

基于数字孪生的电驱连续油管滚筒结构设计

机卓2101班：孙祥鑫 指导教师：贺雨田 论文类型：毕业设计

摘要：本文应用有限元分析结合数字孪生技术的研究方法，探讨了电驱连续油管滚筒的相关结构设计。首先，结合连续油管滚筒的当前痛点对电驱连续油管滚筒的关键部件进行了计算与设计；其次，利用三维建模软件构建滚筒模型，通过有限元分析其重要部件的力学性能；最后，搭建数字孪生数据可视化模型，实现物理实体与虚拟模型的实时交互。该技术为滚筒的智能运维提供了数据支撑，实现了从“经验驱动”到“数据驱动”的设计转变。本研究为连续作业装备的数字化设计与智能化管理提供了理论依据与技术路径，具有一定的工程应用价值。

关键词：数字孪生；电驱连续油管滚筒；有限元分析；智能化

1 研究背景

连续油管滚筒是存储和运输连续油管的重要设备，作业时滚筒通过正转或反转起下连续油管，同时要保证油管一定的拉力，随着作业机上的连续油管作业深度越来越大，要下到一口井下就会需要更长的连续油管，滚筒也要承受更大的重量，这些都对现有的滚筒提出了更高的要求。伴随着油气田的开发向着更深层、超深层以及更复杂的结构井的发展，作业环境也逐渐变得复杂起来，在这种情况下，对设备的要求也在不断提升。电驱连续油管滚筒以电机为动力源，具有效率高、能耗低的特点，可实现复杂工况下的精确定位，能够满足复杂工况下的精细化操作需求，电驱滚筒易于实现智能化功能，如远程监控、故障诊断和预测性维护，通过电驱滚筒的智能化系统，成功预测并避免潜在故障，减少设备停机时间，提高作业安全性。

2 发展现状

2.1 国外研究现状

1997年Yong S. Yang等科学家结合弹塑性力学和工程实际，建立了连续油管卷绕到滚筒上的力学模型，并对滚筒的扭矩计算公式和连续油管发生的弹塑性变形的相关应变方程做出了较为详细、全面的理论推导。

NOV公司通过前期企业对电驱技术的研发成果应用到电驱连续油管滚筒当中，取得了良好的效益，美国NOV公司的电驱连续油管滚筒系统，使用的是高效电机与先进控制算法，大大提升了能量的利用率，根据NOV的技术资料可知，较同种型号的液压滚筒系统来说，其能量消耗比减小了30%；同时电驱滚筒在深井、超深井工况下的可控性和稳定性更强。

2.2 国内研究现状

中石化石油机械股份有限公司研发的智能连续油管作业系统具有实时数据采集、远程监控和自动控制功能，能够通过高精度传感器和物联网技术对油管的张力、速度、位置、温度等重要参数进行实时监测，并且运用大数据分析以及人工智能算法对设备的工作状态进行故障预测与诊断。

宝鸡石油机械有限责任公司采用高强度合金钢和复合材料制造的滚筒体，在一定程度上显著提高了其承载能力和抗疲劳性能，并且通过有限元分析和数字孪生技术优化滚筒结构设计，减少了应力集中和磨损，延长了设备使用寿命。在大庆油田的作业中，优化后的滚筒结构使设备故障率降低了20%，同时显著延长了设备的使用寿命。

3 相关分析

3.1 电驱系统设计

电驱系统控制方案的结构示意图如图3.1所示。电驱控制系统通过可编程逻辑控制器（PLC）对变频器实施全方位保护至关重要。具体而言，PLC能够精准监测并控制变频器的过流、过压、等异常状况，同时针对电机断电刹车这一关键环节进行有效管控。当出现上述异常情况时，PLC会迅速响应，及时采取保护措施，实现设备在正常作业过程中的安全防护，以及在突发状况下的应急保护，从而最大程度确保设备整体在各类突发情况下的可靠性和稳定性。

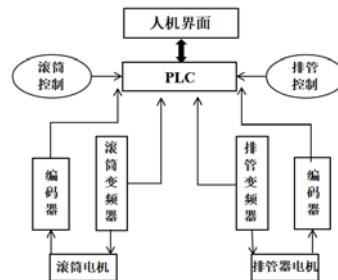


图3.1 电驱系统控制结构示意图

3.2 滚筒主体结构

根据设计方案，可知缠绕的连续油管外径 $D=50.8\text{mm}$ ，需要缠绕7000m，据标准SY/T 6761—2014《连续管作业机》要求，连续油管滚筒筒体中心半径至少应为连续油管直径的20倍，所以滚筒筒体内径为2040mm，设计法兰间宽度 $L=2312\text{mm}$ ，根据计算得知筒身一层可以缠绕45圈，当连续油管多层缠绕在滚筒上时，连续油管的外一层会缠绕在内一层缠绕形成的缝隙上，缠绕方式如下图3.2、3.3所示：

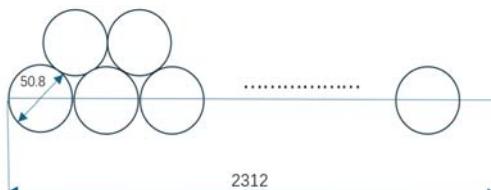


图3.2 连续油管多层缠绕排列示意图

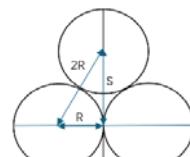


图3.3 连续油管相邻两侧位置关系

设最外层半径 $r_{\text{总}}$, 直径 $\phi_{\text{总}}$:

$$r_{\text{总}} = r_1 + \frac{r}{2} \times \sqrt{3}(n-1) \quad (3.1)$$

$$\phi_{\text{总}} = 2r_{\text{总}} \quad (3.2)$$

得: $r_{\text{总}} = 1836.36\text{m}$ 、 $\phi_{\text{总}} = 3672.72\text{m}$, 因此可知滚筒外径 $\phi_{\text{外}} = 3810\text{mm}$

3.3 有限元分析

当多层缠绕时, 设第 n 层连续油管的轴向力为 F_n , 径向力为 P_{rn} , 滚筒筒体承受的径向压力为 P_m , k 为油管缠绕层数, 计算得:

$$P_m = \frac{F_1}{R \times d} + \frac{1}{d} \sum_{k=2}^n \frac{F_k}{R \times (k-1)d} \quad (3.4)$$

在设计滚筒的过程中, 若直接运用前述公式来计算, 其计算流程会显得颇为复杂。为了提升工程计算中的便捷性与效率, 我们引入“多层缠绕系数”, 该系数为 n 层连续油管缠绕时滚筒所受径向压力与单层缠绕时滚筒所受径向压力的比值, 设为 ε_n , 考虑到《油气井用连续油管作业推荐作法》中要求 $R \geq 20d$, 取 $R=20d$, 计算如下:

$$P_{rl} = \frac{F_1}{R \times d} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_n = \frac{P_m}{P_{rl}} = 1 + \frac{20}{F_1} \sum_{k=2}^n \frac{F_k}{19+k} \quad (3.6)$$

根据以上公式计算得: 第 1、6、12、18 层所受压力分别是为 0.218MPa、0.292MPa、0.304MPa、0.332MPa, 运用有限元仿真软件对滚筒筒身施加均匀压力, 采用轴向固定约束, 对模型进行网格化, 划分为无数个单元, 所得有限元仿真结果如下:

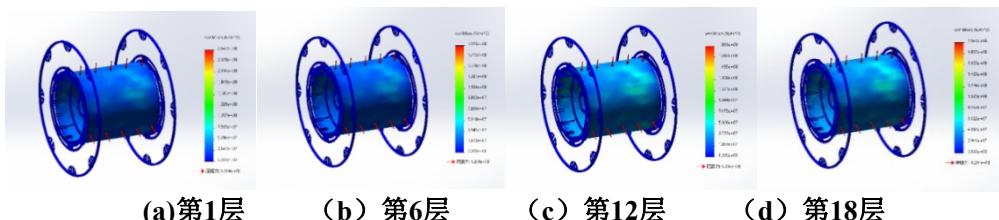


图3.4 连续油管滚筒等效应力云图

由上图可知当缠绕1层时筒身所受的等效应力为59.2MPa, 同理第6层、第12层、第18层的等效应力为79.3MPa、112MPa、143MPa, 将得到的等效应力结果与缠绕圈数结合可以得到二者关系图如下图3.5所示, 由图可知, 随着缠绕圈数的增加等效应力随之均匀增加。

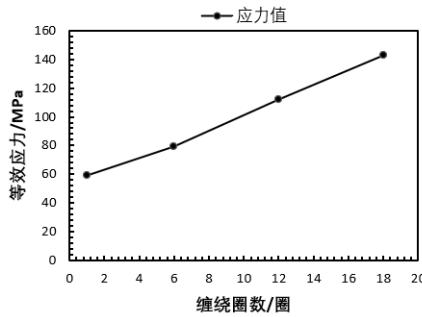


图3.5 等效应力随缠绕圈数变化图

3.4 基于数字孪生的数据可视化模型——滚筒数据可视化界面

可视化界面的作用就是基于传感器所采集的数据、图片信息来展示出连续油管滚筒数字孪生模型的运行以及最终的效果，并能够实现实时调节的功能。



图3.6 基于数字孪生的连续油管滚筒数据可视化界面

本界面如下图3.6所示，平台界面上内拥有连续油管滚筒运行时各项数据的展示窗口，其中包括传感器采集的参数、滚筒参数、丝杠参数、连续油管参数、各种操作记录等多项参数，并且可以实时动态的展现各项数据数值。

实时采集的滚筒参数包括连续油管缠绕圈数和连续油管张力，以及连续油管实时长度，可以及时获知连续油管下放与上拉的状态，实时获取下井工况。长度测量通过排管器的计数装置和滚筒主轴的高精度编码器实现，记录旋转圈数并结合滚筒直径、缠绕层数及油管外径动态计算累计管长。张紧压力监测则采用高精度压力传感器实时反馈油管对滚筒压力，进而反馈连续油管张力，而导向架处的载荷传感器直接测量轴向拉力，二者相互结合数据，经PLC融合后补偿惯性力影响，实现对油管张力的实时展现与反馈。

最能体现本界面的数字孪生功能的方面就是平台可根据实时数据的采集与传输，经平台处理器的数字化分析，可实时监测设备运行情况，发现问题后可实时报警，操作人员可通过界面上的各种功能按钮及时控制，并精确调节滚筒运行，维护安全运营。

4 研究结论

在本次设计中，我们运用了Auto CAD、SolidWorks等软件，基于现有参数，对电驱连续油管滚筒的各个零件进行了相关参数计算与设计，并且对它们的性能进行了校核与仿真模拟，并采用数字化孪生技术，完成从概念设计到最终成果的全流程

闭合，在数字建模、几何建模和物理建模的共同作用下模拟出连续油管滚筒的各种工作状况，正确的把握连续油管滚筒的结构、性能等参数。

然而，本次的研究仍存在一些不足之处，例如数字孪生模型的精度需要进一步提高，实验条件需要进一步优化。个人建议未来的研究可以探索如何将数字孪生技术、人工智能与大数据等技术深度融合与统一，进一步提高模型的准确性和可靠性，拓展数字孪生技术在工业领域的应用范围。