

“双碳”目标背景下船舶动力技术的自主创新与发展论坛论文专栏

轴带发电机在超大型液化石油气体运输船上的应用及经济性分析

周鑫元, 孙超骅, 张道志, 张若豪, 魏 雯

(江南造船(集团)有限责任公司, 上海 201913)

摘 要: 针对 LPG 双燃料低速机驱动的超大型液化石油气体运输船(very large gas carrier, VLGC)进行轴带发电机配置方案设计, 包括轴发型式及安装位置的选择、容量的确定, 以及对主机功率和布置等方面影响的考量。基于燃油和 LPG 两种模式对 VLGC 配置轴带发电机的经济性进行分析。分析表明: 对于使用 LPG、乙烷、甲醇等新型双燃料主机推进的船舶, 如 VLGC, 非常适合配置轴带发电机。

关键词: VLGC; 双燃料低速机; 轴带发电机; 经济性

中图分类号: U664.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)06-0015-05

Application and Economic Analysis of Shaft Generator in VLGC

Zhou Xinyuan, Sun Chaohua, Zhang Daozhi, Zhang Ruohao, Wei Luan

(Jiangnan Shipbuilding (Group) Co., Ltd., Shanghai 201913)

Abstract: The configuration scheme of shaft generator for very large gas carrier (VLGC) driven by LPG dual fuel low-speed engine was designed, including shaft type and installation position, capacity, and the impact on the power and layout of the main engine. The analysis results show that for ships powered by new dual fuel engines such as LPG, ethane and methanol, shaft generator is a very good choice.

Key words: VLGC; dual fuel low-speed engine; shaft generator; economy

0 引言

轴带发电机(以下简称“轴发”)是利用船舶主机来驱动发电机从而给船舶电网供电的装置。早期的中速柴油发电机组只能使用昂贵的柴油, 而通过燃用价格便宜的重油的低速机来驱动轴发可以大幅节省船舶的燃油费用^[1-2]。此外, 采用轴发还可以优化主机运行工况, 降低燃油、滑油消耗, 减少维修工作量, 改善机舱运行环境等^[3]。但随着内燃机技术发展, 四冲程柴油机已普遍可以使用重油作为燃料。而低速机驱动轴发, 较高的机械、电气损失抵消了一部分效率优势, 加上轴发高昂的初投资, 使低速机驱动轴发这种动力形式逐渐受到市场冷落^[4]。

近年来, 随着轴带发电机技术的发展^[5]、低

速机新型燃料技术的成熟以及行业内对设计能效和运营能效的要求越来越高, 中速机新型燃料技术发展相对滞后, 低速机驱动轴发的方案, 尤其是乙烷/LPG 双燃料低速机驱动轴发的方案再次受到各方的关注。

本文结合江南造船(集团)有限责任公司(以下简称“江南造船”)自主研发建造的超大型液化石油气体运输船(very large gas carrier, VLGC)^[6], 进行低速机驱动轴发的应用研究及经济性分析。

1 VLGC 概况

本文研究基于全冷式液化气船, 全船的总体布局如图 1 所示。该船设有连续上甲板, 其艏甲板为下沉甲板, 采用江南造船的节能型艏部、方艏, 配置半平衡舵。其货舱区域采用带有单层船壳, 但有

双层底及顶边压载舱的独立液货舱, 设有4个独立A型液罐, 总舱容约86 000 m³; 液罐设计压力0.027 5 MPa, 设计温度为-52 ℃, 满载工况下货物最大比重0.61 t/m³, 可同时装卸两种货品。该船机舱及房舱位于尾部, 由1台LPG双燃料低速机(型号: MAN 6G60ME-C LGIP)直接带动定距桨驱动; 3台1 250 kW常规燃油发电机为全船提供电力; 1台燃油锅炉为全船提供热源。

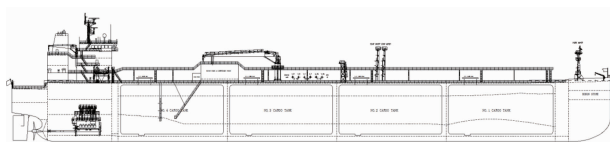


图1 VLGC总布置概览

2 轴发方案研究

2.1 轴发型式

VLGC作为大中型货船, 采用高效的定距桨直接推进方式, 主机转速随航速、海况等的变化而变化, 所以如何保证所配置的轴发的频率稳定可用是首先须解决的问题^[7]。

比较成熟的低速机驱动轴发型式主要有齿轮常数比(gear constant ratio, GCR)型、机械恒频(mechanical constant frequency, MCF)装置型和电子恒频(constant frequency electrical, CFE)电源型等3种。其中: GCR型和MCF型均是通过机械装置控制转速来稳定轴发频率的; 而CFE型则是通过直接对轴发在不同转速下的电流进行控制来稳定轴发频率的。3种轴发型式的优缺点对比见表1。

表1 3种轴发型式的优缺点对比

型式	优点	缺点
GCR	系统简单; 初投资较低; 设备尺寸较小, 对于尾部线型影响较小	须设置增速齿轮箱; 通常与可调螺距螺旋桨(CPP)配合使用; 一般不能与常规发电机组长时间并车运行
MCF	可与固定螺距螺旋桨(FPP)配合使用(要求转速变化范围较小); 可与常规发电机组并车运行	须设置行星齿轮箱; 初投资高; 已停产
CFE	可与FPP配合使用(转速变化范围可以较大); 可不设置齿轮箱; 可与常规发电机组并车运行	初投资较高; 外形尺寸较大

从表1可以看出, GCR一般只能同CPP配合使用。如采用GCR型式的轴发, 则要求VLGC采用CPP驱动或额外配置轴发频率控制设备(类似GCR+CFE), 这无论从船舶能耗还是初始投资方

面来讲都是不可取的, 所以GCR型式首先被排除。MCF和CFE型式都可与FPP配合使用, 且能实现与常规发电机组的长时间并车, 从技术角度而言均可选用, 但是考虑到MCF的初始投资高且已停产, 该型式也被排除。CFE虽然初始投资较高, 但是随着电力电子技术发展, 其成本已开始下降且技术也更成熟稳定, 所以本文的VLGC选用CFE型式的轴发。

2.2 轴发安装方式

目前CFE型式的轴发采用的是低速轴发, 其尺寸比高速轴发要大许多; 安装方式主要有抱轴式和主机自由端安装两种, 如图2所示。

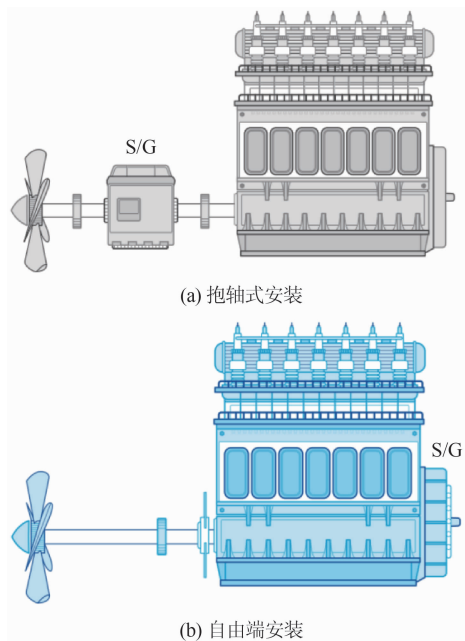


图2 CFE轴发安装方式示意图

抱轴式是目前应用较多、比较成熟的一种布置方式, 其采用中间轴附带线圈充当发电机转子, 主机通过中间轴驱动发电机。该方式对主机后端的艏部线型有一定的要求, 同时, 由于中间轴的重量会增大且具体数值只能待厂家选定后才能确定, 因此会对轴系振动、校中计算等带来一定的影响。主机自由端安装是早期提出来的一种布置方式, 之前一直无成熟的产品, 直至近期才由HHI联合MAN开发出商用方案。此方式虽不会影响轴系设计及艏部线型, 但须在主机本体上安装轴发, 会影响主机本体的设计和建造, 主机可靠性可能会受到影响; 另外还须占用一定的主机前端空间, 要求机舱前壁前移, 对于VLGC这种货船而言就是损失部分货舱容积。

综合考虑以上两种布置方式的优缺点, 本文选择抱轴式CFE轴发方案。

2.3 轴发容量

轴发一般在船舶航行时运行，以取代常规发电机组^[8]。所以对于 VLGC，轴发额定容量的大小须满足其正常海上航行时的电力负荷需求，如表 2 所示。

表 2 VLGC 航行状态电力负荷需求

船舶运输状态	电力负荷/kW	发电机组状态	
		发动机运行台数	负荷/%
商业丙烷 (5% mol 乙烷) 保压	1 670	2	66.8
商业丙烷 (8% mol 乙烷) 保压	1 700	2	68.0
1 舱丁烷 + 3 舱商业丙烷 (5% mol 乙烷) 保压	1 540	2	61.6
商业丙烷 (8% mol 乙烷) 打冷	2 200	3	58.7

从表 2 可以看出：若要满足 VLGC 所有航行状态下的电力负荷需求，且考虑轴发的 90% 负荷限制，则其额定容量应满足式 (1)。考虑到 VLGC 打冷工况在实际航行过程中使用较少，多数船东要求轴发的容量只要能覆盖液货保压状态即可，即轴发的容量应满足式 (2)。轴发容量越大，对于主机功率、初始投资及设备外形等的影响也越大。综合考虑，该 VLGC 轴发的额定容量选取 1 900 kW。

$$Q \geq 2\,200\text{ kW}/90\% \quad (1)$$

即 $Q \geq 2\,444.4\text{ kW}$ 。

$$Q \geq 1\,700\text{ kW}/90\% \quad (2)$$

即 $Q \geq 1\,888.9\text{ kW}$ 。

2.4 对主机功率的影响

虽然轴发的额定容量选取 1 900 kW，但是在计算主机须提供的机械功率时要考虑轴发 90% 负荷限制及其效率因素。根据厂家提供的资料，轴发效率取 92%，即主机须提供的机械功率为 1 859 kW。

根据主机厂 MAN 的推荐^[9-10]，每个项目在主机的最大持续功率工况点 (SMCR) 选定后，主机的运行限制图即已确定，如图 3 所示：在每个功率点下轴发可以收到的最大功率 P_{sc} 为轴发限制线与螺旋桨轻桨曲线之间的功率差值。其中，轴发限制线上功率 P 和转速 n 的关系如式 (3)。从图 3 不难看出： P_{sc} 与主机的 SMCR 及螺旋桨轻转裕度 (LRM) 有关；而对于 VLGC 而言，若 P_{sc} 不能达到上述要求的 1 859 kW，则应调整主机的 SMCR 或 LRM。

$$P = \min (kn^{2.4}, P_{95\% \text{ SMCR}}) \quad (3)$$

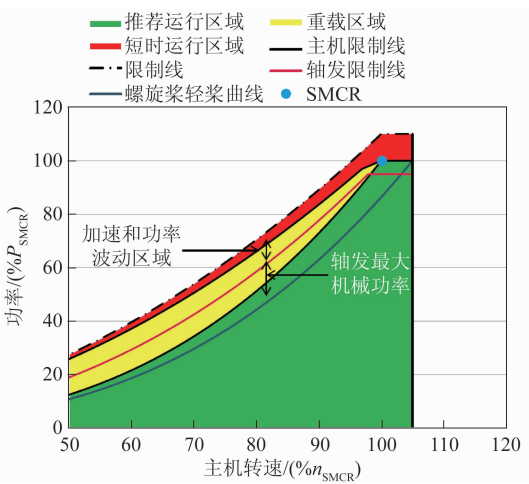


图 3 主机带轴发运行限制图

在无轴发情况下，VLGC 的主机 SMCR 为 12 000 kW@ 90.0 r/min，LRM 为 6%。笔者基于 SMCR 和 LRM 保持不变（模式 1）、只加大 LRM 至 8%（模式 2）和只放大 SMCR 至 14 000 kW@ 90.0 r/min（模式 3）第 3 种情况，计算在主机不同设计点下轴发可收到的最大功率，结果如表 3。

表 3 VLGC 在主机不同设计点下轴发可收到的最大功率

转速 $n/$ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	P_{sc}/kW			P'_{sc}/kW		
	模式 1	模式 2	模式 3	模式 1	模式 2	模式 3
73.0	1 884	2 177	3 094	857	857	2 067
74.0	1 901	2 206	3 151	831	831	2 082
75.0	1 917	2 235	3 208	803	803	2 094
76.0	1 930	2 261	3 263	772	772	2 104
77.0	1 943	2 287	3 318	737	737	2 113
78.0	1 953	2 311	3 372	700	700	2 119
79.0	1 962	2 334	3 425	660	660	2 123
80.0	1 969	2 355	3 476	617	617	2 125
81.0	1 974	2 374	3 527	571	571	2 124
82.0	1 977	2 393	3 625	521	521	2 121
83.0	1 978	2 409	3 672	469	469	2 115
84.0	1 977	2 424	3 718	412	412	2 107
85.0	1 974	2 437	3 762	353	353	2 096
86.0	1 969	2 448	3 805	290	290	2 083
87.0	1 961	2 458	3 846	223	223	2 066
88.0	1 951	2 465	3 557	152	152	2 047
89.0	1 657	2 188	3 225	0	0	1 696
90.0	1 325	1 874	3 625	0	0	1 300

从表 3 中不难看出：考虑轴发利用 LRM 后，模式 1 下 P_{sc} 在 73.0 ~ 88.0 r/min 可以满足上述 1 859 kW 的需求，模式 2 和模式 3 在所有计算转速范围内均可满足轴发需求。随着船舶运营后螺旋桨负荷逐渐增加，螺旋桨吸收的功率逐步加大， P_{sc} 逐步变小；当螺旋桨达到设计状态时，轴发可以收

到的最大功率即为 P'_{sc} 。在螺旋桨达到设计状态后,在模式 1 和模式 2 下 P'_{sc} 的值相同,这是由于两种模式下螺旋桨设计点一样,不同的是模式 2 相较于模式 1 会更晚达到设计点状态;在模式 1 和模式 2 下 P'_{sc} 均远小于轴发的需求,甚至在较高转速下轴发无法发出功率;而在模式 3 下即便螺旋桨达到设计状态后, P'_{sc} 还能覆盖轴发的需求功率。从运营角度出发,模式 3 保证了轴发在船舶运行一定时间后仍能发出额定的功率,所以 VLGC 选择模式 3 作为选用轴发情况的主机设计点,即 SMCR 为 14 000 kW@90.0 r/min。

2.5 其他影响

在选用抱轴式轴发时,还应考虑轴发安装对轴系设计的影响、对艉轴抽油程序的影响以及轴发设备变频器的空间布置等问题。本文为便于轴发安装增加了一段轴发中间轴;由于轴发的安装导致艉轴无法向船内抽出,故须考虑船外抽轴并在艉轴前端配置液压法兰;在机舱二平台与集控室相邻处开辟轴发变频器间,并于其内设单位空调。

3 经济性分析

以该 VLGC 为例,进行配置 CFE 抱轴式轴发的经济性分析。考虑设备成本、船厂设计及调试因素,该 VLGC 轴发方案的整体成本约为 125 万美元。以下基于 VLGC 无轴发方案 (SMCR 为 12 000 kW@90.0 r/min) 和 VLGC 有轴发方案 (SMCR 为 14 000 kW@90.0 r/min),考虑燃料、滑油成本及维护费用,分别在燃油模式和燃气模式下进行经济性分析。

计算分析主要基于如下假设:船舶年运行时间 300 d,电力负荷 1 656 kW/d,发电机组效率 96%,轴发效率 92%,燃油价格 640 美元/t, LPG 价格 500 美元/t,滑油价格 1 500 美元/t,主机维护成本 3.2 美元/(MW·h),发电机维护成本 10.7 美元/(MW·h),ISO 环境工况。

3.1 燃油模式

VLGC 在燃油模式下有无轴发的运营成本对比见表 4。从表 4 可以看出,VLGC 在燃油模式配置轴发后运营成本节省约 14.1 万美元,其中:约 65% 节省的是维护成本;有轴发时的燃料费用比无轴发时只节约了 4.6 万美元。这主要是由于 SMCR 调整后,主机单位油耗上升以及轴发效率比发电机低引起的。考虑轴发初投资约 125 万美元,在燃油模式下轴发的回报期约为 9 年,如果算上初投资的利息和投资收益,对于船东来讲几乎没有吸引力,所以常规燃

料低速机推进的 VLGC 并不适合配置轴带发电机。

表 4 VLGC 燃油模式下有无轴发运营成本对比

模式		无轴发设计	有轴发设计
燃料种类		HFO/MDO	HFO/MDO
计算基础	主机功率/kW	10 800	12 600
	发电机功率/kW	1 725	0
	运营时间/(d·a ⁻¹)	300	
燃料成本	主机单位油耗/(g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	157.4	161.5
	发电机单位油耗/(g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	200	
	主机油耗/(t·a ⁻¹)	12 239.4	14 651.3
	发电机油耗/(t·a ⁻¹)	2 484.0	0
	总油耗/(t·a ⁻¹)	14 723.4	14 651.3
	燃料价格/(美元·t ⁻¹)	640.0	640.0
	燃料成本/(美元·a ⁻¹)	9 422 991	9 376 819
	燃料成本差/(美元·a ⁻¹)	46 172	
滑油成本	主机单位油耗/(g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	0.6	
	发电机单位油耗/(g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	0.8	
	主机油耗/(t·a ⁻¹)	46.7	54.4
	发电机油耗/(t·a ⁻¹)	9.9	0
	总油耗/(t·a ⁻¹)	56.6	54.4
	滑油价格/(美元·t ⁻¹)	1 500.0	
	滑油成本/(美元·a ⁻¹)	84 888	81 648
	滑油成本差/(美元·a ⁻¹)	3 240	
维护成本	主机单位维护成本/(美元·MW ⁻¹ ·h ⁻¹)	3.2	
	发电机单位维护成本/(美元·MW ⁻¹ ·h ⁻¹)	10.7	
	主机维护成本/(美元·a ⁻¹)	248 832	290 304
	发电机维护成本/(美元·a ⁻¹)	132 894	0
	总维护成本/(美元·a ⁻¹)	381 726	290 304
	维护成本差/(美元·a ⁻¹)	91 422	
	总成本/(美元·a ⁻¹)	9 889 605	9 748 771
总成本差/(美元·a ⁻¹)		140 834	

3.2 燃气模式

VLGC 在燃气模式下有无轴发的运营成本对比详见表 5。从表 5 可以看出,VLGC 在燃气模式配置轴发后运营成本节省约 58.7 万美元,其中:约 49 万美元是使用 LPG 节省的燃料成本,占比约 84%;燃料成本降低的根本原因还是 LPG 燃料与燃油之间的差价。考虑轴发初始投资约 125 万美元,在燃气模式下轴发的回报期约为 2.1 a,对于船东来讲非常有吸引力。因此,目前我公司研制的 LPG 双燃料低

速机推进的 VLGC 均配置轴带发电机。

表 5 VLGC 燃气模式下有无轴发运营成本对比

模式		无轴发设计		有轴发设计	
燃料种类		HFO/ MDO	LPG	HFO/ MDO	LPG
计算 基础	主机功率/kW	10 800		12 600	
	发电机功率/kW	1 725	/	0	/
	运营时间/（d·a ⁻¹ ）	300			
燃料 成本	主机单位油耗/ （g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹ ）	6.59	140.60	5.65	144.70
	发电机单位油耗/ （g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹ ）	200			
	主机油耗/（t·a ⁻¹ ）	512.4	10 933.1	512.6	13 127.2
	发电机油耗/（t·a ⁻¹ ）	2 484	/	0	/
	总油耗/（t·a ⁻¹ ）	2 996.4	10 933.1	512.6	13 127.2
	燃料价格/（美元·t ⁻¹ ）	640.0	500.0	640.0	500.0
	燃料成本/（t·a ⁻¹ ）	1 917 721	5 466 528	328 044	6 563 592
	燃料成本差/（t·a ⁻¹ ）	492 613			
滑油 成本	主机单位油耗/ （g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹ ）	0.6			
	发电机单位油耗/ （g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹ ）	0.8			
	主机油耗/（t·a ⁻¹ ）	46.7		54.4	
	发电机油耗/（t·a ⁻¹ ）	9.9		0	
	总油耗/（t·a ⁻¹ ）	56.6		54.4	
	滑油价格/（美元·t ⁻¹ ）	1 500.0			
	滑油成本/（美元·a ⁻¹ ）	84 888		81 648	
	滑油成本差/（美元·a ⁻¹ ）	3 240			
维护 成本	主机单位维护成本/ （美元·MW ⁻¹ ·h ⁻¹ ）	3.2			
	发电机单位维护成本/ （美元·MW ⁻¹ ·h ⁻¹ ）	10.7			
	主机维护成本/ （美元·a ⁻¹ ）	248 832		290 304	
	发电机维护成本/ （美元·a ⁻¹ ）	132 894		0	
	总维护成本/（美元·a ⁻¹ ）	381 726		290 304	
	维护成本差/（美元·a ⁻¹ ）	91 422			
	总成本/（美元·a ⁻¹ ）	7 850 863		7 263 588	
总成本差/（美元·a ⁻¹ ）		587 275			

4 结论

(1) 低速主机如要配置轴带发电机，CFE 抱轴式轴发是优选方案。

(2) 低速机配置轴发时建议在不引起主机跳挡情况下将主机的 SMCR 适当放大。

(3) 低速机配置轴发的成本收益主要来源于主辅机使用不同燃料所带来的燃料成本节省。

(4) 使用 LPG、乙烷、甲醇等新型双燃料低速机推进的船舶，如 VLGC 等，考虑到发电机尚无合适的双燃料机型，非常适合配置轴发。

参考文献

- [1] 郝广君. 轴带发电机在二冲程主机上的发展介绍及应用 [J]. 造船技术, 2019 (4): 2-4.
- [2] 宋强, 王爱平, 史孝华. 20.5 万吨散货船轴带发电机系统的设计 [J]. 船舶工程, 2015 (增刊 1): 127-130.
- [3] 马智君, 辛延林. COSCO 新造船采用主机轴带发电机系统的回顾与看法 [J]. 船舶设计通讯, 2001 (3/4): 48-50.
- [4] 李俊, 王文中. 轴带发电机在船用低速主机上的应用 [J]. 船舶设计通讯, 2014 (2): 62-65.
- [5] 秦俊峰, 李凯. 船舶轴带发电机发展综述及前景探究 [J]. 钦州学院学报, 2015 (8): 10-13.
- [6] 胡可一, 李小灵. 中国首艘 VLGC 的设计和建造 [J]. 中国造船, 2014 (4): 132-139.
- [7] 周燕, 徐建. 某 4000 TEU 集装箱船轴带发电机配置方案 [J]. 广东造船, 2020 (3): 31-34.
- [8] 傅晓红, 夏骏, 周祎隆. 超大型集装箱船电站功率系统构成 [J]. 船舶与海洋工程, 2020 (1): 47-50.
- [9] 丁宇, 王宸, 随从标, 等. 船用低速机减额输出与设计工况点选取研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020 (5): 668-675.
- [10] 刘英策, 韩建兵, 林洪, 等. 低速机驱动轴带发电机高效匹配方案研究 [J]. 广州航海学院学报, 2019 (1): 42-44.