

高 职 高 专 系 列 教 材

调速系统与维护

TIADSU XITONG
YU WEIHU

王 瑾 主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

高职高专系列教材

TIAOSU XITONG YU WEIHU

调速系统与维护

王 瑾 主 编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书以直流调速技术及其应用为核心,详细介绍了直流调速系统基础知识,包括单闭环直流调速系统、双闭环直流调速系统、可逆直流调速系统及计算机控制的直流调速系统,交流调速部分简单介绍了交流调压调速和变频调速的工作原理。另外,通过介绍常用直流调速系统实训设备的结构原理,详细论述了直流调速系统的调试与维护,其中包括主电路调试与维护、电源电路调试与维护、触发电路调试与维护、保护电路调试与维护、隔离电路调试与维护、反馈电路调试与维护、调节电路调试与维护及系统调试与维护等内容。

本书可供高职、高专和成人高校(包括电大、职大)电气工程及其自动化专业学生使用,也适用于一般工科高等院校非自控各相关专业学生,并可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

调速系统与维护 / 王瑾主编. —北京:中国石化出版社, 2015. 2

高职高专系列教材

ISBN 978 - 7 - 5114 - 3137 - 0

I. ①调… II. ①王… III. ①直流调速 - 维修 - 高等职业教育 - 教材 IV. ①TM921. 507

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 039628 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 15.75 印张 293 千字

2015 年 2 月第 1 版 2015 年 2 月第 1 次印刷

定价:40.00 元

前言

Preface

《调速系统与维护》课程是电气类专业的核心课程之一。该课程涉及自动控制原理、电力电子、模拟电子、数字电子、计算机控制和电机学等知识。通过对该课程的学习，学生应具备电力拖动控制系统设计、调试和维护的能力，并能针对不同的控制对象，根据性能指标要求，选择合适的控制规律、系统结构和单元部件。

《调速系统与维护》作为电气工程及其自动化专业一门难度较大的主干课程，其教学改革一直受到广泛重视。该课程的特点是知识覆盖面广，调速技术的更新发展较快，综合性、实践性强。针对这些特点，作为电气自动化专业的教师，尤其针对高职高专学校，理论课时少，基础知识薄弱的情况，必须对这门课程的教学方法进行深入的探讨，提出适应高职教育的教学方法，在有效的时间里，使学生掌握更多知识，并对其实践方案进行了研究实践。

本书以直流调速系统为主，交流调速系统为辅，在介绍各种常用直流调速系统的基本原理后，针对典型实训设备，综合介绍实际调速系统的工作原理，以及维护经验，以国家职业技能标准技师为基础，按照预备技师可持续发展需求和高技能人才培养特点，将职业岗位群的工作技能要求转化为院校的专业培养教学项目。以校企合作开放性办学模式取代传统封闭式办学模式，以任务引领型的一体化情境教学方式取代传统的理论与实训分离的课题教学方式，构建将社会终结性考核转变为过程化评价的现代技工教育课程体系。

本书立足高职高专教育人才培养目标，遵循主动适应社会发展需要、注重实际、强调应用。教材以直流调速技术及其应用为核心，先安排了第一篇：直流调速系统基础知识的讲授，包括单闭环直流调速系统、双闭环直流调速系统、可逆直流调速系统及计算机控制的直流调速系统，交流调速部分简单介绍了交流调压

调速和变频调速的工作原理。这部分内容包含了许多自动控制理论的知识，使学生建立自动控制的概念，同时了解调速系统的性能指标和设计过程。

第二篇通过介绍常用直流调速系统实训设备的结构原理，使学生逐步掌握调速系统的调试与维护，其中包括：主电路调试与维护、电源电路调试与维护、触发电路调试与维护、保护电路调试与维护、隔离电路调试与维护、反馈电路调试与维护、调节电路调试与维护及系统调试与维护。内容详尽，使学生通过学习，起到举一反三的效果，对交流调速系统的设计也具有一定基本知识。教学过程对照相应实训设备，激发学生学习积极性。

本书的第一~七章由王瑾编写；第四章、第十章、第十一章、第十二章由李泉编写；第十三章、第十四章由李长速编写；第八章、第九章由郭彬编写，全书由王瑾统稿。马应魁教授在教材编写过程中给予了很多意见与帮助，在此一并表示感谢。本书在编写过程中参阅了部分兄弟院校的教材及国内外文献资料，在此，对原作者表示深深的敬意和衷心的感谢。

由于编者水平有限和编写时间比较仓促，书中疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

目录

CONTENTS

第一篇 交直流调速系统

第一章 单闭环直流调速系统 / 3

第一节 直流调速系统的概念 / 3

第二节 转速负反馈有静差直流调速系统 / 7

第三节 转速负反馈无静差直流调速系统 / 20

第四节 具有电压负反馈和电流正反馈的直流调速系统 / 24

第二章 多环调速系统 / 36

第一节 转速、电流双闭环调速系统 / 36

第二节 转速超调的抑制——转速微分负反馈 / 44

第三节 调节器的工程设计方法 / 46

第三章 可逆调速系统 / 56

第一节 晶闸管-直流电动机可逆调速系统 / 56

第二节 有环流可逆调速系统 / 63

第三节 无环流可逆调速系统 / 64

第四节 直流脉宽调制 (PWM) 调速系统 / 70

第四章 计算机控制的直流调速系统 / 82

第一节 计算机数字控制的主要特点 / 82

第二节 计算机数字控制双闭环直流调速系统的硬件和软件 / 86

第三节 数字测速、数字滤波与数字PI调节器 / 89

第五章 交流调压调速系统——一种转差功率消耗型调速系统 / 104

第一节 概述 / 105

第二节 交流异步电动机调压调速系统 / 107

目录

CONTENTS

第六章 交流异步电动机变频调速系统——一种 转差功率不变型调速系统 / 115

第一节 变压变频调速的基本控制方式和机械
特性 / 115

第二节 变频器的分类及特点 / 118

第三节 晶闸管变频调速系统 / 124

第四节 正弦波脉宽调制 (SPWM) 逆变器 / 131

第二篇 直流调速系统调试与维护

第七章 主电路调试与维护 / 137

第一节 主电路调试 / 138

第二节 主电路维护 / 145

第八章 电源电路调试 / 148

第一节 电源电路的调试 / 149

第二节 电源电路的维护 / 153

第九章 触发电路的调试与维护 / 156

第一节 触发电路的调试 / 157

第二节 触发电路维护 / 169

第十章 保护电路调试与维护 / 173

第一节 保护电路调试 / 174

第二节 保护电路维护 / 183

第十一章 隔离电路调试与维护 / 187

第一节 隔离电路调试 / 188

第二节 隔离电路维护 / 195

第十二章 反馈电路调试与维护 / 200

第一节 反馈电路调试 / 201

第十三章 调节电路原理和调试维护 / 218

第一节 调节电路简介 / 218

第二节 调节电路的维护 / 231

第十四章 直流调速系统调试与维护 / 233

参考文献 / 245

第一篇 交直流调速系统



第一章 单闭环直流调速系统

本章概述了单闭环直流调速系统的基本概念，介绍了转速负反馈有静差、无静差直流调速系统的组成、工作原理、稳态参数计算和系统的动静态特性，并叙述了限流保护——电流截止负反馈的工作原理，同时也阐述了其他反馈形式在调速系统中的应用。

第一节 直流调速系统的基本概念

一、直流电动机的调速方法

直流电动机具有良好的启、制动性能，适宜于在宽范围内调速，在轧钢机、矿井卷扬机、挖掘机、海洋钻机、大型起重机、金属切削机床、造纸机等电力拖动领域中得到了广泛应用。近年来，交流调速系统（尤其是变频器技术的迅速发展）大有取代直流调速系统的趋势，而直流调速系统在理论和实践上都比较成熟，并且从反馈闭环控制的角度来看，它又是交流调速系统的理论基础。因此首先应该掌握直流调速系统的控制过程。

他励直流电动机转速方程表达式为：

$$n = \frac{E}{C_e \Phi} = \frac{U_d - I_d R}{C_e \Phi} \quad (1-1)$$

式中 U_d ——电枢电压；

I_d ——电枢电流；

E ——电枢电动势；

R ——电枢回路总电阻；

n ——转速，单位 r/min；

Φ ——励磁磁通；

C_e ——由电动机结构决定的电动势系数。

由他励直流电动机转速方程表达式可知，有三种人为改变参数的调速方式，即调节电枢电

压 U ，减弱励磁磁通 Φ ，改变电枢回路总电阻 R 。

1. 调节电枢电压调速

从式 (1-1) 可知，当磁通 Φ 和电阻 R 一定时，改变电枢电压 U ，可以平滑地调节转速 n ，机械特性将上下平移，如图 1-1 所示。由于受电动机绝缘性能的影响，电枢电压的变化只能向小于额定电压的方向变化，所以这种调速方式只能在电动机额定转速以下调速，其转速调节的下限受低速时运转不稳定的限制。因此，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。

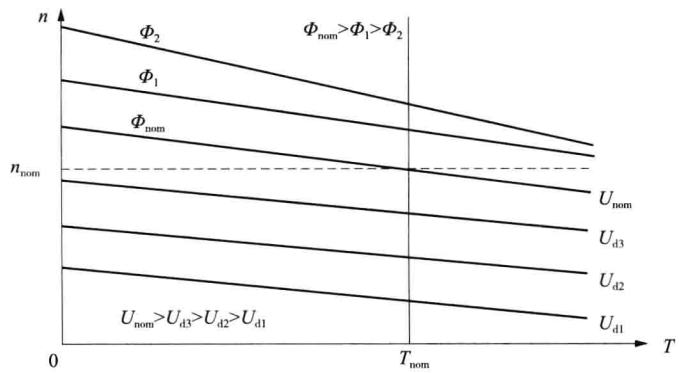


图 1-1 直流电动机机械特性

2. 减弱励磁磁通调速

从式 (1-1) 可知，当磁通 U 和电阻 R 一定时，减弱励磁磁通 Φ （即改变他励直流电动机的励磁电流，考虑到直流电动机额定运行下磁路系统已接近饱和，励磁电流只能减小），电动机转速将高于额定转速，其机械特性向上移动，如图 1-1 所示。

电动机最高转速受换向器和机械强度的限制，减弱励磁磁通调速范围不大。在实际生产中，往往只是配合调压方案，在额定转速以上作小范围的升速。这样调压与调磁相结合，可以扩大调速范围。

3. 改变电枢回路电阻调速

改变电枢回路电阻调速，一般是在电枢回路中串接附加电阻，损耗较大，且只能进行有级调速，电动机的机械特性较软，一般应用于少数小功率场合。工程上常用的主要是前两种调速方法。

二、直流调速系统的供电方式

采用调压调速必须有一个平滑可调的直流电枢电源。常用的可控直流电枢电源有以下三种。

①旋转变流机组：用交流电动机和直流发电机组成机组，以获得可调的直流电压。

②静止可控整流器：用静止的可控整流器，如晶闸管可控整流器，获得可调的直流电压。

③直流斩波器和脉宽调制变换器：用恒定直流电源或不可控整流电源供电，利用直流斩波器或脉宽调制变换器产生可变的平均电压。

1. 旋转变流机组

20 世纪 50 年代以前，工业生产中的直流调速系统，几乎全部采用旋转变流机组供电，如图 1-2 所示。由交流电动机（异步电动机或同步电动机）拖动直流发电机 G 实现变流，发电机给需要调速的直流电动机 M 供电。调节发电机的励磁电流 I_f 可改变其输出电压 U ，从而调节直流电动机的转速 n 。这样的调速系统简称 G-M 系统。如果改变 I_f 的方向，则 U 的极性和 n 的转向都跟着改变，所以 G-M 系统的可逆运行是很容易实现的。但为了供给直流发电机和电动机励磁电流，通常专门设置一台直流励磁发电机 GE。因此 G-M 系统设备多体积大、费用高、效率低、安装维护不便、运行噪声大。20 世纪 50 年代开始出现水银整流器，但水银污染环境，危害人身健康。

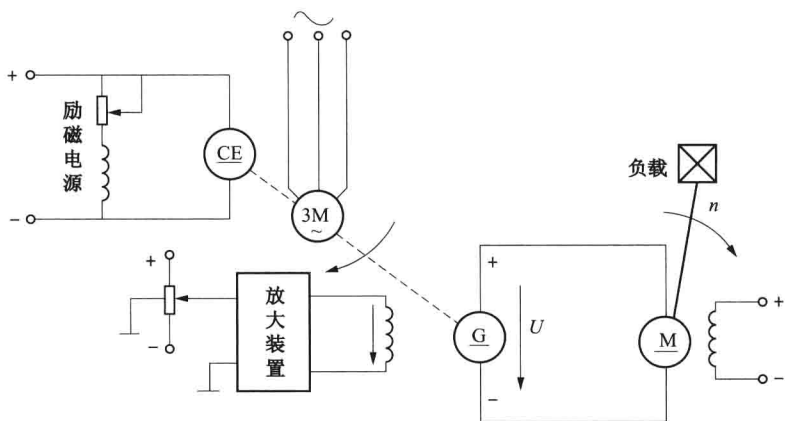


图 1-2 旋转变流机组供电的直流调速系统

2. 静止可控整流器

20 世纪 60 年代起，随着晶闸管的问世，晶闸管整流装置以其效率高、体积小、成本低、无噪声等优点获得广泛应用。其中，晶闸管可控整流器的功率放大倍数在 10^4 以上，其门极电流可以直接用晶体三极管来控制。在控制快速性方面，变流机组是秒级，而晶闸管整流器是毫秒级，这使得系统的动态性能大大提高。晶闸管-直流调速系统，简称 V-M 系统。最简单的 V-M 系统如图 1-3 所示。

晶闸管整流器也有缺点，如晶闸管承受过电压、过电流与 di/dt 、 du/dt 的能力较低，因此电路设有许多保护环节。当系统处于深调速状态时，晶闸管的导通角很小，使得系统的功率因

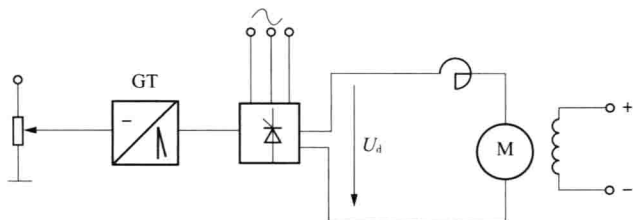


图 1-3 简单的 V-M 系统

数很低，并产生较大的谐波电流，引起电网电压畸变，殃及附近用电设备。若其设备容量在电网中所占比重较大，必须增设无功补偿和滤波装置。

必须说明，晶闸管元件的额定电流是用最大通态平均电流来度量的，电动机的转矩是和整流电流的平均值成正比的。而晶闸管元件和电动机的发热，却与整流电流有效值的平方成正比。因此，当电流断续时，导通角小，同样的平均电流与其对应的有效值大得多，发热也严重得多。这一点在选择晶闸管元件、电机容量、整流电路形式、电抗器和导线截面时必须注意。

3. 直流斩波器

在铁路电力机车、城市电车和地铁电机等电力牵引设备上，常采用直流串励或复励电机，由恒压直流电源供电。晶闸管虽然也可用来控制直流电压，即所谓的直流斩波器，但作为开关元件的晶闸管要实现调速，需要附加一种强迫关断电路。

20 世纪 70 年代以来，随着可关断晶闸管（GTO）、电力晶体管（GTR）、电力场效应管（P-MOSFET）、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）等全控型电力电子器件的迅速发展，由它们构成的斩波器工作频率可达数 KHz，甚至可达数 MHz，采用全控型器件实现开关控制时通常脉宽调制（PWM）变换器供电的直流调速系统。与晶闸管可控装置相比，PWM 系统具有开关频率高、低速运行稳定、动态性能优良、效率高等一系列优点。

三、开环 V-M 系统的机械特性

电流连续时，晶闸管整流供电的直流电动机的机械特性方程式为：

$$n = \frac{U_{d0} - I_d R}{C_e \Phi} = \frac{1}{C_e \Phi} \left(\frac{m}{\pi} U_{sm} \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha - I_d R \right) = n_0 - \Delta n \quad (1-2)$$

式中 U_{sm} —— $\alpha=0$ 时整流线电压波形峰值；

m ——交流电源在一周内整流电压波头数；

n_0 ——开环系统的理想空载转速；

Δn ——开环系统的稳态速降。

由式（1-2）和图1-4可知，调节转速给定电压 U_n^* ，即改变了晶闸管触发电路的控制角 α ，从而调节了晶闸管装置的空载整流电压 U_{d0} ，也就调节了理想空载转速 n_0 。若给定电压 U_n^* 与 U_{d0} 是线性关系，就可以根据工艺要求预先给定出所需的 U_n^* 值，以便确定所需的转速值，所以常常称 U_n^* 为转速给定值。由上式还可

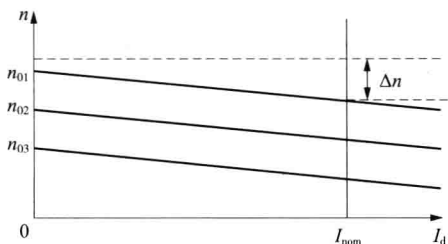


图 1-4 开环系统的机械特性

知，当电动机轴上加机械负载时，电枢回路就产生相应的电流 I_d ，此时即产生 $\Delta n = I_d R / C_e \Phi$ 的转速降。 Δn 的大小反映了机械特性的硬度， Δn 越小，硬度越大。显然，由于系统开环运行， Δn 的大小完全取决于电枢回路电阻 R 及所加的负载大小。

另外，由于晶闸管整流装置的输出电压是脉动的，相应的负载电流也是脉动的。当电动机负载较轻或主回路电感量不足时，就造成了电流断续。这时，随着负载电流的减小，反电势急剧升高，使理想空载转速升高很多。

这样一来，不管是电流连续还是电流断续，开环V-M系统的机械特性仍然是很软的，一般不能满足对调速系统性能指标的要求，因此通常都需要设置反馈环节，以改善系统的机械特性。

第二节 转速负反馈有静差直流调速系统

一、系统的组成及静特性

在自动调速系统中，无论怎样调节， Δn 都无法消除的系统，称为有静差系统。凡是通过适当调节可以使 $\Delta n = 0$ 的系统，称为无静差系统。研究 Δn 的大小对生产机械具有十分重要的意义，因此在调速系统设计中，首先要设法减小 Δn ，甚至为零。根据反馈控制原理，要维持某一物理量基本不变，就应该引入该物理量的负反馈。因此可以引入被控量转速的负反馈，构成转速闭环控制系统。由于系统只有一个转速反馈环，故称为单闭环调速系统。

1. 系统的组成

为了分析的方便，对系统中的电压、电动势、电流均使用大写字母。在动态分析时就认为是瞬时值；在稳态分析时就认为是平均值。如图1-5所示，直流电动机有两个独立的电路，一个是电枢回路，另一个是励磁回路。直流电动机各物理量间的基本关系式是

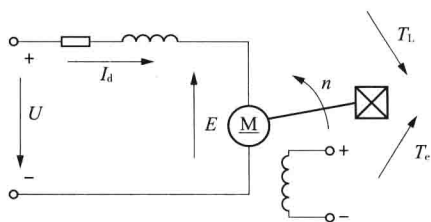


图 1-5 直流电动机稳态运行时各参数之间的关系

$$U = I_d R + L \frac{dI_d}{dt} + E$$

$$T_e = C_M \Phi I_d \quad (1-3)$$

$$T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

$$E = C_e \Phi n$$

式中 U 、 I_d ——分别为电动机电枢瞬时电压、电流；

T_e ——电磁转矩；

T_L ——负载转矩；

C_M ——电动机额定励磁下的转矩电流比， $N \cdot m/A$ ， $C_M = \frac{30}{\pi} C_e$ ，

$C_e \Phi$ ——电动机额定励磁下的电动势转速比， $V \cdot \min/r$ ；

GD^2 ——电力拖动运动部分折算到电动机轴上的飞轮惯量， $N \cdot m^2$ 。

$GD^2/375$ ——转速惯量。

由式 (1-3) 可知，在平衡状态，电动机的电磁转矩 T_e 的大小主要取决于负载转矩 T_L ，即电枢电流 I_d 的大小（即负载）。可见直流调速系统实质上是控制电动机转矩来完成的。当电动机负载转矩 T_L 发生变化时，直流电动机内部将会有转速自动调节过程以达到新的平衡。若以 T_L 增大为例说明其调节过程，如下所示：

$$T_L \uparrow \xrightarrow{T_e < T_L} n \downarrow \xrightarrow{E = C_e \Phi n} E \downarrow \xrightarrow{I_d = (U - E) / R} I_d \uparrow \xrightarrow{T_e = C_T I_d} T_e \uparrow \xrightarrow{\text{一直到}} T_e = T_L$$

由于系统的被控量是转速，在电动机轴上安装一台测速发电机 TG，从而引出与转速成正比的负反馈电压 U_n ， U_n 与转速给定电压 U_n^* 比较后，得到偏差电压 ΔU_n ，经放大器 A 放大后产生触发器 GT 的控制电压 U_{ct} ，用以控制电动机的转速。这就组成了转速反馈控制的调速系统，其原理框图如图 1-6 所示。

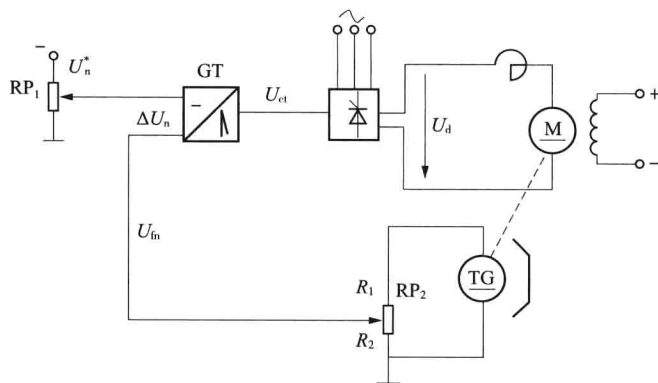


图 1-6 转速负反馈调速系统原理框图

2. 系统的静特性

系统中各环节的稳态输入输出关系如下：

$$\text{电压比较环节} \quad \Delta U_n = U_n^* - U_{fn}$$

$$\text{放大器} \quad U_{ct} = K_p \Delta U_n$$

$$\text{晶闸管整流装置} \quad U_{d0} = K_s U_{ct}$$

$$\text{V-M 开环系统机械特性} \quad n = \frac{U_{d0} - I_d R}{C_e \Phi}$$

$$\text{转速检测环节} \quad U_{fn} = \alpha_2 C_{etg} n = \alpha n$$

式中 K_p ——放大器的电压放大倍数；

K_s ——晶闸管整流装置的放大倍数；

α_2 ——反馈电位器分压比；

C_{etg} ——测速发电机额定磁通下的电动势转速比；

$\alpha = \alpha_2 C_{etg}$ ——转速反馈系数，单位 $V \cdot \min/r$ 。

根据以上各环节的稳态输入输出关系，可画出转速负反馈单闭环调速系统的稳态结构图，如图 1-7 所示。图中各方块内的符号表示该环节的放大倍数，也称静态传递函数。

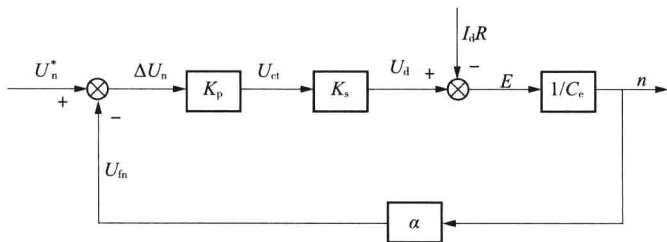


图 1-7 转速负反馈单闭环调速系统的稳态结构图

将结构图化简可得到闭环系统的静特性方程式

$$n = \frac{K_p K_s U_n^* - I_d R}{C_e \Phi (1 + K_p K_s \alpha / C_e \Phi)} = \frac{K_p K_s U_n^*}{C_e \Phi (1 + K)} - \frac{I_d R}{C_e \Phi (1 + K)} = n_{0cl} + \Delta n_{cl} \quad (1-4)$$

式中 $K = K_p K_s \alpha / C_e \Phi$ ——闭环系统开环放大倍数；

n_{0cl} 、 Δn_{cl} ——分别为闭环系统的理想空载转速和稳态速降。

闭环调速系统的静特性表示闭环系统电动机转速与负载电流（转矩）的稳态关系，在形式上与开环机械特性相似，但在本质上二者有很大不同，一个是固有特性，另一个是调节的结果。

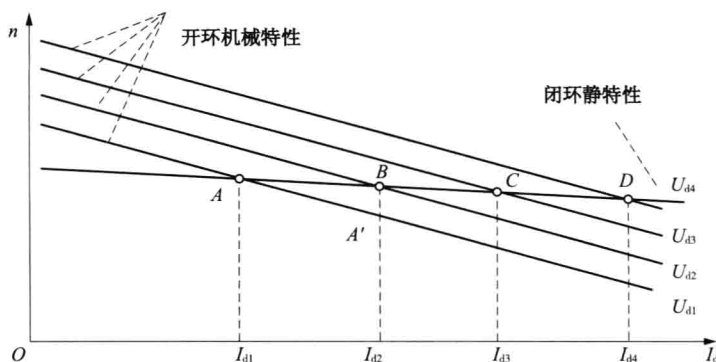


图 1-8 开环系统机械特性和闭环系统静特性的关系

二、闭环系统的静特性与开环系统机械特性的比较

将闭环系统的静特性与开环系统机械特性进行比较,就能清楚地看出闭环控制的优越性。如果断开转速反馈回路,则得到系统的开环机械特性为

$$n = \frac{U_d - I_d R}{C_e \Phi} = \frac{K_p K_s U_n^*}{C_e \Phi} - \frac{I_d R}{C_e \Phi} = n_{0op} + \Delta n_{op} \quad (1-5)$$

式中 n_{0op} 和 Δn_{op} 分别为开环系统的理想空载转速和稳态速降。比较两式可以得出如下结论:

① 闭环系统的静特性比开环系统机械特性硬得多。

在相同的负载下,它们的关系为

$$\Delta n_{cl} = \frac{\Delta n_{op}}{1 + K} \quad (1-6)$$

显然,当 K 值较大时, Δn_{cl} 远小于 Δn_{op} ,也就是说闭环系统的静特性比开环系统机械特性硬得多。

② 闭环系统的静差率比开环系统的静差率小得多。

当 $n_{0op} = n_{0cl}$ 时,则有

$$S_{cl} = S_{op} / (1 + K) \quad (1-7)$$

③ 当要求的静差率一定时,闭环系统的调速范围可以大大提高。

$$D_{cl} = (1 + K) D_{op} \quad (1-8)$$

④ 闭环系统必须设置放大器。

由以上分析可以看出,上述三条优越性是建立在 K 值足够大的基础上。由系统的开环放大倍数 $K = K_p K_s \alpha / C_e \Phi$ 可以看出,若要增大 K 值,只能增大 K_p 和 α 值,因此必须设置放大器。在开环系统中, U_n^* 直接作为 U_{cl} 来控制,因而不用设置放大器,而在闭环系统中,引入转速负反