模糊因素的影响。根据模糊因素的定义,可以列出如表1所示的

表1 模糊影响因素及因素等级隶属度

因素子集	影响因素	因素等级及其隶属度					归一化处理				
		1	2	3	4	5					
设计水平	设计单位资格	高	较高	一般	较低	低	0.3330	0.4170	0.1670	0.0830	0.000
		0.8	1.0	0.4	0.2	0.0					
	设计者的工作经验	好	较好	一般	较差	差	0.2310	0.3080	0.2310	0.1540	0.706
		0.6	0.8	0.6	0.4	0.2					
	重要程度	高	较高	一般	较低	低	0.2960	0.3330	0.2220	0.1110	0.038
		0.8	0.9	0.6	0.3	0.1					
	设计计算精度	高	较高	一般	较低	低	0.2800	0.3200	0.2400	0.1200	0.040
		0.7	0.8	0.6	0.3	0.1					
施工质量	焊接质量	好	较好	一般	较差	差	0.3500	0.3200	0.2000	0.1200	0.000
		0.9	0.8	0.5	0.3	0.0					
	管拱形状	好	较好	一般	较差	差	0.2140	0.2860	0.2860	0.1430	0.068
		0.6	0.8	0.8	0.4	0.2					
	管拱截面形状	好	较好	一般	较差	差	0.4000	0.3000	0.2000	0.1000	0.000
		0.8	0.6	0.4	0.2	0.0					
	拱支墩施工质量	好	较好	一般	较差	差	0.2800	0.3600	0.2000	0.1200	0.040
		0.7	0.9	0.5	0.3	0.1					
维护管理	防腐质量	高	较好	一般	较低	低	0.2590	0.2960	0.2220	0.1480	0.075
		0.7	0.8	0.6	0.4	0.2					
	环境条件	好	较好	一般	较差	差	0.1880	0.2500	0.2810	0.1880	0.093
		0.6	0.8	0.9	0.6	0.3					
	维护频度	高	较高	一般	较低	低	0.2500	0.3750	0.2080	0.1250	0.042
		0.6	0.9	0.5	0.3	0.1					
	防破坏措施	好	较好	一般	较差	差	0.3080	0.3850	0.2310	0.0760	0.000
		0.8	1.0	0.6	0.2	0.0					
	灾害损失费	大	较大	一般	较小	小	0.2610	0.3480	0.2170	0.1300	0.044
		0.6	0.8	0.5	0.3	0.1					

影响组合拱式管桥整体可靠性的各种模糊因素。这些模糊因素是通过因素等级、单因素和因素类3个层次来影响组合拱式管桥的整体可靠性的。所以需要用到三级模糊综合评判法来处理这一问题〔5〕。对表1所列模糊因素进行三级模糊综合评判运算后,可求得一个最优水平截集 λ^* , λ^* 值是区间[0,1]中的一个确定值。于是,考虑了模糊因素的影响后组合拱式管桥的整体可靠度可按式(5)确定

$$P_r^* = P_r^L + \lambda^* (P_r^U - P_r^L) \quad (5)$$

式中: P_r^L ——组合拱式管桥整体可靠度下界值,由式(4)计算;

P_r^U ——组合拱式管桥整体可靠度上界值,可按式(6)确定;

$$P_r^U = \min \{P_{r1}, P_{r2}, P_{r3}\} \quad (6)$$

λ^* ——最优水平截集,通过三级模糊综合评判运算得出。

4. 整体可靠度计算程序设计

根据上述分析,计算组合拱式管桥整体可靠度的步骤如下。

(1) 根据文献[1]导出的公式分别计算出组合拱式管桥各单元构件的单项可靠指标 β_i ($i=1, 2, \dots, 9$);

(2) 由正态分布函数值表查出各单项可靠指标所对应的单项可靠度 P_{ri} ($i=1, 2, \dots, 9$);

(3) 根据式(1)~(3)计算出组合拱式管桥各单元结构的分项可靠度,并按公式(6)定义出整体可靠度的上界值 P_r^U ;

(4) 由式(4)计算出组合拱式管桥整体可靠度的下界值 P_r^L 。

(5) 根据表1所列模糊因素等级及其隶属度,用三级模糊综合评判法求出最优水平截集 λ^* 。

(6) 按式(5)计算出组合拱式管桥的整体可靠度。

为了快速、准确地分析组合拱式管桥的整体可靠性,我们按照上述计算步骤用FORTRAN语言编制了计算程序CAPBR。

5. 应用举例

为了检验前述组合拱式管桥整体可靠性分析方法的正确性,现在举例说明其计算过程。

假设按文献[1]的计算公式已算出某组合拱式管桥的各单项可靠指标分别为

$$\beta_1=2.8692, \beta_2=2.3478, \beta_3=3.4653$$

$$\beta_4=4.6782, \beta_5=8.3643, \beta_6=5.4287$$

$$\beta_7=3.7456, \beta_8=4.0203, \beta_9=6.3672$$

模糊因素的等级隶属度如表1所列数据,且模糊综合评判运算中需用到的评判矩阵 R_{ij} 和因素权重集 A_i 及因素类权重集 A 分别为

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} 0.90 & 1.00 & 0.90 & 0.80 & 0.70 & 0.60 & 0.50 & 0.40 & 0.30 & 0.20 & 0.10 \\ 0.70 & 0.80 & 0.90 & 1.00 & 0.90 & 0.80 & 0.70 & 0.60 & 0.50 & 0.40 & 0.30 \\ 0.50 & 0.60 & 0.70 & 0.80 & 0.90 & 1.00 & 0.90 & 0.80 & 0.70 & 0.60 & 0.50 \\ 0.30 & 0.40 & 0.50 & 0.60 & 0.70 & 0.80 & 0.90 & 1.00 & 0.90 & 0.80 & 0.70 \\ 0.10 & 0.20 & 0.30 & 0.40 & 0.50 & 0.60 & 0.70 & 0.80 & 0.90 & 1.00 & 0.90 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = (0.20 \quad 0.30 \quad 0.20 \quad 0.30) \quad A_2 = (0.30 \quad 0.20 \quad 0.20 \quad 0.30)$$

$$A_3 = (0.30 \quad 0.10 \quad 0.30 \quad 0.20 \quad 0.10) \quad A = (0.40 \quad 0.40 \quad 0.20)$$

将这里所给已知参数存入数据文件B,在微机运行编制的计算程序CAPBR,并按屏幕汉字提示要求键入有关参数,即可迅速算出该组合拱式管桥的整体可靠性为

$$P_r^* = 0.988879 = \Phi(2.285)$$

6. 结语

本文基于系统可靠性评价的基本原理建立的组合拱式管桥整体可靠性分析计算公式概念清晰,结果正确。通过引入模糊因素对组合拱式管桥整体特性的影响,使得组合拱式管桥整体可靠度的评价结构更加符合工程实际。因此,本文所得研究结果不仅对评价组合拱式管桥的整体可靠性具有实用价值,

对研究其它管道结构的系统可靠性也具有一定的参考意义。

参考文献

- 1 宋文利,姚安林.组合拱式管桥单项可靠指标的建立.西南石油学院学报,1996,18(2)
- 2 宋文利,姚安林.组合拱式管桥可变荷载统计分析.天然气工业,1996,16(5)
- 3 宋文利,姚安林.组合拱式管桥计算机模拟设计.天然气与石油,1995,13(4)
- 4 林忠民.工程结构可靠性设计与估计.北京:人民交通出版社,1990
- 5 肖芳淳等.模糊分析设计在石油工业中的应用.北京:石油工业出版社,1993

(收稿日期 1996-11-12 编辑 王德祥)

52 Rational Matching for Motor of Well Pumping Unit with Capacity of Transformer

Dong Lijing, Wang Xingqian

54 Worksite Test on Using Thermal Tube to Fire Tube Type Heater

The authors make worksite test using thermal tube to fire tube type heater, effectively increase the efficiency of the firetube heater. Worksite test result shows that after using thermal tube to double fire tube double pipe type heater, under the rated load, the normal equilibrium thermal efficiency increases 76.7%, gas-saving rate 8.71%, saves natural gas 409.44m³/d

Subject terms: heater/thermal tube/worksite test/optimum design/technology reform

Chen Lei, Li Zengrui

56 J Integral Measurement on Pressure Pipeline's Fissure

This article briefly shows the optics system constituent of 2-dimensional stuck piece cloud interferential method and the fundamental principle evaluating integral with cloud interferential method, puts forward measuring J integral by using 2-dimensional stuck piece cloud interferential method and therefore practically measuring the point displacement field of pipeline's axial fissure and the J integral value and shows the test results. The authors analyses the test result and gains the conclusion that this method has the following advantages: high in sensitivety, simple in optical path and convenient in operation.

Subject terms: fissure/integral/measurement/pressure pipeline

Liu Kanglin, Ji Changzhu

59 Discussion on Several Problems of Oil-Gas Mixed Transferring Pump

On the basis of linear closed mixed pump, this article discusses the work principle of disclosed screws. the article also introduces the design parameters, calculation formulas and design method of disclosed screws, at the same time the structure design of mixed transferring pump has been discussed.

Subject terms: screw/gas-oil ratio/oil-gas mixed transferring pump/explosion

Liu Huiling

63 Electrostatic Elimination Devices for Floating Ball Metal Chain

This article analyses the charge condition of oil products in storage tanks, simply introduces the mechanism of oil product producing electrostatic, shows electrostatic eliminating device for floating ball metal chain and test result. Test data show that electrostatic in oil product can be completely eliminated with the floating ball metal chain method and the device is simple and easy to make.

Subject terms: crude/electrostatic/oil storage/floating ball/resistivity/induction current

Ding Youhu, Wang Zhongqing

65 Improving Thermal Performance Analysis for Civil Steel High Frequency Weld Finned Tubes Radiator

Wang Chunshun

66 Communication System Transformation Engineering Design in Jiangnan Oilfield

Cheng Laidi, Li Shiwen

69 Entirety Reliability Analysis for Combination Arch Pipe Bridge

Using the fundamental method of system reliability appraisal the authors set up the basic model for the combination arch pipe bridge entirety judgment method. The authors deduce the formulas to calculate the entirety reliability of the combination arc pipe bridge and give the applied example.

Subject terms: long distance pipeline/pipeline design/reliability/calculation/combination

Yao Anlin, Yin Jiashang

72 Solve Appointment Problem With Algorithm of Minimum Expense Flow

Wu Changchun

75 Measures to Prevent the Sun Shine and Sand-proof for Technology Equipment of Ta-Zhong 4th Combination Station

Zhang Qiong

EDITOR IN CHARGE: Lei Jing