

# 桁架式跨河管架的优化设计及地震可靠性评价<sup>①</sup>

俞然刚<sup>1</sup>, 庄向仕<sup>2</sup>, 周金顺<sup>1,3</sup>, 朱海<sup>1</sup>

- (1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580;
2. 中石油管道局华北石油工程建设有限公司, 河北 任丘 062552;
3. 浙江省能源集团浙江金衢丽天然气有限公司, 浙江 杭州 310016)

**摘 要:**在管道穿跨越工程中,桁架式跨河管架是一种常见形式。本文在结构优化设计中分别对矩形桁架结构和倒三角形桁架结构两种方案进行优化,并对优化结果进行了比较分析,确定了结构最优方案。通过模拟结构在地震作用下的响应对结构的抗震性能进行了分析,并通过可靠性分析评价了结构的抗震可靠度。结果表明:适当增加结构高度和减小结构宽度对结构有利;结构的总重量随杆件截面尺寸的减小而迅速降低,10 次优化循环后即从 54 t 降至 24 t 左右;三角形桁架比矩形桁架结构简单,重量减轻 36%;可靠性分析表明结构的可靠度为 99%。

**关键词:**跨河管架;桁架;优化设计;地震可靠性;有限元

中图分类号: TU323 文献标志码: A 文章编号: 1000-0844(2013)02-0213-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.02.0213

## Design Optimization and Seismic Reliability Analysis of Truss-type River-crossing Pipe Rack

YU Ran-gang<sup>1</sup>, ZHUANG Xiang-shi<sup>2</sup>, ZHOU Jin-shun<sup>1,3</sup>, ZHU Hai<sup>1</sup>

- (1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao Shandong 266580, China;
2. Huabei Petroleum Engineering Construction, China Petroleum Pipeline Bureau, Renqiu Hebei 062552, China;
3. Zhejiang Jinquli Natural Gas Co., Ltd., Zhenjiang Provincial Energy Group Company Ltd., Huangzhou Zhejiang 310016, China)

**Abstract:** Oil and gas pipeline construction persists throughout China on national and regional levels. Because many barriers are encountered such as rivers, lakes, mountains, canyons, other construction, and unstable strata, access through and across these barriers are important in oil pipeline engineering design. Thus, construction reliability, safety, and economic impact have been studied. In cross projects, truss-type river-crossing pipe rack is a common form of medium-sized cross-projects because it has a simple structure, is light weight, and provides a convenient way to repair pipelines with ample space. The structure design optimization and seismic reliability analysis of truss-type river-crossing pipe racks are related to the overall performance and safe operation of pipeline structures. In this study, two scenarios of rectangular and inverted triangle truss structures were respectively optimized by using ANSYS parameter design language and a design optimization module, and the optimization results were analyzed to determine the most optimal solution. By simulating the structure's earthquake response, seismic performance analysis was conducted, and the structure of anti-seismic reliability was obtained through reliability analysis for optimal structure design.

The optimization results show that the height of the truss increases in the optimization

① 收稿日期:2012-03-20

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(12CX06078A)

作者简介:俞然刚(1967-),男(汉族),山东德州人,教授,博导,主要研究工程结构和地下岩石力学, yurangang@upc.edu.cn

process; however, the width is reduced. In addition, the diameter of pole gradually decreases in the process. The total weight of the structure rapidly reduces with rod cross-section reduction; reduction is rapid in the first three optimization cycles and slows from 54 tons to 25 tons after 10 optimization cycles to maintain a weight of 18.532 t. The analysis of internal force and largest structural displacement show that the structures make full use of material mechanics capability and that the appropriate increase in structural height and decrease in structural width are favorable to the structure. Optimization results show that the two types of structure forms show the same change trends in the optimization. The inversion triangle form has a more simple structure, fewer section species, and a more simple connect node construction than those of the rectangle form. Moreover, the inversion triangle form has weight reduction of 36% over the rectangle form; therefore, the cost of material and construction is less, and mechanics capability is more effective.

Response spectrum and time history analyses reveal that earthquake activity in the horizontal direction results in stronger activity on the river-crossing pipe rack than that in the vertical direction because the width of the truss decreases in the optimization to increase vertical stiffness.

Reliability analysis shows that the reliability of the structure is 99%. Failure probability of the structure maintains the probability permission bound of construction design. Therefore, the entire structure retains the guarantee probability of 99%. That is, the structure is safe and reliable under the earthquake activity and load.

This study provides particular methods of using the ANSYS program for design optimization and seismic reliability analysis, which are helpful for maintaining construction expenses and operation safety.

**Key words:** River-crossing pipe rack; Truss; Optimization design; Seismic reliability; Finite element

## 0 引言

管道运输被称为“第五大运输行业”，是运输油气的主要方式，世界上近三分之二的油气靠管道输送<sup>[1]</sup>。中国正在持续建设长输管道和省际省内管道，铺设过程中难免要遇到河流湖泊、高山峡谷、重要构筑物和不稳定地层等情况，因此管道的穿越与跨越设计是油气管道输送工程设计的重要组成部分。由于其对可靠性、安全性和经济性要求较高，目前研究中还存在着不少的问题，包括管道穿跨越结构在内的构筑物结构优化、抗震性能和地震可靠性评价的研究等<sup>[2-7]</sup>。

管道跨越结构按跨越形式<sup>[4]</sup>分为：梁式跨越、下撑式组合管梁跨越、桁架式跨越、“II”型管道跨越、管拱式跨越、吊架式跨越、大跨度悬缆式跨越、大跨度悬索式跨越、预应力结构跨越以及预应力和悬索拉索结构的组合结构跨越。中型跨越工程则常用桁架式跨越。桁架结构具有结构构造合理，自重相对较轻，施工安装比较方便，且可以充分利用空间便于管道跨越的优点。为更好地应用，有研究对输气管道桁架跨越结构进行了设计方案优选<sup>[5]</sup>，或改进了

断面形式和截面高度<sup>[6]</sup>。

可靠性设计和优化设计是结构设计的两种重要设计方法。本文利用 ANSYS 参数化设计语言和优化设计模块进行长输管道桁架式管架结构有限元分析和优化设计计算，得到了最优化序列；建立桁架式管架的计算模型，进行结构的地震响应分析，针对计算模型分析结构失效机理并进行结构的抗震可靠性计算，评价结构系统的安全性。

## 1 工程概况

某长输天然气输气管道需要跨越近 600 m 河面，因此该跨越结构采用多跨结构。每一跨跨度为 84 m，都放置于两个双柱形桥墩上，作为管道的承重桥梁。跨越结构上铺设相应的维护结构物，如护栏、检修平台等附属结构。该跨越结构采用 16 Mn 无缝钢管桁架，以 T 形连接或用连接板连接。原始设计基本尺寸为：倒三角形空间桁架结构，结构高度  $H=6$  m，宽度  $B=6$  m，节点间距 6.0 m，结构总重 58 000 kg；矩形的则  $H=6.5$  m， $B=4.5$  m，结构总重 61 070 kg。

跨越管道为  $\Phi 1016 \text{ mm} \times 26.2 \text{ mm}$  的无缝钢管,应用 3 层 PE 普通级防腐,外加 60 mm 厚聚氨酯保温层,外包厚度为 0.8 mm 的不锈钢板保护层,表面涂刷淡黄色油漆。管道固定于桁架跨越之上。

## 2 优化设计

### 2.1 基于 ANSYS 优化设计步骤

基于 ANSYS 的优化设计的基本步骤如下<sup>[8-10]</sup>:

(1) 通过完整的有限元结构模拟分析,生成优化设计循环中必须的分析文件。①利用参数化设计语言建立有限元数值模型;选取合适的单元,建立完整的结构模型,精确分配属性,合理划分计算网格;②对模型加载和求解;③有限元求解后,提取优化设计中必要的参数,特别是各个变量的初始参数值。

(2) 结构优化设计分析的关键步骤是建立优化控制分析文件。包括以下三点。①进入 ANSYS 优化设计模块,将第(1)步中产生的文件指定为优化设计分析文件;②分别确定设计变量,状态变量和目标函数,指定优化设计方法;③指定循环控制条件,即优化循环在此条件不满足时,循环结束。

(3) 确定优化循环次数,开始优化。

(4) 查看优化设计结果,得到最优化设计序列;通过 ANSYS 的人机交互接口选择要输出的果,得到结构优化设计的优化序列,完成优化设计。

### 2.2 桁架式管架优化设计与对比分析

为了得到更好的结构形式和更优化的结果,对该工程的桁架结构采用倒三角形和矩形两种方案分别优化并进行对比计算,以确定桁架的最终结构形式。

#### 2.2.1 倒三角形桁架式跨河管架设计优化

建立桁架式跨河管架的有限元分析模型,如图 1 所示。模型中采用三维杆件单元,即 LINK8 单元。

为了管架现场制作和施工的方便,桁架所用钢管的截面进行了归类,如图 2 所示。按照归并好的截面类型和结构的具体尺寸建立有限元分析模型,进行结构的优化设计。优化结果见表 1。

管道内的流体重力荷载处理成集中荷载,在管道支座处传递给桁架。考虑流体流动的动力影响,乘以动力系数。

以管架结构所用的钢管的外径、厚度以及整个结构的高度和宽度为设计变量,用结构的最大竖向位移和最大内力作为状态变量,结构的重量为目标

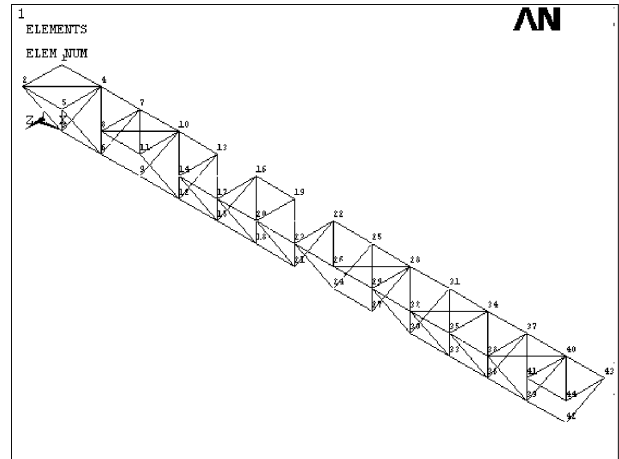


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

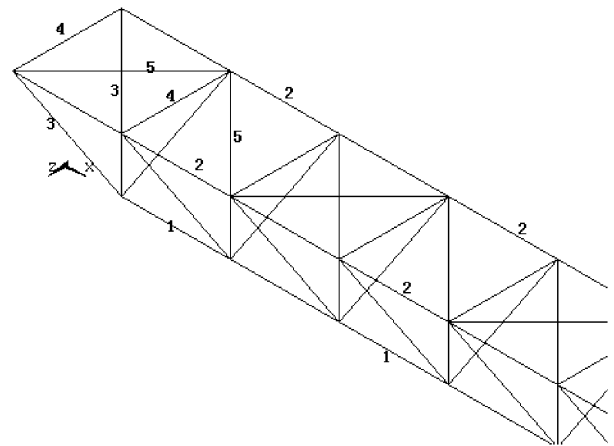


图 2 杆件截面分类示意图

Fig. 2 Figure of categories of component sections.

函数进行有限元优化设计。ANSYS 优化采用一阶优化方法,优化次数为 50 次;当重量差在 50 kg 以内时,优化过程结束。

结构的总重量、各杆件的直径、结构的高度和宽度的变化,以及结构的最大竖向位移和结构构件的最大内力随优化次数的变化规律都是优化效果的评价对象。

倒三角形桁架总重量的优化效果十分明显。在第 2 次优化后重量略有增加,从 54.236 t 升至 56 t 左右;第 3 次优化后急剧下降,降为 36 t 左右;随后进入降速下降阶段,以低于第一阶段的速度逐渐降低,第 10 次时降为 24 t,第 15 次时降为 20 t 以下,可见优化设计的收敛效果较好,随后优化次数的增加对重量的减少贡献值极为微弱,到第 36 次时为 18.532 t。结果表明优化已经逐渐逼近最佳效果。

杆件直径优化结果表明,除杆 1 外,其它杆的直

径大小下降趋势同总重量下降趋势类同。杆1的直径在前7次先是增大,从第8次开始下降,第15次

时降到接近初始直径,最终第36次时降低到45.24 mm。其它杆件直径优化结果见表1。

表1 倒三角形桁架结构参数优化结果

Table 1 Inverted triangular truss structure optimization results

类型	D1/mm	D2/mm	D3/mm	D4/mm	D5/mm	B/mm	H/mm	WT/t
优化初	385	385	216	216	216	6 000	6 000	54.236
优化后	339.76	101.72	67.33	51	50	3858.8	7830.1	18.532
应用	350	110	70	55	55	3850	7850	19.56

桁架结构高度随优化次数的增大而逐渐增大,经过8次优化后迅速升为8.4 m左右,略有下降后缓慢上升,最终趋向最优值。结构的宽度和高度的变化趋势是相反的,随优化进行逐渐减小,第15次后优化贡献开始变差。可见对于倒三角形桁架来说适当增加结构高度和减小结构宽度是更有利的,这样可以增加结构的总体抗弯刚度。

结构优化初和优化后的各个杆件尺寸、桁架总重量、结构高度及宽度的对比如表1所示,D1~D5指代归类后的桁架杆件直径。实际工程中不可能严格按照优化结果制造,构件尺寸类别不能过多,因此按工程需求将优化结果归并成应用尺寸。

### 2.2.2 矩形桁架式跨河管架设计优化

矩形桁架式管架的有限元模型建立与倒三角形桁架基本相同,建立模型时同样按照构件的位置和受力情况对构件的截面分类,优化方法类同。

两种桁架结构优化结果的变化趋势基本相似。

优化后结构的总重量,在第3次优化后急速减少,随后降速趋缓,经过15次优化循环后,优化贡献值趋于微弱,已经逼近最佳效果了。

矩形桁架高度的优化效果不佳,前3次高度增加近0.3 m,第4次和第5次优化结果下降约0.5 m,随后缓慢上升,略有波折后趋于最佳值;宽度则随优化循环次数增加逐渐降低,经过9次循环后已经趋于最优值,直到第22次,宽度值几乎不变。

各类构件的直径优化结果,除杆2之外基本随优化的进行逐步变小,并在第13次优化后趋于最优值。杆2经第2次优化直径剧降,第3次优化后则剧增回略低于原值,随后随优化进行逐步降低。

分析发现:结构总高度增加,宽度减小,整体结构的刚度增加,有利于减小结构的变形且能够一定程度的增加结构的稳定性;重量在急剧减少后趋于稳定;另外杆件内力和结构最大位移分析也表明优化后材料力学性能得到了充分利用。

### 2.2.3 两种形式管架优化设计结果的对比

比较发现:①两种结构中,倒三角形结构形式更

简单,杆件截面类型少,且结点构造简单;②优化后倒三角形桁架的自重约为矩形桁架的64%,降低了材料成本和施工成本,受力性能也因此更好。

表2 结构优化设计结果对比

Table 2 Comparison structural optimization design results

类型	项目	优化前	优化后
倒三角形桁架	结构总重量/t	54.236	18.532
	结构高度/mm	6 000	7 830.1
	结构宽度/mm	6 000	3858.8
矩形桁架	结构总重量/t	61.07	28.20
	结构高度/mm	6 500	6 490
	结构宽度/mm	4 500	3 000

## 3 桁架式管架地震响应分析

地震作用下结构的地震响应分析,对于结构的抗震设计有着指导作用。采用优化后并经实用化处理的倒三角形空间桁架结构作为模拟分析对象:结构高度 $H=7.85$  m,宽度 $B=3.85$  m,节点间距6.0 m,结构总重19 560 kg。

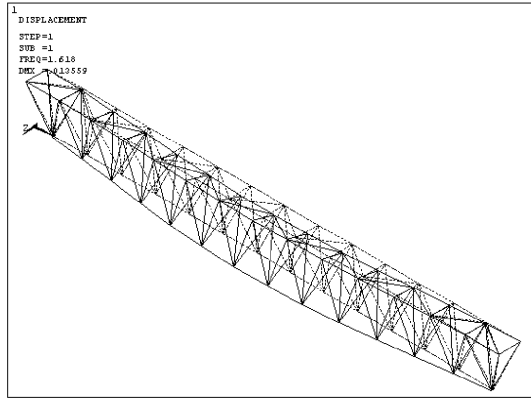
地震资料为:设防烈度为Ⅷ度,场地类型为Ⅲ类,即 $T_g=0.4$ , $\alpha_{max}=0.08$ ;地震波采用天津1976地震波,波的记录时长5 s,时间间隔0.01 s,记录信号为信号加速度。

### 3.1 反应谱分析

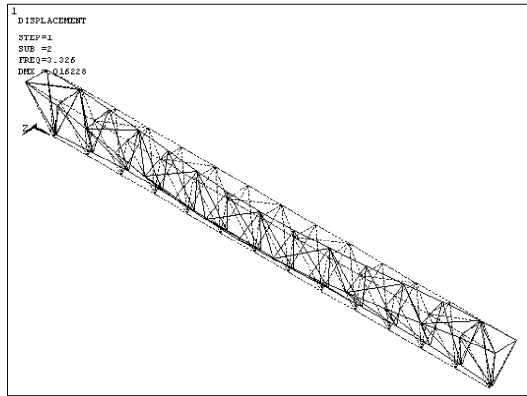
按照工程实际设计尺寸建立有限元分析模型,施加实际边界条件和荷载。

反应谱分析需要进行模态分析、谱分析、模态扩展和模态合并几个步骤。结构的前四阶频率分别为1.618 Hz、3.326 Hz、3.558 Hz和3.639 Hz,对应的振型图如图3所示。一阶振型主要为结构底部水平方向弯曲,并导致结构总体扭转;第二振型主要是结构上部水平向弯曲;第三阶振型为总体结构水平方向和竖直方向共同弯曲,导致结构的扭转变形;第四阶振型主要是竖直方向的弯曲作用,结构略成拱形。可见水平方向的地震作用对结构的影响较大,主要原因为优化过程中为了增加结构的竖向刚度而使结构宽度变小,高度增加。

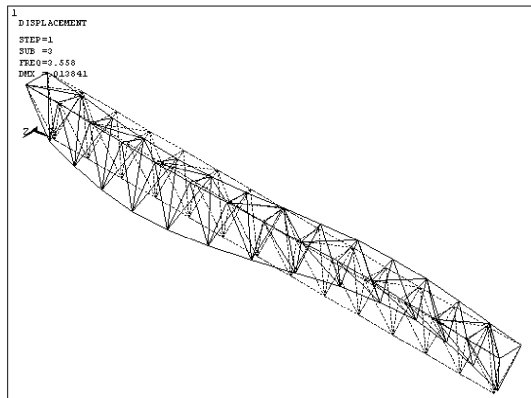
### 3.2 地震波瞬态分析



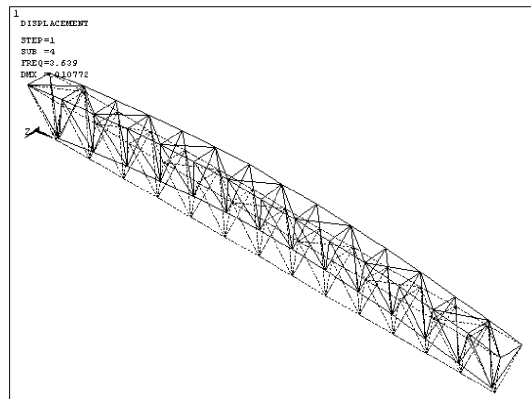
(a) 第一振型图



(b) 第二振型图



(c) 第三振型图



(d) 第四振型图

图 3 结构的前四阶振型

Fig. 3 The first four orders in vibration models of the structure.

输入地震波数据,采用横向和竖向两个方向同时输入,完整模拟地震情况,进行结构地震波瞬态响应分析,获得各节点的位移响应以及支座处的支座反力响应情况等。

跨中的节点位移响应表明,下部两节点的水平与竖向位移响应都重合,即两个点的变形一致,没有响应迟滞效应;上部节点的竖向位移响应变化规律大致相同,但不完全重合,说明两个节点竖向位移不完全相同,有一定的迟滞;不管是跨中上部还是下部节点,水平位移响应的变化较不规则,规律性差且反应剧烈,说明地震作用对结构水平方向的影响很大。

#### 4 桁架式管架抗震可靠性分析

##### 4.1 基于 ANSYS 的可靠性分析方法

蒙特卡罗—有限元法是目前分析计算结构可靠度的基本计算方法之一,其基本原理表述如下:根据前面的介绍,结构中某个功能函数的值大于其容许值时结构即为失效,此时结构的失效概率可以表示为

$$P_f \approx \frac{n(Z > [Z])}{N}$$

式中: $n$  表示实际值大于其容许值的次数; $N$  表示总次数。

可靠性分析时应用已有的地震波数据,在可靠性分析中进行加载计算。设计模拟抽样次数为 400 次。建立结构有限元模型并进行加载计算。计算后提取结构的最大位移和最大内力,以及结构的总体积(重量),作为可靠性分析的输出变量。结构的输入变量分别为结构的总高度、宽度、构件截面尺寸和作用在结构的管线自重。

##### 4.2 可靠性分析在 ANSYS 中的实现过程

(1) 建立分析结构的 ANSYS 有限元模型,并且在建立模型前定义输入和输出变量。划分网格并施加约束条件和荷载。

(2) 进行有限元计算并提取可靠性分析中所要的数据。

(3) 按照(2)提取的计算结果赋值给输出变量,并自动改变输入变量的值,建立有限元模型进行新的随机抽样计算,再次进行结果提取和赋值操作。如此循环进行有限多次。

(4) 通过上述多次循环得到大量输出变量的值,并对这些数值进行统计分析。

##### 4.3 输出变量抽样过程

可靠性分析计算中先研究各个输出变量的抽样

过程,来确定计算是否满足可靠性分析计算的要求。由于输入变量都采用正态分布,当输出变量抽样次数足够时也应大致满足正态分布。在计算中各个变量的取值情况会被软件自动的记录下来并保存在数据表格中。计算结束后可以根据情况自由提取变量及其均值和标准差的取值抽样过程。

最大位移、内力和结构的总体积的均值和标准差的取样过程都是保证在95%的置信区间内,即以95%的保证率保证所取到的数据在最大和最小值之间。

对结构的最大位移、内力和结构体积三个输出变量的取样值和取样过程分析可得,设计中的输出变量的取样是在各自的均值附近波动,是基本符合正态分布的。说明取样过程符合分布情况,变化趋于稳定说明抽样次数能够满足计算的要求,计算结果的精度是可信的。

对输出变量的取样频率直方图分析可得,输出

表3 输入输出变量的线性相关性

Table 3 Linear correlation coefficients between input and output parameters

变量	宽度 $B$	高度 $H$	截面直径 $D1$	截面直径 $D2$	截面直径 $D3$	截面直径 $D4$	截面直径 $D5$	竖向荷载 $FY$
DMAX	0.041	-0.311	-0.175	-0.294	-0.882	-0.129	-0.109	0.034
SMAX	-0.072	-0.085	0.057	0.077	0.996	0.078	0.061	0.013
VTOT	0.033	0.171	0.167	0.314	0.902	0.162	0.161	0.043

#### 4.5 结构可靠性概率分析

分析中,根据一般认为的“当结构的最大位移、最大内力和结构总体积大于极限值时,结构视为失效”,分别计算得出结构的失效概率。失效概率和可靠度如表4所示。

表4 结构可靠性计算结果

Table 4 Results of Reliability Calculation for the structure

标准	>DMAX	>SMAX	>VTOT	总体结构
失效概率/%	0.6144	0.6568	0.5849	0.6568
可靠度/%	99.3856	99.3432	99.4151	99.3432

可见结构的失效概率可以保持在工程设计的概率要求允许范围内。整个结构处在99%的保证概率以内,说明结构在所加荷载和地震作用下是可靠的。

## 5 结论

(1) 对倒三角形和矩形两种形式的桁架式管架分别进行优化,优化变量为结构杆件尺寸、结构的高宽、结构形状,目标是使结构的重量达到最轻。经计算,两种桁架优化后的总重量均大幅度减少;倒三角形桁架式管架的优化结果更优,重量约为矩形结构的64%,且结构构造较简单,杆件截面类型少,结点构造简单。

变量结构最大位移、内力和结构总体积的采样数据也基本符合正态分布。采样相对频率也是接近于正态过程,并且取样次数为400次时,可以满足可靠性分析基本要求。

#### 4.4 各变量的灵敏度分析

从各个输入变量对各个输出变量最大位移(DMAX)、内力(SMAX)、结构总体积(VTOT)的灵敏度分析中可见结构中各构件截面、结构的高和宽,以及荷载对结构可靠性的灵敏程度。结构中第三类和第二类截面构件的直径(截面尺寸)对结构可靠性灵敏度的影响较大,因此,在结构设计和施工制作中要特别注意桁架竖向斜腹杆(D3杆)和上部水平弦杆(D2杆),适当增加其稳定性,以保证结构的可靠性要求。

根据结构的灵敏度分析可以得到各个变量之间的线性相关性。其线性关系如表3所示。

(2) 通过地震响应分析,得到结构的地震响应。结合可靠性分析方法,对优化后的结构进行结构的抗震可靠性评价,结果表明:可靠度在99%以上,完全可以满足工程要求。

(3) 运用有限元法进行管架静力分析,得出结构的静力位移、内力变化,分析优化后的材料力学性能利用是否充分;进行地震作用下的结构动态响应模拟,定量判断结构在地震发生时的各种变形和内力变化情况。分析表明:结构总体重量的减少可以使结构的受力情况更加合理,对减小地震损害,提高结构抗震性能有很大作用。

#### [参考文献]

- [1] 刘天佑,史航,编著.第五运输业——石油储存与运输[M].北京:石油工业出版社,2006:5-8.  
LIU Tian-you, SHI Hang. The fifth Transportation——Oil Storage and Transportation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006:5-8.
- [2] 杜永峰,余钰.重力式挡土墙结构体系可靠度的 Monte Carlo 模拟[J].西北地震学报,2012,34(1): 29-32.  
DU Yong-feng, YU Yu. Monte Carlo Simulation of System Reliability of Gravity Retaining Wall[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012,34(1): 29-32.

- [3] 胡道华, 杨晓秋. 桁架式跨越通过高地震烈度区的抗震分析[J]. 油气储运, 2011, 30(6):453-455.  
HU Dao-hua, YANG Xiao-qiu. The Seismic Analysis of Truss through High Seismic Intensity Area[J]. Oil&Gas Storage and Transportation, 2011, 30(6):453-455.
- [4] 薛强. 管道跨越设计简介[J]. 天然气与石油, 1999, 17(2):27-30.  
XUAN Qiang. Pipeline Crossing Design Presentation[J]. Natural Gas and Petroleum, 1999, 17(2):27-30.
- [5] 史睿, 刘延强. 巴东支井河输气管道桁架跨越结构的优化设计分析[J]. 石油工程建设, 2009, 35(4):24-27.  
SHI Rui, LIU Yan-qiang. Optimization Analysis for Truss Overhead Crossing Design of Zhijing River Gas Transmission Pipeline[J]. Petroleum Engineering construction, 2009, 35(4):24-27.
- [6] 詹胜文, 刘晓峰, 程梦鹏, 等. 忠武输气管道桁架梁式跨越设计的改进[J]. 油气储运, 2005, 24(4):32-34.  
ZHAN Sheng-wen, LIU Xiao-feng, CHENG Meng-peng. Improvement on Truss Overhead Crossing Design for Zhongxian—Wuhan Gas Transmission Pipeline[J]. Oil&Gas Storage and Transportation, 2005, 24(4):32-34.
- [7] 曹青, 张豪. 考虑土—结构相互作用的风力发电机塔架地震响应分析[J]. 西北地震学报, 2011, 33(1):62-66.  
CAO Qing, ZHANG Hao. Seismic Response Analysis of Wind Turbine Tower with Soil-structure Interaction[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(1):62-66.
- [8] L A Schmitt. Structural Design by Systematic Synthesis[A]// Proc. 2nd Conf. Electronic Comp, ASCE[C]. New York: [s. n.], 1960:105-122.
- [9] 刘爱霞. 导管架式海洋平台模型修正技术的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.  
LIU Ai-xia. The Studies on Model Updating for Offshore Platforms[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006.
- [10] 庄向仕. 桁架式跨河管架的地震可靠性评价及优化设计[D]. 青岛: 中国石油大学, 2010.  
ZHUANG Xiang-shi. Seismic Reliability Analysis and Optimization of Truss-type River-crossing Pipe Rack[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2010.