

# 试验台冷却水系统水击压力仿真研究

刘 洋, 曹文庆, 唐斌运, 王 朝

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 液体火箭发动机试验台冷却水供应管路具有长度长、管径大的特点。发动机试验过程中, 由于阀门动作过快所产生的水击压力会对试验台冷却水供应系统的安全可靠运行产生严重影响。针对该问题, 借助系统流动特性瞬态仿真软件, 建立了某试验台冷却水供应系统水击压力仿真平台。通过特征线法对系统内水击压力的变化情况进行了仿真计算, 并将仿真结果与放水试验时的实测值进行了对比分析, 验证了所建立模型的计算准确性并分析了误差产生的主要原因。在此基础上, 分析了关阀策略及管路配置对系统内水击压力的影响, 提出了优化阀门动作顺序及开启手动旁通阀 2 种降低试验台冷却水系统水击压力的方法。仿真结果显示, 通过采用以上 2 种方法能够有效降低水击压力峰值, 同时增大其衰减速率。

**关键词:** 试验台; 冷却水系统; 水击压力

**中图分类号:** V434-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2016) 01-0083-05

## Simulation study on water hammer pressure in cooling water system of LRE test-bed

LIU Yang, CAO Wenqing, TANG Binyun, WANG Chao

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

**Abstract:** The cooling water supply system of LRE test-bed has a long length and large diameter pipeline. The water hammer pressure may cause a serious effect on the safe and reliable operation of cooling water supply system during the LRE test due to the fast valve action. Aiming at this problem, a simulation platform of water hammer pressure in the cooling water system of a certain test-bed was built by means of transient simulation software of the flow characteristics, and the change of the water hammer pressure in the cooling water system was simulated based on the characteristic method. The simulation result and test result are compared and analyzed. The results prove that proposed method is effective and accurate. In order to decrease the surge pressure in the cooling water pipe, the water hammer pressure caused by different control method of valves was simulated. Two control measures to decrease surge pressure in the cooling water system was put forward. The simulation results show that

收稿日期: 2015-06-28; 修回日期: 2015-08-06

基金项目: 航天支撑技术项目(617010503)

作者简介: 刘洋 (1988—)、男, 硕士, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验技术

the two control measures can reduce the peak value and increase decay rate of water hammer pressure effectively.

**Keywords:** test-bed; cooling water system; water hammer pressure

## 0 引言

某液氧/煤油发动机 (以下简称液煤发动机) 试验台对发动机试验过程中产生的高温燃气进行降温导向时, 采用水冷式导流槽, 冷却水通过高位水池供应。高位水池距发动机试车台 0 m 的垂直高度 120 m, 产生的冷却水静压力较大。由于冷却水供应管路长度长、管径大, 快速打开或关闭阀门时产生较高的水击压力, 引起管路压力的瞬间升高, 导致管路剧烈振动, 严重影响试验系统的安全性和可靠性。水击压力的大小与流体流速变化速率和供水管路特性有关, 为了研究阀门动作及管路特性对水击压力的影响, 对该液煤发动机试验台冷却水系统水击压力进行了仿真计算和分析。

## 1 冷却水系统简介

本文所研究的试验台冷却水系统原理图如图 1 所示。

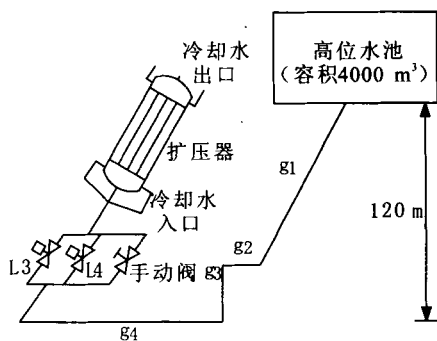


图 1 冷却水系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of cooling water system

主要管路及阀门的基本属性如表 1 所示。

按照试车大纲要求, 各阀门的开关顺序如下: 试车前, 参试人员首先打开冷却水系统手动旁通阀, 然后通过程序依次打开 L4 和 L3 阀门;

当发动机试车结束后, 程序依次关闭 L3 和 L4 阀门, 参试人员随后关闭手动旁通阀。

表 1 管路及阀门基本属性表

Tab. 1 Essential attributes of pipes and valves

管路或阀门代号	长度/m	直径	管路或阀门属性
g1	160	1.2 m	弹性管
g2-g4	280	0.4 m	弹性管
L3	-	DN200	气动球阀
L4	-	DN100	气动球阀
旁通阀	-	DN50	手动截止阀

## 2 水击压力计算方法

当阀门关闭时间与管路长度有以下关系时, 管路中产生的水击为间接水击:

$$t > 2l/c \quad (1)$$

式中:  $t$  为阀门关闭所用的时间, s;  $l$  为管路长度, m;  $c$  为波在管路中传播的速度, 约为 1 100 m/s。试验系统中, 阀门完全关闭 (或打开) 的动作时间约为 3.5 s。因此, 冷却水系统中的水击压力应采用间接水击的计算方法进行计算。

间接水击压力计算方法主要包括解析法、图解法、特征线法、超谱粘性法及其他数值计算方法, 其中特征线法 (MOC) 作为最成熟的数值计算方法, 在水击计算过程中得到了广泛的应用, 本文主要借助 FLOWMASTER 软件, 通过特征线法对冷却水系统的水击压力进行计算。其微分方程通过网格离散后的格式如图 2 所示。

$$C^+ \frac{a}{g\omega} (Q_p - Q_A) + (H_p - H_A) + \frac{f\Delta x}{2} Q_p |Q_A| = 0 \quad (2)$$

$$C^- \frac{a}{g\omega} (Q_p - Q_B) - (H_p - H_B) + \frac{f\Delta x}{2} Q_p |Q_B| = 0 \quad (3)$$

式中:  $H$  为测压管水头,  $\text{m}$ ;  $x$  为管道长度坐标,  $\text{m}$ ;  $a$  为压力波速,  $\text{m/s}$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $f$  为达西摩擦系数;  $D$  为管道内径,  $\text{m}$ ,  $w$  为管道横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $Q$  为体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

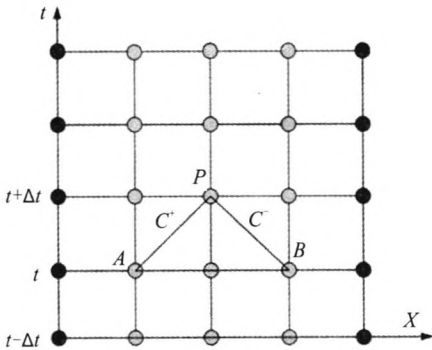


图 2  $x-t$  平面网格  
Fig. 2 Grid in  $X-t$  2D plane

3 仿真计算

为了计算该试验台冷却水系统在试验过程中的水击压力, 首先通过仿真软件建立了冷却水系统仿真平台, 如图 3 所示。

平台中: 元件 1 为高位水池; 元件 8 为 DN50 手动旁通阀门; 元件 10 和 12 为气动球阀; 元件 3, 5, 16, 17 为管路弯头; 元件 9 和 11 为控制单元; 元件 22 为导流槽; 其余元件为管路, 其中元件 2 对应原理图中 g1 管路, 元件 4 对应原理图中 g2-g4 管路, 由于两者管线较长, 因此采用柔性管模型进行计算。同时, 对扩压器冷却水流道进行简化, 采用通过 21 号管路模型近似代替扩压器冷却水流道。

初步估算钢管内压力波传播速度为  $1\,100\text{ m/s}$ , 为保证仿真计算收敛性, 选取模型仿真步长为  $0.1\text{ s}$ ,  $0.05\text{ s}$  和  $0.01\text{ s}$  进行了试算, 结果显示, 仿真步长  $0.05\text{ s}$  和  $0.01\text{ s}$  时的仿真结果基本相同, 因此选取时间步长为  $0.05\text{ s}$  能够满足仿真要求, 同时节省计算时间。

3.1 模型调整计算过程

结合建台时冷却水系统放液试验的试验数据 (见表 2), 对模型中各管路的流阻系数进行了调整计算, 计算得到冷却水输送管路的沿程阻力系数为  $0.04$ , 扩压器冷却水流道等效局部阻力系数为  $0.4$ 。

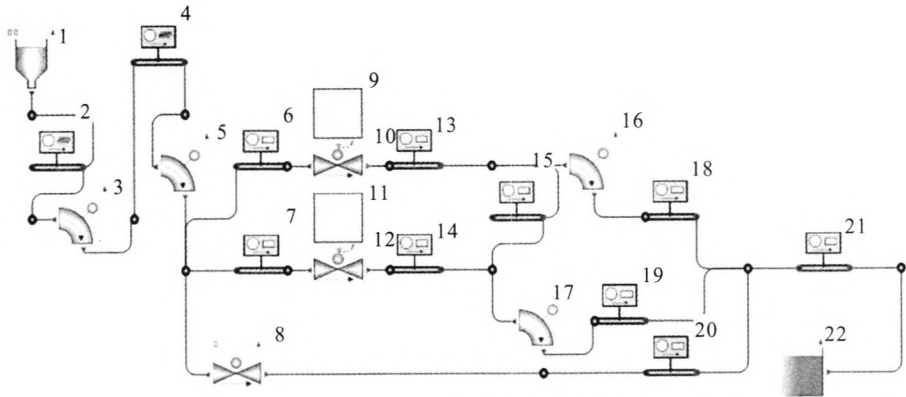


图 3 冷却水系统仿真平台  
Fig. 3 Simulation platform of cooling water system

表 2 冷却水系统放液试验数据  
Tab. 2 Liquid flow test date of cooling water system

开启的阀门	扩压器供水管单管流量/ ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )	扩压器冷却水总流量/ ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )	扩压器进口静压/MPa
L4, L3	185	555	0.73

3.2 仿真计算与实测值的比较

为了验证该方法在计算冷却水系统水击压力时的准确性,对冷却水系统进行了放水试验,并在 L3 阀前安装了水击压力传感器以测量阀前水击。由于此次放水试验过程中,一路冷却水进水直接通空,因此,冷却水流量略大于设计值。

放水试验时,阀门的动作特性如表 3 所示。

表 3 放水试验时阀门的动作时序

Tab. 3 Action time-sequence of valves in liquid flow test					
阀门 代号	阀门 口径	开启 时刻/s	关闭 时刻/s	开启 用时/s	关闭 用时/s
L3	DN200	65	105	3.5	3.8
L4	DN100	32	153	3.5	3.5
旁通 手阀	DN50	常开	-	-	-

仿真计算值与试验实测值对比结果如图 4 示,各阀门开关时刻所产生的水击压力最大值如表 4 所示。

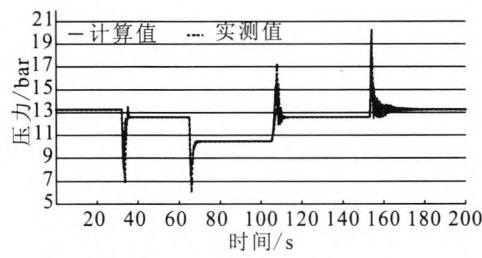


图 4 压力计算值与实测值对比图

Fig. 4 Comparison between calculated and measured pressure values

表 4 水击压力极值对比

Tab. 4 Comparison of maximum valves of water hammer pressure

MPa		
动作	阀前水击实测值	阀前水击仿真值
L4 打开	0.7 (负水击)	0.8
L3 打开	0.6 (负水击)	0.7
L3 关闭	1.72	1.64
L4 关闭	1.976	1.92

从对比结果可以看出,水击压力仿真结果与实测值的平均偏差约为 9.6%,因此采用特征线法能够较准确地计算冷却水系统水击压力。

4 不同控制方式下水击压力的比较

4.1 气动阀门控制方法对水击压力的影响

为了确定阀门控制方式中阀门动作时间和阀门动作间隔时间对管路水击压力的影响,在所建立的仿真平台中采用正交试验设计方法,对不同控制方式下的管路阀前水击压力进行仿真计算。

在正交试验的因素选择上,对阀门动作时间和阀门动作间隔时间分别选择 3 组数据进行分析,所选择的因素情况如表 5 所示。

表 5 正交试验水平分布表

Tab. 5 Factor distribution of orthogonal test

因素	阀门动作时间	阀门动作间隔时间
水平 1	1	2
水平 2	3	6
水平 3	5	12

对以上两因素各水平组合下的水击压力进行仿真计算,结果如表 6 所示。

表 6 正交试验方案及结果

Tab. 6 Scheme and result of orthogonal test

试验 序号	阀门动作 时间/s	阀门动作 间隔时间/s	最大水击压力/MPa	
			L3 优先关闭	L4 优先关闭
1	1	2	3.0	5.2
2	1	6	2.8	4.9
3	1	12	2.8	4.9
4	3	2	2.05	3.04
5	3	6	1.95	2.93
6	3	12	1.95	2.93
7	5	2	1.65	2.15
8	5	6	1.6	2.1
9	5	12	1.6	2.1

如表 6 所示, 从不同阀门动作时间下的水击压力值可以看出, 阀门动作快慢直接影响冷却水系统内水击压力的大小, 这与管内水流速度的变化率直接相关。比较不同阀门动作间隔时间下的水击压力值可以看出, 过分增长阀门动作间隔时间无法有效控制管路内水击压力。

在 9 组正交试验中, 优先关闭口径较大的阀门 L3 时, 管路内所产生的最大水击压力均较小。以第 7 组试验为例, 2 种不同关阀次序下管路内水击压力的变化情况如图 5 所示。

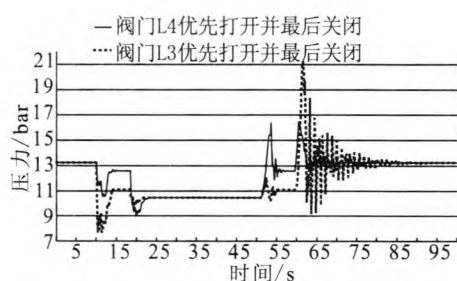


图 5 不同阀门开关顺序下的水击压力

Fig. 5 Water hammer pressure at different switching sequences of valve

分析结果认为, 主管路内水流速变化率与阀门组内不同通径阀门的开关顺序有很大关系, 而根据管路属性, 合理调节阀门动作次序能够有效降低管路内水流速变化率, 从而有效降低管路内最大水击压力。

#### 4.2 开启手动旁通阀对水击压力的影响

为了分析手动旁通阀在参与试车时对水击压力的影响, 通过所建立的模型分别对手动旁通阀动作和不动作 (试车前不开启手动旁通阀) 条件下的管内水击压力进行仿真分析, 结果见图 6。

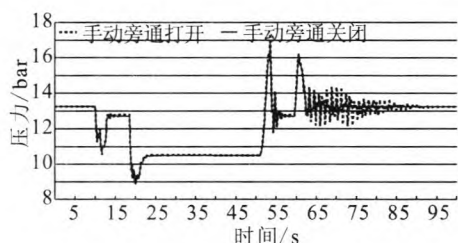


图 6 手动旁通阀开/闭对水击压力的影响

Fig. 6 Effect of manual bypass valve close/open on water hammer pressure

从对比结果可以看出, 虽然手动旁通阀的口径 (DN50) 较小, 但其打关闭状态对冷却水管路中的水击压力有一定的影响。当手动旁通阀打开时, 虽然阀前静压力平均值基本相同, 但冷却水管内水击压力的波动情况明显减弱, 且衰减时间较短, 对有效减少管路受交变压力载荷作用非常有利。因此, 在发动机进行试验时, 应首先打开手动旁通, 并在试车结束, 各气动阀门均关闭后, 手动关闭该旁通阀, 这样一方面能够起到平衡主阀前后压降的作用, 另一方面能够抑制水击压力在管内的波动。

## 5 结论与展望

1) 阀门组控制方式对系统水击压力影响很大, 快速的阀门动作和阀门组中各阀门不合理的动作次序均会使水击压力峰值产生不同程度的增加。因此, 应充分考虑阀门组动作时间和动作时序对水击压力的影响。

2) 采用预留旁通阀门的方式能够增大管路内水击压力的衰减速率, 防止交变压力载荷对管路的影响, 提高管路的安全性和可靠性。

3) 在大型试验台冷却水系统中, 由于所需要的冷却水流量较大, 关闭阀门的快慢和动作间隔, 将直接影响到系统冷却水消耗, 从而间接影响密集长程试验的试验进度。建议充分考虑水击压力和关阀过程中冷却水损耗量之间的关系, 在有效控制系统水击压力的前提下, 最大限度地减少冷却水损耗。

#### 参考文献:

- [1] 韩小鸣. 水击在压力管道工程设计中的防控[J]. 电力学报, 2013, 18(2): 110-112.
- [2] 窦唯, 胡长喜. 液体火箭发动机水击特性仿真及试验研究[J]. 火箭推进, 2013, 39(2): 40-45.  
DOU Wei, HU Changxi. Simulation and testing research for water hammer characteristic of liquid rocket engine [J]. Journal of rocket propulsion, 2013, 39(2): 40-45.
- [3] 田淳, 张宗坤, 郝瑞霞, 等. 电厂输水管道水击波传播过程仿真[J]. 计算机仿真, 2011, 28(11): 279-282.

(下转第 100 页)

## 7 结语

传动轴作为推力测量系统的重要组件,其结构和性能直接影响着系统的工作可靠性。利用 ANSYS 建模并进行强度计算,确定传动轴的损伤薄弱部位与实际损伤集中部位一致。按照优化改进要求进行传动轴优化改进,改进前后的仿真计算数据进行对照,并进行数据分析。通过数据对照结果表明,改进后的传动轴安全可靠,应力强度降低 66%,安全系数提高 36%。这种损伤分析方法可用于其他结构件损伤分析,具有方法参考价值。

### 参考文献:

- [1] 吴晓,黄翀,杨立军.非线性基础上拉压弹性模量不同矩形板的弯曲[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2013,24(6):18-23.
- [2] 彭茂林,杨自春,曹跃云,等.涡轮叶片低周疲劳可靠性稳健设计优化研究[J].中国电机工程学报,2013,12(11):54-61.
- [3] 李先锋,杨建伟,贾志绚,等.基于 Workbench 车辆减振器弹簧盘的疲劳分析[J].北京:建筑学院学报,2012,12(2):53-55.
- [4] 范文学,陈芙蓉,解瑞军,等.Q235B 钢对接焊接头振动 SN 曲线的分析[J].焊接学报,2014,12(8):10-14.
- [5] 陈崧,竺一峰,胡嘉骏,等.船体结构 SN 曲线选取方法[J].舰船科学技术,2014,12(1):22-26.

(编辑:马 杰)

(上接第 87 页)

- [4] 陈宏玉,刘红军,陈建华,等. Chebyshev 超谱粘性法在推进剂供应管路非定常流动分析中的应用[J].推进技术,2012,33(5):804-808.
- [5] 陈宏玉,刘红军,刘上.配置点谱方法求解推进剂供应管路瞬变流动[J].火箭推进,2013,39(4):24-29.  
CHEN Hongyu, LIU Hongjun, LIU Shang. Solution of transient flow in propellant pipelines by Chebyshev spectral collocation method [J]. Journal of rocket propulsion, 2013, 39(4): 24-29.
- [6] 曾强,马贵阳,江东方,等.液体管道水击计算方法综述

- [J].当代化工,2013,42(8):1189-1197.
- [7] WATYERS G Z. 管线中不稳定流的现代分析和控制[M].董启贤,译.北京:石油工业出版社,1987.
- [8] 张国忠.管道瞬变流动分析[M].北京:石油大学出版社,1994.
- [9] 张铭远.高等工程流体力学[M].西安:西安交通大学出版社,2006.
- [10] MUHL W K. 管道水击压力的计算[J].赵东瑞,译.油气储运,1996,10(15):59-60.

(编辑:陈红霞)