

实验教学模式创新与探索

姜增如¹ 许泽昊²

(北京理工大学 自动化学院 北京 100081)

摘要: 理论验证实验是自动控制理论中常规实验,将原有验证性实验添加设计思想是学校一贯倡导的原则,本文以频域法校正和时域数字 PID 实验为例,研究从验证性到设计性实验的一种转变方法,将原来固定被控对象和确定控制参数的验证性实验转换为自行选定被控对象到设计控制参数的设计性实验。文中以一个二阶系统为案例,说明了使用 LabVIEW 软件及 MyDAQ 设计的模拟-数字混合超前校正实验完成的交互界面及参数显示。参加实验的学生可以针对不同控制指标及控制模型,能自行设计控制器并进行验证。这样不仅对学生实验设计起到了一定的帮助作用,更重要的是提高他们的创新意识。

关键词: 实验创新时域 PID 频域法校正 设计性实验

Innovation and exploration of experimental teaching mode

Jiang Zengru¹ Xu Zehao²

(School of automation, Beijing Institute of Technology)

Abstract: The theoretical verification experiment is a routine experiment in the theory of automatic control. The idea of adding the original verification experiment is the principle that the school has always advocated. In this paper, the frequency domain method and the time domain digital PID experiment are taken as examples to study the process transforming the verification into the design experiment, which transforms a modified experiment with the original fixed object and the determination of the control parameters into a design experiment including the design of a self-selected controlled object and the control parameters. In this paper, a second-order system is used as an example to illustrate the interaction interface and parameter display of the analog-digital hybrid calibration experiment using LabVIEW software and MyDAQ design. Students who participate in the experiment can design and control the controller for different control indicators and control models. This is not only the student experimental design played a certain role in helping, more importantly, to improve their sense of innovation.

Key Words: Experimental innovation Time domain PID, Frequency domain correction, Designing experiment,

一、概述

自动控制理论常规实验主要是理解课程原

理、以物理和仿真为主的操作,多数为验证课堂教学公式的基础实验。通过综合分析实验结果撰写出报告,这也是继承和接受前人知识、技能的一个过程。设计性实验需要学生们根据实验任务充分

第一作者:姜增如(出生年—1961),女,硕士,副教授

作者简介:姜增如,女,副教授,从事方向:控制科学与控制工程。教学工作:过程控制、自动控制理论实验等教学工作。

查阅相关资料,自行推证有关理论,确定实验方法、设计控制参数,最终根据实验步骤得到结果。其目的不仅是帮助他们理解课堂理论,更重要的是培养他们的创新意识和创新精神,提高理工科学生分析问题和解决实际问题的能力。本文以频率法校正和数字 PID 控制实验为例,说明时域法校正和频域法校正原理,自行设计控制参数并验证结果的方法。

时域分析与频域分析是自动控制理论中的主要分析手段,PID 控制属于典型的时域分析,它以时间轴为横坐标表示动态特性变化。时域的表示较为形象与直观,可快速观测系统的稳定性及稳态指标。频域法校正属于频域分析,它是针对不同频率正弦信号输入响应进行的,频域分析则更为简练,剖析问题更为深刻和方便,频率法分析不仅反映系统的稳态性能,而且可以用来研究系统的暂态性能,自动控制理论实验围绕着时域和频域两大域展开。

PID 控制实验是根据系统的误差,利用比例、积分和微分计算出控制量进行控制的。改变不同的 PID 参数可以达到改变系统的超调量稳态时间的目的,从而改变系统的动态特性。频域法超前校正利用超前校正网络的相位超前特性来增大系统的相位裕量使得系统相位裕度增大,以达到改变系统的开环频率特性目的。串联滞后校正利用滞后校正网络其高频幅值衰减的特性,以降低系统的开环截止频率,通过加入滞后校正环节,使系统的开环增益有较大幅度增加,从而获得足够的相角裕度。即超前-滞后校正利用校正装置的超前部分来增大系统的相位裕度,以改善其动态性能;利用滞后部分来改善系统的静态性能,两者相辅相成,在自动控制理论频域法校正实验法中,原理方法是在测量被控对象开环对数幅频特性基础上,根据给定的相位裕度或截止频率进行设计。^[1]

实验设计由原来的固定对象和固定参数验证实验,到自行设计被控对象,动态计算控制参数,体现了实验创新特点。频域校正实验根据得到的 Bode 图计算相位裕度、截止频率。再由给定的相位裕度或截止频率指标自动计算校正参数,完成控制器参数设计。最后再匹配电路参数加入到被控对象中,画出系统校正后的时域响应和 Bode 图,分析校正前后系统动态和静态特性参数。实验

中,可从根据目标相位裕度确定校正网络参数,设计校正环节。时域中的 PID 控制,要求学生根据工程整定法设计控制参数,在实验中得到阶跃响应曲线,计算超调量和稳态时间。

二、实验方法设计

1. 频域校正实验原理

频域法校正实验是研究对于被控对象,在给定相位裕度情况下,设计一个能够满足预定的静态与动态性能指标要求的控制器。频率特性是对正弦输入信号的稳态响应,其物理意义是研究频率响应与正弦输入信号之间的关系,对于稳定系统,设:

输入信号为: $A_1(\omega_i) = A_{m1} \sin(\omega_i t + \varphi_1)$

输出信号: $A_2(\omega_i) = A_{m2} \sin(\omega_i t + \varphi_2)$ (式 2-1)

在一定频率范围内,测量频率 ω_i 的输入与输出信号幅值比 (A_{m1}/A_{m2}) 与相位差 ($\varphi_1 - \varphi_2$) 做为幅频与相频特性的值,从起始频率到终止频率可测得一组幅值和相位参数画出 BODE 图。在该图中可看出系统的稳定性、得到相位裕度、幅值裕度及截止频率等参数用于分析系统动态及静态特征。^[2]

2. PID 实验原理

PID 控制由比例(P)、积分(I)和微分(D)组成。其传递函数为:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (\text{式 2-2})$$

其中 K_p 为比例系数, T_i 为积分时间常数, T_d 为微分时间常数。通过调整三个参数,可构成比例控制器;比例微分控制器;比例积分控制器;比例积分微分控制器。

实验的关键是如何确定这三个参数,原有实验是给定一个确定对象,并给定 PID 初始值,由试凑法调整控制参数以达到给定控制指标。目前是学生自行选定被控对象,根据仿真和实验得到的阶跃响应曲线等价为一阶惯性加延迟的环节,即:

$$G_0(s) = K_0 \times \frac{1}{T_0 s + 1} e^{-\tau s} \quad (\text{式 2-3})$$

再根据科恩-库恩公式:^[3]

$$K_p = \frac{1}{K_0} [1.35(\tau/T_0)^{-1} + 0.27]$$

$$T_i = T_0 \times \frac{2.5(\tau/T_0) + 0.5(\tau/T_0)^2}{1 + 0.6(\tau/T_0)}$$

$$T_d = T_0 \times \frac{0.37(\tau/T_0)}{1 + 0.2(\tau/T_0)} \quad (\text{式 2-4})$$

计算得到 K_p 、 T_i 和 T_d , 并以此作为控制器初始参数进行调整, 若不满足给定指标, 再使用微调直到达到控制指标。

3. 实验硬件结构

实验系统通过 D/A 转换将计算机生产的正弦信号输入到模拟对象, 再 A/D 转换将被控对象输出数据采集到计算机进行数据处理, 形成一个数字模拟混合的实验系统。如图 2.1 所示。

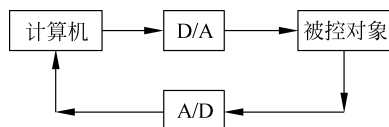


图 2.1 实验系统

其中: A/D 和 D/A 部分使用 NI 公司的 MyDAQ 模块, 被控对象使用模拟实验箱搭接而成。校正实验的闭环电路框图如图 2.2 所示。

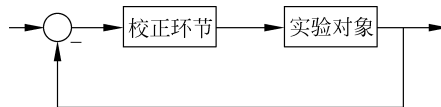


图 2.2 校正系统框图

其中: 校正环节在频域是超前或滞后校正控制器, 在时域是使用 PID 控制器。

3. 实验软件设计

软件设计采用了 LabVIEW 工具。输入的方波信号和正弦信号由软件的波形发生器产生, 正弦信号通过 Function Generator 模块的接入频率、直流偏移、幅值及占空比即可设置输入信号, 使用频率数组生成器的起始频率、终止频率及频率点数目设置不同角频率的输入信号, 以完成一组幅值比与相位差画出 BODE 图, 计算系统相位裕量、截止频率, 结合给定的校正相位裕度, 计算超前相角和开环增益。从而确定超前、滞后网络传递函数的时间常数, 最后匹配校正网络的电路参数。计算流程如图 2.3 所示。

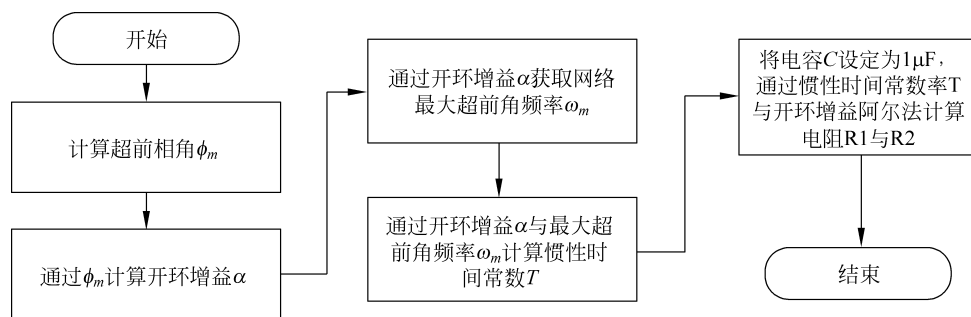


图 2.3 确定校正电路参数流程

如图 3.1 所示。

三、实验测试

1. 实验对象性能指标

实验中的被控对象开环和闭环传递函数如 (式 1) (式 2) 所示:

$$G_0(s) = \frac{10}{0.1s(0.1 + 1)} \quad (\text{式 3-1})$$

$$G_0(s) = \frac{1000}{1 + 10s + 1000s^2} \quad (\text{式 3-2})$$

实验的输入信号由计算机产生, 对于不同被控对象, 信号频率范围和输入幅值会有区别, 实验时需要输入采样点数、起始频率、终止频率及包含起始频率与终止频率在内的频率点数目, 其界面

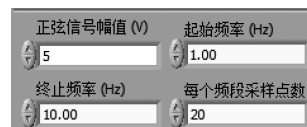


图 3.1 输入界面图

由于最小相位系统的大多对象会随着频率升高, 输出幅值大幅下降, 系统设计了当频率超过截止频率时, 输入幅值放到 2 倍的功能使得采集更加精确。实验中每个频率下可实时观察系统的输入与输出对比波形, 如图 3.2 所示。

在其下方可实时显示当前频率、幅值比及相位差。如图 3.3 所示。

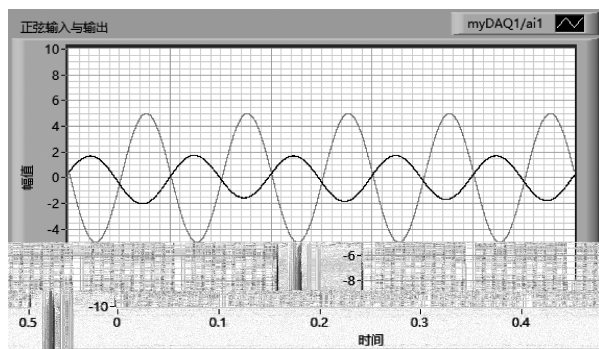


图 3.2 输入输出曲线



图 3.3 当前参数显示界面

采集结束可显示整个系统的频率特性参数值,如图 3.4 所示。

幅值比与相位差全部数据										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
当前频率	1.00000	1.12201	1.25892	1.41253	1.58489	1.77827	1.99526	2.23872	2.51188	2.81838
幅值比	-0.3351	-0.2890	-0.2218	-0.1314	-0.0116	0.14444	0.34564	0.60434	0.93369	1.31131
相位差	-8.6629	-9.4890	-10.420	-11.528	-12.854	-14.472	-16.450	-18.863	-21.893	-25.711

图 3.4 显示界面

根据采集的实验结果,画出未加校正前的 BODE 图如图 3.5 所示。



图 3.5 校正前 BODE 图

从图中测得的截止频率为 7.03Hz, 相位裕度 27.85°。

2. 校正环节及性能指标

在设计超前校正网络时,应使最大超前相位角尽可能出现在校正后的系统的幅值截止频率处。若给定了校正后相位裕度 γ' , 根据测定未校正前相位裕度 γ 即可计算该网络的最大超前相位角 φ_m , 即:

$$\varphi_m = \gamma' - \gamma + \Delta \quad (\text{式 3-3})$$

其中 Δ 一般取 ($5^\circ \sim 10^\circ$) 补偿校正后系统增益剪切频率。对于超前校正环节传递函数的衰减由放大器增益 a 补偿, 即:

$$G_c(s) = \frac{1}{a} \times \frac{1 + aTs}{1 + Ts} \quad (\text{式 3-4})$$

其中 a 值越大, 则超前网络的微分效应越强。正确地选择参数 a 和 T 交转换频率设定到待校正系统截止频率的两旁, 使校正系统的截止频率和相位裕度满足性能指标的要求。其中 a 与最大超前相位的关系^[4]可由下式决定。

$$a = \frac{1 + \sin \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m} \quad (\text{式 3-5})$$

将超前校正网络的最大超前角频率 $\omega_m = \omega_c$ 正好位于校正后系统的截止频率处, 计算校正参数 T 即:

$$T = \frac{1}{\omega_m \sqrt{a}} \quad (\text{式 3-6})$$

由未校正系统的截止频率、相位裕度、校正后相位裕度及超前校正网络电容 C 的值, 再根据(式 3-3)到(式 3-5)计算机自动计算校正网络电路参数如图 3.6 所示。

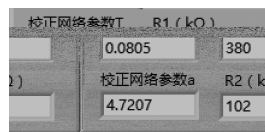


图 3.6 校正参数显示结果

按照参数搭接校正环节, 由 C 、 R_1 和 R_2 的值确定的电路如图 3.7 所示。

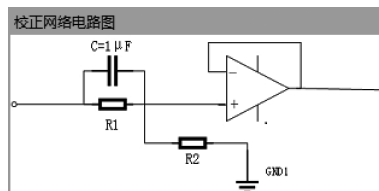


图 3.7 校正环节

其校正后的 BODE 图如图 3.8 所示。

相位超前特性改变了系统的开环频率特性。使校正环节的最大相位超前角出现在系统新的截止频率点。从图上测得的相位裕度为 59.365° 。截止频率为 6.457Hz。满足了给定指标, 相位裕度显示结果如图 3.9 所示。

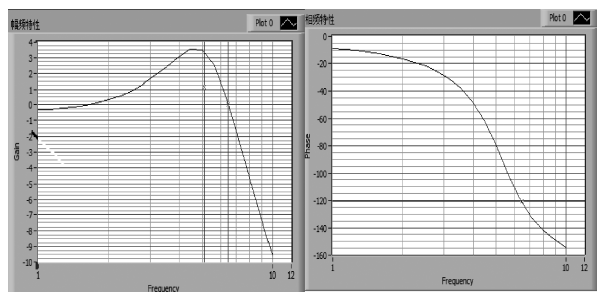


图 3.8 校正后 BODE 图



图 3.9 校正后参数显示

校正前后的时域阶跃响应曲线如图 3.10 所示。

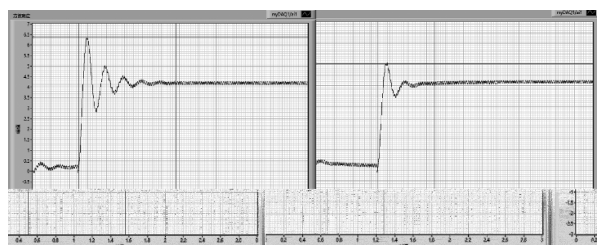


图 3.10 校正前后时域响应曲线

3. 校正实验方法选择

对于某个系统对象根据相位裕度 γ 选择超前和滞后校正,一般 $\gamma > 10^\circ$ 的时候,选用超前校正比较好, $-10^\circ < \gamma < 10^\circ$ 的时候,选用滞后校正, $\gamma < 10$ 也可选用滞后超前校正。频域法的超前作用相当于时域法的 PD 控制,滞后作用相当于 PI 控制。频域法校正的界面如图 3.11 所示。

以上是频率法超前校正的实验结果,其滞后校正设计方法和 PID 控制设计思想与上述基本相同,这里不再累述。

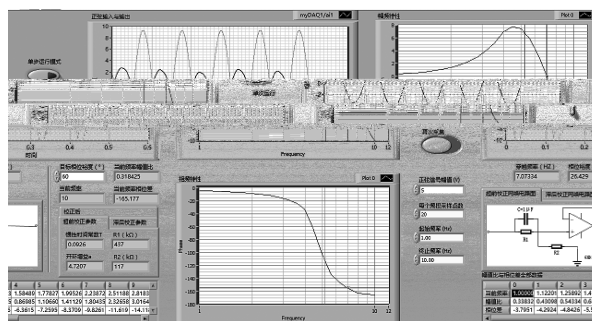


图 3.11 校正实验界面

四、结论

我们实验室在具有相同的实验条件下,改革旧的实验教学方法和实验手段,减少验证性实验,增开综合性、设计性实验,不断创新探索实验模式并予以实施,希望在讨论会上对设计性实验的内涵与特征进行讨论,进而对增加综合性、设计性实验找出更多的方法,这样对提高实验教学质量有一定的实际意义。

参考文献

- [1] B. Taylor, P. Eastwood, B. Ll. Jones. Development of a low-cost, portable hardware platform for teaching control and systems theory [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(17): .
- [2] 胡寿松, 自动控制原理基础教程(第三版). 科学出版社. 2013-3
- [3] 俞金涛, 蒋慰孙. 过程控制工程(第3版)电子工业出版社. 2007-7
- [4] 姜增如. 自动控制理论创新实验案例教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015. 104-119