

双燃料低速发动机供气系统分析

王 涛, 李善从, 吴 璇, 邹 盛

(沪东重机有限公司, 上海 200129)

摘 要: 从系统原理及组成出发对双燃料低速发动机的低、高压供气系统进行了介绍; 对供气系统的技术难点进行了分析; 并对国内外供气系统的发展现状进行了阐述。

关键词: 双燃料发动机; 供气系统; 结构; 发展现状

中图分类号: TK434.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2014)06-0022-04

The Analysis on Fuel Gas Supply System for Low Speed Dual Fuel Engine

Wang Tao, Li Shancong, Wu Xuan, Zou Sheng

(Hudong Heavy Machinery Co., Ltd., Shanghai 200129)

Abstract: The principle and composition of the low and high pressure fuel gas supply systems for low speed dual fuel engines are firstly expounded. And then the technical difficulties of the systems are analyzed. Finally, the state of the art of the systems at home and abroad are expounded.

Keywords: dual fuel engine; fuel gas supply system; structure; development status

0 引 言

世界经济的快速发展, 引发了世界对能源需求的快速增加。天然气以其清洁、方便、高效的特性成为替代煤炭、石油最合适的优质新型能源。随着国际油价的高企及排放要求的日趋严格, 以天然气作为船舶推进主燃料已经成为船舶推进技术发展的重要趋势之一; 以天然气和柴油为燃料的双燃料柴油机以其良好的经济性、排放性、较高的热效率、燃料选用灵活等优势, 越来越受到国内外船东的青睐。

相比传统低速柴油机的辅助系统, 双燃料低速发动机须要增加一套天然气供气系统, 为双燃料主机供应满足要求的气体燃料。由于天然气燃料的特殊性能, 使天然气供气系统与双燃料主机的匹配对发动机的可靠性和性能产生直接影响。继而, 与发动机配套的天然气供气系统产业也应运而生, 成为国际几大船用柴油机生产企业争相发展的领域。

本文将以试验台用双燃料发动机供气系统为例, 对供气系统的基本类型、原理和组成进行介绍。

1 天然气供气系统原理及组成介绍

双燃料低速发动机气体模式下有两种燃烧循环:

(1) 燃气低压喷射预混合燃烧 (Otto 循环): Otto 循环须要喷入适量的低压 (约 1.6 MPa) 天然气来完成燃烧做功; 该种循环以 WCH 公司的 DF 型双燃料发动机为典型代表。

(2) 燃气高压喷射扩散燃烧 (Diesel 循环): Diesel 循环须按一定比例喷入高压天然气 (约 30 MPa) 来完成扩散燃烧做功; 该种循环以 MDT 公司的 ME-GI 型双燃料柴油机为典型代表。

针对上述两种循环的双燃料低速发动机, 燃气供应系统分别为低压供气系统和高压供气系统。

1.1 低压供气系统

低压供气系统主要用于使用 Otto 循环双燃料发动机的燃气供应, 它的功能是将低温低压的液化天然气 (liquefied natural gas, 以下简称 LNG) 通过加压、汽化等过程转变为满足压力和温度要求的天

然气供应给主机。

1.1.1 低压供气系统原理及组成

低压供气系统通过将 LNG 先增压，再汽化的方式进行供气，根据 WCH-DF 主机的需求，供气压力约为 1.6 MPa。

具体工艺流程为：低温低压的 LNG 存储于低温储罐中，通过液位差形成的重力或专用的输送泵将 LNG 输送加压，并通过变频来调节输出的 LNG 流量，从而实现增压和调压的目的；增压后的 LNG 被输出到低压汽化器，在汽化器内被加热汽化为要求温度的压缩天然气 (compressed natural gas，以下简称 CNG)；CNG 通过管道经由阀组单元后进入主机燃烧。为辅助上述工艺流程的正常工作以及保障系统工作的安全性，供气系统还须配置其它辅助系统，如为汽化环节配置的供热及换热系统，为安全应急切断所配置的主机燃气管道惰性气体吹扫系统，防止天然气泄漏至机舱而配置的双层壁通风系统、控制和安全监测系统等。其原理简图如图 1 所示。所配备的相应功能模块及设备如表 1 所示。

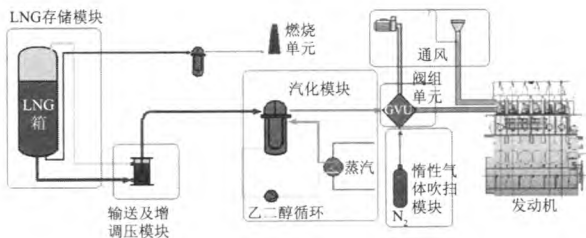


图 1 低压供气系统原理图

表 1 低压供气系统主要配备模块及设备

模块名称	功能	主要设备
LNG 存储模块	LNG 的存储和输出	LNG 低温储罐、空浴式汽化器
输送及增压调压模块	将 LNG 加压输出，输出压力<2 MPa	潜液泵或其它低温泵
汽化模块	用于将 LNG 汽化并加热到 45 ℃	汽化器、乙二醇输送泵、换热器、膨胀罐
燃烧单元	为汽化模块提供热源，并处理系统挥发天然气	锅炉、水处理单元
阀组单元	天然气进机前的控制	通断阀、压力调节阀、流量计
惰气吹扫模块	为主机吹扫供应惰性气体	压力储罐、阀门
通风系统	车间燃气管道的通风保护及监测	风机、双壁管、传感器等
控制系统	系统控制、监测	PLC、控制台、软件等

1.1.2 低压供气系统关键设备

低压供气系统主要关键设备有输送及增压调压模块、汽化模块、通风系统等，这些设备分别有如下特点：

(1) 输送及增压调压模块

其核心设备为低温增压泵，一般使用潜液泵，此类泵将电动机和泵制成一体，浸入 LNG 液体中进行抽吸和输送，安装、使用、维护方便简单，可以使用撬装方式进行模块化设计，布置或转移都非常便利。但其为低温特种设备，设计可靠性、使用和维护要求较高。

(2) 汽化模块

汽化模块一般使用二级换热方式对 LNG 液体进行汽化，第一级使用水乙二醇闭式循环系统为汽化器供给热源；第二级使用蒸汽或热水等热源加热水乙二醇溶液。其核心设备为低压汽化器，主要功能是将增压后的 LNG 等压汽化为 CNG，一般温度要求不高于 60 ℃。

(3) 通风系统

对于布置于人员工作区的燃气管道，须配置通风系统，以实现对燃气输送管道的实时监控，防止天然气泄漏对人员造成伤害。通风系统一般布置于机舱或车间内，通过双层套管的形式，对套管间的空气进行循环监测，出现泄漏则紧急启动安全报警系统。通风系统主要由将燃气输送管道与舱室隔离的双壁管、离心式风机和碳氢传感器组成，其中离心风机为关键设备，因其高静压，低流量的特殊要求，对相应设备的选择提出了较高的要求。

1.2 高压供气系统

高压供气系统主要用于 Diesel 循环的双燃料发动机燃气供应，它的功能是将低温低压的液化天然气通过加压、汽化等过程转变为满足压力和温度要求的天然气供应给主机。

高压供气系统目前主要用于 MDT 公司推出的 ME-GI 型双燃料主机的供气，其特点是供气压力高、系统复杂、建设成本高。

1.2.1 高压供气系统原理及组成

高压供气系统的基本原理与低压供气系统一致，都是将低温低压的 LNG 加压汽化后供给双燃料发动机，但其供气压力极高，根据 ME-GI 主机的负荷其供气压力变化范围在 20 ~ 30 MPa。因此，相对于低压系统，高压供气系统主要增加了高压泵等高压设备，其设备及零件设计和使用压力级别也相应增加至 30 MPa。

具体工艺流程为：低温 LNG 存储于低温储罐

中，通过液位差形成的重力或专用的输送泵将 LNG 加压，输送至高压泵的吸入端，高压泵将 LNG 加压，并通过变频来调节输出的 LNG 流量，从而实现增压和调压的目的；增压后的高压 LNG 被输出到高压汽化器，在汽化器内被加热汽化为要求温度的 CNG；CNG 通过管道经由阀组单元后进入主机燃烧。为辅助上述工艺流程的正常工作以及保障系统工作的安全性，供气系统还须配置其它辅助系统，如为汽化环节配置的供热及换热系统，为安全应急切断所配置的主机燃气管道惰性气体吹扫系统，防止天然气泄漏至机舱而配置的双层壁通风系统、控制和安全监测系统等。其原理简图如图 2 所示。所配备的功能的模块及设备如表 2 所示。

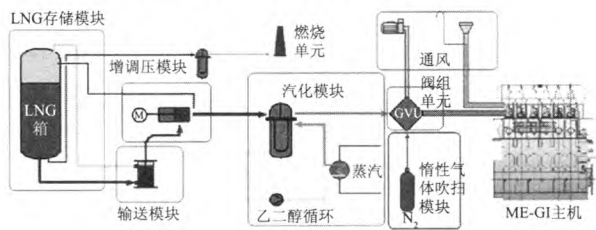


图 2 高压供气系统组成原理简图

表 2 高压供气系统主要配备模块及设备表

模块名称	功能	主要设备
LNG 存储模块	燃料 LNG 的存储和输出	LNG 低温储罐、空浴式汽化器
输送模块	将 LNG 加压输送给高压泵，输出压力 < 1 MPa	潜液泵或其它低温泵
增压模块	将 LNG 的增压及调压输出，输出压力 > 30 MPa	低温高压活塞泵
汽化模块	用于将 LNG 加热汽化到 45 ℃	高压汽化器、乙二醇循环加热系统
燃烧单元	为汽化模块提供热源，并处理系统挥发天然气	锅炉、水处理单元
阀组单元	天然气进主机前的控制	高压阀件
惰气吹扫模块	为主机吹扫供应惰性气体	压力储罐、阀件
通风系统	车间燃气管道的通风保护及监测	风机、双壁管、传感器等
控制系统	系统控制、监测、安保	PLC、控制台、软件等

1.2.2 高压供气系统关键设备介绍

高压供气系统主要关键设备有增压模块、汽化模块、阀组单元和通风系统等，这些设备分别有如下特点：

(1) 增压模块

增压模块的核心设备为高压泵，主要起增压作用，通过高压泵将 LNG 升压到 20 ~ 30 MPa，由于该输出压力远远超过了普通离心式低温泵的输出能力，因此一般选用活塞式低温泵作为高压供气系统的增压泵。这种泵利用 LNG 液体的不可压缩性可将 LNG 加压至极高的压力，同时利用变频调速功能来调节系统的流量，从而调节系统的供气压力。

(2) 汽化模块

汽化模块的核心设备为高压汽化器，一般使用二级换热方式对 LNG 液体进行汽化，第一级使用水乙二醇闭式循环系统为汽化器供给热源；第二级使用蒸汽或热水等热源加热水乙二醇溶液。高压汽化器一般选用管壳式强制水浴型汽化器，该型汽化器 LNG 处于高压管道内，加热介质处于壳腔内，高压低压由高压管道隔离，可承受较高的汽化介质压力。

(3) 阀组单元

阀组单元位于汽化器与主机之间，实现对燃气进主机的通断、泄放以及主机燃气管道的吹扫控制，是实现高压供气系统精确调压、紧急切断泄放等功能的重要设备。阀组单元由各种高压阀件、高压管路组成，除主燃气管道外，还须具备紧急工况时的惰性气体吹扫等功能；集成方式上有一体阀块式和散装集成式两种。

(4) 通风系统

高压供气系统的通分系统和低压供气系统的通风系统的主要区别是高压供气系统的双壁管由燃气管、套管和支撑附件组成，其中内管设计压力 > 30 MPa，套管设计压力 > 20 MPa，设计要求均比较高。

2 供气系统技术难点分析

由于天然气供气系统使用介质特殊，设计压力较高，使用工况复杂，使得天然气供气系统在试验台及船舶辅机的工程化过程中，面临较多的技术难点，主要有以下几点：

(1) 燃气压力调控技术

供气系统的燃气输出压力根据机型的不同，其压力范围和调压精度要求相差很大，主要涉及的技术难点如下：增压模块的压力控制及调节；主机需求小于增压泵最小流量时的压力调节；高压 LNG 回流处理；多台高压泵间的交替切换等。

(2) 汽化温度调控技术

不论是低压供气系统还是高压供气系统都须将低温液态的 LNG 加热汽化为一定温度范围内的天

然气。主机在不同负荷下运行时, 天然气流量需求会发生变化, 但汽化后温度基本保持不变, 因此要求供气系统的 LNG 汽化换热量应跟随主机的负荷变化而相应变化。其主要技术难点如下: 汽化换热平衡测算; 汽化模块设计温度控制; 不同供热需求下的燃烧单元响应匹配; 汽化模块汽化过程安全监测及防护; 测试和验证技术等。

(3) 监控安保系统设计

供气系统的设计遵循安全第一原则, 安全保护既包括系统运行的安全可靠, 也包括危险事故的安全防护, 主要技术难点如下: 天然气泄漏监测报警; 低温、可燃介质防护; 天然气泄漏时的紧急切断和安全吹扫集成及控制; 供气系统各组成设备的控制; 供气系统外围危险点监测和控制集成; 安全事故应急管理。

3 国内外供气系统发展现状

WCH-DF 主机低压供气系统, 其供气压力较低, 系统中的主要设备在国内外均有一定数量的供应商, 使得其系统集成技术相对简单。但是由于双燃料低速机推出时间较晚, 国内外已成功开发和集成的供气系统案例较少。WCH 已在其意大利建成一套 50DF 主机供气系统试验台; 另外日本 DU 公司和珠海玉柴正在建设其试车台供气系统。

MDT-ME-GI 主机高压供气系统, 由于其供气压力高, 关键设备仅在国外有较少的设备供应商, 使得其系统集成技术相对要求较高。不过 ME-GI 主机推出时间较早, 国外已成功开发和集成了较多的供气系统案例, 目前也有较多的船舶配置了 ME-GI 的双燃料低速柴油机作为主动力, 占据着双燃

料低速发动机及其供气系统的主要市场。韩国现代、斗山重工、日本三井、MDT 等企业已相继建成了自己的 ME-GI 主机试车台天然气供气系统, 并通过试车台天然气供气系统的建设, 形成了船用天然气供气系统的系统集成能力; 此外, 部分系统集成商如 TGE、MHI 等通过与主机厂的合作, 也具备了天然气供气系统的系统集成能力。以上各企业通过早期布局, 已抢占了该领域的前期市场。

国内由于市场起步晚, 目前还没有企业完成 ME-GI 主机高压供气系统的开发; 但随着天然气动力系统绿色船舶在国内市场上的增加, 国内船厂对 ME-GI 主机及供气系统的需求也将逐步增加, 国内正有越来越多的厂商投身到供气系统的开发中。目前沪东重机依靠自己在柴油机领域的优势, 已走在了国内各厂商的前列, 公司已于 2013 年组建了供气系统研发团队, 已开始了详细的开发和设计工作, 预计其 ME-GI 主机试车台供气系统将于 2015 年年中投入使用。另外, 大连柴油机厂、宜昌柴油机厂等几家国内船用柴油机生产企业也正在尝试进入该领域。

随着世界能源结构的调整, 以天然气为燃料的双燃料发动机将逐步成为未来发动机技术发展的一个主流趋势。伴随各国对天然气动力系统船舶技术的推广应用, 双燃料低速发动机及其供气系统技术将具有广阔的前景。我国在该领域由于起步较晚, 因此目前无论从天然气动力船舶, 还是双燃料低速机及其供气系统技术的发展, 均已落后于日韩等造船强国; 但随着中国国内造船企业对天然气动力等绿色船舶的推广, 双燃料发动机及其供气系统将会迎来一个较快的发展机遇期。

(上接第 8 页)

参考文献

- [1] 何学良, 李疏松. 内燃机燃烧学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990, 191-344.
- [2] 魏荣年, 王贺武. 柴油机着火滞燃期检测装置[J]. 内燃机工程, 1992(2): 50-65.
- [3] 郭志忠. 浅析运行条件对柴油机燃烧的影响[J]. 天津航海, 2001(1): 10-12.
- [4] 续晗, 姚安仁, 姚春德, 等. 基于柴油机 ω 型燃烧室缸内激波的活塞破坏研究[J]. 工程热物理学报, 2014(3): 586-592.
- [5] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999, 114-124.
- [6] Stefan Ortmann, Matthias Rychetsky. Engine knock estimation using neural networks based on a real-world database[C]. SAE 980513: 628-635.