

斜拉索管桥的优化设计

姚安林 肖芳溥
(西南石油学院)

一、概 述

近十几年来,斜拉索管桥作为一种跨越能力大、整体稳定性优于悬索管桥的合理结构型式在我国油气长输管道建设中得到了应用和发展。工程设计人员在采用管桥的跨越设计方案中,斜拉索管桥仍具有较大的中选优势。为了进一步完善斜拉索管桥的设计理论,和体现斜拉索管桥的经济合理性,对斜拉索管桥的优化设计问题进行研究是十分必要的。

二、斜拉索管桥的结构分析

从构造上看,尽管斜拉索按布局上的不同可以设计成诸如辐射状、扇型、竖琴型、星型及混合型等几种构型,但从减小运载管的轴向拉力和简化构造要求等方面来说,辐射斜拉索管桥不失为最理想的构型。本文即研究这种理想构型的优化设计问题。

根据管桥主要承受均布荷载的特点,一般设计成以跨中点为对称的结构型式(详见图1)。运载管和输送介质的重量是由等间距分布在运载管上的斜拉索通过塔架传于基础;设置在两端的锚固墩与运载管嵌固相连使运载管轴向受压变为轴向受拉。为了减少结构的超静定次数,塔架两端与斜拉索和塔基础的连接通常采取“下固上铰”或“下铰

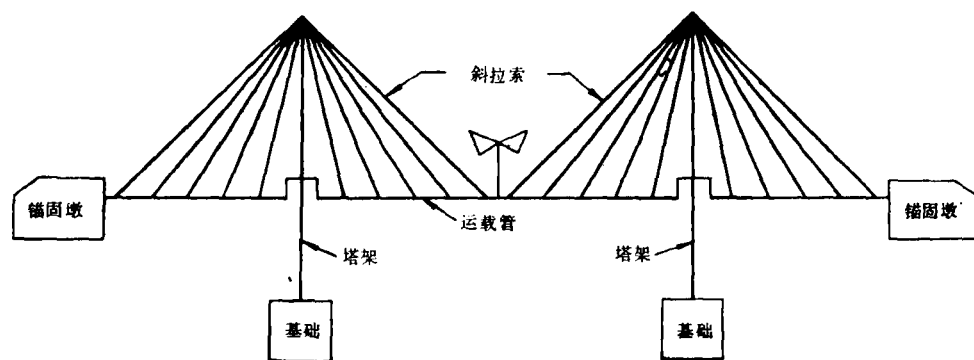


图1 辐射状斜拉索管桥示意图

上固”的方式，这样可以减小当管桥承受非对称荷载时在塔脚产生过大的赘余弯矩的可能性。这种管桥的力学模型是一个高次超静定结构，其内力分析一般靠数值解法来实现。《油气储运》第六卷第六期35页提出的斜拉索管桥内力分析的数值解法是一种更接近于斜拉索管桥真实情况的有效分析方法，此优化设计即采用它的电算程序来实现对斜拉索管桥的静力分析的。

三、建立优化设计的数学模型

通常可把一个结构优化设计问题归纳为如下所述的数学问题：

$$\left. \begin{aligned} & \text{求 } \bar{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \\ & \text{使 } V(\bar{X}) \rightarrow \min \\ & \text{并满足, } G_j(\bar{X}) \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, m) \\ & \text{和 } F_j(\bar{X}) \leq 0 \quad (j = m+1, m+2, \dots, p) \\ & x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 \bar{X} ——由设计变量组成的一个 n 维列向量；

$V(\bar{X})$ ——优化设计问题的目标函数；

$G_j(\bar{X})$ ——不等式约束条件，共有 m 个；

$F_j(\bar{X})$ ——等式约束条件，共有 $(p-m)$ 个；

x_i^l, x_i^u ——分别为第 i 个设计变量的下限值和上限值。

下面根据辐射状斜拉索管桥的实际结构来建立优化设计的数学模型。

1. 设计变量

根据对辐射状斜拉索管桥结构特性的分析，可以选取如下参数作为设计变量：

n —— 1/4 跨内等间距分布在运载管上的斜拉索排数，无量纲；

h ——运载管上方塔架的高度， m ；

t ——运载管的壁厚， m ；

R ——塔架上下端面的宽度比，无量纲；

A_p ——单根塔柱的横截面积， m^2 ；

A_f ——塔基础单墩（分离式）的横截面积， m^2 ；

l ——锚固墩顺桥方向的水平长度， m 。

鉴于 A_p 和 l 两个设计变量对管桥的总造价影响不显著，为了节省计算的时间，故将这两个参数作为相关设计变量。于是，本问题中的独立设计变量就只有 5 个，

$$\text{即 } X_{i.n.d} = (n, h, t, R, A_p)^T \quad (2)$$

$$\text{相关设计变量为: } X_{i.n.r} = (A_f, l)^T \quad (3)$$

则由此设计变量构成的列向量为

$$\bar{X} = \begin{Bmatrix} X_{i.n.d} \\ X_{i.n.r} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

2. 目标函数

作为目标函数的建材费用总和应包括运载管、斜拉索、塔架、塔基础、锚固墩以及斜拉索索端固定器的材料费用，

即
$$V = f(v_{pi}, v_{ca}, v_{to}, v_{fo}, v_{na}, v_{co})$$

(1) 运载管的材料费(包括运载管上附件的材料费)

$$v_{pi} = (L + 4h_0) [\pi t (D_1 - t) \gamma_s F_p + \xi F_1] \quad (5)$$

式中 D_1 ——运载管的外径；
 L ——斜拉索管桥的总跨度；
 γ_s ——运载管钢材的密度；
 h_0 ——补偿器的竖直高度；
 ξ ——运载管上扶手栏杆等附件的重量；
 F_p ——运载管材料单价；
 F_1 ——普通结构钢材的单价。

参见图2。

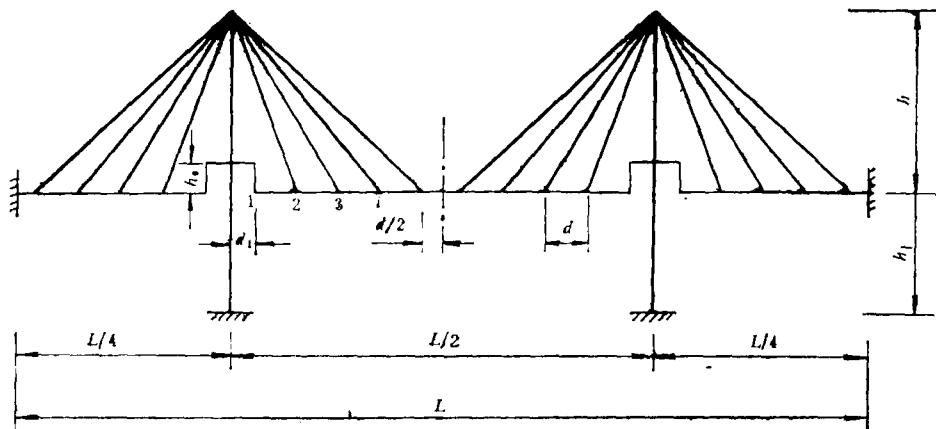


图2

(2) 斜拉索的材料费

$$v_{ca} = 8 \left(\sum_{i=1}^n \sqrt{h^2 + x_i^2} \cdot A_i \right) \gamma_c F_c \quad (6)$$

式中 $x_i = d_1 + (i - 1)d$, $d = (L/4 - d_1) / (n - 0.5)$;

A_i ——第*i*结点处单根缆索的横截面积；

γ_c ——钢丝绳的密度；

d_1 ——补偿器宽度的一半；

F_c ——钢丝绳单价。

(3) 塔架的材料费

下固上铰式塔架的一般构造形式如图3所示。塔架的材料费用为：

$$v_{t_0} = 8 \left[A_p \sqrt{H^2 + \frac{a^2}{4} (R-1)^2} + \frac{aHk}{2} (R+1) \right] \gamma_c F_c \quad (7)$$

式中 a ——塔顶宽度;
 H ——塔架总高度, 且 $H = h + h_1$;
 h_1 ——运载管下方的塔架高度;
 k ——塔架腹杆系数的“拟腹板”厚度。

(4) 塔基础的材料费

$$v_{t_0} = 8 A_f H_f (1 + \xi) \gamma_{c_0} \cdot F_{c_0} \quad (8)$$

式中 H_f ——塔基础的高度;
 γ_{c_0} ——钢筋混凝土的密度;
 F_{c_0} ——钢筋混凝土的单价;
 ξ ——基础横系梁的附加重量系数。

参见图4。

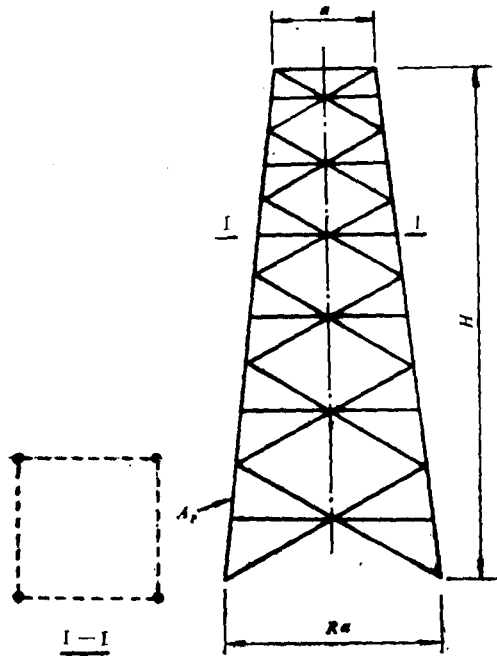


图3 塔架构造图

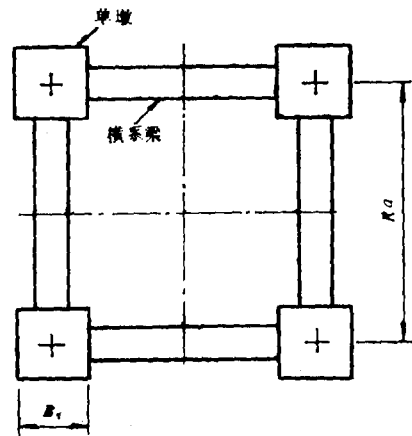


图4 塔基础平面

(5) 锚固墩的材料费

$$v_{t_n} = 2 B H_a \gamma_{c_0} F_{c_0} \quad (9)$$

式中 H_a ——锚固墩高度;
 B ——锚固墩底面与桥垂直向的宽度。

(6) 斜拉索端固定器材料费

$$v_{c_0} = 8 n F_{c_t} \quad (10)$$

式中 F_{c_1} ——索端固定器的平均单价。

如令

$$\begin{aligned} k_p &= L + 4h_0, \quad k_c = 8\gamma_c F_{c_1}, \\ k_i &= 8\gamma_i F_i, \quad k_r = 8H_r(1 + \xi)\gamma_{c_0} \cdot F_{c_0}, \\ k_a &= 2BH_a\gamma_{c_0} F_{c_0}, \quad k_{c_1} = 8F_{c_1} \end{aligned}$$

则目标函数可表示为:

$$\begin{aligned} V &= k_p[\pi t(D_1 - t)\gamma_p F_p + \xi F_i] + \\ &+ k_c \sum_{i=1}^n (\sqrt{h^2 + [d_1 + (i-1)d]^2} A_i) + \\ &+ k_r \left[\sqrt{H^2 + \frac{a^2}{4}(R-1)^2} A_p + \frac{aHk}{2}(R+1) \right] + \\ &+ k_i A_i + k_a l + k_{c_1} n \end{aligned} \quad (11)$$

3. 约束条件

(1) 运载管的强度约束条件

为保证运载管在使用期间的整体安全性, 其最大应力截面处的相当应力应满足如下强度条件:

$$\sigma_{n,p} \leq [\sigma]_p \quad (12)$$

式中 $[\sigma]_p$ ——运载管材的许用应力。

(2) 斜拉索的强度约束条件

$$T_{m,ax} \leq [T]_c \quad (13)$$

式中 $[T]_c = T_{r,a} \cdot 0.85 / 3.5$

$T_{r,a}$ ——钢丝绳的破断拉力总和;

0.85和3.5分别为钢丝绳破断拉力换算系数和安全系数。

(3) 塔柱的强度约束条件

塔架所承受的载荷如图5、6所示。其内力最大的塔柱局部位置(塔脚处)应满足钢材强度的许可条件,

$$\text{即} \quad \sigma_{t,p} \leq [\sigma]_t \quad (14)$$

式中 $[\sigma]_t$ ——塔柱钢材的许用应力;

$$\sigma_{t,p} = \sigma_{t,pv} + \sigma_{t,ph} \quad (15)$$

式中 $\sigma_{t,pv}$ ——竖向荷载在塔柱中产生的最大压应力, 由下式计算

$$\begin{aligned} \sigma_{t,pv} &= \left\{ 2 \sum_{i=1}^n T_i \sin \alpha_i + 4 \left[A_p \sqrt{H^2 + \frac{a^2}{4}(R-1)^2} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{aHk}{2}(R+1) \right] \gamma_s' + C_u \right\} \sqrt{H^2 + \frac{a^2}{4}(R-1)^2} / (4HA_p) \end{aligned}$$

$\sigma_{t,ph}$ ——由水平风载和塔顶偏移在塔脚引起弯矩而产生的压应力, 根据塔架的变形条件导出计算公式如下:

$$\sigma_{i,ph} = \left(\frac{1}{2} Q_h H^2 + M_d \right) \sqrt{H^2 + \frac{a^2}{4} (R-1)^2} \Big/ (2 R a H A_p)$$

$$M_d = \left[2 \sum_{i=1}^n T_i \sin \alpha_i + G_u \right] \left[\frac{1}{4} \left(\frac{1}{R} - 1 \right) \left(5 + \frac{1}{R} \right) - \left(1 + \frac{2}{R} \right) \ln \sqrt{\frac{1}{R}} \right] \frac{H^4 Q_a}{E A_p a^2 (R-1)^4}$$

式中 T_i ——第*i*排斜拉索的张力;
 Q_h ——沿塔高均匀分布的水平风载, (见图6);
 G_u ——塔顶附件的重力;
 γ_i, γ' ——钢材的重度。

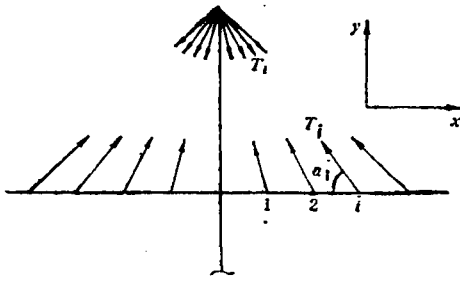


图5

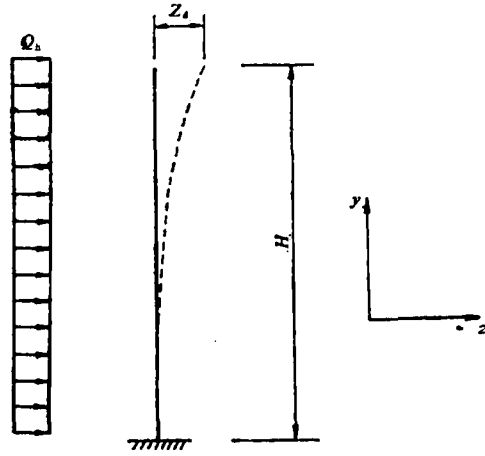


图6

(4) 塔架的稳定性约束条件

根据设计规范的规定, 应按下式检验塔架在弯矩作用平面内的稳定性。

$$\frac{N}{\varphi_{y,z} A} \leq [\sigma], \tag{16}$$

式中 N ——塔脚处的轴向压力;

A ——塔架的有效横截面积;

$\varphi_{y,z}$ ——格构式偏心受压构件在弯矩作用平面内的稳定系数, 可根据塔架的换算

长细比 $\lambda_{hy} = \frac{8H}{a(R+1)}$ 和偏心率 $\varepsilon_1 = \frac{M}{N} \frac{Ax}{I_x}$ 按规范的附表21查

取。

(5) 地基承载能力约束条件

根据规范TJ 7-74规定, 塔基础作用在地基上的压力必须满足如下约束条件

$$\sigma_{m,x} \leq 1.2[R] \tag{17}$$

式中 $[R]$ ——地基允许承载能力。

$$\sigma_{max} = \frac{N_1 + G_1}{B_f^2} + \frac{T_z H_f}{W_x} \quad (18)$$

式中 $N_1 = \frac{Q_h H^2}{4 Ra} + \frac{G}{4}$

$$G = 2 \sum_{i=1} T_i \sin \alpha_i + 4 \left[A_p \sqrt{H^2 + \frac{a^2}{4} (R-1)^2} + \frac{aHk}{2} (R+1) \right] \gamma_c' + C_u$$

$$G_1 = B_f^2 H_f (1 + \zeta) \gamma_c'$$

T_z ——由塔柱传给基础单墩的水

平推力, $T_z = \frac{1}{4} Q_h \cdot H$;

G ——由塔架传给塔基础的竖向荷载;

$$W_x = (1/6) \cdot B_f^3.$$

式中 γ_c ——钢筋混凝土重度;

B_f ——基础单墩的底面边长, 见图7.

(6) 锚固墩抗滑移约束条件

锚固墩的受力如图8所示, 其抗滑移安全系数应符合下式要求:

$$k_h = \frac{S_R}{S_S} \geq 1.3 \quad (19)$$

式中 S_S ——滑动力, $S_S = P_h$;

S_R ——抗滑动力, 为各项反力的组合,

$$S_R = \int_{SF} P_p ds + 2 P_{f1} + P_f \quad (20)$$

根据朗肯土压力计算方法可写为

$$S_R = \frac{1}{2} \gamma_c B h_2^2 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + \gamma \mu h_2^2 (1 - \sin \varphi') + 2 B L H_a \gamma_c'$$

式中 γ_c ——地基土壤的重度;

φ ——土壤内摩擦角;

φ' ——土壤有效内摩擦角;

μ ——土壤与混凝土界面间的摩擦系数;

h_2 ——锚固墩的埋深.

(7) 锚固墩的抗倾覆约束条件

锚固墩的抗倾覆安全系数应符合下式要求:

$$k_q = \frac{G_s \frac{l}{2} + B P_p h_2^2 \cdot \frac{1}{6}}{P_h (h_1 + h_2)} \geq 1.5$$

式中 G_s ——锚固墩的自重力, $G_s = B L H_a \gamma_c'$;

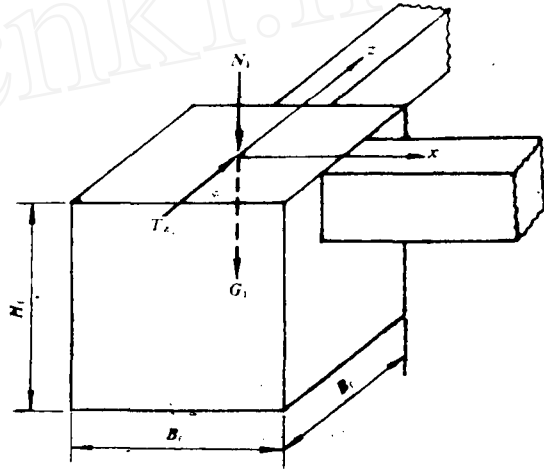


图7 基础单墩受力图

P_p ——被动土压力, $P_p = \gamma_c h_2 \tan^2 (45^\circ + \frac{\varphi}{2})$;
 P_h ——运载管作用在锚固墩上的水平拉力;
 h_1 ——锚固墩处运载管轴线离地表面的高度.

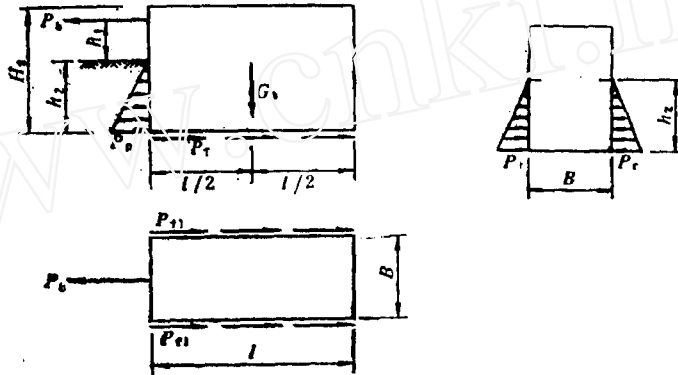


图8 锚固墩受力图

四、优化设计的电算程序

从前面建立的数学模型可以看出,在斜拉索管桥的优化设计问题中,目标函数和部分约束方程均不显含设计变量.因此,本文采用由M.J.BOX于1965年提出的复形法来求解辐射状斜拉索管桥的优化设计问题.现将其优化设计的电算程序作如下简介.

1. 程序包的构成

斜拉索管桥优化设计程序包由优化主程序(ODCPB)和内力分析的子程序(IFMF)、数据子程序(DAT1)以及输出结果子程序(OUTDAT)组成.程序包的结构如图9所示.各块的主要功能如下:

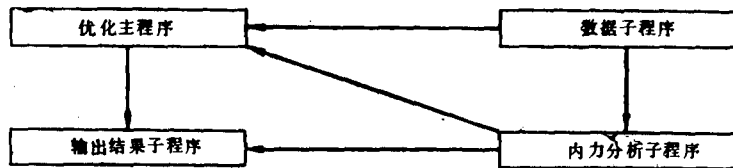


图9 优化设计程序包结构

优化主程序: 定义变量的维数、类型及有关控制变量,实现优化计算过程;

内力分析子程序: 对斜拉索管桥的各部分构件(运载管、斜拉索、塔架、塔基础和锚固墩等)进行静力计算;

数据子程序: 存放基本设计参数及设计变量的上、下限值;

输出结果子程序: 给出一个优化方案的结果(包括设计变量的最佳取值和管桥建材的成本费),并可根据需要给出按优化方案所设计的斜拉索管桥上部结构的内力分析结

果。

2. 源程序结构

源程序采用标准FORTRAN算法语言编制。其中优化主程序的计算框图，如图10所示。

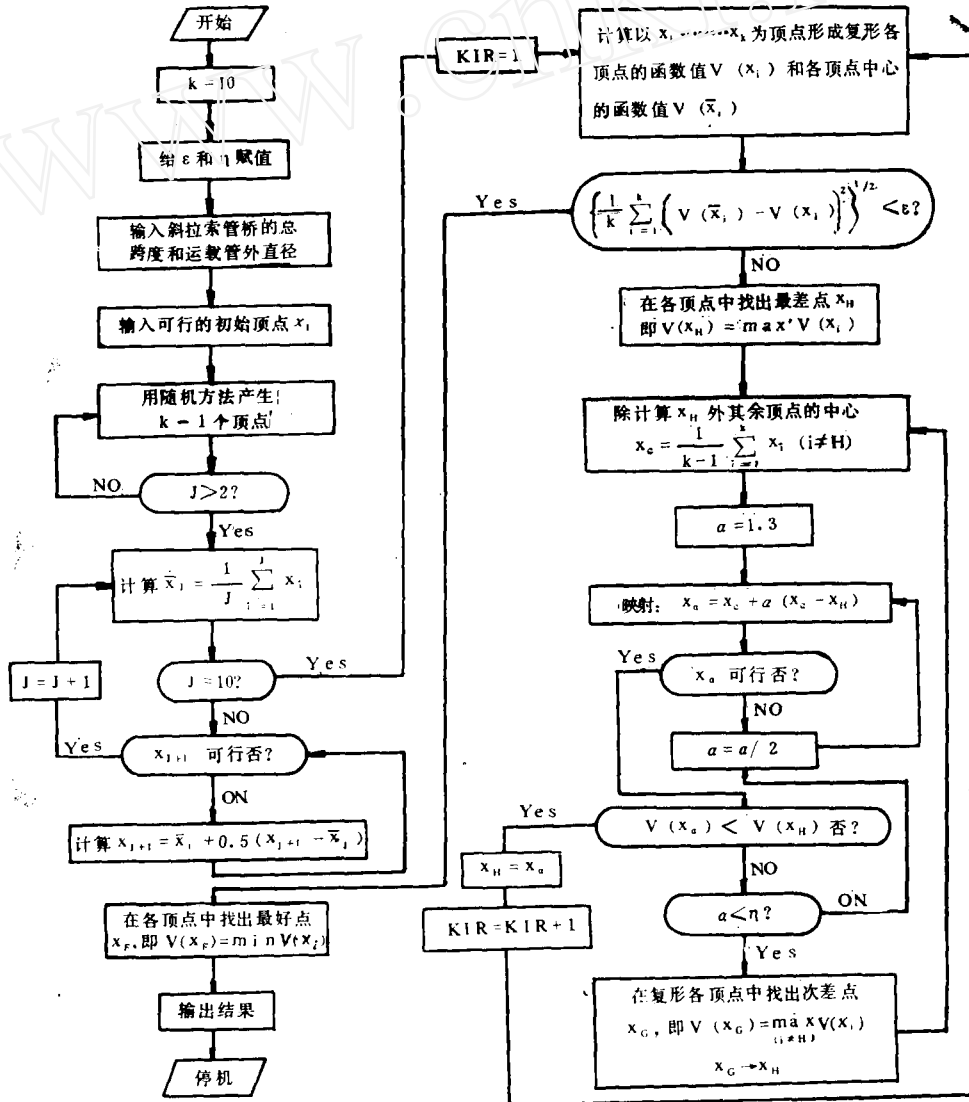


图10 优化设计主程序框图

3. 程序适用环境

全部程序先在VAX-11/780型计算机上调通，然后转移到IBM-PC/XT微机上。本程序可以在具有标准FORTRAN编译系统的各型微机上计算使用。

五、方案比较

为了检验本文所得研究结果的技术可行性及经济效益,对四川石油管理局已建成的涪江斜拉索管桥的设计方案,采用该电算程序对其进行建材费用的验算。在保持原设计的基本设计参数和外载荷不变的基础上,对其中7个主要设计变量进行优化计算,得到对应于原设计的优化方案结果,见表1。按一定的建材价格,计算的优化方案与原设计方案经济指标的对比情况列于表2,从表2可看出,在基本条件一样,承载相当的情况下,采用优化方法的方案比常规设计的方案节省建材费约20%,其经济效益十分显著。

优化方案和原设计中的主要设计变量值

表1

设计变量	1/4跨斜拉索排数	运载管上方塔架高度(m)	塔脚与塔顶宽度比	运载管壁厚(m)	塔柱横截面积(m ²)	基础单墩横截面积(m ²)	锚固墩顺桥向长度(m)
优化方案	6	48.48	7.5	0.010	0.0054	4.7225	8.141
原设计	8	40.798	9.0	0.012	0.00656	6.25	15.00

优化设计与原设计的经济指标对比

表2

项目	重量(t)		材料费(万元)		占总材料费的比例(%)	
	优化方案	原设计	优化方案	原设计	优化方案	原设计
运载管	115.564	138.286	25.3128	27.6572	49.10	39.25
斜拉索	12.946	39.882	4.5311	13.9587	8.80	19.81
塔架	68.736	79.930	10.9977	12.7888	21.30	18.15
塔基础	555.367	719.516	3.3322	4.3171	6.50	6.13
锚固墩	598.333	1102.500	3.5900	6.6150	7.00	6.39
斜拉索索端固定器			3.8400	5.1200	7.40	7.27
材料费总计(万元)	优化方案		原设计			
	51.6037		70.4568			

注:建材价格,管材X-60,0.2万元/吨;普通结构钢0.16万元/吨;钢丝绳(7×19),0.35万元/吨;钢筋混凝土0.006万元/吨;索端固定器0.08万元/个。

分析表2中斜拉索管桥各组成部分的材料费用在总材料费中所占的比例可以发现,优化方案中运载管的材料费约占总材料费的一半(49.1%),比原设计方案中所占的比例提高了25%。这样,使得建材投资比例更符合结构各部分功能的主次关系。从技术经济学的观点来看,这里得到的优化方案也是一种合理的投资方案。

计 量

立式金属罐的底量计量问题

刘 焕 桥

(天津市计量技术研究所)

立式金属罐在计量大量液体物品时,是属于静态容量计量。在理论上,它可以比动态容量计量达到更高的计量准确度。但是十几年来我国应用立式金属罐的实践表明,其计量精确度未能达到应有水平。程达同志指出:“通过近两年多的罐计量与流量计交接资料对比,罐的计量数比流量计的计量数少0.16%~0.46%^[1]。何其逢同志在参加黄岛输油码头的计量对比试验中,同样得出流量计计量数据大于立式罐计量数据,其值为0.12%~0.28%。同时还得到船舱计量结果大于立式罐计量结果,其值为0.23%~0.36%。这两组不同情况下的对比数据,可以认为是比较接近的。如果考虑到流量计的精确度以及这些测量结果是多次测量的平均值的话,那么,立式罐的单次测量的精确度还会恶化。这样很自然产生了一个问题:为什么根据立式罐检定容积表给出的计量结果,与其他计量器具的计量结果相差较大呢?

十分明显的是,影响立式罐计量精确度的因素是较多的。这些因素在立式罐检定过程中大多数已予以考虑。既然在立式罐的实际使用中出现了精确度恶化的情况,那么必然有较重要的影响因素没有考虑,或者考虑的不完善。我们的看法是,这些较重要的影

六、结 论

通过使用该程序验算一座已建成的斜拉索管桥,并将验算结果与原设计作经济比较,我们得出如下结论:

1. 采用优化设计的斜拉索管桥可比常规设计节省约27%的建筑材料费;
2. 由于优化设计所考虑的影响因素比较接近工程实际,对一些技术问题的处理尽可能符合有关规范的规定,所以,得到的结果具有较强的实用性;
3. 编制的电算程序占计算机内存空间小,能在IBM-PC系列以及兼容微机上使用。运算过程中需要输入的数据少,节省机时。
4. 本研究结果不仅能为结构设计师提供合理的斜拉索管桥设计方案,还为进一步实现斜拉索管桥的计算机辅助设计(CAD)提供了基本条件。

(参考文献略)

(收稿日期:1988年1月22日)

Tank, "OGST" 7 (6), 1988: 29—37

The 100 000 m³ oil tank, a project introduced from Japan, has been put into operation in Qing-Huang-Dao, which is the biggest one in China. To know the stress distribution of stress in it when loaded, and to collect data for proper design of such big tanks in the future, stress and strain in it are measured and analysed, which is followed by a proposal as to improving the design of big tanks in China in order to bring down the peak stress in large angle slit bonding area, making it stronger to withstand the low frequency fatigue damage.

姚安林等: 斜拉索管桥的优化设计, 《油气储运》, 1988, 7 (6), 46~55

文中根据更切合工程实际的斜拉索管桥分析模型, 采用复形法这种有效的优化方法, 在计算机上成功地解决了具有多个非线性约束条件的斜拉索管桥的优化设计问题。通过优化方案和原设计技术经济指标的比较, 显示了优化设计的直观经济效益。同时提出了斜拉索管桥优化设计的专用电算程序 (ODCPB)。它不仅为斜拉索管桥的结构设计提供了合理的方案, 而且为进一步实现斜拉索管桥的计算机辅助设计 (CAD) 奠定了基础。

*管道跨越 *〔斜拉索管桥〕 *优化设计 计算机程序

Yao Anlin et al: Optimum Design of Canting-Pull Cable Suspension Bridge, "OGST" 7 (6), 1988: 46—55

Here in the article is presented a canting-pull pipe bridge analytical model much closer to actual engineering, for which the reset method an effective optimum one, is adopted, leading to a successful solution of optimization design of the canting-pull cable bridge with more than one non-linear binding conditions. The comparison between the optimum project and the original one in regard to technical and economical quota proves that the former is better in efficiency. Also presented here is the special computer programme (ODCPB), which not only provides a proper project for the structure of a canting-pull pipe bridge, but also lays the basis for computer assisted design of canting-pull cable bridges.