

普通高等学校能源与动力
“十二五”规划教材

热工自动化综合实验指导书

►► 鲁录义 主编



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

普通高等学校能源与动力“十二五”规划教材

热工自动化综合实验指导书

主 编 鲁录义



华中科技大学出版社

中国·武汉

内 容 简 介

本书是根据普通高等学校教学改革和实验教学的需要,面对能源与动力类专业本科生而编写的实验教材。全书密切结合热工过程自动调节课程的理论教学内容,从工程应用和实践能力培养出发,设计了热工过程自动调节的若干实验内容。各项实验皆以相关理论为基础,介绍了实验目的、实验工具、实验原理、实验方法与操作,并对实验过程与结果的分析、实验的相关思考、实验报告的撰写等进行了引导。旨在指导学生正确实施热工过程自动调节的有关实验和巩固所学理论知识,培养学生的知识综合应用和工程实践能力。

本书既可作为高等院校能源与动力类专业的热工自动化实验教材,也可作为高等院校其他专业自动化实验教学的参考资料,还可供工程控制领域中的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热工自动化综合实验指导书/鲁录义主编. —武汉:华中科技大学出版社,2017.4
ISBN 978-7-5680-2740-3

I. ①热… II. ①鲁… III. ①火电厂-热力工程-自动化系统-实验-高等学校-教材
IV. ①TM621.4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 076688 号

热工自动化综合实验指导书

鲁录义 主编

Regong Zidonghua Zonghe Shiyang Zhidaoshu

策划编辑:刘 勤

责任编辑:刘 飞

封面设计:刘 卉

责任校对:马燕红

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉楚海文化传播有限公司

印 刷:武汉鑫昶文化有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:19

字 数:402千字

版 次:2017年4月第1版第1次印刷

定 价:39.80元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

本书是根据普通高等学校教学改革和实验教学建设的需要,面向能源与动力类专业本科生而编写的热工过程自动调节实验教材。旨在加强热工过程自动调节的实践教学环节,指导学生正确实施热工过程自动调节的有关实验和巩固所学理论知识,培养学生的知识综合应用和工程实践的能力。

本书理论与实际相结合,针对能源与动力类专业的培养计划和教学特点,重点围绕热工过程自动调节的基本教学内容和要求,精心设计了典型环节的动态特性、典型环节的时域分析和稳定性评价、典型环节的频域分析和稳定性评价、线性系统的校正、单回路和串级调节系统的工程整定、前馈—反馈调节系统的工程整定、汽包水位调节系统的工程整定、过热汽温调节系统的工程整定、典型调节系统的构成与调试、基本调节系统的设计与组态等十项实验内容;详细阐述了各项实验的主要目的、基本原理、基本条件、基本方案和基本方法,并对实验数据记录与整理、实验过程与结果的分析、实验的相关思考、实验报告的撰写等进行了必要的引导。通过本书的十项实验,力求使学生进一步加深对热工过程自动调节系统构成及其环节动态特性的了解,力求使学生掌握热工过程自动调节系统分析、调试、整定、评价的基本技能,力求使学生分析和解决实际问题的能力得到锻炼。

本书由华中科技大学鲁录义担任主编,在编写过程中,华中科技大学高伟教授给予了极大的关心和全面的指导,提出了许多宝贵意见和建议,并得到华中科技大学能源与动力工程学院杨涛、张小平等教师的鼎力支持与帮助,在此一并表示感谢。本书在编写过程中参考了许多相关教材、实验指导书、资料和文献,在此,特向有关作者表示由衷的感谢!

由于编者水平有限,书中的缺点和疏漏在所难免,真诚地希望读者批评指正。

编 者

2016 年 12 月

目 录

实验一 典型环节的动态特性	(1)
1.1 实验目的	(1)
1.2 实验工具	(2)
1.3 实验原理	(2)
1.4 基于 Matlab/Simulink 的实验内容及步骤	(6)
1.5 基于 nextboard 平台的实验内容及步骤	(10)
1.6 Matlab/Simulink 基本操作方法	(20)
1.7 实验注意事项	(25)
1.8 实验报告	(29)
实验二 典型环节的时域分析和稳定性评价	(34)
2.1 实验目的	(34)
2.2 实验工具	(34)
2.3 实验原理	(35)
2.4 Simulink 实验内容及步骤	(39)
2.5 nextboard 实验内容及步骤	(43)
2.6 维护保养	(49)
2.7 实验报告	(50)
实验三 典型环节的频域分析和稳定性评价	(53)
3.1 实验目的	(53)
3.2 实验工具	(53)
3.3 实验原理	(53)
3.4 典型环节的 Nyquist 曲线绘制	(63)
3.5 纯迟延环节对典型环节 Nyquist 曲线的影响	(68)
3.6 系统类型对 Nyquist 曲线的影响	(74)
3.7 利用 Nyquist 曲线进行稳定性分析	(77)
3.8 实验报告	(82)
实验四 线性系统的校正	(86)
4.1 实验目的	(86)
4.2 实验工具	(86)

4.3	实验原理	(87)
4.4	实验内容	(88)
4.5	Matlab/Simulink 实验步骤	(91)
4.6	nextboard 验证步骤	(94)
4.7	实验报告	(98)
实验五	单回路和串级调节系统的工程整定	(101)
5.1	实验目的	(101)
5.2	实验工具	(102)
5.3	实验原理	(102)
5.4	临界比例带实验内容及步骤	(105)
5.5	衰减曲线法实验内容及步骤	(110)
5.6	图表整定法实验内容及步骤	(114)
5.7	串级系统整定实验内容及步骤	(124)
5.8	子模型建立方法	(130)
5.9	曲线斜率求取方法	(134)
5.10	实验报告	(135)
实验六	前馈-反馈调节系统的整定与分析	(139)
6.1	实验目的	(139)
6.2	实验工具	(139)
6.3	实验原理	(139)
6.4	实验内容及步骤	(151)
6.5	实验报告	(159)
实验七	汽包水位调节系统的整定	(162)
7.1	实验目的	(162)
7.2	实验工具	(162)
7.3	实验原理	(163)
7.4	单级三冲量给水控制系统整定内容与步骤	(173)
7.5	串级三冲量给水控制系统整定内容与步骤	(180)
7.6	实验报告	(186)
实验八	过热汽温调节系统的整定	(188)
8.1	实验目的	(188)
8.2	实验工具	(188)
8.3	实验原理	(188)

8.4 串级汽温控制系统的参数整定	(195)
8.5 采用导前汽温微分信号的双回路系统的参数整定	(200)
8.6 实验报告	(209)
实验九 典型调节系统的构成与调试	(212)
9.1 实验准备	(213)
9.2 温度控制系统实验	(216)
9.3 光亮度控制模块实验	(219)
9.4 速度控制模块实验	(222)
9.5 位置控制实验	(224)
9.6 维护保养	(227)
9.7 实验报告	(227)
实验十 调节系统的设计与组态	(230)
10.1 实验目的	(230)
10.2 实验工具	(230)
10.3 实验原理	(230)
10.4 XDPS2.0 实验内容和步骤	(233)
10.5 Matlab/Simulink 仿真实验内容和步骤	(274)
10.6 实验报告	(275)
附录 A Simulink 仿真集成环境简介	(278)
参考文献	(296)

实验一 典型环节的动态特性

当系统运行时,输出量与输入量之间的关系称为动态特性。绝大多数系统在测量范围内可以认为是线性系统,可以用常系数线性微分方程描述。对于某些元件或设备的动态特性不是线性微分方程的,工程上为了简化调节系统分析,通常进行近似线性化处理,得到近似线性微分方程。因此可以采用常线性系统微分方程来描述测试系统中输入量 $x(t)$ 和输出 $y(t)$ 的关系。

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x$$

式中, a_i 和 b_i ($i=0,1,2,\dots$) 为系统结构特性参数(常数),系统的阶次由输出量最高微分阶次决定。

通过对输入量 $x(t)$ 和输出 $y(t)$ 进行 Laplace(拉普拉斯)变换,可以得到系统的传递函数 $H(s)$,描述系统本身的动态特性。

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0}$$

式中, s 为复变量,即 $s = a + j\omega$ 。

简单系统的传递可以通过理论推导的其微分方程并进行 Laplace 变换得到,如蓄水箱系统。然后,对于一个复杂系统的传递函数很难通过理论的方法进行推导出来,只能通过测试其在典型信号输入下的响应,将其等效为若干典型环节的组合,以此得到该系统近似的传递函数,以便后期对系统进行整定。因此,需要首先了解并掌握典型环节动态特性。

1.1 实验目的

(1) 熟悉各典型环节的传递函数的绘制方法,掌握 Simulink 进行系统动态响应的实验方法。

(2) 了解典型环节模拟电路的构成,掌握 nextcontrol 实验平台进行动态响应的方法。

(3) 了解系统参数变化对典型环节动态特性的影响。

1.2 实验工具

- (1) 微型计算机 一台。
- (2) nextboard 母板(见图 1-1) 一套。
- (3) 数据采集器 一台。
- (4) 典型环节的时域响应模块(见图 1-2) 一块。
- (5) Matlab/Simulink 平台。

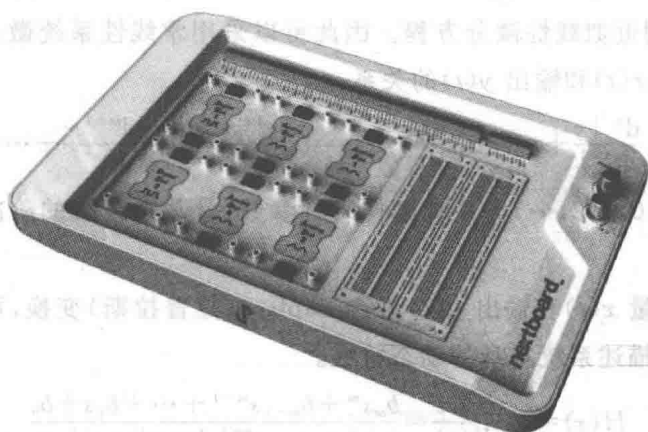


图 1-1 nextboard 母板

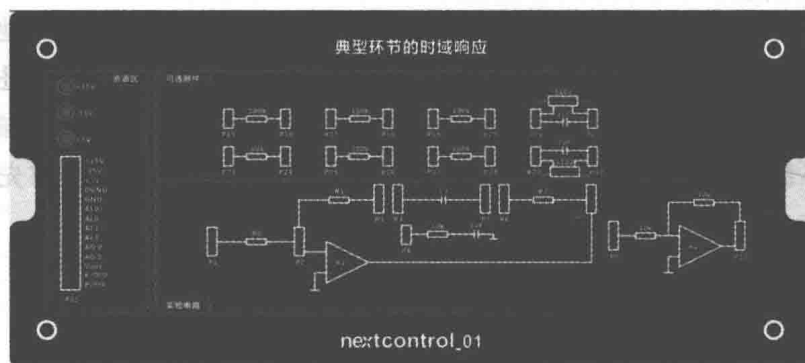


图 1-2 典型环节的时域响应模块

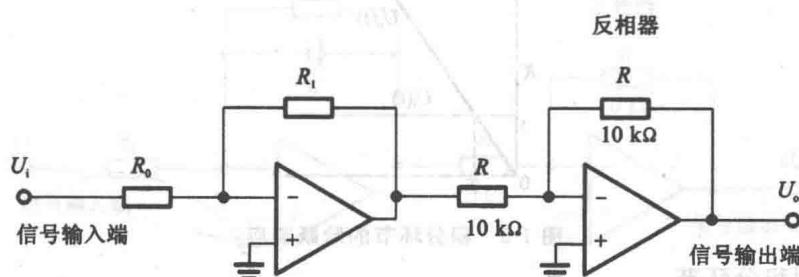
1.3 实验原理

1. 比例环节

比例环节的传递函数为

$$G(s) = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R_1}{R_0} = -2, \quad R_1 = 200 \text{ k}\Omega, \quad R_0 = 100 \text{ k}\Omega$$

其对应的模拟电路如图 1-3 所示。



$$R_0=200\text{ k}\Omega; R_1=100\text{ k}\Omega\text{或}200\text{ k}\Omega$$

图 1-3 比例环节模拟电路图

比例环节的阶跃响应为: $U_o(t) = K(t \geq 0)$, 如图 1-4 所示。

式中, $K = R_1/R_0$ 。

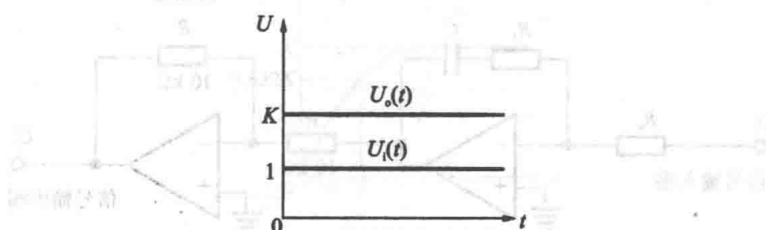


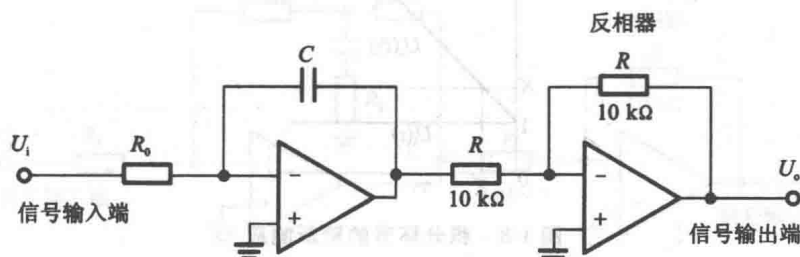
图 1-4 比例环节的阶跃响应

2. 积分环节

积分环节(I)的传递函数为

$$G(s) = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{1}{R_0 C s} = -\frac{1}{0.1 s}, \quad R_0 = 100\text{ k}\Omega, \quad C = 1\text{ }\mu\text{F}$$

其对应的模拟电路如图 1-5 所示。



$$R_0=200\text{ k}\Omega; C=1\text{ }\mu\text{F}\text{或}2.2\text{ }\mu\text{F}$$

图 1-5 积分环节的模拟电路

积分环节的阶跃响应为: $U_o(t) = \frac{1}{T}t (t \geq 0)$, 如图 1-6 所示。

式中, $T = R_0 C$ 。

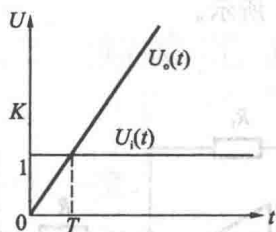


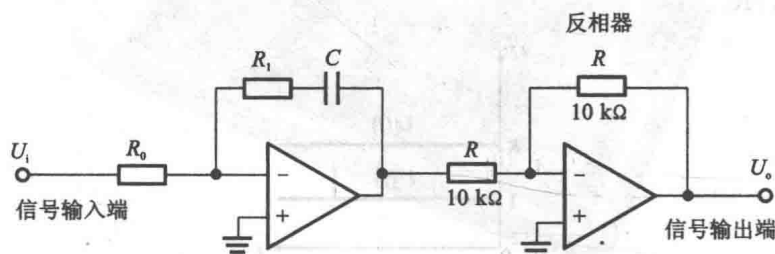
图 1-6 积分环节的阶跃响应

3. 比例积分环节

积分环节(I)的传递函数为

$$G(s) = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R_1}{R_0} - \frac{1}{R_0 C s} = -2 - \frac{1}{0.2s}, \quad R_1 = 100 \text{ k}\Omega, \quad R_0 = 200 \text{ k}\Omega, \quad C = 1 \text{ }\mu\text{F}$$

其对应的模拟电路如图 1-7 所示。



$$R_0 = R_1 = 200 \text{ k}\Omega; C = 1 \text{ }\mu\text{F} \text{ 或 } 2.2 \text{ }\mu\text{F}$$

图 1-7 比例积分环节的模拟电路

积分环节的阶跃响应为: $U_o(t) = K + \frac{1}{T}t (t \geq 0)$, 如图 1-8 所示。

式中, $K = R_1 / R_0$, $T = R_0 C$ 。

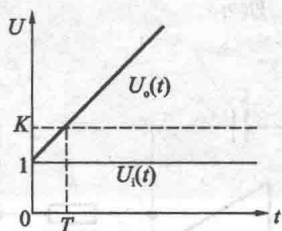


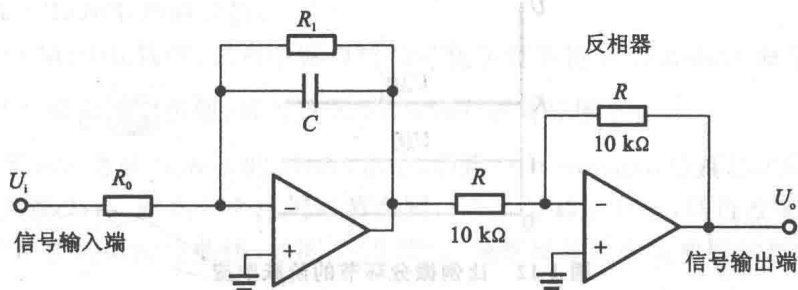
图 1-8 积分环节的阶跃响应

4. 惯性环节

惯性环节的传递函数为

$$G(s) = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R_2}{R_1 R_2 C_1 s + 1} = -\frac{2}{0.2s + 1}, \quad R_1 = 100 \text{ k}\Omega, \quad R_2 = 200 \text{ k}\Omega, \quad C_1 = 1 \text{ }\mu\text{F}$$

其对应的模拟电路如图 1-9 所示。



$$R_0 = R_1 = 200 \text{ k}\Omega; C = 1 \text{ }\mu\text{F} \text{ 或 } 2.2 \text{ }\mu\text{F}$$

图 1-9 惯性环节模拟电路图

惯性环节的阶跃响应为: $U_o(t) = K(1 - e^{-t/T})$, 如图 1-10 所示。

式中: $K = R_1/R_0$, $T = R_1 C$ 。

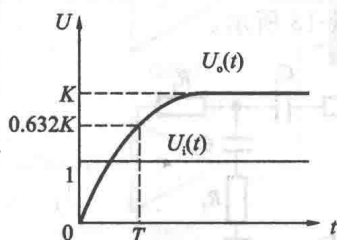


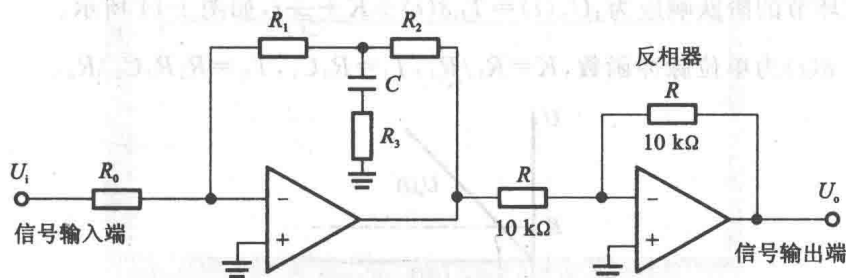
图 1-10 惯性环节的阶跃响应

5. 比例微分环节

比例微分环节(PD)的传递函数为

$$G(s) = -\frac{Z_2}{Z_1} = K_c \left(e + T_D \frac{de}{dt} \right)$$

其对应的模拟电路如图 1-11 所示。



$$R_0 = R_2 = 100 \text{ k}\Omega; R_3 = 10 \text{ k}\Omega; C = 1 \text{ }\mu\text{F} \\ R_1 = 100 \text{ k}\Omega \text{ 或 } 200 \text{ k}\Omega$$

图 1-11 比例微分环节模拟电路图

惯性环节的阶跃响应为: $U_o(t) = K T \delta(t) + K$, 如图 1-12 所示。

式中, $K = (R_1 + R_2)/R_0$, $T = R_1 R_2 C / (R_1 + R_2)$ 。

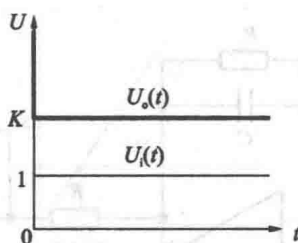


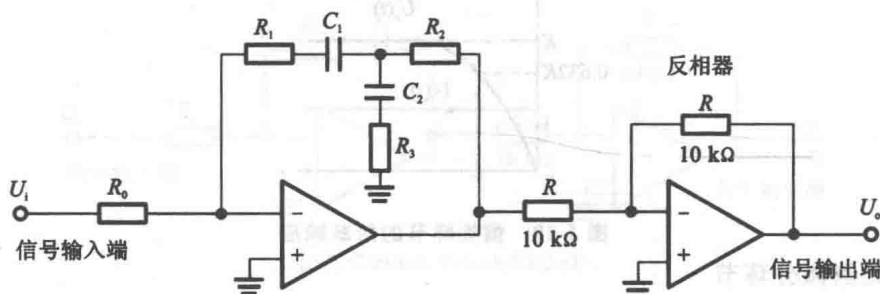
图 1-12 比例微分环节的阶跃响应

6. PID 环节

PID 环节的传递函数为

$$G(s) = \frac{K\omega_n}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

其对应的模拟电路如图 1-13 所示。



$$R_0 = 100 \text{ k}\Omega; R_2 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega; C_1 = C_2 = 1 \text{ }\mu\text{F}$$

$$R_1 = 100 \text{ k}\Omega \text{ 或 } 200 \text{ k}\Omega$$

图 1-13 PID 环节模拟电路图

惯性环节的阶跃响应为: $U_o(t) = T_D \delta(t) + K + \frac{1}{T_I} t$, 如图 1-14 所示。

其中 $\delta(t)$ 为单位脉冲函数, $K = R_1/R_0$, $T_I = R_0 C_1$, $T_D = R_1 R_2 C_2/R_0$ 。

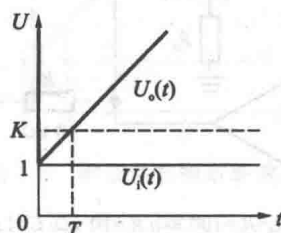


图 1-14 PID 环节的阶跃响应

1.4 基于 Matlab/Simulink 的实验内容及步骤

采用 Matlab/Simulink 进行比例环节、积分环节、微分环节(含实际微分环节)、

惯性环节和 PID 环节影响分析。

(1) 运行 Matlab 软件, 在命令窗口栏“>>”提示符下键入 Simulink 命令, 按 Enter 键或在工具栏单击  按钮, 即可进入 Simulink 仿真环境下。

(2) 选择 File 菜单 New 下的 Model 命令, 新建一个 Simulink 仿真环境常规模板。

(3) 参照图 1-15, 建立三个比例环节在同一个示波器上显示, 通过改变增益大小, 查看对应的单位阶跃响应曲线, 如图 1-16 所示, 观察增益对响应曲线的影响。

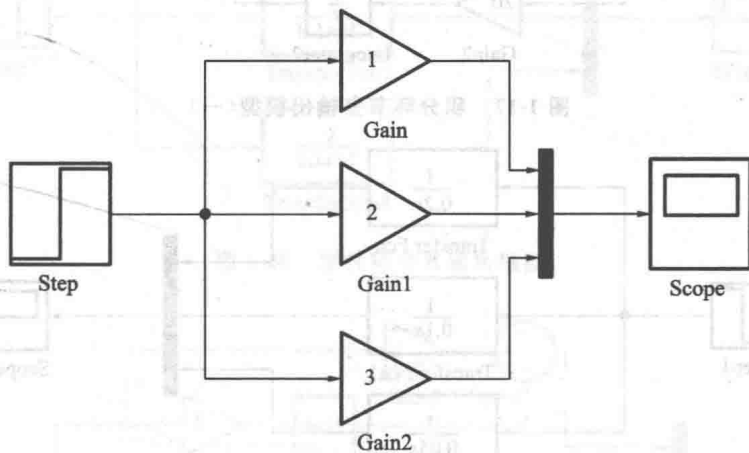


图 1-15 比例环节多输出模型

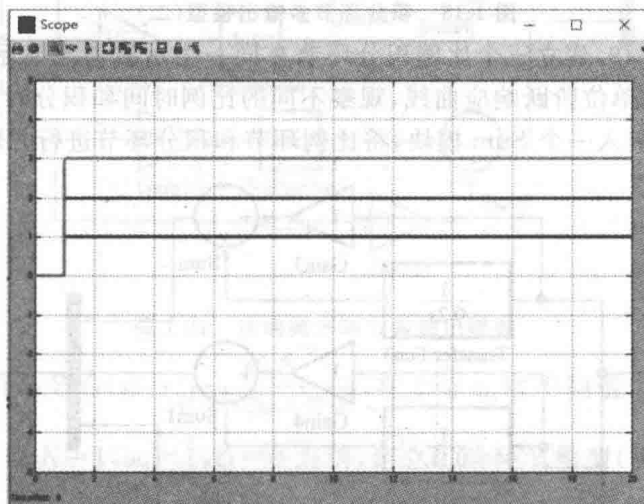


图 1-16 比例环节多输出示意

(4) 参考图 1-17, 建立三个积分环节在同一个示波器上显示, 通过改变增益大小, 查看对应的单位阶跃响应曲线, 观察不同的积分时间对响应曲线的影响。这里需要说明的是, Simulink 中积分环节不能独立设置积分时间的大小, 需要串联一个比例环节来调整积分时间。可替代的方法是采用传递函数模块进行替代(绝大多数环节均可以采用 PID 模块进行建模), 如图 1-18 所示。

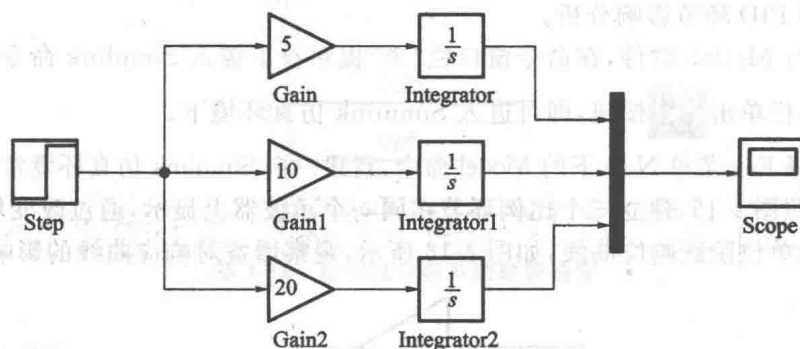


图 1-17 积分环节多输出模型(一)

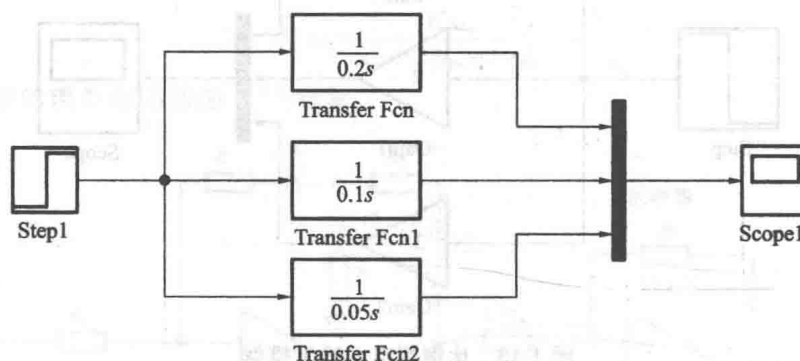


图 1-18 积分环节多输出模型(二)

(5)参考图 1-19,建立三个比例积分环节在同一个示波器上显示,通过改变增益大小,查看对应的单位阶跃响应曲线,观察不同的比例时间和积分时间对响应曲线的影响。这里需要引入一个 Sum 模块,将比例环节和积分环节进行并联。

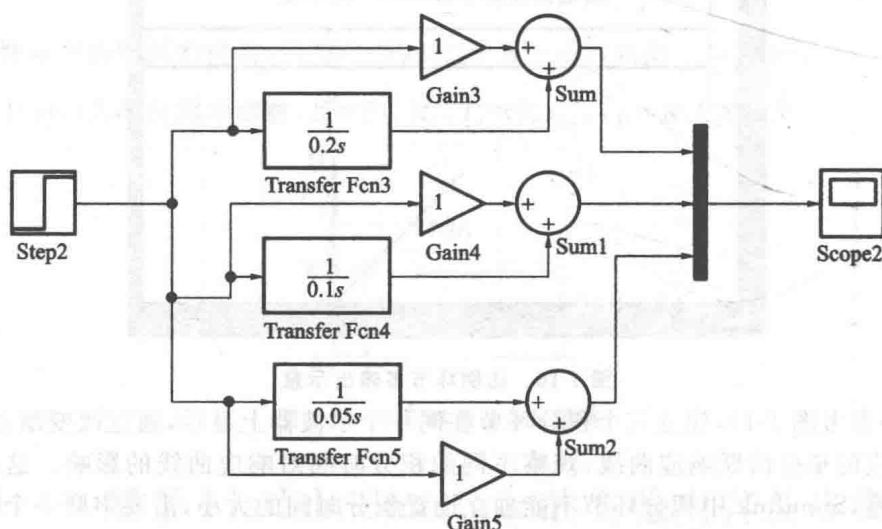


图 1-19 比例积分环节多输出模型

(6)参考步骤(4)和(5),建立惯性环节和比例微分环节的多输出模型,相应的模型分别如图 1-20 及图 1-21 所示。

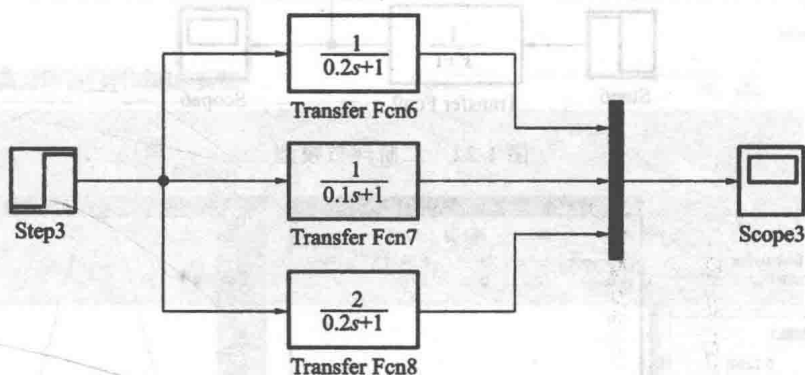


图 1-20 惯性环节多输出模型

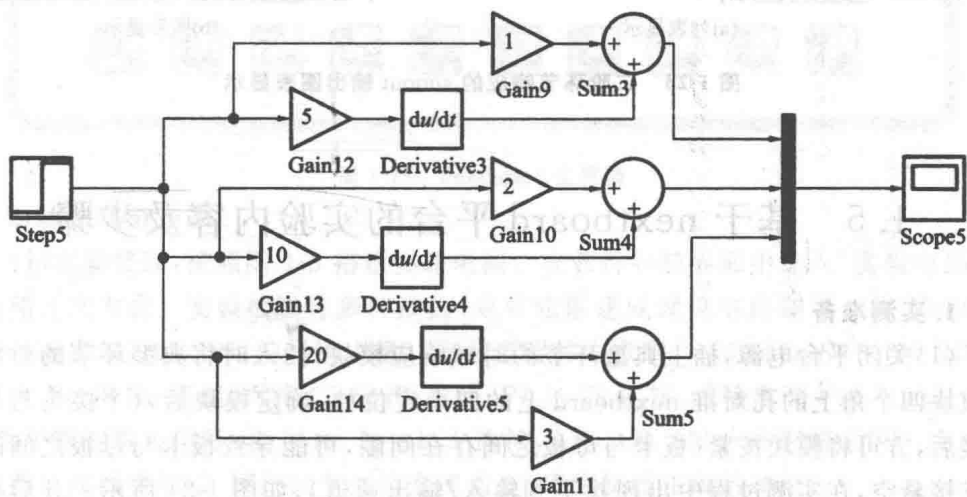


图 1-21 比例微分环节多输出模型

(7)典型二阶环节 $G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$, 在 ζ 与 ω_n 取不同值, 观察对应的单位阶跃响应曲线。以 $K=1, \omega_n=1, \zeta_1=0$ 为例, 建立二阶环节模型(见图 1-22, 为了便于观察曲线上详细信息, 加模型中加入了 simout 环节, 可以在 Matlab 主窗口中显示具体数值)。

- ①令 $\omega_n=1, \zeta$ 取不同值: $\zeta_1=0.5, \zeta_2=0.8(0<\zeta<1); \zeta_3=1; \zeta_4=4(\zeta\geq 1)$;
- ②令 $\zeta=0, \omega_n$ 取不同值: $\omega_{n1}=1; \omega_{n2}=3$;
- ③令 $\zeta=0.216, \omega_n$ 取不同值: $\omega_{n1}=1; \omega_{n2}=3$ 。

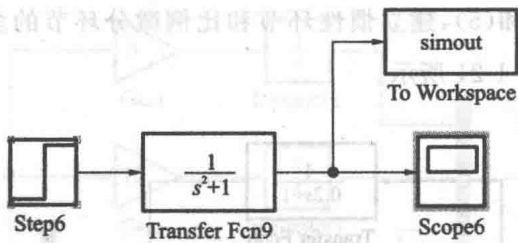
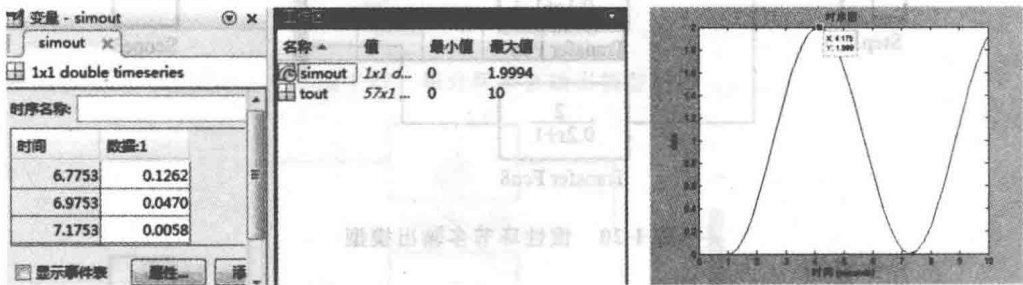


图 1-22 二阶环节模型



(a)列表显示 (b)图形显示

图 1-23 二阶环节响应的 simout 输出图表显示

1.5 基于 nextboard 平台的实验内容及步骤

1. 实测准备

(1)关闭平台电源,插上典型环节的时域响应模块,插入时将典型环节的时域响应模块四个角上的孔对准 nextboard 上的四个定位柱,确定模块后六个接头与母板对接后,方可将模块按紧(板卡与母板之间存在间隙,可能导致板卡与母板之间的部分连接悬空,在实测过程中出现找不到输入/输出通道),如图 1-24 所示。开启平台电源,此时可以看到模块左上角的电源指示灯亮。

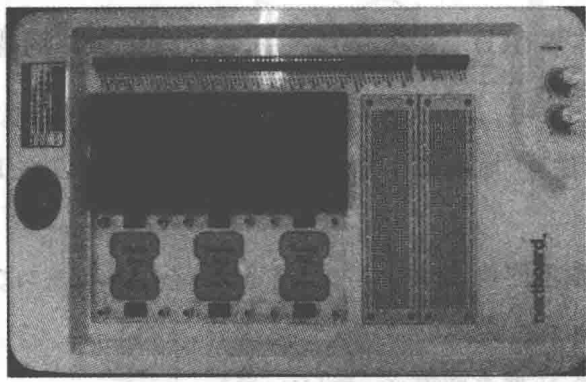


图 1-24 典型环节的时域响应模块插入 nextboard 面板