

新型航天红外组件寿命试验设备的真空系统设计

曹 岚^{1,2}, 杨 波^{1,2}, 朱宪亮^{1,2}, 张海燕¹, 龚海梅¹

1. 中国科学院上海技术物理研究所中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 依据新型航天红外组件寿命试验设备的真空系统的技术要求, 设计了具有两套抽气系统的全自动化高真空排气台, 主真空系统以机械泵和分子泵作为前级泵, 溅射离子泵作为主抽泵; 辅助真空系统由机械泵和分子泵组成, 用于主系统预抽。该真空系统采用计算机控制技术程控真空排气工艺, 为多工位结构, 具有全自动化的功能。根据理论计算分析, 该设备能满足红外组件寿命试验对真空的要求。

关键词 红外组件; 寿命试验; 真空; 自动化

中图分类号 TP273+.5

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.28.001

A New Design of the Vacuum System for the Aging Tests of the Space Infrared Device

CAO Lan^{1,2}, YANG Bo^{1,2}, ZHU Xianliang^{1,2}, ZHANG Haiyan¹, GONG Haimei¹

1. Key Laboratory of Infrared Image Materials and Devices, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract Based on the requirements of the vacuum system for the new aging tests of the space infrared device, this paper presents a design of a fully automatic high vacuum exhaust station with two sets of pumping system. One is the main vacuum system with a mechanical pump and a molecular pump as the backing pump and a sputter ion pump as the main pump; the other is the auxiliary vacuum system composed of a mechanical pump and a molecular pump, used for pre-pumping. With the computer control technology, this multi-station structure system enjoys automatic functions. The theoretical calculation analysis shows that this system can meet the vacuum requirements for the aging tests of the infrared device.

Keywords infrared device; aging test; vacuum; automation

0 引言

航天工程需要可靠地评估航天红外组件的工作寿命。目前, 以寿命试验设备进行无替换定时截尾试验是获取红外组件寿命的重要途径, 在用于航天红外组件寿命试验设备中, 真空系统的主要作用是: (1) 模拟空间工作环境, 一般航天红外组件的轨道环境压力在超高真空到极高真空范围内, 考虑到创造模拟环境的经济合理, 航天光学组件试验的工作压力一般选为 10^{-5} — 10^{-7} Pa^[1]; (2) 盛装组件的杜瓦需要真空环境

以减小其与外界的热交换, 使其减少液氮消耗保持低温^[2]。

在满足系统真空环境的前提下, 为实现寿命试验过程中可以方便地对航天红外组件的多个性能参数进行测试 (如响应率、噪声、探测率、探测器阻抗、黑体性能等), 新型的寿命试验设备采用了将待测试组件分别独立装入不同杜瓦进行寿命试验的方案, 因为寿命试验必须批量同时进行, 因此新型寿命试验设备的真空系统应为多工位结构。若多工位寿命试验为手动操作, 试验时就会耗费大量的人力物力, 因此新型

收稿日期: 2011-08-31; 修回日期: 2011-09-20

作者简介: 曹岚, 博士研究生, 研究方向为红外组件可靠性, 电子信箱: rosely2002@yahoo.cn; 龚海梅 (通信作者), 研究员, 研究方向为红外探测器组, 电子信箱: hmgong@mail.sitp.ac.cn

寿命试验设备的真空系统需设计为自动化操作。为保持光学测试时窗口的洁净,组件寿命试验设备应选用无油洁净真空系统,因此新型寿命试验设备的真空系统需为无油真空系统。

目前国内有一些单位和公司也从事了一些真空系统的研制工作,如:由航天工业总公司 510 研究所研制的 WZM 型无油超高真空环境模拟试验装置,在系统抽气过程中极限真空度可达 $4.8 \times 10^{-6} \text{Pa}$,系统运转过程可自动化进行,但该装置体积庞大,价格昂贵且没有多工位的结构;由北京中科科仪技术发展有限责任公司生产的多工位高真空排气检漏台具有 6 个工位,但真空度只能达到 $10 \text{Pa}^{[3]}$,且为手动操作;由北京中科科仪技术发展有限责任公司生产高低温空间环境模拟装置实现 $10^5 \sim 5 \times 10^{-5} \text{Pa}$ (大气—高真空) 压强范围和 $-50 \sim 150^\circ\text{C}$ 温度范围内的空间环境模拟试验工作,但不具有多工位结构,且为手动操作^[4]。上述的超真空获取系统均不能满足航天红外组件寿命试验对真空系统的要求,因此本文进行了以机械泵、分子泵、离子泵、电气控制系统构成的多工位、自动化操作、无油高真空系统的技术设计。

1 航天红外组件寿命试验对真空系统要求

航天红外组件寿命试验对真空系统要求为:(1) 系统排气接口为多工位;(2) 抽排的工件真空度需优于 10^{-4}Pa ,加液氮后的真空度需优于 10^{-5}Pa ,系统空载压强为 10^{-6}Pa ;(3) 所有阀门均采用电磁阀,以利于电气控制;(4) 两套抽排系统:

一套进行预抽,一套进行主抽,以利于杜瓦能随时加入;(5) 每个超高真空的被抽排工件可独立控制烘烤,并有温度显示和可调功能;(6) 真空度、温度数值数字化显示部分。

2 航天红外组件寿命试验设备的真空系统结构

航天红外组件真空系统由真空机械系统、电控系统、温控系统以及机架结构组成,分为控制柜和主机结构两部分。

真空机械系统如图 1 所示,分为主真空系统及辅助真空系统,主真空系统以机械泵和分子泵作为前级泵,溅射离子泵作为主抽泵;辅助真空系统由机械泵和分子泵组成,用于主系统预抽。系统工作原理如图 2 所示,当新的组件加入进行试验时,在装有组件的杜瓦接入真空系统后,可编程控制器(PLC)将控制开启连接在杜瓦上的真空电磁阀;接着打开金属电磁阀 1,杜瓦将连接到预抽泵组管道,使用预抽系统进行抽气;当预抽管道的真空度为 10^{-3}Pa 时,金属电磁阀 1 将关闭,然后金属电磁阀 2 打开,杜瓦切换到主抽泵组管路上,使用主抽系统进行抽气,金属电磁阀 1、2,真空电磁阀,杜瓦位置如图 3 所示。

图 3 为真空系统排气台的剖面图,它标记出了杜瓦到真空容器各个连接部件,从图中可以看出,杜瓦通过真空电磁阀、三通、波纹管、金属电磁阀 2 连接到主抽系统的真空容器。

真空测量由热偶真空计监测低真空端的真空度,由电离规进行高真空排气过程的测量,真空系统安装有自烘烤加热装置。

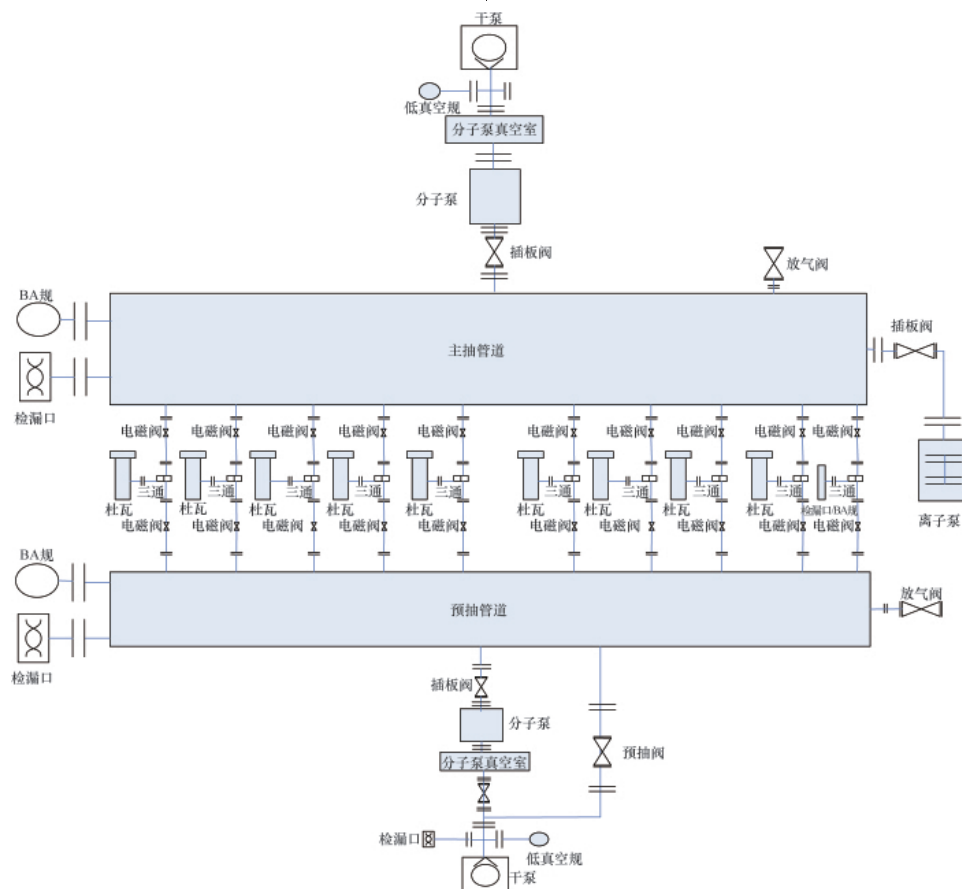


图 1 真空机械系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of the vacuum mechanical systems

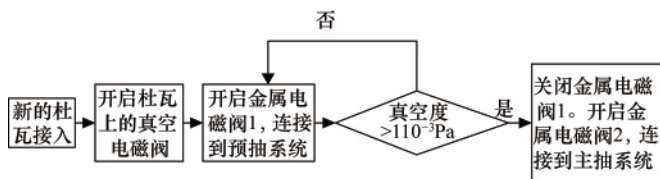


图2 系统工作流程图

Fig. 2 Flow chart of the of system

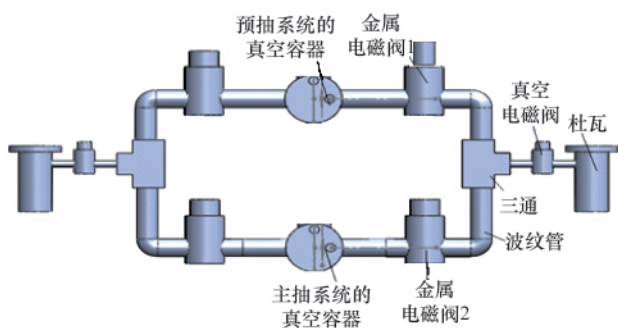


图3 真空系统的剖面示意

Fig. 3 Cross section of the vacuum system

3 真空系统

一个动态真空系统,其动态平衡压强 p 为^[6]

$$p=p_0+Q_{\text{load}}/S \quad (1)$$

其中, Q_{load} 为系统的气体负载; S 为真空系统的有效抽速; p_0 为抽气机组的极限压强。

3.1 杜瓦气体负载的计算

在被抽容器中,需要由真空泵抽走的气体包括:真空作业过程中产生气体 Q_1 ,在容器空间内的气体 Q_2 ,外部泄漏的气体 Q_3 ,以及真空容器中的结构材料表面放气 Q_4 。实际上,在杜瓦的排气过程中,前两项与后两项相比可以忽略不计,即杜瓦的气体负载 Q_0 为

$$Q_0=Q_3+Q_4 \quad (2)$$

其中

$$Q_4=\sum q_i A_i \quad (3)$$

其中, q_i 为第 i 种材料的出气率; $A_i=\beta A_a$, A_a 为材料的表现面积, β 为表面粗糙度系数,对于较为平滑表面, β 取 5—10,对于粗糙表面, β 取 10—50^[6]。

本系统的杜瓦内径 $d_1=50\text{mm}$, 外径 $d_2=70\text{mm}$, 壁厚度为 5mm, 高度 $h=120\text{mm}$, 由公式 (3) 可得杜瓦的放气量为

$$Q_4=(\pi d_1 q l + \pi d_2 q l) \beta \times 20 = 1.24 \times 10^{-2} \text{Pa} \cdot \text{L/s} \quad (4)$$

一般真空系统的漏气量为本系统放气量的 1/10, 所以杜瓦的总气体负载为 $1.36 \times 10^{-2} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

3.2 主抽系统泵选取

为提高寿命试验设备的工作效率,一般一次安排多个杜瓦进行试验,两套系统都在泵与杜瓦之间设计了管道式的真空容器,主抽系统的容器是不锈钢制造的直径为 16cm, 长为

150cm 的真空容器。预抽系统的容器为不锈钢制造的直径为 6.3cm, 长为 150cm 的真空容器。依照杜瓦的气体负载的计算方法,可得出系统的气体负载 Q 为

$$Q=Q_5+Q_6 \quad (5)$$

其中, Q_5 为真空容器、测试杜瓦以及连接前面两者的管道的总的放气量, $\text{Pa} \cdot \text{L/s}$; Q_6 为整个系统的漏气量, $\text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

由式 (5) 可得,系统的气体负载为 $Q=2.49 \times 10^{-2} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$, 又工件所需真空指标 $p_g=10^{-4} \text{Pa}$, 根据

$$S_e=Q/p_g \quad (6)$$

可求得主泵的有效抽速为 $S_e=249 \text{L/s}$, 结合实际应用效果,可选择溅射离子泵的抽速为 500L/s, 前级分子泵的抽速 S_p 为 700L/s, 前级机械泵的抽速为 8L/s。主泵的极限真空度为 10^{-8}Pa , 可满足系统空载小于或等于 $1 \times 10^{-6} \text{Pa}$ 的要求。

3.3 杜瓦口的电磁阀的尺寸计算

被抽工件的工作压强为 10^{-4}Pa , 此时 $p_g D < 0.02 \text{Pa} \cdot \text{m}$ 。故气体处于分子流状态。分子流状态下流导的计算公式如下:

$$G=\begin{cases} 12.1D^3/L & \text{长管} \\ 11.6\alpha A & \text{短管} \end{cases} \quad (7)$$

其中, D 为管道的直径; L 为管道的长度; A 为横截面积; α 为克劳辛系数。

分子泵的泵口到被抽的真空容器的总流导为

$$\frac{1}{G}=\frac{1}{G_0}+\frac{1}{G_1} \quad (8)$$

其中, G_0 为连接管的流导, G_1 为高真空阀门的流导。

如图 3 真空系统排气台剖面图所示,杜瓦通过真空电磁阀、三通、波纹管、金属电磁阀 2 连接到主抽系统的真空容器,其中,该排气台的连接管、真空电磁阀门、真空容器、金属电磁阀、波纹管及三通的关键尺寸与流导数据如表 1 所示。

表 1 真空系统的各部件关键尺寸及流导
Table 1 Key dimensions and conductances of the vacuum system

部件	直径/mm	高度/mm	流导/($\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)
连接管	160.0	80.0	1567
阀门	160.0	120.0	1352
真空容器	160.0	750.0	637
金属电磁阀	—	—	46
波纹管	38.1	84.4	78
三通	38.1	62.5	106

根据表 1, 结合公式 (8), 可求出真空容器的总流导 G 为

$$G=\frac{G_0 G_1}{G_0+G_1}=725 \text{L/s} \quad (9)$$

结合第 3.2 节中选择的分子泵的抽速 S_p 为 700L/s, 则分子泵在真空容器入口的有效抽速为

$$S_e=\frac{S_p G}{S_p+G}=356 \text{L/s} \quad (10)$$

此外, 由表 1 可得: 真空容器的流导 U_0 为 637L/s、波纹管

的流导 U_2 为 78L/s, 三通的流导为 106L/s, 并查得金属电磁阀 1 的流导 U_1 为 46L/s, 因此距离泵口最远的杜瓦的串联流导 U 为

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3} \quad (11)$$

从而可得 $U=22\text{L/s}$ 。

故可求得分子泵在杜瓦口没有电磁阀情况下杜瓦口的有效抽速 S'_e 为

$$S'_e = \frac{S_e U}{S_e + U} = 21\text{L/s} \quad (12)$$

根据同一真空系统, 由任意一横截面积的抽气量均等于泵口的抽气量, 可得:

$$S'_e p' = S_p p \quad (13)$$

其中, S'_e 为分子泵在杜瓦口的有效抽速, p' 为杜瓦口的压强, S_p 为分子泵在真空容器入口有效抽速, p 为真空容器入口处压强。因此可以粗略得出在真空容器入口处压强比杜瓦口压强至少高 1.5 个量级。本设计中选择两者的压强差为 2 个两级, 即 $\frac{p'}{p}=100$, 所以杜瓦口的有效抽速 S'_e 必须达到 3.56L/s。根据流导串联定律, 可得入口处的电磁阀的流导须大于 4.3L/s。因此本设计中选用流导为 5L/s 的 KF16 电磁阀。

4 控制系统

控制系统由温控系统与真空执行系统组成如图 4 所示。在执行自动功能时, 使用 2 台 PLC 对组件的烘烤排气工艺过程实时控制。如图 5 所示, 1 台 PLC 专门负责温度控制系统, 由于该系统为 20 工位结构, 对应有 20 路模拟输入信号, 通

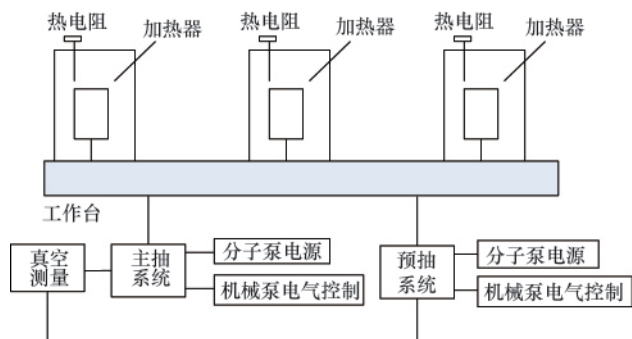


图 4 控制系统框图

Fig. 4 Block diagram of the control system

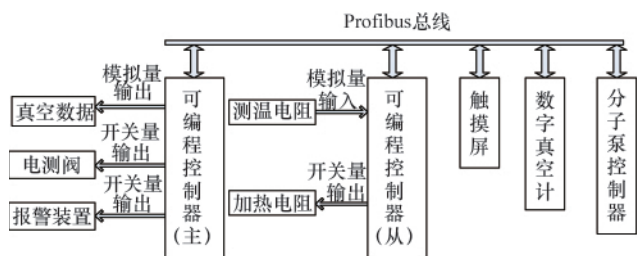


图 5 控制系统原理图

Fig. 5 Schematic diagram of the control system

过分时选通所有测试中的杜瓦的热电阻, PLC 可以对相应的杜瓦进行升温、保温烘烤, 并数字显示各工位的温度值; 另 1 台 PLC 负责真空排气控制系统。PLC 通过 Profibus 总线与全量程数字真空计联接, 以获取真空度值。当真空度低于预抽控制系统的上限时, PLC 控制系统处于预抽的状态, 即打开杜瓦连接至预抽系统的电磁阀, 使杜瓦挂载到预抽系统的分子泵组进行排气; 当真空度高于预抽控制系统的上限时, PLC 控制杜瓦处于主抽状态, 即打开杜瓦连接至主抽系统的电磁阀, 使杜瓦挂载到主抽排气系统的分子泵组进行排气; 此排气台的温度控制系统和真空排气控制系统均为全自动控制, 当新的杜瓦加入测试时, 只需将已检漏的杜瓦接上排气台, 点击人工操作控制台面板上的开关, 以通知控制系统有新的杜瓦加入测试即可。

5 结论

根据寿命试验对真空度的要求, 本文设计了一种各工位真空独立的多工位真空系统, 该系统由干泵和涡轮分子泵作为前级泵, 溅射离子泵作为主抽真空泵, 构成主抽真空系统; 干泵作为前级泵, 涡轮分子泵为主泵, 构成预抽真空系统。采用计算机控制技术程控真空排气工艺。该系统为多工位结构, 具有全自动化的功能。

参考文献 (References)

- [1] 达道安. 空间真空技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1995: 769-770.
Da Daoan. Space vacuum technology[M]. Beijing: China Aerospace Press, 1995: 769-770.
- [2] 吴礼刚. 星载碲汞红外探测器组件的温度循环试验研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2006.
Wu Ligang. Studies on the thermal cycle test of HgCdTe infrared detector assemblies for satellites [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [3] 北京中科科仪技术发展有限责任公司. 多工位高真空排气检漏台[EB/OL]. [2011-05-30]. http://www.kyky.com.cn/?optionid=485&auto_id=105.
KYKY Technology Development LTD. Multi-site high-vacuum exhaust leak detection units [EB/OL]. [2011-05-30]. http://www.kyky.com.cn/?optionid=485&auto_id=105.
- [4] 北京中科科仪技术发展有限责任公司. 高低温空间环境模拟装置[EB/OL]. [2011-05-30]. http://www.kyky.com.cn/?optionid=489&auto_id=92.
KYKY Technology Development LTD. High and low temperature space environment simulator[EB/OL]. [2011-05-30]. http://www.kyky.com.cn/?optionid=489&auto_id=92.
- [5] 肖祥正, 刘玉魁, 谈治信, 等. 真空设计手册[M]. 3 版. 北京: 国防工业出版社, 1991: 84-85.
Xiao Xiangzheng, Liu Yukui, Tan Zhixin, et al. Vacuum design manual [M]. 3rd ed. Beijing: National Defence Industry Press, 1991: 84-85.
- [6] 任家生, 任卫祥, 刘兆斌, 等. 太阳能真空集热管排气台抽气系统的设计计算 [C]/江苏省真空学会第十届学术交流会论文集. 南京: 江苏省真空学会, 2002.
Ren Jiasheng, Ren Weixiang, Liu Zhaobin, et al. Taiwan solar vacuum tube exhaust extraction system design calculation[C]/ Vacuum Society of Jiangsu Province, the Tenth Symposium. Nanjing: Vacuum Society of Jiangsu Province, 2002.

(责任编辑 刘志远)