

高等职业教育教学改革示范教材·自动化类专业规划教材系列

交直流调速系统 综合实训

冯丽平 主编 郁海华 于帅珍 副主编 苏家健 主审

工学结合

理实一体

强化技能

面向就业

Automation

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



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

高等职业教育教学改革示范教材·自动化类专业规划教材系列

交直流调速系统

综合实训

	冯丽平	主 编
郁海华	于帅珍	副主编
	苏家健	主 审

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书共6章, 主要内容包括: 直流调速控制系统、直流调速控制系统操作技能实例、直流调速系统实训题、交流变频调速系统、西门子变频器 MMV 及 MM440 调速系统、交流调速系统实训题。

本书在内容编排上以实训为重点, 考虑到读者知识的连贯性, 对直流调速控制系统及交流变频调速系统的原理做了适度的介绍; 在选型上, 以西门子产品为例进行介绍, 目的是满足大多数用户的知识需求, 具有专业指导作用。

本书可作为高职高专院校电气工程及自动化专业、机电一体化专业、自动控制及相关专业的实训教材, 也可作为工业企业相关技术人员实用的参考资料。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

交直流调速系统综合实训/冯丽平主编. —北京: 电子工业出版社, 2009. 10

高等职业教育教学改革示范教材·自动化类专业规划教材系列

ISBN 978 - 7 - 121 - 09631 - 0

I. 交… II. 冯… III. ①直流电机 - 调速 - 高等学校: 技术学校 - 教材 ②交流电机 - 调速 - 高等学校: 技术学校 - 教材 IV. TM330.12 TM340.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 178027 号

策划编辑: 王昭松

责任编辑: 刘 凡

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市桃园装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787 × 1 092 1/16 印张: 9.75 字数: 225 千字

印 次: 2009 年 10 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 20.00 元

凡所购买电子工业出版社的图书, 如有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

随着科学技术的进步和发展,尤其是大规模集成电路与微计算机技术的发展与应用,企业自动化水平日益提高,电气设备及控制系统越来越复杂,采用了许多新设备、新技术、新材料、新工艺。电力电子器件发展迅速,带动了电气传动控制技术的飞快发展。传统的模拟式直流调速系统已经逐步被带微处理器的全数字直流调速系统所取代。脉宽调制技术及微处理器的发展与应用,使全数字交流变频调速系统已经得到普遍应用。社会形势要求相关人员不但要掌握运动控制的理论知识,而且要能对电气设备进行安装、调试及维修。

本书在内容上力求实用、实效,理论与生产实践紧密结合。因而在内容中除了理论知识力求实用性,对所必需的理论知识进行重点分析外,还着重设置了操作实例及实训题目等内容,其目标是使读者进一步加深对理论知识的理解和应用,提高实际分析问题和实际操作技能。本书对晶闸管-电动机直流调速系统、交流变频调速系统进行分析,还对带微处理器的全数字通用变频器及其应用进行了介绍。与此同时,对晶闸管-电动机直流调速系统及交流调速系统实例和技能操作实例进行介绍,并设置实训题库,以便于实训练习和使用。第1章介绍直流调速控制系统;第2章介绍直流调速控制系统操作技能实例;第3章介绍直流调速系统实训题;第4章介绍交流变频调速系统;第5章介绍西门子变频器MMV及MM440调速系统;第6章介绍交流调速系统实训题。

本书按30学时编写,如有学校课程学时更少,可以将第2、3、5、6章实训作为重点,其他内容选讲或不讲。

本书适合全国高职高专院校的电气工程与自动化、电气工程及其自动化、自动化等专业使用,可供企业的工程技术人员作为参考,也可作为培训相应技术工人的教材。

本书由上海第二工业大学冯丽平主编,上海第二工业大学郁海华、安徽财经大学于帅珍副教授任副主编,上海第二工业大学苏家健教授主审。第1章由于帅珍编写,第2、3章由郁海华编写,其余各章节由冯丽平编写。编写过程中难免有错误与不足之处,殷切期望广大读者批评指正。

编 者

2009年6月

目 录

绪论	(1)
第1章 直流调速控制系统	(3)
1.1 问题的提出	(3)
1.2 直流调速系统技术基础	(3)
1.2.1 改变电动机的电枢电压 U_d 的调速 (调压调速)	(3)
1.2.2 晶闸管-电动机 (U-M) 系统	(3)
1.2.3 直流调速系统主要性能指标	(4)
1.2.4 调速系统中的常用调节器	(7)
1.3 转速、电流双闭环直流调速系统	(11)
1.3.1 转速、电流双闭环调速系统的组成	(11)
1.3.2 转速、电流双闭环调速系统突加给定启动过程分析	(13)
1.3.3 转速调节器和电流调节器的作用	(15)
1.4 晶闸管-电动机可逆直流调速系统	(15)
1.4.1 晶闸管-电动机可逆直流调速系统的电路形式	(16)
1.4.2 晶闸管-电动机可逆直流调速系统的工作状态	(18)
1.4.3 逻辑无环流可逆系统	(21)
第2章 直流调速控制系统操作技能实例	(26)
2.1 转速、电流双闭环不可逆直流调速系统	(26)
2.1.1 实训目的	(26)
2.1.2 实训内容	(26)
2.1.3 实训系统组成及工作原理	(26)
2.1.4 注意事项	(33)
2.1.5 实训方法	(33)
2.2 欧陆 514C 型直流调速控制系统	(36)
2.2.1 概况	(36)
2.2.2 主要技术参数	(37)
2.2.3 控制器的结构与工作原理	(38)
2.2.4 514C 型控制器接线端子功能说明	(42)
2.2.5 实训电路与步骤	(45)

第 3 章 直流调速系统实训题	(47)
3.1 514C 直流模拟式电流、速度双闭环不可逆调速系统的接线、调试 (一)	(47)
3.2 514C 直流模拟式电流、速度双闭环可逆调速系统的接线、调试	(50)
3.3 514C 直流模拟式电流、速度双闭环不可逆调速系统的接线、调试 (二)	(53)
第 4 章 交流变频调速系统	(56)
4.1 问题的提出	(56)
4.2 交流变频调速的基本概念	(56)
4.2.1 异步电动机变频调速的控制原则	(56)
4.2.2 变频调速系统的控制规律	(61)
4.3 脉宽调制型变频调速系统	(71)
4.3.1 简单的 PWM 型变频器工作原理	(71)
4.3.2 PWM 型变频调速系统的主电路	(74)
4.3.3 PWM 型变频调速系统的控制电路	(78)
4.4 数字式通用变频器及其应用	(83)
4.4.1 通用变频器概况	(83)
4.4.2 通用变频器的选择	(85)
4.4.3 通用变频器的安装	(91)
4.4.4 通用变频器的运行	(93)
4.4.5 通用变频器的应用实例	(94)
第 5 章 西门子变频器 MMV 及 MM440 调速系统	(98)
5.1 西门子 MMV/MDV 型交流变频调速系统	(98)
5.1.1 MMV/MDV 型通用变频器概况	(98)
5.1.2 MMV 变频器的接线与操作板	(99)
5.1.3 MMV 变频器的基本操作方法	(101)
5.1.4 MMV 变频器的运行	(102)
5.1.5 西门子变频器 MMV 部分参数表	(105)
5.1.6 实训电路与步骤	(107)
5.2 西门子 MM440 型交流变频调速系统	(111)
5.2.1 概况	(111)
5.2.2 变频器的操作板	(112)
5.2.3 变频器的调试	(115)
5.2.4 变频器的输入与输出	(123)

5.2.5 西门子变频器 MM440 部分参数表 (表 5-8 至表 5-12)	(124)
5.2.6 实训电路与步骤	(128)
第 6 章 交流调速系统实训题	(130)
6.1 交流变频调速装置面板操作	(130)
6.2 交流变频调速装置模拟量操作	(131)
6.3 交流变频调速装置数字操作	(131)
6.4 西门子 MMV 交流变频调速装置三段固定频率控制系统接线、 调试及测量	(131)
6.5 西门子 MMV 交流变频调速装置四段固定频率控制系统接线、 调试及测量	(134)
6.6 西门子 MM440 交流变频调速装置三段固定频率控制系统接线、 调试及测量	(138)
6.7 西门子 MM440 交流变频调速装置四段固定频率控制系统接线、 调试及测量	(142)
参考文献	(146)

绪 论

直流电动机具有良好的启动、制动性能，适应于大范围内平滑调速，在许多需要调速或快速正反向的电力拖动领域得到了广泛的应用。近年来，高性能交流调速技术发展得很快，交流调速有逐步取代直流调速系统的趋势。然而，直流拖动系统毕竟在理论上和实践上都比较成熟；而且从控制的角度看，它也是交流拖动控制系统的基础。因此，首先应该很好地掌握直流拖动控制系统。

直流电动机转速和其他参量之间的关系可表示为

$$n = \frac{U - IR}{K_e \Phi}$$

式中 n ——转速(r/min)；

U ——电枢电压(V)；

I ——电枢电流(A)；

R ——电枢回路总电阻(Ω)；

Φ ——励磁磁通(Wb)；

K_e ——由电动机结构决定的电动势常数。

由上式可以看出，调节电动机的转速有三种方法：

(1) 调节电枢供电电压 U ；

(2) 减弱励磁磁通 Φ ；

(3) 改变电枢回路电阻 R 。

对于要求在一定的范围内无级平滑调速的系统来说，调节电枢供电电压的方式最好。改变电阻只能实现有级调速；减弱磁通虽然能够平滑调速，但调速范围不大，往往只是配合调压方案，在基速(额定转速)以上进行小范围的弱磁升速。因此，自动控制的直流调速系统往往以变压调速为主。

直流电力拖动和交流电力拖动在19世纪先后诞生。在20世纪上半叶，鉴于直流拖动具有优越的调速性能，高性能可调速拖动都采用直流电动机，而约占电力拖动80%以上的不变拖动系统则采用交流电动机。直到20世纪六七十年代，随着电力电子技术的发展，使得采用电力电子变换器的交流拖动系统得以实现，特别是大规模集成电路和计算机控制的出现，使高性能交流调速系统应运而生，交直流拖动按调速性能分工的格局终于被打破了。这时，直流电动机和交流电动机相比的缺点日益显露出来。例如，具有电刷和换向器，因而必须经常检查维修，换向火花使它的应用环境受到限制，换向能力限制了直流电动机的容量和速度(极限容量与转速之积约为 $10^6 \text{ kW} \cdot \text{r/min}$)，等等。于是，用交流可调拖动取代直流可调拖动的呼声越来越强烈，交流拖动控制系统已经成为当前电力拖动的主要发展方向。

交流电动机有异步电动机和同步电动机两大类，每种电动机又都有不同类型的调速方法。交流电动机转速与其他参量之间的关系为

$$n = \frac{60f_1}{p}(1 - S)$$

式中 n ——电动机转速(r/min)；
 f_1 ——电动机定子频率(Hz)；
 p ——定子绕组磁场极对数；
 S ——转差率。

由上式可以看出，调节电动机的转速有三种方法：

- (1) 调节定子绕组频率 f_1 ；
- (2) 调节电动机磁场极对数 p ；
- (3) 调节转差率 S 。

从调速性能上看，目前变频调速几乎可以与直流调速相媲美。而交流调速系统的关键设备是变频器。

工业变频器经过许多年的发展，现在已经处于普及应用阶段。而在我国，多数企业的工程技术人员对工业变频器的了解还处于初级阶段。高等学校的学生毕业后即将面对的企业环境技术性强，要求学生有较强的动手能力，所以在学习了《电动机拖动》、《电力电子变流技术》、《电力拖动自动控制系统》等专业课理论后，进行交直流调速系统的综合实训很有必要。

第 1 章 直流调速控制系统

1.1 问题的提出

在实际生产中,有些生产设备要求电动机既能正转,又能反转;在减速和停车时,要有电气制动,以缩短制动时间。如何实现这些目标?本章从简单的开环直流调速系统开始到闭环直流调速系统,再到复杂的双闭环调速系统以及可逆直流调速系统,对实现目标的直流调速系统进行介绍与分析。

1.2 直流调速系统技术基础

1.2.1 改变电动机的电枢电压 U_d 的调速(调压调速)

改变电动机电枢电压 U_d 时,理想空载转速 n_0 也随之改变,当电枢电流(即负载电流) I_d 不变时,转速降 Δn 不变,机械特性的硬度不变,其机械特性曲线是一簇以 U_d 为参数的平行线。改变电动机电枢电压,其机械特性基本上是平行地上下移动,如图 1-1 所示。

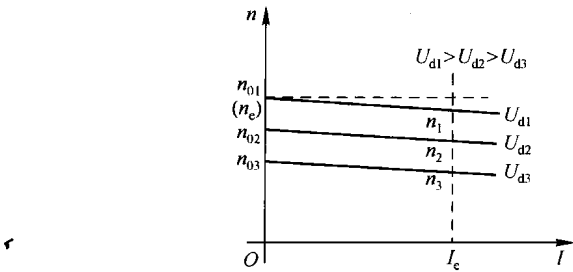


图 1-1 改变电动机电枢电压的机械特性

调压调速在整个调速范围内均有较大硬度,调速范围较宽。由于受电动机绕组绝缘性能等因素影响,电压的变化只能小于额定电压,所以这种调速方案只能在电动机额定转速以下调速。在恒定磁通时,调压调速属于恒转矩调速。

1.2.2 晶闸管-电动机(U-M)系统

该系统主要由晶闸管变流装置 U 和直流电动机 M 组成,如图 1-2 所示。

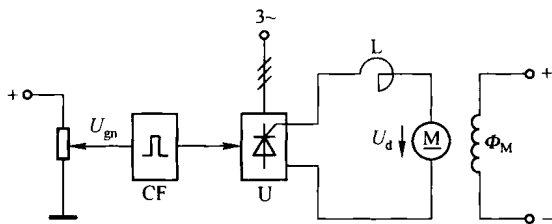


图 1-2 晶闸管-电动机系统

通过改变转速给定电压 U_d 来改变晶闸管变流装置控制角 α 的大小，进而改变晶闸管变流装置输出电压 U_d 的大小，可以达到改变直流电动机转速的目的。其机械特性如图 1-3 所示。

由图 1-3 可见，在电流连续区，该特性曲线也是一簇互相平行的直线。晶闸管-电动机(U-M)系统与发电机-电动机系统相比较，具有控制灵敏、响应快、占地面积小、能耗低、效率高、噪声小、维护方便等优点，得到了广泛应用。目前，直流电动机调速系统绝大部分都采用晶闸管-电动机系统。但晶闸管-电动机系统也存在功率因数低，产生高次谐波引起电网电压、电流波形畸变以及晶闸管过载，过电压能力差等问题，在使用中应引起足够重视。

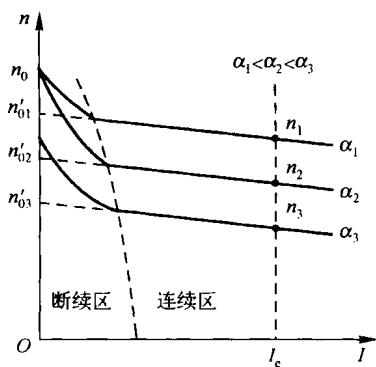


图 1-3 U-M 系统的机械特性

1.2.3 直流调速系统主要性能指标

直流调速系统主要性能指标是衡量调速性能好坏的标准，也是直流调速系统设计和实际运行中考核的主要指标。直流调速系统主要性能指标包括静态性能指标和动态性能指标两部分。

1. 静态主要性能指标

(1) 调速范围 D 。调速范围 D 是指电动机在额定负载下，电动机的最高转速 $n_{\max}$ 与最低转速 $n_{\min}$ 之比，即：

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}}$$

对于少数负载很轻的机械(如精密机床),最高转速 $n_{\max}$ 和最低转速 $n_{\min}$ 时的负载可另作规定。

(2) 静差率 S 。静差率 S 是指电动机在某一转速下运行时,负载由理想空载增加到额定负载时所产生的转速降 Δn_e 与理想空载转速 n_0 之比,常用百分数表示。

$$S = \frac{\Delta n_e}{n_0} = \frac{n_0 - n_e}{n_0} \times 100\%$$

由上式可知,静差率 S 与机械特性硬度以及理想空载转速 n_0 有关。机械特性越硬,静差率 S 越小。同样硬度的机械特性,理想空载转速越低,静差率 S 越大。在调压调速系统中,同一电动机在不同转速运行时,其额定转速降 Δn_e 是相同的,但理想空载转速 n_0 则不同,因而电动机在不同转速运行时的静差率不同。高速时静差率 S 小,低速时静差率 S 大。所以对一个系统所提的静差率要求,主要是对最低速的静差率要求,最低速时静差率能满足要求,高速时就不成问题了。

(3) D , S , Δn_e 之间的关系。在调压调速中, $n_{\max}$ 就是电动机的额定转速,即:

$$n_{\max} = n_e$$

$$n_{\min} = n_{0\min} - \Delta n_e$$

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_e}{n_{0\min} - \Delta n_e}$$

$$S = \frac{\Delta n_e}{n_{0\min}}, n_{0\min} = \frac{\Delta n_e}{S}$$

所以

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_e}{n_{0\min} - \Delta n_e} = \frac{n_e}{\frac{\Delta n_e}{S} - \Delta n_e} = \frac{n_e S}{\Delta n_e (1 - S)}$$

上式表示了调速范围 D 、静差率 S 和静态速降 Δn_e 三者之间的关系。 n_e 可由电动机出厂数据给出, D 和 S 由生产实际要求确定。当系统的特性硬度一定(即 Δn_e 一定)时,如要求静差率 S 越小,则调速范围 D 也就越小;反之,若要求 D 和 S 一定时,那么静态速降 Δn_e 就必须小于某一值。

2. 主要动态性能指标

动态性能指标是指在给定控制信号和扰动信号作用下,控制系统输出在动态响应中的各项指标。理想的控制系统应该对给定控制信号的变化能够不失真地准确跟踪,具有很好的跟随性;同时对抗动信号具有很强的抗扰性,不受扰动的影响。因此,动态性能指标分成给定控制信号和扰动信号作用下这两类性能指标。

(1) 给定控制信号作用下的动态主要性能指标。对直流调速系统来说,一般采用单位阶跃给定控制信号作用下系统输出响应的上升时间 t_r 、调节时间 t_T (也称过渡过程时间)和超调量 σ 来衡量系统对给定控制信号作用下的动态性能指标。系统在单位阶跃给

定控制信号作用下的动态响应曲线如图 1-4 所示。

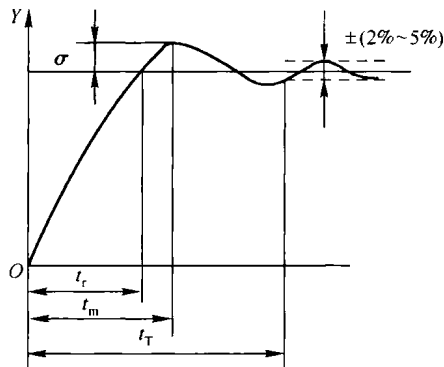


图 1-4 单位阶跃给定控信号作用下的动态响应曲线

- ① 上升时间 t_r 。上升时间又称为响应时间，是从加上阶跃给定的时刻起到系统输出量第一次达到稳态值所需的时间。
- ② 调节时间 t_T 。调节时间也称为过渡过程时间，是从加上阶跃给定的时刻起到系统输出量进入(并且不再超出)其稳态值的 $\pm(2\% \sim 5\%)$ 允许误差范围之内所需的最短时间。
- ③ 超调量 σ 。超调量 σ 是指在动态过程中系统输出量超过其稳态值的最大偏差与稳态值之比，通常用百分数表示：

$$\sigma = \frac{Y(t_m) - Y(\infty)}{Y(\infty)} \times 100\%$$

超调量 σ 用于表征系统的相对稳定性，超调量 σ 小就表示系统的稳定性好。 t_r 用于表征系统动态过程的快速性， t_r 越小表示系统快速性越好。这两者往往是互相矛盾的，减少了超调量 σ ，就导致 t_r 增加，也就延长了过渡过程时间。反之，加快过渡过程，减小 t_r 时间，却又增加了超调量 σ 。在实际应用中，应根据工艺的要求选择合适参数指标。

(2) 扰动信号作用下的动态主要性能指标。对直流调速系统来说，一般采用突加阶跃扰动作用下的系统输出响应的最大动态速降、恢复时间 t_s 来衡量系统对扰动响应的动态性能指标。系统在突加阶跃扰动作用下的动态响应曲线如图 1-5 所示。

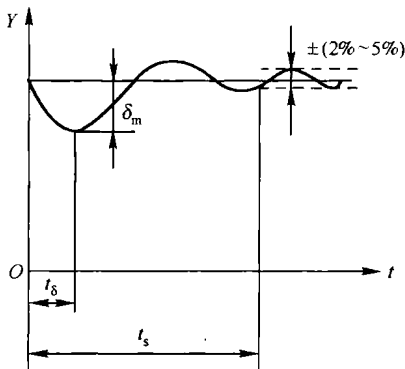


图 1-5 突加阶跃扰动作用下的动态响应曲线

① 最大动态速降。最大动态速降是在突加阶跃扰动作用下，系统的输出响应的最大动态速降，常用百分数表示

$$\delta_m = \frac{Y(\infty) - Y(t_s)}{Y(\infty)} \times 100\%$$

② 恢复时间 t_s 。恢复时间 t_s 是从加上突加阶跃扰动的时刻起到系统输出量进入原稳态值的 $Y(0)$ 的 95% ~ 98% 范围内[即与稳态值之差 $\pm(2\% \sim 5\%)$]所需的最短时间。

最大动态速降越小，恢复时间 t_s 越小，说明系统的抗扰能力越强。

1.2.4 调速系统中的常用调节器

调速系统中，常用的调节器有比例调节器(P)、积分调节器(I)、比例积分调节器(PI)。下面对这三种常用调节器进行分析与讨论。

1. 比例调节器(P 调节器)

比例调节器简称 P 调节器，也可称为比例放大器。比例调节器电路图如图 1-6 所示，一般采用反相输入。

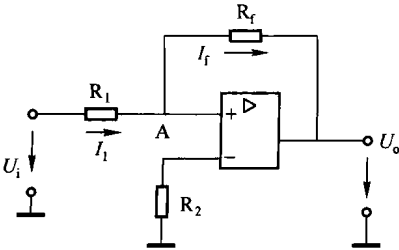


图 1-6 比例调节器电路图

在图 1-6 中， R_1 为输入电阻， R_f 为反馈电阻。由于放大器的开环放大倍数很大 ($10^4 \sim 10^8$)，其输出电压一般都在十几伏以下，所以可认为 A 点的电位近似于零，常把 A 点称为“虚地”，流入放大器的电流近似为零。此时：

$$I_1 = I_f, I_1 = \frac{U_i}{R_1}, I_f = \frac{-U_o}{R_f}$$

所以

$$U_o = -\frac{R_f}{R_1} U_i$$

上式中，负号表示输出电压 U_o 和输入电压 U_i 是反相关系。放大倍数 K_p 为

$$K_p = \frac{R_f}{R_1}$$

由上式可知，改变 R_f 或 R_1 的大小可以方便地改变放大倍数 K_p 。比例调节器的输出与输入特性如图 1-7 所示。

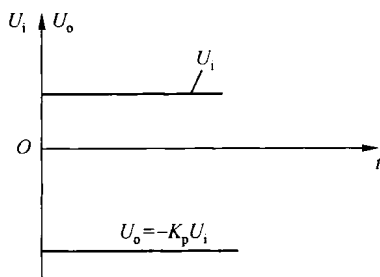


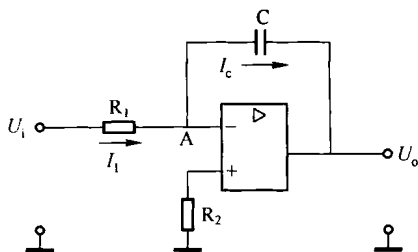
图 1-7 比例调节器的输出与输入特性

2. 积分调节器(I 调节器)

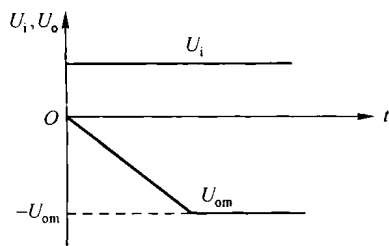
积分调节器的电路如图 1-8(a)所示。由图 1-8(a)可看出,积分调节器就是将比例调节器中的反馈电阻 R_f 换成电容 C 。同理, A 点为“虚地”, 即有:

$$I_1 = I_f$$

$$U_o = U_c = -\frac{1}{C} \int I_f dt = -\frac{1}{C} \int \frac{U_i}{R_1} dt = -\frac{1}{R_1 C} \int U_i dt = -\frac{1}{\tau} \int U_i dt$$



(a) 积分调节器的电路



(b) 阶跃输入/输出特性

图 1-8 积分调节器的电路及其输入/输出特性

式中, τ 为积分调节器的积分时间常数, $\tau = R_1 C$ 。式中的负号表示输出电压 U_o 与输入电压 U_i 反相。当输入电压 U_i 为一阶跃突加电压时, 在突加瞬间, 由于电容电压不能突变, 电容相当于短路, 使放大器输出全部反馈到输入端, 调节放大器一开始输出电压 U_o 为零, 然后以一定的电流对电容 C 充电, 负反馈作用逐渐减弱, 输出电压 U_o 和输入电压 U_i 对时间的积分成正比, 输出电压 U_o 随时间线性增加。此时输出电压 $U_o = \frac{1}{\tau} U_i t$, 只要输入电压 U_i 存在, 输出电压就一直积分直到饱和值(限幅值) U_{om} , 此后一直保持在饱和值(或限幅值)不变。积分调节器的输入/输出特性如图 1-8(b)所示。

积分调节器具有几个显著特点:

(1) 输出电压 U_o 不能突变, 输入电压 U_i 的突变并不能引起输出电压 U_o 的突变。输出电压 U_o 和输入电压 U_i 对时间的积分成正比, 只要输入电压 U_i 存在, 哪怕是很小

值, 输出电压 U_o 就一直积分直至达到饱和值(或限幅值)。

(2) 输出电压 U_o 增加的快慢, 即上升斜率大小和输入电压 U_i 的大小、积分时间常数 τ 的大小有关。当输入电压 U_i 相同时, 积分时间常数 τ 大, 输出电压 U_o 增加缓慢, 上升斜率小, 如图 1-9(a) 所示。图中 $\tau_1 > \tau_2$, U_{o1} 增加缓慢, 上升斜率小。当积分时间常数 τ 相同时, 输入电压 U_i 越大则输出电压 U_o 增加越快, 上升斜率越大, 如图 1-9(b) 所示。图中 $U_{i1} > U_{i2}$, U_{o2} 增加快, 上升斜率大。

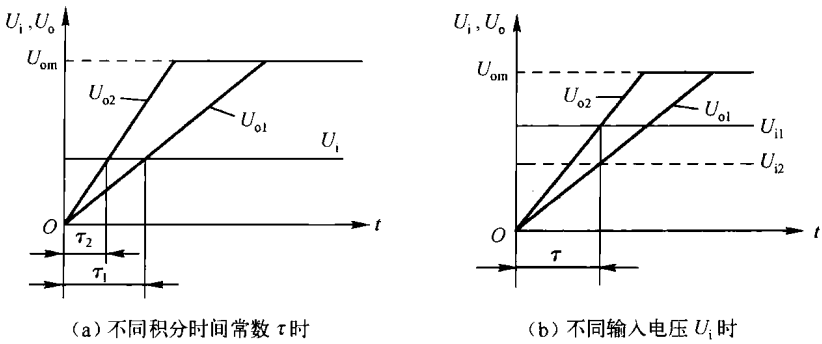


图 1-9 积分调节器输出电压 U_o 与输入电压 U_i 、积分时间常数 τ 之间的关系

(3) 积分调节器具有记忆保持作用。当输入电压 U_i 为零时, 输出电压 U_o 始终保持在输入电压 U_i 为零前的那个瞬间的输出值上。

图 1-10 所示为积分调节器的输出电压 U_o 与输入电压 U_i 的相应关系。

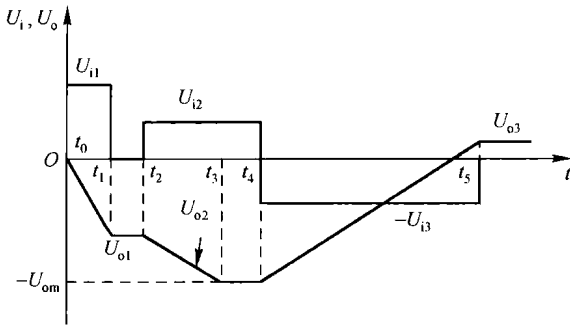


图 1-10 积分调节器的输出电压 U_o 与输入电压 U_i 的相应关系

在图 1-10 中, t_0 时 U_i 由 0 突变为 U_{i1} , 积分调节器输出电压 U_o 线性增加。 t_1 时 U_i 突变为 0, 积分调节器输出电压 U_o 保持 U_{o1} 不变。 t_2 时又突变为 U_{i2} , 积分调节器输出电压 U_o 又线性增加, 但由于 $U_{i1} > U_{i2}$, 线性增加速度较慢。 t_3 时输出电压 U_o 达到饱和值(或限幅值) U_{om} 。虽然 $t_3 \sim t_4$ 输入电压 U_{i2} 继续存在, 但输出电压仍为饱和值(或限幅值) U_{om} 。 t_4 时输入电压又从 $+U_{i2}$ 突变为 $-U_{i3}$, 积分调节器输出电压 U_o 线性下降直到反向。 t_5 时输入电压 U_i 又突变为 0, 积分调节器输出电压 U_o 保持 U_{o3} 不变。

3. 比例积分调节器(PI 调节器)

比例积分调节器的电路如图 1-11(a)所示。

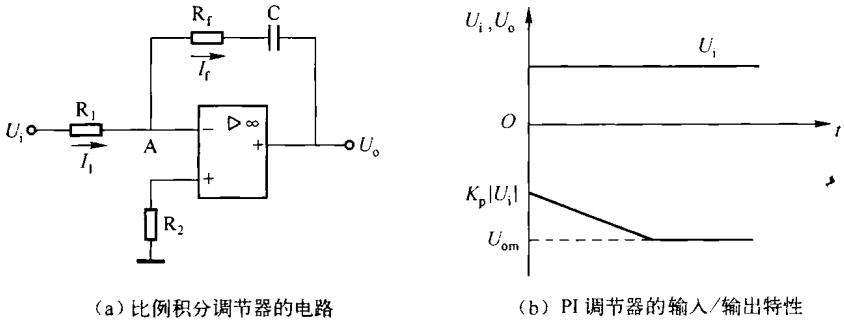


图 1-11 比例积分调节器的电路及其输入/输出特性

A 点为“虚地”，即有：

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_f = \frac{U_i}{R_1} \\
 U_o &= - \left(R_f I_f + \frac{1}{C} \int I_f dt \right) \\
 &= - \left(\frac{R_f}{R_1} U_i + \frac{1}{R_1 C} \int U_i dt \right) \\
 &= - \left(K_p U_i + \frac{1}{\tau} \int U_i dt \right)
 \end{aligned}$$

负号表示输出电压 U_o 与输入电压 U_i 反相。

式中 K_p ——PI 调节器的比例系数, $K_p = \frac{R_f}{R_1}$;

τ ——PI 调节器的积分时间常数, $\tau = R_1 C$ 。

由上面公式可见, PI 调节器的输出电压 U_o 由两部分组成: 第一部分 $K_p U_i$ 是比例部分; 第二部分 $\frac{1}{\tau} \int U_i dt$ 是积分部分。在输出电压 U_o 为零的初始状态和阶跃输入电压 U_i 时, PI 调节器的输入/输出特性如图 1-11(b)所示。当 $t=0$ 突加 U_i 瞬间, 电容 C 相当于短路, 反馈回路只有电阻 R_f , 此时相当于 P 调节器, 输出电压 $U_o = -K_p U_i$ 。随着电容 C 被充电开始积分, 输出电压 U_o 线性增加, 只要输入电压 U_i 继续存在, U_o 会一直增加到饱和值(或限幅值)。

实际应用中比例积分调节器常采用如图 1-12 所示线路。其缺点是存在电位器中间滑动端接触不良而断开, 从而造成调节器反馈回路开路问题。