

# The Design and Research of the Tower Top Anchoring Device of One-Side Double Main Cable Type Suspension Cable Pipeline

Xiaohui Chen<sup>1\*</sup>, Leibin Zuo<sup>1</sup>, Taojia Zhang<sup>2</sup>, Junling Xu<sup>3</sup>, Yuan Gao<sup>4</sup>

<sup>1</sup>China Petroleum Pipeline Engineering Co. Ltd., Langfang Hebei

<sup>2</sup>PetroChina Pipeline Company, Langfang Hebei

<sup>3</sup>No. 1 Branch Company of China Petroleum Pipeline Engineering Co. Ltd., Langfang Hebei

<sup>4</sup>China Petroleum Pipeline Engineering Co. Ltd. International, Langfang Hebei

Email: \*chenxiaohui21cn@163.com

Received: Mar. 24<sup>th</sup>, 2020; accepted: Apr. 27<sup>th</sup>, 2020; published: Jun. 15<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

In the form of suspension cable span of oil and gas pipeline, when the design load is large and the large diameter main cable is adopted; the single large diameter main cable is divided into two main cables with small cross section, which can greatly improve the transportation and installation efficiency. In order to solve the connection and anchoring problem of the single side and double main cable at the top of the main tower, a new type of anchoring device for simultaneously anchoring the double main cable is designed. The anchoring device is simulated and analyzed by using the large-scale general finite element software ABAQUS. The results show that the design of the main cable-main tower anchoring device can completely solve the main cable anchoring and connection problems of the main span and side span, and the welding connection mode with the tower top can also solve the slip problem of the single cable saddle to a certain extent. When the main cable reaches its breaking force, the stress at the end of the arc longitudinal connection plate and the middle longitudinal connection plate on both sides of the anchoring device is the largest, but it is smaller than the ultimate yield strength of the material selection of the device. The design structure of the anchoring device is reasonable and the safety can meet the requirements of use. The baffle plate at the connection between the device and the anchor of the main cable is the key point of design consideration.

## Keywords

Suspension Bridge, Pipeline Spanning, Double Main Cable, Tower Top of Main Tower, ABAQUS Finite Element Software, Anchoring, Analog and Simulation, Device

---

\*通信作者。

# 长输管道单侧双主缆式悬索跨越塔顶锚固装置的设计研究

陈晓晖<sup>1\*</sup>, 左雷彬<sup>1</sup>, 张弢甲<sup>2</sup>, 许峻岭<sup>3</sup>, 高媛<sup>4</sup>

<sup>1</sup>中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊

<sup>2</sup>中国石油天然气股份有限公司管道分公司, 河北 廊坊

<sup>3</sup>中国石油管道局第一工程分公司, 河北 廊坊

<sup>4</sup>中国石油管道局工程有限公司国际事业部, 河北 廊坊

Email: \*chenxiaohui21cn@163.com

收稿日期: 2020年3月24日; 录用日期: 2020年4月27日; 发布日期: 2020年6月15日

## 摘要

在长输油气管道悬索跨越形式中, 当设计荷载较大而采用大直径主缆时, 将单根大直径主缆均分为两根截面较小的主缆, 可极大地提高运输和安装效率, 为了解决主塔塔顶单侧双主缆的连接和锚固问题, 设计了一种用于同时锚固边跨和主跨双主缆的新型锚固装置, 成功在单侧双主缆式悬索跨越中进行应用, 并采用大型通用有限元软件ABAQUS对锚固装置进行仿真模拟分析, 对结构安全性进行了计算和研究。结果表明: 采用不同截面和型号板材设计的主缆-主塔锚固装置可彻底解决双主缆锚固和连接问题, 其与塔顶的焊接连接方式, 也能够一定程度上解决设置单独索鞍存在的滑移问题; 当主缆达到其破断力时, 锚固装置两边弧形纵向连接板及中间纵向连接板的端部锚固位置处的应力最大, 但小于锚固装置选材的极限屈服强度, 锚固装置的设计结构合理, 安全性能能够达到使用要求, 装置与主缆锚具连接处的挡板是设计考虑的重点。

## 关键词

悬索, 管道跨越, 单侧双主缆, 主塔顶部, ABAQUS有限元软件, 锚固, 仿真模拟, 设计

Copyright © 2020 by author(s), Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

据不完全统计, 世界上接近 100% 的天然气、85% 的原油是通过长输管道方式进行运输的[1], 长输管道在遇到河流、山谷、湖泊、冲沟等自然障碍, 在地下穿越方式受限时, 地上跨越则成为必选方式。在形式众多的跨越结构中, 悬索跨越因其受力明确、结构简便、跨越能力强等突出优点[1] [2], 得到越来越多的广泛应用。

现有悬索式跨越中, 全桥通常设置两根主缆, 即单侧一根主缆, 然而对于搭载管道直径大、同时敷设多根管道以及跨径较大的悬索管道桥, 由于设计荷载较大, 若单侧采用一根主缆, 主缆设计直径极大, 有时甚至无成品索可供选择, 此时只能采取现场预制平行索股法进行主缆安装, 工程建设周期长且难度

较大。由于管道悬索跨越自重轻、整体刚度小、线性变化大等特殊性[3]，将大直径主缆均分为截面较小的两根主缆，可极大地提高运输和安装效率。

相较于单侧单主缆可采用索鞍进行锚固的成熟方式[4]，由于单侧双主缆形式的新颖性，目前尚无稳定可靠的塔顶锚固装置进行成功应用，塔顶部位主缆的锚固质量直接影响主塔、主缆、桥面的结构安全，进而影响全桥的稳定性，双主缆在塔顶的锚固正在成为制约此种形式推广的难点和关键。

## 2. 塔顶锚固装置设计

根据悬索跨越结构形式，两组主缆对称布置于塔顶两侧，每侧的边跨与主跨主缆在塔顶也可近似认为对称分布[5]，因此，整套装置应呈前后对称、左右平衡式。锚固装置布置于主塔塔顶，由于塔顶空间所限，整个装置体积应尽可能紧凑，且装置自重应尽可能小以满足塔顶吊装的要求。锚固装置在塔顶位置示意图如图1所示。

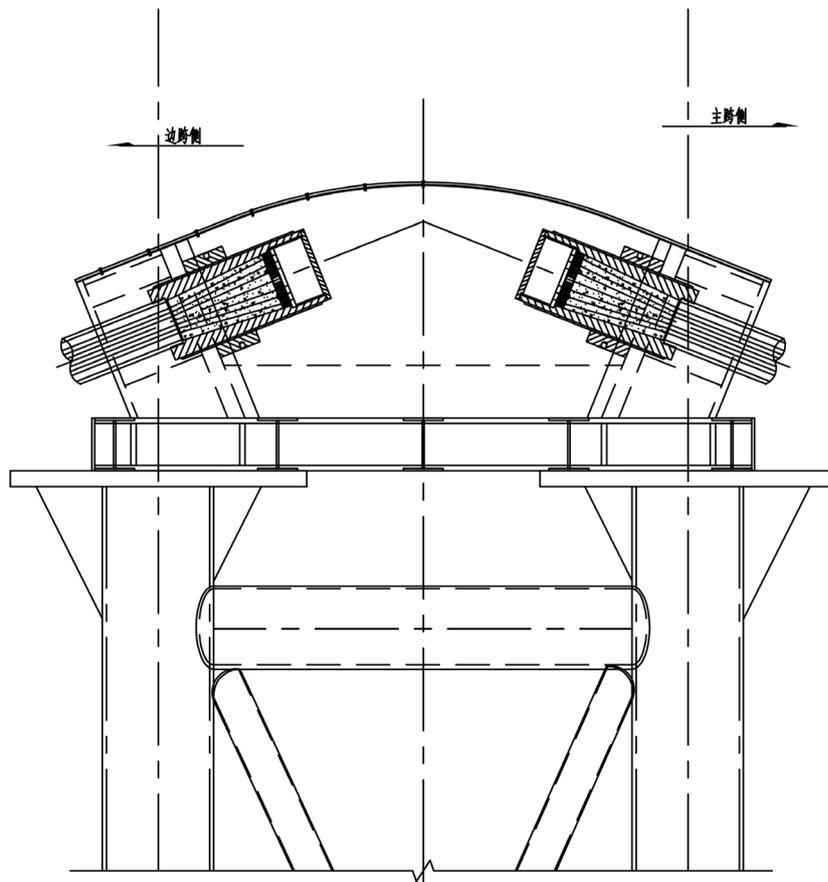


Figure 1. Schematic diagram of tower top layout of anchorage device  
图1. 锚固装置塔顶布置示意图

由于装置各部分的受力和作用不同，锚固装置由不同截面和厚度的钢板组成，包括底板基础、构造板、挡板、连接板、顶部盖板、横梁以及联系梁，除顶部盖板采用螺栓连接外，其余构件均采用焊接连接。底板与主塔塔顶预埋件进行连接，作为整个装置的基础，基础之上设置构造板，形成装置的基本形状和轮廓，构造板前后两端分别设置挡板，各挡板之间通过连接板进行连接和加固，装置的前后两个部分通过顶部盖梁进行封闭，锚固装置设计结构图如图2所示。

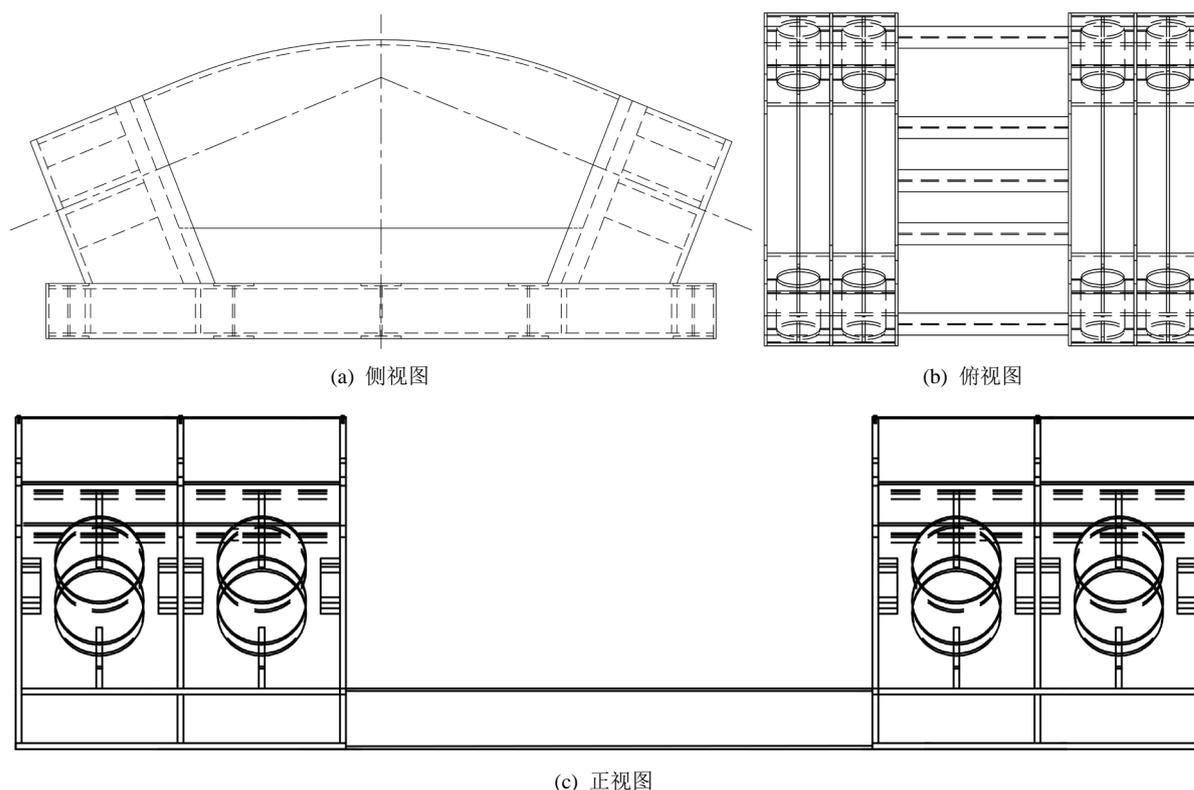


Figure 2. Schematic diagram of structure of anchorage device

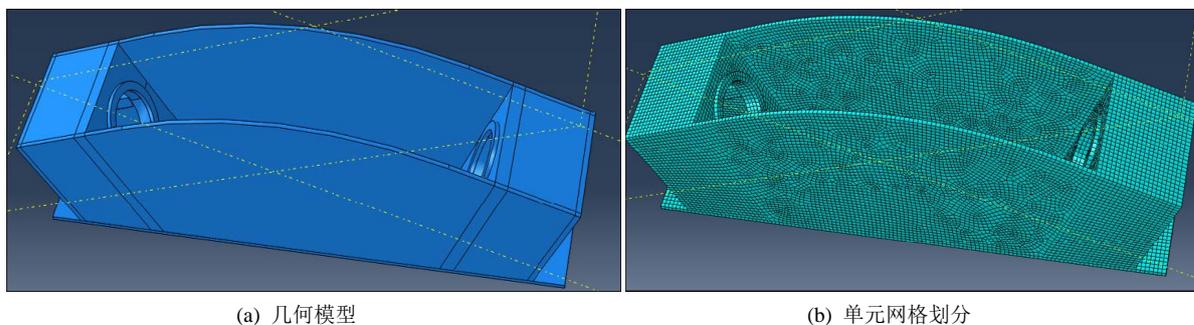
图 2. 锚固装置结构示意图

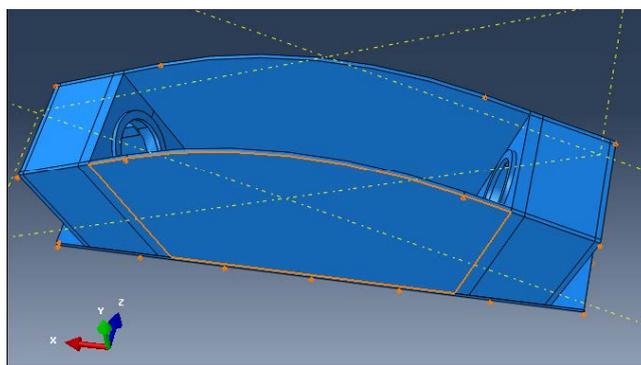
### 3. 有限元模型的建立

锚固装置在塔顶承受两侧主缆强大的拉力，应力集中现象较为严重。建立模型时，需要将锚固区的主缆索力等效施加在锚固装置与挡板之间接触面以及锚固端上。主缆作用等效分解为张拉力、锚固力以及圆弧段的不均匀径向压力，两侧近似为对称张拉主缆，分别产生径向压力满足叠加效应。

由于整个装置呈对称式，为简化分析，仅对其中一组锚固体系进行分析。根据上述传力机理，采用 Abaqus6.10.1 有限元软件建立分析模型，采用 C3D8R 单元模拟，单元尺寸约为 20 mm，几何模型和单元网格划分分别为图 3(a)，图 3(b)所示。

几何模型相互作用：加劲板与垫板通过 Tie 约束住。边界条件施加：底板下表皮的竖向(Y 向)位移自由度约束住；底板左侧角点施加水平向(含 X 向和 Z 向)约束；侧板的角点施加水平 Z 向约束[6] [7]，详见图 3(c)。





(c) 边界条件实施

Figure 3. Numerical model

图 3. 数值模型

## 4. 荷载计算及施加

### 4.1. 荷载模式及计算方式

对于管道跨越工程，主缆是整个桥梁体系中承受全部竖向荷载的重要构件，其荷载模式主要包括永久荷载、可变荷载、偶然荷载[8]，其具体考虑类型及计算方式如表 1 所示。

Table 1. Summary of load patterns and calculation methods

表 1. 荷载模式及计算方式汇总表

荷载类型	荷载编号	荷载名称	计算方式	备注
永久荷载	(1)	结构自重	根据图纸构件重量计算	可程序自动计入
	(2)	附属构造	考虑光缆套管、管道支座、栏杆及人行走道自重。	
	(3)	输送介质自重	\	
	(4)	试压水重	按管道单独试压考虑	
	(5)	检修通道荷载	检修荷载 2.0 kN/m <sup>2</sup>	
可变荷载	(6)	温度效应	取整体升降温 25°计算	
	(7)	风荷载	《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 60-01-2004)	
偶然荷载	(8)	偶然荷载	仅考虑地震作用	

### 4.2. 计算工况及荷载组合

计算工况及荷载组合方式如表 2 所示。

Table 2. Calculation of working conditions and load combination tables

表 2. 计算工况及荷载组合表

序号	计算工况	荷载名称	荷载组合	备注
1	施工工况	试压状态	(1) + (2) + (3) + 0.5 × (5) + (6) + 0.5 × (7)	
2	成桥平衡工况	成桥组合	(1) + (2) + (3)	系数均取为 1
3		组合 1	(1) + (2) + (3) + (5) + (6)	检修道为主力活载
4		组合 2	(1) + (2) + (3) + (6) + (7)	风荷载为主力活载
5	运营工况	组合 3	(1) + (2) + (• 3) + (5) × 0.5 + (6) + (7) × 0.5	检修荷载、风荷载组合
6		偶然工况	地震组合	(1) + (2) + (3) + (8)

### 4.3. 荷载施加

主缆的破断力按锚固装置垫板的法向荷载施加[9]，其左侧和右侧荷载计算值及施加方式见图 4，其荷载为某悬索跨越根据上述计算方式和荷载工况组合计算的数值，以此作为实例进行荷载施加说明。

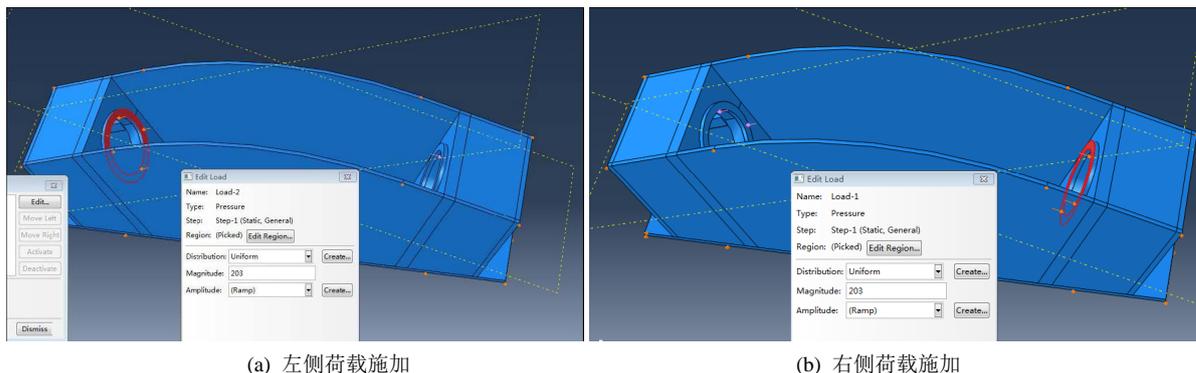


Figure 4. Main cable load applied (N/mm<sup>2</sup>)  
图 4. 主缆荷载施加(N/mm<sup>2</sup>)

## 5. 计算结果及分析

### 5.1. Mises 应力云图分析

根据有限元模型的计算条件和荷载情况进行分析，Mises 等效应力准则即第四强度理论[10] [11] [12] [13]，根据能量守恒原理，可用于判断材料是否产生屈服，一般用于材料对疲劳、破坏进行评价，因此，将 Mises 等效效力作为判断锚固装置安全性是否达到设计要求的主要依据。

实例中模型的 Mises 和剖面 Mises 应力云图如图 5、图 6 所示。从图中可以看出，当逐渐增加主缆拉力，主缆达到其破断力时，锚固装置两边弧形纵向连接板及中间纵向连接板的端部锚固位置处的应力最大，根据模型输出结果，最大等效应力为 353.4 MPa。

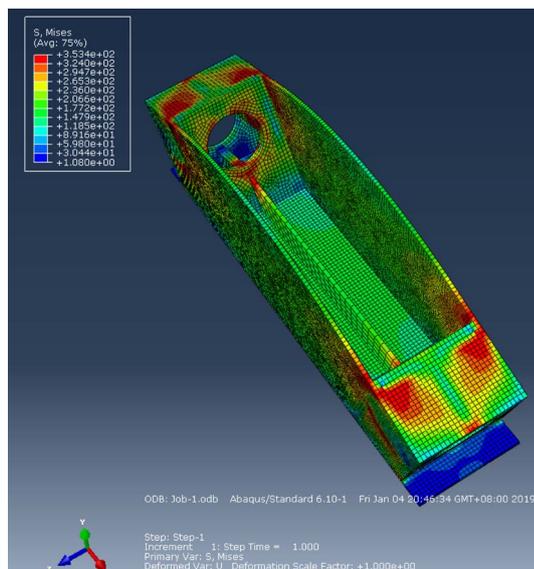


Figure 5. Mises stress cloud map  
图 5. Mises 应力云图

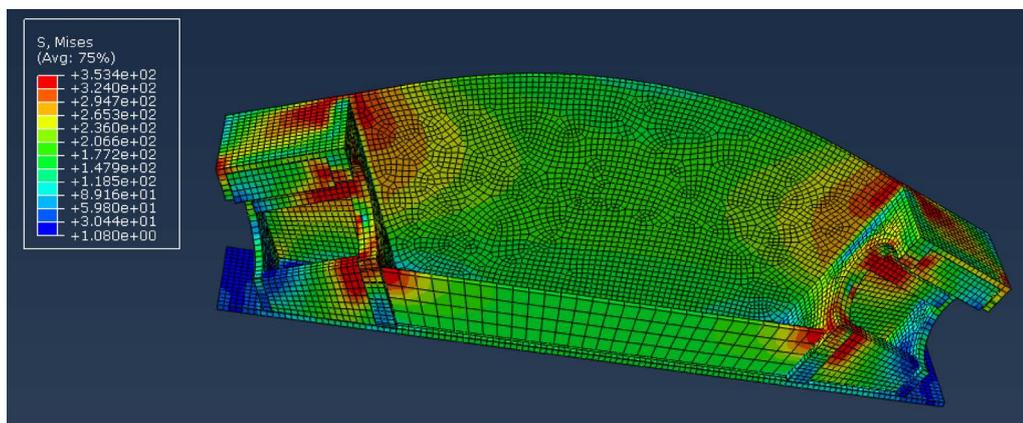


Figure 6. Profile Mises stress cloud  
图 6. 剖面 Mises 应力云图

## 5.2. 应力应变关系

实例中锚固装置所用钢材材质均为 Q345C, 其弹性模量为  $206 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ , 屈服强度标准值取为  $345 \text{ N/mm}^2$ . 极限强度取为  $470 \text{ N/mm}^2$ , 极限应变为 0.2. 在工程实际应用中, 将应力应变关系按两折线考虑, 如图 7 所示. 锚固装置最大等效应力  $353.4 \text{ MPa}$  超出材料屈服强度标准值, 但远小于极限屈服强度, 与 Mises 应力云图中产生红色区域相符合. 因此, 可以判断钢结构设计选材较为合理, 能够满足现实环境情况, 考虑到结构的使用及耐久寿命, 使结构更为安全时, 钢材表面的防腐涂装也应是设计考虑的重点.

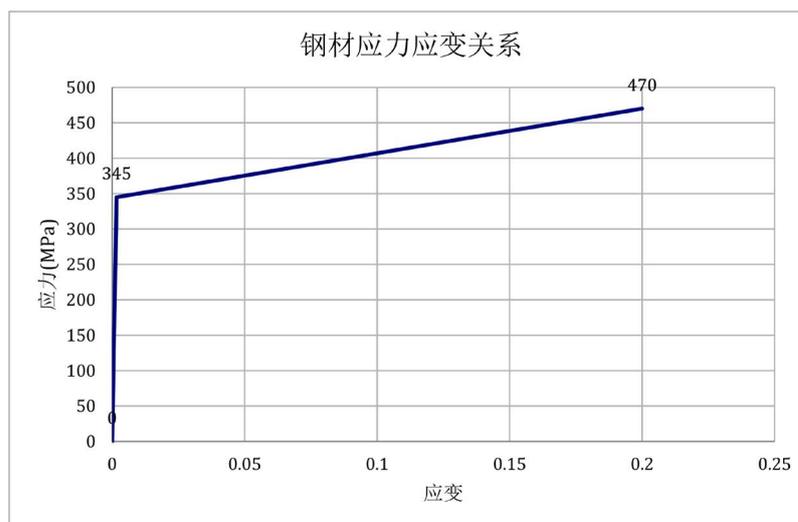


Figure 7. Relationship between stress and strain of steel  
图 7. 钢材应力应变关系图

## 6. 结论

在大中型长输油气管道悬索跨越设计中, 单侧设置双主缆的新型结构, 可灵活多变的满足现场地形状况和场地条件, 具有明显的优势和推广价值. 主缆-主塔锚固装置的设计可彻底解决主跨和边跨主缆锚固和连接问题, 其与塔顶的焊接连接方式, 也能够一定程度上解决单独索鞍存在的滑移问题[14], 同时还可以满足悬索桥主塔两侧主缆不同索力的使用需求.

采用大型通用有限元软件对锚固装置进行仿真模拟分析,在设计模型参数和荷载计算时,从模型可靠性、加载可行性以及计算有效性进行考虑,结果表明:当主缆达到其破断力时,锚固装置两边弧形纵向连接板及中间纵向连接板的端部锚固位置处的应力最大,但小于选材的极限屈服强度,锚固装置的设计结构合理,安全性能能够达到使用要求。根据最大应力出现的位置分析,应重点加强锚固装置与主缆连接处的挡板及纵向连接板的截面选型以及焊接连接质量。同时考虑到结构的使用及耐久寿命,使结构更为安全时,钢材表面的防腐涂装也应是设计考虑的重点。

## 参考文献

- [1] 蔡伟民. 乌江管道悬索桥施工控制研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [2] 张勤, 詹胜文. 中贵管道乌江悬索跨越主缆的施工控制[J]. 油气储运, 2016, 35(6): 657-662.
- [3] 王学军. 预应力技术在中缅天然气管道跨越施工中的应用[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 113-117.
- [4] 高河东, 祁志江, 任金玲, 等. 川气东送管道野三河跨越方案比选与实施[J]. 油气储运, 2011, 30(6): 445-448.
- [5] 陈利琼, 刘洋, 吴世娟, 等. 澜沧江跨越管道的落实冲击影响与防护[J]. 天然气工业, 2019, 39(1): 125-130.
- [6] 周学深, 杨泽亮, 韩鹏. 天然气长输管道通过高填方规划道路区的整治设计[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 118-122.
- [7] 曹水亮, 石秀山. 基于 ABAQUS 的蒸汽管道应力分析[J]. 管道技术与设备, 2017(2): 7-9.
- [8] 王光明, 萧岩. 汽车荷载对管道的作用标准值计算分析[J]. 特种结构, 2007, 24(3): 45-48.
- [9] 郑聪, 马保松. 基于 ABAQUS 的顶管施工中钢管稳定性分析[J]. 给水排水, 2016, 42(4): 99-103.
- [10] 陈锦裕, 王佳, 曾多. PE80 聚乙烯管道焊接接头的应力松弛模型验证及安全评价[J]. 中国塑料, 2018, 32(6): 112-118.
- [11] 杨海军, 张爱林. 基于 Von Mises 应力的预应力钢结构拓扑优化设计[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(4): 475-481.
- [12] 金奕山, 李琳. 随机振动载荷作用下结构 Von Mises 应力过程的研究[J]. 应用力学学报, 2004, 21(3): 13-16.
- [13] 罗文波, 罗中华, 彭炎荣. Mises 准则的圆形屈服轨迹及其在板料成形中的应用[J]. 锻压技术, 1999, 24(6): 23-27.
- [14] 罗旗帜, 彭爱勤, 陈玉骥. 石湾特大桥矮塔索鞍区局部应力分析[J]. 佛山科学技术学报(自然科学版), 2010, 28(6): 13-17.