

综述与机型

LNG 船发动机推进装置系统构成及经济性分析

宋雅丽¹, 李 军²

(1. 沪东重机有限公司, 上海 200129; 2. 中国船舶工业综合技术经济研究院, 北京 100081)

摘 要: 对 LNG 船推进装置系统构成及应用现状进行了分析。对几种可能的工程方案进行了技术论证。完成了不同容积 LNG 船的主机选用方案, 并进行了经济性分析, 提出了方案优缺点及选用建议。

关键词: LNG 船; 推进装置; 双燃料发动机; 经济性

中图分类号: U664.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2013)05-0001-06

The Construction and Economic Performance Analysis of Propulsion System for LNG Ships

Song Yali¹, Li Jun²

(1. Hu Dong Heavy Machinery Co., Ltd., Shanghai 200129;

2. Technology Research and Economy Development Institute, Beijing 100081)

Abstract: The construction of LNG ships' propulsion system and the application status is studied. The possible engineering scheme is technically verified. The main engine type selection for LNG ships with varied volume has been accomplished, economic performance analysis is conducted, and the advantages and disadvantages of different schemes are put forward together with the type selection suggestions.

Keywords: LNG ship; propulsion system; dual fuel engine; economic performance

0 引 言

从 LNG 系列船推进动力和技术发展的过程看, 初期一般均选用蒸汽轮机作为推进动力。蒸汽轮机因其热效率低, 机动性能差, CO₂ 排放高等问题, 已经不能满足时代的要求。因此如何针对 LNG 船特点引入新型的推进系统已经成为当今世界上 LNG 系列船推进动力研究的热点。目前, 替代蒸汽轮机作为推进动力的选择主要有以下几种工程方案: 燃气轮机、常规低速柴油机推进+再液化装置、双燃料中速发动机+电力推进、双燃料低速发动机。

本文在对国内外双燃料主机技术调研的基础上, 对这几种可能的工程方案进行了技术论证, 完成了不同容积 LNG 船的主机选用方案, 并对不同方案的经济性进行了分析, 提出了方案优缺点及选

用建议。

1 LNG 船推进装置系统构成及应用现状分析

1.1 蒸汽轮机

自 LNG 船诞生四十多年来, LNG 船一直采用蒸汽轮机推进装置, 因为它可以利用在运输过程中液货舱产生的 LNG 蒸发气(BOG)作为双燃料锅炉的燃料, 锅炉燃烧产生蒸汽, 为推进主透平和发电透平提供动力。图 1 为典型 LNG 船蒸汽轮机推进装置机舱配置图, 主要由锅炉、蒸汽轮机和齿轮减速传动装置组成。

然而, 蒸汽轮机装置最主要的缺点就是燃料消耗率比柴油机高, 系统整体热效率低(仅为 30% 左右), 经济性差。并且, 蒸汽轮机装置的机动性能

收稿日期: 2013-05-22

作者简介: 宋雅丽(1978-), 女, 高级工程师, 主要研究方向为船舶动力装置, E-mail: ylsong_78@163.com。

不好,在机舱的布置方面占有的空间大,也影响了运营经济性。

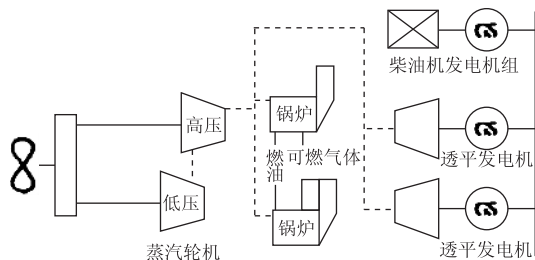


图1 LNG船蒸汽轮机推进装置机舱配置图

1.2 燃气轮机

燃-蒸联合电力推进代表性装置是在用燃气轮机燃烧蒸发气的同时,利用废气能量产生蒸汽,以驱动蒸汽轮机,基本结构如图2所示。系统包括两台简单循环 LM2500 燃气轮机,以 LNG 货物蒸发气或者重油为燃料,各驱动一台发电机,为驱动螺旋桨的两台电动马达和其他用电设备供应电力,马达通过减速齿轮箱驱动螺旋桨。燃气轮机的废气各进入一个废气锅炉产生蒸汽,所产生的蒸汽为一台蒸汽轮机提供动力,蒸汽轮机驱动发电机也为推进电动马达和其它用电设备供电。

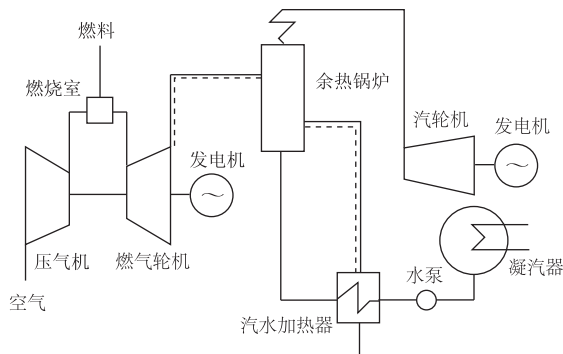


图2 燃蒸混合电力推进机构示意图

燃-蒸联合循环电力推进装置有如下优点:热效率明显高于蒸汽轮机推进装置,可达 45% ~ 50%;具有双燃料的特性;安装所需空间小;排放特性好,当使用天然气作为燃料时,废气排放只有少量的 NO_x ,没有任何的 SO_x ;操纵性能好,起停机快速,机组升降载反应快速,安全可靠。

2005 年,以 LM2500 为基础开发的燃蒸联合循环电力推进装置通过了英国劳氏船级社的认证,但燃气轮机相对于柴油机而言,初投资大,船东对这种装置的运营经验少,船舶管理人员需要专门的培训,造船厂也缺乏相应的建造经验。

1.3 大型低速柴油机+再液化装置的推进系统

选用高效柴油机作为推进装置,再液化装置将

蒸发气再液化后回到液货舱,使经济性有了提高。目前采用双低速柴油机联合再液化装置的 LNG 船舶,机舱的基本布置如图3所示。

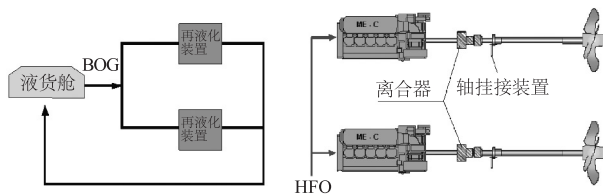


图3 低速柴油机+再液化装置机舱布置简图

采用双低速柴油机联合再液化装置作为 LNG 船推进动力装置虽然初期投入比较大,但具有如下优点:可以减少动力装置占用的空间,从而增加液化天然气舱的容量;柴油机动力装置的推进效率明显高于蒸汽轮机;低速柴油机动力装置可以提供更多种航速;柴油机在船舶推进动力装置中使用的比例相当大,而且柴油机推进的 LNG 船维护和保养费用相对较低;柴油机的环保效果优于蒸汽轮机。

双低速柴油机联合再液化装置这一推进方案,将两台主机布置在两个独立的舱室内,各自驱动一个螺旋桨,完全可以满足船级社提出的冗余性要求。

但是,配置再液化装置初投资极大,并且对船舶电站要求也很高,增加了驱动电力,且由于柴油机燃烧的是重油,排出的氮氧化物、硫氧化物较其他机种多,燃油消耗量也将增加;同时,再液化装置的能耗也会使系统整体的节能效果大打折扣。

1.4 双燃料发动机

双燃料发动机是一种经过特殊改造的可直接燃烧 LNG 蒸发气和燃油的内燃机。双燃料发动机有如下优点:用强制蒸发气补充自然蒸发气是利用双燃料发动机方案的最佳方式;系统的冗余允许在系统故障下继续安全操作,正因为这一点,其安全设计原理得到了船级社的认可,成为典型的高冗余推进系统;相对于蒸汽轮机更加环保。

1.4.1 中速双燃料发机+电力推进系统

中速双燃料发机+电力推进装置是一个多台主机的装置,可提供一定的冗余度,可以是单桨或双桨。以选择四台主机为例,柴油机可比两台情况下的小些,一台主机可以用于驱动主轴带发电机,用于货物操作,这使得辅助发电机容量可以减少。该种推进方式采用双燃料发电机组产生电能,供给船舶推进电动机组,经减速装置减速后驱动螺旋桨转动,其原理如图4。

双燃料中速发动机与电力推进技术相结合产生的双燃料电力推进方式,集合了两者的优点,比传

统的蒸汽轮机推进具有低油耗、低排放、操纵性能好、载货空间大等突出的优点。

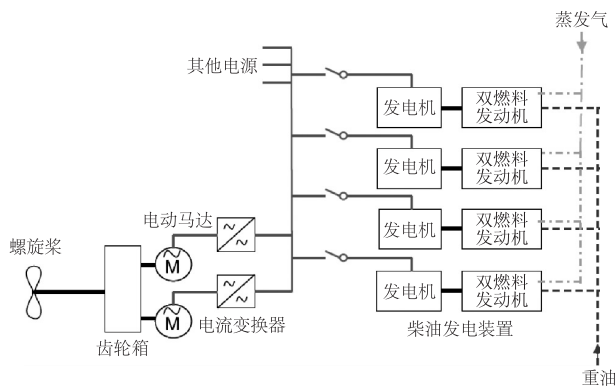


图4 双燃料中速发动机电力推进系统原理图

图5是瓦锡兰双燃料发动机和典型安装的侧视图。

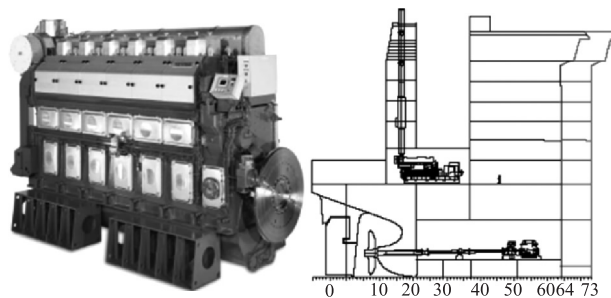


图5 瓦锡兰双燃料发动机和典型安装的侧视图

1.4.2 直接驱动的双燃料低速发动机推进系统

近几十年来，低速柴油机主宰了几乎 LNG 船以外的所有商船的推进系统。双燃料低速主机的发展已经使有效利用蒸发气成为可能，双燃料低速机是从大型低速柴油机发展而来，在喷射少量的点火柴油后，即可将船上蒸发的 LNG 喷射进入燃烧室燃烧。

双燃料低速发动机按照燃气喷射的压力又分为高压和低压两种：高压燃气双燃料发动机和低压燃气双燃料发动机。

(1) 高压燃气双燃料发动机

高压双燃料低速二冲程发动机与电控技术相结合产生的 ME-GI 型双燃料低速二冲程发动机，采用狄赛尔 (Diesel) 循环原理运行，在上止点附近喷射高压 (30 MPa) 天然气。MAN 公司推出的 ME-GI 双燃料发动机便是在原先电控智能化柴油机的基础上添加了以燃气为燃料的功能，其机舱基本配置设计如图6所示。

该发动机具备以下特点：与目前发动机价格相关的预期标准来看，ME-GI 发动机比起其它低速发动机运行经济性要好一些；同时低速机的安装简便性降低

了其安装成本；ME-GI 双燃料低速发动机使对燃料的选择多样化；通过电子控制，可以获得可变的燃料/燃气比；ME-GI 发动机的优势之一是对燃油的适应性，这使 LNG 船能切实地受益；燃烧不同热值的 BOG (蒸发气) 对发动机工作原理来说堪称完美。

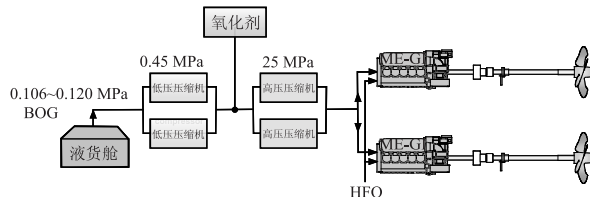


图6 双燃料低速机推进系统原理

双燃料低速发动机在陆用电站中早已被应用，如图7所示为1993年在日本千叶县发电站投入使用的 MAN B&W 12K80MC-GI 发动机，至今仍运行稳定，但仍未应用于实船。

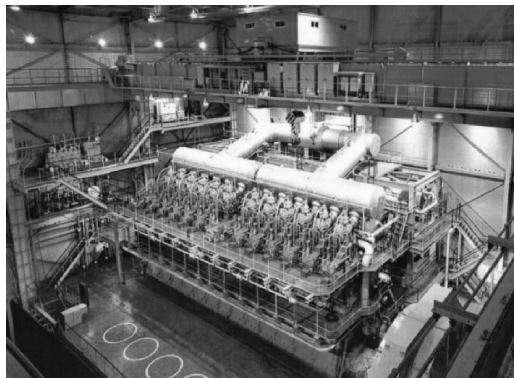


图7 日本千叶县发电站的12K80MC-GI发动机

(2) 低压燃气双燃料发动机

Wärtsilä 最新研制的低压二冲程低速双燃料发动机是以低速二冲程柴油机为基础发展而来的，该发动机采用奥托 (Otto) 循环原理运行，低压天然气 (<1.0 MPa) 喷射发生在活塞上行中部，对降低 NO_x 排放影响显著，并且不需要后处理即可达到 IMO TierIII 的排放要求。该机已经在2012年底完成了单缸机主机燃气试验，最大功率2.5 MW。

2 LNG 船发动机推进装置经济性分析及应用情况

决定 LNG 船推进系统最佳方案有许多不确定因素，除了技术发展因素外，还有诸如 HFO/BOF 价格的预测和波动、船的尺寸大小、航行速度和参与预定贸易的 LNG 船的数量等因素。表1是不同类型 LNG 船动力推进装置在组成、特点、初投资和燃料消耗率及排放等方面的比较。表2是各推进系统型式最新情况的归纳。

表 1 液化天然气船推进装置的比较

装置	蒸汽透平轮机	双燃料发动机	低速柴油机+再液化装置	组合式燃-蒸循环轮机
装置组成				
优点	* 可靠性高 * 正常航行时可燃用 100% 的 B.O.G.	* 低油耗 * B.O.G. 可被柴油机燃用	* 机舱和货舱完全独立	* 燃气透平的油耗低于蒸汽透平
缺点	* 油耗高	* 双燃料柴油机不能单独燃用 B.O.G., 必须提供引燃油 * 在低负荷的状态下不能燃用 B.O.G.	* 油耗高 * 再液化装置须消耗电能	* 需燃用高品质的燃油 * 燃气透平不能同时燃用 B.O.G. 和燃油
初投资	100	105	105	104
燃油消耗率	100 (B.O.G.+HFO)	67 (B.O.G.+HFO)	65 (HFO)	79 (B.O.G. or GAS OIL)
排气	排气 CO ₂	100(87)	66	77
	NO ₂	4(3)	100	99
	SO _x	67(0)	43	100

注：括号中的数值为单独以蒸发气作为燃料时的数值。

表 2 各方案最新情况

装置项目	双燃料低速发动机	双燃料中速发动机+电推	柴油机+再液化装置	燃气轮机+CRP (对转螺旋桨)
燃用 B.O.G.	是	是	不	是
B.O.G. 再液化回货舱	不	不	是	不
目前进展的程度	陆用机组	陆用、石油平台用、船用发电机组	陆用、船用发电机组	船用
仍在调查的项目	- 船用的可靠性 - 船用高压气体压缩机 - 高压天然气供给管路系统的可靠性	- 空气-天然气混合物的安全性 - 低压燃气的供给 - 机器可靠性的提高	- 船用再液化装置可靠性和经济性的发展 - B.O.G. 再液化成货物的成本	应用于蒸汽透平的 CRP 的可靠性的开发

对于一定航线一定船型的 LNG 船舶而言, 选择推进装置时, 要考虑可靠性、冗余度、操纵性能、排放性等 LNG 船舶对推进装置的最基本要求。在满足这几个要求的前提下, 需要进行比较的最重要的因素就是推进装置的营运经济性。

3 不同推进装置的方案实例

目前, 双燃料中、低速发动机的推进方案有着更广阔的前景。双燃料发动机已能利用天然气与液态燃料的混合物作动力, 其运用的范围比柴油机要广阔的多, 而且可以有不同的混合比。同时, 应用双燃料发动机的电力推进也凸现出一些特点。下面对照传统的蒸汽透平, 列举五种 LNG 船舶推进方

案, 这些方案都是利用 B.O.G. 作为一部分燃料, 因而也就减少了常规燃料的使用量, 就经济性方面具有可比性。所有的举例都是基于 135 000 m³ 舱容, 推进功率为 21 MW, 航速为 19.5 节的 LNG 船。六种推进装置的特征详见表 3。

3.1 初投资

表 4 是不同方案在初投资方面的比较值, 表格中的数值表示与蒸汽透平相比的百分比。

从表 4 中可看出: 把设备安装和启动的费用包含进去, 双燃料中速发动机+电力推进的方案显然缺乏吸引力; 而双燃料低速发动机安装的简便性已反映在其动力装置的初投资上, 它的初投资明显低于其它竞争对象。

表 3 六种推进系统方案

方案	主机	推进功率 /kW	辅机
基本	带有减速齿轮箱、定距桨的蒸汽透平 简称：蒸汽透平	26 200	两台 2 900 kW 蒸汽透平发电机，一台 2 900 kW 轻柴油机
1	一台 9K80MCC-GI 双燃料发动机直接与定距桨相联，并配有一套 2 400 kW 的功率输出系统 简称：1×9K80MCC-GI+1×FPP+1×(2 400 kW 的 PTO)	32 490	三台 2 750 kW 燃用轻柴油的柴油机
2a	两台 7S60MCC-GI 双燃料发动机与两变距桨相联，并配有两套 1 200 kW 的功率输出系统 简称：2×7S60MCC-GI+2×CPP+2×(1 200 kW 的 PTO)	31 570	三台 2 750 kW 燃用轻柴油的柴油机
2b	两台 7S60MCC-GI 双燃料发动机，每台主机直接与一个变距桨相联。 简称：2×7S60MC-C-GI +2×CPP	31570	三台 2 750 kW 燃用重柴油的柴油机
3a	四台双燃料中速机(4×8 775 kW)，动力供给给通过减速齿轮箱与定距桨相联的推进电机。 简称：4×(8 775 kW 的中速机) +电力推进	35 100	
3b	五台双燃料中速机(3×8 100 kW +2×5 400 kW)，动力供给给通过减速齿轮箱与定距桨相联的推进电机。 简称：3×(8 100 kW 的中速机) +2×(5 400 kW 的中速机)+电力推进	35 100	

表 4 初投资比较

方案	机器设备	安装+启动费	总费用
基本	65.6	34.4	100
1	48.9	22.9	71.8
2a	45.3	34.4	79.7
2b	43.4	34.4	77.8
3a	68.2	45.9	114.1
3b	78.4	45.9	124.3

3.2 燃油消耗

表 5 反映了不同推进装置方案的燃料(HFO+ MDO) 费用。正如所预料的，双燃料低速发动机的燃料费用最低，而蒸汽透平每年的燃料费最高，是方案 2b 双燃料低速发动机的 224. 2% 。

表 5 燃料耗费比较

方案	所需费用占初投资的比例	相对耗费
基本	11.4	100
1	5.2	45.8
2a	5.2	45.3
2b	5.1	44.6
3a	5.7	50.3
3b	9.6	84.6

3.3 维护保养

表 6 反映了维护保养费用的相对值。

电力推进系统在这一项比较中处于不利的地位。高昂的电力安装费和较多数量的双燃料中速机及其相应多的气缸数，使得其维护保养和备件数的费用远远高于双燃料低速机。同时，由于较多的气缸，双燃料低速机的维护保养费用也高于基本型。

在方案 2a 和 2b 之间，维护保养费用的差异是由辅机引起的，就像 2b 中的主机没有 PTO，因而在其航行中至少有一台辅机必须在工作，以满足电力的需求。

表 6 维护保养费

方案	所需费用占初投资的比例	相对耗费
基本	0.3	100
1	1	307
2a	1.3	395
2b	1.6	490
3a	3	913
3b	3	895

3.4 滑油耗量和其它零星费用

表 7 反映了不同推进装置中每年滑油的费用以及诸如锅炉水的添加剂等额外的费用。双燃料发动机较昂贵，双燃料发动机中低速机又是最贵的。

表 7 滑油费用+其它

方案	所需费用占初投资的比例	相对耗费
基本	0.1	100
1	1.3	1 054
2a	1.5	1 206
2b	1.5	1 176
3a	0.9	685
3b	0.8	672

3.5 总的运作成本

总的运作费用包括燃料+维护保养+滑油+其它，见表 8。最终的结果显示：双燃料低速发动机方案是最经济的方案。

表 8 总运作成本

方案	所需费用占初投资的比例	相对耗费
基本	11.9	100
1	7.6	63.8
2a	7.9	66.9
2b	8.2	69
3a	9.6	82.1
3b	13.4	113.5

3.6 总寿命期基本成本

为了全面比较各个方案,初投资和运作费用的净值总数加入到了船的总寿命中,见表 9。计算中已假定整个 25 年寿命里 2% 的年通货膨胀率和 5% 的年利率。

表 9 总寿命期基本成本

方案	所需费用占初投资的比例	相对耗费
基本	306	100
1	203	66
2a	216	71
2b	220	72
3a	285	93
3b	356	116

从表 4~9 中可清楚地看出,双燃料低速发动机且燃用 BOG 的柴油机方案是最经济的,在初投资方面也是如此。这三种方案彼此间的差异是非常小的,最终的选择可能会取决于考虑其他最初的因素,例如安装的可靠性、推进的富裕度等。

4 其他方面的分析比较

4.1 安装的安全性

这里主要应考虑需提供气体给推进装置的安装型式。对于燃用低压气体的蒸汽透平和双燃料中速发动机的方案来说,在气体管路的安装方面有着相对的优点:低成本及潜在的气体泄漏的风险相对较低。

而使用高压气体的系统(双燃料低速发动机)包含着较大的风险,但目前的技术水平已允许使用这些完全成熟且充分试验过的系统。所以,当使用高压气体(20~35 MPa)时已不具有很高的风险。

4.2 推进的富裕度

所谓推进富裕度是评估推进装置在严重失效的情况下,船舶能继续航行的能力。推进富裕度包括在港口装卸货物时对机器的维修保养。举双轴系的例子,参见方案 2a、2b、3a 和 3b,毫无疑问具有非常突出的富裕度,如果其中一台主机完全失效,或平时不太可能发生的情况突然出现,如轴系或螺旋桨失效等,船舶仍有能力维持至少 15 节的航速。而对于常规方

案,在蒸汽装置严重失效时,船将完全丧失操作能力,进而不可能在港口装卸货时完成维修保养。

4.3 实际使用的经验

直至今日,实际上有很多 LNG 船都采用蒸汽透平作为主推进装置,只有有限数量的双燃料发动机运用在这种类型的船上。以天然气为燃料的发动机主要应用在海上平台和陆用电力电站,如:海上石油平台 FPSO 采用大功率发动机直接燃烧从油井喷出的高压天然气;少数陆用的联合发电装置燃用高压和低压的天然气。对于双燃料低速发动机,在日本千叶县有一台 12K80MC-GI 柴油机燃用重油和天然气的混合物,自 1994 年以来一直运行良好;另外 AESA 在为 Knuten 和 Statoil 公司建造的穿梭油轮上已有了双燃料发动机应用的新业绩。

5 总 结

上述讨论分析的各种因素,既有船东的观点,也有船厂方面的认识,但基本一致的认识是:新的双燃料发动机对于传统的蒸汽透平推进方案来说,无论是其经济性还是可靠性等方面都是一个既明了又中意的方案。

对于那些正在选择的船舶来说,方案 2a 采用双燃料低速发动机 7S60ME-GI+CPP+PTO 是最具吸引力的。

双燃料电力推进装置广泛应用在新建造的容量在 140 000~200 000 m³ 的 LNG 船。而双燃料低速机将在 200 000 m³ 或以上的双螺旋桨大船上使用。

参考文献

- [1] 白兰君. 天然气经济学[M]. 北京:石油工业出版社, 2002.
- [2] 世界 LNG 的船运概况. <http://www.LNG.com.cn/>.
- [3] 王捷,陈永芳,胡贤民,液化天然气运输船主推进装置的发展趋势[J]. 造船技术,2007,4(278).
- [4] 覃朝辉,液化天然气的漩涡模型研究[J]. 上海交通大学学报,1999(8):13-17.
- [5] 王珂,天然气船发动机技术研究[J]. 车辆与动力技术, 2000(4):17-20.
- [6] 初良勇,LNG 船舶技术经济论证模型及系统设计[J]. 船舶,2003(6):17-20.
- [7] 李永鹏,陈爱玲,汪洋. 新型 LNG 船舶采用双燃料电力推进的优势分析[J]. 青岛远洋船员学院学报,2005,4(26).
- [8] 顾安忠. 液化天然气技术[J]. 天然气论坛论文集,2003.
- [9] 各类船舶之最佳推进系统. <http://navybbs.bbs.xilu.com>.
- [10] 林文胜. 可燃液化气体储运安全性研究现状[M]. 北京:天然气工业出版社,2001:87-91.