

LNG 低温潜液泵结构及设计分析

罗资琴¹, 任永平^{2,3}, 陈叔平², 冯琛然², 葛娟³

(1. 兰州石化职业技术学院, 兰州 730060; 2. 兰州理工大学, 兰州 730050;

3. 甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司, 兰州 730070)

摘要: 详细介绍了大型 LNG 储罐和 LNG 船用低温潜液泵的导流器、扩散器、TEM、电机、电缆、轴承等主要结构的特点, 分析了电机冷却及润滑、泵内气蚀、推力自平衡、监测与保护等关键技术, 提出了该种类型 LNG 低温潜液泵的设计要点。

关键词: 低温潜液泵; LNG; 结构; 设计

Structure and design analysis of submerged LNG cryopump

Luo Ziqin¹, Ren Yongping^{2,3}, Chen Shuping², Fen Chenran², Ge Juan³,

(1. Lanzhou Petrochemical College of Vocational Technology, Lanzhou 730060, China;

2. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Gansu Lanpec Technologies Co., Ltd, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Inducer, diffuser, TEM, motor, cable and bearing are the main parts of submerged cryopump for large LNG storage tanks and LNG carriers. The paper described their characteristics in detail, analyzed the key technologies such as motor cooling and lubrication, pump cavitation, thrust self-balancing, monitoring and protection, proposed the design essentials of such type of submerged LNG cryopump.

Keywords: Submerged cryopump, LNG, Structure, Design

1 前言

液化天然气 (Liquefied Natural Gas, 简称 LNG) 以每年 15% 以上的需求增长率已经成为我国能源领域一门迅猛发展的新兴产业。大量的 LNG 接收站、LNG 工厂和 LNG 储备站在各地纷纷建立, 成为优化能源结构、缓解能源供应压力、实现社会和环境可持续协调发展的重要举措。在 LNG 的生产、运输、接收及利用过程中, LNG 的转移都需要用到 LNG 低温潜液泵。近年来低温材料、密封技术、控制技术加工及加工工艺的不断提高, 使 LNG 低温潜液泵的性能大大提升, 应用也更加广泛。目前, 日本的 Nikkiso、Shinko 公司, 美国的 J. C. Carter、Ebara、ACDCRYO 公司, 法国的 Cryostar 公司等成为世界上 LNG 低温潜液泵的主要供应商。

由于国内目前尚无自主研发的大型 LNG 储罐及 LNG 船用低温潜液泵, 已建 LNG 项目均使用了国外进口产品。在我国 LNG 产业迅猛发展

的大背景下, 了解并逐步研发具有自主知识产权的国产化 LNG 低温潜液泵, 对我国 LNG 产业的健康发展尤为重要。

2 LNG 低温潜液泵结构

大型 LNG 储罐和 LNG 船结构特殊, 在罐体底部开孔接管将泵安装在外会对罐体造成较大影响, 此外泵的密封和保冷难度较大, 因此, 大型 LNG 储罐及 LNG 船向外输送 LNG 时必须采用潜液泵。潜液泵通常安装在储罐底部, 每台泵设置一根竖向泵井, 泵井与储罐底部之间设置底阀。当泵通过泵井上部吊装到泵井底部时, 在重力作用下, 泵的底座将底阀压开, 储罐空间与泵井连通。需要维修时, 泵在泵井内被提升的过程中将失去作用在底阀上的重力, 底阀在弹簧和储罐内静压共同作用下将自动关闭, 泵井被封住, LNG 无法进入泵井内部。泵井在泵安装时可起到导向作用, 在检修时可将泵从泵井中取出, 同时泵井也是泵的排出管, 与储罐顶部排液管连通。大型

收稿日期: 2012-04-23

作者简介: 罗资琴 (1966-), 女, 副教授, 主要从事低温工程的教学和科研工作。

LNG 储罐和 LNG 船用低温潜液泵的结构如图 1 所示,为多级离心泵,属于全浸润型,可进行变频调速。主要结构有:导流器、扩散器、电机、主轴、轴承、叶轮、推力自平衡机构(Thrust Equalizing Mechanism,简称 TEM)、振动监测器等。

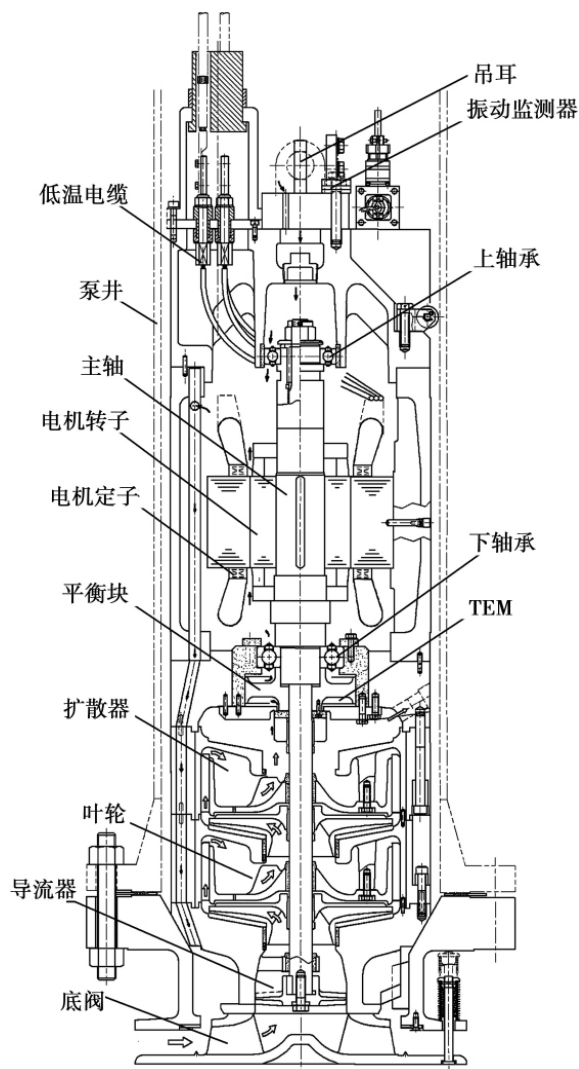


图 1 LNG 低温潜液泵

Fig. 1 Submerged LNG cryopump

2.1 导流器

导流器设置在 LNG 低温潜液泵的进液口处,由导流腔和安装在主轴上的诱导轮组成,早期的 LNG 潜液泵采用叶轮状诱导轮用于改善净吸入压头(Net Positive Suction Head Requirements,简称 NPSHR)到 20 世纪 70 年代,源于火箭燃料泵送技术的高强度螺旋状诱导轮被用于 LNG 低温潜液泵。螺旋状诱导轮如图 2 所示。如今,通过改变诱导轮的叶片数量、叶片安装角、导程及进出口轮毂比等参数可设计出能够满足特定要求的导

流器。导流器的主要作用是减少进液口处流体阻力,降低 NPSHR,并能有效防止进液口处产生气蚀,提高泵的运行平稳性。

2.2 扩散器和 TEM

LNG 低温潜液泵的叶轮轴和电机转子同轴,叶轮工作时由于流体运动和机械结构产生的不平衡造成的径向力和轴向力,直接影响电机和轴承的使用寿命及泵的维修周期,几乎所有的 LNG 潜液泵都采用了某种形式的液压平衡系统来平衡径向力和轴向力,通常径向力是由扩散器来消除的,轴向力则是由 TEM 来平衡。

扩散器安装在叶轮的上部,用来平衡 LNG 作用在叶轮上的径向力。LNG 被叶轮带动进入扩散器,沿螺旋状扩散器叶片向上流动,此过程具有良好的液压对称性,理论径向力为零^[1]。扩散器如图 3 所示。

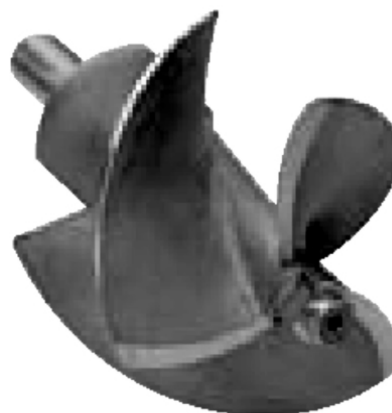


图 2 螺旋状诱导轮

Fig. 2 Spiral inducer



图 3 优化的扩散器及反向流道

Fig. 3 Optimized radial diffuser and return channel

TEM 设置了一个固定的径向孔和可变的轴向孔, LNG 流经折流板与平衡块之间的可变轴向孔时,作用在平衡块上的压力会发生变化,当平衡

块下方的反作用力与平衡块上端出口的压力相等时,即可实现轴向力的平衡^[2]。在整个流量范围内,通过平衡块的上下移动形成孔隙变化来调节轴向力的技术经过多年的实际应用被证明既灵活又可靠,近年来得到广泛采用。

2.3 监测与保护

LNG 低温潜液泵中电机转子、叶轮、扩散器叶轮、诱导轮等部件被布置在一根主轴上,由于质量的不对称性在运转过程中会发生振动。为了解泵的振动情况,目前通常采用的方法是在泵的顶板上部安装一个压电式加速度传感器用来监测系统的振动。如果振动超过规定的标准,系统自动报警。

监测 LNG 低温潜液泵性能最有效的方法是采用分布式控制系统(Tributed Control System,简称 DCS)。对泵的电流、流量和压力进行监测可以了解泵的实际运行情况,如果上述参数出现明显异常,表明泵需要进行维修。

为了保护泵的正常运转,电气系统中的继电器应具有低电流和过电流保护装置。通常电流强度减小表明泵的入口压力降低,电流增大说明存在机械故障或电缆异常,此时需要对泵进行检查维护。此外,DCS 系统还应具备低入口压力和低流量保护功能,当泵的入口压力低于设定值时或工作流量小于泵的最小流量时装置应能报警,目前的大多数 DCS 系统都拥有良好性能,能够满足 LNG 潜液泵的操作需求^[3]。

2.4 电机与低温电缆

LNG 低温潜液泵的电机浸没在 LNG 中,处于无氧环境,消除了机械密封和其潜在的泄露危险,主要优点是安全。电机能够被 LNG 直接冷却,无需其他冷却方式,尺寸仅为风冷电机的一半,电机效率较高,结构紧凑。由于 LNG 低温潜液泵功率较大,从电压为 380 伏的 5 千瓦到电压高达 6600 伏的近 3 兆瓦,电机要求有较大的启动系统,启动电流约为泵满载工作电流的 6.5 倍。为了降低启动电流,软启动技术、自耦变压技术和变频驱动技术已被广泛应用于 LNG 潜液泵中^[4]。电机如图 4 所示,采用 3 相鼠笼式设计,为确保定子转子不受影响,铜绕组线圈采用环氧树脂绝缘漆进行保护,并进行低温处理,确保电机的绝缘性能。通过真空浸渍处理,消除了定子硅钢叠片固化过程中

产生的空气间隙,防止发生局部放电和电晕对绕组造成破坏^[5]。



图4 LNG 潜液泵电机

Fig. 4 Motor of submerged LNG cryopump

LNG 低温潜液泵电缆处于低温的 LNG 中,需要特殊设计并采用耐低温材料,在 -200°C 低温下能保持足够的弹性和韧性,且具有良好的绝缘性。低温电缆一般在导体表面依次涂覆半导体材料、绝缘体材料及聚四氟乙烯保护层,最外面为特氟龙与不锈钢网壳保护套,电缆在出厂前还应做 -200°C 的低温试验,确保其各项指标符合要求。

2.5 轴承

轴承是任何旋转机械整体设计的重要组成部分,LNG 低温潜液泵轴承的操作条件非常苛刻,要承受 -162°C 的低温,且无法进行外部润滑,同时由于工作环境和检修条件限制,其应具备高转速和长寿命的特点,因而制造和组装的工艺技术要求较高。如图 5 所示,用于 LNG 低温潜液泵的



图5 LNG 低温潜液泵轴承

Fig. 5 Bearing for submerged LNG cryopump

轴承一般内外圈和滚珠采用低合金钢或高碳不锈钢材料,保持架为有机氟树脂材料,两片锚固成型,整体防锈,采用 LNG 自润滑。近年来,氮化硅

陶瓷球轴承被广泛用于 LNG 低温潜液泵,该类轴承的滚珠采用硬质陶瓷球,在运行过程中不断打磨钢质滚道,形成了“自我修复”的效果,从而保持较高水平的表面光洁度和限制表面损伤,大大提高了耐磨性和疲劳寿命。

3 可靠性及设计要点

3.1 可靠性分析

大型 LNG 储罐和 LNG 船输送系统的可靠性非常重要,一般需要安装 2 台以上的 LNG 潜液泵,每台泵应能实现 24 小时不间断持续工作若干天,要求泵具备良好的工作稳定性。LNG 的转移通常接近其沸点,对于输送系统来讲,包括系统设计在内的诸多因素均需考虑,确保系统安全可靠。总结多年来 LNG 泵发生的故障,其根本原因有:

(1) 系统设计缺陷或操作不当产生的空穴现象;

(2) 泵长时间远离额定流量或处在最佳效率点之外运行;

(3) 液体中含有碎片或污染物。

由于 LNG 装置系统在运行前必须进行吹扫置换,且工作中天然气都进行过净化处理,系统通常是洁净的,故(1)、(2)是产生故障的主要原因^[6]。在实际运行过程中,为了确保输送系统的可靠性,设计人员和运营商必须对系统的工作环境进行了解,并需要对操作人员进行技术培训。

3.2 设计要点

在 LNG 低温潜液泵的设计中,首先要确定电机转子和主轴的最佳结构,以实现良好的电气性能和轴体刚度,通过计算来确定轴承的尺寸、跨距和轴径。此后可进行叶轮设计,LNG 低温潜液泵通常采用分段轮毂将各级叶轮精确地固定在整体锻造的一根主轴上。叶轮和扩散器在特定速度、最佳轮毂直径和高度下应能够相互匹配^[7]。近年来多采用 CFD 方法来反复计算得出满足水力特性要求的各个设计参数,并采用快速成型法制作几何模型用于水力测试,如果测试结果符合 CFD 计算预期,表明 LNG 潜液泵的设计目标基本实现。

叶轮和扩散器被做成一个转动组件实体模

型,其有限单元法分析应能保证在极限转速下具有良好的操作性能,转动组件和一侧的电机转子同时被上部轴承和位于一级叶轮下的推力轴承支撑,另外采用了直径较大、刚度和稳定性较好的整体锻造主轴,这些都有助于避免泵长时间处于最佳操作状态之外时垂直载荷导致的严重磨损,在设计时需要重点考虑。

4 结语

LNG 低温潜液泵是 LNG 产业链中的重要设备,应用非常广泛。目前国外 LNG 潜液泵的发展已经朝着大型、高效、高压的方向发展,我国尚未掌握关键核心技术,自主研发意义重大。国家对 LNG 产业的发展规划指出,今后几十年是我国天然气工业的高速发展期,大量 LNG 接收站和 LNG 工厂的规划建设,将迎来 LNG 低温潜液泵的需求高峰,了解和掌握 LNG 低温潜液泵的相关技术,有助于 LNG 低温潜液泵的正确使用和维护,同时也为国内的自主研发提供了技术参考,具有十分重要的意义。

参考文献

- [1] 梁骞,厉彦忠,谭宏博,等. 潜液式 LNG 泵的结构特点及其应用优势[J]. 天然气工业,2008,28(2):123-125.
- [2] 谭宏博,厉彦忠,梁骞,等. 液化天然气潜液泵关键技术及研发方案[J]. 现代化工,2007,27(12):52-54.
- [3] 张翼飞,全晓龙. 液化天然气(LNG)输送泵的特点与应用[J]. 水泵技术,2006(6):38-40.
- [4] Michael Cords. The History of Submerged Motor Pumps in the LNG Industry[J]. Pump and Valve,2011(2):18-21.
- [5] 孙晓玲,刘忠明,张燕. 液化天然气潜液泵的研制[J]. 低温工程,2010,174(2):20-23.
- [6] Steve Rush. Submerged Motor LNG Pumps in Send-Out System Service[J]. Pump and Systems,2004(3):32-37.
- [7] David M. Cullen,Joel V. Madison. Advanced LNG Pump Technology[J]. 中国造船,2007(11):38.1-38.10.