

超声波探伤装置设计

骆思仪

广州科技职业技术大学自动化工程学院, 广东 广州

收稿日期: 2025年2月12日; 录用日期: 2025年3月5日; 发布日期: 2025年3月13日

摘要

为了提高管类零件的探伤检测精度, 主要从超声波水浸法的原理、探头的选择、声耦合、扫查方式的选择来设计一台自动实现管类零件的超声波探伤装置, 其包含了上料系统、探伤系统、烘干系统, 通过一系列操作完成零件的探伤工作。该装置设计利用超声波对管道进行检测, 大大提高了检测的精确性和效率。本文将超声波无损检测技术应用于管道探伤的研究, 具有一定的实际应用价值。

关键词

超声波探伤, 管道, 水浸法, 无损检测

Design of Ultrasonic Flaw Detection Device

Siyi Luo

School of Automation Engineering, Guangzhou Vocational and Technical University, Guangzhou Guangdong

Received: Feb. 12th, 2025; accepted: Mar. 5th, 2025; published: Mar. 13th, 2025

Abstract

In order to improve the detection accuracy of pipe parts, an ultrasonic flaw detection device for pipe parts is designed mainly from the principle of ultrasonic water immersion method, the selection of probe, acoustic coupling and scanning mode. It includes feeding system, flaw detection system and drying system, and completes the flaw detection of parts through a series of operations. The device is designed to use ultrasonic waves to detect pipelines, which greatly improves the accuracy and efficiency of detection. In this paper, ultrasonic nondestructive testing technology is applied to the research of pipeline flaw detection, which has certain practical application value.

Keywords

Ultrasonic Flaw Detection, Pipeline, Water Immersion Method, Nondestructive Testing

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着工业化与城市化的快速发展，促进了管道的广泛应用。但由于管道设计与施工缺陷及材料缺陷与腐蚀，易引发严重事故[1]。传统的管道检测方法人力成本高且效率低，同时存在检测范围受限与精度不同的弊端，为了保证管道的安全性能，我们需要采取新的检测方法——超声波无损探伤，这种方法不仅效率高、精度高，而且还能有效地节约成本[2] [3]。该装置设计攻克的问题主要包括上料系统、探伤系统、烘干系统这三个方面。由于管道直径较小，曲率较大，故采用水浸法。超声波探伤作为一种无损检测的方法，其频率大于 20 KHz 赫兹，能够穿透材料内部，检测出其内部的缺陷和异常，为质量控制提供了有力的支持[4]。

本文的探伤装置能够及时发现管道内部的缺陷并对其进行处理，从而消除管道在使用过程中的安全隐患，因此本文的设计研究具有十分重要的现实意义。

2. 超声波探伤的基本原理

2.1. 水浸法超声波探伤的原理

该原理基于超声波在介质中的传播特性。超声波是一种高频率的声波，具有束射性，能在一定介质中保持速度不变地传播。当超声波在不同介质的界面传递时，若遇到缺陷如裂纹、孔洞等，部分超声波能量会被反射回来，这就是超声波的反射特性。这些反射回来的超声波信号携带着被检测物体内部的信息，如缺陷的位置、大小、形状等。通过接收并分析这些信号，就可以实现对物体内部缺陷的识别。由于扩散衰减特性，在管类零件的超声波探测中，特别是当管道外表面有涂层或包覆层时，如果涂层或包覆层的声阻抗与管壁声阻抗相近，大部分能量将透射到周围介质中，导致超声导波在管道中的有效检测距离大大缩短[5]。这些特性使得超声波成为无损检测领域的一种重要手段。水浸法超声波探伤不会对被检测工件造成二次损伤，适用于管类零件的无损检测[6] [7]。

2.2. 探测条件的确定

为了改善声速指向性，能够有效的防止其他波形干扰，我们一般采用聚焦探头，发出的超声波可以汇聚于焦点，声能集中，它在检测时能够提供更清晰的缺陷图像，有助于准确判断缺陷的性质和位置[8]。同时，选择水作为耦合介质，利用超声波探伤设备发射与接收超声波、对信号进行处理与显示等步骤，可以实现对被检测工件内部缺陷或异物的准确检测。

3. 超声波探伤装置总体设计

3.1. 超声波探伤装置工作流程

该装置针对管类零件实现自动化探伤，需要对该超声波装置进行上料系统、烘干系统、卸料系统、驱动系统和控制系统设计等[9]。其工艺流程如图 1 所示。

将管类零件放入料仓，通过液压缸将其输送到指定位置，通过托手座伸缩缸把零件取下放到水箱里，进而滚轮带动零件做回转运动，探针通过滚动导轨实现直线运动，从而完成对零件的探伤。最后通过卸料架把工件送到烘干室对工件进行烘干。



Figure 1. Process flow chart
图 1. 工艺流程图

3.2. 设计要求及参数

本次设计中选用槽式料仓供料机构，其具有较大的给料能力，振幅稳定，保证了供料的连续性和稳定性。同时，它耗电小，功率因数高，降低了运行成本[10]。

(1) 在液压缸的设计中，根据工作环境以及负载特性来选择液压缸的类型[11] [12]。对于 3 m 长，直径为 100 mm 的管道，其重量为 $G = \rho v g = 7.85 \text{ g/cm}^3 \times [\pi \times (50^2 - 40^2) \times 3000 \text{ mm}^3 \times 10 \text{ N/kg}] = 665.5 \text{ N}$ 液压缸工作时最大外负载力 $F_n = 665.5 \text{ N} \times n + G_{\text{上料}}$ ， n 为管道的根数，取 $n = 3$ ，则 $G_{\text{上料}} = 7.85 \text{ g/cm}^3 \times 3 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 10 \text{ N/kg} = 1776.25 \text{ N}$ ，故 $F_n = 3772.8 \text{ N}$ 查表 1，故液压缸的工作压力取 $P = 0.9 \text{ MPa}$ 。

Table 1. Selection of working pressure of hydraulic cylinder
表 1. 液压缸工作压力的选取

负载 F/KN	<5	5~10	10~20	20~30
工作压力 P/MPa	<0.8~1.0	<1.5~2.0	<2.5~3.0	<3.0~4.0

a) 对于液压缸直径的计算，有

$$A = \frac{F_n}{P} = \frac{3772.8}{0.9 \times 10^6} = 41 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (1)$$

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 7.3 \times 10^{-2} \text{ m} \quad (2)$$

取标准值： $D = 80 \text{ mm}$

根据前面所述，本系统对液压缸无具体速度要求，综合考虑，初选 $d = 0.55D$ 。故 $d = 44 \text{ mm}$ 。

取标准值： $d = 45 \text{ mm}$

液压缸的缸筒长度 L 由最大工作行程长度决定，缸筒的长度一般最好不超过内径的 20 倍。取 $L = 300 \text{ mm}$ 。

最小导向长度

$$H \geq \frac{L}{20} + \frac{D}{2} = 55 \text{ mm} \quad (3)$$

活塞的宽度，一般取 $B = (0.6 \sim 1.0)D$ ，导向套滑动面的长度 A ，因 $D < 80 \text{ mm}$ ，取 $A = (0.6 \sim 1.0)D$ 。故 $A = 48 \text{ mm}$ ， $B = 48 \text{ mm}$ 。

隔套的长度 C 由需要的最小导向长度 H 决定，即：

$$C = H - \frac{1}{2}(A + B) \quad (4)$$

故得 $C = 7 \text{ mm}$ 。

b) 活塞杆直径强度校核

活塞杆直径应满足

$$d \geq \sqrt{\frac{4Fn_s}{\pi\sigma_s}} \quad (5)$$

带入数值计算 $d = 45 \text{ mm} > \sqrt{\frac{4Fn_s}{\pi\sigma_s}} = 20 \text{ mm}$ ，所以 $d = 45 \text{ mm}$ 满足强度要求。

c) 活塞杆稳定性验算

根据本设计结构，由于活塞杆总行程为 300 mm ，而活塞杆直径为 45 mm ，
 $L = 300 \text{ mm} < 10d = 450 \text{ mm}$ 。

所以，无须进行弯曲稳定性验算。即 $D = 25 \text{ mm}$ ， $d = 12 \text{ mm}$ 满足设计要求。

上述为竖直液压缸主要尺寸设计，即同理可得水平液压缸主要尺寸， $D = 32 \text{ mm}$ ， $d = 18 \text{ mm}$ 满足设计要求。但由于活塞杆总行程为 800 mm ，而活塞杆直径为 18 mm ， $L = 800 \text{ mm} > 10d = 180 \text{ mm}$ ，需进行弯曲稳定性验算。

$$F_k = \frac{fA}{1 + \frac{\alpha}{\Psi_2} \left(\frac{L}{\gamma_k} \right)^2} = 91064 \text{ N}$$

其中， F_k 代表临界载荷，末端系数 Ψ_2 取 2，活塞杆材料所采用的是普通碳钢，故 $f = 4.9 \times 10^8 \text{ Pa}$ ，

$$\alpha = \frac{1}{5000} \text{, 柔性系数 } \Psi_1 = 85 \text{, } \gamma_k = \sqrt{\frac{J}{A}} = \frac{d}{4} = 6.25$$

当安全系数 n_k 取 4 时，

$$\frac{F_k}{n_k} = \frac{91064}{4} = 22766 \text{ N} > 800 \text{ N}$$

经验算，符合弯曲稳定性条件，故水平液压缸 $D = 32 \text{ mm}$ ， $d = 18 \text{ mm}$ 满足设计要求。

(2) 滚动光轴的设计

a) 键型号选择

联接滚轮轮毂的轴径为 50 mm ，查《机械设计手册》可知，其截面尺寸为： $L = 90 \text{ mm}$ ， $b = 14 \text{ mm}$ ，
 $h = 9 \text{ mm}$ [13]。

b) 键联接强度校核

$$\sigma_p = \frac{2T \times 10^3}{kld} = \frac{2 \times 480 \times 10^3}{5 \times 76 \times 50} = 50.5 < [\sigma_p]$$

键的标记为：键 A14 × 9

c) 轴的校核[14]

由图 2 可知，最大弯矩 $M_{\max} = 480 \text{ N} \cdot \text{m}$

$$\sigma_1 = \frac{M}{W} = \frac{480 \text{ N} \cdot \text{m}}{\pi / 32 (50 \times 10^{-3} \text{ m})^3} = 40 \text{ MPa} < [\sigma] = 110 \text{ MPa}$$

故总结得出，该轴满足强度要求。

(3) 探伤系统设计中采用 Y 系列三相异步电动机。总效率 $\eta = 0.99 \times 0.94 = 0.93$ ，则电动机的功率 $P_m = T_n / 9550 \eta = 1.78 \text{ kW}$ ，所用的电动机参数如下(表 2)。

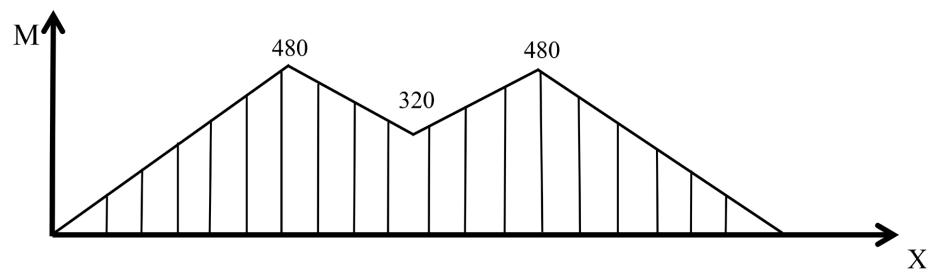


Figure 2. Composite bending moment diagram
图 2. 合成弯矩图

Table 2. Motor parameters
表 2. 电机参数

电机型号	额定功率 KW	同步转速 r/min	满载转速 r/min	轴径 mm
Y100L1-4	2.2	410	1420	20

探伤的零件绕轴线做回转运动，探头做水平运动，对工件进行探伤。探伤装置的控制系统是技术的核心部分，它负责控制整个探伤过程，设计如图 3 所示。

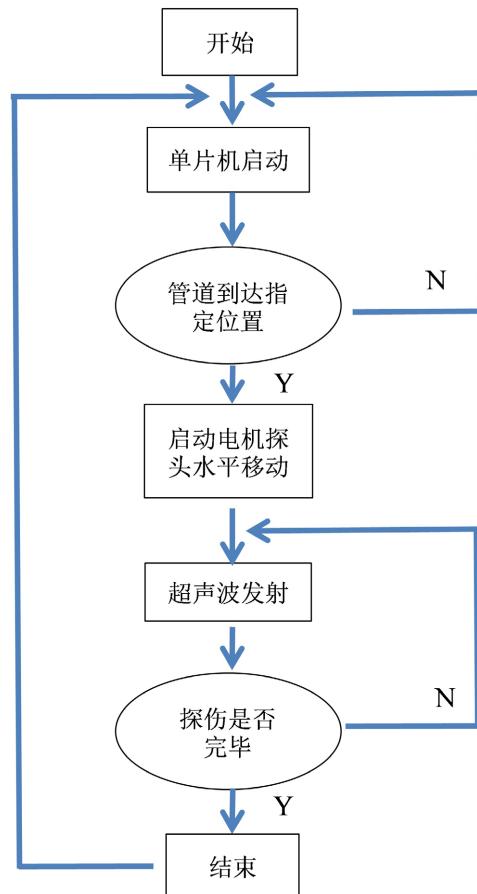


Figure 3. System control block diagram
图 3. 系统控制框图

该控制系统设计以 AT89S51 单片机为核心, 控制电动机通过丝杆驱动探头水平移动。P1.0 管脚产生 20 ms 方波信号触发发射电路, 产生负 300 V 窄脉冲激励探头发出 1 MHz 超声波[15]。超声波在管道内传播, 遇缺陷和气阀界面发射回波, 探头接受回波信号并转换为电信号, 用于判断管道缺陷[5]。

最后将工件送至烘干室烘干, 加热元件一般选用热效率较高的陶瓷红外线辐射电热板, 利用红外线进行辐射性加热, 红外线加热具有穿透力强、加热均匀、热效率高等特点, 能够快速有效地去除零件表面水分[16]。

4. 结论

(1) 本文设计了一种适用于管类零件的超声波探伤装置, 通过优化装置结构和提高检测精度, 实现了对管类零件的高效、准确检测。

(2) 我们充分考虑了超声波探伤技术的特点和要求, 对探头的选择、试块的选择、仪器的调节以及耦合剂的配置等关键环节进行了详细的研究和优化。通过选择合适的探头 K 值(角度)、频率和晶片大小, 以及标准试块和对比试块的结合使用, 确保了检测结果的准确性和可靠性。

(3) 通过实验显示, 该装置具有较高的检测精度和效率, 能够准确识别管类零件中的缺陷位置、大小和性质。

(4) 超声波探伤装置正逐步向智能化和自动化方向发展, 自动化检测流程减少了人工干预, 提高了检测速度和准确性, 同时降低了操作难度和成本, 通过集成传感器网络和数据分析算法, 实现了更高效的缺陷检测和数据分析。

参考文献

- [1] 魏茂安. 油气管道 MFL 检测信号处理与管道 s 缺陷评估技术研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2004.
- [2] 史亦伟. 超声检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 苏堂发, 黄神富, 冯远祯, 杨景锋. 一种超声波探伤装置[P]. 中国, CN222166945U. 2024-12-13.
- [4] 王伟军. 超声波探伤技术的发展及在机械设备状态监测故障诊断中的应用[J]. 中国设备工程, 2023(14): 186-188.
- [5] 王光庆, 徐文潭, 杨斌强. 能量回馈型超声波电动机振动能量采集系统分析[J]. 机械工程学报, 2017, 53(17): 122-130.
- [6] 陈积乐, 陆进亮, 刘熙, 梁素华, 冯舒婷, 关楚. 相控阵超声检测水浸法与接触法的对比分析[J]. 物理测试, 2024, 42(6): 6-9.
- [7] 王仲生. 无损检断现场实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 22-33.
- [8] 吴施伟, 吴海腾, 金浩然, 杨克己, 武二永. 聚焦探头水浸检测下的频域合成孔径聚焦技术[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(1): 110-115.
- [9] 石锋, 谢建平, 梁桠东. 超声波探伤检测的影响因素分析及监督与控制[J]. 科学技术与工程, 2012(25): 6448-6453.
- [10] 高秀兰. 槽形料仓式供料机构料仓滑道的设计[J]. 轻工机械, 2001(3): 24-26.
- [11] 于贵文, 臧克江, 林晶. 双作用多级液压缸的设计[J]. 中国工程机械学报, 2007(4): 430-433.
- [12] 张利平. 液压与气动技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [13] 陆玉, 何在洲, 佟延伟. 机械设计课程设计[M]. 第三版. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [14] 任建华, 王俊丽, 崔彭磊, 李飞, 付宇明. 超声波 NDT 在结构力学参量在线监测中的应用[J]. 塑性工程学报, 2013(4): 124-127.
- [15] 詹湘琳, 石志超. 超声波探伤发射电路的分析设计[J]. 仪表技术与传感器, 2017(1): 143-146.
- [16] 杨达伟, 姚瑶, 江霖. 热界面用导热绝缘陶瓷填料的研究进展[J]. 陶瓷学报, 2024, 45(1): 58-71.