

Overview of Nonlinear Vibration Mechanism of Fluid Structure Coupling in Deep Sea Equipment Hydraulic System

Zhi Yang

Hunan Electrical College of Technology, Xiangtan, Hunan, 411101, China

Abstract

The hydraulic system of deep-sea engineering equipment is subjected to high pressure and ocean current impact, resulting in vibration of hydraulic oil pipes. The vibration will intensify pressure pulsation inside the pipes, causing serious consequences. Therefore, studying the vibration mechanism and reliability of deep-sea equipment hydraulic systems is of great significance. Therefore, the paper summarizes the vibration mechanism of pipelines, the fluid structure coupling mechanism of hydraulic system pressure fluctuations, the optimization design of hydraulic system pulsation reliability, and proposes the future exploration of the nonlinear vibration mechanism of fluid structure coupling in deep-sea equipment hydraulic systems.

Keywords

deep-sea equipment; fluid structure coupling mechanism; conduit

深海装备液压系统流固耦合非线性振动机理研究综述

杨智

湖南电气职业技术学院, 中国·湖南湘潭 411101

摘要

深海工程装备液压系统承受高压与海流冲击, 导致液压油管产生振动, 振动将加剧管内压力脉动, 产生严重后果, 因而研究深海装备液压系统振动机理及可靠性具有重要的意义。为此, 论文综述了管道振动机理, 液压系统压力波动的流固耦合机理, 液压系统脉动可靠性优化设计研究, 并提出了深海装备液压系统流固耦合非线性振动机理未来需要探索的内容。

关键词

深海装备; 流固耦合机理; 管道

1 引言

深海工程装备其工作环境在深海, 其受到海水化学物质的侵蚀、海水的高压及洋流的冲击所以其工况非常恶劣环境, 而且其检测及维修非常困难, 所以对其可靠性提出了非常高的要求^[1]。海洋工程装备液压驱动系统受环境相互作用引起管道振动, 进而影响液压油压力波动、油管接头密封性、液压管道与液压元件疲劳破坏及其可靠性, 深入研究深海工程装备液压系统振动、密封性及可靠性优化设计, 建立完善的深海工程装备液压系统密封失效分析和可靠性优化设计理论显得十分迫切。为了解决此问题, 研究人员分别从管道振动机理、液压系统压力波动的流固耦合机理、液压系统脉

动可靠性优化设计进行了研究。

2 管道振动流固耦合研究

许多专家学者在流体-结构相互耦合领域进行了大量的工作, 取得了不少十分重要的成果, 基础理论和计算方法初步建立。

Walker 团队研究了流体压力波与输送管泊松耦合机理, 并建立包含 4 个方程的力学模型, 并应用该方程求解 RPV 系统中阀门关闭时候对输送管产生的动态影响, 此外该团队在原来 4 方程的基础上融入了管道半径方法平衡及其连续性, 将其扩展为 6 个方程的数学模型。Valentin 团队进一步拓展了模型体系, 提出了包含更多物理细节的八方程模型, 并成功推导了相关的色散方程, 以及针对弯管结构的反射与传递系数, 为复杂管道系统的行为预测提供了有力工具。另一方面, Regetz 则聚焦于火箭燃料供给系统中的直管部分, 专注于分析管内压力与流速的波动特性。对于弯管及岔道对流体的影响, Wood 做了相关研究, 其研究了不同弯曲半径及角度的弯道及其不同型号的岔道对于流场速度的影响。对

【基金项目】湖南省教育厅科学研究优秀青年基金项目: 深海钻结壳多轮独驱电传动采矿车差速转向研究(项目编号: 21B0860)。

【作者简介】杨智(1984-), 男, 中国湖南常宁人, 硕士, 工程师, 从事深海采矿装备研究。

于阀门对岔道耦合研究, Ellis 研究了其压力波、应力波、弯矩波的相互耦合, 并提出了一种求解方法。A.S.Tijsseling 团队基于水锤理论及梁结构力学模型, 构建一个充满液体的管道力学模型。并讨论了其液体与管道壁的动力学耦合关系, 并分别对其进行时域、频域内进行求解流固耦合方程求解, 从而揭示了其流固耦合机制。

直到 20 世纪 80 年代, 中国才有研究流固耦合振动的论文出现, 所以其起步比较晚, 但投入对其研究的学者迅速增加。其中, 张维衡团队对波在充满液体的圆管中传播进行了深入的研究。对于复杂边界条件的流固耦合管道的动力学数学模型, 费文平团队进行了深入的理论研究。为解决空间管道流固耦合问题, 焦宗夏团队基于二次坐标变换理论建立其通用解法。王本利团队基于有限元方法, 探讨输送管道的流固耦合问题, 并研究了输送参数对输送管道的固有频率的影响。曹亮团队^[14]探讨了不同输送管道形状与液压的流固耦合振动机理。喻萌团队基于 ANSYS 软件对不同边界条件的管道与液体的流固耦合作用, 并对振动特性进行研究。杨章锋团队基于 ADINA 流体仿真软件, 对海底管道及其内部流体进行流固耦合分析, 讨论了跨距、流速、管道大小对固有频率的影响。周知进团队^[1]基于 ADINA 数值分析了深海扬矿系统中, 矿石不同输送浓度、大小, 不同的管道截面尺寸下流固耦合, 并讨论其对扬矿系统固有频率的影响。

王煜通采用数值模拟研究了研究航空发动机液压管路的瞬态振动, 并且优化了卡箍约束方式以适应不同载荷条件^[2]。谡冉曦利用 Workbench 分析了弯管耦合振动, 发现流体附加质量显著降低管道固频, 而弯曲刚度影响较小。李青等则研究了流固耦合下流速与压强对管道振动的影响, 发现压强的影响更为显著。这些研究体现了数值模拟在管路振动分析中的有效应用。

3 液压系统压力波动的流固耦合理论

脉动式压力波动会对管道产生强迫运动, 其运动频率如果跟管壁的固有频率或者液压泵的转动频率接近将会产生流固耦合振动。而该振动将会对液压系统带来灾难性后果, 其将可能导致液压管道爆裂或者液压泵爆裂, 所以对于研究是十分必要的。

焦宗夏团队^[3,4]探讨了飞机液压系统中压力波动所触发的流固耦合振动机理, 并采用一种分布式流体脉动主动控制策略对其控制。崔安娜团队运用数值模拟了最小波速等间距管道模型, 探讨了压力波与管道壁应力的响应, 并且揭示了压力波对管道振动特性的影响。杨超团队对压力波对液压系统的稳定性进行研究。何志勇团队基于流固耦合振动机理, 设立了一种液压压力脉动滤波器, 从而大大抑制了压力脉动。

Zhang 及其团队^[5]针对航空领域的液压管路系统, 设计了一个综合性的 14 方程流固耦合模型, 该模型特别纳入

了摩擦效应。通过 Z 型管实例的详细分析, 他们将模型的数值预测结果与实验数据进行了深入对比, 有效验证了模型的高准确性。Quan 等人也在液压管路系统的研究中所建树, 他们同样采用了包含 14 方程的流固耦合模型, 但研究焦点放在了不同摩擦简化策略对系统振动特性的具体影响上, 进一步丰富了该领域的知识体系。在定常流动与管路系统动态耦合的研究领域内, Ding 等研究者^[6,7]的工作尤为引人注目。他们基于先进的 Timoshenko 梁理论框架, 构建了一个高度非线性的耦合动力学模型。为了求解这一复杂模型, 他们创新性地引入了有限差分法, 成功计算出系统的固有频率及振动响应特性。尤为重要的是, 他们的研究发现, 随着流速和初始位移幅值的增加, 非线性系数对系统频率的调节作用变得尤为显著, 为相关领域的设计优化提供了重要理论依据。

4 液压系统脉动可靠性研究

Gilson S. Porciúncula 等人提出了一个系统化和可靠性参数分析的液压平台, 其目的是研究液压系统位置控制方法。Bimal Samanta 等人通过应用故障树方法对液压铲系统可靠性进行了评估。Muhammad Al-Zahrani 充分考虑了节点要求和管道粗糙度情况后对流体输送系统的液压可靠性进行了分析。

赵静一、姚成玉综述了液压系统的可靠性研究进展, 归纳出液压系统可靠性设计、可靠性分析和可靠性试验三类。陈东宁等人提出一种新的基于模糊贝叶斯网络的多态系统可靠性分析方法。在对车辆液压悬挂的可靠性分析中采用该方法对其验证, 其结果表明该方法充分挖掘了其不确定信息, 大大提高了其可靠性。马琳等人以 LGT2001 型公铁两用牵引车液压系统为对象, 结合故障率预计法、评分估计法及基本可靠性预计一般方法对该系统可靠性进行了分析。吴舟超等人以某船舶液压起货机的液压系统为对象进行故障树分析, 采用故障树分析手段, 建立起起货机液压系统的可靠性框图, 利用计算起货机液压系统的可靠性, 通过计算结果对关键元件进行分析, 并进行了优化设计研究。王秀霞等人分析了工作介质技术状态的变化对航空液压系统工作可靠性的影响。石健等人采用分层聚类法和广义随机 Petri 网相结合建立了机载液压系统可靠性模型。苏春团队基于蒙特卡洛建模技术对液压系统进行了研究, 其主要研究内容主要有: 对液压系统动态可靠性进行分析; 分析了液压元器件的故障分布模式, 以及液压元器件修复后故障分布模式。

5 未来需要探索的内容

目前, 对深海装备液压系统流固耦合非线性振动机理研究主要集中在基础性、单一环境中, 而具体针对深海采矿装备液压系统受外部激励引起液压管道系统耦合振动, 振动对系统密封性与液压元件可靠性影响还需要开展的研究以下工作:

第一,结合深海工作环境复杂多变的特点,从现有液压系统流固耦合振动基础理论与可靠性理论出发,将液压油压力波动和管道振动相结合,研究深海工程装备液压系统在不同外部压力下内部液压油波动—油管接头—外部流体三者耦合作用下管道接口密封性能的影响。

①研究陆地上深海工程装备液压系统压力波动导致流固耦合效应对接头密封性能的影响。

②研究深海工程装备液压系统在水压 0~120MPa 范围内时,水压大小对压力波动特性的影响。

③针对深海环境下不同水压液压系统脉动引起管道振动与流固耦合效应,导致液压油压力波动,研究管道接口影响密封性能的因素。

第二,深海工程装备在工作过程中,液压管道迎水面由于水流冲击,引起管道流体之间剧烈的耦合效应,研究深海工程装备液压系统在工作或行进过程中流固耦合效应对管道接头密封性能的影响。

①研究深海工程装备在行进过程中不工作时,海流冲击液管道时流固耦合效应对接头密封性的影响。

②研究深海工程装备在行进过程中一边前进一边工作时,海流与迎水流速(迎水流就是管道与海水相对速度)、管道、内部液压油三者耦合效应对管道接头密封性能的影响。

③建立有外部流体冲击管道时液压油压力波动引起流固耦合效应的管道振动模型,求其解析解。

第三,深海工程装备液压系统流固耦合效应对液压元件疲劳损伤与可靠性的影响。

①研究深海环境下液压系统液压油压力波动引起流固耦合效应对各种液压元件可靠性影响,探索液压系统由于流固耦合效应导致密封失效原理研究。

②针对深海环境下以液压系统作为动力源的工程机械,研究有效衰减液压系统压力波动幅度的理论与技术。

6 结语

为此,论文综述了管道振动机理,液压系统压力波动

的流固耦合机理,液压系统脉动可靠性优化设计研究,具体针对深海采矿装备液压系统受外部激励引起液压管道系统耦合振动,振动对系统密封性与液压元件可靠性影响提出急需展开如下研究工作。研究高压、海水冲击对液压系统管道振动的影响,揭示不同水压、不同水流速度对液压软管振动动态响应规律;研究外部激励引起的管道振动对液压油压力波动的相互作用机理,深入研究液压油压力波动导致的管道—液压油—密封圈三者流固耦合效应,揭示界面处密封元件、管接头位移变化与压力波动之间的内在关系;在获得管道结合处界面位移变化规律的基础上,提出深海工程机械液压系统密封原理和方法;研究液压系统振动造成液压元件疲劳破坏规律,建立海洋环境下液压系统可靠性模型。研究成果为海洋工程机械液压系统优化设计和密封原理以及液压系统可靠性优化设计提供技术支持。

参考文献

- [1] 周知进,卢浩,王钊,等.垂直提升管道输送过程不同参数下流固耦合分析[J].中国海洋大学学报,2013,43(1):87-92.
- [2] 王煜.航空发动机液压管路瞬态振动特性研究[D].天津:中国民航大学,2020.
- [3] 欧阳平超,焦宗夏,刘红梅.分布式液压流体脉动主动控制方法[J].北京航空航天大学学报,2007,33(9):1060-1063.
- [4] 焦宗夏,陈平,华清.液压能源管路系统振动主动控制的理论研究[J].北京航空航天大学学报,2002,28(4):465-469.
- [5] ZHANG Q W, KONG X D, HUANG Z P, et al. Fluidstructure-interaction analysis of an aero hydraulic pipe considering friction coupling[J]. IEEE Access,2019,7:26665-26677.
- [6] DING H, JI J, CHEN L Q. Nonlinear vibration isolation for fluid-conveying pipes using quasi-zero stiffness characteristics[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019,121:675-688.
- [7] XIA T, HU D. Parametric resonances of Timoshenko pipes conveying pulsating high-speed fluids[J]. Journal of Sound and Vibration, 2020:115594.