

# 船舶卫星接收系统减振控制设计

刘宇婷, 孟令启

广州科技职业技术大学智能工程与未来学院, 广东 广州

收稿日期: 2025年11月12日; 录用日期: 2025年12月25日; 发布日期: 2025年12月31日

## 摘要

本文完成了船舶卫星接收系统减振控制的设计, 通过振动分析建立系统动力学模型, 选用UM2082F08单片机作为主控制器, 搭配AD9251模数转换芯片、SS6809A电机驱动芯片及YA19T加速度传感器, 构建闭环减振控制系统。系统通过实时检测振动频率与幅值, 动态调节减振器内硅胶液体体积以改变固有频率, 规避共振风险。实验结果表明, 该控制设备可实现全自动化运行, 频率响应时间为0.01 s, 共振回避率为100%, 振动幅值控制在0~2.5 cm内, 有效延长设备使用寿命, 降低维护成本30%以上。

## 关键词

振动分析, 传感器选取, 单片机控制, 仿真模拟

# Design of Vibration Control for Ship Satellite Receiving System

Yuting Liu, Lingqi Meng

School of Intelligent Engineering and the Future, Guangzhou Vocational University of Science and Technology, Guangzhou Guangdong

Received: November 12, 2025; accepted: December 25, 2025; published: December 31, 2025

## Abstract

This paper completes the design of vibration reduction control for the ship satellite receiving system. A dynamic model of the system is established through vibration analysis, with the UM2082F08 single-chip microcomputer as the main controller, combined with the AD9251 analog-to-digital conversion chip, S56809A motor driver chip and YA19T acceleration sensor to construct a closed-loop vibration reduction control system. The system dynamically adjusts the volume of silicone fluid in the shock absorber to change the natural frequency by real-time detection of vibration frequency and amplitude, thereby avoiding resonance risks. Experimental results show that the control equipment can realize

fully automatic operation, with a frequency response time of 0.01 s and a resonance avoidance rate of 100%. The vibration amplitude is controlled within the range of 0~2.5 cm, which effectively extends the service life of the equipment and reduces maintenance costs by more than 30%.

## Keywords

Vibration Analysis, Sensor Selection, MCU Control, Simulation

Copyright © 2026 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

航海安全直接关系到人员生命安全, 船舶卫星接收系统作为航行安全的关键保障设备, 其稳定性与使用寿命至关重要。近年来, 随着航运业的快速发展, 市场对该类设备的需求持续增长, 但我国相关设备的研发水平相对滞后, 存在使用寿命较短的问题——国内设备平均使用寿命仅 3~5 年, 较国外先进设备缩短 2~3 年, 造成了严重的资源浪费与经济损失。国外同类先进设备虽能有效降低振动幅度、延长使用寿命, 但价格昂贵(约为国内设备的 2~3 倍), 难以广泛普及。

为此, 本文提出一种改进型船舶卫星接收系统减振控制设计, 在原有减振器的基础上增设液压系统与自动控制模块, 通过实时检测系统振动频率, 动态调整减振器内液体体积以改变其固有频率, 从而有效规避共振现象, 最终实现设备使用寿命的显著提升与维护成本的降低。

## 2. 船舶卫星接收系统的总体结构方案设计

该卫星船舶接收系统的总体结构包括接收锅、减振器以及底部支撑部分, 总体结构如图 1 所示。

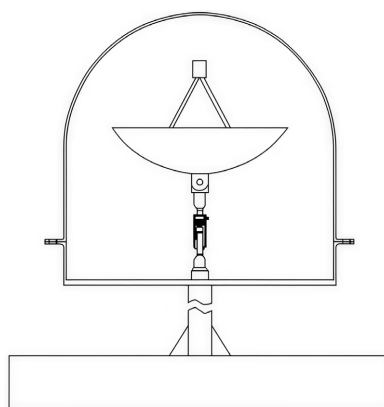


Figure 1. Schematic diagram of the design scheme

图 1. 设计方案简图

### 2.1. 基本原理

为了减少船舶卫星接收系统的振动幅度, 并增加其使用寿命, 克服卫星持续的大幅振动, 就需要有一种有效的减振装置, 这种减振装置能有效避免共振的产生以达到衰减振动的目的, 且卫星的振动越激烈, 阻力也越大[1]。另一方面, 通过控制减振器内液体的弹性系数, 使卫星的振动始终在一定的频率范围内。

## 2.2. 设计内容

以下是对该系统的研究内容,也就是输入、输出、系统三者之间的关系,如图2所示。

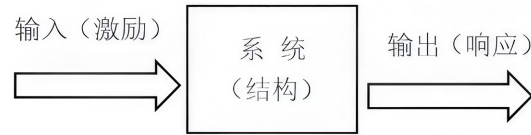


Figure 2. System control block diagram  
图2. 系统控制框图

该系统的输入已知,输出可以通过测振传感器检测出来,需要控制系统参数,来控制该系统的振动频率。

$$\omega = \sqrt{k/m} \quad (1)$$

由该公式可知,要控制其振动频率可通过控制该系统的弹性系数与质量,本设计通过改变减震器内油膏状的液压油的体积来改变其弹性系数[2]。

## 2.3. 振动分析

对于该系统而言,对其进行设计的目的就是避免共振的产生,以减少系统的疲劳破坏[3]。为了方便对系统进行研究,将系统简化并得到数学模型,如图3(a)所示,对该模型进行振动分析得到有关频率的表达式。

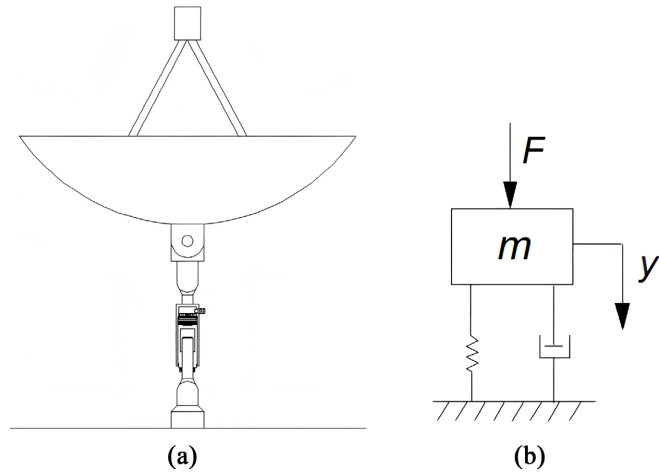


Figure 3. Satellite system model diagram before and after simplification  
图3. 简化前后的卫星系统模型图

对于简化后的模型图进行振动分析,如图3(b)所示,已知在外加激励的作用下对其振动频率进行分析,并通过控制油膏状的液压油的弹性系数来控制其振动频率。

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = F \cos \omega t \quad (2)$$

这个非齐次性常微分方程的解的组成如下,即

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) \quad (3)$$

其中:  $y_1(t)$  是通解;  $y_2(t)$  是其特解。故

$$y_1(t) = A \sin \omega_n t = B \cos \omega_n t \quad (4)$$

$$y_2(t) = Y \cos \omega_n t \quad (5)$$

式中:  $\omega_n$  为系统的无阻尼固有频率,  $\omega_n = \sqrt{k/m}$ 。

将(3)代入(2), 有

$$(-m\omega^2 + k)Y \cos \omega t - cmY \sin \omega t = F \cos \omega t \quad (6)$$

化简得:

$$Y = F \cos \omega t / (-m\omega^2 \cos \omega t + k \cos \omega t - cm \sin \omega t) \quad (7)$$

于是, 式(3)的完全解为:

$$y(t) = A \sin \omega_n t + B \cos \omega_n t + \frac{F \cos^2 \omega t}{-m\omega^2 \cos \omega t + k \cos \omega t - cm \sin \omega t} \quad (8)$$

对(8)求导, 有

$$\begin{aligned} \dot{y}(t) = & A\omega_n \cos \omega_n t - B\omega_n \sin \omega_n t \\ & + \frac{2F \cos \omega t (-\omega \sin \omega t) (-m\omega^2 \cos \omega t + k \cos \omega t - cm \sin \omega t)}{(-m\omega^2 \cos \omega t + k \cos \omega t - cm \sin \omega t)^2} \\ & - \frac{(m\omega^3 \sin \omega t - k\omega \sin \omega t - cm\omega \cos \omega t) F \cos^2 \omega t}{(-m\omega^2 \cos \omega t + k \cos \omega t - cm \sin \omega t)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

设  $t=0$  时,  $y(t)=y(0)$ , 代入式(4)与式(5), 联立解得:

$$A = \frac{y(0)}{\omega_n} \quad B = y(0) + \frac{F}{m\omega^2 - k}$$

代入式(8), 整理得:

$$y(t) = \frac{\dot{y}(0)}{\omega_n} \sin \omega_n t + y(0) \cos \omega_n t + \frac{F}{m\omega^2 - k} + \frac{F \cos^2 \omega t}{-m\omega^2 \cos \omega t + k \cos \omega t - cm \sin \omega t} \quad (10)$$

由(10)可知, 当  $\omega^2 = k/m$ ,  $y(t) \rightarrow \infty$ , 此时系统有共振效应[4]。

因此, 当  $m$  为可调节的某一数值范围,  $k$  有更大的变化。

当  $\omega = \omega_n$  时, 系统共振。

因此, 当外激励的频率值接近或等于此固有频率值, 就应改变  $\omega_n$  的值。

## 2.4. 硅胶液体

该课题的主要设计参数为控制刚度范围为 0.1~100 N/m; 激振频率为 0~100 Hz; 卫星接收系统总质量为 20~80 kg; 振动幅值为 0~5 cm。本课题设计的减振装置就是通过液体进入减振装置的量, 从而控制减振器振动的频率。又  $\omega = \sqrt{k/m}$ , 该液体的要求, 当体积变化时其弹性系数有更大的变化, 从而改变  $\omega$  的值。根据本文的设计, 当硅胶液体加入减振器内, 由于加入的量不同, 就会有不同的固有频率值, 这个值最终需要在实验中加以测定。取原始减振器固有频率值为 17, 进入减振器内液体 1 kg, 对应固有频率值为 8; 进入液体为 2.5 kg, 对应固有频率值为 2。

总之, 刚度  $K$ 、质量  $M$  和频率  $\omega$  存在以上某种关系, 这样也能够在减震缸的加液过程中, 改变位移, 也就是改变了刚度  $K$ , 进而改变频率  $\omega$ , 当外激励频率接近于主频时, 能通过调位移而控制共振的产生[5]。

3. 单片机控制设计

3.1. 控制系统的总体方案设计

方案一采用单片机作为液压弹簧减振器控制系统的核心控制器，如图 4 所示：基于系统对控制灵活性、编程适配性的需求，结合成本控制目标，单片机凭借价格低廉、体积小巧、功耗低及开发难度低的优势成为优选。该控制系统由五个子系统构成，工作流程如下：加速度传感器采集实时时域振动信号，传输至 INSDG 智能振动变送器，经 FFT 变换转换为数字信号后，通过 MODBUS 通信协议上传至单片机；单片机根据信号指令控制伺服电机与继电器动作；同时，流量计检测减振器内液体流量信息，经 ADC 模数转换为数字信号反馈至单片机，形成闭环反馈控制，最终实现精准减振。

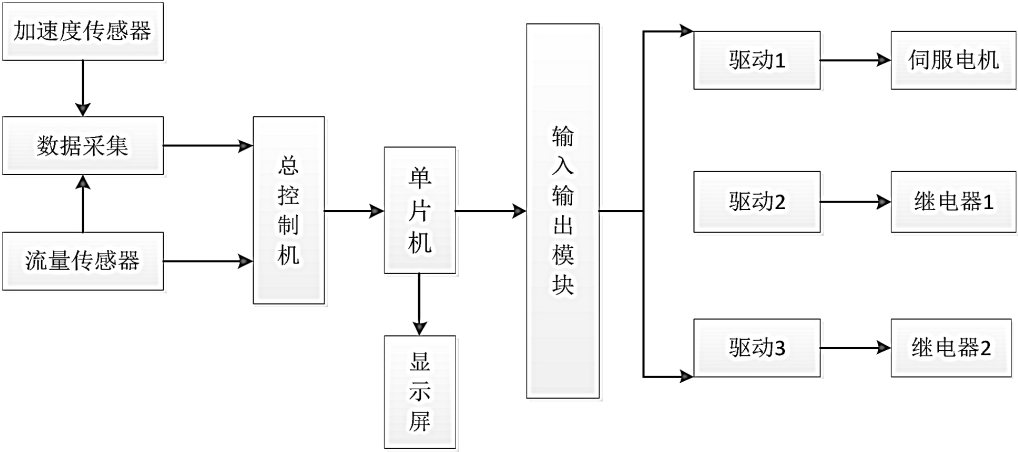


Figure 4. Overall control structure diagram of hydraulic spring vibration damper (Scheme 1)  
图 4. 方案一液压弹簧减振器控制总结构图

方案二设计的液压弹簧减振器控制系统采用的控制器为 PLC，如图 5 所示，PLC 可靠性高，但编程难度高，占用空间大，处理任务单一，成本较高。整个控制系统用一系列传感器来检测减振器频率、幅值、流量参数，将所检测到的参数信息传递给 PLC 控制器，再由其控制液压系统中的继电器和电机，完成对于各个参数的控制。

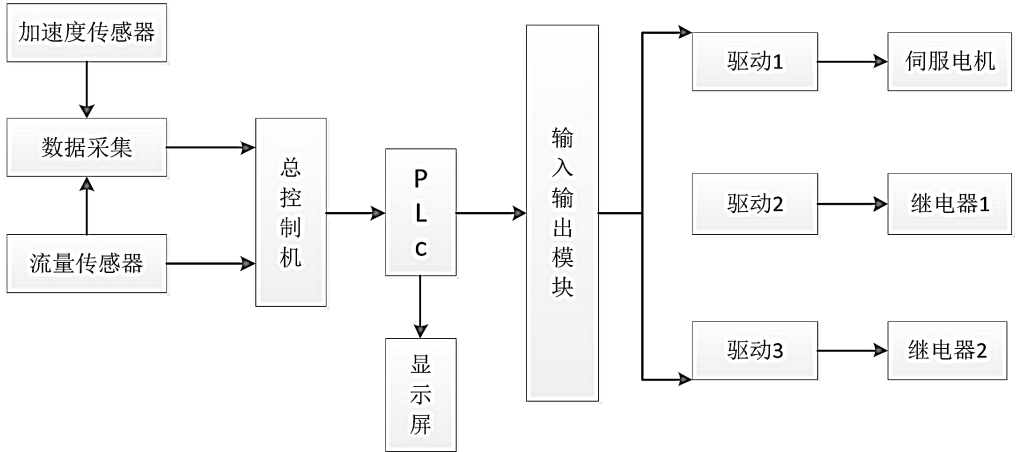


Figure 5. Overall control structure diagram of hydraulic spring vibration damper (Scheme 2)  
图 5. 方案二液压弹簧减振器控制总结构图

本文最终采取方案一为设计方案。方案二中采用的 PLC 作为控制器虽然也能起到和方案一相同的效果, 虽然方案二中采用 PLC 作为控制器可靠性高, 但是编程难度高, 成本较高。对于本文来说, 需要控制以及编程更加灵活, 又考虑到价格因素, 显然方案一更优[6]。

### 3.2. 整体液压弹簧减振器工作过程

本论文要设计的就是在原有减振器的基础上进行改进, 增加液压系统以及控制部分, 这就可以实时检测其振动频率的值, 并通过减振器内液体的增减来改变其内部固有频率, 以达到避免共振的产生, 从而增加其使用寿命[7]。根据本课题的设计目的, 改变减震器的振动频率, 故只需改变液压缸内液体的弹性系数, 而弹性系数的大小与其体积有关, 体积越大弹性系数越小, 体积越小弹性系数越大, 根据频率与弹性系数的关系, 从而控制振动频率的大小[8]。

控制部分主要由三部分组成:

- 1) 根据测振传感器测得的输入激励的信号频率和振动幅值是否在合理范围内以控制电机的启动。
- 2) 当  $\omega = \omega_n$  时, 发生共振并且振动幅度突然变大, 此时电机和电磁换向阀通电, 通过控制液压系统给减振器内加液, 以降低固有频率和减小振动幅度。当加入的液体使固有频率值远离减振器振动频率值时, 停止加液。当再次相等后就再次加液。
- 3) 当减振器内液体加满后, 若减振器振动频率与减振器固有频率再次相等后, 此时启动电机带动液压泵以及启动另一个继电器, 给减振器内减液, 以达到二者频率再次远离, 此时减振器又回到原始固有频率值, 并以此为循环[9]。

具体控制指令如表 1 所示。

单片机初始化时, 显示屏上自动显示  $W = 0$ ,  $\omega_n = 17$ ,  $A = 0$ ,  $M = 0$ 。其次传感器测量读取各部分的值, 并实时显示在显示屏上。当采集外部信号  $W = 17$ 、 $A = 5$  时, 电机启动, 继电器 1 通电, 当检测到传感器测量流入的液体为 1 kg, 此时液体质量  $M = 1$  kg, 并且检测到  $A$  的值为 0~1, 显示屏上  $\omega_n$  改变为显示 8, 此后继电器 1 断电; 当采集外部信号  $W = 8$ 、 $A = 5$  时, 电机启动, 继电器 1 通电, 由流量传感器测量流入的液体为 2.5 kg, 此时液体质量  $M = 2.5$  kg, 并且检测到  $A$  的值为 0~2.5, 显示屏上  $\omega_n$  改变为显示 2, 此后继电器 1 断电; 当采集外部信号  $W = 2$ 、 $A = 5$  时, 电机启动, 继电器 2 通电, 由流量传感器测量流出的液体为 2.5 kg, 并且检测到  $A$  的值为 0~1, 显示屏上  $\omega_n$  改变为显示 17, 此后继电器 2 断电; 以此为循环。

**Table 1.** Control logic specification

**表 1.** 控制逻辑明细表

| 当 $\omega$ | 当 $M$ | 当 $A$ | $\omega_n$ | 状态            |
|------------|-------|-------|------------|---------------|
| 0          |       | 0~1   | 17         | 继电器断电 电机关闭    |
| 17         |       | 5     |            | 继电器 1 通电 电机启动 |
|            | 1     | 0~1   | 8          | 继电器 1 断电 电机关闭 |
| 8          |       | 5     |            | 继电器 1 通电 电机启动 |
|            | 2.5   | 0~2.5 | 2          | 继电器 1 断电 电机关闭 |
| 2          |       | 5     |            | 继电器 2 通电 电机启动 |
|            | 0     | 0~1   | 17         | 继电器 2 断电 电机关闭 |

### 3.3. 芯片类型的选择

UM2082F08 单片机完全可以实现由加速度传感器测量该船舶卫星接收系统的振动频率和振动幅值,



并传给单片机, 进而控制伺服电机与继电器的动作。再通过流量计检测到的流量信息, 反馈其内部固有频率的变化, 进而反馈控制伺服电机与继电器动作, 以此来完成对目标减振的作用。

选择 AD9251 作为 A/D 采样芯片[10]。AD9251 是 14 位模数转换器, 能够精准地将加速度传感器和流量计的模拟信号转换为数字信号, 为后续的控制提供准确的数据基础。可快速采集船舶卫星接收系统的振动频率和幅值等信号, 及时反映系统的振动状态, 满足减震控制系统对实时性的要求。方便在船舶卫星接收减震控制系统中进行调试和维护, 能够适应船舶在不同环境下的工作要求, 保证在各种恶劣条件下都能稳定地进行采样工作。

考虑到液压泵运转需要较大的电机来带动, 于是选择采用 SS6809A 电动机驱动芯片。这是一款双通道 H 桥电机驱动芯片, 可独立控制两台直流电机或通过并联输出峰值电流 2 A 驱动单台大功率电机, 同时支持两相步进电机的全步/半步驱动。

## 4. 传感器选型

### 4.1. 测振传感器的选择

传感器是检测外部信号并将外部信号传输给单片机的一种检测装置, 对于船舶卫星接收系统减振控制设计来说, 对于信号传输的需求是至关重要的, 也是控制中不可缺少的一环。本文就是采用 YA19T 加速度传感器来测量外部频率和幅值信号, 如图 6 所示。其中由加速度传感器测量实时时域信号并传给 INSDG 智能振动变送器, 内部经过 FFT 变换转化为数字信号, 再通过其通信协议 MODBUS 与单片机连接, 进而控制伺服电机与继电器的动作[11]。

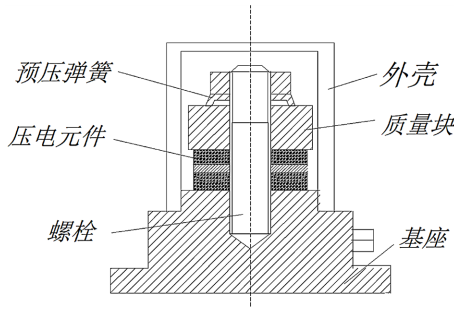


Figure 6. Structural diagram of piezoelectric accelerometer  
图 6. 压电式加速度传感器结构图

### 4.2. 流量传感器的选用

对于船舶卫星接收系统减振控制设计来说, 对于信号的传输的需求是至关重要的, 也是控制中不可缺少的一环。本设计需要通过流量计检测到的流量信息, 并通过 ADC 转换成数字信号传给单片机, 进而反馈控制伺服电机与继电器动作, 以此来完成对目标减振的作用。

在对减震器加减液体流程中, 在进出口处设置流量传感器, 用来监测进入减震器的流量数与减震器排出的流量数。根据流量计的反馈情况调节减震器固有频率[12], 如图 7 所示。

### 4.3. 继电器的选择

本文选择继电器的目的是控制液压系统中电磁换向阀的位置, 本设计要用到两个电磁继电器, 通过与单片机连接来接收控制信号[13]。对于本设计, 继电器与换向阀连接, 电机启动后通过继电器来改变换向阀的工作位置, 从而改变液压缸的工作方向, 进而控制液压油缸对于减振缸进出油的控制[14], 如表 2 所示。

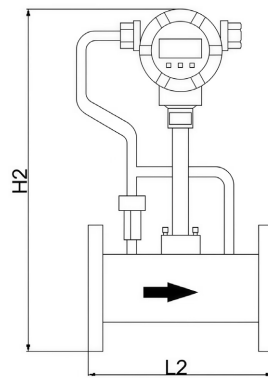


Figure 7. 2D schematic diagram of turbine flowmeter  
图 7. 涡轮流量计二维示意图

Table 2. Basic parameters of electromagnetic relays  
表 2. 电磁继电器基本参数

|      |              |
|------|--------------|
| 型号   | JZX-22F(D)系列 |
| 额定电流 | 5 A          |
| 常用电压 | DC24V/AC220V |
| 触头数量 | 8 脚          |
| 引出形式 | 插拔式          |
| 触点材料 | 银合金          |
| 辅助触点 | 二开二闭         |

## 5. 硬件电路设计

### 5.1. 主控器

本系统中需要对一个直流伺服电机和两个电磁继电器进行控制, 采用 UM2082F08 作为主控器。其主控制器与外围电路图如图 8 所示。

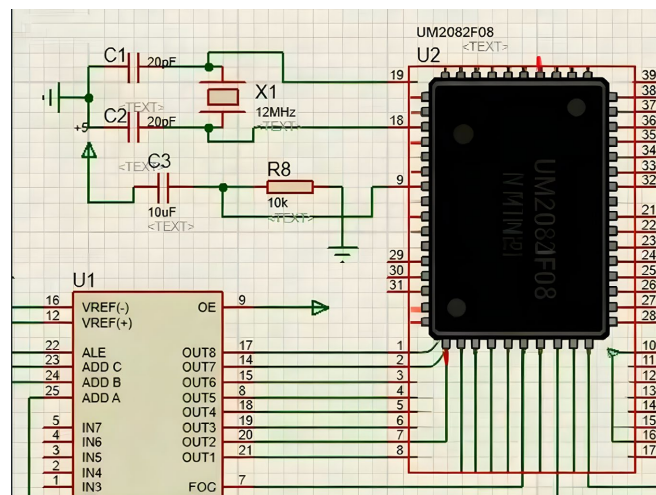


Figure 8. Peripheral circuit diagram of the controller  
图 8. 控制器外围电路图



### 5.2. 电动机驱动控制电路

在液压减振器系统控制中, 电机的控制是通过单片机接收反馈信号控制其通断, 其中频率与幅值控制其通电, 流量计控制其断电[15]。在模拟控制电路中, 其电路原理图如下图 9 所示, 与其连接的电阻起到限制电流从而起到保护电路的目的, 与单片机和电机连接的三极管起到驱动电路的目的, 当单片机输出一个低电平的时候, 电机就通电工作, 反之则断电。

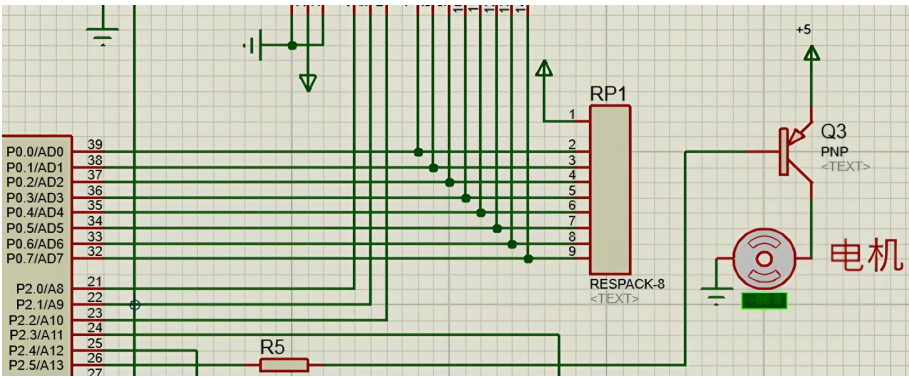


Figure 9. Motor drive control circuit diagram  
图 9. 电动机驱动控制电路图

### 5.3. 继电器电路设计

在液压减振器系统控制中, 需要用到继电器来改变换向阀阀门的位置, 继电器通电则表明阀门打开, 在继电器电路设计中, 在电路中用一个电阻来限制电流的大小以起到保护电路的目的, 并且继电器串联了一个小灯, 当继电器通电时用小灯的亮暗来表示。与其串联的三极管则作为开关使用, 其发射极接 5V 电压、集电极接地, 基极接单片机, 当基极接收到一个低电平的指令时, 继电器则通电[16]。在这个过程中, 频率与幅值控制其通电, 流量计控制其断电。继电器控制电路的原理图如图 10 所示。

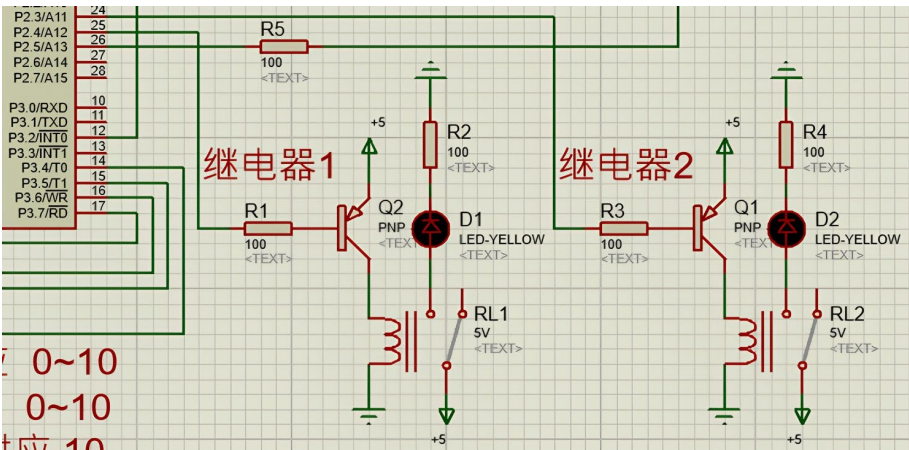


Figure 10. Relay control circuit diagram  
图 10. 继电器控制电路图

### 5.4. 液晶显示屏

在船舶卫星接收系统减振控制设计中, 为了在电路模拟中更清晰地显示出各个工作时期的数据, 采

用了图 11 所示的显示屏。

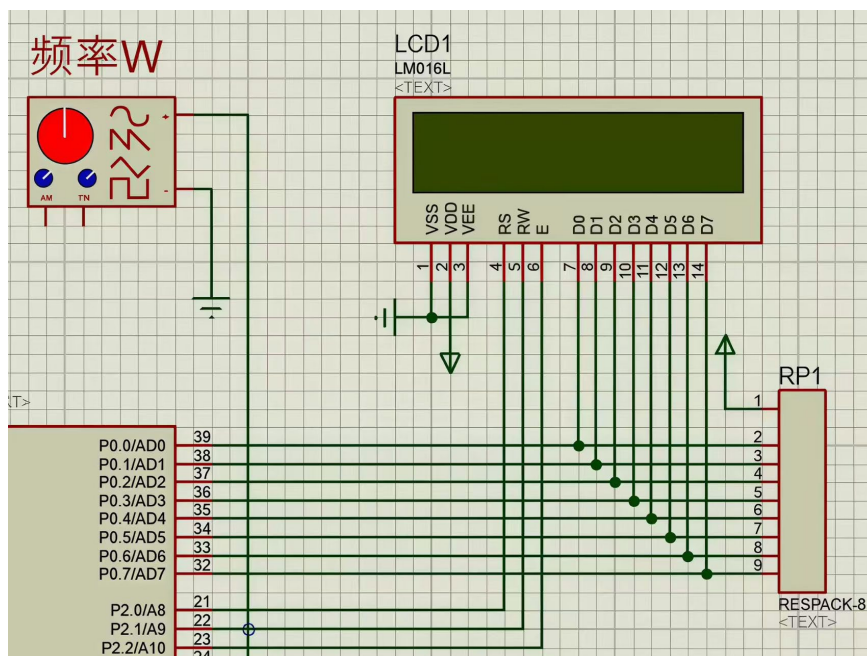


Figure 11. LCD control circuit diagram

图 11. 液晶显示屏控制电路图

## 6. 运行流程设计

卫星系统在工作时, 首先是在外激励的作用下, 接着是加速度传感器和流量传感器进行检测、录入液体流量、振动频率和振动幅值的信息, 将信息传递给单片机, 再由单片机处理信息, 接着相应地控制直流伺服电机运转, 通过控制硅油油量来改变其弹性系数, 进而控制其振动频率。具体如下:

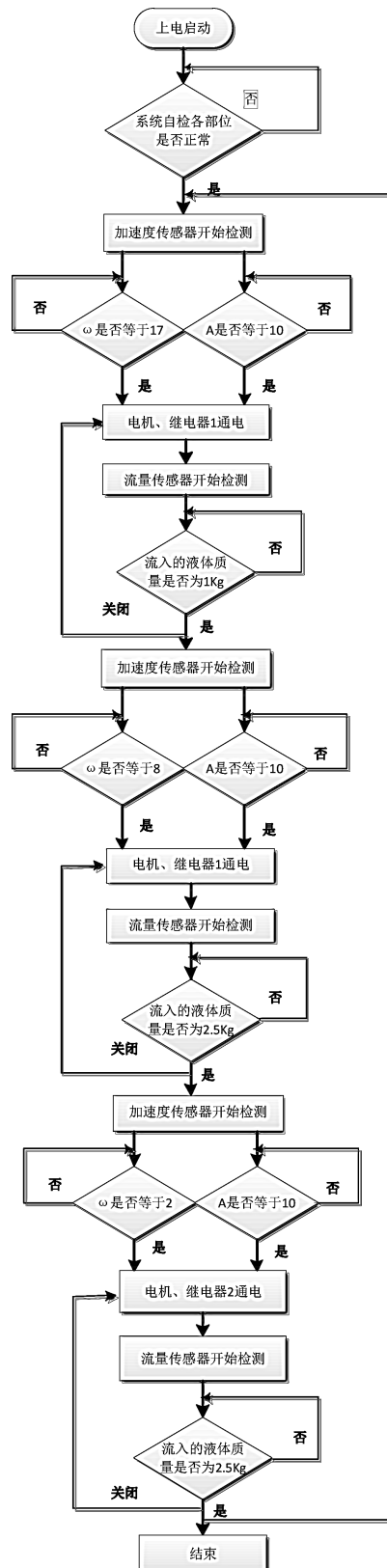
流程设计:

- 1) 启动开关, 卫星锅开始初始化;
- 2) 卫星锅开始振动;
- 3) 根据测振传感器测得的输入激励的信号频率是否等于或接近固有频率以控制电机的启动;
- 4) 当  $\omega = \omega_n = 17$  时, 此时共振, 振幅  $A = 5$ , 电磁换向阀 1 通电给减震缸加液, 流量传感器流出的液体达到设定值 1 kg 时, 此时  $\omega = 8$ , 电磁换向阀断电, 此时振幅下降到 0~1 范围内;
- 5) 当  $\omega = \omega_n = 8$  时, 此时共振, 振幅  $A = 5$ , 电磁换向阀 1 通电给减震缸加液, 流量传感器流出的液体达到设定值 2.5 kg 时, 此时  $\omega = 2$ , 电磁换向阀断电, 此时振幅  $A$  下降到 0~2.5 范围内;
- 6) 当  $\omega = \omega_n = 2$  时, 此时共振, 振幅  $A = 5$ , 电磁换向阀 2 通电给减震缸减液, 流量传感器流入的液体达到设定值 2.5 kg 时, 此时  $\omega = 17$ , 电磁换向阀断电, 此时  $A$  下降到 0~1 范围内; 以此为循环;
- 7) 程序结束。

整体循环图如图 12 所示。

## 整体电路图

以下是对本论文完成的整体仿真电路图, 本文通过电位器模拟流量  $M$  和振幅  $A$ , 通过频率计模拟频率, 如图 13 所示。



**Figure 12.** Overall process cycle diagram  
**图 12.** 整体流程循环图

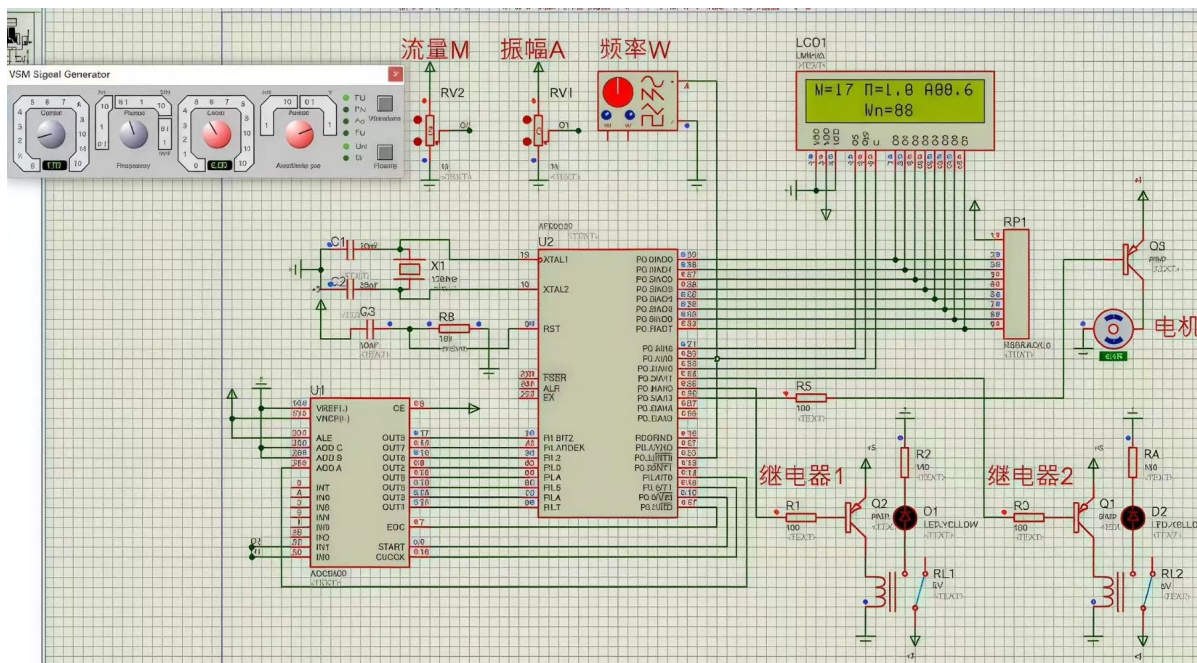


Figure 13. Schematic diagram of the overall circuit  
图 13. 整体电路示意图

## 7. 结语

本文完成的是船舶卫星接收系统减振控制的设计，就是在原有减振器的基础上进行改进，增加液压系统以及控制部分，这就可以实时检测其振动频率的值，并通过减振器内液体的增减来改变其内部固有频率，以达到避免共振的产生，从而增加其使用寿命。因此，得出以下结论：

- 1) 改变减振器的振动频率，故只需改变液压缸内液体的弹性系数，而弹性系数的大小与其体积有关，体积越大弹性系数越小，体积越小弹性系数越大，根据频率与弹性系数的关系，从而控制振动频率的大小。
- 2) 频率响应可在 0.01 s 内完成，因而回避共振的基振频率可达到 100%。
- 3) 从而提高该产品的使用价值，也创造巨大的经济效益。

根据本文的设计目的，结果表明，此控制设备可实现全自动化，并进一步提高该设备的使用寿命，取得更大的社会效益。

## 参考文献

- [1] 张伟, 李娜. 船舶卫星接收系统液压减振器动态特性优化设计[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(3): 46-52.
- [2] 王浩, 陈曦. 硅胶液体体积调控对船舶减振器固有频率的影响规律[J]. 上海交通大学学报, 2024, 58(7): 89-96.
- [3] 刘阳, 赵伟. YA19T 加速传感器在船舶卫星振动监测中的适配性改进[J]. 大连海事大学学报, 2024, 50(2): 78-85.
- [4] 陈明, 杨丽. 船舶卫星减振系统单片机与 PLC 控制方案对比研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(11): 67-73.
- [5] Zhao, Q. and Sun, M. (2025) A Multipath Error Cancellation Method Based on Antenna Jitter. *Communications Engineering (Nature)*, **12**, 45-52.
- [6] 李刚, 吴芳. 涡轮流量计在船舶液压减振系统中的精度校准方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 54-60.
- [7] 王丽, 张涛. 船舶卫星接收系统无阻尼固有频率计算模型修正[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2023, 53(8): 53-59.

- [8] 张强, 刘敏. FFT 信号处理在船舶卫星减振共振预判中的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2025, 57(2): 34-40.
- [9] Wu, T. and Chen, L. (2024) Lightweight Design of Ship-Borne Satellite Receiving Pot and Collaborative Optimization of Vibration Reduction Structure. *Journal of Ship Mechanics*, **28**, 890-898.
- [10] Zheng, Q. and Wu, M. (2024) Error Control of AD9251 Chip in A/D Conversion of Ship Vibration Signals. *Marine Technology*, **61**, 230-237.
- [11] Feng, L. and Han, M. (2025) Marine Environmental Adaptability Transformation of Piezoelectric Acceleration Sensor. *IEEE Sensors Journal*, **25**, 6789-6796.
- [12] 吴涛, 陈丽. 轻量化船舶卫星接收锅的减振结构与底部支撑协同设计[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(6): 112-118.
- [13] 黄勇, 徐静. 船舶减振系统的伺服电机-继电器联动反馈逻辑设计[J]. 控制工程, 2024, 31(7): 135-141.
- [14] 赵强, 孙敏. 多径误差下船舶卫星接收减振系统的抗干扰设计[J]. 国防科技大学学报, 2025, 47(4): 98-105.
- [15] 孙伟, 李静. 船舶液压减振系统中 SS6809A 驱动芯片的过载保护设计[J]. 海军工程大学学报, 2023, 35(8): 82-88.
- [16] Smith, J. and Johnson, L. (2023) Real-Time Vibration Control of Ship-Borne Satellite Systems Using Hydraulic Damping. *Journal of Marine Science and Technology*, **28**, 456-463.