

ZIDONGKONGZHI
XILIESHIYANJIAOCHENG

自动控制系列 实验教程

高鸿雁 李 娟 主编

中国石油大学出版社

自动控制 系列实验教程

主 编 高鸿雁 李 娟
副主编 赵丽清 王至秋 佟春明

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

自动控制系列实验教程/高鸿雁,李娟主编. —东营:
中国石油大学出版社,2009.7
ISBN 978-7-5636-2879-7

I. 自… II. ①高…②李… III. 自动控制系统—高等学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 120866 号

书 名: 自动控制系列实验教程
作 者: 高鸿雁 李 娟

责任编辑: 宋秀勇 满云凤(0546—8392139)
封面设计: 赵志勇

出版者: 中国石油大学出版社(山东 东营,邮编 257061)
网 址: <http://www.uppbook.com.cn>
电子信箱: yibian8392139@163.com
印刷者: 莱芜市圣龙印务有限责任公司
发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546—8392139)
开 本: 180×235 1/16 印张:14.125 字数:287千字 插页:1
版 次: 2009年8月第1版第1次印刷
定 价: 23.00元

前 言

随着高校实验条件的不断改善,实验课程所占的比重也在不断地提高。实验课程对于培养学生的工程实践能力和创新能力具有重要作用,实验教材的实用性更是搞好实验教学的关键。为此,根据目前自动控制相关实验课程的需要,编写了这本实验教程。本书把实验教学的理论验证、综合提高以及独立设计结合起来,力争使学生在有限的课时内,掌握完整的实验方法,为以后的学习以及工作打下基础。

本书共分为五大部分,主要内容包括:自动控制原理实验、计算机控制实验、机械工程控制基础实验、现代控制理论实验以及数值分析实验。以上实验都可在自动控制原理实验箱和微机上完成。其中各部分都可作为相关专业的实验教材单独使用,为方便不同专业学生使用,将自动控制原理实验中的部分实验重复作为机械工程控制基础实验。考虑课时要求和精简教材内容的需要,每部分都尽量选取比较典型的实验,验证性、设计性和综合性实验也按照一定比例包含在内。附录中对实验箱的具体模块的应用和微机使用的软件做了相应的简介。

本书可作为高等学校电气信息类专业以及相近专业的实验教材,也可作为实习设计的参考书。

参加本书编写的有青岛农业大学的高鸿雁、李娟、赵丽清、王志秋、佟春明、李霞(第二部分),全书由高鸿雁统稿完成。此外,本书的编写还得到了龚丽农教授的大力帮助,在此表示衷心感谢!

由于编者水平有限,有不当之处,恳请读者批评指正。

编 者

2009 年 7 月

目 录

第一部分 自动控制原理实验

实验一	典型环节的模拟研究	3
实验二	二阶系统瞬态响应和稳定性	12
实验三	开环增益与零极点对系统性能的影响	17
实验四	控制系统根轨迹分析	30
实验五	控制系统的频率特性测量	35
实验六	线性系统串联校正	38
实验七	自动控制系统的稳定性实验	43
实验八	典型非线性环节的静态特性	47
实验九	非线性环节及系统研究	51
实验十	采样系统分析	55
实验十一	极点配置全状态反馈控制	59
实验十二	模拟温度闭环控制实验	64

第二部分 计算机控制实验

实验一	模/数、数/模转换	69
实验二	采样与保持	75
实验三	积分分离 PID 控制	80
实验四	最小拍控制系统	86
实验五	大林算法	90
实验六	直流电机闭环调速	94

第三部分 机械工程控制基础实验

实验一	典型环节的模拟研究	101
实验二	典型系统瞬态响应和稳定性	110
实验三	控制系统的频率特性测量	115
实验四	线性系统串联校正	119
实验五	典型非线性环节的静态特性	124

实验六 采样系统分析·····	128
-----------------	-----

第四部分 现代控制理论实验

实验一 系统的传递函数阵和状态空间表达式的转换·····	135
实验二 多变量系统的能控、能观和稳定性分析 ·····	137
实验三 系统设计——状态观测器的设计·····	141

第五部分 数值分析实验

实验一 Gauss 列主元消去法 ·····	145
实验二 直接三角分解法·····	146
实验三 Jacobi 迭代法 ·····	148
实验四 Gauss-Seidel 迭代法 ·····	150
实验五 逐次超松弛迭代法(SOR)·····	151
实验六 牛顿插值多项式·····	153
实验七 组合型(复化)Simpson 求积公式 ·····	154
实验八 自适应求积公式·····	156
实验九 龙格-库塔(Runge-Kutta)法 ·····	158
实验十 非线性方程求根的弦截法·····	159
实验十一 牛顿迭代法(Newton-Paphson) ·····	160
实验十二 最小二乘法解线性方程组·····	162
实验十三 最小二乘拟合·····	164
实验十四 乘幂法·····	165
实验十五 改进的 Euler 方法 ·····	167
实验十六 解微分方程第一边值问题的差分方法·····	168

附 录

附录一 labACT 自控原理实验机构成及说明 ·····	173
附录二 虚拟示波器·····	179
附录三 计控实验调试界面下的主要命令·····	183
附录四 数值计算程序实例·····	185

第一部分

自动控制原理实验

实验一 典型环节的模拟研究

一、实验目的

1. 通过实验熟悉并掌握实验装置和上位机操作软件的使用方法。
2. 学习典型环节的电路模拟方法以及参数测试的方法。
3. 通过实验熟悉各种典型环节的传递函数及其特性。

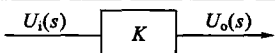
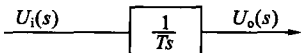
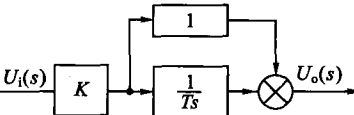
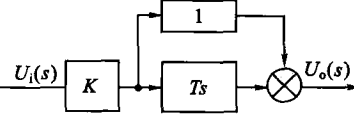
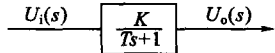
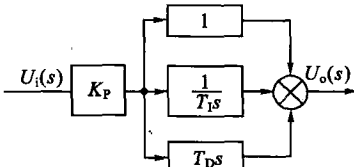
二、实验设备

1. 自动控制原理实验箱 1 套。
2. 微机 1 台。
3. 万用表 1 块。

三、实验内容及步骤

典型环节的方块图与传递函数如表 1-1 所示。

表 1-1 典型环节的方块图与传递函数

	方块图	传递函数
比例 (P)		$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = K$
积分 (I)		$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{Ts}$
比例积分 (PI)		$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = K \left(1 + \frac{1}{Ts} \right)$
比例微分 (PD)		$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = K (1 + Ts)$
惯性环节 (T)		$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{K}{1 + Ts}$
比例积分微分 (PID)		$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = K_p + \frac{K_p}{T_I s} + K_p T_D s$

在实验中欲观测实验结果时,可选用普通示波器,也可选用本实验机配套的虚拟示波器。

如果选用虚拟示波器,只要运行 labACT 程序,选择自动控制菜单下典型环节模拟研究中的相应实验项目,就会弹出虚拟示波器的界面,点击开始即可使用本实验机配套的虚拟示波器(B3)单元的 CH1 测孔测量波形。具体用法参见用户手册中的示波器部分。

1. 观察比例环节的阶跃响应曲线

典型比例环节模拟电路如图 1-1 所示。

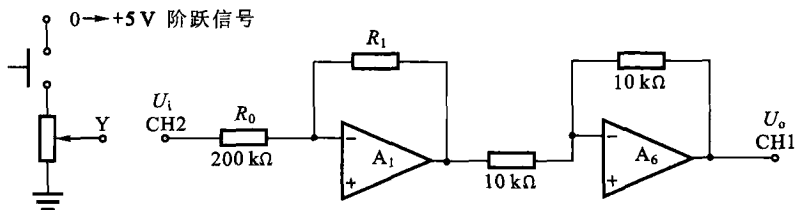


图 1-1 典型比例环节模拟电路

实验步骤:

(1) 用信号发生器(B1)的“阶跃信号输出”和“幅度控制电位器”构造输入信号(U_i):B1 单元中电位器的左边 K3 开关拨下(GND),右边 K4 开关也拨下(0/+5 V 阶跃)。阶跃信号输出(B1 的 Y 测孔)调整为 4 V(调节方法:按下信号发生器(B1)阶跃信号按钮,L9 灯亮,调节电位器,用万用表测量 Y 测孔)。

(2) 构造模拟电路:按图 1-1 安置短路套及测孔连线。

(3) 运行、观察、记录(注:CH1 选“×1”挡,时间量程选“×1”挡):

① 打开虚拟示波器的界面,点击开始,按下信号发生器(B1)阶跃信号按钮(0→+4 V 阶跃),用示波器观测 A_6 输出端(U_o)的实际响应曲线 $U_o(t)$ 。

② 改变比例系数(改变模拟运算单元 A_1 的反馈电阻 R_1),重新观测,将结果填入实验报告。

2. 观察惯性环节的阶跃响应曲线

典型惯性环节模拟电路如图 1-2 所示。

实验步骤:

(1) 用信号发生器(B1)的“阶跃信号输出”和“幅度控制电位器”构造输入信号(U_i):B1 单元中电位器的左边 K3 开关拨下(GND),右边 K4 开关也拨下(0/+5 V 阶跃)。阶跃信号输出(B1 的 Y 测孔)调整为 4 V(调节方法:按下信号发生器(B1)阶跃信号按钮,L9 灯亮,调节电位器,用万用表测量 Y 测孔)。

(2) 构造模拟电路:按图 1-2 安置短路套及测孔连线。

(3) 运行、观察、记录(注:CH1 选“×1”挡,时间量程选“×1”挡):

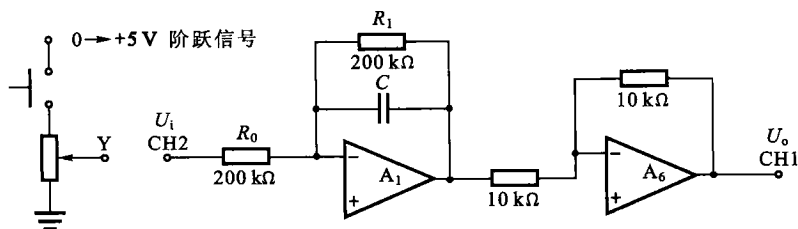


图 1-2 典型惯性环节模拟电路

① 打开虚拟示波器的界面,点击开始,用示波器观测 A_6 输出端(U_o),按下信号发生器(B1)阶跃信号按钮时($0 \rightarrow +4$ V 阶跃),等待完整波形出来后,移动虚拟示波器横游标到 4 V(输入)“ $\times 0.632$ ”处,得到与惯性曲线的交点,再移动虚拟示波器两根纵游标,从阶跃开始到曲线的交点,量得惯性环节模拟电路时间常数 T 并观测 A_6 输出端(U_o)的实际响应曲线 $U_o(t)$ 。

② 改变时间常数及比例系数(分别改变模拟运算单元 A_1 的反馈电阻 R_1 和反馈电容 C),重新观测,将结果填入实验报告。

3. 观察积分环节的阶跃响应曲线

典型积分环节模拟电路如图 1-3 所示。

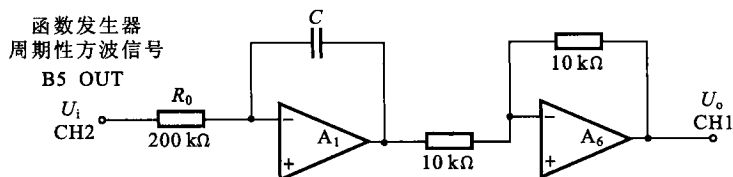


图 1-3 典型积分环节模拟电路

实验步骤:

(1) 为了避免积分饱和,将函数发生器(B5)所产生的周期性矩形波信号(OUT)代替信号发生器(B1)中的人工阶跃输出作为系统的信号输入(U_i),该信号为零输出时,将自动对模拟电路锁零。

① 在显示与功能选择(D1)单元中,通过波形选择按键选中“矩形波”(矩形波指示灯亮)。

② 量程选择开关 S2 置下挡,调节“设定电位器 1”,使矩形波宽度在 1 秒左右(D1 单元左显示)。

③ 调节 B5 单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压为 1 V(D1 单元右显示)。

(2) 构造模拟电路:按图 1-3 安置短路套及测孔连线。

(3) 运行、观察、记录(注:CH1 选“ $\times 1$ ”挡,时间量程选“ $\times 1$ ”挡):

① 打开虚拟示波器的界面,点击开始,用示波器观测 A_6 输出端(U_o),调节调宽电位器使宽度从 0.3 秒开始调到积分输出在虚拟示波器顶端(即积分输出电压接近 $+5\text{ V}$)为止。

② 等待完整波形出来后,移动虚拟示波器横游标到 1 V (与输入相等)处,再移动另一根横游标到 $\Delta U = 1\text{ V}$ (与输入相等)处,得到与积分曲线的交点,再移动虚拟示波器两根纵游标,从阶跃开始到曲线的交点,量得积分环节模拟电路时间常数 T_1 并观测 A_6 输出端(U_o)的实际响应曲线 $U_o(t)$ 。

③ 改变时间常数(分别改变模拟运算单元 A_1 的输入电阻 R_0 和反馈电容 C),重新观测,将结果填入实验报告(可将模拟运算单元 A_1 的输入电阻的短路套(S4)去掉,将可变元件库(A11)中的可变电阻跨接到 A_1 单元的 H1 和 IN 测孔上,调整可变电阻继续实验)。

注:“S-ST”用短路套短接!

4. 观察比例积分环节的阶跃响应曲线

典型比例积分环节模拟电路如图 1-4 所示。

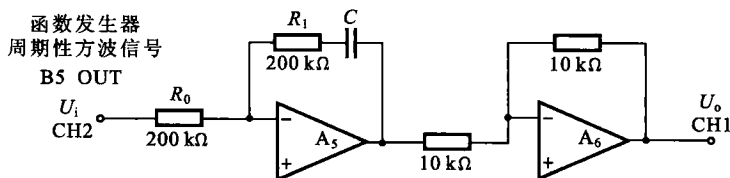


图 1-4 典型比例积分环节模拟电路

实验步骤:

(1) 为了避免积分饱和,将函数发生器(B5)所产生的周期性矩形波信号(OUT),代替信号发生器(B1)中的人工阶跃输出作为系统的信号输入(U_i),该信号为零输出时,将对模拟电路自动锁零。

① 在显示与功能选择(D1)单元中,通过波形选择按键选中“矩形波”(矩形波指示灯亮)。

② 量程选择开关 S2 置下挡,调节“设定电位器 1”,使矩形波宽度在 1 秒左右(D1 单元左显示)。

③ 调节 B5 单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压为 1 V (D1 单元右显示)。

(2) 构造模拟电路:按图 1-4 安置短路套及测孔连线。

(3) 运行、观察、记录(注:CH1 选“ $\times 1$ ”挡,时间量程选“ $\times 1$ ”挡):

① 打开虚拟示波器的单迹界面,点击开始,用示波器观测 A_6 输出端(U_o)。

② 待完整波形出来后,移动示波器两根横游标使 $\Delta U = K_P \times$ 输入电压,得到与积分曲线的两个交点。

③ 再分别移动示波器两根纵游标到积分曲线的两个交点,量得积分环节模拟电路时间常数 T_1 。

④ 改变时间常数及比例系数(分别改变运算模拟单元 A_5 的输入电阻 R_0 和反馈电容 C),重新观测,将结果填入实验报告。

注:“S-ST”用短路套短接!

5. 观察比例微分环节的阶跃响应曲线

典型比例微分环节模拟电路如图 1-5 所示。

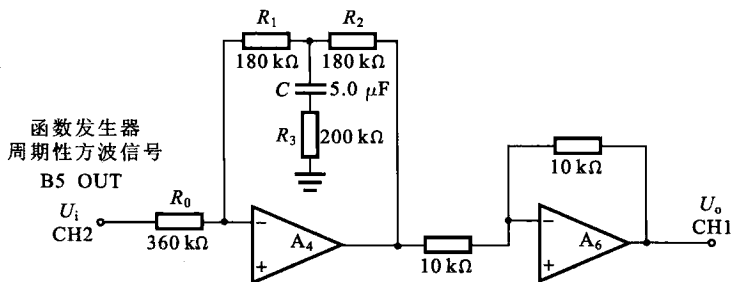


图 1-5 典型比例微分环节模拟电路

实验步骤:

(1) 将函数发生器(B5)单元的矩形波输出作为系统输入 R (连续的正输出宽度足够大的阶跃信号)。

① 在显示与功能选择(D1)单元中,通过波形选择按键选中“矩形波”(矩形波指示灯亮)。

② 量程选择开关 S_2 置下挡,调节“设定电位器 1”,使矩形波宽度在 1 秒左右(D1 单元左显示)。

③ 调节 B5 单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压为 0.5 V(D1 单元右显示)。

(2) 构造模拟电路:按图 1-5 安置短路套及测孔连线。

(3) 运行、观察、记录(CH1 选“ $\times 1$ ”挡,时间量程选“ $/4$ ”挡):

① 打开虚拟示波器的界面,点击开始,用示波器观测系统的 A_6 输出端(U_o)。等待完整波形出来后,把最高端电压(4.77 V)减去稳态输出电压(0.5 V),然后乘以 0.632,得到 $\Delta U = 2.7$ V。

② 移动虚拟示波器两根横游标,从最高端开始到 $\Delta U = 2.7$ V 处为止,得到与微分的指数曲线的交点,再移动虚拟示波器两根纵游标,从阶跃开始到曲线的交点,量得 $\Delta t = 0.048$ s。

③ 已知 $K_D = 10$, 则图 1-5 的比例微分环节模拟电路微分时间常数: $T_D = K_D \times \Delta t = 0.048 \text{ s}$

注: “S-ST”用短路套短接!

6. 观察 PID(比例积分微分)环节的响应曲线

PID(比例积分微分)环节模拟电路如图 1-6 所示。

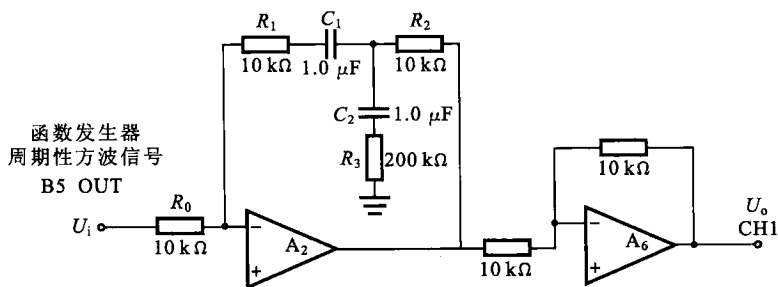


图 1-6 PID(比例积分微分)环节模拟电路

实验步骤:

(1) 为了避免积分饱和, 将函数发生器(B5)所产生的周期性矩形波信号(OUT), 代替信号发生器(B1)中的人工阶跃输出作为系统的信号输入(U_i), 该信号为零输出时, 将对模拟电路自动锁零。

① 在显示与功能选择(D1)单元中, 通过波形选择按键选中“矩形波”(矩形波指示灯亮)。

② 量程选择开关 S2 置下挡, 调节“设定电位器 1”, 使矩形波宽度在 0.1 秒左右(D1 单元左显示)。

③ 调节 B5 单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压为 0.2 V(D1 单元右显示)。

(2) 构造模拟电路: 按图 1-6 安置短路套及测孔连线。

(3) 运行、观察、记录(CH1 选“×1”挡, 时间量程选“/4”挡):

① 打开虚拟示波器的界面, 点击开始, 用示波器观测 A_6 输出端(U_o)。

② 等待完整波形出来后, 移动虚拟示波器两根横游标使 $\Delta U = K_p \times$ 输入电压, 得到与积分曲线的两个交点。

③ 再分别移动示波器两根纵游标到积分曲线的两个交点, 量得积分环节模拟电路时间常数 T_i 。

④ 改变时间常数及比例系数(分别改变运算模拟单元 A_2 的输入电阻 R_0 和反馈电阻 R_1), 重新观测, 将结果填入实验报告。

注: “S-ST”用短路套短接!

四、实验要求

1. 了解 labACT 自动控制原理实验箱的使用方法。
2. 求出各典型环节在给定参数下的阶跃响应曲线,并作书面报告。
3. 观测各种典型环节的阶跃响应曲线。
4. 观测参数变化对典型环节阶跃响应的影响。

五、实验报告要求

1. 实验前选定典型环节模拟电路的元件(电阻、电容)参数各两组,并推导各典型环节传递函数参数与模拟电路电阻、电容值的关系以及画出理想阶跃响应曲线。
2. 实验观测记录。
3. 实验结果分析、讨论和建议。

六、思考题

1. 由运放组成的各种环节的传递函数是在什么条件下推导出的? 怎样选用运算放大器?
2. 各典型环节后面若无比例环节,则其传递函数与之前有什么区别?
3. 惯性环节在什么情况下可近似为比例环节? 在什么情况下可近似为积分环节?

附:实验记录表格(见表 1-2)。

表 1-2 典型环节实验结果

典型环节	传递函数参数与模拟电路参数关系	单位阶跃响应	理想阶跃响应曲线			实测阶跃响应曲线
比例(P)	$K=R_1/R_0$	$u_o(t)=K$	$R_0=200\text{ k}\Omega$	$R_1=100\text{ k}\Omega$		
				$R_1=200\text{ k}\Omega$		

续表 1-2

典型环节	传递函数 参数与模拟电路参数关系	单位阶跃响应	理想阶跃响应曲线			实测阶跃响应曲线
惯性 (T)	$K=R_1/R_0$ $T=R_1C$	$u_o(t)=K(1-e^{-\frac{t}{T}})$	$R_1=200\text{ k}\Omega$ $R_0=200\text{ k}\Omega$	$C=1\text{ }\mu\text{F}$ $C=2\text{ }\mu\text{F}$		
积分 (I)	$T=R_0C$	$u_o(t)=\frac{1}{T}t$	$R_0=200\text{ k}\Omega$	$C=1\text{ }\mu\text{F}$		
				$C=2\text{ }\mu\text{F}$		
比例微分 (PI)	$K=\frac{R_1}{P_0}$ $T=R_0C$	$u_o(t)=K+\frac{1}{T}t$	$R_1=200\text{ k}\Omega$ $R_0=200\text{ k}\Omega$	$C=1\text{ }\mu\text{F}$		
				$C=2\text{ }\mu\text{F}$		

续表 1-2

典型环节	传递函数 参数与模 拟电路参 数关系	单位阶 跃响应	理想阶跃响应曲线			实测阶跃响应曲线
比例 微分 (PD)	$K = \frac{R_1 + R_2}{R_0}$ $T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$	理想: $u_o(t) = KT\delta(t) + K$ 实测: $u_o(t) = \frac{R_1 + R_2}{R_0} + \frac{R_1 R_2}{R_0 R_3} e^{-t/R_3 C}$	$R_0 = 10 \text{ k}\Omega$ $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$ $R_3 = 200 \text{ k}\Omega$	$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$		
				$R_2 = 20 \text{ k}\Omega$		
比例 积分 微分 (PID)	$K_P = \frac{R_1}{R_0}$ $T_1 = R_0 C_1$ $T_D = \frac{R_1 R_2 C_2}{R_0}$	理想: $u_o(t) = T_D \delta(t) + K_P + \frac{1}{T_1} t$ 实测: $u_o(t) = \frac{R_1 + R_2}{R_0} + \frac{1}{R_0 C_1} t + \frac{R_2 C_2}{R_0 C_1} \left[1 + \left(\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2} - 1 \right) e^{-t/R_3 C_2} \right]$	$R_0 = 10 \text{ k}\Omega$ $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ $R_3 = 200 \text{ k}\Omega$ $C_1 = C_2 = 1 \text{ }\mu\text{F}$	$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$		
				$R_2 = 20 \text{ k}\Omega$		