

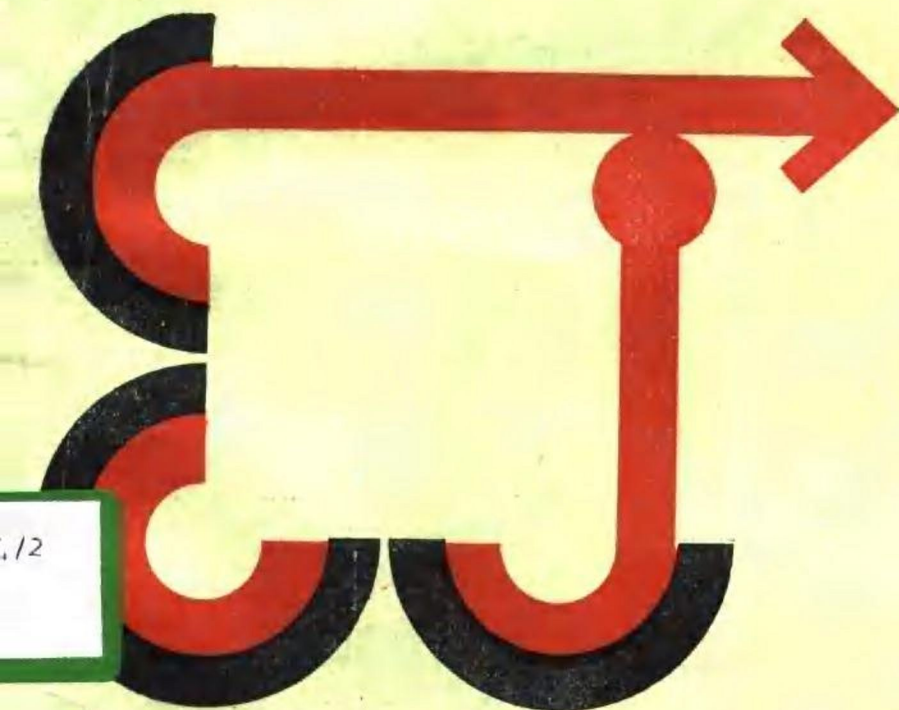
ZHILIU TIAOSU XITONG

直流调速系统

张世铭 王振和 主编



华中理工大学出版社



直流调速系统

张世铭 王振和 主 编

责任编辑 黄以铭

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

武汉大学出版社印刷总厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 9.75 字数: 232 000

1988年8月第1版 1989年8月第1次印刷

印数: 1—2 500

ISBN 7-5609-0360-6/TN·12

定价: 1.95元

内 容 简 介

本教材系根据冶金工业部及有色金属工业总公司两系统所属高等工业专科学校共同制订的工业电气自动化专业《直流调速系统》教学大纲而编写的。

全书共分六章,包括直流调速的基本概念,单闭环直流调速系统的基本原理及改善调速系统静态特性的若干措施,转速、电流双闭环控制的基本原理及有关技术问题,调速系统工程设计方法,可逆直流调速系统的基本原理,调速系统的定性分析、工程估算与调试方法示例。

本书力求突出专科特色,使学生掌握分析与设计调速系统的基本原理及方法。在内容安排上则根据直流调速系统的自身体系与控制规律,由简到繁循序渐进,做到重点突出,内容精练、实用和便于自学。教材各章均附有例题与足够数量的练习题。

本书可作为各类高等专科学校工业自动化专业及相近专业的教材,也可作为中等专业学校有关专业的教材。亦可供从事电气自动化专业工作的工程技术人员参考。

前 言

本教材系根据冶金工业部及有色金属总公司所属高等工业专科学校共同制订的工业电气自动化专业《直流调速系统》教学大纲而编写的，总学时为89（包括实验20学时）。

本书的编写力求使其满足教学大纲的基本要求，突出专科特色。在内容安排上是根据直流调速系统的自身体系与控制规律，由简到繁、循序渐进，并充分注意做到内容精练、实用和便于学生自学。

本课程是在《电子技术基础》、《电机与拖动基础》、《自动控制原理》及《半导体变流技术》等课程的基础上讲授的。全书共分六章：第一章是基本概念；第二章主要阐述了单闭环直流调速系统的基本原理、减小静态误差及改善系统静态特性的诸措施；第三章系统地讲述了转速、电流双闭环积分控制的基本原理及其有关技术问题；第四章系统地分析了调速系统工程设计的原理与方法；第五章介绍可逆直流调速系统的基本工作原理；第六章是系统的综合分析与调试示例，以期通过这一章的学习，使读者掌握对系统进行定性分析、工程估算与调试的基本方法和步骤。

教材各章均附有例题与足够数量的练习题，以便使读者能更好地掌握课程的基本理论，提高分析问题、解决问题的能力。

本书由吉林电气化专科学校张世铭（第二、四、六章）、王振和（第一、五章）和长沙有色金属专科学校卢尊甫（第三章）编写。张世铭、王振和任主编。本溪冶金专科学校吕东岳副教授主审，参加审稿的还有吕圭复、张连科、盛觉民、赵洪恕、佟云峰和沈晓谷等同志。

绪 论

在现代化的工业生产中，几乎无处不使用电力传动装置。轧钢机、电铲、提升机、起重机、机床、纺织机、泵、压缩机、造纸机、运输机等各类生产机械都要采用电动机来传动。随着对生产工艺、产品质量的要求不断提高和产量的增长，越来越多的生产机械要求能实现自动调速。

对可调速的传动系统，按照传动电动机的类型可分为两大类：直流调速系统和交流调速系统。交流电动机具有结构简单、价格低廉、维修简便等优点，但调速较为困难，如何获得具有较高技术经济指标的交流调速系统，多年来一直是人们努力寻求解决的问题。近年来，各种类型的交流调速系统相继涌现，并受到了普遍的重视，特别是随着晶闸管变流器和各种控制元件成本的降低，交流调速系统将会得到较快的发展。但在交流调速系统的发展尚未获得重大突破以前，在一个较长时期内，在工业应用上占主导地位的仍将是直流调速系统。尽管直流电动机与交流电动机相比，它的结构复杂、价格高、维修也较麻烦，但是由于它具有较大的启动转矩和良好的启、制动性能，以及易于在较宽的范围内实现平滑调速，所以直流调速系统在现阶段仍然是自动调速系统的主要形式。目前绝大多数对调速要求较高的生产机械，仍采用直流电动机来传动。

最早的直流调速系统是通过改变直流电动机电枢回路中的电阻来实现调速。虽然这种方法简单易行，但不能得到较宽的调速范围和平滑的调速特性，目前已极少采用。30年代末，出现了发电机-电动机调速系统，特别是随着磁放大器、电机放大机等控制元件问世和被采用，使直流调速系统能在较宽的范围内实现平滑调速，具有较优良的调速性能指标，从而使直流电动机被广泛

地应用于各个生产领域。发电机-电动机调速系统的主要缺点是：需要两台与调速电动机容量相当的旋转电机和一些辅助励磁设备，因而使设备庞大、投资高、占地面积大、维修工作量亦大。自从出现了水银整流器以后，水银整流器-电动机调速系统的采用，使直流调速系统的性能指标又进一步得到提高，特别是系统的快速响应特性，是发电机-电动机系统所不能比拟的。但是它也存在一些缺点，例如：维修不太方便，特别是水银蒸气对维护人员会造成一定的危害等。

1957年，世界出现了第一只晶闸管，与其他变流元件相比，晶闸管具有体积小、响应快、工作可靠、寿命长、维修简便等一系列优点，因而，晶闸管直流调速系统立即显现出它的强大的生命力。用晶闸管变流器供电的直流调速系统，不仅在经济指标和可靠性上有所提高，而且在技术性能上也显示出很大的优越性。晶闸管变流器供电的直流调速系统，其功率放大倍数在一万倍以上，比机组高近一千倍，比水银整流器供电系统亦高几十倍。从快速响应特性来看，机组是秒级，而晶闸管为毫秒级。因此世界上目前的直流调速系统，几乎绝大部分都已改用晶闸管供电了。我国从60年代初试制成功第一只晶闸管以来，晶闸管直流调速系统也得到迅速的发展和广泛的应用。目前200kW以下的晶闸管直流调速装置已实现标准化与系列化，并作为通用产品批量生产。大功率的系列产品，也已开始在大型轧钢机上采用。

随着各种新型控制器件的不断出现，晶闸管供电的直流调速系统，除向大功率发展外，正在实现控制单元的标准化与控制装置的集成化、小型化。随着计算机和微处理机的推广应用，采用计算机和微处理机控制的直流调速系统，必将会达到更高的调速性能指标而在工业上获得广泛的应用。

本教材的重点，是使读者掌握晶闸管直流调速系统的基本原理和设计方法，以期为改造旧系统与设计新型的调速系统建立扎实的理论基础。

目 录

绪 论	(1)
第一章 直流调速系统的基本概念	(1)
1.1 直流电动机调速方案的比较	(1)
1.1.1 改变电枢回路总电阻的调速	(2)
1.1.2 减弱电动机励磁磁通 Φ 的调速	(3)
1.1.3 调节电枢供电电压 U 的调速	(3)
1.2 直流调速系统的组成	(6)
1.2.1 开环控制与闭环控制	(6)
1.2.2 有静差调速系统 and 无静差调速系统	(8)
1.3 调速系统的静态技术指标	(10)
1.3.1 调速系统的两个静态技术指标	(10)
1.3.2 D 、 S 、 Δn_s 之间的关系	(12)
1.4 晶闸管-电动机系统及其开环机械特性	(13)
1.4.1 晶闸管-电动机开环系统的接线方式	(13)
1.4.2 晶闸管-电动机系统的开环机械特性	(13)
小结	(17)
习题	(18)
第二章 单闭环直流调速系统	(19)
2.1 转速负反馈直流调速系统	(19)
2.1.1 调速系统的组成及其工作原理	(19)
2.1.2 系统的静特性方程及其分析	(21)
2.1.3 系统的静态结构图及其应用	(23)
2.1.4 转速负反馈直流调速系统计算示例	(25)
2.2 其它反馈在直流调速系统中的应用	(26)
2.2.1 电压负反馈直流调速系统	(27)
2.2.2 带电流正反馈的直流调速系统	(30)

2.2.3 带电流截止负反馈的直流调速系统·····	(32)
2.3 用积分调节器组成的无静差调速系统·····	(38)
2.3.1 积分调节器·····	(38)
2.3.2 用I调节器组成的无静差调速系统·····	(39)
2.4 用比例积分调节器组成的无静差调速系统·····	(40)
2.4.1 比例积分调节器·····	(41)
2.4.2 用PI调节器组成的无静差调速系统·····	(43)
2.5 直流调速系统中的检测装置·····	(45)
2.5.1 转速检测·····	(45)
2.5.2 电流检测·····	(45)
2.5.3 电压检测·····	(49)
小结·····	(51)
习题·····	(53)
第三章 转速、电流双闭环直流调速系统·····	(56)
3.1 最佳过渡过程的基本概念·····	(56)
3.2 转速、电流双闭环调速系统·····	(61)
3.2.1 双闭环的组成·····	(61)
3.2.2 双闭环调速系统启动过程分析·····	(63)
3.2.3 双闭环系统抗扰动的调节过程·····	(66)
3.2.4 双闭环系统的静特性·····	(68)
3.3 给定积分器·····	(69)
3.4 转速、电流双闭环调速系统中的若干问题·····	(72)
3.4.1 电流断续对系统动特性的影响及电流自适应调节器·····	(73)
3.4.2 电枢电流变化率的限制措施·····	(77)
3.4.3 带有电压调节器的调速系统·····	(81)
● 3.5 调压和调磁的调速系统·····	(85)
3.5.1 独立励磁控制的调压和调磁的调速系统·····	(86)
3.5.2 非独立励磁控制的调压和调磁的调速系统·····	(87)
小结·····	(99)
习题·····	(101)
第四章 调速系统的工程设计方法·····	(103)

4.1	基本 概 念	(103)
4.1.1	控制系统的性能指标	(103)
4.1.2	设计的基本任务	(107)
4.2	典型 I 型二阶系 统	(107)
4.2.1	系统的动态结构图及开环对数幅频特性	(109)
4.2.2	系统的动态性能指标与参数间的关系	(110)
4.2.3	典型 I 型系统的最佳参数及数学模型	(111)
4.2.4	二阶工程最佳闭环系统的设计	(113)
4.3	典型 II 型三阶系 统	(122)
4.3.1	系统动态结构图及开环对数幅频特性	(122)
4.3.2	动态性能指标与系统参数间的关系	(124)
4.3.3	按典型 II 型系统的最佳参数设计系统	(133)
4.4	反馈回路有惯性滞后环节时的补偿 校 正	(141)
4.4.1	反馈回路有惯性滞后时对输出响应的影响	(141)
4.4.2	反馈回路惯性滞后作用的补偿	(142)
4.5	调节器电路及其参数 计 算	(145)
4.6	双闭环调速系统的 设 计	(152)
4.6.1	电流环的设计	(153)
4.6.2	转速环的设计	(160)
4.6.3	转速调节器饱和时启动超调的计算	(165)
4.6.4	设计举例	(163)
4.7	调速系统的微分反馈 校 正	(174)
4.7.1	有微分负反馈系统的传递函数及其近似对数幅频特性	(174)
4.7.2	二阶典型系统的微分反馈校正	(176)
4.7.3	三阶典型系统的微分反馈校正	(179)
* 4.8	调速系统固有参数的测定 方 法	(183)
4.8.1	晶闸管变流器静态放大系数 K_v 的测定	(183)
4.8.2	调速系统主回路电磁时间常数 T_L 的测定	(183)
4.8.3	调速系统机电时间常数 T_M 的测定	(184)
	小 结	(185)

习题	(188)
第五章 可逆调速系统	(191)
5.1 可逆调速系统主电路的接线形式	(191)
5.1.1 电枢可逆电路	(191)
5.1.2 磁场可逆电路	(194)
5.1.3 电枢可逆与磁场可逆方案的比较	(195)
5.2 晶闸管-电动机可逆系统的工作状态	(196)
5.2.1 晶闸管和电动机的工作状态	(196)
5.2.2 可逆系统的四象限运行	(197)
5.2.3 可逆系统中的环流	(198)
5.3 自然环流可逆调速系统	(202)
5.3.1 系统的组成	(202)
5.3.2 系统的工作过程	(303)
5.4 给定环流和可控环流系统	(207)
5.4.1 给定环流系统	(208)
5.4.2 可控环流系统	(210)
5.4.3 交叉反馈环流可控系统	(214)
5.5 逻辑无环流可逆系统	(226)
5.5.1 系统的组成	(226)
5.5.2 系统工作原理	(227)
5.5.3 逻辑无环流系统工作过程	(239)
5.6 逻辑无环流可逆系统实例	(245)
* 5.7 错位无环流可逆系统	(255)
5.7.1 错位控制原理	(255)
5.7.2 具有电压内环的错位无环流可逆系统	(258)
5.7.3 电流调节器限幅电源的讨论	(262)
5.7.4 错位选触无环流可逆系统	(263)
小结	(267)
习题	(269)
第六章 系统综合分析与调试方法示例	(271)
6.1 定性分析	(271)

6.1.1 定性分析的一般步骤.....	(271)
6.1.2 KGS系列调速系统工作原理的 分析.....	(273)
6.2 工程估算	(279)
6.2.1 系统固有参数的确定.....	(280)
6.2.2 预先选定参数的确定.....	(281)
6.3 系统的 调 试.....	(283)
6.3.1 调试前的准备.....	(283)
6.3.2 调试的参考程序.....	(284)
6.4 装置的日常 维 护.....	(286)
习题.....	(287)
附录.....	(289)
参考文献.....	(293)

第一章 直流调速系统的基本概念

到目前为止，在工矿企业中应用的直流调速系统有交磁放大器调速系统、磁放大器调速系统和晶闸管供电的直流调速系统等。由于晶闸管供电的直流调速系统优于前两者，所以该类系统获得了日益广泛的应用。

本章讨论直流电动机调速的基本方案，直流调速系统的组成和分类，调速系统的静态指标。重点研究晶闸管供电的直流电动机调速系统的组成及其开环机械特性。

1.1 直流电动机调速方案的比较

由电机学可知，直流电动机的转速可由式（1-1）表述。

$$n = \frac{U - I_a R_\Sigma}{K_\Phi} \quad (1-1)$$

式中 n ——电动机转速

U ——电动机端电压

I_a ——电动机电枢电流

R_Σ ——电枢回路总电阻 $R_\Sigma = R_a + R$

R_a ——电枢电阻

R ——电枢回路串接附加电阻

Φ ——电动机励磁磁通

K_Φ ——由电动机结构决定的电势系数

由式（1-1）可知，直流电动机的调速方案可有三种：

1. 改变电枢回路总电阻 R_Σ ；
2. 减弱电动机励磁磁通 Φ ；

3. 改变电动机的端电压 U 。

下面分别介绍这三种调速方案的特点。

1.1.1 改变电枢回路总电阻的调速

这种调速方案就是在电枢回路中串接附加电阻 $R = R_1 + R_2$ ，见图1-1。这样电枢回路总电阻 $R_\Sigma = R_a + R_1 + R_2$ ，通过 K_1 触头闭合，可以短接 R_1 ；通过 K_2 触头闭合，可以短接 R_2 。短接后

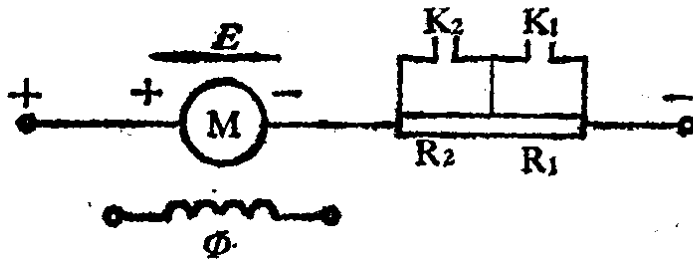


图1-1 改变 R 的调速原理图

电枢回路总电阻 $R_\Sigma = R_a$ ，全部外加电阻被切除。实质上是利用电枢电流 I_a 在 R_Σ 上的压降不同，即转速降 $\Delta n = I_a R_\Sigma / (K_a \Phi)$ 不同而得到不同的稳定运转的转速。其调速特性见图1-2。

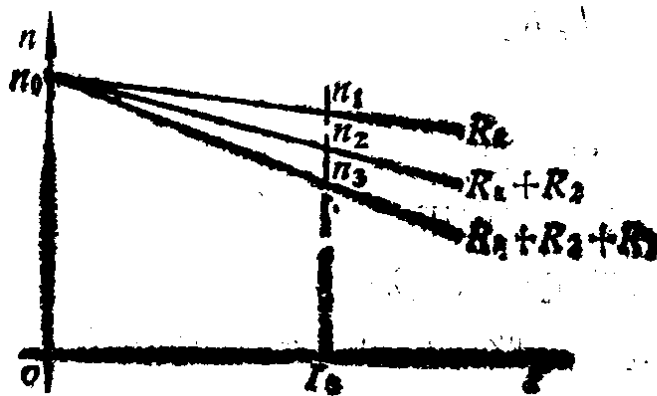


图1-2 改变电阻 R 的调速特性

这种调速方案最早被采用。一般由继电器-接触器控制电阻 R 的接入或短接。该调速系统有设计、安装、调整方便，设备简单，投资省等优点，但是电动机的机械特性软，耗能多，调速范围窄，不平滑。由于线路简单，至今仍然在一些生产机械上应用。

1.1.2 减弱电动机励磁磁通 Φ 的调速

改变电动机的励磁电压，即可改变励磁电流，从而改变励磁磁通 Φ 。由于电动机磁通在额定值时，其铁心已接近饱和，增磁的余地很小，所以用调磁的方法调速主要以减弱磁通来升速。由式(1-1)可见， Φ 减弱，理想空载转速 $n_0 = U/(K_e\Phi)$ 和转速降 $\Delta n = I_a R_\Sigma / (K_e\Phi)$ 均增加，这表明转速 $n = \frac{U}{K_e\Phi} - \frac{I_a R_\Sigma}{K_e\Phi}$ 升高，电动机机械特性变软。其调速特性见图1-3。此外，减弱磁通，将使电动机的电磁转矩 $M = K_M\Phi I$ 减小，若负载转矩 M_L

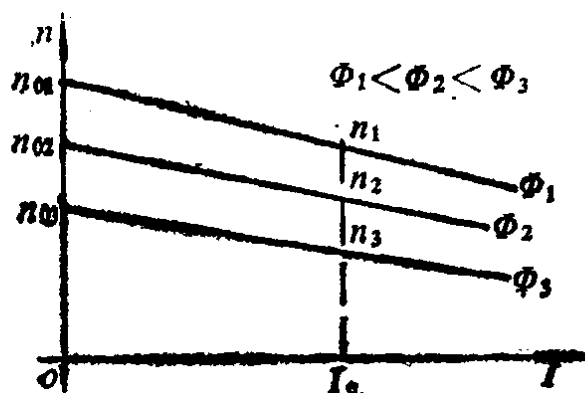


图1-3 改变磁通 Φ 的调速特性

不变，则必将导致电枢电流 I 增加，而电流 I 的增加，又将导致机械特性变软，而且引起发热加重。该调速方法调速范围不大。这些都是减弱磁通 Φ 调速的缺点。因而，一般只在额定转速以上才采用减弱 Φ 来升速的调速方案。

1.1.3 调节电枢供电电压 U 的调速

由式(1-1)可知，改变电动机端电压 U 的大小，即是改变电动机机械特性的理想空载转速 n_0 的大小，而转速降 Δn 是不受影响的，即机械特性的硬度不变。所以改变电动机供电电压 U ，其机械特性基本上是平行地上下移动。目前，调压调速方案中，多采用以下两种系统。

1. 发电机-电动机(G-M)系统

该系统原理图，见图1-4。这种系统由于发电机G需要原

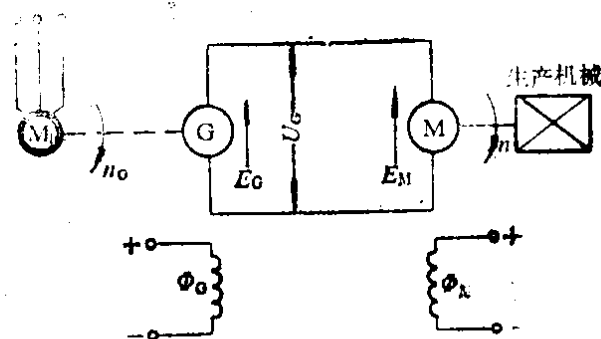


图1-4 G-M系统原理图

动机 M_1 （异步机）拖动，故又称为旋转式变流机组供电的直流调速系统。改变发电机的励磁磁通 Φ_G 就能方便地改变发电机的输出电压 U_G ，从而调节直流电动机的转速 n 。该系统的机械特性基本上是互相平行的直线，见图1-5。从特性上可见，它具有平滑、调速范围大、特性硬等优点。但是它有旋转部分多、占地面积大、费用高、效率低、惯性大、安装必须打基础、运行噪音

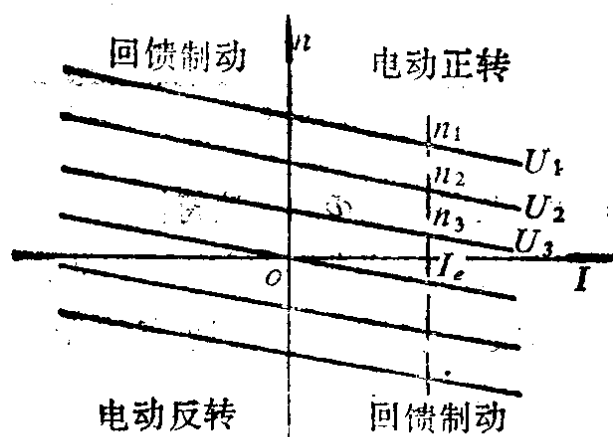


图1-5 G-M系统机械特性

大、维护不方便等缺点。尽管如此，由于这类设备在我国数量多，工程技术人员和维护人员对该系统比较熟悉，有维护经验，因此，现今仍在一些设备上使用。

在20世纪50年代初出现了离子拖动控制系统，用水银整流器变流装置取代旋转式变流机组，减小了噪音，提高了效率和控制的灵活性。但由于水银整流器造价高，体积大，尤其是水银对环

境的污染，严重危害维护人员人身的健康，因此，其应用时间不长。到了60年代就让位于经济、可靠和性能优越的晶闸管变流装置。

2. 晶闸管-电动机 (UR-M) 系统

该系统原理图，见图 1-6。由静止的晶闸管变流装置 UR 提

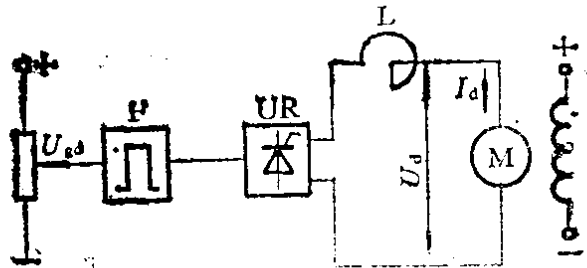


图1-6 晶闸管供电的直流调速系统

供可调的直流电压 U_d 给直流电动机 M，构成了 UR-M 直流调速系统。通过 U_g 电压的改变来改变晶闸管触发控制角 α 的大小，进而改变整流电压 U_d 的大小，达到调节直流电动机转速的目的。其 UR-M 系统的机械特性，如图 1-7 所示。

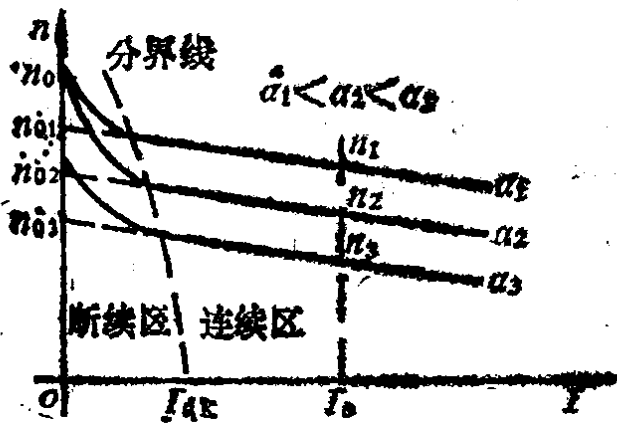


图1-7 UR-M系统机械特性

UR-M与G-M两种调速系统相比较，有下面的不同：功率放大倍数UR-M系统为 10^4 ，而G-M系统为 10^1 ；在快速性上UR-M系统为毫秒级，G-M系统为秒级；此外，UR-M系统具有效率高、体积小、占地少、重量轻、无噪音、无环境污染、维护方便等优点。因此，它一出现，就引起了人们极大的重视。虽然它也