

**The study of long-term reliability of HgCdTe infrared
detector assembly**

**By
Cao lan**

**A Dissertation Submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Doctor of Science**

**Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese
Academy of Sciences**

May, 2013



Y2369207

致 谢

首先,我要感谢我的导师龚海梅研究员。在这四年来的学习和研究工作中,龚老师渊博的知识为我开拓了眼界,对问题的独到见解使我深受启发,严谨的治学态度督促我踏踏实实的开展每一项研究,他对我的悉心教导让我端正了科研态度,树立了科研意识,培养了科研精神。正是在龚老师的严格要求和悉心指导下,才使得我顺利的完成了课题研究工作以及学位论文。在此,我谨对龚老师表示我最衷心的感谢!同时,我还要感谢我的二导张海燕老师,张老师细致的科研态度给了我很多的启迪,感谢他多年来在学业上对我的关心和照顾。

在这些年的学习过程中,感谢实验室多年来给予我帮助各位老师和师兄师姐:李雪、刘大福、范广宇、王小坤、邵秀梅、陈安森、陆华杰、庄馥隆、季鹏、唐恒敬、李淘、洪斯敏、宁锦华、徐勤飞、张亚妮、曾智江、吴家荣、沈一璋、郝振贻等。感谢与我一起生活和学习的同学和朋友们:张可锋、李永富、李淘、包西昌、王玲、张伟、黄张成、黄松垒、李超、王荣阳、王韡、张燕、朱耀明、邓洪海、魏鹏、许中华、马学亮、夏王、刘福浩、叶柏松、刘飞、张立瑶、杨波、朱宪亮、王云姬、石铭、黄星、曹高奇、王瑞等等。

感谢研究生部的诸位老师在学习、生活上给予的关心和帮助。

感谢我的父母、姐姐、姐夫等家人和朋友,尤其感谢邓若汉,感谢他多年来在我的工作和学习中对我的关心和帮助。

最后感谢各位专家对本论文的评阅。

作者曹岚

2013年5月

摘 要

对于空间应用的碲镉汞红外探测器组件，寿命试验是一种很重要的可靠性试验方法，寿命试验数据的统计分析结果可作为可靠性预测、制定筛选条件和改进质量的依据，因此开展对碲镉汞红外探测器组件的长期寿命试验具有十分重要意义。

在长期工作寿命试验方面，电子产品均可按照定数截尾方法进行。虽然这种试验方法已广泛应用于各种军用电子元器件的工作寿命评估，但对于碲镉汞红外探测器组件，该试验进行的还不够充分，没有形成严格的标准，其主要原因是缺乏自动化程度高、黑体测试操作简便的设备。因此研制出适用于碲镉汞红外探测器组件的长期寿命试验设备显得非常必要和紧迫。

论文中首先介绍了一种自主研制的 20 工位碲镉汞红外探测组件长期寿命试验自动化设备，该设备主要包括真空系统、低温系统、测试系统；其次，针对碲镉汞红外组件的长期贮存可靠性问题，开展了对组件的失效模式和失效机理的初步研究，并得出了一些统计规律。

其中，在针对碲镉汞红外组件的长期工作寿命试验设备的研制方面，本文做了以下工作：

1、针对碲镉汞红外组件的长期工作寿命试验的要求，本文通过真空结构理论计算和计算机 3D 建模，对设备进行了结构设计，在此基础上完成了设备的研制，并投入试运行，其空载真空度可达 $2.4 \times 10^{-5} \text{Pa}$ ，满足设计指标，可达到碲镉汞组件长期寿命试验的要求；

2、针对于长期寿命试验设备的自动控制要求，本文进行了以可编程逻辑控制器（PLC）作为控制中心的硬件集成，提出了自主设计的真空排气算法和低温维持算法。在控制系统的硬件、软件设计完成后，对该控制系统进行仿真和调试。调试和仿真结果显示，该系统实现了 PLC 集中采集所有现场数据、分子泵控制、温控仪器控制、自动输液控制、自动排气控制等功能，其自动控制的真空和温度等参数可满足寿命试验的要求。

3、针对长期寿命试验设备的自动测试要求，本文提出了一种 20×54 通道电阻自动测试的解决方案，设计了一种高可靠的多路复用阻值测试系统。为实现多通道的阻值测试，设计了多路复用开关阵列，并采用单片机自动控制开关切换。采用 LABVIEW 编写了 20×54 通道阻值自动测试软件，最后对该 20×54 通道阻值自动测试系统进行了试运行，试运行结果表明，测试系统的电阻测量值波动小于 0.15Ω ，可以满足碲镉汞红外探测器组件自动测试要求。

针对碲镉汞红外组件长期贮存可靠性的研究方面，本文做了以下工作：

进行了三个批次的探测器组件长期贮存试验，对组件的失效模式和失效机理进行了初步研究，得出了一些统计规律。统计发现：1、贮存过程中组件失效比例大，约占总的试验组件比例的 50%；2、失效比例与批次无关，与光敏元有关，1 到 8 元中，3 元和 4 元贮存稳定性最差。3、光敏元失效模式有四种，分别为芯片开路、芯片的噪声增大同时信号减小、芯片的信号减小、芯片室温阻值正常而低温开路；4、在芯片的噪声增大同时信号减小的模式下，失效芯片钝化膜表面无腐蚀迹象。长期贮存试验得到的统计结果将有助于改进器件设计和工艺。

关键词：碲镉汞红外探测器组件，长期可靠性，寿命试验设备，贮存可靠性

ABSTRACT

For space applied HgCdTe infrared detectors, lifetime test is an important kind of reliability test, the results and statistical analysis of the lifetime test can be used as predicting the reliability, obtaining the filter criteria and improving quality. So it is significant to carry out the lifetime test on HgCdTe infrared detectors.

For the long-term Working life test, all the electronic products can be designed with the Censored test method. Although this test method has been widely used in the lifetime prediction of military applied electronic components, for the HgCdTe infrared detector component, this kind test is not sufficiently carried out, there are no strict standards. The main reason is that it is lack of a kind of lifetime test equipment with high automatization and simple operation for the optical test. So it is necessary and urgent to develop Long-term life test equipment for HgCdTe infrared detector assembly.

In this paper we firstly introduce a test equipment which has 20 stations with high automatical functions, including vacuum systems, cryogenic systems and test systems; Secondly, for the long-term storage reliability test of HgCdTe infrared component, this paper carries out a preliminary study of component failure modes and failure mechanisms, and obtain some statistical regularity.

As for the development of long-term working lifetime test equipment for the HgCdTe infrared component, this paper has done the following work:

To meet with the requirements of long-term working lifetime test, this paper has done a number of vacuum structure theoretical calculations and computer 3D modeling, and then based on this design, a long-term working life test equipment is put into processing. Finally, this equipment was sent for trial operation, and gets a no-load vacuum result as 2.4×10^{-5} Pa, which shows that the equipment can satisfy the requirements of the long-term HgCdTe lifetime test.

To achieve the automatical control requirements of the long-term working lifetime test equipment, it uses the programmable logic controller (PLC) as the control center. It proposes a kind of self-designed vacuum exhaust algorithm and a kind of low temperature maintaining algorithm. After completing the hardware and software design, stimulation and debugging of the control system are done. The results of the debugging and the simulations show that the control system can

realize the automatically controlling of the pump and Temperature control unit, and the automatically maintaining of the low temperature and high vacuum; it can satisfy the requirements of the long-term HgCdTe lifetime testing.

To achieve the automatic measuring requirements during the long-term lifetime test, this paper proposes an automatical 20×54 -channels resistance measuring solutions for the HgCdTe infrared detector components. To achieve multi-channel resistance measuring, the multiplexer switch array is designed, which uses micro-controller automatically control the switch. And a kind of automatical measuring software is designed by LABVIEW. Finally this automatical resistance measuring system has been put into trial, the trial results show that the fluctuations of resistance measurement result is less than 0.150 Ω , which shows that this automatical measuring system can meet the requirements of the automatical resistant measurement of HgCdTe infrared detector assembly.

As for long-term storage reliability research for the HgCdTe infrared components, this paper has done the following work:

This paper has done a long-term storage test for three batches of detectors. After a preliminary study of component failure modes and failure mechanisms, it draws some statistical regularity, which including as follows: firstly, there is a large proportion of failure component, with the criterion of low-temperature resistance, the blackbody signal and noise, the number of failure components is 8, which is about 50% of the total number of test components; secondly, the failure fraction have no correlation with the batch, only related to the detector, and compared to other detector, the third and fourth detector have the worst storage stability and the largest number of failure component; thirdly, there are four failure mode, including the open circuit, noise increases and meanwhile signal reduced, the signal decreases, the normal at room temperature and open circuit at low temperature, respectively; fourthly, under the mode of noise increases and meanwhile signal decreases, the passive film of the failure detectors has no signs of corrosion. The data and results from the long-term storage test would help to improve the design and the process of HgCdTe IR detectors.

Key Words: HgCdTe infrared detector assembly, Long-term reliability, Lifetime test

equipment, storage reliability

摘 要	I
ABSTRACT	III
1 引言	1
1.1 碲镉汞红外探测器	1
1.2 碲镉汞红外探测器组件的可靠性	1
1.3 碲镉汞红外探测器组件的长期寿命试验	2
1.4 可靠性特征量	4
1.5 常用的寿命分布	5
1.5.1 指数分布	5
1.5.2 威布尔分布	5
1.5.3 对数正态分布	5
1.6 碲镉汞红外探测器组件的长期寿命试验	6
1.6.1 长期寿命试验方案	6
1.6.2 寿命特征量的分析方法	8
1.7 国内外进展	8
1.8 论文的主要内容及结构安排	11
2 碲镉汞红外探测器寿命试验设备的结构设计	13
2.1 长期寿命试验设备的任务要求	13
2.1.1 碲镉汞红外探测器组件参数测试要求	13
2.1.2 碲镉汞红外探测器组件长期寿命试验要求	14
2.2 设备的总体方案	16
2.3 真空系统设计理论	19
2.3.1 流导计算	19
2.3.2 真空室抽气口处泵的有效抽速计算	20
2.4 真空系统关键部件选型	21
2.4.1 真空系统材料选择	22
2.4.2 公共真空室设计	22
2.4.3 选泵和配泵	23
2.4.4 阀门选型	26
2.4.5 真空系统 3D 建模	27
2.5 设备运行情况	28
2.6 本章小结	30
3 设备的控制	33
3.1 控制系统的控制任务	33
3.1.1 设备的控制要求	33
3.1.2 真空获取的基本工作原理	33
3.1.3 低温维持系统的工作原理	34
3.2 控制系统的总体方案	35
3.3 控制系统的硬件	36
3.3.1 上位机	38

3.3.2 可编程逻辑控制器.....	39
3.3.3 信号模块.....	39
3.3.4 温控模块.....	41
3.3.5 控制总线.....	42
3.3.6 控制系统硬件集成.....	43
3.4 控制系统 PLC 程序设计.....	43
3.4.1 数据采集.....	45
3.4.2 分子泵控制.....	46
3.4.3 烘烤温度控制.....	48
3.4.4 自动输液氮控制.....	49
3.4.5 自动排气控制.....	50
3.5 触摸屏人机界面程序设计.....	54
3.6 控制系统的调试.....	55
3.7 本章小结.....	61
4 设备的自动阻值测试.....	63
4.1 电阻自动测试系统技术要求及指标.....	63
4.2 电阻自动测试总体实现方案.....	64
4.3 多路开关阵列电路设计.....	65
4.3.1 电子开关芯片选型.....	65
4.3.2 测试板设计方案.....	66
4.3.3 控制板设计方案.....	68
4.3.4 系统总体示意图.....	69
4.4 自动测试系统测试可靠性分析.....	70
4.4.1 自动阻值测试精度.....	70
4.4.2 自动阻值测试安全可靠性.....	70
4.5 自动数据采集.....	71
4.5.1 自动数据采集控制流程.....	71
4.5.2 上位机软件设计.....	72
4.5.3 下位机软件设计.....	73
4.6 自动测试系统测试结果.....	74
4.7 本章小结.....	75
5 碲镉汞探测器贮存可靠性研究.....	77
5.1 引言.....	77
5.2 贮存可靠性试验方案.....	78
5.3 碲镉汞探测器组件参数测试结果.....	80
5.3.1 光敏元室温电阻的变化.....	80
5.3.2 光敏元低温电阻的变化.....	80
5.3.3 光敏元信号、噪声的变化.....	85
5.4 碲镉汞探测器组件的失效分析.....	86
5.4.1 非破坏性试验.....	87
5.4.2 半破坏试验.....	88
5.5 本章小结.....	90
6 结论和展望.....	91
6.1 结论.....	91

6.2 展望.....	92
参考文献	93

1 引言

1.1 碲镉汞红外探测器

红外探测器是红外系统中完成光电转换的核心部件，每一种新型红外探测器的问世，都导致红外科学技术的进一步发展。碲镉汞 ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$) 作为一种性能良好的红外探测器材料，自 1959 年 W. D. Lawson 等人发现 HgCdTe 材料以来，其独特的物理特性和巨大的应用潜力引起了人们的极大关注[1]。

HgCdTe 是 HgTe 和 CdTe 两种材料的固溶体，其可根据 Hg 和 Cd 的组分不同，实现禁带宽度可从 0 到大约 1.6eV 范围内连续可调。此外， HgCdTe 材料还具有许多其它的优点，例如电子有效质量小而本征载流子浓度低，反向饱和电流小；探测器噪声低，探测率高；介电常数小，器件电容小，频率响应率高；电子迁移率高；载流子寿命长；本征跃迁，吸收系数大，量子效率高；表面生长的氧化物化学稳定，可得到表面态密度低的半导体-氧化物界面；热膨胀系数比较接近硅，易于制造与硅 CCD 混成的阵列器件。

基于 HgCdTe 材料的上述优点， HgCdTe 材料已经制成了覆盖短波、中波、长波、多色的大规格红外探测器光电探测器件[2-5]。碲镉汞红外探测器也经历了从第一代、第二代到第三代的发展过程。第一代 HgCdTe 红外探测器的基本特点是：(1) 红外探测器响应 8~12 μm 波段；(2) 红外探测器大多数以光电导方式工作；(3) 红外探测器的结构是线列或者小面阵探测器，包括扫积型探测器 (SPRITE, Signal Processing in The Element) 列阵；(4) HgCdTe 红外探测器工作温 90K，需要利用精密光学机械扫描器进行二维扫描成像。第二代 HgCdTe 红外探测器的特点是：(1) 只需要进行一维精密光机扫描就获得电视规格扫描线的线列或带时间延迟积分的探测器列阵；(2) HgCdTe 探测器是焦平面探测器，即探测器列阵与信号读出、预处理电路互联为一体；(3) 红外探测器响应波段主要有 8~12 μm 和 3~5 μm 。第三代 HgCdTe 红外探测器的特征是：(1) 采用凝视型红外焦平面探测器，其探测元规模接近电视标准，规模为 128×128 元、256×256 元、320×256 元、320×240 元、640×480 元等；(2) 采用先进的信号处理技术；(3) 第三代 HgCdTe 红外探测器主要响应 3~5 μm 和 8~12 μm 红外波段。

1.2 碲镉汞红外探测器组件的可靠性

作为红外系统中的核心元部件，红外探测器组件的可靠性决定了系统的工

作寿命、可靠性等问题，因此提高红外探测器组件可靠性具有非常重要的意义。

随着碲镉汞红外探测器组件的发展和对地观测以及对外空观测的应用需求的提高，红外探测器由最初的单波段单元，向多波段多元集成组件及大规模阵列和面阵红外焦平面发展。工艺过程中引入的各种新技术逐渐增多，新技术对红外组件的可靠性影响的不确定因素也逐渐增多[6]，因此对红外探测器尤其是HgCdTe探测器组件的可靠性进行系统的研究，不仅在学术上有重要的科学意义，而且在航天工程中同意有着重大的应用价值。

1.3 碲镉汞红外探测器组件的长期寿命试验

为测定、验证、评价、分析或提高产品可靠性而进行的试验称为可靠性试验，它是产品可靠性工作的一个重要的环节。对产品进行可靠性试验的目的有：

- 1) 确定产品的可靠性特征量。如在研制阶段进行可靠性试验，以便暴露产品在材料、结构、工艺以及环境适应性方面存在的问题，从而达到评价新材料、新工艺、新产品、新设计的目的；
- 2) 考核产品的可靠性指标。如在产品研制成型时，进行鉴定试验，可考核产品是否达到预定的可靠性指标；
- 3) 研究新的试验方法（如加速试验方法及其加速系数的确定，试验应力种类及其量值、循环次数、试验时间的确定，抽样方案选择等）；
- 4) 研究产品失效分布规律和产品的失效机理。如通过各种可靠性试验，了解产品在不同环境与应力条件下的失效规律与失效模式，分析引起产品的失效原因，从而为可靠性预计、设计、试验提供有用的数据。

可靠性试验是评价产品可靠性水平的重要手段，也是生产高可靠性产品的基本环节。常用的可靠性试验按照不同的分类标准可分为不同的试验，表 1.3.1 为按试验项目的分类表[7]，从表中可看出，可靠性试验总体可分为环境试验、寿命试验和现场使用试验。

表 1.3.1 可靠性试验的分类表

试验	类别	试验项目
环境试验	机械试验	振动、冲击、离心加速度、跌落、引线抗拉强度等试验
	可焊性试验	引线可焊性试验
	温度试验	高温、低温、温度循环试验
	湿热试验	恒定湿热、交变湿热试验
	密封性试验	粗检（氟碳油）、细检（氦质谱、放射性示踪）
	特殊试验	盐雾、霉菌、低气压、超高真空、辐照等试验
寿命试验	长期寿命试验	长期贮存寿命试验
		长期工作寿命试验
	加速寿命试验	恒定应力加速试验、步进应力加速试验、序进应力加速试验
现场使用试验		实际工作试验

环境试验是将产品暴露在人工模拟环境中，以此来评价该产品在运输、贮存、使用环境条件下的性能的一种试验方法。通过环境试验，可以提供产品质量方面的信息。

环境对产品的性能会产生很大的影响，从 20 世纪 40 年代开始研究电子产品的适应性问题。军用电子元器件环境试验方法目前主要有以下几种：美国制订的三军通用的环境试验方法 MIL-STD-810D、国际电工委员会制订的 ICE68、我国制订的军用环境试验方法 GJB150-2009。

寿命试验是获取产品寿命特征的方法，它是在实验室模拟产品实际工作状态或贮存状态，投入一定样品进行试验，记录样品失效时间、进行统计分析，以评估产品可靠性寿命特征的一种可靠性试验方法。

寿命试验总的来分有两大类：其一为长期寿命试验，其按照产品的正常工作状态或贮存状态进行试验；其二为加速寿命试验，其按照超出正常工作或贮存的应力来进行试验。目前军用电子元器件的寿命试验标准主要有：我国军用可靠性鉴定和验收试验 GJB899A-2009、美国军用可靠性鉴定和验收试验 MIL-STD-781、美国军用电子元器件加速寿命标准 MIL-STD-471A 等。

对于碲镉汞红外探测器组件，环境试验可以检测出具有一定特性的产品或剔除早期失效的产品，以提高产品的使用可靠性。产品在制造过程中，由于材料的缺陷、工艺失控等原因使部分产品出现所谓早期缺陷或故障，通过环境试验将这些缺陷或故障及早剔除，从而保证在实际使用时产品的可靠性水平。总的来说，环境试验可以提高合格品总的可靠性水平，但它不能预测产品的长期可靠性，即不能预测产品的寿命。加速寿命试验可以在较短的时间内获取较多的产品失效数据，以提高寿命特征量获取的效率。但是，目前加速寿命试验主要是用于对集成制冷机的碲镉汞红外探测器组件、杜瓦、制冷机等进行机械可靠性研究[8-10]，试验针对对象为杜瓦和制冷机。而对于电子元器件的寿命预测的正确性和指导性还存在争议，如在 1996 年，美军方指出一些加速寿命试验标准如 MIL-HDBK-217 在用于可靠性预测中会产生错误的结果和产生误导。因此开展对碲镉汞红外探测器组件的长期寿命试验，以对探测器组件的工作寿命进行评价分析和验证的研究工作，对于空间应用的碲镉汞红外探测组件的可靠性具有十分重要的研究意义。

碲镉汞红外探测器组件在实际使用中总要处于一定的应用环境下，包括工作环境和非工作环境。对于工作环境下，它主要指探测器组件的实际使用条件；对于非工作环境下，它主要包括贮存环境下、安装环境下、整机中休眠的环境下的可靠性，其中，贮存是广义非工作状态中最基本的类型。因此针对于碲镉汞红外探测器组件，它的长期寿命试验一般分为长期工作寿命试验和长期贮存

寿命试验。

1.4 可靠性特征量

衡量产品可靠性水平有好几种标准，有定量的，也有定性的，有时要用几种标准（指标）去度量一种产品的可靠性，但最基本最常用的有以下几种标准：[7]

(1) 可靠度 $R(t)$

它是产品在规定条件和规定时间 t 内完成规定功能的概率。一批产品的数量为 N ，从 $t=0$ 时开始使用，随着时间的推移，失效的产品件数逐渐增加，而正常工作的产品件数 $n(t)$ 逐渐减少，用 $R(t)$ 表示产品在任意时刻 t 的可靠度。

(2) 失效分布函数 $F(t)$

它是产品在规定条件下和规定时间 t 内发生失效的概率。若给定的时间 $t=100$ 小时，则 $F(100)=P(\text{产品寿命 } T < 100)$ 表示 100 小时以前的失效概率；在可靠性工作中，也有把 $F(t)$ 称做“累积失效概率”。 $F(t)$ 和 $R(t)$ 为互补关系。

(3) 失效密度 $f(t)$

失效密度为产品在时刻 t 的单位时间内发生失效的概率，可以用失效分布失效分布函数 $f(t)$ 的导数来计算， $f(t)=F'(t)$ 。

(4) 失效率 $\lambda(t)$

它是产品可靠性的重要指标，不少产品是用失效率的大小来确定其等级的，它的定义为已工作到 t 时刻的产品，在时刻 t 后的单位时间内发生失效的概率，称为该产品的失效率函数，简称失效率，记为 $\lambda(t)$ 。失效率与失效分布函数的关系： $\lambda(t)=f(t)/R(t)$ 。

(5) 平均寿命

它标志一个标志产品平均能工作多长实际的量，对于不可修复的产品，平均寿命就是平均寿终时间，记为 MTTF (Mean Time to Failure)；对于可修复的产品，平均寿命就是平均无故障工作时间，记为 MTBF (Mean Time Between Failure)。若考虑首次失效前的一段工作时间，那两者没有区别。若抽取 n 个样品进行寿命试验获得各个样品发生故障的时刻

(6) 可靠寿命 $R(t_r)$

它与一般理解的寿命有不同含义，概念也不同。假设产品的可靠度为 $R(t)$ ，使可靠度等于给定值 r 的时间 t_r 被称为可靠寿命。

1.5 常用的寿命分布

1.5.1 指数分布

指数分布是非常重要的分布，它描述了恒定失效率产品的状况，在电子工业中较多的用来描述电子产品的失效率。其概率密度函数为：

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (1.5.1)$$

其中 λ 是失效率。

1.5.2 威布尔分布

威布尔分布是可靠性中常用的寿命分布，许多电子与机械的元件与设备的寿命分布都是威布尔分布。3 参数的威布尔分布的概率密度函数为：

$$f(T) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (1.5.2)$$

其中 $\eta > 0$ 是尺度参数，又叫特征寿命，因为 $\eta = T_{0.632}$ ， $\beta > 0$ 是形状参数（斜率）， γ 是位置参数。不同的形状参数下威布尔分布的密度函数和分布函数不同，如下图给出了不同形状参数下密度函数和分布函数。

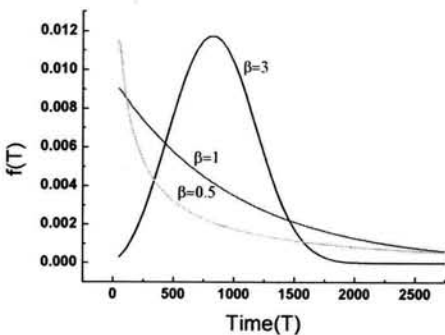


图 1.5.1 Weibull 分布中形状参数与密度函数的关系曲线

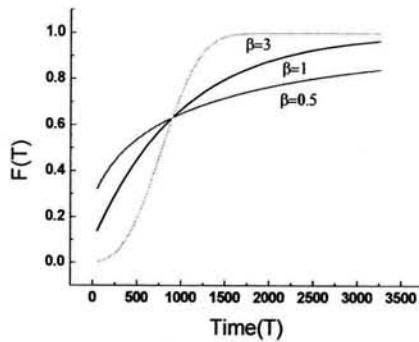


图 1.5.2 Weibull 分布中形状参数与失效分布函数的关系曲线

当 $\beta < 1$ 时，早期失效较多；当 $\beta = 1$ 时，威布尔分布即为指数分布；当 $\beta > 1$ 时，威布尔分布的密度函数呈单峰状；当 $\beta > 3$ 时，威布尔分布的密度函数渐呈对称状，类似正态分布。一般情况下 β 都在 0.5 到 5 之间。

1.5.3 对数正态分布

对数正态分布广泛应用于分析试验样品的疲劳寿命。它的概率密度函数为：

$$f(T) = \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{T-\mu}{\sigma_T} \right)^2} \quad (1.5.3)$$

其中： σ_r 是对数标准差， μ 是对数均值。

1.6 碲镉汞红外探测器组件的长期寿命试验

1.6.1 长期寿命试验方案

为了了解碲镉汞红外组件的长期可靠性水平，需要对组件进行长期寿命试验。在一批红外组件中选取一定数量的样品，在实验室模拟实际使用过程中的主要条件，在人工控制的条件下进行试验，记录组件的失效时间（即寿命）和失效原因。对失效数据，利用统计方法进行分析。得到红外组件性能指标和可靠性指标的预值。对于航天用碲镉汞红外探测器，寿命试验是可靠性试验的一个很重要的部分，是为评价分析和验证产品寿命特征量所进行的试验。统计分析的结果可作为可靠性预测、制定筛选条件和改进质量的依据。

假设碲镉汞红外组件的寿命分布满足指数分布情况下，在试验方案选择方面，长期工作寿命试验和长期贮存寿命均可按照我国军用可靠性鉴定和验收试验 GJB 899A-2009 标准[11]来进行方案设计。以碲镉汞红外探测器组件的平均无故障时间 MTBF 作为可靠性特征量，依照标准 GJB 899A-2009，长期寿命试验有三种试验方案，其分别为定时截尾寿命试验、定数截尾寿命试验和截尾序贯寿命试验。以下是三种试验方案的具体做法：

(1) 定时截尾寿命试验方案

从一批产品中抽取样本 n 个样品进行寿命试验，试验进行到预先规定的时间 t 时截止。若在 $[0, t]$ 内有 r 个产品失效，试验过程中，产品失效后无替换，其检验规则为：

- 1) $r \leq c$ ，认为产品合格，接收这批产品；
- 2) $r > c$ ，认为产品不合格，拒收这批产品。

其中 n 为抽验量， c 为合格判定数， r 为产品失效数， t 为试验截止时间。

(2) 定数截尾寿命试验方案

从一批产品中抽取样本 n 个样品进行寿命试验，规定试验截尾的失效数为 r ，失效时无替换，设 r 个失效样品的失效时间为： $t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq \dots \leq t_r$ ($r \leq n$)，则可求出平均寿命 θ 的极大似然估计为：

$$\hat{\theta} = nt_r / r \quad (1.6.1)$$

其检验规则为： $\hat{\theta} \geq c$ 认为产品合格，符合要求 $\hat{\theta} < c$ 认为产品不合格，拒收这批产品。

(3) 序贯截尾寿命试验方案

从一批产品中抽取样本 n 个样品进行寿命试验，观察第 r 个失效发生时间

($r=1,2,\dots,n$), 并计算第 r 个失效发生时 n 个样品的总试验时间 T_r , 判断规则:

- 1) $T_r \geq T(A)$, 认为产品符合要求, 接收这批产品;
- 2) $T_r \geq T(R)$, 认为产品不合格, 拒收这批产品;
- 3) $T(R) < T_r < T(A)$, 不能判决, 继续试验。

在不能做出判决时, 寿命试验应该继续进行到第 $r+1$ 个失效发生, 然后再计算此时的总试验时间 T_{r+1} , 将 T_{r+1} 和 $T(R)$ 、 $T(A)$ 比较后决定接收还是拒收或不做决定继续试验, 直到做出接收或拒收的判决。

表 1.6.1 给出了三种试验方案的优缺点对比表格。从该表中可以看出, 序贯截尾寿命试验可以根据每一个失效发生时提供的信息还对产品的平均寿命进行评价, 但它不能预计试验时间和所需费用, 目前该方法主要应用于试验样品数目很小的产品的寿命试验, 例如产量少、价格昂贵的设备; 定时截尾寿命试验可以在试验开始之前确定试验时间和试验所需要的人力物力, 但它在试验时间截止之前不能停止试验, 它不能有效利用每个失效发生时提供的信息, 目前该方法主要应用于试验样品数目较多、需预先知道试验时间的产品, 例如量化的电视机等; 定数截尾寿命试验可以在试验开始之前确定试验截止时间和试验所需要的人力物力, 且能有效利用每个失效发生时提供的信息, 比同类的定时截尾寿命试验获得的寿命的置信下限大, 目前该方法主要应用于试验样品数目较少、需预先知道试验时间的产品, 例如定制产品等; 针对于工程应用的、价格昂贵的碲镉汞红外探测器组件, 由于序贯截尾试验在试验开始时无法确认试验时间, 而定时截尾寿命不能利用每个组件的失效发生的信息对产品的平均寿命进行评价, 因此碲镉汞红外探测器组件在寿命试验方案上选择定数截尾寿命试验。

表 1.6.1 三种寿命试验方案的优缺点对比表

试验方案	优点	缺点
定时截尾试验	试验的最大累积时间是固定的, 实验前可确定试验所需设备、人力、物力, 比类似的定数或序贯试验时间短;	试验的平均故障数超过类似的序贯截尾试验; 试验时间不随产品的固有可靠性变化;
定数截尾试验	试验的最大故障数量确定, 可确定试验所需设备、人力、物力, 试验前比类似序贯试验时间短, 比类似定时试验的获得置信下限寿命大;	试验的平均累积试验时间超过类似的序贯截尾试验, 试验时间不随产品的固有可靠性变化;
序贯截尾试验	做出试验停止判决所要求的平均故障数和平均累积试验时间比类似定时或定数试验少, 当产品的固有可靠性低时, 试验停止判决要更快一些;	试验时间和试验所需的费用不固定

1.6.2 寿命特征量的分析方法

在可靠性寿命特征量估计方面,有各种不同的估计方法,譬如,在分布类型未知时,可选用矩法估计;在现场使用时,可采用图估法;在指数分布和正态分布,可选用极大似然估计 MLE;在威布尔分布与对数正态分布场合,可选用最佳线性无偏估或简单线性无偏估计[7];Bayes 可用于对于所有的寿命分布的可靠性寿命特征量的估计,对于寿命分布服从于指数分布的碲镉汞红外探测器组件,应选用极大似然法或 Bayes 进行寿命特征量进行估计。

1956 年,Robbins 提出了经验 Bayes 方法,该方法利用试验前的研制数据、测试数据、理论数据及相关系统的试验数据等进行折合,换算后的数据和现场样本近似服从同一母体,然后利用折合的数据作为验前样本拟合验前分布或直接进行估计,从而在很大的程度上避免了主观性,更能让人接受。目前 Bayes 方法主要用于小子样零失效情况研究,见文献 [12-14],这些方法理论性较强,侧重于在无失效情况下的数学推导和理论证明,由于各种方法引起估计结果的差别没有统一的判定依据,无法形成在无失效情况下可靠性鉴定试验相应的操作方法,难以在实际可靠性试验中进行实施和评估,因此在进行寿命特征量评估大多情况下采用极大似然估计法。

1.7 国内外进展

国外各大公司在研制碲镉汞红外探测器的同时,也相继开展了旨在控制主要失效模式的各项研究工作。但由于碲镉汞探测器的国防应用等特点,对碲镉汞红外探测器可靠性的系统研究报告比较少,碲镉汞红外探测器的长期寿命试验数据的报导更是屈指可数。以下列出了一些有关碲镉汞红外探测器的可靠性研究情况。

1986 年~1988 年,SANTA BARBARA 研究中心研究红外探测器芯片和读出电路的倒装互连工艺可靠性,通过从 77 K 到室温的温度循环试验来研究红外探测器的失效模式和失效机理,研究内容包括钢柱的蠕变试验、温度循环对探测器 I-V 特性的影响、环境应力筛选等[15]。

1987 年,Honeywell 公司颁布了“碲镉汞红外探测器可靠性技术和失效物理环境应力试验计划[16]”,该计划的目的是确定红外探测器在复合压力和环境条件下的失效模式和失效机理,试验项目包括:温度循环、杜瓦烘烤、静态储存和倒装焊压力试验,表 1.7.1 为各项试验的具体内容。1990 年 Honeywell 公司发布了“碲镉汞红外探测器可靠性技术和失效物理试验计划”的结果分析报告,该报告对几种主要失效模式(钝化层的失效、钢柱互连的失效等)进行了详细的分析和研究,并对提高 HgCdTe 探测器可靠性提出了建设性意见。

表 1.7.1 Honeywell 碲镉汞红外探测器可靠性试验项目表

试验项目	试验目的	试验内容	测试参数
温度循环试验	温度循环对性能的影响	80~300 K 温度循环 循环次数: 200 次;	连通率、 R_0A 、I-V 曲线、噪声、黑体 响应率、光谱响应 率和 80 K 的探 测率
杜瓦烘烤试验	保证杜瓦的真空寿命	设定三个烘烤温度: 71°C、 85°C、100°C; 每个温度点烘烤 2 周;	接触电阻和材料 互扩散的相关参 数。
静态储存试验	储存温度对 FPA 的 影响	贮存试验温度: 54.4°C; 储 存时间: 2 周~4 周;	检测 FPA 性能的 变化
倒装焊压力试 验	确定位错密度与 R_0A 的分布关系	压力: $2 \times 10^5 \sim 2 \times$ 10^6g/cm^2 。	R_0A

美国国家标准局 (NIST) 完成了一份“GOES 项目中 HgCdTe 探测器的可靠性研究”的报告[17], 该报告通过大量的长期寿命试验数据积累和统计确定了影响 HgCdTe 探测器可靠性的主要因素, 其主要为电极结构、引线焊接、ZnS 钝化膜脱离 HgCdTe 晶体表面及 Hg 扩散等。

美国 Lockheed Martin 公司报导了用于 GOES 成像仪和垂直探测仪的光导碲镉汞探测器组件的研制情况[18]。他们主要是加强封装与测试的控制, 其老化仅为 24 小时, 未提及寿命试验。

M. A. Kinch 等人[19]已对 0.1eV 光导器件分别进行了 95°C (3h) 及 125°C (7h) 的真空热浸试验, 并分析了真空热浸对器件性能的影响。热浸不仅对探测器的光敏元有一定的影响, 对探测器的电极接触、增加探测器电阻也有影响。一般而言, 探测芯片在 75°C 以下的热浸烘烤过程中, 其电阻、探测器率和噪声基本没有变化, 但当温度高于 90°C 时, 探测器的电阻增大、噪声增加, 从而导致探测率下降。

Sofradir 公司[20]对探测器杜瓦组件的平均无故障时间 (MTBF) 进行了评估。主要做了两方面的工作: 探测器杜瓦组件在环境温度 20~-196°C 之间的热循环可靠性和在 -196°C 下工作的可靠性。Sofradir 公司根据大量的研究和试验发现, 光电元件的电连接是探测器杜瓦组件的主要失效模式。

Sofradir 公司[21]将温度、振动和冲击作为可靠性加速试验的主要应力, 利用环境试验, 分析环境应力对集成制冷机杜瓦组件影响和产生的失效模式, 主要失效模式如表 1.7.2 所示。其后根据 FMEA 分析结果, 设计焦平面探测器的加速试验, 加速寿命试验主要针对的对象为制冷机和杜瓦。加速试验的目的是深入分析焦平面探测器组件的失效模式, 通过加速试验充分暴露设计和工艺缺陷, 改进设计和工艺, 建立可靠性模型[22]。

表 1.7.2 功能模块的主要失效模式

环境应力	功能模块	影响的参数	失效模式
温度和热冲击	FPA	—	—
	真空杜瓦	—	漏气
	制冷机	制冷机控制功率、最大制冷功率、电机旋转速度	电机旋转速度
	电连接	—	焊点疲劳
机械振动	真空杜瓦	—	漏气
	制冷机	FPA 稳定性	疲劳、损坏
	电连接	—	疲劳、损坏
机械冲击	真空杜瓦	—	疲劳、损坏
	制冷机	—	疲劳、损坏
	电连接	—	疲劳、损坏

国内的碲镉汞红外探测器研究主要集中在一些科研院所，由于碲镉汞探测器的国防应用等特点，对碲镉汞红外探测器可靠性的系统研究报告比较少，以下列出了一些有关碲镉汞红外探测器的可靠性研究情况：

刘大福等[23]从真空热浸和电流冲击两个方面对碲镉汞红外探测器进行了研究，通过研究得到耐真空热浸温度为 85℃、95℃下 39h 的热浸会降低探测器的性能，低温下探测器芯片耐冲击能力低于室温下的探测器芯片，粘接胶的热导率和厚度是影响耐冲击能力的主要因素。

朱克学等[24]研究了激光对光导探测器的影响，并指出在激光辐照功率小于探测器的暂时损伤阈值时，探测器本身不会产生明显的性能的变化，而当激光辐照功率超过探测器的暂时损伤阈值时，激光辐照在表面所产生的热效应会使得 HgCdTe 光导探测器的性能的下降。

总的来说，目前国内外关于碲镉汞红外探测器长期贮存可靠性的研究报告未见报告。值得参考的是一些有关电子元器件的贮存可靠性和加速贮存可靠性研究。杨少华[25]等人研究了电子元器件贮存状态下的失效模式和失效机理，并发现腐蚀、键合缺陷和贴装失效是造成器件非工作失效的主要原因。李坤兰[26]等人研究在 A(寒温)、B(亚湿热-入海口)、C(亚湿热-内陆)、D(热带海洋)四地开展了的电容器贮存可靠性的研究，并发现 A(寒温)地更适合电容器的长期贮存。

关于长期工作寿命试验方面，电子产品均可按照定数截尾方法进行设计。虽然这种试验方法已广泛应用于军用和民用的各种仪器设备和电子元器件，但是对于碲镉汞红外探测器组件的寿命试验进行得不够充分，没有形成严格的标准。其原因在于缺少专用的自动化程度较高、黑体测试操作简便的寿命试验设备。对碲镉汞探测器组件的长期寿命试验多停留在手工操作的水平阶段，试验需要组织大批研究人员和耗费大量的时间和经费，测试间隔大，测试数据收集

困难。

用于碲镉汞红外组件长期寿命试验的设备国内外未见报道，值得参考的是一些其他类别可靠性试验设备的研究。2002年，朱三根等针对探测器组件电老化要求研制出电老化设备，该设备可实现电老化进程，但测试和老化试验不能在同一真空腔体进行，需多次拆装[27]。2006年，张勤耀等提出了一种多工位高低温循环试验自动控制系统及方法，该系统包括自动输液管道以及液氮流量恒定控制系统，自动过程控制和温度时间数据记录系统，并具有温度测试与加速升温的专用杜瓦瓶和真空排气机组[28]。2006年，吴礼刚针对于星载探测器的可靠性要求，研制了一种用于探测器温度循环可靠性测试的自动控制试验系统，该设备的温度变化区间为 $-173^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ ，真空环境的真空度在 $10^{-1}\sim 10^{-3}\text{Pa}$ ，一次可测试4-8个器件[29]。

1.8 论文的主要内容及结构安排

为弄清碲镉汞探测器组件在长期试验过程的失效机理、失效模式、寿命特征量，需要对大量组件进行长时间的试验，并且在整个试验过程中需要采用短间隔测试，以得到确切的故障时间。针对目前设备的不足，本论文首先致力于碲镉汞红外探测器组件长期寿命试验的自动化设备的自主研究，并研制了该试验设备。目前这台设备已在实验室通过调试，运行良好，基本满足了碲镉汞红外探测器组件的寿命试验的试验要求。

然后对FY碲镉汞探测器组件进行了长期贮存可靠性试验研究，用以发现组件的失效模式和研究组件的失效机理，统计失效规律。

以下是对后面几章的论文结构安排：

第二章到第五章为碲镉汞红外组件寿命试验设备的研制，第五章为碲镉汞红外组件贮存可靠性研究，第六章为结论和建议，具体来说：

第二章根据设备的技术要求，首先提出设备的总体实现方案，其次对设备的结构进行了设计和理论计算，运用真空系统设计理论对设备的极限真空进行了计算，为设备的研制奠定了理论基础。在完成了该自主研制长期寿命试验设备的整个真空系统的结构设计后，将该设计方案投入研制，最后对该设备进行了试运行，其试运行的真空度可达 $2.4\times 10^{-5}\text{Pa}$ ，结果表明该设备的真空度能达到碲镉汞长期寿命试验的要求；

第三章对设备的控制进行了介绍，根据真空排气工作原理和低温维持工作原理，将碲镉汞红外探测器组件寿命试验要求具体化，得出控制系统的各项控制指标。针对控制系统的控制要求，提出了控制系统的总体分布布局：上位机监控、控制柜、现场执行设备、HMI。其后分别对控制系统的硬件和软件进行设

计。在控制系统的硬件、软件设计完成后，对该控制系统进行调试和仿真，调试结果显示，该系统初步实现了 PLC 集中采集所有现场数据、分子泵控制、温控仪器控制、自动输液控制、自动排气控制等功能，可以满足碲镉汞红外探测器组件寿命试验的要求；

第四章对设备的自动阻值测试系统进行了介绍，针对长期寿命试验设备的自动测试要求，本文提出了一种 20×54 通道电阻自动测试的解决方案，设计了一种用于碲镉汞红外探测器组件的高可靠的多通道复用阻值测试系统。为实现多通道阻值测试，设计了多路复用开关阵列，采用单片机控制自动开关切换，并用 LABVIEW 编写了 20×54 通道电阻阻值自动测试软件，最后对该 20×54 通道电阻阻值自动测试系统进行了试运行，试运行结果表明，测试系统的电阻测量值波动小于 0.15Ω ，可以满足碲镉汞红外探测器组件自动测试要求。

第五章对一批 02 年 FY2 碲镉汞探测器组件的贮存试验研究，统计了一些失效规律，获得了探测器贮存过程中主要失效模式，并对各种失效模式对应的失效机理进行了分析，得到的试验数据和结果将有助于改进器件设计和工艺；

第六章是结论与建议，针对论文中存在的问题，以及以后需要继续进行的工作提出了一些意见和建议。

2 碲镉汞红外探测器寿命试验设备的结构设计

2.1 长期寿命试验设备的任务要求

我所研究碲镉汞红外探测器组件已数年，从单元到线列形成了一系列的产品，部分型号已被航天工程使用。为了更好地评价探测器长期寿命可靠性，拟研制面向光导型碲镉汞红外探测器组件的长期寿命试验设备，试验设备应满足长期寿命试验的需求、长期寿命试验测试需求、准确可靠、操作尽量简单。

2.1.1 碲镉汞红外探测器组件参数测试要求

通常红外探测器用于红外辐射的直接探测，其响应率、噪声、探测率、探测器阻抗是最重要的特性参数。

1) 响应率

响应率是在入射调制辐射垂直投射到探测器响应平面的情况下，探测器的开路输出的基频电压的均方根值与入射辐射功率的基频功率均方根值之比。

2) 噪声

噪声是探测器的电压总输出中与入射信号系统无关的那部分输出，它容易受到外界电磁干扰，机械振动和声浪也可能引起附加的振动噪声。

3) 探测率

探测率 D^* 是用来表征探测器优劣，它与噪声等效功率的倒数和光敏元面积平方根成正比。

4) 探测器阻抗

探测器阻抗是探测器两端的瞬时电压与瞬时电流的比值，通常测得 I-V 曲线可以得出探测器在不同电压下的阻值。在探测器的研制过程中，例如光伏探测器，阻抗是一个关键的参数。

对于光导探测器型器件，N 型光导型碲镉汞红外器件的响应率 ($V \cdot W^{-1}$) 和探测率 D^* 的计算公式如下[30]:

$$R_\lambda = \eta \frac{\lambda}{hc} er_d \frac{\mu_e E_b}{l} \tau_{eff} \quad (2.1.1)$$

$$D^* = \frac{R_\lambda}{V_n} (l_w \Delta f)^{1/2} \quad (2.1.2)$$

式中其中： η 为量子效率， λ 是入射光的波长， h 为普朗克常量， c 为光速度， r_d 是器件的电阻， μ_e 是电子迁移率， E_b 是加在器件上的电场强度， τ_{eff} 是

少子有效寿命, V_n 是噪声。 l 为器件长度, w 为器件宽度, Δf 为带宽。

由 2.1.1 和 2.1.2 式可以看出光导型红外探测器的探测率和响应率集合了如探测器光敏元尺寸, 材料的迁移率、有效少子寿命、器件电阻等探测器参数, 因此长期寿命试验中应获取探测器探测率和响应率。然而探测器的探测率、响应率只能通过黑体信号和黑体噪声测试得出, 故长期寿命试验中应进行黑体信号和噪声的测量。除了探测率和响应率变化, 阻值的变化为器件发生变化的重要标志, 因此长期寿命试验中应进行低温和室温电阻值测量。

对于寿命试验中碲镉汞红外组件的参数评价, 国外也有采用黑体信号、噪声、室温电阻、低温电阻作为评判组件失效的标准, 如 NIST 在 GOES 卫星上的碲镉汞探测器的长期可靠性研究一文中[16], 对器件的低温电阻、常温电阻、额定辐射时信号大小、探测率响应率等参数的测试数据均有分析, 美国 ITT[16] 关于碲镉汞探测器的失效报告中提到: 当探测器的电阻随时间缓慢变化时, 输出信号存在 50% 锐减。因此在本文设计的长期寿命试验设备中, 设备需具备对试验中的探测器进行黑体信号、噪声、低温电阻、室温电阻四个参数测量功能。

2.1.2 碲镉汞红外探测器组件长期寿命试验要求

寿命试验是获取产品寿命特征的方法, 它是在实验室模拟产品实际工作状态或贮存状态, 投入一定样品进行试验, 记录样品失效时间、进行统计分析, 以评估产品可靠性寿命特征的一种可靠性试验方法。因此, 针对碲镉汞红外探测器的太空工作环境, 实验室应对探测器工作深低温及高真空环境进行模拟。低温方面, 由于探测器的工作温度为 90K 左右, 故长期寿命试验设备的温度要求为 90K 左右; 高真空方面, 由于探测器芯片密封在充满干燥氮气的管壳中, 空间真空工作的环境与探测器组件发生的几种相互作用只有真空的热效应对器件的影响较大, 寿命试验只需考虑模拟的真空的热效应。根据气体的传热性能与压力的关系, 压力小于 10^{-1} Pa 时, 传热的主要方式是辐射传热。对流和气体分子的热传导传热可以忽略不计, 实验室一般用 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ Pa 来对空间真空环境进行模拟[31], 本文以中间值为其真空系统的指标, 即该长期寿命试验设备应满足: 1、满载时, 实验容器等工位极限真空度小于 5×10^{-4} Pa; 2、空载时, 等工位极限真空度小于 3×10^{-5} Pa。

根据第一章中对三种长期寿命试验方案的讨论可以发现: 针对碲镉汞红外探测器组件产品, 应选择定数截尾方案。根据定数截尾试验的试验规则, 组件的接收概率 $L(\theta)$ 满足:

$$L(\theta) = P(\hat{\theta} \geq c) = P\left(\frac{2r\hat{\theta}}{\theta} \geq \frac{2rc}{\theta}\right) \quad (2.1.3)$$

其中, $\hat{\theta}$ 为平均寿命 θ 的极大似然估计, r 为失效数, $r\hat{\theta}$ = 总的试验时间 $S(t)$, C 为合格判定平均寿命。

由于总试验截尾子样函数的分布 $2S(t)/\theta$ 满足自由度为 $2r$ 的卡方分布 [11], 即 $2r\hat{\theta}/\theta$ 满足自由度为 $2r$ 的卡方分布, 所以组件的接收概率 $L(\theta)$ 可由卡方分布表查到, 其抽样特性曲线是一条上升的曲线, 即在假设产品的失效率一定前提下, 总的试验时间 $S(t)$ 越大, 试验得到组件的平均寿命接近符合预计的平均寿命估计 θ 的概率就越大, 因此在定数截尾试验中, 总的试验时间应越长越好。但实际上试验总时间与试验样品数 n 、失效数 r 是有密切的关系, 通过产品的失效率的点估计中的 MLE 可看到三者间的关系, 如下式:

$$S(t) = \sum_{i=1}^r t_i + (n-r)t_r \quad (2.1.4)$$

其中, n 为样本大小, t_i 为第 r 个产品的失效时间, t_r 为试验的截尾时间。从 2.1.4 式中可以看出, 总的试验时间 $S(t)$ 为样本大小和试验时间的乘积, 假设总的试验时间 $S(t)$ 一定, 当试验截尾时间 t_r 越长, 产品样本数目 n 越小, 反之, 产品样本数目 n 越大, 试验所需的成本越大。对于碲镉汞红外组件, 由于组件量小价贵, 在寿命试验设计时需折中考虑截尾时间和产品样本大小。表 2.1.1 列出了几种所内研制的碲镉汞红外探测器组件的可靠性试验估计 [32], 从表中看出碲镉汞红外探测器的寿命要求高, 为了使产品的长期寿命试验时间不至于太长, 寿命试验设备一次进行试验的组件样本数目应大于 50 个。

表 2.1.1 待试验几种组件可靠性试验估计

组件类型		寿命要求		可靠性验证试验时间	
		工作寿命 (年)	可靠度	参加试验组件数	试验时间 (天)
风三	扫描辐射计短波	3	0.98	50	1084
	红外分光计	2	0.98	50	723
	中分	2	0.98	50	723
风二	全部	2	0.83	50	120

综合碲镉汞红外组件寿命试验过程中参数测试的要求和长期寿命试验的要求, 该设备的技术指标如下:

- 1) 高真空: (5×10^{-4} Pa 极限真空);
- 2) 低温: (90K 左右);
- 3) 定期检测 (电阻测试, 兼容黑体测试);
- 4) 避免试验与测试间不断变换真空腔体, 减小风险;

- 5) 可进行全自动控制，包括真空、液氮维持、测试；
- 6) 寿命试验设备一次最多可扩展至 50 个组件进行试验；

2.2 设备的总体方案

为了能完成定数截尾寿命试验，设备一方面需模拟碲镉汞红外组件实际的工作环境，即高真空、深低温，另一方面设备需要记录器件在恒定辐照下信号随时间的变化情况。总结起来，设备需要具备高真空系统、深低温系统、测试系统、数据采集四个子系统。

针对于碲镉汞红外探测器组件的长期寿命试验，目前采用的是上海技术物理研究所自主研制老化试验设备[27]，该设备的结构图如图 2.2.1(a)，从图中可以看出，设备具有高真空和深低温系统，试验时所有试验组件位于同一冷平台上，处于同一真空室。该设备优点为：真空结构简单，真空腔真空度高(最大达到 $6 \times 10^{-6} \text{Pa}$)。其缺点为：在试验过程中探测器的响应率、噪声、探测率等参数的采集困难，无法进行短间隔的测试工作。其原因在于：试验过程中定期黑体参数测试时，需要将组件从设备的冷平台上拆下，重新装入新的真空容器，而一次进行试验的组件数目多，拆装工作十分繁杂，冷平台的过渡板如 2.2.1(b)。

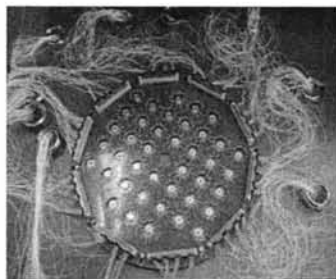
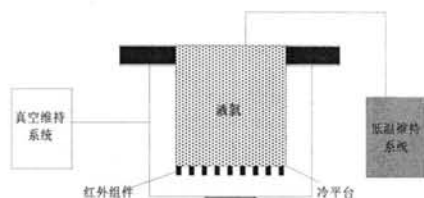


图 2.2.1(a)老化试验设备结构示意图

图 2.2.1(b)冷平台 PCB 板过渡板

针对传统试验设备的不足，本文提出了以下两种方案：

1) 单一真空腔体和黑体测试传动装置内置方案

该方案中所有试验组件均位于同一冷平台上，当针对不同组件进行黑体测试时，通过旋转内置的位移平台，将组件移至黑体测试位置，测出组件的最大黑体信号值，图 2.2.2 是该方案的示意图。

内置的位移平台的主从动传动方式有三种：即机械传动，电力传动和磁力传动。

机械传动是用轴或其它构件，将室内从动件与室外原动机机构联结起来，这种方式中必须使用弹性元件如橡胶垫。但该传动方式存在以下缺点：(1) 胶圈与轴接触面处因轴作旋转，或作直线运动，易引起漏气；(2) 橡胶结构不是很致密，

而有气体通过肉眼见不到的细孔渗透到真空室内；(3) 定位复杂，黑体测试均只能由手动操作完成，而试验红外组件数目多，繁杂的测试工作量会大大降低试验的可行性。

电力传动是将原动机、从动件都封入真空室内，原动机(如马达)的电源只需用电子管电极密封一样引入电力，但这种结构使真空室体积增大，并且原动机机构含有大量气体释放入真空室中，降低了腔体真空度。

磁力传动是主动机构在真空室外，从动机处于在真空室内，主从动机构之间没有任何机械和电的联系。通过镶嵌在主从动机构上的磁块间的作用力，将主从件连接起来[33-34]，如图 2.2.3。

在这三种传动方式中，磁力传动结构的优点是：无密封传动，无泄漏。该结构已广泛用于分子束外延、离子束外延设备、镀膜机、俄歇质谱仪、高能粒子加速器等超高真空系统中。在本方案中，选择无密封的磁力传动结构为内置传动装置，具有真空系统结构简单，真空腔真空度高(最大达到 6×10^{-6} Pa)等优点，但是这种磁力传动结构具有价格高昂、组件黑体测试寻址难、磁力传动结构在低温环境下的稳定性有待考究等问题。

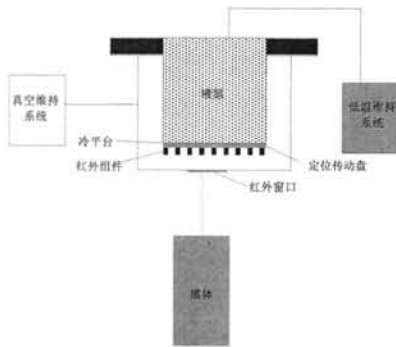


图 2.2.2 寿命试验设备方案 2 示意图

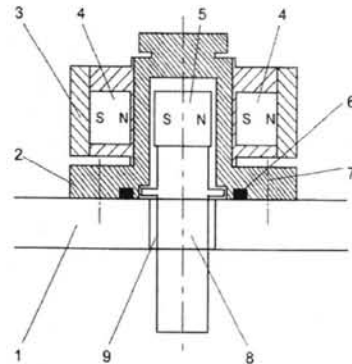


图 2.2.3 真空系统旋转磁力传动装置

2) 多个真空腔体和黑体测试传动装置外置方案

多个真空腔体和黑体测试传动装置外置方案的示意图如图 2.2.4，从图中可以看出试验组件是独立进行试验的，每个组件都有独立的真空腔和储液腔，试验时组件安放于杜瓦的冷平台上。组件的黑体测试传动装置外置于真空系统之外，当需要对不同红外组件进行黑体测试时，黑体传动机构将黑体送至对应组件的位置，然后通过传动机构的进行微调，测出组件的最大信号值。

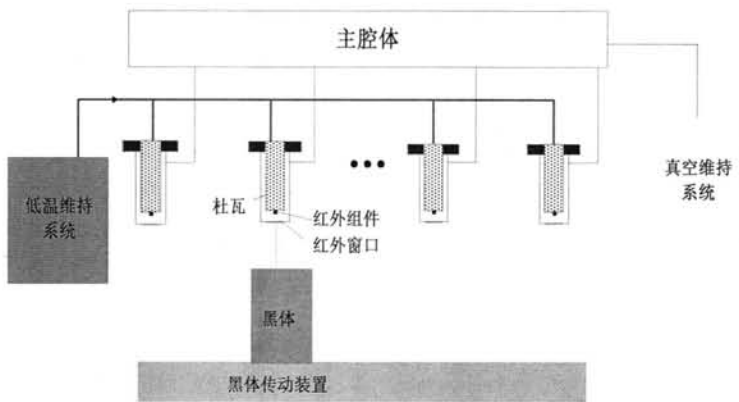


图 2.2.4 寿命试验设备方案 3 示意图

表 2.2.1 三种设备总体结构的优缺点对比表

方案	优点	缺点
单一真空腔体和黑体测试传动装置内置方案	设备的真空系统结构简单；原、从动件为无密封传动；试验组件所处的真空腔真空度高，最大达到 $6 \times 10^{-6} \text{Pa}$ ；定位台的原动件处于真空室外，真空腔室体积与第一种方案等同，但真空腔黑体窗口尺寸远小于第一种方案。	这种磁力传动结构价格高昂、同时多个组件分布于冷平台上，组件黑体测试寻址难、磁力传动结构在低温环境下的稳定性有待考究。
多个真空腔体和黑体测试传动装置外置方案	组件黑体测试寻址较为简单，红外组件可独立进行试验、有独立真空腔和低温腔，与其它可靠性试验如温度循环试验、环境模拟试验的兼容性好，	真空系统结构相对较为复杂，试验组件所在真空腔的真空度最大只能达到 $1 \times 10^{-5} \text{Pa}$

表 2.2.1 为两种设备总体结构的优缺点对比表格。从该表中可以看出第一种方案采用磁力传动结构，具有真空系统结构简单、真空腔真空度高等优点，但这种方案存在价格高昂、组件黑体测试寻址难、磁力传动结构在低温环境下的稳定性有待考究等问题；第二种方案组件黑体测试寻址较为简单，有利于实现组件长期寿命试验过程中的自动黑体信号测试，且红外组件能分立进行试验，具有试验独立性好、试验的兼容性好等优点，但它的试验腔的真空度要低于前种方案，其试验腔的真空压强最大只能达到 $1 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 。

对于碲镉汞红外组件的长期寿命试验，根据前面的试验要求，真空压强需达到 $3 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 。对比上述方案，第二种方案在可以满足其真空度要求的前提下，还具有黑体测试寻址较为简单、试验独立性好、试验的兼容性好等优点，因此本设备的总体结构选用多个真空腔体和黑体测试传动装置外置的方案。

考虑到试验的灵活性和可靠性，对设备的总体方案进行了细化，具体如下：

- a) 真空系统采用涡旋分子泵为主泵抽气方式实现，它不能直接对大气排气，需要配置前级机械泵，同时由于涡旋分子泵和机械泵的排气过程通

- 过机械结构完成，长时间的寿命试验过程中泵组须间歇工作；
- 考虑到试验过程中有新的组件加入或中止试验的情况，设备的真空系统应增加主腔体密封阀和旁抽通道，主腔体密封阀的作用是防止在组件中止试验时，主腔体直接暴露到大气中，旁抽通道的作用是避免有新组件加入试验时频繁的开闭分子泵；
 - 杜瓦上应加入杜瓦密封电磁阀，以满足杜瓦撤离设备后的真空密封要求；
 - 设备的低温获取采用液氮冷却，考虑到设备的低温维持功能，在杜瓦的储液腔上应加入输液电磁阀，以满足试验时的低温要求；
 - 考虑到设备一次最大可扩展至 60 个组件进行试验，真空系统的工位个数为 20 个；
 - 为了便于真空排气的自动控制，设备中的所有阀门均为电气控制阀门，同时为更快地实现设备的高真空，在主腔体以及 20 个工位处均安装有电阻加热器进行烘烤。

细化后的设备总体方案如图 2.2.5 所示。

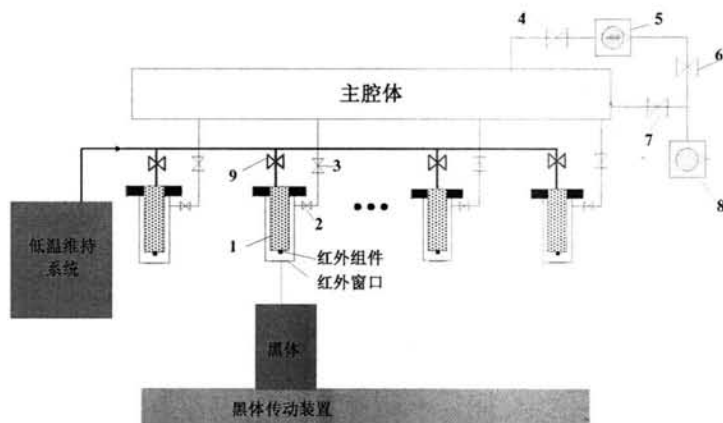


图 2.2.5 寿命试验设备总体方案

- 1、杜瓦；2、杜瓦密封电磁阀；3、主腔体密封阀门；4、分子泵插板阀；
5、分子泵；6、前级阀；7、旁抽阀；8、机械泵；9、输液阀

2.3 真空系统设计理论

2.3.1 流导计算

真空系统中气体沿管道的流动状态可分为有四种：湍流、粘滞流、粘滞分子流和分子流。湍流仅仅在气体开始运动的一瞬间才出现，粗抽泵在大气压附近工作时就会形成湍流。一般湍流持续的时间很短，因而计算时通常不考虑这

一流动状态。粘滞流出现在气体压力较高、流速较小的情况下，通常发生在低真空管路中。分子流出现在管道内压力很低时，一般出现在高真空管道中。粘滞分子流为介于粘滞流和分子流之间的流动状态，实际应用中，粘滞流、分子流、粘滞分子流这三种状态较为常见，在理论和经验计算上比较成熟，有理论和经验公式。

对于 20℃ 的空气，判断其气体状态类型根据以下公式[35]：

$$\begin{aligned} \bar{P}D > 0.67 Pa \cdot m & \quad \text{为粘滞流} \\ \bar{P}D < 0.02 Pa \cdot m & \quad \text{为分子流} \\ 0.02 Pa \cdot m < \bar{P}D < 0.67 Pa \cdot m & \quad \text{为粘滞-分子流} \end{aligned} \quad (2.3.1)$$

式中，D 为管道直径， \bar{P} 为管道两端的平均压强，真空工程计算中通常认为高真空管道中的流动状态为分子流，低真空管道中的流动状态为粘滞流。

管道的流导，又叫导通能力，由气体的流态和管道形状决定，它是导管的重要参数。一般流导定义为：

$$G = \frac{Q}{p_1 - p_2} \quad \text{或} \quad G = \frac{p_2 S}{p_1 - p_2} \quad (2.3.2)$$

式中，Q 为气流量(Pa·L/s)， $p_1 - p_2$ 为压差(Pa)，S 为泵的抽速(L/s)。

粘滞流时，对于 20℃ 的空气，管道的流导计算公式如下：

$$\begin{cases} G = 1.34 \times 10^3 D^4 / L \bar{P} & \text{圆长管} \\ G = 1.34 \times 10^3 D^4 / (L + 0.029 Q_n) \bar{P} & \text{圆短管} \end{cases} \quad (2.3.3)$$

其中 D 为管道的直径，L 为管道的长度， \bar{P} 为管道两端的平均压强， Q_n 为气流量(Pa·L/s)； $L > 20D$ 的管道为长管， $L \leq 20D$ 的管道为短管；

分子流时，对于 20℃ 的空气，管道的流导计算公式如下：

$$\begin{cases} G = 12.1 D^3 / L & \text{圆长管} \\ G = 11.6 \alpha A & \text{圆短管} \end{cases} \quad (2.3.4)$$

其中，D 为管道的直径，L 为管道的长度， $L > 20D$ 的管道为长管， $L \leq 20D$ 的管道为短管，A 为横截面积， α 为克劳辛系数，克劳辛系数与管的相对长度 L/r 的关系可查阅文献[35]。

2.3.2 真空室抽气口处泵的有效抽速计算

真空系统对容器的有效抽速是指在容器出口处的压力下，单位时间内真空系统能够从被抽容器中所抽除的气体体积。真空系统对容器的有效抽速不仅取决于真空泵的抽速，也取决于真空系统管路对气体的导通性能，即所说的流导。

最简单的真空抽气系统如图 2.3.1 所示，真空室的气体负荷 Q [Pa·L/s]，通过流导为 G 的管道被真空机组或真空泵抽走，图中 S_e 为真空室抽气口的有效抽速，而 P 、 P_e 分别为管道出口和入口压力， S 则为真空泵的抽速。

根据流量的定义有：

$$Q = G(P_e - P) \quad (2.3.5)$$

泵口压力为 S 、泵的抽速为 P ，泵抽走的气体流量为：

$$Q = SP \quad (2.3.6)$$

真空室出气口压力为 P_e ，有效抽速为 S_e ，通过出口的气流量为

$$Q = S_e P_e \quad (2.3.7)$$

在动态平衡时，流经任意截面的气体流量相等，由 (2.3.5)、(2.3.6)、(2.3.7) 可得出真空室抽气口处泵的有效抽速为：

$$S_e = \frac{S \cdot G}{S + G} \quad (2.3.8)$$

从 (2.3.8) 式可以看出，泵的抽速和管道的流导对真空室抽气口处泵的有效抽速影响作用是等同的，当管道流导很大时，即 $G \gg S$ 有效抽速只受泵的抽速制约；当管道流导很小时，即 $G \ll S$ 有效抽速只受流导的制约。

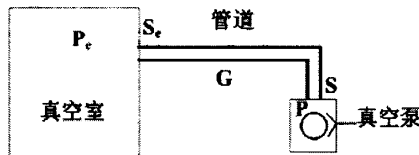


图 2.3.1 最简单真空系统示意图

2.4 真空系统关键部件选型

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到 4.8×10^{-8} Pa，系统运转过程可自动化进行 [36]，但该装置体积庞大，价格昂贵且无法实现试验过程中的黑体信号测试功能；由北京中科科仪技术发展有限责任公司生产的多工位真空排气系统具有 6 个工位，但真空度仅达到 10 Pa [37]，且为手动操作；上述的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、分子泵构成的多工位、自动化操作、无油高真空系统的技术设计。

2.4.1 真空系统材料选择

真空系统中，真空泵抽取真空时，首先被抽走的是真空室中大气，这部分气体会很快被机械泵抽走，然后是材料表面解吸的气体、材料内部向表面扩散出来的气体、以及通过器壁渗透到真空室中的气体。一般解吸及扩散到表面再解吸的速率非常缓慢，计算表明一台金属密封的不烘烤的真空系统，要达到超高真空（ 10^{-7} Pa）所需要的时间大约 108 小时，因此长期寿命试验设备的真空系统必须可以进行烘烤，介于真空系统抽气时间和红外组件的安全性两方面的考虑，本文的真空系统的各个工位和公共主腔体需独立进行烘烤，其中公共主腔体的烘烤温度为 150 摄氏度，红外组件所处工位的烘烤温度为 50 摄氏度。由于真空系统进行烘烤，因此在真空系统的使用材料上有一定考究，这些材料必须满足以下特点：

- 1) 烘烤温度下，材料不丧失其机械性能，壳体能承受外部大气压力。
- 2) 烘烤温度下，材料的蒸汽压低。
- 3) 容易抛光，加热不易变形。

基于以上的要求，本文的真空系统使用的材料是不锈钢，同时考虑到橡胶的放气率高，系统所有接口均采用金属密封；

2.4.2 公共真空室设计

考虑到各个工位抽气的均匀性，真空室的壳体选择圆筒形结构，这种结构制造容易且强度好，圆筒筒体的直径由工位数目和杜瓦的大小决定，考虑到安装的方便和管道流导，圆筒体的内径为 594mm、圆筒体的高度为 40mm。参考真空设计手册[35]，对圆筒体的壁厚设计遵从以下标准：

圆筒壳体只承受外压时，按稳定条件计算，圆筒的壁厚 S_0 为：

$$S_0 = 1.25 D_B \left(\frac{P}{E_t} \cdot \frac{L}{D_B} \right)^{0.4} \quad [\text{mm}] \quad (2.4.1)$$

其中， S_0 为圆筒计算壁厚， D_B 为圆筒直径[mm]， P 为外压设计压力[MPa]， L 为圆筒计算长度[mm]， E_t 为材料温度为 t 时的弹性模量[MPa]。

取 20℃ 时不锈钢材料 $E_t = 2.08 \times 10^5$ MPa，设计压力 $P = 1.01 \times 10^{-1}$ MPa，代入结构尺寸参数可以求得计算壁厚为 2.2mm。

另外，考虑到结构的各方面的因素，还需增加一些壁厚附加量[38]，其公式表示如下：

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (2.4.2)$$

其中， C_1 为钢板的最大负公差附加量[mm]，跟钢板厚度有关，见表 2.4.1；

C_2 为腐蚀裕度 [mm]，当介质对容器的腐蚀速度 $\leq 0.05\text{mm/年}$ （包括大气腐蚀）时，单面腐蚀取 $C_2 = 1\text{mm}$ ； C_3 一般取计算壁厚 S_0 的 10%，且不大于 4mm。

表 2.4.1 钢板最大负公差 C_1 与板厚关系

钢板厚度 (mm)	2.5	3	4	5	6	8.25
最大负公差 (mm) 附加量 C_1	0.2	0.22	0.4	0.5	0.6	0.8

因为计算壁厚 $< 2.5\text{mm}$ ，所以可取 $C_1 = 0.2\text{mm}$ ，代入计算得壁厚附加量 $C = 1.32\text{mm}$ ，所以实际壁厚不得低于 3.52mm ，为保证设计的安全性，实际加工时取壁厚为 8mm 。

2.4.3 选泵和配泵

设计一套使用方便而又工作可靠的真空系统，选取主泵是个关键问题，选取主泵必须根据所需达到的真空条件进行综合考虑，一般真空系统选取主泵的主要依据是：1、空载时，真空室所需要达到的极限真空；2、真空室所需达到的工作压力。

对于一个动态真空系统，其真空室的工作压力 P 为[6]

$$P = P_0 + Q_{\text{load}} / S_e \quad (2.4.3)$$

其中， Q_{load} 为系统的气体负载； S_e 为真空系统的有效抽速； P_0 为抽气机组的极限压力，一般的真空系统中前项远小于后项，对泵组抽速计算中可忽略前项。因此泵的有效抽速 S_e 为：

$$S_e = Q_{\text{load}} / P \quad (2.4.4)$$

Q_{load} 通常由四个部分组成：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，在碲镉汞红外探测器的长期寿命试验过程中，不会产生气体，故 Q_1 为 0；对于容器空间内的气体 Q_2 ，在系统的长期排气过程中，其与后两者相比可以忽略不计[35]，所以系统的气体总负载 Q_{load} 为：

$$Q_{\text{load}} = Q_3 + Q_4 \quad (2.4.5)$$

其中 Q_4 为：

$$Q_4 = \sum q_i A_i \quad (2.4.6)$$

q_i 为第 i 种材料的出气率，出气率与温度相关，计算时应选用实际使用温度时的数据； $A_i = \beta A_0$ ， A_0 为材料的表现面积， β 为表面粗糙度系数，对于抛光

表面, β 为 1—5; 较为平滑表面, β 为 5—10; 对于粗糙表面, β 为 10—50[39]。而真空系统的漏气量 Q_3 为本系统放气量 Q_4 的 1/10, 因此系统的气体负载 Q_{load} 为:

$$Q_{load} = \sum 1.1q_i A_i \quad (2.4.7)$$

对于碲镉汞寿命试验设备的真空系统, 其气体负载主要包括杜瓦负载、主腔体负载、管道负载、碲镉汞红外组件的负载。以下是各个部件气体负载的计算:

本系统的杜瓦内径 $d_1=50\text{mm}$, 外径 $d_2=78\text{mm}$, 壁厚度为 1mm , 高度 $h=190\text{mm}$, 红外组件所处工位的烘烤温度为 50 摄氏度, 该温度下烘烤 3h 后不锈钢的出气率约为: $1.6 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ [35], 由公式 (2.4.6) 可得 20 个杜瓦的放气量为

$$Q_i^{\text{杜瓦}} = (\pi d_1 q_{\text{内壁}} l + \pi d_2 q_{\text{内壁}} l + \pi d_1^2 q_{\text{窗口}} / 4) \beta \times 20 = 1.5 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{L/s} \quad (2.4.8)$$

根据公式 (2.4.7) 可得出杜瓦的总气体负载为 $1.7 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

本系统的公共真空室圆筒体的内径 D 为 594mm 、圆筒体的高度 H 为 40mm , 公共真空室的烘烤温度为 150 摄氏度, 该温度下烘烤 3h 后不锈钢的出气率约为: $2.0 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ [35], 由公式 (2.4.6) 可得主腔体的放气量为

$$Q_{\text{主腔体}} = \pi D q H + 2 * \pi D^2 q / 4 = \pi D q (H + D/2) = 2 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{L/s} \quad (2.4.9)$$

根据公式 (2.4.7) 可得出公共主腔体的总气体负载为 $2.2 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

对于本系统的管道的气体负载, 由于管道表面积小, 故可忽略不计, 因此整个真空系统的气体负载 Q_{load} 为:

$$Q_{load} = Q_{\text{杜瓦}} + Q_{\text{主腔体}} = 1.9 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{L/s} \quad (2.4.10)$$

根据碲镉汞红外组件寿命试验的要求: 满载时组件所需真空指标为 $P = 5 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 。对于红外组件寿命试验设备的真空系统结构, 在公共主腔体内的压强比组件所处的真空腔的压强至少高 1~2 个数量级, 因此本文取公共主腔体内的压强 $P_g = 5 \times 10^{-6} \text{Pa}$; 因此主泵在公共主腔体处的有效抽速 S_e 为:

$$S_e = Q / P_g \quad (2.4.11)$$

可求得主泵的有效抽速为 $S_e = 380 \text{L/s}$, 但为了可靠起见, 同时考虑到主泵口的管道和阀门的流导造成有效抽速的损失, 主泵的抽速应放大 1.25 倍, 因此寿命试验设备选择主抽分子泵的抽速需大于 475L/s , 在本真空系统中本文选择的是 Agilent 的涡轮分子泵, 分子泵的选型为: TV551。此泵对 N_2 气体抽速随前级压力的变化曲线如图 2.4.1[40], 从图中可以看出, 此泵在大于 10^{-3}mbar (即 10^{-1}Pa) 范围内的平均抽速为 $400 \sim 550 \text{L/s}$, 可以满足系统需求, 因此选 TV551

是合适的。

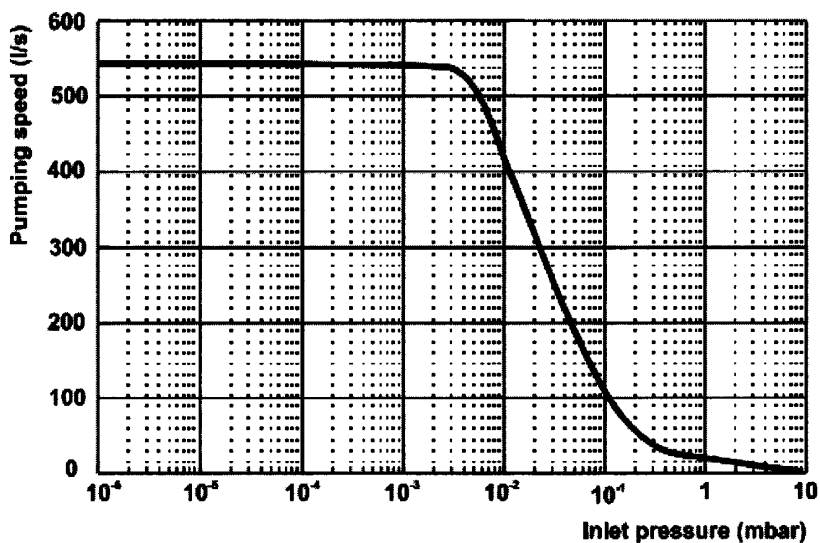


图 2.4.1 TV551 对 N_2 气体抽速随前级压力的变化曲线图

前级机械泵的选型主要依据真空系统的粗抽时间决定，真空系统的粗抽时间可由以下公式求出：

$$t = 2.3K_q \frac{V}{S_p} \lg \frac{P_i}{P} \quad (2.4.12)$$

其中： t —抽气时间[s]；

V —被抽真空室的容积[V]；

P —经 t 时间抽气后后的压力[Pa]；

P_i —开始抽气时的压力[Mpa]；

K_q —修正系数，与设备抽气终止时的压强有关，见表 2.4.2；

S_p —泵的抽速[L/s]；

表 2.4.2 修正系数 K_q

P/Pa	$10^5 \sim 10^4$	$10^4 \sim 10^3$	$10^3 \sim 10^2$	$10^2 \sim 10$	$10 \sim 1$
K_q	1	1.25	1.5	2	4

本系统的粗抽抽走的气体主要为主腔体的气体，所以真空室容积 V 为：
 $V = \pi D^2 H / 4 = 0.11 m^3$ ，分子泵的启动压强为 10Pa，即粗抽结束压强为 10Pa，设计的粗抽时间应不大于 20min，因此机械泵的抽速应大于 4.9L/s，本系统的前级机械泵的抽速为 8L/s[41]，可满足系统要求。

2.4.4 阀门选型

图 2.4.2 为单个杜瓦和真空系统的剖面图，杜瓦 1 的真空腔通过杜瓦密封电磁阀 2、腔体密封阀门 3 连接到公共主腔体，然后通过分子泵 5 和机械泵 8 进行排气；同时杜瓦与公共主腔体之间有拆装接口，通过操作拆装接口可将杜瓦撤离公共真空排气系统，杜瓦真空腔密封的阀门 2 跟随杜瓦。考虑到杜瓦重心稳定性和杜瓦的美观，杜瓦上的密封阀门 2 的尺寸应越小越好，然而阀门 2 的尺寸变小，阀门 2 的流导也将变小，当阀门 2 的流导远小于泵在公共主腔体处的有效抽速时，根据 2.3.2 节中的有效抽速计算公式 (2.3.8)，杜瓦出气口的有效抽速将受阀门 2 的流导制约，因此在对杜瓦密封阀门 2 的尺寸选择需要进行折中设计，使其即满足杜瓦处有效抽速的要求，又满足杜瓦重心稳定和美观；而对于分子插板阀 4、旁抽阀 7、前级阀 6 可根据选定的分子泵和机械泵的入气口尺寸来选型；对于主腔体密封阀 3，根据安装的方便性，往大尺寸方向选型即可。以下将讨论杜瓦真空密封电磁阀 2 的选型计算的方法。

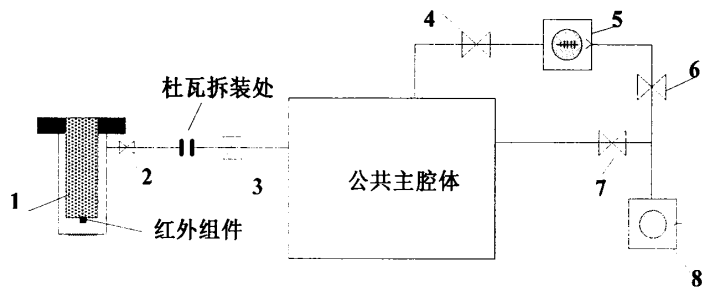


图 2.4.2 寿命试验设备总体方案

- 1、杜瓦；2、杜瓦密封电磁阀；3、腔体密封阀门；4、分子泵插板阀；
5、分子泵；6、前级阀；7、旁抽阀；8、机械泵

杜瓦拆装处到分子泵入气口的总流导包括插板阀 4、分子泵入口连接管、公共主腔体、主腔体密封阀门 3 的流导串联得到。

被抽工件的工作压力为 $5 \times 10^{-4} \text{Pa}$ ，此时 $P_g * D < 0.02 \text{Pa} \cdot \text{m}$ 。故气体处于分子流状态。根据分子流状态下流导的计算公式 (2.3.4) 可计算出杜瓦拆装处到分子泵入气口的各个部件的流导如表 2.4.3 所示。

表 2.4.3 真空系统的部件尺寸及流导[42,43]

部件	直径/mm	高度/mm	流导/ (L · s ⁻¹)
分子泵入口连接管	160	110	1391
插板阀	160	120	1354
主腔体	594	40	4893
主腔体密封阀	—	—	46

根据流导第 2.3.2 节真空室抽气口处泵的有效抽速计算,可推理出流导串联后的总流导的计算公式:

$$\frac{1}{G_{\text{总}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{G_i} \quad (2.4.13)$$

其中 $G_{\text{总}}$ 为串联后的总流导, G_i 为串联的各个部件的流导,结合表 2.4.3,可求得杜瓦拆装处到分子泵入气口的总流导为 43L/s。

结合第 2.4.2 节中选择的分子泵的抽速 S 为 550L/s,则杜瓦拆装处的有效抽速 S'_e 为:

$$S'_e = \frac{S \cdot G}{S + G} = 40L/s \quad (2.4.14)$$

根据同一真空系统,任意一个横截面积的抽气量均等于泵口的抽气量的原理可得:

$$C'P' = CP \quad (2.4.15)$$

其中, C' 为截面 1 的有效抽速, P' 为截面 1 处的压强, C 为分子泵在截面 2 的有效抽速, P 为截面 2 处的压强;已知分子泵的极限真空为 1×10^{-7} Pa,故杜瓦拆装处的压强 1.4×10^{-5} Pa。

已知杜瓦拆装处的压强 1.4×10^{-5} Pa,杜瓦拆装处的有效抽速为 40 L/s,要使得组件试验所需的真空即杜瓦内的压强 P 小于 5×10^{-4} Pa,根据公式 2.4.15 可得出,杜瓦出气口的有效抽速须大于 1.12L/s。

已知杜瓦拆装处的有效抽速为 40L/s,要使杜瓦出气口的有效抽速须大于 1.12L/s,根据有效抽速的计算公式 2.4.14 可得出,杜瓦出气口的电磁阀的流导须大于 1.15L/s。

2.4.5 真空系统 3D 建模

真空系统的 3D 建模是采用 Solidworks 软件进行设计的,它是一种功能强大的三维机械设计自动化软件。相比于在目前市场上所见到的其他三维 CAD 解决方案中, SolidWorks 设计过程最简便、最方便,它具有以下特点:

- 1) 动态界面。提供了一整套完整的动态界面和鼠标拖动控制。“全动感”的用户界面减少设计步骤,减少了多余的对话框,从而避免了界面的零乱。
- 2) 属性管理。崭新的属性管理员用来高效地管理整个设计过程和步骤。属性管理员包含所有的设计数据和参数,而且操作方便、界面直观。
- 3) 装配设计。SolidWorks 中,当生成新零件时,你可以直接参考其他零

件并保持这种参考关系。在装配的环境里，可以方便地设计和修改零部件。

- 4) 工程图生成。SolidWorks 提供了生成完整的、车间认可的详细工程图的工具。工程图是全相关的，当你修改图纸时，三维模型、各个视图、装配体都会自动更新。

基于 SolidWorks 的以上优点，本文使用该软件对主腔体、分子泵、阀门等按照 1:1 的比例进行 3D 建模，生成对应的零件。然后对整个真空系统进行装配组合，确定设备的空间位置尺寸，同时使用间隙验证可以检查装配体中所选零部件之间的间隙。检查出零部件之间的最小距离，并报告不满足指定的“可接受的最小间隙”的间隙，最后使用软件自带的干涉检查工具检查零部件之间是否有干涉的情况，生成的总装配图如图 2.4.3。

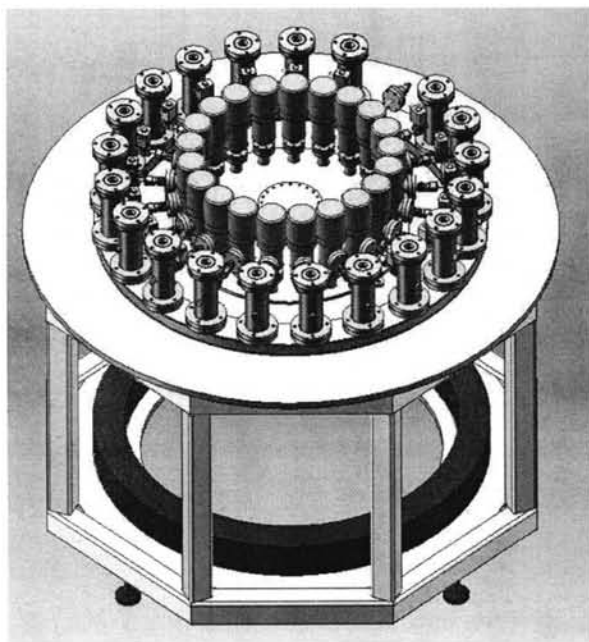


图 2.4.3. 设备的真空系统的 3D 模型图

2.5 设备运行情况

按照上述对各个部件的选型设计，将设备的真空系统投入加工，加工后设备的真空系统结构图如图 2.5.1。对该真空系统进行空载初次排气实验，对待排器件的等工位处的真空度进行监测，等工位处测得的真空度随时间的变化图如图 2.5.2，从图中可以看出，实验证明，排气 24 小时后，等工位真空可达到 $2.42 \times 10^{-5} \text{Pa}$ ，可以满足空载时设备真空度为 $3 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 的要求。在该真空系统加载 2 个工位并加液氮制冷的情况下，其等工位处测得的真空度如图 2.5.3 所

示，等工位真空可达到 3.67×10^{-6} Pa。

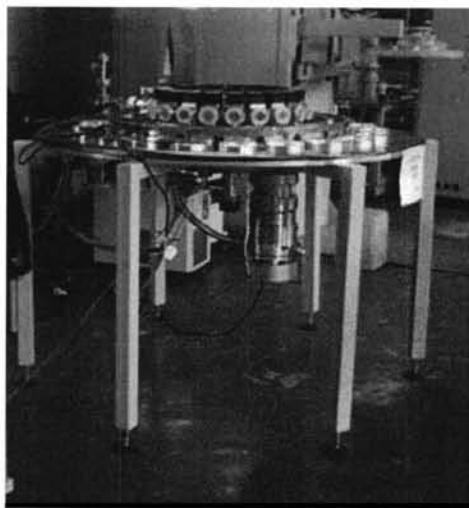


图 2.5.1. 设备的真空系统的实物图

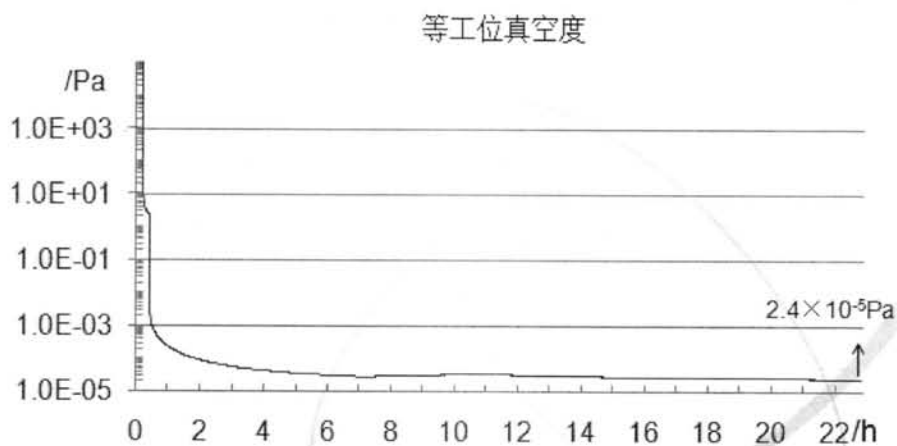


图 2.5.2. 空载等工位真空度随时间变化图

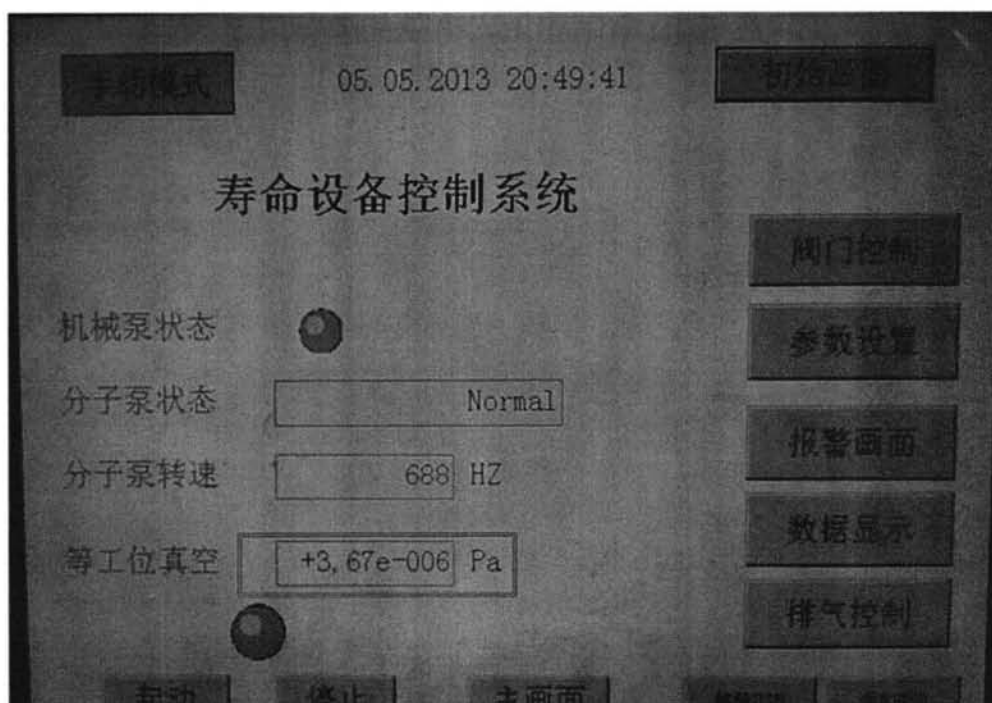


图 2.5.3 加载 2 个杜瓦、加液氮制冷的等工位真空度

系统在加载七个杜瓦，未加液氮制冷后，其等工位处测得的真空度随时间的变化图如图 2.5.4 所示，真空度可达 2.18×10^{-4} Pa，图中的几个压强涨落处为加热烘烤过程。

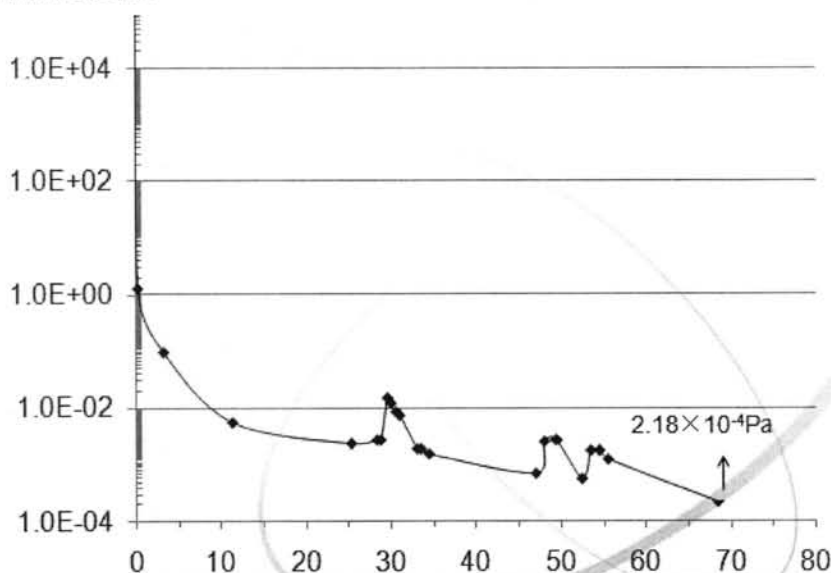


图 2.5.4. 加载 7 个杜瓦的等工位真空度随时间变化图

2.6 本章小结

根据碲镉汞红外探测器长期寿命试验的要求，对设备的整体结构提出独一

真空腔体和黑体测试传动装置内置、多个真空腔体和黑体测试传动装置外置两种方案。从试验腔的真空度、试验过程中自动黑体测试的可行性、试验环境的稳定可靠性四个角度对比了两种方案的优劣，综合两种方案的优缺点，设备的整体结构选用了多个真空腔体和黑体测试传动装置方案。

根据碲镉汞红外探测器长期寿命试验的真空度要求，对设备进行了结构设计。依据真空系统设计理论，对真空系统的公共真空室、泵组、阀门等关键部位进行了选型设计。采用了 3D 绘图软件对设备进行 3D 建模，检测真空系统的空间装配情况。在此基础上完成了设备的研制，并投入试运行，其空载真空度可达 $2.4 \times 10^{-5} \text{Pa}$ ，满足设计指标，可达到碲镉汞组件长期寿命试验的要求；

此页不缺内容

3 设备的控制

3.1 控制系统的控制任务

3.1.1 设备的控制要求

该设备用于红外组件长期寿命试验，设备包含有真空系统、低温维持系统、数据采集系统、测试系统。本章所述的控制系统主要是针对于真空系统和低温维持系统的自动控制。具体控制要求如下：

- 1) 一般情况下，控制将采用自动方式，在进行调试和比较复杂的故障检修时可使用手动方式；
- 2) 现场所采集的仪表信号和分子泵控制器信号都要求进入 PLC 系统；
- 3) 控制参数（设备运行时间、工位使用情况、仪表数值显示报警信息及报警值数值等），均可在触摸屏中设定或显示；
- 4) 在整个抽气过程中进行排气的工位处的烘烤温度将维持在 T_{e0} ($50^{\circ}\text{C} \pm 5$)，主腔体处的烘烤温度将维持在 T_{e1} ($(150 \pm 5)^{\circ}\text{C}$)；
- 5) 杜瓦排气满足间歇式工作；
- 6) 各个工位独立工作，独立烘烤；
- 7) 杜瓦的冷平台温度长期维持在 90K 左右；

3.1.2 真空获取的基本工作原理

根据杜瓦和主腔体工作特点的不同，真空系统的抽气过程分为杜瓦抽气和主腔体抽气两个过程。其中杜瓦抽气为从公共主腔体连接出来的各个支路排气通道的排气，包含的部件有杜瓦、杜瓦密封阀门、主腔体密封阀门；主腔体抽气为主腔体和泵组的排气，包含有两个排气通道，其一为旁抽通道（主腔体通过旁抽阀连通至机械泵），其二为主抽通道（主腔体通过一个插板阀连通至分子泵，然后通过前级阀连通至机械泵），图 3.1.1 为杜瓦、公共主腔体、机械泵及分子泵的连接示意图。

真空获取的原理示意图如图 3.1.2 所示，在杜瓦接入真空系统后，其排气的工作步骤为：

- 1) 开启其相应的杜瓦密封电磁阀（CKD）和主腔体密封电磁阀（VAT），使其连通至主腔体；
- 2) 观测杜瓦等工位的真空度，判断其排气工作模式；当观测到的真空度 $P_{A} \geq P_{A0.1}$ ，则开启系统的旁抽通道进行排气，关闭主抽通道；反之，

- 则开启系统的主抽通道进行排气，关闭旁抽通道；
- 3) 当等工位的真空度达到了一个规定值 PA_END 后，关闭其相应的杜瓦密封电磁阀 (CKD) 和主腔体密封电磁阀 (VAT)，使其进入杜瓦静态真空状态；
 - 4) 当杜瓦真空度变差到一定程度时，将重复上述排气过程，即杜瓦进行重抽动作。

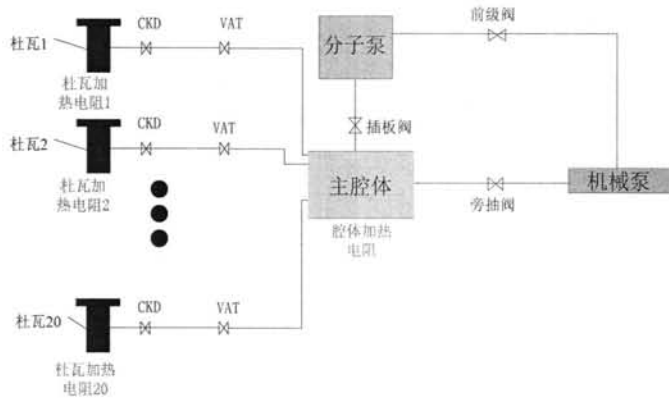


图 3.1.1 杜瓦与真空主腔体的连接示意图

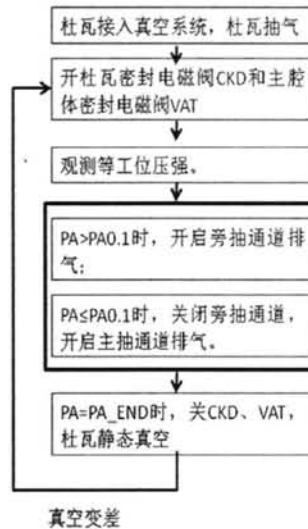


图 3.1.2 真空获取原理示意图

3.1.3 低温维持系统的工作原理

该设备低温获取和维持采用的是液氮冷却的方式。各个工位的杜瓦有独立的液氮储液腔，低温控制系统依据各个杜瓦内的液氮液位传感器的来控制相应的加液氮阀门的开闭，从而使杜瓦的储液腔内能长期储存液氮，以获取和维持低温，设备的低温维持的工作原理图如图 3.1.3 所示。

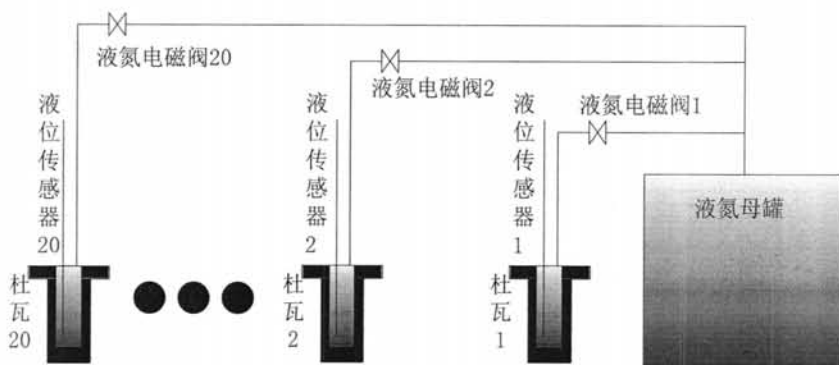


图 3.1.3 低温维持系统的连接示意图

液氮的输送方法一般有三种：重力输送、液泵输送和加压输送。在输送距离比较短的情况下，大多采用加压输送。加压输送具体来讲有两种：一种是使用压缩气体给源容器加压，这样在源、目的容器中产生压力差，把液氮从源容器输送到目的容器中；另外一种是通过加热器加热，使源容器中一部分液氮蒸发，产生比较高的压力，使液氮输送到目的容器中[44]。后一种方法操作起来复杂，加液时需要同时控制母罐的压力和输液电磁阀的开闭，同时加热器加热源容器产生较高压力所花费的时间较长，常常会出现加液不及时的现象。而前一种方式，这种方式操作简单，母罐的压力维持只需简单的机械装置完成，无需电气控制，同时母罐的压力可长期维持，加液时无需等待压力上升，可直接开闭阀门进行加液，加液响应时间短。因此本文的这套系统利用的是使用压缩气体给源容器加压输送液氮的方式。

3.2 控制系统的总体方案

设备的控制系统的合理设计能提高系统的稳定性、可靠性、易维护性。系统的结构示意图如图 3.2.1 所示。控制系统的总体分布有四大部分：上位机监控、控制柜、现场执行设备泵、阀、开关等、HMI。

(1) 上位机

上位机操作站主要完成系统中的各类参数的监视、数据保存、显示排气流程画面、设备运行情况等，可以对红外组件寿命试验过程中的组件环境参数数据进行历史存储。同时上位机还可以根据需要开发远程数据查询的功能。

(2) 控制柜

可编程控制器（Programmable Controller）是为工业控制应用而设计制造的，最先可编程控制器主要用来替代继电器实现逻辑控制的，故被称作可编程逻辑控制器（Programmable Logic Controller），简称 PLC。PLC 具有高可靠性，PLC 选用的器件经过严格筛选，PLC 的输入输出电路均采用光隔离技术，屏蔽工

业现场的干扰信号，目前 PLC 已经广泛应用于工业领域[45~49]。

PLC 控制柜中安装 PLC 控制器，它负责完成全部现场参数（模拟量和开关量）信号的采集和控制，PLC 控制柜内安装有 CPU 卡、通信卡、拆卸式 DI、DO、AI、AO 模块、功率继电器、开关电源、220V 转 24V 的变压器。尽管 PLC 的输出模块具有直接功率输出功能，能完成各种常规较复杂的控制回路，但考虑到 PLC 控制柜的安全性和可靠性，PLC 柜中每个开关量均配备有功率继电器，以 PLC 控制模块与控制回路进行隔离。另考虑到后续扩展，PLC 控制器的供电采用开关电源。变压器用于杜瓦加热烘烤。

(3) 现场执行设备

在本系统中，现场执行设备有三种：仪表（分子泵控制器等）、阀（真空密封阀、抽气通道阀、低温输液阀）、开关（寿命试验电源开关、真空烘烤开关），其中阀门和开关占主要部分。

(4) HMI

HMI 一般特指用于操作员与控制系统对话和相互交换信息的专用设备，它按照工业环境应用来设计，防护等级高，坚固耐用，其稳定性和可靠性与 PLC 相当[50]，本系统选用的 HMI 为触摸屏，它可以进行部分现场数据的显示（泵组运行状态、温度等），同时操作员可以它进行过程控制，如参数设置、启停设备等。但对于数据保存，其发挥的作用很小，本系统中将数据保存功能从 HMI 分离出去，数据存储工作由上位计算机完成。

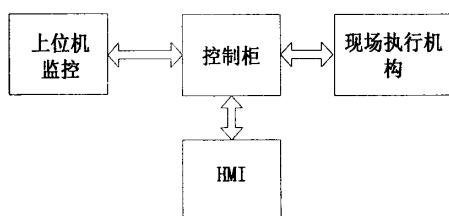


图 3.2.1 控制系统结构示意图

3.3 控制系统的硬件

为了方便控制系统分析，给设备的检测装置和执行机构统一编制工程代号，形成设备的控制框图，如图 3.3.1 所示。控制系统的检测装置可分为四类，即液位计 LA，温度计 TA、TB、TC、红外位置传感器 WZ 和真空计 PA，其中，LA#num 为第#num 个杜瓦储液腔的液位信号，#num=1, 2, …, 20，代表工位号，如工位 1 的储液腔液位信号为 LA1，TA#num 和 TC#num 为第#num 个杜瓦的冷平台的两个不同位置的温度信号，TB#num 为第#num 个工位的真空腔外壁的温度信号，#num 的定义同上，但#num=21 代表公共主腔体，该信号的用途是配合真空排气

过程中杜瓦和公共主腔体定点烘烤用；PA#num 为第#num 个杜瓦内真空度信号，#num 的定义同上，其中 PA1~PA20 为杜瓦内的真空度，它由液氮制冷温度得出，PA21 为等工位真空度，它由真空规量出；WZ 为插板阀关闭到位信号，该信号的设置是为了避免分子泵在开启状态下受到大气的冲击。因为插板阀关闭阀门存在延时，若无插板阀到位信号，PLC 可能对插板阀的状态出现误判断，将新加入杜瓦内大气放入主腔体，从而会导致大气冲击已开启的分子泵。

控制系统的数字量输出有两大类：阀门和开关。开关主要用于通断电，有两种：烘烤开关、试验通电保护开关；阀门可分为四种：加液氮电磁阀 S1、杜瓦密封阀 S2、主腔体密封阀 S3、主旁通道阀门，其中 S=1, 2...20，为了方便控制，对设备各个数字量输出点进行统一编号，代号表和控制要求如表 3.3.1 所示。

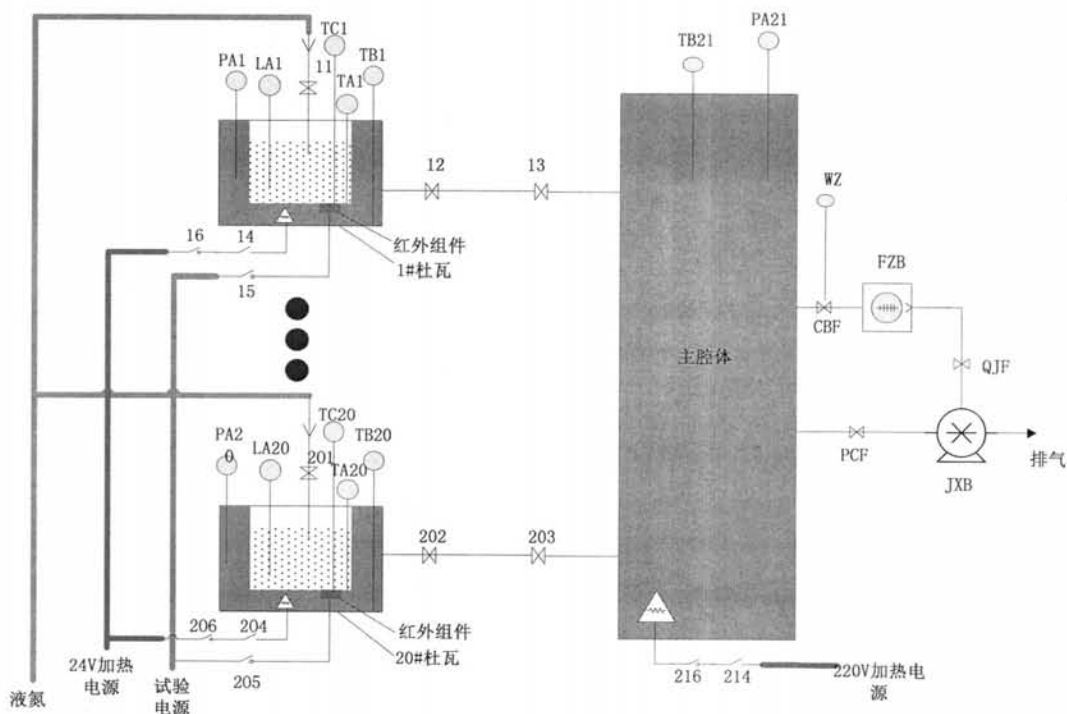


图 3.3.1 设备控制框图

表 3.3.1 设备各个部件代号表和控制要求

代号	设备	控制要求	低位	高位
11	1#杜瓦加液氮电磁阀	启动条件: 1#杜瓦初排成功且 LA1 低于低液位;	LA0.1	LA0.2
12	1#杜瓦密封阀	启动条件: 1#杜瓦接入公共主腔体系统排气;		
13	1#工位主腔体密封阀	启动条件: 1#杜瓦接入公共主腔体系统排气;		
14	1#杜瓦烘烤开关	启动条件: 1#杜瓦烘烤温度 TB1 低于高位温度点	TB0.1	
15	1#杜瓦内组件试验通电开关	停止条件: 1#杜瓦内压强 $>A_2$ 或 TA1、TC1 高于高位温度点或设备故障	A_2	TA0.1 TC0.1
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
214	主腔体烘烤开关	启动条件: 主腔体烘烤温度 TB21 低于高位温度点	TB0.3	
SDF	氦质谱检漏阀	手动控制		
QJF	前级阀	启停上位机确定		
CBF	插板阀	启停上位机确定		
PCF	旁抽阀	启停上位机确定		
FZB	分子泵	启停上位机确定		
JXB	机械泵	启停上位机确定		

除了上述介绍的现场执行设备（泵、阀、开关等）以及控制部件上位机和 PLC 外，控制系统还应包括上位机和 PLC 的通信部分以及 PLC 与现场执行设备的通信部分，根据控制系统的总体方案，其硬件组成可大体分为以下几个方面：

- 1) 上位计算机，上位计算机负责完成现场数据存储功能，兼容远程数据查询功能；
- 2) 通信链路，通信链路负责上、下位机之间以怎样的方式通信，介质如何选择；
- 3) 可编程控制器 PLC，控制系统的关键部分，执行用户的控制程序；
- 4) 控制总线，以何种控制总线传递 PLC 和执行仪表间的信息；
- 5) 信号模块，用于 PLC 与现场传感器之间的信号传递。

3.3.1 上位机

为了进行数据采集工作，上位计算机配备了 USB 转 MPI 通信网卡 CP5711。在控制系统中，上位机可监视现场全部运行信息，对现场采集数据进行汇总和分析，全面执行储存功能。

3.3.2 可编程逻辑控制器

按照 I/O 点数的多少, PLC 可分为小型、中型和大型三类。I/O 点数指输入点以及输出点数之和, 是衡量 PLC 规模的常用指标, 一般 I/O 点数在 64 及 64 点以下的称为微型 PLC, 64~256 点的 PLC 为小型 PLC, 总点数在 256~2048 点之间的称为中型 PLC, 总点数在 2048 点以上的称为大型 PLC[52]。本控制系统的 I/O 点数统计为 208, 其中模拟量输入 AI 点数为 83, 数字量输出 DO 点数为 125。依据上述的 PLC 的分类, 本设备的控制系统应属于小型偏中型系统, 但考虑到系统以后的扩展性, 控制系统将按照中型系统进行 PLC 的选型。

德国西门子 (SIMENS) 是欧洲最大的电子和电气设备制造商, 也是最早生产 PLC 的厂家, 其生产的 SIMATIC PLC 在全世界处于领先地位, 1996 年西门子推出的 S7 系列产品, 包含有小型 PLC S7-200 系列, 中型 PLC S7-300 系列和大型 PLC S7-400 系列。按照上述 I/O 点数选定控制系统规格的方法, 本控制系统选用中型 PLC S7-300, 表 3.3.2 列出了 S7-300 的几种不同规格的 CPU[53], 从表中可以看出各个 CPU 模块的通信功能有较大差异, 有 1~3 个通信接口, 但都支持 MPI (MultiPoint Interface) 通信。DP 子系列支持 PROFIBUS-DP 协议, 带 PN 后缀名的 CPU 支持 PROFINET 通信。综合考虑控制总线方面的因素, 控制系统选择支持 PROFIBUS-DP 通信的 CPU 315-DP, 它的程序容量属于大中规模的, 对二进制和浮点数的处理性能高, 足以满足控制系统的需求。同时它内置 1 个 DP 口, 可方便形成 PROFIBUS-DP 总线网络, 可以方便扩展为冗余配置, 提高控制系统的可靠性。

表 3.3.2 几种 S7-300CPU 性能比较

CPU	312	314	315-2DP	315-2PN/DP	317-2DP
RAM	32KB	96KB	128KB	256KB	512KB
最大位操作指令执行时间	0.2 μ s	0.1 μ s	0.1 μ s	0.1 μ s	0.05 μ s
浮点数指令执行时间	6 μ s	3 μ s	3 μ s	3 μ s	1 μ s
位存储器 (M)	128B	256B	2048B	2048B	4096B
内置的 DP 口接口	0	0	1	1	2
最大模拟量点数	64	256	256	256	512
最大局部数据	256B	512B	1024B	1024B	1024B

3.3.3 信号模块

信号模块是连接 PLC 和外部传感器的接口模块, 这个模块主要是对输入或输出模块进行相应的信号转换, 以便于信号的处理和执行。

1) 模拟量输入 (AI) 模块的选用。

测量仪表将所测量的对象值 (液位等) 转化为标准的电流或电压等形式, 而模拟量输入模块将这些标准信号转换为 CPU 内部处理用的数字信号, 这种模

块的主要作用是 A/D 转换。将传感器的模拟量信号输入至 PLC 有两种方案：其一为采用分布式 AI 模块[54]，分布式 AI 模块采集的传感器信号，然后通过控制总线将采集到的信号传送至 PLC；其二为采用 PLC 机架模拟量输入模块 SM331[55]，SM331 采集的传感器信号，然后通过 PLC 的背板总线将采集的信号送入 PLC。表 3.3.3 为两种模块的规格参数对比表格，从表中可以看出，SM331 的每通道的转换时间为 10ms，远大于分布式 AI 模块的刷新时间 250ms，此外，SM331 支持传感器的类型种类也远多于分布式 I/O，其支持多种传感器，如电压、电流、热电阻、热电偶、电阻等，而分布式 I/O 无法检测电阻信号且支持热电阻传感器的模块通道数少。由于本控制系统中传感器种类多、数目多，涵盖液位传感器（电阻值信号）、温度传感器 PT100（热电阻信号）、真空计（电压信号），AI 点总计达到 82 个，因此本系统中模拟量输入模块选用西门子 SM331，型号为 6ES7 331-1KF02-0AB0。每个模块可输入 8 个模拟量，可支持电压输入量程、电流输入量程、电阻输入量程、热电阻输入量程、热电偶输入量程，电阻、电压、电流基本误差极限小于 0.5%，温度误差低于 1K。

表 3.3.3 几种模块的参数对比表

模块类型	转换时间/ 每通道 (ms)	模拟量输入 点数	支持传感器 类型	精度
分布式 AI 模块	250	4	热电阻	$\pm(0.5\%FS \pm 1)$
		8	热电偶	$\pm(0.5\%FS \pm 1)$
		8	电压	$\pm 0.6\%$
		8	电流	$\pm 0.5\%$
		0	电阻	-
SM321	110	8	热电阻	1Kelvin
		8	热电偶	1Kelvin
		8	电压	$\pm 0.4\%$
		8	电流	$\pm 0.3\%$
		8	电阻	$\pm 0.3\%$

2) 数字量输出(DO)模块的选用

控制系统中，数字输出信号用于驱动电磁阀、泵及其他控制元件和负载，DO 模块将 PLC 内部的电平信号转化为控制过程中所需要的外部信号电平，还有隔离和放大作用。基于西门子数字量输出模块 SM322 的高可靠性[56]，本系统选用 SM322，SM322 模块按照输出器件的不同可分为晶体管式，晶闸管式、继电器式三种，晶体管式模块的输出驱动器件是场效应管，它只能接直流负载；晶闸管式模块的输出驱动器件是双向晶闸管，它只能接交流负载；继电器式模块的输出驱动器件是机械式继电器，它即可接交流又可接直流负载。表 3.3.4 为三种模块的规格参数对比表格，从表中可以看出：响应速度上，晶体管式>晶闸管式>继电器式。最大点数上，晶体管最好；在本控制系统中，DO 点多且均为

直流型负载，因此在本系统中数字量输出模块选用晶体管输出模块 6ES7 322-1BL00-0AA0，其额定输出电压为 DC24V，每个模块有 32 个输出点，输出电流为 $5\text{mA} \sim 0.5\text{A}$ 。阻性、感性负载的最大开关频率为 100Hz、2Hz。

表 3.3.4 三种数字量输出模块规格参数对比表

模块类型	负载类型	数字量输出最大点数	最大开关频率(HZ)		电隔离(通道间每组数量)
			负载类型	最大频率	
晶体管	直流	64	阻性	100	1~16
			感性	2	
			灯	10	
晶闸管	交流	32	阻性	10	1~8
			感性	0.5	
			灯	1	
继电器	直流或交流	8	阻性	2	1~8
			感性	0.5	
			灯	2	

3) 数字量输入(AI)模块的选用

数字量输入模块的作用是将现场的外部数字量信号转换为 PLC 内部信号，本控制系统的数字量输入点只有 1 点，即插板阀的关闭到位信号。因此这里的 AI 模块选用的输入点最少的模块，按照 SM321 模块手册[57]，选用通道数目最少的 6ES7 321-1BHL00-0AA0。

3.3.4 温控模块

在本系统中，温控模块主要用于管道烘烤。对于温度定点烘烤控制，目前有两种方案：其一为带总线的专用温控模块，模块自带温控功能，实时烘烤温度通过总线传送到 PLC；其二为利用 PLC 自带的 PID 温控控制模块 FB58/FB59[58]，其通过 PLC 的模拟量输入模块 AI 将温度过程值采集进入 PLC，然后利用 FB58/FB59 进行 PID 处理并产生脉冲控制信号，最后利用 PLC 数字量输出模块输出，从而实现温度控制。这两种方案中，后一种方案对一个温度点的控制需 1 个 AI 点、1 个 DO 点以及一些 CPU 内存，前一种需要一个 1 个带总线的温控模块。从价格和体积上来看，两者相当，但是从性价比上看，后一种不如前种，因为 FB58/FB59 是通过中断实现过程控制，当控制温度点数目越多，对 S7-300 的 CPU 的负担越大，而本文的控制系统需控温点多达 21 路，因此本控制系统中温度控制采用带总线的专用温控模块完成，温控器为英国 WEST 的多回路紧凑型 PID 温控模块 MLC9000[59]，它体积紧凑，集成度高，4 个点的控制回路模块的体积仅为：100mm×120mm×22mm。它由现场通信模块和多个回路控制模块组成，由于一个回路模块最多能实现 4 个温度点的控制，根据本系统 21

个温度点和控制总线控制要求，MLC9000+选用 1 个 PROFIBUS-DP 通信模块和 6 个回路控制模块，选型分别为：MLC9000+-BM240 和 MLC9000-Z4620，回路控制具体的技术指标如下：

- 1) 仪表精度 $\pm 0.1\%$ 级；
- 2) 显示基本误差： $\pm 0.1\%$ of span；
- 3) 支持继电器输出、固态继电器 SSR 输出、线性百分比输出三种。SSR 输出触发信号：空载电压 $>12V$ ，电流 $>20mA$ ；
- 4) 电源：DC24V ；
- 5) 工作环境： $0\sim 55^{\circ}C$ ， $30\% \leq RH \leq 90\%$ （不结霜），无腐蚀性及强电磁场干扰；
- 6) 测控范围：Pt100， $-200.0\sim 800.0^{\circ}C$ 。

3.3.5 控制总线

随着制造业自动化和过程自动化中分散结构的迅速增长，现场总线的应用日益广泛，现场总线实现了数字量和模拟量的输入、输出模块、智能信号模块、各种智能仪表等与 PLC(可编程控制器)或者 PC 之间的数据传输，把各个 I/O 通道分散到实际需要的现场设备附近，从而使整个系统工程的费用、装配费用、硬件成本、设备调试和维修成本减少到最小。标准化的现场总线具有开放的接口、透明的通讯协议，允许用户选用不同制造商生产的分散的 I/O 装置。一方面它覆盖了传感器\执行器领域的通信功能要求，另一方面又具有单元级领域的所有网络的通信功能。PROFIBUS 是现场总线的一种，它以其独特的技术特点、严格的认证规范、开放的标准、众多的厂商支持和不断发展的应用行规，已被纳入现场总线的国际标准 IEC61158 和欧洲标准 EN50170，并与 2001 年被定与我国的国家标准 JB/T10308.3 — 2001[60]。

PROFIBUS 是用于车间级和现场级的数据高速传输，传输速率高达 12Mbit/s，响应时间为 1ms，使用屏蔽双绞线（最长 9.6Km）或光缆（最长 90Km），最多从站数目可以接 127 个从站。PROFIBUS 提供三种通信协议[61]：

(1) PROFIBUS-FMS，主要用于车间级的不同供应商的自动化系统之间传输数据，处理单元级多主站通信，FMS 已基本被以太网取代；

(2) PROFIBUS-DP，主要用于 PLC 和现场级分布式 I/O 设备之间的通信，主站之间的通信为令牌方式，主站与从站之间为主从方式，以及这两种方式的结合。DP 是 PROFIBUS 应用最广泛的通信方式；

(3) PROFIBUS-PA，主要用于现场传感器和执行器的低速数据传输；

本控制系统中，总线通信均为现场级的传输，因此控制系统的控制总线选

用 PROFIBUS-DP 总线，总线网络为纯主-从系统，一个主站轮询多个从站。系统中 PLC 为一类主站，HMI 为二类从站，温控模块 MLC9000 和分子泵控制器为从站。

3.3.6 控制系统硬件集成

通过对控制系统信号的统计和分析，要实现系统的控制要求，可以计算出控制系统需要 8 个模拟量输入模块 SM331、4 个数字量输出模块 SM322、1 个数字量输入模块、1 个多回路温控模块 MLC9000 以及 1 个分子泵控制器。其中温控模块和分子泵控制器为现场仪表类执行机构，以控制总线与 S7-300 连接。而 AI 模块和 DO 模块以背板总线与 S7-300 连接，由于 S7-300 每个机架最多可挂 8 个模块[52]，因此系统采用 2 机架结构，8 个模拟量输入模块 SM331 位于第一机架，将所有的 AI 信号读入 PLC 总站，4 个数字量输出模块 SM322 位于第二机架，实现所有数字量信号输入输出。控制系统，机架之间的连接可通过接口模块进行连接，接口模块选型有两种选择：IM360+IM361 和 IM365+ IM365，后一种只能应用于两个机架的系统，前一种可以扩展到四机架系统，考虑到系统的扩展性，接口模块选用后一种方式。系统硬件确定后，就可以画出 PLC 的硬件系统结构图，如图 3.3.2。当 PLC 硬件结构确定后，信号模块的物理地址就确定了。

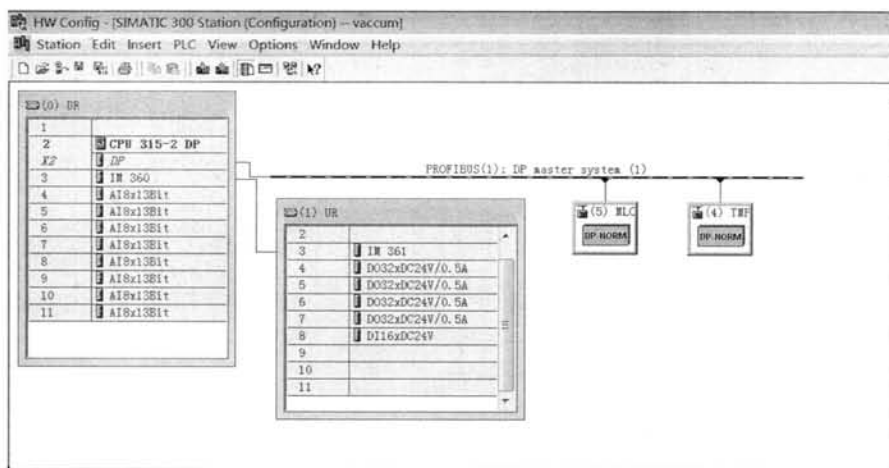


图 3.3.2 控制系统硬件结构示意图

3.4 控制系统 PLC 程序设计

PLC 程序是整个控制系统的关键。在 PLC 程序的总体结构上，可分为控制程序的主体部分和辅助部分。PLC 程序主体部分完成主要的控制功能，依照完成的方式，可分为自动部分和手动部分。手动功能置于现场，其控制通过人机界面上的独立控制按钮等实现，手动功能的设置针对于某些特殊场合，如设备

的调试、故障维修。此外，程序还设置手动/自动的切换功能，以备设备发生意外时，现场工作人员立即进行人工干预。辅助部分起着保障主体程序完成的作用，如初始化、通信、诊断等。

为了实现设备的自动控制要求，本控制系统的 PLC 程序设计部分采用模块式的编程方法，不同的功能模块实现不同的功能，如数据采集模块负责整个系统的数据采集功能、分子泵控制模块负责分子泵与 PLC 数据交换等，这种模块化的编程方法可大大提高程序的可移植性和通用性，使程序在相似或相同的环境下能多次重复利用。

主程序模块 OB1 是 PLC 必执行的程序模块[62]。在项目中，OB1 完成控制程序的绝大部分功能。根据控制系统功能分析，在本控制系统中，它主要包括初始化模块、数据采集模块、分子泵控制模块、温控仪控制模块、抽真空模块、自动输液模块、报警模块、数字量输出模块等。PLC 程序的总体模块调用结构如图 3.4.1 所示。其中 OB100 为系统默认的初始化模块，它在 PLC 从 STOP 状态到 RUN 状态时由 PLC 的操作系统自动调用，主要用于初始化数据，OB100 模块运行结束后，操作系统循环调用 OB1。本控制系统采用西门子的 STEP 7 进行设计。

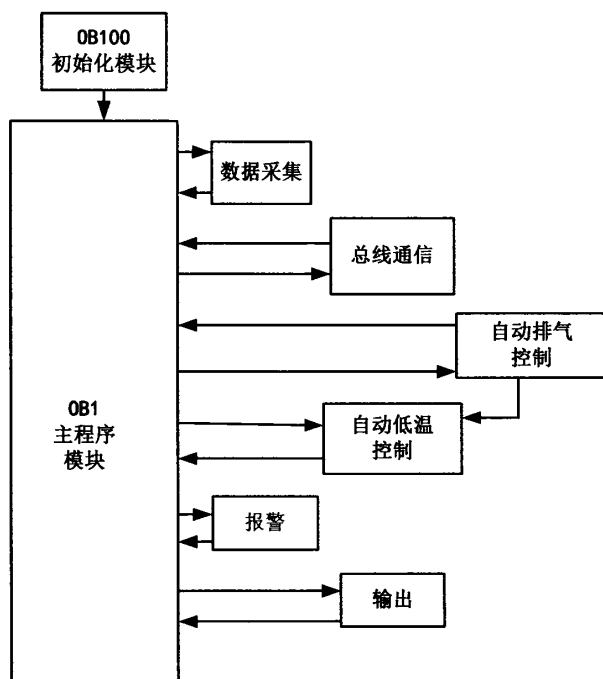


图 3.4.1 PLC 整体模块调用结构示意图

3.4.1 数据采集

在使用 STEP 7 进行程序设计时，一般要大量使用共享数据块 DB，这种数据块的为用户提供一个可保存的数据区，它的数据结构和大小并不依赖于特定的程序块，而是由用户自己定义。在数据采集模块中，本文使用了大量的数据块 DB，这样可以使得程序结构简单，易于修改、管理和移植。

本系统中的数据采集模块为 FC2，其功能为将系统采集到数字量或模拟量信号标度为常规意义的阻值、温度或真空信号值。该模块使用了 DB3 及 DB1 数据块。其中，前者放置各种模拟量的上、下限值；后者为目标数据块，标度转换后的数据放置在这个数据块中。在本数据块中，为了增强程序可读性，每个模拟量变量定义了地址及符号，变量的符号名称结合了如图 3.1.5 的设备框图编号。DB1 的部分定义如图 3.4.2 所示。

在刻度转换上，本控制系统设计到 3 种刻度转换：PT100 温度转换、液位电阻值转换及真空度的转换。对于 PT100 温度转换，可通过 S7-300 的模块手册 [55] 的转换方法得出，即 1 个数字=0.1℃；对于液位阻值的转换，可以根据线性转换方法得出 [63]，即数值 0~27648 对应 0~600Ω；对于真空度转换，可根据真空规手册中给出的电压 U(V) 与真空度 P(Pa) 的关系 [64] $P=10^{1.667U-9.333}$ 得出，同样，真空规的电压值与 PLC 输入映像区的数值之间转换关系遵循线性转换的规则，即 0~27648 对应 0~10V；由于系统中待转换的模拟量的数目较多，STEP7 编程采用的是 STL 方式编写的，数值采集模块的部分程序如图 3.4.3 所示。

Address	Name	Type	Initial value	Comment
+0.0		STRUCT		
+0.0	TA1	REAL	0.00000e+000	
+4.0	TB1	REAL	0.00000e+000	
+8.0	TA2	REAL	0.00000e+000	
+12.0	TB2	REAL	0.00000e+000	
+16.0	TA3	REAL	0.00000e+000	
+20.0	TB3	REAL	0.00000e+000	
+24.0	TA4	REAL	0.00000e+000	
+28.0	TB4	REAL	0.00000e+000	
+32.0	TA5	REAL	0.00000e+000	
+36.0	TB5	REAL	0.00000e+000	
+40.0	TA6	REAL	0.00000e+000	
+44.0	TB6	REAL	0.00000e+000	
+48.0	TA7	REAL	0.00000e+000	
+52.0	TB7	REAL	0.00000e+000	
+56.0	TA8	REAL	0.00000e+000	
+60.0	TB8	REAL	0.00000e+000	
+64.0	TA9	REAL	0.00000e+000	
+68.0	TB9	REAL	0.00000e+000	
+72.0	TA10	REAL	0.00000e+000	
+76.0	TB10	REAL	0.00000e+000	

图 3.4.2 DB1 数据块



图 3.4.3 数据采集模块

3.4.2 分子泵控制

本系统的控制总线采用 PROFIBUS-DP 控制总线，参照第三方设备进入 PROFIBUS-DP 网络方法[65~68]，分子泵通过安装 TMP 通讯适配器模块接入 PROFIBUS-DP 网络，成为 PROFIBUS-DP 从站，接受主站 SIMATIC S7-315-2DP 的控制。在该控制网络中，TMP 通讯适配器模块将从 Profibus-DP 网中读取数据，并将数据存入双向缓存区，然后按照被编址参数排序，向分子泵控制器写入控制字、设置值或读出实际值、诊断信息等参量。TMP 的双向缓存区的部分参数的定义如表 3.4.1 所示[69]。

过程数据是分子泵运行过程中要输入/输出的一些数据值，如泵的转速、运行启停状态、运行时间、电流反馈值、启停控制命令等，因此分子泵控制的程序设计中需要建立与 TMP 输入输出相同编址相同大小的数据块 DB5，以利于 PLC 与 TMP 进行数据交换，数据块 DB5 的定义如图 3.4.4。在数据传输方面，本文使用数据交互函数 FC1 完成，S7-300 写到 TMP 的数据保存在 TMP 的输出缓冲区，对应于 S7-300 的 QB0~QB4；S7-300 从 TMP 的输入缓冲区读取数据，对应于 S7-300 的 IB200~IB219；图 3.4.5 为分子泵数据交换的部分程序。

表 3.4.1a TMP 网络适配器输入缓存区定义

3 设备的控制

2	V	1	Voltage
3	°C	1	Pump temperature
4		1	Controller Status (refer to controller manual)
5		1	Error code (refer to controller manual)
6	°C	1	Lower bearing temperature (only ICE)
7	Sec/m	1	Purge flow read (only ICE)
8	mA/A	2	Current (mA on Nav, mA x 10 on HT and ICE)
10	W	2	Power
12	Hz/Krpm	2	Driving frequency (Hz on Nav, Krpm on HT and ICE)
14	Minutes	2	Cycle time
16	-	2	Cycle number
18	Hours	2	Pump life

表 3.4.1b TMP 网络适配器输出缓存区定义

Offset	Unit/res.	Size (byte)	Range	Description
0		1		B7 Start/Stop (0 = stop 1 = start)
				B6 Low speed (0 = no 1 = yes)
				B5 Soft start (0 = no 1 = yes)
				B4 ...
				B3 Heater jacket enable (ICE only, 0 = no 1 = yes)
				B2 Vent valve on/off (Nav only, 0 = Off 1 = On)
				B1 Internal fan on/off
				B0 External fan on/off
1		2		High speed adjust
3		2		Low speed adjust

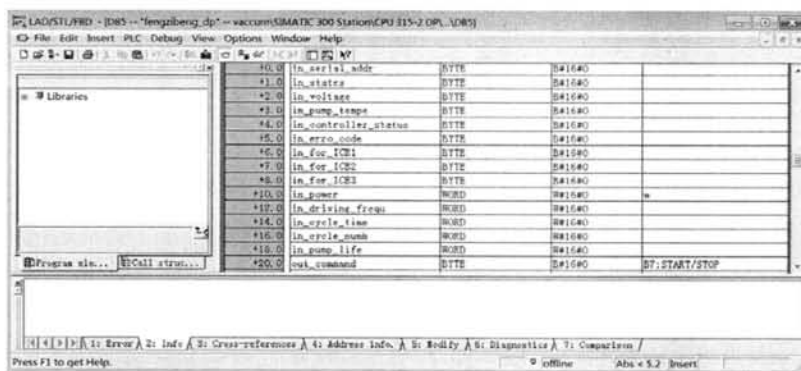


图 3.4.4 数据块 DB5 的定义



图 3.4.5 分子泵数据交换的部分程序

3.4.3 烘烤温度控制

工位处杜瓦烘烤温度控制硬件结构如图 3.4.6，铂电阻 Pt100 贴在待加热物体的外表面，加热装置为加热带。杜瓦烘烤温度设定温度 50℃，腔体的烘烤设定温度为 150℃。

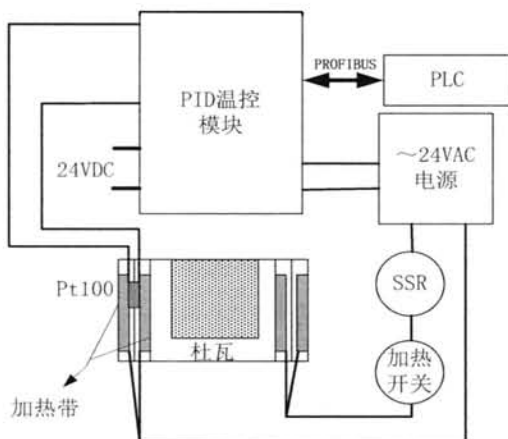


图 3.4.6 杜瓦烘烤 PID 温度控制

在控制领域，PID 控制算法应用非常广泛，技术成熟，具有很强的灵活性和适应性，能精确控制对象，因此 PID 温度控制在工业、医药等领域得到了广泛的应用[70-82]。PID 控制器早在 20 世纪 30 年代末期就已经出现，经过多年的更新换代，由模拟 PID 控制器发展到数字 PID 控制器，其控制算法也在不断发展，出现了非线性 PID 控制、选择性 PID-PD 控制、I-PD 控制以及自适应 PID 控制算法等，近年来又出现了专家自适应 PID 控制器，或称为智能 PID 控制器 [83]。

PID 控制当中，存在着比例、积分和微分三种控制作用。比例控制的优点是：误差一旦产生，控制器立即就有控制作用，使被控制量朝着减小误差方向变化，控制作用的强弱取决于比例系数 K_p 。缺点是：对于具有自平衡（系统阶

跃响应终值为一有限值)的被控对象存在静差。加大 K_p 可减小静差,但 K_p 过大时,会导致动态性能变坏,甚至使系统不稳定。

根据不同被控对象适当整定 PID 的三个参数,就可以获得比较满意的控制效果。在本控制系统中, PID 的比例系数、积分系数及微分系数的选择依靠 MLC9000 模块的自整定获得。

在本文的控制系统中,为了把 WEST 生产的 PROFIBUS 产品集成 PROFIBUS 网络在一起,必须提供温控模块 MLC9000+的 GSD 文件以提供产品的功能阐述[52],如产品的系列号、产品输入输出区的定义、温度设定值、温度过程值等。MLC9000 的软件编程控制如同上述分子泵的控制,在硬件上,由于 MLC9000+模块功能(温控点数目)具有很强的灵活性,厂家并未提供特定的 GSD 文件,而提供生成 GSD 文件的组态软件 MLC9000 WORKSHOP,用户可根据在的需求进行组态。对 MLC9000+的温度控制组态步骤如下[59]:

(1) 通讯模块的组态:根据组态提示正确选择默认的地址码(1-126),波特率(1.5Mbps)等;

(2) 控制模块的组态。输入回路组态:正确选择所需要的传感器类型(K型或 PT100),警报类型(高报警,低报警与偏差报警),警报范围(最高与最低植),动作方式(反向),控制方式(加热/警报),温度设定点的设定,整定方式(自整定/预整定);输出回路组态:根据提示正确选择第一,第二,第三,第四回路做为四个加热回路(SSR 输出),选择好加热输出动作时间(SSR 输出,一般选择为 2 秒),正确选择好第一,第二回路相对应的高警报输出(继电器输出),选择好高警报输出动作时间(继电器输出,一般选择为 8 秒);控制模块具有复制功能,每组 8 个控制模块的温度控制方式一样,启动复制功能,成功很快的复制好其他 5 个控制模块的组态,这样大大减少了组态的设置时间;

(3) MLC9000+组态完毕后,将生成一个通讯数据 GSD 文件。利用 S7-300 的硬件组态,将 MLC9000+设为 PROFIBUS 从站。

3.4.4 自动输液氮控制

本系统采用串联的铂电阻来测量液面位置,当铂电阻低于液面位置时,电阻减小,当铂电阻高于液面位置时,阻值增大。利用铂电阻阻值随其液位的变化而变化的特性,可以判断液面的位置。

根据本章第一节中提到的低温维持系统的工作原理,本文设计了一种低温自动维持算法。其自动输液氮控制流程如图 3.4.7 所示,根据流程图编写 PLC 程序,实现对自动输液模块的控制。以 1#工位为例,其自动控制过程如下:

当液面传感器显示液氮液面 LA1 低于低处液位 LA0.1 时,即表示液氮即将

消耗完，这时 PLC 的数字量输出通道输出高电平，即将代号为 11 的 1#杜瓦输液电磁阀打开，母缸开始给子缸输液氮；

当液面传感器显示液氮液面 LA1 低于高处液位 LA0.2 时，即表示液氮已经加满，这时 PLC 的数字量输出通道输出低电平，即将代号为 11 的 1#杜瓦输液电磁阀关闭，母缸停止给子缸输液氮；

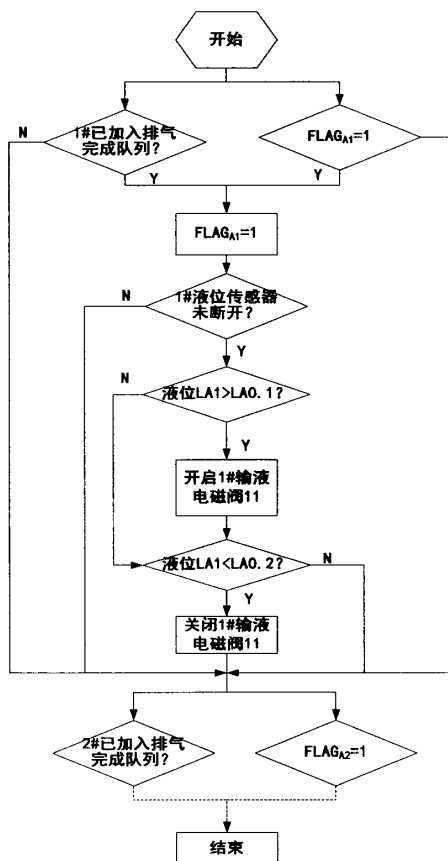


图 3.4.7 自动输液氮程序流程

当液面位置在高低铂电阻之间位置时，数字输出端口会保持当前的状态。具体说，如果当前的状态是加液氮状态，即此时液氮面在上升，设备会继续保持加液氮状态至高铂电阻的位置，此时系统停止加液氮；如果当前状态是液氮面在下降，即停止了加液氮，设备会保持停止加液氮状态至低铂电阻的位置，此时系统将重新进行加液氮。周而复始，这样子缸就在任何时刻都保持着低温环境。另外，为防止液位电阻失效而导致错误加液，本系统还在加液前还增加了一个液位传感器断开的判断设计。

3.4.5 自动排气控制

根据本章第一节中的真空系统控制要求，可将杜瓦抽真空的工作要点归纳

为以下几点：1、抽气优先级处理；2、抽气批量处理；3、间歇性抽气处理；4、随时性加入排气处理。根据上述工作要点，本文将所有杜瓦的工作状态分为如表 3.4.2 所示的几种状态队列，所有的工作状态队列均为双字型的整形数值，数值的二进制形式的 D0 为最低位，D31 为最高位，其中 D0~D19 分别表示 1~20 工位的各个工位在该队列中所处状态，1#工位对应 D0 位，19#工位对应 D19 位，D0=1 表示 1#工位处于该状态队列，反之，则不处于该队列，如所有工位均加入初次排气等待状态，则初排等待队列为：0000 0000 0000 0000 1111 1111 1111 1111 1111，如除 1 号工位外所有工位均加入初排队列，则初排队列为：0000 0000 0000 0000 1111 1111 1111 1111 1110。

表 3.4.2 杜瓦工作状态队列表

状态队列	加入条件
初排等待队列	对应工位 S 加入排气按钮被按下
初排队列	对应工位 S 已经加入初排等待队列或腔体压强<粗抽结束压强 A_0
排气完成队列	对应工位 S 已处于排气队列且等工位压强<排气完成压强值 A_3
重抽队列	对应工位 S 已加入排气完成队列且杜瓦内压强>重抽开始压强值 A_4

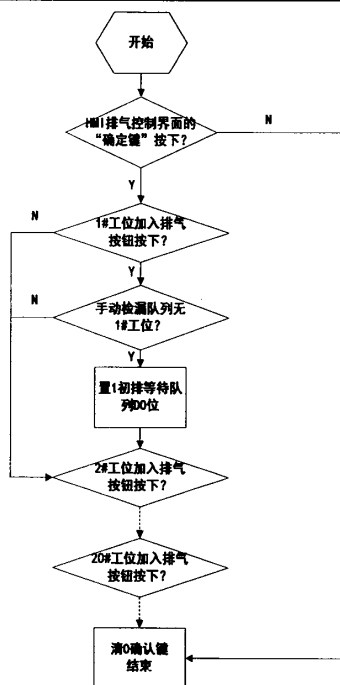


图 3.4.8 加入初排等待队列的流程图

初排等待队列的设定是用于实现杜瓦随时加入排气的功能，它通过捕捉加入排气按钮按下信息，将操作员的工位操作信息进行存储，待到工位满足加入

初排队列的条件后，将初排等待队列的有效工位转移至初排队列，然后释放初排等待队列中的信息。加入初排等待队列的流程图如图 3.4.8。

初排队列的设定是用于实现杜瓦批量处理排气的功能。只要真空系统的压强 \geq 分子泵的开启压强 A_0 ，加入初排等待队列的工位即可加入批量进入初排队列，然后将初排队列交由 PLC 进行初次排气，而不是一个个工位逐次进行排气。这样做的好处是即可以将真空度相似的工位进行批量排气，又可以通过分子泵开启压强的设定，将排气时间较长的工位与新加入排气的工位分离，防止真空度已达到较高程度的工位被重新带回大气压状态。加入初排队列的流程图如图 3.4.9。

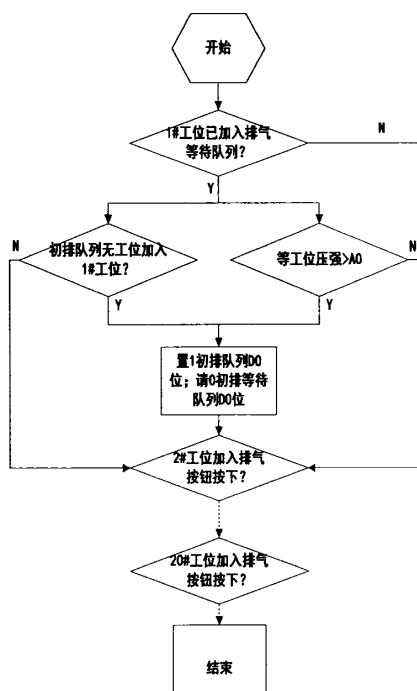


图 3.4.9 加入初排队列的流程图

重抽队列的设定是用于监视杜瓦内真空变化的情况，使杜瓦能及时进行重抽，以保证在长期寿命试验过程中器件所处的真空环境始终优于组件寿命试验的压强下限值 A_2 。杜瓦排气完成后，杜瓦会处于静态真空状态，一段时间过后，由于杜瓦的内部材料的放气和外部的漏气，杜瓦内真空上升。若工位已处于排气完成队列，且杜瓦内真空度 $>$ 重抽开始压强值 A_1 时，工位将从排气完成队列退出，加入重抽队列。加入重抽队列的流程图如图 3.4.10。

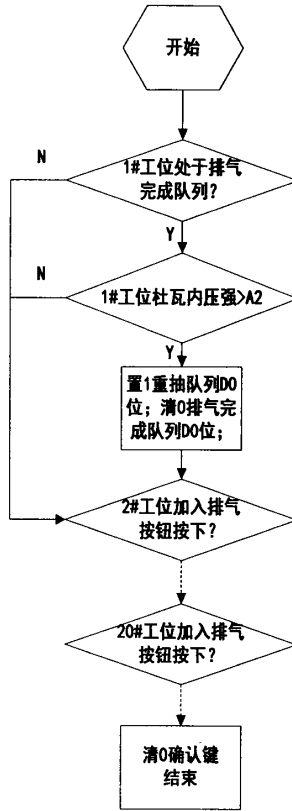


图 3.4.10 加入重抽队列的流程图

控制系统将上述的各个队列读入，然后根据各个队列的优先级处理，优先级执行按照表格自下往上执行，抽气的流程图如图 3.4.11 所示。由于自动排气控制系统中涉及到的定时器较多，为了防止误操作，当对某种队列进行处理时，其他队列涉及的定时器必须清零。同时在初排/重抽动作模块未通过粗检漏的工位直接加入手动检漏队列。

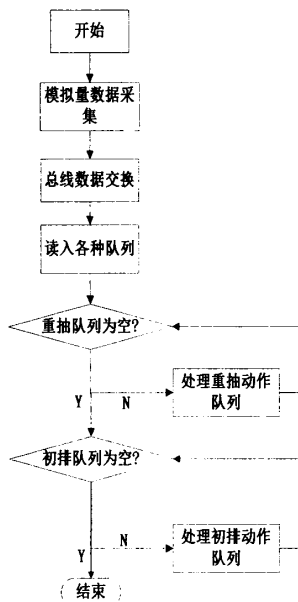


图 3.4.11 自动排气流程图

3.5 触摸屏人机界面程序设计

触摸屏监控界面软件采用 Wincc flexible 设计。它是一款功能强大的触摸屏人机界面设计软件，可使用此软件为人机界面设备创建操作员面板并配置操作参数。它提供了设计人机界面项目（包括从数据采集到创建并显示动画等各种任务）所需的所有工具。根据监控软件实现的具体功能，本软件设计了人机界面界面，如图 3.5.1:

a. 初始界面。主界面直观地显示了真空系统主要设备的工作状况及系统的真空度，若查看更详细的数据，则点击相应的图标或者按键，进入详细数据界面。

b. 主界面。将设备的所有数量开关和阀门以图画的形式显示于主界面，便于操作人员直接全面地掌握整个真空系统的工作情况。

c. 排气控制界面。实时显示排气队列情况，若向新加入工位进行试验或退出试验，可点击相应的工位的按钮，实现杜瓦随时加入或退出排气；

d. 报警界面。集中显示分子泵、机械泵、温控仪、插板阀等相关故障信息。一旦系统发生故障，界面弹出报警对话框，显示故障类型；该界面由报警指示灯、复位按钮等组成，设置有停止警示音和停止报警灯闪烁按钮，可以在线查看和复位报警。

e. 手动界面。手动界面可供操作员手动操作真空系统中的任一阀门和任一加热器开关，起停分子泵、机械泵等。

- f. 参数设置。供操作员设定工位的烘烤温度、杜瓦预定保持时间、工位排气完成真空度，初排动作时间等；
- g. 数据显示。显示真空排气工位处的参数和相关操作。
- h. 用户管理。设置用户信息，用于用户登陆等；



图 3.5.1 触摸屏人机界面图



图 3.5.2 触摸屏排气控制界面图

3.6 控制系统的调试

控制系统硬件和软件设计完成后，进行了系统的集成，而后对系统进行调试。本章完成了系统硬件的设计和软件的编程，其系统调试过程的实物图如图 3.6.1 所示，其中，图 3.6.1(a)、3.6.1(b)为控制总系统的实物图，其中包括 PLC、信号模块、分子泵通信模块、温控仪、触摸屏及控制执行元件等；系统经过初步调试，可实现 PLC 集中采集所有现场数据、分子泵控制、温控仪器控制、自动输液控制。工位自动排气控制已通过电脑仿真和实际运行试验。

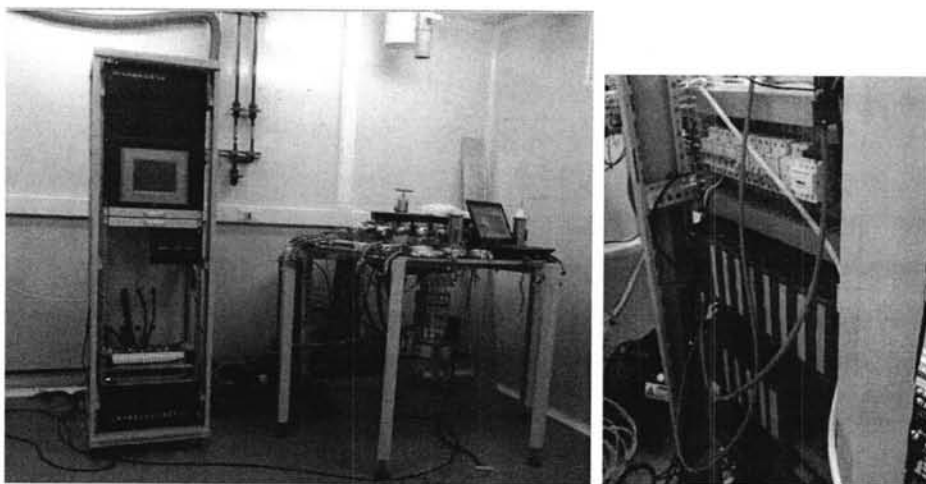


图 3.6.1(a) 集成后的控制系统实物图(正面) 图 3.6.1(a)集成后的控制系统实物图(背面)

分子泵状态显示和控制通过 PLC 编程软件 STEP7 的变量表监控，可实现 PLC

对分子泵的控制，控制情况如图 3.6.2，图左边为 STEP7 的变量表监控表、图中右边为 TMP 网络适配器的输入输出量缓冲区的定义。从图中可以看出，地址偏移量为 12 字节的 PIW212 的变量值为 688、Q0.7 为 1，结合右侧 TMP 网络适配器的输入输出量缓冲区的定义，可得知分子泵状态为开启状态，分子泵的转动频率为 688Hz，其中通过变更 Q0.7 的变量值可变更分子泵的状态；温控仪控制同分子泵一样，通过 PROFIBUS-DP 总线与 PLC 进行数据交换，温控仪控制的情况如图 3.6.3，从图中可以看出温控仪控温稳定，开启 10 分钟后波动范围小于 1℃。

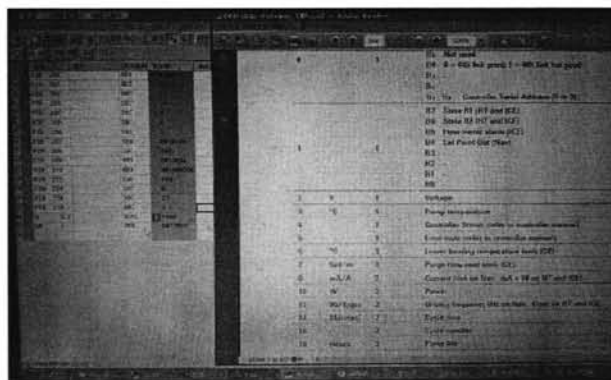


图 3.6.2 分子泵控制的控制情况

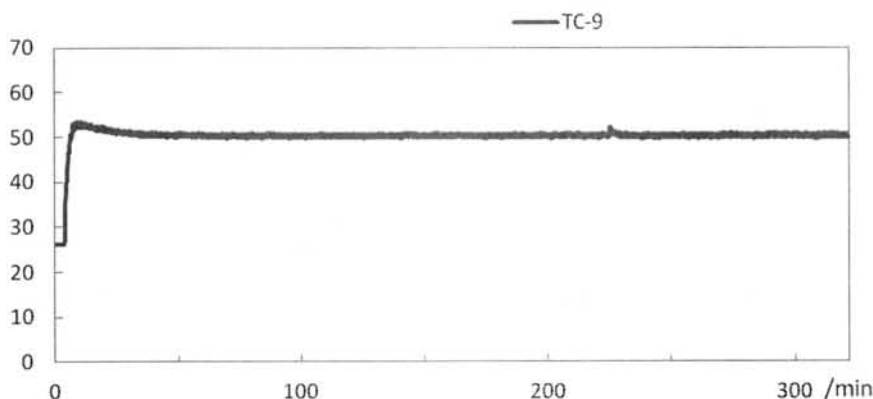


图 3.6.3 温控仪的控制控制情况

自动低温维持方面，按照上述的自动低温维持算法，对该设备的自动低温维持进行了试运行试验，试运行的结果如图 3.6.4 所示，图中的三条曲线分别为输液冷平台温度 TA、TB、液位传感器的阻值随时间变化图，从图中可以看出，TA、TB 随温度变化很小，基本维持在液氮温度（仅在加液点处出现 40K 的跳变，这是因为输液管过于接近冷头，输液开始时，输送的是温度比较高的氮气，因此出现这个现象。可以通过缩短输液管的长度来改进这一问题。），可以实现自动低温维持。

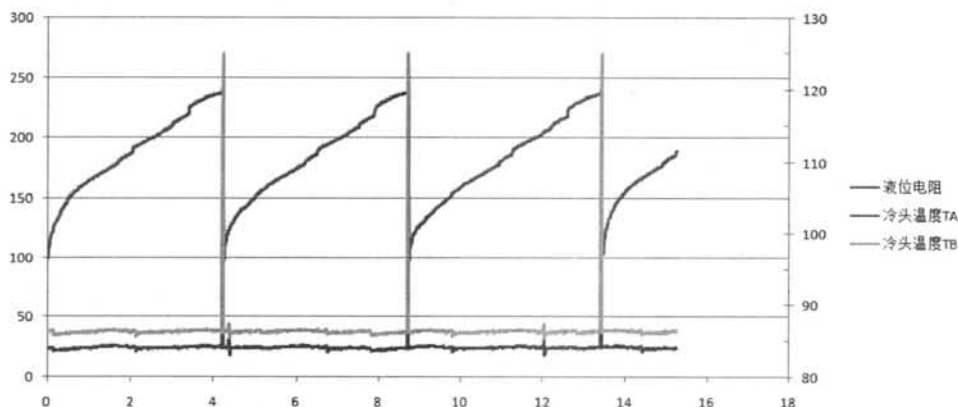
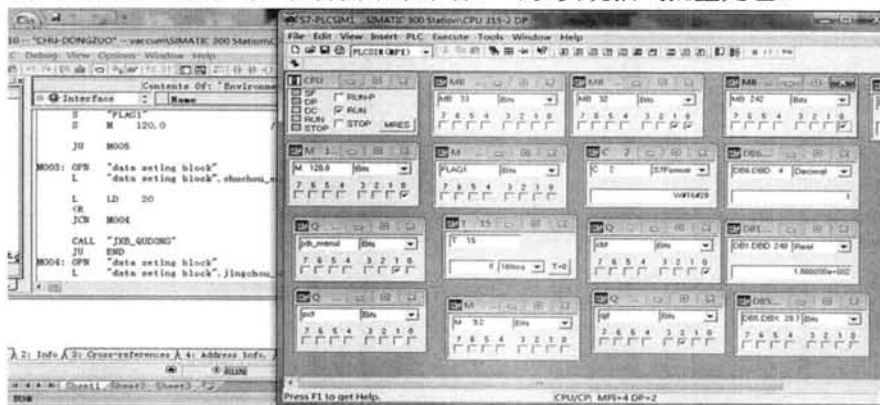


图 3.6.4 自动输液氮冷平台温度时间变化图

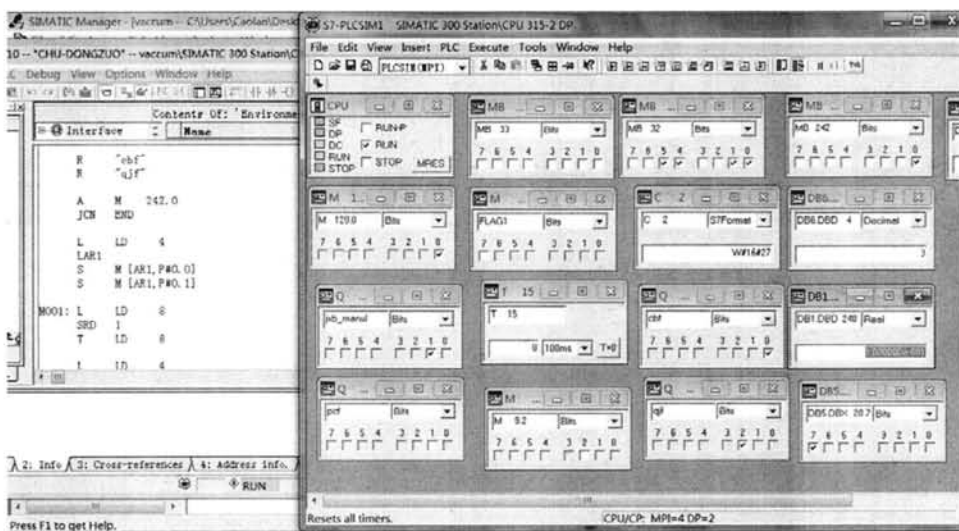
自动排气控制方面，由于排气过程较复杂，本文先采用 PLCsim 软件对控制系统进行了全面的仿真。仿真通过后，然后将该自动排气算法下载到 PLC 进行了自动排气控制试运行试验。

真空系统要实现的功能有以下几点：1、抽气批量处理；2、间歇性抽气处理。以下是这两个功能的 PLCsim 仿真情况，论述中所有逻辑量为 1 对应部件的开启状态，逻辑量为 0 对应关闭状态。

(1) 对于抽气批量处理，其仿真结果如图 3.6.5(a)和 3.6.5(b)所示，3.6.5(a)为设备已有工位进行排气仿真图，3.6.5(b)为另有新工位加入排气的仿真图，从 3.6.5(a)图中看出，初排队列 DB6.DBD4 的二进制值为 01，即初排队列有 1#工位正在进行排气，等工位真空度 DB1.DBD240 为 100Pa，前级阀 QJF、插板阀 CBF、机械泵输出 JXB_MANUL 为 1，分子泵状态 DB5.DBX20.7 为 0，1 支路上 CKD 阀门和 VAT 阀的位存储器 M32.0、M32.1 为 1；初排队列 DB6.DBD4 的二进制值设为 11，即表明 2#工位也需要进行排气并已经加入了初排队列，如图 3.6.5(b)所示，此时 1#、2#工位支路 CKD 和 VAT 对应的位存储器 M32.0、M32.1、M32.4、M32.5 均为 1，主腔体的泵组状态输出不变，表明 1#、2#工位均已挂载至公共主腔体进行排气。从仿真结果来看，可以实现抽气批量处理。



3.6.5(a) 批量处理排气

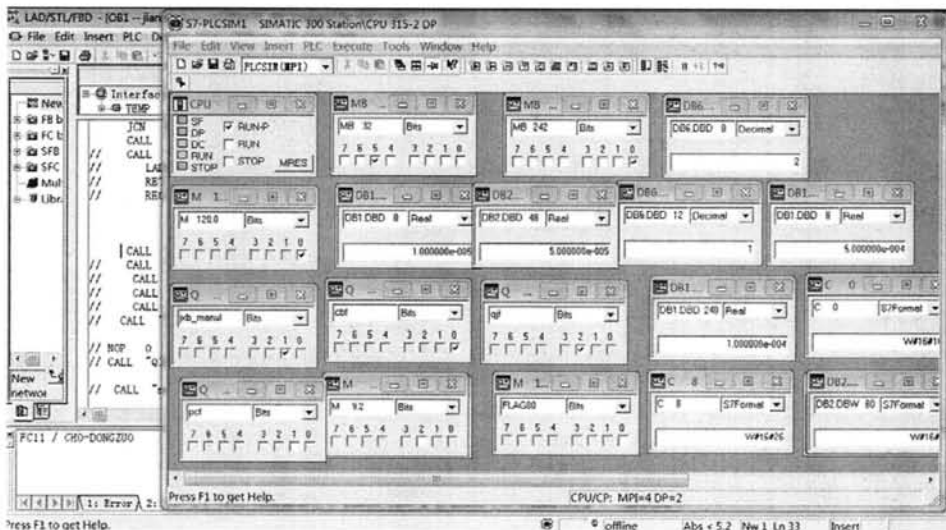


3.6.5(b) 批量处理排气

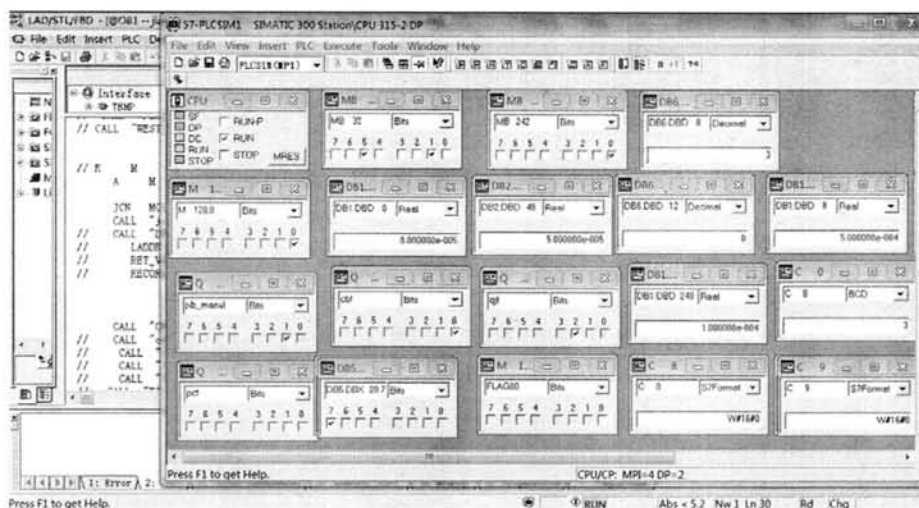
(2) 间歇性抽气处理

对于单个工位间歇性抽气，仿真结果如图 3.6.6(a) 和 3.6.6 (b) 所示，3.6.6(a)为间歇排气前真空系统的状态。从图中看出，排气完成队列 DB6. DBD12 的二进制值为 1 即 1#工位已经完成排气，处于静态真空状态。1#杜瓦的真空度 DB1. DBD0 低于设定真空度 DB2. DBD48，1#工位支路 CKD 和 VAT 对应的位存储器 M32.0、M32.1 均为 0，对应阀门为关闭状态，泵组为关闭状态。1#工位静态密封一段时间后，当 1#杜瓦的真空度 DB1. DBD0 高于设定真空度 DB2. DBD48 时，真空系统的状态如图 3.6.6 (b) 所示。从图中看出，1#工位从排气完成队列转入重抽队列，排气完成队列 DB6. DBD12 的清零，重抽队列 DB6. DBD8 的二进制值变为 1。同时分子泵状态 DB5. DBX20.7、机械泵 JXB_MANUL、前级阀 QJF、插板阀 CBF 均为 1，主腔体的主抽通道为开启状态，1#重新挂载至公共主腔体进行排气。从仿真结果来看，系统可以实现单个工位重抽排气处理。

均为 1，泵组输出维持不变，1#和 2#工位均已挂载至公共主腔体进行排气。从仿真结果来看，系统可以实现重抽抽气批量处理。

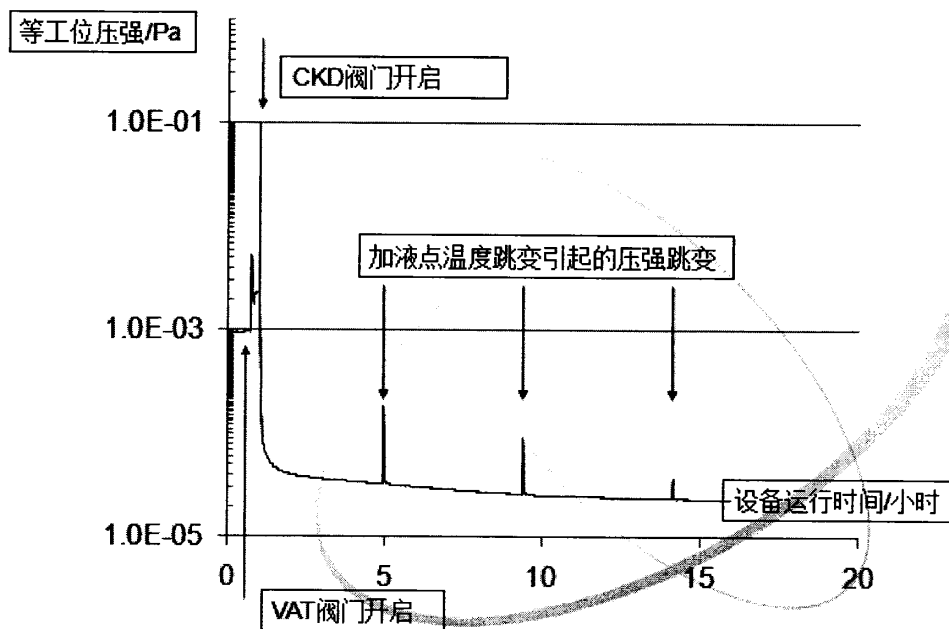


3. 6. 7(a) 多个工位重抽处理排气



3. 6. 7(b) 多个工位重抽处理排气

在上述的自动排气仿真过程全部正确完成后，将该自动排气算法下载到 PLC 进行了自动排气控制试运行试验。试运行的结果如图 3. 6. 8 所示，在相继自动开启主腔体密封电磁阀 VAT 和杜瓦密封电磁阀 CKD 后，自动排气过程开启，在经过 20 小时的排气后，其真空度可达 $2.4 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 。满足寿命试验的自动排气要求。



3.6.8 设备自动排气试运行的真空度变化情况

3.7 本章小结

根据真空排气工作原理和低温维持工作原理，将碲镉汞红外探测器组件寿命试验要求具体化，得出了控制系统的各项控制指标。针对控制系统的控制要求，提出了控制系统的总体分布布局：上位机监控、控制柜、现场执行设备、HMI；对控制系统的硬件和软件进行了设计。

从硬件上，控制系统的硬件设计可大体分为以下几个方面：

(1) 上位计算机硬件配备。为了进行数据采集工作，上位计算机配备了USB转MPI通信网卡CP5711；

(2) 可编程控制器PLC选型。依据控制系统的I/O点数，系统选择了西门子的中型控制系统控制器S7-300系列，通过对比该系列的几种CPU的性能指标，系统选用了该系列的CPU315-2DP；

(3) 信号模块的选型。从响应速度、支持的传感器种类数目、模块通道数等方面对比两种信号模块（分布式模块和背板总线模块）的优劣，系统的信号模块选择了PLC背板总线I/O模块。

(4) 通信链路的选择。通信链路负责上、下位机之间通信方式，系统采用了MPI总线；

(5) 控制总线的选择。基于Profibus-DP高可靠、高速度传输的特点，系统的控制总线采用了Profibus-DP总线；

(6) 温控模块选型。基于真空管道烘烤的要求，系统采用了多回路温控模

块 MLC9000+。

从软件上，控制系统的软件设计可大体分为以下几个方面：

(1) PLC 软件设计：自主设计了自动低温维持和真空自动排气。

(2) 人机界面软件设计：设计了多个信息交互界面，可实现手动操作仪表和阀门、环境数据实时显示、工位排气状态实时显示、故障信息报警功能。

在控制系统的硬件、软件设计完成后，对该控制系统进行调试和仿真，调试结果显示，该系统初步实现了 PLC 集中采集所有现场数据、分子泵控制、温控仪器控制、自动输液控制、自动排气控制等功能。其自动控制的真空和温度等参数可满足寿命试验的要求。

4 设备的自动阻值测试

空间应用的红外探测组件具有高可靠性要求,其失效率不超过 $1\text{Fit}(10^{-9}/\text{h})$ [84~88], 红外组件交付前需要进行寿命试验, 以获取红外组件的工作寿命指标。一般来说, 当红外组件发生失效时, 会伴随着很多特性参数的变化, 如电阻, 电压信号, 噪声电压, 黑体响应等, 因此, 要获得红外组件工作寿命指标, 需要精确的参数测量系统进行定期的测量, 以准确获取组件的失效时间, 此外, 空间应用红外探测器价格昂贵, 测量系统必须安全可靠以避免在测量过程中给器件带来损害。

在传统的寿命试验中, 为了实现测量系统的安全性, 其测量系统是通过真空容器引出的光敏元连线进行定期手动电阻测试的 [89], 这样大大增加了电阻测试的不准确性和不方便性, 寿命试验过程中积累的数据量也极为有限, 为此, 本章提出了将控制模块和测试模块进行分离设计的自动老化和测试方案。基于可编程逻辑控制器 PLC 的可靠性高、稳定性好等优点 [90~95], 本文采用工业控制器 PLC 控制模块实现寿命试验过程与测试过程的切换控制, 采用单片机和计算机 LabVIEW 程序来控制 and 监测测试模块。

该自动阻值测试的老化试验设备具有操作步骤简单, 老化和测试过程安全可靠等优点。用户只需点击人机界面的开始键即可实现寿命试验过程和测试过程的自动控制。其在测试过程中所获得的数据, 该测试系统均会以文本格式储存, 可方便用户随时调用每一步的测试结果, 及时对数据进行分析。另外, 该系统还有一些的数据处理功能, 能自动剔出试验中可能失效的组件并即时报警。

4.1 电阻自动测试系统技术要求及指标

碲镉汞红外组件的电阻从 20 欧姆到 200 欧姆不等, 而长期寿命试验的失效判据为: 阻值变化超过 $\pm 20\%$ 范围即判定光敏元失效。为了准确对光敏元的失效进行判断, 阻值测量引入的误差应小于失效判据, 因此本测试系统的精度要求为应小于 0.4 欧姆。系统的具体技术指标如下:

- 1) 测量精度 $\leq 0.4 \Omega$;
- 2) 测量范围: $0\sim 500 \Omega$;
- 3) 最大一次测试 20×54 通道光敏元电阻, 每路光敏元独立测量;
- 4) 为不影响寿命实验, 每个通道的测试过程需尽可能快的进行, 20×54 通道测试的时间应该控制在 60 分钟内完成。
- 5) 自动测试, 自动数据存储;

- 6) 当器件的阻值变化超过 $\pm 20\%$ 范围时, 即时进行报警并显示该器件的序号和阻值变化幅度;
- 7) 测试过程安全可靠, 瞬时电流干扰应小于 1mA。

4.2 电阻自动测试总体实现方案

为了实现在长时间的寿命试验过程中对探测器阻值自动测试要求, 本章采用了如图 4.2.1 的电路结构。相比于传统寿命试验电路结构, 该系统在传统寿命试验电路结构基础上增加了电路保护单元、老化和测试过程切换控制单元、多路电子开关阵列及数据采集器四个部分。

1) 电路保护单元

电路保护单元由保险丝、滤波电容以及三种浪涌抑制器件组成, 利用以上电路保护单元各自的特点, 可以可靠地保护光敏元器件的安全。其中采用的三种浪涌抑制器件分别为气体放电管、浪涌抑制 TVS 二极管及压敏电阻。

2) 老化和测试过程切换控制单元

该自动测试系统采用了 PLC 控制继电器开关进行老化和测试过程切换的控制单元, 其主要原因有以下几点: 1) 将探测器的寿命试验过程与阻值测试过程分离, 当 PLC 控制的继电器开关从闭合变换到断开时, 组件才从寿命试验状态变为测试状态, 从而确保阻值测试的准确性; 2) 当测试系统或者试验系统出现问题时及时切断老化电流, 以减少对组件的损坏。

3) 多路电子开关阵列

多路电子开关阵列由多片具有使能控制的单刀双掷电子开关组成, 可实现待测光敏元在老化和测试状态之间进行转换。当系统处于阻值测试过程时, 多路电子开关阵列可将不同的光敏元分时接入数据采集器两端, 为实现阻值自动测试提供先决条件。该电路由单片机控制, 当某路光敏元需要进行数据采集时, 单片机向电子开关阵列发送相应的信号, 以开启连接在该路对应的电子开关以及闭合其它光敏元所对应的电子开关。同时当开关动作完毕后对数据采集器发出阻值测试准备信号。

4) 电阻数据采集器

电阻数据采集器是实现阻值自动采集的测量工具, 用来完成阻值的采集工作。同时在本系统中, 采集器的数字量 I/O 口还需作为单片机和计算机的通信平台。本系统采用的数据采集器为 fluke 2620A[96], 该数据采集器具有 RS232 数据通信接口、8 位数字量输入输出接口 DI/O、21 个测试通道, 可进行多通道测量, 可测量电压、温度、电阻和频率。

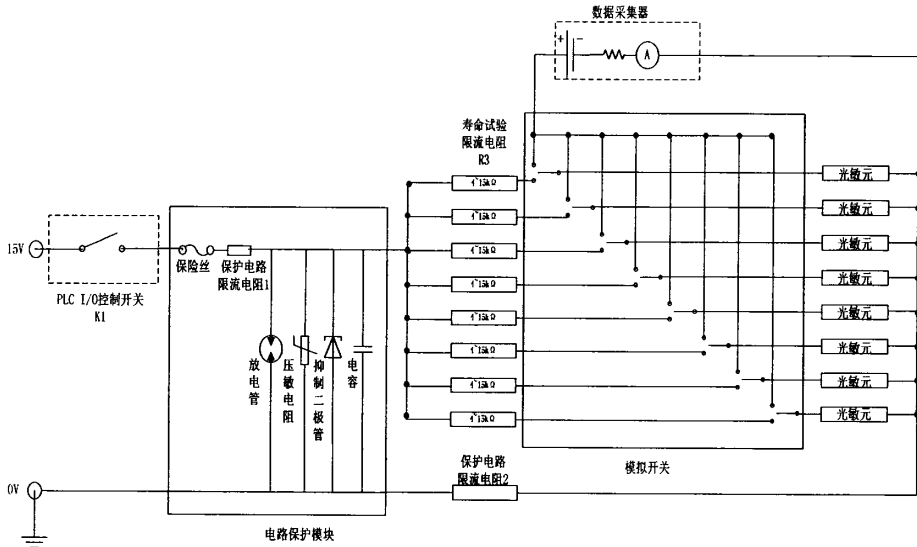


图 4.2.1 探测器自动阻值测试电路原理图

4.3 多路开关阵列电路设计

电阻值自动测试系统中，多路开关阵列的作用是：通过切换模拟电子开关的接通触点，可将光敏元接入不同的回路中以实现不同的功能。当光敏元需要进行寿命试验时，SPDT 电子开关导通寿命试验限流电阻端的触点，从而将光敏元接入寿命试验的 DC15V 的回路中；当光敏元需要进行参数测量时，则将 SPDT 电子开关导通到参数测量回路中。因此多路开关阵列及其控制电路为电阻自动测试系统的核心电路。

4.3.1 电子开关芯片选型

为满足电阻自动测试系统的性能技术指标要求，对市面上现有的芯片进行全面的选型。由于现有的 SPDT 成品通道总数最多只能达到的 4 路。本系统可选择使用多个 4 通道的 SPDT 芯片组成开关阵列。多个芯片扩展的方式主要有两种：I2C 总线扩展和编译器片选扩展[97~100]。然而带有 I2C 总线扩展的 4 通道的 SPDT 开关仅有 ADG791A 一种[101]，且该芯片没有硬件的片选信号端，这使得此中芯片最多只能扩展到 23 路，不能满足系统的要求。因此本开关阵列选用编译器片选扩展的方案，选择的 SPDT 芯片为 ADG1634[102]，为 4 通道的 SPDT 开关，其内部逻辑结构图如图 2。其中 \overline{EN} 为芯片的片选信号，它为低电平有效，当 \overline{EN} 为低时，每路通道均可通过外接的 $IN1 \sim IN4$ 进行独立操作，反之 \overline{EN} 为高，公共端 D 不连接任何通道即所有通道均处于断开的状态。

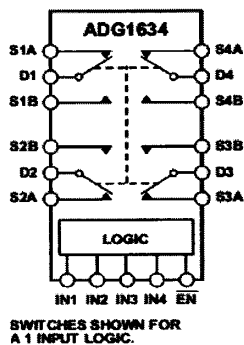


图 4.3.1 ADG1634 内部逻辑结构图

表 4.5.1 ADG1634 的真值表

\overline{EN}	IN _x	S _x A	S _x B
1	X ¹	Off	Off
0	0	Off	On
0	1	On	Off

其中, X1=管脚悬置;

4.3.2 测试板设计方案

考虑到系统的布局布线和扩展性的便利,可将 20×54 通道的开关阵列设计为 1 块总控制板和最大可扩展至 20 块的测试板组成,其中每块测试板包含 54 个通道。每个测试版的电路结构完全一样,每个测试版都可各自完成不同通道探测器的寿命实验和电阻测试,其控制信号不同之处仅在于其片选信号电平高低的不同。

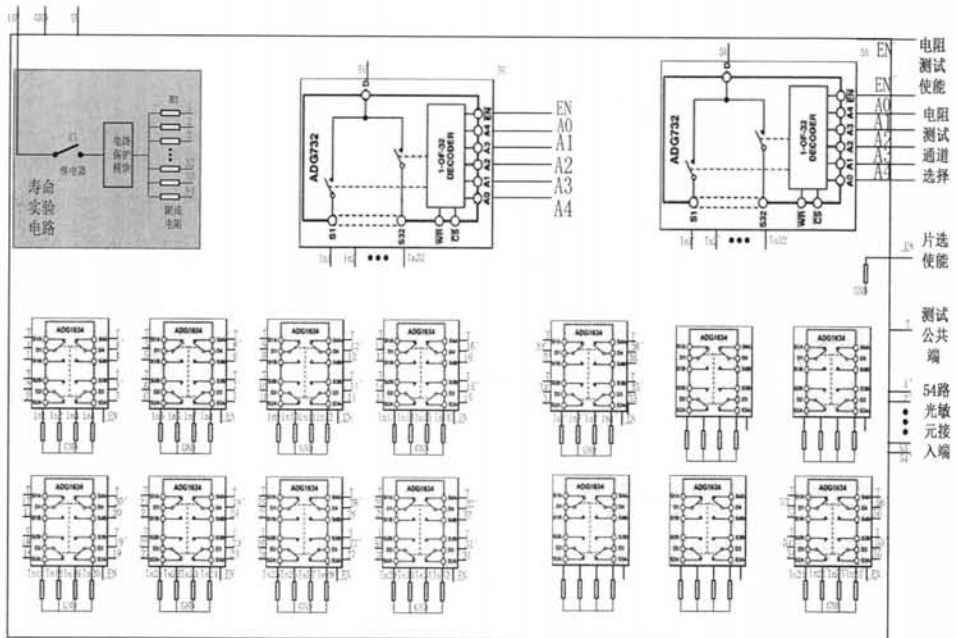


图 4.3.2 可扩展的 54 通道电阻自动测试板电路示意图

可扩展的通道电阻自动测试板电路示意图如图 4.3.2 所示，红色标示为电气节点名称，两个相同的电气节点名代表它们之间在电路中为同一电路节点。该电路的简要介绍如下：

1) 所需芯片

从图中可以看出，该电路所需芯片主要包括 14 片 4 通道的单刀双掷电子开关 ADG1634 和 2 片用于自动测试过程用于通道选择的 32 路多路复用开关 ADG732。

2) 电路的输入输出端口

该电路的端口包括：电源输入端、测试信号输入端、测试公共端、测试通道选择控制端、测试使能控制端以及用于测试版扩展功能的片选使能端。

- 电源输入：包括 15V 的寿命实验电源和 5V 的测试电路电源；
- 测试信号输入：包括通道的光敏元输入；
- 测试公共端：测试公共端 T 输出接至数据采集器（FLUKE 表）的一个测试端；
- 测试通道选择控制端：5 路测试通道选择信号，可通过 32:1 的多路复用开关 ADG732 实现 32 路光敏元的测试通道依次选通控制；
- 电阻测试使能控制：2 个电阻测试使能端 EN_ADG1 和 EN_ADG2 用于控制两片 ADG732，其为低电平时为电阻测试过程开启，为高电平时电阻测试过程关闭；
- 片选使能信号 EN_X 用于扩展测试板，当测试板的片选使能为低电

平时，测试板被选通，该测试板上的 54 个测试通道可进行老化或测试操作。

3) 工作原理

设备处于寿命实验过程时，其电路状态为：继电器开关 K1 闭合；片选使能端 EN_X 置低，也可不需外加控制信号（注：片选使能外加下拉电阻已下拉至低电平），即此时所有测试板都选通；所有测试板的电阻测试使能高电平，即电阻测试功能关闭；测试通道选择信号可为任意状态（此时因 ADG1634 的使能为高电平，因此该多路复用开关断开，测试通道选择信号可为低电平、高电平或高阻态亦可）；

寿命实验时，其工作原理为：所有的测试板都通过片选选通，每个测试板上的光敏元电阻都导通至 15V 的老化电路中进行寿命实验。此时，没有通道选通至测试公共端。

设备处于测试过程时，电路状态及工作原理为：继电器开关 K1 断开，寿命实验中止；不同测试板的片选使能端通过不同的片选控制信号依次被片选选通；所有测试板共用两路电阻测试使能，交替的置于低电平；所有的测试板使用相同的测试通道选择信号，使得测试板上的通道依次导通至公共测试端。测试开关阵列工作的时序图如图 4.3.3

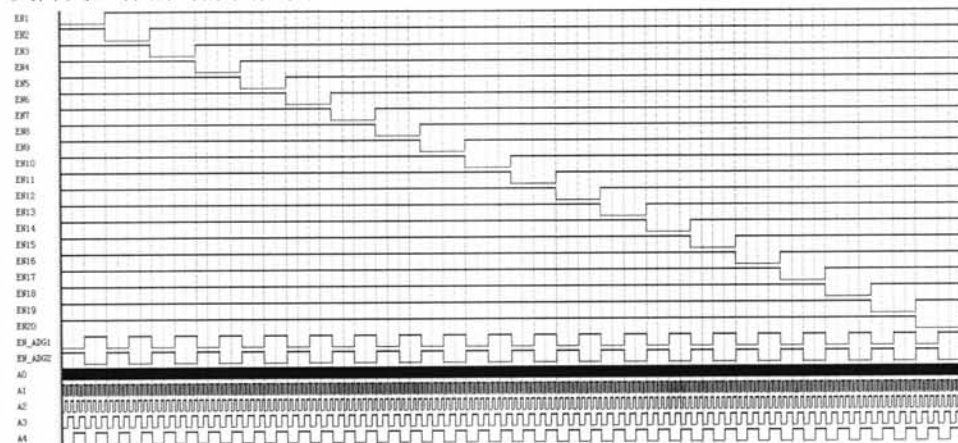


图 4.3.3(a) 开关阵列工作的时序图

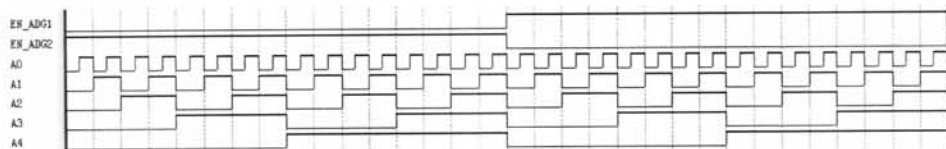


图 4.3.3(b) 开关阵列工作的时序图

4.3.3 控制板设计方案

控制板的电路设由一片 51 单片机和一系列控制线组成。从上面的测试的方

案可得出一个工位即一块测试板应包含的控制线有：5 路测试通道选择信号线、2 个电阻测试使能端 EN_ADG1 和 EN_ADG2、1 个片选使能信号 EN_X、2 个数据采集器置位信号。在控制板的设计方案中，20 个工位将共用 5 根的测试通道选择信号、2 个电阻测试使能端 EN_ADG1 和 EN_ADG2，而片选使能信号 EN_X 将 20 个工位逐个使用，分别为 EN_1, EN_2...EN_20。该控制板即可以产生 20 路片选使能信号，即可控制最多达 20 片电阻自动测试板，最大可自动测试电阻通道数达 20×54 。同时，单片机只需产生 $7+20+2=29$ 路的控制信号，一般的 51 单片机的片上资源即可满足该要求[103]。

4.3.4 系统总体示意图

根据前面的测试板和控制板的设计和分析，可以得到电阻自动测试系统的总体结构图如图 4.3.4 所示。该系统中测试板之间的测试公共端共用，一起接至数据采集器的一个输入端（即 FLUKE 的一端）。不同测试板之间的电阻测试使能信号以及电阻测试通道选择信号共用，而不同测试板之间的片选信号则各不相同，这些控制信号一起由控制板产生。

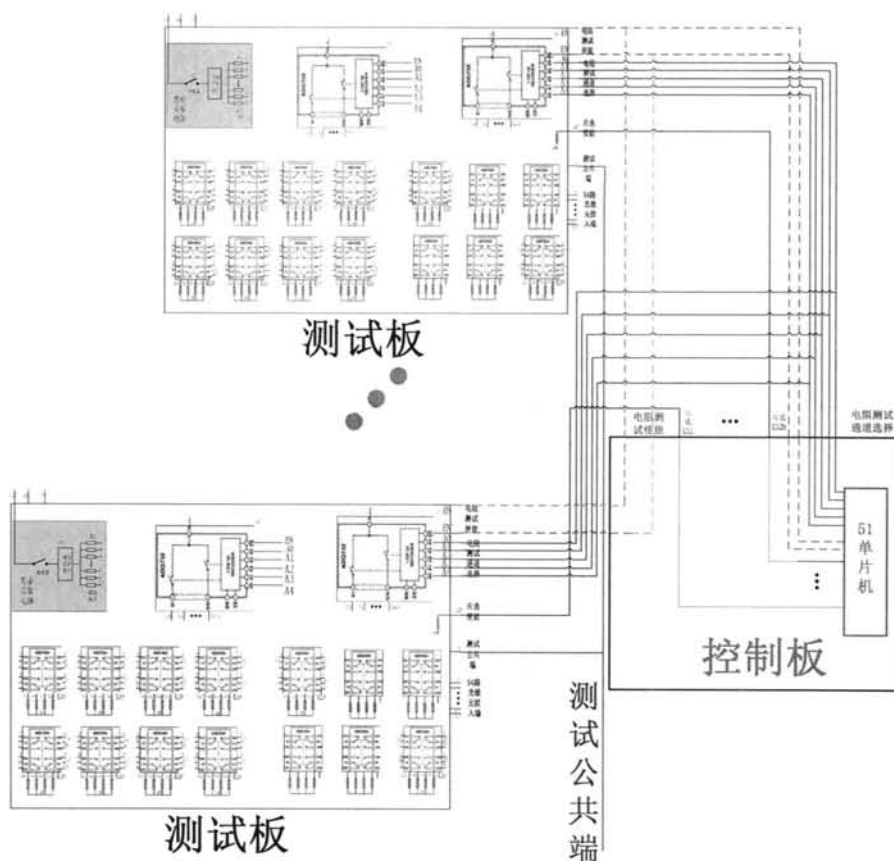


图 4.3.4 电子开关阵列总体示意图

4.4 自动测试系统测试可靠性分析

4.4.1 自动阻值测试精度

光敏元所在电路可等效为如图 4.4.1 所示的电路图。由图 4.4.1 可得，数据采集器测到的阻值为 $R_{\text{总}}$ ，为开关芯片的导通电阻 R_1 与光敏元的电阻 R_0 之和。因此导通电阻 R_1 的波动对测试的精度将会带来直接的影响。本测试系统选用的数据采集器为 fluke 2620A，该采集器的测量精度如表 4.4.1。选用的档位为 $3\text{K}\Omega$ ，测试精度为 0.1Ω ，开路电压为 1.5V ，流经测试电路的最大电流为 $110\mu\text{A}$ 。保险起见，本文要求在恒定室温的情况下，模拟电子开关导通时产生的导通电阻 R_1 的变化须小于 0.3Ω ，瞬时电流小于 1mA 。而本文的 ADG1634 在恒定室温下的导通电阻的波动小于 0.3Ω [102]，足以满足测试的要求。

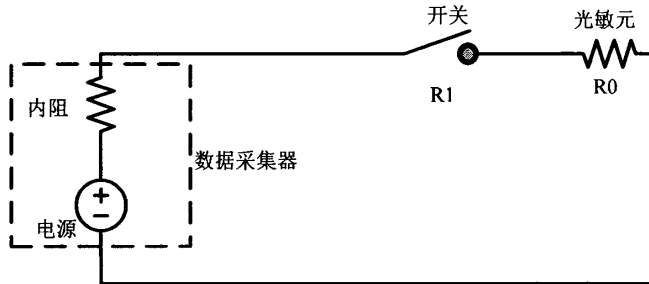


图 4.4.1 光敏元所在电路的等效电路图

表 4.4.1 数据采集器 2620 的测试精度

量程范围	测试模式		回路最大电流	开路电压
	慢	快		
300Ω	$10\text{m}\Omega$	0.1Ω	1mA	3.2V
$3\text{k}\Omega$	0.1Ω	1Ω	$110\mu\text{A}$	1.5V
$30\text{k}\Omega$	1Ω	10Ω	$13\mu\text{A}$	1.5V
$300\text{k}\Omega$	10Ω	100Ω	$3.2\mu\text{A}$	3.2V
$3\text{M}\Omega$	100Ω	$1\text{K}\Omega$	$3.2\mu\text{A}$	3.2V
$10\text{M}\Omega$	$1\text{K}\Omega$	$10\text{K}\Omega$	$3.2\mu\text{A}$	3.2V

4.4.2 自动阻值测试安全可靠性

寿命试验是用于评价器件产品的寿命特征的试验，试验时间很长，一般都会持续半年、一年以上。为保证器件在这么长的时间上进行可靠的寿命试验，对系统的稳定度和安全度有着很高的要求。相对于单片机，用于工业控制的 PLC 的稳定性更好，因此系统采用 PLC 作为整个系统的控制中心。同时由于系统需

经常开始和中断寿命试验进行器件性能测试，在电源开启和关断时极易形成浪涌电流，此外，电源的波动，外界的干扰等，都容易形成浪涌电流，这些浪涌电流对器件的危害极大，严重时甚至会烧坏探测器器件。因此，在寿命试验的自动测试系统中加入保护电路来确保探测器器件的安全就显得非常的重要。

如图 4.2.1 所示，保护电路由保险丝、RC 低通滤波、瞬态抑制二极管 (TVS)、气体放电管以及压敏电阻组成。保险丝作为第一级高电压保护措施，当电路里存在持续的高电压时，会通过熔断保险丝来切断光敏元与电源的连接。RC 低通滤波可以滤除高频的浪涌电流，在本系统中，保护电路限流电阻 1 的电阻 $R_1=100\ \Omega$ ，电容 $C=10\ \mu\text{F}$ ，该滤波器可滤除频率在 160Hz 以上的浪涌电流干扰。另外，为保证电路器件的安全，选取了 1.5KE20CA 的瞬态抑制二极管来泄放浪涌电流。该 TVS 的截止电压 V_{RWM} 为 17.1V，最大箝位电压 V_C 为 27.7V，最大峰值泄漏电流为 54.2A，可在皮秒量级响应浪涌电流，以实现在瞬时浪涌电流小于 54.2A 的情况下保证探测器的电流变化小于 1mA，可有效的保障探测器的安全[104]。此外，保护电路中还使用了可于微妙量级响应的压敏电阻以及毫秒量级响应的气体放电管来增强浪涌电流的泄放功能。

4.5 自动数据采集

4.5.1 自动数据采集控制流程

将 20×54 路待测光敏元按照原理图 4.3.1 接线，即将 54 路元器件一端分别接到开关阵列接头 $1' \sim 54'$ ，另一端接到公共测试端 T，T 接到数据采集器的输出端。当测试间隔时间到达时，系统运行的步骤如图 4.5.1:

- 1) PLC 断开 K1 开关，将所有的光敏元的寿命试验状态切换到阻值测试状态；并向单片机发送测试开始命令；
- 2) 多路电子开关阵列 EN_1 将置低为 0，其他的片选拉高，片选中 1#工位的测试板，然后切换回路编号最小的单刀双闸开关，多路开将该路元器件连接至数据采集器，同时置位数据采集器的数字量输入输出 DIO 的 D2 位，发送开关就位信号；
- 3) 计算机从数据采集器上通过 RS232 接口读取多路电子开关阵列数字量输入输出信号 DIO，若读取到开关就位信号即 $D_2=1$ ，计算机则向数据采集器发送数据采集命令，并等待数据采集器的回馈信息；
- 4) 计算机接收到数据采集器返回有效数据，将返回的有效数据进行存储，并向多路电子开关阵列发送数据采集完毕信号，并通知多路电阻开关阵列准备下一回路的光敏元测试。
- 5) 重复步骤 2~4，对所有待测的元器件进行测试。

- 6) 当所有待测的元器件测试完毕, 计算机向多路电子开关阵列发送测试完毕信号。
- 7) 多路电子开关阵列收到计算机发送的测试完毕信号后, 多路电子开关阵列将所有完成测试元器件所在回路的单刀双闸开关进行切换, 以将所有的敏感元连接至试验电源上, 让元器件继续进行试验;

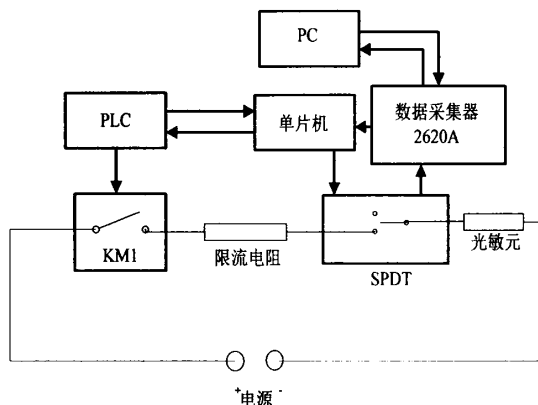


图 4.5.1 电阻自动测试控制框图

4.5.2 上位机软件设计

1) 界面设计

上位机软件设计主要利用 LabVIEW 软件的强大的图形编程能力和数据计算处理能力[105~108], 完成阻值的数据采集、测量、控制, 测试结果的分析、计算和保存等, 同时为用户提供优美、方便的操作界面。图 4.5.2 为上位机的 LabVIEW 监控界面。该 LabVIEW 软件主要由光敏元阻值数据采集、数据检测、数据存取及数据分析等模块组成。基于 LabVIEW 的测控系统软件采用模块化的思想来编写, 每个功能的实现均由一个模块完成, 从而最终实现数据采集、处理、报警显示等功能。

2) 数据采集

计算机通过串口通信的方式, 向 fluke 2620A 数据采集模块发送数据采集指令, 以获得各路光敏元的阻值, 并把采集到的阻值数据用 LabVIEW 软件界面实时保存到数据表中, 以备后续的数据处理、计算及打印。

3) 数据存取和数据处理

数据存储部分主要是将采集到的光敏元阻值数据以 txt 文件和 Excel 文件存储, txt 文件是用来建立记录集, 执行数据文件的操作, 满足历史报表数据的查询和打印。而 Excel 文件是用来进行数据比较的, Excel 文件有两个, 其分别保存着最近两次测量的光敏元阻值信息, 系统通过对比两个 Excel 文件中

各路光敏元的阻值来判断光敏元阻值是否出现异常现象。考虑到测量系统的误差，当同一个光敏元两次测到的阻值变化超出 $\pm 30\%$ 时，通知单片机重新测量一遍，若阻值变化还是超出范围，则通知单片机停止试验，标出出现问题的光敏元。

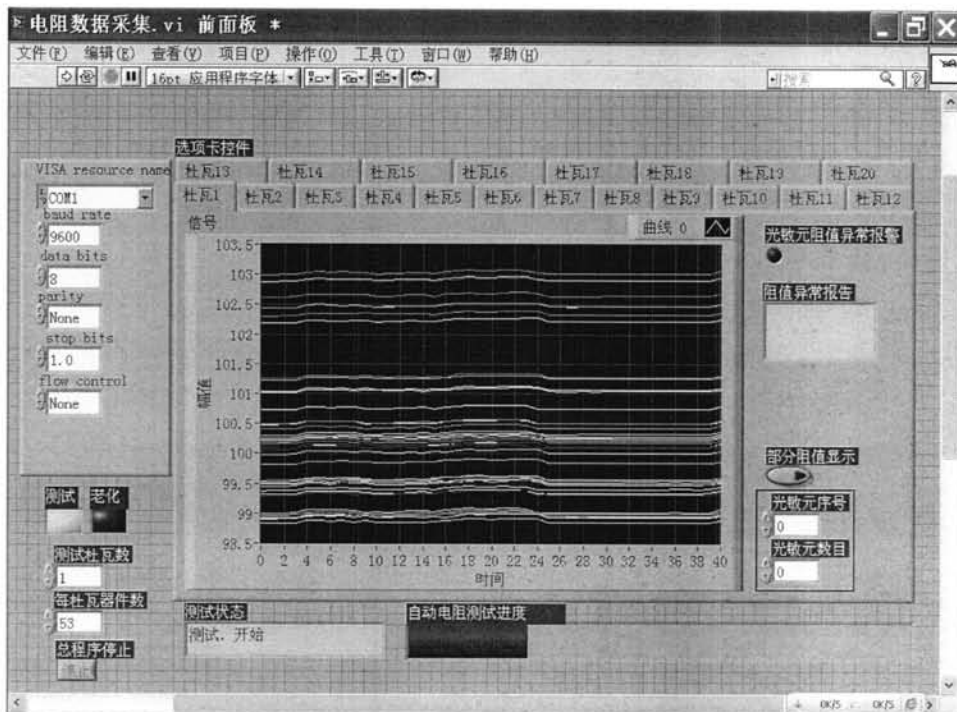


图 4.5.2 电阻自动测试主界面图

4.5.3 下位机软件设计

本系统中，PLC 是整个系统的控制中心，其通过定时中断，将光敏元从寿命试验模式转向测试测量模式，其控制流程图如图 4.5.3。

对于单片机，其承担控制开关阵列的正确切换和配合计算机进行阻值测试的工作。当 PLC 发送的测试开始命令时，单片机才会从寿命试验状态转为测试状态；单片机的工作流程图如图 4.5.4。其通过读写数据采集器的数字信号输入输出，以得知计算机的测量工作是否完成和通知计算机开关阵列是否闭合就位，从而完成对所有的光敏元的阻值的测试。

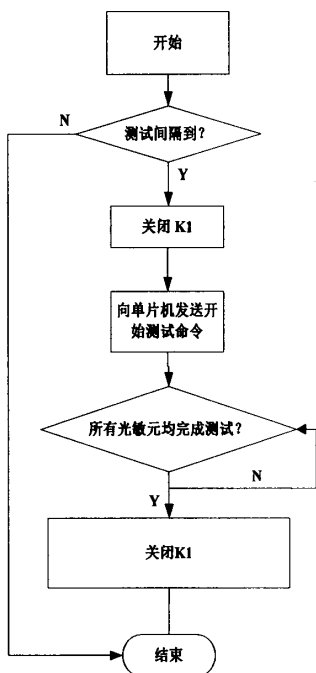


图 4.5.3 PLC 控制流程图

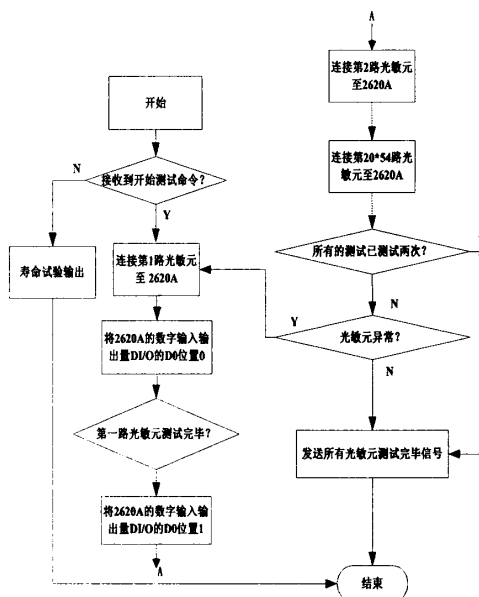


图 4.5.4 单片机控制流程图

4.6 自动测试系统测试结果

按照上述对自动阻值测试系统的软硬件设计要求，本章完成了系统硬件的设计和软件的编程，其系统调试过程的实物图如图 2.6.1 所示，其中，图 2.6.1 (a) 为总系统的实物图，其中包括电源、Fluke2620a 数据采集器、电脑 (Labview 上位机程序)、控制主板 (包括单片机下位机程序)、测试板等；图 2.6.1 (b) 为控制主板 (可扩展控制 20 块测试板) 和测试板 (可实现 54 路器件的试验和测试) 的实物图。为验证该系统的实际性能，将该测试板连接至 54 路阻值精度为 $\pm 5\%$ 的 100 欧电阻，对该系统进行自动老化和自动阻值测试实验，在对待测的电阻阻值进行连续监测后，测得的电阻阻值随时间的变化图如图 2.6.2。从图中可以看出，该测试系统的电阻测量值波动非常小，小于 $0.15\ \Omega$ ；此外，该系统的测试速度非常快，单杜瓦 54 路器件的阻值测试时间仅为 2 分钟，足以满足实际的应用需求，达到了预期的设计目标。

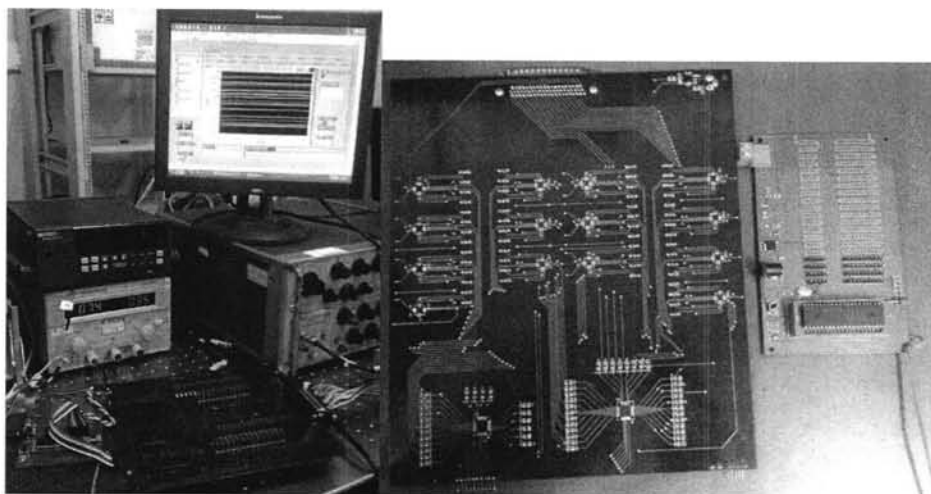


图 4.6.1(a)电阻自动测试系统

(b)电阻自动测试 54 通道测试板和控制主板

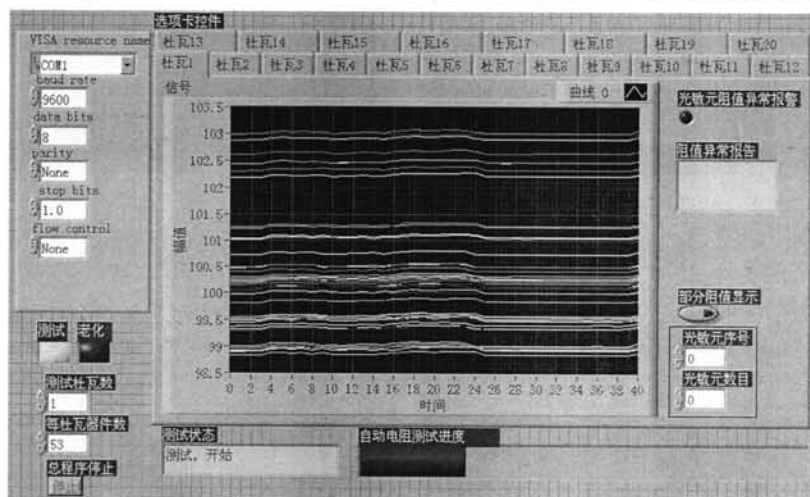


图 4.6.2 电阻自动测试系统运行结果

4.7 本章小结

基于碲镉汞红外探测器组件寿命试验阻值测试困难,提出了 20×54 通道电阻自动测试的解决方案,设计了一种用于碲镉汞红外探测器组件的高可靠的多路复用阻值测试系统。为实现多通道阻值测量,设计了多路复用开关阵列。采用单片机控制多路复用开关阵列,实现了开关自动切换。采用 LABVIEW 编写了 20×54 通道电阻阻值自动测试软件。最后对 20×54 通道电阻阻值自动测试系统进行了试运行,试运行结果表明,测试系统的电阻测量值波动小于 0.15Ω ,可以满足碲镉汞红外探测器组件自动测试要求。

5 碲镉汞探测器贮存可靠性研究

5.1 引言

碲镉汞探测器是系统最基本的组成部分，它的可靠性直接关系到系统的最终可靠性。探测器在实际使用中总要处于一定的应用环境下，包括工作环境和非工作环境。因此，在非工作环境下，进行碲镉汞探测器寿命试验及失效分析研究对保证航天探测器在诸多特殊环境中满足极高的可靠性、寿命要求和消除故障隐患可能带来的重大的经济损失有着深远的意义。

对于非工作环境可靠性，它主要包括贮存环境下、安装环境下、整机中休眠的环境下的可靠性[28]，其中，贮存是广义非工作状态中最基本的类型。贮存可靠性是指产品在规定的贮存条件下和规定的贮存时间内，维持产品规定功能的能力。一般用概率来度量这种能力，并称之为贮存可靠度，以 R_z 表示。

电子元件器件的贮存状态可靠性评价方法有两种。一种是自然条件下的贮存试验，这是最直接最真实的也是必不可少的方法，是寿命评价的重要依据。另一种就是加速应力可靠性评价试验，它针对电子在长期贮存状态的主要失效模式及失效机理，采用极限应力/高加速应力试验、加速贮存寿命试验及补充评价试验等方法进行贮存可靠性评价，充分暴露出贮存状态长期贮存失效模式，确定长期贮存的最薄弱结构设计、材料和工艺。

对于贮存可靠性，国外发达国家如美国等都十分强调和重视贮存试验，英美等国家军用元器件长期贮存试验作为一项长期战略一直在做[109~113]。自上世纪 50 年代末，美国成立了长期贮存小组委员会，对液压系统、元件等进行分析鉴定。针对于碲镉汞探测器的贮存可靠性，1987 年，Honeywell 公司在颁布的“碲镉汞红外探测器可靠性技术和失效物理环境应力试验计划[16]”中提到使用贮存温度为 54.4℃ 的静态储存试验对焦平面的贮存可靠性进行研究；Sofradir 公司[21]将温度作为可靠性加速试验的主要应力，使用了高温贮存试验对焦平面探测器组部件的贮存可靠性进行研究，深入分析焦平面探测器组部件在贮存条件下失效模式。

基于贮存可靠性的重要意义，本章主要研究目的是碲镉汞红外探测器组件在贮存状态下的可靠性，使之能为装备可靠性设计提供参考和依据，为实现军用电子元器件的可靠性设计工作提供基础数据。本章所论述的主要内容为：通过元器件在特定环境应力条件下的长期贮存试验，考察其环境适应性；研究及总结它们在试验过程中暴露的贮存失效模式、失效机理，以及提出相应的改进

措施；研究元器件贮存试验数据处理和统计方法。

5.2 贮存可靠性试验方案

器件在贮存环境下，随着贮存时间的增加，各种环境应力的影响会导致器件发生缓慢的物理化学反应，从而会导致器件材料及性能的劣化[114~119]。其中，自然条件下的库房长期贮存试验是评价元器件贮存寿命最直接的方法，其寿命数据最真实可靠。通过自然条件下的环境应力，评价器件可靠性和贮存寿命更加符合实际情况。因此本试验方案采用长期贮存试验方案，其通过对碲镉汞探测器组件的自然贮存试验，得到器件现场贮存失效信息（失效样品数量和时间等），分析贮存可靠性的影响因素，从中找出薄弱环节，研究失效模式及失效原因，提出改进措施是贮存试验的主要目的。同时研究元器件贮存试验数据处理和统计方法。

本试验对 3 个批次的碲镉汞红外探测器组件开展了长期贮存试验，将红外组件放入自动调温调湿箱内进行贮存，按照不同批次的组件的存储环境一样，贮存时间不同，从 10 年到 6 年不等，各批次测试的器件类型及编号、器件数量、电极焊接形式、贮存开始时间、贮存结束时间以及贮存条件如表 5.2.1 所示，其中 2002 批次的器件编号均以 2002_x，依次类推至 2003 批次和 2005 批次。贮存试验中使用的碲镉汞红外组件均上海技术物理研究所生产的 4 通道的光导型组件，每通道有两个光敏元，光敏元面积为 $82 \times 82 \mu\text{m}^2$ ，碲镉汞红外探测芯片采用充氮封装在金属陶瓷管壳内，探测器组件结构如图 5.2.1 所示。

表 5.2.1 各个批次长期贮存可靠性试验

批次	编号	数量	电极焊接形式	贮存条件	贮存开始时间	贮存结束时间
2002 批次	2002_x	11 个	芯片电极（键压、补胶）	室温自然存储	2002/3	2013/12
2003 批次	2003_x	5 个	芯片电极（键压、补胶）	室温自然存储	2003/5	2013/12
2005 批次	2005_x	1 个	芯片电极（键压、补胶）	室温自然存储	2005/8	2013/12

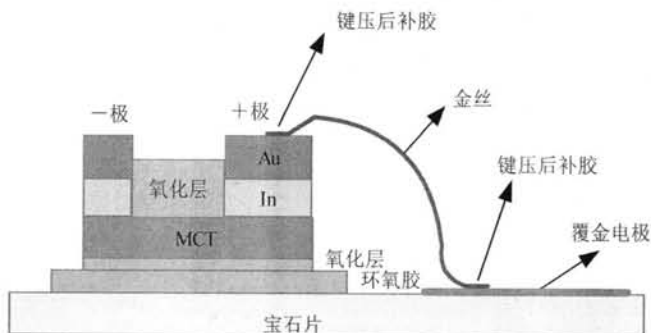


图 5.2.1 管壳封装后的探测器组件结构

本文在设计试验方案时，主要考虑以下几个问题：

(1) 试验样品类型与数量的确定。贮存寿命试验最大的特点是耗时较长，为了获取更多有价值的试验数据，对高可靠性长寿命产品，试样数量应较大。本文选取红外组件 17 只，按照生产批次的不同，分为四组：第一组为 2002 年批次的红外组件，数目为 11 只；第二组为 2003 年组件，数目为 5 只；第三组为 2005 年组件，数目为 1 只；每只试品有 8 个光敏元，两两为一组通道。整个试验过程中，试品都放置在一定温度应力条件下的自动调温调湿箱内。

(2) 试验中的测试问题。

由于长期贮存时间长，且在前期贮存时缺乏对试验中组件的情况进行检测，本试验将按照定时截尾试验的规则进行，即仅在试验截止时间对试验组件进行测试。对于在测试参数选择上，有以下考虑：

通常红外探测器用于红外辐射的直接探测，其响应率、噪声、探测率、探测器阻抗是最重要的特性参数，信号电压是指在一定辐照功率下探测器的输出电压，它跟频率，温度，响应面积和辐照量有关。

因此贮存寿命试验截止时，需要对探测器的探测率、响应率、低温电阻、室温电阻四个参数进行检验，其中探测器的探测率、响应率可通过黑体性能测试得出。

(3) 失效分析问题

在同等测试条件下，贮存寿命试验开始时和结束时，分别对贮存 3 个批次的各个组件进行探测器的探测率、响应率、低温电阻、室温电阻四个参数进行测试。对比贮存寿命试验开始时和结束时各个器件测试性能参数数据，然后贮存样品的探测率 D^* 下降到原来的 50% 时或低温电阻的变化率达到 20% 时，标记该光敏元失效，同一组件 2 个相邻的光敏元失效即标记组件失效；本实验的组件失效数记为 C ；若 $C \neq 0$ ，则确定组件失效模式，并进行机理分析；

5.3 碲镉汞探测器组件参数测试结果

在对所有贮存试验器件室温电阻测试时发现，组件编号为 2003_11 的光敏元 2 的室温阻值为无穷大即芯片开路。考虑到绘图的方便，该元的所有测试参数均以 0 处理。

5.3.1 光敏元室温电阻的变化

图 5.3.1 给出贮存试验各个批次的所有碲镉汞红外探测器器件的室温电阻变化，其中横坐标为器件编号，每个横坐标间隔里的 8 个条形图分别代表该器件的 8 个光敏元，顺序从光敏元 1, 2, … 8；纵坐标为贮存试验起始和结束时各个光敏元室温电阻的变化率 CR 的百分比形式，

$$CR = (R_{\text{贮存前}} - R_{\text{贮存后}}) / R_{\text{贮存前}} \quad (5.3.1)$$

从图中可看出，贮存前后各个批次的器件的室温电阻均有较大变化，变化率的变化量与批次的关系不大，与光敏元有关，其中 1、2、3、4 元的变化率高于 5、6、7、8 元，但器件的对应的光敏元的变化量均在一定水平之内，如所有器件的 1 号光敏元的变化率均位于 10%~15%之间。因此，光敏元的室温电阻的变化率较大的原因应归结于室温环境的变化。

5.3.2 光敏元低温电阻的变化

图 5.3.2 给出贮存试验前后各个批次的所有碲镉汞红外探测器器件的室温电阻变化，横坐标和纵坐标的定义同图 5.3.1，纵坐标为负数表示增大，反之为减小，低温电阻变化率超过失效判据 $\pm 20\%$ 视为失效判据。从图中可以看出，同通道有两个光敏元低温电阻变化率均超过失效判据 $\pm 20\%$ 的器件的数目有 7 个，变化率的变化量与批次的关系不大，与光敏元有关。其中 1、2 元的阻值变化率超失效范围的器件的数目为 1 个，这两元的变化率最大的器件编号为 2002_19，变化率分别为-31%和-30%，变化率其次的为 2002_23；3、4 元的阻值变化率均超失效范围的器件数目为 4 个，这两元的变化率最大的器件编号为 2003_10，变化率分别为-86%和-78%，与同器件编号的其它元相关性小，同器件编号的其它元的变化率均小于 $\pm 20\%$ ；5、6 元的阻值变化率均超失效范围的器件数目为 2 个，这两元的变化率最大的器件编号为 2002_23，变化率分别为-33%和-52%，变化率其次的为 2002_23；7、8 元的阻值变化率均超失效范围的器件数目为 2 个，这两元的变化率最大的器件编号为 2002_19，变化率分别为-42%和-57%，变化率其次的为 2002_18；从考查贮存前后低温电阻的变化率来看，3、4 元的失效数目最多，变化率最大。

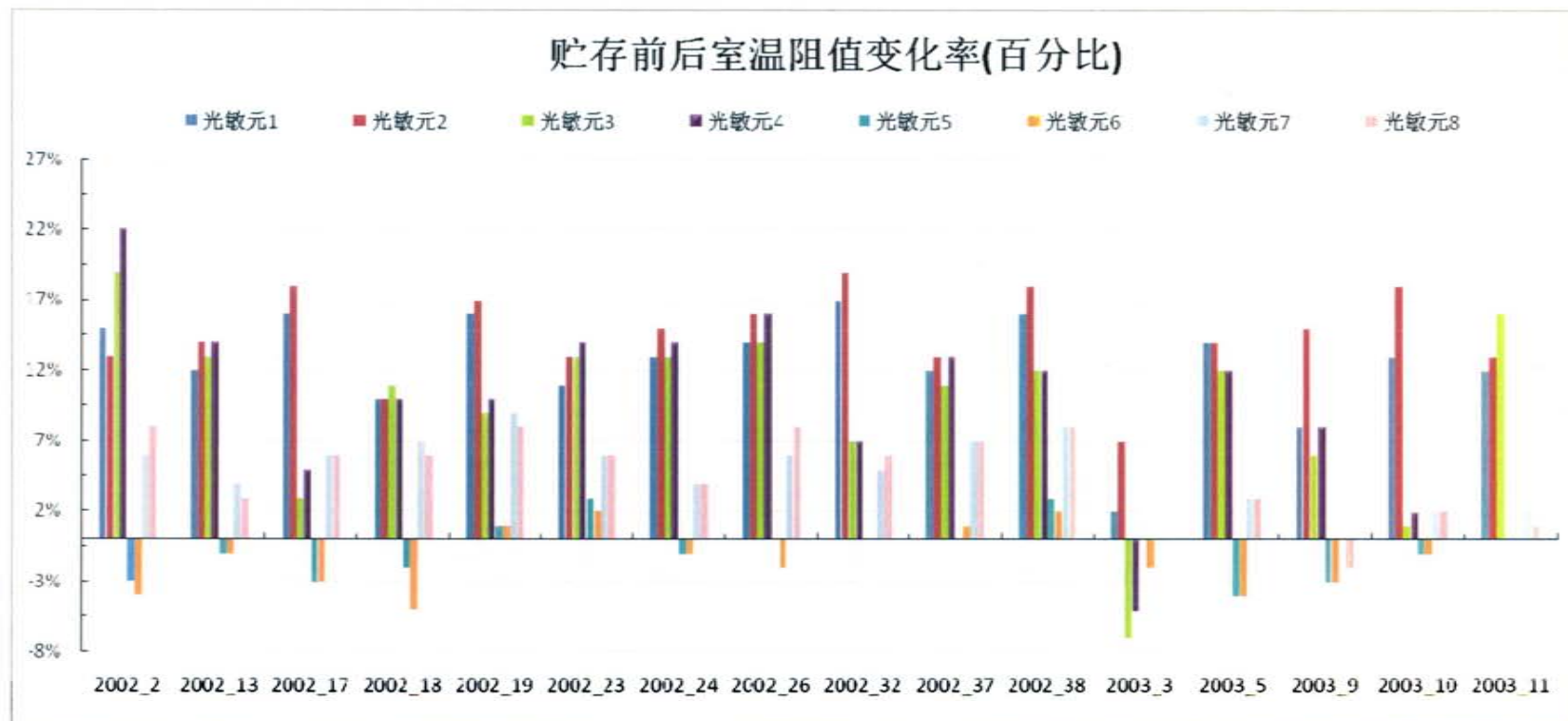


图 5.3.1 碲镉汞红外探测器贮存前后低温阻值变化率

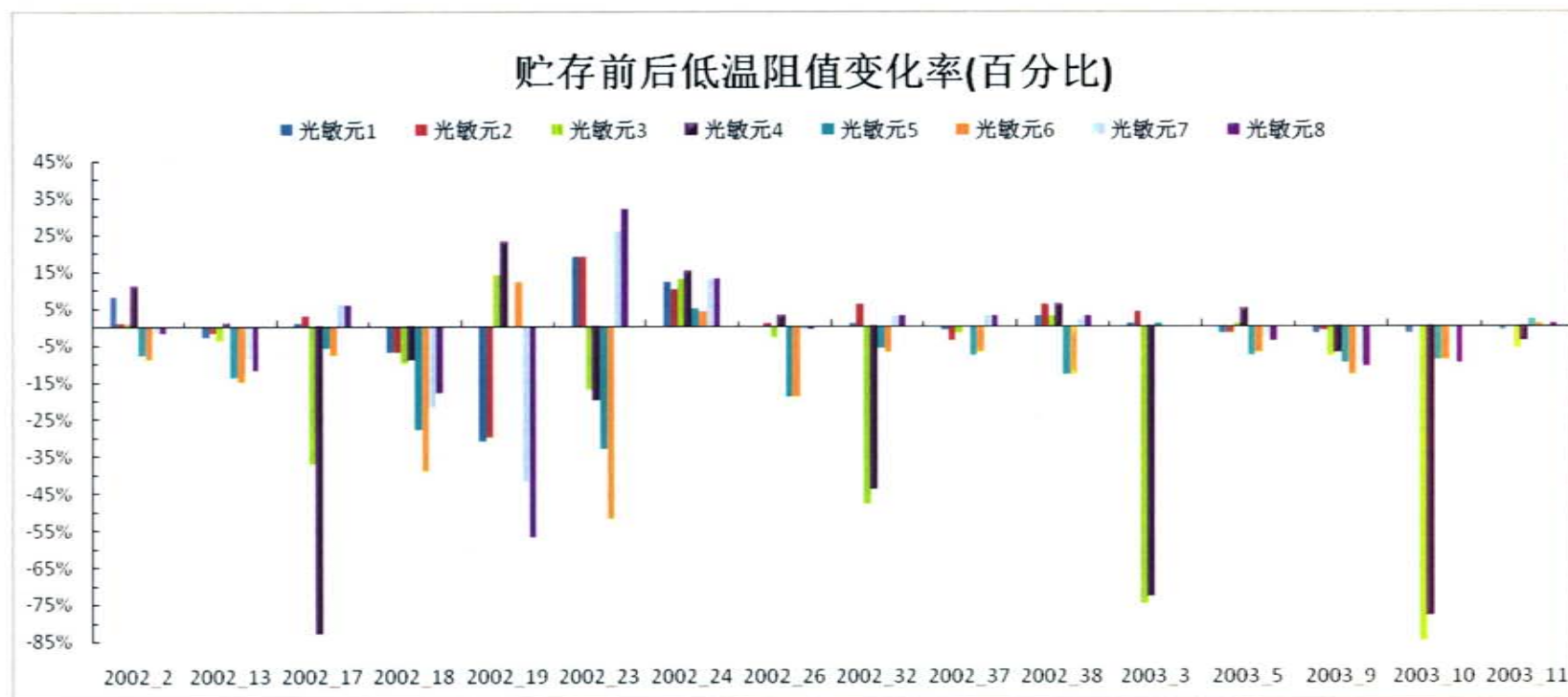


图 5.3.2 碲镉汞红外探测器贮存前后低温阻值变化率

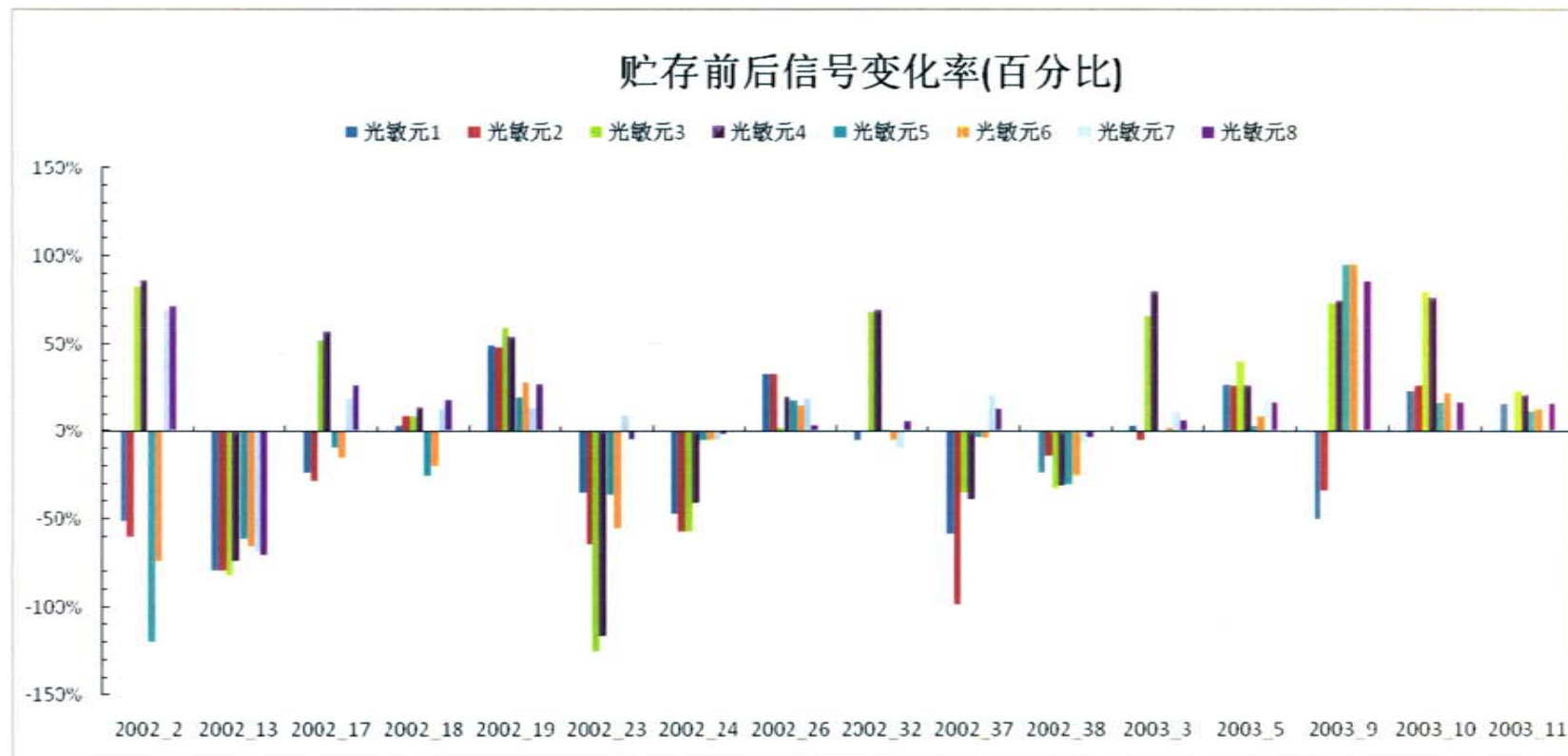


图 5.3.3 碲镉汞红外探测器贮存前后信号变化率

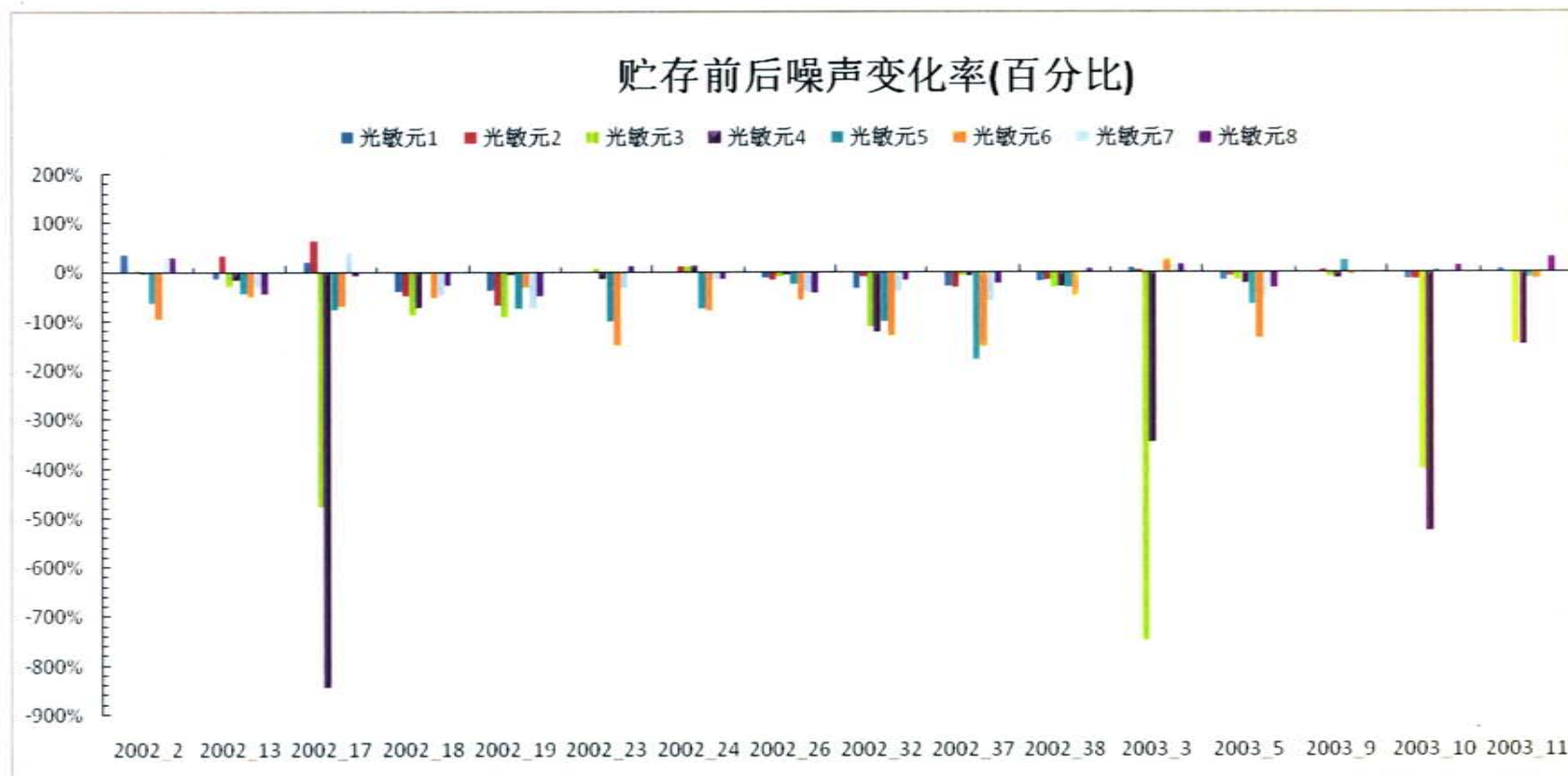


图 5.3.4 碲镉汞红外探测器贮存前后信号变化率

5.3.3 光敏元信号、噪声的变化

用于测量探测器响应率和探测率的系统如图 5.3.5 所示。在样品放置在热电制冷杜瓦内。测试条件为：1、黑体温度：500K；2、黑体孔径：0.6cm；3、中心频率：1000Hz；4、测试距离：20cm；。根据探测器的阻值大小在探测器两端加偏置电流，调制的红外辐照在探测器两端产生光生电压，探测器电压信号通过前置放大器和锁相放大器读出调制频率的探测器响应。将黑体遮盖，读出探测器的噪声。探测器噪声值选择中心频率 1000Hz，带宽 Δf 为 100Hz 的噪声均值。将上述测量值经过电脑处理即可获得探测器的响应率、探测率和噪声等探测器参数。

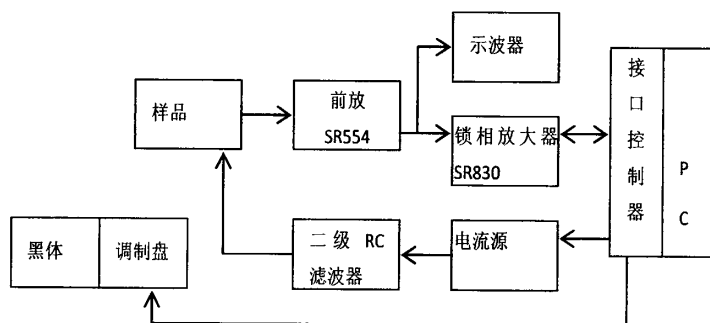


图 5.3.5 碲镉汞红外探测器黑体性能测试系统

图 5.3.3 给出贮存试验前后各个批次的所有碲镉汞红外探测器器件的信号变化，横坐标和纵坐标的定义同图 5.3.1，这里主要考查的是信号减小量，信号减小量达到 50% 视为失效判据。从图中可以看出，同通道有两个光敏元信号减小量均超过失效判据 50% 的器件的数目有 7 个，变化率的变化量与批次的关系不大，与光敏元有关。其中 1、2 元的信号变化率超失效范围的器件的数目为 0 个，该两元贮存前后信号变大的器件数目较多，多达 11 个；3、4 元的信号减小量百分比均超失效范围的器件数目为 7 个，失效器件中，这两元的变化率最大的器件编号为 2002_2，变化率分别为 83% 和 86%，3、4 元的信号增大的器件也较多，数目为 5 个，增大量均超 20%，其中信号增大最明显的器件编号为 2002_23，变化率为 -125% 和 -116%；5、6 元的信号变化率均超失效范围的器件数目为 1 个，这两元的减小量百分比最大的器件编号为 2003_9，变化率分别为 95% 和 95%，信号增大的器件也较多，数目为 9 个，其中信号增大最明显的器件编号为 2002_23，变化率为 -116% 和 -53%；7、8 元的信号变化率均超失效范围的器件数目为 2 个，这两元的变化率最大的器件编号为 2003_9，变化率分别为 -42% 和 -57%，变化率其次的为 2002_2；从考查贮存前后信号的变化率来看，3、4 元的失效数目最对，变化率幅动超 $\pm 50%$ 数目最多。

图 5.3.4 给出贮存试验前后各个批次的所有碲镉汞红外探测器器件的噪声变化，横坐标和纵坐标的定义同图 5.3.1，这里主要考查的是噪声增大量，由于贮存前的噪声较小，噪声变化量达到-100%方视为失效判据。从图中可以看出，贮存后测得的噪声整体比贮存前大，同通道有两个光敏元低温噪声变化率均超过失效判据-100%的器件的数目有 4 个，变化率的变化量与批次的关系不大，与光敏元有关。其中 1、2 元的噪声变化率超失效范围的器件的数目为 0 个，这两元的变化率最大的器件编号为 2002_19，变化率分别为-38%和-67%，变化率其次的为 2002_23；3、4 元的阻值变化率均超失效范围的器件数目为 3 个，这两元的变化率最大的器件编号为 2003_3，变化率分别为-748%和-376%；5、6 元的阻值变化率均超失效范围的器件数目为 1 个，这两元的变化率最大的器件编号为 2002_23，变化率分别为-178%和-153%；7、8 元的阻值变化率均超失效范围的器件数目为 0 个，这两元的变化率最大的器件编号为 2002_19，变化率分别为-74%和-50%；从考查贮存前后噪声的变化率来看，1、贮存后测得的噪声整体比贮存前大，增大的原因可能与测试环境的改变有关；2、3 元和 4 元的失效数目最多，变化率最大。

结合室温电阻、低温电阻、黑体信号、黑体噪声四个方面，贮存试验可得出以下结果：

- 1、相比于其他光敏元，3 元和 4 元贮存稳定性最差，失效数目最多。
- 2、光敏元失效模式有四种，分别为芯片开路、芯片的噪声增大同时信号减小、芯片的信号减小、芯片室温正常而低温开路；

表 5.3.1 贮存试验结束后的组件失效数目

评判参数	失效组件数目			
	1、2 元	3、4 元	5、6 元	7、8 元
低温电阻	1	4	2	2
黑体信号	0	5	1	2
噪声	0	3	1	0

5.4 碲镉汞探测器组件的失效分析

从第 5.3 节的长期贮存试验的试验结果来看，贮存前后红外探测器组件的整体性能相差较大，失效的器件数目较多，因此开展碲镉汞红外探测器组件失效原因分析工作以提高碲镉汞红外探测器组件长期贮存可靠性具有重大意义。和普通的半导体元器件的失效分析工作一样，碲镉汞红外探测器组件失效分析步骤必须遵循先进行非破坏性、可逆、可重复的试验，再做半破坏性、不可重复的试验，最后进行破坏性试验的原则。采用合适的分析方法，最大限度地防止把被分析器件(DUA)的真正失效因素、迹象丢失或引入新的失效因素，以期得到客观的分析结论。

5.4.1 非破坏性试验

红外探测器芯片一般密封在管壳或杜瓦内，以保护芯片。密封环境内的气氛对探测器芯片的可靠性起着至关重要的作用。密封环境内部的气氛(残余气体)十分活跃，而且不易控制，它与元器件封装的材料、排气、封装工艺、封装环境及元器件内部发生的各种物理化学反应密切相关，并处于一个变化的动态平衡状态。因此控制密封管壳内部的气氛是一件比较复杂的工作，这个问题在半导体行业中普遍存在。对于航天用的红外探测器由于使用环境特殊，密封性要求更高，对它的研究更有意义。

密封电子器件的内部水汽含量、有害气氛的检测及分析，一直是国内气密封装电子器件的难题。由于对器件内部水汽含量、有害气氛无法进行检测及分析，就很难保证器件的封装质量。器件内部水汽和有害气氛会导致电子元器件失效，这是影响国内电子元器件使用可靠性的主要因素之一。与水汽相关的失效机理一般是金属的腐蚀，腐蚀是由于水汽的凝聚，很多因素都会加速腐蚀效应[120]。

检漏工作可以判断探测器组件内是否有水汽侵入，本文中采用的检漏方法是背压法。对管壳封装好的探测器采用背压法测得的漏率如表 5.4.1。

表 5.4.1 贮存试验结束后的探测器漏率

组件编号	贮存结束后检漏 (torr.l/s)	组件编号	贮存结束后检漏 (torr.l/s)
2002_2	1.5E-05	2002_37	2.5E-08
2002_13	4.2E0-5	2002_38	1.8E-08
2002_17	3.5E-08	2003_3	7.4E-08
2002_18	3.2E-08	2003_5	2.9E-07
2002_19	4.5E-05	2003_9	3E-08
2002_23	4.4E-08	2003_10	1.8E-08
2002_24	1E-05	2003_11	2E-08
2002_26	2E-07	2005_03	1E-04
2002_32	1.3E-08		

从表 5.4.1 可以看出，2005 批次、器件编号为 2005_03 的漏率最差仅为 1E-04，其次为 2002_2、2002_13、2002_19、2002_24、2005_03。对于其它漏率较差的器件，器件编号和贮存试验性能变化率的器件编号关联性小。对于器件 2005_03，结合 2005_03 的低温电阻的波动性变化，可初步确定 2005_03 管壳出现裂纹。

贮存试验的红外探测器组件都是采用了 4J33 与 95%A1203 陶瓷烧结结构的管壳，图 5.4.1 是柯伐与陶瓷烧结结构的示意图，这类管壳结构在降温过程中，当降温速率过快时，由于温度梯度的存在，管壳的陶瓷结构部分会出现裂纹，管壳的时间越久，陶瓷结构出现裂纹的几率越大，从而影响电极的可靠性。当

器件 2005_03 从室温降到液氮温度，根据热胀冷缩的原理，陶瓷结构上电极上的裂痕会逐步增大，这很好解释了 2005_03 室温阻值正常，随着温度的下降，阻值从 100 多欧姆增加到无穷大的现象。

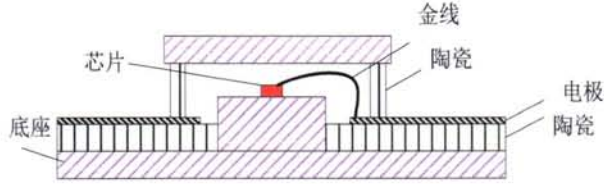


图 5.4.1 陶瓷结构管壳内部结构图

5.4.2 半破坏试验

根据第 5.3 节的贮存寿命试验结果，光敏元失效模式有四种，分别为芯片开路、芯片的噪声增大同时信号减小、芯片的信号减小、芯片室温正常而低温开路。其中芯片室温正常而低温开路已通过检漏的方式检查出实效的原因。对于其它几种失效模式，失效探测器的部分失效机制可以使用表面形貌信息对其进行评估，例如探测器光敏面和电极区的形貌；探测器表面的清洁度；金属在探测器表面的扩散；引线键合的失效；封装内部由于气密性变差产生的水汽；引线互联中的金属在扩散后的形貌变化。因此本半破坏性试验的方法为：选取几个具有上述失效模式下代表意义的器件，开封管壳，然后用表征失效探测器形貌的仪器光学显微镜进行观察。

对于芯片开路失效模式，贮存试验中仅一个器件出现该情况，该器件编号为 2003_11。一般引起芯片开路的因素比较容易得到，主要有两种：芯片电极断开和芯片烧毁。芯片电极断开的位置主要在电极连接处，由于电极连接处是比较脆弱的部位，本身就比较容易断开，且连接处的接触电阻较大，电功率的热效应也会使得该位置首先容易发生断开现象。芯片烧毁是电功率的热效应引起的，在加电老化过程或测试时，引入的电脉冲从而导致芯片的烧毁。考虑到上述原因，对器件编号为 2003_11 进行管壳开封，图 5.4.2 芯片的失效光敏元的光学显微镜照片，从图中看出，芯片的开路原因是器件烧毁。

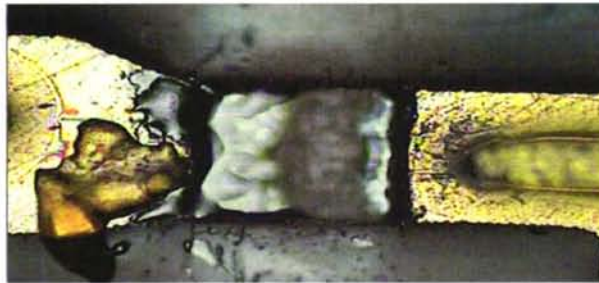


图 5.4.2 2003_11 失效芯片光敏元

对于芯片的信号减小模式, 贮存试验中出现该情况较多, 现选取器件进行开封试验, 这个器件的编号为 2003_09, 该组件贮存前后的性能对比如表 5. 4. 2。从表 5. 4. 2 中可以看出, 光敏元 3、4、5、6、7、8 的黑体信号明显较小而噪声浮动较少。考虑到上述信息, 对器件进行管壳开封, 图 5. 4. 3(a) (b) (c) 为 2003_09 芯片的失效光敏元的光学显微镜照片, 分别对应 3/4 元, 5/6 元, 7/8 元。从三张图来, 芯片的电极连接正常、表面钝化膜无腐蚀迹象。因此, 这种失效模式的失效原因有待进一步研究。

表 5. 4. 2 编号为 2003_9 组件贮存试验前后性能对比

光敏元编号	测试时间	器件电阻 R		偏置电流 (mA)	信号 ($\mu v \times 10^{-2}$)	噪声 ($\mu v \times 10^{-2}$)	探测率 D_{λ} (cmHz ^{1/2} /W)	响应率 R_{λ} (V/W)
		室温	低温					
1	02 年	17.4	27	4	100	3.7	4.6E+10	2.1E+04
	13 年	15.9	27.5	4	150	3.7	6.8E+10	3.1E+04
	变化幅度	8%	-2%		-50%	0%	-50%	-50%
2	02 年	17.2	26.5	4	105	3.9	4.5E+10	2.2E+04
	13 年	14.6	26.7	4	140	3.7	6.4E+10	2.9E+04
	变化幅度	15%	-1%		-34%	5%	-41%	-34%
3	02 年	15.6	27.6	4	190	3.4	7.2E+10	3.0E+04
	13 年	14.6	29.7	4	50	3.7	1.7E+10	7.8E+03
	变化幅度	6%	-8%		73%	-9%	75%	73%
4	02 年	14.9	26.3	4	180	3.3	7.0E+10	2.8E+04
	13 年	13.6	27.9	4	46	3.7	1.6E+10	7.2E+03
	变化幅度	8%	-7%		74%	-13%	77%	74%
5	02 年	108.7	88.2	2	170	2.7	1.1E+11	3.7E+04
	13 年	111.1	96.6	2	8	2	7.1E+09	1.7E+03
	变化幅度	-3%	-10%		95%	25%	93%	95%
6	02 年	110.6	89	2	220	2.4	1.6E+11	4.8E+04
	13 年	113.7	100.1	2	10	2.5	7.1E+09	2.2E+03
	变化幅度	-3%	-13%		95%	-5%	95%	95%
7	02 年	50.1	51.4	4	170	3.5	2.2E+10	9.4E+03
	13 年	50	56.2	4	58	3.5	7.5E+09	3.2E+03
	变化幅度	0%	-10%		65%	0%	65%	65%
8	02 年	50.2	51.3	4	370	3.7	4.6E+10	2.1E+04
	13 年	51.1	56.6	4	50	3.6	6.3E+09	2.8E+03
	变化幅度	-2%	-11%		86%	2%	86%	86%

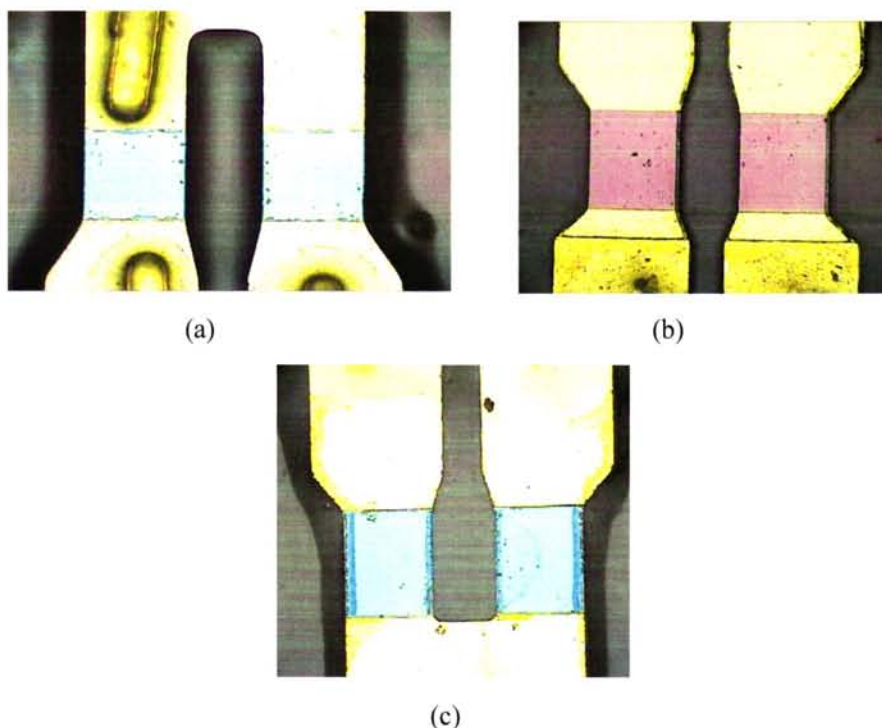


图 5.4.3 2003_9 失效芯片光敏元

5.5 本章小结

研究碲镉汞红外探测器组件在自然贮存环境下的可靠性,对 2002 年、2003 年、2005 年三个批次的 16 个碲镉汞红外组件进行特定环境应力条件下的长期贮存试验,对贮存起始和截尾时各个组件的低温电阻、黑体信号、噪声进行考核对比,并依据制定的失效依据,进行组件失效的统计,统计发现:1、贮存过程中组件失效比例大,约占总的试验组件比例的 50%;2、失效比例与批次无关,与光敏元有关,1 到 8 元中,3 元和 4 元贮存稳定性最差,失效数目最多;3、光敏元失效模式有四种,分别为芯片开路、芯片的噪声增大同时信号减小、芯片的信号减小、芯片室温正常而低温开路;4、失效的主要模式为芯片的噪声增大同时信号减小,失效芯片钝化膜表面无腐蚀迹象。长期贮存试验得到的试验数据和结果将有助于改进器件设计和工艺。

6 结论和展望

6.1 结论

对于空间应用的碲镉汞红外探测器组件，寿命试验是一种很重要的可靠性试验方法，寿命试验数据的统计分析结果可作为可靠性预测、制定筛选条件和改进质量的依据，因此开展对碲镉汞红外探测器组件的长期寿命试验具有十分重要意义。

在长期工作寿命试验方面，电子产品均可按照定数截尾方法进行。虽然这种试验方法已广泛应用于各种军用电子元器件的工作寿命评估，但对于碲镉汞红外探测器组件，该试验进行的还不够充分，没有形成严格的标准，其主要原因是缺乏自动化程度高、黑体测试操作简便的设备。因此研制出适用于碲镉汞红外探测器组件的长期寿命试验设备显得非常必要和紧迫。

论文中首先介绍了一种自主研制的 20 工位碲镉汞红外探测组件长期寿命试验自动化设备，该设备主要包括真空系统、低温系统、测试系统；其次，针对碲镉汞红外组件的长期贮存可靠性问题，开展了对组件的失效模式和失效机理的初步研究，并得出了一些统计规律。

在长期寿命试验设备研制方面，本文所做的工作及成果有以下几个方面：

1. 根据碲镉汞红外探测器长期寿命试验的要求，提出设备的整体方案。通过真空结构理论计算和计算机 3D 建模，对设备进行了结构设计，在此基础上完成了设备的研制，并投入试运行，其空载真空度可达 $2.4 \times 10^{-5} \text{Pa}$ ，满足设计指标，可达到碲镉汞组件长期寿命试验的要求；

2. 根据长期寿命试验设备的自动控制要求，提出了控制系统的总体分布布局：上位机监控、控制柜、现场执行设备、HMI 等。对控制系统的硬件和软件进行了设计。硬件设计方面包括上位计算机硬件配置、可编程控制器 PLC 选型、温控模块选型、信号模块的选型、通信链路的选择、控制总线的选择；软件设计方面包括 PLC 软件设计、人机界面软件设计，其中，为了实现真空和低温的自动维持，自主设计了真空排气算法和低温维持算法。在控制系统硬件和软件设计完成后，进行调试和仿真，调试和仿真结果显示，系统初步实现了 PLC 集中采集所有现场数据、分子泵控制、温控仪器控制、自动低温维持、自动真空维持等功能，其自动控制的真空和温度等参数可满足寿命试验的要求。

3. 基于碲镉汞红外探测器组件寿命试验阻值测试困难，提出了一种 20×54 通道电阻自动测试的解决方案，设计了一种高可靠的多路复用阻值测试系统。

为实现多通道阻值测量，设计了多路复用开关阵列。采用单片机控制多路复用开关阵列，实现了开关自动切换。采用 LABVIEW 编写了 20×54 通道电阻阻值自动测试软件。最后对 20×54 通道电阻阻值自动测试系统进行了试运行，试运行结果表明，测试系统的电阻测量值波动小于 0.15Ω ，可以满足碲镉汞红外探测器组件自动测试要求。

针对碲镉汞红外组件长期贮存可靠性的研究方面，本文做了以下工作：

研究了碲镉汞红外探测器组件在自然贮存环境下的可靠性，对 2002 年、2003 年、2005 年三个批次的 16 个碲镉汞红外组件进行特定环境应力条件下的长期贮存试验，对贮存起始和截尾时各个组件的低温电阻、黑体信号、噪声进行考核对比，并依据制定的失效依据，进行组件失效的统计和失效机理的初步研究，得出了一些统计规律。统计发现：1、组件失效比例大，约占总的试验组件比例的 50%；2、失效比例与批次无关，与光敏元有关，1 到 8 元中，3 元和 4 元贮存稳定性最差，失效数目最多。3、光敏元失效模式有四种，分别为芯片开路、芯片的噪声增大同时信号减小、芯片的信号减小、芯片室温正常而低温开路；4、失效的主要模式为芯片的噪声增大同时信号减小，失效芯片钝化膜表面无腐蚀迹象。长期贮存试验得到的试验数据和结果将有助于改进器件设计和工艺。

6.2 展望

本文在碲镉汞红外探测器组件的长期寿命试验设备研制上取得了一定的成功，在探测器长期贮存可靠性研究上取得了初步的结果和结论，但时间紧迫，仍然有很多方面需要改进和深入研究。具体来说，有以下几个方面：

- 1) 增加设备的自动黑体测试功能；
- 2) 增加设备的变温控制系统，以使设备能兼容温度加速寿命试验；
- 3) 对探测器组件的缺陷进一步做微观分析，包括扫描电镜、超声显微镜等观察分析；
- 4) 通过更多测试，进一步研究探测器组件的失效模式和失效机理，将试验结果和理论分析有机结合起来，最后总结出一些碲镉汞红外探测器失效的科学规律，然后将这些规律应用到芯片设计、制备和器件封装工艺，使得探测器的设计和制造工艺得到进一步提高，最后形成一套完整的设计和工艺规范。

参考文献

- [1] M.A.Kinch. in Semiconductors and Semimetals, edited by R.K.Willardson and A.C.Beer (Academic, New York 1981), Vol.18, pp.1
- [2] 汤定元, 糜正瑜等, 光电器件概论, 第一版, 上海科学技术文献出版社, 1989, 298-301.
- [3] 汤定元, 红外探测器的最佳材料—Hg_{1-x}Cd_xTe 晶体, 碲镉汞材料和器件的应用基础研究 95 论文集, 1-6.
- [4] 徐国森, 方家熊等, “风云二号”卫星用双波段四元 HgCdTe 红外探测器, 上海技术物理研究所文集, 1998-1999, 157-163.
- [5] Lawson W D, Nielson S, Putley E H, et al. Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe-CdTe [J]. J. Phys. Chem. Solids, 1959, 9(3-4): 325-329.
- [6] Antoni Rogalski, Infrared detectors: an overview. Infrared Phys. Technol, 2002, 43:187-210.
- [7] 顾瑛, 可靠性工程数学, 第一版, 电子工业出版社, 2004, 128-129
- [8] Marianne MOLINA, Xavier BRENIERE. IR detector Dewar and assemblies for stringent environmental conditions[C], Proc. SPIE, 2007, 6542-85.
- [9] H. Korf, W. A. Cabanski, J. Wendle. IR Modules and long-life Stirling Cryocoolers at AIM[C], Proc of SPIE, 1998, 3436: 375-386.
- [10] Garin S. Tate. Linear-drive cryocoolers for the Department of Defense standard advanced dewar assembly (SADA)", Proc. SPIE. 2005, 5783:138-144.
- [11] 可靠性鉴定和验收试验 GJB 899A-2009, 2009
- [12] 韩明, 无失效数据的多层 Bayes 可靠性分析[J].应用数学, 1998, 2:131-134.
- [13] 李亿民, 关于指数分布无失效数据的一种 Bayes 分析[J].山东理工大学学报: 自然科学版, 2006, 20(2):17-19.
- [14] 张晓冉, 张海娟, 高作峰, 无失效数据的一类迭代 Bayes 分析[J].武汉大学学报: 理学版, 2009, 55(4):399-404.
- [15] Per W. Schmidt. NRL Hybrid Reliability Physics of Failure Initial Study. ADA217986. 1990.
- [16] Hybrid PV HgCdTe IR Detectors Technology Reliability and Failure Physics Program-Environmental Stress Testing Plan. ADA191165. 1987
- [17] David G.Seler, George G.Harman, Jeremiah R.Lowney, et, al. NIST(U.S.),HgCdTe Detector Reliability Study for the GOES Program, NISTIR:4687. Sep. 1991.
- [18] J.M.Hartley, M.B.Reine, C.L.Terzis, et,al. Photoconductive HgCdTe Detector Assemblies for the GOES Imager and Sounder Instruments. Proc. SPIE. 1996, 2812:518-527
- [19] M.A.Kinch, S. R. Borrello, A. Simmons. 0.1eV HgCdTe photoconductive detector performance. Infrared Physics. 1977, 17:127-135.
- [20] 王蕴辉, 姜小波, 国外碲镉汞红外焦平面杜瓦组件可靠性研究进展[J].电子产品可靠

- 性与环境试验, 1999, 6:8-11.
- [21] Marianne MOLINA, Xavier BRENIERE. IR detector dewar and assemblies for stringent environmental conditions[C]. Proc. SPIE.2007: 6542-85.
- [22] 张莹, 刘塑, 国外红外焦平面探测器组件可靠性研究综述[J]. 红外技术, 2012,34(3):134-139.
- [23] 刘大福. 星载碲镉汞红外探测器组件的可靠性研究, 中国科学院上海技术物理研究所学位论文, 2006.
- [24] 朱克学, 张赞, 李向阳等. 激光辐照对 HgCdTe 长波光导探测器性能的影响[J]. 激光与红外., 2001, 31(4):234-235.
- [25] 杨少华. 电子元器件的贮存可靠性研究, 广东工业大学学位论文, 2006.
- [26] 李坤兰, 邱森宝. 电容器长期贮存可靠性研究, 电子元件与材料, 2010, 29(9): 70-73.
- [27] 朱三根等. 碲镉汞红外探测器老化试验设备, 上海技术物理研究所内部资料, 2005.
- [28] 张勤耀等. 多工位高低温循环试验自动控制系统与方法, 专利申请号: 200610031017
- [29] 吴礼刚等. 用于低温半导体器件筛选的新型温度循环设备. 红外与毫米波学报, 2006, 25(2): 153-156.
- [30] J. F. Siliquini, C. A. Musca, B. D. Nener, L. Faraone. Temperature Dependence of Hg_{0.68}Cd_{0.32}Te Infrared Photoconductor Performance. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 42. NO. 8, AUGUST 1995
- [31] 达道安. 空间真空技术[Z]. 宇航出版社, 1995, 769-770
- [32] FY-3 红外探测器组件可靠性试验方案, 上海技术物理研究所内部资料, 2005.
- [33] 廖伟强, 张斌, 曾德长. 磁力传动及其应用与设计[J]. 机械设计与制造, 2007, 5: 148-151..
- [34] 程云立, 张云龙, 徐健. 一种用于真空领域的磁力传动装置, 专利申请号: CN200720103348.9
- [35] 达道安. 真空设计手册[Z]. 第三版, 国防工业出版社, 2006.
- [36] 陈正全等. WZM 无油超高真空环境模拟试验设备. 航天工业总公司 510 研究所. 1986.
- [37] 多工位高真空排气检漏. 北京中科科仪发展有限公司. <http://www.kyky.com.cn>.
- [38] 吴礼刚. 星载碲镉汞红外探测器组件的温度循环试验研究, 中国科学院上海技术物理研究所学位论文, 2006:20~21
- [39] 任家生. 太阳能真空集热管排气抽气系统的设计计算[J]. 江苏省真空学会第十届学术交流会议论文集, 2001.
- [40] TV 551/701 Navigator user manul, www.agilent.com/chem.
- [41] TriScroll 300 Series Dry Scroll Vacuum Pump user manual, www.agilent.com/chem.
- [42] CCQ-150 用户手册. <http://www.sky.ac.cn/>.
- [43] 28432-GE11 用户手册. <http://www.vatvalve.com/>.
- [44] 刘大福. 航天红外探测器可靠性及失效机理研究, 中国科学院上海技术物理研究所学位论文, 2004:13~18
- [45] 任炳春, 基于 PROFIBUS_DP 网络的水处理 PLC 控制系统的应用研究, 山东大学硕士学位论文, 2008: 17~21.

- [46] 陈婵娟,薛恺,常美蓉等. 基于 PLC 的步进电动机单双轴运动控制的实现[J]. 机械设计与制造. 2009, 3:178~180.
- [47] 王玉德,刘景斌,韩翠玲等. 基于 PLC 的步进电机的驱动控制[J]. 机电一体化. 2008, 07:65~66.
- [48] 王玲, 张洋, 胡庆生等. 基于 PROFIBUS 和 PLC 的 EAST 托卡马克装置真空控制系统[C]. 《第 13 届全国计算机、网络在现代科学技术领域的应用学术会议论文集》, 北京: 中国核学会, 2007
- [49] 蒋晓峰, 施伟锋, 刘以建等. 基于触摸屏和 PLC 的船舶电站监控系统设计[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(1): 122-125.
- [50] 廖常初. 西门子人机界面组态与应用技术[Z]. 第二版, 北京: 机械工业出版社, 2009, 1-3.
- [51] 熊伟丽, 贾岩, 许文强等. 基于 OPC 技术的 LabVIEW 与 S7-300PLC 的污水处理监控系统[J]. 计算机与应用化学, 2011, 28(9): 1131-1133.
- [52] 廖常初. S7-300/400 PLC 应用技术[M]. 第二版.机械工业出版社, 2008.
- [53] S7-300CPU 模块用户手册. <http://www.ad.siemens.com.cn/>.
- [54] ADAM-5013 技术文档. <http://www.advantech.com.cn/>.
- [55] 模拟量输入模块 SM331 模块手册. <http://www.ad.siemens.com.cn/>
- [56] 数字量输出模块 SM322 模块手册. <http://www.ad.siemens.com.cn/>.
- [57] 数字量输入模块 SM321 手册. <http://www.ad.siemens.com.cn/>.
- [58] 韩兆祥, 李学英, 万鑫等. 利用 PLC 和触摸屏实现多阶段 PID 温度控制, 实验技术与管理[J], 2008,25(6):56-60
- [59] MLC9000 PLUS user manual. <http://www.west-cs.cn/>
- [60] 雷霖. 现场总线控制网络技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004, 133-139.
- [61] PROFIBUS 总线规范. <http://www.profibus.com/>
- [62] 王曙光 杨春杰 魏秋月. S7-300_400 PLC 入门与开发实例[M]. 人民邮电出版社, 2009, 29~33.
- [63] 吴中俊、黄永红. 可编程程序控制器原理及其应用[J], 机械工业出版社, 2004, 122~114.
- [64] Gauge FRG-700/FRG-702 instruction manual. www.agilent.com/chem.
- [65] 李传伟, 王燕妮. 变频器与 PLC 的连接与配合使用[J]. 电气传动自动化, 2005, 2:46-49.
- [66] 李日方. 三菱变频器在多电动机场合中的应用[J]. 电气时代, 2005, 3:82-90.
- [67] 黄建新, 刘建群, 旷辉等. 触摸屏与 PLC 组成的伺服电机控制系统[J]. 仪表技术与传感器, 2005, 2:44-45.
- [68] 崔坚. 西门子工业网路通信指南(上册)[Z], 机械工业出版社, 2009.
- [69] TMP Profibus Gateway User Manual / 87-900-976-01 (F). www.agilent.com/chem.
- [70] 刘文慰, 葛锁良. AT89C2051 在自适应模糊 PID 温度控制器中的应用, 电子工程师, 2004, 30 (1) : 20-23
- [71] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M], 机械工业出版社, 2000.
- [72] 朱胤, 左敦稳, 王珉等. CVD 金刚石衬底温度场的自调整模糊控制器研究, 中国制造

- 业信息化, 2003, 32 (11) : 83-86
- [73] 陆宏伟, 陈亚珠. 基于改进 PID 算法的射频消融治疗仪, 北京生物医学工程, 2003, 22 (1) : 45-47
- [74] 王文新, 张金昌, 王艳辉等. IMC-PID 控制器在炼油厂减压蒸馏装置的应用研究, 化工进展, 2004, 23 (6) : 654-656
- [75] 方昕, 方仁昌, PID 调节器对制备纳米钛薄膜的重要作用, 微电子技术, 2003, (12) : 22-24
- [76] 招伟, PID 和自适应联合控制电子膨胀阀对蒸发器提供液量的影响, 制冷与空调, 2004, 4 (1) :63-67
- [77] 肖衡, 陈春俊, PID 温度控制装置的电路设计, 计测技术, 2003, (1) :10-11
- [78] 魏红昀, 邓忠华, 魏晴昀, PID 专家控制器在温控系统中的应用, 测控技术, 2004, 23 (4) : 50-51
- [79] 李英顺, 伦淑娟, 模糊 PID 温度测控仪, 仪表技术与传感器, 2003, (1) : 20-22
- [80] 赵惠忠, 刘震炎, 张敏, 马晓东, 王少为, 利用 PID 调节器精确控制激光器温度, 仪表技术与传感器, 2004, (7) : 49-51
- [81] 陆地, 大电流硅整流装置温度控制用的 Fuzzy-PID 控制, 电力电子技术, 2004, 38 (4) : 69-71
- [82] 张丽芳 肖定国 佟祥国, 感应加热温度的 Fuzzy+PID 复合控制方法, 热加工技术 2004 年, 34 (6) : 38-40
- [83] 李士勇, 模糊控制·神经控制和智能控制论, 哈尔滨工业大学出版社, 1998
- [84] X. Breniere, P .Tribolet. Uniting IR detectors for tactical and space applications: a continuous cycle for reliability [J]. Proc. SPIE 2009, 7298: 1-12.
- [85] 龚海梅,张亚妮,朱三根,王小坤,刘大福,董德平,游达,李向阳,王平,朱龙源,方家熊. 红外焦平面可靠性封装技术[J]. 红外与毫米波学报. 2009, 28(02):85-89.
- [86] 龚海梅,刘大福.航天红外探测器的发展现状与进展[J]. 红外与激光工程. 2008, 37(1):18-24.
- [87] 周赞熙. 红外探测器组件可靠性指标分配初探[J]. 红外技术, 1997, 19(4):13-16.
- [88] 龚海梅, 邵秀梅, 李向阳等.航天先进红外探测器组件技术及应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12):3129-3140.
- [89] 碲镉汞红外探测器组件老化试验操作指导书. 上海技术物理研究所内部资料, 2010.
- [90] 任阿丹. 基于 PLC 控制的高温高压试验站计算机监控系统设计. 西安理工大学学位论文, 2010.
- [91] 丁楚芮. 基于 PLC 的人造板热压机自动控制系统设计. 西北农林科技大学学位论文, 2009.
- [92] 魏日翔. PLC 在市电与发电机组供电自动切换系统中的应用[J]. 电气开关. 2010, 2:62-67.
- [93] 赵朝阳,史丽萍. 基于PLC变电站监控自动化的研究与实现[J]. 低压电器. 2006,6:23-27.
- [94] 李林静. PLC 在变电站中央信号系统中的应用[J]. 通用机械. 2005,11:54-56
- [95] 吴志宏, 王瑞艳. 应用 PLC 实现变电站电压无功控制的系统设计[J]. 东北电力技术.

- 2004,4:23-24.
- [96] Fluke 2620A data acquisition user manual.
- [97] 张琦,汪跃龙,汤楠. 基于 24LC1025 芯片的存储器阵列设计[J]. 西安石油大学学报(自然科学版). 2009, 24(6):80-83.
- [98] 梁建华, 肖伸平. 基于 S3C44B0X 的 I~2C 总线设计[J]. 微计算机信息. 2006, 55(5-2):143-145.
- [99] 秦剑,王金玲,穆道明等. 一种基于 VG2 控制的 I~2C 总线键盘接口设计[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版). 2005, 28(12):1561-1564.
- [100] 季宏锋, 吴军辉, 徐立鸿. I2C 总线技术及应用实例[J]. 自动化与仪表, 2002, 21(4): 21-23.
- [101] ADG791A datasheet. <http://cn.element14.com/>.
- [102] ADG1634 datasheet. <http://cn.element14.com/>.
- [103] 郭天祥. 51 单片机 C 语言教程[Z],电子工业出版社.2008 年.
- [104] 1.5KE20CA datasheet. <http://cn.element14.com/>.
- [105] 单士源,张良祖,刘美兰. 一种对虚拟对象进行控制的系统设计[J]. 微计算机信息. 2003,19(11):21-22.
- [106] 邴春秋,郑萍,宋耀华,王敏. 基于 PLC 和单片机实现的数据采集控制系统设计[J]. 西华大学学报(自然科学版). 2007, 26(06):7-11
- [107] 戴亮,谈士力,沈俊杰等. 基于 LabVIEW 与 PLC 的串级控制系统的设计和应用[J]. 机电一体化. 2007, 2:53-55.
- [108] 王晋杰. 基于 LabVIEW 的 PC 与 PLC 实时监控的实现[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版). 2006, 28(11): 53-55.
- [109] Pecht J., Pecht M. Long-term non-operating reliability of electronic Products. Boca Raton, FL:CRC Press, 1995.
- [110] Coti, Dvaid W, Priore, Mary G, AD-A158-843 Impact of Nonoperating Periods on Equipment Reliability, 1985.
- [111] Buae J., AD-768-619 Dormant and Power on-off Cycling Effects on Electronic Equipment and Part Reliability, 1983.
- [112] Dickhaut, R. H. Dudley, AD-A071-794 Long-term Dormant Storage of microelectronic Components, 1979.
- [113] Robert M. Seman , Jullus M. Ettl , Althur W.Pumell , AD-A202-704Relibailtiy/Maintainability/Testability Desgin of Dormancy(Sections 5), 1988.
- [114] 杨家铿.电子元器件长期贮存可靠性分析.第九届全国可靠性物理学术讨论会论文集,延安, 2001:65-72.
- [115] 吴询颖.关于对电子元器件在长期贮存试验中出现的若干失效实例的总结.第九届全国可靠性物理学术讨论会论文集,延安, 2001:73-76.
- [116] 潘永跃, 丁学武. 电子产品的贮存可靠性研究.南京理工大学学报, 2002, Vol.26, No.1:31-34.
- [117] 庄奕琪.微电子器件应用可靠性技术.北京:电子工业出版社, 1996:30-50.

- [118] 史保华, 家新章, 张德胜. 微电子器件可靠性. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999: 54-58.
- [119] 吴生虎, 韩林, 朱心永等, 单片集成电路贮存状态可靠性研究, 第十一届全国可靠性物理学术讨论会论文集, 温州, 2005:72-76.
- [120] Thomas J. Rossiter, " Moisture Analysis: History, Sampling and Case Studies " www.ors-labs.com.

附录 A

作者简介及在学期间发表的学术论文与研究成果

作者简介:

1984年7月14日出生于江西省九江市。

2002年9月——2006年7月,在重庆大学数理学院获得学士学位。

2006年9月——2009年7月,在重庆大学数理学院获得硕士学位。

2009年9月——2013年7月,在中国科学院上海技术物理研究所攻读博士学位。

获奖情况:获上海技术物理研究所“二等奖”1次,上海技术物理研究所“三好学生奖”1次。

已发表(或正式接受)的学术论文:(书写格式同参考文献)

- [1] 曹岚,杨波,朱宪亮等,新型航天红外组件寿命试验设备的真空系统设计,科技导报,2011,29(28):20-23。
- [2] Cao lan, Zhu Xian-liang, Zhang Hai-yan, etc. An automatic measuring system for the lifetime testing of Infrared Detectors, Proc. of SPIE, 2012,8419.
- [3] Zhang Hai-yan, Cao lan, etc. The study of selective heating of indium bump in MCT infrared focal plane array, Proc. of SPIE, 2012, 8419.
- [4] Zhu, Xianliang, He, Xiangrong, Zhang, Haiyan, Cao Lan, etc. Design of the displacement platform for the life test system of the space infrared device, Proceedings of SPIE ,v 2012,8417.

申请或已获得的专利:

- [1] 曹岚、张海燕、朱宪亮、龚海梅等。多路阻值测量系统。专利号: 201310039535.5, 已受理。
- [2] 曹岚、张海燕、朱宪亮、龚海梅等。一种红外探测器用多工位真空排气装置。专利号: 201320057943.9, 已受理。

参加的研究项目及获奖情况:

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名： 2013 年 6 月 3 日

学位论文使用授权说明

本人同意：中国科学院上海技术物理研究所有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；有权按规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，有权复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

经指导教师同意，本学位论文属于保密，密级为：_____。涉密论文在解密后，以上学位论文使用授权说明适用。

论文作者签名： 2013 年 6 月 3 日

指导教师签名： 2013 年 06 月 03 日