

进口吊机开式齿圈和马达轮齿国产化改造

王冬港

(中海石油(中国)有限公司天津分公司工程技术作业中心 天津 300451)

摘要: 在海油平台吊机齿圈及轮齿磨损超限,影响使用安全的情况下,摒弃以往依托采办进口设备备件更换的常规思路,在无备件零部件图纸、无材质报告等关键技术资料的情况下,积极谋划和开拓思路,以国产化加工为突破口,经现场拆卸、优选材质、校核加工、精确测绘、回装、制造、安装施工、验收试运等一系列工作,严格把控、闭环管理,推动国产化实践,并取得良好收效。

关键词: 吊机; 开式齿圈; 马达轮齿; 国产化改造

1 项目背景

某海油平台用基座式起重吊机为国外进口,截止到2015年,已投用达16年之久,维修人员在对吊机开展周期试运转检查时发现,其运转噪音明显,且噪声主要产生于变幅、主副钩滚筒齿圈与马达轮齿啮合传动部位,后经目测,以上啮合接触部位已出现多点位、不同程度磨损,且经专业测量,多处磨损已超过标准限值。鉴于此吊机为平台吊运货物和人员所需的关键设备,且目前状态对安全正常使用造成了较大的隐患,故需对齿圈及轮齿进行维修更换作业^[1]。

2 基座式起重吊机简介

海油平台配备吊机主要用于,在日常和应急期间,船舶装卸货物和吊运人员到平台甲板,是海洋石油生产中最重要生产和安全关键设备之一。它具有起重能力大、操纵方便、耐冲击、制动性能优良、安全可靠、装卸货效率高、货物适应性好等诸多特点。鉴于海洋环境恶劣,同时考虑海上作业的独立性和潮湿环境的特殊性,海油平台起重吊机采用的安全系数要高于陆用起重机,安全性、可维修性、抗风性及耐腐蚀性更高。

此次故障的吊机为固定基座式起重吊机,于1999年由澳大利亚FavelleFavco公司生产,其吊臂为桁架式,具备起升、变幅和回转功能,其中主钩绞车、副钩绞车及变幅绞车所配备的减速系统为外啮合齿轮减速系统,其主要性能参数如下:

动力源:电动机;主钩安全工作负荷:20t;辅钩安全工作负荷:2t;主钩最大工作半径:25000mm;主钩最小工作半径:4900mm;辅钩最大工作半径:27700mm;辅钩最小工作半径:6700mm,装绳示意图如图1所示。

3 方案论证

常规方案: 采购原厂齿圈轮齿及相关备件,直接更换故障备件。经与澳方原厂家进行多次尝试性联系与咨询^[2],厂家回复,需派人至外方工厂面谈,但厂家报价过高,总费用超过100万元,且不包括滚筒轴承、齿圈打孔、厂家人员到场安装施工所需人工等费用,同时所有额外费用均需我方负担;因属外方设备,供货周期偏长,最少需5个月,150天左右。综合以上,此方案施工周期长,费用远超预算。

备选方案: 基于采用常规方案更换进口齿圈及轮齿的困难,综合考虑持续降本增效及大力推行“三新三化”的政策要求,在结合国产化齿轮加工技术成熟度较高的背景基础上,经深入研究分析,计划采用国产化加工齿圈及轮齿进行替换的方案,此方案的主要优势是:采购

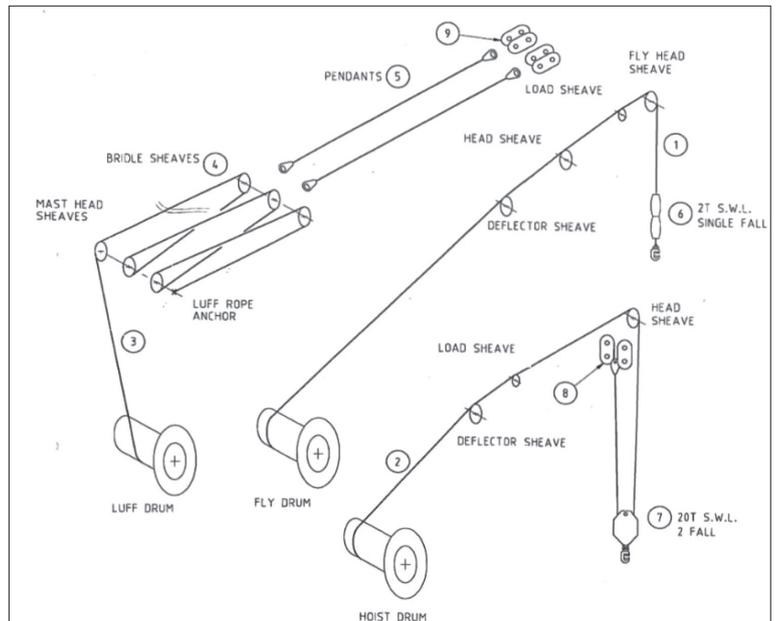


图1 装绳示意图

周期短，后期维护方便；项目费用大幅降低；减少海外报关等繁琐流程。

4 方案简述

经现场拆卸落实精确测绘，并制定滚筒齿圈、马达轮齿制造工艺的技术要求以及材质、热处理特性、粗糙度、硬度参数等设计要求，同时匹配提供相应的材质、探伤、机械性能、热处理、零件外形尺寸、齿部尺寸以及公差检测、氮化处理检测、UT及PT检测等报告，并确保严控现场安装施工，通过CCS认证。

5 项目改造总体过程

5.1 现场拆卸滚筒开式齿圈（3套）、马达轮齿（6套）

由于吊机更换开式齿圈受位置和空间所限，变幅及大钩在更换作业中需新增搭设脚手架吊运平台，并确保吊运平台能够承载吊装设备的载荷。具体讲，就是分别搭设主钩、副钩、变幅附近的脚手架，并对应将各自滚筒上缠绕的多层钢丝绳逐步放松，同时把多套滑轮组下放至吊臂格栅板上，并用麻绳固定钢丝绳，在搭设脚手架上选取合适的承重吊点并悬挂固定倒链，逐步使用倒链将滚筒整体向上吊装使其受力，在倒链向上拉力与滚筒重力平衡时，拆卸滚筒中心的金属通轴，再将各个开式齿圈及轮齿吊运至甲板^[3]。

5.2 开式齿圈、马达轮齿测绘及公差检验

以主钩开式齿圈为例，见表1。

5.3 原齿圈、轮齿回装

按照拆卸原拆卸顺序，反序回装滚筒齿圈及马达轮齿，并将变幅滚筒整体复位，恢复相关附属配件，启动吊机进行试运转，并根据排绳情况进行适当调整。

5.4 选取齿圈及轮齿材质，制定热处理标准规范

按照吊机齿圈及轮齿技术要求，选取材质为42CrMo钢，42CrMo钢属于超高强度钢，具有高强度、高韧性，较好的淬透性，无明显的回火脆性，调质处理后有较高的疲劳极限和抗多次冲击能力，低温冲击韧性良好。经综合分析该钢，适用于制造海上油田吊机开式齿轮。其化学成分分析见表2。

该材质热处理状态为正火，调质硬度达到HB230-240，工艺规范为氮化处理，氮化处理硬度达到HV700-72。经热处理检验，马达轮齿硬度达到HV740，开式齿圈硬度达到710HV0.3，硬化层深为0.72mm，均达到技术规范要求。

5.5 加工部件检测及探伤

按照尺寸参数进行检查核对，对材料进行机械性能试验，最后对加工后成型件进行超声检测和渗透检测，并出具检测报告。

力学性能试验：采用冲击试样采用10mm×10mm×55mm样品，V性缺口，缺口深度2mm。实验方法：按GB/T 228.1-2010和GB/T 229-2007标准规范，温度20℃，参数见表3。

5.6 现场安装及试重试验

使用国产加工的齿圈、轮齿更换吊机对应磨损备件，并检查装配无误后，开展试重试验。

(1) 主钩负载试验分为4次，具体试验方法如下：

启动吊机空载运行，各项动作空载循环工作一次。要做到各项动作灵敏有效、各项限位灵敏有效、刹车灵敏有效、无迟缓现象。

工作半径为5~17.5m时起升质量为10t，静载5min观察有无溜钩与溜杆现象。将吊车吊臂转至海面左右旋转并上下起落主钩，如无异常现象。起升并下放变幅范围为5~17.5m工作循环一次。随时观察新更换齿轮工作状态，要求试验期间刹车系统无打滑、刹车迟缓现象。

工作半径为5~12.5m时起升质量为15t，静载5min观察有无溜钩与溜杆现象。将吊车吊臂转至海面左右旋转并上下起落主钩，如无异常现象。起升并下放变幅范围为5~12.5m工作循环一次。随时观察新更换齿轮工作状态，要求试验期间刹车系统无打滑、刹车迟缓现象。

工作半径为5~10m时起升质量为20t，试验步骤

表1 主钩开式齿圈测绘检验结果

图纸尺寸及公差/mm	实测值/mm	检验方法	判定
齿轮外形尺寸 φ 1258 × 137	φ 1258.02 × 137	卡尺	合格
安装止口 φ 710 (+0.02/+0.04) × 6.5	φ 710.03 × 6.5	卡尺	合格
轴承孔 φ 160 (+0.05/+0.07) × 56.5	φ 160.05 × 56.5	内径表	合格
连接孔 20-φ 22 × 中心距 746	20-φ 22 × 中心距 746		合格
游丝通槽 27	27		合格
压盖螺孔 4-M12 × 40 × 中心孔距 190	4-M12 × 40 × 中心孔距 190		合格
油嘴螺孔 M16 × 20 × 中心孔距 914	M6 × 20 × 中心孔距 914		合格
齿轮参数			
模数 12.7 × 齿数 97	齿数 97		合格
公法线：410.919 (-0.36/-0.50)	410.5	公法线尺	合格
跨测齿数 (K) : 11	11		合格

表2 化学成分分析表

化学成分/%	C	Mn	Si	P	S	Cr	M	Ni	Cu	Al
	0.41	0.59	0.28	0.004	0.001	1.00	0.17	0.24	0.057	0.022

表3 力学性能分析表

抗拉强度 R _m /MPa	规定塑性延伸强度 R _{p0.2} /MPa	断后 延伸率A/%	冲击吸收功 KV2-23℃/J		
1235	1113	16.5	29	32	32

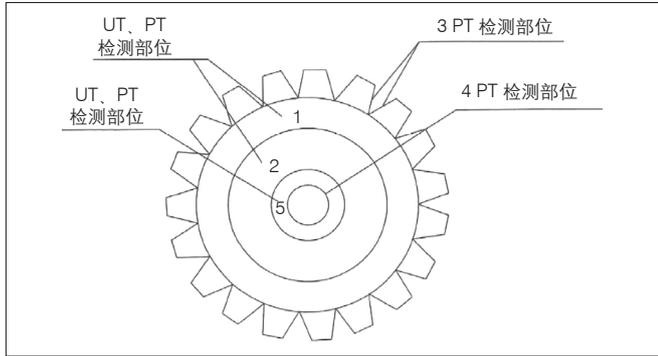


图2 检测位置图

为起升标准配重铁高度 10cm 静止 5min，无溜钩与溜杆现象。将吊车吊臂转至海面左右旋转并上下起落主钩，如无异常现象。起升并下放变幅范围为 5 ~ 10m 工作循环一次。随时观察新更换齿轮工作状态。要求试验期间刹车系统无打滑、刹车迟缓现象^[4]。

(2) 副钩负载试验分为 2 次，具体试验方法如下：

启动吊机空载运行，各项动作空载循环工作一次。要做到各项动作灵敏有效、各项限位灵敏有效、刹车灵敏有效、无迟缓现象。

工作半径为 7 ~ 27m 时起升质量为 2t，试验步骤为起升标准配重铁高度 10cm 静止 5min，将吊车吊臂转至海面左右旋转并上下起落主钩，无异常现象。起升并下放变幅范围为 7 ~ 27m 工作循环一次。要求试验期间刹车系统无打滑、刹车迟缓现象。

(3) 负载试验的注意事项：① 试验应有专人指挥，并且使用合格有效的吊索具；② 试验前要仔细检查吊索具是否完好，并且符合额定负载重量；③ 实验前对新更换零件各连接件进行再次检查确认；④ 吊车司机与现场参加试重人员应熟悉并掌握本试重方案的试验步骤；⑤ 与试重无关人员禁止在试重现场停留；⑥ 试验期间司机与施工人员应注意吊车在运行过程中有无异常现象，一旦发现异常应立即停止作业。

5.7 梳理全部技术资料，强度校核计算，CCS 认证

梳理此次项目改造全部资料，包括但不限于：锻件合格证书、锻件超声波探伤检测报告、机械性能检测报告、粗加工后调质（热处理）报告、零件外形尺寸、齿部尺寸及公差检测报告、淡化处理检测报告、UT 及 PT 检测报告、委托书、施工方案、负荷试验记录表、完工技术报告等，在进行强度校核计算后，顺利通过 CCS 认证。

副钩齿轮副强度校核计算，见表 4 和表 5。

滚筒钢丝绳外圆周拉力为 26.6kN，滚筒拉力作用半径 282mm，齿轮传动及润滑形式为开式传动机、润滑脂润滑，滚筒转速 $v=1.67\text{m/s}$ ，减速传动比 $63/25=2.52$ 。

齿轮副齿根弯曲疲劳强度校核：

载荷系数 $k = K_v K_a K_f$ ，查表得 $K_v = 1.25$ ，

表 4 副钩液压马达主动齿轮参数

齿数 Z_1	模数	齿宽 /mm	数量
25	10	65	2

表 5 副钩滚筒从动齿轮参数

齿数 Z_2	模数	齿宽 (计算齿宽) /mm	数量
63	10	56	1

根据：

$$vZ_1/100 = \frac{1.67 \times 25}{100} = 0.4175$$

查表得 $K_v = 1.02$ ， $K_f = 1.3$ ，

则载荷系数：

$$k = K_v K_a K_f = 1.25 \times 1.02 \times 1.3 = 1.6575$$

计算圆周力 F ：

$$F = 2T/d_2 = 2.3813 \times 10^4 \text{N}$$

查表得 $Y_1=2.62$ ， $Y_2=2.25$ ， $Y_{s\alpha 1}=21.65$ ， $Y_{s\alpha 2}=1.81$ ，

由 $[\sigma]_b = K_{nb} [\sigma]_{b0}$ ，计算 $[\sigma]_b$ ，

查表得 $[\sigma]_{b01} = 850\text{N/mm}^2$ ， $[\sigma]_{b02} = 800\text{N/mm}^2 K_{NB1} = K_{NB2} = 1$

得 $[\sigma]_{b1} = 850\text{N/mm}^2$ ， $[\sigma]_{b2} = 800\text{N/mm}^2$ ，

$$\begin{aligned} \sigma_{b2} &= \frac{KF_t}{2bm} Y_2 Y_{s\alpha 2} \\ &= \frac{1.6575 \times 2.3813 \times 10^4 \times 2.25 \times 1.81}{2 \times 56 \times 10} \\ &= 143.52\text{N/mm}^2 < [\sigma]_{b2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{b1} &= \frac{\sigma_{b2} Y_1 Y_{s\alpha 1}}{Y_2 Y_{s\alpha 2}} \\ &= \frac{143.52 \times 2.65 \times 1.65}{2.25 \times 1.81} \\ &= 154.09\text{N/mm}^2 < [\sigma]_{b1} \end{aligned}$$

6 结语

国产化齿圈及轮齿安装应用到吊机后，经连续两年运行试验，目前啮合位置磨损在正常范围，且无噪声出现，可以说实现了国产化应用的成功。在海上油田，同型吊机繁多，此次国产化试验既彻底解决了设备运转隐患，提高了设备使用寿命，为海上油田安全生产提供了有力支撑与保障，同时彻底解决了采办进口备件高费用、高周期的“双高”问题，实现了技术攻关的突破，打破了国外厂家的技术封锁和垄断，创造经济效益 70 余万元，并为海洋石油平台吊机改造提供了重要参考依据，具有重要的推广意义、借鉴意义、现实意义与实践意义。

参考文献：

[1] 孙桓，葛文杰. 机械原理：第 9 版 [M]. 北京：高等教育出版社，2021.
 [2] 王英杰. 金属工艺学：第 3 版 [M]. 北京：机械工业出版社，2015.
 [3] 朱学仪. 钢材检验手册：第 3 版. [M]. 北京：中国标准出版社，2009.
 [4] 梅盛开. 初始缺陷下齿轮磨损动态特性测试与演化机理 [D]. 淄博：山东理工大学，2020.