

## 摘要

通过对双闭环直流调速控制系统的分析，本设计决定采用晶闸管电动机调速系统进行电机控制。首先需要根据设计要求确定出调速方案和主电路的结构型式，实际设计中常采用双闭环控制系统，电流环作为控制系统的内环并选用典型 I 型系统，转速环作为控制系统的外环并选用典型 II 型系统，从而使电动机满足所要求的静态和动态性能指标。然后按照确定时间常数、选择调节器结构、计算调节器参数、校验近似条件的步骤逐步实现对直流调节器的具体设计。最后，用 Matlab 软件对完整的设计系统进行模拟仿真，得到仿真波形。

**关键词：**双闭环；直流调速器；控制系统；晶闸管

# 第1章 绪论

三十多年来，直流电机调速控制经历了重大的变革。首先实现了整流器的更新换代，以晶闸管整流装置取代了习用已久的直流发电机电动机组及水银整流装置使直流电气传动完成了一次大的跃进。同时，控制电路已经实现高集成化、小型化、高可靠性及低成本。以上技术的应用，使直流调速系统的性能指标大幅提高，应用范围不断扩大。直流调速技术不断发展，走向成熟化、完善化、系列化、标准化，在可逆脉宽调速、高精度的电气传动领域中仍然难以替代。

如今，直流电机调速系统在现代化工业生产中已经得到广泛应用。针对直流电机调速的方法也很多，目前国内外也研究了一些调速的控制器。例如已经用于实际生产的直流电机无极电子调速控制器采用国际先进的IGBT大功率模块器件和独特自行设计的PWM 微电子控制技术，以及节能反馈电路和丰富的保护功能控制电路。适用于无轨机车、矿山井下窄轨机车、磨床、木工机械、服装制作、纺织、造纸印刷等场所。控制器具有调速平稳，安全可靠，提高生产效率；直流电机正反转控制简便；可以与计算机连接控制等特点。直流电动机有三种调速方法，分别是改变电枢供电电压、励磁磁通和电枢回路电阻来调速。对于要求在一定范围内无级平滑调速的系统来说，以调节电枢电压方式为最好，调压调速是调速系统的主要调速方式。

## 1.1 研究背景及意义

直流电机的调速控制的装置已经发生了很大的变化，第一，在完成了整流器更换，采用晶闸管蒸馏的设备代替了之前一直用的直流式发电机的电动机组以及水银式的设备使得整个直流传动的设备发生了天翻地覆的变化。第二，在由于科学技术的创新，现在已经基本实现了高度集成化，小型化以及可靠性极高的设备。以上的技术创新，使得现在直流式调速控制系统的性能指标已经发生了很大变化，应用的空间和范围在不断的变大。直流式调速控制设备经过不断发展变化，已经逐步走向了成熟化的过程，在可以改变脉冲宽度调速的过程中已经变成了现在难以取代的位置。

现在，直流式电动调速设备已经在现代的工厂中广泛的使用，在直流式设备中的调试方法也很多，现在我们经常也在研究一些调速的设备，比如已经用于实际生产的直流式电机设备，采用先进的设备和技术，进行控制电路和保护设备。主要应用在机车、服装设计等场所。该控制设备的调试时平稳并且安全可靠，这就是我们常用的直流式电机设备，可以将电机设备有效控制。这对于需要将无极稳定调试控制在一定范围内，将电枢电压控制到最好，调试时达到最理想的状态。

## 1.2 研究现状

### (1) 国内现状及发展趋势

从七十年代开始，由于晶闸管直流调速系统的高效、无噪音和快速响应等优点而得到广泛应用。双闭环直流调速系统一般含晶闸管可控整流主电路、移相控制电路、转速电流双闭环调速控制电路、以及缺相和过流保护电路等。给定信号为0~10V 直流信号，可对主电路输出电压进行平滑调节。采用双 PI 调节器，可获得良好的动静态效果。晶闸管-直流电动机调速系统为现代工业提供了高效、高性能的动力。尽管目前交流调速的迅速发展，交流调速技术越趋成熟，以及交流电动机的经济性和易维护性，使交流调速广泛受到用户的欢迎。但是直流电动机调速系统以其优良的调速性能仍有广阔的市场，并且建立在反馈控制理论基础上的直流调速原理也是交流控制的基础。在我国国内，双闭环控制也已经经过了几十年的发展时期，目前已经基本发展成熟，但是目前的趋势仍是追赶着发达国家的脚步，向着数字化发展。

### (2) 国外现状及发展趋势

从80年代中后期起，世界各大电气公司都在竞相开发数字式调速传动装置。直流调速已经发展到一个很高的技术水平：功率元件采用可控硅；控制板采用表面安装技术；控制方式采用电源换相、相位控制。特别采用了微机及其他先进技术，使数字式直流调速装置具有很高的精度、良好的控制性能和强大的抗干扰能力，在国内外受到广泛的应用。目前，发达国家应用的先进电气调速系统几乎完全实现了数字化，双闭环控制系统已经普遍的应用到了各类仪器仪表，机械重工业以及轻工业的生产过程中。随着全球科技日新月异的发展，双闭环控制系统的总的发展趋势也向着控制的数字化、智能化和网络化发展。

## 1.3 研究内容

本文通过对研究背景及意义，以及现状进行分析，第二章对其应用的主要技术进行研究，主要技术有电力电子技术以及脉宽调制技术。在第三章中对直流调速系统的主电路进行设计，第四章中对双闭环直流调速系统的控制理论进行分析。最后对其仿真系统及通知其环节进行设计工作。

## 第2章课题中应用的主要技术

### 2.1 电力电子技术

电力电子技术是现代交流调速装置的支柱，其发展直接决定和影响交流调速技术的发展。迄今为止，电力电子器件的发展经历了分立换流关断器件(第一代)→自关断器件(第二代)→功率集成电路PIC(第三代)→智能模块IPM(第四代)四个阶段。

20世纪80年代中期以前，变频装置功率回路主要采用晶闸管元件。装置的效率、可靠性、成本、体积均无法与同容量的直流调速装置相比。20世纪80年代中期以后用第二代电力电子器件GTR、GTO、VDMOS-IGBT等创造的变频装置在性能与价格比上可以与直流调速装置相媲美。随着向大电流、高电压、高频化、集成化、模块化方向继续发展，第三代电力电子器件是20世纪90年代制造变频器的主流产品，中、小功率的变频调速装置(1—100kw)主要是采用IGBT,中、大功率的变频调速装置(1000—10000kw)采用GTO 器件。20世纪90年代至今，电力电子器件的发展进入了第四代。主要实用的第四代器件为：(1)高压IGBT 器件，(2)IGCT。由于GTR、GTO器件本身存在的不可克服的缺陷，功率器件进入第三代以来，GTR 器件已被淘汰不再使用。进入第四代后，GTO 器件也将被逐步淘汰。第四代电力电子器件模块化更为成熟。如智能化模块 IPM、专用功率器件模块 ASPM等。模块化功率器件将是21世纪主宰器件。需要指出的是，以上所述的全控型开关功率器件主要应用于异步电动机变频调速系统中。但是目前同步电动机变频调速系统中仍采用晶闸管，其原因也是众所周知的。一代电力电子器件带来一代变频调速装置，性价比一代高过一代。在人类社会进入信息化时代后，电力电子技术连同电力传动控制与计算机技术一起仍是21 世纪最重要的两大技术。电压或电流中的谐波分量，从而降低或消除了变频调速时电机的转矩脉动，提高了电机的工作效率，扩大了调速系统的调速范围。

### 2.2 脉宽调制技术

脉宽调制(PWM)技术种类很多，并且正在不断发展之中。基本上可分为四类，

即等宽PWM法、正弦PWM法(SPWM)、磁链追踪型PWM法及电流跟踪型PWM法。PWM技术的应用克服了相控原理的所有弊端，使交流电动机定子得到了接近正弦波形的电压和电流，提高了电机的功率因数和输出功率，现代PWM生成电路大多采用具有高度输出 HSO 的单片机(如80196)及数字信号处理器 DSP(Digital Signal Processor),通过软件编程生成PWM。近年来，新型全数字化专用 PWM生成芯片 HEF4752、SLE4520、MA818 等达到实用化，并已实际应用。

直流调速器是一种电机调速装置，包括电机直流调速器、脉宽直流调速器、可控硅直流调速器等，一般为模块式直流电机调速器，集电源、控制、驱动电路于一体，采用立体结构布局，控制电路采用低功耗元件，用光电耦合器实现电流、电压的隔离变换，电路的比例常数、积分常数和微分常数用 PID 适配器调整。具有体积小、重量轻等特点，可单独使用也可直接安装在直流电机上构成一体化直流调速电机，可具有调速器所应有的一切功能。

现有调速产品调查：6RA70调速系统西门子SIMOREG K6RA23/24系列全数字直流调速产品，自在中国市场推出以来，得到了广大用户的认同。最新推出的SIMOREG DC Master 6RA70系列全数字直流调速产品，在6RA24产品的基础上更具有以下特点：

1)单台装置输出额定电枢电流：15A~3000A，额定励磁电流：3A-85A。装置并联后输出额定电枢电流可达12000A。

2)输入电压分为6个等级：400V/460V/575V/690V/830V/950V。

3)强大的通讯能力。有 SIMOLINK 高速直接的装置-装置通讯，还可支持 PROFIBUS、CAN-BUS、USS协议等。

4)所有工艺板、通讯板都可与新一代的SIMOVERT MASTERDRIVES矢量控制交流调速产品通用。

6RA70 的应用：6RA70 SIMOREG DC MASTER系列整流器为全数字紧凑型整流器，输入为三相电源，可向变速直流驱动用的电枢和励磁供电，额定电枢电流从15A至3000A。紧凑型整流器可以并联使用，提供高至12000A的电流，励磁电路可以提供最大85A的电流。

6RA70 工作方式：所有的开环和闭环驱动控制及通讯功能由两台功能强大

的微处理器实现，驱动控制功能可以通过参数，将软件所提供的程序块“连接”来实现。铭牌上规定的额定直流电流(连续直流电流), 在负载等级I, 可以过载到180%, 过载允许的持续时间由各个整流器而定。微处理器周期地计算功率部份电流的 $I^2t$  值, 以确保晶闸管在过载运行时不被损坏。整流器可自动适应电源频率范围为45Hz-65Hz(电枢和励磁互不相关)。工作在扩大的频率范围23Hz-110Hz需询问。

## 第3章 直流调速系统的主电路设计

### 3.1 晶闸管-电动机直流调速系统

主电路设计是电力电子装置中，起到能量变换和传递作用的部分。主电路的明显特征：高电压、大电流。

#### 3.1.1 主电路拓扑结构图

三相交流电源经不可控整流器变换为电压恒定的直流电源，再经过直流PWM变换器得到可调的直流电压，给直流电动机供电。检测回路包括电压、电流、温度和转速检测，转速检测用数字测速。微机控制具备故障检测功能，对电压、电流、温度等信号进行实时监测和报警。一般选用专为电机控制设计的单片机，配以显示、键盘等外围电路，通过通信接口与上位机或其他外设交换数据。

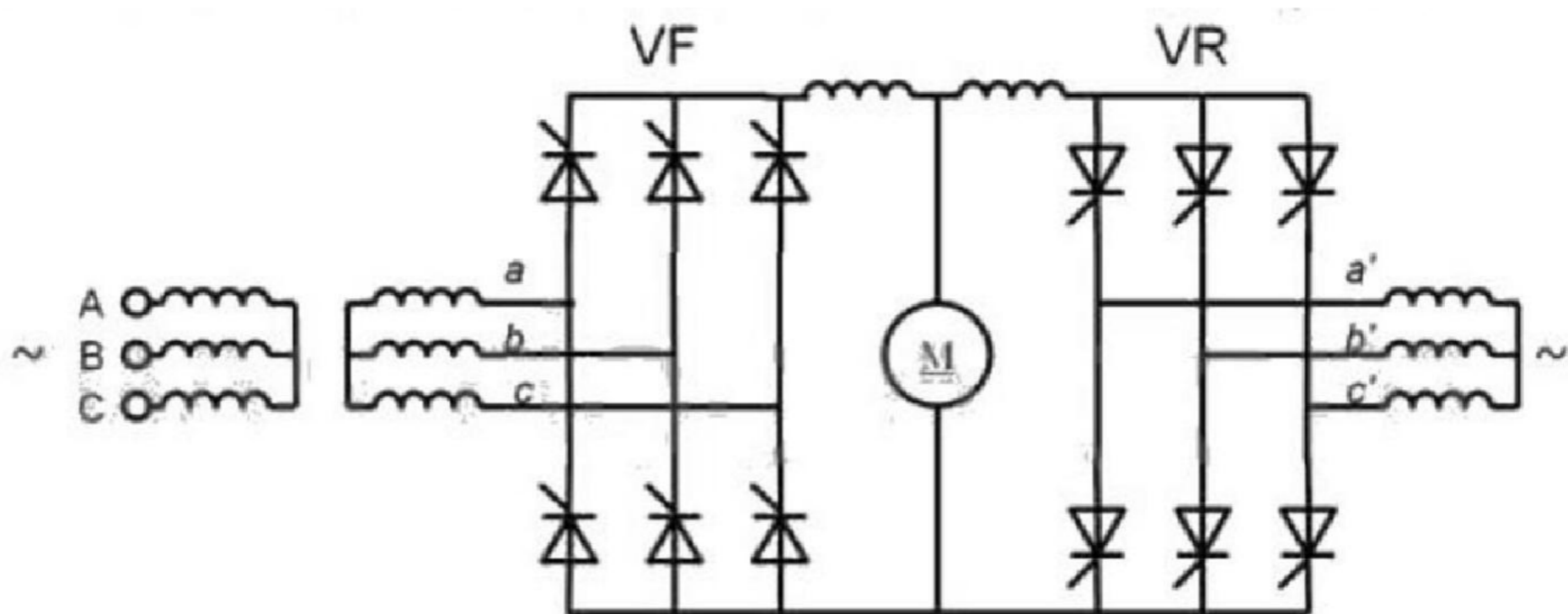


图3.1 两组晶闸管可控整流装置反并联可逆线路

#### 3.1.2 电力电子器件选型步骤

步骤如下：

- 1) 根据主电路的结构，计算电力电子器件承受的最高电压、最大电流的有效值。
- 2) 按照工程化方法计算电力电子器件的额定电压和额定电流。
- 3) 根据应用的具体场合，是否需要选择特殊类型的电力电子器件，如：快恢复等。

4) 确定电力电子器件的封装形式：螺栓型、模块式等。

5) 选择生产厂商，确定具体型号。

二极管、晶闸管额定电流和电压的计算，二极管、晶闸管的额定电流按照通态平均电流定义。

$$I_{T(AV)} = \frac{(1.5 \sim 2)}{1.57} I_{VT}$$

$I_y$ : 流过器件的最大电流有效值。

$$U_N = (2 \sim 3) U_M$$

二极管只能承受反向电压，晶闸管既可承受正向电压也可承受反向电压。

$U_M$ : 器件承受的最高电压瞬时值。

### 3. 1. 3 选择功率器件的标准

1) 耐压等级。因为大多数IGBT 模块工作在交流电网通过单相或三相整流后的直流母线电压下，所以通常 IGBT 模块的工作电压(600V、1200V、1700V)均对应于常用电网的电压等级。考虑到过载，电网波动，开关过程引起的电压尖峰等因素，通常电力电子设备选择IGBT 器件耐压都是直流母线电压的一倍。

2) 电流等级。在电力电子设备中，选择 IGBT 时，通常是先计算通过IGBT 模块的电流值，然后根据电力电子设备的特点，考虑到过载、电网波动、开关尖峰等因素考虑一倍的安全余量来选择相应的IGBT 模块。

3) 开关频率。

4) 其它因素：供货周期，价格等。

电解电容的串并联：由于每个电容都有等效的内阻，而且该等效内阻的阻值差异较大，若电容直接串联则必然会带来电容两端的分压不平均导致内阻较大的电容两端所分担的电压过高，甚至高于其耐压值而损坏。为了避免该现象，每个串联的电容两端并接一个较大阻值的电阻以减小内阻差异带来的分压不均。该电阻称为均压电阻。同型号电容并联耐压值保持不变，但其电容值随并联的电容的个数倍增；同型号电容串联，耐压值随所串接的电容的个数倍增，但其电容值随之成倍递减。电解电容是有极性的，电容并联时要注意保持极性一致，串联时要注意串接电容的极性正负相连。

## 3. 2 电力电子器件的应用电路

### 3. 2. 1 驱动电路的用途

- 1) 使电力电子器件工作在较理想的开关状态，缩短开关时间，减小开关损耗。
- 2) 对装置的运行效率、可靠性和安全性都有重要的意义。
- 3) 一些保护措施也往往设在驱动电路中，或通过驱动电路实现。

### 3. 2. 2 驱动电路的任务

- 1) 按控制目标的要求施加开通或关断的信号。
- 2) 对半控型器件只需提供开通控制信号。
- 3) 对全控型器件既要提供开通控制信号，又要提供关断控制信号。

### 3. 2. 3 触发电路的要求

定义：为门极提供触发电压和电流的电路称为触发电路。

分类：分为移相触发和过零触发两类。一般常用的整流或逆变电路中，广泛使用的触发电路通常都是移相触发电路。

对触发电路的要求：触发信号应有足够的功率；触发脉冲应有一定的宽度；触发脉冲必须与阳极同步，同时必须有足够的移相范围。

### 3. 2. 4 晶闸管触发电路

- 1) 正弦波同步触发电路，由同步移相、脉冲形成、脉冲输出等三大部分形成。
- 2) 锯齿波同步触发电路，由脉冲形成、同步移相、输出等环节组成。
- 3) 集成电路触发器，随着电力电子技术的不断发展，集成触发器已经取代分立元件构成的触发器，具有体积小、工作可靠、电路简单、使用方便等特点，已被各种变流装置广泛应用。目前，常用集成触发线路有KC 系列共十余品种。

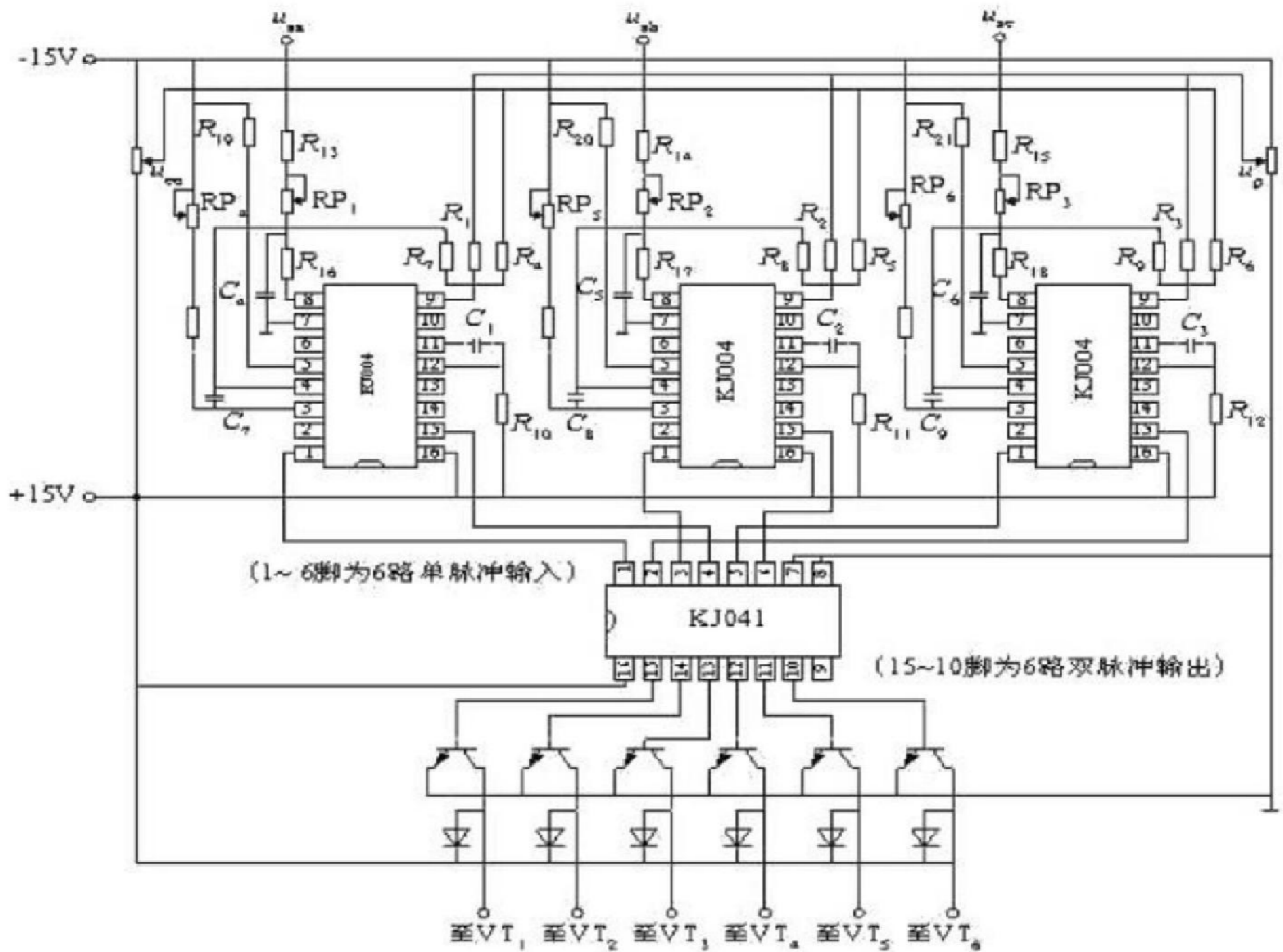


图3.2三相全控桥整流电路的集成触发电路

A/D 模数变换将控制电压 $U_c$ 模拟量转换成与 $U_c$ 成正比的脉冲频率数字量。用 $cp$ 表示，分别送到三个分频器。分频器用七位二进制集成电路计数器组成，有清零环节，分频器输出到脉冲形成器，有封锁环节。

### 3.3 信号检测装置

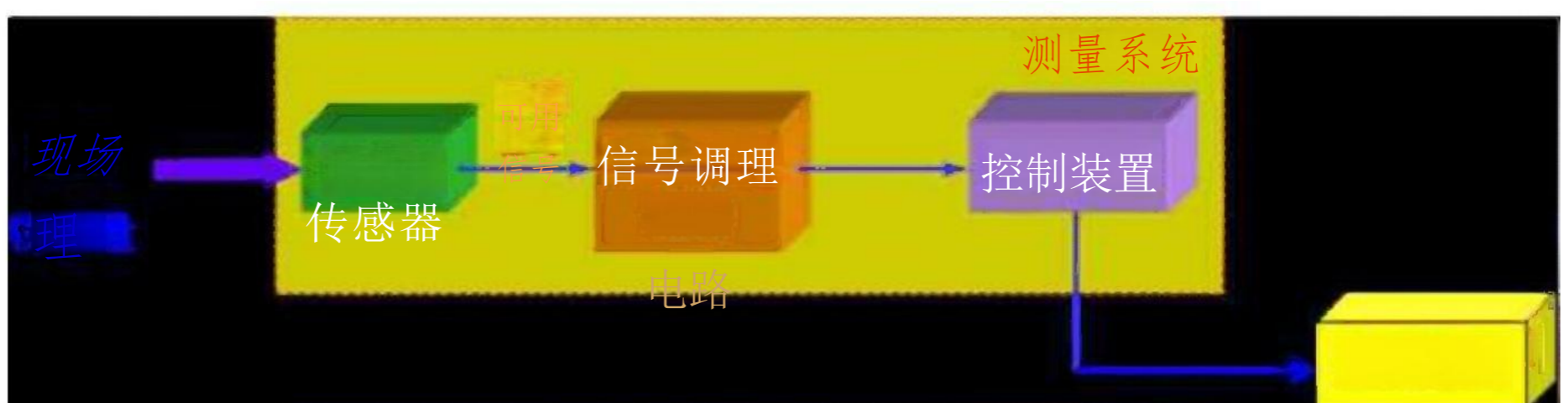


图3.3信号检测及处理电路

### 3.3.1 模拟量输入通道的组成部分

典型的模拟量输入通道由以下几部分组成。

1) 传感器。传感器是用于将工业生产现场的某些非电物理量转换为电量(电流、电压)的器件。例如,热电偶能够将温度这个物理量转换成几毫伏或几十毫伏的电压信号,所以可用它作为温度传感器;而压力传感器可以把物理量压力的变化转换为电信号,等等。

2) 变送器。一般来讲,传感器输出的电信号都比较微弱,有些传感器的输出甚至是电阻值、电容值等非电量。为了易于与信号处理环节衔接,就需要将这些微弱电信号及电阻值等非电量转换成一种统一的电信号,变送器就是实现这一功能的器件。它将传感器的输出信号转换成0~10mA或4~20mA的统一电流信号或者0~5V的电压信号。

3) 信号处理环节。信号处理环节主要包括信号的放大及干扰信号的去除。它将变送器输出的信号进行放大或处理成与A/D(Analog to Digital)转换器所要求的输入相适应的电平。另外,传感器通常都安装在现场,环境比较恶劣,其输出常叠加有高频干扰信号。因此,信号处理环节通常是低通滤波电路,如RC滤波器或由运算放大器构成的有源滤波电路等。

### 3.3.2 温度检测元件

热电偶是温度测量仪表中常用的测温元件,它直接测量温度,并把温度信号转换成热电动势信号,通过电气仪表(二次仪表)转换成被测介质的温度。各种热电偶的外形常因需要而极不相同,但是它们的基本结构却大致相同,通常由热电极、绝缘套保护管和接线盒等主要部分组成,通常和显示仪表、记录仪表及电子调节器配套使用。

热敏电阻是敏感元件的一类,按照温度系数不同分为正温度系数热敏电阻器(PTC)和负温度系数热敏电阻器(NTC)。热敏电阻器的典型特点是对温度敏感,不同的温度下表现出不同的电阻值。正温度系数热敏电阻器(PTC)在温度越高时电阻值越大,负温度系数热敏电阻器(NTC)在温度越高时电阻值越低,它们同属于半导体器件。

温度继电器,当外界温度达到给定值时而动作的继电器。该产品为通接触感应式密封温度继电器,具有体积小、重量轻、控温精度高等特点,通用性极强。

是使用最为广泛的产品，可供航空航天、监控摄像设备、电机、电器设备及其它行业作温度控制和过热保护用。

### 3.3.3速度传感器

测速发电机输出电动势与转速成比例的微特电机。测速发电机的绕组和磁路经精确设计，其输出电动势 $E$ 和转速 $n$ 成线性关系，即 $E=Kn$ ， $K$ 是常数。改变旋转方向时输出电动势的极性即相应改变。在被测机构与测速发电机同轴联接时，只要检测出输出电动势，就能获得被测机构的转速，故又称速度传感器。模拟量输出线性度限制受温度影响。

轴编码器采用与主轴同步的光电脉冲发生器，通过中间轴上的齿轮1:1地同步传动。数控车床主轴的转动与进给运动之间，没有机械方面的直接联系，为了加工螺纹，就要求给定进给伺服电动机的脉冲数与主轴的转速应有相对应的关系，主轴脉冲发生器起到了对主轴转动与进给运动的联系作用。

## 第4章双闭环直流调速系统的控制理论

系统设计的一般原则为：先内环后外环。即从内环开始，逐步向外扩展。在这里，首先设计电流调节器，然后把整个电流环看作是转速调节系统中的一个环节，再设计转速调节器。

图4.1为转速、电流双闭环调速系统的原理图，图4.2为双闭环调速系统的结构图。图中两个调节器ASR和ACR分别为转速调节器和电流调节器，二者串级连接，即把电流调节器的输出作为转速调节器的输入，再用转速调节器的输出去控制电力电子变换器UPE。

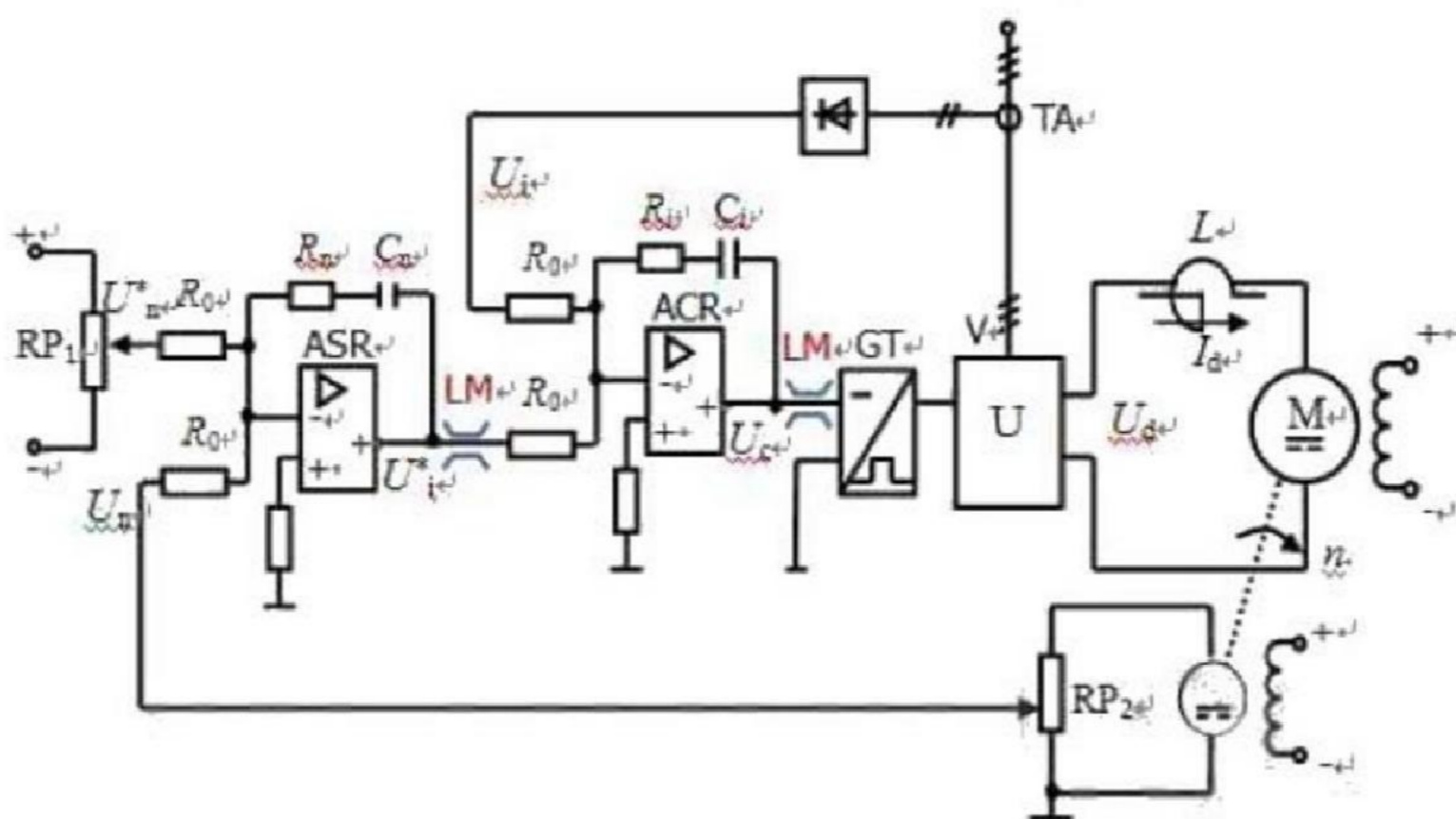


图4.1 双闭环调速系统电路原理图

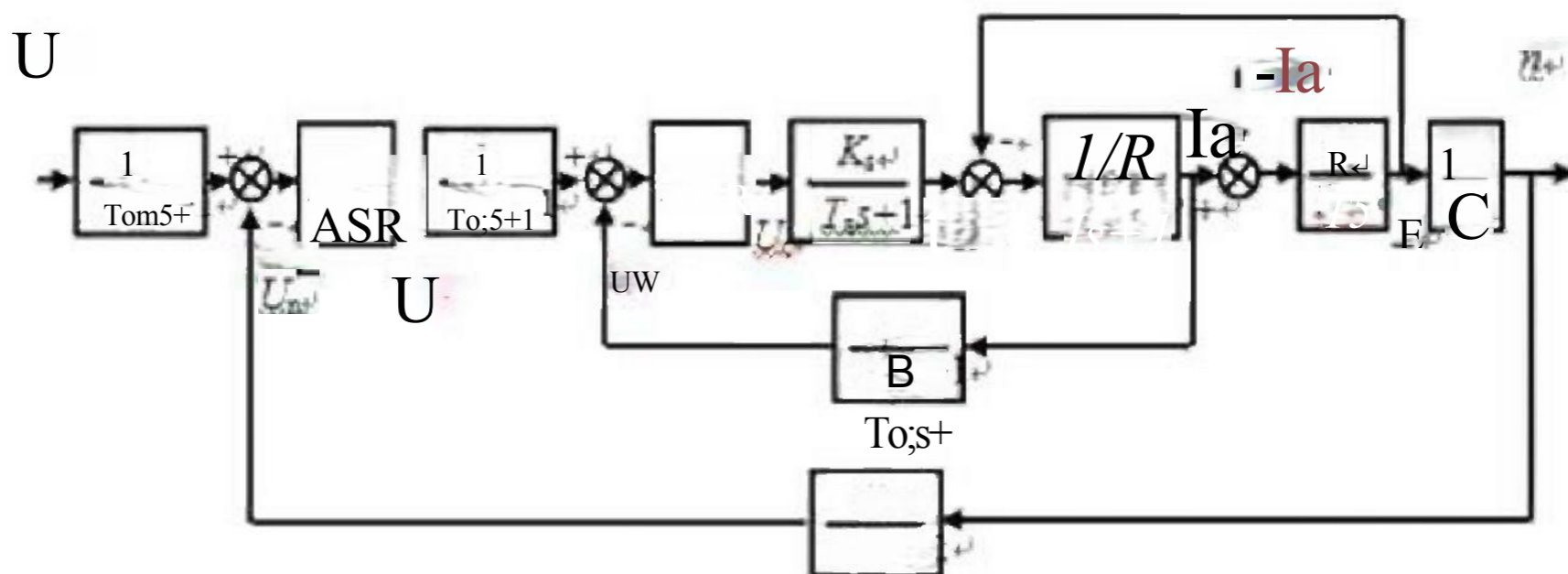


图4.2双闭环调速系统结构框图

#### 4.1 双闭环直流可逆调速系统的相关参数

电路相关参数：额定功率 $P_e=60\text{kW}$ ；额定电压 $U_e=220\text{V}$ ；额定电流 $I_e=308\text{A}$ ；额定转速 $n=1000\text{r/min}$ ；电枢回路总电阻 $R=0.18\Omega$ ；电磁时间常数 $T_e=0.012\text{s}$ ；机电时间常数 $T_m=0.120\text{s}$ ；电动势系数 $C_e=0.196\text{V}/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$ 。另外根据器件选择确定其他参数：电流反馈时间常数 $T_i=0.0025\text{s}$ ；转速反馈时间常数 $T_m=0.015\text{s}$ ；额定转速的给定电压 $(U)_x=10\text{V}$ ；调节器ASR、ACR饱和输出电压 $U_m=8\text{V}, U_m=6.5\text{V}$ ；系统的静动态指标为：稳态无静差，调速范围 $D=10$ ，电流超调量 $\sigma \leq 5\%$ ，空载起动到额定转速时的转速超调量 $\sigma \leq 10\%$ 。

#### 4.2 电流环结构图

电流环结构图的简化分为忽略反电动势的动态影响、等效成单位负反馈系统、小惯性环节的近似处理等环节。

在一般情况下，系统的电磁时间常数  $T_1$  远小于机电时间常数  $T_m$ ，因此转速的变化往往比电流变化慢得多，对电流环来说，反电动势是一个变化较慢的扰动，在按动态性能设计电流环时，可以暂不考虑反电动势变化的动态影响，即  $DE \approx 0$ 。这时，电流环如图4.3所示。

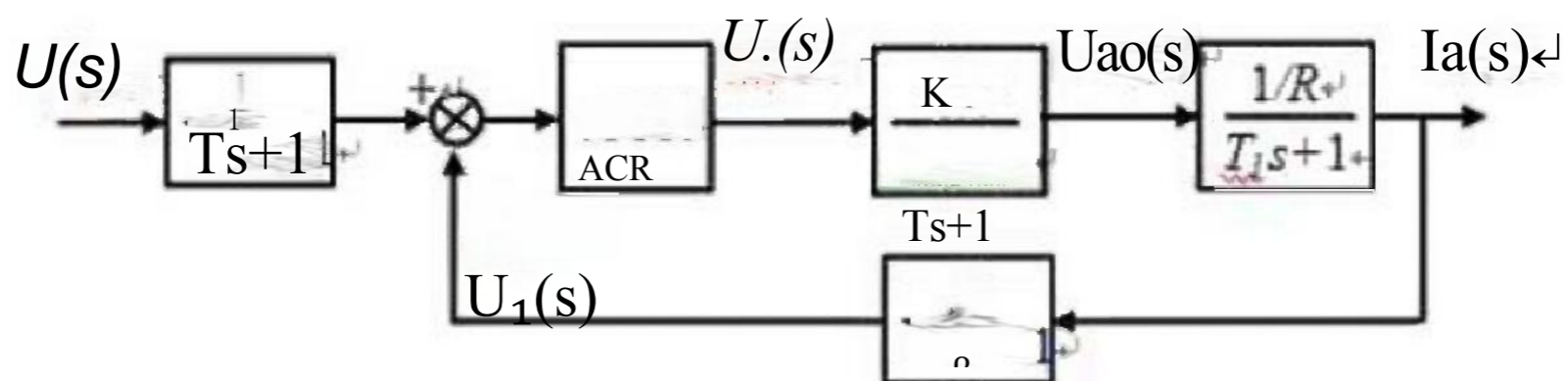


图4.3 忽略反电动势动态影响的电流环动态结构图

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：  
<https://d.book118.com/616105042154010215>