



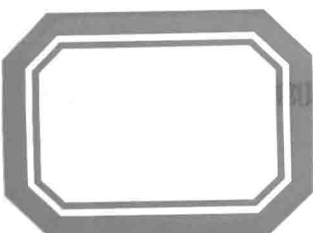
青年科技创新人才学术文库

典型油气管道跨越结构和节点力学性能与设计

DIANXING YOUQI GUANDAO KUAYUE JIEGOU
HE JIEDIAN LIXUE XINGNENG YU SHEJI

陈 誉 银永明 著

 郑州大学出版社

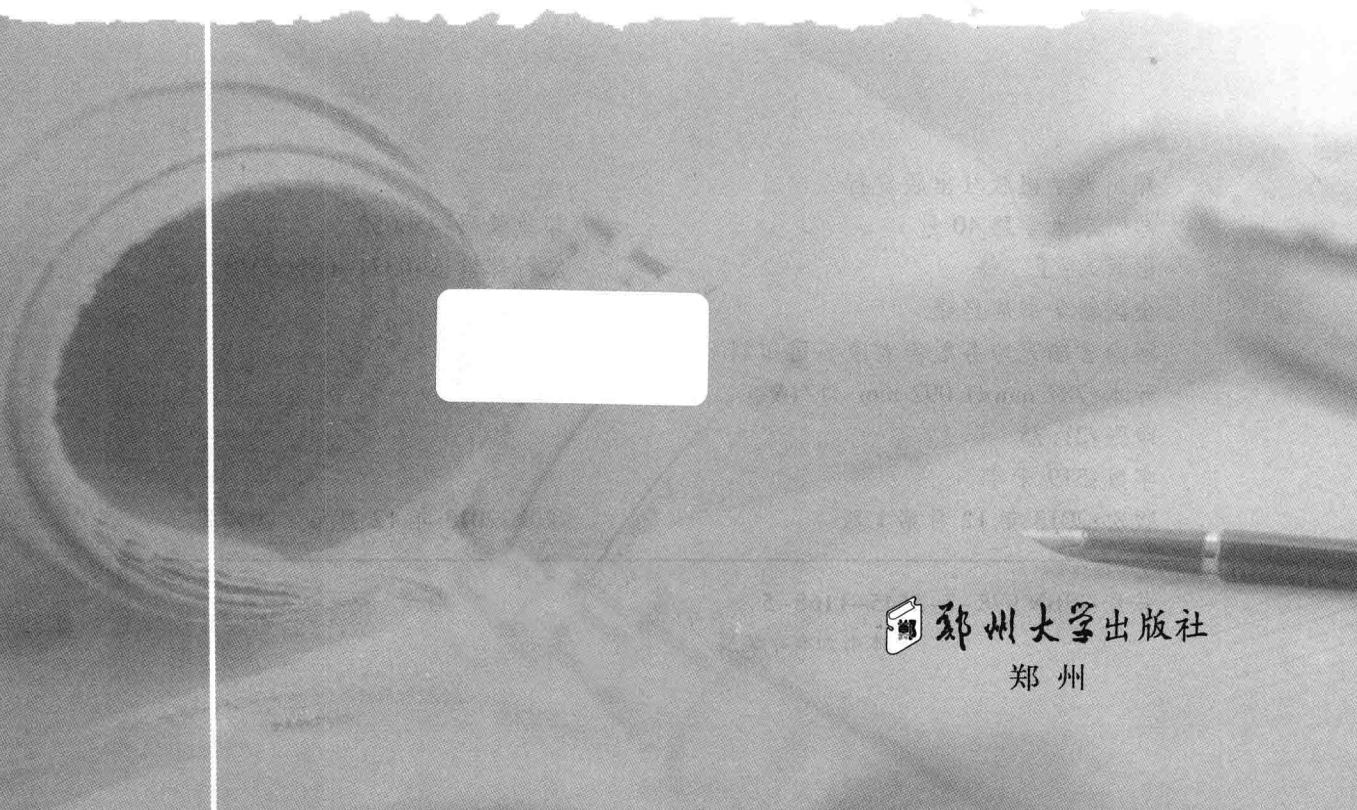


新人才学术文库

典型油气管道跨越结构和节点力学性能与设计

DIANXING YOUQI GUANDAO KUAYUE JIEGOU
HE JIEDIAN LIXUE XINGNENG YU SHEJI

陈 誉 银永明 著



 郑州大学出版社
郑 州

图书在版编目(CIP)数据

典型油气管道跨越结构和节点力学性能与设计/陈誉,银永明著. —郑州:郑州大学出版社,2013.12

ISBN 978-7-5645-1168-5

I. ①典… II. ①陈… ②银… III. ①石油管道-管道跨越-结构-力学性能-研究
②石油管道-管道跨越-节点-力学性能-研究③天然气管道-管道跨越-结构-力学性能-研究
④天然气管道-管道跨越-节点-力学性能-研究 IV. ①TE973.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第273132号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路40号

出版人:王 锋

全国新华书店经销

河南省瑞光印务股份有限公司印制

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:21.75

字数:519千字

版次:2013年12月第1版

邮政编码:450052

发行部电话:0371-66966070

印次:2013年12月第1次印刷

书号:ISBN 978-7-5645-1168-5

定价:40.00元

本书如有印装质量问题,由本社负责调换



作者简介



陈誉,男,1978年4月出生,汉族,湖北省公安县人。1998年7月毕业于长江大学城市建设学院并获得工民建专业学士学位;2001年7月毕业于武汉理工大学土木工程与建筑学院并获得结构工程专业硕士学位;2006年4月毕业于同济大学土木工程学院并获得结构工程专业博士学位。现为华侨大学土木工程学院副教授、硕士研究生导师。现任厦门市建设工程评标专家,浙江省自然科学基金同行评议专家。获得两项国家自然科学基金、三项福建省自然科学基金以及两项大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室基金项目资助。作为第一作者在《土木工程学报》、《建筑结构学报》和《工程力学》等一级学报发表有关学术论文20余篇。主要研究领域包括钢结构理论及设计、钢-混凝土组合结构、结构数值模拟技术。



前 言

在油气管道运输过程中,当管道跨越铁路、公路、河流和山谷等障碍物时,经常采用空间跨越结构敷设管道。跨越结构是一种应用较广的特殊结构,在设计上自成体系,具有其特殊性。随着我国油气管道运输的迅速发展,跨越结构也得到了广泛的应用。悬索跨越和桁架跨越是近年来发展较快的油气管道跨越结构形式。由于悬索跨越和桁架跨越结构在结构柔度、荷载作用位置、荷载类型以及截面类型等方面存在许多不同于桥梁和屋盖结构的特性,故急需建立其结构设计和计算方法,以供工程应用。

本书作者长期从事油气管道跨越结构和节点力学性能的理论 and 设计方法研究。有关研究曾获得两项国家自然科学基金、三项福建省自然科学基金以及两项大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室基金项目资助。作者在《土木工程学报》、《建筑结构学报》和《工程力学》等国内外权威学术期刊上发表相关论文 20 余篇,其中 16 篇被 EI 检索。

本书系统地评述了油气管道跨越结构和节点的发展,采用试验和有限元方法系统地研究了悬索跨越和桁架跨越结构以及节点的力学性能,提出了两种跨越结构和多种节点形式的实用设计方法。

全书共 7 章,分别为:绪论、油气管道悬索跨越结构整体力学性能、油气管道桁架跨越结构整体力学性能、大偏心 N 型圆钢管节点静力性能研究、圆钢管混凝土桁架节点力学性能研究、主圆支方桁架节点力学性能研究、结论与展望。本书第 1 章由银永明教授级高级工程师撰写,第 2 章到第 7 章由陈誉副教授撰写。

本研究工作得到国家自然科学基金项目的资助,如:弯曲弦杆的钢管混凝土相贯节点静动力性能与设计方法研究(项目编号:51278209);钢管混凝土桁架节点力学性能与设计方法研究(项目编号:51008133)。另外也得到福建省自然科学基金项目的资助,如:大偏心圆钢管桁架节点受力性能研究(项目编号:2012J01219)。参加这些研究工作的有唐菊梅、张钻湖、刘飞飞、林智寰、高胜伟、吴颖、魏琳等。

同济大学博士研究生导师陈以一教授给予了我热情关怀和悉心指导,中国石化集团中原油田设计院院长郭晓明教授级高级工程师也给予了我亲切关怀和大力支持,借此机会对陈教授和郭院长表示由衷的敬意和感谢。同时还要感谢华侨大学力学与工程结构实验中心诸位同仁的帮助。感谢华侨大学土木学院领导、科研处、研究生部和各位老师的热情关怀与支持。

油气管道跨越结构和节点力学性能与设计是一个新的研究领域,内容丰富,需要进一步研究的问题很多,希望本书的出版能起到抛砖引玉的作用。书中如有错误和不当之处,敬请读者指正。

陈誉于华侨大学

2012. 10



目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	4
1.3 研究任务	9
第 2 章 油气管道悬索跨越结构整体力学性能	12
2.1 引言	12
2.2 悬索跨越基本理论	13
2.3 悬索跨越非线性有限元静力分析	17
2.4 模态分析	40
2.5 风荷载的静力等效计算	46
2.6 管道悬索跨越清管球荷载下的有限元分析	51
2.7 管道悬索跨越地震时程分析	57
2.8 安全性能评估	69
2.9 本章小结	73
第 3 章 油气管道桁架跨越结构整体力学性能	77
3.1 引言	77
3.2 试验方案	80
3.3 试验现象与破坏模式	90
3.4 试验结果	98
3.5 试验结果分析	129
3.6 有限元分析	131
3.7 桁架跨越图集	145
3.8 本章小结	155
第 4 章 大偏心 N 型圆钢管节点静力性能研究	157
4.1 引言	157
4.2 直腹杆受压大偏心 N 型圆钢管节点静力性能试验	

研究	159
4.3 直腹杆受拉大偏心 N 型圆钢管节点静力性能试验 研究	174
4.4 节点有限元分析	189
4.5 大偏心 N 型圆钢管节点极限承载力计算公式	202
4.6 本章小结	212
第 5 章 圆钢管混凝土桁架节点力学性能研究	216
5.1 引言	216
5.2 平面 X 型圆钢管混凝土节点受压性能试验研究	218
5.3 平面 X 型圆钢管混凝土节点平面内受弯性能试验 研究	243
5.4 平面 X 型圆钢管混凝土节点平面外受弯性能试验 研究	267
5.5 平面 X 型圆钢管混凝土节点受压极限承载力计算 公式	286
5.6 本章小结	289
第 6 章 主圆支方桁架节点力学性能研究	293
6.1 引言	293
6.2 平面 K 型圆主管方支管节点极限承载力试验研究	296
6.3 节点极限承载力有限元适应性分析	308
6.4 平面 K 型圆主管方支管节点极限承载力参数研究	319
6.5 平面 K 型圆主管方支管节点有限元分析	323
6.6 平面 K 型圆主管方支管节点极限承载力计算公式	332
6.7 本章小结	335
第 7 章 结论与展望	339
7.1 结论	339
7.2 建议与展望	340

第1章

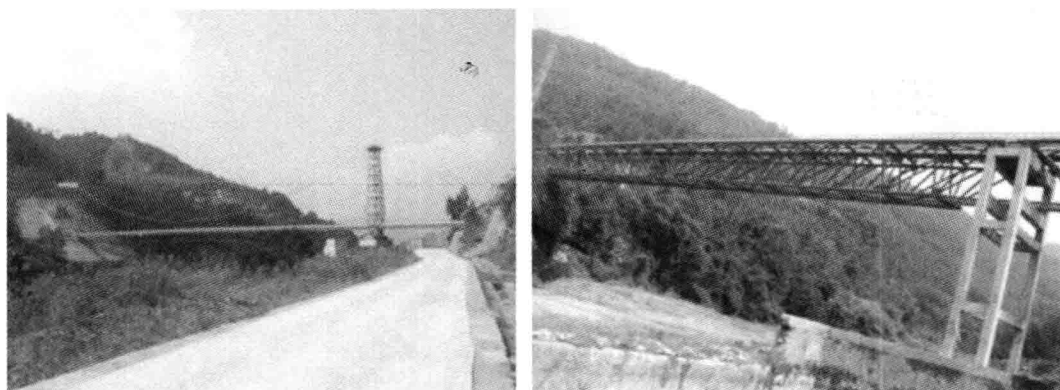
绪 论

1.1 研究背景

作为世界主要能源的石油和天然气在 20 世纪得到了广泛的开发和利用,极大地推动了社会生产力的发展。石油、天然气产品从生产地到消费区主要以管道输送为主。管道运输由于具有连续性强、运输量大,以及适应性强、建设周期短、资金回收快、永久性占地少等一系列优点,因而决定了它在铁路运输、公路运输、水路运输、航空运输及管道运输方式中的重要地位。目前,世界上油气管道运输发展很快,油气干线管道敷设已超过 150 万千米,并以每年平均 3 万千米的建设速度继续发展。美国拥有油气管道 70 多万千米,苏联和加拿大也都拥有数十万千米的油气输送管线。自 1958 年我国建成第一条长距离输送原油管道克拉玛依—独山子输油管道(管径 150 mm,长度 147 km)开始,目前我国已拥有油气长输管道 4 万多千米。我国投资额最大的输气管道工程是西气东输工程,该工程将塔里木盆地的天然气送往豫皖苏浙沪地区,沿线经过新疆、甘肃、宁夏、陕西、山西、河南、安徽、江苏、上海、浙江 10 个省区市,全程 4 176 千米,现已投产使用。近年来,我国天然气勘探在塔里木、鄂尔多斯和四川盆地以及东海、南海等海域取得重大突破,天然气输送管道陕京线、西气东输、陕京二线和忠武线等陆续投入使用,天然气可源源不断输送到华北、华中和华东经济发达地区。我国在建和将建成的管道有中亚天然气管道、中缅油气管道,西气东输二线、三线、四线,川气东送,中俄原油管道,海气登陆,LNG 干线管道,同时构筑沿海天然气管网,扩展和完善珠三角、长三角、环渤海等发达地区的天然气管网。规划中的成品油管道将覆盖东北、西北、华北、中南、鲁西等地区,形成北油南调、西油东送。根据规划,2008~2010 年三年我国将建原油管道 9 000 千米,成品油管道 3 000 千米,天然气管道 3 万千米。按照积极的方案考虑,到 2015 年,我国油气管道将接近 20 万千米。未来 10 年,我国将新建成 10 000~15 000 千米的成品油管道,输送能力将达 9 400 万吨/年。

目前常采用的跨越结构形式包括梁式跨越、桁架式跨越、悬索、斜拉索以及组合式跨越等,其中悬索跨越和桁架跨越两种结构形式是近年得到较快发展的新技术,如图 1.1(a)和 1.1(b)。对于中等跨越工程采用桁架跨越比较经济;而对于大型跨越工程,悬索跨越结构能够跨越的长度很大,且比较经济并易于实现,是目前较多采用的跨越形式之一。跨越结构在长输管道中具有相当重要的地位,衔接一旦发生事故,不仅中断油气供

应,影响油田的继续开采和油厂的原油供应,而且还会严重污染环境,造成重大的经济损失和严重的社会影响。



(a)管道悬索跨越

(b)管道桁架跨越

图 1.1 管道跨越结构实例

1.1.1 管道悬索跨越结构

自 1926 年美国在红河建起第一座管道悬索跨越结构以来,世界各地已建成许多此类跨越工程。近年来,我国在黄河、长江等河流上建起多座管道悬索跨越结构。陕甘宁至北京输气管道黄河跨越工程,塔高 44 m,两塔中心距 270 m,采用悬索跨越结构。由两根直径 68 mm 主索、两根直径 52 mm 风索以及斜拉索构成空间受力体系。弦杆道为 $\phi 660 \text{ mm} \times 14.3 \text{ mm}$,是国内长输管道建设史上首次跨越黄河的管道工程。川气东送管道工程中的野三河悬索桥跨越野三河河谷,全长 332 m,主孔跨径为 240 m。该桥完工后,将在桥面铺设直径为 1 016 mm 的输气管道。忠武输气管道干线根据渝东及鄂西山区的地形特点,通过比选确定木龙河、马水河、蚂蝗溪、野三河跨越采用大、中型悬索跨越结构;大溪沟、黄水湖 1 号和黄水湖 2 号跨越采用桁架跨越结构,其中最大跨度为 195 m,最小跨度为 55 m。

在设计管道悬索跨越结构时,一般可以借鉴悬索桥成功的设计经验。但在此种结构中,由于管道为承力结构,柔性很大,和悬索桥设计又有很大区别。因此必须采用非线性、大挠度理论计算管道悬索跨越结构的变形和内力。

伴随石油、天然气工业的快速发展,我国近年来建造了多项管道悬索跨越结构工程,尽管管道悬索跨越结构与悬索桥梁结构有某些相似之处,但管道悬索跨越结构在以下几方面有着自身的特点:①自重轻。多数管道悬索跨越都仅有一条主管道(直径在 660 ~ 1 200 mm),因此自重荷载较悬索公路、铁路桥要轻得多。②结构刚度差。管道悬索跨越结构属于柔性结构。跨度大时,其自振周期一般都较长(可以长达 10 s 以上)。③抵抗风荷载能力差。与悬索桥梁比较,虽然管道跨越结构迎风面积小,单位长度上受到的风力较小,但是因为其水平横向没有足够的刚度,所以,管道跨越结构一般都采用加抗风索来

抵抗风荷载的作用。而悬索桥梁是通过风洞试验取得设计所需数据,据此采用桁架式钢梁来抵抗风荷载的作用。④承受的竖向活荷载不同。悬索桥承受着汽车、火车等带来的活荷载,而管道悬索结构承受着管道内介质所形成的活荷载。

鉴于上述结构及使用情况的不同,管道悬索跨越结构与悬索桥梁相比在结构的构造、设计理论、材料选用、构件连接方式以及结构所发生破坏形式等方面都不尽相同。

1.1.2 桁架跨越结构

桁架跨越结构形式现已广泛应用于一些中等跨越结构中。桁架结构有如下特点:①桁架截面形式为三角形和矩形两种,根据需要截面宽度和高度可大可小,能满足管道布置的要求;②材料全为钢管,受力合理,抗腐蚀性能和耐久性能均好,便于防腐维护,用钢量也少,而且可用比较便宜的焊接钢管;③可以做成比较大的跨度;④建筑造型比较新颖美观。

虽然管道桁架结构与传统的屋盖桁架结构存在许多相似之处,但是管道桁架跨越结构也有以下几方面自身的特点:①结构柔度大。管道结构一般都是单榀桁架作用,而屋盖桁架结构是多榀桁架通过屋面支撑体系来共同工作的。②荷载作用位置不同。管道桁架结构中管道可以布置在上弦、下弦或者腹杆中,位置比较灵活,而屋盖桁架结构中屋盖荷载全部作用在上弦节点或者上弦节间。③承受的竖向活荷载不同。传统的屋盖桁架结构承受着屋面活荷载、雪荷载等,而管道跨越结构承受着管道内介质所形成的活荷载。④桁架截面形式。管道跨越结构截面可以有三角形、矩形和梯形,而屋盖桁架结构只有三角形和梯形两种。⑤杆件截面形式。管道跨越结构杆件截面可以有方形、圆形和工字钢形式,而屋盖桁架结构中方形和圆形是比较常用的类型。

目前管道跨越桁架结构设计方法均借鉴屋盖桁架结构的设计思路和方法,由于在结构柔度、荷载作用位置、荷载类型以及截面类型等方面的不同点,使得对管道桁架跨越结构受力性能的分析方法,以及可供工程应用的管道桁架跨越结构的设计方法的建立,成为目前需要尽快解决的课题。

油气输送管道工程在现代化工业生产和人民生活中占有重要位置,是现代工业和社会经济的大动脉,属重要生命线工程之一。地震灾害表明,地震不仅可能直接破坏输油气管道工程,还往往造成火灾、爆炸等次生灾害,经济损失和人员伤亡相当严重。管道一旦发生破坏,不仅会引起巨大的经济损失,也将破坏生态,对当地环境造成严重的污染。我国属于地震多发国家,地震带分布很广,长输管道不可避免会在地震多发区域建设。为减轻地震对管道工程的破坏,提高其防灾可靠度,确保工程安全,开展管道跨越结构抗震能力的研究十分必要。

中华人民共和国石油天然气行业标准《原油和天然气输送管道穿跨越工程设计规范》和国家标准《油气输送管道跨越工程设计规范》是我国现行的关于悬索跨越结构设计方面的技术规范。在两规范中,对管道悬索跨越结构和桁架结构均规定了荷载取值、材料选用标准、地基基础设计、防腐保温设计以及施工技术要求。但是这两个规范并没有列出悬索跨越结构和桁架跨越结构的具体计算和设计方法。

典型油气管道跨越结构和节点力学性能与设计
.....
4

1.2 国内外研究现状

管道悬索跨越结构具有受力明确、能实现大跨度、抗震性能好等特点,因此得到较为广泛的应用。与悬索桥梁结构相似,管道悬索跨越结构主要由塔架及基础、主索(大缆)、斜拉索、抗风索(消振索)、吊索、索夹及桥面板等组成。管道本身既是作用在结构体系中的荷载,也是受力构件之一,参与结构共同工作。塔架用来固定主索。吊索上端通过索夹固定在主索上,下端与桥面板连接,管道采用紧箍套固定在桥面板上。斜拉索主要用来平衡主索作用于塔架的水平力。结构的水平横向风荷载一般通过设置在两侧的抗风索来承受。

塔架一般采用钢结构或钢筋混凝土结构。主索、斜拉索一般采用平行钢丝式或者桥梁专用的成品斜拉桥热聚乙烯拉索。2007 年以前,悬索跨越施工中主要采用钢丝绳作为缆索,存在承重能力差、索头加工困难、现场索头浇注合金比较困难等特点,并且质量难以保证,从普光实施的跨越工程看,现有悬索跨越结构主索已经逐步采用热聚乙烯拉索,此种缆索(含索头、锚杯等)均在工厂进行,主要将多股 5 mm 的钢丝通过专用设备拧结成股而成,外防腐采用外套 PE 结构,使其具有更好的承载能力和抗腐蚀能力,同时索头采用锚杯结构,现场仅通过如同紧固螺母形式的方式就完成安装,索头仅需利用涂抹黄油的方式进行保护,不需另行进行合金浇注的复杂工艺,给悬索施工带来较大的便利。吊索是在吊点处由主索通过绕索夹而下垂的钢丝绳。索夹由铸钢制造,由竖向缝分成两半。安装时用高强螺杆将两半拉紧,使索夹内壁对主索产生压力,利用摩擦力防止索夹沿主索向低处滑动。

2003 年西南石油学院许萍以大中型斜拉索管道跨越结构为研究对象,将输送管道视为连续弹性梁,考虑清管时积液在边跨中满管流动引起的涡合振动,建立了斜拉索管道跨越结构的有限元分析模型。使用 ANSYS 分析软件编写了计算程序,通过对有限元模型进行分析计算,得出在各种清管工况条件下,当清管器及积液通过管道跨越结构时,管道振动的位移及应力等数据;然后应用相关规范的强度理论对管道及斜拉索进行强度校核,得出在一定的清管速度下,管道与斜拉索强度安全范围内的最大允许积液长度,及在此极限状态下跨越结构的最大振动位移。2003 年大庆石油学院滕振超以悬索跨越管道为研究对象,得出了适用于悬索跨越管道的计算模型及其动特性的计算方法。利用 ANSYS 有限元分析软件,建立了悬索跨越管道的数值计算模型,对悬索跨越管道的动特性进行了分析,得到了悬索跨越管道的自振频率和振型,并分析了与理论计算结果间误差产生的原因,从而证明了 ANSYS 有限元数值仿真计算的正确性。通过地震波的输入,对该跨越管道在不同地震烈度、不同场地下的地震响应进行了分析,得到了悬索跨越管道在各种不同情况下的地震动响应,为基于跨越管道基于地震损伤性能的抗震设计提供了理论依据。确立了跨越管道的地震损伤模型,初步给出了跨越管道基于地震损伤性能的抗震设计方法。

2005 年中国地震局工程力学研究所王金国围绕长输油气管道悬索跨越工程的抗震能力和健康诊断技术,利用理论分析、模型实验和数值模拟手段进行了较为系统的研究。

在总结震害经验和分析受力特点的基础上,概括归纳了该类结构的三种基本损伤模式。提出了基于模式识别的多级整体健康诊断方法,建立并验证了健康诊断的神经网络模型。此外,还建议了基于简单缆索受力监测的局部诊断方法,该方法可与整体诊断方法结合使用,判断结构系统的损伤模式、损伤位置和损伤程度。2006年西南石油大学郭咏梅根据ANSYS有限元软件仿真分析结果,较合理地确定了构件的失效准则,结合力学分析建立了斜拉索管道跨越结构构件可靠度功能函数,修正了有关文献中部分参数取值以及构件可靠度计算的功能函数;利用蒙特卡罗方法和Matlab仿真软件对斜拉索管道跨越结构可靠度进行了随机模拟与结果分析,针对蒙特卡罗方法在分析多变量、高次非线性复杂问题中的局限性,提出了一种有效的改进方法——基于最优化原理的蒙特卡罗方法。因可靠度计算指标普遍大于规范规定的Ⅰ级可靠度指标,为使结构基本变量更加合理,采用正交试验方法对参数进行了优选,在没有任何试验数据和试验非常困难的情况下,该方法对于分析解决类似工程问题具有一定的理论参考价值。

2007年北京化工大学王恩青在国内外有关研究成果的基础上,以八盘峡悬索式管桥为工程背景,利用ANSYS结构分析程序,采用反应谱法对八盘峡悬索式管桥进行了地震反应分析,得到了该桥的地震反应规律。以此为基础,针对该悬索桥的特点,选择了合适的标准反应谱曲线和阻尼修正公式,并根据所求得的阻尼比对反应谱曲线进行了阻尼影响的修正。然后分别沿八盘峡悬索式管桥的纵向、横向、竖向以及考虑多维地震动输入,输入修正后的反应谱曲线,对该悬索式管桥进行了地震反应谱响应分析,同时还分析了反应谱曲线阻尼影响的修正与否对大跨度悬索桥地震反应谱响应的影响,并得出了相应的结论。2007年大庆石油学院张峰围绕管道悬索式跨越工程的计算方法分析,利用理论研究、模型实验、现场实验和数值模拟手段进行研究。在总结以往经验和分析结构受力特点的基础上,归纳了该类结构的计算方法,提出了基于仿真分析和现场动力试验数据分析基础上的计算公式。此外,还编制并验证了基于计算公式的程序。程序可与有限元仿真分析结合使用,为工程设计提供计算成果。2007年大庆石油学院王向楠针对所建立的跨越管道新型支撑结构体系,采用理论分析和数值模拟手段进行了较为系统的研究。建立了新型跨越结构的数值仿真模型,并对跨越管道新型支撑结构进行了静力、动特性、抗风及抗震分析,提出了新型支撑结构体系的设计方法。

从收集到的资料来看,至今目前关于悬索跨越结构主要是横担作为桥面板,管道本身既是作用在结构体系中的荷载,也是受力构件之一,参与结构共同工作。这种结构体型结构整体刚度比较小,地震反应比较小,用钢量也比较小,但是在风荷载作用下的响应比较大,这在一定程度上限制了这种跨越形式的应用。

大型管道跨越中,悬索跨越比斜拉索跨越更常用。利用管道本身作为跨越结构体系组成部分,一方面不便于检修,另一方面对管道本身强度提出了更高的要求。研究新的管道跨越结构体系,对旧有的结构体系进行革新,弥补旧有跨越结构体系的不足之处,也是必要的。利用网架作为加劲梁支撑管道,改善了管道的受力性能,管道钢材单位成本下降、管径减小,管道的投资大大降低。目前,悬索式跨越及将管道独立于跨越结构是一种发展趋势。设计和施工应尽量避免管道承受外力引起的纵向应力。大型河流跨越管段是管道的薄弱环节,设置专门的管桥是必要的及安全的。

典型油气管道跨越结构和节点力学性能与设计
.....
6

悬索桥是以主缆为主要承重构件的索梁组合体系,在受力本质上属于柔性索悬挂体系。悬索桥结构分析理论的发展,经历了由连续化到离散化的过程。连续化理论包括弹性理论和挠度理论。离散化理论是随着计算机的发展而逐渐发展起来的,包括作为离散参数方法的非线性离散吊杆理论和非线性有限元理论。由于弹性理论、挠度理论和非线性离散吊杆理论都采用了不同程度的假定,使得这些理论都存在计算误差并有一定的适用范围。非线性有限元理论是将悬索桥当作非线性平面框架结构,按非线性杆系有限元方法求严密解的理论。这一理论除假定材料符合胡克定律之外,无任何其他假定,且可以考虑结构在细节上的变化,所以非线性有限元理论是悬索桥所有的结构分析理论中最精确的。目前,在应用非线性杆系有限元法对悬索桥进行受力分析时,对主缆和吊杆的模拟存在着使用杆单元和索单元两种单元模式。为了简化悬索桥的分析,可采用杆单元代替索单元并用 Ernest 公式修正弹性模量以考虑主缆的垂度效应的近似方法来分析悬索桥的受力行为。

20 世纪美国长大桥时代的领袖人物斯坦因曼,分别于 1929 年和 1934 年提出了运用挠度理论,利用悬挂加劲梁与张拉梁的相似性,对桥梁进行分析设计的典型方法。在 20 世纪 40 年代,对悬索桥进行设计分析都是采用传统的手工计算方法,运用悬索桥挠度理论与弹性理论,那时挠度理论与弹性理论的实用分析计算已相当成熟,在特定的假定设计条件下,对悬索桥进行简化计算,把悬索桥的结构简化为梁和杆,把拉索离散为多段的空间杆单元,将塔和桥墩均简化为空间梁单元,所得到的计算结果往往存在较大误差。难以对悬索跨越结构的非线性大变形特性进行模拟,其设计的成功率主要取决于设计者的经验及安全系数的提高,不利于结构形式的优化。但自从 1926 年美国在红河建起第一座悬索管道跨越结构以来,在国外许多国家都采用此方法建成了许多具有代表性的悬索桥,并使该理论得到了不断的发展。1965 年铁木辛柯利用挠度理论,提出了桥梁分析的典型方法。1993 年彼得生和 1982 年罗宾与威格就对挠度理论的基本方程进行了进一步的推导,使设计者不通过有限元分析就能了解悬索桥的结构,以方便设计者进行初步设计和对复杂模型进行验证。

在 20 世纪 60 年代,国外开始研究依据有限位移理论的悬索桥非线性分析,发展了非线性离散吊杆理论和非线性有限元理论,并随着计算机的发展得到了发展。但非线性离散吊杆理论存在计算误差并有一定的适用范围。非线性有限元理论是将悬索桥当作非线性平面框架结构,按非线性杆系有限元方法求严密解的理论。到 20 世纪 70 年代末,非线性分析在理论上或是应用软件上都已发展得相当成熟。我国起步稍晚,在 20 世纪 80 年代中期,编制了按有限位移理论的分析软件,并在汕头、杨浦、虎门等悬索桥方案设计中应用 ADINA 程序,使桥梁的设计得到了大大的简化,并能对悬索桥的结构进行优化。

在 20 世纪 80 年代后的悬索桥的设计分析中,都采用了大型的有限元分析软件,根据悬索桥的结构特点,建立有限元分析模型。随着计算机技术和有限元数值方法的发展,出现了一些比较强大的有限元分析软件,使悬索桥结构的精确分析成为可能。悬索桥是一个空间结构,塔架、横担及管道采用三维梁单元离散。主索、吊杆和抗风索主要承受拉伸载荷,在建立有限元模型时,采用了单压或单拉的杆单元。管道与土壤的接触部分按弹性地基考虑,用弹簧单元模拟弹性基础。杆单元与梁单元的连接处用节点耦合方程将

其耦合起来。根据管桥的实际固定方式,对有限元模型施加约束,主索和抗风索的端部是用锚固墩固定,对其端部的所有自由度进行约束,管道的两端也采用固定端约束,塔架的底部用铰链约束。这种是比较常规的方法,人们仍在不断探索精确解析解的单元,对悬索桥进行精确的分析。例如同济大学罗喜恒、肖汝诚、项海帆等基于精确解析解的索单元,从理论上推导了空间索单元的平面外刚度系数,并通过坐标转换矩阵将空间索单元统一到平面索单元上,也可考虑在组合均布荷载作用下的索单元,对悬索桥拉索精确求解提出了一种较好的方法。

悬索桥挠度理论的应用已有 90 多年的经验,20 世纪 40 年代挠度理论的实用计算方法已相当成熟,至今仍是国内外许多教科书中所介绍的主要经典方法,随着有限元法的创立和计算机的应用,使得充分考虑几何非线性的迭代计算不再是一件困难的事,从 20 世纪 60 年代开始研究按有限位移理论的悬索桥非线性分析在理论上或是应用软件上都已发展得相当成熟,我国在 20 世纪 80 年代中编制了按有限位移理论的分析软件,应用 ADINA 程序是国内通用的非线性结构分析程序,虽不具备桥梁设计所要求的最不利加载功能,但作为检验精度的手段是可以的,在设计时往往发现采用不同程序计算同一结构会发生不同结果,其主要原因:由于非线性分析可采用不同解法和收敛技巧;理论上可能发生漏算或重复计算部分非线性因素造成错误。从而带来较大误差,所以按有限位移理论的空间非线性分析程序计算的同时,应通过与 ADINA 程序、模型实验和经典方法的结果进行对比,验证软件的正确性和精度是十分必要的。

在现代桥梁建设过程中,运用有限元法方法将结构简化成梁、杆单元体系,应用大型通用程序 ANSYS 对简化模型进行模态综合分析,并充分考虑主缆的重力刚度和结构的面内应力与面外刚度的耦合。大桥的建模可以为同类桥梁的动力分析提供有益的思路,寻找应用 ANSYS 分析桥梁结构的有效解决方案;同时也为实际的工程设计提供指导。利用 ANSYS 程序的耦合、初应力等功能可以有效模拟桥梁边界和初始条件,进而建立悬索桥三维有限元模型,为利用通用有限元程序分析悬索桥找到了一个可行方案。

随着科技和社会的发展,悬索桥的规模、功能、造型和相应的建造技术越来越大型化、复杂化和多样化。新材料、新设备、新结构和施工技术等日新月异并与悬索桥等建筑工程相结合。悬索桥正在成为高新技术的复合载体。所以,悬索桥等超大跨度桥梁的现代结构技术是一个国家建筑科学技术发展水平的重要标志之一。目前,该方面的发展趋势是向大跨度,造型美观等方面发展,对于管道方面来说,河流的穿越维修维护不方便,随着悬索设计的完善及施工方法的进步,河流峡谷的跨越将逐渐以桥梁为主。

在长输管道建设和运行中,清管是一项非常重要,同时也是非常有风险的作业。对于新建管道来说,施工作业遗留物较多,管道水压试验时遗留的水比较多,清管的主要目的是清除管道内的水以及施工遗留物。大中型管道悬索跨越结构是油气输送管道系统中的关键部位,呈现高次超静定、高柔性的结构特点,清管过程中形成的积液将在结构中产生强烈的冲击动载荷作用,破坏悬索结构的稳定性,因此管道悬索跨越结构在两岸塔架附近设置了补偿弯管,形成自由伸缩端,并在两岸边跨端部设有固定墩,以增加管道轴向刚度并控制挠度。为了保证悬索跨越结构的安全可靠,必须确定不同清管工况条件下管道悬索跨越结构的振动位移,以尽量避免悬索跨越结构因动载荷导致的破坏或失效,

典型油气管道跨越结构和节点力学性能与设计
.....
8

确保结构体系的安全。

通过定义载荷随时间变化的数组参数施加时间-历程载荷并进行求解,施加载荷后规定终止时间和积分时间步长就可以对动力响应进行求解分析。按照移动载荷-时间历程的特性,采用载荷步在悬索跨越结构上施加动载荷,从而实现清管动力特性的分析。

国内外对桁架稳定性的研究由来已久,有关平面桁架稳定性经典理论业已收入到结构力学的著作中。经典理论对桁架失稳的研究是建立在分支屈曲的基础上的,在不发生局部杆件失稳的前提下,如果结构存在两种不同的平衡路径,即结构在发生一定位移后达到了一种新的平衡,该临界点就认为是结构的临界荷载。孙焕纯教授等对这种经典的理论进行了讨论,指出其存在的问题,并进一步提出了采用屈曲理论计算桁架临界荷载的方法。屈曲理论认为,桁架的整体失稳是在小变形下突然发生的,失稳前杆件并不始终处于直线平衡状态,某些杆件已经发生了屈曲变形。桁架的整体失稳主要是由杆件屈曲失稳的累积、导致桁架形成机构造成的。如果从矩阵的角度来分析的话,前者主要问题在于计算过程中刚度矩阵完全采用的是初始弹性刚度矩阵,且没有考虑到塑性阶段,进行的是完全的线弹性分析即一阶弹性分析,后者考虑了几何和材料非线性,在计算中对刚度矩阵进行了修正,故实现了二阶弹塑性分析。

判断结构是否达到极限承载力状态,需要考虑二阶的弹塑性分析。在特定荷载组合下结构的二阶弹塑性分析,已经有各种软件可以采用;但在结构设计中达到实用化还有待时日。在对结构整体进行二阶弹塑性分析时,根据计算结果可以直接确定结构的稳定承载力;当采用二阶或一阶弹性分析时,则将结构稳定计算转化为单个杆件的稳定计算。

将结构体系的稳定计算转化为构件的稳定计算,是钢结构设计中采用的一种近似的计算方法。轴心受压杆或压弯构件的稳定计算公式以及计算时所需的计算长度系数,在钢结构设计规范和各种手册中都有规定。当采用二阶分析获得构件内力时,计算长度系数取为1。

结构体系中各个杆件因荷载不同,截面设计的不同。在同一种荷载组合工况下,按计算结果,有的杆件发生失稳,有的杆件并没有发生失稳。但是从结构的实际工作状态考虑,当杆件有失稳的趋势时,意味着其抗弯刚度下降,该杆件的负荷向其他杆件转移。所以对结构体系来说,其整体失稳是各个杆件都失稳的状态,利用单个杆件来复核体系的整体稳定,需要考虑杆件之间的相互影响,为此,单个杆件的计算长度系数必须考虑其受力的影响而给予调整,这样不同的工况下内力效应也并不相同,所以也需要针对不同工况分别进行调整。若取未经修正的计算长度系数进行设计,因为没有考虑共同作用中杆件的相互支持,相当于各杆件均按最不利工况设计,理论上说不通,但却取得偏于安全的结果,且比较简单。

由于钢管具有一些很突出的优点,桁架结构也越来越多地采用钢管作为杆件截面。国内外对钢管结构的研究起先都大量地集中在杆件的连接节点方面,早在二十世纪五十年代,美国就开始对圆管节点进行研究。由于影响钢管节点的因素多,节点的刚度和极限承载力较难描述,一直以来都有大量的专家学者对其工作原理进行探索研究。

随着钢管结构体系在工程中的大量应用,这些年来对钢管结构体系设计参数的研究

日趋增多。1985年哈尔滨建筑大学在吉林滑冰练习馆的工程中采用了方钢管做弦杆,圆钢管做腹杆的截面为三角形的空间管结构桁架体系,跨度达38 m的整个桁架体系的用钢量仅为 25 kg/m^2 。由于工期的关系当时没能对该种结构体系的性能 and 设计参数进行较为详细的研究,而是通过现场原型结构试验和个别节点模型试验来保证其可靠性的。为了深入研究其工作性能,寻求合理的设计参数,哈尔滨建筑大学和北京银河金属屋顶成型技术研究所成立了科研课题组,对该体系进行了详细的研究,得出了三角形截面宽高比、高跨比的经济取值范围,总结出该桁架体系稳定承载力的拟合公式。

张楠、罗尧治在《钢管结构若干关键技术的研究》一文中分析钢管桁架的平面外稳定性,主要运用有限元手段,考虑各几何参数对整体稳定的影响程度,利用特征值屈曲对钢管桁架的极限荷载进行大量的数值分析,分析其破坏模式,揭示了截面宽高比与破坏模式的联系。

目前对空间屋盖桁架结构的设计和研究已经比较成熟,由于与管道桁架结构具有不同的荷载性质、荷载作用方式以及变形控制等级,使得两种结构体系的设计方法有所不同。目前管道桁架跨越结构还是在借鉴屋盖桁架结构的设计方法,针对管道桁架跨越结构还没有提出比较完备的设计方法和设计流程。同时,各设计院还没有编制出标准的油气管道桁架结构通用图纸。

以往桁架跨越的截面形式有三角形和矩形截面,而且大都是用小角钢和钢筋构成的,也有的采用由角钢组成的两个平面桁架等,有的设计单位还编制了通用图。虽然这些桁架已经使用了很多年,但是它有以下几点不足:①桁架的主要材料是小角钢、小直径钢筋等,这种桁架腐蚀速度非常快,使用不到几年就成摇摇欲坠的形态,而且长期防腐蚀维护费用也比较高;②跨度较小,一些通用图绝大部分的最大跨度不超过18 m,这样的跨度有时不能满足管道跨度的要求;③截面宽度太小,对较多的管道就要放置两个或者两个以上的桁架,不经济。

同时,钢管结构也存在一些局限性:①因为钢管是通过钢板再加工而成的,所以钢管的生产成本比开口轧制型钢或焊接截面可能要大。②相贯节点弦杆方向尽量设计成钢管外径一致,对于不同内力的杆件采用相同钢管外径和不同壁厚,壁厚变化不宜太多,否则钢管间拼接量太大,因此,材料强度不能充分发挥,从而增加了用钢量。这就是钢管结构往往比用网架结构用钢量大的原因之一。③相贯节点的加工与放样复杂,相贯线上的坡口又是变化的,而手工切割很难做到,因此对机械加工的要求很高,要求施工单位有数控的三维切割机床设备。出于工艺的精度和材料质量问题(如钢管不够圆)导致相贯线不符合施工要求,施工中只好高空修补,从而延误了工期。④钢管结构均为焊接节点,需要控制焊接收缩量,对焊接质量要求较高,而且均为现场施焊,焊接工作量大。

相贯式钢管节点构造的进一步简约化,由此引发一系列不同于既有节点的力学特性;对相贯式节点的滞回特性是迄今研究甚少的一个环节,但对以节点效率控制设计的结构具有重要意义;节点基于结构整体性能的刚度评价也是尚未开展的研究课题。

1.3 研究任务

选取刚度和强度适当的管道悬索桥面板,建立悬索跨越结构分析的有限元模型,并