

# 一种开闭式泵试验系统及控制方法

张锐, 常明伟, 杨玉东, 罗宏斌  
(北京航天动力研究所, 北京 100076)

**摘要:** 针对泵试验开式系统 NPSH<sub>r</sub> 测量精度低、大功率泵闭式系统发热量大的问题, 提出了一种开闭式泵试验系统的设计及控制方法, 该系统能完成各试验数据的采集、显示、处理、自动调节、校正和打印。通过储水罐的等流量调节, 使试验系统更加稳定、可靠, 精度也大为提高。

**关键词:** 开闭式泵试验系统; PID 调节; 等流量调节; 通信

**中图分类号:** V434-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2014) 06-0069-05

## Opened-closed test system of pump and its control method

ZHANG Rui, CHANG Ming-wei, YANG Yu-dong, LUO Hong-bin  
(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

**Abstract:** There are two problems about test system of pump: low measurement accuracy of NPSH<sub>r</sub> for opened system and overheating of high power pump for closed system. According to above problems, the design and control method for a new opened-closed test system of pump is proposed in this paper. Acquisition, display, processing, automatic adjustment, correction and print of test data can be finished in this system. The system can work more stable and reliable. Its measurement accuracy was improved greatly by equal-flow adjustment of water tank.

**Keywords:** opened-closed test system of pump; PID adjustment; equal-flow adjustment; communication

## 0 引言

常用的泵试验系统分为开式系统和闭式系统。开式系统: 试验泵从自由液面的水池中吸水, 水池容量大, 散热条件好, 流量稳定, 但在采用流量保持恒定的方法进行汽蚀试验时, 泵进口节流阀在降低泵进口压力的同时, 会造成泵进

口流量不稳定, 影响汽蚀性能的测量精度。闭式系统: 试验泵从封闭大容器中吸水, 系统中的液体与外界空气隔绝, 构成封闭循环系统, 通过封闭大容器抽真空来降低吸入液面的压力, 汽蚀性能的测量精度高, 不过大流量时系统发热严重。为满足生产规模不断扩大、试验精度高的需求, 本文提出了将泵开式试验系统和闭式试验系统技

收稿日期: 2014-07-16; 修回日期: 2014-09-12

作者简介: 张锐 (1963—), 女, 工程师, 研究领域为涡轮泵技术

术相结合的方法,使试验系统既能满足泵性能试验和汽蚀试验对测量精度要求,又保证大功率泵散热条件好,试验效率高。

## 1 方案设计

泵试验主要包括:外特性试验、内特性试验、强度试验等。泵外特性试验分为型式试验和出厂试验。其中型式试验包括泵运转试验、性能试验、汽蚀试验和噪声试验。性能试验是在工况稳定后,对泵进口压力、出口压力、轴功率、转速、流量和温度等数据时时采集,计算出扬程、功率和效率值,并根据这些数据绘制出流量-扬程、流量-轴功率及流量-效率曲线。为了确保泵具有汽蚀余量,进行汽蚀试验是目前唯一的办法。泵汽蚀试验应在小流量、额定流量、大流量 3 个以上不同流量点进行。泵的出厂试验则是在泵的工作范围内(至少包括小流量、额定流量、大流量),检查泵的扬程、功率及转速等性能,并与规定值进行比较,判断其是否达到要求。本文主要涉及的是性能试验和汽蚀试验。

本文所述试验系统采用的技术方案是:试验泵从闭式储水罐中吸水,打入开式大水池,经过冷却的水用增压泵补充到闭式储水罐,形成开、闭式相结合的循环系统。通过液位变送器、流量计监测储水罐的液位和流进流出储水罐的累积流量,实现自动调节电动闸阀开度而控制进出储水罐的水流量的等液位控制,保证储水罐储水量的稳定。工业控制计算机对试验泵测试过程进行实时工况转换、控制、数据采集与处理,可自动完成试验泵各种性能的测试和调整。

泵试验系统包括泵站子系统、计算机控制与测量子系统。在测控软件的支持下,实现测试工况的自动建立、转换、加载和测量。

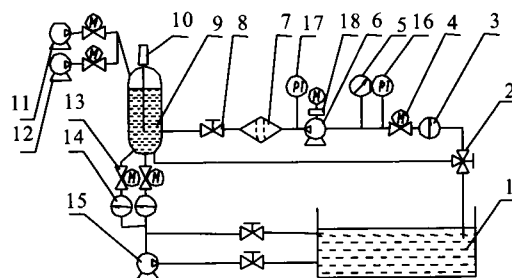
## 2 开闭式泵试验系统构成和试验方法

试验系统主要由机械系统、电气系统和控制系统构成。机械系统如图 1 所示。

两台增压泵最大流量  $2 \times 500 \text{ m}^3$ ,大水池容积  $100 \text{ m}^3$ ,储水罐容积  $15 \text{ m}^3$ ,系统设计试验能力

$1000 \text{ m}^3$ 。增压泵由大水池把水打入储水罐。储水罐的工作压力由空气压缩机压控阀设定,最高  $0.7 \text{ MPa}$ 。储水罐进水流量由电动闸阀调节,储水罐设有液位变送器实时监测储水罐液位。压力变送器对进口压力和出口压力进行测量,扭矩测量仪用于轴功率和转速的测量,电磁流量计用于流量的测量。

电气和控制系统如图 2 所示。



1-大水池; 2-电动三通球阀; 3-电磁流量计; 4-电动闸阀; 5-压力表; 6-泵试验工位; 7-过滤器; 8-手动闸阀; 9-储水罐; 10-液位变送器; 11-真空泵; 12-空气压缩机; 13-电动闸阀; 14-电磁流量计; 15-增压泵; 16-压力变送器; 17-压力变送器; 18-扭矩测量仪

图 1 机械系统

Fig. 1 Mechanical system

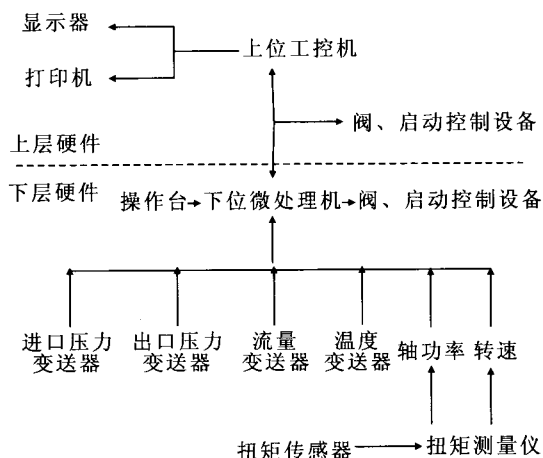


图 2 电气和控制系统

Fig. 2 Electrical and control system

数据采集部分用来完成泵的进口压力、出口压力、流量、温度、转速、轴功率等的测量,并将测量信号转换成  $4 \sim 20 \text{ mA}$  的电流信号,送入下

位微处理机 PLC。下位机处理部分是系统的控制中心,实现系统控制方式的选择;系统的启停;测试泵的启停;接受现场传感器采集的数据、进行数据的处理、保存和上传;控制进出口电动调节阀的开度来实现流量的调节;具有急停保护功能等。

下位微处理机系统主要是对其输入输出模块的设计,包括各 I/O 口地址的分配、线路的连接和参数的设置。开关量输入主要是接受操作人员的命令,有试验模式选择、试验选择、开停机指令、急停指令、采集指令和电控柜手动控制。开关量输出主要是电控柜的启停、急停和指示信号。模拟量输入主要有进口压力、出口压力、流量、温度、转速、轴功率调节输入,可接受输入范围为  $\pm 500$  mV,  $0\sim 500$  mV,  $\pm 1$  V,  $0\sim 1$  V,  $\pm 2.5$  V,  $0\sim 2.5$  V,  $\pm 5$  V,  $0\sim 5$  V,  $\pm 10$  V,  $0\sim 10$  V,  $0\sim 20$  mA 和  $4\sim 20$  mA。模拟量输入信号通过有屏蔽层的双绞线接入。为防止干扰,该线须与电源线、数字信号线分开敷设。输入端需并接 125  $\Omega$  电阻。模拟量输出主要给进口和出口电动调节阀提供输入信号,可以输出  $0\sim 10$  V,  $0\sim 20$  mA 和  $4\sim 20$  mA,本系统设定输入为  $4\sim 20$  mA,作为电动调节阀的输入信号,控制阀门的开度。

开式泵试验系统汽蚀试验:将泵进口阀全开,出口阀全关,调节出口流量到某一确定值后,采集数据,并计算泵在该点的各性能参数;以少量进给量关闭进口阀,并少量微调打开出水阀以维持流量值不变,采集数据,并计算泵在该点的各性能参数。重复以上步骤,直到计算扬程下降值  $\Delta H$  达到 3% 时,认为泵开始发生汽蚀。该试验方法测量流量点流量值不稳定,精度低。

开闭式泵试验系统汽蚀试验的步骤与开式泵试验系统有所不同,表现如下:试验泵从储水罐中吸水,通过液位变送器、电磁流量计监测储水罐的液位和流进流出储水的累积流量,自动调节电动闸阀开度来控制进出储水的流量,保证储水罐液位的稳定。通过真空泵降低吸入液面的压力,从而逐渐降低泵进口装置汽蚀余量,这种方法避免了因关系进口调节阀的节流效应造成的汽蚀和进口流量不稳定。因为试验泵出口流量回大

水池,经过冷却的水通过增压泵补充到储水罐,保证了系统水温的相对稳定,降低了水温升高对汽蚀的影响,提高了汽蚀判断的精确度。本测试系统要求精度达到国标 GB3216-89《离心泵、混流泵、轴流泵和旋涡泵试验方法》B 级。

### 3 开闭式泵试验系统控制方法

为了保证泵试验精度,需要防止泵吸空或储水罐过溢,开闭式泵试验系统最为关键的是储水罐的等流量调节。等流量调节的数学模型为:假定流量计的量程与阀门开度完全对应,零流量时对应阀门全关,满量程流量时对应阀门全开,中间状态完全线性关系。

等流量调节的精度为总量程  $\pm 5\%$ ,即流量在  $\pm 5\%$  内变化,认为流量是恒定的,被控制调节机构可以不做调整,这即是常用的“死区”。所以误差  $e(t)$  (储水罐出口流量测量误差) 在  $\pm 5\%$  可以当  $e(t)$  等于 0 处理,避免被控制机构过分频繁的动作。被控制量的偏差控制按 PID 计算。计算公式为

$$\Delta y = K_p e(t) + 1/T_i \int e(t) dt + T_d de(t)/dt \quad (1)$$

式中:  $K_p$  为比例常数;  $T_i$  为积分时间常数;  $T_d$  为微分时间常数;  $y$  为阀门开度,  $\Delta y$  为阀门开度的补偿量。

PID 控制按间隔 5 s 执行一次,  $P$ 、 $I$  和  $D$  之间的关系按如下原则确定:四次循环周期后  $P$  与  $I$  分量相等,  $D$  分量占  $P$  分量的十分之一。经试验调试,确定  $K_p$ ,  $T_i$  和  $T_d$  的值为 0.25, 50 和 0.04,其中  $T_i$  和  $T_d$  已经包括了积分和微分的时间因素,所以在计算中  $e$  直接与  $T_i$  和  $T_d$  相除相乘即可。

在等流量控制中,如果一切正常而检测到流量严重下降,则当流量下降到设定点的 50% 时,给出警告信号,提醒操作人员。

在储水罐的等液位控制中,每 0.5 s 检测一次储水罐出口和补水口流量并对时间积分,5 s 后检测进出储水罐流量的积分(即进出罐水的容量),并比较这个积分的大小,同时根据液面的位置,确定开关进口阀的开度;液面的位置从下

到上分为五个区,其高度占总高度的比例分别为-30%,-15%,-10%,+15%和+30%;

每次液位最好都从最中间位置开始液位控制,以避免程序振荡;

阀门调节与液位、流量积分相关,按下列原则调节:

液位在最低-30%时:进口流量积分小于出口流量积分 1.2 倍,则增大调节阀开度,每次增加 10% (总量程的 10%),直到进口流量大于出口流量 1.2 倍为止;进口流量积分大于出口流量积分 1.2 倍,则不做任何调整;

液位在次低-15%时:进口流量积分小于出口流量积分 1.1 倍,则增大调节阀开度,每次增加 5% (总量程的 5%),直到进口流量大于出口流量 1.1 倍为止;进口流量积分大于出口流量积分 1.1 倍,则不做任何调整;

液位在中间-10%时:进口流量积分在出口流量积分 0.95 倍和 1.05 倍之间,则阀门开度不做任何调整;

进口流量积分小于出口流量积分 0.95 倍,则增大调节阀开度,每次增加 2% (总量程的 2%),直到进口流量大于出口流量 0.95 倍为止;进口流量积分大于出口流量积分 1.05 倍,则减小调节阀开度,每次减小 2% (总量程的 2%),直到进口流量小于出口流量 1.05 倍为止;

液位在次高+15%时:进口流量积分大于出口流量积分 0.9 倍,则减小调节阀开度,每次减小 5% (总量程的 5%),直到进口流量小于出口流量 0.9 倍为止;进口流量积分小于出口流量积分 0.9 倍,则不做任何调整;

液位在最高+30%时:进口流量积分大于出口流量积分 0.8 倍,则减小调节阀开度,每次减小 10% (总量程的 10%),直到进口流量小于出口流量 0.8 倍为止;进口流量积分小于出口流量积分 0.8 倍,则不做任何调整。

开闭式泵试验系统主要实现以下功能:

- 1) 实现性能试验,汽蚀试验。
- 2) 实现对各输入状态实时监测,以执行相应操作。
- 3) 具有全自动、半自动、人工自动、人工手动四种测试模式,能实现对继电器、电动调节

阀、电机等自动控制。

- 4) 能自动对泵性能做出判别。
- 5) 具有状态指示、报警和保护功能。
- 6) 具有通信功能。

根据试验系统的功能需要,上位机主要实现与局域网其它计算机及下位机 PLC 的通信,泵各项参数的显示、采集,各式曲线(流量-效率曲线、流量-功率曲线、流量-扬程曲线、气蚀-扬程曲线等)的生成,及试验数据的打印和保存。由于上位机并入了局域网,因此可以在局域网内各个计算机上实时查看各实验参数。上位机的软件实现采用 Visual Basic,包含三个界面:性能试验、气蚀试验和量程设置界面。

上位机与 PLC 之间的通信采用控件 Winsock 控件实现。此控件提供了一个简单的途径访问 TCP 及 UDP 网络服务,而且封装性好,因此无需了解底层协议和其它细节。本上位机采用 TCP/IP 传输协议。

由于泵型不同,泵的流量、扬程、功率等参数都不尽相同,为了软件的统一性,所以首先加入了“量程设置”功能,根据输入的量程,自动生成相应的坐标系统。

其次,根据试验需要设计了采集功能,可将泵试验的某个时间点的参数采集到右边的表格里,作为曲线生成的数据源;鉴于人工手动采集,可能会出现误操作,因此设计了“删除一行”功能。气蚀试验数据采集略显复杂:当气蚀余量大于 15 m 时,人工采集一次,接下来为程序自动采集,采样点分别为:15, 8, 6, 5, 4, 3.5, 3, 2.5, 2, 1.5, 1, 0.5 (m),中途如果电机停止则自动停止采样。为了更加方便直观的观察泵各项性能参数的趋势,需要将采样点的数据生成曲线,其中性能试验采用最小二乘法进行曲线拟合,气蚀试验采用 B 样条曲线进行拟合。

“保存数据”功能,可将泵试验的采样点数据和拟合曲线保存成图片和文本形式永久保存下来,与之相对应的“载入数据”功能,可将保存的数据重新填入表格及曲线的重现。最后,根据生产需要,设计了“打印”功能,将试验数据和曲线打印成电子文档或直接送至打印机打印,作为纸质文档保存。

## 4 开闭式泵试验系统的应用

作为应用, 本系统选用一个大流量泵作为样例。该泵设计流量  $634 \text{ m}^3/\text{h}$ , 设计扬程  $143 \text{ m}$ , 设计汽蚀余量  $5 \text{ m}$ 。

分别进行了 4 次设计流量  $634 \text{ m}^3/\text{h}$  下的汽蚀试验, NPSHr 分别为 3.55, 3.59, 3.54 和 3.6, 误差值  $<1.5\%$ , 大大高于开式泵试验系统汽蚀试验的精度 (原来开式循环的精度约  $10\%$ )。同时连续进行 2 个小时设计流量  $634 \text{ m}^3/\text{h}$  下的运行试验, 储水罐温升  $<10^\circ\text{C}$  (原闭式循环大约  $20 \text{ min}$  温升  $10^\circ\text{C}$ )。分别对水温变化前后水的密度  $\rho$ , 和饱和蒸汽压力  $P$ , 计算, 两个值相差很小, 对水力计算的影响可以忽略不计。

## 5 结论

开闭式泵试验系统的试验表明, 系统操作控制灵活、测试精度高、自动化程度高、试验工况扩充性强。解决了闭式试验系统温升较快的问题, 使得泵的试验精度不受温升的影响, 为测试和分析各种新型泵的特性, 不断完善设计参数提供了可靠的试验手段。

### 参考文献:

- [1] 关醒凡. 现代泵设计手册[M]. 北京: 宇航出版社, 2005.
- [2] 杨源泉. 阀门设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [3] 廖常初. S7-300/400 PLC 应用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

(编辑: 王建喜)

(上接第 68 页)

涡轮转子的设计关键特性有 5 项。在分析研究涡轮转子工艺关键特性和过程关键特性过程中, 细化的工序流程为 50 个, 对 50 个工序流程进行 FMECA 分析, 将 5 项设计关键特性作为相关工序的输入条件, 然后按规定程序分别就工艺关键特性和过程关键特性进行分析, 对每道工序包含的潜在故障模式分析、评估和打分。评分等级为 1~10 分, 选取置信度为 0.9, 则风险优先数字 RPN 的门限值为 100, 低于此值的潜在故障模式不作评估。经分析评估, 涡轮转子工艺关键特性在风险优先数字  $\text{RPN} \geq 432$  情况下有 4 项; 涡轮转子过程关键特性在风险优先数字  $\text{RPN} \geq 270$  情况下有 2 项。涡轮转子部件确定的三类关键特性有 11 项, 见表 1。

## 5 结论

通过研究液体火箭发动机工艺关键特性与过程关键特性分析和确认方法, 运用 FMECA 分析工具对其进行研究和归纳, 得出了液体火箭发动机工艺关键特性与过程关键特性评判准则, 即分

析工作策划和关键参数甄别工作准则, 将该准则用于液体火箭发动机制造, 可提高发动机制造工艺水平和精细化管理能力, 推进发动机制造数据建设和发动机成熟度快速提升。

### 参考文献:

- [1] 袁家军. 航天产品工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- [2] [美] STAMATIS D H. Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution[M]. 2 ed. 陈晓彤, 姚绍华, 译. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [3] 袁家军. 航天产品质量与可靠性数据包及其应用[J]. 中国质量, 2009 (4): 8-10.
- [4] 张根保. 复杂机电产品关键质量特性提取模型[J]. 重庆大学学报, 2010 (2): 8-14.
- [5] 唐文斌. 产品关键特性量化鉴别与分解方法应用研究[J]. 计算机集成制造系统, 2011 (11): 2383-2388.
- [6] 张根保. 面向制造过程的产品多关键质量特性优化模型[J]. 计算机集成制造系统, 2010 (6): 1286-1291.
- [7] 刘志存, 邹冀华, 范玉青. 框类组件制造关键特性分析研究[J]. 宇航材料工艺, 2006 (6): 56-60

(编辑: 王建喜)