

# LNGC-FSRU多功能蒸汽系统的应用研究

吴国顺 申波

上海中远海运重工有限公司 上海 200100

**摘要:** 文章针对蒸汽系统在船舶上的推进、发电和加热功能进行浅析,同时结合LNGC和FSRU不同工况下对蒸汽系统的特殊设计进行简要介绍,尤其针对闭式再气化加热系统和混合式再气化加热模式工况下蒸汽系统进行研究。

**关键词:** 锅炉; 蒸汽系统; 再气化加热

蒸汽系统在工业领域使用已有多年历史,为整个工业发展进程的重要组成部分。然而蒸汽系统在船舶上主要用于推进、发电或加热功能,在常规船舶上一般是一种或者多种功能组合。虽然随着电力驱动的迅猛发展,蒸汽系统因其建造成本偏高使用效率一般而慢慢被电力驱动所取代,但蒸汽系统依然是目前工业中不可或缺的重要组成。本文以13.7万方LNG运输船改装为LNGC-FSRU项目为基础,对蒸汽系统推进、发电和加热的多功能使用进行研究和浅析。

## 1 LNGC-FSRU 多功能蒸汽系统组成

LNGC-FSRU多功能蒸汽系统主要设备包括:主锅炉、经济器、废气锅炉、高低压透平、透平发电机、减

温减压站、蒸汽加热器和舱柜加热系统等。

船上配有主锅炉2台,通过双燃料(燃油/燃气)燃烧器燃烧燃料提供热源产生高压过热蒸汽,用于作为船上推进、发电和加热功能的主要热源。另外船上还配有2台经济器和3台废气锅炉,用于回收船上主锅炉和发电机排出废气中的热量回收。透平发电机产生的电力可以航行工况下所需的全部电力。在FSRU闭式再气化加热模式下,由主锅炉产生的过热蒸汽提供加热源,过热蒸汽通过减温减压站转换成低压蒸汽,然后通过蒸汽/乙二醇板将热量传递给再气化加热介质乙二醇<sup>[1]</sup>,最后实现乙二醇加热LNG气化后天然气外输。如下图1所示LNGC-FSRU多功能蒸汽系统主要流程图。

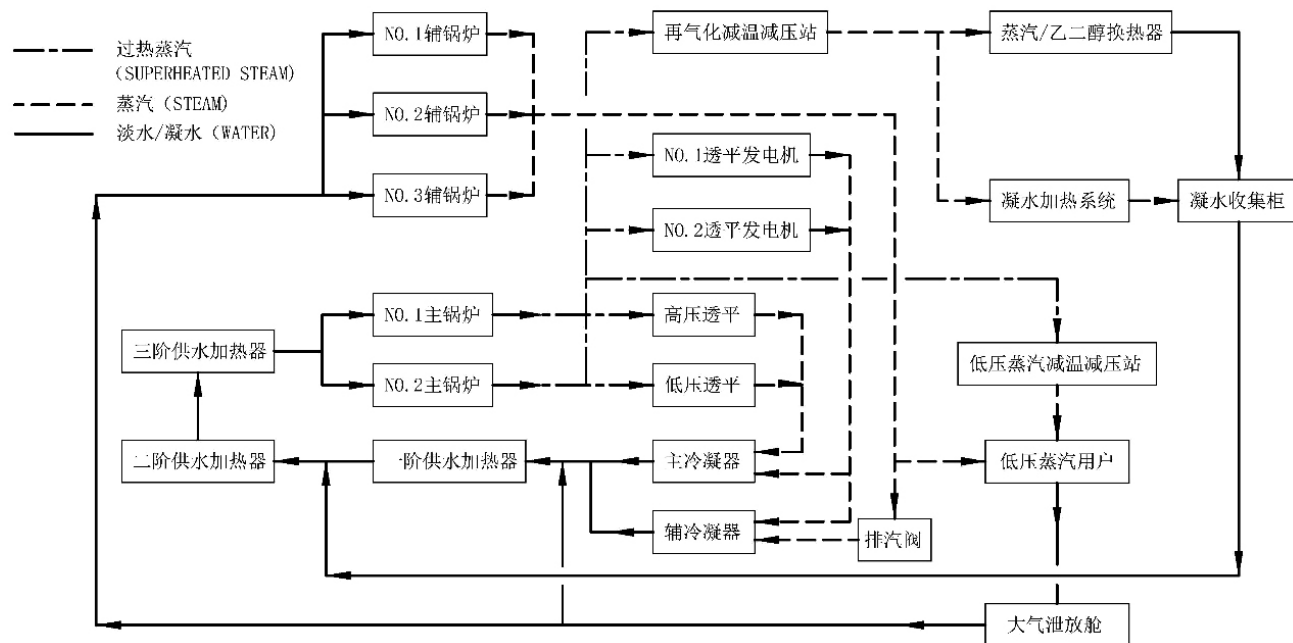


图1 LNGC-FSRU多功能蒸汽系统主要流程图

## 2 LNGC-FSRU 多功能蒸汽系统之推进功能

尽管目前新建的LNG船较多选用双燃料柴油机或燃气轮机作为推进动力,但在服役的LNGC或FSRU项目中,锅炉蒸汽轮机仍占有较大比例。虽其效率对比双燃

料发电机和燃气轮机相对偏低,但它具有功率大、运行维护费用低、使用寿命长、可靠性高等突出优点,同时一般项目中主锅炉的燃气耗量会大于液货自然蒸发量,因此无需额外配置再液化装置,减小建造成本。

根据朗肯循环原理,用过热蒸汽驱动汽轮机的热效率要远高于用饱和蒸汽,同时过热蒸汽还有如下优点:

(1) 在汽轮机内不易形成水滴,减少汽轮机叶轮冲蚀,也减低摩擦阻力;

(2) 可以使用更高的管道流速(最高至100m/s),这样可以减小蒸汽管网尺寸(假如压降没有超出允许范围);

(3) 仅启动时进行疏水,运行后管道中没有冷凝水形成,尤其适用于长期运行;

因此用于推进功能的蒸汽选用过热蒸汽,一般配置2台船用主锅炉,配有燃油/燃气双燃料燃烧器、过热器、汽鼓、水鼓、经济器、凝水供应和加热系统等,主锅炉主要性能参数如下:

过热蒸汽产量:最大49.5 t/h

过热蒸汽压力: 61.5 barg

过热蒸汽温度: 515°C

燃气耗量:最大2941 kg/h

主推进单元采用交叉双轴透平,带尾链接双减速齿轮箱。主要分为三个单元:高压透平单元、低压透平与冷凝器单元和减速齿轮箱单元,便于安装和对中。透平外壳有开口连接用于抽汽。减速齿轮为双减速、双螺旋、串联铰接式,第一减速齿轮系位于首部,第二减速齿轮系位于尾部。为了控制主透平的输出功率,在高压透平上部机壳上提供了整体安装的正车喷嘴控制阀,透平上单独设置了倒车操纵阀,可通过控制杆或者控制按钮经电动和液压机构实现控制。

推进透平主要参数:

输出轴功率:正车21 320 kW,倒车7 313 kW;

操纵阀进口蒸汽压力: 59 barg;

操纵阀进口蒸汽温度: 510°C;

冷凝器排汽真空度(基于海水温度27°C): 722mm Hgvac.

此外,相关的辅助设备还包括主冷凝器和真空泵、汽封蒸汽冷凝器、主供水增压泵、一级/二级/三级供水加热器、空气加热器、凝水柜、吹灰器和冷凝泄放(Steam Dump)控制阀等。

### 3 LNGC-FSRU 多功能蒸汽系统之发电功能

主锅炉产生的高压过热蒸汽除大部分用于推进装置外,一部分蒸汽还送至透平机发电机进行发电,供船上所需电力。LNGC模式下正常工况所需最大电力约5299kW,因此2台2800kW透平发电机完全可以覆盖全船

**作者简介:** 吴国顺(1986-),男,山东菏泽人,工程师,大学本科,主要从事船舶与海洋工程轮机和管路系统设计工作。

电力负荷。FSRU模式下在开式再气化加热模式运行时,主锅炉停用,此时所需电力由双燃料发电机供应;在闭式再气化加热模式或混合式再气化加热模式下,主锅炉投入使用,根据再气化外输量变化,此时透平发电机可以提供部分或全部电力。

透平发电机主要参数:

发电功率: 2 800 kW;

进口蒸汽: 59 barg x 510°C;

出口排汽真空度: 6.7 kpa (a);

转速(透平/发电机): 约10 000 / 1 800 rpm;

对比双燃料发电机或燃气轮机,采用透平发电机具有结构简单、使用寿命长、维护成本小等优点。对于LNGC-FSRU项目中,中低再气化负荷工况下尤其适合使用透平发电机发电,主锅炉的运行给汽轮机启动提供热源,无需再额外启动其他设备,操作简单,节约人力。

### 4 LNGC-FSRU 多功能蒸汽系统之加热功能

LNGC工况下,蒸汽除用于推进和发电等主动力设备外,还供应如下设备,如:油舱加热、中央空调加热单元、房间取暖器、加湿器、造水机、燃油加热器、热水加热柜、惰气发生器(IGG)干燥器、强制蒸发器和LNG蒸发器、海底门吹洗、管路伴热等<sup>[1]</sup>;FSRU工况下,蒸汽还为闭式或混合式再气化加热提供主热源。

然而如果这些用户直接使用主锅炉产生的过热蒸汽会有如下缺点:

(1) 过热蒸汽的传热系数相对较低,且易于变化,难于精准量化,很难对换热器进行精准选型和控制;

(2) 某些过程使用过热蒸汽效率会降低;

(3) 使用过热蒸汽所选用的换热设备等级更高、更昂贵;

(4) 过热蒸汽的高温可能会损坏敏感设备;

因此需要将高压过热蒸汽进行减温减压至饱和蒸汽方可用于加热功能使用,如此其传热系数将会大幅提高,并且蒸汽冷凝成水的过程中温度基本恒定不变,这样有助于换热设备的正确选型和控制。

#### 4.1 再气化蒸汽加热

为满足再气化在闭式或混合式再气化加热<sup>[1]</sup>的正常进行,增加再气化减温减压站(REGAS PRDS)对主锅炉产生的过热蒸汽进行减压降温达到饱和蒸汽状态供蒸汽/乙二醇板冷进行热交换。主要参数如下:

配置: 2x100%;

蒸汽流量: 1.585 kg/h - 93 000kg/h;

蒸汽压力: 60 barg 减压至10.5 barg;

蒸汽温度: 515°C减温至192°C;

减温水温度：75~90℃；

减温水压力：最小15barg；

减压通过控制阀和压力控制回路直接实现，而减温则需要将一定量的水通过减温器的混合装置加入到过热蒸汽中，当水进入减温器，吸收过热蒸汽的热量而蒸发，这样过热蒸汽的温度随之减低。

由于此减压减温站蒸汽流量比偏大，因此采用一大一小两路控制管线并联运行，当流量需求较低时只需启动小

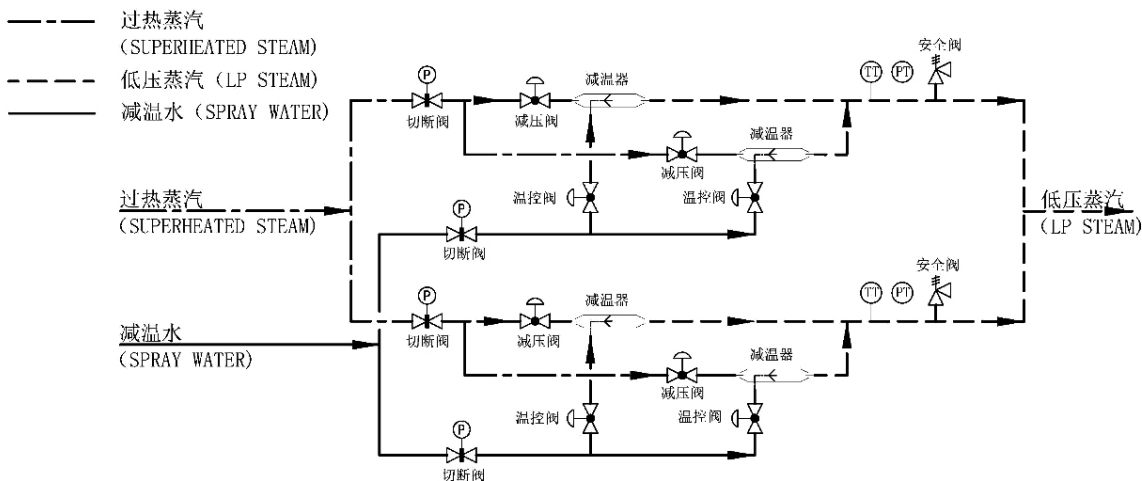


图2 再气化减温减压站流程图

减温减压后的低压蒸汽送至首部蒸汽/乙二醇换热器，由于距离较远，所以减温后的温度一般保持5~7℃的过热度防止管道在输送过程中产生过多的冷凝水而影响蒸汽输送。

蒸汽/乙二醇板冷主要参数：

换热负荷：21 MW；

设计压力：13 barg；

设计温度：205℃；

换热片材质：不锈钢316L；

#### 4.2 新增凝水加热系统

经蒸汽/乙二醇换热后的凝水不仅需要循环回到锅炉供水，同时也供应再气化减温减压站的减温水，减温水的要求不低于75℃。而由于再气化负荷的变化，板冷出口的凝水温度也会随之波动，约在7℃~80℃之间，因此需要增加凝水加热系统对回水凝水进行加热以满足减温水要求。由于蒸汽流量从最小到最大需要较大的调节比，凝水加热系统采用3路控制管线（1大2小）并联控制不同的蒸汽量供应以满足不同负荷工况下将凝水加热至80℃~85℃。

凝水加热系统主要参数：

凝水温度：从7℃~80℃加热至80℃~85℃；

凝水流量：1 950~80 700 kg/h；

流量控制管线；当流量逐渐升高，超过小流量管线的最大负荷，此时大流量管线将会启动投入使用。如下图2示意图。在减温减压后出口管路上设有压力和温度传感器用来监测和控制出口压力和温度在需求范围之内，避免下游出现超压或过热现象。同时设有高压高温报警，异常情况下可直接切断进口切断阀避免高压过热对系统的损坏风险。出口端还设有安全阀对下游管路做机械保护。

蒸汽压力：9.3~10.2 barg；

蒸汽温度：~186℃；

凝水收集柜上设有温度传感器和液位传感器，异常工况下（高温、高高温、低液位等）会有相应的报警或切断进口蒸汽供应阀，以避免下游系统的超压过热风险。

#### 4.3 新增辅锅炉

从LNGC改装为FSRU后增加了3台双燃料发电机供应FSRU工况下增加的电力负荷，为回收利用排气废热，在每台发电机的排烟管出口各新增1台辅锅炉。每台锅炉采用独立汽包（DRUM）设计，可独立运行。辅锅炉蒸汽产量随全船所需电力和发电机负荷变化而变化<sup>[2]</sup>，其中2号辅锅炉带有燃烧器，以满足发电机失效等应急工况下蒸汽的正常供应。

辅锅炉的主要参数如下：

配置：3x50%；

产生蒸汽压力：10.5 barg；

产生蒸汽温度：~188℃；

蒸汽产量：1 200 kg/h；

辅锅炉产生的低压蒸汽送至机舱内低压蒸汽总管，供在开式再气化加热模式下的全部蒸汽用户或在闭式/混合式再气化加热模式下补充部分低压蒸汽。

由于废气锅炉蒸汽的产量随发电机负荷变化，当

产量大于实际用量时, 多余蒸汽可通过排汽阀 (DUMP VALVE) 排放至辅冷凝器。

FSRU开式再气化加热模式下蒸汽用户较少, 辅助锅炉产生的蒸汽量可完全满足全船需求, 因此无需再启动主锅炉, 极大的减轻了主锅炉负担, 同时提高了能源利用率。

## 5 总结

LNGC-FSRU多功能蒸汽系统不仅满足了常规船舶航行时推进、发电和加热需求, 同时经减温减压后用于给乙二醇进行加热, 满足了闭式或混合式LNG再气化加热所需的热量需求。同时废气锅炉的补充使用解决了开式

再气化模式下对低负荷蒸汽的需求, 降低了能源损耗, 有利于保护环境。本系统也可类似项目设计提供理论参考, 为碳达峰/碳中和双碳减排目标下能源使用战略提供思路和方法。

## 参考文献

- [1]吴国顺.浮式储存和再气化装置多重加热系统.中国修船.2023(03): 65-67
- [2]邱锦.FSRU改装电力系统设计分析.中国修船.2023(03):61-64
- [3]汤良然.船舶辅蒸汽系统研究.上海造船.2011(02): 42-46