

提篮半穿式管桥 的模糊优化设计

宋文利· 姚安林

(西南石油学院)

内容提要 本文在现有关于提篮半穿式管桥分析设计和理论研究的基础上,建立了非对称模糊优化模型,所给算例表明,采用模糊优化设计方法得到的设计方案在技术上更可靠,经济上更合理。

主题词 提篮半穿式管桥 优化设计 模糊综合评判

提篮半穿式管桥是在组合拱式管桥的基础上发展起来的一种新型管桥结构。它不仅继承了拱式管桥体系的合理性和结构优点,而且在降低结构的相对温差内力和提高组合管拱抗侧倾稳定性能力等方面取得了卓有成效的创新,从而有利于充分发挥结构各部分材料的承载潜力,降低工程投资和延长管桥的使用寿命。基于以上独特的优点,该管桥型式将会受到工程技术人员的关注。本文将应用模糊分析设计方法来解决提篮半穿式管桥的形体参数优选问题。

结构特性

提篮半穿式管桥是在传统的组合拱式管桥结构的基础上,从公路桥梁中的“拱—桁架桥”的构思原则出发,提出的一种较组合拱式管桥更合理的新式管桥结构,由运载管、提篮桁拱、吊杆和拱支墩构成。其中运载管不再象组合拱式管桥那样与结构管焊接成一个整体,而是从组合管拱中分离出来,由圆弧桁拱(拱式桁架片的简称)构成的两提篮拱片在拱

脚分开,又逐渐收缩于拱顶以形成变截面组合拱,它与内力变化相协调,符合等强度原则;运载管从提篮的半腰直线穿过(如图1所示)。管桥的全部荷载由提篮桁拱(桁架管拱

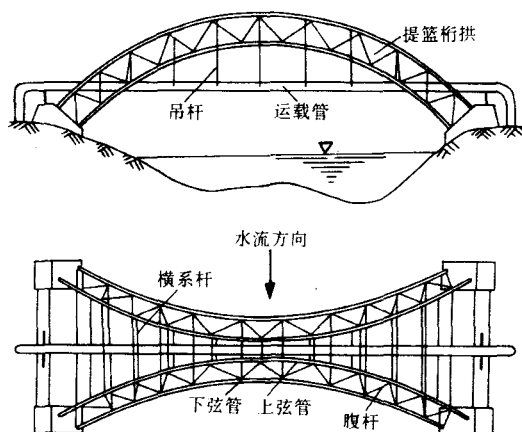


图1 提篮半穿式管桥示意图

的简称)承担,运载管只承受输送介质重量及其内压的作用,若输送高温介质不会对拱体

部分产生非均匀温差内力。另外,可随时拆换易损的运载管道,这可充分发挥结构管的使用潜力;管桥的重心较低,拱脚处截面刚度大,具有较强的抗风载能力和较好的抗侧倾稳定性^[1]。

提篮半穿式管桥各部分的静力分析计算可参阅文献[2、3、4]。

非对称模糊优化模型

通过分析提篮半穿式管桥的结构特性可知影响管桥结构特性的不确定性因素,即模糊因素主要有两类:一类是设计系数,影响它有六个方面:(1)设计水平;(2)制造水平;(3)材料质量;(4)使用环境;(5)重要程度;(6)维修和灾害损失。另一类是地基条件,影响它有四个方面:(1)勘探水平;(2)地基处理;(3)未来环境影响;(4)灾害损失。

提篮半穿式管桥的非对称模糊优化模型和普通优化模型一样有三大要素:即设计变量、目标函数、约束条件,不同之处是本文建立的约束条件具有模糊性。根据该管桥的实际结构建立其模糊优化设计数学模型如下:

1. 设计变量:

据前面对提篮半穿式管桥的特性分析,选取以下参数作为设计变量。

$$\begin{aligned} \vec{X} &= (D, n, b, h, F_s, l)^T \\ &= (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)^T \end{aligned}$$

其中 D ——提篮桁拱的矢跨比;

n ——提篮桁拱拱脚拱顶宽度比;

b ——提篮桁拱拱顶的宽度;

F_s ——提篮桁拱结构弦管的横截面积;

h ——得篮桁拱的厚度;

l ——拱支墩顺桥方向的水平长度。

2. 目标函数:

以管桥的材料总费用作为优化目标函数,形式如下:

$$V(\vec{X}) = V_{pa} + V_t + V_x + V_r + V_g$$

其中 V_{pa} ——运载管(包括运载管上的附件)材料费用;

V_t ——吊杆材料费用;

V_x ——桁拱结构弦管材料费用;

V_r ——桁拱结构腹杆材料费用;

V_g ——管桥拱支墩材料费用。

3. 约束条件:

提篮半穿式管桥非对称模糊优化模型中约束条件是模糊的,其模糊性源于结构本身和人们认识结构性能的限制性。在管桥的安全可靠性控制条件中,构成强度约束条件时所用的材料基本许用应力 $[\sigma]$ 在工程中一般是在材料最低屈服应力前面乘以一个设计系数而定的。事实上,设计系数是受前述六方面影响的模糊因素。同样,地基允许承载力 $[R]$ 和设计规范中推荐的抗倾复和抗滑移安全系数也是受前述四方面影响的模糊因素。根据[5]的方法建立的模糊优化设计模型中的模糊约束条件 $g_j(\vec{X})$ 的取值在 G_j 所定义的模糊允许范围内,即

$$g_j(\vec{X}) \subseteq G_j \quad (j=1, 2, \dots, m)$$

而 G_j 是实数论域 R (约束函数值空间)上的模糊子集:

$$G_j = \int_{g \in R} G_j(g) / g$$

式中 G_j 为隶属度,一般按如下梯形分布:

$$G_j(g) = \begin{cases} 1, & (g_j^L \leq g \leq g_j^U) \\ \frac{g_j^u - g}{g_j^u - g_j^L}, & (g_j^L < g < g_j^U) \\ 0, & (g \geq g_j^u) \end{cases}$$

其水平 λ 截集为:

$$G_{j,\lambda} = \{g | G_j(g) \geq \lambda, g \in R, (j=1, 2, \dots, m)\}$$

这是一个普通子集,具有:

$$\bar{g}_j = g_j^u - \lambda(g_j^u - g_j^L) \text{ 和 } g_j = 0$$

这样的上、下边界。如果用一个最优水平值 λ^* 来代替 λ ,那么模糊约束就变成了普通约束^[6],即:

$$g_j(\bar{X}) \leq \bar{g}_{j\lambda} \quad (j=1, 2, \dots, m)$$

于是,在模糊优化模型中的模糊约束条件可分别表示成如下形式:

(1)应力约束条件:

$$\sigma_j / (\sigma_{sj} \bar{F}_{j\lambda} \cdot \psi K_t) - 1 \leq 0 \quad (j=1, 2, \dots, n)$$

其中 σ_{sj} ——材料的屈服极限;

ψ ——管材的纵向焊缝系数;

K_t ——管材的温度减弱系数,当温度在121℃以下时, $K_t=1.0$;

$\bar{F}_{j\lambda}$ ——设计系数边界上限,由下式确定:

$$\bar{F}_{j\lambda} = F_j^u - \lambda^* (F_j^u - F_j^l)$$

σ_j ——实际计算得到的应力,对于提篮桁拱拱顶、拱脚处的 σ_j 分别为:⁽⁷⁾

拱顶处:

$$\sigma_{jt} = \frac{N_{gd} + N_{wd}}{A F_s} + \frac{|M_{gd} + M_{wd}| h}{2 I_{xd}} + \frac{|M_{pd}| S_{ld}}{2 I_{yd}}$$

拱脚处:

$$\sigma_{jj} = \sqrt{\sigma_0^2 + 3(\tau_1 + \tau_2)^2}$$

以上二式中各符号的意义及计算公式同文献[7]。

(2)地基承载力约束条件:

$$\sigma_{\max} / [\bar{R}]_{\lambda} - 1.2 \leq 0$$

其中 $[\bar{R}]_{\lambda} = [R]^u - \lambda^* ([R]^u - [R]^l)$;

σ_{\max} ——拱支墩地基受到的最大压应力,由下式计算得到:

$$\sigma_{\max} = \frac{Q_G + V_G}{b_1} + \frac{M_{x8}}{W_x} + \frac{M_{y8}}{W_y}$$

式中 Q_G ——混凝土拱支墩的自重;

V_G ——拱支墩受到的垂直荷载;

b_1 ——拱支墩底面宽度;

W_x, W_y ——分别是拱支墩底面纵向和横向抗弯截面模量;

M_{x8}, M_{y8} ——分别是拱支墩纵向和横向弯矩,由下式确定:

$$M_{x8} = \left| \frac{1}{3} F h_1 (a+3) - H_G (h_1 - h_3) - M_x + V_G \left[h_3 \tan \varphi_0 + \frac{1}{2} l_1 \right] \right|$$

$$M_{y8} = |M_y|$$

其中 F ——拱支墩后壁被动土压力;

h_1 ——拱支墩的埋深;

a ——提篮桁拱拱脚的宽度;

H_G ——拱支墩受到的水平推力;

h_3 ——拱支墩的高度参数;

M_x ——荷载在拱脚产生的纵向弯矩;

φ_0 ——圆弧拱半圆角;

l_1 ——拱支墩的长度参数;

M_y ——风荷载在拱脚产生的横向弯矩。

(3)提篮桁拱面外稳定性约束条件:

$$P_{cr\lambda} / P - 2.6 \geq 0$$

其中 $P_{cr\lambda} = P_{cr}^u - \lambda^* (P_{cr}^u - P_{cr}^l)$;

P ——提篮桁拱受到的沿拱轴均布的水平风载,其大小可按基本风压和形体参数估算;

P_{cr} ——桁拱侧向临界水平风载,按文献[4]的方法计算。

(4)拱支墩抗滑移、抗倾覆稳定性约束条件:

$$P_{si} / (\bar{\xi}_{i\lambda} \cdot P_{Ri}) - 1 \leq 0 \quad (i=1, 2)$$

其中 $\bar{\xi}_{i\lambda}$ ——拱支墩抗滑移、抗倾覆系数的边界上限,由下式确定:

$$\bar{\xi}_{i\lambda} = \xi_i^u - \lambda^* (\xi_i^u - \xi_i^l) \quad (i=1, 2)$$

P_{si} ——作用在拱支墩上的滑移力和倾覆力矩;

P_{Ri} ——拱支墩自身产生的抗滑移力、抗倾覆力矩。

拱支墩滑移力和抗滑移力分别为:

$$P_{s1} = H_G;$$

$$P_{R1} = F(a+3) + P_t + T$$

其中 P_t ——拱支墩侧壁与土壤之间的摩擦阻力;

T ——拱支墩与土壤之间的摩擦力。

式中其余各符号的意义同前。

拱支墩的倾覆力矩和抗倾覆力矩分别为:

$$P_{a2} = H_G(h_1 - h_2) + M_x;$$

$$P_{R2} = Q_0 g [l \cdot l_2 - h_1 \text{ctg} \theta_0 - \frac{l_1}{2}] + V_g [l - l_2 - (h_1 - h_2 - h_3) \text{ctg} \theta_0] + \frac{1}{3} F(a+3)h_1$$

其中 $h_3 = 0.5 + \frac{h}{2}$

θ_0 ——拱支墩的正面倾角;

其余各符号的意义同前。

于是,非对称模糊优化模型可归纳成如下形式:

$$\text{Find } \vec{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)^T$$

$$\text{Min } V(\vec{X}) = V_{pa} + V_i + V_x + V_f + V_g$$

$$\text{S. t. } G_k(\vec{X}) \leq 0$$

$$\sigma_j / (\sigma_{jk} \cdot \bar{F}_{jk} \cdot \gamma K_i) - 1 \leq 0$$

$$\sigma_{\max} / [\bar{R}]_{k^*} - 1.2 \leq 0$$

$$P_{\text{cri}k^*} / P - 2.6 \geq 0$$

$$P_{a1} / (\xi_{k^*} \cdot P_{R1}) - 1 \leq 0$$

$i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, q; q + n = m - 4; \lambda^* \in [0, 1]$ 。

式中: q 表示非对称模糊约束函数个数; n 表示应力模糊约束函数个数; m 表示约束函数总个数。显然,当最优水平值 λ^* 确定后,该数学模型仍是一个普通优化模型,它的最优解就是非对称模糊优化模型的最优解。

用三级模糊综合评判确定最优水平值 λ^*

模糊综合评判是用来寻找最优水平值 λ^* 的有效方法,其实质是对多种因素所影响的事物或现象作出总的评价,而无需通过一个优化过程来实现。针对非对称模糊优化模型中所考虑的影响因素,本文采用三级模糊综合评判来确定 λ^* 。该方法步骤为确立因素集,建立备择集,依次进行一级、二级、三级模糊综合评判,加权平均确定最优水平值 λ^* 。具体的评判过程详见文献[6],这里仅列出的因素集和各因素等级的隶属度,见表 1。

本文采用扩增系数法来确定过渡区间的

上下界。扩增系数法是在许用值的基础上,通过引入扩增系数 $\beta (> 1.0)$ 来确定过渡区间的,并以许用值乘以扩增系数 β 为上界。在本文研究的模糊约束条件中有:

设计系数上下界: $F^L = 0.5, F^U = 0.5\beta$

地基承载力的上下界: $[R]^L = [R],$

$[R]^U = \beta[R]$

临界风载的上下界: $P_{\alpha}^L = P_{\alpha}, P_{\alpha}^U = \beta P_{\alpha}$

拱支墩抗滑移系数上下界: $\xi_1^L = 1/1.3,$

$\xi_1^U = \beta/1.3$

拱支墩抗倾覆系数上下界: $\xi_2^L = 1/1.5,$

$\xi_2^U = \beta/1.5$

扩增系数 β 通常根据约束的松紧程度在 (1.05~1.30) 的范围内取值。这里取 $\beta = 1.20$ 。

至此,非对称模糊优化设计模型中的基本参数均已确定,模糊约束条件也转化成了非模糊约束条件,因此,只需采用普通优化方法,即可求解出提篮半穿式管桥的最佳设计方案。

算 例

为了更好地说明模糊优化设计方法,下面结合一个实例来说明该方法的应用。

1. 基本设计参数

(1) 提篮半穿式管桥的总跨度: $L = 150\text{m}$

(2) 运载管的规格为: $\varnothing 630 \times 12$, 其输送介质为天然气

(3) 桁拱腹杆节间距: $l_0 = 3\text{m}$

(4) 斜面桁架片腹杆、拱顶平面桁架片腹杆及拱脚平面桁架片腹杆的横截面积分别为:

$$F_1 = 5.57 \times 10^{-4} \text{m}^2,$$

$$F_{a2} = 1.0637 \times 10^{-3} \text{m}^2,$$

$$F_{j2} = 4.224 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

(5) 提篮桁拱受到的侧向水平风载:

$$P = 418 \text{N/m}$$

(6) 设计温差: $\Delta t_1 = 30^\circ\text{C}, \Delta t_2 = -12^\circ\text{C}$

表1 提篮半穿式管桥的因素集和各因素等级的隶属度

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		
设计系数	U ₁₁	设计水平	高	较高	一般	较低	低	(0.348 0.435 0.217 0.000 0.000)	
			0.8	1.0	0.5	0.0	0.0		
	U ₁₂	制造水平	高	较高	一般	较低	低	(0.391 0.435 0.174 0.000 0.000)	
			0.9	1.0	0.4	0.0	0.0		
	U ₁₃	材料质量	好	较好	中等	较差	差	(0.334 0.370 0.295 0.037 0.000)	
			0.9	1.0	0.7	0.1	0.0		
	U ₁₄	环境条件	好	较好	一般	较差	差	(0.000 0.023 0.202 0.417 0.292)	
			0.0	0.2	0.5	1.0	0.7		
	U ₁₅	重要程度	重要	较重要	一般	不太重要	不重要	(0.333 0.417 0.208 0.042 0.000)	
			0.8	1.0	0.5	0.1	0.0		
	U ₁₆	维修和灾害损失	大	较大	一般	较小	小	(0.200 0.320 0.360 0.120 0.000)	
			0.5	0.8	0.9	0.3	0.0		
	地基条件	U ₂₁	勘测水平	高	较高	一般	较低	低	(0.242 0.273 0.303 0.121 0.061)
				0.8	0.9	1.0	0.4	0.2	
		U ₂₂	地基处理	好	较好	一般	较差	差	(0.233 0.300 0.267 0.167 0.033)
				0.7	0.9	0.8	0.5	0.1	
U ₂₃		未来环境的影响	大	较大	一般	较小	小	(0.000 0.087 0.218 0.304 0.391)	
			0.0	0.2	0.5	0.7	0.9		
U ₂₄		灾害损失	大	较大	一般	较小	小	(0.190 0.429 0.333 0.048 0.000)	
			0.4	0.9	0.7	0.1	0.0		

(7) 钢材屈服极限和地基允许承载力分别为:

$$\sigma_s = 2.4 \times 10^8 \text{ Pa}, [R] = 2.744 \times 10^5 \text{ Pa}$$

(8) 钢材的拉压弹性模量和剪切弹性模量分别为:

$$E = 2.0594 \times 10^{11} \text{ Pa},$$

$$G = 8.24 \times 10^{10} \text{ Pa}$$

(9) 钢材的线膨胀系数:

$$\alpha = 1.18 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$$

(10) 土壤的密度、摩擦系数、内摩擦角分别为: $\gamma_{st} = 1837 \text{ kg/m}^3, \mu = 0.40, \varphi = 0.25 \text{ rad}$

(11) 钢材和拱支墩混凝土的密度分别为: $\gamma = 7850 \text{ kg/m}^3, \gamma_s = 2450 \text{ kg/m}^3$

(12) 透载管钢材, 普通结构钢材以及拱支墩混凝土的单价分别为:

$$C_p = 3000 \text{ 元/t}, C_{pu} = 2500 \text{ 元/t},$$

$$C_g = 80 \text{ 元/t}$$

2. 模糊综合评判的有关数据

通过调查并综合大量工程设计经验后, 确定模糊约束条件中的等级评判矩阵、因素权重集和因素类权重集分别为:

$$R_{ij} = \begin{pmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.8 & 0.9 & 1.0 & 0.9 & 0.8 & 0.7 \\ 0.0 & 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.8 & 0.9 & 1.0 & 0.9 & 0.8 & 0.7 & 0.5 & 0.3 \\ 0.1 & 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.7 & 0.9 & 0.9 & 1.0 & 0.9 & 0.8 & 0.7 & 0.6 & 0.5 & 0.4 & 0.3 & 0.1 \\ 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.7 & 0.9 & 1.0 & 0.9 & 0.8 & 0.7 & 0.6 & 0.5 & 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0.0 \\ 0.7 & 0.9 & 1.0 & 0.9 & 0.8 & 0.7 & 0.6 & 0.5 & 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \end{pmatrix}$$

$$A_1 = (0.25 \quad 0.25 \quad 0.15 \quad 0.10 \quad 0.15 \quad 0.10)$$

$$A_2 = (0.30 \quad 0.30 \quad 0.15 \quad 0.25)$$

$$A = (0.60 \quad 0.40)$$

3. 优化模型的求解

本文采用工程中常用的复合形优化方法进行优化模型求解。用 FORTRAN 语言编制了该优化方法的电算程序,并进行了实例运算,其计算结果列于表 2、表 3。

表 2 模糊优化设计得到的设计变量值

设计变量	数值
矢跨比	0.179000
拱脚拱顶宽度比	3.695196
桁拱拱顶宽度	2.2017(m)
结构弦管的横截面积	0.0056(m ²)
提篮桁拱厚度	1.0199(m)
拱支墩水平长度	5.0982(m)

表 3 模糊优化设计管桥的经济指标

项 目	材料费 (万元)	占总材料费比例 (%)
运载管 (包括管上附件)	10.803	49.9
吊 杆	0.057	0.3
桁拱结构弦管	5.869	27.1
桁拱结构腹杆	0.916	4.2
管桥拱支墩	3.986	18.4
材料费总计 (万元)	21.631	100

从算例得到的模糊优化设计结果和设计方案的经济指标可以看出,由于模糊优化设计方法所考虑的影响因素更接近于工程实际,所以由此而得到的提篮半穿式管桥的设计方案更加合理,拱桥的材料费用最省,其结构可靠性也完全能够保证。无疑这种设计新方法对实际管桥的方案设计具有一定的理论指导意义。

参 考 文 献

- 1 汤国栋,姚安林. 提篮半穿式管桥的构思与设计. 油气储运,1985,4(3):7~12
- 2 姚安林. 拱轴弹性压缩对提篮桁拱的内力影响. 石油学报,1987,8(4):109~116
- 3 姚安林. 水平风荷载作用下变截面提篮式无铰拱的内力分析. 油气储运,1984,3(4):48~52
- 4 姚安林. 提篮桁拱的侧倾稳定性分析. 天然气工业,1988,8(1):69~74
- 5 Yao Anlin, Xiao Fangchun. Fuzzy optimum design of cablestayed pipe bridge. Proceedings of the International Conference on Structural Engineering and Computation. Beijing University Press, 25~28 April, 1990, 974~980
- 6 王彩华,宋连天. 模糊论方法学,北京:中国建筑工业出版社,1988;191~203
- 7 姚安林,雍歧卫. 提篮半穿式管桥静态特性的计算机分析. 石油工程建设,1990,16(5):1~6

(本文收稿 1993—02—20)

Huang Bingguang, Li Shunchu and Zhou Ronghui; Pulse Test Analytical Method in the State of Steady Production, NGI 13(4), 1993: 64~67

The mathematical model of pulse test in the state of steady production of oil well is posed out in this paper. Its analytic solution is evaluated by using stacking principles of time and space, and pulse test analysis is done by using unliner regression analysis.

Subject Headings: oil well, steady production, pulse test, mathematical model, analytical method.

STORAGE/TRANSPORTATION/SURFACE CONSTRUCTION

Song Wenli and Yao Antin; Fuzzy Optimum Design of Basket Like Semi-Crossing Pipe Bridge, NGI 13(4), 1993: 68~73

Based on analysis design and theoretical study of the available basket-like semi-crossing pipe bridge (BSPB), an unsymmetrical fuzzy optimum model of BSPB is set up in this paper. A given compute example shows that the BSPB design scheme obtained by fuzzy optimum design method is more reliable in technique and more reasonable in economy.

Subject Headings: basket-like semi-crossing pipe bridge, optimum design, fuzzy overall decision.

GAS PROCESSING AND CHEMICAL TECHNOLOGY

Zhou Xuehou and Wang Kaijie; Developing Adaptability of Natural Gas Sweetening Process, NGI, 13(4), 1993: 74~80

Various natural gas sweetening processes were developed and grasped at home, and have met the gas field developing need on the whole at present. But, in the light of gas source already appearing and probably appearing, developing the adaptability of natural gas sweetening process is necessary. There are four respects which must be considered: the high ratio of carbon to sulfur in natural gas, extra high acid content natural gas, the natural gas with low latent sulfur content and of which the acid gas is unable to blow down and burn, as well as settling adaptability of skid mounted sweetening unit. Many realistic and probable ways enlarging natural gas sweetening process to fit the above-mentioned four respects are discussed in this paper.

Subject Headings: natural gas sweetening, amine method, direct conversion method, adaptability, selectivity, skid mounted unit.

Zhang Cuiqing; Experimental Study of Using CA Membrane to Removal Acid Gas in Natural Gas, NGI 13(4), 1993: 81~85

Taking the cellulose acetate (CA) made in China as membrane material, Shida-1 and Shida-2 solutions as additives, unsymmetrical CA anti impregnation membrane is made by facies conversion method, and then the membrane is dried by multistage solvent exchange technique. The permeability experiment on the CA dried membrane is made in the condition of indoor temperature respectively us-