

管道悬索桥跨越绳索检测应用实例

汪 洋

中国石油西南油气田分公司川东北气矿, 四川 达州

收稿日期: 2023年7月20日; 录用日期: 2023年8月31日; 发布日期: 2023年9月12日

摘 要

L管道巴河跨越为大型天然气管道悬索桥跨越, 跨越的安全性决定着跨越管段的生产运行安全。现行标准《油气管道架空部分及其附属设施维护保养规程》对跨越的绳索检测要求较为简单, 尤其缺乏具体的技术要求及做法规定, 不能完全满足跨越绳索检测的需要。我们通过对巴河跨越特点进行分析, 结合公路桥梁绳索检测技术要求, 采用先进技术手段对跨越绳索系统进行了全面检测, 较好满足了现场的实际需要。本文总结分析了跨越绳索检测技术应用实践情况, 可为下一步大型管道悬索跨越的绳索检测和管理提供有益的帮助, 对实现管道完整性管理起到积极作用。

关键词

管道, 跨越, 绳索, 检测

Application Example of Pipeline Suspension Bridge Crossing Rope Detection

Yang Wang

Southwest Oil and Gas Field Branch Company Northeast Sichuan Gas Field, Petro China, Dazhou Sichuan

Received: Jul. 20th, 2023; accepted: Aug. 31st, 2023; published: Sep. 12th, 2023

Abstract

The Bahe river crossing of L pipeline is a large natural gas pipeline suspension bridge. The safety of crossing determines the safety of production and operation of the crossing section. The current standard 'Maintenance Regulations for Overhead Parts of Oil and Gas Pipelines and Their Auxiliary Facilities' has relatively simple requirements for the detection of crossing ropes, especially the lack of specific technical requirements and practice regulations, which cannot fully meet the needs of crossing rope detection. Through the analysis of the characteristics of the Bahe crossing, combined with the technical requirements of the highway bridge rope detection, we used ad-

vanced technical means to conduct a comprehensive detection of the crossing rope system, which better met the actual needs of the site. This paper summarizes and analyzes the application practice of crossing rope detection technology, which can provide useful help for rope detection and management of large pipeline suspension crossing in the next step, and play a positive role in realizing pipeline integrity management.

Keywords

Pipeline, Crossing, Rope, Detection

Copyright © 2023 by author(s) 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

跨越是管道工程在遇到河流、峡谷、道路等自然或人工障碍物时常用的施工方法，多用于河床穿越困难的河流，以及地势陡峭的峡谷等地点[1] [2] [3]。L 管道巴河大型跨越处为典型的 U 型河床，河床较深，为 V 级通航河道，河内严禁打桩立墩，需要一跨过河[4] [5]。经过技术经济比选后采用了悬索桥跨越方案。悬索桥一般适用于跨度较大的河流跨越，管道的重量由主悬索支撑，并传递至两岸的塔架和基础。其优点是管道不承受轴向力和水平作用力，受力状态良好[6] [7]。

因巴河跨越属架设在管架上的地上管道，也纳入架空管道进行管理。现行标准 SY/T 6068-2014《油气管道架空部分及其附属设施维护保养规程》对于跨越绳索的检测要求较为宽泛，没有明确具体的检测评价指标和做法，不能满足跨越绳索检测的需要[8]。我们结合巴河大型管道跨越特点，参考公铁路桥梁绳索检测评价方法，对巴河跨越绳索系统及相关附件进行了检测。以巴河跨越为实例，提出了适用于大型油气管道悬索跨越绳索检测评价的具体内容及方法[9]。可为下一步管道跨越的检测和管理提供参考，对管道完整性管理起到促进作用。

2. L 管道巴河跨越概况



Figure 1. The real map of the river crossing of the Bahe

图 1. 巴河跨越实景图

L 管道(DN250)巴河跨越位于四川省达州市渠县，属于甲类大型跨越，跨越长度 480 m，其中主跨 320

m. 巴河跨越桥梁整体结构由主索、吊索、风索、拉索、钢结构桥面、主塔、基础及锚固系统等部分组成。风索是为了悬索桥在大风的时候给桥面提供一个缓冲,使全桥有更好的稳定性。防止桥面在大风环境下产生剧烈晃动,在主桥南、北侧各设置风索一根,通过拉索对称与主桥形成固结状态。管道和桥面用拉索连接到主索和风索上。主索承受竖向荷载,风索承受侧向风载。在此结构体系中,承受主要荷载的构件为主索和风索,属于典型的柔性结构[10]。主索、风索采用平行钢丝束,双层热挤PE防腐。系索、连接索采用镀锌钢绞线,单层热挤PE防腐。巴河跨越结构见图1所示。

跨越主索为PESC7-223平行钢丝束,钢丝的强度等级均为1670 MPa。钢丝束的公称破断索力为14,332 KN。中跨主索与塔顶连接板采用叉耳式热铸锚连接,塔顶连接板焊在塔架立柱的槽口中,见图2所示。

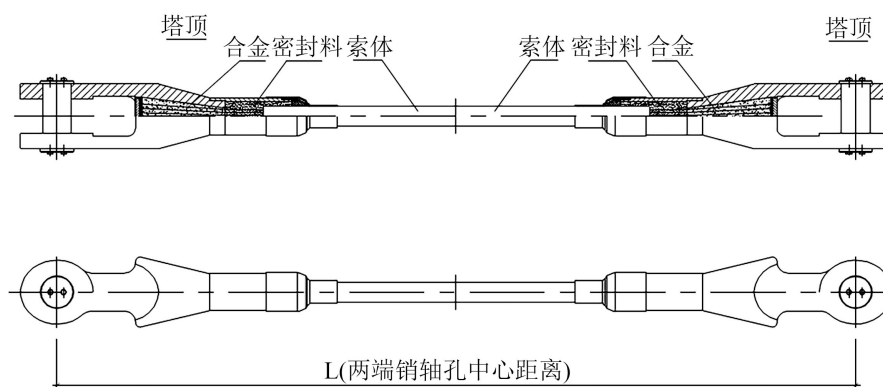


Figure 2. Main span and main cable structure diagram

图 2. 主跨主索结构示意图

生产实践表明,锚具端口处是疲劳破坏的薄弱环节,容易造成断丝破坏。经过改进结构和锚固方式,平行钢丝索结合部采用热铸锚锚固,提高了悬索的抗疲劳破坏能力。对高强度钢丝表面实施热镀锌工艺,对索体进行表面保护,采用高密度聚乙烯(PE)护套达到较好的防护效果。

边跨主索与锚固墩采用双螺杆式热铸锚与锚固座连接,锚固座用地脚螺栓与锚固墩连接;与塔顶连接板采用叉耳式热铸锚连接,塔顶连接板焊在塔架立柱的槽口中。

3. 跨越绳索检测要求及技术选择

3.1. 绳索检测要求

之前根据行业标准 SY/T 6068-2014《油气管道架空部分及其附属设施维护保养规程》规定,侧重于对桥梁结构的检查检测,而对于跨越绳索只要求进行常规检查,定期进行索力测定,没有明确具体的检测评价指标和做法。因此,我们查阅了大量桥梁检测资料,结合巴河跨越自身的结构特点,借鉴了公铁路桥梁绳索检测评价方法,提出了针对巴河跨越绳索系统及相关附件的检测技术,对巴河跨越进行了全面检测。

本次检测遵循的主要依据:《无损检测磁致伸缩超声导波检测方法》(GB/T 28704-2012)、《重要用途钢丝绳》(GB/T 8819-2006)、《斜拉桥用热挤聚乙烯高强钢丝拉索》(GB/T 18365-2018)等标准。

需要达到的检测要求如下:

- 1) 通过外观检查,查明缺损的部位、类型、性质、范围、数量和程度。
- 2) 通过主缆索线形测量、风缆主索线形检测、风缆拉索位置测量、主塔三维线形测量、桁架梁体三维线形测,验证各线形是否与设计线形一致,同时为后续检测评估提供参考[11]。

3) 通过主吊索倾斜度测量和墩身倾斜度测量, 验证以上各倾斜度是否与设计倾斜度一致, 同时为后续检测评估提供参考。

4) 通过主吊索索力测试、背索索力测试、风缆拉索索力测试, 验证以上各索索力是否与设计索力一致, 同时为后续检测评估提供参考。

5) 通过高强螺栓预紧力检测, 验证高强螺栓预紧力是否与设计一致。

6) 根据检测结果, 对绳索系统存在的结构性病害进行必要的分析, 并提出科学合理、针对性强的养护及管理建议; 对损坏严重、危及安全运行的问题, 提出限制载荷或加固维修的措施及建议。

3.2. 检测内容

跨越绳索检测主要内容包括宏观检查、钢索检测、索力测试、自振频率测试、基准网和永久观测点的建立、钢索内部锈蚀、断丝及截面损失检测等内容, 索力测试是重点。巴河跨越的线形观测包括主索线性、风索线形测量、风索拉索位置测量等。跨越桥梁的线形测量采用极坐标法完成。跨越主吊索和背索索力测试采用频率法进行[12][13]。

对该悬索跨越结构的索体及其附属结构进行检查, 内容包括: 外观检查、绳索防护性能检测、索夹等附件表观状况检测、倾斜度测量、线形测量等。

外观检查是悬索桥结构状态检测的一个十分重要的手段。这种方法易于发现比较明显的结构缺陷。本次对全桥范围内绳索及锚固设施外观进行详细检查。外观检查以拍照目测为主, 用裂缝放大镜、望远镜、长焦数码相机、拉索爬升仪器、无人机(见图3)等对全桥主索、吊索、风索 PE 护套、索夹等的表观状况进行全面检测, 记录影像资料并进行分析评估。

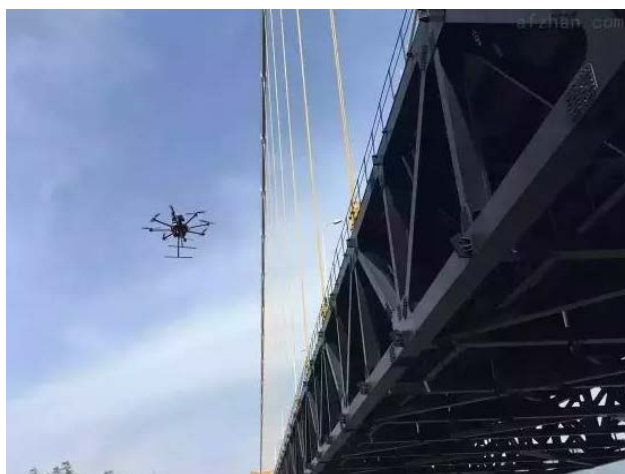


Figure 3. Appearance detection of rope PE sheath for unmanned air vehicle

图3. 无人机绳索 PE 护套外观检测

倾斜度测量包括主缆吊索倾斜度测量和墩台倾斜度测量两部分。主缆吊索倾斜度测量。考虑到主吊索沿纵桥向方向测量的空间限制, 采用全站仪从平面控制点直接测量吊索的顶端和底端截面的某一特定方向表面的三维坐标(X 边, Y 边, Z 边), 结合吊索半径 R 反推吊索中心三维坐标(X 中, Y 中, Z 中), 从而计算出每根主吊索在横桥向与纵桥向方向上的垂直度。全桥主吊索倾斜度测量共计 252 个方向。墩身倾斜度测量采用全站仪从横桥向和顺桥向两个方向进行, 每个方向测量其顶、底面到测站点位的距离及顶底点之间的高差值, 从而计算该方向垂直度。墩身倾斜度测点共计 8 个方向。

本桥线形测量内容包括主缆线形测量、风缆线形测量、风缆拉索位置测量、主塔三维线形测量、桁

架梁体三维线形测量等[14]。考虑到巴河跨越检测的精度要求和测量内容,本桥的倾斜度及线形测量均采用免棱镜测量方法,并采用三维自由建站法完成坐标采集。全桥共布设 146 个主缆索线形测量点,每根主缆索线形观测点 73 个。本次风缆拉索线形测量共计布设 130 个观测点位。风缆拉索位置的测量是通过测量拉索两端分别与风缆主索和主缆索连接的夹板位置来确定拉索的位置,共布设 252 个观测点位[15]。

3.3. 检测技术及设备

通过磁通量变化可以检测金属横截面积损失(LMA)和局部损伤(LF)。检测时,磁头首先磁化索体/吊杆至饱和状态,内嵌的霍尔传感器通过磁通量变化可以捕捉到索体/吊杆中任何缺陷(如断丝、磨损、锈蚀等),转换为电信号输出处理,按照特定算法及模型转换为图形信号,直观反映出索体/吊杆的损伤状态。

巴河跨越绳索检测采用了磁致伸缩导波检测仪,见图 4。该仪器可通过磁通量变化检测金属横截面积损失和局部损伤。在检测时,需要选择对应索体规格的检测磁头,并选配专用动力牵引设备进行检测。利用拉索爬升机携带检测仪逐一进行索体 PE 防护层状况检查及内部钢丝腐蚀无损检测。该检测仪搭载 4 个高清微型摄像头,可对全桥吊索 PE 防护层状况进行全面检测和评估,360 度全方位检测、摄像并进行远程监控、数据保存。



Figure 4. Automatic magnetostrictive guided wave detector
图 4. 自动磁致伸缩导波检测仪

拉索爬升机检测仪同时搭载基于电磁检测方法的拉索钢丝锈蚀无损检测传感器。爬升检测仪搭载模块化励磁设备在拉索上运动,检测拉索上的各个点的钢丝内部损伤。励磁检测装置利用霍尔元件检测拉索内部钢丝的损伤情况,霍尔元件的信号通过模块检测装置上的电路板经过电压跟随、滤波、放大等初步处理,利用无线设备传送到桥梁底端的接收设备上。

4. 检测技术应用情况

4.1. 检测流程

先综合利用无人机搭载高清摄像机、人工长焦相机观测和人员实地检测等方法对跨越全桥缆索、锚固、索夹及螺栓等附件的外观进行全面检查。再利用专业仪器对绳索进行检测。磁致导波检测方式需要先选择索体规格对应检测磁头及固定、牵引检测设备。在不拆除外保护套的条件下,将激励传感器和接收传感器安装在待测拉索上。随后利用便携式计算机控制主机产生大功率低频正弦波信号,输入到激励传感器,基于磁致伸缩效应在斜拉索中产生导波。传感器安装示意图如图 5 所示。检测信息通过信号采

集端口输入数据采集单元，经其中的 A/D 转换器后输入计算机，经处理后得到拉索导波检测结果。

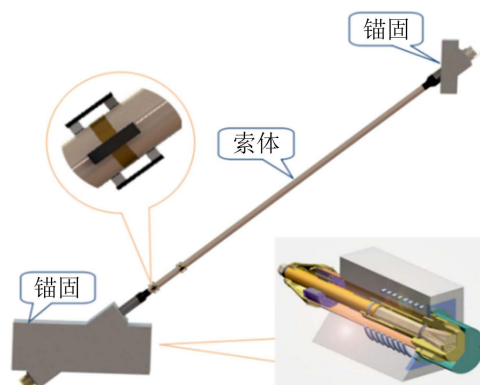


Figure 5. Sensor installation diagram
图 5. 传感器安装示意图

4.2. 绳索检测情况

4.2.1. 主索检查

主索的检测分为塔间主缆索体及塔后的背索，内容如下：主索的 PE 外观检查；背索的索力检查，利用振频法对主索的索力进行检测；主索的两端的锚固结构的检查，对主缆、吊索叉耳及其连接构件进行外观检查，对可疑点进行标记，再进行超声探伤检查；背索利用索体检测机器人进行断丝锈蚀检测。

4.2.2. 钢索检测

钢索无损检测采用钢丝绳电磁检测方法定量检测钢丝绳的金属截面积损失；通过获取振动频率，对钢索索力进行测试。

外观检测评定标度主要依据《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21-2011)和《无损检测磁致伸缩超声导波检测方法》(GB/T 28704-2012)。检测发现主索锚固存在起皮、锈蚀及内部存在杂物等问题。还发现部分风索、主索吊索及风索拉索存在外保护套松动和破损开裂现象。

主索和背索索力测试采用频率法，是依据拉力与主缆各索股的振动频率之间存在对应关系的特点，在已知主缆各索股长度、两端约束情况、分布质量等参数的情况下，将高灵敏度的拾振器绑在主缆各索股上，拾取各索股在环境激励下的振动信号，经过滤波、信号放大、A/D 转换和频谱分析测出主缆各索股的自振频率，进而由拉力与各索股自振频率的关系获得拉力，最后将各索股拉力叠加得到主缆的总拉力，各工况的主缆拉力减去空载工况的拉力即为主缆拉力增量。

吊索索力检测采用的方法为振动测定法，是利用紧固在缆索上的高灵敏度传感器，拾取缆索在环境振动激励下的振动信号，经过滤波、放大、频谱分析，得出缆索的自振频率，根据自振频率与索力的关系，来迅速确定索力。

主索及主索吊索横截面积损失和局部损伤检测结果表明，所检测绳索横截面积没有什么损失，没有发现断丝现象。主吊索实测索力与理论索力比值具有较高的吻合度，索力分布较为合理。

4.3. 倾斜度测量结果

考虑到主吊索倾纵桥向方向测量空间限制，故倾斜度测量采用全站仪从平面控制点直接测量吊索顶、底端截面某一特定方向表面的三维坐标，从而计算出每根主吊索在 X 方向与 Y 方向上的垂直度(见图 6)。全桥主吊索倾斜度测点共计 252 个，东西两侧各 126 个；观测西侧主吊索倾斜度时，在西岸风锚上以 JZ05、

JZ06 和 JD04 为后视点进行后方交会建站, 观测东侧主吊索倾斜度时, 则在西岸风锚上以 JZ02、JZ03 和 JZ01 为后视点进行后方交会建站, 全部测点均采用免棱镜测量模式直接测量其三维坐标, 并计算每根主吊索在横桥向与纵桥向方向上的垂直度。通过检测, 巴河跨越的绳索倾斜度满足设计要求。



Figure 6. Tilt measurement
图 6. 倾斜度测量

4.4. 线性测量结果

本次主缆索线形观测采用全站仪利用后方交会方法从平面控制点间接测量主缆索截面某一特定方向表面三维坐标(见图 7)。观测西侧主缆索线形时, 在风锚碇附近安置全站仪, 以 JZ01、JZ03 为后视点进行后方交会建站, 观测东侧主缆索线形时, 以 JZ04、JZ05 和 JZ06 为后视点进行后方交会建站; 所有线形观测点均采用免棱镜测量模式完成其三维坐标测量, 并根据测量成果绘制主缆索横向与竖向几何线形图。



Figure 7. Linear measurement of main cable
图 7. 主索线性测量

采用全站仪直接测量风缆主索截面的某一特定方向表面的三维坐标, 从而绘制出风缆主索线形图。观测时, 分别在桥梁东西岸风锚碇附近以基准点 JZ01、JZ02、JZ04、JZ05、JZ06 为后视点进行三维自由建站, 采用免棱镜测量模式对测点进行观测。

将巴河跨越主索线形、风索线形、桁架线形测量形成三维坐标成果, 通过主缆吊索垂直度、风索拉索垂直度、主塔三维空间位置等多项指标综合分析, 跨越整体绳索结构在横向、竖向及不同高度上的空

间形态对称, 较为安全, 能够满足管道正常生产运行要求。

5. 结束语

按照《油气管道架空部分及其附属设施维护保养规程》要求, 参考了公路和铁路桥梁绳索检测做法, 对巴河跨越绳索系统进行了专项检测。检测结果表明, L 管道巴河跨越结构稳定, 绳索系统没有较大缺陷, 索力分布较为合理。跨越目前状况是安全的, 可以正常使用。实际采用的检测技术适用于巴河跨越绳索系统, 全面检测取得了圆满成功, 基本解决了现行行业标准不能完全适合现场应用的问题, 较好满足了现场的实际需要。

针对跨越绳索检测过程中发现的问题和缺陷, 以及今后的绳索检测工作开展, 提出如下改进和维修建议:

1. 对于存在异常信号的拉索, 需要结合拉索的实际结构判断分析异常信号的原因, 在去除结构导致的异常回波情况下, 再进行判断分析拉索的损伤位置和损伤程度。

2. 应及时对检测发现的部件锈蚀、破损等缺陷进行修复。加强跨越绳索保护套维护保养。定期对紧固螺栓扭力进行检测, 发现松动及时紧固。

3. 本次检测应用的动力牵引磁致伸缩导波无损检测仪器技术先进, 但在应用中发现牵引设备的通过能力存在不足。在绳索保护套发生破损、脱皮的部位通过能力不强, 容易发生卡堵现象, 导致牵引设备停滞, 解除卡堵十分不易。因此, 在以后的检测中如遇检测仪器无法通过时, 可以结合使用载人的小型吊篮沿绳索移动, 用人工携带仪器的方式进行检测, 以提高检测的适用性和全面性。

4. 加强数据保存整理。做好检测数据的保存, 对于有历史检测数据的绳索可通过历史数据进行进一步对比分析, 得出更为准确合理的检测结果和管理修复建议。

5. 巴河跨越属甲类大型跨越, 建议定期观测主缆线形、风缆线形状况, 并与历史数据对比, 如发现较大的不可恢复的变化时, 应及时进行分析处理, 保障安全运行。

通过本次巴河大型管道跨越绳索检测应用, 初步建立了一套适用的管道悬索跨越绳索检测方法, 能对今后管道悬索跨越绳索检测评价提供有益的帮助, 为实现管道完整性管理起到积极的促进作用。

参考文献

- [1] 邵子璐, 刁凤东, 马子健, 等. 悬索桥施工监控技术[J]. 石油天然气学报, 2020, 42(4): 280-285.
- [2] 贾春磊. 普光气田地面集输工程悬索跨越设计[J]. 钢结构, 2014, 29(1): 36-39.
- [3] 王永振, 霍思彤, 曾维国, 等. 基于缩比模型的悬索跨越管桥结构安全性分析研究[J]. 油气田地面工程, 2021, 40(1): 13-17.
- [4] 李鲁明, 王武斌. 油气输送管道悬索跨越结构运营状态检测与评估分析[J]. 四川建筑, 2012, 32(3): 174-176.
- [5] 詹胜文, 孙宏全, 杨红军. 忠武输气管道悬索跨越设计创新及探讨[J]. 石油工程建设, 2006, 32(4): 19-22.
- [6] 王金国, 丁阳. 长输管道悬索跨越结构损伤的试验模拟与识别[J]. 天津大学学报, 2010, 43(3): 229-233.
- [7] 陈晓晖, 张弢甲. 悬索管道桥双主缆式索夹抗滑移性能研究[J]. 油气田地面工程, 2020, 39(6): 25-28.
- [8] 石油工业油气储运专业标准化技术委员会. SY/T6068-2014. 油气管道架空部分及其附属设施维护保养规程[S]. 北京: 石油工业出版社, 2014: 4-5.
- [9] 白山云, 陈开利, 陈杰, 等. 公路悬索桥预防性养护技术[J]. 桥梁建设, 2014, 44(2): 102-105.
- [10] 廖柯熹, 李建华, 康凯. 大中型悬索管道跨越结构清管动力响应分析[J]. 管道技术与设备, 2006(1): 38-42.
- [11] 赵碧航, 杨汝东, 孙测世. 不同加劲梁重量下的悬索非线性振动特性[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(21): 9346-9354.
- [12] 王伟坤, 刘世忠. 马新大桥索力测试、调索计算方法[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(16): 276-278.
- [13] 杨发平, 刘方检, 庞斌, 等. 普光气田后河悬索跨越索力荷载试验检测技术[J]. 石油工业技术监督, 2013, 29(8): 56-61.

-
- [14] 彭阳, 安建川, 李明, 等. 勐岗河大型悬索跨越管道成桥状态下非线性静力有限元分析[J]. 天然气工业, 2020, 40(1): 125-131.
- [15] 周建庭, 冯燕媚, 蒋震, 等. 基于有限测点的悬索桥位移场获取与安全评估[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(16): 139-144..