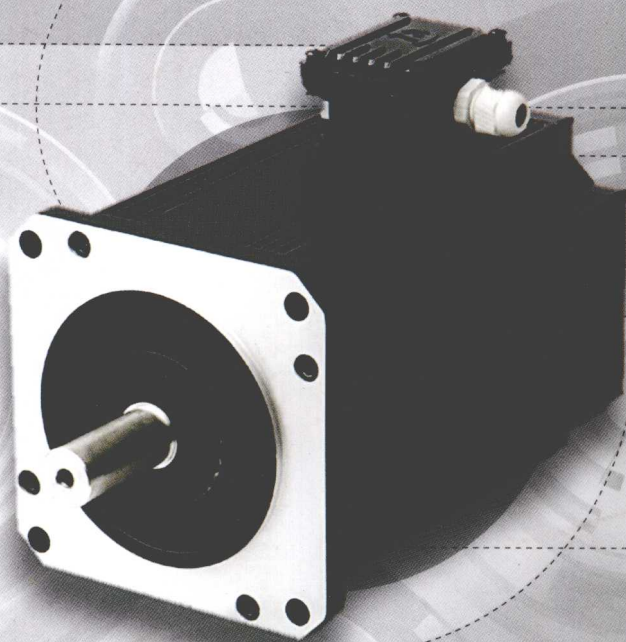


李珍国 编著

JIAOLIU DIANJI KONGZHI JICHU

交流电机 控制基础

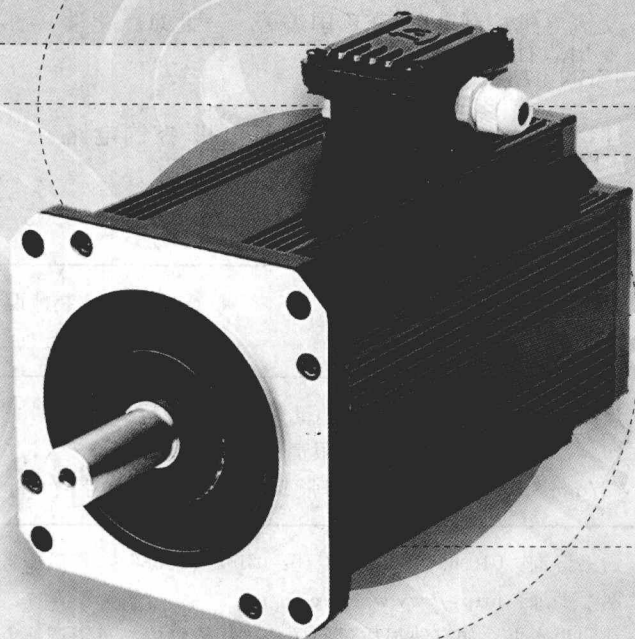


化学工业出版社

李珍国 编著

JIAOLIU DIANJI KONGZHI JICHU

交流电机 控制基础



化学工业出版社

· 北京 ·

TM 301.2

图书在版编目 (CIP) 数据

交流电机控制基础/李珍国编著. —北京: 化学工业出版社, 2009.10
ISBN 978-7-122-06573-5

I. 交… II. 李… III. 交流电机-控制电路
IV. TM340.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 153505 号

责任编辑: 高墨荣 卢小林
责任校对: 周梦华

装帧设计: 张 辉

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 15 1/4 字数 385 千字 2010 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

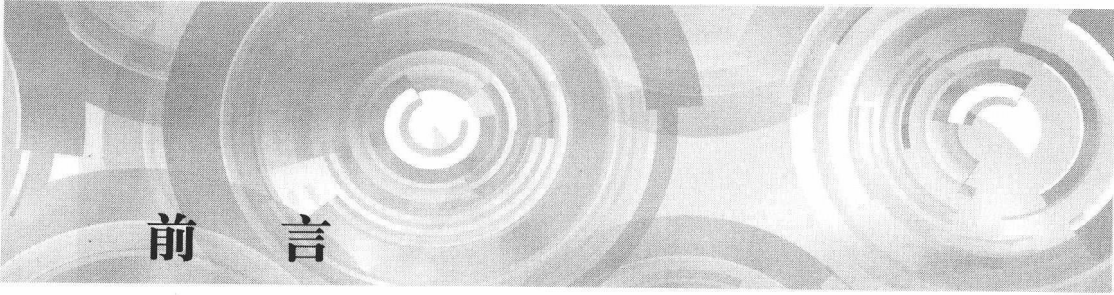
购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究



前 言

交流电机驱动已广泛应用于如机床、机器人、水泵、压缩机等大多数工农业生产机械以及家用电器和医疗器械中，而交流电机控制技术是交流电机驱动装置的核心部分。

从发展进程看，电机控制系统一直以来向结构简单、操作方便、高性能等方向发展。如由直流电机控制系统到交流电机控制系统；由模拟型控制系统到数字型控制系统，再到软件型控制系统；由标量控制技术到磁链定向矢量控制技术和直接转矩控制技术；由传统的 PI 控制到各种智能控制等。

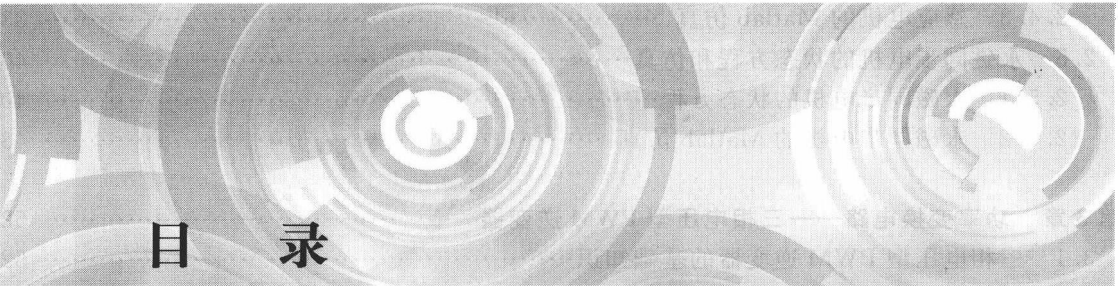
交流电机控制技术交织和融合着电机学、电力电子学、自动控制理论、计算机控制技术等知识，且在不断更新和发展。本书以三相笼型感应电机 (I. M.) 控制系统和三相永磁同步电机 (PMSM) 控制系统为例，主要阐述了电机数学模型、主电路与控制电路的构成、位置-速度-电流控制系统的设计与构成。尤其是以感应电机和永磁同步电机为对象，通过理论与其相应 Matlab 仿真数据相结合的方式，具体介绍了各自位置-速度-电流控制器的设计和构成方法。

本书共 6 章。第 1 章介绍了交流电机控制系统的整体概念和系统构成，并与直流电机控制系统进行了比较。第 2 章介绍了三相笼型感应电机和三相永磁同步电机在不同坐标系下的电压方程、运动方程和状态方程等数学模型，并在已知电机参数的条件下，运用 Matlab 软件对其进行了仿真。第 3 章介绍了三相电压型逆变器的构成、PWM 等调制方法、死区时间的影响等应用时会碰到的实际问题。第 4 章介绍了感应电机控制系统转差频率矢量控制、基于磁链观测器的矢量控制、直接转矩控制、标量控制的构成和设计方法。其中，详细说明了电流控制器系数的选取方法和直接转矩控制中电压矢量查询表的构成原理，并以具体的电机参数为例，给出了这些控制系统的仿真结果。第 5 章介绍了永磁同步电机控制系统矢量控制和直接转矩控制的构成和设计方法。也以具体电机参数为例，给出了这些控制系统的仿真结果。第 6 章介绍了交流电机控制系统中的位置控制器和速度控制器的参数选取方法，并以具体实例，给出了速度和位置控制系统的仿真结果。

本书可供科研院所人员和从事此类研究开发工作的人员参考，也可供高等院校教师 and 研究生参考，亦可作为本科高年级学生选修课的参考书。

由于笔者所掌握的知识有限，因此可能有一些讲解不到位的地方，敬请各位专家和读者赐教。

李珍国
2009 年 7 月



目 录

第 1 章 交流电机控制系统概述	1
1.1 交流电机控制系统的构成	1
1.2 交流电机控制系统与直流电机控制系统的比较	2
1.3 交流电机难以控制的原因	3
1.4 电机控制系统相关术语和定义	4
1.4.1 电机相关术语和定义	4
1.4.2 控制相关术语和定义	5
1.4.3 系统性能相关术语和定义	6
第 2 章 交流电机的电压方程和状态方程	8
2.1 感应电机的电压方程和转矩公式	8
2.1.1 结构	8
2.1.2 用三相交流变量表示的电压方程	9
2.1.3 坐标变换	10
2.1.4 三相交流坐标系到两相交流坐标系的变换	11
2.1.5 用两相交流变量表示的电压方程	12
2.1.6 两相静止坐标系到两相旋转坐标系的变换	13
2.1.7 两相交流静止坐标系下的电压方程	14
2.1.8 两轴直流旋转坐标系下的电压方程	15
2.1.9 T 型等效电路	17
2.1.10 转矩公式	18
2.2 永磁同步电机的电压方程和转矩公式	18
2.2.1 结构	18
2.2.2 用三相交流变量表示的电压方程	19
2.2.3 用两相交流变量表示的电压方程	20
2.2.4 两轴旋转坐标系下的电压方程	21
2.2.5 稳态等效电路	22
2.2.6 转矩公式	22
2.3 系统运动方程	23
2.4 感应电机的状态方程和仿真	23
2.4.1 有关状态方程的基础知识	23
2.4.2 感应电机的状态方程	25

2.4.3 感应电机的 Matlab 仿真	33
2.5 永磁同步电机的状态方程和仿真	40
2.5.1 永磁同步电机的状态方程	40
2.5.2 永磁同步电机的 Matlab 仿真	43
第3章 功率变换电路——三相电压型 PWM 逆变器	52
3.1 三相电压型 PWM 逆变器的基础知识	52
3.1.1 什么是电压型逆变器	52
3.1.2 什么是 PWM	53
3.1.3 三相电压型逆变器的基本构成和基本工作回路	54
3.1.4 三相电压型逆变器的输出电压矢量	55
3.1.5 三相电压型 PAM 逆变器的输出电压控制方法	56
3.1.6 三相电压型 PWM 逆变器的输出电压控制方法	56
3.2 三相电压型 PWM 逆变器应用中的实际问题	71
3.2.1 死区时间的影响和对策	72
3.2.2 直流电源电压波动的影响和对策	75
3.2.3 开关管在 PWM 方式下运行时的开关损耗	75
3.3 三相电压型 PWM 逆变器应用中的其他问题	78
3.3.1 功率开关器件	78
3.3.2 整流电路	86
3.3.3 开关管驱动电路	89
3.3.4 缓冲电路	91
3.3.5 噪声滤波电路	92
3.3.6 回馈电能放电电路	94
第4章 感应电机控制系统	95
4.1 感应电机控制系统的构成	95
4.2 感应电机的矢量控制系统	95
4.2.1 矢量控制的基本思路	95
4.2.2 矢量控制的基础和分类	97
4.2.3 转差频率矢量控制	100
4.2.4 基于磁链观测器的矢量控制	121
4.2.5 无速度传感器矢量控制	133
4.2.6 矢量控制系统的实际构成方法	136
4.2.7 三相交流坐标系下的电流控制	141
4.3 感应电机的直接转矩控制系统	143
4.3.1 直接转矩控制的基本思路	143
4.3.2 直接转矩控制与矢量控制之间的内在联系	148
4.3.3 直接转矩控制与矢量控制的比较	150
4.3.4 直接转矩控制系统的构成	150
4.3.5 系统的 Matlab 仿真	154

4.4 感应电机的标量控制系统	162
4.4.1 稳态等效电路和其相量图	163
4.4.2 感应电机的电压频率协调控制系统	165
4.4.3 感应电机的转差频率控制系统	167
第5章 永磁同步电机控制系统	170
5.1 永磁同步电机控制系统的构成	170
5.2 永磁同步电机的矢量控制系统	170
5.2.1 矢量控制的基本思路	170
5.2.2 转子磁极位置的检测	171
5.2.3 d 、 q 两轴之间的解耦	172
5.2.4 三相静止交流坐标系和两轴旋转直流坐标系之间的矢量变换	173
5.2.5 电流控制器	175
5.2.6 系统的整体构成	178
5.2.7 系统的 Matlab 仿真	178
5.2.8 系统的实际构成方法	185
5.2.9 三相交流坐标系下的电流控制	188
5.3 永磁同步电机的直接转矩控制系统	192
5.3.1 直接转矩控制的基本思路在永磁同步电机系统中的应用	192
5.3.2 电枢磁链和输出转矩的估算	195
5.3.3 系统的 Matlab 仿真	196
5.3.4 d 轴电枢电流为 0 的永磁同步电机直接转矩控制系统	200
第6章 速度和位置控制系统的设计	203
6.1 速度控制系统的设计	203
6.1.1 基本设计方法	203
6.1.2 双自由度 PI 速度控制系统的设计方法	223
6.2 位置控制系统的设计	227
6.2.1 系统的构成	227
6.2.2 单轴直线运动的跟随性	231
6.2.3 平面直线运动的跟随性	232
6.2.4 圆弧运动的跟随性	232
6.2.5 速度控制范围的确定	234
参考文献	235

第1章

交流电机控制系统概述

电机控制系统一直以来向结构简单、操作方便、高性能等方向发展。例如：为了方便维护，控制系统中广泛使用的电机由原先的直流（DC）电机转变为现在的交流（AC）电机；为了追求高性能和操作方便，控制系统中的电气回路由原先的模拟（Analog）型转变为数字（Digital）型，再转变为现在的软件（Software）型控制电路。因此，当前主流的电机控制系统为软件型交流电机控制系统，现广泛应用于各种生产机械、家用电器、机器人等系统中。

之所以形成这种转变有以下三条理由：一是已开发出了针对交流电机即感应电机（Induction Motor, I. M.）和同步电机（Synchronous Motor, S. M.）的高性能控制理论；二是高开关频率大容量开关器件的问世，促进了大容量逆变器（Power Inverter）控制技术的发展，使得交流电的高精度和高速控制变为可能了；三是随着大规模集成电路（Large-scale integration, LSI）、微处理器（Microprocessor）、数字信号处理器（digital signal processor, DSP）等的进步，系统的数字化和软件化也变为可能了。

本章为使读者明确交流电机控制系统的整体概念，将介绍其构成，并与直流电机控制系统进行比较。

1.1 交流电机控制系统的构成

一般的交流电机控制系统的构成如图 1-1 所示。系统由电机、功率变换器、传感器、控制器等组成。其中，电机为进行机电能量转换的部件，也是整个系统的控制对象；功率变换器为根据要求给电机提供电能的装置，是把常用交流电或直流电变换成电机控制所需形式交流电的装置；传感器为检测电机电流和转轴速度以及转子位置的装置；控制器为根据指令信号和从传感器获得的信号产生功率变换器所需控制信号的装置。对于交流电机控制系统中，典型常用且系统容量不是很大的场合使用的交流电机有三相笼型感应电机和三相永磁同步电机。三相永磁同步电机由于用功率半导体开关器件代替了直流电机中的电刷和换向器，所以也常被称无刷直流电机（Brushless DC Motor, BLDC）。对应于这个名称，有时也把交流电机单指三相笼型感应电机。此外，对于交流电机控制系统中，较常用的功率变换器为三相电压型 PWM 逆变器。

系统的控制框图如图 1-2 所示。从图中可看出，控制系统由位置控制环、速度控制环、电流控制环构成。其中，位置控制环为最外环，是主闭环，而速度控制环和电流控制环为内环。对于电流控制环，由于电机为交流电机，因此需要两个或三个信号通路。其构成方法也有两种：一种是直接通过交流电流构成闭环的方法，另一种是先把三相交流电流坐标变换成直角两轴上的矢量后构成闭环的方法。此时，反馈回路上就需要能把电流传感器的输出信号

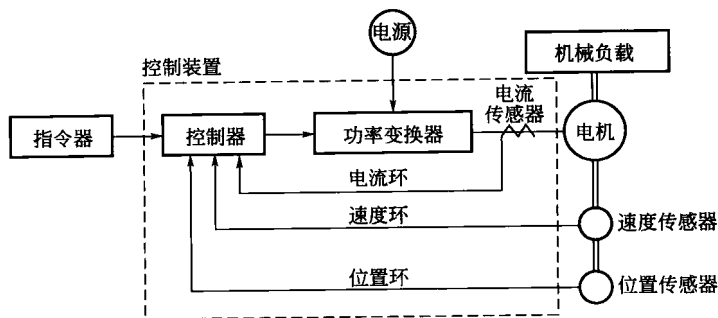


图 1-1 交流电机控制系统的构成

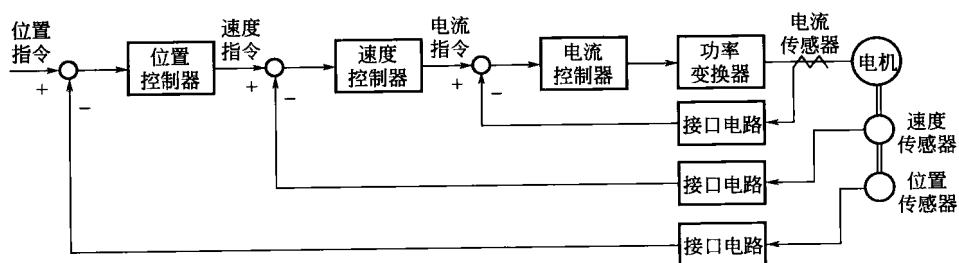


图 1-2 系统的控制框图

进行坐标变换的接口电路。速度传感器和位置传感器的输出信号，通常也需要接口电路进行信号处理后，构成闭环。还有，之所以系统中有内环控制器是为了加强系统的稳定性。只要把内环控制器的穿越角频率设置成比外环的更高就可以。而且，这样的系统容易设置速度和电流的指令限幅。

根据控制系统的回路是模拟还是数字，分为模拟型和数字型电机控制系统。伴随着数字 IC 的发展，位置、速度和电流控制都成为数字化了。由于出现了高性能的微处理器和数字信号处理器，其全数字化变为可能。一旦使用了处理器，因为控制是通过软件来实现的，所以也叫做软件型电机控制系统。

1.2 交流电机控制系统与直流电机控制系统的比较

直流电机是通过靠机械的方式形成的互相垂直的气隙磁通与电枢电流的乘积产生电磁转矩的。由于在做控制时，要保持气隙磁通基本不变，所以转矩控制只能通过控制电枢电流大小来实现。随之转矩控制变得简单，在电力变换和控制技术未成熟的时期，电机控制系统中的电机大都采用直流电机。但是直流电机由于存在电刷的维护性问题，因此没有此缺点的交流电机渐渐被用于电机控制系统中。交流电机控制系统的控制装置比直流电机控制系统复杂得多。随着电力变换和控制技术的进步、功率开关管器件和处理器等构成控制装置的部件的价格下降，到现在交流电机控制系统已变为主流。

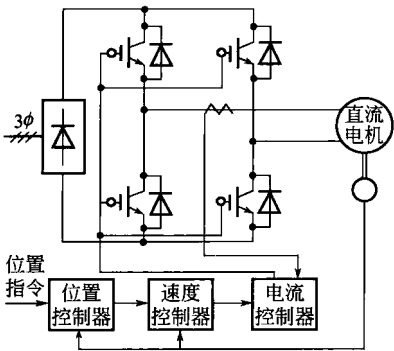
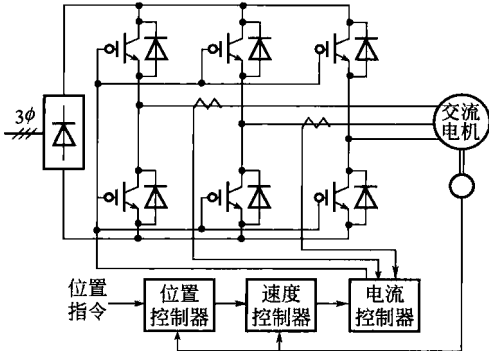
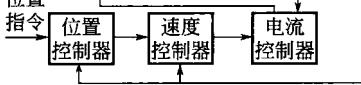
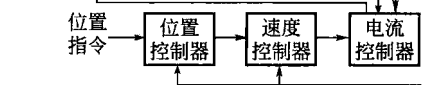
感应电机的定子电流中同时含有对应于直流电机中励磁电流和电枢电流的两个分量。感应电机控制系统中，常把这两个分量再构成互成正交的矢量来进行控制，即进行所谓的矢量控制。至于转矩控制，感应电机的控制虽比同步电机的控制复杂，但由于电机本身具有的坚固性优点，使得在较大容量系统中常常被使用。此外，与同步电机控制不同的是，即使在无

负载情况下，感应电机也需要励磁电流。运行异常时的制动，一般采用机械制动或依靠事先准备好的直流电源的直流制动方法。

永磁同步电机是靠旋转的永久磁铁形成气隙磁通，并与其互成正交的三相电枢电流的合成矢量一起产生电磁转矩。只要控制好电枢电流，就能达到控制转矩的目的，因此比感应电机控制简单、易实现。此类电机在较小容量系统中，由于电机的效率高，而常被使用。此外，永久磁铁存在退磁的问题。当电枢电流过于大时，出现此情况，而不能正确输出所需转矩。因此，永磁同步电机控制系统中，应注意最大电枢电流问题。运行异常时的制动，可采用通过电阻短接电枢线圈的方法来实现。显然在这方面，比感应电机好。

表 1-1 列出了直流电机控制系统和交流电机控制系统的比较数据。

表 1-1 直流电机控制系统和交流电机控制系统的比较

分类	直流电机控制系统	交流电机控制系统	
		感应电机控制系统	同步电机控制系统
功率变换电路			
控制回路			
转矩控制	电枢电流控制 (双极性直流)	定子电流控制 (三相交流)	电枢电流控制 (三相交流)
磁极检测	不需要	不需要	需要
退磁维护	需要	不需要	需要
控制难度	简单	复杂	较复杂
异常时的制动	发电制动	机械制动或直流制动	发电制动

1.3 交流电机难以控制的原因

当把电机认定为控制系统对象时，可把这个对象看成产生转矩的模块。这是由于电机在旋转时的位置和速度决定于其输出转矩、系统的负载转矩、电路中的反电势以及当前位置信息的缘故。因此电机控制的核心是转矩控制。

在磁通密度为 $B(\text{Wb}/\text{m}^2)$ 的磁场中, 有一条有效长度为 $L(\text{m})$ 的直线形状导体里通有电流 $i(\text{A})$ 时, 作用于这个导体的电磁力 $f(\text{N})$ 为:

大小 $f = LiB\sin\beta$ (β 为电流方向和磁场方向之间的夹角)

方向 左手平展, 使大拇指与其余四指垂直, 并且都跟手掌在一个平面内。当把左手放入磁场中, 让磁感线垂直穿入手心, 四指指向电流方向时, 电磁力方向为拇指的方向 (左手定则, Left-hand rule)。

直流电机的原理模型如图 1-3 所示。从图中可知, 磁通 Φ 的方向和通过电枢电流 I_a 的导

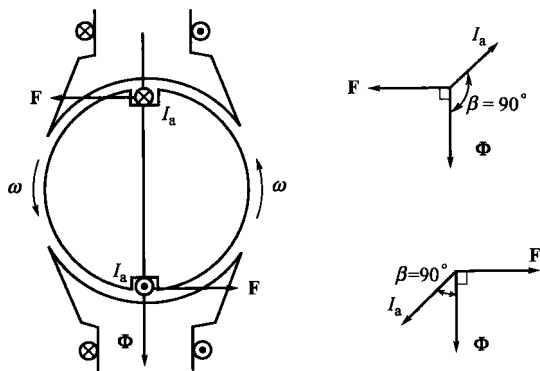


图 1-3 直流电机的原理模型

体位置及方向都做成了产生最大效果的转矩的结构, 即做成了磁通、电枢电流和电磁力互为 90° 的结构。因此可通过左手定则很容易定量地计算出所需转矩相对应的电枢电流, 而直流电机的转矩或速度控制的实现相对容易一些。

但是对于交流电机来说, 每时每刻磁通的大小和方向、电流的方向都在发生变化。因此虽然可通过等效电路、输入输出关系和矢量图等方法进行解析并控制, 但是所有这些方法的适用条件为系统处于稳定状态。基于上述原因, 要

得到与直流电机同等效果的控制将会不容易, 而要进行瞬时值的解析或控制就得需要其它的方法。

对于交流电机的控制, 为了能够利用直流电机的控制方法, 可以转换思考方法。假设能够捕捉交流电机每时每刻的磁场方向, 且以变化的磁场方向为参照物建立坐标系, 在这个坐标系上分析和考虑交流电机的电磁转矩的产生时, 会发现其与直流电机的电磁转矩的产生很相似。这时, 只要通过各种方法控制好与磁场方向成 90° 的电流值, 就可得到与直流电机相同的控制性能效果, 这就是交流电机矢量控制的初衷。把这个想法具体到底怎么理解和实现, 就是本书要介绍的内容。

1.4 电机控制系统相关术语和定义

1.4.1 电机相关术语和定义

不管是直流电机还是交流电机, 其框图都可用图 1-4 表示。若电机为直流电机, 此框图中的参数就是电机本身的参数; 而若电机为交流电机, 则此框图中的参数为从控制效果等效得来的参数。下面结合此框图, 介绍电机相关术语和定义。

① 转矩系数 $K_T(\text{N} \cdot \text{m}/\text{A})$ 电机产生的电磁转矩 T_e 与转矩分量电流 i 的比值。

② 电势系数 $K_E(\text{V}/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$ 速度电势 e 与转子角速度 ω_{rm} 的比值。对于同步电机, K_E 和 K_T 一致; 而对于感应电机, 则不一致。

③ 电气时间常数 $T_E(\text{s})$ 堵转电机, 并给电机施加某一定值 v_0 时, 转矩分量电流 i 从 0 上升到其饱和值 i_0 的 63% 所需要的时间。如果其绕组的电阻和电感分别用 R 和 L 表示, 则电气时间常数 T_E 大小可由式(1-1)求得

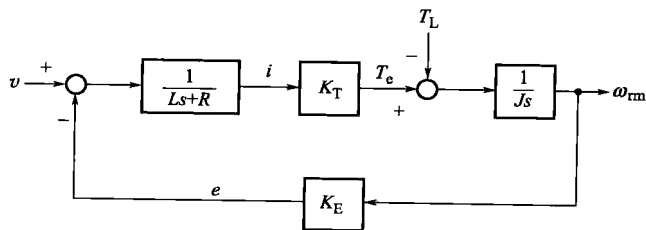


图 1-4 电机框图

$$T_E = \frac{L}{R} \quad (1-1)$$

这时, 转矩分量电流 i 的表达式如下

$$i = i_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_E}} \right) \quad (1-2)$$

④ 机械时间常数 $T_M(s)$ 不加机械负载, 并给电机施加某一定值 v_0 时, 电机转速 ω_{rm} 从 0 加速到其饱和值 ω_{rm0} 的 63% 所需要的时间。如果绕组的电阻用 R 表示, 而电机的转动惯量用 J 表示, 则机械时间常数 T_M 大小可由式(1-3)求得

$$T_M = \frac{JR}{K_T K_E} \quad (1-3)$$

这时, 电机的转速 ω_{rm} 表达式如下

$$\omega_{rm} = \omega_{rm0} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) \quad (1-4)$$

⑤ 固有角频率 ω_0 (rad/s) 和衰减系数 α_0 当把控制系统中电机本体的动特性近似看成二阶系统的时候, 电机的角速度 ω_{rm} 对输入电压 v 的传递函数 $G(s)$ 可写成如下所示

$$G(s) = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1-5)$$

式中, ω_n 为非衰减固有角频率; ζ 为衰减率。

当电机切除负载, 施加一定电压 v_0 启动时, 在加速过程中一般会出现振荡现象。 ω_n 为当 $\zeta=0$ 时的振荡角频率, 而 ζ 为振荡过程中的衰减率。

ω_n 、 ζ 和 T_E 、 T_M 之间的关系如下

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{T_E T_M}}, \quad \zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_M}{T_E}} \quad (1-6)$$

此外, 从传递函数 $G(s)$ 的表达式, 即式(1-5)可看出, 其两个特征方程的根为如下所示

$$s_{1,2} = -\alpha_0 \pm j\omega_0 = -\zeta\omega_n \pm j\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n \quad (1-7)$$

式中, $\alpha_0 = \zeta\omega_n$ 称为衰减系数, 而 $\omega_0 = \sqrt{1-\zeta^2}\omega_n$ 称为固有角频率。

1.4.2 控制相关术语和定义

结合图 1-4 的电机框图, 可构成如图 1-5 所示的电机控制系统框图。下面结合此框图, 介绍其控制相关术语和定义。

在图 1-5 的电机控制系统框图中, K_θ 、 K_ω 、 K_i 分别为位置控制器、速度控制器、电流控制器的系数。在这种系统中, 一般多由各个闭环子系统的开环放大倍数 (也可称闭环系

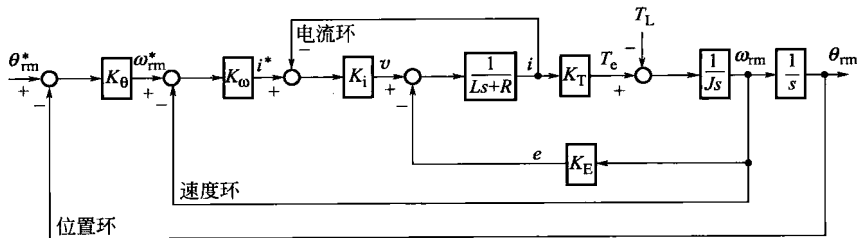


图 1-5 电机控制系统框图

数)来表示系统特性。闭环系数也指其闭环子系统频率特性的带宽(或截止频率)。

① 位置环系数 G_θ 位置环系数 G_θ 可通过把速度环的闭环传递函数设置成 1 来求得,显然

$$G_\theta = K_\theta \quad (1-8)$$

② 速度环系数 G_ω 与位置环系数的求法类同,速度环系数 G_ω 也可通过把电流环的闭环传递函数设置成 1 来求得。这时,速度环系数 G_ω 的表达式如下

$$G_\omega = \frac{K_\omega K_T}{J} \quad (1-9)$$

③ 电流环系数 G_i 当忽略电机绕组的电阻 R 时,其电流环系数 G_i 的表达式如下

$$G_i = \frac{K_i}{L} \quad (1-10)$$

④ 系统刚性 $K(N \cdot m/rad)$ 系统刚性 K 是指对应于单位变位角的恢复转矩值。对于图 1-5 系统,当把电流环的闭环传递函数设置成 1 时,系统刚性表达式如下

$$K = K_\theta K_\omega K_T = G_\theta G_\omega J \quad (1-11)$$

系统中,当速度控制器由 PI 构成时,其刚性为无穷大。

⑤ 黏性系数 $D(N \cdot m/rad \cdot s^{-1})$ 黏性系数 D 是指由速度反馈引起的等效黏性系数。对于图 1-5 系统,当把电流环的闭环传递函数设置成 1 时,系统刚性表达式如下

$$D = K_\omega K_T = G_\omega J \quad (1-12)$$

1.4.3 系统性能相关术语和定义

对于电机控制系统来说,如果需要经常进行位置和速度控制,则与此相关的性能指标主要有反映速度变化快慢的额定加速时间常数和反映输出功率增减快慢的功率变化速度。

① 额定加速时间常数 $T_N(s)$ 是指当电机以额定输出转矩 T_{eN} 加速时,达到额定角速度 ω_{rmN} 所需时间。即

$$T_N = \frac{J \omega_{rmN}}{T_{eN}} \quad (1-13)$$

② 功率变化速度 $Q_N(W/s)$ 是指当电机以额定输出转矩 T_{eN} 加速时,电机输出功率的增加速度。即

$$Q_N = \frac{P_N}{T_N} = \frac{T_{eN}^2}{J} \quad (1-14)$$

式中, P_N 为电机的额定输出功率。



系统刚性 K 和黏性系数 D 的推导:

当电流环的闭环传递函数为 1 时, 系统框图 1-5 将变成如图 1-6 所示。再把负载转矩 T_L 当作输入、把位置信息 θ_{rm} 当作输出时, 系统框图 1-6 会变成如图 1-7 所示。其输入输出之间的传递函数如下

$$\frac{\theta_{rm}}{T_L} = -\frac{1}{Js^2 + K_T K_\omega s + K_T K_\omega K_\theta} = -\frac{1}{Js^2 + Ds + K} \quad (1-15)$$

式中, 分母的第二项表示黏性系数 D , 第三项表示系统刚性 K 。

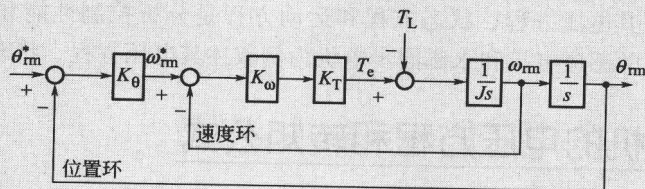


图 1-6 电流环的闭环传递函数为 1 时的电机控制系统框图

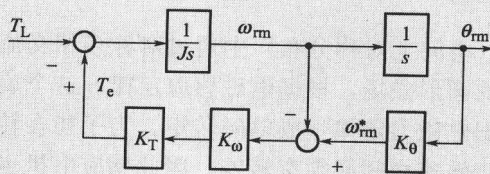


图 1-7 输入、输出分别为负载转矩、位置信息时的系统框图

第2章

交流电机的电压方程和状态方程

要控制好电机，其电压方程、状态方程和运动方程是分析控制性能和导出控制方式的基础。本章主要以常用的感应电机和永磁同步电机为例叙述其电压方程、状态方程和运动方程。

2.1 感应电机的电压方程和转矩公式

2.1.1 结构

感应电机在定子绕组（空间上对称分布）中通过对称多相交流电流时，在定转子之间气隙中产生以同步转速旋转的圆形磁场，根据电磁感应定律，这个旋转磁场将在转子绕组中产生感应电势和电流，并根据电磁力定律生成电磁转矩。为了能在转子绕组中感应出电势和电流，感应电机的转速与同步转速之间必须有转差。因此感应电机也被称为异步电机。

同步转速可由以下公式确定

$$n_s = \frac{60f}{p} (\text{r/min}) \quad (2-1)$$

式中， f 为定子绕组中通过的多相交流电流的频率，Hz； p 为感应电机的极对数。从式(2-1)可看出，如果能够改变频率 f ，就能改变气隙磁场的同步转速，进而可以改变感应电机的转速。

感应电机由定子（一次侧）、转子（二次侧）和气隙组成，其结构如图 2-1 所示。按转子结构的不同，感应电机分为笼型感应电机和绕线型感应电机。这两种电机的定子结构相同，主要由定子铁芯、定子绕组和机座构成。笼型感应电机的转子一般在转子铁芯的槽内埋入铝等导条，并由短路环把所有导条短接，如图 2-1(a) 所示。绕线型感应电机的转子在转子铁芯中嵌入多相绕组，其转子铁芯的形状和绕组连接方式与定子相似。不同的是为了能连接外部电路，绕组的出线端都连到转轴上的集电环后，通过电刷引出，如图 2-1(b) 所示。

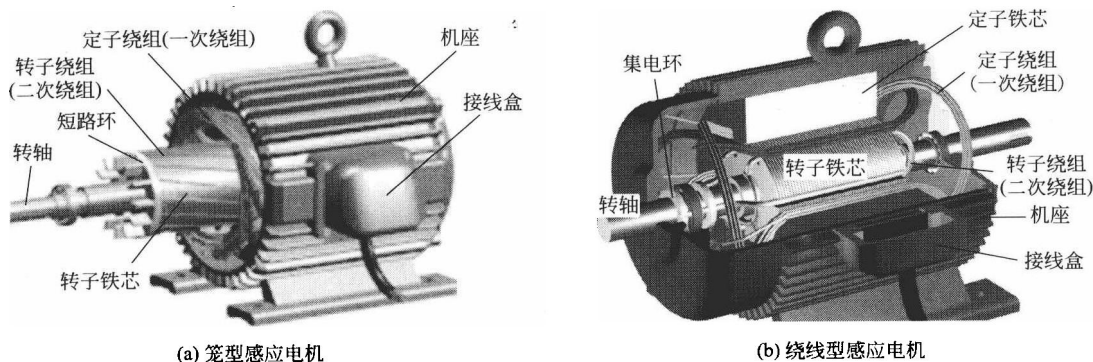


图 2-1 感应电机结构

在感应电机中,定转子之间的气隙是均匀的,即定子内表面到转子外表面间的气隙中,沿圆周方向任意点处的气隙磁阻都相等。一般常用的是三相笼型感应电机。

2.1.2 用三相交流变量表示的电压方程

图 2-2 为三相笼型感应电机的等效模型。图中为了分析方便,每相绕组画到各自绕组轴线位置上。这时,从这个等效模型可得到如式(2-2)所示的电压方程式。

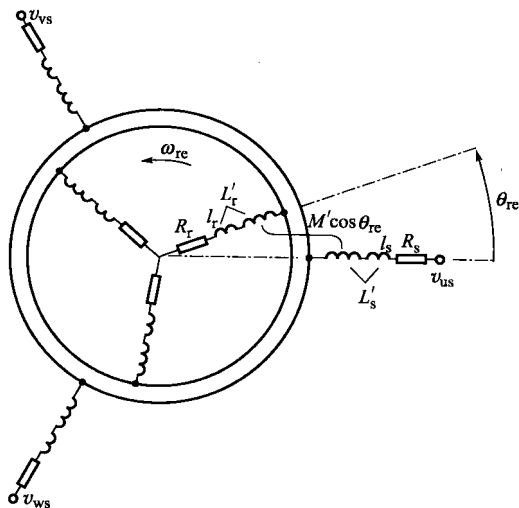


图 2-2 三相笼型感应电机的等效模型

$$\begin{bmatrix} v_{us} \\ v_{vs} \\ v_{ws} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + PL'_s & -P \frac{M'}{2} & -P \frac{M'}{2} & PM' \cos \theta_{re} & PM' \cos \left(\theta_{re} - \frac{2}{3} \pi \right) & PM' \cos \left(\theta_{re} + \frac{2}{3} \pi \right) \\ -P \frac{M'}{2} & R_s + PL'_s & -P \frac{M'}{2} & PM' \cos \left(\theta_{re} + \frac{2}{3} \pi \right) & PM' \cos \theta_{re} & PM' \cos \left(\theta_{re} - \frac{2}{3} \pi \right) \\ -P \frac{M'}{2} & -P \frac{M'}{2} & R_s + PL'_s & PM' \cos \left(\theta_{re} - \frac{2}{3} \pi \right) & PM' \cos \left(\theta_{re} + \frac{2}{3} \pi \right) & PM' \cos \theta_{re} \\ PM' \cos \theta_{re} & PM' \cos \left(\theta_{re} + \frac{2}{3} \pi \right) & PM' \cos \left(\theta_{re} - \frac{2}{3} \pi \right) & R_r + PL'_r & -P \frac{M'}{2} & -P \frac{M'}{2} \\ PM' \cos \left(\theta_{re} - \frac{2}{3} \pi \right) & PM' \cos \theta_{re} & PM' \cos \left(\theta_{re} + \frac{2}{3} \pi \right) & -P \frac{M'}{2} & R_r + PL'_r & -P \frac{M'}{2} \\ PM' \cos \left(\theta_{re} + \frac{2}{3} \pi \right) & PM' \cos \left(\theta_{re} - \frac{2}{3} \pi \right) & PM' \cos \theta_{re} & -P \frac{M'}{2} & -P \frac{M'}{2} & R_r + PL'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{us} \\ i_{vs} \\ i_{ws} \\ i_{ur} \\ i_{vr} \\ i_{wr} \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

式中, v_{us}, v_{vs}, v_{ws} 为 u, v, w 相定子电压; i_{us}, i_{vs}, i_{ws} 为 u, v, w 相定子电流; i_{ur}, i_{vr}, i_{wr} 为 u, v, w 相转子电流; R_s 为定子绕组电阻; R_r 为转子绕组电阻; L'_s 为定子绕组的自感; L'_r 为转子绕组的自感; M' 为各相绕组间的互感, 是两绕组轴线正好重合时的值; θ_{re} 为以定子 u 相绕组轴线为基准, 按电机旋转方向 (图中为逆时针) 取的转子 u 相绕组轴线的位置角 (单位为电角度); P 为微分因子 (d/dt)。

此外, 把笼型感应电机的转子表示成三相形式是为了方便分析和计算。笼型感应电机转子的实际相数与转子的槽数和极对数有关, 其关系式如下

$$m_r = \frac{z_r}{p} \quad (2-3)$$

式中, m_r 为转子实际相数; z_r 为转子槽数。

因此, 对于笼型感应电机, 图 2-2 和式 (2-2) 中的转子参数为把实际 m_r 相的转子绕组等效变换成三相绕组后的值。

再有, 定、转子绕组的电感中, 各含有漏感 l_s, l_r 。自感、互感和漏感之间的关系式如下

$$L'_s = M' + l_s, \quad L'_r = M' + l_r \quad (2-4)$$

还有, 当电机转子的旋转角速度 (单位为电角度/秒) 用 ω_{re} 表示时, 转子位置角 θ_{re} 为

$$\theta_{re} = \int \omega_{re} dt \quad (2-5)$$

其中, 用电角度表示的电机转速 ω_{re} 和用机械角度表示的电机转速 ω_{rm} 之间的关系为

$$\omega_{re} = p\omega_{rm} \quad (2-6)$$

2.1.3 坐标变换

当需要分析控制性能和导出控制方法时, 电压方程采用两相交流变量表示比采用三相交流变量表示更简单。同理, 采用两轴直流变量表示又比两相交流变量表示更简单。而如果电机的电压方程要改变其表示变量, 则需要改变电机的参考坐标系, 即需要进行坐标变换。如上一小节中, 用三相交流表示的电压方程的参考坐标系是其定子部分方程为三相静止坐标系 (交流变量)、转子部分方程为以电机转速 ω_{re} 的速度旋转的三相旋转坐标系 (交流变量), 而这定、转子部分的坐标系都以定子 u 相绕组轴线为位置基准轴。这时, 可通过坐标变换, 把电压方程中定、转子部分的坐标系分别改为两相静止坐标系 (交流变量)、两相旋转坐标系 (交流变量) 或定、转子部分的坐标系都改为同一个两相静止坐标系 (交流变量) 或定、转子部分的坐标系都改为同一个两相旋转坐标系 (两轴直流变量) 等。

下面介绍坐标变换相关概念和求取变换矩阵的方法。

一般, 电机的电压方程式可用式 (2-7) 表示。

$$[v] = [z][i] + [e] \quad (2-7)$$

式中, $[v]$ 为电压矩阵, $[i]$ 为电流矩阵, $[z]$ 为阻抗矩阵, $[e]$ 为速度感应电势矩阵 (对于感应电机无此项)。这些矩阵的每一个元素都为实数。

假设, 从当前坐标系到目标坐标系之间的变换矩阵为 $[c]$, 则在目标坐标系下, 式 (2-7) 变为式 (2-8) 所示。

$$[c][v] = [c][z][c]^{-1}[c][i] + [c][e] \quad (2-8)$$

式中, $[c]^{-1}$ 为 $[c]$ 的逆矩阵, 即

$$[c]^{-1}[c] = [I] \quad (2-9)$$