

# 大跨径油气管道悬索跨越施工调控方法研究

滕孔先 (国家石油天然气管网集团有限公司工程技术创新公司, 天津 300450)

铁明亮 (中国石油天然气管道工程有限公司河北省管道隧道和跨越技术创新中心, 河北 廊坊 065000)

邵志奇 (中国石油管道局工程有限公司管道投产运行分公司, 河北 廊坊 065000)

**摘要:** 大跨径油气管道悬索跨越刚度小, 施工过程中线形和应力变化显著。为解决大跨径油气管道悬索跨越调控难度大的问题, 本文分析了缆索线形计算调控理论和索力监测理论, 提出了施工调控内容及参数取值方法, 给出了施工异常情况调控方法, 可为管道悬索跨越建设的设计和施工提供参考。

**关键词:** 油气管道; 悬索跨越; 施工调控; 悬索桥施工; 调控理论

悬索桥作为一种大位移柔性结构, 在施工过程中呈现出显著的几何非线性, 特别是在油气管道悬索桥中, 这种情况更加突出<sup>[1]</sup>。相较于公路铁路悬索桥, 油气管道悬索跨越结构更为柔性。由于引入了风索、风拉索和稳定索等结构, 管道悬索跨越施工过程<sup>[2]</sup>中线形和应力的变化十分显著, 施工调控难度也相应增大。

## 1 管道悬跨越施工调控理论

### 1.1 有限位移理论

大跨度管道悬索桥施工调控方案的核心监控内容是悬索桥的上部索系结构施工过程, 以理论计算为主, 辅以监控测试和测量。索系结构主要理论基础为单索结构悬链线理论、分段悬链线理论和有限位移法理论。有限位移理论是以位移法为基础的矩阵结构分析, 能

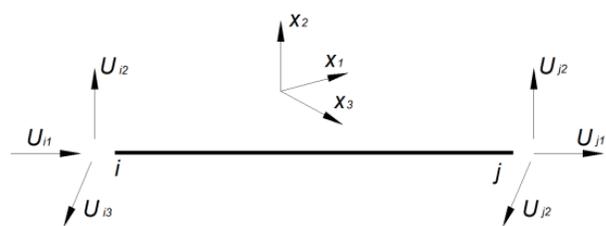


图1 有限位移理论空间索单元

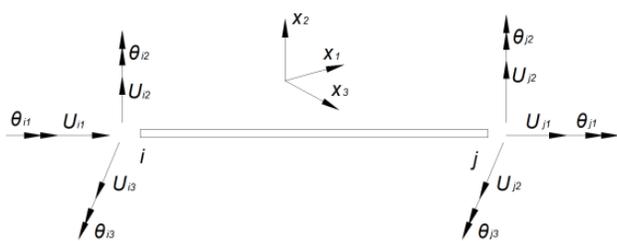


图2 有限位移理论空间梁单元

够全面考虑大位移引起的几何非线性因素, 计算模型与实际索系状态更为接近, 且可用于空间结构的分析, 因此多用于专业化的非线性有限元分析软件的理论基础, 计算模型如图1、图2所示。

图中X指单位的三个方向, U在空间索单位指单位节点的三个自由度, U和θ在空间梁单元指6个自由度。单元切线刚度矩阵:

$$[k]^e = [k_S]^e + [k_L]^e + [k_N]^e + [k_M]^e$$

式中:  $[k_L]^e$  为大位移对切线刚度矩阵的影响;  $[k_S]^e$  为割线刚度矩阵;  $[k_N]^e$  为轴力对切线刚度矩阵的影响;  $[k_M]^e$  为弯矩对切线刚度矩阵的影响。

通过将全部单元刚度矩阵集成为总体刚度矩阵  $K = \sum [k]^e$ , 整个结构集成方程为:

$$dF = Kd\Delta$$

式中:  $dF$  为荷载增量矩阵,  $d\Delta$  为位移增量矩阵。

### 1.2 索力监测理论

张紧拉索的无阻尼自由振动方程为:

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

式中:  $x$  为沿索向的坐标,  $u(x, t)$  为索上个点在时刻  $t$  的横向位移;  $EI$  为索的抗弯刚度;  $T$  为索内拉力;  $m$  为索的线密度。

当索两端边界条件为两端简支, 则索力测试方程为:

$$T = \frac{4ml^2}{n^2} \cdot f_n^2 - \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \cdot EI$$

式中： $f_n$  为第  $n$  阶频率。

当不考虑索的抗弯刚度时，索力测试方程可简化为：

$$T = \frac{4ml^2}{n^2} \cdot f_n^2$$

工程中，索的实际边界条件为弹性固接，是介于理论铰接和固结的边界条件。在实际测量时，通过现场实测与理论计算张拉力的对比，给出索力修正系数表或趋势图，修正得出精确索力值<sup>[2]</sup>。

## 2 管道悬索跨越施工调控内容及参数

### 2.1 施工调控的主要内容

管道悬索跨越与普通悬索跨越不同的地方主要在桥面结构刚度低，对风作用比较敏感，因此一般都会设置抗风索，且油气管道安装过程对桥面结构、主缆及主塔受力影响较大，除了与普通悬索桥一样进行主缆安装调控、猫道安装的调控、索夹吊杆的调控、加劲梁桁架吊装阶段的调控等之外，还需要进行风索安装过程、管道安装过程及管道试压过程的调控。

管道悬索桥抗风索系结构主要三种：风索 + 风拉索，风索 + 风拉索 + 稳定索，风索 + 风拉索 + 共轭索。

因此管道风索安装过程调控就涉及以上三种索系结构的设计及计算、风索预张力的计算、主塔及桁架结构的应力和位移等，现场需要对塔顶位移、塔底应力、桁架线性及应力、索系各索力等进行监测，塔顶设置索鞍的还需要进行索鞍预偏量进行计算和监测。

管道安装及试压过程中，管道所有作用通过桥面桁架传递给索系，主索再传递给桥塔和基础，因此需要对桥面桁架的应力和线性、索系结构的应力和线性、桥塔塔顶位移及应力进行理论计算和施工过程中的调控。管道悬索跨越上管道数量并不确定，但为保证施工安全一般采用单根安装完成后再进行另一根管道的安装，且安装方式可采取单边发送、两边发送或增加配重等多种安装形式。管道试压一般采用注水试压形式，多采用单根试压完成并排水结束后再进行下一根管道的试压。施工现场调控应根据不同安装和试压方式采取不同的监测方案。

典型管道悬索跨越与普通悬索桥相比，主要不同的施工调控内容见表 1。

典型管道悬索跨越的主要施工调控流程如图 3 所示。

表 1 管道悬索跨越施工调控的特殊内容

序号	主要项目	具体内容
1	风索安装	风索、风拉索或共轭索、稳定索等安装方案设计和计算、安装无应力长度计算；风索体系索夹安装坐标和方位角的确定；风索初始锚固张拉力的确定；主塔塔顶位移理论计算、塔底应力理论计算及现场监测；塔顶主索鞍预偏量、顶推量理论计算及现场监测；主缆线形、索力理论计算及现场监测；风索施工过程桥面桁架线形、应力理论计算及现场监测；风索锚下张拉过程主缆线形和索力计算、主塔塔顶位移、塔底应力、风拉索索力、稳定索索力或共轭索索力理论计算及现场监测。
2	管道安装	管道安装方案的设计和计算；管道安装过程主塔塔顶位移理论、主塔塔底应力、索鞍预偏量及顶推量、主缆线形和索力、桥面桁架线形和应力的理论计算及现场监测。
3	管道试压	气、油管道试压方案的设计及确定；气、油管道充水试压作用下主缆线形、索力桁架线形和应力、塔顶位移和塔底应力、风索及风拉索线形和锚下张力、风拉索线形和索力、稳定索或共轭索线形和索力的理论计算及现场监测；油管道充水试压作用下主缆线形和索力、桥面桁架线形和应力、塔顶位移和塔底应力、风索及风拉索线形和锚下张力、风拉索线形和索力、稳定索或共轭索线形和索力的理论计算及现场监测。

表 2 大跨径管道悬索跨越施工调控参数及其敏感性分类

序号	敏感级别	参数名称
1	I	桥塔构造尺寸、锚固面坐标、主索弹性模量、主索膨胀系数、鞍座构造尺寸、索夹尺寸及重量、桥面截面尺寸、温度、管道试压方案、风索膨胀系数、风索钢丝弹性模量、风索索夹尺寸及重量、稳定索索夹尺寸、稳定索索夹重量
2	II	桥塔温度、主索跨度、主索自重、主索垂度、鞍座施工标高、吊索直径、吊索弹性模量、桥面安装方案、管道安装方案、风索锚头重量、风索跨度和垂度、风拉索面积及弹性模量、稳定索面积、稳定索弹性模量
3	III	桥塔弹性模量、桥塔收缩徐变与基础沉降、散索鞍中心坐标、锚碇沉降、滑移或转动、鞍座预偏、吊索制作长度、桥面重量、管道保护层重量、管道重量、猫道结构重量、猫道矢高、猫道承重索弹性模量、索股弹性模量、风索重量、风索控制张力、风拉索制作长度、稳定索制作长度

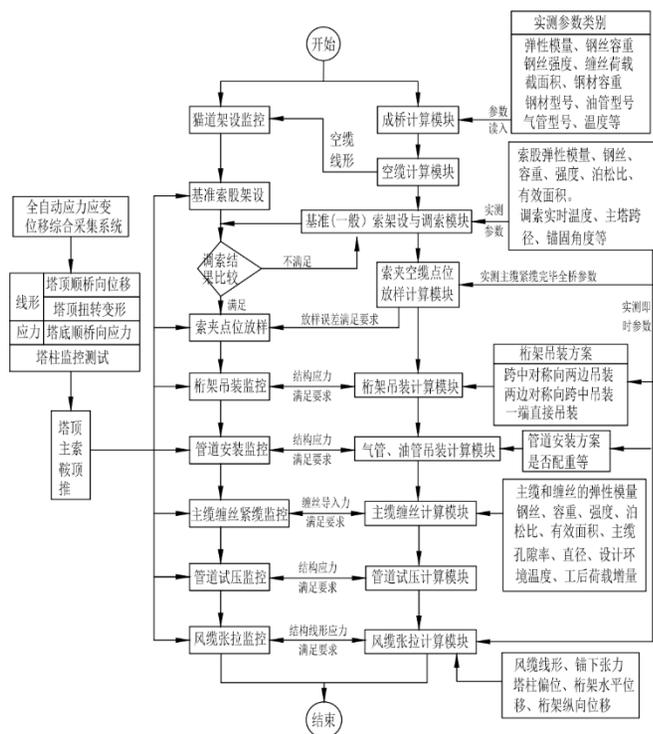


图3 典型管道悬索跨越的主要施工调控内容及流程

## 2.2 施工调控的主要参数及敏感性分析

大跨径管道悬索跨越施工监控中所必须取得参数有结构或构件的几何尺寸、温度、临时支撑与约束、临时荷载、弹性模量、容重、线膨胀系数等。表1列出大跨径油气管道悬索跨越施工调控的重要参数及其敏感程度。敏感系数为I表示参数敏感性不强,可以采用理论值;敏感性为III表示参数敏感性强烈,调控中必须以实际参数为准;敏感性为II的参数采用理论值计算时需要加经验修正。如表2所示。

## 3 管道悬索桥施工异常情况调控方法

### 3.1 桥塔立柱施工

索塔施工立模位置受温度影响大,如果不加以修正将会导致索塔线形的误差,因此桥塔立柱的施工要预留恒载弹性压缩量,方便施工过程中修正温度对立模位置的影响。

### 3.2 主索安装施工

猫道架设时,应塔顶位移进行实施监测。如发生位移超限,应调整猫道的施工进度及步骤,减少桥塔顶部两侧承重索的索力差。主索的安装误差的调整一般通过测量施工现场的主索线形、温度,从成桥线形为反算主索的无应力长度,并重新计算索夹位置以及吊索长度,通过调整索夹位置及吊索锁长降低主索安装误差。

### 3.3 桥面安装

桥面桁架吊装过程中,如果桥塔实际测量偏移与理论计算偏移相差太大,应先检查理论计算中参数选择的合理性。如果修正了理论计算模型,需检查桥面桁架吊装以及索鞍顶推的方案是否合理。桥面施工和索鞍顶推应拖过反复计算交替进行,梁段安装的方案需要通过反复的计算根据现场情况确定。同时还要确定桥面桁架之间的连接方式及吊装方法和顺序。

### 3.4 管道安装

管道安装阶段,应检查主梁构件中的变形、应力情况,主索的线形和索力情况。如果发现主梁局部应力超标,应先检查模型计算中的参数、边界条件是否合理,最后进行理论和实际比较,分析误差和给出危险预警提醒。

### 3.5 风索系统安装和张拉

风索、风拉索、稳定索安装到主梁上,应调控监测构件变形、应力,塔顶位移和塔顶应力等关键控制参数。风索应分级分步骤分阶段张拉,监测桥梁控制参数。并与理论计算值比较,当误差较大时,先查计算数据模型,在分析实际误差,给出相应的预警提醒。

### 3.6 试压过程调控

气管道或者油管道充水试压的荷载较大,应先基于跨越实际状况建立理论分析模型,分析结构在充水试压工况下的变形、应力和内力情况,分析结构是否具有相应的承载能力。当不能满足其试压承载能力,应查模型参数等基本数据,再结合实际情况分析误差,给出预警提醒。

## 4 结语

大跨径油气管道悬索桥施工过程中线形和应力变化显著,调控难度大。针对大跨径油气管道悬索桥,分析了缆索线形计算调控理论和索力监测理论,提出了施工调控内容及参数取值方法,给出了施工异常情况调控方法。大跨径油气管道悬索桥施工调控方法可行,能有效解决施工过程中问题,有助于桥梁顺利建成。

### 参考文献:

- [1] 王少林. 景观斜拉桥施工与监控技术研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2013.
- [2] 余祁平, 潘权, 杨胜江等. 大跨度悬索桥锚跨索股张力计算分析 [J]. 公路与汽运, 2023(3):98-101.

### 作者简介:

滕孔先 (1985-) 男, 汉族, 河南周口人, 本科, 中级工程师, 研究方向: 油气储运。