

# 脉冲爆震发动机旋转阀技术研究

孙 亮, 白少卿, 罗大亮

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 为解决脉冲爆震发动机高频稳定连续燃烧推进剂间歇式供应难题, 开展了旋转阀技术研究。通过采用伺服电机驱动二阶凸轮特殊结构设计, 将电机轴的旋转运动转换为控制阀芯的直线开关运动, 并放大电机旋转频率特性, 实现最大 200 Hz 的高频控制。突破了高频响应、长寿命驱动和氧气安全性保障关键技术, 完成旋转阀鉴定试验和脉冲爆震发动机地面点火试车考核。研究结果表明, 与传统电磁阀相比, 旋转阀能够有效提高响应频率, 实现了爆震波的稳定连续输出, 满足工程应用要求。

**关键词:** 脉冲爆震发动机; 旋转阀; 高频控制

**中图分类号:** V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 04-0041-06

## Technology research of rotary valve for pulse detonation engine

SUN Liang, BAI Shaoqing, LUO Daliang

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** In order to resolve the difficult problem of pulse detonation engine's steady and continuous burn of the fuel which is supplied intermittently, the technology research of rotary valve was developed. The motor axle's rotary motion is transformed to linear on-off motion of the valve core based on the design of a special structure in which the servo motor is adopted to drive two-order cam. The rotational frequency of the motor is enlarged by two-order cam simultaneously to realize the control of high frequency of 200 Hz. The key technology problems of high-frequency response, long-life drive and oxygen safety were resolved. The rotary valve's performance test and the ground fire test at different operation frequencies were carried out. The results show that the rotary valve can improve the frequency response more efficiently in comparison with the traditional solenoid valve, and satisfy the requirement of engineering application. Steady and continuous output of the detonation wave was realized.

**Keywords:** pulse detonation engine; rotary valve; high-frequency control

收稿日期: 2016-05-30; 修回日期: 2016-07-05

作者简介: 孙亮 (1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机阀门设计与研发

# 0 引言

脉冲爆震发动机 (Pulse detonation engine, PDE) 是一种利用周期性爆震波产生的高温高压燃气来产生推力的非稳态动力装置, 是当前新概念推进技术领域研究热点, 其潜在的优越性能得到了广泛的关注。与传统发动机不同的是: PDE 是基于爆震燃烧基础上的间歇性工作的动力装置, 因此如何在爆震管内迅速、可靠地产生爆震波是 PDE 设计中的核心问题, 同时也是决定 PDE 性能好坏的核心要素, 高频响应旋转阀是解决此核心问题的重要途径。为满足系统高频控制要求, 控制阀设计时采用电机驱动旋转、二阶凸轮特殊机构驱动转化为阀芯直线开关运动、齿轮变速器放大机构转换、驱动器程序控制调节等设计关键技术, 实现旋转阀 2~200 Hz 高频控制功能。该阀已完成地面热试车考核。

# 1 研究现状

在脉冲爆震发动机的工作过程中, 存在如何实现高频周期性进气的问题。美国的 Helman 在模拟飞行状态的脉冲爆震发动机模型中采用的油、气阀门都是电磁阀, 但电磁阀存在频率过低、需外加快响应驱动电源等缺陷。还有一类阀门——气动阀能用于脉冲爆震发动机。气动阀在冲压发动机和脉动发动机上有过不少应用, 典型的如 Kentifield, Bertin, Wislicenus 等气动阀。这几种气动阀在结构上有所不同, 但其气动原理是一样的。国内外有关研究人员已在上述结构的基础上开发出一些气动阀应用于 PDE, 如 Smirnov 等的锥形气动阀, Ashasov 和 Penyazkov 等带 90° 拐弯结构的复合式气动阀, Levin 等的阻流器式气动阀, Brophy 等组合了锥形与 Kentifield 的气动阀及范育新、王家骅等的旋流器式气动阀。除此之外, 国内外还开发了旋转阀应用于脉冲爆震发动机。旋转阀利用旋转周期性打开和关闭介质通路或者爆震管, 较好地解决了频率和开关质量问题, 是 PDE 研究的另一项核心课题。旋转阀的优点在于进气时流阻小、关闭时密封性好, 特别是响应频率较高, 可以达到 200 Hz 量

级, 因此在已研制 PDE 样机中得到广泛应用, 如普惠公司研制的五管旋转阀式 PDE 样机, 在模拟高空 12 000 m 条件下实现了最高工作频率 120 Hz 的稳定工作。

# 2 技术方案

脉冲爆震发动机控制用高频旋转阀主要由伺服电机、相位反馈编码器、转换齿轮、放大齿轮、二阶凸轮、驱动钢球、旋转阀体、氧路阀、燃路阀、氮气阀、离心喷嘴和转接支架等组成, 材料均按照相关标准要求选用与氧气相容的牌号。采用单个电机轴同时驱动三路阀芯实现启闭控制结构设计, 其中氧气路和煤油路为同相位, 氮气路与其错开 90°, 二阶凸轮实现电机旋转一周, 三路各自旋转两周的频率放大功能, 实现高频驱动。旋转阀的主要技术指标要求见表 1。

表 1 旋转阀主要技术指标

| Tab. 1 Primary specifications of rotary valve |                   |      |      |
|---|-------------------|------|------|
| 项目  | 技术指标              |      |      |
| 流量/(g·s <sup>-1</sup> )                       | ≤200              | ≤200 | ≤50  |
|   | (氧气)              | (氮气) | (煤油) |
| 流阻/MPa  | ≤0.2              | ≤0.2 | ≤0.1 |
| 额定入口压力/MPa                                    | 1.7               | 2.1  | 1.0  |
| 工作电压/V  | 28 (DC), 220 (AC) |      |      |
| 最高入口压力/MPa                                    | 4.0               |      |      |
| 工作频率/Hz                                       | ≤200              |      |      |
| 气密性   | 内漏率: ≤ 总工作流量的 5%; |      |      |
|   | 外漏率: 不允许外漏        |      |      |
| 工作寿命  | 连续旋转运动 1 000 h 以上 |      |      |

脉冲爆震发动机旋转阀结构如图 1 所示, 其结构设计具有以下特点:

1) 旋转阀采用空冷交流伺服电机带动凸轮机构旋转, 驱动滚珠滚动, 并产生各路阀芯开度变化, 使各阀芯能够打开和关闭。电机可以实现凸轮相位的准确控制和位置反馈, 并提供点火信号, 也可以实现额定工作频率以下的连续调节。

2) 旋转凸轮采用二阶凸轮驱动机构, 每路阀芯在电机转动一周时间内打开和关闭工作各 2 次, 其工作响应频率是电机驱动频率的 2 倍。氧气阀、煤油阀均由凸轮 1 同时驱动, 旋转打开 90° 工作区域后再旋转关闭 90° 区域。氧气阀和

煤油阀处于相同的相位, 具有相同的打开与关闭动态特性; 氮气阀在氧气阀和煤油阀工作 120° 相位后由凸轮 2 驱动开启, 并工作旋转 30° 区域时间。

阀芯工作状态与凸轮的相对位置关系见图 2。

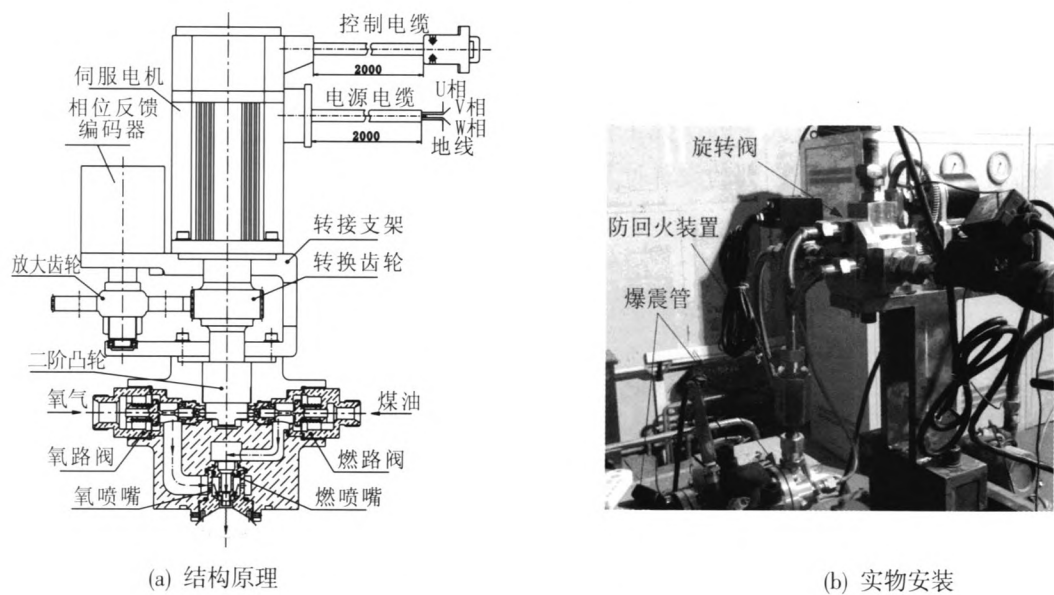


图 1 旋转阀结构原理及其在脉冲爆震发动机系统中的实物安装

Fig. 1 Structure and principle of rotary valve, and picture of pulse detonation engine system

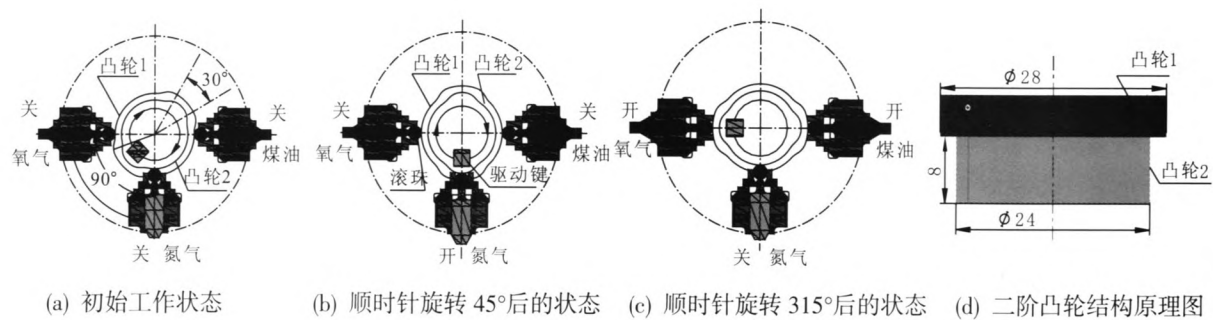


图 2 阀芯开启/关闭状态与凸轮位置相对关系

Fig. 2 Relative relation of valve core on/off state and cam position

3) 三路控制阀芯采用相同的技术方案, 见图 3, 将不同介质工作流量要求不同的阀芯结构按最大流量和通用化思想设计为统一状态, 并通过调整垫片进行大小流量匹配装配。阀芯阀座选用菌状密封型式, 阀芯密封材料选择氟塑料, 保证快速关闭时具有良好的密封性能, 同时兼顾介质相容性及结构强度性能, 以满足高频长时可靠工作要求。

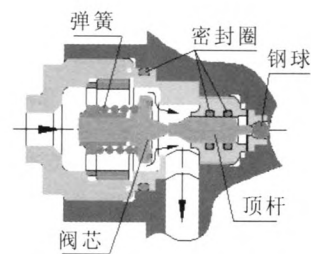


图 3 三路通用阀芯结构

Fig. 3 Three-channel commonly-used structure of valve core

4) 结构方案中的不同介质路阀芯的工作相对相位可以通过更换不同相位控制的凸轮零件实现。凸轮采用高强度材料,并在工作表面进行特殊金属材料涂覆,满足 1 000 h 以上的长寿命工作要求。

5) 旋转阀上还集成设计了推进剂雾化装置——旋流式气-液同轴喷注器,见图 4,为推力产品气-液工作介质常用的喷注单元形式,并在其雾化性能试验方面进行过大量的研究工作;按照该喷注器的设计规范进行详细的设计计算,可以满足良好掺混与雾化的要求。

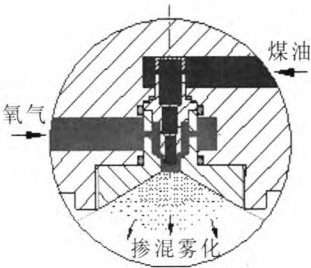


图 4 推进剂掺混雾化喷注器

Fig. 4 Mixture and atomization injector for propellant

6) 电机的设计与选用

电机选择原则:以一个周期内凸轮顶开阀芯瞬间的力所需的全行程最大功率(摩擦力矩)作为电机的输出转矩,进行电机额定力矩选择。所需电机扭矩计算结果见表 2。

表 2 旋转阀凸轮驱动特性计算  
Tab. 2 Calculation of cam driving features of rotary valve

| 项 目              | FF1                 | FF2                 |
|------------------|---------------------|---------------------|
| 工作最大输入功/(N·mm)   | 535.9               | /                   |
| 工作最大摩擦力矩/(N·mm)  | /                   | 487.2               |
| 电机效率             | 0.85                | 0.85                |
| 所需电机输出转矩/(N·mm)  | 630.5               | 573.2               |
| 所选电机的额定转矩/(N·mm) | 2.5×10 <sup>3</sup> | 2.5×10 <sup>3</sup> |
| 所选电机的最大转矩/(N·mm) | 7.5×10 <sup>3</sup> | 7.5×10 <sup>3</sup> |
| 安全系数(额定)         | 3.97                | 4.36                |

根据表中所需电机输出转矩计算结果,经过对比分析,选择某公司生产的 80 系列空冷交流伺服电机。该电机的额定转矩为 2.5 N·m,最大转矩为 7.5 N·m;额定转速为 3 000 rpm,最高转速为 3 600 rpm;额定功率为 0.75 kW。电机可以实现转速的任意设定,通过相位编码器能够进行转角位置设定和位置反馈,该反馈信号可以作为下一周期的点火控制信号。

3 关键技术及攻关

旋转阀设计时采用伺服电机驱动、二阶凸轮转换、滚动钢球承接、三路阀芯分别高频率启闭的结构方案,具有结构新颖、驱动频率高、相位可调、频率可控、相位可输出的特点。研制过程中突破了高频响应控制、长寿命可靠驱动、氧气使用安全性等关键技术。

3.1 高频响应控制设计

设计要求旋转阀控制频率不小于 60 Hz,且国际上已完成 80 Hz 的验证试验,而现有传统大流量电动气阀最快响应频率仅达到 30 Hz。要满足 60 Hz 以上的控制无法采用传统的电磁阀或电动气阀结构方案,必须创新结构设计。

设计时选用了电机驱动凸轮转换的旋转阀结构方案,通过滚动钢球将电机的旋转运动转换为常规阀芯的启闭直线运动,并通过二阶凸轮机构将高频电机的驱动频率(60 Hz)进行放大,使电机转动一圈,凸轮高低行程变化 2 次,从而使使得阀芯可以开关 2 次,将电机频率放大一倍,实现了 200 Hz 以上的高频响应设计,同时也可再通过变速器结构实现更快频响的控制设计。

3.2 长寿命可靠驱动设计

针对发动机试验要求旋转阀满足 1 000 h 以上旋转工作寿命要求,分析其关键设计点为凸轮机构与滚动钢球之间的耐磨性。为此,设计过程中采取了以下途径及措施:

1) 在凸轮外表面和与之配合的阀体内孔面上均进行镀铬化学表面处理,增强其耐磨性。镀铬主要是提高凸轮及其配合面的表面硬度和耐磨性能,以延长凸轮的使用寿命。镀铬层硬度达到 Hv800~1 100,抗磨料磨损性能好,熔点高达



1 770 ℃, 可改善耐熔磨损性能。在正常同等条件下, 镀铬后零件的使用寿命可提高 10~50 倍。做好凸轮及配合零件导向面的镀铬能够很好地满足工作寿命要求。

2) 设计合理的凸轮高低行程过渡面。采用流线圆弧结构设计, 能够有效减少运动阻力, 提高凸轮旋转运动的灵活性, 也消除了由于过渡不顺畅导致磨损, 降低寿命问题。

3) 表面有效润滑结构设计。在凸轮与阀体内腔及钢球配合面处, 设计留有一定容腔的结构, 用于贮存和保留满足长时间工作必需的润滑油, 并在装配中严格控制和检查。

3.3 安全性设计

由于旋转阀工作介质为氧气、煤油和氮气, 存在氧气使用安全性的问题, 针对该安全性问题设计时采取了如下措施:

1) 选择满足压力和流速安全性要求的材料。根据设计要求, 氧气工作压力最大为 4 MPa, 满足大于 0.6 MPa 且小于 10 MPa 的范围, 根据 GB16912-1997 《氧气及相关气体安全技术规程》规定, 其相关结构材料可以选用奥氏体不锈钢结构, 设计中均选用了不锈钢 1Cr18Ni9Ti 材料, 并热处理成奥氏体状态。

2) 禁油设计。在设计和装配中禁止在氧气通路中使用润滑油膏, 并在装配前进行严格清洗, 装配试验中严格控制。

3) 减少运动中的摩擦磨损。在氧气路结构中提高设计表面的光洁度, 避免锐边结构, 确保运动中不产生摩擦火花现象。

4 旋转阀试验

通过关键技术攻关, 旋转阀通过了设计鉴定试验, 完成了脉冲爆震发动机地面多次高频脉冲点火热试车考核, 其工作性能和寿命均满足技术指标, 达到工程应用要求。

4.1 设计鉴定试验

旋转阀按照技术文件要求完成了全部设计鉴定试验内容。试验项目包括: 阀芯行程检查、液压强度试验、工作压力 1.0~4.0 MPa 下的气密性检查、流量流阻特性试验、动作寿命试验 (动作

脉冲频率为 10~200 Hz) 等。  
试验中旋转阀工作正常, 产品性能均满足技术文件指标要求, 具体见表 3。

表 3 旋转阀设计鉴定试验结果  
Tab. 3 Design authentication and test results of rotary valve

| 项目                      | 技术指标                            |              |              | 满足情况 |
|-------------------------|---------------------------------|--------------|--------------|------|
| 阀芯行程/mm                 | 1.2                             | 1.5          | 1.2          | 满足   |
| 流量/(g·s <sup>-1</sup> ) | ~220<br>(氧气)                    | ~220<br>(氮气) | ~100<br>(煤油) | 满足   |
| 流阻/MPa                  | 0.16                            | 0.17         | 0.096        | 满足   |
| 额定入口<br>压力/MPa          | 1.7                             | 2.1          | 1.0          | 满足   |
| 工作电压/V                  | 220(AC)                         |              |              | 满足   |
| 最高入口<br>压力/MPa          | 4.0                             |              |              | 满足   |
| 最高工作<br>频率/Hz           | ≤200                            |              |              | 满足   |
| 气密性                     | 内漏率:5 min 不漏气;<br>外漏率:5 min 不漏气 |              |              | 满足   |
| 工作寿命                    | 连续旋转运动 1 100 h 无异常              |              |              | 满足   |

4.2 热试车考核情况

旋转阀先后参加了脉冲爆震发动机试样阶段共计 105 次地面高频脉冲点火试车 (图 5)。采用编码器、解码器和计算机组成点火控制系统, 以汽油为燃料, 氧气与氮气的混合气体(各占 50%)为氧化剂, 氮气作为隔离气。进行了基于旋转阀的点火试车实验研究, 验证了其应用于脉冲爆震发动机的可行性, 实现了工作频率 2~200 Hz 的稳定运行试车 (见图 6)。在旋转阀的高频控制下, 脉冲爆震发动机均可实现稳定、连续和充分发展的爆震波输出, 爆震波速为 1 750~2 800 m/s, 达到了 C-J 波速的 80%~97%。

试车中, 旋转阀工作正常, 响应频率满足试车控制要求。

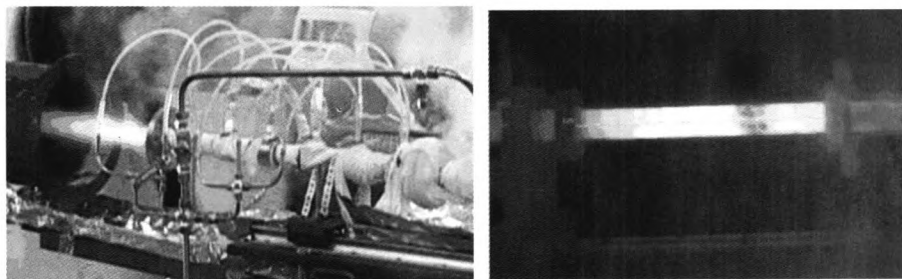


图 5 脉冲爆震发动机试车点火现场照片及爆震管红外照片  
Fig. 5 Picture of fire test of pulse detonation engine and infrared photograph of detonation tube

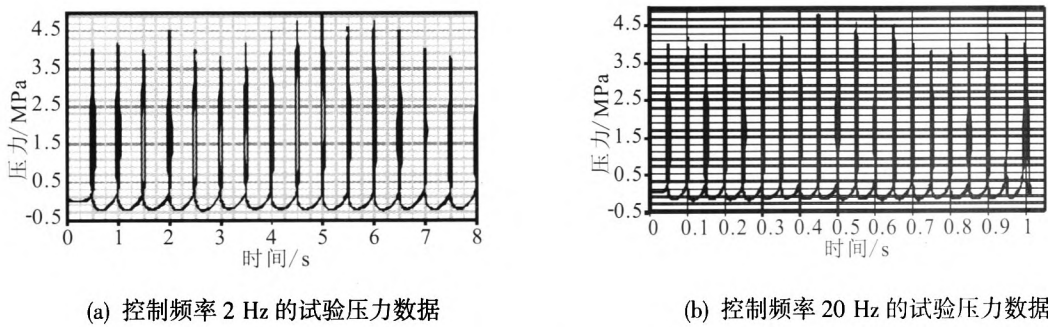


图 6 脉冲爆震发动机试车爆震管内压力高频响应曲线  
Fig. 6 Curves of pressure high-frequency response inside detonation tube in pulse detonation engine fire test

5 结束语

旋转阀是为新型脉冲爆震发动机技术攻关配套研制的一种阀门产品，用于解决脉冲爆震发动机实现稳定、连续、充分发展爆震波而必须进行的推进剂供应高频间歇式控制的难题。通过旋转阀的结构方案设计和关键技术攻关，顺利完成了设计鉴定试验项目，实现了最高频率 200 Hz 的脉冲爆震点火控制效果，后续将同脉冲爆震发动机一起重点研究工程应用课题，完成飞行演示验证。

参考文献：

[1] 严传俊, 范玮. 脉冲爆震发动机原理及关键技术[M]. 西安:

西北工业大学出版社, 2005.  
[2] 陈帆, 范玮, 王可. 基于旋转阀的脉冲爆震火箭发动机实验[J]. 北京: 推进技术, 2013, 34(6): 860-864.  
[3] 王可, 范玮, 严宇. 双管脉冲爆震火箭发动机实验研究[J]. 北京: 推进技术, 2012, 33(1): 116-120.  
[4] 陈巍, 范玮. 脉冲爆震火箭发动机高频实验研究[J]. 北京: 推进技术, 2011, 32 (3): 443-446.  
[5] 范育新, 王家骅. 脉冲爆震发动机气动阀性能分析[J]. 航空动力学报, 2007, 22(1): 142-149.  
[6] 张少博, 王乃世, 陈海峰, 等. 基于声压测量的阀门故障检测方法研究[J]. 火箭推进, 2015, 41(4): 100-104.  
ZHANG S B, WANG N S, CHEN H F, et al. Method of valve fault detection based on sound pressure measurement[J]. Journal of rocket propulsion, 2015, 41(4): 100-104.

(编辑：陈红霞)