

DOI: 10.14056/j.cnki.naoe.2017.03.010

电气自动化

5000dwt 多用途天然气动力滚装船电气设计

夏明宽

(罗尔斯-罗伊斯船舶制造(上海)有限公司, 上海 201204)

摘要: 以罗尔斯-罗伊斯船舶制造(上海)有限公司设计的世界上首艘 5 000 dwt 多用途纯天然气动力滚装船为例, 阐述其电气系统的设计及混合推进系统在电力系统中发挥的重要作用。同时, 介绍该船主推进遥控系统、自动化系统和气体泄漏探测与安全系统的设计。该类型船的成功应用可为相关船型的电气设计提供参考。

关键词: 滚装船; 船舶电气; 混合轴带发电机(HSG); 纯气体燃料发动机; 液化天然气(LNG)安保; 推进控制
中图分类号: U674.13⁺8; U665 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-4069(2017)03-0046-05

Electrical Design of a LNG Powered 5000dwt Multi-Purpose RORO Vessel

XIA Ming-kuan

(Rolls-Royce Marine Manufacturing (Shanghai) Limited, Shanghai 201204, China)

Abstract: Taking the world's first LNG powered 5 000 dwt multi-purpose pure RORO vessel designed by Rolls-Royce as example, this paper elaborates the electrical system design and the important role that hybrid propulsion system plays in the electrical system. It also introduces the design of the main propulsion remote control system, the automation system and the gas leakage detection and security system. The success of the ship type can provide reference for the electrical design of the similar ships.

Key words: RORO vessel; marine electrics; HSG; LNG powered engine; LNG safety; propulsion control

0 引言

环保问题已是当今社会研究的热点,为满足日益严苛的 CO₂ 及污染物排放要求,研制采用清洁能源的发动机逐渐成为发动机制造业发展的方向。随着人们对环保问题持续关注及国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)的 Tier III 排放标准出台,液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)燃料动力船舶在环保方面的独特优势更加明显。LNG 燃料可从源头上解决 CO₂ 及污染物排放问题并完全满足 IMO Tier III 的要求。与使用常规燃油的内燃机相比,以 LNG 为燃料的内燃机的减排效果和环保性能十分显著,其中: CO₂ 排放量降低约 22%; SO_x 排放量降低约 100%; 颗粒物排放量降低约 100%; NO_x 排放量降低约 92%^[1-2]。

这里以罗尔斯-罗伊斯船舶制造(上海)有限公司(以下简称罗尔斯罗伊斯)设计的世界上首艘 5 000 dwt 多用途纯天然气动力滚装船为例,阐述其电气系统的设计及混合推进系统在电力系统中发挥的作用,并介绍主推进遥控系统、自动化系统和氧化泄漏探测与安全系统的设计。该船长 112 m,载重量 5 000 t,结合天然气发动机推进系统、最新的船舶线型设计及混合推进技术达到环保的目的,包括可从根本上降低 SO_x 及 CO₂ 排放量,比同类型船舶减少约 40%。

收稿日期: 2016-05-25

作者简介: 夏明宽,男,工程师,硕士,1980 年生。2005 年毕业于哈尔滨工程大学控制理论与控制工程专业,现从事船舶电气自动化系统技术支持及应用工作。

1 主要负载分析及计算

该船可运载集装箱、汽车和冷藏货物，露天甲板上可装载 125 TEU 集装箱并安装有最大起重量为 80t 的吊机，艏部配置 700kW 的侧推器用于进出港机动。表 1 为该船的主要负载设备功率需求，表 2 为该船不同工况下所需的电力负荷。

表 1 5000 dwt 多用途船主要负载设备功率需求

负载名称	侧推	吊机	艏门液压泵站	压载水泵	制冷压缩机	冷藏
数量/台	1	2	1	3	2	2
功率/kW	700	159	369	61	132	120

表 2 5000 dwt 多用途船不同工况下所需的电力负荷

工况	航行	进出港机动	装载	停泊	电力推进（PTH）
负荷/kW	750	1300	1000	520	1200

2 电力系统设计

目前以 LNG 为燃料的船舶多采用中速四冲程双燃料发动机或单一气体燃料发动机，其中双燃料发动机可在 2 种燃料模式下工作，根据不同的工况自动切换。然而，该船的主机为罗尔斯罗伊斯生产的纯天然气动力发动机，如何在 LNG 供气系统出现故障时保证船舶不失去推进动力并满足相关船级社规范要求是该船设计的难点。

出于推进系统冗余考虑，该船采用罗尔斯罗伊斯的混合轴带发电机系统。主机的额定功率为 3940kW，通过减速齿轮箱连接可调螺距螺旋桨，同时连接功率为 1400kW 的轴带发电机，实现动力输出装置（Power-Take-Out, PTO）功能。该船配有 2 台功率为 700kW 的柴油发电机组，当主机出现故障无法运行时，可使用 2 台柴油发电机组，轴带发电机作为电动机工作，带动螺旋桨作应急推进系统，实现 PTH（Power Take Home）功能。

混合轴带发电机系统（Hybrid Shaft Generator, HSG）是一种基于主动前端变频器的新型轴带发电机系统，由罗尔斯罗伊斯最先提出。该系统以普通异步感应电机作为轴带发电机（或推进电机）。在 PTO 模式下，轴带发电机发出的电能经主动前端变频器整定为频率和电压稳定的电能，供应到配电板上，主机不再需要保持转速恒定。这样就可进一步优化主机的转速和可调螺距螺旋桨的螺距，使主机工作在更为节能、高效的转速点上。在 PTH 模式下，主机停车，主动前端变频器吸收配电板上的电能，用以驱动感应电机和螺旋桨，可根据船舶运行的实际工况在 PTO/PTH 模式下自动切换。这种基于绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）技术的轴带发电电动装置采用全控型器件进行脉宽调制，节能效果较好，电网谐波低^[3-4]。

该船电力系统单线图见图 1，其设计具有以下特点：

- 1) 整个电力系统由 1 台 1400kW 的轴带发电机和 2 台 700kW 的柴油发电机组组成，运行轴带发电机完全可以满足船上电力负荷的需求。
- 2) 440 V 主汇流排分成 2 段，分别连接 1400kW 的轴带发电机和 700kW 的柴油发电机组，功率上达到平衡配置。
- 3) 配电系统最突出的优势在于 1400kW 的轴带发电机屏可与柴油发电机屏长期并车，由功率管理系统根据发电机的容量按比例分配负荷。
- 4) 艏侧推器作为船舶最大的负载，不是直接连接到主汇流排，而是通过轴带发电机的驱动控制系统来驱动。在轴带发电机运行时，可不通过主汇流排，而是由轴带发电机驱动系统直接驱动侧推器。在启动柴油发电机（轴带发电机不运行）时，可由主汇流排的电力来驱动侧推器。
- 5) 岸电也是通过轴带发电机驱动控制柜连接到主汇流排的。在驱动控制柜上设置岸电控制屏，充分利用主动前端变频器的优势，不论岸电频率是 50Hz 还是 60Hz，经过变频器的整流和逆变环节，都能在主配电板上得到频率稳定的电力供给。

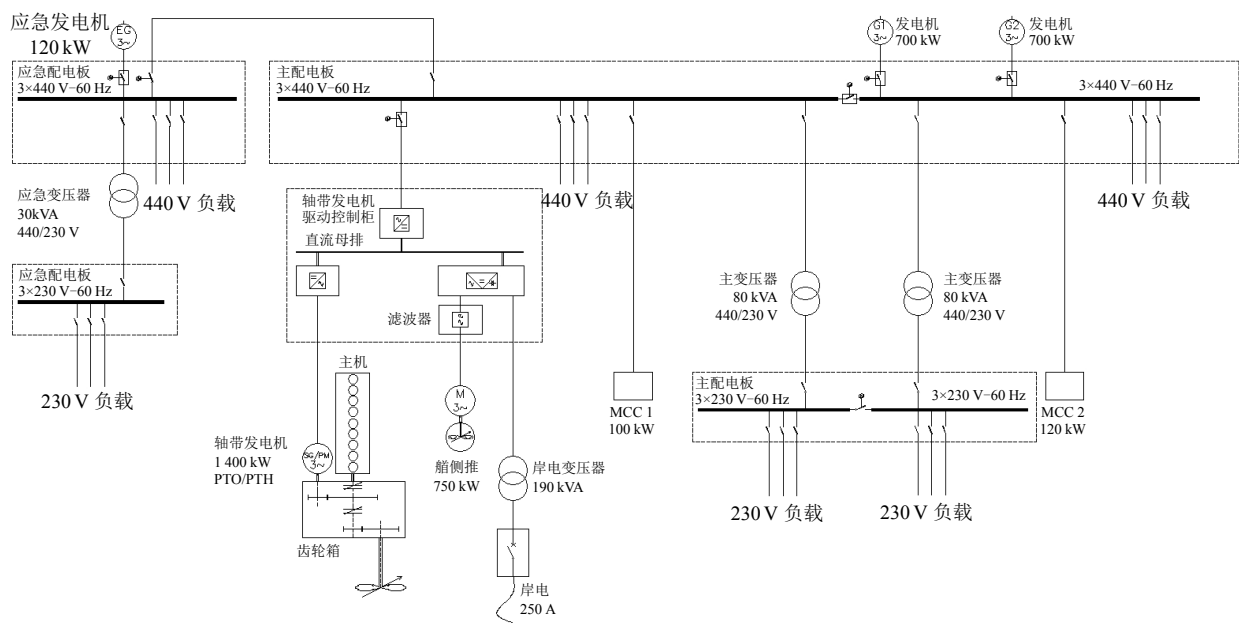


图 1 电力系统单线图

由以上分析可知，整个电力系统设计非常灵活，船舶可在多种工况下工作。表 3 为船舶不同运行模式下的配电状态。

表 3 船舶不同运行模式下的配电状态

运行模式	配电状态
海上航行模式	1) 主机运行，主推进离合器啮合； 2) 舷侧推器不运行； 3) PTO 离合器啮合，轴带发电机连接到主汇流排； 4) 联络开关合闸
机动模式	1) 主机运行，主推进离合器啮合； 2) 舷侧推器运行； 3) PTO 离合器啮合，轴带发电机连接到主汇流排； 4) 联络开关合闸
装/卸货模式	1) 主机运行，主推进离合器脱开； 2) 舷侧推器不运行； 3) PTO 离合器啮合，轴带发电机连接到主汇流排； 4) 联络开关合闸
PTI (PTH) 模式	1) 主机不运行，主推进离合器脱开； 2) 2 台柴油发电机运行，连接到主汇流排； 3) 联络开关合闸； 4) PTI 离合器啮合，轴带发电机连接到汇流排由 HSG 驱动作为电动机运行
港口/停泊模式	1) 主机不运行，主推进离合器脱开； 2) 1 台柴油发电机运行，连接到主汇流排； 3) 联络开关合闸
岸电模式	1) 主机不运行，发电机不运行； 2) 通过 HSG 连接岸电，HSG 连接到主汇流排； 3) 联络开关合闸

3 自动化系统

3.1 主推进装置及控制

主机采用罗尔斯罗伊斯生产的 B35:40L9PG 四冲程气体发动机 (MCR3940kW，转速 750r/min)；整套

推进系统也由其提供, 包含齿轮箱、PTO/PTH 轴带发电机、轴系和调距桨。主推进系统采用“中速机+齿轮箱+调距桨”的方案, 有多种工作模式(见图2)。齿轮箱内有主离合器、PTO 离合器和 PTI 离合器。在常规推进模式下, 只有主离合器啮合, 主机通过主输出轴带动螺旋桨; 在 PTO 模式下, 主离合器和 PTO 离合器啮合, 主机在驱动螺旋桨的同时带动轴带发电机发电; 在 PTH 模式下, 主机不运行, PTI 离合器啮合, 轴带发电机以电动机模式工作, 驱动螺旋桨。此外, 在港口具有排放限制的区域还可使用停泊发电模式, 该模式下 PTO 离合器啮合、主离合器脱开, 主机只用来驱动轴带发电机。

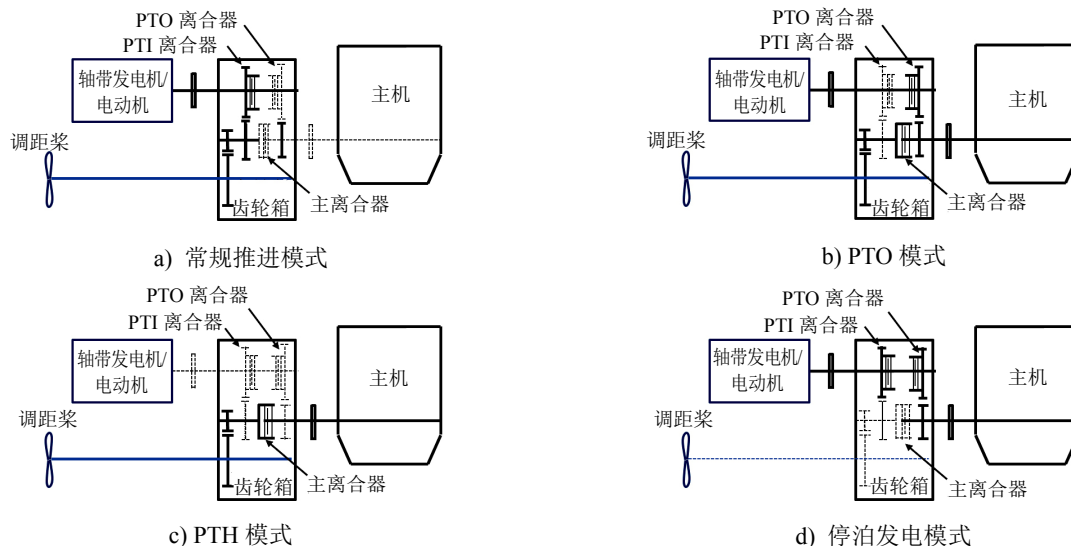


图2 齿轮箱工作模式

推进器控制系统对主推进调距桨和艏侧推器集中控制。图3为全船推进器控制系统布置图。

1) 在驾驶室的左翼、右翼和主驾控台设有控制站。各控制站均包含各推进器单独的指示仪表、控制手柄及触摸屏电脑人机界面。调距桨控制手柄同时输出螺距命令和主机转速命令, 实现联合控制。

2) 在集控室控制站设有主推进调距桨的控制手柄和触屏人机界面, 集控室控制站对主推进装置的控制具有优先权。

3) 艏侧推器只在驾驶室控制螺距。侧推器是由变频器驱动调距桨。控制手柄的位置按照控制系统内预先标定的联合控制曲线标定相应的电动机转速和侧推器螺距。

4) 控制系统为双总线的冗余设计, 指示系统通过单独的总线传输信号。局域网系统连接所有触屏电脑人机界面。每个手柄中都设有2套控制电位器并单独供电, 使主控制系统和备用控制系统均为随动控制。

5) 所有控制站的触屏人机界面上的信息都是相同的, 即显示所有推进器的相关信息; 在人机界面上可对控制位置进行转换, 控制相关伺服泵的起停、侧推变频器的启动与复位及 PTH/PTO 齿轮箱模式的转换。

3.2 全船自动化系统

整个自动化系统基于冗余以太网通信设计, 集成机舱监测报警系统、泵控阀控系统、液位测量系统、功率管理系统、LNG 控制系统及 LNG 安全系统。在驾驶室、集控室、轮机长房间和货控室设有控制站。控制站通过冗余以太网网络交换机连接各子系统。在自动化系统中预定义不同的船舶操纵模式, 通过自动化系统实现推进控制系统、功率管理系统、齿轮箱离合器控制系统及轴带发电机控制系统之间的联合控制, 船员只需在工作站计算机上即可实现不同操作模式之间的自动切换。图4为集成自动化系统结构图。

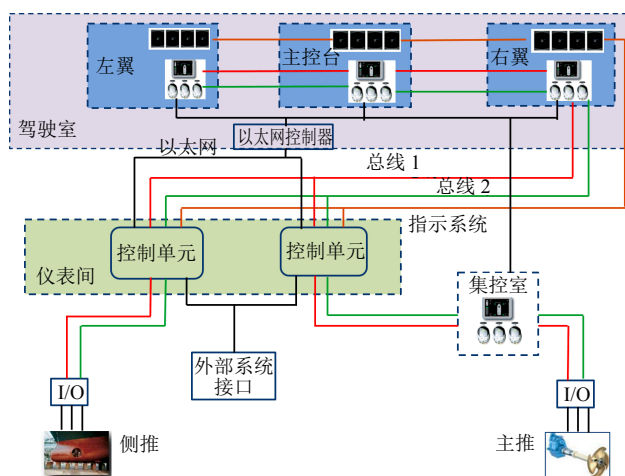


图3 全船推进器控制系统布置图

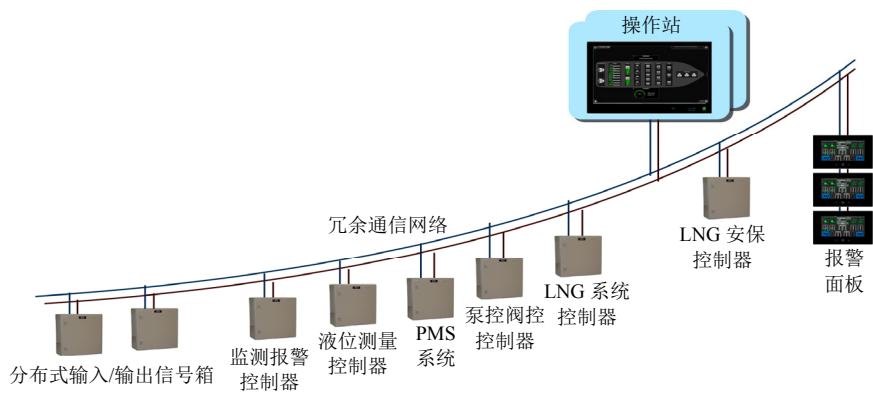


图 4 集成自动化系统结构图

3.3 LNG 探测及安全系统

由于采用混合推进技术，因此当 LNG 燃料系统发生故障必须停止使用时会自动切换到 PTH 模式，采用柴油机电力推进方式保障船舶的推进功能。为避免在 PTO 模式下全船失电，柴油发电机组必须在检测到 LNG 燃料系统报警并自动切换到 PTH 模式之前启动。一旦触发安保系统，将有多种类型的动作发生（见表 4）。

表 4 LNG 安全系统警报分类

系统警报	描述
LNG 燃料系统报警	相关控制位置和受影响区域本地声光报警
LNG 燃料系统关闭预报警	报警，准备进入 PTH 模式
LNG 燃料系统延时关闭	报警，尽可能快地进入 PTH 模式；相关控制位置和驾驶室声光报警；LNG 燃料系统关闭进入延时阶段
LNG 燃料系统紧急关闭	LNG 燃料系统立即关闭；相关控制位置、驾驶室和受影响的本地声光报警；PTH 模式准备（如果没有触发预报警）并自动尽快投入使用
LNG 燃料系统手动关闭	声光报警并准备进入 PTH 模式，集控室和驾驶室控制板上出现手动关闭请求，供选择确认
LNG 燃料系统加注关闭	在加注控制位置和加注站出现声光报警；加注站遥控操作阀自动关闭，加注过程停止

LNG 安保系统在检测到气体泄漏时将关闭供气系统，避免天然气泄漏到非危险区域。在所有可能发生气体积累和/或相应通风出口处安装气体泄漏探测装置。该船在 LNG 加注站、冷箱（储罐连接处所）、压力整定单元、气闸、膨胀箱、主机进气管路、主机上方及机舱布置有天然气泄漏探测传感器（见图 5）。

4 结 语

罗尔斯罗伊斯设计的 5000dwt 多用途纯天然气动力滚装船的首制船“Kvitbjørn”已于 2015 年交付给挪威船东 Norlines 公司，并单纯依靠 LNG 燃料成功完成了史上最长的航行^[5]，证明了罗尔斯罗伊斯纯气体发动机技术的可靠性。

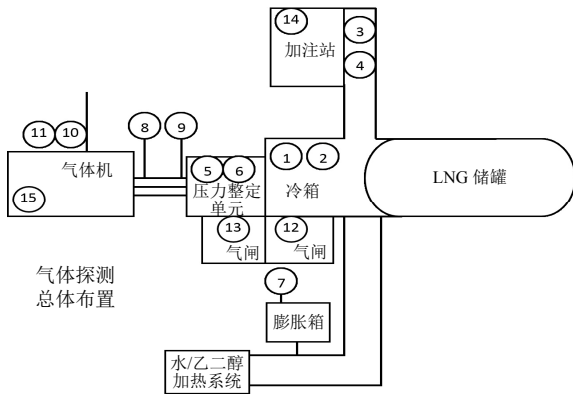


图 5 天然气泄漏探测传感器布置图

【参 考 文 献】

[1] 金宝燕, 郑玄亮. 液化天然气双燃料动力港作拖轮设计研究[J].船舶与海洋工程, 2013 (2): 35-39.

[2] 林建辉, 陆晟. 小型 LNG 船推进方案综述[J]. 船舶与海洋工程, 2012 (3): 52-55.

[3] 郭焱, 李硕, 许慧敏, 等. AFE 变频器在船舶电力推进电机控制中的应用[J]. 上海海事大学学报, 2014, 35 (4): 68-74.

[4] 中国船舶工业集团公司, 中国船舶重工集团公司, 中国造船学会. 船舶设计实用手册（电气分册）[M]. 3 版. 北京: 国防工业出版社, 2013.

[5] Rolls-Royce 公司. Rolls-Royce powers the world's longest journey by LNG at sea[EB/OL]. [2016-02-15]. <http://www.rolls-royce.com>.