

高等院校理工科教材

装甲车辆

电力传动系统及其设计

臧克茂 马晓军 编著



国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>



责任编辑: 崔晓莉 E-mail: xcui@ndip.cn
封面设计: 彭建华 E-mail: jhpeng@ndip.cn

ISBN 7-118-03595-5



9 787118 035957 >

ISBN 7-118-03595-5/TJ·187

定价: 25.00 元

高等院校理工科教材

装甲车辆电力传动系统及其设计

臧克茂 马晓军 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

装甲车辆电力传动系统及其设计/臧克茂,马晓军编
著.—北京:国防工业出版社,2004.9
高等院校理工科教材
ISBN 7-118-03595-5

I. 装... II. ①臧...②马... III. 装甲车-电力传
动-传动系-高等学校-教材 IV. TJ811

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 097433 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经营

*

开本 787×1092 1/16 印张 20 459 千字

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:25.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:68428422

发行邮购:68414474

发行传真:68411535

发行业务:68472764

前 言

坦克装甲车(统称为装甲车辆)自第一次世界大战中出世至今,性能有了很大提高。今后装甲车辆进一步发展的途径,普遍认为需要借助于电气自动化程度的进一步提高。电气自动化程度是装甲车辆发展水平的重要标志,它对于装甲车辆的火力、机动和防护性能的提高和发挥起着十分重要的作用。未来的“全电坦克”、“无人驾驶坦克”更是装甲车辆电气自动化程度高度发展的体现。本书主要是作为坦克电气工程及其自动化专业相关课程的教材,学员通过对本书的学习,能比较全面地、系统地掌握装甲车辆电力传动系统的原理和设计方法,为从事装甲车辆电气自动化的技术工作奠定基础,同时也为对装甲车辆电气自动化技术有兴趣的人员提供参考材料。装甲兵工程学院在1982年首次开出“自动控制系统”课时,基本上采用了普通高等学校相近专业的教学内容。随着20多年的教学实践和对课程认识的提高,国内外装甲车辆技术的发展,相关科研工作的开展,以及对装甲车辆电力传动系统特点理解的深入,教学内容随之不断更新和补充,书的名称由原来的“自动控制系统”到现在的“装甲车辆电力传动系统及其设计”,从一个侧面反映了装甲兵工程学院坦克电气工程及其自动化专业在教学和科研工作方面的变化。

本书既有一般通用的基础理论,又有反映装甲车辆特点的内容。全书共分7章。第一章,电机放大机调速系统:现在工业中已很少见到电机放大机—电动机调速系统了,而且在前期课程——“电机原理及拖动”的通用教材中,一般也没有关于“电机放大机”的内容。但目前绝大多数装甲车辆还有这种调速系统。本书首先介绍电机放大机的原理,再分析电机放大机—电动机调速系统的工作特点,最后介绍用于坦克炮塔电传装置的几种电机放大机—电动机调速系统。第二章,晶闸管调速系统:晶闸管的出现,使变流(调压)技术发生了根本性的变革,晶闸管变流装置完全取代了原来的变流设备,而且使变流(调压)调速系统的理论和实践得到了空前的发展,它的一些研究方法被其它类型调速系统所借鉴,本书对此作了较多的介绍。第三章,直流脉宽调速系统:电机调速引用了通信领域的脉宽调制技术后,低速性能有了很大提高,使调速比达到20000以上,在国内外,脉宽调制技术便被迅速应用到装甲车辆上需要调速的装备中,例如坦克火炮的控制系统中,已经有成功应用脉宽调速系统的实例。第四章,位置随动系统:装甲车辆上的火炮不仅需要调速系统的驱动实现对目标的瞄准,还需要在装甲车辆的运动中始终稳定地瞄准目标,这通常称为火炮的稳定状态。在控制系统的分类中,稳定状态属于随动系统范畴,本书以59式坦克为例,分析了坦克火炮控制系统中的随动系统的特点。第五章,电力传动系统的工程设计方法:本章从分析调速系统和随动系统的动态性能入手,介绍了它们符合性能要求的工程设计方法。第六章异步电机变压变频调速系统和第七章同步电机变频调速系统:在20世纪80年代,交流电机调速技术刚刚取得了突破,交流电机调速系统大都单独成书

IV

作为选修内容。我们编写的“自动控制系统”也没有涉及交流电机调速系统。如今交流电机调速技术已经得到比较广泛的应用,而且我们通过科研工作,将交流电机调速技术应用于坦克火炮控制系统和装甲车电传动系统的研究中,在理论和实践两方面都取得了一些成果。所以将交流电机变压变频调速系统作为两章融入本书。

在撰写和出版本书的过程中,参考和引用了所列主要参考文献作者的著作,得到了国防工业出版社和装甲兵工程学院控制工程系以及电气工程教研室的领导和同志们的热心指导和帮助;尤其是崔晓莉编辑付出了许多心血和努力,本书才得以与读者见面。对此我们表示衷心的感谢。

由于我们学识水平有限,书中难免有许多错误和不妥之处,恳希得到批评和指正。

臧克茂

2004年4月18日

内 容 简 介

现代装甲车辆的电力传动系统,主要有火炮/炮塔电力传动系统(简称坦克炮控系统)和装甲车辆电力驱动系统(又称坦克电传动)。这些装甲车辆电力传动系统,采用电机放大机、脉宽调制(PWM)等直流调速技术或正弦脉宽调制(SPWM)、矢量控制等交流调速技术构成调速系统,实现火炮瞄准速度和车辆运动速度的调节;组成随动(伺服)系统,实现火炮在车辆运动中能始终瞄准目标,即所谓火炮稳定工况。车辆运动、尤其火炮瞄准速度的调节范围很大,调速比达到 10^3 的数量级。在直流调速中主要采用电动机电枢控制,在交流调速中采用永磁同步电动机的SPWM控制或矢量控制,并在必要时配合采用弱磁调速控制。通常火炮的稳定精度以mil的数量级表示,火炮随动系统需要有十分高的响应速度。坦克火炮通常需要兼有瞄准和稳定两种工况,所以坦克炮控系统常常是变结构的双环控制系统。本书的内容,主要为分析研究现代装甲车辆电力传动系统的原理及其进行工程设计的方法,同时也考虑了未来电力传动技术的发展以及装甲车辆电气自动化程度进一步提高、采用电力传动系统装备增多的需要。本书可作为坦克电气工程及自动化专业的教材和供相关的技术人员阅读参考。

目 录

第一章 电机放大机调速系统	3
§ 1-1 调速系统的静态调速指标	3
一、调速范围	3
二、静差率	3
§ 1-2 电机放大机的工作原理和特性	5
一、电机放大机的工作原理	5
二、电机放大机的空载特性	6
三、电机放大机的外特性	7
四、电机放大机的动态特性	8
§ 1-3 他励直流电动机的传递函数	12
§ 1-4 电机放大机调速系统——坦克炮塔电力传动系统	14
一、有电压负反馈的电机放大机—电动机调速系统	14
二、有转速负反馈的电机放大机—电动机调速系统	20
三、有软反馈的电机放大机—电动机系统	23
第二章 晶闸管调速系统	27
§ 2-1 晶闸管—电动机调速系统的特殊问题	28
一、触发脉冲相位控制	28
二、电流脉动的影响及其抑制措施	29
三、电流波形的连续和断续	30
四、晶闸管—电动机系统的机械特性	30
§ 2-2 晶闸管闭环调速系统的组成及其静特性	32
一、闭环调速系统的组成	32
二、闭环调速系统的静特性	33
三、开环系统机械特性和闭环系统静特性的比较	34
§ 2-3 闭环系统的电流截止负反馈—限流保护	35
§ 2-4 电压负反馈和电流正反馈调速系统	37
§ 2-5 晶闸管调速系统的动态特性	39
一、电枢控制他励直流电动机	39
二、晶闸管触发和整流装置	39
三、比例放大器和测速发电机	42

四、闭环调速系统的数学模型和传递函数	42
五、稳定性分析	43
§ 2-6 无静差调速系统	44
§ 2-7 转速、电流双闭环调速系统	47
一、问题的提出	47
二、转速、电流双闭环调速系统的组成	47
三、稳态结构图和静特性	48
四、各变量的稳态工作点和稳态参数计算	50
五、双闭环调速系统的动态性能	50
§ 2-8 转速超调的抑制——转速微分负反馈	54
一、调速系统的转速超调	54
二、带转速微分负反馈双闭环调速系统的基本原理	54
三、退饱和时间与退饱和转速	55
四、带转速微分负反馈双闭环调速系统的抗扰性能	56
§ 2-9 三环调速系统	57
一、带电流变化率内环的三环调速系统	58
二、带电压内环的三环调速系统	60
§ 2-10 弱磁控制的直流调速系统	63
一、电枢电压与励磁配合控制	63
二、非独立控制励磁的调速系统	63
§ 2-11 晶闸管可逆调速系统	65
一、晶闸管可逆调速系统的线路	65
二、晶闸管可逆调速系统的回馈制动	68
三、两组晶闸管可逆线路中的环流	71
四、有环流可逆调速系统	74
五、无环流可逆调速系统	75
第三章 直流脉宽调速系统	86
§ 3-1 脉宽调制变换器	86
一、不可逆 PWM 变换器	86
二、可逆 PWM 变换器	88
§ 3-2 脉宽调速系统的开环机械特性	91
§ 3-3 脉宽调速系统的控制电路	93
一、脉宽调制器	93
二、逻辑延时环节	95
三、基极驱动器	95
§ 3-4 晶体管脉宽调速系统的特殊问题	96
一、电流脉动量和转速脉动量	96
二、脉宽调制器和 PWM 变换器的传递函数	101

三、电力晶体管的安全工作区和缓冲电路	102
四、电力晶体管的开关过程、开关损耗和最佳开关频率	107
五、泵升电压限制电路	110
§ 3-5 59D 坦克炮塔电力传动系统	110
一、控制系统部分	112
二、稳压电源部分	115
§ 3-6 WZ501 火炮射角电力传动系统	117
§ 3-7 某步兵战车电力传动系统的组成及工作原理	118
一、系统的组成	118
二、电力传动系统的基本工作原理	119
第四章 位置随动系统	120
§ 4-1 位置随动系统概述	120
一、位置随动系统的应用	120
二、位置随动系统的主要组成部件及其工作原理	120
三、位置随动系统与调速系统的比较	121
四、位置随动系统的分类	121
§ 4-2 位置信号的检测	123
一、自整角机(BS)	123
二、旋转变压器(BR)	126
三、感应同步器(BIS)	127
四、光电编码盘	129
§ 4-3 自整角机位置随动系统	131
一、自整角机位置随动系统的组成和数学模型	131
二、位置随动系统的稳态误差分析	134
第五章 电力传动系统的工程设计方法	144
§ 5-1 系统的动态性能指标与典型系统的开环对数频率特性	145
一、动态性能指标	145
二、典型系统	147
三、典型 I 型系统参数和性能指标的关系	149
四、典型 II 型系统参数和性能指标的关系	153
§ 5-2 调节器结构的选择和传递函数的近似处理——非典型系统的 典型化	157
一、调节器结构的选择	157
二、小惯性环节的近似处理	159
三、高阶系统的降阶处理	160
四、大惯性环节的近似处理	160
§ 5-3 反馈校正及其参数选择	162

§ 5-4 双闭环系统中电流调节器和转速调节器的设计	165
一、电流调节器的设计	166
二、转速调节器的设计	170
三、转速调节器退饱和时转速超调量的计算	173
四、设计举例	176
§ 5-5 随动系统及其调节器的设计	184
一、串联校正(调节器校正)	185
二、并联校正	189
三、复合控制	197
§ 5-6 坦克火炮稳定器的分析与计算	200
一、各环节的传递函数	201
二、稳定器的系统结构图	210
三、稳定器在稳定工作状态下的精度分析	211
四、复合控制系统的频率特性	213
五、稳定器系统稳定性的判别	216
六、稳定器的刚性计算	217
第六章 异步电动机变压变频调速系统	219
§ 6-1 变频调速的基本控制方式	219
一、基频以下调速	219
二、基频以上调速	220
§ 6-2 异步电机电压、频率协调控制时的机械特性	220
一、正弦波恒压恒频供电时异步电机的机械特性	220
二、基频以下电压、频率协调控制时的机械特性	221
三、基频以上变频调速时的机械特性	224
四、正弦波恒流供电时的机械特性	224
§ 6-3 电力电子变压变频装置	226
一、间接变压变频装置(交—直—交变压变频装置)	226
二、直接变压变频装置(交—交变压变频装置)	227
三、电压源型变频器和电流源型变频器	228
四、180°导通型和120°导通型逆变器	231
§ 6-4 正弦脉宽调制(SPWM)变压变频器	233
一、正弦脉宽调制原理	233
二、SPWM波形的基波电压	236
三、对脉宽调制的制约条件	237
四、同步调制与异步调制	238
§ 6-5 脉宽调制变压变频器的控制方法	240
一、SPWM的模拟控制	240
二、SPWM的数字控制	241

三、消除指定次数谐波的 PWM 控制	244
四、电流跟踪控制	244
五、电压空间矢量控制(磁链跟踪控制)	246
§ 6-6 转速开环恒压频比控制的调速系统	246
一、电压源型晶闸管变频器—异步电机调速系统	246
二、电流源型晶闸管变频器—异步电机调速系统	250
三、数字控制的 SPWM 变频调速系统	252
§ 6-7 转速闭环转差频率控制的变压变频调速系统	254
一、转差频率控制的基本概念	255
二、转差频率控制的规律	255
三、转差频率控制的变压变频调速系统	257
四、闭环转差频率控制调速系统的优、缺点	258
§ 6-8 异步电机的多变量数学模型	259
一、异步电机动态数学模型的性质	259
二、三相异步电机的多变量非线性数学模型	260
§ 6-9 坐标变换及其在异步电机中的应用	264
一、坐标变换	264
二、三相异步电机在两相坐标系上的数学模型	266
§ 6-10 按转子磁场定向的矢量控制系统	271
一、异步电机的坐标变换结构图和等效直流电机模型	271
二、矢量控制系统的构想	272
三、矢量控制的基本方程式及其解耦性质	272
四、转速、磁链闭环控制的矢量控制系统及转子磁链模型	274
五、磁链开环转差控制的矢量控制系统	276
§ 6-11 按定子磁场控制的直接转矩控制系统	278
一、直接转矩控制系统的原理和特点	278
二、直接转矩控制系统的控制方案和模型算法	279
第七章 同步电机变频调速系统	281
§ 7-1 他控变频同步电机调速系统	282
一、转速开环恒压频比控制的同步电机调速系统	282
二、由交—交变压变频器供电的低速同步电机调速系统	282
三、按气隙磁场定向的同步电机矢量控制系统	282
四、同步电机的多变量动态数学模型	286
§ 7-2 自控变频同步电机调速系统	287
一、大中容量晶闸管自控变频同步电机(无换向器电机)调速系统	288
二、小容量永磁同步电机自控变频调速系统	294
§ 7-3 105mm 坦克炮的双向永磁同步电动机控制系统	298
§ 7-4 装甲车数字电驱动系统	299

附录	304
一、二阶系统的动态性能指标	304
二、典型Ⅱ型系统的 M_{\min} 准则——式(5-25)、式(5-26)及式(5-28)的 证明	307
参考文献	309

常用符号表

A	放大量,调节器	f	频率
ACR	电流调节器	FB	反馈环节
ADR	电流变化率调节器	FBS	测速反馈环节
AER	电动势调节器	G	发电机,振荡器;重力
AFR	励磁电流调节器	GAB	绝对值变换器
AP	脉冲放大器	GD^2	飞轮惯量
APR	位置调节器	GI	给定积分器
AR	反号器	GM	调制波发生器;增益裕度
ASR	转速调节器	GT	触发装置
ATR	转矩调节器	GTO	门极可关断晶闸管
AVR	电压调节器	GTF	正组触发装置
$A\psi R$	磁链调节器	GTR	反组触发装置;电力晶体管
B	非电量——电量变换器;磁通密度	GVF	压频变换器
BIS	感应同步器	h	开环对数率特性中频宽
BQ	位置变换器	I_d, i_d	整流电流
BR	旋转变压器	i_t	励磁电流
BRR	旋转变压接收器	J	转动惯量
BRT	旋转传感器,旋转变压发送器	K	继电器,接触器;控制绕组;闭环系统的开环放大倍数
BS	自整角机	K_a	加速度品质因数
BSR	自整角接收机	K_v	速度品质因数
BST	自整角发送机	KF	正向继电器
C	电容器	KMF	正向接触器
CD	电流微分环节	KMR	反向接触器
C_e	在额定磁通下的电势常数	KR	反向继电器
C_m	在额定磁通下的转矩常数	L	电感,电抗器
D	调速范围	L_l	漏感
DHC	滞环比较器	L_m	互感
DLC	逻辑控制器	LS	饱和电抗器
DLD	逻辑延时环节	M	电动机;闭环系统频率特性幅值
DPI	极性鉴别器	m	整流电流(压)一周内的脉波数;相数;转子绕组与定子绕组的有效匝数比
DPT	转矩极性鉴别器	M_r	闭环系统幅频特性幅值
DPZ	零电流检测器	MT	力矩电动机
E	电动势(平均值,有效值)		
e	电动势(瞬时值;下同)		
F	磁动势		

N	运算放大器;线圈匝数	U_x^*	变量 x 的给定电压
n_0	理想空载转速,同步转速	V	体积
P_m	电磁功率	v	速度
P_s	转差功率	VD	二极管
Q	无功功率	VF	正组晶闸管整流装置
R_0	直流电机电阻	VR	反组晶闸管整流装置
R_{rec}	整流装置内阻	VST	稳压管
S	视在功率;静差率	VT	晶体管,晶闸管
s	转差率	W_F	辅助绕组
RP	电位器	W_K	控制绕组
SA	控制开关	$W(S)$	传递函数,开环传递函数
SM	伺服电机	$W_{cl}(S)$	闭环传递函数
T	变压器	$W_{obj}(S)$	控制对象传递函数
TA	电流互感器	X	电抗
T_e	电磁转矩	x	机械位移
T_c	脉宽调制载波的周期	YC	电磁离合器
TC	测速发电机	Z	阻抗
T_L	负载转矩	α	转速反馈系数
T_1	电枢回路时间常数		可控整流器的控制角
TM	整流变压器	β	电流反馈系数
T_m	机电时间常数		可控整流器的逆变角
T_o	滤波时间常数	γ	电压反馈系数
T_s	晶闸管装置平均失控时间	Δn	转速降落
t_s	调节时间	ΔU	偏差电压
TU	自耦变压器	$\Delta\theta$	失调角,角差
TV	电压互感器	ζ	阻尼比;补偿程度系数
TVD	直流电压隔离变换器	ξ	与补偿程度系数对应的等效电阻
U	变换器,调制器;电压	θ	电角位移;可控整流器的导通角
U_b	基极驱动电压	λ	电机允许过载倍数
U_{bs}	自整角机输出电压	μ	磁导率;换流重叠角
U_{ct}	触发装置控制电压	σ	漏磁系数
U_d	整流电压	$\sigma\%$	超调量
U_{d0}	理想空载整流电压	ϕ_m	每极气隙磁通
U_{ex}	输出电压	φ	相位角,阻抗角
UI	逆变器	Ψ	磁链
U_{in}	输入电压	Ω	机械角转速
UPW	脉宽调制器	ω	角转速,角频率
URP	相敏整流器	ω_b	闭环特性通频带
U_x	变量 x 的反馈电压	ω_c	开环特性截止频率
		ω_s	转差角转速

第一章 电机放大机调速系统

直流电动机有良好的起动和制动性能,并能在宽广的范围内方便地进行调速;直流电动机调速系统被广泛应用于工业、军事等各个领域。即使在近年来,虽然交流电动机调速技术取得了空前的发展,直流电动机调速系统在数量上仍占据着主导地位。改变直流电动机电枢电压是直流电动机调速的主要方法,改变直流电动机电枢电压需要有专门的可调节的直流电源。电机放大机(又称电机扩大机,以 ZKK 表示)的输出电压可通过调节控制绕组(相当于普通直流发电机的励磁绕组)中的电流方便地实现。在 20 世纪四、五十年代间,晶体管和晶闸管还没有出现,用电机放大机作为直流电动机的可变压的电源,供电给直流电动机所构成的电机放大机一直流电动机调速系统,得到了十分广泛的应用,曾风靡一时。但它与后来出现的晶体管和晶闸管相比,显得笨重、效率低、可靠性差、维护不方便、噪声大。目前在工业中已经很少见了,但在坦克中还较多地保留着这种调速系统,例如我国的 59 式、88 式等坦克,国外的 T55、T62、逊丘伦等坦克,都有电机放大机一直流电动机调速系统。电机放大机一直流电动机调速系统可认为是直流发电机一直流电动机调速系统的一种,因此也可简称为 G-M 调速。本章将讨论电机放大机调速系统的组成、一般原理、坦克上的应用以及调速系统的技术指标等问题。

§ 1-1 调速系统的静态调速指标

调速系统的技术指标分为静态和动态两种。动态指标在第五章讨论,本章只讨论静态指标。静态指标又称稳态指标,它主要有两项:调速范围与静差率。

一、调速范围

系统对象要求的调速范围以 D 表示,它代表运行的最大转速 n_{\max} 与最小转速 n_{\min} 之比,或最大角速度 Ω_{\max} 与最小角速度 Ω_{\min} 之比,用公式表示为

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (1-1a)$$

$$D = \frac{\Omega_{\max}}{\Omega_{\min}} \quad (1-1b)$$

其中 n_{\max} 和 n_{\min} 一般都指额定负载时的转速,对于少数负载很轻的机械,也可以用实际负载时的转速。

二、静差率

静差率表示负载转矩变化时转速变化的程度,用 S 来表示。其含义为,在一条机械

特性曲线上,电动机的负载由理想空载加到额定负载,所出现的转速降落 Δn_{nom} 与理想空载转速之比,用百分数表示为

$$S\% = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{n_0} \times 100\% = \frac{n_0 - n_{\text{nom}}}{n_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

显然,静差率与机械特性的硬度有关,特性越硬,静差率越小,则稳定精度越高。然而静差率和机械特性硬度又有区别,如图 1-1 所示。特性 a 与特性 b 互相平行,硬度一样,两者在额定转矩下的转速降落相等, $\Delta n_{\text{nom}a} = \Delta n_{\text{nom}b}$ 。但它们的静差率却不相同,因为理想空载转速不一样, $n_{0a} > n_{0b}$, 根据式 (1-2) 定义, $S_a\% < S_b\%$ 。同样硬度的特性,理想空载转速越低时,静差率就越大,转速的相对稳定性就差。 $n_{0a} = 1000\text{r/min}$ 时, $\Delta n_{\text{nom}} = 10\text{r/min}$, 只占 1%, $n_{0b} = 100\text{r/min}$, 也降低 10r/min , 就占 10%。因此,调速范围和静差率这两项指标不是互相孤立的,必须同时提才有意义。对一个系统所提的静差率要求,主要是在最低转速时的静差率。最低转速静差率达到要求了,高速时自然符合要求。

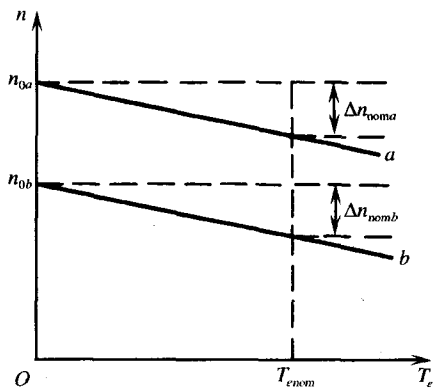


图 1-1 不同转速下的静差率

如果某一调速系统需保证静差率为 S , 即

$$S = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{n_{0\text{min}}} \quad (\text{用小数表示})$$

而调速范围 $D = n_{\text{max}}/n_{\text{min}}$, 在变压调速系统中, n_{max} 就是电动机的额定转速 n_{nom} , 而

$$n_{\text{min}} = n_{0\text{min}} - \Delta n_{\text{nom}} = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{S} - \Delta n_{\text{nom}} = \Delta n_{\text{nom}} \left(\frac{1}{S} - 1 \right) = \Delta n_{\text{nom}} \frac{1-S}{S}$$

于是

$$D = \frac{n_{\text{nom}} S}{\Delta n_{\text{nom}} (1-S)} \quad (1-3)$$

式(1-3)表达了调速范围、静差率和静态速降 Δn_{nom} 三者间的关系。它表明:当系统特性的硬度一定(即 Δn_{nom} 一定)时,对静差率的要求越高(即 S 越小),允许的调速范围就越小。举例来说,某电机放大机调速系统,电动机额定转速 $n_{\text{nom}} = 1430\text{r/min}$, 额定静态速降 $\Delta n_{\text{nom}} = 115\text{r/min}$ 。当要求静差率不大于 30% 时,允许调速范围为

$$D = \frac{1430 \times 0.3}{115 \times (1 - 0.3)} = 5.3$$

若静差率不大于 20% 时,则调速范围只有

$$D = \frac{1430 \times 0.2}{115 \times (1 - 0.2)} = 3.1$$