

结构与可靠性

双燃料发动机试验台架系统安全技术的研究和实施

李汉润, 郑 炜, 邓健星, 王朝新

(玉柴船舶动力股份有限公司, 广东 珠海 519100)

摘 要: 针对低压双燃料低速船舶发动机的特点, 为保障其试验台架使用的安全性, 在燃气站建设及双燃料试车台改造过程中, 对燃气安全技术如, 燃气双层壁管路抽风系统、天然气探测器系统、惰性气体吹扫系统、排烟系统防爆设计以及气站报警连锁及安全动作控制技术等进行研究并实施。应用表明: 采用上述技术后, 燃气站、试验台架乃至整个车间的安全用气得到保证。

关键词: 双燃料发动机; 天然气; 试验台架; 安全技术

中图分类号: TK434.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2016)06-0025-05

Safety Technology Research and Implementation of Dual Fuel Engine Test Bed

Li Hanrun, Zheng Wei, Deng Jianxing, Wang Chaoxin

(Yuchai Marine Power Co., Ltd., Guangdong Zhuhai 519100)

Abstract: With regard to the characteristics of low pressure dual fuel low speed marine engine, to ensure the safety of its test bed, fuel gas safety technologies used during the construction of gas station and retrofit of dual fuel test bed, such as suction fan system for the double-wall fuel pipes, natural gas detection system, inert gas blow system, anti-explosion design of smoke extraction system as well as gas station alarm chain and safety action controlling technology were studied and implemented. Application results showed that the safety of fuel gas usage in fuel station, test bed and the whole workshop were ensured after using the technology.

Key words: dual fuel engine; natural gas; test bed; safety technology

0 引 言

瓦锡兰公司在 2013 年推出了二冲程发动机低压双燃料技术。该技术在燃气模式下使用奥拓循环, 采用不高于 1.6 MPa 的低压供气系统供气, 主机在整个负荷范围内都能依靠燃烧气体实现稳定运行, 燃油模式和燃气模式可直接平稳切换。该技术在气体模式下运行时无须安装废气清洁系统即能符合 IMO Tier III 排放标准, 成为目前改善发动机燃油经济性、排放的有效技术方案之一。

2014 年玉柴船舶动力股份有限公司(玉柴船动)成功引入瓦锡兰公司的二冲程双燃料低速发

动机专利许可。研制的首台双燃料发动机是 5RT-flex50DF, 在该机装配的同时, 建设了供气系统和双燃料试验台架。

针对天然气易燃易爆的特性, 以及发动机台架试验及新技术验证的不稳定性, 有必要对试验台架燃气的安全使用进行专项技术方案研究, 以满足安全生产的需要。本研究工作对新建的燃气供气系统及改造的试验台架提出安全设计方案, 包括管路系统、自动化监测系统、惰性气体吹扫系统及排烟管防爆系统等, 确保双燃料发动机台架试验整套系统的安全运行。

收稿日期: 2016-02-29; 修回日期: 2016-03-30

作者简介: 李汉润(1988-), 男, 助理工程师, 主要研究方向为船舶双燃料发动机控制、安保系统, E-mail: lhrwork2011@163.com。

1 试验台架天然气供气系统概况

玉柴船动根据二冲程双燃料低速发动机的特点对现有试验平台系统研究和改造,建设安全可靠的天然气供气系统。该系统主要由除尘滤器、涡轮流量计、天然气缓冲储罐(1.2 MPa)、天然气压缩机、除油滤器、天然气缓冲储罐(2.5 MPa)、调压阀、应急关闭阀、吹扫阀及排空安全阀等组成;并设置冷却系统、氮气吹扫系统、仪表空气系统、监测/报警/控制系统、安全放散系统等^{[1][2]}。

该系统设计使用城市天然气进气管网的气态天然气,压力范围为0.2~0.4 MPa,也即压缩机的吸气压力;系统输出压力为 ≤ 1.6 MPa,实际压力根据双燃料发动机功率点的进气需求可调,一般大于1.2 MPa。

2 双燃料发动机试验台架安全技术

鉴于双燃料发动机燃气模式下天然气使用的特点,并结合天然气使用、储存的风险特性,在发动机试验台架供气系统的设计中,对气站安全进行了重点考虑及设计。在布置火灾声光报警器等消防系统外,重点实现了对燃气泄漏的放散、监测、安全吹扫及防爆功能。

2.1 燃气双壁管路抽风系统及其监测系统

基于天然气容易泄漏的特性,为了使车间内部用气安全系数达到最大化,设计了车间内部天然气双层管路布置,与发动机本身的双层管相呼应;内外管尽可能采用焊接进行连接,减少或者不采用法兰连接,以减少天然气泄漏的几率。

双层管模型如图1所示。

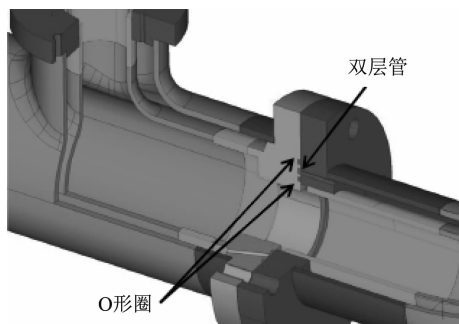


图1 双层管模型

双层管的应用使内管中的天然气在出现泄漏时第一时间仅泄漏至双层管的中间间隙,即双层管隙中,避免了直接泄漏至外界的危险。同时,为避免泄漏的天然气就此积聚在双层管隙内,另外设计有

两台抽风机,使双层管隙内的气体时刻与外界空气进行交换,及时排走泄漏的天然气^[4]。

对抽风机系统抽风能力的要求是:双层管隙容积气体的置换率至少达到30次/小时;或双层管隙内的压力(负压)小于 -2×10^3 Pa,可安装负压传感器进行监测报警及动作。

抽风机的位置设置在车间外(图2),接至进入车间的燃气管双层管隙,而双层管的开口(也即吸气口)在车间外开阔处,该处必须位于天然气安全区域,即:无易燃易爆气体体积聚的可能性。

另外,为使双层管隙的泄漏可以实时得到监测,在双层管隙的抽风上游处设计有天然气探测器,探测器的数量一般为2~3个,以使泄漏位置更容易定位。

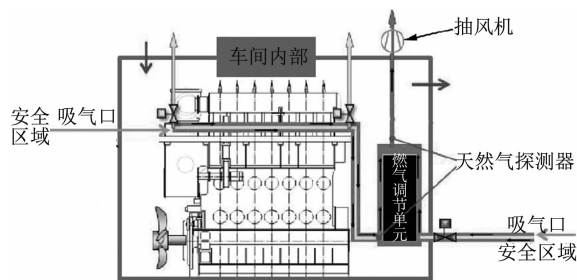


图2 双层管隙抽风系统

2.2 天然气探测器系统

天然气探测器的主要作用是发生泄漏时及时报警,不至于在燃气泄漏严重时才被发现,能有效避免安全事故的发生。

在天然气站建设及试车台架改造中,根据天然气特点及发动机特性布置燃气探测器,布置方式如图3所示。

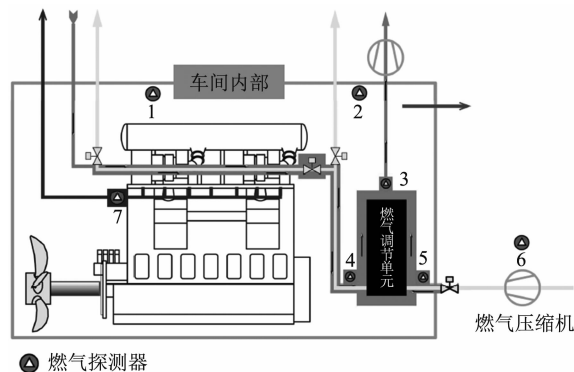


图3 燃气探测器布置

(1) 基于天然气比空气轻的特性,在车间内部试车台位上方,也即双燃料发动机上方布置探测器(#1和#2),探测器数量一般 ≥ 2 个,主要用于探测发动机燃气管路的天然气泄漏。

(2) 由于车间内部天然气管路均为双层管设计, 少量的泄漏并不会直接泄漏至外界空气中, 而是通过双层管隙被车间外的抽风系统抽走。因此, 监测双层管隙的天然气的泄漏是比较关键的。如图 3 所示, 燃气调节单元上部及左右的探测器均连接双层管隙。燃气调节单元上部的管子即为抽风总管, 此处是必不可少的探测器 (#3) 安装点; 而燃气调节单元左右侧的探头安装在双层管上 (#4 和 #5)。三个探测器相互结合能很好地定位泄漏点, 大大减少查找泄漏位置的时间。具体说明如下:

① 探测器#3 检测到天然气, 探测器#4 和#5 未检测到, 则可判断燃气调节单元内部泄漏。

② 探测器#3 和#4 检测到天然气, 探测器#5 未检测到, 且探测器#3 的浓度远低于#4 的, 则基本可判断天然气泄漏来自于试验台架侧。

③ 反之, 探测器#3 和#5 检测到天然气, 探测器#4 未检测到, 且探测器#3 的浓度远低于#5 的, 则可判断天然气泄漏来自于进入车间至燃气调节单元的双层管部分。

(3) 气站内压缩机的功能是将低压天然气压缩至较高压力, 故压缩机上方也须布置探测器, 如图 3 中的探测器#6。

(4) 图 3 中探测器#7 为双燃料发动机本身自带的, 旨在检查发动机内部气缸工作过程中的泄漏情况^[3]。

多个天然气探测器组网并由主机 (控制中枢) 进行集中监测、处理, 如图 4 所示。探测器采用总线方式组网, 有效减少了电缆的敷设, 实现了精简布置。



图 4 探测器及主机组网

天然气的燃烧浓度界限为占空气比例的 5% ~ 15%, 5% 以下浓度时天然气过于稀薄, 而大于 15% 时天然气含量又过高, 两种情况均不会导致燃烧。故在设置天然气报警浓度时, 以 5% 的浓度下限 (LFL) 作为浓度 100%, 设置多级报警及动作, 如图 5 所示。浓度设置也可根据实际环境及安全级别设定。

① 浓度 $\geq 20\%$ LFL 时, 触发主机浓度报警。

② 浓度 $\geq 40\%$ LFL 时, 主机发出触发动作至双燃料发动机台架安保系统, 切断整个气站的天然气供应; 同时双燃料发动机切换燃料, 即由使用天然气转向使用柴油。

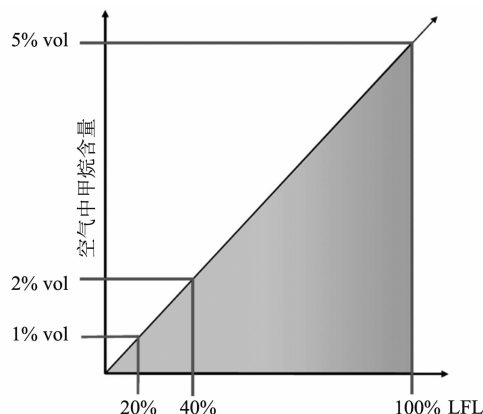


图 5 空气中甲烷含量与浓度下限的设定

2.3 惰性气体吹扫系统

当车间内燃气管路出现泄漏, 试车台架出现燃气故障或天然气系统须要检修时, 为确保安全, 有必要采取有效措施将所有残余的天然气清除干净。故引入惰性气体吹扫系统, 采用不可燃烧的气体将管路、系统内部残余的天然气置换掉。一般采用氮气进行吹扫。

如图 6 所示, 分别针对车间内部与外部设计了两套相对独立的吹扫系统。

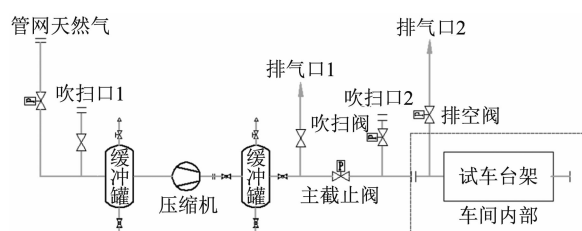


图 6 氮气吹扫系统简图

(1) 车间内部吹扫系统

由吹扫口#2 及排气口#2 组成, 采用气动阀进行自动控制, 并设有两种模式: 远程手动操纵及系统自动控制。

① 远程手动操纵: 可手动打开吹扫阀和排空阀, 使氮气从吹扫口#2 进入, 从排气口#2 中吹出, 实现车间内部燃气管路内天然气的置换。

② 系统自动控制: 由台架发动机控制安全系统操纵, 当出现天然气泄漏等故障时, 由控制安全系统自动打开吹扫阀和排空阀进行氮气吹扫。应当注意的是, 这种控制方式中的主截止阀必须与吹扫阀和排空阀实现互锁。

(2) 车间外部吹扫系统

该系统一般是在须要对气站进行检修时才使用,使用频率较小,因此该吹扫系统的阀门均为手动阀,氮气由吹扫口#1吹入,由排气口#1吹出,对整个车间外的气站及管路进行冲洗。因气站及车间外围管系容量巨大,如氮气容量不足,在保证安全的前提下,可使用空气代替。

冲洗介质的工作压力一般为 0.7×10^6 Pa,因燃气压力一般较高,在任意吹扫系统的自动化逻辑或操纵顺序上,应优先打开排气口进行排空,直至燃气压力较低时(由燃气压力传感器监测)才能打开吹扫口。自动吹扫逻辑中,吹扫口动作应与高压缓冲罐内燃气压力实现连锁,并根据吹扫介质的压力、管径调校吹扫口开启时间。吹扫时间按燃气管容量3~5倍的气体置换来计算。

2.4 排烟系统防爆设计

发动机使用天然气作为燃料时,由于失火、燃烧不充分等原因,排气系统中会含有未燃烧的天然气。

此处引入甲烷逃逸值。图7为台架试验时实测的排气系统中的甲烷含量。正常情况下排气成分中甲烷含量应远低于爆炸下限浓度,即5%。柴油模式下甲烷接近于0,天然气模式时稍高,达到 900×10^{-6} ,但都远低于爆炸下限 $50\,000 \times 10^{-6}$ 。

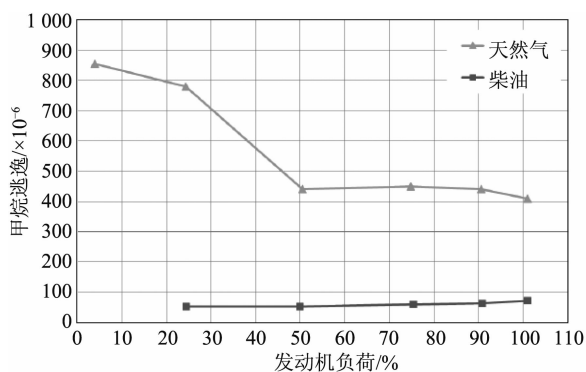


图7 甲烷逃逸曲线图

但如由于故障等原因,甲烷逃逸量达到爆炸极限时,由于排烟系统中容易出现火花等着火点,必须采取有效措施,防止爆炸发生。故试验台架排气系统的设计必须保证天然气不会在排烟管中聚集,且排烟系统的设计要具备安全防爆性。此处引入爆破片,安装在增压器后的排烟管上,它可安全地卸除爆炸压力。爆破片的位置选择应避免爆破后所喷出的高温燃烧气体伤害到人员。考虑到正常情况下发动机满负荷时的排气背压约为300 mm水柱,即约 3×10^3 Pa,选择设计爆破压力为 (10 ± 2.5)

$\times 10^3$ Pa的爆破片,即爆破压力为 $(7.5 \sim 12.5) \times 10^3$ Pa,约为2~3倍的排气背压。爆破片应满足国标 GB567.1的要求。

2.5 气站报警联锁及安全动作控制

本节主要基于气站现有的模型探讨气站安全报警及气动阀门安全动作控制的相关逻辑设计。主要从两个方面入手:一是故障程度,递进分别为报警显示、声光报警、气站急停;二是发动机系统与气站系统信号的交互及响应。

2.5.1 报警等级定义及动作要求

显示报警:不会影响燃气系统正常运行,仅是起到提示作用的一些报警信息。例如:天然气管网进气压力波动、调压阀后压力、介质温度等。这些报警点仅是略微偏离正常的工作范围,报警仅起到预警作用,气站阀门不动作。

声光报警:当报警点偏离正常工作范围较远但仍能勉强支持燃气运行;或燃气探测系统检测到少量燃气泄漏;或气站压缩机的运行介质如冷却水、滑油等低于正常值,均触发声光报警。此类报警意味着气站的运行状态已处于异常,必须进行处理。此时建议停止试车平台试车,直至故障解决。

气站急停:当出现严重故障时,如燃气浓度过高,火焰探测器检测到火焰或运行介质超出气站运行极限时,均会触发气站急停。另外,在集控室、气站等关键位置均设有气站急停按钮。气站急停将使气站所有启动阀门动作,如图8所示:气动阀A/B/C关闭,气动阀E打开,气动阀D维持关闭^{[5][6]}。

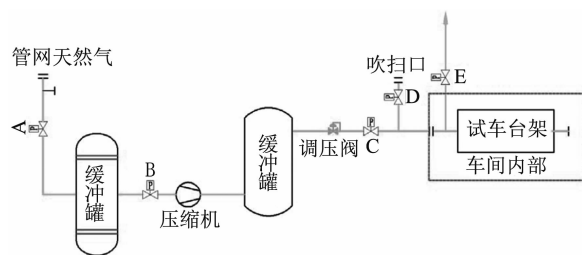


图8 气站气动阀门简化模型

2.5.2 气站与发动机系统安全信号交互及响应

气站故障:当气站自身存在故障时,气站将发送信号给发动机系统,发动机无法进入燃气模式。气站系统内部故障导致无法正常供气,气站系统将视情况选择关闭主截止阀,开启排空阀、氮气吹扫阀。

发动机燃气模式故障:发动机出现故障无法进入燃气模式时将发送信号给气站,气站根据此信号执行相应操作,如关闭主截止阀、打开排空阀等,

整个气站系统根据安全级别要求保持供给压力(待机状态)或完全停止。

3 结 论

上述安全技术已在双燃料发动机台架试验过程中同步进行了验证工作。验证表明: 该安全技术能对台架试验的安全进行有效监控, 保证发动机试验乃至整个车间生产的安全性。同时, 该系统中的安全技术也可用于天然气船舶的安全监控措施。但试验台架和船舶安装的工况存在一定差异, 须在实际应用中采集数据, 并做验证和调校。

目前, 排放法规日益严苛, LNG 作为船舶清洁代用燃料有着广泛的应用前景。如此, 对试验平台及船舶的燃气安全技术有必要进行更深入的研究, 使其应用更加稳定可靠。

参考文献

- [1] 中国石油天然气集团公司安全环保部. 中国石油天然气集团公司安全经验分享知识读本 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- [2] 石仁委. 天然气管道安全与管理 [M]. 1 版. 北京: 中国石化出版社, 2015.
- [3] JB/T 11792. 2-2014, 柴油/天然气双燃料发动机 [S].
- [4] 赵秀雯. 天然气管道安全 [M]. 1 版. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [5] 中国船舶社. 天然气燃料动力船舶规范 [R]. 2013.
- [6] BV 船级社. Design and installation of dual fuel engines using low pressure gas rule note: NR481 DT R02 E [S]. Bureau Veritas. 2007.
- [5] HAMMOND J M, LEE R M. A non-contact piezoelectric torque sensor [C]. IEEE Frequency Control Symp., 1998: 715-723.
- [6] BECKLE Y J, KALININ V, LEE M, et al. Non-contact torque sensors based on SAW resonators [C]. IEEE Frequency Control Symp., 2002: 202-213.
- [7] 徐继辉. 应用与船舶传动轴扭矩检测的声表面波传感器设计 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [8] 任姝. 声表面波扭矩传感器结构设计及信号提取方法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [9] TIERSTEN H F, SINHA B K. A perturbation analysis of the attenuation of surface waves due to the electrical conductivity of thin surface films and air loading [C]. IEEE Int. Ultrasonics Symp., 1976, pp: 486-490.
- [10] SHRENE A I, ELSELE D, BARDONG J, et al. High-precision signal processing algorithm to evaluate SAW properties as a function of temperature [C]. IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., 2013, 60 (4): 805-813.
- [11] KALININ V. Influence of receiver noise properties on resolution of passive wireless resonant SAW sensors [C]. IEEE Int. Ultrasonics Symposium, 2005: 1452 - 1455.
- [12] 徐芝纶. 弹性力学 (上册) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006
- [13] MENDEZ I M R, HALL T J, ZAGZEBSKI J A. Performance of an adaptive multitaper method for reducing coherent noise in spectral analysis of ultrasound backscattered echoes [C]. IEEE Joint UFFC, EFTF and PFM Symp., 2013, pp: 429-432.
- [14] STDFCA P, MOSES R L. Introduction to spectral analysis [M], Prentice-Hall, 1997.
- [15] CHOI Y H. Systematic approach to MUSIC estimation with minimization of its cost function [J]. Electronics Letters, 1999, 35 (8): 620-621.

(上接第 19 页)