

电子仪器泄复压试验设备改造

武越, 许忠旭, 杜春林, 尹晓芳
(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 电子仪器泄复压试验是载人航天系统工程中的一项关键技术。文章介绍了北京卫星环境工程研究所泄复压试验设备的改造目的以及改造方案, 重点运用理论研究的方法即泄压设计分析与复压设计分析, 使改造后的设备同时满足两类技术要求, 并结合工程试验研究加以验证。通过调试试验证明, 改造后的设备满足相应的技术要求, 可以保证泄复压试验的顺利进行。

关键词: 电子仪器; 泄复压试验; 设备改造

中图分类号: V416.8

文献标识码: B

文章编号: 1673-1379(2010)05-0631-05

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2010.05.018

0 引言

为了考察某些飞船电子设备以及对压力变化敏感的设备对泄复压环境的适应性, 需要对设备进行泄复压试验, 以保证飞行任务顺利完成^[1]。对于北京卫星环境工程研究所目前现有的一套泄复压试验设备, 一方面由于试验技术要求的改变即泄复压试验设备从满足一类技术要求到需要满足两类技术要求; 另一方面通过多个试验的总结, 发现该设备存在不足, 即真空抽气系统由有油真空泵组成, 复压的精度与稳定性均不够, 以及整套设备没有建立起控制系统。因此提出对现有的泄复压试验设备进行改造。

1 试验技术要求

1.1 第一类试验技术要求

1.1.1 泄压要求

- 1) 101~70 kPa, 起始泄压速率不小于 2.0 kPa/s, 压力变化特征值见表 1;
- 2) 70 kPa 保持 30 min;
- 3) 70~1.01 kPa, 起始泄压速率不小于 2.0 kPa/s, 压力变化特征值见表 2;

4) 100~10 Pa 自然泄放。

表 1 101~70 kPa 压力之间单机泄压试验压力变化特征值
Table 1 Characteristic values of pressure variation during the single-machine depressurization test from 101~70 kPa

时间/s	0	5	10	15
压力特征值/kPa	101	88.70	77.90	68.41

表 2 70 kPa 压力以下单机泄压试验压力变化特征值
Table 2 Characteristic values of pressure variation during the single-machine depressurization test below 70 kPa

时间/s	0	31	61	91	121	151	181
压力特征值/kPa	70	23.13	7.92	2.71	0.93	0.32	0.11

1.1.2 复压要求

- 1) 容器压力小于 40 kPa 时, 平均复压速率不小于 1.33 kPa/s;
- 2) 至 40 kPa 保持 3 min;
- 3) 大于 40 kPa 时, 平均复压速率不小于 0.133 kPa/s。

1.2 第二类试验技术要求

第二类试验技术要求在表 3 中列出。压力允差 ±10%。

表 3 目标飞行器产品泄复压试验条件
Table 3 Experimental conditions for the depressurization and repressurization test of target aircraft products

序号	压力范围/kPa	泄压速率/(kPa·s ⁻¹)	复压速率/(kPa·s ⁻¹)	速率允差/%	循环次数
1	101~30	0.3	—	±50	6
2	30~2	0.1	—	±50	
3	2	恒压保持 30 min		—	
4	2~101	—	0.05	±50	

收稿日期: 2010-03-01; 修回日期: 2010-03-31

作者简介: 武越(1983—), 男, 硕士学位, 主要从事航天器真空热试验的研究工作。E-mail: wuyue_neu@163.com。

2 改造方案

由于需要同时满足两类技术要求, 可以考虑先满足第一类技术要求, 在此基础上进行验算是否满足第二类技术要求; 若不满足第二类技术要求, 就要进行设备改造。

2.1 BZ 试验设备的泄压能力

对 BZ12 设备进行模拟泄压抽气调试, 调试数据如表 4、表 5 所示。经过与第一类技术要求的特征值进行比较发现, 使用 BZ12 目前的抽气系统无法满足泄压抽气速率的要求, 必须通过增加抽气设备或合并其他部组件试验设备的低真空泵来满足泄压速率的要求。

表 4 101~70 kPa 压力之间泄压调试压力变化特征值
Table 4 Characteristic values of pressure variation during the depressurization debugging from 101~70 kPa

时间/s	0	5	10	15
实际值/kPa	101	92.37	80.61	71.25

表 5 70 kPa 压力以下泄压调试压力变化特征值
Table 5 Characteristic values of pressure variation during the depressurization debugging below 70 kPa

时间/s	0	31	61	91	121	151	181
实际值/kPa	70.3	35.7	18.12	8.53	3.59	1.31	0.42

2.2 方案设计

2.2.1 泄压设计

利用 BZ11、BZ12 两台设备的 SP250 干泵抽气以满足泄压速率的要求。即以 BZ12 试验设备

表 6 按表 4 和表 5 压力区间得到的固定管路的流导

压力区间	1	2	3	4	5	6	7	8	9
流导/(m ³ ·s ⁻¹)	0.053	0.139	0.106	0.074	0.08	0.099	0.139	0.222	0.371

取以上 9 个数值的平均值, 得出固定管路的流导为: $C^I = 0.143 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

由于 SP250 的抽气口直径为 63 mm, 查真空设计手册^[3], 表 6-37 得 $d = 70 \text{ mm}$, 但实测管路的直径 d 为 100 mm, 长度大约为 9 575 mm, 因此设计管路长度为 9 575 mm, 直径为 100 mm。经判断, 管内流体流态为粘滞流, 且为长管。所以设计管路的流导为

为主, 将 BZ11 设备上的 SP250 干泵通过设计好的管路连接到 BZ12 设备上, 由这台干泵配合 BZ12 设备上的 SP250 干泵进行抽气。

2.2.1.1 分析计算

从实际连接情况(即: BZ12 的 SP250 干泵从泵的进气口到容器的管道已经确定不动, BZ11 设备的 SP250 干泵要连一段 10 m 长的管道)来反推可以满足第一类技术要求。

根据表 4、表 5 提供的实际压力值计算已确定管道的流导。已知 BZ12 容器直径 $d = 1.2 \text{ m}$, 长 $L = 1.5 \text{ m}$, 则容器口处净流量为

$$Q = \frac{V \cdot \Delta P}{\Delta t}, \quad (1)$$

式中: V 为泄复压容器的容积, m³; ΔP 为表 4 中两相邻实际压力的差值, Pa; Δt 为表 4 中的时间间隔, s。容器口的相对抽速^[2]

$$Se = \frac{Q}{\bar{P}}, \quad (2)$$

式中: Q 为容器口处净流量, Pa·m³/s; \bar{P} 为表 4、表 5 中两相邻实际压力的平均值, Pa。计算可得流导

$$C = \frac{1}{\frac{1}{Se} - \frac{1}{Sp}}, \quad (3)$$

式中: Se 为容器口的相对抽速, m³/s; Sp 为 SP250 泵的抽速, m³/s。

$$C = 1.34 \times 10^3 \frac{D^4}{L} \bar{P} = 1.34 \times 10^3 \times \quad (4)$$

$$\frac{0.1^4}{9.575} \times 10 = 0.14 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

考虑到管路弯折(6 个直角)以及阀门给管路流导造成的损失, 取该段管路的流导为

$$C^{II} = \frac{1}{7} C = 0.02 \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (5)$$

因此两泵对容器口的抽速分别为

$$Se^I = \frac{1}{\frac{1}{C^I} + \frac{1}{Sp}} = \frac{1}{\frac{1}{0.143} + \frac{1}{0.069}} = 0.047 \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (6)$$

$$Se^{\text{II}} = \frac{1}{\frac{1}{C^{\text{II}}} + \frac{1}{Sp}} = \frac{1}{\frac{1}{0.02} + \frac{1}{0.069}} = 0.016(\text{m}^3/\text{s}) \quad (7)$$

70 kPa 后的泄压开始。由总抽速与表 2 中提供的时间区间, 根据下式^[4]可依次算出各时间区间的压降, 进而求出压力。

$$Se = \frac{V}{t} \ln \frac{P_1}{P_2}, \quad (8)$$

表 7 70 kPa 压力以下单机泄压试验计算值与特征值比照表

Table 7 A comparison between computation values and characteristic values of pressure variation during the single-machine depressurization test below 70 kPa

时间/s	0	31	61	91	121	151	181
计算值/kPa	70	21.88	7.17	2.35	0.77	0.25	0.08
压力特征值/kPa	70	23.13	7.92	2.71	0.93	0.32	0.11

由表 7 可知每个计算值都小于对应的压力特征值, 所以满足第一类泄压技术要求。从 101 kPa 到 70 kPa 只开一台泵, 从 70 kPa 到 0.11 kPa 同时开两台泵。

2.2.1.2 第二类泄压要求验算

由表 3 可知泄压过程分为两个阶段, 第一阶段为 101.3 ~ 30 kPa, 速率要求为 0.3 kPa/s; 第二阶段为 30 ~ 2 kPa, 速率要求为 0.1 kPa/s, 两阶段速率允差均为 ±50%。

1) 第一阶段泄压验算

由泄压要求得最佳泄压时间为 237.7 s。

采用 BZ11 上的 SP250 干泵对容器进行泄压。由第一类泄压设计中 BZ11 上的 SP250 干泵对容器口的有效抽速为 0.016 m³/s, 可以得到净流量, 再由净流量得到泄压时间。

净流量

$$Q = Se \cdot \bar{P}, \quad (9)$$

式中: Se 为容器口的相对抽速, m³/s; \bar{P} 为压力平均值, Pa。将数值代入得 $Q = 1\,050.4 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

时间

$$t = \frac{V \cdot \Delta P}{Q}, \quad (10)$$

式中: V 为泄复压容器的容积, m³; ΔP 为压力的差值, Pa; Q 为容器口处净流量, Pa·m³/s; t 为泄压时间, s。

将数值代入得 $t = 115.2 \text{ s}$, 泄压设备的能力可满足试验要求, 只需调节管路上蝶阀的开度, 直

表 1 与表 4 比照可知, 从 101 kPa 到 70 kPa 泄压时认为单台设备即可满足要求, 计算主要从

式中: Se 为容器口的相对抽速, m³/s; V 为容器的容积, m³; t 为从 P_1 泄压至 P_2 所需要的时间, s; P_1 为容器内的初始压力, kPa; P_2 为容器内抽至某一时刻的压力, kPa。

得到压力如表 7 所示。

到泄压时间接近最佳时间 237.7 s 即可。

2) 第二阶段泄压验算

由第一阶段泄压验算, 将数值代入, 同理可以得到最小泄压时间 $t = 185.6 \text{ s}$, 泄压设备的能力可以满足试验要求, 只需调节管路上蝶阀的开度, 直到泄压时间接近最佳时间 280 s 即可。

2.2.2 复压设计

目前的复压机构由手动复压阀、复压管路组成, 复压过程中很难精确的达到所需要的精度。本次改造换掉了手动复压阀, 通过控制系统实现阀门开关动作及开度的调节, 提高了复压操作的精度。

2.2.2.1 分析计算

经过推导, 复压口最小流导

$$C = \frac{S \cdot V}{P}, \quad (11)$$

式中: V 为泄复压容器的容积, m³; \bar{P} 为泄复压过程容器内的平均真空度, kPa; S 为复压速率, kPa/s。

由于复压过程分为两个阶段, 所以当 S 取 0.133, \bar{P} 取 70.5 时, 可得复压口最小流导为 0.003 m³/s。根据计算得出的最小流导以及多次试验的结果, 设计复压口的直径为 16 mm。

2.2.2.2 第二类复压要求验算

由(11)式 S 取 0.05, \bar{P} 取 51.5 时, 得复压口流导为 0.002 m³/s, 和第一类复压要求计算得出的最小流导比较接近, 认为复压口直径为 16 mm 设

计合理, 可以满足第二类复压要求。

2.2.3 控制部分设计

现代测控技术是指通过 PC 机操作功能硬件

电路以并联的方式引入单机泄复压下位机控制系统, 在 BZ11 的机柜内安装切换开关, 实现 BZ11 干泵单机泄复压系统控制和原 BZ11 系统控制的切换。

泄复压流程包括自设定试验流程、第一类技术要求固化试验流程、第二类技术要求固化试验流程。

1) 自设定试验流程

自设定试验流程包括基本试验程序和复压阀参数设置程序。基本试验程序(图 1)可自由设置泄压目标值和保压时间; 复压阀参数设置程序为基本试验流程复压, 可以自由设定不同的复压区间以及这些压力区间阀门的开度值。

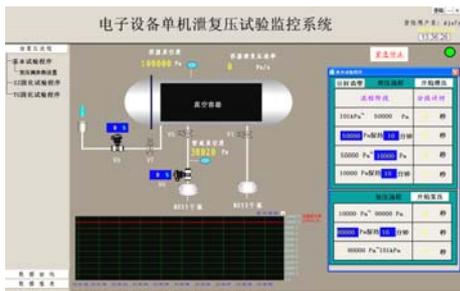


图 1 基本试验程序流程界面

Fig. 1 The interface of basic test procedures' flowchart

2) 固化试验流程

此试验流程是根据第一类与第二类试验技术要求, 将试验数据固化到下位机中, 试验人员只需要点击开始按钮就可以进行试验, 简化了操作, 同时也避免了人为输入错误。

3 设备调试

调试过程分为两部分: 第一类技术要求泄复压过程调试和第二类技术要求泄复压过程调试。各阀门编号按图 1 中所示。

3.1 第一类技术要求泄复压过程调试

1) 泄压流程

① 手动打开 V1、V5、V6 阀门, 确认 V7、V8 阀门处于关闭状态;

② 手动打开 BZ11、BZ12 干泵, 开始对容器抽气;

进行测控的技术^[5]。本次改造的监控系统下位机采用西门子 S7-200 系统, 上位机采用力控组态软件。

BZ11 干泵的控制通过将 BZ11 控制柜的

③ 记录达到压力设定点的时间, 确认是否满足技术要求。

2) 复压流程

① 手动调节 V8 阀门的开度, 确认 V1、V5、V6 阀门处于关闭状态;

② 手动打开 V7 阀门, 开始复压;

③ 观察复压速率的变化, 实时调节 V8 阀门开度, 使得复压速率达到技术要求;

④ 记录各个压力区间内 V8 阀门的开度值。

3) 调试数据

① 泄压流程

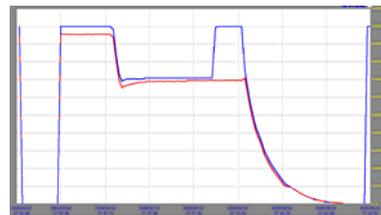


图 2 第一类技术要求泄压过程真空度曲线

Fig. 2 The curve of the vacuum degree during depressurization according to the first kind of technical requirements

图 2 为泄压过程曲线图, 图中红色曲线为容器真空度, 蓝色曲线为管道真空度。根据曲线, 101~70 kPa, 实际试验所需时间 11 s, 优于特征值 4 s; 70 kPa~100 Pa, 实际试验所需时间 124 s, 优于特征值 57 s, 系统能力完全满足试验要求。

② 复压流程



图 3 第一类技术要求复压过程真空度曲线

Fig. 3 The curve of the vacuum degree during repressurization according to the first kind of technical requirements

图 3 为复压过程曲线图, 图中红色曲线为容器真空度。

复压过程各个阶段的调节阀开度见表 8。

表 8 第一类技术要求复压过程阀门开度表

Table 8 The table of valve opening during repressurization according to the first kind of technical requirements

序号	复压阶段/kPa	阀门开度/%
1	0.1~40	50
2	40~50	3
3	50~60	5
4	60~70	7

5	70~80	12
6	80~90	14
7	90~101	15

根据曲线, 0.1~40 kPa, 实际试验所需时间为 29 s, 经计算得出平均复压速率为 1.376 kPa/s; 40~101kPa, 实际试验所需时间为 452 s, 经计算得出平均复压速率为 0.134 kPa/s, 均符合技术要求。

3.2 第二类技术要求泄复压过程调试

1) 泄压流程

- ① 手动调节阀门 V6 的开度, 手动打开 V5, 确认 V1、V7、V8 阀门处于关闭状态;
- ② 手动打开 BZ11 干泵, 开始对容器抽气;
- ③ 观察泄压速率的变化, 实时调节 V6 阀门开度, 使得泄压速率达到技术要求;
- ④ 记录各个压力区间内 V6 阀门的开度值。

2) 复压流程

- ① 手动调节阀门 V8 的开度, 确认 V1、V5、V6 阀门处于关闭状态;
- ② 手动打开 V7 阀门, 开始复压;
- ③ 观察复压速率的变化, 实时调节 V8 阀门开度, 使得复压速率达到技术要求;
- ④ 记录各个压力区间内 V8 阀门的开度值。

3) 调试数据

① 泄压流程

图 4 为泄压过程曲线图, 图中红色曲线为容器真空度曲线, 蓝色曲线为管道真空度曲线。

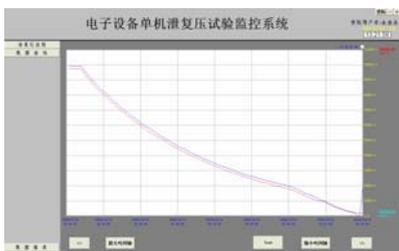


图 4 第二类技术要求泄压过程真空度曲线
Fig. 4 The curve of the vacuum degree during depressurization according to the second kind of technical requirements

泄压过程各个阶段的调节阀开度见表 9。

表 9 第二类技术要求泄压过程阀门开度表
Table 9 The table of valve opening during depressurization according to the second kind of technical requirements

序号	泄压阶段/kPa	阀门开度/%
1	101~80	7
2	80~40	9
3	40~30	10
4	30~20	7

5	20~17	8
6	17~10	10
7	10~7	16
8	7~5	17
9	5~2	30

根据曲线 101~30 kPa, 实际试验所需时间为 292 s, 经计算得出平均泄压速率为 0.24 kPa/s, 符合技术要求; 30~2 kPa, 实际试验所需时间为 265 s, 经计算得出平均泄压速率为 0.1 kPa/s, 符合技术要求。

② 复压流程

图 5 为复压过程容器真空度曲线。

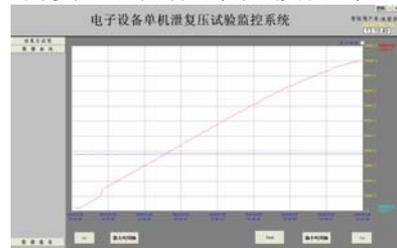


图 5 第二类技术要求复压过程真空度曲线
Fig. 5 The curve of the vacuum degree during repressurization according to the second kind of technical requirements

经过调试, 复压过程各个阶段的调节阀开度均为 1%。

根据曲线 2~101 kPa, 实际试验所需时间为 2501 s, 经计算得出平均复压速率为 0.04 kPa/s, 符合技术要求。

4 结束语

航天器的试验需求推动了环境试验技术的发展^[6], 本次设计改造就是针对新增的试验需求对现有设备进行改造, 使其同时满足两类技术要求。经过调试结果分析, 表明改造后的设备满足相应的技术要求, 使泄复压试验顺利完成。为了扩大本套泄复压试验设备的应用范围, 程序中还相应增加了自设定试验流程, 可以自由地选择泄复压目标值、保压时间等参数, 进一步增加了本套泄复压试验设备对试验需求的适应性。

参考文献 (References)

[1] 许忠旭, 陈金明, 常冬林, 等. 电子仪器泄复压试验与设备研制[J]. 航天器环境工程, 2007, 24(4): 223

- [2] 杨乃恒. 真空获得设备[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001: 1
- [3] 达道安. 真空设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 488
- [4] 王继常. 真空系统设计[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2002: 47
- [5] 顾苗, 刘劲松. 小型热真空试验设备网络化集群测控技术[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(4): 338
- [6] 金恂叔. 航天器的环境试验及其发展趋势[J]. 航天器环境工程, 2002, 19(2): 1