

经典教材辅导用书



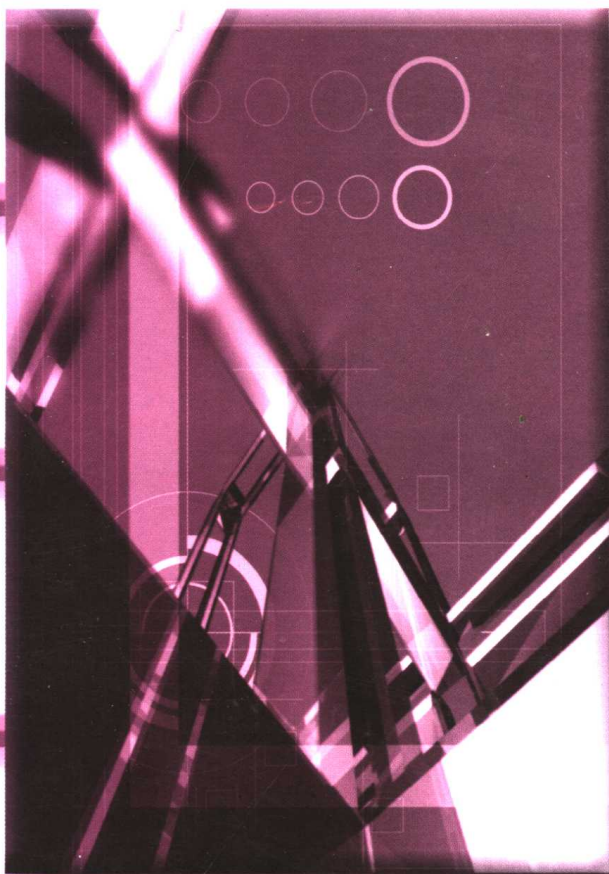
新编自动控制原理题解

胡寿松主编《自动控制原理》(第三版、第四版)

李友善主编《自动控制原理》(修订版)

习题选解

张正方 李玉清 康远林 编



华中科技大学出版社

新编自动控制原理题解

张正方 李玉清 康远林 编

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

新编自动控制原理题解/张正方 李玉清 康远林 编
武汉:华中科技大学出版社, 2003年4月
ISBN 7-5609-2923-0

I. 新…

II. ①张… ②李… ③康…

III. 自动控制理论-高等学校-试题

IV. TP13-44

新编自动控制原理题解 张正方 李玉清 康远林 编

责任编辑:李 德

封面设计:潘 群

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87545012

录 排:华中科技大学出版社照排室

印 刷:仙桃市新华印刷厂

开本:850×1168 1/32

印张:11.75

字数:284 000

版次:2003年4月第1版

印次:2003年9月第2次印刷

定价:14.80元

ISBN 7-5609-2923-0/TP·503

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

序

编者多年来从事“自动控制原理”、“最优控制”课程的教学,在教学中一直以胡寿松主编的《自动控制原理》(第三版、第四版)和李友善主编的《自动控制原理》(修订版)作为教材。以上述两种教材的内容编写了《新编自动控制原理题解》。为节省篇幅,在每章中略去内容提要,所以阅读本书时,请读者务必认真阅读上述两种教材之一。

《新编自动控制原理题解》可作为自动化类专业本科生学习“自动控制原理”课程的辅助参考书。可帮助学生深入、灵活掌握课程的基本概念、基本理论和基本方法。可供立志报考自动化类专业研究生的学生作为复习材料使用。

本书从第一章到第八章的内容属于经典控制理论范围。第九章介绍近代控制理论的基础——状态空间分析法。第十章介绍近代控制理论的核心——最优控制基础。

本书在编写过程中得到华中科技大学出版社的热情鼓励、支持和帮助。在此谨向他们致以诚挚的谢意。由于时间和编者的水平有限,书中难免存在问题和错误,希望读者批评指正。

编 者

2003 年 2 月

目 录

第一章	自动控制的一般概念	(1)
第二章	控制系统的数学模型	(14)
第三章	控制系统的时域分析法	(57)
第四章	根轨迹法	(99)
第五章	频率法	(141)
第六章	应用频率法综合串接校正装置	(188)
第七章	线性离散系统的分析与校正	(211)
第八章	非线性系统分析	(238)
第九章	线性系统的状态空间分析与综合	(271)
第十章	最优控制基础	(331)
参考文献		(370)

第一章 自动控制的一般概念

1-1 图 1-1 所示的是液位自动控制系统原理示意图。在任何情况下,都希望液面高度 C 维持不变。试说明系统工作原理,并画出系统方块图。

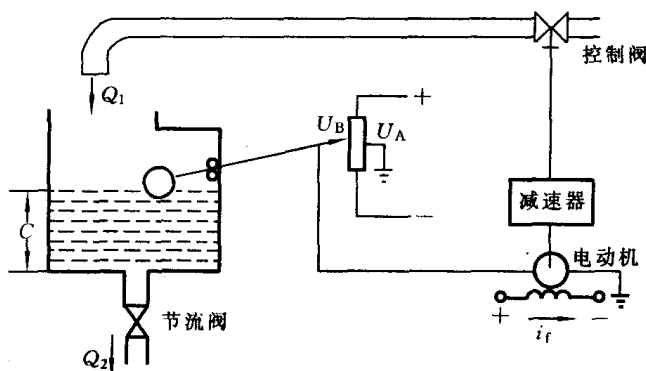


图 1-1

解 系统的控制对象是水箱,被控量(系统的输出量)是水位高度 C ,工艺上要求恒定。出水量 Q_2 影响水位高低,因而是扰动。保持 C 恒定的控制量是进水量 Q_1 。进水量的大小由电动机通过减速器改变控制阀的开度来实现。因此,电动机、减速器、控制阀是执行机构。电动机电枢电压 $U=U_A-U_B$,其中 U_A 为给定值, U_B 为反馈量。 U_B 的大小取决于浮球的位置,而浮球的位置取决于水位 C 。由浮球—杠杆—电位器可动触头构成了检测反馈元件。

当 $Q_1=Q_2$ 时,液位 C 保持恒定,此时电动机不转, $U=U_A-U_B=0$ 。设 Q_2 增加, C 下降,通过浮球及杠杆的反馈作用,将使可动触头上移, U_B 增大, $U=U_A-U_B$ 为负,从而使电动机反转,电动机使阀门开大,从而使 Q_1 增加,水位 C 上升。这一过程直到水位恢

复到原来位置为止。此时, $U = U_A - U_B = 0$ 。当 Q_2 减小时, C 上升, 通过浮球及杠杆的反馈作用, 将使可动触头下移, U_B 减小, $U = U_A - U_B$ 为正, 使电动机正转, 电动机使阀门关小, 从而使 Q_1 减小, 这一过程直到水位恢复到原来位置为止。此时, $U = U_A - U_B = 0$ 。

系统的方块图如图 1-2 所示。

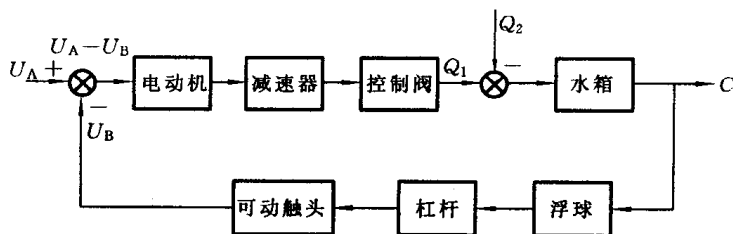


图 1-2

需要说明的是: 图 1-1 所示系统 在阶跃扰动作用下是无稳态误差的。

1-2 如图 1-3 所示的为液位自动控制系统。希望液位高度 C 尽量维持恒定。试说明系统的工作原理, 并画出系统的方块图。

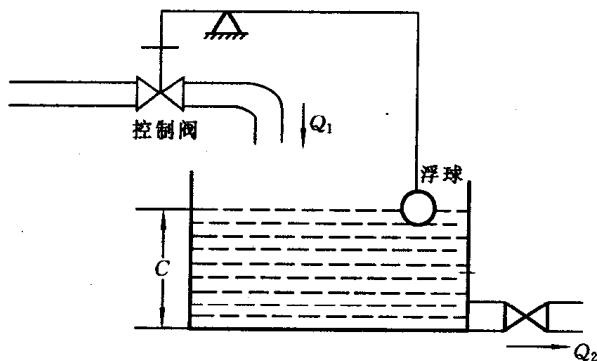


图 1-3

解 系统的工作原理为:

当扰动 Q_2 增加时, 液面 C 随着降低, 浮球降落, 通过杠杆作

用移动控制阀的开度,流量 Q_1 增加,水位开始上升。当 $Q_1=Q_2$ 时达到平衡状态。当流出水量 Q_2 减小时,读者可自行分析。

方块图如图 1-4 所示。

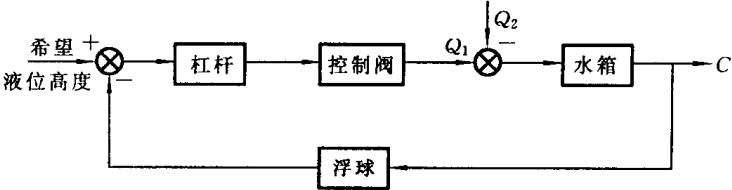


图 1-4

此系统在阶跃扰动作用下,存在稳态误差。

1-3 他激直流发电机的电压自动控制系统如图 1-5 所示。在任何情况下,都希望电压维持不变。试说明系统的工作原理,并画出系统的方块图。

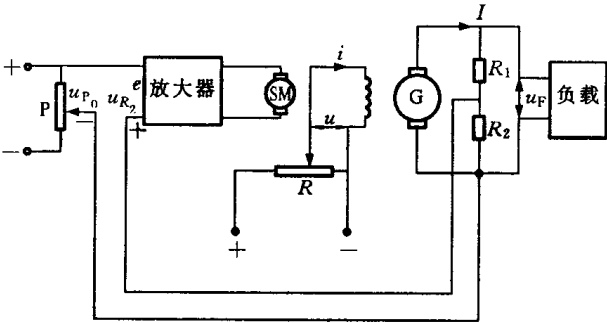


图 1-5

解 他激直流发电机是控制对象,发电机端电压 u_F 是被控量(即系统的输出)。电动机 SM 带动电位器可动触头,用来改变发电机激磁电压 u ,从而改变激磁电流 i (控制作用),以使发电机 G 端电压保持恒定。反馈电压 u_{R_2} 由电阻 R_2 上取得。反馈电压 u_{R_2} 与给定值 u_{P_0} 反极性连接,实现负反馈。

该系统属于定值控制系统。其工作原理如下:

如果扰动(负载电流 I)使发电机端电压 u_F 下降,则 u_{R_2} 随之下降。偏差 $e = u_{P_0} - u_{R_2}$ 为正。经放大后在电动机电枢两端加上一正电压,它使电动机正转,导致激磁电压 u 增大,激磁电流 i 增大,发电机端电压 u_F 增大,直至等于给定值为止。此时,偏差电压 e 等于零。若负载电流 I 减小,则 u_F 升高,这时的控制过程请读者自行分析。

系统的方块图如图 1-6 所示。

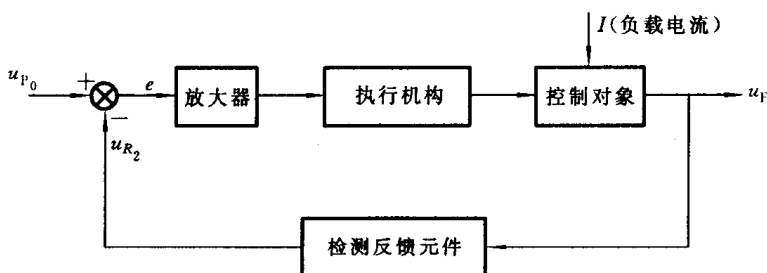


图 1-6

本系统在阶跃扰动作用下,稳态误差为零。

1-4 他激直流发电机端电压自动控制系统如图 1-7 所示。

试说明系统的工作原理,并画出系统的方块图。

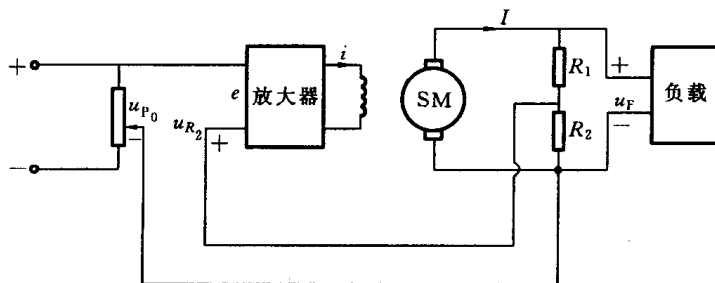


图 1-7

解 他激直流发电机是控制对象,其端电压 u_F 是被控量(系统的输出量),负载电流 I 是扰动量。工艺上要求端电压 u_F 尽量保

持恒定。图中用 R_1 、 R_2 串联在发电机两端,并在 R_2 上取出一部分电压 u_{R_2} ,它与 u_F 成比例,故 u_{R_2} 的变化代表了 u_F 的变化, u_{R_2} 可以作为 u_F 的测量值。 u_{R_2} 的给定值为 u_{P_0} , u_{R_2} 与 u_{P_0} 是反极性连接的,因而偏差电压 $e = u_{P_0} - u_{R_2}$ 。将 e 作为放大器(比例调节器)的输入量,放大器的输出量是发电机的激磁电流 i , i 与 e 成比例。

系统的工作原理为:

负载电流 I (扰动)增大,使 u_F 下降,则 u_{R_2} 减小,偏差 e 增大,激磁电流增大,故自动地使 u_F 上升,直至 u_F 恢复到希望值附近为止。反之,负载电流 I 减小,使 u_F 增大,则 u_{R_2} 上升,偏差 e 减小,经放大器使激磁电流 i 减小,自动地使 u_F 下降,直至 u_F 恢复到希望值附近为止。

系统的方块图如图 1-8 所示。

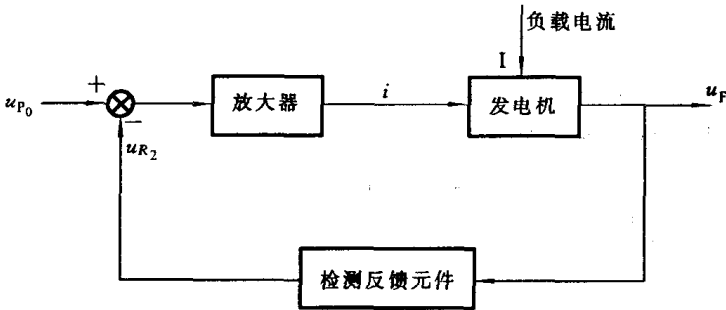


图 1-8

该系统在阶跃扰动作用下,存在稳态误差。

1-5 图 1-9 所示的是仓库大门自动控制系统原理示意图。试说明系统自动控制大门开闭的工作原理,并画出系统的方块图。

解 在图中,合上“开门”开关,给定电位器发出一电压信号,反映大门位置的检测电位器发出一电压信号。将两个电压信号比较后得到偏差电压信号,它作用在放大器的输入端。偏差电压信号经放大后驱动电动机带动卷筒使大门向上提升,这一过程一直到大门开到预定位置为止。若大门开启的程度不够,则调节给定电位

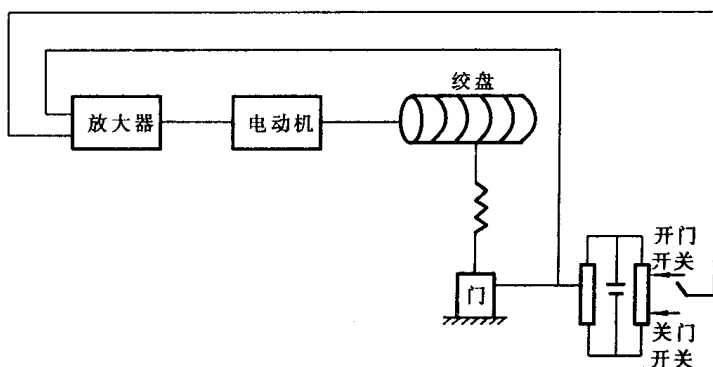


图 1-9

器“开门”触点,使其向上移即可。当合上“关门”开关时,其控制过程请读者自行分析。

不论合上“开门”开关还是合上“关门”开关,控制过程一直进行到偏差电压信号等于零为止。

系统的方块图如图 1-10 所示。

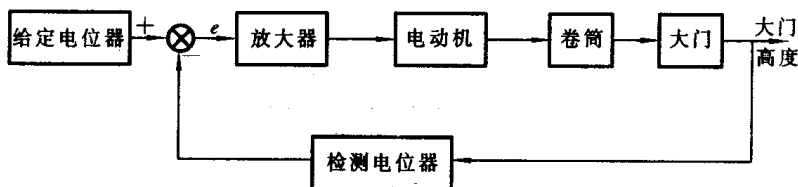


图 1-10

1-6 图 1-11 所示的是电炉温度控制系统的原理示意图。

试分析系统保持电炉温度恒定的工作过程,并指出系统的被控对象、被控量以及各部件的作用,最后画出系统的方块图。

解 电炉是用电阻丝加热的,工艺上要求炉温保持恒定。图中采用热电偶来测量温度并将炉温转换为电压信号,将其反馈输入端与给定电压比较,测量得到的电压信号与给定电压信号反极性连接,实现负反馈。二者的差值称为偏差电压,它经电压放大和功

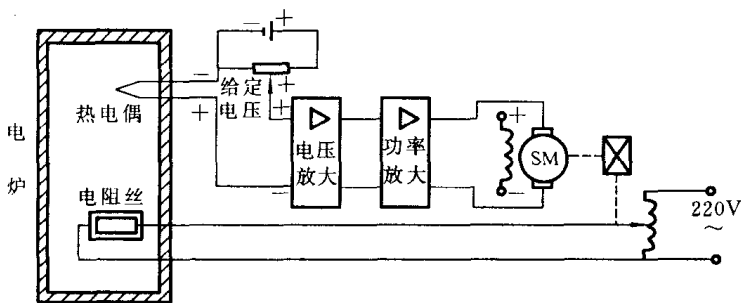


图 1-11

率放大去驱动直流电动机。电动机经减速器带动调压变压器的可动触头,改变电阻丝的供电电压,从而调节炉温。

当炉温偏低时,测量电压 u 小于给定电压 u_0 ,二者比较得偏差电压 $\Delta u = u_0 - u$, Δu 为正时,电动机“正”转,使调压器的可动触头上移,电阻丝的供电电压增加,电流加大,炉温上升,直至炉温升至给定值为止。 $u = u_0$, $\Delta u = 0$,电动机停转,炉温保持恒定。

当炉温偏高时, Δu 为负,经放大后使电动机“反”转,触头下移,使供电电压减小,直至炉温等于给定值为止。

系统的被控对象是电炉,被控量是电炉炉温,电动机、减速器、调压器是执行机构,热电偶是检测元件。

系统的方块图如图 1-12 所示。

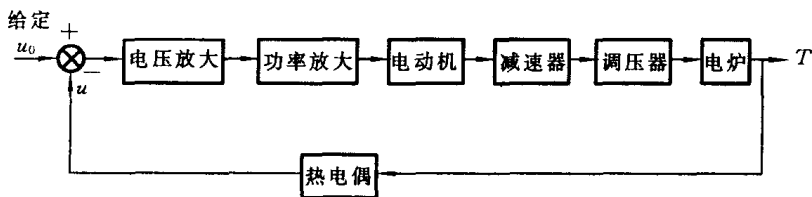


图 1-12

1-7 图 1-13 所示的是自整角机随动系统原理示意图,系统的功能是,使接收自整角机 TR 的转子角位移 θ_0 与发送自整角机

TX 的转子角位移 θ_i 始终保持一致。试说明系统是如何工作的,并指出被控对象、被控量以及控制装置各部件的作用,并画出系统方块图。

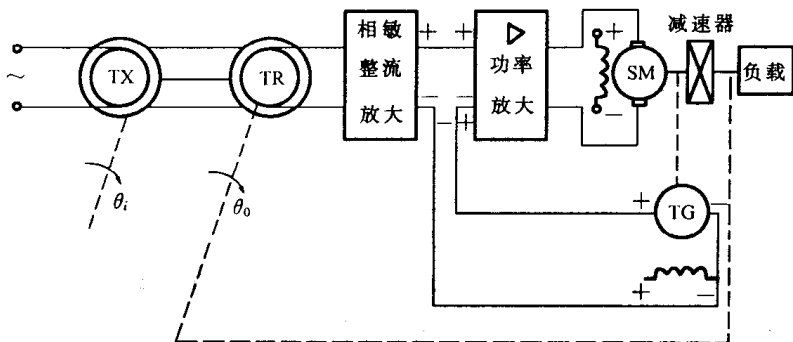


图 1-13

解 发送自整角机的转子与给定轴相连;接收自整角机的转子与负载轴(从动轴)相连。TX 与 TR 组成角差测量线路。若发送自整角机的转子离开平衡位置转过一个角度 θ_i ,则在接收自整角机转子的单相绕组上将感应出一偏差电压 u_e ,它是一个振幅为 u_{em} 、频率与发送自整角机激磁频率相同的交流调幅电压,即

$$u_e = u_{em} \cdot \sin \omega t \quad 1)$$

在一定范围内, u_{em} 正比于 $\theta_i - \theta_0$:

$$u_{em} = k_e [\theta_i - \theta_0] \quad 2)$$

将 2) 式代入 1) 式,得:

$$u_e = k_e (\theta_i - \theta_0) \sin \omega t$$

这就是随动系统中接收自整角机所产生的偏差电压的表达式,它是一个振幅随偏差 $(\theta_i - \theta_0)$ 的改变而变化的交流电压。因此,在图 1-13 中, u_e 先经过相敏整流放大器变为直流电压,再经过功率放大器放大,放大后的直流信号作用在电动机电枢两端。电动机通过减速器带动负载和接收自整角机的转子,使其跟随着发送自整

角机的转子旋转,实现 $\theta_0 = \theta_i$,以达到跟随的目的。为使电动机转速恒定、平稳,引入测速负反馈。

依上述,可绘制系统的方块图如图 1-14 所示。

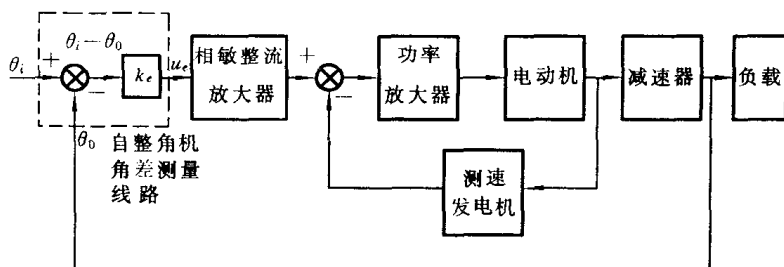


图 1-14

由图可知:被控对象是负载轴,被控量是负载轴转角 θ_0 ,电动机和减速器是执行机构,相敏整流放大器及功率放大器起着放大信号的作用,测速发电机是检测反馈元件。

1-8 图 1-15 所示的为水温控制系统示意图。冷水在热交换器中由通入的蒸汽加热,从而得到一定温度的热水。冷水流量的变化用流量计测量。试绘制系统的方块图,并说明为了保持热水温度为期望值,系统是如何工作的? 系统的被控对象和控制装置是什么?

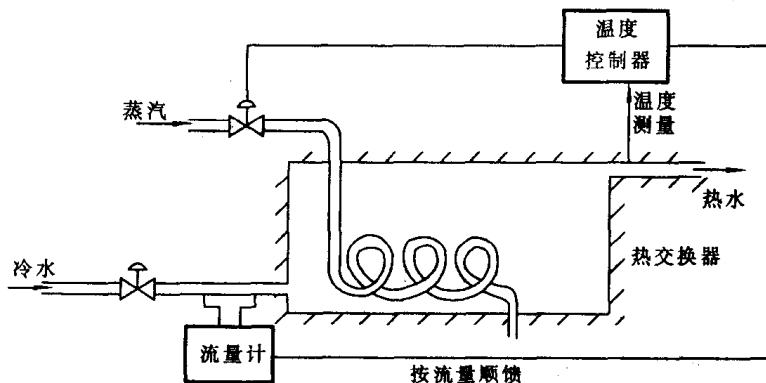


图 1-15

解 系统的方块图如图 1-16 所示。

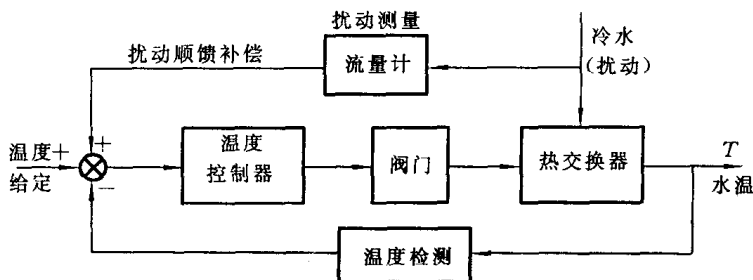


图 1-16

系统是复合控制系统，它的控制方式是把按偏差控制与扰动补偿的顺馈控制结合起来。

采用温度负反馈，由温度控制器对热水温度进行自动控制。若热水温度过高，控制器使阀门关小，蒸汽量减小，热水温度回到给定值。冷水流量是主要扰动量，用流量计测量扰动信号，将其送到控制器输入端，进行扰动顺馈补偿。当冷水流量减小时，补偿量减小，通过温度控制器使阀门关小，蒸汽量减少，以保持热水温度恒定。

系统的被控对象是热交换器。被控量是热水温度。控制装置是温度调节器。

1-9 图 1-17 所示的是一晶体管稳压电源电路图。试说明哪个是给定量、被控量、反馈量和扰动量，并画出系统的方块图，说明其自动调节过程。

解 由图可见：电阻 R_L 上的电压 U_L 是输出电压，它即是被控量。若将负载（电阻 R_L ）直接接到整流电路的输出电压 U 上，则当 R_L 减小即负载电流 I_L 增大时，整流电源等效内阻上的压降将增大，从而使得整流输出电压 U 减小（此时， U 为负载上的电压）。另外，电网电压的波动也会对整流输出电压产生影响。假设整流输出电压的波动为 ΔU 。显然，它是造成负载电压不稳定的原因。

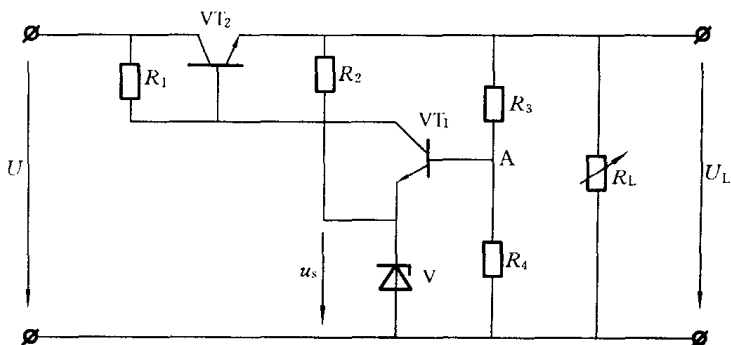


图 1-17

若增加一稳压电路于该线路中,则负载上的电压不再是整流电压 U 而是整流电压经调整管 VT_2 调节后输出的电压 U_L 。 VT_2 的导通程度将直接影响输出电压 U_L 的大小; VT_2 导通程度越大,则 U_L 就越大。而调整管 VT_2 的导通程度又取决于放大器 VT_1 的导通程度。 VT_1 的发射极电位由电阻 R_2 和稳压管 V 构成的稳压电路提供恒定的电位, VT_1 的基极电位 U_A 又取决于负载电压 U_L 。同时,由 R_2 和 R_3 构成的分压电路又提供输出的负载电压 U_L 的采样信号 U_A 。

由以上分析可知:

系统的输出量为 U_L (其给定值取决于稳压管 V 的稳压值), 检测元件为 R_3 、 R_4 构成的分压电路, 执行元件为调整管 VT_2 , 放大元件为放大器 VT_1 , 反馈量为电压负反馈, 扰动量为整流输出电压的波动 ΔU 。

系统的方块图如图 1-18 所示。

系统的自动调节过程如图 1-19 所示。

当负载电流增加或电网电压下降引起负载电压 U_L 减小时, U_A 下降。因 VT_1 管的发射极电位恒定, 故 U_{ibc} 减小, 从而 VT_1 的集电极电流 I_{c1} 减小, 电阻 R_1 上的压降 $I_{c1}R_1$ 也将减小, 导致调整管 VT_2 的基极电位升高, VT_2 的导通程度增大, 使得输出电压 U_L 增

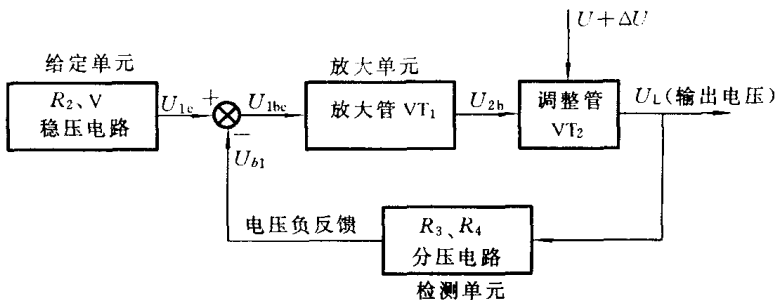


图 1-18

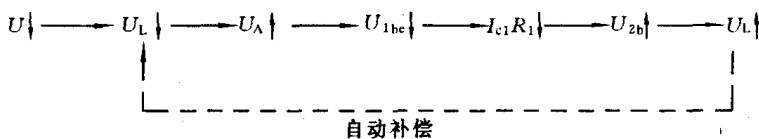


图 1-19

大,于是得到自动补偿。 U_L 增大时的自动调节过程请读者自行分析。

以上就是图 1-17 所示晶体管稳压电源的工作原理。

1-10 本题中(1)~(7)式是描述系统的微分方程,其中 $c(t)$ 为输出量, $r(t)$ 为输入量,试判断哪些是线性定常或时变系统,哪些是非线性系统?

$$(1) c(t) = 5 + r^2(t) + t \frac{d^2 r(t)}{dt^2}$$

$$(2) \frac{d^3 c(t)}{dt^3} + 3 \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + 6 \frac{dc(t)}{dt} + 8c(t) = r(t)$$

$$(3) t \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = r(t) + 3 \frac{dr(t)}{dt}$$

$$(4) c(t) = r(t) \cos \omega t + 5$$

$$(5) c(t) = 3r(t) + 6 \frac{dr(t)}{dt} + 5 \int_{-\infty}^t r(\tau) d\tau$$

$$(6) c(t) = r^2(t)$$