



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

(专业学位)

液压控制单元的氦质谱检漏系统
设计与实现

姓名：朱捷

学号：1121180149

所在院系：汽车学院

职业类型：工程硕士

专业领域：车辆工程

指导教师：孔德洋

副指导教师：高晓杰

二〇一七年三月



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Master of Engineering

***Design and Implementation of Helium Leak Test
System of Hydraulic Control Unit***

Candidate: Zhu Jie

Student Number: 1121180149

School/Department: School of Automotive Studies

Discipline: Engineering Master

Major: Vehicle Engineering

Supervisor: Kong Deyang

Vice Supervisor: Gao Xiaojie

Mar, 2017

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保存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；学校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；学校有权按有关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，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学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：

年 月 日

摘要

伴随着汽车在大众生活中的广泛使用,人们在选择车辆时更加倾向于选择具有电子稳定程序 ESP 功能的车辆,因此,作为 ESP 执行机构的液压控制单元的质量也越多越受到重视,其密封性是影响液压控制单元质量的一个重要因素,而检漏系统是衡量密封性的最有效的工具之一。当前主流的检漏系统是采取差压法或气泡法。差压法通过检测被测件内部压力差来计算漏率,存在标准件容积不一致,容易受外部环境变化影响,检漏精度低等不足;而气泡法存在主观误差大、效率低、污染被测件等不足。传统气密检测的差压法和气泡法已经无法满足现代化工业生产的质量和效率要求。随着检漏技术的进步,检漏精度更高的氦质谱检漏法将会得到更多的应用。

本文针对现有差压法和气泡法检漏系统的不足,以液压控制单元为研究对象,研究了以氦质谱检漏为基础的检漏系统。通过对氦质谱检漏工作原理的研究分析,解决了在实际生产应用中的漏率标准不明确、氦气检漏使用成本过高、无法量化评价检漏系统等一些问题。根据研究结果设计了一套氦质谱检漏系统,采用低浓度的氦气为示踪气体,并结合气密检测直压法,实现了工业生产流水线环境下的高精度快速检漏过程。

本文首先分析了导致液压控制单元泄漏的各种原因,在对比现有几种检漏法的优劣势的基础上,提出基于氦质谱技术的检漏系统。在常规氦质谱检漏中采用浓度 100%的纯氦气进行检测,而本文的采用了浓度 10%的氦气作为示踪气体,从而得以极大的降低使用成本。通过研究分析测试压力、漏率及氦气浓度这三者之间的关系,优化最经济的参数组合,在此基础上设计了一台液压控制单元检漏系统。根据检漏功能需求分析设计出检漏工艺流程,可以通过不同的检漏步骤检测出不同的失效模式,提高了检漏工艺的合理性。整个系统基于功能模块设计方法,不同产品的模块化换型即满足产线的效率要求,又满足产品多样性的需求。控制系统采用 PLC 和 HMI 相结合的控制方式,采用 ControlLogix 系列的控制器 CPU 控制各个气缸、电磁阀和泵的动作,并用输入输出模块接收各个传感器的模拟量或数字量信号,用于控制整个系统的动作流程。

最后采用零泄漏件和标准漏孔进行试验,试验结果表明检漏系统的精度达到 1.0×10^{-8} atm.cc/s,比传统差压法有了极大的提高。并用数学统计方法分析验证了低浓度氦质谱检漏系统检测结果的测量能力 GR&R 值小于 10%,同时秒表法测量运行节拍小于 28 秒,符合流水线生产工艺要求。

关键词: 液压控制单元, 氦质谱检漏, PLC, GR&R

ABSTRACT

Along with the vehicle being widely used in people's life, people are more inclined to choose a vehicle electronic stability program ESP function, in the choice of vehicles so as the quality of the hydraulic actuator of the ESP control unit is also more and more attention, the sealing performance is one of the important factors affecting the quality of the hydraulic control unit, and leak detection the system is one of the most effective tools to measure the sealing property. At present, the mainstream leak detection system adopts differential pressure method or bubble method. The differential pressure method by detecting the measured internal pressure difference calculation of leakage rate, there are standard volume is not consistent, vulnerable to external environmental changes, the leak detection precision low; and the bubble law existence insufficiency subjective error and low efficiency, pollution measured etc.. The traditional differential pressure test and bubble method have been unable to meet the requirements of the quality and efficiency of modern industrial production. With the progress of leak detection technology, the leak detection method of helium mass spectrometry with higher leak detection accuracy will be used more.

In view of the shortcomings of the existing differential pressure and bubble method leak detection systems, a hydraulic leak detection system based on helium mass spectrometer leak detection is studied in this paper. By analyzing the principle of helium mass spectrometry leak detection, the problems such as the unclear standard of leakage rate, the high cost of helium leak detection and the quantitative evaluation of leak detection system are solved. According to the results of a helium leak detection system design, using low concentration of helium as the tracer gas, combined with air tightness detection direct pressure method, realized the high precision and fast detection process of industrial production line environment.

In this paper, firstly, the reasons for leakage of hydraulic control unit are analyzed. On the basis of comparing the advantages and disadvantages of several existing leak detection methods, a leak detection system based on helium mass spectrometry is proposed. In the conventional helium mass spectrometry leak detection, 100% pure helium is used to detect, while the helium concentration of 10% is used as tracer gas, which can greatly reduce the use cost. By studying and analyzing the relationship between the three kinds of test pressure, leakage rate and helium concentration, the most

economical parameter combination is optimized, and a hydraulic control unit leak detection system is designed. According to the demand analysis of leak detection function, the technological process of leak detection is designed. Different failure modes can be detected through different leak detection procedures, and the rationality of leak detection technology is improved. The whole system is based on the function module design method, and the modular change of different products meets the demand of production line efficiency, and meets the demand of product diversity. Control system adopts PLC and HMI combination, using ControlLogix series controller CPU control of each cylinder, solenoid valve and pump action, analog or digital signal input and output module and receiving various sensors, used to control the whole system operation process.

The zero leakage and leak test, test results show that the leak detection system achieves an accuracy of 1.0×10^{-8} atm.cc/s, compared with the traditional differential pressure method has greatly improved. The measurement ability of low concentration helium mass spectrometer leak detection system is analyzed and verified by mathematical statistics. The GR&R value is less than 10%. At the same time, the running time is less than 28 seconds by the stopwatch method. It meets the requirements of the assembly line production process.

Key Words: Hydraulic control unit, Helium leak, PLC, GR&R

目录

| | |
|--------------------------------|----|
| 摘要 | I |
| ABSTRACT | II |
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 研究的背景与意义..... | 1 |
| 1.2 检漏技术的国内外发展和现状..... | 2 |
| 1.2.1 国外研究现状 | 3 |
| 1.2.2 国内研究现状 | 4 |
| 1.3 泄漏检测技术的研究..... | 7 |
| 1.3.1 泄漏的相关定义 | 7 |
| 1.3.2 检漏方法的分类与比较 | 8 |
| 1.4 本文的主要研究内容..... | 11 |
| 第 2 章 氦质谱检漏系统的总体设计 | 13 |
| 2.1 液压控制单元的基本原理和结构..... | 13 |
| 2.1.1 ESP 的基本功能和结构..... | 13 |
| 2.1.2 液压控制单元的工作原理 | 14 |
| 2.1.3 液压控制单元的泄漏失效分析 | 15 |
| 2.2 氦质谱检漏法的基本原理..... | 18 |
| 2.2.1 氦气的优点 | 18 |
| 2.2.2 检漏仪的工作原理 | 19 |
| 2.2.3 氦质谱检漏法的分类与选定 | 20 |
| 2.3 检漏系统的因素分析..... | 24 |
| 2.3.1 检漏系统的检测需求 | 24 |
| 2.3.2 检漏仪的参数 | 24 |
| 2.3.3 测试压力、漏率、氦气浓度对成本的影响 | 26 |
| 2.3.4 检漏标准的漏率上限计算 | 28 |
| 2.4 本章小结..... | 29 |
| 第 3 章 检漏系统的硬件设计 | 31 |
| 3.1 检漏系统的结构设计..... | 31 |
| 3.1.1 功能参数设计 | 31 |

| | |
|-------------------------|----|
| 3.1.2 总体设计 | 32 |
| 3.2 气路系统的设计 | 33 |
| 3.2.1 测试气路设计 | 33 |
| 3.2.2 检漏流程设计 | 35 |
| 3.3 机械系统设计 | 37 |
| 3.3.1 框架模块设计 | 38 |
| 3.3.2 换型工装设计 | 39 |
| 3.3.3 配气工装设计 | 41 |
| 3.4 零部件选型 | 43 |
| 3.4.1 真空泵的选型 | 43 |
| 3.4.2 检漏仪的选型 | 45 |
| 3.4.3 气缸的选型 | 45 |
| 3.5 本章小结 | 47 |
| 第 4 章 检漏系统的软件设计 | 49 |
| 4.1 PLC 程序设计步骤 | 49 |
| 4.2 PLC 程序设计 | 50 |
| 4.2.1 软件功能分析 | 50 |
| 4.2.2 PLC 模块选型和配置 | 51 |
| 4.2.3 PLC 编程 | 53 |
| 4.3 功能模块的界面实现 | 55 |
| 4.3.1 界面架构设计 | 55 |
| 4.3.2 界面设计 | 56 |
| 4.3.3 报警信息 | 62 |
| 4.4 本章小结 | 62 |
| 第 5 章 检漏系统的性能评定 | 63 |
| 5.1 测量能力评定 | 63 |
| 5.1.1 零泄漏件试验 | 63 |
| 5.1.2 标准漏孔试验 | 66 |
| 5.1.3 测量能力分析 | 69 |
| 5.2 运行节拍测定 | 70 |
| 5.3 本章小结 | 72 |

| | |
|-----------------------------|----|
| 第 6 章 总结与展望 | 73 |
| 6.1 总结..... | 73 |
| 6.2 进一步工作的方向..... | 73 |
| 致谢 | 75 |
| 参考文献 | 76 |
| 个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果 | 79 |

第 1 章 绪论

1.1 研究的背景与意义

在中国加入 WTO 后，国民经济快速发展，人民消费能力日益增加，私家车已经成为人民群众的主要采购物件。2016 年国内乘用车市场产销量达到 2300 万辆之多，汽车行业已经成为地方经济的主要支柱产业。由于目前汽车制造采取的是全球化多品牌“集团采购”的模式，即各地区生产基地的采购体系组成统一的采购团队，从而在整合集团各基地采购规模的条件下，实现满足整个集团利益的组团采购。随着全球化采购进程的加快，也带来了很大的风险，一旦供应商出现问题就会导致产销环节受到牵连。据统计高田公司的气囊问题在全球引起的汽车召回数字已经超过 5000 万台，这占据了 2015 年全球汽车销量的 60%。2017 年汽车市场将面临更加激烈的竞争，作为零部件供应商也将面临新的挑战和需求，必须加强技术改造已获得质量和成本优势。

ESP 电子稳定程序其英文全称是 Electronic Stability Program，作为主动制动系统的一部分，其质量关系到整车的安全行驶安全。ECU(Electronic Control Unit, 电子控制单元)发出指令，ESP 的液压控制单元根据指令改变制动压力，调整单个车轮的制动力，从而控制车辆避免发生侧滑现象。因此液压控制单元的密封性决定了整个系统的耐久性和动态特性。如果某些微小的漏孔无法在常规气密泄漏检测被探测，从而导致整车厂制动液加注时泄漏，更严重时在终端客户使用时制动液缓慢泄漏，整车最终失去制动力而发生车祸。

当前国内厂家对液压控制单元的密封性检漏，主要是采用差压法和气泡法，差压法的检漏原理是利用高压压缩空气同时充入被测件和标准件，稳定一定时间达到气体平衡后，由压力传感器读出两边的压力值。如果被测件存在泄漏，内部压力下降，压力值的差值就是泄漏的直压，根据漏率公式可以计算出被测件的实际漏率。气泡法的检漏原理是被测物充入高压气体，在被测物表面涂抹检漏液等液体后，如果存在泄漏，漏孔出会产生气泡。这两种检漏方法在批量化生产中已广泛使用，但是在新的工业化生产要求下存在一些问题需要解决。首先是差压法检漏精度只有 $1 \times 10^{-5} \text{ atm} \cdot \text{cc/s}$ ，对标准件的容积要求高，易受充气管路的泄漏影响；其次气泡法依靠人眼观察，检测结果受人工主观影响，劳动力需求较大，生产效率低，这些方法已不能满足现代检漏对灵敏度和效率的要求。

如何提高检漏系统的检漏率，防止发生误检，降低质量风险是所有厂家共

同关心的问题。所以必须通过技术创新,研制出检漏精度更高的设备来提高产品的竞争力。当前一些厂家应用了一些氦质谱检漏设备,但因其技术复杂、使用成本高、检漏工艺标准不清晰及缺少检漏测量结果准确性评价方法,这种技术没有得到普遍化应用。

目前针对液压控制单元检漏方面的文献资料有限,非常有必要加强对液压单元检漏技术研究,设计出氦质谱检漏技术与自动化 PLC 控制技术相联合的系统,将在实际生产中产生庞大的经济利益和深远的意义。

1.2 检漏技术的国内外发展和现状

检漏系统的一个基本目的是为了检测液体或气体进入或漏出,确定产品上面的漏孔位置和漏率的大小。而泄漏是绝对的,不漏是相对的。每件物体都有漏,问题在于我们能够容忍的漏率有多大。因此使产品达到合理的工作寿命所能容忍的最大漏率是判定产品是否泄漏的关键指标。

1834 年法国物理学家 Clapeyron 将亨利定律与查尔斯定律结合起来,得出了克拉伯龙方程,奠定了理想气体状态方程的基础^[1],即理想气体在处于稳定态时,压强、体积、物质的量、温度间关系的状态方程。依据理想气体状态方程推导出了漏率计算公式^[3]。

气泡法就是漏率公式最直接的应用。在被检物内充入适量压力的气体,当漏孔两边具有压差时,气体就从漏孔的高压侧向低压侧流动,并在四周的液体中产生气泡,气泡出现的位置就是漏孔所在的点,根据气泡生成的速度、大小及周围液体的特性,可以粗略计算出漏孔的漏率。

70 年代初伴随着传感器技术的进步,国外逐步开始研究以气体为检测介质的检漏技术。到了 90 年代初,以气体直压法^[49]为基础,运用压力传感器的检漏系统逐步投入生产,通过技术的不断完善,检漏技术的精度和稳定性已经能适应各种高要求的检漏需求。

真空技术也不再局限于原先的应用,在 1940 年以后,在核工业研究等方面,真空技术作为一个独立学科而发展。在二战期间,核物理试验对高质量电器件的高真空度的需要,加快了真空技术的进步。随着检漏精度的提高,出现了离子泵检漏法、氦检漏法、荧光检漏法、同位素检漏法等各类检漏方法,当前成熟使用的检漏法主要有氦质谱检漏法、卤素检漏法、火花检漏法、气敏检漏法等^[3]。

自 20 世纪 40 年代氦质谱检漏仪应用于核工业以来^[1],氦质谱技术得到了不断的发展。新的便携性的、高压的、自动化、全无油干式检漏、宽检漏范围的技术的开发,使得氦质谱检漏广泛应用于航天航空、军事工业、科学工程、轻工、

医疗、仪表、汽车等行业。

基于氦质谱检漏法的普遍使用,国外厂家都在研发具有不同特性的氦质谱检漏仪。其中国外厂家有德国英福康,德国普发,德国莱宝,美国安捷伦,日本岛津,日本爱发科等。英福康在真空技术上世界领先,美国安捷伦收购的瓦里安公司最早在氦质谱检漏中应用逆扩散原理检漏,带来了检漏仪技术的革命性变化。普发公司分子泵方面现在处于领先。爱发科公司的HELIOT系列利用磁场偏转型质谱分析仪的原理,采用流量自主选择功能的专用排气系统为特点的设计,具有信息量丰富,全自动简便操作等特征。其排气系统采取分析管、复合分子泵等Heliot独家设计的排气部件。因此工作参数中的接触压力最大可至1200 Pa,灵敏度精度提升至 $10^{-13} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{S}$,实现排气可以任意选择流量模式。

1.2.1 国外研究现状

2004年意大利科学家G Firpo和A Pozzo在国际真空会议上提出了一种提高氦质谱检漏仪灵敏度的新方法^[50],可以将检漏灵敏度提高一个数量级。他们是通过在前级泵和主分子泵之间加一个小孔阀,这样本底信号与噪声信号的比值提高了三个数量级,从而检漏仪灵敏度提高了一个数量级^[51],常规检漏仪检漏漏率灵敏度为 10^{-11} 数量级,见图1.1所示,而修改后的漏率灵敏度可以达到 10^{-12} 数量级,见图1.2所示。

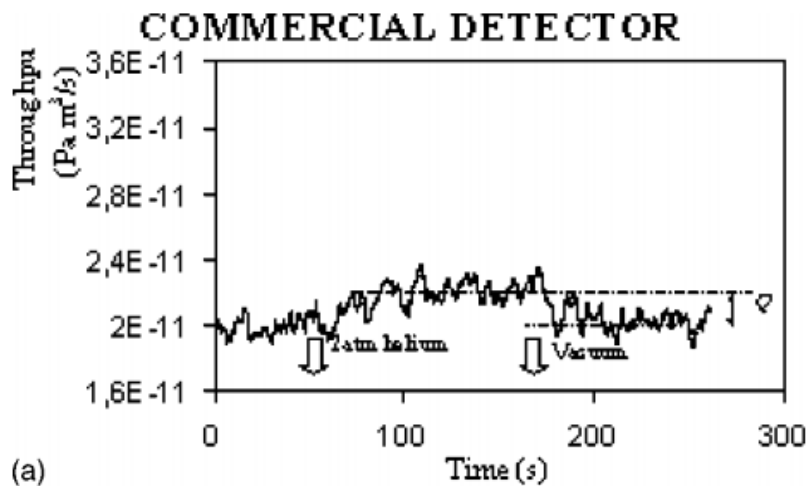


图 1.1 常规检漏仪漏率图

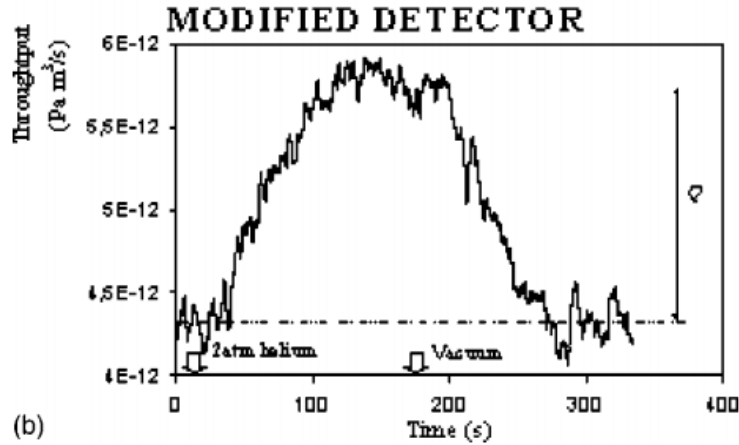


图 1.2 修改后检漏仪漏率图

美国军用标准MIL-STD-883J《微电子器件试验方法和程序》^[51]的1014章为气密试验方法，里面规定了多种测量漏率的试验方法，包括氦质谱检漏、同位素（Kr85）、光干涉检漏、碳氟化合物检漏等方法。Kr85检漏方法因带有辐射所以应用较少，光干涉检漏主要应用于陶瓷上盖封装检漏。检漏随着检漏要求和技术的发展多次更新，在2010年增加了积累氦质谱检漏试验方法，其原理图见图1.3。积累氦质谱检漏法检漏精度高，并且无需对被测件进行抽真空，通过风扇将氦分子吹散在整个检测室内，利用检漏仪自带真空泵将氦分子吸入，从而检测到氦分子。这种方法降低了应用工况的要求，但其检测时间长，不适合节拍要求高的流水线。

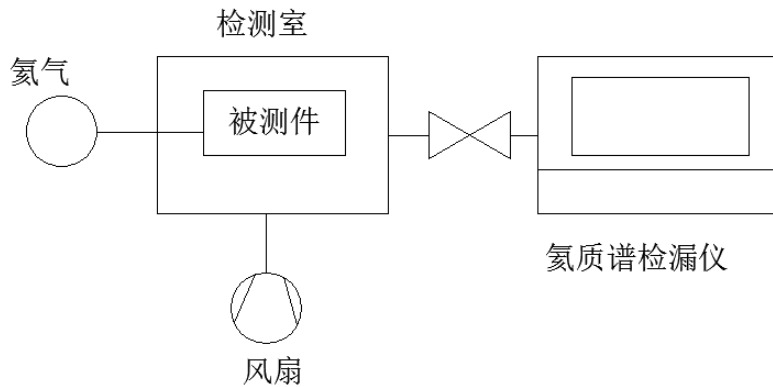


图 1.3 积累氦质谱检漏原理图

1.2.2 国内研究现状

在国内，对于检漏技术研究较晚，但随着工业技术的发展，一些新的传感器和自动化设备的研究，在国外研究的成果上也开发了新的符合中国国情的检漏系

统。浙江理工大学吴春龙设计了基于机器视觉的气密性检测装置^[4]，利用图像处理系统和PLC计算结合实现了自动化的气泡法检漏，从而避免人工检测造成的失误和减少了劳动力。北京市科通电子继电器总厂王庚林提出了一种基于氦气交换时间常数 τ_{He} 的新型漏率计算方法和检漏思路^[5]，将经典的压氦法氦质谱细检漏氦气测量漏率“豪威尔-曼方程”变量代换为新公式，将密封件的气体泄漏描述为类似电学系统里电容冲放电的物理过程，表述更加直观、形象。

西北核技术研究所的胡茂中开展了较低充氦浓度的氦质谱检漏模拟试验^[6]，试验将浓度为0.5%，1%，3%，5%的氦气分别测试了混合气体中氦气的漏率，四种浓度下测得的漏率实际值与理论计算值相比较，见图1.4，试验验证了在定量的容积内定点释放少量的氦气自由扩散至基本平均分布所需的时间。证明了保证足够的候检时间，在较低充氦浓度的条件下，漏率与浓度间具有定量关系。为在流水线应用氦质谱检漏技术时降低成本提供了理论依据。

Tab. 2 Leak detection sensitivity of low concentrations

| 充氦浓度 / % | 理论计算数值 / Pa·m ³ /s | 实验检测数据 / Pa·m ³ /s | 理论与实验值的偏差 / % |
|----------|-------------------------------|-------------------------------|---------------|
| 0.5 | 3.2×10^{-8} | 3.6×10^{-8} | 11 |
| 1 | 1.6×10^{-8} | 1.5×10^{-8} | 6.7 |
| 3 | 5.3×10^{-9} | 5.1×10^{-9} | 3.9 |
| 5 | 3.2×10^{-9} | 3.3×10^{-9} | 3.0 |

图1.4 低浓度检漏灵敏度统计

中国计量学院的周乔君针对制冷部件的泄漏检测，研发了真空氦质谱自动检漏系统^[45]，见图1.5，该系统采用PLC与触摸屏结合的模式，充分发挥了PLC可靠高效的特点。通过可触控屏幕弥补了人机交互的不足，对检漏工艺过程进行优化，实现了工位间不干扰的交叉检测并增添了大漏预检环节，显著提高了检漏效率。该研究为本文液压控制单元氦质谱检漏系统的设计提供了宝贵的经验。

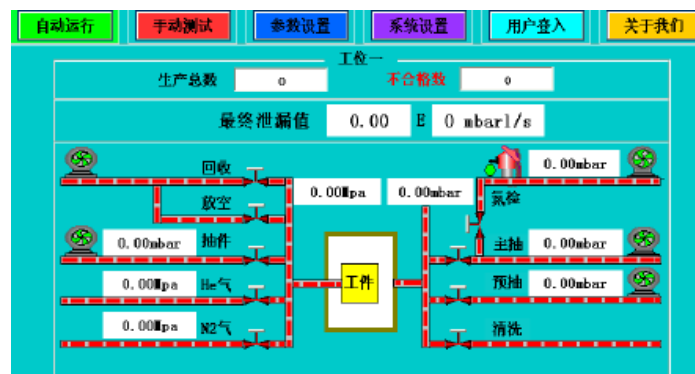


图1.5 制冷部件的泄漏检测

安徽皖仪科技股份有限公司的朱长平发明了一种氦气回收系统^[13],由回收端口、高压回收阀、低压回收阀、压力传感器、真空泵、真空泵缓冲罐、高压罐、低压罐、压缩机、隔离阀等部件组成,见图1.6。利用真空泵低压回收了被测件的真空压力,并可以设定回收的负压值,改善了被测件中氦气的回收率,通过压缩机将低压罐中的回收氦气压缩到高压罐,保证低压罐中氦气保持在负压某个阶段,保证高压回收的有效进行,为低压回收打好基础。此发明降低了氦气消耗量,是流水线应用氦质谱检漏系统的关键技术。

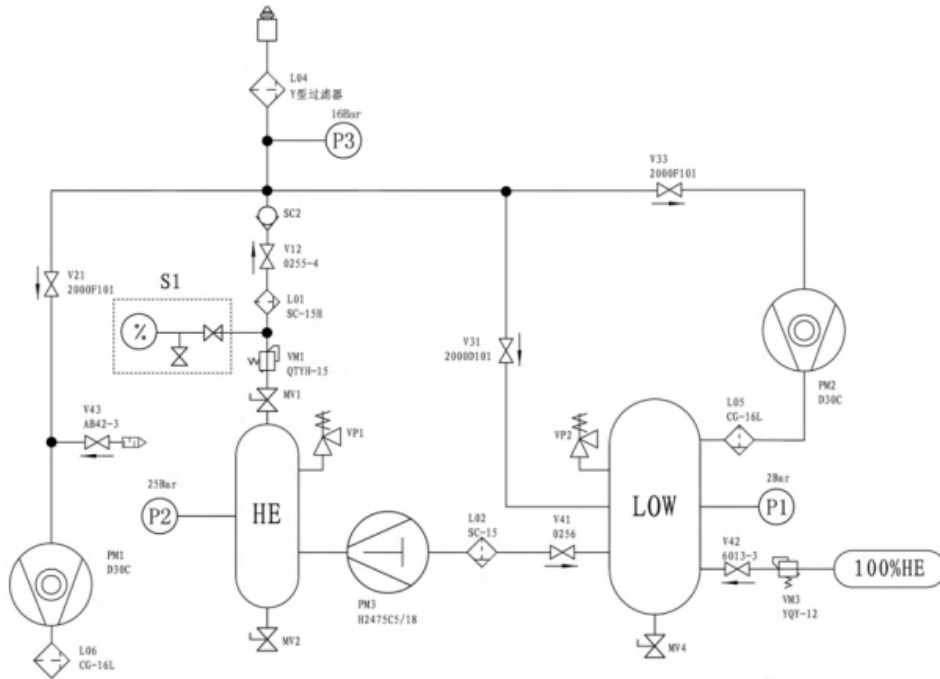


图1.6 提高回收率气路原理图

国内市场上的中科院北京科仪中心、成都仪器厂,合肥皖仪科技等氦质谱检漏仪生产厂家,面临国外大公司在本土市场上的激烈竞争,他们不断开发创新,适应国情及使用者需要,也在持续的改造优化机器,为民族工业崛起做出自己的贡献。2006年皖仪科技研制的新型氦质谱检漏仪被评为国家火炬计划项目。该检漏仪全自动控制,质谱室为180度半圆形偏转磁场的设计,它的稳定性高。采用新型进口复合分子泵加大了抽真空速度,改善了氦气本底的清除时间,有效预防了氦气污染。离子源内机械部件和电气部件分隔布置,避免了温度和电磁的干扰,增加仪器的可靠性,并可自动切换双灯丝,延长了离子源的寿命。

1.3 泄漏检测技术的研究

1.3.1 泄漏的相关定义

泄漏检测的一个基本目的是为了液体或气体进入或漏出,确定产品上面的漏孔位置和漏率的大小。而泄漏是绝对的,不漏是相对的。每件物体都有漏,问题在于我们能够容忍的漏率有多大。因此使产品达到合理的工作寿命所能容忍的最大漏率是判定产品是否泄漏的关键指标。

漏孔分有实漏孔、虚漏孔 2 种。虚漏孔是相对实漏孔而言的一种物理征象。通常是因为材质表面的细微间隙解吸气体,凝聚的气体二次蒸发,气体从这细微间隙内流出等原因引起密封容器内直压低或真空容器中负压升高的状况。实漏孔可能产生的位置在有缺陷的连接处和密封处,包括焊缝,铜连接点, O 型圈和垫圈和材料的缺陷等。

实漏孔因为形状复杂和多变、尺寸细小,无法用具体测量数值表示它的大小。因此通常用等效流导或漏气速度(简称为漏率)表示漏孔的大小。当密封容器存在压差,并且环境温度稳定的情况下,单位时间内流经漏孔的干燥气流量。用漏率示意漏孔大小时,由理想气体状态方程式(1.1):

$$pv = nRT \quad (1.1)$$

设气体质量为 m , 摩尔质量为 M , $\rho = m/V$, $n = m/M$ 代入式(1.1), 得出式(1.2):

$$m = pv \left(\frac{M}{rt} \right) \quad (1.2)$$

当 t 一定时, $\frac{M}{rt}$ 为常数, 则气体漏率就等于在单位时间内流经漏孔截面的气体容量, 得出式(1.3):

$$Q = \frac{\Delta P \cdot V}{\Delta t} \quad (1.3)$$

式中 Q =流量, ΔP =压强变化量, V =体积, Δt =时间变化量

漏率常用单位有 atm.cc/s, Pa.m³/s, mbar.l/s, Torr.l。1 atm 为 1 个标准大气压的含义, 1 Torr 为等效高度为 760mmHg 的压力, Pa 为 1 牛顿/平方米, bar 为 10 牛顿/平方厘米。这种计量单位繁杂, 它们之间换算也会带来一定的误差, 所以本文统一采用 atm·cc/s 为最终计量单位, 下表 1.1 列出了换算关系, 避免产生理解上的错误。

表 1.1 各种单位间的换算关系表

| | Pa·m ³ /s | mbar·l/s | Torr·l/s | atm·cc/s | sccm |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------|
| 1 Pa·m ³ /s | 1 | 10 | 7.5 | 9.87 | 59.2 |
| 1 mbar·l/s | 0.1 | 1 | 0.75 | 0.987 | 5.92 |
| 1 Torr·l/s | 0.133 | 1.33 | 1 | 1.32 | 78.9 |
| 1 atm·cc/s | 0.101 | 1.01 | 0.76 | 1 | 60 |
| 1 sccm | 1.69×10 ⁻³ | 1.69×10 ⁻² | 1.27×10 ⁻² | 1.67×10 ⁻² | 1 |

1.3.2 检漏方法的分类与比较

检漏的方法分很多种，它们的原理和应用环境有相似点，也有不同点。按照探测装置分类可分为传感器检漏法、氦质谱检漏法、卤素检漏法等；按照所选用的检漏方法所检测目的又可划分为定性检漏方法和定量检漏方法；根据被检产品的压力状态又可分为压力检漏法和真空检漏法。正确得选择泄漏检测方法可以更加准确及有效地完成检测，节约成本，提高工作效率。下文根据几种主要的检漏方法加于简单说明。

1) 气泡检漏法

对密封容器进行密封检漏时，先用压力水泵将密封容器内部装满水，加压至一定压力，再将检漏液喷涂在密封处或被测件放置在水箱内，观察密封处是否有气泡产生。检漏时需要等待一定的时间，直到有气泡从密封处渗透出来。所以只能用气泡的数量和大小表示泄漏量的大小。虽然可以通过目视被测件表面是否有气泡产生，很容易找到泄漏发生的位置，但是对于形状比较复杂或者体积比较巨大的被测件，则目视可能无法直接察看到泄漏位置。而且由于检漏人员的操作方法的的不同，检漏结果也会完全不一样。气泡检漏法的成本非常低，除了气源无需添加额外的检测设备。检漏过程如图 1.7 所示。

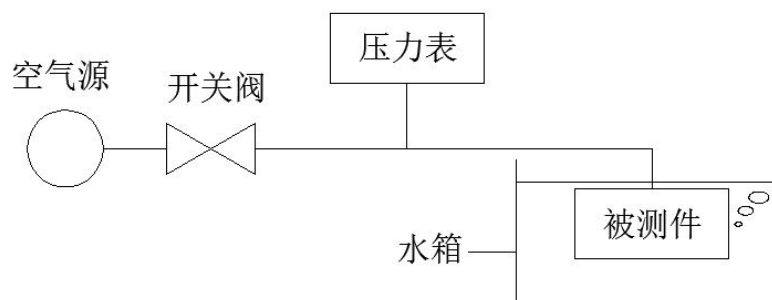


图 1.7 气泡法检漏原理图

气泡法因其所需检测设备简单，操作方便，无需特别的技术培训，所以过去一直是最常用的检漏方法。然而这种方法只能定性的判断泄漏位置，而无法定性的知道具体泄漏漏率，也有很多不足之处：

(1) 需要人工操作，人工判断，一是主观判断增加了漏检的可能性，二是人力成本较高，不适应工业化生产的需要；

(2) 有些漏率需要较长时间才能观察到气泡，造成检漏时间较大，无法提高生产效率；被测件必须涂抹肥皂液或者整体放在水中，这对于一些有防锈要求的产品而言，需要进行二次保护处理，额外增加了成本；

(3) 因其无法定量的给出具体漏率值，使得工程人员无法具体研究漏孔产生的原因，从而改善生产工艺，对质量的改善没有帮助。

2) 直压检漏法

气压检漏法是当前广泛使用的气密性检漏法，具有操作简单，气源无污染，检测结果准确等特点。普遍使用的有直压法和差压法这两类。直压法是将高压气体充入被测件，当气压达到要求的压力值时，关闭气源，停止升压，同时关闭阀门，稳定一定时间后，开始记录压力传感器的第一个压力值，接着保压一定时间后，记录第二个压力值，两个压力值变化量即为直压。通过压降数值的大小可以客观得表示出漏率的大小。这种检漏方法快速，操作简单，检漏结果准确，是检测泄漏的一种常用的方法。检漏过程如图 1.8 所示。

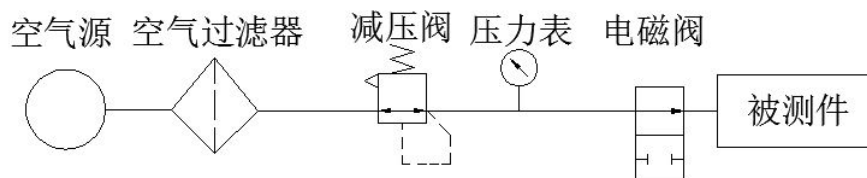


图1.8 直压法检漏原理图

直压法因其可以在少量设备成本的基础上实现定量化漏率检测，所以得到了普遍的应用，并且基于压力传感器技术的发展，这种检漏方法也极易实现在流水线上自动化检漏，但这种传感器技术也易收到环境因素的干扰造成一些不足之处：

(1) 压力传感器多采用模拟量信号输出，即 PLC 将接收到的电压或电流输出值换算成实际压力值。这种输出量容易受到输入量即电源电压的影响而波动；

(2) 直压法的理论漏率计算公式式基于理想气体方程，方程中除了压力和体积这些变量可以固定，还存在温度这个因素无法准确控制。温度的变化也会造成输出值的变化。

3) 差压检漏法

差压法与直压法泄漏检测过程相似，不同点是差压法加入了标准件，将气体同时充入被检设备与基准件内，同时记录两边的压力值，在保压一定时间后再次记录两边的压力值，计算两边压力值的差值，将两个差值相减得出压力差，依据压力差是否大于设定值判断泄漏状况。此方法相对比直压法检漏精度更高，且容易校准。也是当前的液压控制单元检漏系统广泛采用的检测方法。检漏过程如图 1.9 所示。

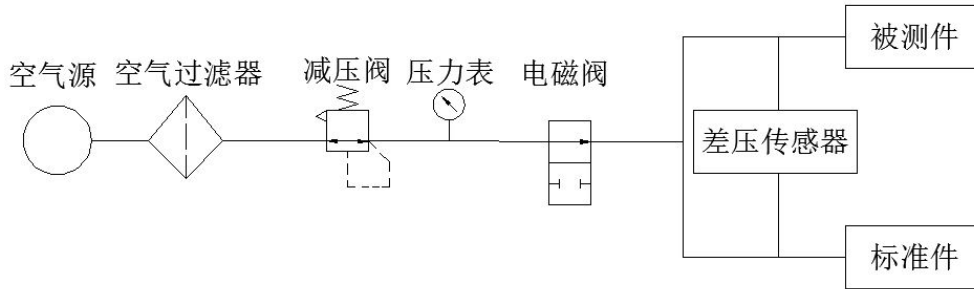


图 1.9 差压法检漏原理图

差压法是在直压法的基础上发展而来的，基准件的引入使得环境因素的变化造成的干扰同时影响了基准件和被测件，所以输出值具备更高的稳定性。而且因为两路气压同时作用于传感器，两路的作用力同时抵消，所以更高的测试压力也不会影响其检漏的灵敏度。差压法因其的高精度和稳定性，现在已成为主流的泄漏检测方法。但因为基准件的容积是固定的，对于被测件的容积的细微变化也会使得检漏结果产生不一致。

4) 氦质谱检漏法

氦质谱检漏法的原理是将被测件置放在一个密封的腔体内，用真空泵将腔体内抽至检漏所需要的真空状态。然后将含有氦气的高压混合气体通入被测件的内部。如果存在漏孔，则氦气会通过漏孔跑到真空室内，这时用质谱检漏仪就能探测出真空室内的氦分子含量，然后通过内置的标准漏孔的漏率等效换算成被测件的实际漏率。检漏过程如图 1.10 所示。因为氦分子非常小，可以穿透非常细微的漏孔，所以它的检漏精度非常高，适用于对密封性能要求较高的产品。

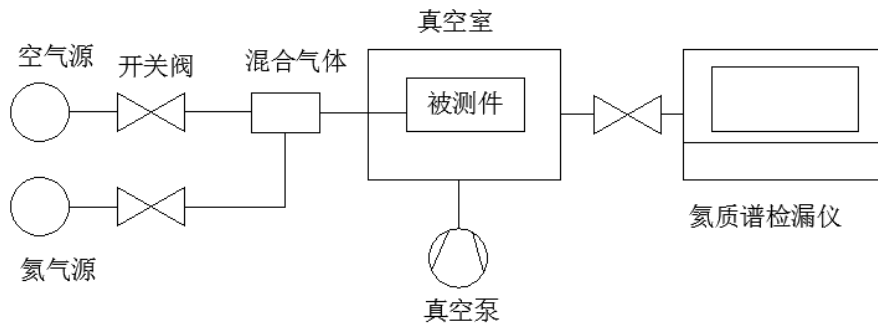


图 1.10 氦质谱法检漏原理图

氦质谱检漏法的灵敏度比差压法高了四个数量级,因此可以检测出极其微小的漏孔,甚至于类似于毛细血管型多路交叉的漏孔,是现有精度最高的检漏方法,灵敏度对比见表 1.2。并且只要提供足够的真空环境,氦质谱检漏不会受到如电源电压、温度和容积等因素的干扰,早期多应用于航天及军工这些要求较高的领域。其系统复杂,检测标准涉及了非常多的工艺参数的确定,需要提供较高的真空度,氦气使用成本非常高,操作人员需要一定的技术水平阻碍了广泛的应用。本文所研究的液压控制单元因作为汽车零部件里的关键安全件,它的密封性能关系到人员安全。所以选用氦质谱检漏法可以极大地提高它的密封性能检测水平,提高它的质量水平。本文将通过对氦质谱检漏原理的详细研究,确定出适合液压控制单元的检测标准,并通过对检漏工艺参数的优化降低生产成本,以实现高效率高质量低成本的批量化流水线生产应用,为其他相关产品的使用提供经验。

表1.2 检漏法分类灵敏度对比表

| 检漏法灵敏度 | | | | |
|--------|-----------------------|---------|--------|---------------------------------|
| 检漏方法 | 工作方法 | 现象 | 设备 | 检漏灵敏度 atm·cm ³ /s |
| 气泡法 | 注水或涂抹检漏液 | 水中冒气泡 | 人眼 | 1x10 ⁻⁴ |
| 直压法 | 充入一定压力的气体 | 压力下降 | 压力传感器 | 1x10 ⁻² |
| 差压法 | 待测件与标准件同时充入一定压力的气体 | 压力下降 | 压力传感器 | 1x10 ⁻⁵ |
| 氦质谱检漏法 | 待测件密封罩抽取真空后,充入一定浓度的氦气 | 输出仪表的读数 | 氦质谱检漏仪 | 1x10 ⁻¹¹ |

1.4 本文的主要研究内容

本课题来源于某汽车 ESP 制造厂家,通过对氦质谱检漏原理进行研究,并结合液压控制单元的泄漏特征,利用氦质谱检漏仪优化了现有检漏工艺流程,设计出一套用于液压控制单元的自动检漏系统,提高了检漏精度,降低了氦质谱使用成本,淘汰了人工检测,降低了液压控制单元的质量风险。

本文将从以下几方面对该氦质谱检漏系统做详细分析和说明:

第一章阐述了 ESP 液压控制单元检漏的研究背景和意义,泄漏可能会造成人员伤害。通过介绍了国内外泄漏检测技术的发展现状,对比分析了几种检漏方法的优缺点,根据检漏灵敏度等级确立了用氦质谱检漏法代替差压法,从而提高检漏系统的检漏精度。

第二章介绍了 ESP 液压控制单元的工作原理,利用爆炸图分析了内部结构

和密封设计，归类了发生泄漏失效模式的根本原因，而某些泄露是无法用差压法检测出。通过对氦质谱检漏法的基本原理和具体使用方法的研究制定出检漏系统所相关的因素。通过研究确定了检漏系统的相关性能指标，为系统关键部件的选型打下基础。并通过研究漏率的计算公式，分析出测试压力、漏率、氦气浓度三者间关系，将三个因素汇制成双曲线图，找到其最优组合点。从而在不影响检漏精度的条件下，得出低浓度氦气检漏的工艺参数，并用漏率公式计算合适的验算出合适的检漏标准。

第三章详细介绍了检漏系统的硬件设计。根据总体方案，设计了测试回路和真空回路，对真空室、真空泵元件的选型进行分析验证，优化系统结构和选择合适的气动元件，并根据产品特点结合快速换型的要求设计了换型工装和配气工装。同时完成了关键零部件的选型设计。

第四章完成了检漏系统的软件设计，按照性能参数要求遴选合适的 PLC 及电气控制元件，结合检漏功能需求设计了系统的逻辑控制流程。以人机工程学为依据设计了人机交互界面。

第五章对氦质谱检漏系统的检漏结果进行试验，常规的气密检漏系统验证手段是通过测量标准漏孔的测量值，将测量值与标准漏孔的相比，计算其误差率，如果误差率小于设定标准，则系统为合格。这种评定方法比较简单，适合一些精度要求不高的场所。本文将采用测量系统分析中的 GR&R 方法来评价检漏系统的准确性和精确性，用数学统计方法对零泄漏件和标准漏孔的测量值进行分析，从而得出检漏系统的精确性和准确性。并用秒表法验证生产运行节拍是否符合生产工艺要求。

第 2 章 氮质谱检漏系统的总体设计

2.1 液压控制单元的基本原理和结构

本文是针对液压控制单元来设计的泄漏检测系统，所以需对 ESP 及作为其执行机构的液压控制单元有所了解。

2.1.1 ESP 的基本功能和结构

ESP 汇合了 ABS (Antilock Brake System, 防抱死制动系统)、TCS (Traction Control System, 牵引力控制系统) 和 YSC (Yaw Stability Control, 横摆稳定性控制系统) 三个系统, 在 ABS 和 TCS 的基本功能上扩充了其功用, 添加了了车辆转向行驶时侧向加速度传感器、横摆率传感器和方向盘转角传感器。通过 ECU 支配四个车轮的刹车力和驱动力, 确保机车行进时的侧向平稳性。ESP 的组成如图 2.1 所示。

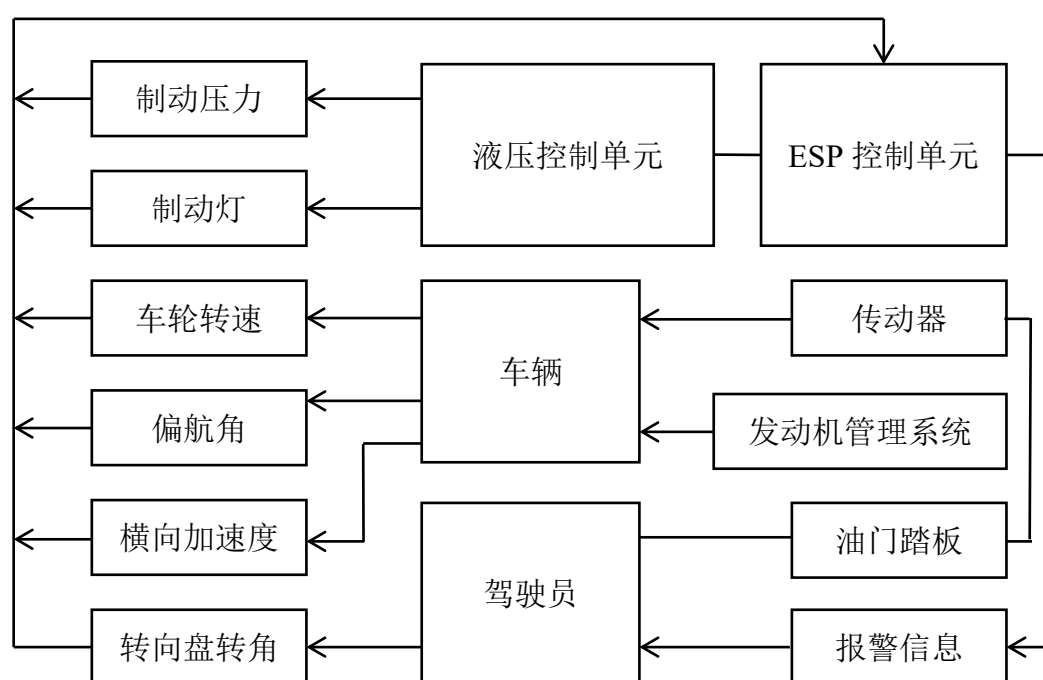


图 2.1 ESP 的组成

ESP 可以迅速探测车辆过度转向或不足转向现象。在车辆行进过程中, 制动主缸传感器监测刹车力, 车速传感器监测车轮的速度, 方向盘转角传感器监测驾驶员行进方向和角度, 侧向加速度传感器和横摆角速度传感器检测车辆的横摆和侧倾速率。ECU 汇总这些信息后, 将这些信息与系统内置逻辑程序匹配, 然后运算出车辆当前转向和速度是否符合驾驶员的行进意图。并由 ECU 发出动作命令,

调节发动机的转速和刹车系统的制动力。当车辆因惯性导致实际行驶路线与预期的行驶路线不同时，则 ESP 的液压控制单元立即调整 4 个车轮的制动力，车轮的制动钳执行不同的制动力，车辆的转向不足被纠正，防止车辆发生车轮抱死或侧滑现象，从而保证车辆的安全行驶。

2.1.2 液压控制单元的工作原理

液压控制单元是 ESP 的核心部件，主要由增压常闭阀（Dump）、减压常开阀（ISO）、回油泵（Pump）和储能器（LPA）等控制阀构成。它根据电子控制单元（ECU）的指令，通过控制每个液压控制阀的开闭状态来建立不同的液压回路，达到保压、减压、增压的控制动作，进而自动调节每个车辆制动钳的制动压力。回油泵通过与马达形成柱塞泵功能将流回储能器的制动液增压后送回制动主缸，使得制动回路内制动液循环平衡。储能器内部的弹簧装置将制动液的液压转化为弹簧力。

早期的液压控制单元的液压回路采用单回路设计，液压输出口只有一个，同时给四个车轮提供制动力，但只要整个系统中有某一处产生泄漏，就会造成整个制动力丧失，无法刹车。为了提供足够的安全冗余，现在的安全法规规定需采用双回路系统。两个液压回路完全独立运作，互不干扰。当一路回路失效后，另一路仍可以提供制动力，保证行驶安全。双液压回路与四轮的布置结构通常采用平行式或交叉式。平行式就是一个液压回路连接双前轮，另一个液压回路连接双后轮。交叉式就是一个液压回路交叉连接左前轮和右后轮，另一个液压回路连接右前轮和左后轮。因交叉式设计可以让在单回路的作用下前后轮都分配到制动力，不会丧失稳定性，所以当前车辆制动设计多采用交叉式回路，如图 2.2 所示。MC1 为 1 号液压回路的输入口，它连接了右前（FR）轮和左后（RL）轮。MC2 为 2 号液压回路的输入口，它连接了右后（RR）轮和左前（FL）轮。

如果某一液压回路发生泄漏，那么这一回路连接的车轮将无法得到足够制动力，导致车辆无法刹车或偏移。所以在液压控制单元所有零件安装到位后必须对整个单元进行泄漏检测，大泄漏可以通过肉眼观察或者其他传感器手段直接观察出来，一些细小的泄漏必须通过高精度的检漏系统才能检测出来，本文所研究的检漏系统就是通过应用氮质谱技术提升其检漏精度。

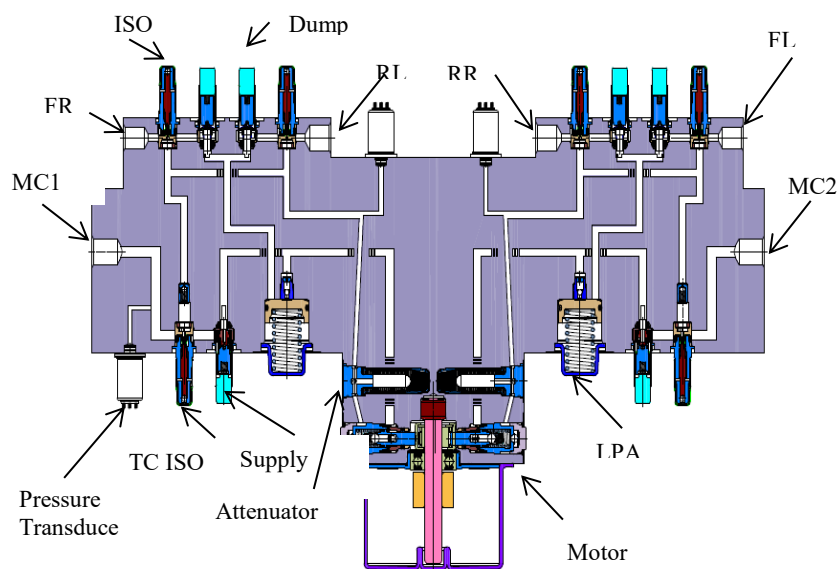


图 2.2 液压控制单元液压回路

2.1.3 液压控制单元的泄漏失效分析

液压控制单元的泄漏失效模式主要有内泄漏和外泄漏两种。内泄漏指的是液压控制单元内部回路发生不必要的液体流动，通常是由于液压控制阀内部阀芯不密封造成的。这种泄漏一般为轻量渗漏，制动液始终在液压回路中，只是引起液压压力波动。但控制单元通过监测液压回路中的压力传感器，控制液压泵的补油动作，可以及时弥补这种缺陷或提示报警。

外泄漏指的是液压控制单元内部的制动液与外部发生液体流动，外泄漏通常发生在控制阀压装面和控制阀焊接面，如图 2.3 所示。

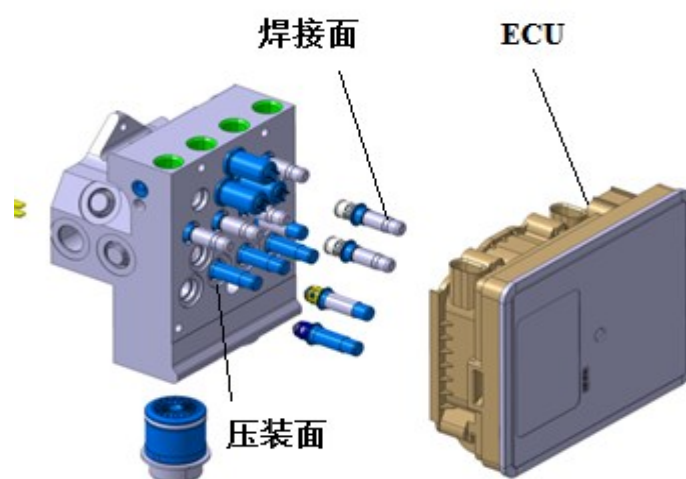


图 2.3 液压控制单元与 ECU 组装图

外泄漏的一种失效模式是导致制动液缺失，外部空气进去，从而导致制动踏板行程逐渐加长，制动性能降低。假如制动液快速缺失，这时液位传感器不能及

时报警提示，液压回路形成不了足够的液压力，无法夹紧摩擦片，使得制动力快速下降，车辆无法刹停导致发生事故。外泄漏的另一种失效模式是导致制动液将直接与 ECU 接触，从而引起 ECU 内部电子回路的短路，ECU 无法及时控制各个高速电磁阀动作，导致制动钳无法提供足够的制动力，从而刹车不及时而发生车祸。液压控制单元的外泄漏将直接影响到 ESP 的正常工作和整车的安全性能，因此本文主要研究的是其外泄漏。

泄漏漏孔主要有两种形式：间隙泄漏和渗透泄漏。间隙泄漏指的是泄漏点位于密封接触面的间隙，一般是因为密封面的夹紧力缺失、橡胶件老化、腐蚀等因素引起的。渗透泄漏指的是密封件内部自身的缝隙渗透出来，一般是因为自身材质、加工工艺和润滑性引起的。密封的主要原理就是通过消减这种缝隙来达到的。常见的密封方法有堵塞和隔断泄漏渠道这两种。而液压控制单元的泄漏既有间隙泄漏，也有渗透泄漏，其中压装面泄漏属于间隙密封，如图 2.4 所示。液压控制单元的压装工艺属于堵塞这种方法，利用铝材质软这种特性，在液压控制阀被压机压紧后，通过压力将铝壳体挤压变形，变形后的铝填补了与控制阀之间的间隙，从而实现了密封作用。

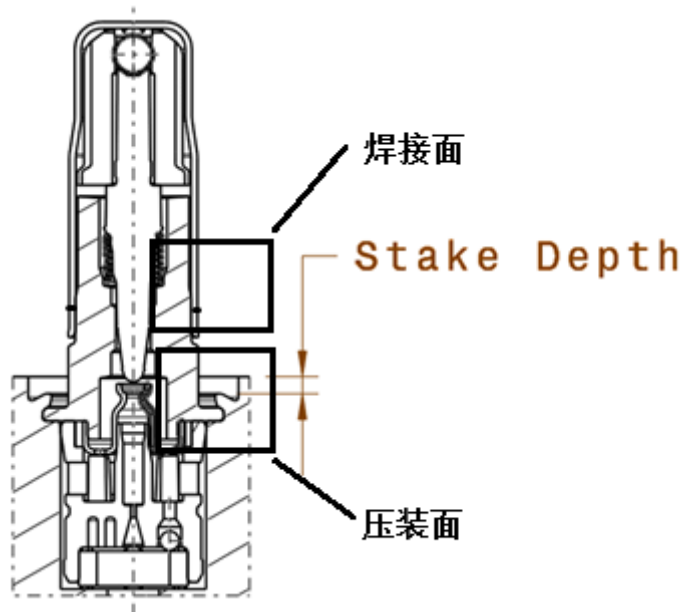


图 2.4 液压控制阀外部泄漏面

压装面泄漏原因：

压装工艺是通过铝材质挤压变形后与工件本身啮合，靠自身的压紧力形成密封面。如果工装精度发生偏差会发生挤压层厚度过薄或不一致的现象，那么工作时在高压制动液作用下，挤压面不足以阻挡液压力，就会造成挤压面破裂，从而发生泄漏。这种泄漏模式可以通过气密高压测试探测出来，将被测件内部通入高

压气体，保压一定时间后，观察内部的直压。如果压力下降变化量超过了设定的最大直压，说明被测件耐压强度不够。

焊接面泄漏属于渗透泄漏，焊接工艺属于隔断方法，如图 2.4 所示，所示利用激光束在非常短的时间内形成热能，热能将控制阀内外部金属融化后形成一个熔池如图 2.5 所示，熔池内的金属固化后形成焊缝变为一体，达到密封的作用。所以对焊缝的宽度和深度都有相应的尺寸要求，焊缝尺寸如图 2.6 所示。

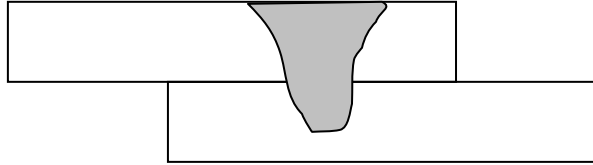


图 2.5 焊接熔池剖面

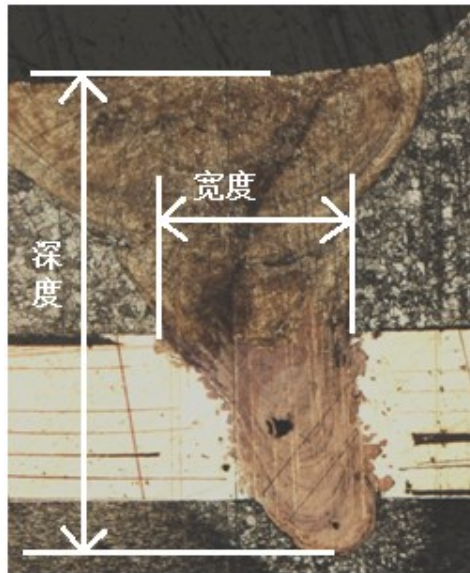


图 2.6 焊缝尺寸

焊接面泄漏原因：

焊接中普遍的质量问题有气孔、夹渣、裂纹、未焊透等。气孔指熔池内的空气会随着焊接的热能而膨胀形成气泡，因为气体比较轻，会向上逃逸出，那些没有逸出的气泡凝固在熔池内形成了气孔如图 2.7 所示。

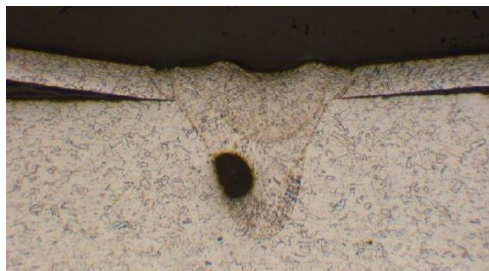


图 2.7 焊接气孔放大图

焊接裂纹是由于焊接熔池内有不同材质的杂质，这些杂质熔点比焊材低，所以焊材凝固后杂质才开始凝固。杂质在凝固时造成晶体开裂。裂纹会造成非常严重的危害，会形成肠道型的漏孔如图 2.8 所示，并从裂纹处发生结构性破坏。这种泄漏模式采用常规的差压法气密检测无法百分百检测出一些细微的裂纹，因为裂纹足够小，空气分子太大在漏孔处形成表面张力而无法渗透出。所以必须采用氦质谱检漏法检测这种微小的漏孔。

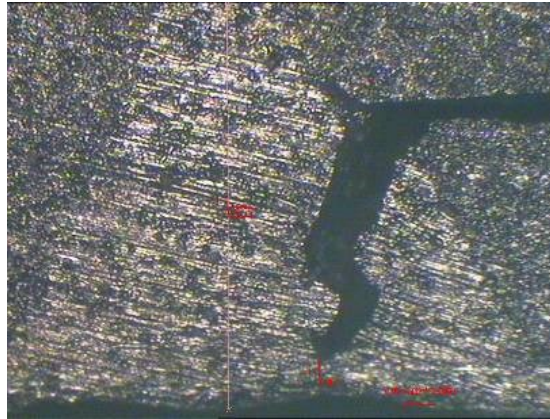


图 2.8 焊接裂纹放大图

将上述五种失效模式汇总后如表 2.1，根据其失效原因，主要分为工艺和材质两类，结合现有的工艺经验，本文优选了几种检测方法，可以用于检漏系统的工艺流程设计。

表2.1 泄漏失效的优选检测方法

| 泄漏失效模式 | 泄漏失效原因 | 优选检测方法 |
|--------|---------------|--------------|
| 压装面未闭合 | 压装不到位 | 真空检测 |
| 压装面崩裂 | 铝材压装厚度或材质强度不足 | 高压检测 |
| 焊接面未焊 | 工艺缺失 | 真空检测 |
| 焊接面气孔 | 焊接工艺缺陷 | 真空检测 |
| 焊接面裂纹 | 焊接工艺缺陷或材质强度不足 | 高精度气密检测和高压检测 |

2.2 氦质谱检漏法的基本原理

2.2.1 氦气的优点

质谱检漏可以采用氦气、氙气等其他其他，但在流水线中采用氦气来探测漏孔更具备优势：

(1) 氦气在空气中浓度极低，氦质谱仪探测它的本底噪声信号极小，很容易和其他气体区分出来，因此微小的泄漏也能探测，灵敏度高；

(2) 氦分子小，分子质量为 4，比其他气体更加容易穿透细微的漏孔，漏出

的气体多，灵敏度高；

(3) 元素表中氦附近的分子是氢（分子量为 2）和碳（分子量为 6），质荷比区分大，因此在磁场里圆周运动的半径与其他分子距离很远，降低了对氦质谱仪内某些部件的加工精度要求；

(4) 氦气是惰性气体，无毒及非易燃，实现对被检测件无损检测过程。

因此氦气是一种非常理想的检漏示踪气体。

2.2.2 检漏仪的工作原理

设计以氦气为示踪气体进行质谱检漏的仪器称为氦质谱检漏仪，它除灵敏度高外，还具有适用环境广、机能稳定、检漏讯速、操控容易等优点，是在气体检漏技术中检漏精度最高的检漏方法。氦质谱检漏仪的核心原理是在磁偏转下分离质谱进行离子质量分析。其组成部件主要包括质谱室、真空系统、电气系统等，质谱室是其核心部件，主要由离子源、磁场分析器、接收器组成，见图 2.9。

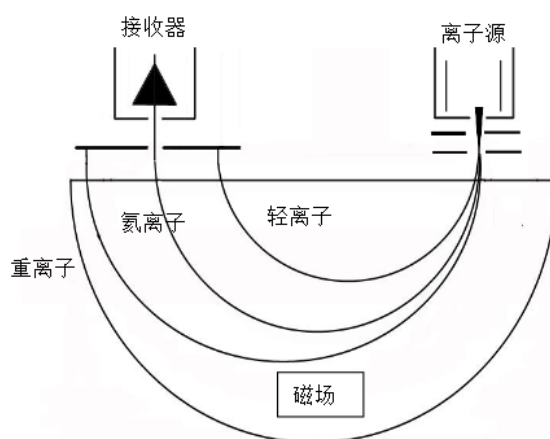


图 2.9 氦质谱检漏仪的质谱学原理图

离子源的作用是电离化气体分子，使其成为一组拥有一定能量的离子束。不同质荷比的离子在通过一个均匀磁场分布的分析器时由于运动路线不同而分离。通过调整出口电极的距离，只允许氦离子可以通过，撞击在接受器上。具有一定能力的离子束垂直射入均匀的磁场分析器后，由于离子收到洛伦兹力作用产生偏转轨迹，形成圆周运动，圆周半径为式 (2.1)：

$$R = \frac{144}{B} \times 10^{-4} \sqrt{\frac{M}{Z} U} \quad (2.1)$$

式 (2.1) 中 R —— 离子偏转圆周运动半径 (cm)

B —— 磁场强度 (T)

$\frac{M}{Z}$ ——氦离子的质量与电荷之比

U ——离子加速电压 (V)

由上式可知,当运动半径和磁场强度为常数时,通过调整加速电压量可达到氦离子全部穿过磁场和出口电极而捕捉到最大氦离子流,到达接收器而被检测。接收器的作用是捕捉到穿越出口电极的氦离子,并用电流放大器测定氦离子流的电流量,将此电流量与检漏仪内置的标准漏孔获得的电流量进行换算,从而得知捕捉到的氦离子质量就可计算出漏率。显示漏率可由式(2.2)算出:

$$Q_e = \frac{I_n}{I - I_0} Q_0 \quad (2.2)$$

式(2.2)中 Q_e ——显示漏率 ($\text{atm} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$)

I_n ——检测时输出值

I_0 ——本底噪声

Q_0 ——标准漏孔的标称漏率 ($\text{atm} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$)

简单来说就是氦质谱检漏系统在单位时间内获取了一定质量的氦气,运用理想气体方程推算了漏孔的漏率。

氦质谱检漏系统包含真空系统和电气系统。真空系统包含主泵、前级真空泵、预抽真空泵、控制阀、真空规、标准漏孔等部件。这些管件为质谱室工作运行时维持真空环境,将漏出的氦气抽至质谱室内。真空系统的真空度将直接关联到系统最小检漏率。电气系统主要包括供电电路、控制电路、离子源电路、真空电路、灯丝电路、控制屏等。多路电路为系统的稳定运行、互不干扰提供保障。

2.2.3 氦质谱检漏法的分类与选定

氦质谱检漏通常有五种方法。根据检漏仪的工作方式分为吸枪法和喷吹法两种。根据被测件受压状态又分为背压法、真空法和氦罩法。几种方法有其各自的应用特点。

1) 吸枪法检漏

如图 3.2 所示,将待测件充入氦气,连接检漏仪的吸枪对被测件进行检测。如果存在漏孔,泄漏的氦气被吸入检漏仪。吸枪法可以快速定位漏孔的位置,并且无需将被测件抽真空。检测原理如图 2.10 所示。

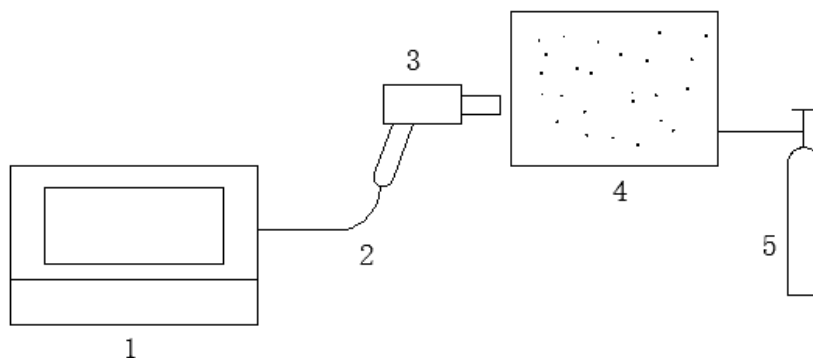


图 2.10 氦质谱吸枪法检漏原理

1-检漏仪 2-软管 3-吸枪 4-被测件 4-氦气源

2) 喷吹法检漏

在进行泄漏点排查时因其简单、方便经常使用到喷吹法。检漏时，将被测件连接上已经抽至极限真空的质谱检漏仪，并连续抽真空。当质谱室内达到真空时，用从氦气瓶引出的喷枪在所有密封处附近进行喷吹氦气。喷吹法可以探测复杂的管路泄漏，但对单个零件探测来说，效率低，成本高。检测原理如图 2.11 所示。

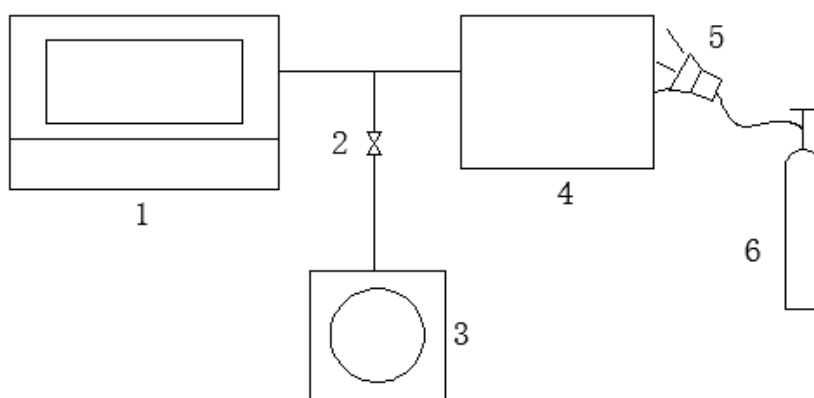


图 2.11 氦质谱喷吹法检漏原理

1-检漏仪 2-辅助阀 3-辅助泵
4-被测件 5-喷枪 6-氦气源

3) 背压法检漏

小型密封容器既无法对内抽气也无法充气，通常使用背压法。采用背压法主要有加压、清洁、检漏三个过程。加压过程为将被测件放于高压的氦气室中，加压浸润一定时间，可达几小时或几天。如果被检产品表面存在漏孔，因为内外部的压力差，氦气往低压的地方流动，便进入密封容器内部，使得内部中氦分子含量增加。清洁过程为将被测件拿出，用高压气体吹去表面的残留的氦气。检漏过程为将被测件置入真空测试腔内，被测件内部的氦气因为存在负压差通过漏孔渗漏到真空测试腔内，再被吸入到氦质谱检漏仪，因而测量出被测件的漏率。检漏

系统测得的漏率值为测量漏率，根据公式换算后得出等效实际标准漏率。检测原理如图 2.12 所示。

背压法的优势是检测灵敏度高，能够一次性大批量的检测小型被测件。背压法的缺点是检漏时间过长，如单次只检测一件大型被测件，效率低下。此外，每个测量漏率因为分子流的范围的关系，根据公式会换算出两个等效标准漏率，所有需采用粗检法鉴别是否气体状态超过分子流范围，以排除大漏的可能。

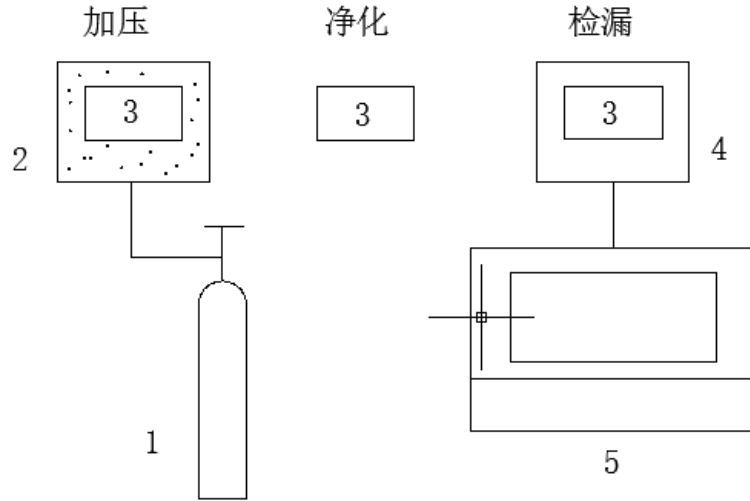


图 2.12 氦质谱背压法检漏原理

1- 氦气源 2-高压氦室 3-被测件 4-真空室 5-检漏仪

4) 真空法检漏

选用真空法检漏时，将被测件放置在一个真空室中，真空室和氦质谱检系统相连。检漏时，先用粗抽泵对真空室进行抽真空，达到极限真空后，然后关闭粗抽泵，接着打开检测阀，连接真空室和氦质谱室。此时被测件的充气接口与氦气源相连，被测件内部含有一定压力的氦气。若是被测件存在漏孔时，氦气就会穿过漏孔进入真空室，再被吸入氦质谱检漏仪，氦离子电流量会变大。将电流变化量与用标准漏孔测得的电流量做正比计算，乘上标准漏孔漏率即可得出被测件的漏率值。检测原理如图 2.13 所示。

真空压力法的优点是检漏时间短，能够实现高压氦气下对被测件检查，压力增大有利于放大漏孔漏率的实际值，加强检漏灵敏度。真空压力法的缺点是检漏系统气路管道设计繁杂，对真空系统的设计及极限真空功能要求高，不同结构的产品必须设计独立的检漏真空室。

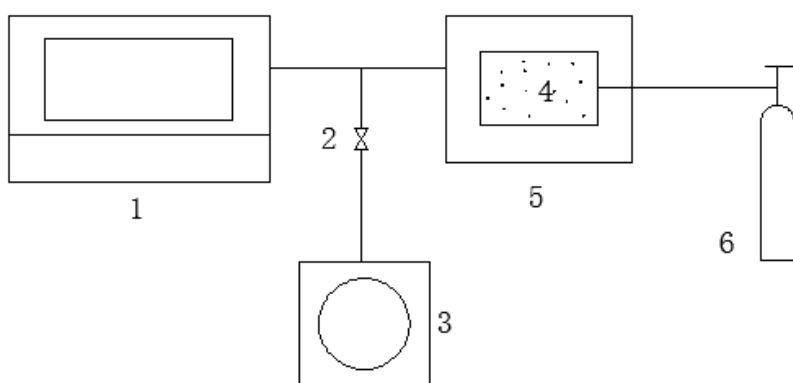


图 2.13 氦质谱真空法检漏原理

1-检漏仪 2-辅助阀 3-辅助泵
4-被测件 5-真空室 6-氦气源

5) 氦罩法检漏

氦罩法的检测原理正好与真空法相反。它是将被测件放置于一个充满氦气的容器内，而检漏仪与被测件相连通。通常这种方法是对喷吹法的补充，当喷氦无法覆盖大型容器的所有可能漏点时，用氦罩法检漏将更加快速的确定总的泄漏率。检测原理如图 2.14 所示。

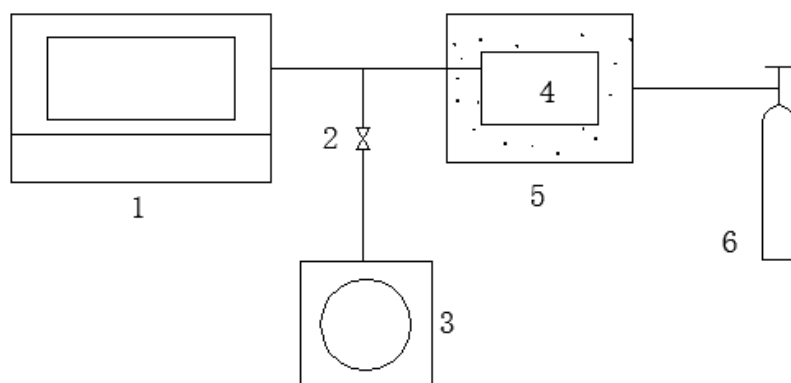


图 2.14 氦质谱真空法检漏原理

1-检漏仪 2-辅助阀 3-辅助泵
4-被测件 5-氦罩 6-氦气源

本系统选用真空法来搭建系统基本结构。因为根据第二章对液压控制单元泄漏的分析，当其在工作状态时，内部会产生高达 15MPa 的液压压力，高液压使得制动液通过漏孔向外界泄漏。这种压力泄漏的流向是与真空法相同的，可以真实模拟出泄漏工况。其次氦气充注于液压控制单元的内部，它的内部容积远远小

于真空室的有效容积，可以减少氦气的使用量。再次在氦气充气检漏完成后，可以及时的通过切换管路，将氦气联通至回收装置，这时的氦气没有与空气混合过，可以保证稳定的氦气浓度用于二次循环利用。所以选择真空法即可保证检漏的灵敏度，也可以有效的降低氦气使用成本。

2.3 检漏系统的因素分析

依据对液压控制单元泄漏特征的分析及对氦质谱检漏原理的了解，提出氦质谱检漏系统的检漏功能需求及检测漏率标准，为系统工艺流程和功能模块的设计及关键元器件的选型提供依据。

2.3.1 检漏系统的检测需求

检漏系统保证检漏结果的正确性首先应确保系统自身的准确性，其次对影响被测件泄漏的几种因素的探测。根据真空法的检漏原理，系统应进行真空室真空度检测确保外界空气中的氦气不会影响检测结果，并具有内外部标定功能已确保结果的准确性。被测件内部真空度和粗漏检测都属于预检，通过极少的步骤完成简单的检测过程，这样可以节约系统运行节拍和氦气使用量。基于液压控制单元在实际使用中内部将建立 10MPa 的液压，通过耐压强度检测可以将一些隐形缺陷暴露出来。最后再进行氦质谱细漏检漏完成对细小的漏孔的探测。各项检测要求如表 2.2 所示。

表 2.2 液压控制单元检测项目要求

| 序号 | 检测项目 | 检测参数 | 精度要求 |
|----|------------|-------|----------------------|
| 1 | 真空室真空度检测 | 真空压力 | ±0.5%FS |
| 2 | 被测件内部真空度检测 | 真空压力 | ±0.5%FS |
| 3 | 被测件粗漏检测 | 绝对压力 | >10MPa |
| 4 | 被测件耐压强度检测 | 绝对压力差 | >10MPa |
| 5 | 被测件细漏氦质谱检测 | 漏率 | 1.0×10^{-8} |

2.3.2 检漏仪的参数

检漏系统设计的核心是确认各个参数，包括灵敏度、最小可检漏率、响应时间、清除时间、极限真空、真空流导、真空抽速、测试压力、氦气浓度和漏率。这些参数决定了系统的配置和元器件的选型。

1) 灵敏度与最小可检漏率

灵敏度意为仪表输出变化值与输入值的比值。而氦质谱检漏系统的灵敏度的输出变化值是显示值的变化，输入值即是漏孔的漏率。氦质谱检漏系统内部装有

1 个已知漏率的标准漏孔，平时此旁路出常闭状态。在标定时，将标准漏孔打开，显示屏输出变化值，那么

$$\text{氦质谱检漏系统灵敏度} = \frac{\text{标准漏孔引起的输出变化值}}{\text{标准漏孔漏率}}$$

而系统的最小可检漏率除了与灵敏度有关，还与系统的本底噪声和漂移有关，最小可检漏率与仪器灵敏度、最小可检信号及本底噪声的关系为

$$\text{最小可检漏率} = \frac{\text{最小可检信号}}{\text{系统灵敏度}} + \frac{(\text{本底噪声} + \text{漂移})}{\text{系统灵敏度}}$$

最小可检漏率的定义为即系统处于最佳工作条件下，以一个标准大气压的纯氦气为示踪气体，实施动态检漏时，可以检出的最小可检漏率。

- (1) “最佳工作条件”定义指被测件出气和漏气都不大，不影响质谱室的正常工作。
- (2) “动态检漏”定义为检漏系统的真空系统在进行持续抽气，系统的响应时间小于 3s。
- (3) “最小可检”定义指检漏系统输出值可以显示的最小变换间隔。
- (4) “漏率”定义指一个大标准气压的气体穿过漏孔截面流出的速率。
- (5) “本底噪声”通常指在 2 分钟内系统显示的最大变化量。

2) 响应时间和清除时间

响应时间是检漏系统的核心指标之一。是指系统控制阀完全开启后，从漏孔进入的氦气触发输出信号增加，当增加到其最大值的 63% 时所需要的时间，记为 τ_R 。

清除时间是指停止抽氦气后输出仪表信号下降到最大值的 37% 所需要的时间，记为 τ_C 。两次喷吹的间隔时间就是消除小时，直接与检漏速度关联。

3) 极限真空

极限真空是指真空容器经过足够时间的抽气后，真空度稳定在某一水平后，此时的真空度称为极限真空。使用检漏仪相配套的真空规可以测定真空系统的的极限真空。

$$\text{极限真空: } \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{S_e \cdot P}{V} + \frac{Q}{V} \quad (2.3)$$

式 (2.3) 中 P: 被抽容器内的压强，单位为 Pa;

S_e : 被抽容器出气口处的有效抽速，单位为 L/s;

V: 容器体积，单位为 L;

Q: 容器漏气量与放气量之和，单位为 atm.cc/s。

上式 (2.3) 中令 $\frac{\Delta P}{\Delta t} = 0$, 可得极限压强为:

$$P = \frac{Q}{S_e} \quad (2.4)$$

4) 管路流导

真空管路通过气体的能力用流导表示, 直接关系到抽气时间、极限真空、真空抽速的计算。系统的管理有串联和并联两种形式, 因此可以采用和电路电阻相似的方式计算流导^[28]。当管路为串联形式时, 每个管路流导的倒数之和即为总流导 U_c , 如式 (2.5):

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_n} + \dots + \frac{1}{U_n} \quad (2.5)$$

当管路为并联形式时, 每个管路流导之和即为总流导 U_b , 如式 (2.6):

$$U_b = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (2.6)$$

2.3.3 测试压力、漏率、氦气浓度对成本的影响

漏率对比所使用的标准漏孔的气室内通常充入浓度为 100% 的氦气, 而检漏中一般在被检部位施加纯氦气, 但也可采用氦和空气的混合气体。市场上浓度 99.99% 的氦气价格为 40 元/升, 一般每次测试循环会消耗 15 毫升。这样平均每件的测试成本高达 0.5 元/件, 而空气的成本价格只有氦气的百分之一。所以需要降低消耗量和提升回收量来降低检测成本。消耗量取决于氦气浓度比例和测试回路的管路设计。其中氦气浓度的比例将直接影响到检漏系统的运行成本, 根据《低充氦浓度氦质谱检漏技术应用研究》一文的研究, 如果氦浓度低至 1%, 要准确判断漏孔漏率, 有两点假设: 一是充氦空间内少量的氦气在混和气体中均匀分布, 二是氦气以同比分通过漏孔, 即从漏孔漏出的气体中氦气浓度与混和气体中氦气的理论浓度一致^[6]。在此假设条件下有式 (2.7):

$$Q = \frac{Q'}{C} \quad (2.7)$$

式 (2.7) 中, Q 为混合气体检测漏孔的实际漏率, 单位为 $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$;

Q' 为混合气体检测漏孔时检漏仪显示漏率, 单位为 $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$;

C 为泄漏气体的体积浓度。

在分子流情况下, 被检漏孔对氦的漏率 Q_0 为:

$$Q_0 = \frac{p_0 \cdot \sqrt{M}}{p \cdot \sqrt{M_{He}}} \cdot \frac{Q'}{C} \quad (2.8)$$

式(2.8)中, p 为充氦空间内混合气体绝对压力, 单位为 Pa;

p_0 为标准大气压, 单位为 Pa;

M_{He} 为氦气分子量;

M 为混合气体的分子。

因 M 和 p_0 为常数, 从式(2.7)可得出氦气浓度与检测漏率成等比关系, 对应关系见表 2.3。从式(2.8)可得气体泄漏量与压力成正比关系。这表明可以通过氦气浓度的稀释可降低成本, 增加测试压力可弥补由于氦气稀释带来的灵敏度的损失。

表 2.3 不同浓度与漏率对应关系如下表:

| | 显示漏率 |
|---------|---|
| 标准漏孔 | $1 \times 10^{-6} \text{ atm.cc/s}$ |
| 100%氦气 | $1 \times 10^{-6} \times 100\% = 1 \times 10^{-6} \text{ atm.cc/s}$ |
| 10%混合氦气 | $1 \times 10^{-6} \times 10\% = 1 \times 10^{-7} \text{ atm.cc/s}$ |
| 1%混合氦气 | $1 \times 10^{-6} \times 1\% = 1 \times 10^{-8} \text{ atm.cc/s}$ |

将氦气浓度、检测压力、检测漏率组合关系如图 2.15 所示, 可以清晰的看出选择 10%的氦气浓度及 16 MPa 的检测压力是最优经济效益。如果氦气回收利用率达到 50%, 那么检漏成本为 0.025 元/件, 虽然依然比空气检漏成本高很多, 但是相对液压控制单元单价 500 元和考虑到质量投诉成本, 所占的比例还是很小的。

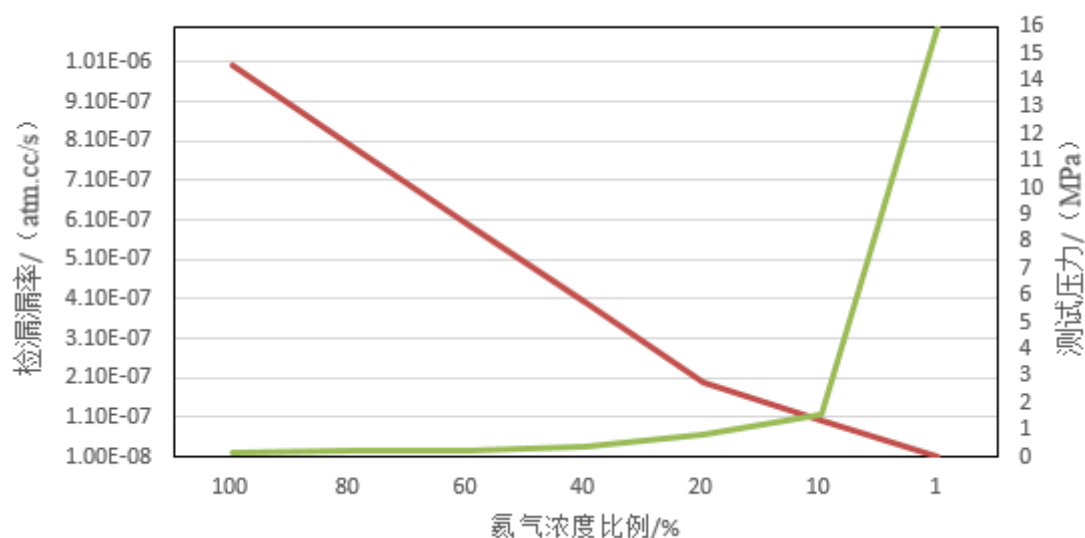


图 2.15 浓度、压力、漏率关系

2.3.4 检漏标准的漏率上限计算

液压控制单元内部填充的是制动液，最大工作压力为 16 MPa，平均工作温度为 50°C。根据产品要求年泄漏量不得超过 1.5 g/年。制动液漏率计算公式^[26]为：

$$Q_z = \frac{R}{M} \times \frac{22400}{365 \times 24 \times 3600} \times \frac{T}{273} \quad (2.9)$$

式 (2.9) 中 R 为年泄漏量，单位为 g；

M 为相对分子质量；

T 为工作温度绝对值，单位为度°C。

则制动液漏率上限：

$$Q_z = \frac{1}{206} \times \frac{22400}{365 \times 24 \times 3600} \times \frac{323}{273} = 4.08 \times 10^{-6} (\text{mbar} \cdot \text{L} / \text{s})$$

$$Q_z = 6.12 \times 10^{-6} \times 0.987 = 8.06 \times 10^{-6} \text{ atm.cc/s}$$

当采用氦气为示踪气体检漏时，液体与氦气的漏率等效关系 N ^[27]如下：

$$N = \frac{\eta_{He}}{\eta_z} \frac{2}{(P_1 + P_2)} \rho_l \frac{RT}{\mu} \quad (2.10)$$

式 (2.10) 中 η_z 为氦气的粘滞系数，单位为 Pa·s；

η_{He} 制动液的粘滞系数，单位为 Pa·s；

P_1 、 P_2 分别为入口压力和出口压力，单位为 Pa；

ρ_l 为液体的密度，单位为 kg；

μ 为相对分子质量；

R 为摩尔气体常数；

T 为理想气体温度，单位为 J/(mol·K)。

根据式 (2.10) 得出：

$$N = \frac{1.96 \times 10^{-5}}{0.97 \times 10^{-3}} \times \frac{2}{(160+1)} \times 1040 \times \frac{82.98 \times 273}{2 \times 10^3} = 3.15$$

所以氦气漏率上限为式 (2.11)：

$$Q_{He} = \frac{Q_z}{N} \quad (2.11)$$

根据式 (2.11) 得出：

$$Q_{He} = 6.12 \times 10^{-6} / 3.15 = 1.92 \times 10^{-6}$$

根据生产的需要圆整漏率上限为 $1.7 \times 10^{-6} \text{ atm.cc/s}$ 。

2.4 本章小结

本章主要阐述了 ESP 液压控制单元的功用和工作原理，通过对泄漏失效模式的分析，找出其主要的泄漏产生原因和漏孔特征，并优选出几种检测方法。

综上所述，本章首先介绍了氦质谱检漏仪的工作原理，通过对比各种方法的优缺点及产品特性，采用真空法作为本系统的核心技术。在分析了测试压力、漏率和氦气浓度的因果关系后，确认相对经济的参数组合，达到降低运行成本的目的，又实现系统最小可检漏率提升至 $1 \times 10^{-8} \text{atm} \cdot \text{cc/s}$ ，提升了 3 个数量级，使得检测精度更高，有利于检测出产品内部缺陷，避免发生客户投诉，造成更多的质量成本。

第3章 检漏系统的硬件设计

3.1 检漏系统的结构设计

首先需分析整体功能和工艺流程的要求，根据要求制定出系统的结构。从而将系统分解成几个子系统进行详细设计。方案的详细设计需基于安全性分析的基础上，比如气缸动作顺序不会发生干涉，拥有足够的人员保护装置。并且方案需考虑到加工的难易性，这个将直接影响机械加工的成本。

其次根据方案的详细设计，确定各个模块的分布、组合和连结形式。本系统主要分为框架模块、换型工装模块、配气工装模块及气动管路模块。

接着根据模块分布和组合等确认各个元器件的参数和尺寸，根据可以互换性和经济性选择相应的元器件。

最后将所有设计方案和元器件图纸三维化，在三维软件里模拟仿真系统的组合，查看设计的合理性。

3.1.1 功能参数设计

本文所设计的检漏系统是用于批量化流水线所使用，不仅需满足对产品质量的工艺要求，使得系统达到最佳工作状态，还要有产能和 HSE（Health Safety Environment, 健康、安全、环境）的要求，即可以按时发货给客户又不会产生多余的产能浪费，同时在 HSE 这几方面对员工进行保护也是企业的责任。

根据第三章对检漏系统的总体设计，本系统将采用氦气浓度为 10% 的氦氧混合气，进气压力为 16 MPa，考虑到 1.5 倍的安全系数，选择压力传感器量程为 0-25 MPa，而系统检测压力降值为 0.1 MPa，相对满量程 25 MPa 为 0.4%，所以可以选择 FS 精度为 0.2% 的这个型号。根据检测标准的漏率上限 $1.7 \times 10^{-6} \text{ atm.cc/s}$ ，系统的灵敏度必须小于这个上限的 10%，灵敏度越小，检漏系统的准确性越高。

在第三章检测需求分析中，检漏系统将进行 5 项检测内容，涉及到多个管路，既有高压回路也有负压回路还有排气回路，因此需要用电磁阀对气路进行管理，本系统没有不同气路切换的需求，因此最简单的两位两通电磁阀就可实现得电导通，失电不通的功能。根据 JB/T 7352-2010《工业过程控制系统用电磁阀》里关于泄漏量的规定，A 级的电磁阀符合设计要求，即在试验持续时间内无可见泄漏量。

流水线的产能规划必须以客户的需求量为基准，此条流水线所对应的客户年需求量为 60 万件，工作日为 300 天，每天分早晚两班，每班工作 630 分钟，设备利用率为 80%，总的有效工作时间为 18144000 秒，将总时间除以年需求量即

为最大运行节拍 30.24 秒，考虑到 5%的节拍余量，将本系统运行节拍设定为 28 秒/件。

一套设备的良好人机工程设计可以保障安全健康和提高工作效率。可以从人、机、环这 3 个方面进行研究设计。人的因素主要包括人体的生理、生物力学和人的可靠性等。机的因素主要包括界面显示、控制器等。环的因素主要包括声、光和气等。可以通过观察法、实测法、调查研究法等方法分析人机工程。首先作者实测了大部分员工的身高，平均值在 170 cm 左右，那么设备的工作台面高度设计为 85-90 cm 为合理值。通过观察法发现原先设计的启动开关是按钮式，需要操作人员拇指或食指施加一定力量才能按下去，这样长期工作后，人员疲劳度会额外增加，本文优化设计采用光电感应式开关，当人手指触碰到开关，开关即可响应启动，无需额外作用力。其次观察到操作人员在操作触摸屏时经常会操作错误或者遗漏操作信息，经过分析研究是原有触摸屏各个操作块和信息背景的颜色区分不明显，在无意识中凭借感觉进行操作，所以本系统将优化人机交互触摸屏的颜色区分，并且将重要信息进行动态效果显示。根据上述分析总要的功能参数设计如表 3.1 所示。

表 3.1 液压控制单元检漏系统功能参数

| 参数 | 要求 |
|------------|------------|
| 氮氧混合气压力 | >16MPa |
| 压力传感器测量范围 | 0-25MPa |
| 压力传感器精度 | ±0.2%FS |
| 电磁阀功能 | 两位两通 |
| 电磁阀泄漏等级 | A 级 |
| 运行节拍 | 28 秒/件 |
| 设备工作台面高度 | 90cm |
| 启动开关 | 光电感应式 |
| 人机交互触摸界面设计 | 多颜色区分、动态效果 |

3.1.2 总体设计

一个系统的设计应该自上而下，由总体到逐层深入每一个模块的设计。总体设计是在系统分析的基础上将整个系统划分各个子系统及软硬件的配置。本节将介绍如何将一个系统划分为多个子系统，子系统如何划分为多个模块以及子系统之间如何关联。

结构化设计是最常用的设计方法，可以将一个复杂的系统转化为模块化的系统，每个模块相对独立，功能单一，极大地简化了系统开发的流程。结构化设计的基础就是模块结构图，将实际工艺流程按照逻辑顺序进行堆叠组合，最后根据

模块结构图就可转化为实物架构。模块的划分方法有逻辑划分、时间划分、过程划分和目的划分。逻辑划分就是将处理逻辑相同的放入同一个模块，时间划分就是将同一时间处理的动作放入统一模块，过程划分就是将控制流程相同的放入同一模块，目的划分就是将同一作用目的放入同一个模块。

根据上述方法将整个检漏系统划分为人机交互界面、数据系统、PLC 控制、电气系统、气路系统等，如图 3.1 所示。人机交互界面是系统与操作人员传递和交互信息的接口。数据系统是用于传递和保存生产信息的接口。PLC 控制则是系统的中枢，当操作人员发出启动信号后，PLC 控制各个气路系统进行切换进行检测，并将各种传感器的数值发送回 PLC 进行判断，同时触摸屏接收 PLC 的数据进行输出显示，关键结果数据由 PLC 发送回数据系统完成追溯保存。气路系统根据气体流的运动方向划分为真空系统、检漏系统和回收系统，各个系统即可独立运作，又可以通过电磁阀的通断实现组合动作，完成检测目的。

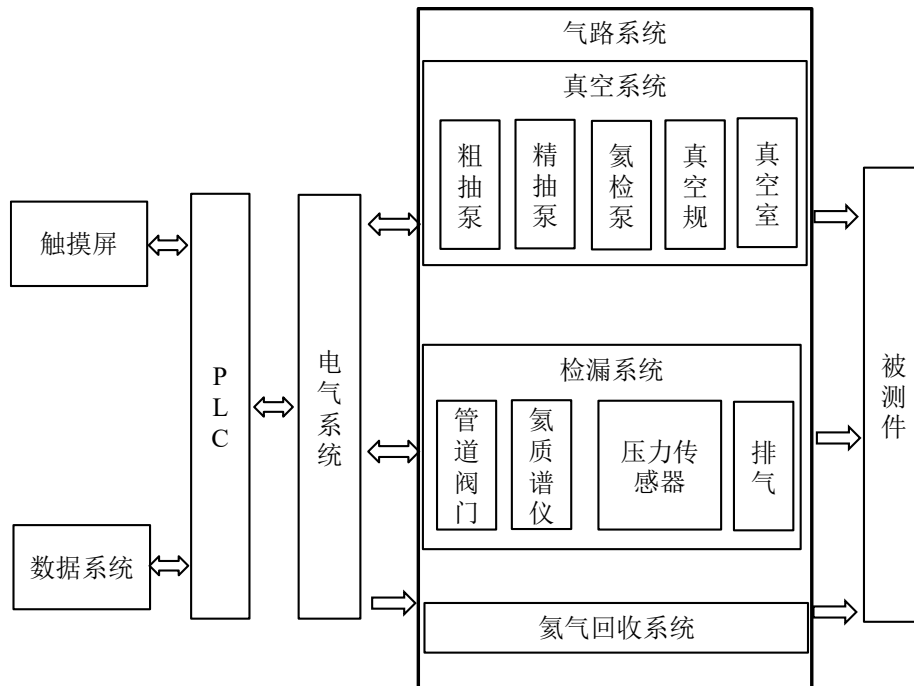


图 3.1 氦质谱检漏系统结构

3.2 气路系统的设计

3.2.1 测试气路设计

根据工艺流程图和结构框架图可以看出，气路系统是检漏系统的关键组成，关系到最终检漏的实施性。从第 2 章中的研究并结合产品特点，本系统选用真空法检漏，因此气动元件如减压阀、电磁阀、压力传感器需满足真空环境的使用，

真空管路中的真空泵、真空气管、真空室、真空规需满足氦质谱检漏的极限真空要求，氦气回收管路设计需不会对真空室产生污染。设计的气路系统图如图 3.2 所示。

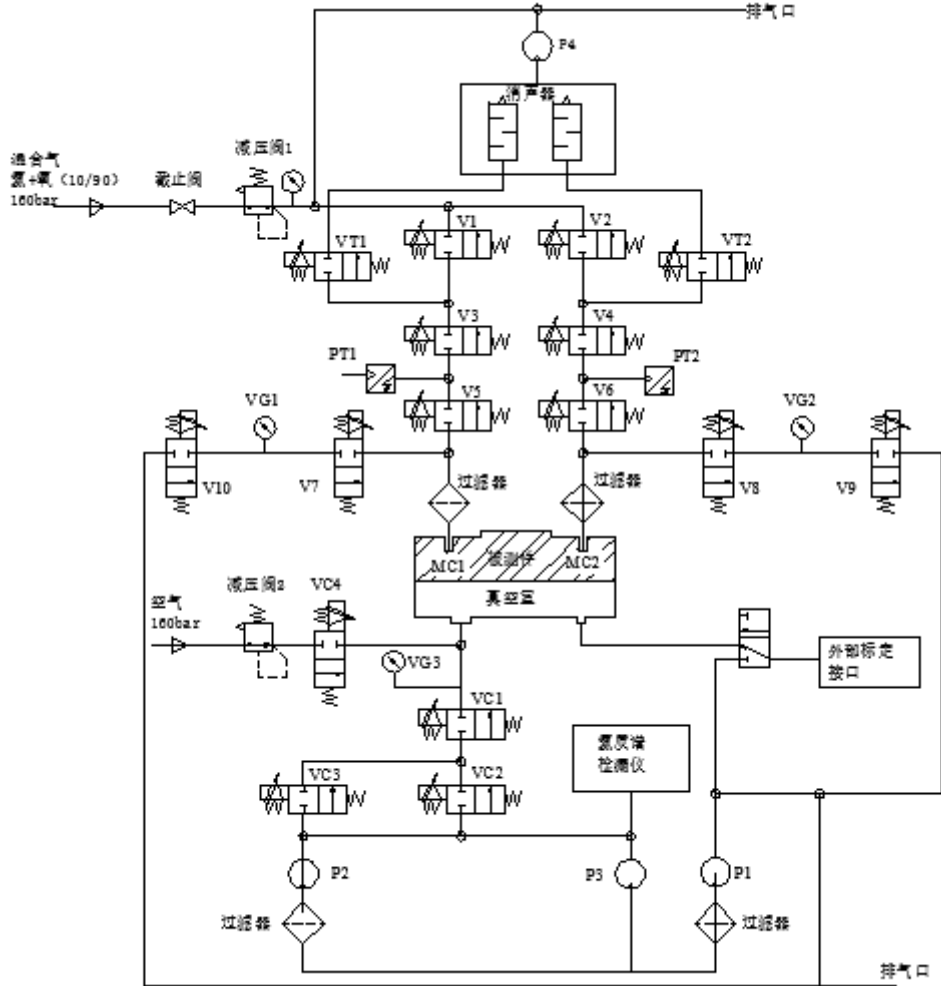


图 3.2 氦质谱检漏系统检测气路

P1-回收泵，P2-粗抽泵 P3，P4-精抽泵，V1-10-高压正压两位两通电磁阀
 VT1，VT2-排气两位两通电磁阀，VC1-VC4-真空两位两通电磁阀
 PT1，PT2-高压压力传感器，VG1-3-压力表

该气路主要由截止阀、减压阀、压力表、压力传感器、电磁阀、真空泵、真空泵、真空规、检漏仪和真空室组成。这些部件的作用如下：截止阀和电磁阀负责控制气源的通断；压力表、真空规和压力传感器负责提供管路内气体的压力，包括正压和真空负压，用于反馈检测流程的结果；真空泵负责对管路内进行抽气或排气；检漏仪负责最终对产品漏孔的检测。

设计本气路除了考虑检漏流程各个项目的组合，还考虑了使用成本及检测准确性等问题。在对被测件充氦气的气路设计了回收泵，用于将检漏结束后的排掉

的氦气进行回收。回收的氦气进行加压后可用于再次检测，这极大的减少了氦气的使用量。

在检测真空室的气路设计一条高压空气气路，在被测件检漏完成后，打开高压空气对真空室进行吹气动作，这样可以将通过漏孔泄漏到真空室的氦气快速排空，避免在再次检漏时影响本底早上，导致检测结果产品偏差。

3.2.2 检漏流程设计

根据检漏系统的检测需求分析，将整个检漏流程分为大漏测试、真空测试、中压测试、高压测试、排气、清洁等六个步序，如图 3.3 所示。

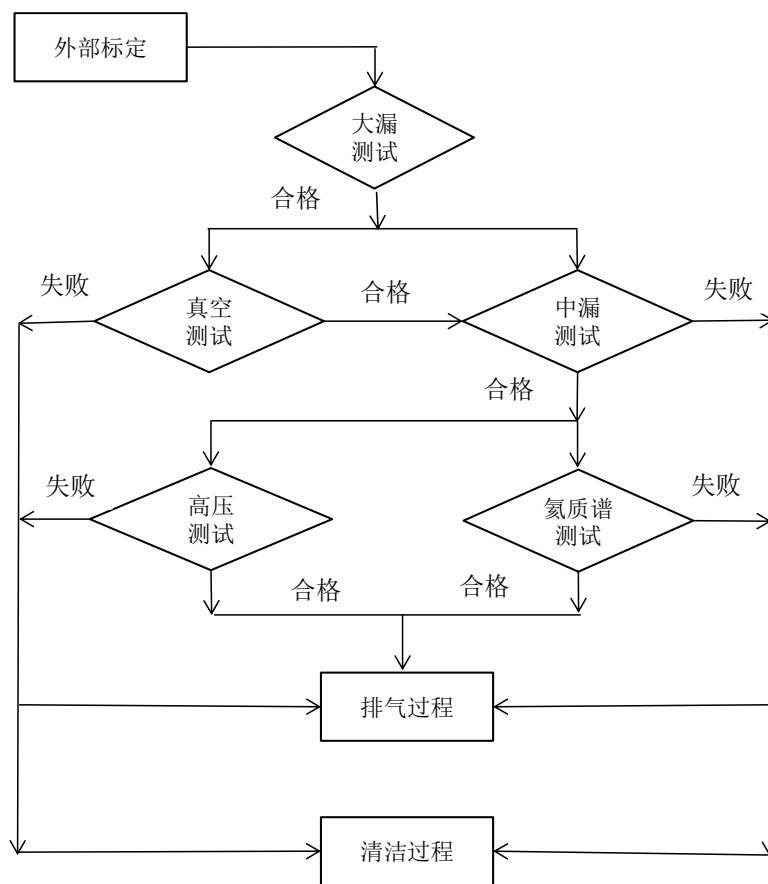


图 3.3 氦质谱检漏流程

1) 大漏测试

本步序的目的是对待测件进行真空测试，检测内部是否有大漏。流程如下：

(1) 关闭 V5、V6 电磁阀，打开 V7、V8、V9、V10 电磁阀，启动 P1 真空泵进行抽真空；稳定 3 秒后，关闭 V9、V10 电磁阀，检测真空传感器信号是否合格；打开 V7、V8 电磁阀为中漏测试做准备。

2) 真空测试

本步序的目的对真空室进行真空测试，检测真空室是否可以达到极限真空。

(2) 打开 VC1、VC3 真空阀，并启动 P2 真空泵进行抽真空；

(3) 等待 3 秒后，关闭 VC3 电磁阀，稳定 0.5 秒后，通过 VG3 真空压力表检测真空值，真空值必须达到 50 Pa 以下；

(4) 稳定 4 秒后，检测真空值的变化量，需小于 10 Pa；

(5) 如果都通过，则可以进行中漏检测和氦质谱检测。

3) 中漏测试

本步序通过 16 MPa 高压检测被测件内部，是为了最终氦质谱检漏做预检，以防被测件有漏孔较大时有大量氦气进入氦质谱仪，超过设计检测漏率的上限而损坏灯丝，这样可以延长质谱仪使用寿命，降低消耗件的费用。

(1) 打开 16 MPa 氦空混合气；

(2) 关闭 VT1、VT2 排气阀，关闭 V5、V6 电磁阀；

(3) 打开 V1、V2、V3、V4 电磁阀，将 16 MPa 氦空混合气通入被测件的 MC1 和 MC2 两路气路，在内部压力达到 16 MPa，关闭电磁阀；

(4) 打开 V5、V6 电磁阀将 16 MPa 氦空混合气从 MC1 和 MC2 口通入被测件内部；

(5) 打开 VC1、VC3 真空阀，1 秒后检测是否探测到氦气；

(6) 如果探测到氦气，说明被测件有较大的漏孔，检测失败，进行排气。将真空室内气体排出，以免滞留的氦气对下一次检测产生影响。如果未探测到，则进行下一步高压测试。

4) 高压测试

本步序通过 16 MPa 高压混合气检测被测件自身的耐压性，通过高压将被测件的材质缺陷及焊接等隐形缺陷暴露出来。

(1) 关闭 VT1、VT2 排气阀；打开 V1、V2、V3、V4 电磁阀，将 16 MPa 氦空混合气通入被测件的 MC1 和 MC2 两路气路，充气 4 秒后关闭电磁阀；

(2) 关闭 V1、V2、V3、V4 电磁阀，并打开 VT1、VT2 排气阀排出高压混合气。稳定 3 秒后，记录压力值 1；

(3) 保压 4 秒，记录压力值 2，压力值变化量必须小于 0.27 MPa。

5) 氦质谱测试

本步序为最终测试，通过氦质谱仪检测真空室内是否有通过被测件漏孔泄漏过来的氦气。

- (1) 打开 VC1、VC2 真空阀，关闭 VC3 真空阀；
- (2) 启动真空泵 P3，将真空室内的气体抽入氦质谱仪进行检漏，漏率上限为 1.0×10^{-6} atm.cc/s。
- (3) 如果检漏合格，进行下一步。如果失败则进行抽气过程，及用 16 MPa 纯空气冲刷真空室气路，彻底清除氦气，已降低氦气本底噪声。

3.3 机械系统设计

机械结构是所有功能实施的基础，优异的先期规划可以对机械系统设计起到事半功倍的效果，一个合理的机械系统可以影响到整套设备的运行稳定性和使用寿命，并且使得整套设备具备完善的安全性和符合人机工程。先从系统结构设计中确认机械系统的动作需求，再从动作需求设计各个模块的方案。本文所研制的机械系统包括框架模块、换型工装模块、配气工装模块等几大部分。图 3.4 为检漏系统的总体布局。

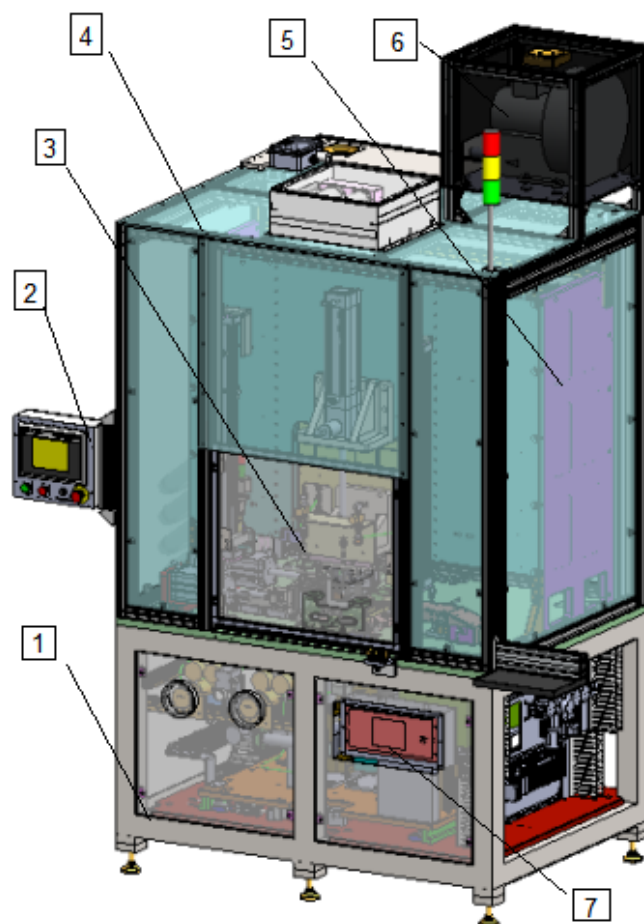


图 3.4 检漏系统总体布局

- 1-基座 2-操作屏 3-工作台面 4-安全围栏
5-电控箱 6-排气泵 7-氦质谱检漏仪及真空泵

检漏系统分为上、中、下三个部分，每一部分都是一个独立的模块，通过电气控制而相连在一起。在系统的上部的空间放置排气泵，排气管道可以沿垂直方向向天花板布置，可以有效利用空间，减少管道的弯曲走向。在系统的中部因为整条流水线为从右向左流动，从方便操作人员可以无需转头直接目视，将操作屏放置在安全围栏的左中部，并且转有转轴可以旋转使用。中部后面布置了电控箱，其内部安装有 PLC 模块、继电器、电源等电气设备，其安装位置与安全围栏保持同一水平位，这种设计可以让维修人员在排查电气问题时无需进行弯腰操作。中部台面上布置了换型工装、配气工装、检测管路、电磁阀等动态部件。下部空间为基座，其内部空间布置氦质谱检漏仪和真空泵，检漏仪的控制屏面对操作人员布置，方便调试。并且可以利用后部的开口进行真空泵的换气散热。

3.3.1 框架模块设计

框架模块包括基座、工作台面、安全围栏、操作屏及电控箱，如图 3.4 所示。框架模块首先设计基座，基座的作用是用来摆放和承受所有零部件的重量。根据零部件重量估算为 400 kg，以最长 1400 mm 的横梁为计算，受力模型如图 3.5 所示，那么每个横梁均布载荷至少受力为 $M_x = 400 / 1.4 \times 9.8 \text{ N/kg} = 2800 \text{ N/m}$ 。

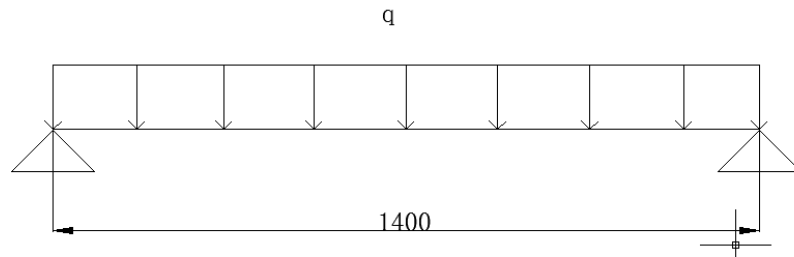


图 3.5 基座受力模型

根据方管钢抗弯强度计算式 (3.1):

$$W_{nx} = \frac{M_x}{r_x \cdot \sigma} \quad (3.1)$$

式中查表得知 $r_x = 1.05$ ，材料强度 $\sigma = 205 \text{ N/mm}^2$ ，得出截面系数:

$$W_{nx} = \frac{2800}{1.05 \times 205} = 13.00 \text{ cm}^3$$

按照至少 1.5 倍安全系数，本文查表选择边长 75 mm，厚度 3 mm 的方形管，其截面系数为 25.17 cm^3 。将 75 的碳钢方形管焊接成框后喷漆使用，如图 3.6 所示。上部的安全围栏采用铝合金型材组装而成。这种设计即可满足基座承重的结构强度要求，又可以降低整体的重量，方便快速安装。

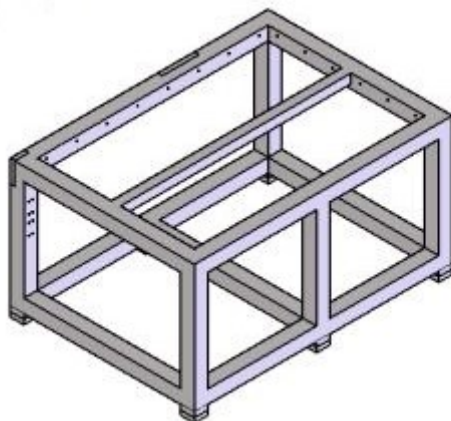


图 3.6 基座效果图

基座的内部主要布置了气路系统，包括了氦气和高压气混合管道，通过调压阀设定混合气体的出气压力；用于处理进气的气源处理单元，通过合适压力的空气来控制气缸运动；两台真空泵通过 PLC 的切换控制分别提供测试回路不同需求的真空度。系统核心的氦质谱仪布置在离真空泵最近的位置，从而减少管道损失。图 3.7 为基座内部布置图。

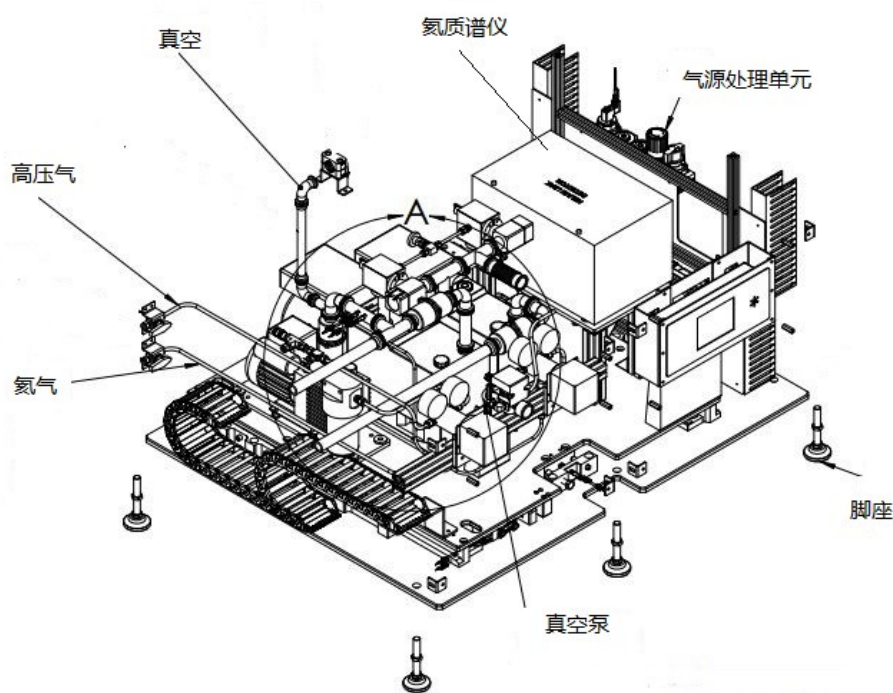


图 3.7 基座布置图

3.3.2 换型工装设计

由于不同产品的外形尺寸和控制阀位置的不同，所以需要根据产品种类设计不同的工装，且这些工装不仅可以快速定位产品，还需具备快速换型功能。根据这一特点，本文将换型工装设计成两个工装组合使用，包括定位工装和密封工装，

如图 3.8 所示。定位工装作用是固定被测件，密封工装作用是将被测件的控制阀密封在真空室内。两个工装即可以组合使用，又能独立换型，互不干扰。当某种产品只是控制阀位置不同时，只需要更换密封工装，这样减少了换型工装的数量和换型时间。

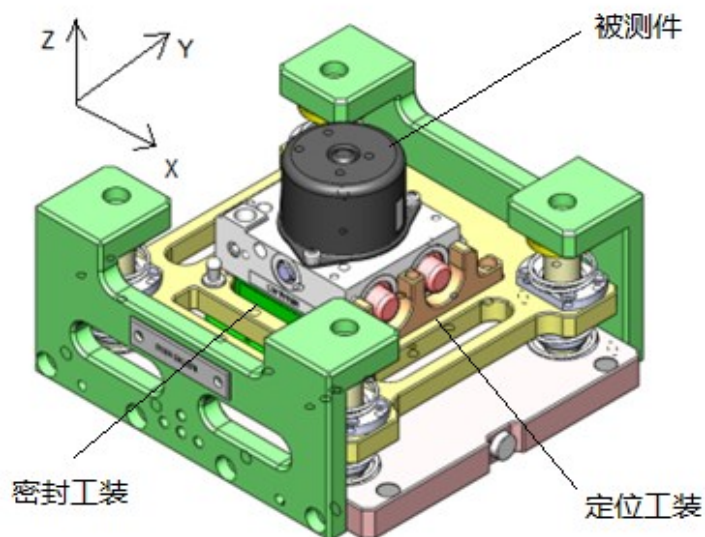


图 3.8 换型工装效果图

定位工装的设计需要即保证产品固定的精度，也要保证每次换件时的快速。由于物体在空间直角坐标系里存在 6 个自由度，如果要固定物体的位置，必须限制这 6 个自由度，包括 X、Y、Z 的三个直线运动和 X、Y、Z 的三个绕轴运动，称为“六点定位定则”。通过定位和夹紧两个过程实现物体的装夹，如图 3.9 所示。

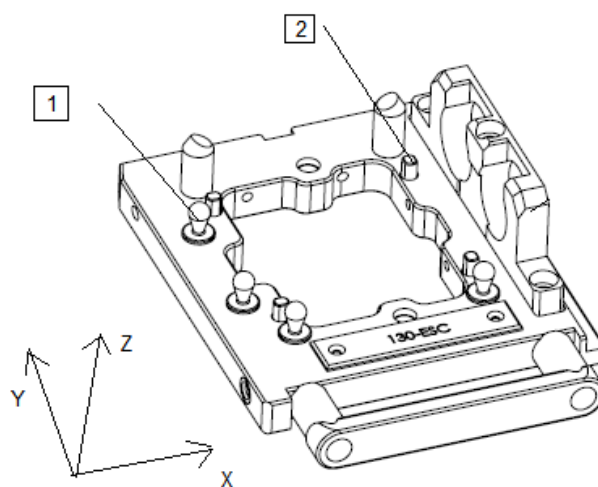


图 3.9 定位工装效果图

1-弹簧定位销 2-圆菱定位销

本文所研究的液压控制单元因其形状较规则，铝材质较软，采用了一些组合装夹方式。被测件在工装里 X 和 Y 轴定位没有采用常规的靠山硬定位模式而是采用了 4 个弹簧定位销定位和 4 个圆菱定位销的组合结构，如图 3.9 所示。圆菱定位销起定位置作用，弹簧定位销夹紧作用。弹簧定位销结构非常紧凑，利用内部的橡胶弹性对被测件施加侧向力，外部表面是固体聚氨酯体覆盖的铝壳，可以理想的避免破坏软材料或成品表面，如图 3.10 所示。

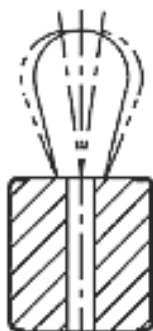


图 3.10 弹簧定位销剖面

密封工装的设计主要考虑在被测件不干涉的情况下尽量减少真空室的容积，这样可以降低对真空泵抽速的要求。并且密封圈安装槽的位置要方便维护时更换，如图 3.11 所示。

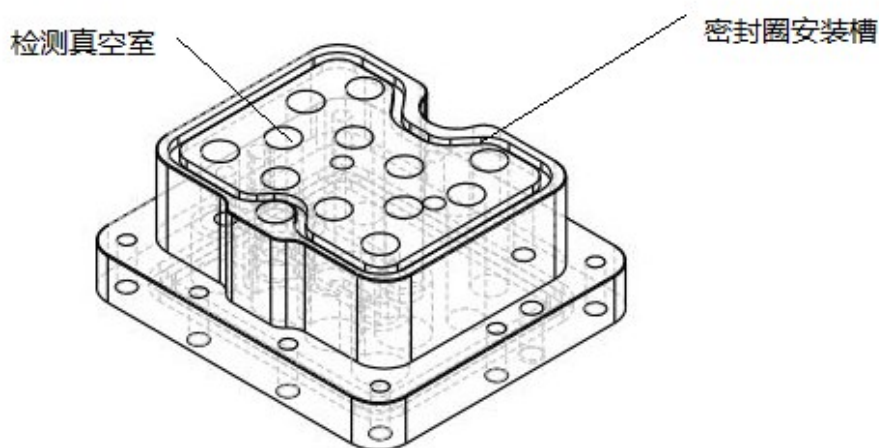


图 3.11 密封工装效果图

3.3.3 配气工装设计

系统工作台上除了布置有换型工装，还有配气组件。配气组件包括配气工装、夹紧气缸及电磁阀气路等，如图 3.12 所示。

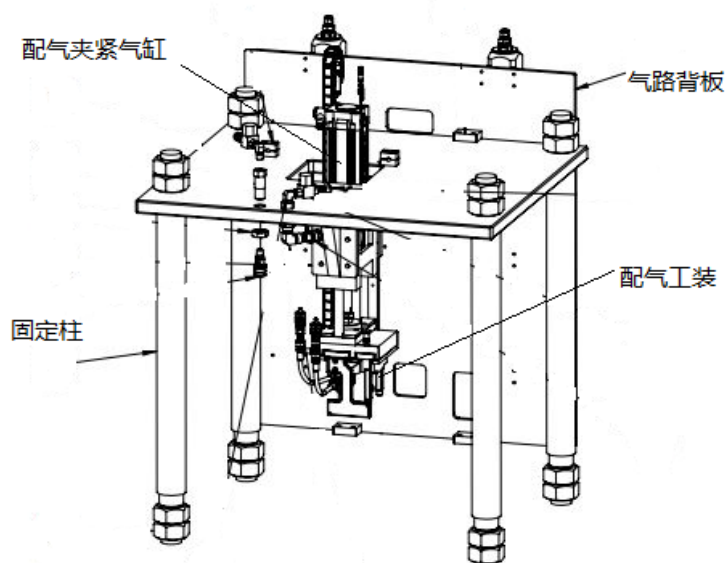


图 3.12 配气组件效果图

检漏系统的机械设计中最重要的是配气工装的设计，通过配气工装实现被测产品的夹紧和输送高压气体，提供稳定的密封测试气路。配气工装由气源快插管路、密封配气头、定位柱这 3 部分组成，如图 3.12 所示。气源快插管路的末端为气动快换接头，这种快换接头互换性好，可以自锁，无需任何工具即可完成拆卸更换工作。2 个密封配气头实现对 MC1 和 MC2 口输送高压气体，并内部内置弹簧机构，如图 3.13 所示。被测件的 Z 轴定位依靠 4 个定位柱实现，均匀得压紧被测件的 4 个角，防止因配气头单侧下压造成的沿 Y 轴旋转现象。定位柱端面装有聚氨酯材质的缓冲垫块，即可保护被测件不被损坏，也可缓冲夹紧力。

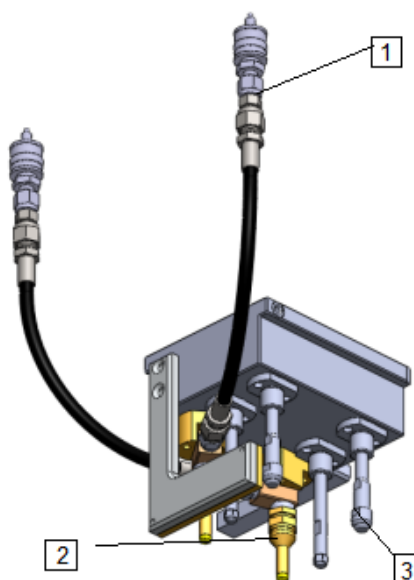


图 3.13 配气工装

1-气动快换接头 2-密封配气头 3-定位柱

配气头因为与产品的密封面直接接触，所以在头部安装有聚缩醛材质的密封圈，聚缩醛是一种坚韧有弹性的材料，很好的延展强度、抗疲劳强度。因此可以有比较长的稳定使用寿命。在配气头内部还装有一个弹簧，用于缓冲气缸快速下压时带来的冲击力，避免损坏被测件，如图 3.14 所示。

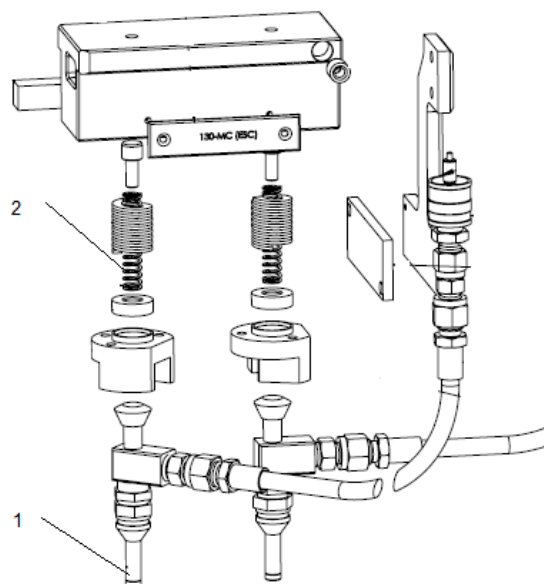


图 3.14 配气头爆炸图

1-配气密封圈 2-弹簧

3.4 零部件选型

3.4.1 真空泵的选型

真空系统有 1 台粗抽泵和 2 台精抽泵组合，粗抽泵 1 的作用是在大漏测试中将工件内部的真空度降到 30 Pa 以下，粗抽泵 2 的作用是在真空测试中将真空室内部的真空度降到 30 Pa 以下，为后续氦质谱仪工作做准备。精抽泵 3 的作用是将可能从工件泄漏至真空室的氦气抽至氦质谱仪，这时要求的真空度达到 10-30 Pa。

精抽泵的作用是维持系统内的极限真空，根据氦质谱仪的运行要求，设置 1 Pa 为真空室内的极限真空。那么精抽泵的抽速由检漏回路中的泄漏量、放气量和极限真空决定。

精抽泵有效抽速公式如式 (3.2)：

$$S = \frac{Q}{P_g} \quad (3.2)$$

式 (3.2) 中：S 为精抽泵有效抽速，单位为 L/s；

Q 为总抽气量，单位为 L；

P_g 为测试过程极限真空，单位为 Pa。

代入式 (3.2) 中，得出：

$$S = \frac{2.0}{1} = 2.0 \text{ L/s}$$

考虑到真空管路的泄漏，定义 2 倍的安全系数，精抽泵的抽速最小为 4 L/s。真空测试这段回路并联了一段等长的通向 MC1 和 MC2 口的管道，管道为一根内径 25 mm，长度 1 M 的圆管组成。所以真空测试回路总流导 U 大为两个并联后的流导。流导计算公式如式 (3.3)：

$$U = \frac{\pi D^4}{128 \eta L} p \quad (3.3)$$

式 (3.3) 中：D 为管道直径，单位为 M；

η 为气体粘滞系数，单位为 N.s/m²；

L 为管道长度，单位为 M；

P 为管道内平均压强，单位为 Pa。

代入式 (3.3) 中，得出：

$$U_z = \frac{3.14 \times (0.025)^4}{128 \times 1.86 \times 10^{-5} \times 1} \times 20 \times 2 = 40 \text{ L/s}$$

根据抽速计算公式 (3.4)：

$$S_p = \frac{S \times U}{U - S} = \frac{2.0 \times 20}{20 - 2.0} = 2.22 \text{ L/s} < 4 \text{ L/s} \quad (3.4)$$

根据计算，最小抽速设定为 4 L/s 是满足设计要求的。

DS302 真空泵符合设计选型要求。DS302 属于双极旋片式真空泵，它具有稳定性高，噪声小、无油污染和工作寿命长等优点。其双级旋片可以在低温环境下也可正常使用，并且大大减少了油蒸气回流的情况。同时在 1 Pa 的低压工况下也具有可靠的抽气速率，其技术参数如下表 3.2：

表 3.2 真空泵技术参数表

| 技术参数 | 单位 | DS602 |
|------------|-------------------|--------------------|
| 自由抽气量 | l/min | 605 |
| 泵速 | m ³ /h | 31 |
| 极限真空 | Pa | 10 ⁻² |
| 极限全压力 | Pa | 2×10 ⁻² |
| 水蒸气容量 | g/h | 550 |
| 油量 (最小/最大) | L | 0.6/1 |
| 马达功率 (3 相) | kW | 0.9 |
| 工作转速 | r/min | 1800 |
| 工作油温 | °C | 72 |

3.4.2 检漏仪的选型

检漏仪是系统的核心部件，它的最小可检漏率和响应时间直接影响到系统的检漏精度和效率，也就是对漏孔大小的探测能力和探测漏孔所消耗的时间。本系统所选择检漏仪应满足如下要求：

- (1) 可以探测微小的漏孔，检漏灵敏度不低于 1×10^{-9} atm.cc/s；
- (2) 测试口压力大于 500 Pa；
- (3) 具有多种通讯接口，包括 RS-232, Profinet 及 I/O 接口；可以进行数字量输出或模拟量输出；
- (4) 响应时间短，并具备本底噪声校零功能；
- (5) 设备具备显示屏，可以显示实时漏率数据；
- (6) 安装维护简单；

本系统所选用的检漏仪是某公司所生产的 VS 系列中的 C15 型氦质谱检漏仪，该检漏仪内部设计紧凑，外壳牢固。测试范围广，测试口耐压高，检测灵敏度可分 12 个等级调整，最小达到 5×10^{-10} atm.cc/s，满足设计所需要的最小可检漏率要求。全触摸屏可视化菜单操作，并可全量程校准。详细参数如表 3.3。

表 3.3 氦质谱检漏仪技术参数表

| 性能名称 | 具体规格 |
|----------|--|
| 灵敏度范围 | 4 个工作范围，覆盖 1×10^{-3} 到 1×10^{-9} atm-cc/s |
| 最低可检测泄漏 | 5×10^{-10} atm-cc/s, 5×10^{-8} Pa -L/s, 5×10^{-11} Pa-m ³ /s |
| 最大测试接口压力 | 5 Torr, 700 Pa, 667 Pa |
| 校准程序 | 自动或手动（内部或外部） |
| 背景抑制 | 自动归零 |
| 显示界面 | 高清晰度 TFT 彩色触摸屏 |
| 显示语言 | 英语，法语，德语，西班牙语，日语，韩语，简体中文 |
| 设定点 | 5 个设置点：4 个用于泄漏速率或压力，1 个音频 |
| 模拟输出 | 0 - 10 V，对数 1 V/格和 2V/格及对数线性 (DB-9F) |
| 串行接口 | RS-232 绝缘，9600 波特 (DB-9M) |
| 开关量 I/O | 光学隔离，5 - 24 VDC 输出和输入 (DB-25S) |
| 网络接口 | Profinet® I/O 选件 (RJ45) |
| 电源输入 | 24 VDC \pm 5%，最大电流 4 A (Molex 03-12-1036) |
| 操作温度 | 5 到 48 °C |

3.4.3 气缸的选型

气缸的作用是将压缩空气的气能转化为机械动能，因气压的平衡原理推动活塞杆做直线往复或摆动往复运动。本系统的 MC 口和 BP 口配气工装是输送 16 MPa 高压气体，因此气缸的合理选型即关系到设备运行的安全性也关系到配气口的密封性。气缸的剖面图如图 3.15 所示。

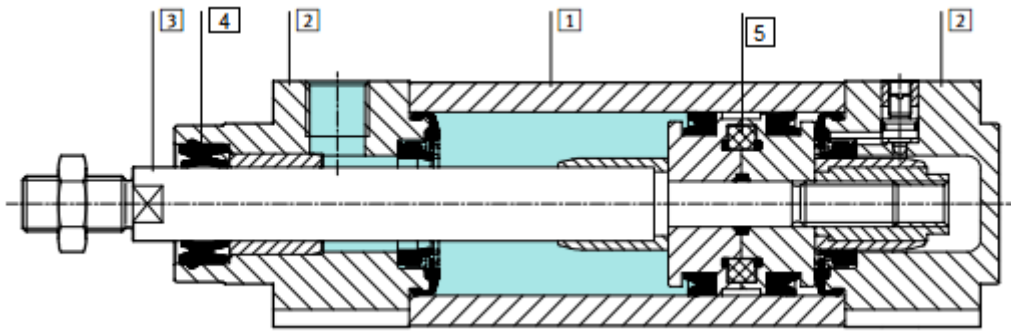


图 3.15 气缸剖面

1-缸筒 2-轴承盖和端盖 3-活塞杆 4-密封件 5-磁性环

气缸是由缸筒、端盖、活塞杆、密封件和磁性环等零件组成。如图 3.10 所示，这是一个双作用气缸，根据字面理解就是活塞杆可以在压缩空气的作用下即能伸出运动也能缩回运动。

1) 缸筒

缸筒的直径大小直接代表了气缸输出力的多少。活塞将在缸筒内部做直线往复运动，缸筒内壁的表面粗糙度不大于 $R_a0.8\mu\text{m}$ 。

2) 端盖

端盖上设有进排气接口，用于接入气源。端盖上的活塞孔内装有密封圈，以防止气体从活塞孔处泄漏或者外部的灰尘或水汽进入。端盖内壁孔上设有导向套，通常为黄铜材质，可以提高活塞杆的导向精度，降低摩擦力，延长气缸使用寿命。端盖材质为铝合金，可以承受高压下的气压作用力，并降低整体重量。

3) 活塞杆

活塞杆是整个气缸中直接与受力件作用的部件。由它将气动力转化为机械作用力。活塞杆材质一般采用高碳钢，然后表面做硬度处理，并且抛光减小粗糙度，已降低密封圈的磨损，提高寿命。

4) 密封圈

密封圈的作用是将压缩气体隔离在左右两个腔体内，当气缸运动时保持气体不泄漏而维持气缸的作用力。

5) 磁性环

磁性环周围可以产生磁场，接近开关感应到磁性时触发相关信号，以确认活塞杆当前所处的位置。

了解了气缸的结构后，我们应按照下列步骤选择合适的气缸

1) 气缸缸径：可根据气缸载荷力确认气缸的输出力。本系统气缸载荷力等

于被测件在 16 MPa 气压时的压强乘以作用面积，如式 (3.5)：

$$F=P\pi d^2 \quad (3.5)$$

式 (3.5) 中 P 为被测件内部气压，单位为 Pa；

d 为配气口直径，单位为 M。

代入式 (3.5)，得出：

$$F=160 \times 10^5 \times 3.14 \times 0.0025^2 = 1130 \text{ N}$$

考虑到 1.5 倍安全系数，气缸最小输出力应大于 1650 N。

2) 气缸行程:根据三维软件测量出实际工作行程，加上一定的余量，可以选择 100 mm 行程的气缸。

3) 气缸安装方式:气缸的安装面应无干涉并易拆装，且活塞杆不会收到弯曲力。

4) 磁性开关:根据电气控制程序编写的逻辑，采用 2 个磁性开关，用于确认气缸的原位和终止位。

根据上述计算，选用 FESTO 的 DNC 系列双作用气缸，型号为 DNC-63-100-P-A-KP。

同样方法可以计算其他气缸的选型，本文不再详述，气缸选型列表见表 3.4。

表 3.4 气缸选型表

| 型号 | 缸径 | 行程 | 数量 |
|-------------------|----|-----|----|
| DNC 63-100-P-A-KP | 63 | 100 | 1 |
| FENG-63-100-KF | 63 | 100 | 1 |
| ADN-80-80-A-P-A | 80 | 80 | 2 |
| SLT-25-80-P-A | 25 | 80 | 1 |
| ADN-32-300-A-P-A | 32 | 300 | 1 |
| SLT-16-50-P-A | 13 | 50 | 1 |

3.5 本章小结

本章通过对检漏功能需求的分析，建立起检漏系统的总体结构框架，将系统分解成几个子系统进行设计。然后基于检测项目的要求，完成检漏工艺流程的设计，将各种气动部件组合成满足检漏需求的气路系统。根据产品设计的特点和现场布置的要求完成了机械系统的设计，包括框架模块、换型工装和配气工装。最后根据设计要求完成对几个关键零部件的选型工作。

第4章 检漏系统的软件设计

软件系统是检漏系统的中枢核心，它将各个硬件模块组合在一起，通过程序化控制完成各个动作目标。检漏系统的性能不仅仅依靠高参数的硬件配置，也依靠优异的软件设计，来发挥出硬件的全部性能。它的可靠性及兼容性也直接影响了系统的工作稳定性，保证设备在流水线上 7x24 小时不间断运行。本章将主要介绍软件系统的设计流程，包括 PLC 控制系统的设计和选型、人机交互界面的设计。

4.1 PLC 程序设计步骤

PLC 程序就是将设备的机械动作转化为可编程控制器可识别的逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算的指令语言，并通过模拟量或数字量输入输出与设备进行交互控制。常用的编程语言有梯形图、指定表、功能模块图、顺序功能流程图和结构化文本等五种，本文采用梯形图编程，因为其与电气原理图类似，更加直观，与原有的继电器控制方式一致，电气设计人员非常容易学习，普及型广。在详细设计前需要先确认整个设计步骤，这样可以规范作业流程，并且及时于机械设计人员沟通设备调试问题，设计步骤如图 4.1 所示。

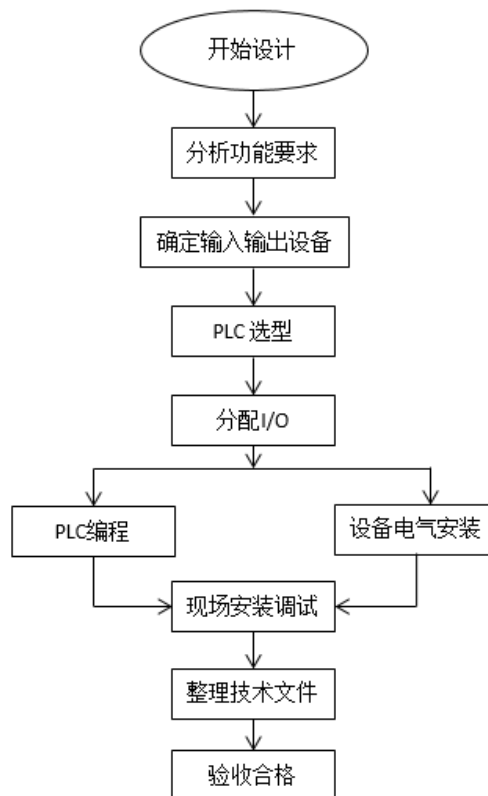


图 4.1 设计步骤

设计步骤介绍如下：

1) 分析功能要求：在 PLC 控制程序设计之前，首先需要了解整个系统的检测需求，从而分析出整个系统所实现的功能。

2) 确定输入输出设备：根据系统功能了解所有控制对象，包括它的控制方式和作用，确定所需要的输入输出（简称 I/O）点数，从而选择合适的 I/O 模块。

3) PLC 选型：根据所要实现的功能需求和 I/O 模块，选择合适的 PLC 型号。

4) 分配 I/O：根据控制对象的输入输出方式分配与 PLC 的 I/O 模块接口，记录好所有的 I/O 点位。

5) PLC 编程：按照实现功能的流程，用梯形图编写控制程序。

6) 设备电气安装：将 PLC 各模块端子与设备各个输入输出设备进行电缆连接。

7) 现场调试：将程序上载至 PLC 内，先对各个输入输出设备进行单步动作调试，确认单步动作到位后进行整个设备的联机调试。

8) 结束：将现场调试所修改的电气图和 PLC 程序整理成最终文件存档。

4.2 PLC 程序设计

4.2.1 软件功能分析

根据检漏系统的结构设计和实际生产的要求，本系统应具有产品信息管理、自动检测、手动控制、数据信号采集、标定等功能。

1) 产品信息管理

产品信息作为基础信息源，把产品与生产过程信息精确地关联起来，将产品和工艺结合在一起进行分类管理，其中包含了产品类型、工艺参数和检测标准等信息。

2) 自动检测

自动检测过程完成产品自动装夹、自动检漏、结果输出的步序，并能够实时显示工艺过程数据，合格件和不合格件有红绿灯显示，错误有报警信息提示。

3) 手动控制

手动控制功能实现对所有开关阀、电磁阀、真空泵和气缸等元器件的人工操作，以及显示所有元器件的当前状态信息。并设计有安全联锁的急停开关，以防发生意外时可以关闭所有可动部件。

4) 数据信号采集

数据信号采集功能实现采集所有数字量信号和模拟量信号,将元器件信息与 PLC 控制系统关联在一起。条码读码器读取了产品上的流水号信息, I/O 模块接收了气缸磁性开关的到位信息。模拟量模块将压力传感器的电压信号转化为数字用于 PLC 换算为实际压力值。

5) 标定

根据氦质谱检漏的工作原理,氦气漏率的计算是通过计算质谱室接到到氦离子的电流计算而来。由于出口电极位置的偏差、电流计的误差及信号采样、转换、传输后产生了一系列累计误差,使得测试值与真实值也存在了一定的误差,导致标准漏孔的设置值与氦离子接收量比值计算错误,从而影响了检漏系统的测量精度。所以为了保证检漏系统的测量精度,必须对系统进行标定。氦质谱标定分为内部标定和外部标定。

4.2.2 PLC 模块选型和配置

PLC 为模块化设计,根据功能要求配置不同的模块满足设备动作程序要求。本系统选择罗克韦尔公司的 ControlLogix 系列控制器作为 PLC 控制模块。其主要由 CPU、I/O 输入输出模块、模拟量模块、通信模块、机架、电源组成。

ControlLogix 系列的控制器 CPU 外形尺寸小,不仅可提供离散、驱动、运动、过程和安全控制,还可以配备多种 I/O 模块和通讯模块,实现多功能性和包容性。系统采用模块化结构,因此可以进行高效地维修和与其他系统的通用互换。1756-L72 控制器自带 4MB 存储器,支持多任务系统,可以同时运行 32 个任务,提供了可扩展的解决方案,通过背板监控足够多的 I/O 点。支持 EtherNet/IP, DeviceNet, ControlNet 等网络通讯协议,可以与多种第三方设备进行互联互通。支持梯形图、功能块、顺序功能图等编程语言,可以让编程人员轻松编辑,无需额外培训。在同一机架内可以放置多个 CPU,实现分布式运算。

1756-IF16 模拟量输入模块具有输入路数为 8 路单端,4 路差分或 16 路单端,8 路差分;电压范围支持 0-5.125V、0-10.25V、 $\pm 10.25V$;电流范围支持 4-20mA;分辨率达到 16 位;精度为 0.15%满量程(电流);背板电流为 150mA@5Vdc, 40/65mA@24Vdc,并具有带电插拔功能。

1756-OF8 模拟量输出模块具有输出路数为 4 路电流或电压或 8 路电流或电压;电压范围支持 $\pm 10.4V$;电流范围支持 4 20mA;分辨率为 15 位;精度为 0.05%满量程(电流);背板电流为 200mA@5Vdc, 120mA@24Vdc/ 150mA@5Vdc, 210mA@24Vdc,并具有带电插拔功能。

本系统所选用的 PLC 模块型号如下表 4.1, PLC 模块布置如图 4.2 所示。

表 4.1 PLC 模块型号

| 产品型号 | 产品描述 | 数量 |
|-----------|----------------|----|
| 1756-A7 | 机架 | 1 |
| 1756-DNB | DEVICENET 网络模块 | 1 |
| 1756-ENBT | ETHERNET 网络模块 | 1 |
| 1756-L72 | CPU | 1 |
| 1756-N2 | 空槽填补模块 | 2 |
| 1756-PA72 | 电源 | 1 |
| 1756-OF8 | 模拟量输出模块 | 1 |
| 1756-TBCH | 36 针可拆卸端子块 | 2 |
| 1756-TBNH | 20 针可拆卸端子块 | 2 |
| 1756-IF16 | 模拟量输入模块 | 1 |

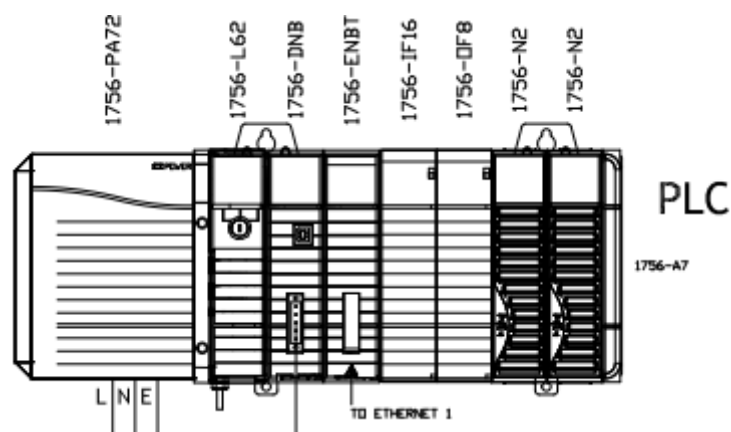


图 4.2 PLC 模块布置

输入输出信号分为开关量信号和模拟量信号，根据设备的输入输出信号类型，本系统开关量信号采用输入模块 2 个，共 40 点，输出模块 2 个，共 72 点。模拟量输入模块 1 个，共 16 点，模拟量输出模块 8 点。开关量信号主要用于各种接近开关、电磁阀、氦质谱检漏仪、指示灯等，模拟量信号主要用于压力传感器、真空规等。输入输出信号分配如表 4.2 和表 4.3 所示。

表 4.2 PLC 输入点分配

| 输入点名称 | 地址 |
|----------------|-------------|
| WIKA 压力传感器 1 | AI IN0 |
| WIKA 压力传感器 2 | AI IN1 |
| Festo 阀岛 | AI IN2 |
| 安全光幕 | 6.6 DI0 |
| Pilz 安全继电器 | 6.6 DI0 |
| 自动手动切换 钥匙开关 | 6.6 DI4 |
| 急停开关 | 6.6 DI5 |
| 氦质谱仪输入 | 6.6 DI8-19 |
| 光电开关 2 | 9.9 DI5 |
| 接近开关 21-30 | 9.10 DI0-15 |
| 启动开关 | 9.9 DI2 |
| 接近开关 1-20 | 9.9 DI3-25 |
| 光电开关 1 | 9.9 DI4 |

表 4.3 PLC 输出点分配

| 输出点名称 | 地址 |
|------------|-------------|
| 双色灯绿色 | 9.9 DO2 |
| 双色灯红色 | 9.9 DO3 |
| 软启动阀 | 9.9 DO4 |
| 工件到位信号 | 3.3 DO0-1 |
| 安全门信号 | 3.3 DO6-7 |
| 电控箱锁信号 | 3.3 DO8-9 |
| BP 口工装信号 | 3.3 DO16-17 |
| MC 口工装信号 | 3.3 DO18-19 |
| VT1 排气阀输出 | 4.5 DO0-1 |
| VT2 排气阀输出 | 4.5 DO2-3 |
| V5 排气阀输出 | 4.5 DO4-5 |
| V6 排气阀输出 | 4.5 DO6-7 |
| V1&3 排气阀输出 | 4.5 DO8-5 |
| V2&4 排气阀输出 | 4.5 DO10-11 |
| 三色灯绿色 | 6.6 DO0 |
| 三色灯黄色 | 6.6 DO1 |
| 三色灯红色 | 6.6 DO2 |
| festo 电磁阀 | 6.6 DO8 |
| 氦质谱仪输出 | 6.6 DO12-19 |

4.2.3 PLC 编程

本文采用 AB 公司的 RSLogix5000 软件来进行 PLC 程序编程。RSLogix5000 有丰富的驱动程序库，支持各种设备进行组态操作。用户可以通过一个或多个通讯接口同时运行任何支持的应用程序组合，可以在线监视数据，将程序块分为 task、program 和 routine 进行分别管理，具有性能诊断工具，便于进行系统故障排查，支持梯形图、功能模块及顺序功能流程等多种语言，自由切换。

根据总体结构设计、检漏流程和关键功能的分析，将控制程序分为主程序和检漏程序 2 个部分。主程序流程如图 4.3 所示，主程序进行对系统的初始化、标定和产品信息管理等进行控制。系统的初始化要求在设备启动时，检查所有的气缸、电磁阀是否在原位，检漏仪是否在准备状态。内外部标定要求设备的检测功能已经在准备状态，性能是符合质量控制要求的。产品换型将系统的工装夹具和

电磁阀信号切换至当前产品所对应的状态，从而可以实现工装夹具的防错功能。参数下载步骤会与数据系统进行通讯，将当前产品所对应的工艺过程参数和检测标准快速下载至 PLC 的存储器中，这样可以实现产品工艺防错功能。在自动检漏步骤完成后，系统进行输出显示，合格件亮绿灯放行，不合格件亮红灯锁死，出现故障时闪烁黄灯进行报警提示。

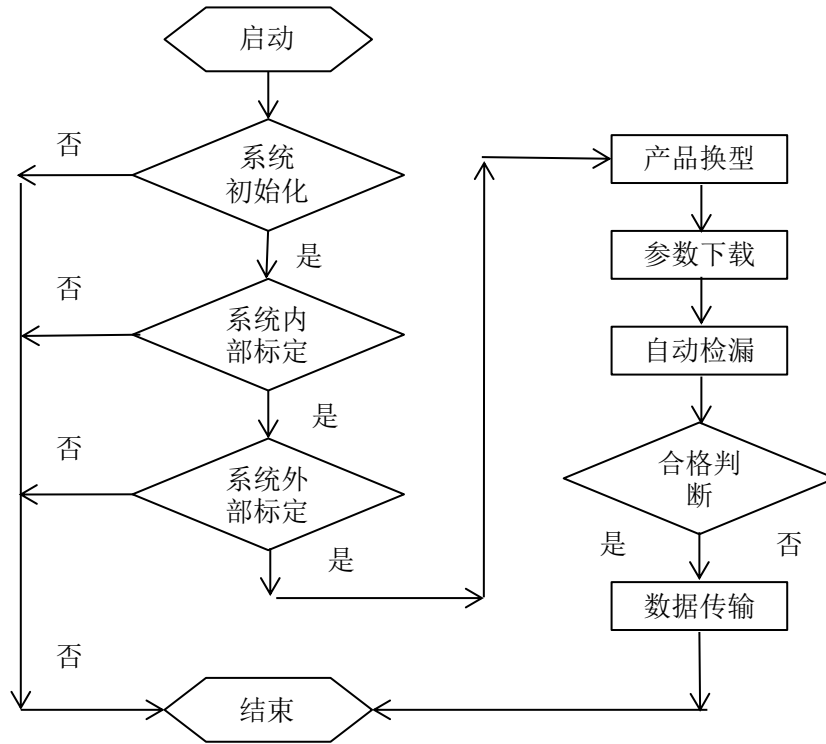


图 4.3 控制程序主程序

检漏程序流程如图 4.4 所示，主要是控制各个气动元件、输入输出模块实现自动检漏，当启动开关触发后，气缸推动安全门关闭，工装上的传感器检测产品有无到位，到位后读码器读取产品上的唯一性的条码，由 PLC 传送至数据系统进行比对，判断此件产品是否应当在此工位检测，实现工艺流程防错功能，并在触摸屏上显示当前产品的条码信息。判断合格后，气缸推动夹紧和配气气缸运行，到位传感器触发后，PLC 控制电磁阀打开气路进行检漏流程。在检漏结束后，传感器和检漏仪输出信号传送至 PLC，PLC 对结果进行判断。

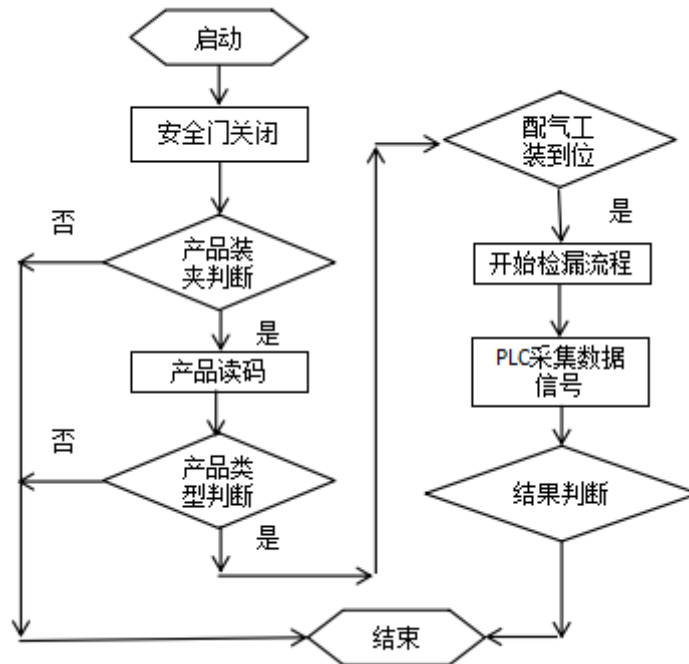


图 4.4 自动检漏流程

4.3 功能模块的界面实现

本系统采用 FactoryTalk View Site Edition 软件来设计人机交互界面，是一种紧凑型的功能强大的可视化解决方案，允许以图形方式监视、控制和显示工程项目的状态信息，并且是基于 Window 操作系统，提供了足够的开放性和灵活性。根据设计功能的要求，按照模块化分布式组态，完成过程显示、数据传递、设备控制等应用。

人机交互界面数量较多，包括工艺控制界面和信息展示界面等，这里主要是对整个界面架构规划、各个界面的衔接以及其他报警信息、真空曲线等进行设计。

4.3.1 界面架构设计

人机交互界面应具有以下功能：

- 1) 人性化的交互界面，操作人员可以清楚的观察到设备的运行状态，并通过少量的点击完成设备部件的操作；
- 2) 完善的产品数据传递、管理功能，清楚得展示当前工作的产品型号，拥有足够可扩展换型产品库。产品参数需要从数据系统下载并确认。
- 3) 实时显示功能，可以以图文方式展示检漏过程中各个电磁阀和传感器的动态信息；
- 4) 具有安全互锁的手动控制功能，可以让操作人员安全得操作各个气动元

件和电磁阀，防止发生误操作而造成人员伤害。

根据这些功能要求，人机交互界面设计主要包含主界面、换型、工装控制、阀控制、氦质谱标定、真空趋势、工艺参数、手动测试、测试结果等 9 个界面，人机界面架构如图 4.5 所示。

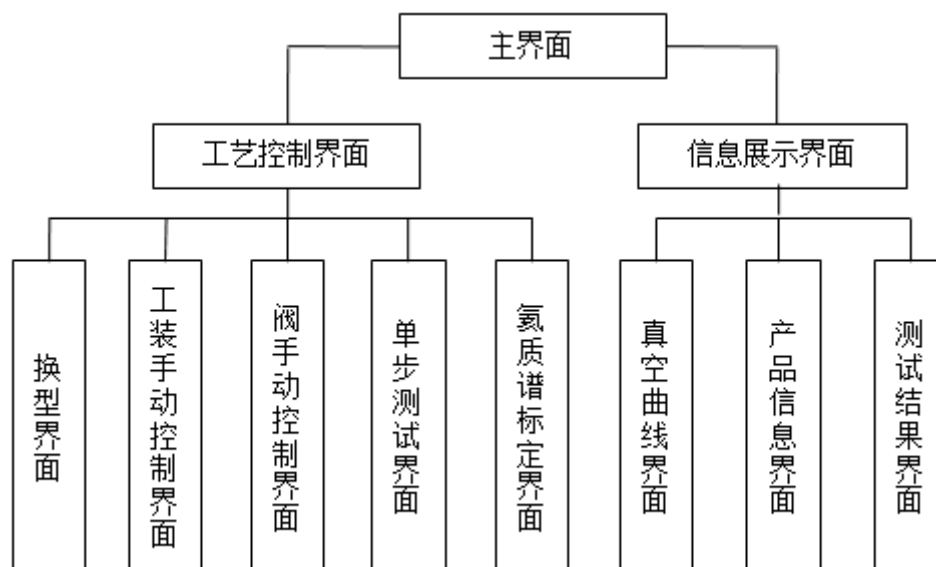


图 4.5 人机界面架构

4.3.2 界面设计

人机界面的设计需安装一定的原则进行设计，否则就会杂乱无章，让操作人员困惑。首先是以用户为中心的基本设计原则，通过观察和调研了解操作人员的需求，使得设计更加符合人机工程学。第二是顺序原则，按钮的布置需符合动作的流程，避免无必要的返回再进入的切换。第三是功能原则，将某些操作对象固定的按钮集中在一起，提高易操作性。第四是一致性，所有相同功能的信息展示或按钮需保持一致的颜色和固定的位置，这样操作人员可以直观得找到所需要的信息。

本系统人机界面除了主界面，工艺控制界面有五个，信息展示界面有三个。信息展示界面的切换功能主要设计在主界面第一层，工艺控制界面切换通过主界面的总按钮进入第二层再切换。这样的设计可以实现：

- (1) 主界面展示总体的产品信息，了解当前状态；
- (2) 一次按键即可切换到所有的信息展示界面，迅速，节约时间；
- (3) 可以设置用户权限，限制无关用户进入到第二层去进行工艺操作，防止误操作和工艺参数误变更；

1) 主界面

本段主要介绍下主界面的设计布局，其他界面与其类似，不再详细介绍。将

主界面划分为7行进行介绍,如图4.6所示。第一行中间写明当前工位号(station),以便区分不同工位。第二行放置了5个控制按钮,左侧3个灰色的依次是循环开始(cycle start)、循环停止(cycle stop)、工位复位(station reset),这些按钮将控制自动测试步骤,并将工位全部恢复至原位。红色按钮是不合格释放(reset nok),在自动检测不合格后,不合格件会被锁死在工位内,需要人工操作才能解锁,防止不合格产品混入至合格产品中。绿色是进入各种手动操作的按钮,可以根据用户权限设置来管控不同用户的操作。第三行是当前工艺步骤显示,用于展示当前设备运行在哪个步骤。第四行显示信息筛选按钮,用来控制第五行所要显示的信息,只展示用户重点关注的信息。第五行将显示所有的工艺步骤、报警信息、节拍信息等。第六行左侧barcode将显示当前产品的条码,右侧显示PLC程序运行至哪一个步序,在设备故障时可以方便维护人员及时找到故障点。第七行主要显示机器安全门的动作状态,绿色的ACC信息表明当前PLC与数据系统是连接中,否则ACC为灰色。

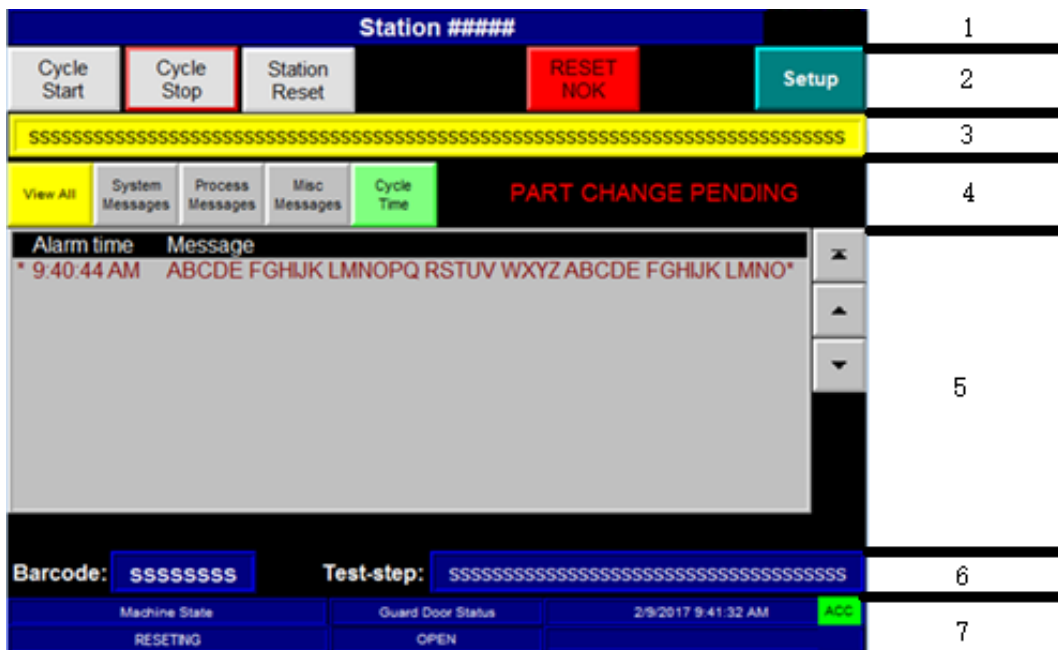


图4.6 主界面

2) 换型界面

换型界面可以通过触摸屏的按钮选择正确的产品型号,从而完成从数据系统获取正确的工艺参数,如图4.7。

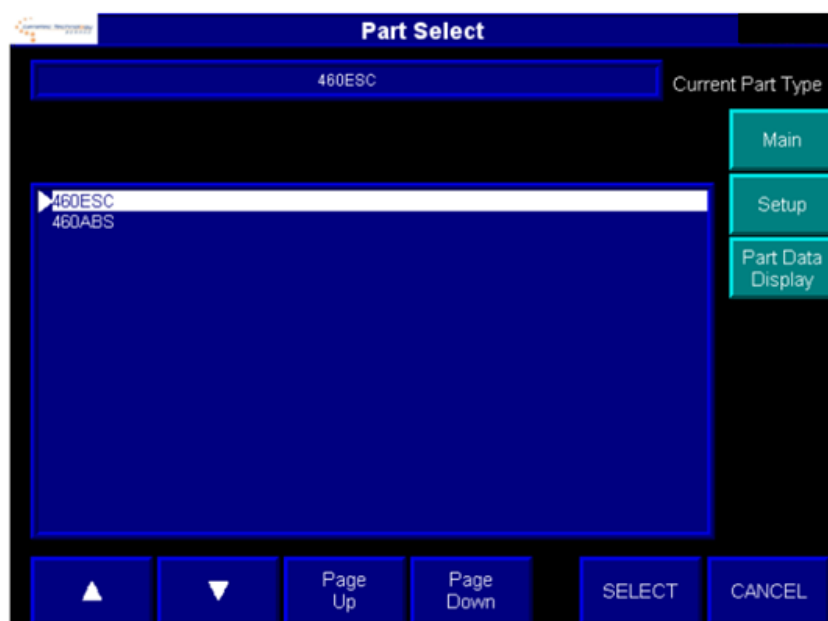


图 4.7 换型界面

3) 工装手动控制界面

工装控制界面可以通过触摸屏按钮完成对工装夹具的移动控制，并展示工装夹具的当前位置，如图 4.8。

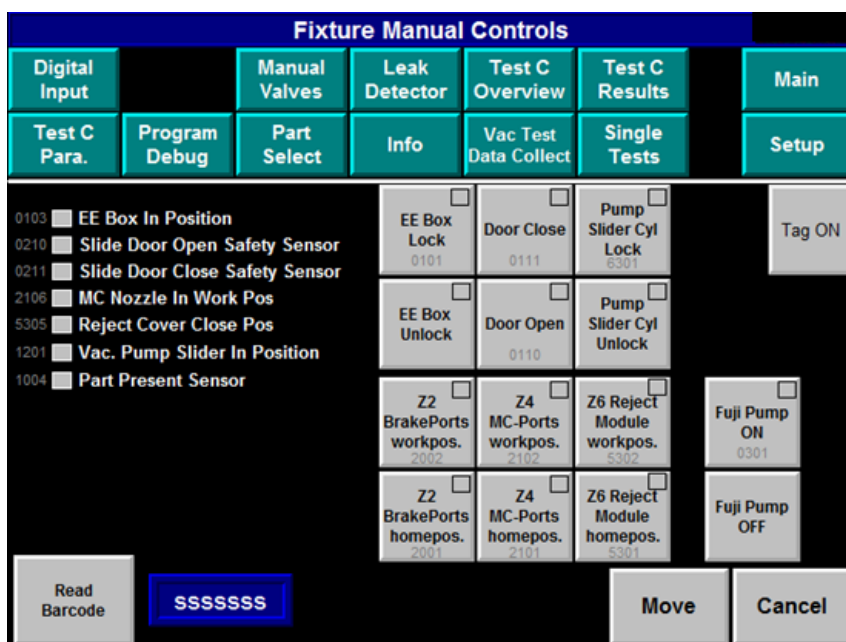


图 4.8 工装控制界面

4) 阀手动控制界面

阀控制界面可以通过触摸屏按钮完成对电磁阀、真空阀的开关控制，并通过阀的开关展示管路中压力的变化，以便维修时快速排查是哪个阀损坏，如图 4.9。

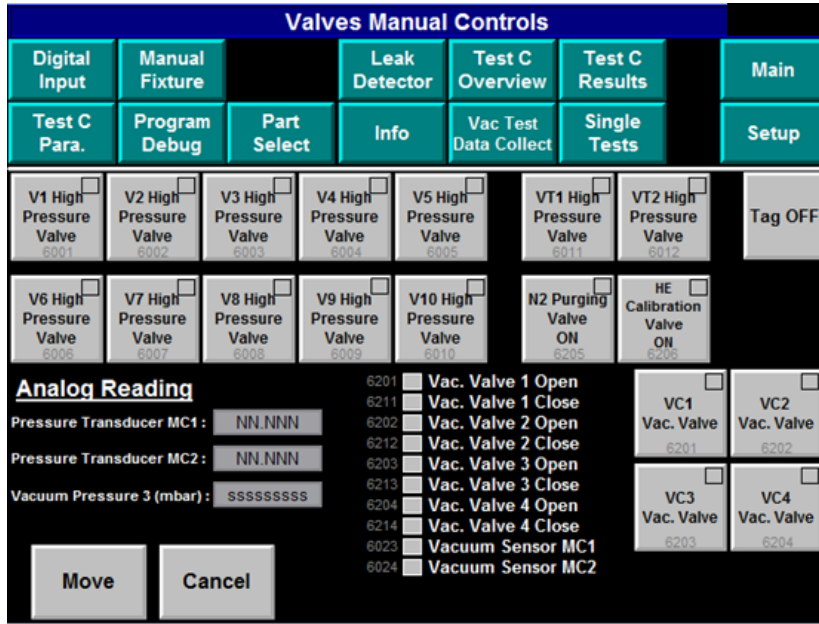


图 4.9 阀控制界面

5) 氦质谱标定界面

在这个界面可以完成氦质谱仪的内、外部标定过程，并展示氦质谱仪的模拟量输入值，了解实时漏率，如图 4.10。

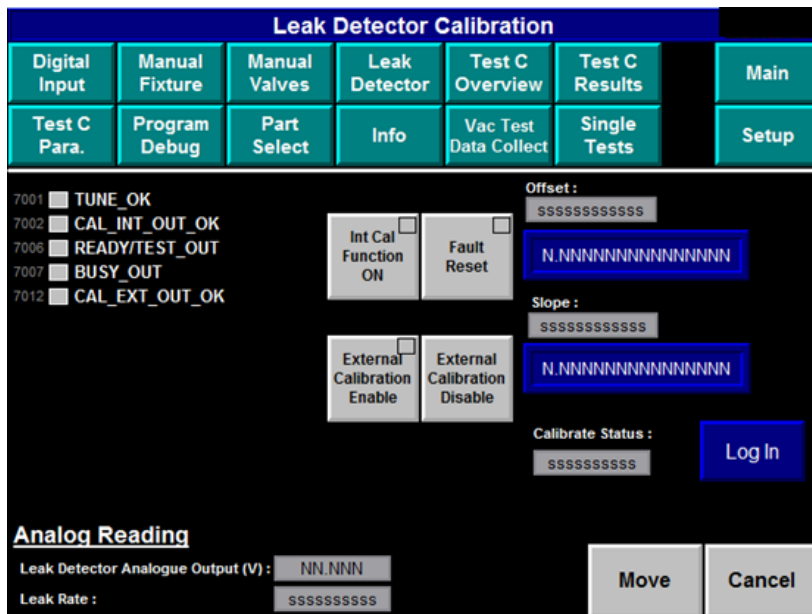


图 4.10 氦质谱标定界面

6) 真空曲线界面

在这个界面可以展示当前真空回路中的实时真空值，以便了解真空泵的真实工作能力，如图 4.11。

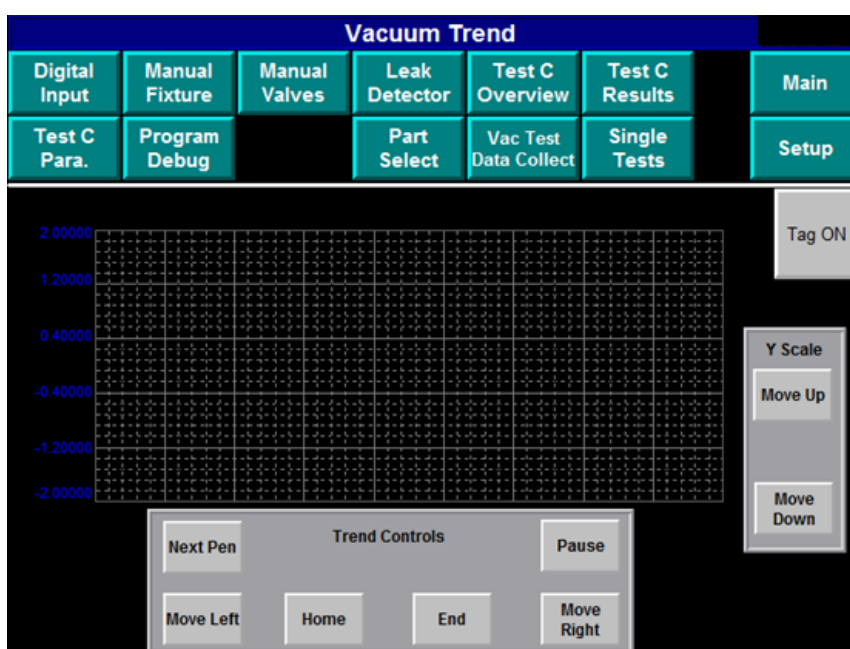


图 4.11 真空曲线界面

7) 产品信息界面

在这个界面可以展示数据系统传输过来的参数值，清楚的了解当前检漏系统的运行环境，如图 4.12。

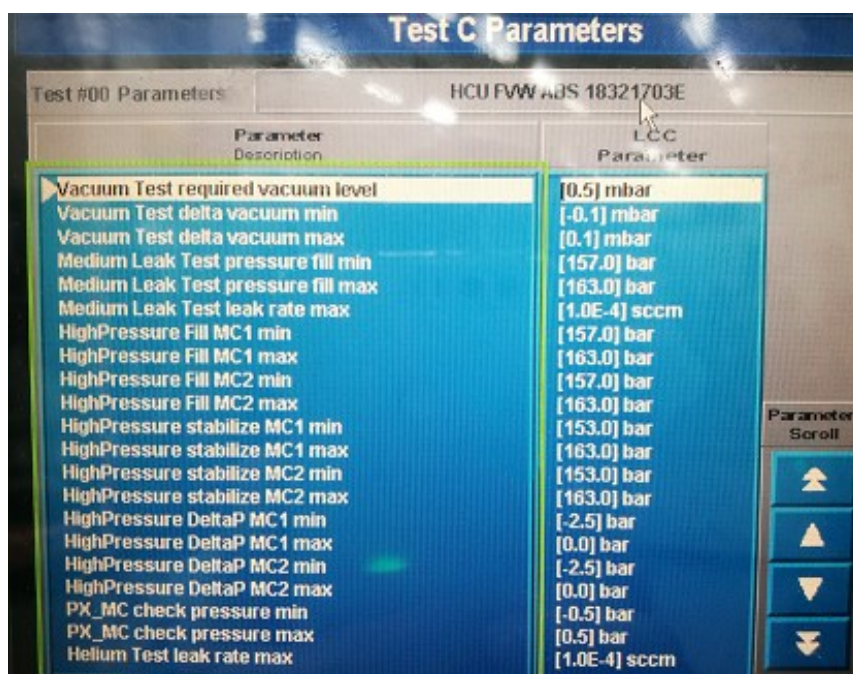


图 4.12 产品信息界面

8) 单步测试界面

在这个界面可以完成检漏流程里各个步骤的单步测试，检测出失效件是在哪个步序发生检测失败，从而进一步分析发生失效的根本原因，如图 4.13。

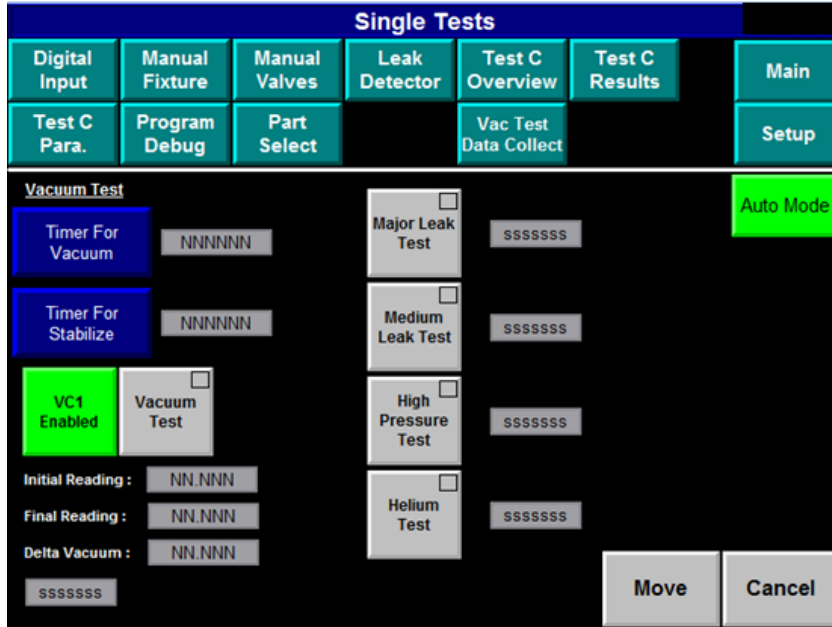


图 4.13 单步测试界面

9) 测试结果界面

在这个界面展示每个测试结果的数值，并用红绿双色灯直观得表示测试的结果，如图 4.14。

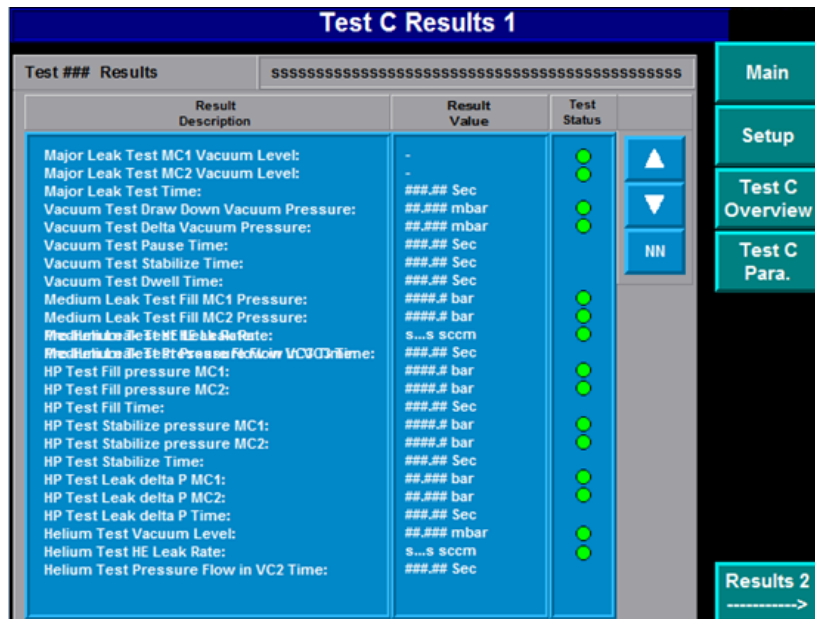


图 4.14 测试结果界面

4.3.3 报警信息

该检漏系统在调试运行中发生了一些报警和中断运行，我们将这些报警信息汇总归类，见表 4.4，并且写入人机交互界面的报警信息中，使得操作人员可以快速找到问题点，并得到合理的处理措施，提高检漏系统的使用效率。

表 4.4 人机交互界面报警信息汇总表：

| 报警代码 | 报警内容 | 报警处理措施 |
|----------|-------------------|-----------------|
| 15001001 | Z10 安全门没有关闭 | 检测安全门接近开关 |
| 15001101 | MC 口工装不在工作位置 | 检查气缸位置 |
| 15001301 | BP 口工装不在工作位置 | 检查气缸位置 |
| 15002001 | BP 口工装不在原位 | 检查气缸位置 |
| 15002301 | MC 口工装不在原位 | 检查气缸位置 |
| 15002501 | Z10 安全门没有打开 | 检测安全门接近开关 |
| 15209971 | 连续 3 件不合格 | 零泄漏件标定 |
| 15200201 | MC 口压力值不在零位 | 检查电磁阀和压力传感器 |
| 15200202 | 氮质谱检漏仪电压异常，需要内部标定 | 进行内部标定 |
| 15207161 | 从数据系统没有产品类型反馈 | 检查与数据系统的通讯 |
| 10400421 | 产品类型下载错误 | 重新加载产品类型 |
| 10401411 | 从数据系统没有产品数据反馈 | 检查与数据系统的通讯 |
| 10401421 | 从数据系统没有产品换型反馈 | 检查与数据系统的通讯 |
| 10414021 | 产品上料错误 | 检查产品条码标签 |
| 10424021 | 产品下料错误 | 检查产品条码标签是否与屏幕一致 |
| 10401431 | 产品参数下载错误 | 重新加载产品类型 |

4.4 本章小结

本章主要介绍了检漏系统的软件系统设计流程，通过功能需求分析，规划出控制程序的逻辑流程，确定了 PLC 主要模块的选型。通过人机交互界面设计软件完成几个功能模块的界面实现。

第5章 检漏系统的性能评定

检漏系统搭建完成后，需要对其性能进行评定，以判定系统是否满足生产线的使用要求。通常单个的元器件，如压力传感器、真空规、压力表，可用有资质的第三方机构的仪器进行检定。而整套系统需要采用试验方法，用量化的数据对其评定。一般来说检漏系统从测量能力和运行节拍这两方面评定其性能。

5.1 测量能力评定

5.1.1 零泄漏件试验

检漏系统的测量能力指的是正常工作条件下检漏已知漏率的被测件所显示测量值的准确度。理想状况下纵坐标为测量值线性应该是一条斜率为1，截距为0，横坐标为输入的已知漏率的一次函数。那么截距和斜率就是影响测量值的2个关键因子。当检漏系统的自身泄漏为零，统称为系统内漏，截距就为0，但绝对零泄漏是不存在的，任何密封都会有泄漏。检漏系统由若干金属管道和电磁阀组装而成，虽然在组装完成时已经进行了气密保压试验，但经过长时间受到高压气体作用后，管道的变形和电磁阀内部的磨损也可能导致系统内漏。在一定范围内的系统内漏在所引起的测量值变化也是系统可以接受的，通常系统内漏小于测量值上限的10%为可接受。因此首先用零泄漏件试验其自身的密封性。零泄漏件就是未加工孔的工件，它的漏率是0 atm.cc/s，相当于检漏系统在配气口完全密封。

零泄漏件试验操作过程如下：

1) 为了满足测试要求，确保试验环境温度为20℃，湿度为50%，进气压力调整至16 MPa，并在触摸屏上设置好试验参数，如表5.1所示。

表 5.1 试验参数要求

| | |
|------------------|------------------------|
| 大漏测试时间 (s) | 1.5 |
| 真空度上限 (Pa) | 10 |
| 进气压力 (MPa) | 16±0.5 |
| 高压稳压时间 (s) | 3 |
| 高压保压时间 (s) | 3 |
| 高压压力降上限 (MPa) | 0.1 |
| 氦质谱检漏时间 (s) | 1.5 |
| 标准漏孔漏率(atm.cc/s) | 1.750×10 ⁻⁸ |

2) 将配气管路插接至高压气源口, 检查换型工装是否装夹到位, 如图 5.1 所示, 配气工装上密封头是否安装, 如图 5.2 所示。

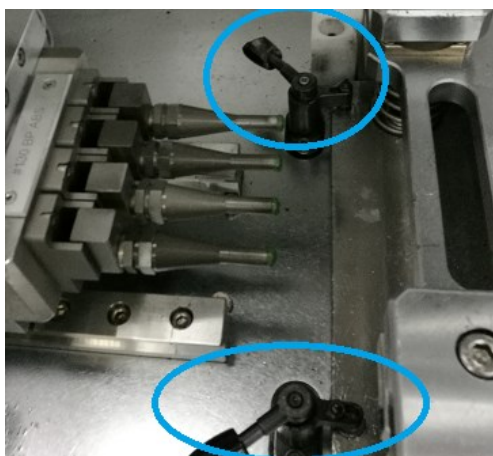


图 5.1 换型工装图

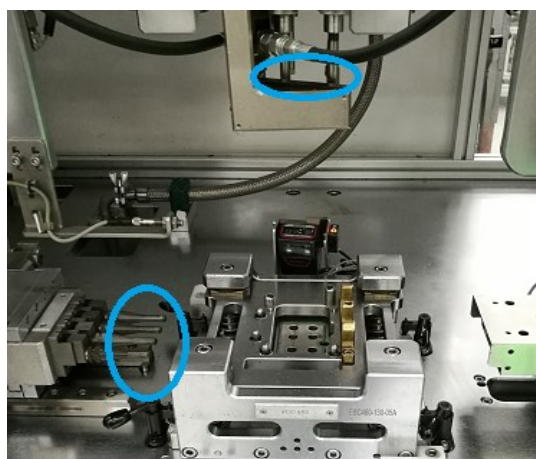


图 5.2 配气工装图

3) 将零泄漏件放置在换型工装上, 如图 5.3 所示;

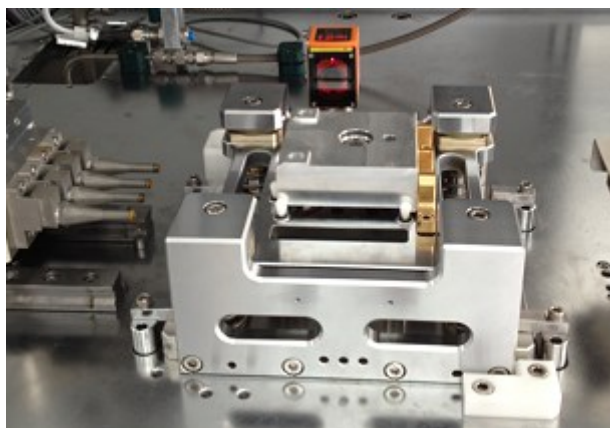


图 5.3 零泄漏件工装图

4) 先进行系统工况的试验, 按下启动按钮, 进行检漏流程, 先进行 5 次试验, 分别记录下 MC1 和 MC2 口的测试压力、压力降值、真空室的真空度值, 并计算各自的平均值, 试验结果如表 5.2 所示。

表 5.2 试验参数表

| 序号 | 真空度 (Pa) | MC1 测试压力 (MPa) | MC2 测试压力 (MPa) | MC1 压力降 (MPa) | MC2 压力降 (MPa) |
|-----|----------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| 1 | 4.9 | 15.80 | 15.76 | -0.075 | -0.075 |
| 2 | 5.8 | 15.78 | 15.74 | -0.08 | -0.080 |
| 3 | 5.9 | 15.78 | 15.74 | -0.083 | -0.083 |
| 4 | 5.5 | 15.78 | 15.74 | -0.082 | -0.081 |
| 5 | 5.6 | 15.78 | 15.74 | -0.081 | -0.080 |
| 平均值 | 5.54 | 15.786 | 15.744 | -0.0802 | -0.0798 |

通过表 5.2 的 5 次试验数据的平均值可以看出: a: 在高压进气压力 16 MPa 的工况下, 高压测试压力稳定, 与进气压力差值小于 0.5 MPa, 符合系统设定要求, 从进气口到测试口这段的管路的设计没要造成较大的压力损失, 并且 MC1 和 MC2 两路管路的压力差值没有明显差异; b: 试验的 MC1 和 MC2 的压力降平均值小于系统设定的 0.1 MPa 上限值, 高压管路的密封性符合系统要求。c: 真空室的真空度平均值小于 10 Pa, 符合系统设计的密封要求, 保证了后续氦质谱试验时不受环境氦气干扰。

这 5 项数据说明系统工况符合设计要求, 可以进行下一步氦质谱试验。

5) 再重复进行 30 次试验, 记录下氦质谱检漏的漏率值, 试验结果如表 5.3 所示。

表 5.3 零泄漏件检漏数据

| 序号 | 屏幕显示值 atm.cc/s | 序号 | 屏幕显示值 atm.cc/s | 序号 | 屏幕显示值 atm.cc/s |
|----|------------------------|----|------------------------|----|------------------------|
| 1 | 1.750×10^{-8} | 11 | 1.750×10^{-8} | 21 | 1.750×10^{-8} |
| 2 | 1.750×10^{-8} | 12 | 1.750×10^{-8} | 22 | 1.750×10^{-8} |
| 3 | 1.750×10^{-8} | 13 | 1.750×10^{-8} | 23 | 1.750×10^{-8} |
| 4 | 1.750×10^{-8} | 14 | 1.750×10^{-8} | 24 | 1.750×10^{-8} |
| 5 | 1.750×10^{-8} | 15 | 1.750×10^{-8} | 25 | 1.750×10^{-8} |
| 6 | 1.750×10^{-8} | 16 | 1.750×10^{-8} | 26 | 1.750×10^{-8} |
| 7 | 1.750×10^{-8} | 17 | 1.750×10^{-8} | 27 | 1.750×10^{-8} |
| 8 | 1.750×10^{-8} | 18 | 1.750×10^{-8} | 28 | 1.750×10^{-8} |
| 9 | 1.750×10^{-8} | 19 | 1.750×10^{-8} | 29 | 1.750×10^{-8} |
| 10 | 1.750×10^{-8} | 20 | 1.750×10^{-8} | 30 | 1.750×10^{-8} |

计算出表 5.3 的 30 次数据的平均值为 1.750×10^{-8} ，远小于系统漏率上限 1.7×10^{-6} 的 10%，符合系统设计要求。将表 5.3 的 30 次数据汇制成趋势曲线，如图 5.4 所示，可以看出系统内部密封性非常稳定，在连续高压作用下，管路的密封性依然稳定。

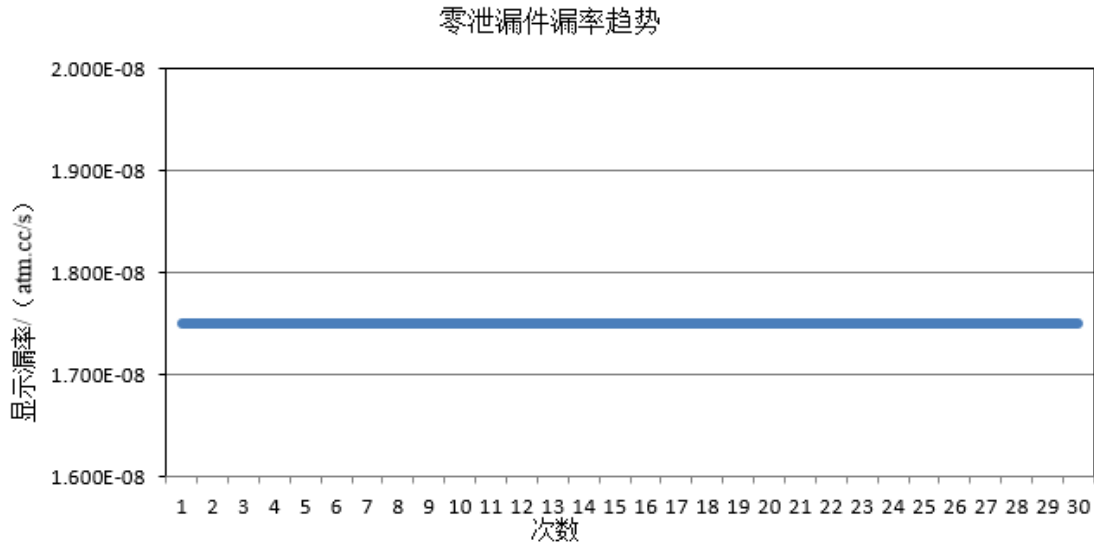


图 5.4 零泄漏件漏率趋势

零泄漏件的试验说明了检漏系统的系统内漏非常小，一次函数截距的值不会产生线性零点偏移，对最终测量值的影响小于系统要求。

5.1.2 标准漏孔试验

上一节已经对影响测量值的关键因子截距的试验，本节将试验测量值一次函数的斜率因子。当斜率为 1，截距为 0 时，检漏系统检测一个已知漏率为 a 的被测件时，那么系统测量值 b 应等于 a 。如果斜率小于或大于 1 都会导致测量值变小或变大，与真实值产生偏差。本文采用标准漏孔试验，标准漏孔是人工制造的具有固定漏率的接头，可以快速的插入检漏系统的管路中。通常标准漏孔有玻璃毛细管型和薄膜渗氮型等几种类型，本文采用的是薄膜渗氮型，其优点是性能稳定，抗污染能力强，比较适合生产现场使用。标准漏孔必须经过标定和定期校准，通常有效期为一年，之后需要有资质的第三方进行校准。本文校准的标准漏孔漏率是 $1.13 \times 10^{-6} \text{ atm.cc/s}$ ，这个漏率接近系统漏率上限，可以最大程度的保证系统判断临界区间的测量值的准确性。

外部标定流程如下：

- 1) 将标准漏孔插入第三章图 3.2 所示的外部标定接口；
- 2) 点击检漏仪触摸屏"Calbrition"按钮进入；
- 3) 选择点击"External Calibration Enable"按钮，如图 5.5 所示；

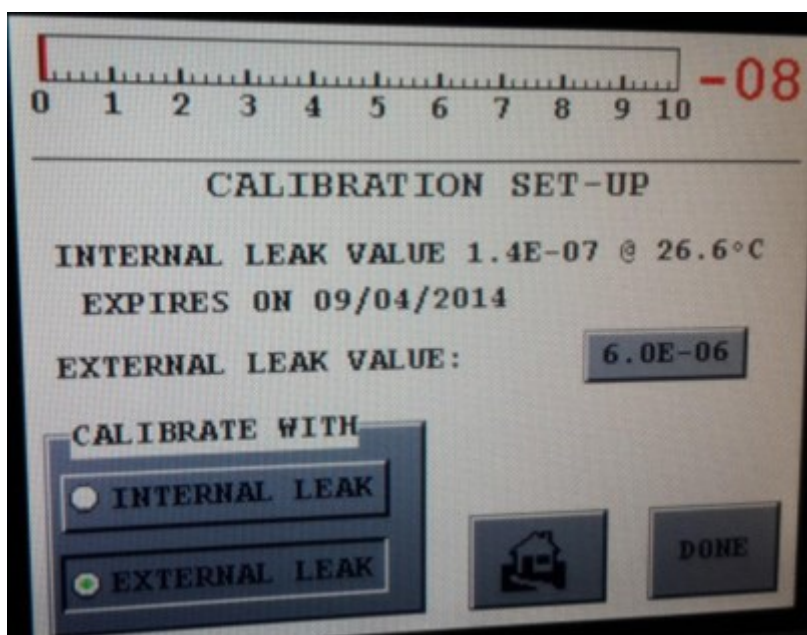


图 5.5 氦质谱仪标定界面

4) 重复进行 30 次试验, 步骤与零泄漏件试验流程相同, 不再复述。试验结果如表 5.4。

表 5.4 标准漏孔检漏数据

| 序号 | 检漏显示值 atm.cc/s | 序号 | 检漏显示值 atm.cc/s | 序号 | 检漏显示值 atm.cc/s | 平均值 atm.cc/s |
|----|------------------------|----|------------------------|----|------------------------|------------------------|
| 1 | 1.023×10^{-6} | 11 | 1.019×10^{-6} | 21 | 1.015×10^{-6} | 1.019 $\times 10^{-6}$ |
| 2 | 1.016×10^{-6} | 12 | 1.027×10^{-6} | 22 | 1.024×10^{-6} | |
| 3 | 1.014×10^{-6} | 13 | 1.025×10^{-6} | 23 | 1.004×10^{-6} | |
| 4 | 1.014×10^{-6} | 14 | 1.017×10^{-6} | 24 | 1.010×10^{-6} | |
| 5 | 1.021×10^{-6} | 15 | 1.020×10^{-6} | 25 | 1.014×10^{-6} | |
| 6 | 1.014×10^{-6} | 16 | 1.024×10^{-6} | 26 | 1.011×10^{-6} | |
| 7 | 1.030×10^{-6} | 17 | 1.025×10^{-6} | 27 | 1.019×10^{-6} | |
| 8 | 1.026×10^{-6} | 18 | 1.018×10^{-6} | 28 | 1.022×10^{-6} | |
| 9 | 1.026×10^{-6} | 19 | 1.029×10^{-6} | 29 | 1.018×10^{-6} | |
| 10 | 1.009×10^{-6} | 20 | 1.021×10^{-6} | 30 | 1.023×10^{-6} | |

计算表 5.4 的 30 组数据的平均值为 1.019×10^{-6} atm.cc/s, 与标准漏孔漏率的差值为 0.111×10^{-6} atm.cc/s, 小于第 2.3 节所计算的漏率上限的 10%, 符合设计要求。

将表 5.4 的 30 组数据汇制成趋势曲线, 如图 5.6 所示, 可以看出测试稳定性很好, 前一次检漏的氦气排气冲刷干净, 没有对下一次检漏产生影响。

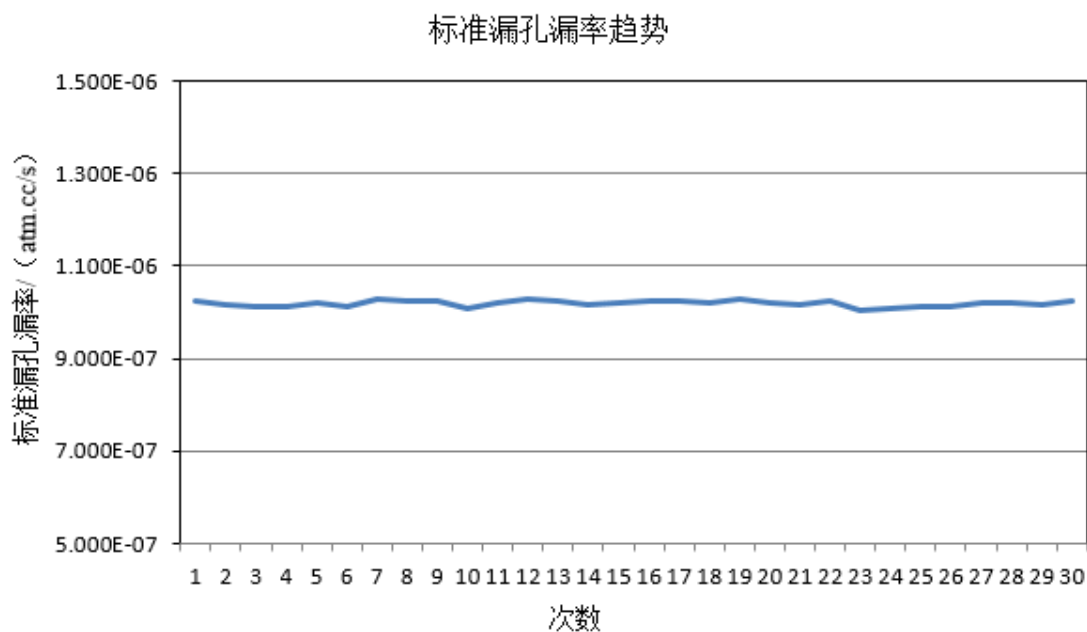


图 5.6 标准漏孔漏率趋势图

将零泄漏件和标准漏孔试验的均值拟合成一次函数, 如图 5.7 所示。图 5.7 中 K1 直线为理想状况截距为 0 和斜率为 1 的直线, K2 的截距为零泄漏件试验测得系统内漏为 1.750×10^{-8} 。根据两点一点原则拟合出 K3 直线。

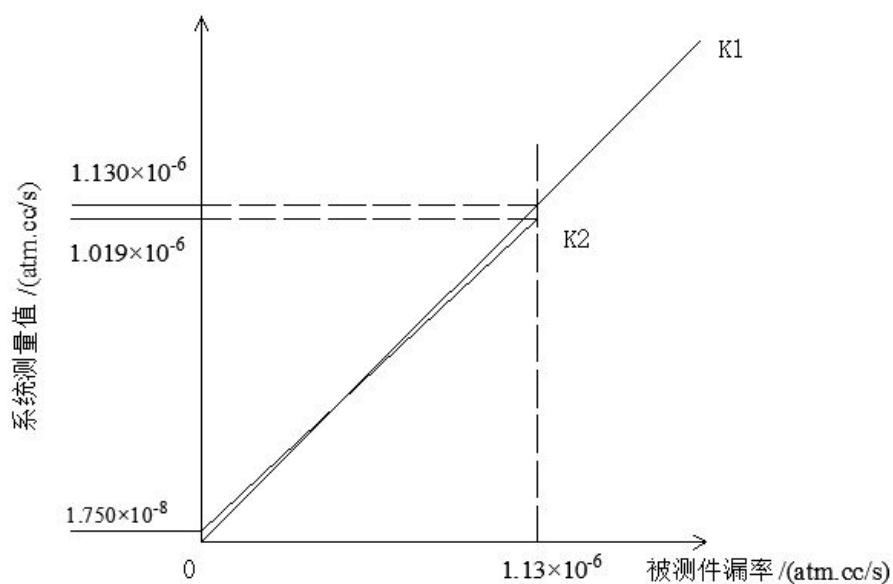


图 5.7 标准漏孔拟合一次函数图线

标准漏孔试验说明了检漏系统的对于已知漏率真实值的反馈测量值是准确的，一次函数的斜率接近于1，对最终测量值的影响小于系统要求。

5.1.3 测量能力分析

氦质谱检漏系统的本质就是一套测量系统，因此如果测量系统出错，那么好的结果被测为坏的结果，坏的结果被测为好的结果。这样将无法得知产品的真实特性。考量数据是否真实可以从数据的准确性和精确性这两方面进行分析。准确性指的是数据相对真实值的接近程度，如图 5.8 所示。精确性指的是数据的重复程度，如图 5.9 所示。

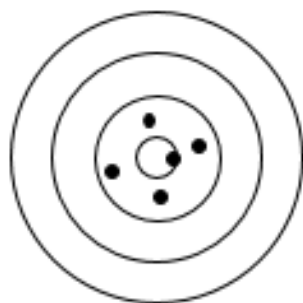


图 5.8 准确性图

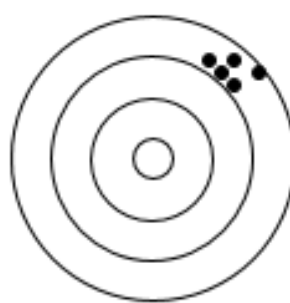


图 5.9 精确性图

本文用测量系统分析中的 GR&R 方法来评价检漏系统的准确性和精确性。GR&R 是 Gauge repeatability & Reproducibility 的英文简写，是运用数学统计方法对测量系统的分辨率和误差进行计算分析，来判断系统测量的准确性和精确性。GR&R 方法的评价标准，如表 5.5 所示。

表 5.5 检漏系统 GR&R 评价标准

| | |
|-----------------|---------------------------|
| 如果 GR&R<10% | 此系统无问题。 |
| 如果 10%<GR&R<20% | 此系统是可以接受的。 |
| 如果 20%<GR&R<30% | 系统依据其的重要性，决定是否需要改造接受或让步接受 |
| 如果 GR&R>30% | 系统不能接受，并且需要进行改善。 |

数学统计方法如下：

首先根据 30 组数据值 X_i 计算出平均值 U ：

$$U = X_i / 30 \quad (5.1)$$

然后根据实际值 A 和平均值 u 计算出偏移量 D ：

$$D = |u - A| \quad (5.2)$$

根据漏率上下限计算出公差范围 T:

$$T=usl-dsl \quad (5.3)$$

最后用式 (5.4) 计算出偏差准确性 P_d :

$$P_d=O/T \quad (5.4)$$

根据 30 组数据 X_i 用式 (5.5) 计算出标准差 σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - u)^2} \quad (5.5)$$

得出六西格玛标准差 6σ , 最后用式 (5.6) 计算出偏差精确性 P_t :

$$P_t=6\sigma/T \quad (5.6)$$

根据数学统计方法计算出零泄漏件的平均值为 1.750×10^{-8} , 偏移量为 1.750×10^{-8} , 公差范围为 1.7×10^{-6} , 标准漏孔的标准差为 6.304×10^{-9} , 六西格玛标准差 6σ 为 3.782×10^{-8} , 汇总数据计算得出准确性和精确性如表 5.6 所示。

表 5.6 检漏系统 GR&R 结果

| 测试件 | 实际漏率 | 准确性 | 精确性 | GR&R 值 |
|------|-----------------------|-------|-------|--------|
| 零泄漏件 | 1.75×10^{-8} | 1.03% | 0.00% | 1.03% |
| 标准漏孔 | 1.13×10^{-6} | 6.71% | 2.22% | 8.93% |

通过 GR&R 方法对 2 组 30 个数据进行分析, 检漏系统的 GR&R 均小于 10%, 根据表 5.5 所示的评价标准评定系统是稳定可靠的, 检漏结果是可信任的。

5.2 运行节拍测定

测量系统运行节拍可分为直接法和合成法。直接法是使用电子秒表直接测量工作时间, 合成法根据操作人员的动作分解, 分别测定每个动作的时间, 然后累加为运行节拍。因为本检漏系统是机器运行时间为主, 人员动作时间为辅, 所以我们采用直接法测量节拍。

测量过程分别对设备运行时间和操作人员的动作进行两组测量, 每组测量 10 个时间。测量方法为第一件开始启动秒表, 当第一件结束时, 暂停秒表, 读取记录秒表值, 然后复位秒表, 开始测量第二件。测量时操作人员需稳定, 不可更换, 并需根据实际情况对异常值进行删除。实际测量结果如表 5.7。

表 5.7 检漏系统运行节拍

| 次数 | 工作时间 | 人员时间 | 机器时间 |
|-----|-------|------|------|
| 1 | 27.6 | 7.6 | 20 |
| 2 | 26.8 | 6.8 | 20 |
| 3 | 25.9 | 5.9 | 20 |
| 4 | 26.8 | 6.8 | 20 |
| 5 | 26.8 | 6.8 | 20 |
| 6 | 27.8 | 6.8 | 21 |
| 7 | 26.6 | 6.6 | 20 |
| 8 | 27.6 | 7.6 | 20 |
| 9 | 26.8 | 6.8 | 20 |
| 10 | 26.8 | 6.8 | 20 |
| 平均值 | 26.95 | 6.85 | 20.1 |

检漏系统的平均节拍为 26.95 秒，符合设计要求的小于 28 秒。运行节拍趋势可以看出机器节拍非常平稳，如图 5.10 所示，说明真空泵能力、气缸运行速度及 PLC 控制程序的逻辑都非常稳定。人员动作时间偏差在 2 秒之内，说明系统的人性化设计符合要求，没有对人员动作产生过多的干扰。

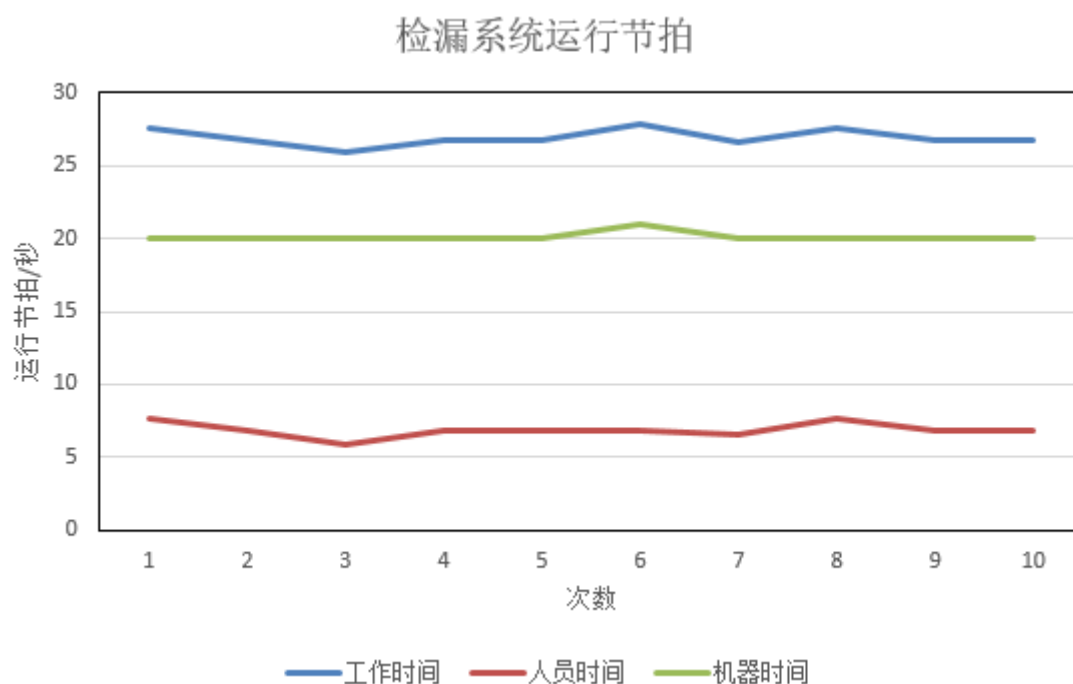


图 5.10 检漏系统运行节拍趋势

5.3 本章小结

本章对氦质谱检漏系统用零泄漏件和标准漏孔各进行了 30 组试验，通过零泄漏件的试验数据验证了检漏系统的自身密封性。并且 30 组标准漏孔试验数据平均值 1.019×10^{-6} atm.cc/s 与标准漏孔理论值相差也小于 10%，符合系统要求。通过运用数学统计方法计算了这 2 次试验数据的平均值、偏移量及标准差计算出偏差的准确性和精确性，根据 GR&R 理论计算出检漏系统的 GR&R 值均小于 10%，符合系统要求。最后用秒表法测量了系统的机器运行节拍和人员节拍，得出生产节拍小于设计目标，符合系统要求。从而验证了整套检漏系统达到设计的精度和稳定性的要求，可以投入批量生产使用。

第6章 总结与展望

6.1 总结

密封性是影响液压控制单元质量的一个重要因素，而检漏系统是衡量密封性的最有效的工具之一。传统气密检测的差压法和气泡法，因其检漏精度一般，耗费人工多，无法自动化生产，已经无法满足现代化工业生产的质量和效率要求。随着检漏技术的进步，检漏精度更高的氦质谱检漏法将会得到更多的应用。

本文介绍了检漏系统的发展现状，以液压控制单元为研究对象研究了当前各种检漏方法的工作原理、优缺点及液压控制单元的泄漏缺陷，在比较的基础上提出了以直压法检漏为辅，以氦质谱检漏为主的检漏系统。通过研究分析解决了在实际生产应用中的氦质谱检漏的漏率标准不明确、漏率与氦气浓度及成本的关系难平衡、无法量化评价检漏系统优良等问题。

具体而言，本文主要完成了如下工作：

(1) 本文研究了各种检漏技术的发展现状，对比分析了各种检漏方法的优缺点，提出了以氦质谱为基础的结合直压法的检漏系统代替以往用差压法，避免了因为检漏精度低而造成的不合格产品的流出。

(2) 本文从 ESP 液压控制单元工作原理着手，分析了它的密封面的设计和导致以往泄漏检测不出的直接原因。

(3) 本文详细研究了氦质谱检漏的工作原理，从而分析出使用浓度为 10% 氦气作为示踪气体的可行性，并由漏率计算公式推导出符合实际生产要求的漏率上限。

(4) 本文从工艺角度设计了一套全新的检漏流程，将直压法、真空法、氦质谱法结合应用，发挥各自方法的特点，完成了气路、机械、PLC 控制程序及人机交互界面的设计。

(5) 本文使用零泄露件和标准漏孔为试验载体完成了 2 次各 30 组的试验，利用测量系统分析的 GR&R 方法分析了检漏系统的测量能力，计算出 GR&R 值小于系统要求的 10%，证明了检漏系统的测量结果的可靠性和稳定性，并测定了系统的运行节拍，符合设计要求，满足流水线生产的需要。

6.2 进一步工作的方向

本文的设计的检漏系统已在某 ESP 生产厂家的流水线得到应用，取得了一定的成果。由于本人的研究能力有限，本论文还存在某些不完善的地方，需要得

到各位专家的批评指导。对于下列几个方面还需要进一步的研究：

1) 对于液压控制单元内泄漏的检测，如何将内外部泄漏结合在一台检漏系统上检测。本检漏系统主要是检测液压控制单元的静态泄漏率，还需要研究在各个电磁开关阀在动态时产生的不同压力、体积对于漏率的影响。

2) 本检漏系统大部分采用进口元器件，譬如氦质谱仪价格高达十万，阻碍了成本的降低。在彻底研究和掌握氦质谱检漏原理和得到大量的运行经验后，可以采购国产元器件代替进口件，提高国产化率，可极大地降低设备投入成本，为氦质谱检漏系统普及化打下基础。

致谢

本文是在我尊敬的导师孔德洋副教授耐心指导下完成的，在论文写作过程中，孔老师精益求精的精神和扎实的专业知识深深的引导着我，也让我意识到在以后的工作和生活都要学习老师的认真钻研精神。正是在他的指导下，我能顺利的完成本课题的研究，并在学术水平和科研能力上得到提高，在此向孔老师表示真挚的感谢。

另外感谢汽车学院的老师们，感谢他们在平时课程里为我传授知识，使我掌握了更多的科研能力。也感谢学院办公室的老师们，正是有你们的督促和指导，给我论文的编写提供了巨大的支持和帮助。

2017年3月

参考文献

- [1] 鲍仕儒, A.Nerken. 氦质谱检漏史话[J]. 真空与低温, 1992(4):51-52.
- [2] 刘惟信. 汽车制动系的结构分析与设计计算[M]. 清华大学出版社, 2004.
- [3] 肖祥正. 泄漏检测方法与应用[M]. 机械工业出版社, 2009.
- [4] 黄迷梅. 液压气动密封与泄漏防治[M]. 机械工业出版社, 2003.
- [5] 胡喜凤, 刘沛明. 理想气体状态方程在工业测量中的应用[J]. 中国高新技术企业, 2014(19):46-48.
- [6] 舒畅. 微型汽车空调管路检漏工艺的研究与优化[D]. 武汉理工大学, 2012.
- [7] 闫治平, 黄淑英. 漏率与压力关系的研究[J]. 中国空间科学技术, 1999, V19(2):42-46.
- [8] 周萍. 氦质谱检漏仪的研制[D]. 电子科技大学, 2007.
- [9] 龙飞, 邢武, 盛曾慰. 气密性检测方法分析[J]. 液压气动与密封, 2000(5):21-23.
- [10] 吴春龙. 基于机器视觉的气密性检测装置研究与设计[D]. 浙江理工大学, 2013.
- [11] 王庚林, 王莉研, 董立军. 漏率公式与判据和内部气体含量的分析研究(三)[J]. 电子与封装, 2007, 7(10):44-46.
- [12] 胡茂中, 白国云. 低充氦浓度氦质谱检漏技术应用研究[J]. 真空科学与技术学报, 2011, 31(2):208-211.
- [13] 朱长平, 黄文平. 提高氦气回收系统回收率的研究[J]. 中国仪器仪表, 2016(7). 韩武林. 一种阀门低温检测氦气回收利用系统及其控制方法:, CN103939738A[P]. 2014.
- [14] 周小军. 基于 AMESim 液压系统泄漏仿真与故障诊断研究[D]. 国防科学技术大学, 2012.
- [15] 周虎军. 汽车燃油系统的气密性和通气性检测[D]. 华中科技大学, 2004.
- [16] 王庚林, 李飞, 李宁博, 等. 压氦法和预充氦法氦质谱细检漏固定方案的设计[J]. 中国电子科学研究院学报, 2013, 8(6):656-660.
- [17] 初明璋. 日本的氦质谱检漏仪现状[C]// 真空技术应用学术年会. 2005.
- [18] 熊泽伟. ABS 液压单元 HCU 的性能研究及测试设备的开发[D]. 重庆大学, 2004.
- [19] 朱思莲. 氦真空检漏回收装置监控系统的设计和实现[D]. 电子科技大学, 2006.
- [20] 肖慧霞. 基于 PLC 的盘式制动器制动泵总成综合性能试验台的研制[D]. 武汉理工大学, 2009.
- [21] 袁海林. 基于 PLC 控制的气密液压检测系统的设计与实现[D]. 成都理工大学, 2013.
- [22] 郝忠兴. 汽车发动机缸体的试漏机研制[D]. 大连理工大学, 2012.
- [23] 荣雪琴. 密封容器的气密检测系统的设计与实现[D]. 苏州大学, 2010.
- [24] Arghavani J, Derenne M, Marchand L. Effect of Surface Characteristics on Compressive Stress and Leakage Rate in Gasketed Flanged Joints[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(10):713-732.
- [25] 曾成洲. 基于压差原理的泄漏检测方法研究及系统开发[D]. 浙江大学, 2012.
- [26] Zerbi R. Improving HMI Functions at Pilot Plant[J]. 2010, 57(3).
- [27] Fiset J Y. Human-Machine Interface Design for Process Control[M]. Instrumentation Systems and Automation Society, 2008.

- [28] Ljungkrantz O, Åkesson K, Fabian M, et al. An empirical study of control logic specifications for programmable logic controllers[J]. *Empirical Software Engineering*, 2014, 19(3):655-677.
- [29] 宦重波. 负压氦气检漏法的运用[J]. *制冷与空调*, 2015, 15(3):41-44.
- [30] 孙伟, 闫荣鑫, 韩琰, 等. 液态工质与示漏气体 He 的漏率等效关系研究[J]. *航天器环境工程*, 2010, 27(2):190-193.
- [31] 李灿伦. 真空系统设计应用软件的开发研究[D]. 东北大学, 2012.
- [32] 刘衍捷. 充压法氦质谱检漏的器件漏率双值求解和粗、细检漏的可靠衔接[D]. 苏州大学, 2006.
- [33] Wang G L, Wang L Y, Dong L J, et al. Study on Leak Rate Formula and Criterion for Helium Mass Spectrometer Fine Leak Test[C]// *International Conference on Electronic Packaging Technology*. IEEE, 2007:1-11.
- [34] Greenhouse H. Understanding Helium Fine Leak Testing in Accordance with Method 1014, MIL-STD-883 - Hermeticity of Electronic Packages - 6[J]. *Hermeticity of Electronic Packages*, 1999:210-258.
- [35] Johnson C H, Druschitz E A, Druschitz A P. Ultrasonic Leak Test for Automotive Brake Caliper[C]// *Materials Science Forum*. 2007.
- [36] Goswami A, Han B. On ultra-fine leak detection of hermitic wafer level packages[C]// *Electronic Components and Technology Conference*. IEEE, 2006:6 pp.
- [37] Hung S Y, Huang Y H, Liu L. Optical system for fast inspection of hermetic seals in electronic packages[C]// *International Symposium on Optomechatronic Technologies*. IEEE, 2011:1-4.
- [38] Costello S, Desmulliez M P Y, Mccracken S. Review of test methods used for the measurement of hermeticity in packages containing small cavities[J]. *IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology*, 2012, 2(3):430-438.
- [39] Schuetz G. GR&R Studies: Measuring the Measurement[J]. *Modern Machine Shop*, 2010(9).
- [40] Low S M, Lee S Y, Yong W K. Application of GR&R for productivity improvement[C]// *Electronics Packaging Technology Conference*, 2009. Eptc '09. IEEE, 2009:996 - 999.
- [41] Chen K S, Wu C H, Chen S C. Criteria of Determining the P/T Upper Limits of GR&R in MSA[J]. *Quality & Quantity*, 2008, 42(1):23-33.
- [42] Balta B, Sönmez F Ö, Cengiz A. Gage Repeatability and Reproducibility Investigations of a Test Rig Using ANOVA/Xbar-R Method[C]// *ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2011:793-800.
- [43] Gao H, Yang J, Wang D. Design and Research of Automatic Control System of Paper-making Tobacco Sheet Postprocessing Production Line Based on AB PLC[J]. *Programmable Controller & Factory Automation*, 2014.
- [44] Jiang X B, Zhao Q, Xiao-Xiu X U. Application of iFix and AB PLC in program control coal transport systems reformation[J]. *Electric Drive Automation*, 2010.Ceng, Yongji. The communication between AB PLC and MODBUS network[J]. *Control & Automation*, 2004.
- [45] 周乔君. 热力膨胀阀氦质谱自动检漏系统的研制[D]. 中国计量学院, 2014.
- [46] 胡晓峰. 气制动阀综合性能检测系统的研制[D]. 中国计量学院, 2012.
- [47] 刘浩. 基于外压压差法高压气密性检测系统研究[D]. 太原科技大学, 2014.
- [48] 洪孝鹏. 基于压力补偿的恒压式检漏仪及检测效率的研究[D]. 浙江工业大学, 2009.

- [49] 刘军. 产品气密性检测技术研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2014.
- [50] Firpo G, Pozzo A, Boragno C, et al. Easy method enhancing the sensitivity of a helium mass-spectrometer leak detector[C]// International Vacuum Conference Ivc-16 Icass-12 Nano-8 Aiv. 2004.
- [51] Usa D. MIL-STD-883J:2013 + C1:2013, C2:2014 & C3:2014[J].

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

朱捷, 男, 1982 年 11 月生。

2005 年 7 月毕业于上海应用技术学院 机械设计制造及其自动化专业 获学士学位。

2011 年 3 月入同济大学攻读硕士学位。

已发表论文:

[1] 朱捷. 演化博弈基础下的汽车零部件质量提升策略[J]. 科技展望, 2017, (14):299.

待发表论文:

研究报告:

[1] 朱捷. 涂油工装利用重力供油的供油系统[P]. 上海: CN204974365U, 2016-01-20.

[2] 朱捷. 集通气检测工艺与拧紧工艺为一体的工装夹具[P]. 上海: CN204976450U, 2016-01-20.