

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

高等学校教材



# 电力拖动 自动控制系统

DIANLI TUODONG  
ZIDONG  
KONGZHI XITONG

王离久 主编

华中理工大学出版社

**电力拖动自动控制系统**

王离九 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

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

\*

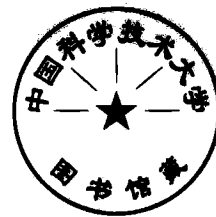
开本: 850×1168 1/32 印张: 11.125 字数: 271 000

1991年5月第一版 1991年5月第一次印刷

印数: 1-1 500

ISBN 7-5609-0546-3/TP·48

定价: 2.90元



## 内 容 提 要

本书系统地论述直流调速系统、交流调速系统及随动系统的原理、结构、性能和工程设计方法。直流调速系统分别论述晶闸管直流调速系统和晶体管直流脉宽调速系统。交流调速系统以变频调速为主,兼顾调压调速和串级调速,并突出地论述矢量控制变频调速。随动系统主要论述位置检测元件的结构和信号变换技术及位置环的构成、分析和设计方法。书中既论述这些系统的原理,也论述有关的应用技术,适用面宽。本书是作为大专院校工业电气自动化专业的教材编写的,但也可供工厂、设计和科研单位从事电气自动化工作的工程技术人员参考。

机械工业出版社

## 前 言

“电力拖动自动控制系统”是一门综合性强，与生产实际紧密结合的专业课程。该书是作为工业电气自动化专业的教材而编写的，书中既论述电力拖动自动控制系统的基本原理，也论述有关的应用技术。为了突出重点，认真贯彻“少而精”的原则，本书主要论述有代表性的自动调速系统和位置随动系统。这些系统的构成原理和分析设计方法可推广应用于其它类型的电力拖动自动控制系统。

全书共有十一章，可概括为三部分。第一部分为直流调速系统，包括第一、二、三、四章，第二部分为交流调速系统，包括第五、六、七、八章，第三部分为随动系统，包括第九、十、十一章。直流调速系统中第一、二、三章论述典型的不可逆式和可逆式晶闸管直流调速系统的工作线路、工作原理和工作特性，并结合这些系统论述各种反馈的作用，自动调速系统的分析设计方法，为论述晶体管直流脉宽调速系统、交流调速系统和随动系统奠定基础。第四章主要论述晶体管脉宽调制放大器的工作线路、工作特性及直流脉宽调速系统中的非线性特性。第二部分论述交流调速系统。鉴于交流调速系统正在蓬勃发展，有着广阔的应用前景，故是本课程重点讲授的内容，但考虑到交流调速系统类型繁多，为了突出重点，概括基本规律，在取材上以交流变频调速为主，兼顾调压调速和串级调速，又考虑到矢量变换控制的重要性，将它从变频调速中独立出来，专门列为第八章。在内容叙述上，考虑到交流调速系统的波形分析对理解其运行特性有很大作用，但详尽的波形分析将过于繁琐，讲解费时，又不易为学生所理解，因此，这里力图避开繁琐的波形分析，尽可能讲清物理概

念, 并采用物理概念与数学分析相结合的讲授方法, 以建立交流调速系统的总体概念。第三部分随动系统。随动系统的结构、工作原理和工作特性都与调速系统不同, 是另一类型的电力拖动自动控制系统。随着电子技术的发展, 计算机的普及应用和伺服电动机的推陈出新, 交直流随动系统都处于迅速发展之中, 其应用范围日益宽广。随动系统的类型很多, 有直流随动系统和交流随动系统, 有模拟式随动系统和数字式随动系统等, 各种随动系统都趋向于在调速系统上加位置环的结构。因此, 在这一部分中主要是论述位置检测元件的结构和信号变换技术及位置环的构成、分析和设计方法, 有关直流或交流调速系统的问题, 将直接引用前面各章中得出的结论。这里将结合两种典型随动系统——带同步联系装置的模拟式同步随动系统和数-模混合式随动系统, 阐述系统的跟随原理、位置环的构成方法及系统的复合控制和变结构调节器的设计方法等基本问题。

本书由王离九任主编, 其中第一、二、三章由徐邦荃编写, 第四章由王离九编写, 第五、六、七、八章由李浚源编写, 第九、十、十一章由万淑芸编写。

在本书编写的过程中, 我们得到华中理工大学工业电气自动化教研室陶绪楠副教授等的支持与帮助。全国有关兄弟院校的同龄专家对本书初稿提了许多的宝贵意见。在此, 作者向他们致以衷心的感谢。

本书既可作为大专院校工业电气自动化专业的教材, 也可供从事电气自动化工作的工程技术人员参考。

由于作者的业务水平和教学经验有限, 错误及不当之处在所难免, 恳切期望广大读者给予批评指正。

作者

1990.1

## 本书所用文字符号表

### 一、元、器件文字符号

A	调节器, 放大器	M	电动机
AC	电流调节器	PR	反相器
AS	速度调节器	R	电阻器
AV	电压调节器	RP	电位器, 可调电阻
BG	自整角机发送机	S	开关 (正组电子模拟开关为FS, 反组电子模拟开关为RS)
BG	自整角机接受机	TG	测速发电机
C	电容器	V	晶体二极管、三极管、晶闸管
F	触发器 (正组为FF, 反组为RF)	VC	晶闸管整流装置 (正组为FV, 反组为RV)
G	发电机	VL	光电耦合管
K	继电器 (正向为FK, 反向为RK)	VS	稳压管
KM	接触器 (正向为FKM, 反向为RKM)		
L	电抗器		

### 二、物理量文字符号

$C$	电容	$F_a$	电枢磁势
$C_M$	转矩系数	$F_m$	励磁磁势
$D$	调速范围	$F_{a1}$	定子磁势的 $\alpha$ 轴分量
$E$	电势	$F_{\beta 1}$	定子磁势的 $\beta$ 轴分量
$E_a$	直流电动机反电动势	$f_1$	定子频率
$E_{ad}$	附加电势	$f_{1n}$	定子额定频率
$E_{20}$	转子不动时转子电势有效值	$GD^2$	飞轮力矩
$E_{2s}$	转子旋转时转子电势有效值	$I_1$	交流电动机定子电流有效值
$e_L$	自感电势	$I_2$	交流电动机转子电流有效值
$F$	磁势	$I_a$	电动机电枢电流平均值 ( $i_a$ )

	为瞬时值)	$n_{c0}$	闭环理想空载转速
$I_{ab}$	堵转电流	$n_{o0}$	开环理想空载转速
$I_{ac}$	截止电流	$n_s$	稳态转速
$I_{am}$	电枢电流最大值	$\Delta n_c$	闭环系统的稳态转速降
$I_d$	整流电流平均值	$\Delta n_o$	开环系统的稳态转速降
$I_{dL}$	与负载转矩对应的负载电 流平均值	$P_1$	电动机定子输入功率
$I_L$	负载电流平均值( $i_L$ 为瞬 时值)	$P_2$	电动机轴上输出功率
$I_1$	环流平均值( $i_1$ 为瞬 时值)	$P_{em}$	电磁功率
$I_m$	激磁电流有效值	$P_M$	机械功率
$i_m$	电枢电流的 $m$ 轴分量	$P_s$	转差功率
$i_a$	电枢电流的 $\alpha$ 轴分量	$P_w$	电网输入功率
$i_\beta$	电枢电流的 $\beta$ 轴分量	$p$	极对数
$i_r$	电枢电流的 $r$ 轴分量	$p_{Cu1}$	定子铜耗
$J$	转动惯量	$p_{Cu2}$	转子铜耗
$L_a$	电枢电感	$p_{Fe}$	铁耗
$L_F$	平波电感器电感	$p_M$	机械损耗
$L_\Sigma$	电枢回路总电感	$Q$	无功功率
$M$	转矩, 互感	$R_0$	调节器输入电阻
$M_{em}$	电磁转矩	$R_a$	电枢电阻
$M_L$	负载转矩	$R_{av}$	电枢及整流装置合成电阻
$M_{max}$	最大转矩	$R_L$	负载电阻, 平波电抗器电阻
$M_R$	转子两相绕组间的互感	$R_V$	整流装置内阻
$M_S$	定子两相绕组间的互感	$R_\Sigma$	电枢回路总电阻
$M_{SR}$	定、转子绕组间的互感最 大值	$r_1$	电动机定子一相绕组的电阻
$m_1$	定子相数	$r_2$	电动机转子一相绕组的电阻
$n$	转速	$r_2'$	折算后的转子一相绕组电阻
$n_1$	同步转速	$S$	转差率
$n_{1n}$	额定同步转速	$S'$	串级调速系统的实际转差率
$n_o$	理想空载转速	$S_{cr}$	临界转差率
		$T$	时间常数, 周期
		$T_{cn}$	转速给定滤波时间常数
		$T_{ci}$	电流给定滤波时间常数

$T_{fi}$	时间电流反馈滤波常数	$u_{m\sigma}$	定子电压的 $m$ 轴分量
$T_{fs}$	转速反馈滤波时间常数	$u_{\alpha 1}$	定子电压的 $\alpha$ 轴分量
$T_L$	电磁时间常数	$u_{\beta 1}$	定子电压的 $\beta$ 轴分量
$T_M$	机电时间常数	$u_{\tau 1}$	定子电压的 $\tau$ 轴分量
$T_{\Sigma i}$	电流环小时间常数	$x_{1\sigma}$	电动机定子漏电抗
$T_{\Sigma \omega}$	速度环小时间常数	$x_{2\sigma}$	电动机转子漏电抗
$U_n$	电枢电压	$x'_{2\sigma}$	折算后的转子漏电抗
$U_c$	直流(移相)控制电压	$Z$	负载阻抗
$U_{c1}$	电流给定电压	$\gamma$	负载电压系数, 换流重叠角
$U_{c\omega}$	转速给定电压	$\eta$	效率
$U_{c\omega}$	电压给定电压	$\theta$	晶闸管导通角
$U_d$	整流电压平均值	$\nu$	功率因数
$U_{d0}$	空载整流电压	$\rho$	占空比
$U_{fi}$	电流反馈电压	$\varphi_2$	转子功率因数角
$U_{fs}$	转速反馈电压	$\varphi_{m\alpha}$	额定气隙磁通量
$U_{fv}$	电压反馈电压	$\varphi_{\alpha 1}$	定子磁链的 $\alpha$ 轴分量
$U_L$	负载电压平均值和有效值 ( $u_L$ 为瞬时值)	$\varphi_{\beta 1}$	定子磁链的 $\beta$ 轴分量
$U_1$	定子相电压有效值	$\omega$	角频率
$U_{1n}$	定子额定电压	$\omega_b$	转折频率
$u_{AL}$	A相负载电压瞬时值	$\omega_c$	剪切频率
$u_B$	驱动电压	$\omega_{ci}$	电流环的剪切频率
$u_s$	同步电压	$\omega_{cs}$	速度环的剪切频率



# 目 录

## 第一章 单闭环直流调速系统

- § 1-1 开环调速系统与闭环调速系统…………… (1)
  - 一、晶闸管-直流电动机调速系统 (简称VC-M系统)……………(1)
  - 二、调速系统的稳态指标……………(4)
- § 1-2 转速负反馈单闭环直流调速系统…………… (6)
  - 一、调速系统稳态性能……………(6)
  - 二、闭环调速系统的动态数学模型及稳定性分析……………(11)
  - 三、无静差调速系统……………(18)
- § 1-3 带电流负反馈截止环节的调速系统……………(24)
  - 一、电流负反馈截止环节……………(24)
  - 二、带电流负反馈截止环节的单闭环调速系统的静特性……………(26)
- 思考题……………(28)

## 第二章 双闭环调速系统与调节器的工程设计

- § 2-1 双闭环调速系统…………… (29)
  - 一、双闭环调速系统的组成……………(29)
  - 二、双闭环调速系统的基本特性……………(30)
- § 2-2 双闭环调速系统中调节器的工程设计方法……………(34)
  - 一、调节器校正的含义……………(34)
  - 二、典型系统参数与性能指标之间的关系……………(36)
  - 三、调节器的选择……………(46)
- § 2-3 按工程设计方法设计双闭环直流调速系统……………(51)
  - 一、他励直流电动机双闭环调速系统动态结构图与参数的建立……………(52)
  - 二、电流调节器的设计……………(55)

三、速度调节器的设计	(58)
四、几个问题的说明	(64)
§ 2-4 双闭环调速系统实例	(67)
思考题	(67)

### 第三章 可逆调速系统

§ 3-1 晶闸管-电动机可逆系统主回路的形式	(69)
§ 3-2 两组晶闸管组成的可逆线路的特殊问题——环流	(72)
一、直流环流为零的控制原则	(73)
二、脉动环流的抑制	(74)
§ 3-3 有环流电枢可逆调速系统	(76)
一、自然环流系统的组成	(76)
二、制动过程分析	(76)
§ 3-4 无环流电枢可逆调速系统	(82)
一、逻辑控制无环流可逆调速系统	(82)
二、错位控制无环流电枢可逆调速系统	(86)
思考题	(89)

### 第四章 晶体管直流脉宽调速系统

§ 4-1 概述	(91)
§ 4-2 晶体管脉宽调制放大器的主电路	(93)
一、不可逆输出的脉宽调制放大器	(93)
二、可逆输出的H型脉宽调制放大器	(95)
§ 4-3 晶体管脉宽调制放大器的控制电路	(113)
一、三角波振荡器	(113)
二、脉冲形成及脉冲分配器	(115)
三、功率三极管驱动电路	(116)
§ 4-4 贮能电容器的计算	(119)
一、回馈能量的计算	(119)

二、储能电容器电容量的计算 .....	(122)
§ 4-5 双环直流脉宽调速系统 .....	(123)
一、原理图 .....	(123)
二、脉宽调制放大器和电动机的数学模型 .....	(125)
三、双环直流脉宽调速系统的结构图 .....	(125)
思考题 .....	(128)

## 第五章 交流电动机的调速方式及调速系统的类型

§ 5-1 交流电动机的调速方式 .....	(129)
§ 5-2 交流调速系统的类型 .....	(132)
§ 5-3 交流调速系统推广应用中的几个问题 .....	(137)
一、谐波问题 .....	(137)
二、功率因数问题 .....	(138)
三、系统的数学描述问题 .....	(138)
四、新控制方案的研究 .....	(139)
思考题 .....	(139)

## 第六章 异步电动机改变转差率的调速系统

§ 6-1 异步电动机调压调速系统 .....	(142)
一、异步电动机在不同定子电压下的机械特性 .....	(142)
二、晶闸管交流调压电路 .....	(143)
三、转速闭环调压调速系统 .....	(151)
四、变极调压调速 .....	(152)
§ 6-2 绕线式异步电动机的串级调速系统 .....	(153)
一、串级调速原理 .....	(153)
二、串级调速装置 .....	(156)
三、串级调速系统的运行特性 .....	(159)
四、串级调速系统的构成 .....	(162)
思考题 .....	(166)

## 第七章 鼠笼式异步电动机的变频调速系统

§ 7-1 变频调速的基本原理 .....	(168)
-----------------------	-------

一、 $U_1/f_1$ 协调控制 .....	(168)
二、转差频率控制 .....	(172)
<b>§ 7-2 变频调速系统中的变频器</b> .....	(175)
一、交-直-交变频器的主电路 .....	(177)
二、交-直-交电压源型变频器 .....	(181)
三、交-直-交电流源型变频器 .....	(187)
四、电压源型变频器和电流源型变频器的性能比较 .....	(189)
五、脉宽调制式电压源型变频器 .....	(191)
六、交-交变频器 .....	(196)
<b>§ 7-3 变频器供电时异步电动机的特性</b> .....	(200)
一、用电压源型变频器供电 .....	(200)
二、用电流源型变频器供电 .....	(203)
<b>§ 7-4 鼠笼式异步电动机变频调速系统</b> .....	(204)
一、转速开环电压源型变频器-异步电动机调速系统 .....	(205)
二、转速开环电流源型变频器-异步电动机调速系统 .....	(208)
三、转差频率控制电流源型变频器-异步电动机调速系统 .....	(210)
<b>思考题</b> .....	(214)

## 第八章 交流电动机的矢量变换控制

<b>§ 8-1 矢量变换控制的基本概念</b> .....	(216)
<b>§ 8-2 交流电动机的坐标变换</b> .....	(219)
一、三相/二相变换(3/2变换) .....	(219)
二、旋转变换 .....	(225)
三、直角坐标/极坐标变换(K/P变换) .....	(226)
<b>§ 8-3 <math>m-\tau</math>坐标系和<math>\alpha-\beta</math>坐标系中异步电动机的基本方程式</b> .....	(227)
一、 $m-\tau$ 坐标系中异步电动机的电压方程 .....	(227)
二、 $m-\tau$ 坐标系中异步电动机的转矩方程 .....	(234)
三、矢量变换控制系统的控制方程 .....	(236)
四、 $\alpha-\beta$ 坐标系中异步电动机的电压方程 .....	(237)
<b>§ 8-4 异步电动机的矢量变换控制系统</b> .....	(237)

一、磁通反馈型矢量变换控制系统·····	(239)
二、磁通前馈型矢量变换控制系统·····	(241)
§ 8-5 永磁式三相同步电动机的矢量变换控制·····	(242)
一、凸极式同步电动机的电压方程和转矩方程·····	(243)
二、永磁式圆筒型转子同步电动机的电压方程和转矩方程·····	(246)
三、 $i_m = 0$ 条件下永磁式圆筒型转子同步电动机的传递函数·····	(247)
四、三相永磁式圆筒转子同步电动机矢量变换控制系统举例·····	(248)
思考题·····	(249)

## 第九章 位置随动系统的结构、类型和检测部件

§ 9-1 位置随动系统的结构和类型·····	(250)
一、位置随动系统的结构和特征·····	(250)
二、位置随动系统的基本类型·····	(252)
§ 9-2 位置检测部件及信号处理电路·····	(253)
一、自整角机角差检测器·····	(254)
二、旋转变压器和感应同步器·····	(258)
三、数字式位置传感器·····	(265)
思考题·····	(266)

## 第十章 位置随动系统

§ 10-1 模拟式位置随动系统·····	(267)
一、自整角机位置随动系统·····	(267)
二、双通道粗-精检测随动系统·····	(269)
三、随动系统举例·····	(274)
§ 10-2 数字随动系统·····	(280)
一、脉冲/相位调制式随动系统·····	(281)
二、数字比较式随动系统·····	(290)
思考题·····	(297)

## 第十一章 随动系统的稳态误差分析和动态校正

§ 11-1 位置随动系统的稳态误差分析·····	(298)
---------------------------	-------

一、稳态误差和稳态误差系数 .....	(298)
二、正弦输入信号下的误差分析 .....	(305)
§ 11-2 位置随动系统工程设计的基本方法 .....	(307)
一、位置随动系统的数学模型 .....	(308)
二、按典型系统设计位置环和位置调节器参数选择 .....	(312)
三、复合控制及其在提高跟随性能方面的作用 .....	(321)
§ 11-3 快速随动系统设计 .....	(327)
一、快速定位系统调节器设计 .....	(328)
二、变结构位置调节器 .....	(331)
思考题 .....	(337)
参考文献 .....	(338)

# 第一章 单闭环直流调速系统

调速系统是当今电力拖动自动控制系统中应用得最普遍的一种系统。目前对调速性能要求较高的各类生产机械已普遍采用直流传动，其控制系统按控制方式的不同分为开环系统与闭环系统（或称反馈系统）。本章将从系统的静态指标入手，着重讨论由晶闸管供电、带转速反馈的单闭环直流调速系统，并说明采用反馈系统的必要性。本章介绍的反馈控制原理及控制规律是后续章节进一步讨论其它典型系统的基础。

## § 1-1 开环调速系统与闭环调速系统

### 一、晶闸管直流电动机调速系统（简称VC-M系统）

随着半导体变流技术和电子技术的发展，直流传动系统中的可控变流装置也随之不断地更新换代。早在40年代采用的是旋转变流机组，即发电机-电动机系统，该系统的原理图示于图1-1中，

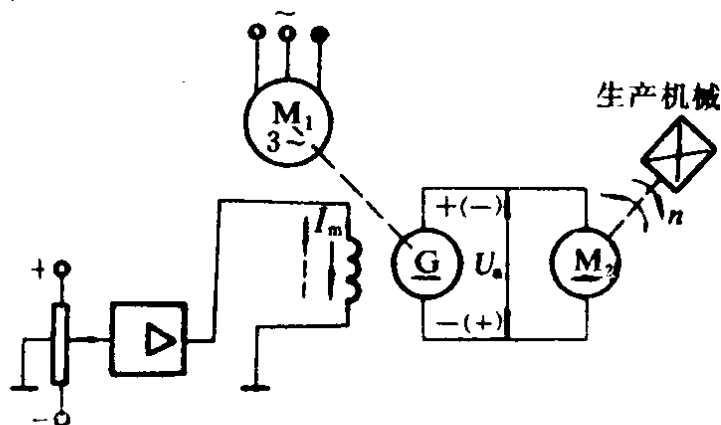


图1-1 旋转变流机组供电的直流调速系统

它由交流电动机 $M_1$ （异步电动机或同步电动机）拖动直流发电机 $G$ 实现变流，由 $G$ 给需要调速的直流电动机供电，调节 $G$ 的励磁电

流 $I_a$ 即可改变其输出电压 $U_a$ ，从而调节电动机的转速 $n$ ；改变发电机励磁电流的方向，可以改变发电机输出电压的极性以实现电动机的正、反转可逆运行。这种系统常用交磁放大机作为功率放大器直接对发电机励磁绕组供电，所以又称为放大机控制的发电机-电动机组系统（简称G-M系统）。

这种系统在50年代已被广泛地使用着，至今对于尚未进行设备改造的地方仍沿用这种系统。由于这种系统至少应包含两台与调速电动机容量相当的旋转电机，因而设备多、占地大、效率低、运行费用昂贵、安装需打地基、运行有噪音、维护不方便。为了克服这些缺点，50年代开始采用水银整流器作为可控变流装置，用静止的变流器取代了旋转的变流机组。由于水银严重污染了环境，危害人体的健康，因而到了50年代末又被相继出现的晶闸管（大功率半导体器件）变流装置所取代了。由晶闸管变流装置直接给直流电动机供电的调速系统，称为晶闸管-电动机调速系统（简称VC-M系统，又称为静止的Word-Leonard系统），如图1-2所示。这种系统已成为直流调速系统的主要形式，在世界各主要工业国已得到普遍应用。我国自行设计的晶闸管直流变流装置已有标准化和系列化的产品（装置的最大容量已达7000kW）。

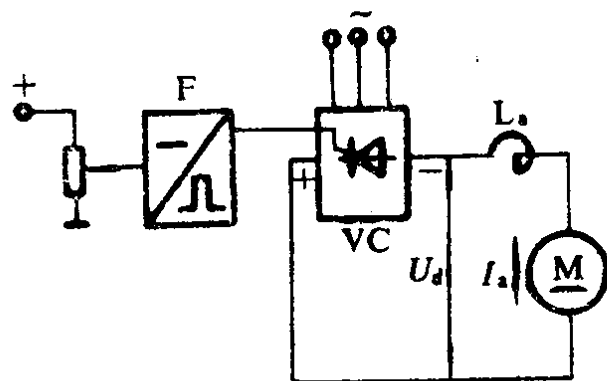


图1-2 晶闸管变流装置供电的直流调速系统

由图1-2可以看出，变流装置输出的直流脉动电压直接加到平波电抗器 $L_d$ 和电动机电枢两端。当电枢电流保持连续时，系统处于稳定运行状态，其电压平衡方程式为



$$U_{d0} = E + I_a R_\Sigma \quad (1-1)$$

$$R_\Sigma = X_T m / 2\pi + R_T + R_L + R_{\cdot v}$$

式中  $U_{d0}$ ——理想空载整流电压的平均值

$E$ ——电动机反电势,  $E = C \cdot n$

$I_a$ ——电动机电枢电流

$R_\Sigma$ ——电枢回路总电阻

$X_T m / 2\pi$ ——整流变压器漏抗  $X_T$  引起的换向压降对应的等效电阻, 在三相零式整流电路中  $m = 3$ , 在三相全控桥式整流电路中  $m = 6$

$R_T$ ——整流变压器绕组折合到副边的等效电阻

$R_L$ ——平波电抗器电阻

$R_{\cdot v}$ ——包括电动机电枢电阻及整流装置内阻。

将  $E = C \cdot n$  代入式(1-1), 经整理后可得电动机转速表达式为

$$n = \frac{U_{d0} - I_a R_\Sigma}{C} \quad (1-2)$$

由式(1-2)可知, VC-M系统有两种主要的调速方式:

1. 保持电动机磁场为额定值, 改变电枢两端电压, 可得到基速以下的无级调速, 实现电动机恒转矩调速。

2. 电动机端电压为额定值, 减弱电动机磁场, 可得基速以上的无级调速, 实现电动机恒功率调速。

在主电路中串接电阻的调速方式, 由于电阻本身消耗电能, 所以一般很少采用。由式(1-2)可知, 在电枢电流连续的情况下, 晶闸管开环直流调速系统的机械特性方程式为

$$n = \frac{U_{d0} - I_a R_\Sigma}{C} = n_{00} - \Delta n_0 \quad (1-3)$$

式中  $U_{d0} = AU_2 \cos\alpha$ , 当用三相零式整流电路时,  $A = 1.17$ , 当用三相全控桥式整流电路时,  $A = 2.34$

$U_2$ ——整流变压器相电压的有效值