

组合拱式管桥可靠性分析

宋文利*

姚安林

(西北石油管道建设指挥部) (西南石油学院)

宋文利 姚安林:组合拱式管桥可靠性分析,油气储运,1997(6)16,24~27。

摘 要 跨越管桥结构是长输油气管道中非常重要的组成部分,其结构设计是否合理以及安全可靠性的高低将对这类管道整体运行产生直接影响。以圆弧形组合拱式管桥作为研究对象,应用一次二阶矩理论对这种管桥结构进行了可靠性分析和计算,给出了组合拱式管桥可靠性的分析思路,认为影响结构构件抗力的主要因素是材料性能、几何参数和计算模式精度等随机变量,提出了确定目标可靠指标 β_0 的方法,并以中心点法对组合拱式管桥结构构件或截面的可靠指标 β_0 进行了分析和计算。考虑到计算 β 公式的繁复性,以 FORTRAN 语言编制了用于组合拱式管桥可靠性分析的 CPMRA 软件。以该软件计算可靠指标 β 的结果表明,所述分析方法是正确的,计算结果精度高,并证明该种管桥的常规设计方法过于保守,经济上不合理。

主题词 输油管道 输气管道 组合拱式管桥 结构设计 可靠性 结构分析 计算

油气管道的设计合理性和运行可靠性,不仅会影响油气生产的发展,而且还会影响管道运输在综合运输领域中的竞争势头。作为长输油气管道中十分关键的组成部分,跨越管桥结构不仅工程建设投资巨大,而且,管桥结构设计的合理性和使用的安全性与油气管道的整体运行可靠性关系甚密。

以在长输油气管道建设中已得到较广泛应用的圆弧形组合拱式管桥作为研究对象,利用现有的文献资料,应用一次二阶矩理论对该种管桥结构进行了可靠性(度)分析计算,定量分析了组合拱式管桥结构的可靠性指标。这对指导管桥结构的优化设计,科学地使用该结构以及对其进行安全评定,都具有积极的实际意义和工程参考价值。

一、组合拱式管桥可靠性分析思路

1、 载荷统计分析

由工程实际可知,组合拱式管桥在使用期间,所受载荷主要有:竖向恒载、输送介质内压、风荷载及环境气温变化等,这些载荷可分为固定载荷和可变

载荷两大类。因目前尚缺乏管桥载荷的实测统计资料,因此,参照文献[1,2,3],假定组合拱式管桥固定载荷即竖向恒载的概率模型为服从正态分布的随机变量。对于可变载荷即输送介质内压、风荷载及环境气温变化的概率模型则采用平稳二项随机过程来描述。文献[4]详细描述了这些载荷的统计分析过程。

2、 载荷效应组合

如前述,组合拱式管桥在使用期间,一般要承受上述几种载荷的共同作用。然而,一般而言,多种可变载荷在设计基准期内以最大值相遇的概率很小,于是就存在着如何进行载荷效应组合的问题。根据组合拱式管桥的具体情况,这里采用“JC”载荷组合模式^[5]进行组合拱式管桥固定载荷和可变载荷效应组合,文献[6]给出了具体分析过程。

3、 结构构件抗力统计分析

文献[5]指出,影响结构构件抗力的主要因素是材料性能、几何参数和计算模式精度,它们都是随机变量。油气跨越管桥属于钢结构,因此,其构件抗力 R 可采用下式表达:

$$R = K_M K_A K_P R_K \quad (1)$$

* 710021,陕西省西安市北郊张家堡;电话:(029)6239860-2377。

式中 R_K ——按规范指定和公式计算所得的结构构件抗力的标准值;

K_M ——结构构件材料性能的不定性;

K_A ——结构构件几何参数的不定性;

K_P ——结构构件计算模式的不定性。

于是,抗力的均值、变异系数及标准差分别为:

$$\left. \begin{aligned} & \text{均值: } \mu_R = \mu_{KM} \mu_{KA} \mu_{KP} R_K \\ & \text{变异系数: } V_R = \sqrt{V_{KM}^2 + V_{KA}^2 + V_{KP}^2} \\ & \text{标准差: } \sigma_R = V_R \mu_R \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

组合拱式管桥构件的抗力形式,除了钢材的屈服强度之外,还有构件的临界力、抗滑移力、抗倾覆力矩及地基承载力等。这些抗力统计参数的求取,都将影响抗力不定性的诸变量和载荷效应的各变量,按其函数关系直接引入极限状态方程中,然后用一次二阶矩理论计算构件的可靠指标。

4、随机变量的选定及可靠指标的计算方法

在油气管道跨越结构中存在着大量的随机因素,如在材料特性、载荷、外部环境、结构制造安装、几何尺寸控制等方面均存在着随机因素的影响,因而在这些方面表现出随机性。由于跨越管桥结构复杂,计算公式繁琐^[7],为简化起见,这里只考虑了组合拱式管桥在载荷、材料性能、管子壁厚偏差及拱支墩处地基土特性等几个主要方面的随机性,并选取如下变量作为组合拱式管桥可靠性分析的相互独立的基本随机变量:

(1)管子壁厚: $\delta_{pi}, \delta_s, \delta_f$;

(2)风荷载: ω ;

(3)输送介质内压: P ;

(4)温度变化: t_u, t_i ;

(5)钢材屈服强度: R_{sp}, R_{sj} ;

(6)土壤抗剪切强度指标(内聚力 c_N)和内摩擦角 φ 。

一次二阶矩理论计算可靠指标 β 的方法有两种,即中心点法和验算点法。因考虑到管桥结构的复杂性及载荷效应、抗力计算的繁琐,不易或难于实现用验算点法计算 β 的迭代过程。

本文采用计算精度稍次于验算点法但应用较广泛的中心点法来分析和计算组合拱式管桥结构构件或截面的可靠指标 β 。

5、目标可靠指标 β_0 的确定及管桥结构构件(截面)的失效准则

目标可靠指标 β_0 是指预先给定的作为设计依

据的可靠指标,它反映了所要求的结构构件预定的可靠度。本文在确定组合拱式管桥结构构件的 β_0 时,参照我国《建筑结构设计统一标准》中关于结构构件设计可靠指标 β 的规定值,根据组合拱式管桥属重要的工程结构(安全等级为 I 级),其构件破坏形式属于延性破坏,因此,取其结构构件的目标可靠指标 $\beta_0 = 3.7$,与之相应的失效概率为 $P_f = \Phi(\beta_0) = 1.08 \times 10^{-4}$ 。

根据组合拱式管桥的工作方式和使用条件,其失效形式大致分为强度不足和失稳两种。具体地说,就是指组合拱式管桥结构中,运载管、结构管及腹杆的强度不够;拱支墩基础承载力不够;腹杆受压失稳,组合管拱在拱平面内和平面外的失稳以及拱支墩抗滑移力、抗倾覆力矩不够而导致的管桥结构的失效。因此,可建立与组合拱式管桥各构件失效形式相应的失效准则^[6],用广义应力—强度将结构处于失效状态统一表述为:

$$R - S < 0$$

其中 S ——组合拱式管桥构件(或截面)的广义应力,如实际计算应力、水平风荷载、滑移力、倾覆力矩等;

R ——组合拱式管桥构件(或截面)的广义强度,如钢材屈服强度、临界力、抗滑移力、抗倾覆力矩、地基承载力等。

6、 β 计算公式的建立

利用组合拱式管桥常规设计中有关内力的计算公式^[7],根据中心点法的基本原理以及已建立的结构构件的失效准则,经数学演算,即可得到组合拱式管桥各构件(截面)的可靠指标 $\beta_i (i=1, 2, \dots, 9)$ 的计算公式,大致的推导步骤如下:

(1)根据相应的失效准则,构成相应的极限状态功能函数为:

$$Z_i = R_i - S_i = f_i(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3)$$

式中 i ——下标,所求构件(截面)可靠指标的个数, $i=1, 2, \dots, 9$;

$X_j (j=1, 2, \dots, n)$ ——前述选定的随机变量;

R, S ——分别为结构构件的抗力和载荷效应,均为随机变量 X_j 的函数。

(2)根据中心点法的基本原理,分别求出 Z_i 的均值和标准差:

$$\left. \begin{aligned} \text{均值: } \mu_{z_i} &= f_i(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n}) \\ &(i=1, 2, \dots, 9) \\ \text{标准差: } \sigma_{z_i} &= \left[\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial f_i}{\partial X_j} \Big|_{\mu_{X_j}} \cdot \sigma_{X_j} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &(i=1, 2, \dots, 9) \end{aligned} \right\} (4)$$

(3) 根据结构构件可靠指标的定义, 可得 β_i 的计算公式:

$$\beta_i = \frac{\mu_{z_i}}{\sigma_{z_i}} = \frac{f_i(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n})}{\left[\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial f_i}{\partial X_j} \Big|_{\mu_{X_j}} \cdot \sigma_{X_j} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (i=1, 2, \dots, 9) \quad (5)$$

β_i 计算公式的详细推导过程见参考文献[6,8]。

二、可靠性分析软件(CPMRA)的编制及说明

由于计算组合拱式管桥结构构件可靠指标 β 的公式繁多且十分复杂, 为减轻劳动强度, 同时确保计算结果的准确性, 用 FORTRAN 语言编制了一个能准确、快速、方便进行组合拱式管桥可靠性分析的软件 CPMRA。

该软件由 1 个主程序(CPMRA)、22 个子程序、3 个数据块子程序和 6 个数据文件组成, 其结构框图如图 1 所示, 计算框图如图 2 所示。

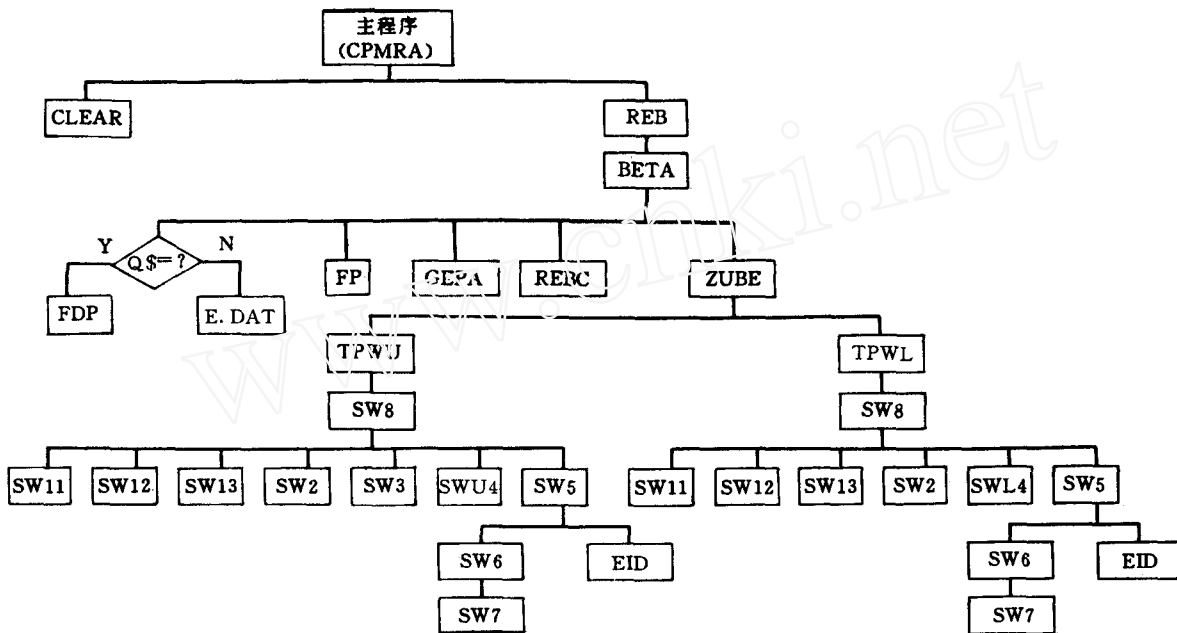


图 1 组合拱式管桥可靠性分析软件 CPMRA 结构框图

使用 CPMRA 软件, 可以得到组合拱式管桥输送不同介质(输油或输气)时各结构构件可靠指标 β_i 值以及与 β_0 比较的输出打印结果, 同时还能得到相应的各构件(或截面)强度校核和稳定性验算输出打印结果。对于同一种输送介质, 可以从键盘输入不同管桥的基本几何参数, 得到相应的 β_i 值以及与 β_0 的比较结果, 还可以进行组合拱式管桥各构件(或截面)强度校核和稳定性验算并输出打印结果, 从而使工程技术人员了解对管桥设计影响较大的是哪一个或哪几个几何参数, 有助于工程设计人员改进设计, 使管桥结构设计朝着既经济合理又安全可靠的优化方向发展。

三、算例及结果分析

为了进一步说明可靠性分析方法的应用, 下面给出一个组合拱式管桥常规设计的具体算例。

1、 可靠性分析输出结果

正确运行软件 CPMRA, 按屏幕提示键盘输入组合拱式管桥基本几何参数值^[7], 即运载管、结构弦管及结构腹杆的规格、矢跨比、组合管拱等边三角形截面的边长和高度以及管桥拱支墩顺桥方向的水平长度, 并键入结构控制截面处构件的目标可靠指标 β_0 值, 于是就得到如表 1 所示的计算结果。

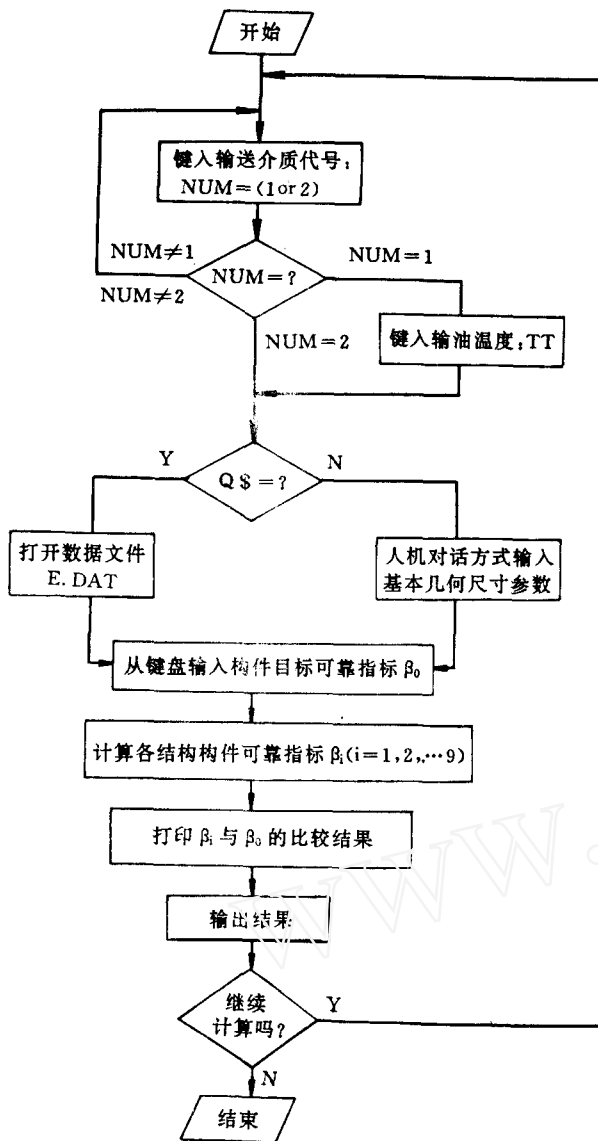


图 2 组合拱式管桥可靠性软件 CPMRA 计算框图

表 1 组合拱式管桥单项可靠指标计算结果

项 目	可靠性指标 β 值	
	原油	天然气
拱脚运载管强度	8.480 84	8.957 83
拱脚结构弦管强度	7.779 23	7.253 21
拱顶组合管拱面外稳定性	7.578 19	7.607 37
拱顶组合管拱面内稳定性	9.089 93	9.742 71
拱脚腹杆压杆稳定性	9.515 54	7.662 31
拱脚腹杆受压强度	9.523 98	7.751 34
拱支墩抗滑移稳定性	5.784 87	6.708 39
拱支墩抗倾覆稳定性	8.020 40	6.183 63
拱支墩地基承载力强度	3.759 83	3.949 32

注 目标可靠性指标 β_0 (无输油气) 设定为 3.70

2、 结果分析

从表 1 中不难看出,无论是输油还是输气,组合拱式管桥常规设计中的各构件(截面)可靠指标的数值,除拱支墩地基承载力可靠指标值较接近目标可靠指标 β_0 值之外,其余的均远大于 β_0 值。这表明组合拱式管桥常规设计的各构件具有过分的可靠度,也说明了该常规设计过于保守,构件截面尺寸偏大,在经济上是很不合理的,因此,有必要改进组合拱式管桥的常规设计,在满足管桥工程安全可靠性的条件下,使组合拱式管桥的结构设计更趋经济合理。

参 考 文 献

1. 吴世伟:结构可靠度分析,人民交通出版社(北京),1990,8.
2. 黄兴棣:工程结构可靠性设计,人民交通出版社(北京),1989,1.
3. 李继华等:建筑结构概率极限状态设计,中国建筑工业出版社(北京),1990,10.
4. 宋文利等:组合拱式管桥可变荷载统计分析,天然气工业,1996(5).
5. GB168-84(试行)建筑设计统一标准,中国建筑科学研究院,1984.
6. 宋文利等:组合拱式管桥单项可靠指标的建立,西南石油学院学报,1996(2).
7. 宋文利等:组合拱式管桥计算机模拟设计,天然气与石油,1995(4).
8. 宋文利:组合拱式管桥可靠设计(硕士论文),西南石油学院,1994.

(收稿日期:1996-11-08)

编辑:刘春阳

第 15 届世界石油大会即将召开

世界石油大会(WPC)是国际科学会议中高层次、高水平的学术组织。它成立于 1933 年,全称为“世界石油大会——石油科技经济管理论坛”。它的宗旨是为人类的利益加强对世界石油资源的管理、在世界石油工业中推进先进的石油科学技术的应用和经济、金融及管理问题的研究。

第 15 届世界石油大会将于 1997 年 10 月 12~16 日在北京隆重举行,其主题是“技术和全球化引导石油工业进入 21 世纪”。届时,将有 70 多个国家和地区的 3 000 多名与会代表和 1 000 多名参展代表云集北京。大会将就海上和陆地石油及天然气勘探开发、石油化工、储量、环保安全、储运、经营管理等方面的新理论、新观点、新技术和新趋势进行深入的探讨,并预测未来 21 世纪石油工业面临的机遇与挑战。

摘自《石油知识》1997.1

作 者 介 绍

- 罗塘湖** 教授级高级工程师,国家有突出贡献的科技专家,1933年生,1956年毕业于北京石油学院储运专业,1956~1961年留苏研究生,现任《油气储运》编委会副主任。
- 邓松圣** 见本刊1997年第1期。
- 郭秀玲** 工程师,1953年生,1978年毕业于华东石油学院储运专业,现在中国石油天然气华东输油管理局山东第二输油管理处从事输油生产技术工作。
- 胡通年** 教授级高级工程师,1942年12月生,1966年毕业于北京工业大学,现任中国石油天然气管道局副总工程师,科技处处长,本刊编委。
- 林映源** 助理工程师,1970年生,1993年毕业于抚顺石油学院,现在广州白云机场中南油料公司从事修建工作。
- 曹学文** 讲师,1966年2月生,1989年毕业于石油大学(山东)储运专业,获硕士学位,现在石油大学(山东)储运教研室从事油气集输教学和科研工作。
- 陶勇寅** 副教授,1963年生,1983年毕业于河北大学,1989年获天津大学土木系硕士学位,现任中国石油天然气管道局职工教育培训中心管道工程系主任,从事教学和科研工作。
- 宋文利** 工程师,1969年5月生,1994年7月毕业于西南石油学院油气储运专业,获工学硕士学位。现在中国石油天然气总公司西北石油管道建设指挥部生产准备部从事长输原油管道的生产管理及相关科研工作。
- 马书定** 翻译,1967年12月生,1989年毕业于北京第二外国语学院英语系,现在辽河油田设计院信息所从事科技情报翻译工作。
- 陈李宾** 见本刊1997年第2期作者介绍。
- 梁斌** 工程师,1968年生,1991年7月毕业于中国人民解放军后勤工程学院油料储运专业,现在中国航空油料西北公司修建处工作。
- 詹华** 讲师,1964年1月生,1984年毕业于厦门水产学院动力机械专业,现在中国石油天然气管道局职工教育培训中心管道运输系从事教学和科研工作。
- 吴维加** 讲师,1957年生,1983年毕业于原中国石油天然气管道局职工学院通信工程专业,现在中国石油天然气管道局职工教育培训中心从事教学工作。
- 梁宪玉** 工程师,1955年10月生,1984年毕业于沈阳化工学院仪表自动化专业,现在大庆输油公司计量科从事原油计量工作。
- 刘建荣** 工程师,1958年生,1983年毕业于原中国石油天然气管道局职工学院自动化仪表专业,现在中国石油天然气管道局胜利输油公司维修中心从事技术管理工作。
- 任凤翔** 工程师,1954年5月生,1983年毕业于原中国石油天然气管道局职工学院仪表自动化专业,现任中国石油天然气管道局北京输油公司技术科科长,从事仪表自动化技术管理工作。
- 黄春芳** 讲师,1953年生,1985年毕业于原中国石油天然气管道局职工学院储运系,1993年在石油大学(北京)研究生院获工学硕士学位,现在中国石油天然气管道局职工教育培训中心从事教学和科研工作。
- 孙正海** 翻译,1951年1月生,1982年毕业于哈尔滨师范大学外语系俄语专业,现在中国石油天然气华东勘察设计院从事科技情报翻译工作。
- 焦玉瑞** 工程师,1964年7月生,1986年毕业于大连理工大学化工机械系,现任大连石化公司机动处转动设备科科长,从事技术管理工作。

Song Wenli and Yao Anlin: **Reliability Analysis of Combined-Arch Pipe Bridge**, *OGST*, 1997(6)16, 24~27.

Overhead crossing pipe bridge is a very important structure for long-distance oil/gas pipeline, its reasonable structure design and safe reliability will totally ensure this kind of pipeline to safe operation. Taking an arch-shape Combined-Arched Pipe Bridge (CAPB) as a research target, the paper applies the first-order second-moment theory to carry out reliability analysis on CAPB and provides the analysis ideas of reliability of CAPB. It considers that the major factors influencing the resistivity of structure members are such random variables as the material performances, geometric parameters and accuracy of models, and put forward the method which determines the target reliability indices β_0 , and quantitatively analyses and calculates the structure reliability indices of CAPB with centre-point method. It develops reliability analysis software—CPMRA with FORTRAN language in order to deal with the complicated β equations. The indices results calculated by the software show that the analysis method described in the paper are correct with a high accuracy, and prove that the old design method of CAPB is too conservative to be reasonable in economy.

Subject Headings: oil pipeline, gas pipeline, combined-arched pipe bridge, structure design, reliability, structural analysis, calculation

• CORROSION CONTROL & INSULATION •

Ma Shuding and Wang Xueshan: **A New Process for the Application of Internal Insitu Pipeline Coating with Double-Pig**, *OGST*, 1997(6)16, 28~30.

A new process for the application of internal insitu pipeline coating with double-pig is systematically introduced. It is pointed out that the process can be used to coat continuously the inner surface of long pipe with bend, which can deal with the inhomogeneous coating and be easy to apply coating around bends; and the process is reliable in stable operating with homogeneous coating. The accelerated-type epoxy coating material should be used during applying. The applying procedure of this process is critical and limited to the pipe with uniform diameter because of curvature radius of bend. At present, the insitu double-pig applying process is an effective method on inner coating or inner rehabilitation.

Subject Headings: pipeline, corrosion control, pig, extrusion, coating, process

• QUESTION & DISCUSSION •

Chen Libin and Liao Zhengfang *et al.*: **Electric-hydraulic Pulse Method Applied to Cleaning Scale Deposition of Pipe Network in Oilfield**, *OGST*, 1997(6)16, 31~33.

Based on the externally breaking stone with impact wave and the theory of pulsative oscillation jet nozzle, the electric-hydraulic pulse method can be used to clean the scale deposit on the internal surface of pipe of the gathering pipeline in oilfield. To generate the electric-hydraulic pressure effect, the four necessary conditions must be provided: ① an additional clearance; ② a big current amplitude; ③ a high current slope; ④ a short wave tail. The simplified equations in calculating wavefront pressure of pressure wave formed in liquid discharge are put forward, and general application program of this method is given.

Subject Headings: electricity, liquid, pressure, impact wave, oilfield pipeline, cleaning

• CONSTRUCTION TECHNIQUE •

Lian Bin and Ma Yongli: **Analysis on Welding Deformation and its Control for Vertical Steel Tank**, *OGST*, 1997(6)16, 34~35, 47.

Because of concentrated welded seams and complicated welding stresses, the integral sizes of tank are often out of control during tank welding, which yields a poor installation quality. From respect of welding