

# 浅谈降低 LNG 动力船燃料补给损耗的方法

吕家吴

中海油广东水运清洁能源有限公司, 广东 广州 510000

**摘要** : 目前广东省为 LNG 动力船燃料补给的 LNG 加注站多为撬装站, 没有固定的储罐, 主要靠槽罐车进行运输和临时储存, 如果在船舶加注作业过程中操作不当, 将导致加注设备及管道内残留液体较大, 不但造成资源浪费, 经济效益低, 也对环境造成一定的影响。

**关键词** : LNG; 压力; 频率; 泵池; 管线

## Discussion on Methods for Reducing Fuel Supply Loss of LNG Powered Ships

Lv Jiawu

CNOOC Guangdong Water Transport Clean Energy Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

**Abstract** : Currently, most of the LNG refueling stations in Guangdong Province that supply fuel for LNG powered ships are skid mounted stations without fixed storage tanks. They mainly rely on tank trucks for transportation and temporary storage. If operated improperly during ship refueling operations, it will result in a large amount of residual liquid in the refueling equipment and pipelines, which not only causes resource waste, low economic benefits, but also has a certain impact on the environment.

**Key words** : LNG; pressure; frequency; pump pool; pipeline

## 引言

随着“碳达峰”“碳中和”目标的提出, 低碳减排成为当前的首要任务, 如何平衡经济发展和环境保护是摆在当前的重要问题, 各行业都在尝试从方方面面推动节能降碳, 使用清洁能源代替传统化石能源。在交通运输行业中, 船舶的能源消耗量极大, 船用柴油造成的污染问题十分严峻<sup>[1]</sup>。LNG 作为清洁能源, 近年来在交通领域应用越来越广, 除作为汽车燃油的替代品之外, LNG 作为船舶清洁能源也得到了水运行业企业的青睐。我国内河航运资源丰富, 船舶保有量约为 12.54 万艘, 资源需求量巨大, 在节能减排的大背景下, 目前发展 LNG 动力船舶已成为重要发展方向。2020 年 6 月, 中国船东协会 LNG 动力船分会成立, 并在 2021 年 12 月召开了第一届年会, 2021 年 12 月, 第二届年会在北京召开。LNG 动力船在船舶市场上逐渐普及, 并开始受到越来越多船东和船长的关注。对于 LNG 动力船的安全性、经济性及环保性都有了更高的要求, 特别是 LNG 燃料补给环节更是重中之重<sup>[2]</sup>。同时, LNG 燃料补给中也出现了很多问题, 比如燃料补给过程中可能存在泄漏、燃油系统渗漏、燃气系统泄漏、燃料系统内压增加等情况, 这些都会造成 LNG 燃料损耗。目前国内船舶使用的主要是国际上通用的燃料补给装置——加气机和管路系统, 而加气管路和加气机中的泄漏会造成加注过程中燃气泄漏、加气机内压增加等情况。针对上述问题, 本文对 LNG 动力船燃料补给损耗进行分析研究并提出相应解决措施, 通过改善加注设备、优化加注管路和加注方法等方式减少加注过程中的损耗。

## 一、船舶加注介绍

随着技术的发展, LNG 动力船舶应用的安全性问题被不断地攻克。近来 LNG 的使用成本和便利性问题逐渐成了 LNG 动力船舶应用必须突破的一个重要障碍, 船舶 LNG 加注则是上述问题的一个关键点。船舶 LNG 加注实际上是一种将 LNG 燃料从供应源转移到 LNG 动力船的操作。根据供应源我们可以把船舶 LNG 加注分为三种模式: 港到船 (port to ship--PTS)、船到船 (ship

to ship--STS)、车到船 (truck to ship--TTS)。

### (一) 岸基加注称为港到船 (port to ship--PTS)

PTS 加注方式中, LNG 从陆地上的固定储存站点, 通过低温管路或软管向停泊在附近码头的船舶充装 LNG。不仅能进行大容量的充装, 也可通过便携式液罐进行充装。岸基加注站有固定的 LNG 储罐, 补液主要靠 LNG 槽车来完成<sup>[3]</sup>。

### (二) 船到船 (ship to ship--STS)

船对船 (STS) 加注是从燃料加注船或加注驳船向另一艘



LNG 动力船加注燃料。船对船加注方式在燃料充装量和充装速度上具有较大的灵活性，加注作业不受涨潮落潮限制，适合设置在高低潮落差较大的水域。燃料加注船或加注驳船的加注位置也具有最大的灵活性，可以在港口操作也可以在海上操作。趸船或者 LNG 运输船上设置加注设备、LNG 的罐体等设备，趸船 LNG 储罐靠槽车补给。

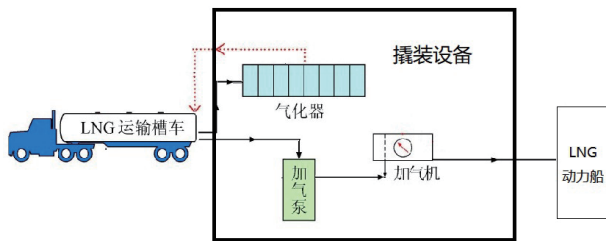
### （三）槽车加注也称为槽车到船（truck to ship—TTS）

TTS 加注是从槽车的液罐向停泊在港口的船舶充装 LNG。通常是通过连接在两者之间的一根特制的用于低温 LNG 的软管来传输，此加注方式主要用在岸基加注站未正式投运，或者应急保供时使用的一种加注方式<sup>[4]</sup>。此加注方式由于无固定储罐，LNG 槽车作为移动储罐，只有将储罐内的液体全部卸完才能保证最大经济效益。

## 二、降低船舶加注卸车损耗的方法

国内目前开展的 LNG 船舶加注模式有 PTS、STS、TTS，无论哪种加注模式，均是利用加注软管将受注船燃料储罐 LNG 储罐相连接，利用 LNG 储罐与受注船燃料差压对其进行 LNG 加注，或者利用低温潜液泵将 LNG 储罐内 LNG 升压后加注至受注船燃料储罐。下面将以移动撬装站为例来分析船舶加注过程中的损耗。

LNG 船舶移动撬装站采用槽车、撬装设备、卸车软管和加注软管对受注船开展加注作业。撬装设备是将槽车内的低温液化天然气（温度为  $-162^{\circ}\text{C} \sim -140^{\circ}\text{C}$ ）经管路、低温泵、流量计等设备通过 6 米长的卸车软管（DN50）和 2 根 15 米长的加注软管（DN50）输送至 LNG 燃料动力船的燃料舱室内的专用设备。配套设备包括：流量计、控制柜、动力电源柜、燃气报警器等。移动式撬装站有加注管道长、加注设备容积大等特点，据统计加注作业完成后在加注管道、加注设备内残存的液体有 170kg 左右，这部分残液如果直接对空排放，不但造成资源浪费，也对环境造成一定的影响。



通过多年工作实践和经验积累，从加注设备保养及加注方式选择、槽车压力控制、潜液泵变频器频率调节、泵池残液回收、加注管道残液回收等方面进行优化，将槽车储罐、加注设备内的残液最大程度加入受注船，实现船舶加注作业经济效益最大化。

### （一）加注设备维保及加注方式选择

#### 1. 加注设备

LNG 属于低温流体，加注枪头、卸车软管、输液管道、加注软管等设备长期处于低温—常温冷热反复交替的恶劣作业环境，对设备的密封性和寿命造成较大影响，如果维保不及时容易导致管道零部件发生泄漏，轻则暂停作业，影响受注船运输计划，重则可能对人身设备造成损害，所以加注前应检查加注枪头密封

垫是否完好，密封面是否有磕伤或者变形，及时更换密封垫或者加注枪头；每次加注前对卸车软管和加注软管进行升压检测，发现有泄漏点及时更换，且每半年对卸车软管、加注软管进行水压检测试验，不合格的软管及时更换，以避免发生泄漏事故；做过水压试验的软管应放置在户外挂立放置，将管道内水汽沥干，否则在加注过程中容易发生冰堵，不能开展正常加注作业，且软管内水汽有可能变成冰块或者冰渣加注到受注船储罐，影响受注船燃料系统正常工作，甚至影响发动机工作。

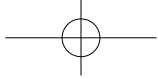
#### 2. 加注方式

正常加注作业前应对设备进行充分的吹扫、惰化、预冷、置换，以保证系统中没有空气和氮气，此过程大概需要半小时左右。首先用氮气对卸车软管、潜液泵池及输液管道、加注软管等系统管道进行吹扫以排除系统内空气，当受注船放散管取样氧含量  $< 2\%$ ，完成设备及管路吹扫工作；其次用天然气对设备及管路进行吹扫置换，当取样口天然气浓度  $\geq 95\%$  后完成气体置换；然后使用 LNG 对设备及管路系统进行预冷，泵池温度  $\leq -130^{\circ}\text{C}$  后预冷完成；接着在用管道内天然气对这个管路系统及设备再进行一次吹扫，当取样口天然气浓度  $\geq 95\%$  后完成吹扫；最后再进行加注作业。开始使用小流量进液，LNG 从受注船储罐顶部喷淋将储罐内气相液化，降低储罐压力，待动力船燃料罐压力下降并稳定后采用底部进液方式进行大流量加注。在加注过程中要密切监视船舶罐压力、潜液泵出口压力，防止系统超压。燃料补给过程中，加注方法的选择至关重要。根据《内河船舶法定检验技术规则》规定，当 LNG 加注前压力小于等于  $0.7\text{MPa}$  时，加注过程中不应出现任何泄漏，且在加注时不应发生任何形式的燃烧；当加注压力大于  $0.7\text{MPa}$  时，应采取有效措施将压力控制在安全范围内<sup>[9, 10]</sup>。同时，对于船舶加气设备，国际海事组织（IMO）、国际标准化组织（ISO）及日本、美国等国家制定了相应的技术规范 and 标准，其中部分规范和标准已被我国船级社采纳并颁布实施<sup>[11]</sup>。

### （二）控制槽车压力

目前市场上 LNG 运输槽车储罐容积为  $52.6\text{m}^3$ （满车质量约 20.2 吨），槽车储罐内分为气相和液相，随着加注作业的进行，液相空间逐渐减小，气相空间逐渐增大。在卸车过程中如果储罐压力过高则导致储罐内液体卸完后储罐内天然气较多，槽车储罐的压力会随着卸液量的增加而不断降低。如果槽车气相压力过低而 LNG 动力船储罐压力过高，不但会造成潜液泵气蚀，而且还会导致潜液泵无法将 LNG 输送至船上，造成槽车内残液增加。槽车完成卸车操作后，将返回液化厂再次充装，充装站要求槽车压力必须保持在  $0.1\text{MPa} \sim 0.3\text{MPa}$ ，过低和过高都严禁充装，因此在槽车卸液过程中，需要控制槽车储罐的压力。

LNG 动力船的储罐压力为  $0.6 \sim 0.9\text{MPa}$  左右，加注时需要根据动力船的压力来对槽车增压，当槽车液位低于 450mm 时，增压较困难，需要提前对增压作出预判。通过实践和经验总结：当槽车液位至 350mm 时，槽车储罐压力控制在  $0.55\text{MPa}$ （即通过调整增压气化器的进出口阀来对槽车增压，低于  $0.55\text{MPa}$  时打开增压气化器进出口阀进行增压，高于  $0.55\text{MPa}$  时关闭增压气化器进出口阀），这样既可以将槽罐车内液体卸完，也可以把槽罐车压力



控制在0.3Mpa以下，满足液化厂充装要求。

### (三) 控制加注频率

LNG 动力船加注通过潜液泵来输送液体，启动频率为55Hz（根据 LNG 动力船储罐压力进行控制，如果储罐压力高于0.8Mpa 则需将启动频率设置为60Hz）。初始加注时先采用小流量输送方式（通过泵变频控制），并通过顶部喷淋加注方式对船用燃料罐进行预冷降温，以确保加注过程中加注管路、船罐不会产生大量 BOG（Boil-Off Gas 蒸发气体），也确保管路系统安全阀不会起跳。当加注站系统及船罐系统温度相当、管路充分预冷后，可适当将顶部喷淋加注转换为底部进液加注方式，将潜液泵的频率设置在70Hz，控制潜液泵出口压力在1.0Mpa左右，此时流速能达到135kg/min，对动力船进行大流量加注，在即将达到本次加注量时，提前降低加注频率，进入结束作业准备。密切监控加注站和船用燃料罐的液位、温度、压力的变化，防止过充或溢流。

槽车液位低于150mm时，槽车储罐内剩余 LNG 液体较少，需要操作人员密切监视加注流速，当流速大幅波动或者压力不断下降时，需要降低潜液泵的频率，进液管道内会有少量气体进入，需要手动开启泵池对空排气，以保证泵池充满液，防止潜液泵发生气蚀<sup>[6]</sup>。通过上述操作可以很大程度将槽车内液体卸完，将残液损失降至最低。

### (四) 泵池残液回收

每次加注作业一般为2—3艘船，在卸完第一艘船后，需要停止加注，同时拆掉加注软管。当按下“停止加注”按钮后，潜液泵的出口阀会关闭，会导致槽车出液管到加注撬总出液阀管线里残留较多 LNG 液体，同时当阀门关闭后，管中的 LNG 会不断气化，造成管线憋压。据估算，该管线内残余的 LNG 液体为140kg左右，如果将其放空，不但会造成该量的损失，也会给大气造成

一定的污染。所以当停止加注后，打开回流阀，管线内剩余的液体或气体会通过回流阀进入槽车储罐内。

### (五) 调整上下进液回收管线残液

撬装设备出口阀到 LNG 动力船储罐还有一段长达30m的加注软管，据估算该软管内 LNG 的质量约为30kg，动力船加注结束，按下“停止加气”按钮后，撬装设备总出口阀会自动关闭，加注软管内的 LNG 液体将会气化，如果不回收这部分液体，不但会造成较大损失而且也会给设备带来安全隐患。为减少加注软管残液造成的损失，当按下“停止加气”按钮后，动力船储罐的上进液改为下进液，将剩余的残液回收，管道中的残余 LNG 会不断气化，管道前端的压力会升高，将管道的残液通过压差回收到 LNG 动力船储罐内。

### (六) 经济性分析

通过上述操作优化，每船可以减少卸车亏损约100kg，以每年为新造和改造 LNG 动力船1600艘次计算，采取优化后操作方案，除了保障安全生产和稳定供应外，还累计减少损耗约160吨，按6000元一吨计算实现减亏约96万元。

其实无论是 PTS、STS 还是 TTS，均需要靠槽车来对 LNG 进行运输，均有卸车操作，采用上述方法不但可以将槽车内 LNG 最大程度卸完，也能保证槽车返回液化厂的充装安全。

## 三、结语

LNG 动力船与传统船舶相比，LNG 清洁能源船舶兼具环保性和经济性。LNG 清洁能源船舶可减排二氧化碳20%、氮氧化物90%、硫化物100%。随着新造、改造 LNG 动力船下水数量的增加，节能降耗效果会越来越显著。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家标准. 液化天然气燃料水上加注作业安全规程 GB42283-2022
- [2] 中华人民共和国长江海事局. 内河 LNG 燃料动力船舶安全操作指南 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2015
- [3] JT/T1319-2020, 天然气燃料动力船舶罐车加注作业安全技术要求, 中华人民共和国交通运输部.
- [4] 中国船级社. 天然气燃料动力船舶规范 [S]. 2017
- [5] 中海油广东水运清洁能源有限公司. 船舶 LNG 充装安全操作规程
- [6] 朱云琪, 赵瑞嘉, 谢新连. 运河航速限制情景下的班轮燃油补给决策与航速优化 [J]. 大连海事大学学报, 2019, 45(01):82-88.
- [7] 钱芳. 班轮运输燃油补给决策与航速优化的经济环保双目标模型 [J]. 数学的实践与认识, 2021, 51(12):35-41.
- [8] 刘翠莲, 张群淑, 魏巍. 考虑碳税和易腐品的班轮加油策略与航速优化 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2021, 40(11):24-31.
- [9] 刘忠行. 大型 LNG 动力船冷热耦合梯级利用技术研究 [D]. 青岛科技大学, 2020.
- [10] 范洪军, 王曦, 齐奎利. 江中型 LNG 加注趸船旁靠系泊作业的安全性 [J]. 船舶工程, 2019, 41(04):119-124.
- [11] 曹维鑫. 长江中上游水域 LNG 燃料动力船加注方案研究 [J]. 中国水运 (下半月), 2014, 14(11):20-21.