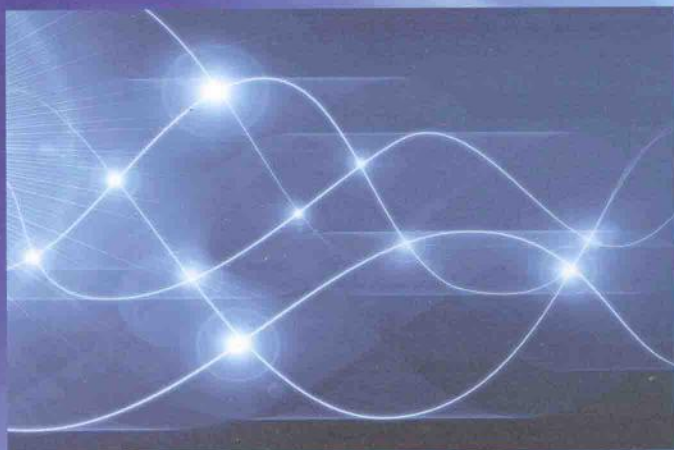


控制电机及其应用

编著 王爱元



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

控制电机及其应用

王爱元 编著

上海交通大学出版社

内容提要

本书主要阐述常用控制电机的工作原理、结构、运行特性、驱动控制及应用,内容包括传统的直流伺服电动机、交流伺服电动机、测速发电机、自整角机、旋转变压器、步进电动机、直线电动机,增加了开关磁阻电动机、超声波电动机等新型控制电机的内容。突出了控制电机的驱动控制技术及其典型应用。理论联系实际,反映了控制电机领域的最新研究成果,使内容更加充实和新颖。每章附有思考题和习题,便于教学以及读者自学和复习巩固。

本书可作为普通高等院校电气工程及其自动化、电机与电器、自动化、测控技术与仪器等本科专业的教材和参考书,也可供从事相关专业的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

控制电机及其应用/王爱元编著. —上海:上海交通大学出版社,2013

ISBN 978-7-313-10262-1

I. ①控… II. ①王… III. ①微型控制电机—高等学校—教材 IV. ①TM383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 202274 号

控制电机及其应用

编 著:王爱元

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:上海交大印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:340千字

版 次:2013年11月第1版

书 号:ISBN 978-7-313-10262-1/TM

定 价:28.00元

地 址:上海市番禺路951号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:14.75

印 次:2013年11月第1次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-54742979

前 言

控制电机作为电机行业的主要分支,应用于现代工业自动化系统、现代军事装备工业、科学技术研究和办公自动化等领域。教学中,控制电机多年来一直作为电气、自动化等专业的重要专业课,为学生学习后续课程,参加科技创新活动、毕业设计及工作就业提供专业理论基础知识和基本实践能力。随着生产的发展和技术的进步,一方面传统的控制电机性能在不断地提高,应用领域在不断地扩大;另一方面出现了一些新型的控制电机,并且应用中与相关的控制技术和控制方法密切结合。因此本书编写过程中力图体现其发展动态,突出其驱动控制和应用。

本书阐述常用控制电机的工作原理、结构、运行特性、驱动控制及应用,内容上包括传统的直流伺服电动机、交流伺服电动机、测速发电机、自整角机、旋转变压器、步进电动机、直线电动机;增加了开关磁阻电动机、超声波电动机等新型控制电机的内容。材料来源既借鉴了国内外的优秀教材,又兼顾了生产和科研的发展,也把编者多年的科研教学成果融入进去,以加强基础、注重应用、提高能力。

与同类教材相比,本书具有以下特点:

(1) 应用中控制电机的运行性能与其驱动控制技术和控制方法密切相关,因此在阐述控制电机结构、工作原理、运行性能的基础上,增加并突出了直流伺服电动机、无刷直流电动机、开关磁阻电动机等驱动控制的相关内容。

(2) 多年来,我国本科相关专业的教学以控制电机为主,并把控制电机作为电机学、电机拖动等课程的后续课程,而在科研和生产中以特种电机、微特电机为主,三者之间既相互联系又相互区别。考虑到实际教学及科研和生产的需要,本书把特种电机、微特电机的部分内容作为补充。

(3) 考虑到电机与拖动基础等先修课程,删除变压器的内容,简化直流伺服电动机的原理性内容,突出其结构特点、过渡过程分析和驱动控制。

(4) 突出了控制电机的应用,新增或扩充了控制电机选用、使用及其应用实例,并



与实验、课程设计、毕业设计等教学环节相配套。

教学过程中,教师可根据专业的特点和学时的多少灵活选用。学时多或者专业要求高的,可进一步拓宽控制电机驱动控制技术的讲解,并与课程设计、毕业设计等实践环节相联系;学时少或者专业要求不高的,可重点讲解控制电机的原理、结构和运行特性,其他部分留待学生日后自学。

本书编写过程中,引用了大量相关资料和研究成果,走访了部分高校和生产企业,征询了许多电机界同仁的意见,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中存在的不妥或错误之处,殷切期望广大读者批评指正。

编者

2013年6月

目 录

第 1 章 直流伺服电动机	001
1.1 概述	001
1.2 直流伺服电动机的结构分类和控制方式	001
1.3 直流伺服电动机的特性	005
1.4 直流力矩电动机	009
1.5 直流伺服电动机控制技术	012
1.6 直流伺服电动机的应用	019
思考题与习题.....	022
第 2 章 交流伺服电动机	024
2.1 概述	024
2.2 两相感应伺服电动机的结构特点和工作原理	024
2.3 两相感应伺服电动机的运行分析	030
2.4 两相感应伺服电动机的使用	041
2.5 交流同步伺服电动机	047
2.6 交流伺服电动机的应用	054
思考题与习题.....	057
第 3 章 测速发电机	058
3.1 概述	058
3.2 直流测速发电机	059
3.3 交流异步测速发电机	064
3.4 测速发电机的应用	070
思考题与习题.....	073
第 4 章 自整角机	075
4.1 概述	075
4.2 控制式自整角机	078
4.3 力矩式自整角机	085



4.4	差动式自整角机	088
4.5	自整角机的应用	091
	思考题与习题	093
第5章	旋转变压器	095
5.1	概述	095
5.2	正余弦旋转变压器	096
5.3	线性旋转变压器	101
5.4	多极和双通道的旋转变压器	102
5.5	感应移相器	105
5.6	感应同步器	108
5.7	旋转变压器的应用	111
	思考题与习题	113
第6章	步进电动机	115
6.1	概述	115
6.2	反应式步进电动机的结构和工作原理	116
6.3	反应式步进电动机的运行特性	121
6.4	步进电动机的其他类型和主要性能指标	131
6.5	步进电动机的驱动控制	134
6.6	步进电动机的控制技术	140
6.7	步进电动机的应用	144
	思考题与习题	146
第7章	无刷直流电动机	148
7.1	概述	148
7.2	无刷直流电动机的结构和工作原理	148
7.3	无刷直流电动机的数学模型和运行特性	155
7.4	无刷直流电动机的控制技术	159
7.5	无刷直流电动机的电枢反应和转矩脉动	165
7.6	无刷直流电动机的应用	168
	思考题与习题	170
第8章	开关磁阻电动机	171
8.1	概述	171
8.2	开关磁阻电动机的结构和工作原理	172
8.3	开关磁阻电动机的基本电磁关系	174



8.4 开关磁阻电动机的运行控制	179
8.5 开关磁阻电动机的驱动控制	184
8.6 开关磁阻电动机的应用	191
思考题与习题	193
第9章 直线电动机	194
9.1 概述	194
9.2 直线感应电动机	195
9.3 直线直流电动机	200
9.4 直线同步电动机	202
9.5 直线和平面步进电动机	203
9.6 直线电动机的应用	206
思考题与习题	208
第10章 超声波电动机	209
10.1 概述	209
10.2 超声波电动机的运动形成机理	211
10.3 环形行波型超声波电动机	214
10.4 其他类型的超声波电动机	219
10.5 超声波电动机的应用	222
思考题与习题	223
参考文献	225

第 1 章 直流伺服电动机

1.1 概述

伺服电动机又称为执行电动机,其功能是把输入的电压信号变换成转轴的角位移或角速度输出,输入的电压信号又称为控制信号。按使用电源的性质不同,伺服电动机可分为直流伺服电动机和交流伺服电动机两大类。交流伺服电动机通常为两相伺服电动机,其转子采用笼型转子或空心杯转子。直流伺服电动机的结构、原理与普通直流电动机相同,通过改变控制电压可以改变伺服电动机的转速和方向,其输出功率通常为 1~600 W。两相伺服电动机的输出功率通常为 0.1~100 W,常用的在 30 W 以下。

近年来,伺服电动机的应用范围日益扩大,对其要求不断提高,出现了许多采用新材料、新技术和新结构的伺服电动机。如采用空心杯电枢、盘形电枢和无槽电枢的低惯量直流伺服电动机,采用位置传感器和电子开关线路取代电枢和换向器的无刷直流电动机,以及永磁式、磁阻式和磁滞式的同步伺服电动机。

伺服电动机的种类多、用途广泛,自动控制系统对伺服电动机的基本要求可归纳为以下几个方面:

- (1) 宽广的调速范围。要求伺服电动机的转速在宽广的范围内连续调节。
- (2) 机械特性和调节特性为线性。线性的机械特性和调节特性有利于提高自动控制系统的动态精度和稳定性。
- (3) 当控制信号消除时,伺服电动机应立即停转,也就是要求伺服电动机无“自转”现象。
- (4) 控制功率小、体积小、重量轻,起动转矩大。
- (5) 机电时间常数小,始动电压低。当控制信号变化时,反应快速灵敏。

1.2 直流伺服电动机的结构分类和控制方式

1.2.1 结构和分类

按直流伺服电动机的结构可分为传统型和低惯量型两大类。

1. 传统型直流伺服电动机

传统型直流伺服电动机的结构形式与普通直流电动机基本相同,也是由定子、转子两大部分所组成,只是它的容量和体积较小。按励磁方式的不同,传统型直流伺服电动机可以再分为永磁式和电磁式两种。永磁式直流伺服电动机的定子磁极由永久磁钢构成,电磁式直流伺服



电动机的定子磁极通常由硅钢片铁芯和励磁绕组构成。这两种电动机的转子结构与普通直流电动机的结构相同,其铁芯均由硅钢片冲制叠压而成,在转子冲片的外圆周上开有均匀布置的齿槽,在转子槽中放置电枢绕组,并通过换向器和电刷与外电路连接。

2. 低惯量型直流伺服电动机

与传统型的直流伺服电动机相比,低惯量型直流伺服电动机具有时间常数小、响应快速的特点。目前低惯量型直流伺服电动机主要有:空心杯转子直流伺服电动机、盘形电枢直流伺服电动机和无槽电枢直流伺服电动机。

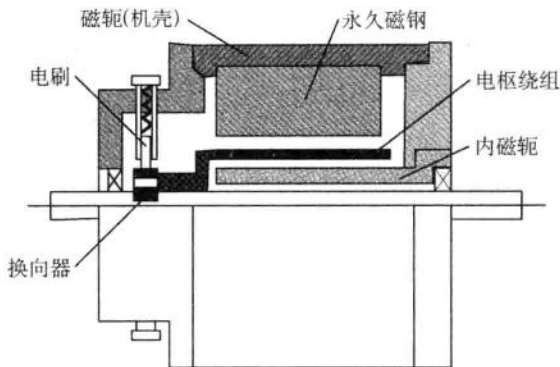


图 1-1 空心杯转子直流伺服电动机

1) 空心杯转子直流伺服电动机

空心杯转子直流伺服电动机的结构简图如图 1-1 所示。空心杯转子可以由事先成型的单个线圈,沿圆柱面排列成杯形,或直接用绕线机绕成导线杯,再用环氧树脂热固化定型。也可采用印制绕组。它有内、外两个定子,外定子装有永久磁钢,内定子起磁轭作用,由软磁材料做成。

空心杯电枢直接安装在电机轴上,它在内、外定子之间的气隙中旋转,电枢绕组的端侧与换向器相连,通过电刷与外电路实现电气连接。由于转子内、外侧都需要有足够的气隙,所以磁阻大,磁势利用率低。通常需采用高磁能积永磁材料作磁极。

这种电机的性能特点是:

- (1) 低惯量。由于转子无铁芯,且薄壁细长,惯量极低,有超低惯量电动机之称。
- (2) 灵敏度高。因转子绕组散热条件好,绕组的电流密度可取到 30 A/mm^2 ,并且永久磁钢体积大,可提高气隙的磁通密度,所以力矩大。加上惯量又小,因而转矩/惯量比很大,机电时间常数很小(最小的在 1 ms 以下),灵敏度高,快速性好。其始动电压在 100 mV 以下,可完成每秒钟 250 次起-停循环。
- (3) 损耗小,效率高。因转子中无磁滞和涡流造成的铁耗,所以效率可达 80% 或更高。
- (4) 力矩波动小,低速运转平稳,噪声很小。由于绕组在气隙中均匀分布,不存在齿槽效应,因此力矩传递均匀、波动小,故运转时噪声小,低速运转平稳。
- (5) 换向性能好,寿命长。由于杯形电枢无铁芯,换向元件电感很小,几乎不产生电火花,换向性能好,因此大大提高了电动机的使用寿命。

这种形式的直流伺服电动机的制造成本较高。它大多用于高精度的自动控制系统及测量装置等设备中,如电视摄像机、录音机、X-Y 函数记录仪、机床控制系统等方面。

2) 盘形电枢直流伺服电动机

盘形电枢的特点是电枢的直径远大于长度,电枢有效导体沿径向排列,定转子间的气隙为轴向平面气隙,主磁通沿轴向通过气隙,多采用永久磁钢励磁。



圆盘中电枢绕组可以是印制绕组或绕线式绕组,后者功率比前者大。印制绕组是采用与制造印制电路板相类似的工艺制成的,它可以是单片双面或多片重叠的。绕线式绕组则是先绕成单个线圈,然后把全部线圈排列成盘形,再用环氧树脂热固化成型。图1-2为印制绕组盘形电枢直流伺服电动机结构示意图,它不单独设置换向器,而是利用靠近转轴的电枢端部兼作换向器,但导体表面需另外镀一层耐磨材料,以延长使用寿命。图1-3为绕线式盘形伺服电动机结构示意图。

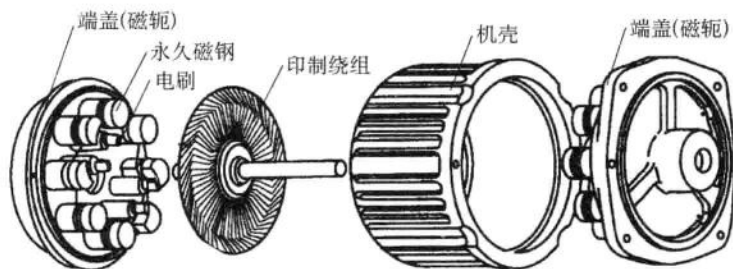


图1-2 印刷绕组盘形伺服电动机结构示意图

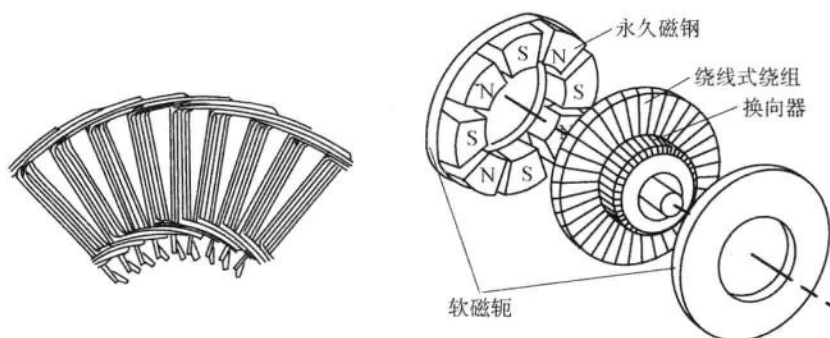


图1-3 绕线式绕组盘形伺服电动机结构示意图

盘形电枢直流伺服电动机具有与杯形电枢类似的特点,表述如下:

- (1) 电机结构简单,制造成本低。
- (2) 起动转矩大。由于电枢绕组全部在气隙中,散热良好,其绕组电流密度比一般普通的直流伺服电动机高10倍以上,因此容许的起动电流大,起动转矩也大。
- (3) 力矩波动很小,低速运行稳定,调速范围广而平滑,能在1:20的速比范围内可靠平稳运行。这主要是由于这种电机没有齿槽效应,以及电枢元件数、换向片数很多的缘故。
- (4) 换向性能好。电枢由非磁性材料组成,换向元件电感小,所以换向火花小。
- (5) 电枢转动惯量小,反应快,机电时间常数一般为10~15 ms,属于中等低惯量伺服电动机。

3) 无槽电枢直流伺服电动机

无槽电枢直流电动机的结构和普通直流电动机的差别仅仅是电枢铁芯是光滑、无槽的圆

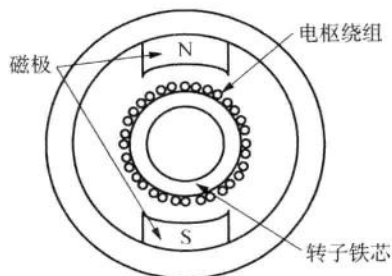


图 1-4 无槽电枢直流伺服电动机结构示意图

柱体。电枢的制造是将敷设在光滑电枢铁芯表面的绕组，用环氧树脂固化成型并与铁芯黏结在一起，其气隙尺寸较大，比普通的直流电动机大 10 倍以上，定子励磁一般采用高磁能的永久磁钢，图 1-4 为无槽电枢直流伺服电动机结构示意图。

由于无槽直流电动机在磁路上不存在齿部磁通密度饱和的问题，因此就有可能大大提高电机的气隙磁通密度和减小电枢的外径。这种电机主要用于要求快速动作、功率较大的系统，例如数控机床和雷达天线驱动等方面。

1.2.2 控制方式

直流伺服电动机的转速公式为

$$n = \frac{U_a - I_a R_a}{C_e \Phi} \quad (1-1)$$

式中： U_a 为电枢电压， I_a 为电枢电流， R_a 为电枢回路总电阻， C_e 为电动势常数， Φ 为每极磁通。

根据式(1-1)改变电枢电压 U_a 和每极磁通 Φ 都可以改变电动机转速，因此直流伺服电动机的控制方式有两种，一种是电枢控制，另一种为磁场控制。

1. 电枢控制

电枢控制是保持励磁磁通不变，通过改变电枢绕组的电压来改变电机的转速。当电动机的负载转矩不变时，升高电枢电压，电机的转速就升高；反之转速就降低。电枢电压等于零时，电机不转。电枢电压改变极性时，电机反转。

图 1-5 所示为电枢控制时电机转速的变化过程， t_1 时刻电机的电枢电压由 U_{a1} 变为 U_{a2} ，电流从 I_{a1} 迅速增大，转矩增大，因此转速从 n_1 随之增大；随着转速的上升，反电势增大，电流又有下降的趋势，转矩下降，因此转速趋于稳定，至 t_2 时刻转速稳定在较高的转速 n_2 下，电流也恢复到 I_{a1} 。

2. 磁场控制

磁场控制是保持电枢绕组电压不变，改变励磁回路的电压改变电机的转速。若电动机的负载转矩不变，当升高励磁电压时，励磁电流增加，主磁通增加，电机转速就降低；反之，转速升高。改变励磁电压的极性，电机转向随之改变。

尽管磁场控制也可达到控制转速大小和旋转方向的目的，但励磁电流和主磁通之间是非线性关系，且随着励磁电压的减小其机械特性变软，调节特性也是非线性的，故少用。

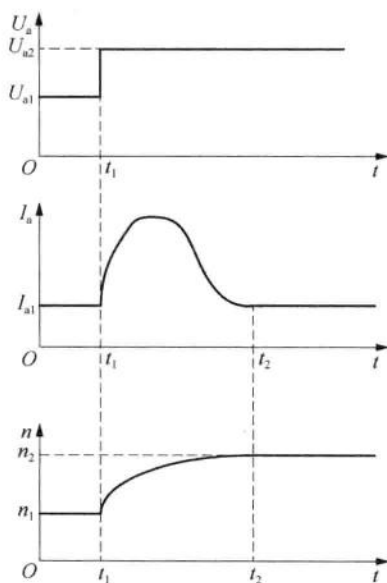


图 1-5 电枢控制时电机转速的变化过程



1.3 直流伺服电动机的特性

1.3.1 静态特性

直流伺服电动机的静态特性包括机械特性和调节特性,为了简化分析,可作如下假定:

- (1) 不考虑电机磁路饱和,并忽略负载时电枢反应的影响。
- (2) 电刷位于几何中性线上。

1. 机械特性

机械特性是指电枢电压等于常数时,转速与电磁转矩之间的函数关系,即 $U_a = \text{常数}$ 时, $n = f(T_e)$ 。

如果忽略电枢反应的影响,主磁通保持不变,直流伺服电动机的电磁转矩为

$$T_e = C_T \Phi I_a \quad (1-2)$$

式中: C_T 为转矩系数。电枢绕组的感应电动势为

$$E_a = C_e \Phi n \quad (1-3)$$

式中: C_e 为电动势系数。电枢回路的电压平衡方程为

$$U_a = E_a + R_a I_a \quad (1-4)$$

由式(1-2)~式(1-4),可以得到直流伺服电动机的机械特性方程为

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T_e = n_0 - k T_e \quad (1-5)$$

式中: $n_0 = \frac{U_a}{C_e \Phi}$ 为理想空载转速, $k = \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2}$ 为直线的斜率。由式(1-5)可得堵转转矩为 $T_d = C_T \Phi \frac{U_a}{R_a}$ 。

根据式(1-5)可知,直流伺服电动机的机械特性为一条直线,转速随转矩的增大而增大。同时随着电枢电压 U_a 的上升,理想空载转速 n_0 和堵转转矩 T_d 提高,机械特性曲线上移如图 1-6 所示。

电动机机械特性的斜率 k 与电枢电阻 R_a 成正比。电枢电阻 R_a 大,斜率 k 也大,机械特性就软;电枢电阻 R_a 小,斜率 k 也小,机械特性就硬。因此总希望电枢电阻 R_a 数值小,这样机械特性就硬。

当直流伺服电动机在自动控制系统中使用,电动机的电枢电压 U_a 是由系统中的放大器供给的。考虑放大器的内阻 R_i ,机械特性的斜率为 $k = \frac{R_a + R_i}{C_e C_T \Phi^2}$ 。可见,放大器内阻越大,机械特性越软。因此总希望降低放大器的内阻,以改善电动机的特性。

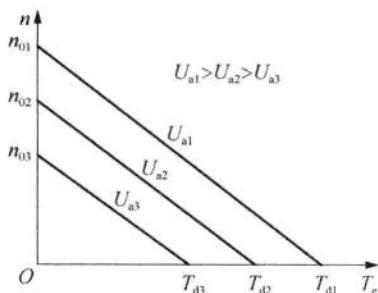


图 1-6 直流伺服电动机的机械特性



2. 调节特性

直流伺服电动机的调节特性是指在一定负载转矩下,转子转速与控制电压之间的关系曲线,即 $n = f(U_a)$ 。

当负载转矩 T_L 恒定时,根据式(1-5),并利用 $T_L = T_e$ 的关系,可以直接得到直流伺服电动机的调节特性方程为

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T_L \quad (1-6)$$

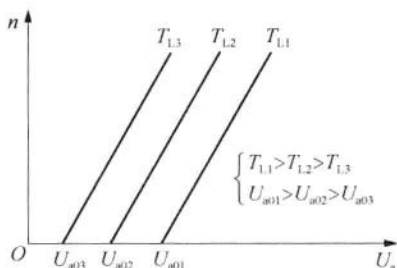


图 1-7 直流伺服电动机的调节特性

相应的调节特性曲线如图 1-7 所示。可见,直流伺服电动机的调节特性也为一直线,随着负载转矩 T_L 的增加,调节特性向右平移,而直线斜率保持不变。

当 $n=0$,由式(1-6)得直流伺服电动机的始动电压为

$$U_{a0} = \frac{R_a T_L}{C_T \Phi} \quad (1-7)$$

不同负载转矩 T_L 所需要的始动电压 U_{a0} 也是不同的,只有当电枢电压大于这个电压值,电动机才会转动;否则电动机产生的电磁转矩小于负载转矩,电机不能起动。电枢电压小于始动电压的区间是调节特性的死区。负载转矩 T_L 越大,始动电压 U_{a0} 越高,死区越大。负载越大,死区越大,伺服电机不灵敏,所以不可有太大负载。

1.3.2 低速运行的不稳定性分析

当电动机转速很低时,转速就不均匀,出现时快、时慢,甚至暂时停一下的现象,这种现象称为直流伺服电动机低速运转的不稳定性,产生的原因主要有以下几个方面:

(1) 低速时感应电动势较小,由于电枢齿槽效应等原因造成的电动势脉动的影响将增大,导致电磁转矩的波动比较明显。

(2) 低速时控制电压值很小,电刷和换向器之间接触电压不稳定性的影响将增大,导致电枢电流和电磁转矩的波动。

(3) 低速时电刷和换向器之间的摩擦转矩也是不稳定的,造成总的阻转矩的变化,导致输出转矩的不稳定。

直流伺服电动机低速运行的不稳定性将在自动控制系统中造成误差,必须采取相应的措施加以克服,如在系统的控制线路中采取措施,或者采用低速运行性能较好的特种电机,如力矩电机、无槽电机等。

1.3.3 动态特性

电动机进行调速、起动、制动运行以及电源波动、负载变化时,存在从一种稳态到另一种稳态的变化过程。在此期间电动机的电流、功率、电磁转矩以及转速等物理量随时间的变化特性称为动态特性。



动态特性体现在电机运行中的过渡过程,产生过渡过程的原因主要是电机中存在两种惯性:机械惯性和电磁惯性。当电枢电压突然改变时,由于电机和负载有转动惯量,转速不能突变,需要有一个渐变的过程,才能达到新的稳态,因此转动惯量是造成机械过渡过程的主要因素。另外,由于电枢绕组具有电感,电枢电流也不能突变,也需要有一个过渡过程,所以电感是造成电磁过渡过程的主要因素。电磁过渡过程和机械过渡过程是相互影响的,这两种过渡过程交织在一起形成了电机总的过渡过程。但是一般来说,电磁过渡过程所需的时间要比机械过渡过程短得多。因此在许多场合,只考虑机械过渡过程,而忽略电磁过渡过程。

研究电机过渡过程的方法,是将过渡过程中的物理规律用微分方程表示出来,然后根据初始条件求解方程,找出各物理量与时间的函数关系。

1. 过渡过程分析

因电枢绕组具有电感,在过渡过程中电枢电流在变化,所以在电枢回路中将产生电抗压降 $L_a dI_a/dt$,其中 L_a 为电刷两端的电感。因此,动态电压平衡方程式应写为

$$U_a = L_a \frac{dI_a}{dt} + R_a I_a + E_a \quad (1-8)$$

在过渡过程中,转矩平衡方程式为

$$T_e = T_s + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-9)$$

式中: T_s 为阻转矩,它是负载转矩和电机空载转矩之和; J 为电机本身及负载的转动惯量; Ω 为电机的角速度。

在小功率随动系统中选择电动机时,总是使电动机的额定转矩远大于轴上的阻转矩。也就是说,在动态过渡过程中,电磁转矩主要用来克服惯性转矩,以加快过渡过程。为了推导方便,可以假定 $T_s=0$,由式(1-9)得

$$T_e = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-10)$$

根据 $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ 以及式(1-2),式(1-3),式(1-8),式(1-10),得

$$L_a \frac{2\pi J}{60C_e C_T \Phi^2} \frac{d^2 n}{dt^2} + \frac{2\pi J R_a}{60C_e C_T \Phi^2} \frac{dn}{dt} + n = \frac{U_a}{C_e \Phi} \quad (1-11)$$

令 $\tau_j = \frac{2\pi J R_a}{60C_e C_T \Phi^2}$, $\tau_d = \frac{L_a}{R_a}$, $n_0 = \frac{U_a}{C_e \Phi}$, 上式可写成

$$\tau_j \tau_d \frac{d^2 n}{dt^2} + \tau_j \frac{dn}{dt} + n = n_0 \quad (1-12)$$

式中: τ_j 为机电时间常数; τ_d 为电磁时间常数; n_0 为理想空载转速。

式(1-12)为关于转速的二阶微分方程,该方程的两个特征根为



$$p_{1,2} = -\frac{1}{2\tau_d} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4\tau_d}{\tau_j}} \right] \quad (1-13)$$

设 $t = 0$ 时, $n = 0$, $\frac{dn}{dt} = 0$, 则

$$n = n_0 + \frac{n_0}{2\sqrt{1 - \frac{4\tau_d}{\tau_j}}} \left[\left(1 - \sqrt{1 - \frac{4\tau_d}{\tau_j}} \right) e^{p_1 t} - \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4\tau_d}{\tau_j}} \right) e^{p_2 t} \right] \quad (1-14)$$

同理可得电流的解为

$$I_a = \frac{\frac{U_a}{R_a}}{\sqrt{1 - \frac{4\tau_d}{\tau_j}}} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) \quad (1-15)$$

当 $4\tau_d < \tau_j$ 时, p_1 和 p_2 两根都是负实数。这时电机的转速、电流的过渡过程如图 1-8 所示, 是非周期的过渡过程。这种情况出现在电机电枢电感 L_a 比较小、电枢电阻 R_a 比较大, 以及电机转动惯量 J 较大、电机转矩较小的条件下。

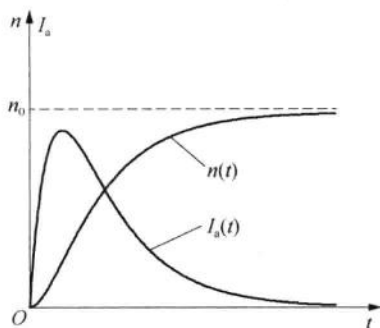


图 1-8 $4\tau_d < \tau_j$ 时的过渡过程

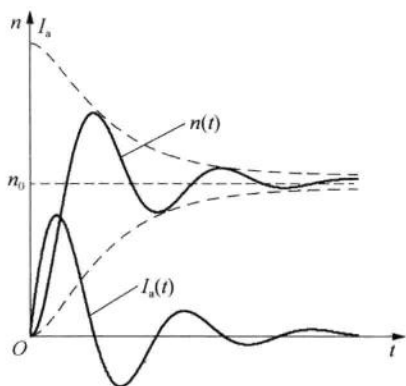


图 1-9 $4\tau_d > \tau_j$ 时的过渡过程

当 $4\tau_d > \tau_j$ 时, p_1 和 p_2 两个根是共轭复数。这时过渡过程产生振荡, 如图 1-9 所示。当电枢回路电阻 R_a 及转动惯量 J 很小, 而电枢电感 L_a 很大时, 就可能出现这种振荡现象。

在大多数情况下, 特别是放大器内阻与电枢绕组相串联时, 则有 $\tau_j \gg \tau_d$ 。此时, τ_d 可以忽略不计, 于是式(1-12)可以简化为一阶微分方程, 由此得零初始条件下转速和电流的解分别为

$$n = n_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau_j}}) \quad (1-16)$$

$$I_a = \frac{U_a}{R_a} e^{-\frac{t}{\tau_j}} \quad (1-17)$$

把 $t = \tau_j$ 代入式(1-16), 可得 $n = 0.632n_0$ 。所以, 机电时间常数 τ_j 被定义为: 电机在空载



情况下加额定励磁电压时,加上阶跃的额定控制电压,转速从零升到理想空载转速的 63.2% 时所需的时间。如再把 $t=3\tau_j$ 代入式(1-16),则得 $n=0.95n_0$ 。此时,过渡过程基本结束,所以 $3\tau_j$ 称为过渡过程时间。

式(1-16),式(1-17)对应的特性曲线如图 1-10 所示。

2. 机电时间常数与电机参数的关系

根据机电时间常数 $\tau_j = \frac{2\pi J R_a}{60 C_e C_T \Phi^2}$ 的定义,机电时间

常数与以下因素有关:

(1) 机电时间常数与转动惯量成正比。当电机在系统中带动负载时,其转动惯量应该包括负载通过传动比折合到电动机轴上的转动惯量 J_L 和电机本身的转动惯量 J_0 ,即总的转动惯量应该是 $J_L + J_0$ 。

(2) 与电机的每极气隙磁通 Φ 的平方成反比,为了减小电机机电时间常数,应增加每极气隙磁通。

(3) 与电枢电阻 R_a 的大小成正比,为减小时间常数,应尽可能减小电枢电阻,当伺服电动机用于自动控制系统,并由放大器供给控制电压时,应计入放大器的内阻 R_i ,即总的电枢回路电阻为 $R_a + R_i$ 。

同时机电时间常数与电枢电压等外界因素无关。

如果把理想空载转速 n_0 的单位取为 rad/s,堵转转矩的单位取为 $N \cdot m$,转动惯量 J 的单位取为 $kg \cdot m^2$,则时间常数 τ_j 单位为 s。

由于机电时间常数表示了电机过渡过程时间的长短,反映了电机转速追随信号变化的快慢程度,所以是伺服电动机一项重要的动态性能指标。一般直流伺服电动机的机电时间常数大约在十几毫秒到几十毫秒之间。快速低惯量直流伺服电动机的机电时间常数通常在 10 ms 以下,其中空心杯电枢永磁直流伺服电动机的机电时间常数可小到 2~3 ms。

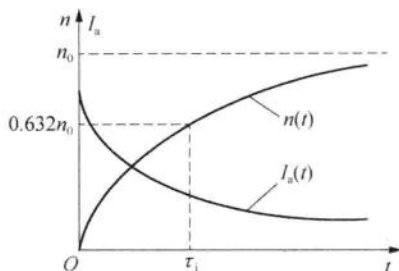


图 1-10 $\tau_j \gg \tau_a$ 时的过渡过程

1.4 直流力矩电动机

在某些自动控制系统中,被控对象的运动速度相对来说是比较低的。例如某一种防空雷达天线的最高旋转速度为 $90^\circ/s$,这相当于转速 15 r/min。一般直流伺服电动机的额定转速为 1500 r/min 或 3000 r/min,甚至 6000 r/min,这时就需要用齿轮减速后再去拖动天线旋转。但是齿轮之间的间隙对提高自动控制系统的性能指标是很不利的,它会引起系统在小范围内的振荡和降低系统的刚度。因此,希望有一种低转速、大转矩的电动机来直接带动被控对象。

直流力矩电动机就是为满足类似上述这种低转速、大转矩负载的需要而设计制造的电动机。它能够在长期堵转或低速运行时产生足够大的转矩,而且不需经过齿轮减速而直接带动负载。它具有反应速度快、转矩和转速波动小、能在很低转速下稳定运行、机械特性和调节特性的线性度好等优点。特别适用于位置伺服系统和低速伺服系统中作执行元件,也适用于需要转矩调节、转矩反馈和一定张力的场合(如在纸带的传动中)。