



21世纪

高等学校精品规划教材

现代机电驱动 控制技术

张晗亮 朱顺鹏 张成林 等 编著
冼 进 审校



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



21世纪

高等学校精品规划教材

现代机电驱动控制技术

张晗亮 朱顺鹏 张成林 等 编著
洗 进 审校



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

在现代化工业企业中,众多设备均离不开电、液、气组成的驱动控制系统。驱动控制技术以其速度、位置、转矩等的精确控制,在驱动机械运动中得到了广泛的应用。

本书是目前驱动和控制技术方面较为全面和系统的专著。结合多年研究和实践的经验,从直流电动机、步进电动机到交流电动机,从电动机的基本工作原理及构造到其机械特性及静、动态特性,从启动、调速与制动的电气控制电路到调速系统,从变频驱动技术到驱动电路的具体应用实例,从液压传动的基本知识、基本元件和基本回路到其驱动控制系统的分析和设计,从气压传动的基本知识、基本元件和基本回路到其驱动控制系统的分析和设计,都进行了论述。

本书涵盖了目前所使用的各种驱动控制方法,按照驱动方式的不同,内容包括:直流电动机的驱动控制技术、步进电动机驱动技术、交流驱动技术、变频驱动技术、液压传动控制技术、气压传动控制技术,以及针对以上技术而设计的实践环节。

本书在编写过程中,既做到理论翔实、语言通俗易懂,又注意一些最新的协议、规范及学术界、工业上的研究进展。同时还非常注重实用性,既适合作为高等院校和各类成人高校、自学考试等机械制造、机械设计、机电一体化等机械工程类专业的教材,也可供有关技术培训及工程技术人员自学参考之用。

图书在版编目(CIP)数据

现代机电驱动控制技术 / 张晗亮等编著. —北京: 中国水利水电出版社, 2009

21 世纪高等学校精品规划教材

ISBN 978 - 7 - 5084 - 4782 - 7

I. 现… II. 张… III. 电动机-控制系统-高等学校-教材 IV. TM370.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 044633 号

书 名	21 世纪高等学校精品规划教材 现代机电驱动控制技术
作 者	张晗亮 朱顺鹏 张成林 等 编著 洗进 审校
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 13 印张 308 千字
版 次	2009 年 4 月第 1 版 2009 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	26.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

机电系统特别是其驱动控制技术是 20 世纪后人类社会的重大技术进步之一，在工农业生产、国防航天、科学研究及其日常生活都得到了广泛的应用。随着现代技术的进步，驱动控制技术由过去传统单一的机械传动，发展到现在对其速度、位置、转矩等的精确控制。目前，以机械技术、测试技术、微机控制技术和信息技术等多学科交叉、有机结合的一种工业制造技术已基本形成，并构成了机电一体化的现代工业体系。

机电一体化作为多门技术学科相互渗透、相互结合为辅的综合技术领域，已经深入国民经济的各个方面，成为社会发展的重要物质基础。本书立足现代机电系统常用的驱动控制技术，并注重理论性、系统性和先进性的有机统一，结合典型应用实例，完整地体现各种驱动控制技术的结构和控制方式。

本书的主要特点是：

(1) 概括了机电系统的电机，液、气压驱动和控制的原理知识，并辅以实例讲解。

(2) 在阐述基本原理的基础上，侧重于基本理论的实际应用。

(3) 文字阐述方面层次清楚、概念准确、通俗易懂、深入浅出，并融入了最新的驱动控制方式。

(4) 内容阐述循序渐进，富于启发性，便于学习。

(5) 使用面宽。本书在内容上、写法上都考虑了不同层次读者的需要。

本书在编写过程中，力求贯彻少而精、理论联系实际的原则，在较全面地阐述有关机电驱动控制技术的基本内容的基础上，力求反映中国机电驱动控制技术发展的最新情况，使大家能真正掌握机电驱动控制技术的主要内容和设计方法。

本书以现代机电驱动控制的方法入手，详细介绍了各种驱动控制技术中的结构、工作原理及设计方法。全书共分为 7 章，内容包括：直流电动机的驱动控制技术、步进电动机驱动技术、交流驱动技术、变频驱动技术、液压传动控制技术、气压传动控制技术、系统控制的实践环节。这些内容即对以往

的教材有一定的继承性，又体现了先进制造技术在现代工业的应用。

本书既适合作为各类高等学校机械基础知识、机械工程测试技术、电子电工技术和微机原理、自动化等有关专业的教材，也可供有关工程技术人员使用参考。

本书在编写过程中，引用了部分参考文献中的材料，在此一并表示感谢。

本书由张晗亮、朱顺鹏、张成林等编著，冼进审校。参与本书编写工作的人员还有：王治国、冯强、曾德惠、许庆华、程亮、周聪、黄志平、胡松、邢永峰、邵军、边海龙、刘达因、赵婷、马鸿娟、侯桐、赵光明、李胜、李辉、侯杰、王红研、王磊、闫守红、康涌泉、李欢、蒋杼倩、王小东、张森、张正亮、宋利梅、何群芬、程瑶等，在此也一并表示感谢！

由于作者学识水平有限，编写时间仓促，书中缺点、错误及不当之处在所难免，欢迎广大读者批评指正，并给予谅解。

为充分展现本书编写特点，帮助读者深刻理解本书编写意图与内涵，进一步提高对本书教学的使用效率，我们建立了本书使用指导联络方式，欢迎读者将图书在使用过程中问题与各种探讨、建议反馈给我们，本书编者会竭诚给你满意的答复。我们的联系方式 E-mail: china_54@tom.com。

编 者

2009 年 1 月

前言

第 1 章 直流电动机的驱动控制技术	1
1.1 直流伺服电动机的结构、原理及特性	1
1.1.1 直流伺服电动机的结构	1
1.1.2 直流伺服电动机的原理	1
1.1.3 直流伺服电动机的静态特性	1
1.1.4 影响静态特性的因素	3
1.1.5 直流伺服电动机的动态特性	4
1.1.6 直流伺服电动机的控制	5
1.1.7 直流伺服电动机的方向控制	7
1.2 直流调速系统	7
1.2.1 调速系统的性能指标	8
1.2.2 单闭环静差调速系统	9
1.2.3 单闭环无静差调速系统	14
1.2.4 速度电流双闭环调速	18
1.2.5 脉宽调速系统	24
1.3 调速系统应用举例	29
1.3.1 单闭环直流调速的实例应用	29
1.3.2 双闭环直流调速的实例应用	30
1.3.3 TL598 小型直流电动机 PWM 调速电路	32
1.4 本章小结	32
第 2 章 步进电动机驱动技术	33
2.1 步进电动机	33
2.1.1 步进电动机的结构和工作原理	33
2.1.2 步进电动机的主要特点及性能指标	35
2.2 反应式步进电动机的静、动态特性	36
2.2.1 反应式步进电动机的静态特性	36
2.2.2 反应式步进电动机的动态特性	39
2.3 步进电动机驱动与控制	44

2.3.1	驱动电源	44
2.3.2	脉冲分配器	45
2.3.3	步进电动机的控制	46
2.3.4	步进电动机的驱动电路	50
2.4	步进电动机的驱动与控制应用	57
2.4.1	步进电动机的应用	57
2.4.2	步进电动机的驱动控制	58
2.5	本章小结	62
第3章	交流驱动技术	64
3.1	交流伺服电动机	64
3.1.1	交流永磁伺服电动机	64
3.1.2	两相交流异步伺服电动机	67
3.2	交流调速系统	70
3.2.1	交流调速系统发展方向	71
3.2.2	交流调速的基本方法	71
3.2.3	鼠笼型转子电动机的变极调速	71
3.2.4	电磁自转差离合器调速	74
3.2.5	绕线式异步电动机转子串电阻调速	78
3.2.6	绕线式异步电动机串级调速	78
3.2.7	感应电动机的变频调速	79
3.2.8	矢量控制的调速系统	81
3.2.9	直接转矩控制	82
3.3	本章小结	82
第4章	变频驱动技术	84
4.1	鼠笼感应异步电动机	84
4.1.1	三相感应电动机的基本工作原理	84
4.1.2	感应电动机的分类	86
4.1.3	三相感应电动机的结构	86
4.1.4	感应电动机的额定值	87
4.1.5	三相感应电动机的工作特性	88
4.2	三相异步电动机的启动、调速和制动	92
4.2.1	三相异步电动机的启动	92
4.2.2	三相异步电动机的调速	94
4.2.3	三相异步电动机的制动	96
4.3	变频调速系统	97
4.3.1	变频调速的基本知识	98
4.3.2	变频调速控制原理	102

4.3.3	变频调速技术中的功率驱动电路	105
4.3.4	变频调速系统实例	112
4.4	本章小结	116
第5章	液压传动控制技术	118
5.1	液压传动系统的基础知识	118
5.1.1	液压传动工作介质	118
5.1.2	空穴现象	121
5.1.3	液压冲击	122
5.2	液压传动系统的动力元件	122
5.2.1	液压泵概述	122
5.2.2	液压泵的种类	124
5.2.3	液压泵的选用	127
5.3	液压传动系统的执行元件	127
5.3.1	液压马达	127
5.3.2	液压缸	129
5.4	液压传动系统的控制元件	131
5.4.1	压力控制阀	131
5.4.2	流量控制阀	135
5.4.3	方向控制阀	137
5.5	液压传动系统的辅助元件	141
5.5.1	蓄能器	141
5.5.2	滤油器	142
5.5.3	油箱	143
5.6	液压的基本回路	143
5.6.1	液压传动系统的压力控制回路	143
5.6.2	液压传动系统的速度控制回路	145
5.6.3	液压传动系统的多缸工作回路	147
5.6.4	液压传动系统的其他回路	148
5.7	典型的液压传动系统的应用举例	150
5.8	本章小结	151
第6章	气压传动控制技术	153
6.1	气压传动系统基础	153
6.2	气源装置及气动辅助元件	154
6.2.1	气源装置	154
6.2.2	空气压缩机	155
6.2.3	后冷却器	156
6.2.4	油水分离器	156

6.2.5	储气罐	157
6.2.6	干燥器	157
6.2.7	过滤器	158
6.2.8	消声器	158
6.3	气动执行元件	159
6.3.1	气缸	159
6.3.2	气动马达	160
6.4	气动控制元件	161
6.4.1	压力控制阀	161
6.4.2	流量控制阀	163
6.4.3	方向控制阀	164
6.5	基本回路	167
6.5.1	换向回路	167
6.5.2	速度控制回路	168
6.5.3	压力控制回路	170
6.5.4	气—液联动回路	172
6.5.5	气压传动系统的其他回路	172
6.6	本章小结	173
第7章	系统控制的实践环节	174
7.1	电机实验	174
7.1.1	电动机的直接启动实验	174
7.1.2	电动机的减压启动实验	175
7.1.3	电动机的制动实验	176
7.1.4	电动机保护电路实验	177
7.1.5	基于 AT89C51 交流变频调速系统设计实验	178
7.2	液压实验	183
7.2.1	液压泵（液压马达）的拆装实验	183
7.2.2	液压泵的特性曲线绘制实验	184
7.2.3	液压差动回路实验	185
7.2.4	液压快进—工进—快退回路实验	186
7.2.5	基于 PLC 的机械手液压系统设计实验	187
7.3	气动实验	189
7.3.1	气动基本回路实验	189
7.3.2	综合气动回路设计实验	193
7.4	本章小结	195
参考文献		196

第 1 章 直流电动机的驱动控制技术

知识点

- 直流伺服电动机的基础知识、工作原理和各种特性
- 直流调速系统
- 调速系统应用举例

本章导读

本章主要介绍直流电动机的基本结构、工作原理、静态特性，常用的驱动控制调速系统及应用举例。

1.1 直流伺服电动机的结构、原理及特性

1.1.1 直流伺服电动机的结构

直流伺服电动机包括三大部分：定子、转子和气隙。静止不动的部分称为定子；转动或者做直线运动的部分称为转子；定子和转子之间的部分称为气隙。虽然电动机内部的气隙比较小，但所有电磁功率都是通过气隙传递的，而且电动机内部的大部分磁场能量均集中在气隙中，因此气隙也是电动机重要的组成部分。

定子包括产生励磁磁场的主磁极、具有固定主磁极功能并兼作磁路的基座、电刷装置以及改善换向的换向极。转子包括电枢铁芯、电枢绕组以及换向器。其结构如图 1.1 所示。

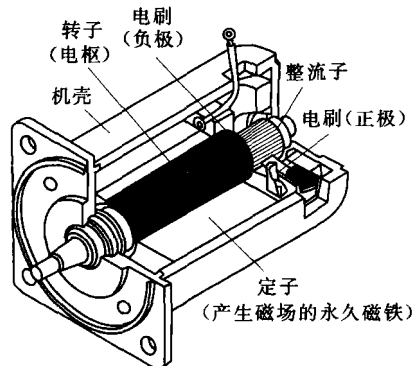


图 1.1 直流伺服电动机结构图

1.1.2 直流伺服电动机的原理

简单地说，就是当电枢绕组中通过直流电时，在定子磁场的作用下就会在电枢绕组的导体上产生电磁力，并形成带动负载旋转的电磁转矩，驱动转子旋转。而控制电枢绕组中电流的方向和大小，就可以控制直流伺服电动机的旋转方向和速度。

1.1.3 直流伺服电动机的静态特性

为了对直流伺服电动机进行准确的控制，首先必须了解直流伺服电动机的静态特性。静态特性是指电动机在稳态情况下，其转子转速、电磁转矩和电枢电压三者之间的关系。直流伺服电动机采用电枢电压控制时的电枢等效回路，如图 1.2 所示。

在图 1.2 中 L_a 和 R_a 分别是电枢绕组的电感和电阻， T_L 是负载转矩。当电枢绕组流

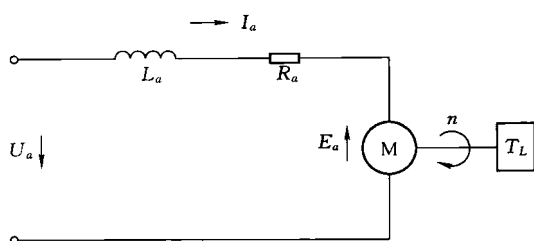


图 1.2 电枢等效回路

过直流电流 I_a 时,一方面在电枢导体中产生电磁力,使转子旋转;另一方面,电枢导体在定子磁场中以转速 n (r/min) 旋转切割磁力线,产生感应电动势 E_a 。感应电动势方向与电枢电流 I_a 方向相反,称为反电动势,其大小与转子旋转速度 n 和电子磁场中的每极气隙磁通量 Φ (Wb) 有关,表达式如下

$$E_a = C_e \Phi n \quad (1.1)$$

式中: C_e 为电磁常数,仅与电动机结构有关。

由图 1.2 可得电枢回路中的电压平衡方程式为

$$E_a = U_a - I_a R_a \quad (1.2)$$

式中: R_a 为电枢绕组电阻; U_a 为电枢外施电压。

此外,电枢导体切割磁力线所产生电磁转矩 T_m (N·m) 可有以下式表达

$$T_m = C_m \Phi I_a \quad (1.3)$$

式中: C_m 为转矩常数,仅与电动机结构有关,且 $C_m = 9.55 C_e$ 。

根据式 (1.1)、式 (1.2) 和式 (1.3),可得到直流伺服电动机运行特性的一般表达式

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_m \Phi^2} T_m \quad (1.4)$$

在采用电枢电压控制时,磁通量 Φ 是一个常量。如果是电枢电压 U_a 保持恒定,则上式可写成

$$n = n_0 - K T_m \quad (1.5)$$

其中

$$n_0 = \frac{U_a}{C_e \Phi}; \quad K = \frac{R_a}{C_e C_m \Phi^2}$$

由式 (1.4) 可得到直流伺服电动机的两种特殊运行状态。

当 $T_m = 0$, 即空载时

$$n = n_0 = \frac{U_a}{C_e \Phi} \quad (1.6)$$

式中: n_0 为理想空载转速,其值与电枢电压成正比。

当 $n_0 = 0$, 即启动或堵转时

$$T_m = T_d = \frac{C_m \Phi}{R_a} U_a \quad (1.7)$$

式中: T_d 为启动转矩或堵转转矩,其值也与电枢电压成正比。

在式 (1.4) 中,如果把转速 n 看作是电磁转矩 T_m 的函数,即 $n = f(T_m)$, 则可得到直流伺服电动机的机械特性表达式

$$n = n_0 - \frac{R_a}{C_e C_m \Phi^2} T_m \quad (1.8)$$

如果把转速 n 看作是电枢电压 U_a 的函数,即 $n = f(U_a)$, 则可得到直流伺服电动机的

调节特性表达式

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - K T_m \quad (1.9)$$

根据式 (1.8) 和式 (1.9), 给定不同的 U_a 和 T_m 值, 可分别绘出直流伺服电动机的机械特性和调节特性曲线, 如图 1.3 和图 1.4 所示。

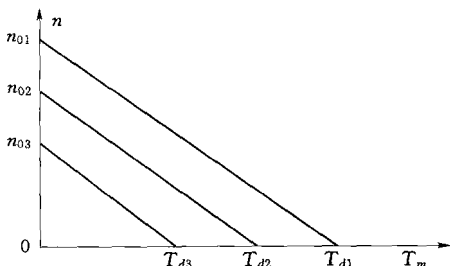


图 1.3 直流伺服电动机的机械特性

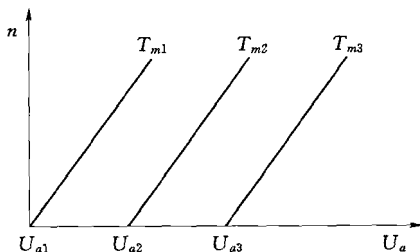


图 1.4 直流伺服电动机的调节特性

由图 1.3 可知, 直流伺服电动机的机械特性就是一组斜率相同, 互相平行的直线族。每条机械特性和一种电枢电压相对应, 与 n 轴的交点是该电枢电压下的理想空载转速, 与 T_m 轴的交点是该电枢电压下的堵转转矩。

由图 1.4 所示中可知, 直流伺服电动机的机械特性就是一组斜率相同, 互相平行的直线族。每条调节特性和一种电磁转矩相对应, 与 U_a 轴的交点是启动时的电枢电压。

1.1.4 影响静态特性的因素

上述对直流伺服电动机静态特性的分析是在理想条件下进行的, 实际上电动机的功放电路、电动机内部的摩擦、负载变动等因素将直接影响直流伺服电动机的静态特性。

1. 功放电路对机械特性的影响

直流伺服电动机是由功放电路供电的, 功放电路中有一定的内阻, 因而加载在绕组两端的电压 U_a 不等于控制电压 U_c 。如图 1.5 所示。

在这个电枢等效回路中, 电压平衡方式为

$$E_a = U_c - I_a (R_a + R_i) \quad (1.10)$$

式中: R_i 为功放电路的内阻。

于是直流伺服电动机的机械特性表达式变为

$$n = n_0 - \frac{R_a + R_i}{C_e C_m \Phi^2} T_m \quad (1.11)$$

比较式 (1.7) 和式 (1.11) 可以发现, 由于 R_i 的存在使机械特性曲线相对于原来的特性曲线变陡了, 从而使机械特性变软, 如图 1.6 所示。当机械特性曲线较平缓时, 直流伺服电动机的机械特性较硬。而机械特性越硬, 电动机带负载能力越强。由图 1.6 可知, 由于功放电路内阻 R_i 的影响, 导致机械特性变软了, 所以在设计功放电路时, 应设法减小其内阻。

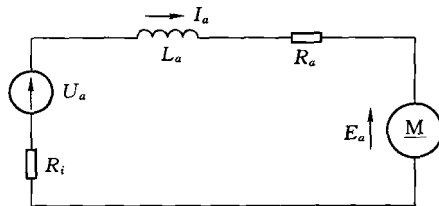


图 1.5 有功放电路的电枢等效回路

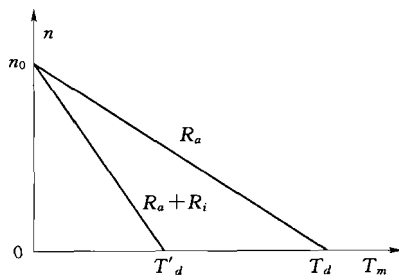


图 1.6 功放电路的内阻对机械特性的影响

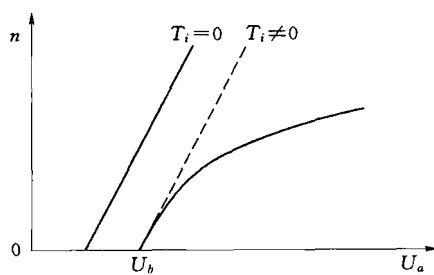


图 1.7 摩擦及负载变动对调节特性的影响

2. 内部摩擦对调节特性的影响

实际上直流伺服电动机在启动时为了克服一定的摩擦转矩，形成电枢电压不为零，这个电压称为启动电压，用 U_b 表示，如图 1.7 所示。通常把从零到启动电压这一电压范围称为不灵敏区或死区，电压值处于该区内时，电动机不转动。

3. 负载变动对调节特性的影响

由式 (1.8) 可知，在负载转矩不变的条件下，直流伺服电动机转速与电枢电压呈线性关系。但在实际情况中，经常会遇到负载随转速变动的情况，如数控机床切削工件过程中的切削力是随进给速度变化而变化的，这是由于负载的变动将导致调节特性的非线性变化，如图 1.7 所示。

1.1.5 直流伺服电动机的动态特性

直流伺服电动机的动态特性是指当给电动机电枢绕组加上阶跃电压时，转子转速随时间变化的规律。这一规律可用表达式 $\omega = f(t)$ 来描述。

直流伺服电动机的动态过渡过程的产生原因是由负载转动惯量引起的机械惯性和电枢电感引起的电磁惯性导致的。

图 1.2 所示的电枢回路中动态电压平衡方程式为

$$L_a \frac{di_a}{dt} + i_a R_a + e_a = u_a \quad (1.12)$$

式中： i_a 、 e_a 和 u_a 分别为电枢电流 I_a 、电枢反电动势 E_a 和电枢绕组两端的控制电压 U_a 在过渡过程中的瞬时值； L_a 为电枢绕组电感。在过渡过程中，直流伺服电动机的电磁转矩 T_m 除了要克服负载转矩 T_L 外，还要克服轴上的惯性转矩，因而它的动态转矩平衡方程式为

$$T_m = T_L + J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.13)$$

式中： J 为转子轴上的总转动惯量。

将式 (1.3) 中的 I_a 换成 i_a 并代入式 (1.13)，可得

$$\tau_j \tau_d \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \tau_j \frac{d\omega}{dt} + \omega = K_m u_a - \frac{R_a}{C_e C_m \Phi^2} T_L - \frac{L_a}{C_e C_m \Phi^2} \frac{dT_L}{dt} \quad (1.14)$$

$$\tau_j = \frac{J R_a}{C_e C_m \Phi^2}, \quad \tau_d = \frac{L_a}{R_a}, \quad K_m = \frac{1}{C_e \Phi}$$

式中： τ_j 、 τ_d 、 K_m 分别为机电时间常数、电磁时间常数和静态放大系数。

当直流伺服电动机带有恒定负载时, 则 $\frac{dT_L}{dt}=0$, 可简化成

$$\tau_j \tau_d \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \tau_j \frac{d\omega}{dt} + \omega = K_m u_a - \frac{R_a}{C_e C_m \Phi^2} T_L \quad (1.15)$$

在空载条件下, 即 $T_L=0$ 时, 式 (1.15) 还可以进一步简化成

$$\tau_j \tau_d \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \tau_j \frac{d\omega}{dt} + \omega = K_m u_a \quad (1.16)$$

对式 (1.16) 进行拉氏变换, 得出电动机的传递函数

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{K_m}{\tau_j \tau_d s^2 + \tau_j s + 1} \quad (1.17)$$

在大多数情况下, $\tau_j > 4\tau_d$, 此时 τ_d 可以忽略不计, 式 (1.17) 可写成

$$G(s) = \frac{K_m}{\tau_j s + 1} \quad (1.18)$$

可见, 这时电动机是一个一阶惯性环节。在单位阶跃电压信号输入时, 角速度的响应函数为

$$\omega(t) = K_m (1 - e^{-t/\tau_j}) \quad (1.19)$$

其变化曲线如图 1.8 所示, 电动机的角速度按指数规律从零逐渐增加到稳态值 K_m , 过渡过程的时间常数 τ_j 。

根据式 (1.6) 和式 (1.7) 得

$$\tau_j = \frac{J R_a}{C_e C_m \Phi^2} = J \frac{R_a I_a}{C_m \Phi C_m \Phi I_a} = \frac{\omega_0}{T_d / J} \quad (1.20)$$

式中: T_d/J 为力矩—惯量比。

可见通过加大力矩—惯量比的方法, 即可加快过渡过程, 又不至于引起振荡, 直流伺服电动机就是基于这一原则设计的。

1.1.6 直流伺服电动机的控制

1.1.6.1 直流伺服电动机的转速控制

在自动控制系统中, 直流伺服电动机的转速需要在很宽的范围内变化, 对其控制主要有以下两种方法。

1. 电枢电压控制

在定子磁场不变的情况下, 通过改变施加在电枢绕组两端的电压来改变电动机的转

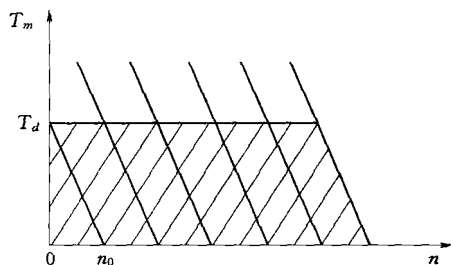


图 1.9 电枢电压控制的机械特性曲线

速, 由于负载和定子磁场均不变, 电枢电流可以达到额定值, 相应的输出转矩也可以达到额定值。由电机学可知, 这种调速方式称为恒转矩调速方式。如图 1.9 所示。

2. 激磁磁场控制

这种方式只适用于电磁式直流伺服电动机, 是通过改变激磁电流的大小来改变定子磁场强度, 从而改变电动机的转速。

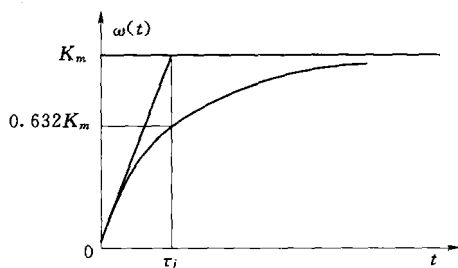


图 1.8 直流伺服电动机的单位阶跃响应

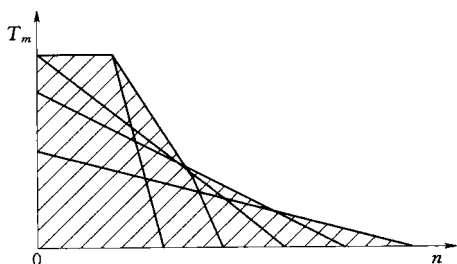


图 1.10 激励磁场控制的机械特性曲线

当采用励磁磁场控制时，电动机在额定运转条件下磁场已接近饱和，只能减弱磁场来改变电动机的转速。因为不允许电枢电流超过额定值，所以当磁场减弱时，在输出功率不变的情况下转速增加，输出转矩下降。由电机学可知，这种调速方式称为恒功率调速方式。如图 1.10 所示。

在使用这种方式调速时，应注意电动机运转时不能将励磁回路断开，以免损坏电动机。

【例 1-1】 设一台直流伺服电动机，电枢电压 $U_a = 110\text{V}$ ， $R_a = 50\Omega$ 空载时电枢电流 $I_{a0} = 0.062\text{A}$ ，接负载后，当 $I_a = 0.4\text{A}$ 时其转速 $n = 3600\text{r/min}$ 。若励磁回路断开后，剩磁下降为正常磁通的 0.04，问励磁回路断开后将会发生什么后果？

解：分两种情况进行分析。

(1) 当电动机负载时。根据转矩平衡关系，励磁回路断开前后的电磁转矩应不变，即

$$T = C_m \Phi I_a = C_m \Phi' I'_a$$

这样励磁回路断开后的电枢电流应为

$$I'_a = \frac{C_m \Phi}{C_m \Phi'} I_a = \frac{1}{0.04} \times 0.4 = 10(\text{A})$$

但这台电动机所能产生的最大电枢电流为

$$I_a = \frac{U_a}{R_a} = \frac{110}{50} = 2.2(\text{A})$$

其结果小于负载转矩所需的电流 (10A)，电磁转矩小于负载转矩，电动机停转，此时电动机处于堵转状态。如果电动机长时间堵转，就会被烧坏。

(2) 当电动机空载时。空载时电磁转矩与电机的阻转矩 T_0 相等，由于 T_0 基本不变，因此励磁回路断开前后的电磁转矩应相等，即

$$C_m \Phi I_{a0} = C_m \Phi' I'_{a0}$$

这样励磁回路断开后的空载电枢电流应为

$$I'_{a0} = \frac{C_m \Phi}{C_m \Phi'} I_{a0} = \frac{1}{0.04} \times 0.062 = 1.55(\text{A})$$

励磁回路断开后的空载转速与负载转速之比为

$$\frac{n'_0}{n} = \frac{E'_a / C_e \Phi'}{E_a / C_e \Phi} = \frac{E'_a \Phi}{E_a \Phi'} = \frac{(U_a - I'_{a0} R_a) \Phi}{(U_a - I_a R_a) \Phi'} = \frac{(110 - 1.55 \times 50) \times 1}{(110 - 0.4 \times 50) \times 0.04} = 9$$

即电动机的空载转速 $n'_0 = 9n = 9 \times 3600 = 32400(\text{r/min})$ 。可见此时的转速大大地超过额定值，轴承摩擦急剧增大，发出尖锐的噪音，这种情况称为“飞车”，对电枢绕组和换向器也会有损害。因此，直流伺服电动机在运转时绝对不能将励磁回路断开。

1.1.6.2 直流伺服电动机的方向控制

通过改变励磁磁场或电枢电压的方向能改变电动机的旋转方向，即将励磁绕组或电枢绕组的接线端对调就可以改变转向。

1.1.7 直流伺服电动机的方向控制

技术指标是选用直流伺服电动机的依据，主要有以下几项：

(1) 额定功率 $P_N(\text{W})$ ：是电动机在额定状态下运行时的输出功率，在此功率下允许电动机长期连续运行而不至于过热。

(2) 额定电压 $U_N(\text{V})$ ：是电动机在额定状态下运行时，激磁绕组和电枢绕组上应加的电压。永磁式直流伺服电动机只有额定电枢电压。

(3) 额定电流 $I_N(\text{A})$ ：是电动机在额定电压下运行时，输出额定功率时绕组中的电流。额定电流一般就是电动机长期连续运行所允许的最大电流。

(4) 额定转速 $n_N(\text{r/min})$ ：有时也称最高转速，使电动机在额定电压下，输出额定功率时的转速。

(5) 额定转矩 $T_N(\text{N} \cdot \text{m})$ ：是电动机在额定状态下运行时的输出转矩，且 $T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N}$ 。

(6) 最大转矩 $T_M(\text{N} \cdot \text{m})$ ：是电动机在短时间内可输出最大转矩，它反映了电动机的瞬时过载能力。最大转矩一般是额定转矩的 5~10 倍。

(7) 机电时间常数 τ_j 和电磁时间常数 τ_a ：分别反映了电动机的两个过渡过程时间。 τ_j 通常小于 20ms， τ_a 通常小于 5ms，两者之比大于 3。

(8) 转动惯量 $J(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2)$ ：是电动机电枢转子上的转动惯量。

1.2 直流调速系统

直流电动机一直是电力拖动自动控制系统的主要执行元件，具有良好的启动、制动性能，适宜在较宽范围内进行平滑调速。长期以来，在应用和完善直流拖动控制系统的同时，人们不断致力于研制性能与价格都能与直流系统相媲拟的交流拖动控制系统。随着计算机技术、电力电子技术和控制技术的发展，交流调速系统正逐渐取代直流调速系统，但目前的现状仍然是以直流调速系统自动调速系统为主要形式。鉴于直流拖动系统的理论和实践都比较成熟，而从闭环反馈控制的角度上看，它也是交流拖动控制系统的基础。因此，本书从单闭环调速系统、双闭环调速系统、PWM 调速几个方面着重讨论直流调速系统。

不同的生产机械对调速系统的转速控制有不同的要求，具体有如下三个方面转速控制类别：

(1) 调速。在一定的转速范围内，应用有级（分档）和无级（平滑）来调节转速。

(2) 稳速。转速过程中不因各种可能出现的因素（如动力电源、负载变化等）而产生转速波动。

(3) 加、减速控制。对频繁启动、制动的设备要求尽快地加、减速，缩短启动、制动时间，以提高生产率；对不宜经受剧烈速度变化的生产机械，则要求启动、制动尽量平稳。

有时以上三个方面都要具备，有时只需满足其中一项或两项。为了定量的分析问题，

一般需规定几种性能指标,以便衡量一个调速系统的性能。

1.2.1 调速系统的性能指标

1.2.1.1 调速系统的稳态指标

1. 调速范围 D

生产机械要求电动机能达到的最高转速 $n_{\max}$ 和最低转速 $n_{\min}$ 之比称为调速范围,用 D 表示,即

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (1.21)$$

式中: $n_{\max}$ 和 $n_{\min}$ 通常指电动机额定负载时的最高和最低转速,对于少数负载很轻的机械,也可以用实际负载的转速。设计调速系统过程中, $n_{\max}$ 近似为电动机的额定转速 n_N 。

2. 静差率 S

当系统在某一转速下运行时,负载由理想空载加到额定负载时所对应的转速降落 Δn_N 与理想空载转速 n_0 之比,称为静差率 S ,即

$$S = \frac{\Delta n_N}{n_0} = \frac{\Delta n_N}{n_0} \times 100\% \quad (1.22)$$

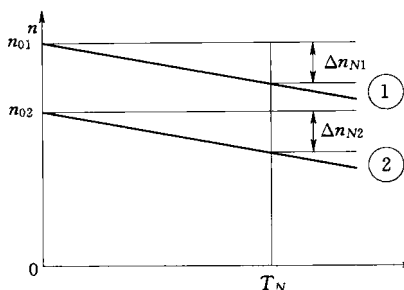


图 1.11 不同转速下的静差率

由式 (1.22) 可以看出,静差率是用来衡量调速系统在电动机负载变化下转速的稳定度的。 S 和机械特性的硬度有关,特性越硬,静差率越小,转速的稳定程度就越高,如图 1.11 所示。

3. 调压调速系统中 D , S 和 Δn_N 之间的关系

在直流电动机调压调速系统中, $n_{\max}$ 为电动机的额定转速 n_N ,若额定负载时的转速减小为 Δn_N ,则系统的静差率应该是最低转速时的静差率,即

$$S = \frac{\Delta n_N}{n_{0\min}} \quad (1.23)$$

额定负载时的最低转速为

$$n_{\min} = n_{0\min} - \Delta n_N \quad (1.24)$$

将式 (1.23),代入式 (1.24) 可以得到

$$n_{\min} = \frac{\Delta n_N}{S} - \Delta n_N = \frac{\Delta n_N (1 - S)}{S} \quad (1.25)$$

调速范围为

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_N}{n_{\min}} \quad (1.26)$$

将式 (1.25) 代入式 (1.26),得

$$D = \frac{n_N S}{\Delta n_N (1 - S)} \quad (1.27)$$

由式 (1.27) 可知:对于相同的调速系统,其特性硬度或 Δn_N 值是一定的,如果静差率 S 值越小,系统允许的调速范围 D 就越小。

【例 1-2】 某调速系统电动机的额定转速为 $n_N = 1560 \text{ r/min}$,额定速降为 $\Delta n_N =$