

液氧/煤油发动机试验系统

李伟民

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 设计并建立了液氧/煤油发动机发生器-涡轮泵联动装置和整机试验系统。详细介绍了推进剂供应系统、煤油回流系统、试验工艺辅助系统、控制系统的组成及试验能力, 重点论述了关键试验工艺技术, 主要包括启动技术、增压技术、试车工艺、安全措施。

关键词: 液氧/煤油发动机; 系统组成; 试验能力; 工艺

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2005)06-0050-07

LOX/kerosene rocket engine test system

Li Weimin

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

Abstract: A gas generator-turbopump test device and an overall engine test system for LOX/kerosene rocket engine were developed. System composition and test ability of propellant feed system, kerosene return system, control system and auxiliary system for technique test were described in detail. Key test techniques such as start technology, pressurization technology, test technique and safety measures were primarily introduced.

Key words: LOX/kerosene engine; system composition; test ability; technique

1 引言

新研制的液氧/煤油发动机及其联动装置试验, 其推进剂流量大, 入口压力要求严格, 煤油回流量大且压力高, 排出的燃气高温、富氧, 特别是其试验工艺过程复杂, 工艺技术要求较高。因此, 在试验系统的设计建立及试验的进行过程中, 需解决较多的设计技术和试验工艺难题。本

文叙述液氧/煤油发动机试验系统的性能特点、关键技术、解决措施和试验技术。

2 系统组成及试验能力

液氧/煤油发动机试验系统主要由推进剂供应系统、煤油回流收集系统、燃气降温系统、试验工艺辅助系统、控制系统等组成。

2.1 推进剂供应系统

收稿日期: 2005-03-07; 修回日期: 2005-03-15

作者简介: 李伟民(1967—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验工艺。

2.1.1 液氧供应系统

建立的液氧供应系统如图 1 所示，可以完成额定工况 100 秒试车。系统主要由主容器、启动容器、低温阀门、补偿器、流量计和过滤器等组成。其主要技术指标为：

(1) 液氧系统设计压力为 1.6MPa；

(2) 液氧容器为真空粉末绝热低温容器，主容器容积 50m³，启动容器容积 4m³；试车时的增压气体气垫量和试车结束时的安全剩余量满足使用要求；

(3) 主管道内径为 DN207mm，采用外包扎多层堆积绝热法绝热；

(4) 加注过滤器：用 119 目不锈钢丝过滤网，过滤粒度 0.12mm；

(5) 主管道过滤器：用 32 目不锈钢丝过滤网，过滤粒度 0.56mm；

(6) 主管道的冷缩补偿采用 DN200mm 的不锈钢软管，系统设置的补偿量大于 2mm/m；

(7) 主容器及启动容器内均安装电容式液面

计及多个温度测点，可以远距离测量和显示容器内的液面高度和液氧温度。同时主容器及启动容器外均安装双波纹管差压式液面计；

(8) 在系统的不同位置安装涡轮流量计三台，可较准确地测得试验过程的流量值；

(9) 在两个流量计之间的管道上测量液氧温度和压力，以此换算液氧密度；

(10) 在发动机入口管道的入口处及发动机预冷排放口测量液氧温度和压力，以检查管道预冷和发动机预冷的程度；

(11) 主容器和启动容器的增压系统分别采用三路和四路节流孔板装置，可按程序自动或手动给容器增压，增压气体流量最大可达 16kg/s；

(12) 液氧容器和管道的排气以气动阀门远距离控制操纵为主，手动阀门手动放气为辅并设有安全阀，确保系统的安全运行；

(13) 系统的主要阀门均采用可远离控制操纵的气动阀门，在试验发生故障时可紧急切断液氧的供应并泄压。

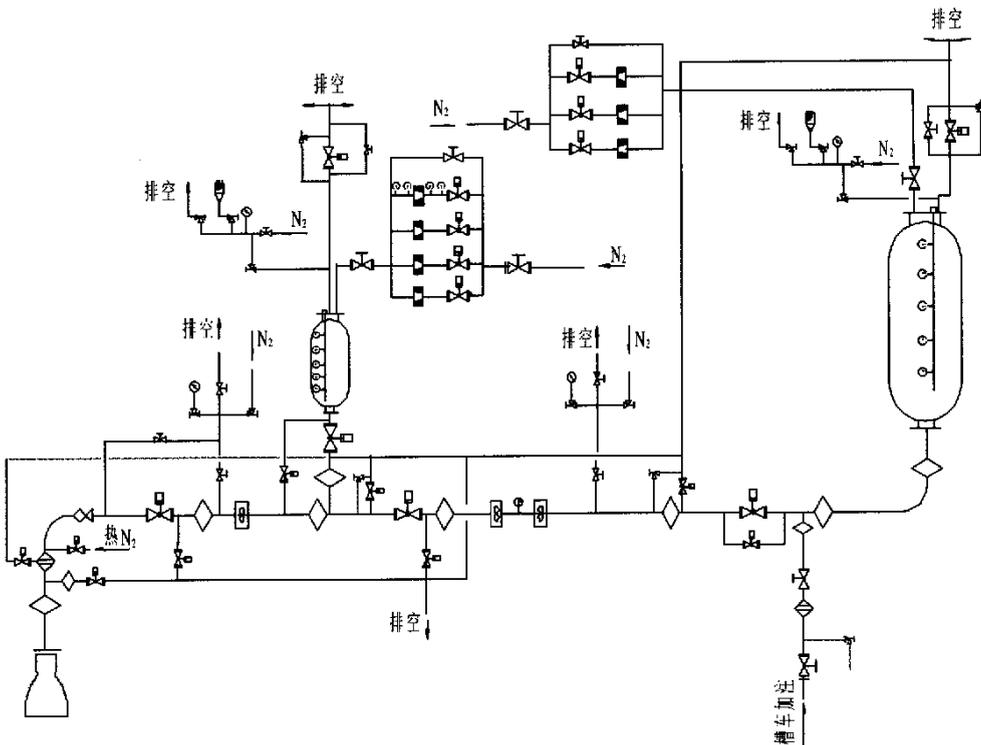


图 1 液氧系统原理图

Fig.1 Schematic of the LOX system

2.1.2 煤油供应系统

建立的煤油供应系统如图 2 所示, 可完成额定工况 100 秒试车。系统主要由主容器、启动容器、阀门、补偿器、流量计和过滤器等组成。其主要技术指标为:

- (1) 煤油系统设计压力为 1.2MPa;
- (2) 主容器容积 18m^3 , 启动容器容积 2m^3 ; 试车时的增压气体气垫量和试车结束时的安全剩余量满足使用要求;
- (3) 主管道内径 DN150mm;
- (4) 加注过滤器: 用 119 目不锈钢丝过滤网, 过滤粒度 0.12mm;
- (5) 主管道过滤器: 用 32 目不锈钢丝过滤网, 过滤粒度 0.56mm;
- (6) 在系统的不同位置安装涡轮流量计三台,

可较准确地测得试验过程的流量值;

(7) 在两个流量计之间的管道上测量煤油温度, 以此换算煤油密度;

(8) 主容器和启动容器的增压系统均采用两路节流孔板装置, 可按程序自动或手动给容器增压, 增压气体流量最大可达 8kg/s ;

(9) 煤油容器和管道的排气以气动阀门远距离控制操纵为主, 手动阀门手动放气为辅并设有安全阀, 确保系统的安全运行;

(10) 系统的主要阀门均采用可远距离控制操纵的气动阀门, 在试验发生故障时可紧急切断煤油的供应并泄压回收。

2.2 煤油回流系统

煤油回流系统如图 2 所示, 主要由孔板组、流量计和收集贮存容器组成。

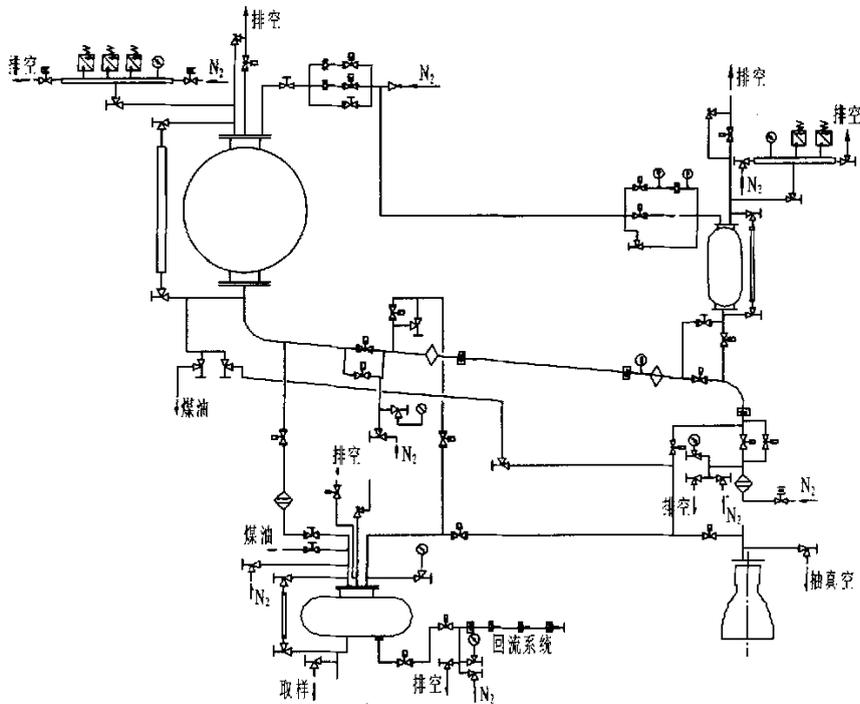


图 2 煤油系统原理图

Fig.2 Schematic of the kerosene system

回流系统也可以采用直接将煤油回流到主容器的方法, 该方法的优点是试车时间不受容器容积为 18m^3 的限制, 增压气体的流量小。只要补足燃烧掉的煤油的体积就行, 系统简单, 不需收集

贮存容器等设备, 但其缺点是不能保证煤油回流系统的出口压力等于大气压, 开车前煤油容器压力达 1.0MPa, 有可能顶开推力室燃料主阀, 致使开车前煤油腔道真空度抽不上去, 造成发动机煤

油加注不充分,是一个直接影响试验成败的主要问题。

选择图2中所示的回流方法,回收系统与主系统互不干扰,推力室燃料主阀后的压力通过节流器件后,可以保证为大气压或较低的压力值。设置收集贮存器后,增加了投资,但该容器可以作为煤油贮存容器和试车台煤油系统紧急排放用,起到了一举两得的作用。

无论采用哪种方法回流,节流降压、回流流量的测量和保证回流系统高压部分的密封是回收系统设计的关键。从推力室煤油主阀出来的煤油压力达12MPa以上,流量可达107.8kg/s。在试验时发动机的振动大,回流系统采用节流元件后,其降压的自激振动也大。因此在回流系统的设计中,采用三级节流孔板、插入式强行改变流体流向装置和液流整流技术,在短距离(约3米)内有效地将回流的高压煤油降压至0.5MPa左右。由于能在短距离内降压,使得降压装置全部安装在试车动架上成为可能,在动架与定架的受力分界面上,采用了DN150mm、1.6MPa低压补偿器,将动架的振动完全隔离,使得降压装置与动架一体随动架振动,确保了整个回流系统的密封性。这种设计方法解决了以往泵试验振动及降压自激振动大造成系统不能有效密封、工作可靠性不高这一难题。试验表明,煤油回流系统密封,工作可靠。

为了测得和测准流量,系统设计采用DN150mm涡轮流量计测量煤油回流量,采用液流整流孔板消除了第三级节流孔板出来的射流,使煤油在DN150mm管道内流速分布均匀,保证了流量测量精度。

该煤油回流系统的降压组件设计,采用理论计算的方法确定节流孔板及组件的结构尺寸,加工后采用相似压力、流量下的水介质试验,试验数据及实际使用情况证明,设计的理论计算正确。

2.3 试验工艺辅助系统

液氧/煤油发动机整机及联动装置试验,有别于常规发动机的试验,试验过程中,需对泵隔离腔吹氮、吹氧,对发生器进行强、弱吹除,试验系统预冷时需对涡轮泵液氧腔吹氧,煤油系统需抽真空加注及排放一定时间,试验时排出的大量

高温富氧燃气需冷却,试验后,需热氮气回温,点火剂需清除等。为此,按试验的工艺及技术要求,分别建立了相应的辅助系统,满足了试车任务书要求。

2.3.1 燃气降温装置

发生器一涡轮泵联动装置试验与发动机试验不同之一,就是试验时,从模拟工艺喷管排出的是大量富氧燃气,其温度高达400℃以上,为了防止着火及爆炸,试验系统设计了燃气降温装置。该装置安装于排放喷管出口,试验时,燃气喷入装置内,通过装置内大量的冷却水对燃气进行冷却,保证了大量富氧燃气的安全排放。

2.3.2 真空引射系统

自行设计的高真空引射器,以4.5MPa氮气作为引射气体,试车前可在短时间(约10分钟)内将需加注的煤油系统腔道及缓冲容器(总体积约0.6m³)压力抽至2.6kPa以下,最低可达1.6kPa,保证了试车前煤油腔道的充分加注。为了保证引射器不喷煤油,在发动机的四路抽真空排泄口与引射器之间设置约0.4m³的缓冲容器,收集排放的煤油,消除了引射器喷射煤油的现象。

2.3.3 泵隔离腔吹除系统

试车前预冷开始后,为了防止液氧的低温传入煤油腔,试验要求在泵的隔离腔内吹氮气,提高泵轴温度,吹除时间从涡轮泵预冷开始至停车后300秒前后约100分钟,为了节约氮气,停车后300秒改用氮气继续吹除。

系统设计采用膜压机将小气瓶中的氮气增压,贮存于1m³的高压气瓶中,使用时用减压器减压至3.0MPa。利用节流孔板控制流量,满足5.5g/s~7.5g/s的要求,采用高压电磁阀实现远距离控制。在节流孔板后测量氮气压力、温度和流量,确保流量的准确无误。同样利用相似的系统结构,组成隔离腔的氮气吹除系统。停车后,在控制台实施远距离控制切换。

2.3.4 燃气发生器的强、弱吹除系统

在发动机泵开始预冷后,燃气发生器必须进行氮气的强、弱吹除。弱吹除在前,强吹除在后。保证涡轮进出口温度不低于-35℃。为此系统设计时采用两个不同的氮气源分别供气。强吹除采用落压式吹除,弱吹除采用高压氮气经减压器减压

恒压吹除, 节流孔板控制流量, 满足流量在 30~40g/s 范围内, 采用电磁阀实现远距离控制。同样在节流孔板后测量氮气压力、温度和流量, 确保流量的准确。为了防止涡轮进出口的温度下降太多, 还建立了大流量(300g/s)的弱吹除系统, 整机试车时根据任务书要求推力室及发生器吹除由台上提供 22MPa 和 12MPa 两路气源, 而吹除流量由产品节流圈保证。

2.4 控制系统

液氧/煤油发动机试验的控制系统, 由主控计算机、主控台、副控台、控制外线、电源及现场监视系统等组成。

按照试验任务书程序控制时间精度优于 20ms 的要求, 采用工业控制计算机及固态继电器模块进行时间及开停车程序控制, 建立的控制系统程序时间精度优于 5ms, 程序控制对象为发动机 9 路, 工艺系统 36 路, 满足试验任务书和工艺过程的要求。

新建的监视系统设有 6 台监视器, 可远距离多方位监视试验及设备的工作情况, 并录像记录, 为试车故障分析提供依据。

为了准确地记录判定工艺系统阀门的动作时间, 控制系统专门设计和开发了工艺系统阀门动作时间测试记录系统。该系统可准确记录工艺系统阀门打开或关闭时间, 记录从给指令到阀门全开或全关的时间历程。该系统的设计开发控制成功, 可以准确地判断工艺系统阀门本身的工作是否正常, 还可判断工艺系统阀门在程序中的开、闭时序的准确性, 同时还为确定增压阀门的动作时间和推进剂供应系统主阀门的工作交接时间提供准确的依据, 为确定试验程序及事后数据分析创造了条件。

3 关键试验工艺技术研究

3.1 试验启动技术

液氧/煤油发动机是闭式循环系统, 燃气发生器在高压高富氧条件下启动及工作, 工作条件比较恶劣。在发动机发生器-涡轮泵联试和整机试车时不设预压泵, 为此对启动前后及启动过程中的入口压力要求较为严格, 且入口压力较高, 特别是液氧系统启动时的入口压力直接决定液氧流

量, 因此必须防止液氧入口压力偏高或偏低。液氧流量的变化可以导致发生器内混合比发生变化, 可能导致点不着火或燃气温度偏高。如何保证入口压力的稳定及要求的压力值, 完成启动是一大难题。

按照推进剂供应系统采用的增压方式, 发动机涡轮泵入口压力可用下式表示:

$$P_i = P_0 + \rho \cdot g \cdot H \times 10^{-3} \Delta P - \frac{A}{L} \frac{dq}{dt} \times 10^{-6}$$

式中

P_i ——发动机入口压力, MPa;

P_0 ——容器增压压力, MPa;

ΔP ——推进剂供应系统的系统流阻, MPa;

ρ ——推进剂密度, kg/m^3 ;

H ——发动机入口至推进剂容器内液面的静液柱高度, m;

g ——重力加速度, 取 9.81m/s^2 ;

A ——发动机入口至推进剂容器出口的管道截面积, m^2 ;

L ——发动机入口至推进剂容器出口的管道长度, m;

$\frac{dq}{dt}$ ——单位时间内的推进剂流量变化量, kg/s^2 。

由上式可知, 入口压力与推进剂容器内压力、系统流阻、管道的几何尺寸、流量的变化量直接相关。开车前, 容器已按计算的增压压力值预增压完毕, 但此时液氧流量为零, 作用在发动机入口处的压力高于试车设定值, 高出的值就是系统流阻, 常规发动机在入口处有启动活门, 此压力全部作用在启动活门上, 发动机允许这种工作状态启动。而液氧/煤油发动机没有启动活门, 此压力全部作用在燃气发生器液氧主阀上, 开车瞬间流量不大, 所以产生的系统流阻很小, 引起压力偏高, 而造成进入燃气发生器的流量加大, 可能导致燃气发生器内混合比发生变化。由(1)式可知, 解决这一问题的途径, 就是尽量减少系统阻力损失, 为此在靠近发动机入口的管道上设计安装启动容器和较短的管道, 组成专门供发动机点火启动时的液氧、煤油启动容器及管路系统。由于启动容器的设立, 不仅减少了系统流阻, 而且

也减少了惯性流阻,使得启动时的压力变得相对平稳。

但是设立启动容器后,就存在着主容器系统和启动容器系统是两个系统同时工作,还是一前一后,交替工作这一技术问题。通过计算分析,若两个系统同时工作,启动时增压气体流量很大,原有的供气系统无法满足要求,改造供气系统将耗资巨大,为此选择后者。采用启动容器系统先工作,主容器系统接替的工作方式。那么何时接替、如何接替以及保证接替过程中的压力平稳,这是一个关键的技术问题,该问题解决不好将直接导致试车失败。针对上述问题,在系统设计及试车的不断进行中,我们总结经验,完善功能,采取了以下技术措施:

(1) 设立启动容器,尽可能缩短启动容器至发动机入口的管道长度,减少系统流阻和惯性流阻;

(2) 将主容器系统的接替时间安排在发动机启动完成后进行;

(3) 通过大量的冷调放液试验,确定启动容器系统和主容器系统接替时的共同工作时间;

(4) 通过冷调试验采用在主阀门打开或关闭的操纵气管道上加节流阻尼孔板的方式,控制主容器路主阀门打开的速度和启动容器路主阀门关闭的速度;

(5) 通过理论计算及冷调试验,控制并保持启动容器和主容器的预增压压力及压力差;

(6) 保证启动容器有足够的增压气体气垫量。

通过以上技术措施,制定的试验控制程序,消除了交接过程中的压力凹坑,保证了试验的正常启动和启动容器系统与主容器系统的正常交接工作。

试验控制程序在2秒时主容器系统开始工作,打开 $A_1(B_1)$ 准备接班。在4秒时启动容器退出,关闭 $A_{1b}(B_{1b})$,关闭速度从给指令到全部关闭,调节在3.1秒(2.3秒)左右。

通过多次试验证明上述技术措施有效,掌握了液氧/煤油发动机的启动技术。

3.2 试验增压技术

液氧/煤油发动机联动装置和整机试验,惯性流阻较大。尽管在系统设计时尽可能缩短管道长度,但启动速度快,因其流量变化量较大。如液

氧系统 $\frac{dq}{dt}=1000\text{kg/s}^2$,其惯性流阻仍然很大,如

液氧系统可达0.25MPa。为此要求试车台启动容器的增压系统能在试验程序的某个时间点开始短时间内迅速增压,提升启动容器箱压 p_0 ,确保入口压力 p_1 不低于泵的气蚀压力,此后还应保持箱压。因注入启动容器的高压氮气是常温气体,在进入液氧容器后气体温度将迅速下降。估算气体温度也将是一大难题,针对上述诸多技术难题,采用的主要技术措施如下:

(1) 设计的增压系统采用减压器加多路增压孔板的增压方式,其原理如图1、图2所示,增压时可以选择多种气体流量组合,准确控制增入的气体量;

(2) 随着液氧系统增压气体流量的增加,一台减压器的最大流量不能满足要求,为此通过试验验证,采用双减压器并联工作的方法保证了启动时的大流量增压;

(3) 设计能均匀扩散增压气体的启动容器增压气体扩散管,尽可能保证增入容器的高压氮气不扰动推进剂液面,保持气体温度均匀;

(4) 系统设计时,选择了打开、关闭时间短且重复性好的气动增压阀,通过准确测量打开或关闭的所需时间,为增压系统的调整计算准确和控制程序制定提供保障;

(5) 系统建成后,通过理论计算及大量增压试验验证,确定了增压系统的增压能力及系统特性;

(6) 在液氧容器内装有电容式液面计和温度测点,准确测量容器内液面高度和气体温度,确保推进剂加注量和气垫量的准确无误;

(7) 设置小流量增压孔板,保证预增压和压力满足要求。

3.3 试验工艺技术

液氧/煤油发动机联动装置和整机试验,其试验的工艺过程远比常规发动机复杂,其主要体现如下:

(1) 发动机液氧系统和试车台液氧系统在试验前要求充分预冷;

(2) 发动机的煤油加注采用抽真空加注,并要求增压至0.4MPa保持一定时间;

(3) 发动机预冷时,多处要求氢气或氮气吹

除, 工艺系统需保证气体流量及压力;

(4) 试验开车前, 四个推进剂容器的预增压压力符合试验大纲要求, 并要求稳定;

(5) 开车时需满足的条件较多。如某次试车, 检测的启动条件为:

抽真空度达到要求 (2666Pa), 从燃料排放总阀排泄口连续排出无气泡煤油, 煤油充填完毕; 预冷管路出口温度不高于-174℃, 氧化剂入口温度不高于-178℃; 吹除、控制气源压力均满足设计要求; 电动组件均处于断电状态; 涡轮入口温度和涡轮出口温度不低于-50℃; 推进剂组元压力、温度达到要求; 氦气瓶压力保持在 22MPa (表);

(6) 发动机上台安装后, 始终要保压封存, 液氧腔压力一定要比煤油腔高;

(7) 试验后需清除点火剂。

由于上述要求, 致使试车台参试的系统数量增加, 系统原理及试验过程复杂。针对上述情况, 采取了以下措施:

(1) 按试车任务书的要求, 做好试车的技术准备工作;

(2) 详细编制试车当天的工作程序, 详细检查各工艺过程的实施情况, 严格控制关键参数;

(3) 确保各参试系统的功能及技术性能指标满足试验任务书的要求;

(4) 各参数系统进行充分的调试验证, 确保各系统性能稳定, 工作可靠;

(5) 加强试验系统的测试检查及技术状态管理, 严格控制参试系统的技术状态;

(6) 制订试验工艺、测量、控制等工艺文件及操作规程, 规范试验工艺过程及操作过程;

(7) 不断摸索和总结每次试验过程和调试情况, 完善工艺方法, 保证工艺过程的准确与完整;

(8) 严格控制系统多余物, 与产品对接的气体管路, 均设置大于 800 目的过滤器, 定期对液气路管道、阀门、容器等设备进行检查。

3.4 安全防护措施

针对液氧/煤油发动机本身以及模样研制阶段试验在安全方面的特点, 采取了以下安全措施:

(1) 制定吊装方案, 完善吊装设备, 对吊车进行了检修, 新增专用吊具;

(2) 对试车台台体内消防系统进行了改造, 解

决了消防布局不合理、水量小等问题, 加强了发动机部位的消防能力, 并在液氧启动容器顶部增设了消防管路。加强了试验场区消防能力, 增加了手推式、手动式灭火器具;

(3) 对试车台关键设备采取隔离防护措施, 对台上液氧启动容器和煤油启动容器加装了两层碳钢板中间夹石棉布的防护挡板, 对发动机用的两个氦气瓶加装了不锈钢防护挡板, 对煤油回收容器用瓦楞板进行了防护;

(4) 建立人员紧急撤离条件。建设了试车控制间人员紧急撤离通道, 在试车台上加装了 1.8m 至 7.6m 平台的人员紧急撤离楼梯, 在 4.5m 和 7.6m 平台加装了安全护栏;

(5) 增设隔离栏杆、警示牌和隔离墩, 加强试验现场安全、保卫管理; 对试车台大门 (含电机)、照明、供电等进行检修, 增设了防爆灯具, 对试车台所有电器设备采取了防爆防燃措施;

(6) 对试车测控电缆走向、防护提出具体要求, 对台上转接柜、阀门箱做了安全防护, 对电缆沟、穿墙孔进行了封堵;

(7) 加强试车台体消防、场坪水龙带消防、消防车水龙带消防和干粉消防的演练配合;

(8) 制定《液氧、煤油使用安全技术规程》、《液氧/煤油发动机试车安全管理办法》、《液氧/煤油发动机试车现场安全管理规定》;

(9) 建立液氧/煤油发动机试验安全管理网络体系, 层层落实责任制, 成立了两级安全管理组织、安全检查监督组以及现场安全保卫组、基层义务消防员组织和抢险队;

(10) 制订并落实试车紧急停车原则和故障紧急处理预案。

4 结论

所建立的液氧/煤油发动机发生器-涡轮泵联动装置和整机试验系统, 目前已进行了发动机发生器-涡轮泵联动装置试验和整机试验, 证明试车台的工艺系统、控制系统、工艺辅助系统, 完全满足液氧/煤油发动机发生器-涡轮泵联动装置和整机的试验要求。

(编辑: 王建喜)