

复合材料管道结构灰色可靠性设计

陈靖华 宋东昱 肖芳淳

(基础学科部) (油建工程系) (机械工程系)

摘要 本文选用目前最先进的碳纤维复合材料,应用可靠性理论和灰色系统理论,结合最优化技术,考虑了白色、灰色、随机等管道结构优化设计中可能遇到的影响因素,提出了复合材料管道结构灰色可靠性设计。

主题词 输气管道;灰色系统;可靠性分析;优化设计;复合材料

中图法分类号 TE873

引言

对于油气管道系统,人们总希望投资少,运行可靠、平稳、经济、合理。这就要求在设计中,选用高强度薄壁管材,并考虑管道结构的可靠性因素及经济指标,对设计中所涉及到的一类信息不完全的量作为灰数处理,引入灰色可靠度,使设计结果更符合实际,以满足工程要求。

碳纤维复合材料是以碳纤维为增强材料,环氧树脂为基本材料复合而成的新型工程材料,具有高强度、高弹性模量的性能。碳纤维复合材料能满足工程上油、气管道输送对管材性能的要求。本文以正交异性碳纤维复合材料的性能参数试验统计值为依据;土壤设计温度、天然气输送温度和管道结构可靠度视为灰数;并考虑了管材性能、结构尺寸及外来作用力的随机影响,对地下输气管道结构进行了灰色可靠性设计。

1 数学模型及解法

地下输气管道结构优化设计问题可选用如下的数学模型:

$$\text{求 } \vec{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T \in R^4$$

$$\text{使 } V^{\otimes}(\vec{x}) = f(v_1^{\otimes}, v_2^{\otimes}, v_3^{\otimes}) \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\text{满足 } R_1^{\otimes}(\vec{x}) \leq 0 \quad (2)$$

$$G_2^{\otimes}(\vec{x}) \leq 0 \quad (3)$$

$$G_j^{\otimes}(\vec{x}) \leq 0, \quad j=3,4,5 \quad (4)$$

1992-10-13 收稿

$$H_0^{\otimes}(\bar{x})=0 \quad (5)$$

$$0 < x_1^l \leq x_i \leq x_i^u \quad (6)$$

其中, $V^{\otimes}(\bar{x})$ 考虑为多目标无量纲灰函数, 此函数用线性的 \bar{x} 表示; 而 \bar{x} 系设计变量, 即 $[x_1, x_2, x_3, x_4]^T$; 这里 x_1 为管子外径(m), x_2 为压缩机站数(座); x_3 为管子壁厚(m), x_4 为管顶覆土厚度(m). 在式(1)中, $v_1^{\otimes}, v_2^{\otimes}, v_3^{\otimes}$ 分别表示管道结构和主要设备的灰色投资、管线系统灰色年折合费用和管内灰色摩阻; 它们均系无量纲参数. 不等式(2)~(4)和等式(5)包含以下约束:

$$\text{最小灰色可靠度} \quad \frac{\otimes(\beta) \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_s^2}}{\mu_c - \mu_s} - 1 \leq 0 \quad (7)$$

$$\text{最小灰色纵向稳定} \quad AS_L / 0.375 \rho q_1 - 1 \leq 0 \quad (8)$$

$$\text{最小周向稳定} \quad 3q_2 / q_3 - 1 \leq 0 \quad (9)$$

$$\text{最小径向位移} \quad \Delta X / 0.05 D_0 - 1 \leq 0 \quad (10)$$

$$\text{最小流态} \quad R_{e2} / P_c - 1 \leq 0 \quad (11)$$

$$\text{能量平衡} \quad \frac{NP_c}{L_0} - \frac{\lambda z \tau \gamma Q^2}{(P_1 + P_2) \alpha^5 C^2} = 0 \quad (12)$$

引入权系数后, 把多目标极小化问题归结为与之相关的数值单目标极小化问题, 其解法与常规单目标优化模型求解一样.

2 实例计算及结论

一条运行中的地下输气管线, 全长 1038km, 弹性敷设, $\rho=455\text{m}$, 亚砂土; 设计输量 4 亿 (标) $\text{m}^3/\text{年}$, 设计压力 5.5MPa (绝); 沿途最低气温 -4.6°C , 沿线月平均最高土壤温度见表 1.

现采用碳纤维复合管材, 进行管道结构设计, 其计算结果为:

(1) 各目标权系数 通过四个输气公式计算灰色关联度, 宜选用威莫斯公式及其对应的一组权系数,

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$$

$$= (0.2770232, 0.4169956, 0.3059812)$$

$$(2) \text{土壤温度 } t_{(h_0)}^{(0)} = 28.67285e^{-0.144918h_0}$$

(3) 模型优化解列于表 2.

表 1 土壤测试温度值

深度 h_0 (m)	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	...	1.5	...	2.0
土温 $t_{(h_0)}^{(0)} (^\circ\text{C})$	26.7	26.3	25.9	25.5	25.2	24.8	...	23.1	...	21.4

表 2 管道结构灰色可靠性设计及常规设计参数值

计 算 参 量 结 果 方 法	x_1 (mm)	x_2 (座)	x_3 (mm)	x_4 (cm)	相对目标函数值			可靠性系数 [8]
					$\otimes(v_1)$	$\otimes(v_2)$	$\otimes(v_3)$	
灰 色	400	1	3	115	0.5000000	0.7502617	0.7214166	2.0917
可靠性设计	400	1	4	118	0.6666667	0.8335078	0.9467679	2.9824
常规设计	400	1	6	80~120	1.0000000	1.0000000	1.0000000	

结论 如上表所述,多目标灰色可靠性设计优于常规设计,因为用前一种方法设计的管道壁厚比后一种设计结果要小得多,且给出了管道结构的可靠性系数值,所以非常经济和可靠.因此,这种设计方法是一种较好的设计方法之一,可供参考.

符号注释

- ⊗——灰符号,表示该参数为信息不完全的量;
- σ_c, μ_c ——分别为管材强度的分布均值和标准差, N/m^2 ;
- σ_s, μ_s ——分别为管壁应力的分布均值和标准差, N/m^2 ;
- β ——油、气管道结构的可靠性系数;
- A ——管子横截面面积的分布均值, m^2 ;
- S_L ——管壁轴向应力的分布均值, N/m^2 ;
- ρ ——管线弹性弯曲半径的分布均值, m ;
- q_1 ——管道向上作横向位移时的土壤极限阻力的分布均值, N/m ;
- q_2 ——管道所承受的外载荷压力的分布均值, N/m ;
- q_3 ——地下管道受外压时丧失径向稳定的临界压力的分布均值, N/m ;
- Δx ——管环水平径向变形量的分布均值, m ;
- d ——管子内径的分布均值, m ;
- D_0 ——管子外径的分布均值, m ;
- P_c ——增压站提供的压力能的分布均值, $Pa/座$;
- P_1, P_2 ——分别为增压站出口和入口压力的分布均值, Pa ;
- T ——天然气的输送温度, $T = 273 + t^{(0)}(h_0)$, k ;
- γ ——天然气的相对密度;
- Z ——天然气压缩性系数;
- λ ——达西水力摩阻系数;
- L_0 ——压缩机站间管道计算长度, m ;
- N ——压缩机站数, 座;
- Q ——流量, (标) m^3/s ;
- C ——常数;
- R_c ——雷诺数;
- R_{c2} ——流态由混合摩擦区向阻力平方区过渡的临界雷诺数;
- h_0 ——管道中心埋深, m .

参 考 文 献

- 1 邓聚龙. 灰色系统理论教程. 华中理工大学出版社, 1990
- 2 朱颐龄. 复合材料概率结构设计. 复合材料学报, 1985(3)
- 3 李卓球, 岳红军. 玻璃钢管道与容器. 科学出版社, 1990

Grey Reliability Design for the Structure of Composite Pipeline

Cheng Jinghua

(Department of Basic Science)

Song Dongyu

Xiao Fangchun

(Department of Mechanical Engineering)

Abstract

In this paper, a design method of the structure of carbon—fibre composite gas pipeline is introduced by combining reliability theory and grey system theory with optimization techniques, and taking account of the influences of white, grey and random factors on oil or gas pipeline optimum design.

Key Words: Composite; Gas pipeline; Grey system; Reliability analysis; Optimum design

中国石油天然气总公司技术市场工作 研讨会在中原石油勘探局胜利召开

中国石油天然气总公司技术市场工作研讨会于1994年4月23日至24日在中原石油勘探局胜利召开。来自石油天然气总公司新技术推广中心、国家科委技术市场办公室、石油工业专利处、石油工业出版社、中国石油报社以及各研究院所、石油高校、建设公司等单位的82名代表参加了这次会议。会议交流了各单位技术市场工作情况与经验,并就“培育和发展石油技术市场的方向与对策”、“开展石油科贸活动的具体方法”、“当前石油技术市场工作中存在的主要问题及解决办法”、“中国石油天然气总公司石油技术市场管理暂行规定”等方面的问题进行了讨论。会上,国家科委技术市场办公室领导就我国技术市场现状及我国技术市场体系发展的目标和任务等方面问题作了详细介绍;总公司新技术推广中心技术市场办公室负责同志就石油技术市场工作情况及1994年技术市场工作要点,今后石油技术市场发展目标、任务作了详细的报告、大家一致认为,这次会议开得很好,很及时,取得了预期效果。(科研处 白仁福)