

# 液氧试验台系统设计与实现

张基鑫, 张鹤平

(陕西动力机械设计研究所, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 液氧试验台能够进行液氧煤油发动机液氧泵中轴承、密封件模拟实际液氧工作环境的可靠性、安全性研究。试验台由配气系统、液氧供应系统、涡轮驱动系统、轴径向加载系统、操纵指令控制系统、测试系统、安全防护系统等组成。通过轴承、端面密封组件在液氧、液氮中的运转试验, 可为发动机研制提供准确数据。

**关键词:** 液氧; 试验台; 系统

**中图分类号:** V416.8

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2004)04-0049-06

## Design and Realization of LOX Test Bed System

Zhang Jixin, Zhang Heping

(Shaanxi Engine Design Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Reliability and safety experiments of bearings and seals of LOX/kerosene rocket engine LOX pump were conducted on the LOX test bed under the conditions close to the real operation of LOX. The test bed consisted of gas distribution system, LOX supply system, turbine driving system, axial and radial loading system, command and control system, measuring system and safety protection system. The operation tests of bearing and face seal components in LOX and liquid nitrogen provided accurate data for future engine development.

**Key words:** LOX; test bed; system

### 1 引言

液氧煤油高压补燃发动机中, 为保证液氧泵安全可靠工作, 需要对在液氧中工作的轴承、密封组件进行工作可靠性、安全性试验, 设计建设液氧试验台是非常必要的。试验台可以使轴承、密封组件模拟在实际的环境下工作, 以降低发动机研制试验

的风险, 降低研制成本, 加快研制进度。

试验台液氧供应方式采用氮气挤压式, 保证试验器中液氧压力、流量及温度满足试验技术指标要求。拖动系统采用空气(或燃气)驱动涡轮拖动试验器进行运转试验, 通过调节涡轮入口空气(或燃气)压力来保证涡轮输出转速, 可实现无级调速。

在做摩擦副试验时, 给试验器中的被试件加

收稿日期: 2003-09-09; 修回日期: 2003-10-09。

作者简介: 张基鑫(1949—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验技术。

上轴向负荷；在做轴承试验时，运转前预加轴向载荷，当转速达到工作条件下的转速后，在30s内加满轴向载荷和径向载荷来进行运转试验；在做密封件试验时，采用2#液氧贮箱辅助供应系统，使脱开式密封件先行脱开，然后启动数采、启动涡轮，再由1#液氧贮箱主供应系统使脱开式密封件完全脱开，进行运转试验。

试验台是由配气系统、液氧供应系统、涡轮驱动系统、轴、径向加载系统、操纵指令控制系统、测试系统、安全防护系统等组成。

## 2 配气系统

系统由氮气瓶、空气瓶、手动截止阀、氮气过滤器、配气台、供气管路及管路连接件等组成。功能是将合格的氮气根据试验要求经减压后输送到液氧试验台各系统上的用气点；采用空气驱动涡轮并拖动试验器，使之达到要求的试验转速。

系统中氮气瓶可提供容积 $2.0\text{m}^3$ 、压力 $35\text{MPa}$ 、质量指标符合GJB3040-98要求的氮气；空气瓶可提供容积为 $8.0\text{m}^3$ 、压力 $35\text{MPa}$ 的涡轮驱动空气；气体经过 $14\mu\text{m}$ 空气、氮气过滤器后由配气台进行分配，完成1#、2#液氧贮箱增压供气，试验器工艺腔/工作腔氮气吹风、吹除供气，气动阀供气和轴/径向加载供气调节和控制。配气台系统原理见图1。

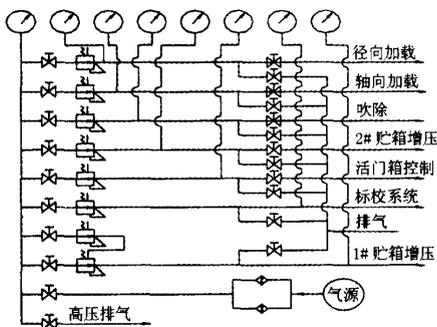


图1 配气台系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of gas distribution system

## 3 液氧供应、排放系统

液氧供应、排放系统由加注系统、液氧主供应系统、液氧辅助供应系统、液氧回收排放系统等组成。分别完成液氧加注、供应和回收功能。

加注系统由液氧/液氮槽车、金属软管、低温手动截止阀、液氧过滤器、测温传感器、液氧贮箱下集液管、液氧排放系统及管路等组成。

液氧（或液氮）槽车采用自增发氧气压力将液氧（或液氮）加注到液氧贮箱内。为了对贮箱进行充分预冷并减少液氧（或液氮）损耗量，加注操作时将槽车的氧气（或氮气）压力 $p$ 小于等于 $0.3\text{MPa}$ 。

液氧主供应系统是由液氧贮箱（ $V=2.1\text{m}^3$ 、 $p=30\text{MPa}$ ）、手动截止阀、气动截止阀、流量计组件、液氧过滤器、分配器、液氧贮箱上下集气/集液管、测温/测压传感器、管路及管路连接件等组成。系统可进行轴承最大流量为 $m=6\text{kg/s}$ 、每加注一次运转时间大于 $100\text{s}$ 和端面密封试验流量为 $m=4\text{kg/s}$ 、运转试验时间大于 $200\text{s}$ 。液氧过滤器过滤精度为小于等于 $38\mu\text{m}$ 。液氧主供应系统原理图见图2。

液氧辅助供应系统功用是进行液氧煤油发动机涡轮泵端面密封组件试验时，可实现试验启动前使端面密封 $80\%$ 脱开，压力为 $2.5\text{MPa}\sim 3.5\text{MPa}$ ，涡轮启动后供脱开压力 $5\text{MPa}$ ，使之端面密封完全脱开进行运转试验。该系统由液氧贮箱、低温手动截止阀、低温气动截止阀、流量计、测温测压初级变送器、氧气压力表、管路及管路连接件等组成。系统原理见图3。

液氧回收、排放系统由1#液氧贮箱排放系统、2#液氧贮箱排放系统、试验器液氧排放系统、液氧回收和排放容器等组成。液氧回收、排放系统原理见图4。该系统将试验器排出的液氧，试验后贮箱排放的液氧及加注系统排放的液氧回收液氧蒸发器内使之转化成氧气排放到高空大气中，以保证试验场区的安全。

## 4 涡轮驱动系统

采用空气驱动涡轮拖动试验器进行运转试验，涡轮的工质为冷空气（或燃气）。该系统由空

气瓶、减压器、调节构件、燃气发生器、涡轮、阀门及管路等组成。采用涡轮的好处是通过调节涡轮入口空气压力可实现无级调速，最高转速可

达到 50000r/min，用电机是无法实现的。利用涡轮的机械特性，在试验器中出现卡涩现象时，可自动失速，保证试验系统安全可靠运行。

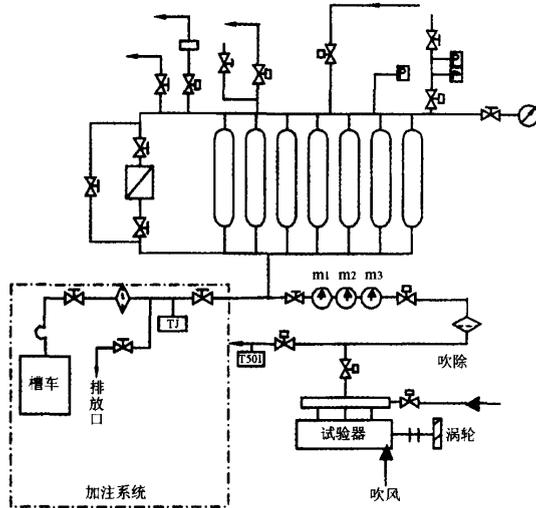


图 2 液氧主供应系统原理图

Fig.2 Sketch of main LOX supply system

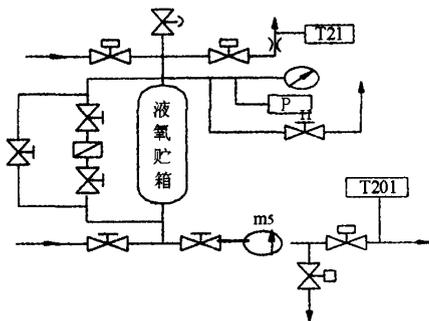


图 3 液氧辅助供应系统原理图

Fig.3 Sketch of auxiliary LOX supply system

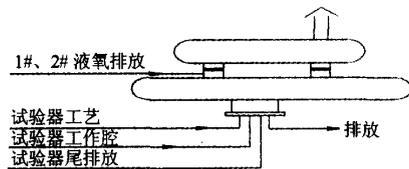


图 4 液氧回收、排放系统原理图

Fig.4 Sketch of LOX recovery/drain system

涡轮轴承在试验运转过程中必须进行冷却润滑，系统使用的推进剂为液氧，为保证试验安全可靠的进行，轴承冷却不能用油，所以采用水进行冷却润滑。涡轮轴承冷却水供给系统是由水箱、手动截止阀、气动截止阀、过滤器、流量计、管路及管路连接件等组成。该系统保证涡轮冷却水供给压力 0.5MPa~0.55MPa，以满足涡轮轴承

冷却水流量大于 0.1kg/s 的要求。涡轮驱动系统原理见图 5。

### 5 试验器轴向、径向加载供气系统功用及组成

系统功用是试验时采用氮气增压方式给试验

件加轴、径向载荷。采用氮气增压比用水增压的好处是：加载作动筒和加载系统管路不被冻住，在氮气系统中通过设置稳压器和节流孔板可实现

30s内完成给试验件加满轴、径向载荷。试验器轴、径向加载供气系统原理见图6。

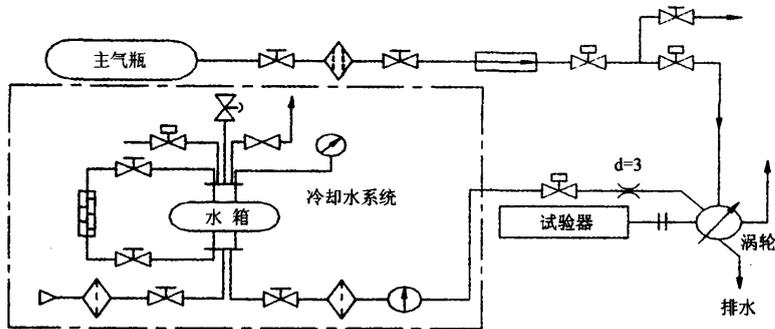


图5 涡轮驱动系统原理图

Fig.5 Schematic diagram of turbine-driven system

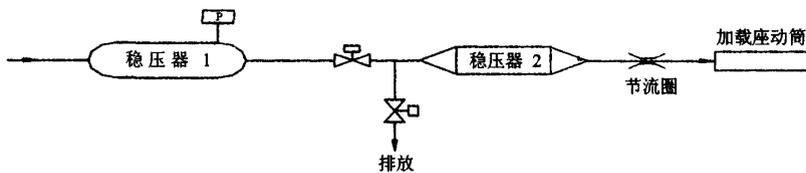


图6 轴向、径向加载供气系统原理图

Fig.6 Schematic diagram of gas distribution system for axial and radial loading

该系统是由手动截止阀、减压器、稳压器1 ( $V=0.01\text{m}^3$ 、 $p=15\text{MPa}$ )、稳压器2、增压排放截止阀、节流圈、压力变送器、管路及管路连接件组成。

## 6 试验器工艺腔、工作腔氮气吹风、吹除系统功用及组成

系统功用是试验前用该系统对试验器腔进行氮气置换；试验时给试验器工艺腔尾部供氮气吹风压力，形成冷却环带，将泄漏的液氧迅速转化成气氧，吹风压力为70%~80%；试验后，用压力0.5MPa的氮气吹除试验器工作腔、工艺腔中的液氧，吹除时间大于5min；如果试验器内发生着火现象，可用该系统进行氮气灭火。该系统是由手动截止阀、减压器、稳压器、吹风截止阀、吹

除截止阀、压力变送器、管路及管路连接件组成。

## 7 操纵、指令控制系统

系统功用是实现远距离操纵，控制试验台系统上所设置的气动截止阀可靠的接通、关闭；控制强力通风机的启、停；控制雨淋电磁阀的开启、关闭；监视1#贮箱示警压力，显示电流、电压等。该系统是由电气操纵台和双向电磁阀箱两大部分组成。

电气操纵台：试验指令通过电器指令控制双向电磁阀动作，可实现遥控气动截止阀动作；指令控制台内设计了紧急故障保护系统，试验过程中通过自动检测压力、温度，在超过预先设置的警戒线时，自动运行故障保护程序，实现安全可靠关机。

双向电磁阀箱：双向电磁阀与稳压器安装于双向电磁阀箱内，通过管路与气动截止阀连接组成气路控制系统，采用气动控制满足了 Q-1 级防爆要求的规范；采用气体实现了电气系统与供应系统的隔离和信号连接，防止电火花产生的爆炸隐患。双向电磁阀箱是由活门箱体、稳压器、双向电磁阀、管路及管路连接件等组成。

## 8 测试系统

依据试验任务书中提出的测量参数、测量精度、参数采集速度要求进行系统设计。参数测试的方案一般有两种：一种是由直读式仪表直接进行观察记录；另一种是用数据自动采集记录系统。液氧试验台测试系统采用 HT100.8 数据采集系统进行自动采集试验参数。数据采集速率为 10ms，满足试验任务书要求测量的参数及试验精度要求。

## 9 技安防护系统

为保护试验系统和试验人员安全，试验台设计和安装了技安防护系统：

(1) 容器间、试验间设计成防爆间，采光窗设计成卸爆窗，观察窗、照明窗设计成防爆窗，照明设备采用防爆型探照灯；

(2) 容器间、试验间设有防静电接地系统，接地电阻小于 1 欧姆，试验系统可靠接地；

(3) 在容器间、试验间内设置氮气灭火系统和电磁阀控制的雨淋灭火系统，试验厂房外设有干粉灭火器。

## 10 实际应用效果

液氧试验台建成后，根据液氧煤油高压补燃发动机研制任务要求，改造和设计了三种低温轴承和两种端面密封组件试验器。为轴承、端面密封组件在液氮、液氧的研制试验创造了基本条件，为提高发动机的工作可靠性发挥了积极作用：

(1) 完成了液氧煤油发动机 QJS7214、6214 轴承在液氮中的运转试验；

(2) 完成了氧泵入口端面密封组件在液氧、液氮中的运转试验；

(3) 完成了液氧主阀性能检查试验；

(4) 完成了燃气单向阀性能检查试验；

(5) 完成了燃气发生器试验系统低温手动截止阀、气动截止阀性能检查试验。

## 11 主要技术成果

在国内建成了第一个高压、大流量、大负荷、高转速液氧试验台，可完成在液氧、液氮介质中工作的零部件性能测试和安全性验证试验。

(1) 采用挤压式供应液氧原理，实现了液氧轴承、端面密封组件试验的可靠供应，保证了试验流量、压力和温度要求。

(2) 用空气涡轮直接驱动试验器进行运转试验，拖动系统简单，环节少，可靠性高，调节涡轮入口压力可实现无级调速；另外利用涡轮的机械特性，试验过程中如出现卡涩等现象涡轮可自动失速，实现试验系统的保护。

(3) 轴、径向加载系统：采用气压式活塞分别进行轴、径向加载（加载时间由稳压器和节流圈保证），可防止低温条件下液压产生的冻结问题，加载、卸载均由气动截止阀联锁控制，提高了安全可靠。

(4) 试验器与涡轮间采用花键联轴节，安装后用手检查联轴节在轴向有 2mm~3mm 的位移，360° 转动联轴节无卡涩现象即可，保证了可靠的联接，又简化了试验器安装定位程序，提高了工作效率。

(5) 试验器工艺腔尾部采用迷宫式密封，试验过程中允许尾部有泄漏，可用一定的氮气压力进行吹除，使外泄的液氧迅速转化成气氧。采用该种密封方案，简化了试验器尾部密封结构，实用性强。

(6) 数据采集用 HT100.8 型系统，该系统采集数据量大（128 个通道），速率高（10ms），实时性强，数据处理方便，可随时提供准确的数值、曲线、图表数据。

(7) 操纵、指令控制系统可实现远距离控制气动截止阀接通、关闭，并设有紧急故障处理程序。通过实时检测试验器上的动态压力传感器和温度传感器信号并进行比较，当压力有突峰或温度有明显升高（ $\Delta t$  大于 20℃ 时），可紧急关机进行系

统保护, 确保试验设备安全可靠运行。

## 12 结论

(1) 液氧试验台达到的技术指标:

涡轮传动的功率为 0~160kW;  
 涡轮输出转速为 0~50000r/min;  
 试验器的转速为 0~30000r/min;  
 工作腔内压力为 0~20MPa;  
 被试轴承液氧流量为 0~6kg/s;  
 工艺轴承液氧流量为 0~2kg/s;  
 工作腔液氧温度为 77~110K;  
 轴向负荷为 20kN;

径向负荷为 10kN;

一次启动运转时间为大于 100s。

(2) 通过建设液氧试验台, 掌握了低温运转试验系统设计、安装和试验的相关工程技术, 为新型火箭发动机研究锻炼了科研队伍, 培养了试验技术人才。在该台上进行的摩擦副、轴承、端面密封件试验提供了准确的试验数据, 加快了研制进度, 为液氧煤油高压补燃发动机的研制做出了突出贡献。液氧试验台采用的液氧供应原理、控制原理、密封技术、绝热技术、涡轮驱动技术、低温测量技术, 为液氧系统的设计、安装、调试提供了经验, 可在相关的领域中进行推广和应用。

\*\*\*\*\*

(上接第 31 页)

## 9 结论

将推力室、喷管夹层结构按刚度和质量等效原则, 等效成等宽度(取波纹板的一个波长)的矩形板, 然后按板单元划分推力室和喷管, 能够真实地反映结构的组成, 计算过程表明这种方法是可行的。

涡轮泵和发动机头部也用板单元来划分, 调整板单元的厚度使之与实际刚度吻合, 调整质量密度使之与实际质量吻合。

以上四种工况的计算可知, 无论是哪种工况, 即不管机架和舱段对接的边界条件如何变化, 四机并联组成的结构系统总存在多阶 40Hz 附近的振动。

工况 3 和工况 4 比较符合发动机的实际工作情况, 在 40Hz~50Hz 的范围内工况 3 有 8 阶模态, 工况 4 有 7 阶模态。工况 4 的约束要比工况 3 强, 这说明加强机架和舱段的对接可以减少这段范围的模态数。

工况 2 和工况 3 的差别在于工况 3 考虑了结构是充满液体的, 比较 40Hz~50Hz 的范围内的模态发现, 充液降低了结构的固有频率。

在所分析的频率范围内(0Hz~75Hz), 单个发动机中燃烧室和喷管主要是刚体变形, 但有个别模态有弯曲变形, 弯曲变形节点大致出现在推

力室过渡架附近; 涡轮泵和排气管基本上全是刚体振型; 机架在各阶模态中均为弯曲变形, 每根梁最多出现两个波, 但弯曲平面每次各不相同。

在工况 2 中轴向运动较大的几阶频率有:

24Hz, 34Hz, 42Hz, 44Hz, 46Hz, 48Hz, 49Hz 和 50Hz。在工况 3 中轴向运动较大的几阶频率有: 36Hz, 37Hz, 40Hz, 41Hz, 42Hz, 42.5Hz, 42.6Hz, 47Hz 和 49Hz。以上这些频率应予以注意, 避免它们和输送管路压强、流量低频脉动耦合, 及与箭体纵向低频振动模态的耦合。

## 参考文献:

- [1] 倪振华. 振动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989.
- [2] Basic Dynamic Analysis User's Guide[M]. 美国 MSC 公司, 1997.
- [3] 赵汝嘉. 机械结构有限元分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.
- [4] 黄道琼, 张继桐, 郭景录. 结构动态特性仿真在液体火箭发动机中的应用[J]. 火箭推进, 2003, 29(3).