

## 第二十届全国大功率柴油机会论文专栏

## 大功率船用天然气发动机燃气系统压力波动特性研究

浦卫华, 平涛, 李翔, 郭立君

(七一一研究所, 上海 201108)

**摘要:** 以改善大功率船用天然气发动机燃气系统压力波动, 减少各缸喷射过程的互相干扰为目标, 确定燃气系统主要结构参数设计原则。采用发动机燃气系统压力波动试验数据标定仿真计算模型; 对燃气系统突加/突卸负荷开展预测研究, 分析各缸压力波动及其对燃气喷射率的影响, 提出为保证燃气系统正常工作, 突加/突卸时间应大于 0.5 s。

**关键词:** 大功率船用天然气发动机; 燃气系统; 压力波动

**中图分类号:** TK434.6    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4357(2018)02-0001-04

## Investigation on Gas System Pressure Fluctuation of a Large Power Marine Gas Engine

Pu Weihua, Ping Tao, Li Xiang, Guo Lijun

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

**Abstract:** Aiming at improving the pressure fluctuation of a large power marine gas engine and meanwhile reducing the mutual interference of each cylinders during injection, the design principles of main structure parameters of its gas system was determined. The simulation model was calibrated based on the pressure fluctuation test data of the engine gas system, and then the forecast research was carried out on the sudden increasing and decreasing of load, the pressure fluctuation of each cylinder was studied as well as its influence on the gas injection rate. It is suggested that to ensure the normal operation of the gas system, the time of sudden increasing and decreasing of load should be longer than 0.5 s.

**Key words:** large power marine gas engine; gas system; pressure fluctuation

## 0 引言

随着石油资源短缺, 以及世界各国发动机废气排放法规的日益严格, 液化天然气(LNG)作为一种高热值的清洁能源越来越受到青睐。以LNG为代表的新能源在环保方面具有独特优势, 产生的环保效益越来越显著, 在船舶领域的应用也越来越广泛。

大功率天然气发动机燃气系统按天然气与空气的混合方式不同分为两种: 增压器前单点混合及进气道多点混合。增压器前单点混合多用于陆用电站, 对负荷变化的响应相对船用主、辅机慢, 不需

要较高的燃气喷射压力, 因此发动机不须要外接燃气增压调节设备, 且燃气有充足的空间和时间与空气均匀混合; 缺点在于对空燃比控制不够精确, 容易引发爆震。进气道多点混合通过对燃气喷射阀的结构设计和空间布置, 配合进气道气流组织, 可达到天然气和空气的均匀混合, 实现对燃气喷射量的精确控制, 从而保证空燃比的精确控制; 但是须要增加一套天然气增压调节装置, 增加了成本。

本文所研究的船用天然气发动机燃气系统为进气道多点混合方式。由于船用天然气发动机单次燃气喷射量大, 会造成燃气总管压力波动, 从而影响相邻缸喷射量的一致性。针对多点喷射燃气系统的

收稿日期: 2017-10-25

作者简介: 浦卫华(1985-), 男, 工程师, 主要研究方向为船用发动机燃料供给系统, puweihua@csic711.com。

特点,以改善船用天然气发动机燃气系统压力波动,减少各缸喷射过程的互相干扰为目标,对燃气系统关键结构尺寸开展多方案计算分析,确定燃气系统关键结构参数;同时对燃气系统突加突卸负荷对各缸压力波动及燃气喷射速率的影响进行研究。

为了确保天然气发动机正常有效运行,还须结合燃气与空气的混合及扫气过程开展发动机工作过程计算,该部分内容不在本文讨论。

## 1 燃气系统结构

采用预燃室船用天然气发动机进气道多点混合燃气系统,除了增加主燃气喷射阀外,还须增加预燃室燃气调压阀、预燃室节流阀、单向阀,此外,为了满足船规要求,还须设置燃气透气阀等。

区别于柴油微喷引燃的点火方式,本文所述的天然气发动机点火方式采用预燃室加火花塞的形式,见图1。天然气从机外燃气压力调节模块进入机带燃气总管,然后一分为二,一路进入主燃室燃气管路,经各缸支管后,通过燃气安全滤器进入燃气喷射阀,等待喷射;一路经预燃室调压阀后进入预燃室总管,经预燃室支管后,通过预燃室安全滤器进入预燃室节流阀。当预燃室内压力小于预燃气支管压力,单向阀开启,天然气进入预燃室,当火花塞得到指令点燃预燃室内天然气,预燃室内已着火的燃气将进入主燃室完成点火功能;当预燃室压力大于预燃室燃气管路压力,单向阀关闭,避免高温高压燃气进入预燃室燃气管路。

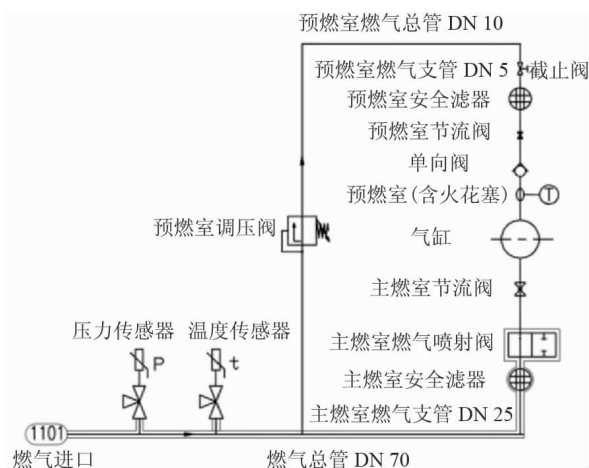


图1 单缸燃气系统结构示意图

## 2 燃气系统设计要求

某天然气发动机的主要技术参数如表1所示。根据发动机总体性能要求:燃气系统应满足8缸发动机系列化供气量的要求;具备110%超负荷的能

力;各缸燃气进气量偏差小于 $\pm 3\%$ ;同时燃气系统设计应满足船规的安全性要求,设置双壁通风管。

对于燃气系统分系统而言:燃气总管流量应大于等于 $500 (\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1})$ ;燃气总管压力波动不大于 $\pm 0.05 \text{ MPa}$ ;主燃气喷射持续期应包含在进气持续期之内,且避开气门重叠期,避免扫气过程的甲烷逃逸。

表1 燃气系统模型标定

| 参数                                      | 数值              |
|-----------------------------------------|-----------------|
| 缸径/mm                                   | 230             |
| 冲程/mm                                   | 320             |
| 缸数/型式                                   | 8缸/直列           |
| 整机功率/kW                                 | 1 600           |
| 转速/( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ) | 1 000           |
| 平均有效压力/MPa                              | 1.81            |
| 发火顺序                                    | 1-2-4-6-8-7-5-3 |

## 3 仿真建模分析

采用专业液压与流体分析软件 AMESim 建模。模型基于一维可压缩流动和二维多刚体动力理论,采用管道流动模型;综合考虑压力波动因素以及变状态参数的影响。计算时假设:在一次喷射过程中,天然气温度不变;天然气在容积腔内流动是可压缩的,考虑压力传播时间。本模型中天然气气源参数采用 PNGD001 理想气体特征参数,不考虑气体黏性阻尼;燃气管路模型采用 PNL0004 气动管路压力波动方程模型;燃气喷射阀模型采用气动滑阀模型。计算模型如图2所示。

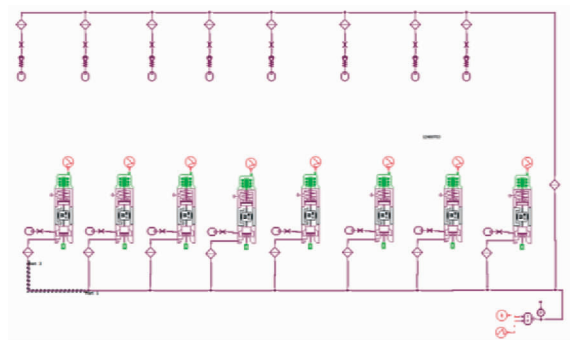


图2 燃气系统仿真模型

在发动机燃气总管末端（第八缸处）安装压力波传感器,通过实测燃气系统压力波动试验数据对仿真模型进行标定。标定结果表明:在额定点相同压力和喷射脉宽下,计算结果和试验值差异不超过1%,见表2。表明该模型可以用于进一步仿真分析。

在满足设计要求的前提下，通过仿真计算研究燃气系统关键结构参数，如：主燃室总管直径、主燃室支管直径、预燃室总管直径、预燃室支管直径等对压力波动的影响。

表 2 燃气系统模型标定

| 标定参数 | 额定点循环喷气量/<br>( $\text{g} \cdot \text{cyc}^{-1}$ ) | 额定点第八缸压力波动值<br>(MAX/MIN) /MPa |
|------|---------------------------------------------------|-------------------------------|
| 仿真值  | 1.19                                              | 0.470/0.466                   |
| 试验值  | 1.19                                              | 0.468/0.463                   |
| 偏差   | 0                                                 | 0.43%/0.64%                   |

3.1 主燃室总管直径对压力波动的影响

由图 3 可以看出：第 8 缸燃气总管压力波动大于其他缸压力波动，而第 1 缸由于靠近燃气进口，压力波动较为稳定，具体数值详见表 3。

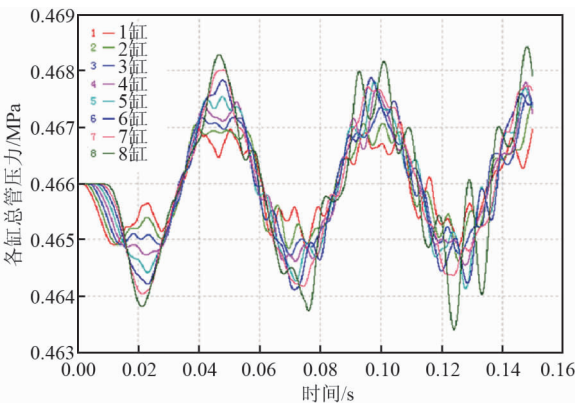


图 3 各缸燃气总管处压力曲线

表 3 各缸燃气总管处压力波动

| 气缸编号 | 燃气总管压力波动/MPa |          |
|------|--------------|----------|
|      | 波峰           | 波谷       |
| 1    | +0.000 9     | -0.001 1 |
| 2    | +0.000 9     | -0.001 2 |
| 3    | +0.001 3     | -0.001 3 |
| 4    | +0.001 4     | -0.001 3 |
| 5    | +0.001 5     | -0.001 6 |
| 6    | +0.001 4     | -0.001 8 |
| 7    | +0.002 0     | -0.002 0 |
| 8    | +0.002 3     | -0.002 6 |

通过表 3 可以看出：第 8 缸压力波动（波峰和波谷）均高于其他缸。这是由于第 8 缸远离燃气总管进口，燃气在第 8 缸末端处截止，会形成压力波反射，正向压力波与反射压力波叠加，造成第 8 缸处压力波动大于其余缸的压力波动。因此，后续仿真计算中衡量压力波动是否满足设计要求均以第 8 缸的压力波动为判据。

为了防止发动机整机试验过程中出现各缸最高

燃烧压力差异较大的现象，以稳定各缸燃气喷射为出发点，开展不同总管直径对燃气压力波动的计算分析。

由表 4 可以看出：随着主燃室总管直径增大，第 8 缸处燃气压力波动越来越小，即管径越大，压力波动越小。但燃气总管的直径受到结构布置的约束，不能无限增大，须综合性能和结构参数做最终确定。

表 4 不同总管直径对第 8 缸燃气总管压力波动的影响

| 主燃室总管<br>直径/mm | 第 8 缸燃气总管压力波动/MPa |          |
|----------------|-------------------|----------|
|                | 波峰                | 波谷       |
| 60             | +0.002 8          | -0.003 3 |
| 70             | +0.002 3          | -0.002 3 |
| 80             | +0.001 8          | -0.001 6 |
| 90             | +0.001 5          | -0.001 1 |

3.2 主燃室支管直径对喷射特性的影响

主燃室支管承担着将天然气从燃气总管输送至燃气喷射阀的任务，而燃气喷射阀入口处压力是否稳定决定了喷射的稳定性，同时影响各缸燃气喷射量的一致性。一般而言，燃气总管形状规则，可以通过增大总管直径和长度的方法避免各缸之间的压力波干扰，这样连接总管和燃气喷射阀的支管的结构就显得尤为重要。天然气经主燃室总管进入各缸支管，而支管长度受结构布置制约，难以变化，只能通过改变支管直径来提升流通能力，降低压损。

由表 5 可以看出：燃气喷射过程对支管压力波动的波谷影响较大，压力跌落均大于 0.045 MPa；对波峰影响较小。喷射结束后，支管压力逐步趋于稳定，波动范围  $\pm 0.03$  MPa。

表 5 不同支管直径对第 8 缸燃气支管压力波动的影响

| 主燃室支管<br>直径/mm | 第 8 缸燃气支管压力波动/MPa |        |
|----------------|-------------------|--------|
|                | 波峰                | 波谷     |
| 20             | +0.003            | -0.068 |
| 25             | +0.004            | -0.049 |
| 30             | +0.013            | -0.046 |

由图 4 可以看出：支管直径越大，由燃气喷射造成的压力跌落越小，但支管直径从 25 mm 增大至 30 mm，对压力波谷的改善不大，即超过 DN25 通径对改善压力跌落效果不明显。

由图 5 可以看出：燃气喷射阀打开时会造成支管压力下降；当燃气喷射阀达到最大开度后，支管压力逐渐上升，并处于稳定喷射状态；当燃气阀关闭，支管压力处于稳定波动状态。

3.3 预燃室总管直径和支管直径的确定

按照总体设计要求：预燃室耗气量为燃气总管

流量的 $\alpha$ 倍。根据伯努利方程,假设流速相同,计算预燃室燃气总管直径为燃气总管直径的 $\alpha^{1/2}$ ,预燃室燃气支管直径为主燃室支管直径的 $\alpha^{1/2}$ ,考虑预燃管路较小,过大的流速必然带来流阻增大和压损增大,因此,从工程实际出发,设定预燃室燃气总管直径和预燃室燃气支管直径应比计算值略大。

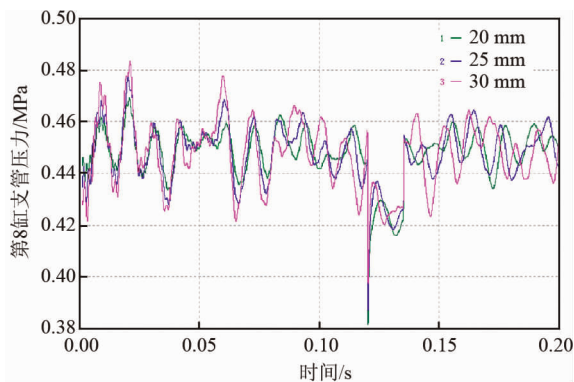


图4 不同燃气支管直径对应的支管压力曲线

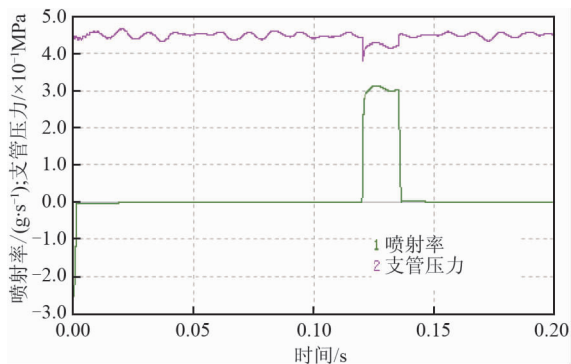


图5 支管直径为25 mm时,支管压力波动及喷射率曲线

### 3.4 突加负荷燃气系统压力波动特性研究

由于发动机在实际突加/突卸负荷时采用压力和脉宽同时调节的方式,且具体数值须在试验开发时确定。本计算假设:在突加/突卸负荷时,仅通过改变燃气供气压力而不改变喷射脉宽实现突加/突卸负荷,研究发动机燃气系统压力波动特性。

燃气压力调节主要依靠机外燃气供气单元(GVU)完成,目前暂无该模块的详细模型,因此,本次计算在模型中用压力边界阶跃模块代替。

突加负荷模拟燃气进口压力在0.5 s内由0.2 MPa调节至0.45 MPa时的压力波动。

由图6可以看出:突加负荷时,燃气压力逐步上升,燃气喷射阀循环喷气量也逐步上升,各缸支管压力跌落逐步增大。该发动机发火次序为1-2-4-6-8-7-5-3。仿真计算结果表明:突加过程对第1缸造成的压力超调很大,此时第1缸的压力波动较

大;随着压力上升,各缸天然气喷射量逐步提升,0.48 s后,压力处于稳定段。因此,对于气体机突加负荷时,要求突加时间至少大于0.5 s,这样可以避免由于燃气系统压力超调带来各缸燃气喷射量不均匀,以及由于负荷加载过快可能导致发动机出现爆震现象。

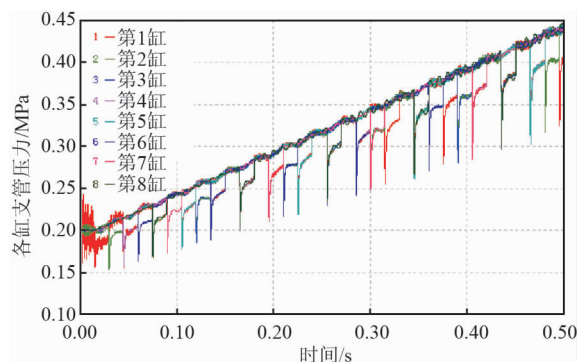


图6 突加负荷时各缸支管燃气压力曲线

图7为突加负荷各缸天然气喷射率曲线,按照发火次序不同,各缸燃气喷射率峰值逐步提高,尔后压力趋于稳定,燃气喷射率也趋于正常。在发动机试验时,须要重点关注各缸缸压曲线、放热率曲线等发动机性能参数,避免由于加载过快,燃气喷射量过大,混合不均匀而导致的发动机爆震。

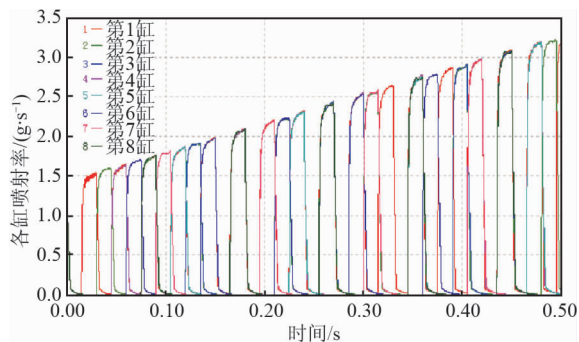


图7 突加负荷时各缸天然气喷射率

### 3.5 突卸负荷燃气系统压力波动特性研究

突卸负荷模拟燃气进口压力在0.5 s内由0.45 MPa调节至0.2 MPa时的压力波动。由图8可以看出:突卸负荷时,燃气压力逐步下降,波动振幅越来越小。由于第8缸远离燃气进口位置,燃气波动最大,当调节至0.2 MPa时,各缸压力趋于稳定。

由图9可以看出:突卸负荷时,按照发火次序,各缸天然气喷射量逐步降低,由于压力波动的存在,各缸喷射率峰值差异较大。从喷射率曲线看:突卸时间0.5 s比较合理,但要考虑整个燃气系统各零部件的耐压情况,防止造成零部件失效。

(下转第9页)

度调节策略为: 中高负荷之前节气门和旁通阀联合调节控制空燃比, 节气门逐渐全开, 旁通阀开度逐渐关小; 中高负荷以上节气门保持全开, 改变旁通阀开度实现空燃比调节。

(2) 发电特性运行时, 节气门、旁通阀的开度调节策略为: 低负荷时旁通阀保持全开, 由节气门控制空气量进行空燃比调节; 低负荷至中高负荷过渡时节气门逐渐全开, 旁通阀逐渐关闭; 中高负荷调节旁通阀开度, 改变增压器效率实现对空燃比控制。

试验验证表明: 所确定的空燃比控制技术能够满足研究所用的气体机稳态及动态特性的各项性能指标。

## 参考文献

- [1] 姚勇. CNG 发动机和汽油机燃烧的比较分析 [J]. 车用发动机, 2005 (5): 31-33.
- [2] LEN Z U, SCHROEDER D. Transient air-fuel ratio control using artificial intelligence [R]. SAE970618.
- [3] VAKTSKJOLD E, SKARBO L A, VALDE K, et al. The new Bergen B35: 40 lean burn marine gas engine series and practical experiences of SI lean burn gas engines for marine mechanical drive [C]. CIMAC Congress, Shanghai, 2013. Paper No. 417.
- [4] KLAUSNER J, TRAPP C, SCHAUMBERGER H, et al. The gas engine of the future-innovation combustion and high compression ratios for highest efficiencies [C]. CIMAC Congress, Bergen, 2010. Paper No. 312.

(上接第 4 页)

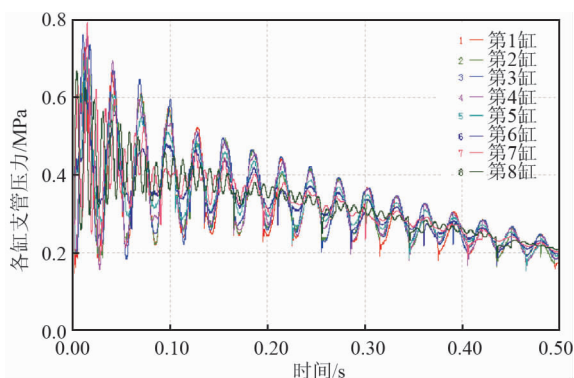


图 8 突卸负荷时各缸支管燃气压力曲线

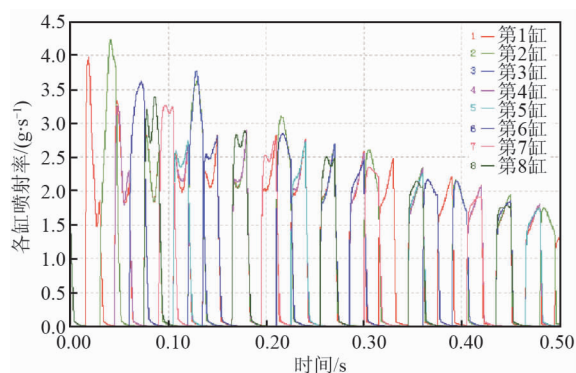


图 9 突卸负荷时各缸天然气喷射率

## 4 结 论

(1) 对燃气系统开展仿真计算分析, 研究了燃气系统主要结构参数对压力波动的影响。采用末端燃气管路 (本文为第八缸) 压力波动作为系统评价的判据。

(2) 研究负荷突加突卸对各缸支管压力波动及燃气喷射率的影响, 从燃气系统角度建议: 后续试验过程中发动机负荷突加突卸时间应大于 0.5 s。

## 参考文献

- [1] 党永浩. 天然气发动机燃气供给系统综述 [J]. 铁道机车车辆, 2011, 31 (b10): 83-86.
- [2] 张飞虎, 梁顺伟, 祁文革. 潍柴 LNG 气体机电控燃气系统及故障检修 [J]. 重型汽车, 2016 (3): 44-46.
- [3] WILLMANN M, BUCHER T, SENGHAAS C, et al. 大缸径气体机和双燃料发动机燃油喷射系统 [J]. 柴油机, 2013, 35 (1): 9-12.
- [4] 唐浩. 双燃料发动机燃气供给系统设计 [J]. 船舶与海洋工程, 2014 (4): 43-49.
- [5] 张红学, 韦莹, 陈建春, 等. 12V240 燃气发动机预混合系统的设计 [J]. 柴油机, 2015, 37 (2): 43-46.
- [6] 刘震涛, 俞小莉, 费少梅. 天然气/柴油双燃料发动机燃气供给系统特性研究 [J]. 内燃机工程, 2002, 23 (2): 15-19.