

清华大学机械工程基础系列教材

控制工程基础 实验指导

Experiment Guidebook to
Control Engineering

● 赵长德 郭美凤 董景新 王芄 编著
● Zhao Changde Guo Meifeng Dong Jingxin Wang Peng

清华大学出版社

TP13

90-2C

2007

清华大学机械工程基础系列教材

控制工程基础 实验指导

Experiment Guidebook to Control Engineering

赵长德 郭美凤 董景新 王芄 编著

Zhao Changde Guo Meifeng Dong Jingxin Wang Peng

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书是与《控制工程基础》(第2版)(董景新等编著,清华大学出版社,2003)配套的实验教材。书中涉及的控制工程基础实验可以帮助读者从理论与实践的结合上深入理解控制系统,掌握控制系统的组成、系统建模、系统仿真、主要元部件实验、系统开环和闭环实验调试方法和手段,提高分析和解决工程实际问题的能力。本书内容包括 MATLAB 仿真、直流电动机调速系统、直流电动机位置伺服系统、计算机控制的位置伺服系统、实验用 TDS1002 数字式记忆示波器的使用方法等。书中给出了系统建模、仿真和系统测试的方法,可供从事机电控制的本科生、研究生和科技人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

控制工程基础实验指导 / 赵长德等编著. —北京:清华大学出版社,2007.2
(清华大学机械工程基础系列教材)

ISBN 978-7-302-14248-5

I. 控… II. 赵… III. 自动控制理论—实验—高等学校—教学参考资料 IV. TP13-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 146188 号

责任编辑:张秋玲 洪 英

责任校对:刘玉霞

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175

投稿咨询:010-62772015

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮购热线:010-62786544

客户服务:010-62776969

印 刷 者:北京四季青印刷厂

装 订 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:10.25 字 数:210 千字

版 次:2007 年 2 月第 1 版 印 次:2007 年 2 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:18.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:016145-01

前言

本实验教材是配合《控制工程基础》(第2版)(董景新、赵长德、熊沈蜀、郭美凤编著,清华大学出版社,2003)教材编写的,该教材被列为普通高等教育“十五”国家级规划教材和北京市高等教育精品教材。

配套教材的第1版1992年3月出版,11年内印刷11次,印数达53000册;该教材的第2版自2003年8月出版以来除在清华大学使用外,同时被多所兄弟院校选为教材及研究生入学考试参考书,出版3年多来已印刷7次,总印数达33000册。本实验教材在出版之前,其内容一直放在清华校园网上供学生浏览下载。但实验不只是验证理论,更重要的是学习“控制工程基础”课程的重要手段,可帮助读者从理论与实践的结合上理解控制系统,这也是提高分析和解决工程实际问题能力的必要训练,因此才整理出版了本实验教材。

本实验教材包括自动控制系统的模拟与仿真、直流电动机调速系统、直流电动机位置伺服系统、计算机控制的位置伺服系统共4个实验,并介绍了TDS1002数字式记忆示波器的使用。清华大学汽车系夏珩同学参加了直流电动机调速系统实验的测试,精密仪器与机械学系王瑞、陈涛同学参加了计算机控制的位置伺服系统实验的调试工作,本实验教材的编写还得到了清华大学出版社的资助,在此一并表示衷心感谢。

编 者

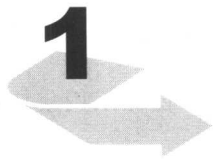
2007年1月

目录

1	自动控制系统的模拟与仿真	1
1.1	自动控制系统的模拟	1
1.2	计算机仿真	2
1.3	MATLAB 仿真	2
1.3.1	一阶系统的仿真	3
1.3.2	二阶系统的仿真	3
1.3.3	三阶系统的稳定性研究	3
1.3.4	控制系统的校正	4
1.4	速度环仿真	5
1.4.1	具有比例调节器的速度环仿真	5
1.4.2	具有比例积分调节器的速度环仿真	7
1.4.3	速度环仿真举例	7
1.5	位置环仿真	13
1.5.1	具有比例调节器的位置环仿真	14
1.5.2	具有比例积分调节器的位置环仿真	15
1.5.3	位置环仿真举例	15
2	直流电动机调速系统	19
2.1	实验目的	19
2.2	直流伺服电动机调速系统工作原理	19
2.2.1	直流伺服电动机	20
2.2.2	PWM 功率放大器	22

2.2.3	霍尔电流传感器	26
2.2.4	电流环的分析与设计	27
2.2.5	速度环的分析与设计	30
2.3	实验测试报告	33
2.3.1	电流环测试	33
2.3.2	速度环测试	37
2.4	实验步骤	58
2.4.1	速度环测试步骤	58
2.4.2	实验思考	59
2.5	实验报告要求	59
3	直流电动机位置伺服系统	61
3.1	实验目的	61
3.2	实验原理	61
3.2.1	位置环的构成	61
3.2.2	光电编码器及其计数器	61
3.2.3	数字电位器的实现	65
3.2.4	比例位置调节器与位置环函数图	67
3.2.5	比例积分位置调节器及其对应的位置环分析	72
3.3	实验测试报告	75
3.3.1	位置环速度品质系数的测定	75
3.3.2	位置环采用比例调节器时系统的阶跃时域响应	76
3.3.3	位置环采用比例积分调节器时系统的阶跃时域响应	76
3.3.4	位置环的静特性测试	77
3.3.5	位置环的阻尼	80
3.4	实验步骤与要求	80
3.4.1	测试位置环的速度品质系数	80
3.4.2	时域响应测试与仿真结果的对比	80
3.4.3	具有PI调节器的位置环阶跃响应	81
3.4.4	测试工作台位移与输入电压的静特性	81
3.5	实验思考	81
3.6	实验报告要求	83

4	计算机控制的位置伺服系统	84
4.1	实验目的	84
4.2	实验原理	84
4.2.1	计算机控制的位置伺服系统的组成	84
4.2.2	D/A 卡	84
4.2.3	功率放大器	85
4.2.4	电动机	86
4.2.5	工作台	86
4.2.6	光电编码器计数卡	87
4.2.7	定时器卡	88
4.2.8	PC-104 总线的接口卡	88
4.3	系统建模	100
4.3.1	D/A 及电动机的数学模型	100
4.3.2	伺服放大器-电动机转速的动特性	103
4.3.3	光电编码器读数卡的传递特性	103
4.3.4	系统模型	103
4.4	系统实验	109
4.4.1	系统闭环	109
4.4.2	采样时间 τ 对系统稳定性的影响	110
4.4.3	K_p 对系统稳定性的影响	110
4.4.4	数字 PID 对系统性能的影响	110
4.4.5	系统性能的测试和评价	112
附录 4.1	计算机控制的位置伺服系统源程序	116
附录 4.2	PC-104 总线计算机控制的源程序	125
附录 4.3	D/A 转换、功率放大器及电动机实验数据分析	138
5	TDS1002 数字存储示波器介绍	141
5.1	概述	141
5.2	使用方法	143
5.3	频谱分析仪	155
	参考文献	156



自动控制系统的模拟与仿真

1.1 自动控制系统的模拟

在自动控制系统的分析和设计过程中,广泛采用模拟技术。模拟的本质就是用能够在一定程度上复现工程上实用系统的模型来代替整个系统。有多种模拟方法,如物理模拟方法,即通过研究某物理系统模型中的现象来研究实际的物理系统;数学模拟方法,其基本原理是建立在物理系统间的相似性这一基础上的。在自然界中,各类物理系统的运动形式是多种多样的,但就其数学模型的描述而言却往往是一致的。两类具有同样运动规律但却有着不同物理属性的系统,表征它们状态的微分方程在数学形式上是相同的。物理系统在微分方程上的这种相似性,使得人们可用对一类物理系统的研究代替对另一类具有同样微分方程的物理系统的研究,从而给自动控制系统的实验带来很大方便。考虑到经济性和教学要求,利用高性能集成运算放大器来模拟机械、电气、热力学等物理系统是很合适的。

模拟大型系统也往往采用专门研制的电子模拟计算机,其运放是自动稳定零点的双通道运算放大器,不仅能够模拟线性系统,还能够模拟各种非线性系统。例如,利用模拟计算机,可以模拟飞行器的高阶微分方程。

还有一种模拟方法是数学物理模拟,例如一个飞行器的自动驾驶控制系统就可用这种方法模拟,飞行器的数学模型通过理论分析和风洞实验建立起来后,一般用专用的模拟计算机模拟(也可以用数字计算机、加上 A/D、D/A 转换卡来仿真),其输出的飞行器姿态角数值(俯仰、航向、横滚)再通过三轴飞行模拟台复现,陀螺和加速度计等传感器安装在飞行模拟台上,其输出经过真实的控制器来控制相关的舵机,舵机位置的变动再传输到模拟机的输入,从而组成飞行器控制系统。显然,复杂的飞行力学方程通过模拟计算机模拟,而传感器、控制器和执行环节(舵机)都是实际的物理装备,这就是数学物理模拟,整个系统如图 1-1 所示。

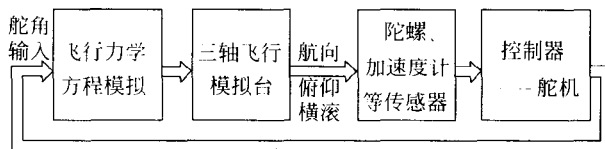


图 1-1 控制系统的数学物理模拟

由于专用的模拟计算机价格很高,所以在自动控制系统教学实践中往往采用集成运算放大器组成的积分器、PID 校正放大器来模拟自动控制系统。

在 20 世纪,“控制工程基础”课程就是采用这种方法实验的。至今,一些教学仪器厂还生产这种设备。例如 XMN-2 等型号的控制理论学习机是采用 OP07 运算放大器来模拟线性和非线性控制系统的。

1.2 计算机仿真

由于微型计算机的普及和其性能迅速提高,使得各种基于微机上运行的应用软件得以迅猛发展。MATLAB 软件提供了强大的矩阵运算和绘图功能,非常适合控制系统的计算机辅助设计和分析,这种设计和分析往往称为计算机仿真。1993 年, SIMULINK 问世,它集成在 MATLAB 4.0 动态系统建模和仿真工具中,使得控制系统的计算机辅助设计向可视化方向迈进了一大步。当前, MATLAB 的版本已经发展到了 6.5、7.0,它已经成为国际控制领域最为流行的计算机辅助设计和教学工具软件,虽然它已经偏离了“矩阵实验室”(matrix laboratory)的本意,但其风格和设计理念对控制领域的影响是非常深远的。

本次实验是通过上机,学习 MATLAB 集成环境及其使用方法,进一步通过给定的控制系统,学习 SIMULINK 在控制系统分析和设计中的应用。

一个复杂的控制系统在通过了利用 MATLAB 软件的计算机辅助设计和分析之后,一般还要进行数学物理模拟才会进入实际系统的调试,但目前已经开发出的基于 DSP 的控制器(内部有 D/A 和 A/D 等通道),可直接利用 MATLAB 软件工具来调试计算机控制系统。这就使 MATLAB 软件工具从控制系统的 CAD 发展到计算机控制系统的实现,大大加快了控制系统的设计和实现的进程。

1.3 MATLAB 仿真

实验条件为 CAD 实验室的个人计算机要安装 MATLAB 6.5 软件,在计算机上进行控制系统仿真实验。

1.3.1 一阶系统的仿真

(1) 推导并写出如图 1-2 所示的一阶系统的传递函数 $\frac{U_c(s)}{U_r(s)}$, 图中, $R_4 = R_5 = 20 \text{ k}\Omega$,

$R_3 = 1 \text{ M}\Omega$, $C = 1 \mu\text{F}$, $R_1 = 20 \text{ k}\Omega$, 而 R_2 有 3 种选择, 即 ① $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$; ② $R_2 = 200 \text{ k}\Omega$; ③ $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$ 。

(2) 利用 MATLAB 仿真, 画出 U_r 为单位阶跃输入时, 输出 U_c 的时域响应曲线, 系统开环的频率特性(伯德(Bode)图和乃氏图), 说明物理系统的线性区(运算放大器供电为 $\pm 15 \text{ V}$)。

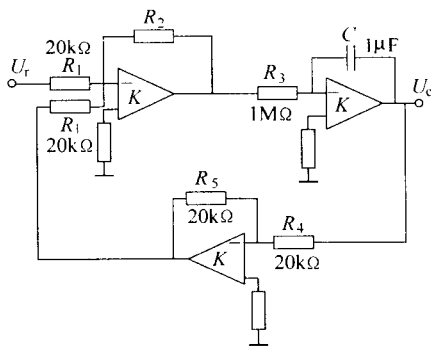


图 1-2 一阶系统

1.3.2 二阶系统的仿真

(1) 推导并写出如图 1-3 所示的二阶系统的

传递函数 $\frac{U_c(s)}{U_r(s)}$, 说明选取不同的 R_5 会有不

同的阻尼比 ζ 。图中, $R_1 = 1 \text{ M}\Omega$, $C = 0.1 \mu\text{F}$, $R_3 = R_4 = 100 \text{ k}\Omega$, 而 R_5 有 3 种选择, 即 ① $R_5 = 40 \text{ k}\Omega$; ② $R_5 = 100 \text{ k}\Omega$; ③ $R_5 = 140 \text{ k}\Omega$ 。

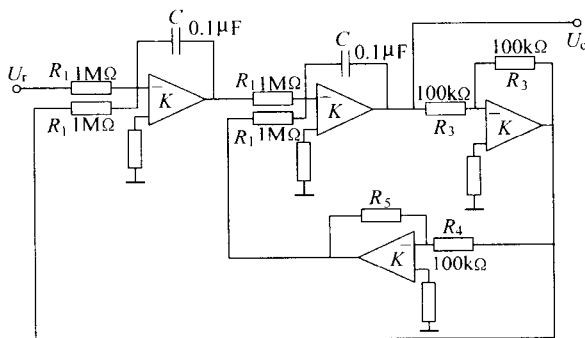


图 1-3 二阶系统

(2) 利用 MATLAB 仿真, 画出 U_r 为单位阶跃输入时, 输出 U_c 的时域响应曲线; 利用 MATLAB 仿真, 画出 R_5 不同值时的开环频率特性(Bode 图和乃氏图), 根据这个 Bode 图, 分析二阶系统的主要动态特性(M_p, t_s)。进一步, 画出不同阻尼比 ζ 时闭环频率特性。

1.3.3 三阶系统的稳定性研究

(1) 图 1-4 是由 3 个时间常数一致的惯性环节组成的三阶系统, 试推导其闭环传递

函数 $\frac{U_c(s)}{U_r(s)}$, 说明开环增益 K_v 为 8 时系统处于临界稳定。图中, $R_3 = 200 \text{ k}\Omega$, $C = 0.1 \mu\text{F}$, $R_1 = 50 \text{ k}\Omega$, R_x 是 $470 \text{ k}\Omega$ 的电位器, 可调节第二个运算放大器的放大倍数, 从 0.38 变化到 4。整个系统的开环增益可从 1.5 变化到 16。

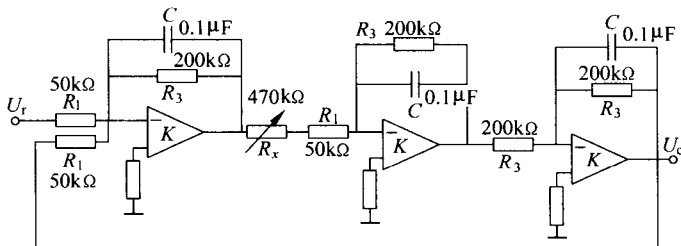


图 1-4 三阶 0 型系统

(2) 利用 MATLAB 画出图 1-4 系统不同增益下的开环 Bode 图, 分析该系统的稳定性。

(3) 给定三阶 I 型系统如图 1-5 所示, 试推导其闭环传递函数, 说明开环增益 K_v 为何值时系统临界稳定, 这时其剪切频率 ω_c 为何值? 图中, $C_1 = C_3 = 0.1 \mu\text{F}$, $C_2 = 1 \mu\text{F}$, $R_4 = 30 \text{ k}\Omega$, $R_1 = R_3 = R_5 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_x = 1 \text{ M}\Omega$ 是可调电位器, 用以调节系统的开环增益 K_v 。

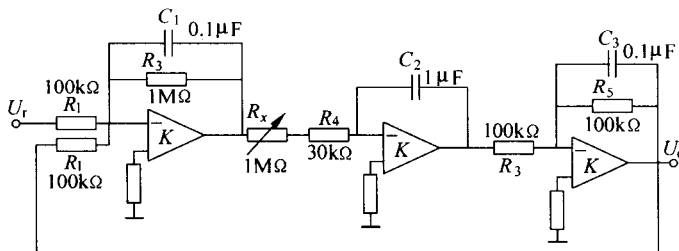


图 1-5 三阶 I 型系统

(4) 利用 MATLAB 画出图 1-5 系统临界稳定时的开环 Bode 图, 分析此时的系统开环增益值 K_v 和剪切频率值。求出 K_v 最大和最小时的相位裕量 γ 。

1.3.4 控制系统的校正

(1) 单位反馈的控制系统的开环传递函数为

$$G_1(s) = \frac{100}{s(0.04s + 1)(0.01s + 1)}$$

校正装置的传递函数为

$$G_1(s) = \frac{0.5s + 1}{5s + 1}$$

请利用 MATLAB, 分析校正前后的稳定性和系统品质, 分析开环增益对系统的影响。

(2) 单位反馈的控制系统开环传递函数为

$$G_1(s) = \frac{200}{s(0.1s + 1)(0.002s + 1)}$$

加入近似 PD 校正, 其传递函数为

$$G_1(s) = \frac{0.05s + 1}{0.005s + 1}$$

请利用 MATLAB, 分析校正前后的稳定性和系统品质, 分析开环增益对系统的影响。

1.4 速度环仿真

结合直流电动机调速系统实验, 掌握 MATLAB 的控制系统图形输入与仿真工具 SIMULINK, 把仿真结果与本书实验 2“直流电动机调速系统实验”进行对比, 以便从理论与实践相结合的高度掌握该控制系统。

1.4.1 具有比例调节器的速度环仿真

1. 实验原理

速度环原理方框图如图 1-6 所示。

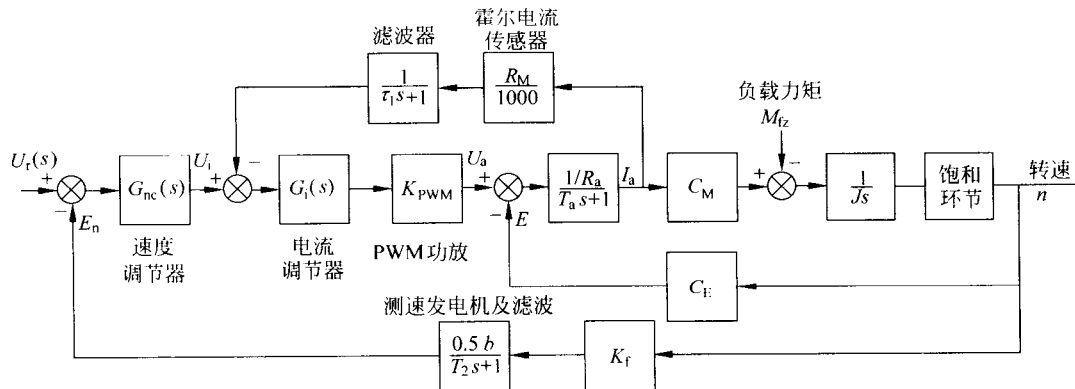


图 1-6 速度环原理方框图

因为电流环可视为二阶最优设计,其频带在 1 kHz,对于速度环来说,可认为是比例环节,可以忽略电动机反电势的作用,其传递系数为 $\frac{I_a}{U_i} = \frac{\alpha}{R_a} = 0.5$ 。而 K_P 是速度环比例调节器的增益, C_M 是电动机电磁力矩系数, J 为折算到电动机轴上的转动惯量, K_c 是安装在电机轴上的测速发电机传递系数, β 是测速发电机输出后的分压系数,则速度环进一步可简化为图 1-7 所示方框图。

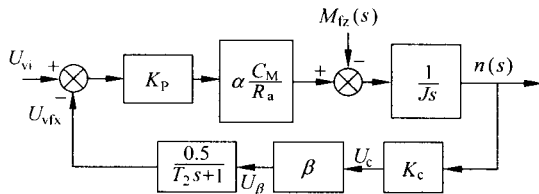


图 1-7 速度环简化方框图

经过实验测试, $\frac{C_M}{J} = 830.6$, 量纲为 $\text{rad}/(\text{A} \cdot \text{s})$, $K_c = 0.237$, β 选定 0.66(即 2/3), 测速滤波时间常数为 $T_2 = 4 \text{ ms}$ 。这样,可进一步简化速度环方框图如图 1-8 所示,图中,比例调节器增益 K_P 可变化。

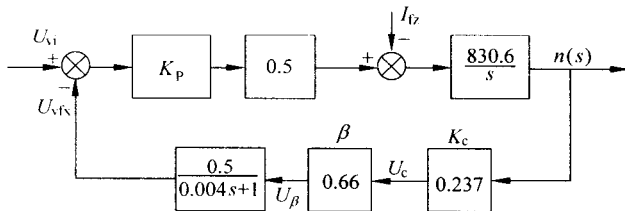


图 1-8 具有比例调节器的速度环方框图

2. 实验要求

选择不同的 K_P , 使闭环系统阻尼比大约为 0.2、0.5、0.7、1 几种情况。

- (1) 分别画出这几种情况的 Bode 图及阶跃输入下的时域响应曲线。
- (2) 分析 $I_{lz} = 0, \pm 2 \text{ A}, \pm 4 \text{ A}$ 时的稳态误差 Δn 。
- (3) 画出系统在负载力矩为 0 时的静态特性 $n = f(U_{vi})$, 此时, 不同的 K_P 有什么影响?
- (4) 画出系统负载力矩固定 ($I_{lz} = 4 \text{ A}$) 情况下不同的 K_P 对应的静态特性, 即 $n = f(U_{vi})$, 以 K_P 为参变量。
- (5) 画出考虑放大器饱和 ($\pm 11 \text{ V}$) 和电动机速度饱和 ($\pm 120 \text{ rad/s}$) 时的仿真函数图, 用 MATLAB 仿真, 分析其性能。

1.4.2 具有比例积分调节器的速度环仿真

选择比例-积分(PI)调节器,线路如图 1-9 所示。其传递函数为

$$G_n(s) = \frac{\tau_n s + 1}{T_n s} = \frac{R_5 C_5 s + 1}{R_3 C_5 s}$$

式中, $R_5 = R_4 + 100 \text{ k}\Omega$, 实验中 C_1 只能选择 $0.1 \mu\text{F}$ 和 $0.47 \mu\text{F}$ 两种。于是系统方框图可简化为如图 1-10 所示。

(1) 当 R_5 最大和最小时, PI 调节器分别为 ① $\frac{0.055s+1}{0.004s}$; ② $\frac{0.01s+1}{0.004s}$; ③ $\frac{0.256s+1}{0.018s}$; ④ $\frac{0.047s+1}{0.018s}$ 。利用 MATLAB 进行仿真, 画出系统的阶跃响应曲线, 说明哪种参数好。

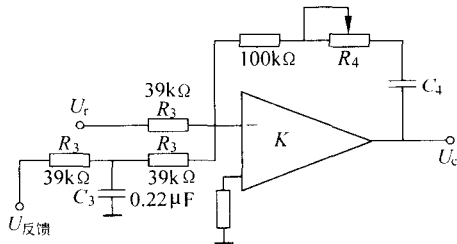


图 1-9 PI 调节器电路原理图

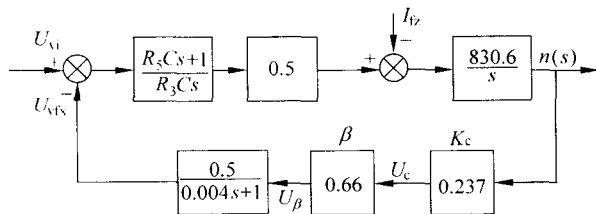


图 1-10 具有 PI 调节器的速度环方框图

(2) 如果给定 $C_1 = 0.1 \mu\text{F}$ 和 $C_1 = 0.47 \mu\text{F}$, 请设计最佳的校正参数(可按高阶最优设计), 并求出相应的 R_1 值, 画出此时的 Bode 图, 并画出时域响应曲线和闭环频率特性, 说明系统的主要动态特性 (M_p, t_s) 和闭环带宽、谐振峰值、谐振频率。

(3) 画出具有 PI 调节器的速度环静态特性, 即 $n = f(U_w)$, 并说明负载力矩对静特性的影响。

(4) 比较比例调节和比例积分调节的优缺点。

1.4.3 速度环仿真举例

由图 1-8 得到的简化方框图, 可在 MATLAB 的 SIMULINK 里绘制相应的仿真图。这里要注意的是由于运算放大器和电机都存在饱和环节, 在仿真时也应该加入两个饱和 (Saturation) 环节, 如图 1-11 所示。

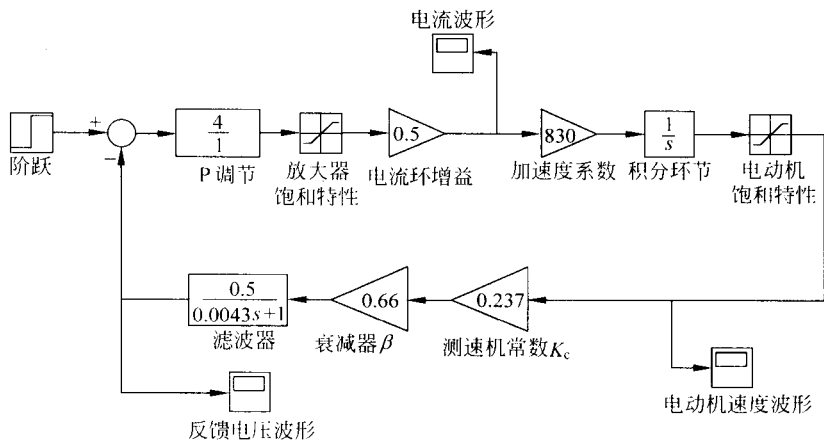


图 1-11 考虑饱和时的速度环仿真图

当速度环采用比例(P)调节器时,采用参考数据 $\beta=0.66$, $K_p=4$ 。将运放后的饱和模块设为 ± 11 V,将测速电机后的饱和模块设为 ± 120 rad/s,以 1 V 的阶跃输入,仿真图如图 1-11 所示。可得反馈电压信号的时域响应曲线如图 1-12 所示。同时,观察电动机电枢电流 I 的响应曲线如图 1-13 所示。

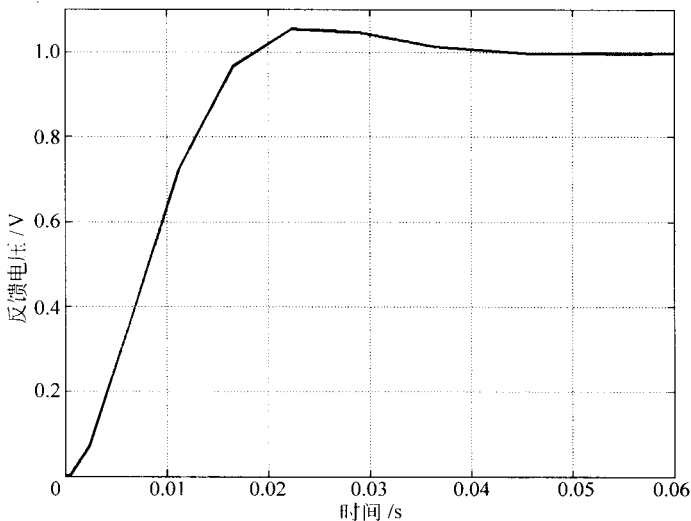


图 1-12 反馈电压信号的时域响应曲线

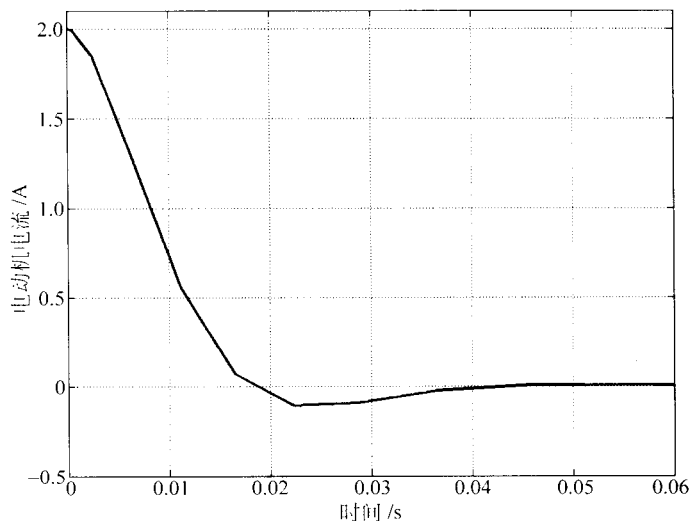


图 1-13 电动机电流的时域响应曲线

图 1-11 中的各模块可在 SIMULINK 的子模块中找到：

在 Sources 中可以找到 Step；

在 Math Operations 中可以找到加法器和 Gain；

在 Continuous 中可以找到 Transfer Fcn；

在 Sinks 中可以找到 Scope；

在 Discontinuity 中可以找到 Saturation；

另外按 Ctrl+r 键可以使模块顺时针旋转 90° 。

由图 1-13 可见,电动机枢电流没有达到饱和(5 A 饱和),由于后面存在一个积分环节,使稳态最终趋于 0。电动机转速的单位阶跃响应曲线如图 1-14 所示。

为了求得系统的闭环带宽,首先需要计算闭环传递函数,这里可以采用 3 种方法,一是手工计算,二是利用 feedBack 函数,用 $\text{sys}=\text{feedBack}(\text{sys1},\text{sys2})$ 的形式求出闭环传递函数,其中 sys1、sys2 分别为前向通道和反馈回路的传递函数。编写如下程序进行计算。

```
b=0.5;
Kp=4;
num1=Kp*b*830;
den1=[1,0];
sys1=tf(num1,den1);
num2=0.237*0.66*0.5;
den2=[0.0043,1];
```



```
sys2=tf(num2,den2);  
sys=feedBack(sys1,sys2);  
Bode(sys);  
grid;
```

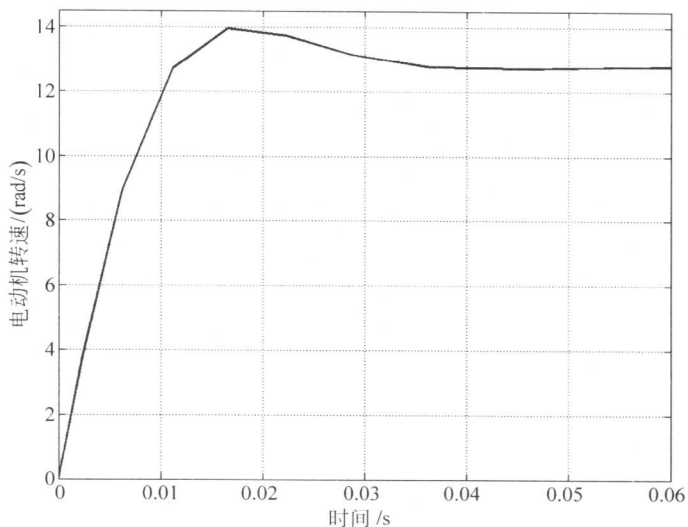


图 1-14 电动机转速的时域响应曲线

闭环的 Bode 图如图 1-15 所示。在 Bode 图上放大后可以看到系统闭环频宽 200 rad/s (约 30 Hz)。

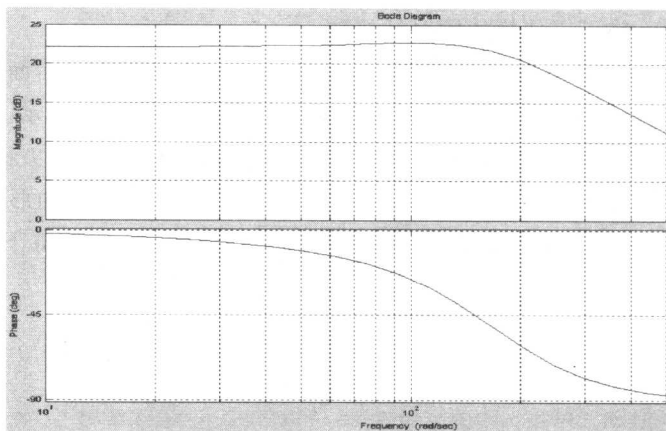


图 1-15 调速系统闭环的 Bode 图