

# 船舶动力发动机低压天然气喷射阀测试体系开发

董全, 战宇\*, 杨晓涛, 魏代君

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 船舶动力发动机低压天然气喷射阀测试体系的开发在多方面产生积极影响。测试体系的提出能确保船舶运营的合法合规性、支持绿色船舶动力的发展、降低运营成本, 有助于实现可持续性发展目标。测试体系涵盖了多个关键性能指标, 包括喷射阀的可靠性、驱动电流、喷气规律和喷气量, 以及密封性、内部泄漏、工作压差、喷射阀耐久性和喷气特性的验证, 这有助于改进产品设计和性能。引入这一测试体系推动了数据驱动的产品开发, 确保产品在市场上的成功和可持续发展, 对于船舶行业和环保目标都具有深远的意义。

**关键词:** 测试体系; 船舶动力; 天然气发动机; 燃气喷射阀

**中图分类号:** TK437 **文献标识码:**

## Development of low-pressure natural gas injection valve test system for Marine power engine

DONG Quan<sup>1</sup>, ZHAN Yu\*, YANG Xiaotao WEI Daijun

(1. School of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The development of a testing system for low-pressure natural gas injection valves in ship engine power systems has multiple positive impacts. The introduction of this system ensures the legal and regulatory compliance of ship operations, supports the development of green marine propulsion, and reduces operational costs, contributing to the achievement of sustainability goals. The testing system covers several key performance indicators, including the reliability, drive current, jet pattern, and jet quantity of injection valves, as well as the validation of sealing, internal leaks, working pressure differentials, durability, and jet characteristics. This aids in improving product design and performance. The implementation of this testing system drives data-driven product development, ensuring the success and sustainable development of products in the market, with profound implications for the maritime industry and environmental conservation goals.

**Keywords:** Testing system; Marine power; Natural gas engine; Gas injector.

# 1 引言

航运业的爆发式增长带来了船舶动力领域关键技术的挑战。内燃机作为船舶动力的主要组成部分，近年来，内燃机研究人员不得不同时在发动机设计领域和燃料领域寻求突破，以满足当前愈发严苛的排放法规。一方面希望通过优化燃烧模式和喷射过程来提高燃烧效率，降低燃料消耗以达到短期内减碳的目的。另一方面采用低碳燃料替代传统燃料从源头上减少碳排放<sup>[1-3]</sup>。在我国，随着“碳中和，碳达峰”战略的稳步推进，具有高储量的清洁燃料在内燃机上的应用技术逐渐受到重视<sup>[4-5]</sup>。天然气的丰富性，低成本及可再生性使其成为一种理想的燃料，主要应用于空间加热，发电等工业过程<sup>[6]</sup>。因此，天然气发动机成为了解决环境与能源问题的新思路。由于天然气单位质量的热值要高于柴油，并且具有较高的辛烷值，使其可以像柴油机一样采用高压比来获得很高的热效率，而燃烧后的尾气排放中PM、NO<sub>x</sub>及SO<sub>x</sub>的含量要明显低于柴油机。

天然气发动机燃气喷射阀是天然气发动机设计开发的重要依据<sup>[7]</sup>。在采用进气道喷射的燃气系统时，燃气喷射阀的耐久性、可靠性、喷射性能决定了燃气进气速率及单循环燃气的最大进气质量，直接影响了发动机的动力性、经济性及排放性<sup>[8-9]</sup>。本文旨在规范发动机低压燃气喷射阀的测试规程，确保喷射阀装配发动机前满足使用要求，具体测试流程及测试项目。

## 2 喷射阀测试体系开发的必要性

### 2.1 满足行业法规的迫切需求

随着国家“一带一路”政策的深入推进和建设长江经济带的实施，我国水路货物运输量和港口吞吐量持续增长，多年稳居世界第一，内河大小船舶数量已达20余万艘<sup>[10]</sup>。船舶动力行业在得到快速发展的同时，其有害物排放也成为了我国环境污染的重要来源之一。2016年我国颁布了第一部针对内河船舶排放的法规文件《船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法》，2020年我国在第七十六届联合国大会正式提出了碳达峰和碳中和目标<sup>[11-12]</sup>。

天然气作为一种燃料在航运业得到广泛应用，但在使用中存在一定的安全风险。低压天然气喷射阀的不正常运行可能导致泄漏、火灾等危险情况。测试体系的开发可用于监测阀门的性能，确保其可靠关闭和开启，从而降低潜在的安全风险。测试体系可以定期监测和评估低压天然气喷射阀的性能，有助于早期发现潜在故障迹象，提前进行维护，降低维修成本和停机时间<sup>[13]</sup>。这对船舶的可用性和经济性至关重要。航运行业受到严格的法规和标准约束，以确保设备和系统的性能和安全性。低压天然气喷射阀作为关键组成部分，必须符合相关法

规。测试体系的开发有助于船舶运营者满足法规要求，确保其业务合法合规。

## 2.2 符合船舶动力绿色发展需求

天然气发动机还具有燃料价格低廉、对发动机改造容易、排放后处理要求低等优点。这些优势使天然气发动机技术成为我国在新能源战略框架下有效解决内河船舶及道路交通动力系统技术落后、排放污染严重等问题的主要途径，也使其成为全球船舶动力及重型运载技术领域研究热点和发展方向。船舶在全球温室气体排放和环保问题上承担重要责任。低压天然气喷射阀的性能直接关系到燃烧过程的效率和废气排放。通过测试体系的使用，可以更好地优化燃烧过程，减少能源消耗和环境污染，有助于实现更加可持续的航运，减轻对地球气候的不良影响。其次，在全球航运市场中，船舶动力系统的技术创新和质量是竞争的关键。测试体系的开发有助于提高技术创新水平，提升船舶制造商和运营者的竞争力，吸引更多客户，创造更多商业机会。同时，船舶动力发动机低压天然气喷射阀测试体系的开发符合航运业的可持续发展趋势。通过提高安全性、合规性、环保性、维护效率和性能，这一测试体系有助于确保航运业在未来能够持续发展，满足社会对航运的要求<sup>[14-15]</sup>。

## 2.3 符合产品开发与优化需求

通过测试体系的使用，可以全面评估低压天然气喷射阀的性能。这有助于发现潜在的问题和缺陷，并在产品开发过程中进行改进，从而提高产品的质量和性能，有助于确保天然气喷射阀符合相关法规和标准。这意味着产品在市场上能够合法销售，并提供更高水平的安全性，减少潜在的风险。另外在开发测试体系的过程中，可能会发现改进或创新的机会，这将有助于产品开发团队改善产品设计、性能和功能。这些创新可以增加产品竞争力，满足市场需求。通过测试体系的使用，产品开发团队可以更好地了解产品的寿命和维护需求，这有助于开发更持久和低维护成本的产品，降低客户的运营成本。从而拥有经过全面测试和合规性验证的产品，将提高产品在市场上的竞争力。客户更愿意选择经过验证的产品，因为它们提供更高的可靠性和安全性。

# 3 测试体系技术要求

## 3.1 一般要求

1) 测试对象：发动机低压燃气喷射阀

2) 测试体系一般要求：应使用测试体系规定的测试系统来测量被提交试验的发动机低压天然气喷射阀的喷气特性及关键参数。测试体系描述了推荐的发动机低压天然气喷射阀的测试系统和测试规程

3) 测试项目：试验用测量装置测试项目要求如下，具体可按供应商与发动机协商确定，燃气喷射阀驱动电流测试、燃气喷射阀可靠性测试、燃气喷射阀喷气特性测试等。

## 3.2 测试方法装置及方法要求

### 3.2.1 驱动电流推荐测试装置及方法

电流卡钳表是一种用于测量交流或直流电流的仪器，实现了对电流的非接触式测量，无需破坏电路和断开电源。将电流卡钳连接燃气喷射阀接线端和示波器，设定喷射阀驱动电流为额定驱动电流，测量实际燃气喷射阀驱动电流形状与数值，建议采用基于霍尔效应测试原理的电流卡钳表。

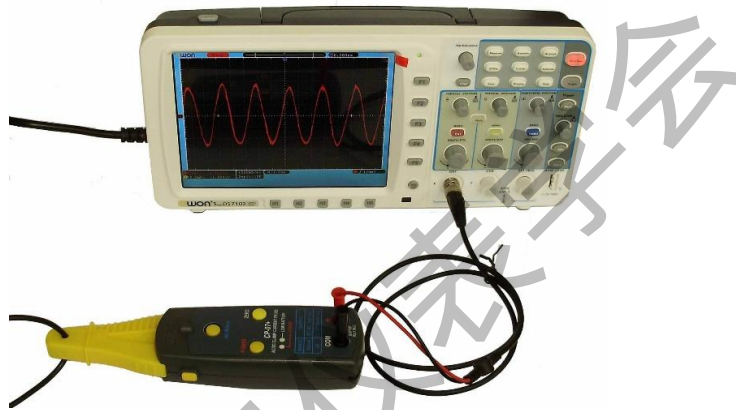


图 1 驱动电流测试实物图

驱动电流具体测试步骤如下：

- 1.插入导线:首先要将喷射阀被测电流导线放入电流卡钳表的口中，以夹住被测导线。
- 2.调节测量范围:电流卡钳表分为不同的测量范围，根据被测电流的大小来选择相应的测量范围调整电流卡钳表的旋钮，以便在范围内获得更精确的测量结果。
- 3.显示测量值:在插入导线和调节范围之后电流卡钳表就可以显示被测电流的大小，通过读取示波器数字显示屏上显示的数值即可获取被测电流的大小。

### 3.2.2 喷气规律推荐测试装置及方法

燃气喷射阀喷气规律测试装置一般采用定容法的实验原理，当气体以一定的压力喷入定容气室中，气室的压力会随之升高，通过实时监测并采集定容气室内压力的变化来实时的检测气阀的喷气状态。

由理想气体状态方程可知：

$$m = P \frac{VM}{RT} \quad (1)$$

式中：P 为定容气室内的压强，V 为定容气室容积，R 为理想气体常数，M 为气体的摩尔质量，T 为温度，m 为容器内氮气质量。

对于船用大流量的燃气喷射阀泄漏现象普遍存在，因此需要将测试周期内的泄漏量减去，修正后的燃气喷射量计算公式为：

$$\Delta m = (P_2 - P_1) \frac{VM}{RT} - L(f - a) \quad (2)$$

式中： $\Delta m$  为喷射阀喷射一次的喷气质量， $P_1$  为定容气室内喷气前的压强， $P_2$  为气体喷射完毕且容器内压强达到稳定时的压强， $f$  为测试周期， $L$  为喷射阀泄漏速率， $a$  为喷气持续期。

对上式两端进行微分，可以得到：

$$dm = \frac{VM}{RT} dp \quad (3)$$

式中： $dm$  是燃气喷射阀喷气时的质量流率， $dp$  为定容气室内压强变化速率。因此通过计算定容气室内压强变化速率，可以获得其燃气喷射的瞬时质量流率，即喷射规律，推荐测试系统示意图如下图 2 所示。实验用测试介质由气瓶直接提供，测试气体通过减压阀减压进入气阀上游的稳压气室进行稳压并供给气阀。阀的开启和关闭由计算机通过驱动器进行驱动，在计算机中可以配置喷射脉宽和驱动电流值，驱动器按照配置形式输出驱动电流波形。实验时定容气室的出口阀关闭，当氮气喷入定容气室中，气室的压力会发生变化，压力值由安装在气室上端的压力传感器测得。

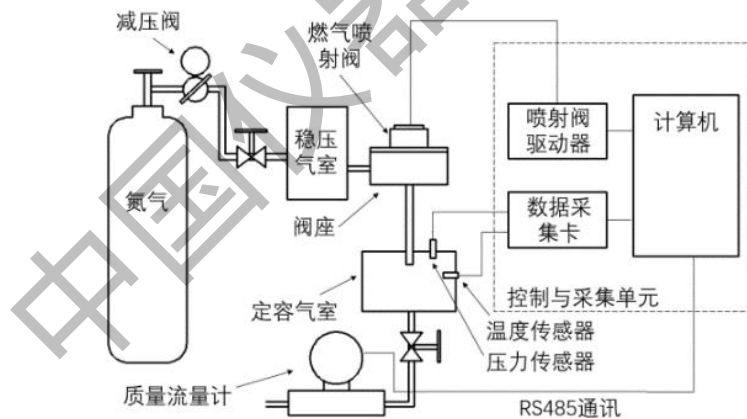


图 2 推荐喷气规律测试系统示意图

### 3.2.3 喷气量推荐测试装置及方法

质量流量计只能测出一段时间的质量流量无法测出瞬时喷气规律，为此，仅选用质量流量计作为喷气量测试装置。将喷射阀喷孔通过阀座密封安装在密封容器内部，喷射阀电气部分暴露于外部环境与发动机低压喷射阀控制系统连接，推荐采用高精度科氏质量流量计。

在质量流量计上游放置稳压气室，使气体先进入稳压气室进行缓冲，防止喷气过程过快导致质量流量计测试误差。设置喷气频率和喷气脉宽为发动机低压天然气燃气阀额定参数，取 60 次测试结果的平均值作为最终喷气量测试结果。

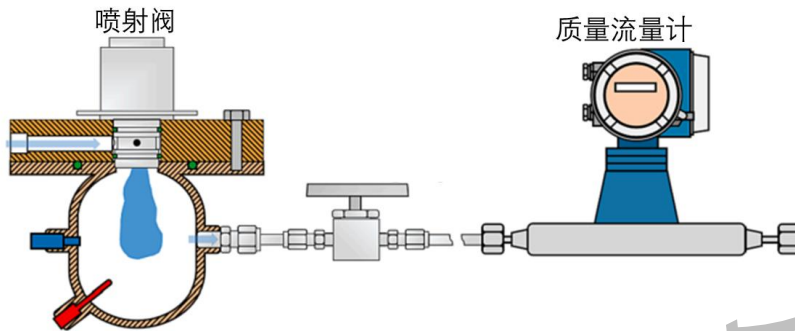


图3 推荐喷气量测试装置示意图

### 3.3 测试设备技术要求

#### 3.3.1 电流卡钳的一般技术要求

电流卡钳应该有适合用来测量驱动电流所需精度的量程，推荐电流卡钳在满量程的 30% 到 100%之间测量，应使测量的驱动电流大小落在此测量区间内。首先将电流钳卡在传输电流的线缆上，需注意电流的方向与电流钳上的箭头一致。

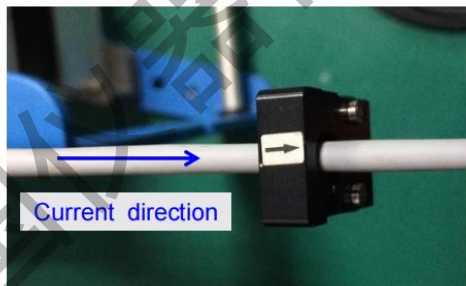
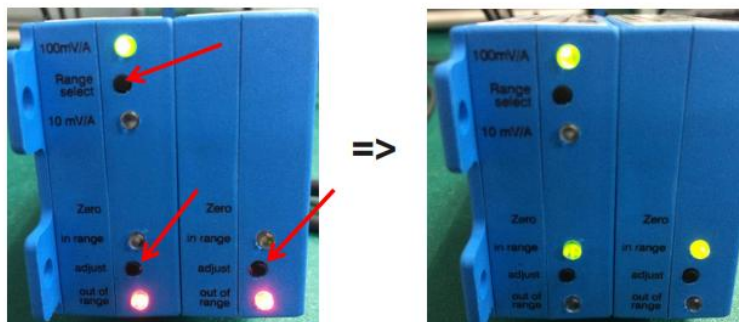


图4 电流卡钳一般安装方式

若 zero-LED 处于红色状态 (out of range)，则需长按的“adjust” 按键。直至显示为绿色状态。同时，可根据线缆内电流的大小调节 “Range select” 按键。



**图 5 电流卡钳量程选择**

在插入导线和调节范围之后电流卡钳表就可以显示被测电流的大小,通过读取示波器数字显示屏上显示的数值即可获取被测电流的大小。如果电流卡钳驱动电流满量程值是 20A 或以下,或读出系统(计算机,示波器)在低于满量程 30%时能达到足够的精度和分辨率,则低于满量程 30%的喷射阀驱动电流测量结果也可以接受,在这种情况下,要额外增加标定点以确保标定曲线的准确度。设备的电磁兼容性应达到使附加误差最小的水平,电流卡钳不应偏离名义标定点读数的+2%或满量程的 0.3%,取其中较大值。

### **3.3.2 压力传感器的一般技术要求**

正常使用状态下(静态测试或准静态测试,使用频率不高),传感器的量程选取一要考虑被测力值,传感器量程一般选取是被测量的 1.2~1.5 倍。动态使用时,传感器的量程一般选取大于所测力值的 3~10 倍以上,具体的量程选用要根据测试的频率来决定,一般情况下,测量的频率越高,对应的系数越大<sup>[6]</sup>。考虑当有设备最大出力时(测试容腔内部压力冲击),需要考虑过冲力对传感器的影响,因此在选择时传感器的量程要大于过冲力的 2 倍以上。

传感器的灵敏度需满足试验需求,决定传感器的分辨率,同时决定系统分辨率,理论上测试系统分辨率为 100kHz 以上,压力传感器的灵敏度应大于测试系统分辨率。压力传感器的安装可采用螺纹固定和工装附件固定的方式,但注意压力传感器密封位置气密性要保证。

### **3.3.3 质量流量计的一般技术要求**

质量流量计应该有适合用来测量通过设备流量所需精度的量程,推荐质量流量计在满量程的 15%到 100%之间测量,应使测量的喷气量落在此区间内。如果在低于满量程 15%时喷气量测量值能达到足够的精度和分辨率,则低于满量程 15%的喷气量测量结果也可以接受,在这种情况下,要额外增加标定点以确保标定曲线的准确度。设备的电磁兼容性应达到使附加误差最小的水平。质量流量计不应偏离名义标定点读数的+2%或满量程的 0.3%,取其中较大值。在所有的应用量程,质量流量计对喷气量在 10 秒期间的峰-峰响应值不应超过满量程的 2%。

## **4 测试条件**

### **4.1 标准测试条件**

试验用气应符合 GB/T-17820-2012 规定的天然气。

试验台气源供气温度为 0°C ~ 60°C。

环境温度: 20°C ~ 30°C。

相对湿度：40%~80%。

大气压力：86 kPa~106 kPa。

注：在试验期间，允许的温度变化每小时不超过1℃。

清洁度要求：试验台及天然气喷射阀清洁度应满足要求，装配过程注意保持清洁，避免杂质污物进入精滤后天然气管路，试验气体最后一节过滤精度通常为5μm。

标准压力气源：标准压力源应选用工作基准活塞压力计、工作基准微压计、标准活塞式压力计、标准活塞式真空计、气动活塞式压力计、标准浮球式压力计、标准液体压力计(微压计)、数字式压力计、精密压力表及其他相应准确度等级的压力计量标准器。标准压力源选择原则如下：对于0.01级~0.05级的传感器，其误差不应超过被试传感器允许基本误差的1/2；对于0.1级~4.0级的传感器，其误差应不超过被试传感器允许基本误差的1/3；提供的仪表或监视标准压力源的仪表量程，应为被试传感器满量程的125%~500%；在整个量程范围内的压力输出应连续可调，压力输出也可以采用阶跃式调节，但阶跃的方式必须保证被试传感器在试验过程中不因过冲和扰动而引起迟滞误差。

设备供电电源：设备供电电源按试验传感器要求，应选用精密稳压电源、稳流电源、干电池或蓄电池等，其稳定度误差不应超过被试传感器允许基本误差的1/5。

## 4.2 基本测试设备要求

测试气体气源、减压阀、质量流量计、气轨、测试容器、压力传感器、温度传感器、电流卡钳、电荷放大器、示波器、高速信号采集卡、CAN卡、上位机PC、燃气阀控制系统。所有测量设备的校准应该可溯源到国家基准并满足下表1条件，测量中所用重要零件标准满足下表2条件。

表1 测量设备校准标准

序号	测量设备	精度	校准期限(月)
1	电流卡钳	读数的±2%或驱动电流最大值的±1%，取大值	3
2	压力传感器	读数的±2%或所测压力最大值的±1%，取大值	3
3	温度传感器	读数的±2.5%或所测压力最大值的±1.5%，取大值	6
4	质量流量计	喷射阀最大值的2%	3

表2 重要零件标准

序号	名称	标准
1	压力气源	压力气源需满足测试系统压力需求，测试气体应符合



合 GB/T-17820-2012 技术要求

2	减压阀	减压阀量程为最大喷气压力的 1.2~1.5 倍
3	钢制气管	钢制气管尺寸均为 $\phi 6$ ，长度不长于 80cm
4	供电电源	供电电源 24V

## 5 喷射阀测试方法及流程

### 5.1 喷射阀可靠性试验

密封性试验：正式测试开始前，设定燃气压力为额定工况压力，脉宽为额定工况脉宽，喷射频率为额定工况频率，运行 10 分钟，观察燃气喷射阀各密封处是否泄露。

内部泄漏量试验：在试验台上，发动机低压天然气喷射阀设定压力为 1.5 倍额定压力的条件下，观察发动机低压天然气喷射阀各处不得有裂纹、无明显燃气泄露现象、压力破坏现象，验证各部件的耐压性能。

工作压差试验：在试验台上，发动机低压天然气喷射阀设定发动机常用压力范围，观察发动机低压天然气喷射阀在全工况压力范围运行正常，无明显喷射阀不抬阀、无法闭阀等异常现象，确保喷射阀在额定工作压差正常运行。

### 5.2 驱动电流测试试验

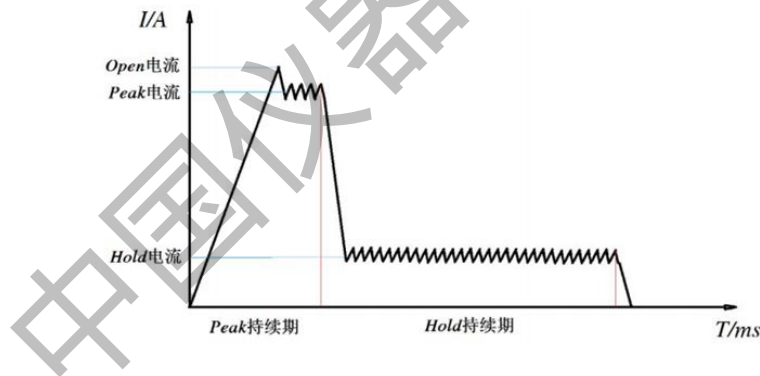


图 6 喷射阀驱动电流通用形式

喷射阀电磁线圈耐久性测试：在试验台上，将电流卡钳连接燃气喷射阀接线端和示波器，设定喷射阀驱动电流为额定驱动电流，喷射频率为额定工况频率，运行 30 分钟，观察示波器处燃气喷射阀驱动电流是否发生改变，电磁线圈是否温度过高。

喷射阀驱动电流能力测试：在试验台上，将电流卡钳连接燃气喷射阀接线端和示波器，设定喷射阀驱动电流为额定驱动电流，将喷射压力调节为发动机低压天然气喷射阀最大喷射压力，观察额定驱动电流条件下燃气喷射阀是否能够完成抬阀。

a) 在试验台上，使用喷气规律测量装置，测量标定工况喷气规律，计算燃气喷射阀的

开启响应时间是否匹配发动机控制系统要求的开启响应时间偏差。

b) 在试验台上, 使用喷气规律测量装置, 多次测量标定工况下的单个燃气喷射阀的喷气规律, 计算多次测量得到的喷气规律曲线的拟合优度。

c) 在试验台上, 使用喷气规律测量装置, 测量怠速工况、额定工况下的喷气规律, 计算各缸燃气喷射阀的开启响应时间及喷气规律曲线的拟合优度的一致性偏差。

### 5.3 喷气量测试试验

a) 在试验台上, 使用喷气量测量装置, 测量标定工况喷气量, 并计算与匹配发动机要求的标定喷气量偏差。

b) 在试验台上, 使用喷气量测量装置, 多次测量标定工况下的单个燃气喷射阀的喷气量, 计算喷气量重复性相对标准差。

c) 在试验台上, 使用喷气量测量装置, 测量怠速工况、额定工况下的喷气量并计算各缸喷气量一致性偏差。



图7 喷气量测试试验气路连接示意图

### 5.4 喷气规律测试试验

a) 在试验台上, 使用喷气规律测量装置, 测量标定工况喷气规律, 计算燃气喷射阀的开启响应时间是否匹配发动机控制系统要求的开启响应时间偏差。

b) 在试验台上, 使用喷气规律测量装置, 多次测量标定工况下的单个燃气喷射阀的喷气规律, 计算多次测量得到的喷气规律曲线的拟合优度。

c) 在试验台上, 使用喷气规律测量装置, 测量怠速工况、额定工况下的喷气规律, 计算各缸燃气喷射阀的开启响应时间及喷气规律曲线的拟合优度的一致性偏差。

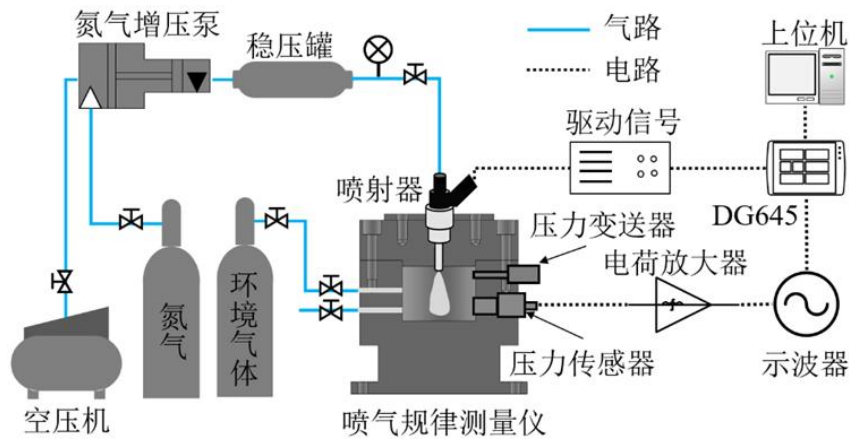


图 8 喷气规律测试试验气路连接示意图

## 6 结论

总的来说,船舶动力发动机低压天然气喷射阀测试体系的开发代表了一项积极而迫切的举措,以满足航运业不断增长的需求、加强环境保护,并促进可持续性发展。这一创新的测试体系为船舶运营者提供了强大的工具,以确保他们的船舶在法规、性能和环保方面都能达到最高标准。通过对低压天然气喷射阀的全面测试,航运行业可以实现更高的效率、更低的排放和更低的维护成本,从而提高了整体竞争力。此外,该测试体系的引入也将鼓励更多的技术创新和绿色船舶动力解决方案的发展,有望进一步改善行业的可持续性。在面对全球环境挑战和法规要求日益增加的船舶行业,这一技术创新为航运行业树立了榜样,展示了如何将环保与经济效益相结合。它为船舶运营者、技术团队和政策制定者提供了一个有力的工具,以实现更清洁、更高效的航运,为未来提供更健康、更可持续的海洋环境。

### 参考文献:

- [1] 高荃. 航运业的“双碳”之路该如何走? 未来业界还应关注什么? [J]. 柴油机, 2022, 44(05): 1-5.
- [2] 李银涛. 绿色低碳船舶发展趋势及未来展望[J]. 中国船检, 2023(04): 63-73.
- [3] 王明月. 新能源汽车产业市场分析[J]. 合作经济与科技, 2023(11): 86-87.
- [4] 王磊明, 沈彬, 闫晓娜等. 全产业链视角下内燃机行业“双碳”路径探析[J]. 内燃机与配件, 2023(20): 90-92.
- [5] 刘志良. 双碳目标下, 船用内燃机如何把握新航向[N]. 中国船舶报, 2021-05-21(007).
- [6] 张钰钦. 基于甲烷值在线测量技术的天然气发动机性能影响研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2022.

- [7] 周胜余,徐士,段继翔等.某型国六天然气发动机燃气系统优化分析[J].内燃机与配件,2022(07):16-18.
- [8] 付晓东.天然气发动机缸内湍流与燃烧相互作用机制研究[D].吉林大学,2022.
- [9] 王洪悦.喷射策略和燃烧室形状对天然气发动机燃烧特性的影响研究[D].哈尔滨工程大学,2021.
- [10] 董全,张楠,王忠义.船舶动力实验教学平台建设与开放共享管理[J].实验室研究与探索,2023,42(05):260-263.
- [11] 王静.碳达峰碳中和目标下现代能源供应链生态系统高质量发展研究[J].社会科学研究,2023(04):65-73.
- [12] 吴智勇.碳达峰碳中和目标下我国能源低碳转型思路初探[J].中国能源,2022,44(09):51-56.
- [13] 耿维明.关于构建国家先进测量体系的设想[J].中国计量,2021(11):17-20.
- [14] 张彦,石慧,袁成清等.内河绿色船舶测试体系研究[J].航海技术,2023(04):54-58.
- [15] 殷剑锋,赵中祥,孙鹏等.气体发动机燃气阀试验系统的开发[J].机械管理开发,2020,35(02):17-19.
- [16] 李河山,张万杰,田英帅.压力传感器在燃气压力计量中的选用探讨[J].城市燃气,2019(11):4-10.