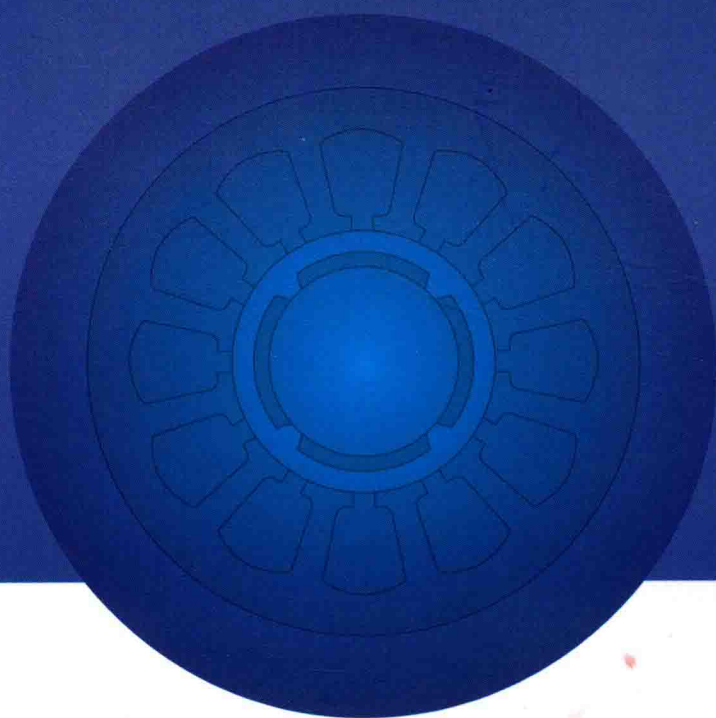


# 交流永磁电机 进给驱动伺服系统

赵希梅 编著



清华大学出版社

# 交流永磁电机 进给驱动伺服系统

赵希梅 编著



清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书全面系统地阐述了现代数控机床最新采用的交流永磁同步电动机(PMSM 和 PMLSM)进给驱动伺服系统。第1~6章概括介绍了伺服系统的一些基本概念,系统的结构、组成及分类,重点介绍了PMSM本体的基本结构、系统的工作原理、各主要环节的设计等相关内容。第7章指出了PMSM(PMLSM)伺服系统有别于其他类系统的一些特殊问题。第8章对PMSM电气闭环伺服系统的稳定性与快速性进行了时域和频域分析,并对三阶和多轴系统增益进行了性能设计,继而对其相连接的机械传动部件的特性作了相应介绍。第9章介绍了新一代PC数控系统,其中包括数控加工轨迹的插补原理及方法;着重介绍了实现轨迹控制原理及方法;以及在高速高精度轨迹控制中的高级方法,如前瞻控制、jerk限制等。在附录中,初步介绍了jerk的力学定义及在国内外的研发、应用情况。

本书可作为高等院校电气工程、自动化、电力电子与电力传动、机械工程等专业的研究生和高年级本科生的教学用书或参考书,也特别适合从事电机驱动控制、数控等工程技术人员研发设计时参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

交流永磁电机进给驱动伺服系统/赵希梅编著. —北京:清华大学出版社,2017  
ISBN 978-7-302-48793-7

I. ①交… II. ①赵… III. ①永磁式电机—交流电机—伺服系统 IV. ①TM351.12

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第272623号

责任编辑:冯 昕  
封面设计:傅瑞学  
责任校对:刘玉霞  
责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:北京泽宇印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:14

字 数:340千字

版 次:2017年11月第1版

印 次:2017年11月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:42.00元

产品编号:077154-01

# 前言

## FOREWORD

现代数控机床是集当今各个领域高新技术于一体的工作母机,它是一个国家综合国力的衡量与象征,成为国家的一项重要战略物资。而其中的进给驱动伺服系统又是数控机床关键的组成部分之一,它对数控机床的加工精度、生产效率具有决定性的影响。而且它本身也涉及许多技术领域,虽经过半个多世纪的发展、几代的更替,但在理论上和实践方面仍有许多问题还在继续深入探讨中。本书结合当前国内外的相关文献,特别是书后所列参考文献[1-6],根据作者本人在教学与科研活动中的经验总结和学习体会,编写此书用于教学,并希望出版后与读者交流,提高本人的认识水平,能为中国早日成为制造强国作微薄贡献。

在当前,进给系统中所采用的电气执行元件虽有多种,并且各具特点,都找到了最适于其应用的场合,但综观当前与未来发展来看,唯有 PMSM(包括 PMLSM)以其优良的伺服性能而成为首选。

本书在选材上,首先注意到了进给驱动伺服系统的完整性。过去往往专注于进给系统电气驱动部分的讲述,而忽略了进给系统中的机械传动部件的特性分析、设计、选用以及对前级电气驱动部分的影响。本书学习了文献[1,3]的做法,完善了整个进给装置的电气驱动-机械传动过程的统一描述。其次,也是更重要的一点,在选材上特别注意内容的先进性与前瞻性。文献[2]站在当前 PC 数控系统最新发展的基础上,把数控加工原理的本质概括为“分解与合成”。本书讲述进给驱动系统,应该交代坐标运动控制系统位置指令的由来,不准备讨论各种插补算法,但对插补器的输出作为位置进给坐标运动系统的输入指令还是需要了解的。所以,本书对轨迹插补,特别是有关轨迹控制的原理、实现方法的相关内容以及提高轨迹精度的各种方法,特别是前瞻控制等高级控制方法、限制与控制 jerk 等都做了较详细的介绍。文献[4,15]对 PMSM 与 PMLSM 的具体结构、工作原理、齿槽及谐波扰动等问题做了详细介绍,文献[5,6,8,11-14]等所述相关内容对本书亦有很多的裨益,书后各篇重要刊物上发表的学术论文所提供的思想都对本书有很大的启发。在此,非常感谢国内著名的数控专家、学者、前辈们所出版的著作对本书所作出的贡献和沈阳机床集团专家们的鼓励和支持。

最后,感谢郭庆鼎教授对本书提出了许多宝贵的修改意见,纠正了许多失当之处,对此作者铭记在心。同时还要感谢赵久威硕士在查找资料、绘制图形、打字修改等诸多方面所给予的帮助。

由于本人水平有限,临近付梓之时,心绪难诉,深感“纸上得来终觉浅,绝知此事要躬行”。由于本人缺乏数控工程方面的实践,书中谬误之处在所难免,恳请各位专家、学者不吝赐教,也望诸位用书的读者指正。

作者

2017年7月于沈阳

# 目录

## CONTENTS

<b>第 1 章 伺服系统概述</b> .....	1
1.1 伺服系统的基本概念 .....	1
1.1.1 伺服系统的定义 .....	1
1.1.2 伺服系统发展回顾 .....	1
1.1.3 伺服系统的组成 .....	2
1.2 对伺服系统的基本要求 .....	2
1.2.1 稳定性好 .....	3
1.2.2 动态特性快速精准 .....	3
1.2.3 稳态特性平稳无差 .....	3
1.3 伺服系统的分类 .....	4
1.3.1 按调节理论分类 .....	4
1.3.2 按使用执行元件分类 .....	4
1.3.3 按系统信号特点分类 .....	5
1.3.4 按系统部件输入-输出特性不同分类 .....	5
1.4 伺服系统的发展历程 .....	5
1.5 交流伺服系统的组成 .....	6
1.5.1 交流伺服电动机 .....	7
1.5.2 功率放大变换器 .....	7
1.5.3 传感器 .....	7
1.5.4 控制器 .....	8
1.6 伺服系统的典型输入信号 .....	9
<b>第 2 章 旋转式永磁同步伺服电机(PMSM)控制系统</b> .....	12
2.1 旋转式永磁同步伺服电机控制系统的组成 .....	12
2.2 旋转式永磁同步伺服电机的结构与基本工作原理 .....	13
2.3 旋转式永磁同步伺服电机的数学模型 .....	14
2.3.1 为简化数学模型要做的一些假设 .....	14
2.3.2 定子电压方程 .....	14
2.3.3 转矩方程和运动方程 .....	17
2.3.4 状态方程 .....	18
2.4 旋转式永磁同步伺服电机矢量控制原理 .....	19

2.5	旋转式交流永磁同步电机矢量控制系统设计	20
2.5.1	状态方程与控制框图	20
2.5.2	解耦控制与坐标变换的实现	21
2.5.3	电流实现反馈线性化控制	23
2.5.4	速度控制器设计	25
2.5.5	位置控制器设计	29
<b>第3章</b>	<b>伺服驱动的负载机械特性</b>	<b>32</b>
3.1	旋转体的运动方程	32
3.2	负载的转矩特性	35
3.3	几种典型的非线性现象	37
3.3.1	现象分析	38
3.3.2	饱和现象研究	39
3.3.3	间隙现象的讨论	40
3.3.4	摩擦分析	42
3.4	机械谐振	43
3.5	机械刚度与伺服刚度	44
3.6	机械负载的折算与匹配	45
<b>第4章</b>	<b>永磁直线同步电动机(PMLSM)伺服系统</b>	<b>47</b>
4.1	直线电动机的发展和应用简述	47
4.2	永磁直线同步伺服电动机	48
4.2.1	直线电动机直接驱动实现“零传动”链	49
4.2.2	永磁直线同步电动机的基本结构	50
4.2.3	永磁直线同步电动机的基本工作原理	50
4.2.4	永磁直线同步电动机的端部效应	51
4.3	永磁直线同步电动机的齿槽定位力及其削弱	53
4.4	永磁直线同步电动机的纹波力及其削弱	54
4.5	直线电动机在机床上应用发展缓慢的原因分析	59
<b>第5章</b>	<b>交流伺服系统常用传感器</b>	<b>61</b>
5.1	概述	61
5.2	光电编码器	62
5.2.1	增量式光电编码器	63
5.2.2	绝对式光电编码器	65
5.2.3	混合式光电编码器	67
5.3	旋转变压器	68
5.4	光栅	73
5.4.1	直线式透射光栅	73
5.4.2	莫尔条纹式光栅	74
5.4.3	光栅检测装置	76
5.5	加速度传感器	78

5.6	电流传感器	80
<b>第 6 章</b>	<b>交流伺服系统的功率变换电路</b>	<b>82</b>
6.1	交流伺服系统功率变换主电路的构成	82
6.2	功率变换主电路的设计	84
6.2.1	整流电路的设计	84
6.2.2	滤波电路的设计	84
6.2.3	逆变电路的设计	85
6.2.4	缓冲电路的设计	86
6.2.5	制动电路的设计	89
6.3	PWM 控制技术	90
6.3.1	SPWM 控制技术	91
6.3.2	电流跟踪型 PWM 控制技术	95
<b>第 7 章</b>	<b>PMSM(PMLSM)伺服驱动系统若干特殊问题</b>	<b>99</b>
7.1	永磁同步电动机的 $d$ 、 $q$ 轴数学模型	99
7.1.1	永磁同步电动机的 $d$ 、 $q$ 轴基本数学模型	99
7.1.2	计及铁损时 PMSM 的 $d$ 、 $q$ 轴数学模型	100
7.2	关于转子磁极初始位置的检测	102
7.3	永磁同步伺服电动机的弱磁控制问题	104
7.4	正弦波永磁同步电动机的矢量控制方法	107
7.4.1	$i_d=0$ 控制	107
7.4.2	最大转矩电流比控制	108
7.4.3	最大转矩磁链比控制(最大转矩电动势比控制)	108
7.4.4	功率因数 $\cos\varphi=1$ 控制	109
7.4.5	最大效率控制	110
7.4.6	永磁同步电动机的参数与其输出极限	111
7.4.7	实际定子电流响应的延迟作用影响	112
<b>第 8 章</b>	<b>数控机床进给驱动伺服系统</b>	<b>114</b>
8.1	数控机床的坐标轴规定	114
8.2	对数控机床进给驱动伺服系统的要求	116
8.2.1	对进给驱动伺服系统的基本要求	116
8.2.2	数控机床进给驱动伺服系统的要求	117
8.3	进给驱动伺服系统的组成及其数学模型	118
8.4	进给驱动伺服系统的动态响应特性与伺服性能分析	119
8.4.1	时间响应特性	119
8.4.2	频率响应特性	123
8.4.3	稳定性分析	125
8.4.4	快速性分析	130
8.4.5	伺服精度与伺服刚度	135
8.5	进给驱动伺服系统的系统增益设计	136
8.5.1	一个三阶进给驱动伺服系统的系统增益设计	137

8.5.2	多轴系统的系统增益设计	138
8.6	电机驱动部件的设计	139
8.6.1	静态设计	139
8.6.2	动态设计	141
8.7	机械传动部件的设计	145
8.7.1	概述	145
8.7.2	机械传动部件的谐振频率	149
8.7.3	转动惯量	150
8.7.4	机械传动部件的刚度	151
8.7.5	阻尼比	154
8.7.6	机械传动部件中的非线性因素	155
8.7.7	工作台导轨	157
8.7.8	滚珠丝杠螺母传动装置	158
8.7.9	滚珠丝杠支承专用轴承的选用	163
<b>第9章</b>	<b>PC 数控的轨迹插补与控制原理及实现方法</b>	<b>166</b>
9.1	何谓 PC 数控	166
9.2	PC 控制加工过程的基本原理	166
9.2.1	PC 数控加工的基本概念	166
9.2.2	PC 数控加工的实现过程	167
9.3	PC 数控的轨迹插补原理	171
9.3.1	PC 数控轨迹插补的基本原理	171
9.3.2	PC 数控轨迹插补的基本方法	173
9.3.3	PC 数控的高速采样插补方法	178
9.3.4	PC 数控的柔性加减速控制方法	180
9.4	PC 数控的轨迹控制原理与方法	182
9.4.1	PC 数控轨迹控制的基本原理	183
9.4.2	PC 数控的连续运动控制	184
9.4.3	PC 数控的数字化连续运动控制	185
9.5	PC 数控提高轨迹精度的控制方法	194
9.5.1	什么是精密加工	194
9.5.2	进给轴跟随误差对轨迹精度的影响	195
9.5.3	高速 PC 数控的轨迹前瞻控制方法	200
9.5.4	从控制角度看提高合成轨迹精度的途径	204
9.5.5	轨迹误差增益匹配控制方法	207
9.5.6	轨迹误差交叉耦合控制方法	207
9.5.7	轨迹误差预测补偿控制方法	208
9.5.8	轨迹误差的仿真学习控制方法	209
<b>附录</b>	<b>加加速度 jerk 简介</b>	<b>212</b>
	<b>参考文献</b>	<b>214</b>



## 伺服系统概述

随着微电子技术、电力电子技术、计算机技术、自动控制技术、新材料技术和新工艺的不断进步,伺服技术的发展已经达到了相当高的水平。

伺服系统应用无所不在,遍及各个领域。例如,绕地飞行的卫星,地面飞驰的高铁与电动汽车,海上游弋的邮轮与舰艇,探索宇宙深处星体的天文射电望远镜巨型天线,工业上的数控机床与机器人,生活产品 DVD 影碟机,办公室自动化设备,等等。可以说,没有伺服系统,就没有现代化。

### 1.1 伺服系统的基本概念

#### 1.1.1 伺服系统的定义

在自动控制系统中,被控对象的输出量能够以一定的速度和足够的精度跟踪输入量的变化且复现输入量的系统,称为随动系统,亦叫伺服系统。被控制量可能是气体或液体的压力、流速、流量或温度等过程控制变量;但在大多数情况下,所指的伺服系统是指被控对象是机械(或机构)运动体的位置、速度、加速度乃至加加速度(jerk)的控制系统,这种由动力及传感器所组成的负反馈系统称为伺服机构,即伺服系统。

#### 1.1.2 伺服系统发展回顾

“伺服”一词是英文 Servo 的音译,它源于拉丁文 Servus,意为奴隶之意。众所周知,在奴隶社会中,奴隶必须无条件地服从主人的命令,从事繁重的体力劳动。从这里可以体会到“伺服”一词的寓意。后来,随着经济技术的发展,人们就把这个社会学中的名词引申到工程技术领域中,用于控制被驱使机械的运动。1866年,英国工程师罗伯特·怀特黑德(Robert Whitehead)发明了鱼雷,第一次用压缩空气做动力驱动鱼雷在水下运动,并击中水上目标。1868年,法国工程师法尔科(J. Farcot)发明了反馈调节器,并把它与蒸汽机阀连接起来,操作蒸汽船的船舵,并称之为伺服机构(servo-mechanism)。在总结前人的经验基础上,美国黑曾(H. Hazen)于1934年发表了《关于伺服机构理论》的论文,促进了经典控制理论的诞生。

第二次世界大战后不久,美国空军面临着研发飞机的任务,委托巴森兹公司与麻省理工

学院(MIT)的伺服机构研究所,在1951年研发出三坐标数控铣床,用于加工复杂的飞机叶片。

1952年巴森兹公司的福雷斯特(J. W. Forrester)等4人向美国专利局申请了“数控伺服机构”的专利,历经10年的考核,终于在1962年得到批准,这件事震动了当时国内外的数控界。“伺服机构”专利重要性由此可见一斑。

此后,由于经济发展和国防、空间技术的需要,伺服技术得到突飞猛进的发展,新产品层出不穷,理论越来越成熟,尤其是日本和德国在数控机床方面的制造和应用达到了国际领先水平。

### 1.1.3 伺服系统的组成

伺服系统有各种应用场合,其系统的组成环节各异。但是伺服系统作为一种自动控制系统,都有大致相同的结构和组成环节,如图1-1所示,它表示的是一般化的伺服控制系统的各功能环节及其组成的系统原理图。

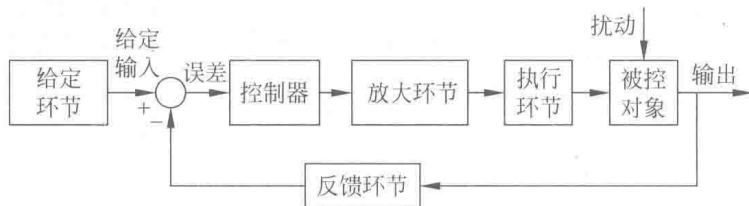


图 1-1 伺服系统的一般结构

- (1) 给定环节：产生给定的输入信号；
- (2) 反馈环节：对系统输出(被控制量)进行测量,将它转换成反馈信号；
- (3) 比较环节：将给定的输入信号与反馈信号加以比较,产生误差信号,常以○表示；
- (4) 控制器(调节器)：根据误差信号,按一定规律,产生相应的控制信号,控制器是自动控制系统实现控制的核心部分；
- (5) 放大环节：控制器输出的控制信号能量不足以直接激励执行环节动作,放大环节可经由能源提供出足够的功率；
- (6) 执行环节(执行机构)：控制信号获得功率放大后,激励被控对象使其被控量产生变化；
- (7) 被控对象：控制系统所要控制的设备或生产过程,它的输出就是被控量；
- (8) 扰动：除给定输入信号外,能使被控量偏离给定输入信号所要求值或规律的来自系统内部或外部的一种与给定输入信号要求相左的物理量。

## 1.2 对伺服系统的基本要求

一般来说,可根据各种形式的被控变量,例如蒸汽流量、液面的高度或温度等变量构成伺服系统;但实际上,在绝大多数情况下,非常重要的伺服机构都是机电式的,因为伺服机构的重要目的是用电动机和齿轮箱(机械变速箱)来确定受控物体的位置,所以伺服机构就是伺服系统,又称为随动系统。大多数书中所称的伺服系统多是针对这种伺服系统而言的。

各类伺服系统广泛应用于工业、国防武器、空间技术和科学实验中。由于被控对象不同,工作要求不同,对伺服的具体要求也千差万别,要针对具体情况,具体对待。但是,对伺服来讲,普遍存在着一些共同的要求。为了说明这些普遍的要求,需要充分认识伺服系统的输入输出过程。

### 1.2.1 稳定性好

稳定是指伺服系统在给定输入或外界干扰作用下,经由短暂调节过程后,系统的输出量到达一个新的或者恢复到原来的平衡状态。

实际系统中存在电感与电容,而电感中的电流、电容上的电压不能跃变;运动体存在机械质量,而有较大的机械惯性;电源所能提供的功率也是有限的。由于系统存在这样的电磁和机械惯性,在有限的功率驱动下,输出量在给定信号或干扰信号作用之后不可能瞬间达到给定信号的期望值,抑制干扰信号也需要经过一个短暂的调节过程,才能使输出达到新的或恢复到原来的平衡状态,这一动态过程亦叫过渡过程或动态特性。被控量的动态过程较全面地反映出系统的控制品质。图 1-2 表示系统几种输出信号的动态过程曲线。

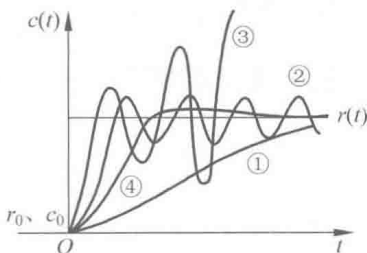


图 1-2 系统的动态过程

由上述分析可知,稳定性反映了动态过程的振荡倾向和系统重新恢复平衡工作状态的能力。

如果系统受到扰动后偏离了原工作状态,而控制装置再也不能使系统恢复到原状态,并且越来越偏离原状态,或当指令改变时,控制装置再也无法使被控对象跟踪指令运行,并且误差越来越大,如图 1-2 中的过程③所示,这样的系统就称为不稳定系统。不稳定系统完全由该系统的结构和参数所决定,是系统的本质特性,与外界输入信号无关。系统稳定是系统工作的前提条件。不但要求控制系统稳定,而且要求系统具有一定的稳定裕量,即相当的抗扰动能力或称鲁棒性。

### 1.2.2 动态特性快速精准

动态特性反应在动态过程中,对给定信号的响应,要快速并且振荡强弱有度,上升平稳均匀。如果过程持续时间长,将使系统长久地出现较大偏差,也说明了系统响应迟钝,难以复现快速变化的指令信号,如图 1-2 的过程①所示。

稳定性和快速性的性能要求,在过渡过程中往往是矛盾的,要求既快又稳,则被控制量与给定量的偏差小,偏差存在的时间短,即系统的动态精度高,如图 1-2 中的过程④所示。

### 1.2.3 稳态特性平稳无差

跟随给定信号的过渡过程的结束到达一个新的平衡状态后,或者系统受扰动重新恢复平衡之后,最终保持的精度,反映了动态过程结束后的稳态特性。对稳态特性的要求主要是被控量与给定量的偏差越小越好,理想情况下偏差为零。

由于控制对象与控制目的不同,因而对系统的动态特性、稳态特性要求也不相同。例如,随动系统主要用于跟踪控制,对快速性要求相对较高,而对机器人控制系统则不允许产

生振荡而又要求有较高的轨迹控制精度；对数控机床驱动，则要动、静态误差更小，精度更高。

对于同一个伺服系统，要求它首先要具有较充分的稳定性、动态特性和稳态特性。快、稳、准三个要求是相互制约的，往往产生矛盾。如提高快速性，将导致系统的振荡增强；改善系统的相对稳定性，就可能使系统反应迟钝，延长动态过程；提高稳态精度，就可能引起系统动态性能改变（过渡过程时间及振荡性甚至导致不稳定）。在具体设计时，要满足控制对象的主要要求，兼顾其他性能，折中处理，但首先要确保系统是稳定的。

## 1.3 伺服系统的分类

伺服系统可按不同原则进行分类。

### 1.3.1 按调节理论分类

#### 1) 开环伺服系统

这是一种简单的伺服系统，没有被控系统输出量的检测与反馈。最典型的开环系统就是执行元件采用步进电动机的伺服系统。这种系统的信息流是单方向指向的，每给一个脉冲信号，步进电动机就转动一个角度，而这个旋转角度值不再反馈到输入端，即输出量不参与输入端对系统的控制。开环伺服系统因其结构简易、成本低廉的特点，应用领域广阔。

#### 2) 闭环伺服系统

闭环伺服系统具有输出量的检测装置，把输出量检测后反馈到系统的输入端，与输入信号进行比较，得到差值，经过放大和变换后驱动执行元件向减小误差的方向变化，直到误差等于零为止。在这类系统中，控制信号不但由给定信号决定，而且也由最终输出信号参与控制，这样就共同决定了最终的输出量，精度显著提高。但也应该看到，如果闭环系统内各个环节的参数匹配不好，将会引起系统振荡，甚至使稳定性受到破坏。一般来说，闭环伺服系统控制性能好，但调试复杂，成本相对也高，适用于高性能要求的应用场合。

#### 3) 半闭环伺服系统

半闭环系统主要用在系统最终输出量不易测量的场合。而选择在最终输出量之前的某一个适当的位置上取得反馈信号，但要求这个反馈信号与最终的输出信号间具有简单的对应关系。与开环系统相比，它具有反馈通道，提高了伺服系统的性能。半闭环系统也存在着稳定性问题，因为它本质上也是一个闭环的系统，只是没有在系统最终的输出量上取负反馈而构成闭环。这类系统的性能介于开环和闭环系统之间。性能没有闭环系统高，调试却比闭环系统方便，因而广泛应用。

半闭环伺服系统不能补偿半闭环点到最终输出量处之间的传递误差，这段是开环的，未被闭环所包围。

### 1.3.2 按使用执行元件分类

在伺服技术发展的不同时期，先后出现了不同的伺服系统。

(1) 气压伺服系统：最初以压缩空气为动力推动水中负载（鱼雷螺旋桨）。

(2) 电-气伺服系统：系统的误差检测与前级放大部分用的是电气技术，而执行元件是气动的。

(3) 电液伺服系统: 系统的误差测量与前级放大部分是电气的, 而系统的功率放大与执行元件是液压的。

(4) 液压伺服系统: 系统的误差测量与放大执行全是由液压元件完成的系统。

(5) 电动伺服系统: 组成系统的元件除了机械部件外, 均是电磁电子元件, 而执行元件是各种类型的电动机。根据执行元件所采用的电机类别又可分为直流伺服系统和交流伺服系统。

① 直流伺服系统的执行元件为直流伺服电动机或无刷直流伺服电动机。

② 交流伺服系统的执行元件为各种交流伺服电动机, 其中又细分为感应电机交流伺服系统和同步电机交流伺服系统, 按电机的运动型式又可分为由旋转型执行元件和直线运动型执行元件所构成的交流伺服系统。当今性能最好、应用最广的执行元件是交流永磁同步电动机和交流永磁直线同步电动机, 本书将主要对由这两种型式的执行元件构成的伺服系统做详细介绍。

### 1.3.3 按系统信号特点分类

(1) 连续伺服系统: 系统传递的电信号都是时间的连续函数, 而不是离散的, 称该系统为连续伺服系统。

(2) 数字伺服系统: 系统中至少有一处传递的电信号是时间断续的、离散的脉冲数字信号, 则称为数字伺服系统, 又称为采样系统或离散伺服系统。

### 1.3.4 按系统部件输入-输出特性不同分类

(1) 线性伺服系统: 系统各部件的输入-输出特性在正常的工作范围内是线性关系。描述这种系统运动的微分方程是线性微分方程, 如方程的系数是常数, 则称为定常线性伺服系统, 如系数不是常数而是时间的函数, 则称为变系数线性伺服系统。

(2) 非线性伺服系统: 系统中含有输入-输出特性的是非线性部件, 描述这种系统特性是非线性微分方程, 对非线性系统的处理比较困难。

严格地讲, 任何实际的伺服系统都具有一定非线性因素存在, 因为该系统的元部件总是存在一定的死区和饱和现象。

## 1.4 伺服系统的发展历程

伺服系统的发展经历了由液压到电动的过程。电动伺服系统的发展与伺服电动机的发展密不可分, 作为执行元件的伺服电动机在很大程度上决定了整个伺服系统的性能优劣, 因为整个伺服系统的电磁惯性与机械惯性主要由伺服电机所决定。伺服电机至今已有半个多世纪的发展历史, 主要经历了三个阶段。

### 1) 第一阶段(20世纪60年代之前)

这个阶段是以步进电机驱动的液压伺服马达或以功率步进电动机直接驱动为中心的步进电机时代, 是液压伺服系统的全盛时期。整个系统为开环系统。液压伺服系统具有巨大的扭矩, 控制简单, 可靠性高, 在整个速度范围内保持恒转矩输出, 主要应用在重型设备和一些关键设备场合。它的主要缺点是需要清洁的液压源, 易污染环境, 效率低, 维护麻烦。

## 2) 第二阶段(20 世纪 60—70 年代)

这一时期是直流伺服电机诞生到全盛的发展时代。由于直流电动机具有十分优良的调速性能,特别是大惯量直流电动机在很多高性能的驱动装置中都有应用,从发展主流上看,整个伺服系统也由步进电机的开环控制转变成直流伺服电机闭环控制系统。但是,直流伺服电动机存在机械换向器,使其结构复杂,维护工作麻烦,重载高速运行时整流器容易产生火花,在工作中转子也容易发热,影响到与之相连接的机械设备的精度,难以应用在高速大容量场合。虽几经努力改进,但最终机械整流器的缺点扼住了其发展与应用势头,难逃被淘汰的命运。

## 3) 第三阶段(20 世纪 80 年代至今)

由于伺服电机结构及永磁材料、半导体功率器件技术、控制技术的发展,出现了无刷直流伺服电机(方波电流驱动)、交流伺服电动机(正弦波电流驱动)、矢量控制感应电机、永磁同步电机等新型驱动形式。尤其 80 年代以后,矢量控制技术更加成熟,极大地推动了交流伺服驱动技术的发展,达到了使交流伺服系统的性能与直流伺服系统相媲美的水平,有的性能指标,甚至前者超过了后者。交流电机克服了直流电机的固有缺点——需要机械换向器和电刷,具有强的过载能力,而转动惯量又大为降低,为伺服系统性能的提高创造了前提。

# 1.5 交流伺服系统的组成

交流伺服系统构成原理图如图 1-3 所示。

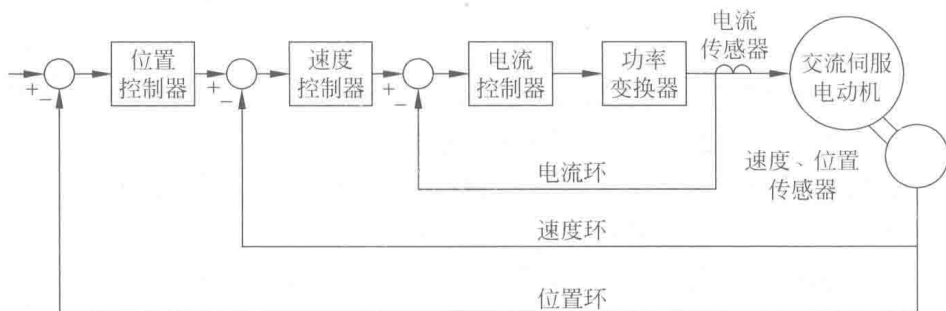


图 1-3 交流伺服系统原理图

该系统的组成有执行元件交流伺服电动机,功率变换器,电流、速度、位置传感器与相应的位置、速度、电流控制器以及它们组成的控制三个变量的三个闭环。系统的控制作用简述如下:

电流环与速度环为内环(局部环)、位置环为外环(主环)。其中,电流环的作用是使流过电机绕组的交流电流实时、准确地在幅值、频率和相位上跟踪电流指令,限制电枢电流以免其在动态过程中超过允许的最大值,使系统具有所允许的恒定的最大加(减)速转矩,尽量提高系统的快速性。速度环的作用是尽量按速度给定指令的速度运动,增强系统抗负载扰动能力,抑制运行速度波动,以要求的速度尽早到达指令位置。

位置环的作用是保证系统位置静态精度和动态跟踪性能,这也是采用位置环最直接的目的。

### 1.5.1 交流伺服电动机

交流伺服电动机分为三相永磁同步电动机(PMSM)和三相感应电动机(IM)。其中在伺服系统中性能最好、应用最广的是正弦电流控制型的三相永磁同步伺服电动机。

这两种交流伺服电动机的特点如下。

#### 1. 永磁同步型交流伺服电动机

(1) 正弦波电流控制型转矩脉动小,低速运行平稳,但控制上稍为复杂一点;而方波电流型控制上简单,但输出力矩较正弦波电流型的稍大,转矩波动也较大,在低速时表现尤甚。

(2) 采用稀土永磁体励磁,提高了功率密度。

(3) 采用电子换向,不需要维护,散热好,惯量小,能对电流相位进行精细调节,形成了良好的正弦性。

(4) 弱磁控制困难,不易实现恒功率运行。

(5) 要防止定子绕组电流过大,可能导致转子永磁体失磁。

#### 2. 感应型交流伺服电动机

(1) 采用磁场定向控制,可得到类似于直流伺服电动机的控制效果。

(2) 需要无功励磁电流,增加了电机的损耗。

(3) 较容易实现弱磁控制,适合高速及恒功率负载驱动。

(4) 结构简单、坚固、价格低廉、适应大功率应用。

(5) 控制技术复杂,转子参数易受温升影响。

### 1.5.2 功率放大变换器

交流伺服系统功率放大变换器的主要功能作用是为伺服系统提供足够的动力以驱动机械负载按所要求的规律运动。首先要通过由功率二极管组成的三相桥式整流器将电网的三相50Hz交流电转换为直流电。为保证整流器件安全和输出电压平稳,需要加设缓冲电路,以抑制尖峰电压与电流。在直流电压输出端,连接滤波电容和电阻及相应的开关,以获得稳定平稳的直流电压。功率放大变换器的主电路包括逆变电路和大功率开关管驱动电路。

逆变电路的功能是将稳定平滑的直流电转变成幅值、频率及相位均可调控的三相交流电,输送到电动机的定子绕组中。对逆变电路而言,必须有运算电路、PWM发生电路、检测信号电路、保护电路等,用于对功率主电路实行控制及安全保护。逆变部分是功率放大变换器的核心部分。

大功率开关管驱动电路直接与开关逆变电路相连,是弱电与强电间连接的桥梁,其性能优劣对安全逆变至关重要。

如果为了减小这部分主电路的体积,对于小功率的应用场合,可以采用智能功率模块,它集成了逆变元件、驱动器及相应的保护电路等部分。

### 1.5.3 传感器

在交流伺服系统中,要求对交流伺服电动机定子绕组电流以及对转子的运动速度与位置信号进行实时检测。经过信号变换后,构成电流环、速度环与位置环,必须有相应的传感器及其信号变换电路。电流传感器通常采用主电路纯电阻隔离检测式或者霍尔电流传感器。构成电流闭环的方法有两种:一种是用检测出的交流电流直接反馈组成闭环;另一种

是把三相交流电流通过坐标变换方法变换成正交双轴上的电流矢量之后再闭环。

速度和位置的检测可以通过采用增量式(或绝对式)光电编码器和无刷旋转变压器来实现。

### 1.5.4 控制器

交流伺服系统在不同的应用场合,对控制性能有不同的要求,因而,在实际应用中,交流伺服电动机有不同的控制形式。从被控制量来说主要有转矩控制/电流控制、速度控制和位置控制。

#### 1. 转矩控制/电流控制与电流控制器

有些负载,例如螺栓拧紧机构,只要求电机提供必要的紧固力,并根据所需紧固力的大小来决定伺服电机的转矩和转矩限制,而对伺服电机的速度和位置没有要求。在这种场合,就应该采用转矩/电流控制形式。此外在伺服电机系统中,电机永磁转子的磁极位置由轴上的位置传感器测量出来,并以此信号作为定子电流控制的依据(即作为参考方向),从而实现磁场和电流的正交控制。在这种情况下,交流伺服电动机所产生的电磁转矩与电枢电流成正比,故转矩控制实际上也就是电流控制。实现这种控制的单元,就称为电流控制器。

电流控制器的作用就是控制绕组电流,是三环控制系统的最内环。对其外环的速度控制抑或位置控制,它都是至关重要的环节,因为无论是速度控制抑或位置控制,最终都得转换为先控制电流,而后逐次实现对速度和位置的控制。因此,要求电流控制器适应电流变化快速的特点,既能满足电流指令在形式上的要求,又要简易便于实现,确保电力半导体器件的安全。

对电流控制器,要求绕组电流安全、实时、快速、准确地跟踪指令电流的变化,精确地控制电磁转矩。该控制器通常用PI控制规律,也可以采用滞环控制方式。小时间常数是该控制器的特点。

#### 2. 速度控制与速度控制器

速度控制器的作用是保证电机的转速和速度指令值相一致,消除负载扰动等因素对电机速度的影响。速度指令值与电机的速度反馈相比较,其差值通过速度控制器直接产生电枢电流指令,控制电机的加减速。就控制规律而言,该控制器一般是PI方式,也可以采用其他控制方式。速度控制器具有较大时间常数,它主要反映了电机转子和轴上机械负载的惯性,但对电磁惯性也有一定的反映,它的时间过程要比电流控制器慢得多。

#### 3. 位置控制与位置控制器

位置控制器是利用其输出作为伺服电机的速度指令,并使电机带动负载准确跟踪复现位置指令变化规律,或精确定位在某一位置上。利用位置大偏差产生最大速度指令,使电机以最大加速度加速到最大速度后,以该速度恒速运行;在位置小偏差区域,便产生逐渐递减的速度指令,使电机减速运行,直至最终定位。在许多应用场合,为避免出现位置超调,位置控制器通常设计成单纯的比例(P)型控制器。为提高位置稳态精度,希望位置控制器具有较高的增益,但过高的增益也容易引起不稳定,这是应该注意的。另外,有时为了实现对位置的及时跟踪,位置控制还可以增设前馈控制环节。位置控制器虽然用比例控制器,但由于位置是速度的积累过程,所以位置是受到速度控制器制约的。由此可见,要想得到优良的外环控制,必须首先做好内环控制。



图 1-1 表示了伺服系统的一般结构方框图,图 1-3 表示的是以交流伺服电动机为执行元件的交流伺服系统原理图,比图 1-1 中所指的内容具体了很多,而图 1-4 则是包括数控机床的机械传动部件在内的整个进给驱动的伺服系统结构的方框图。总的看来,在前述图 1-1 和图 1-3 的基础上,伺服电机的输出轴端与其相配套的机械传动部件相连,从而驱动切削刀具运动或工件运动。

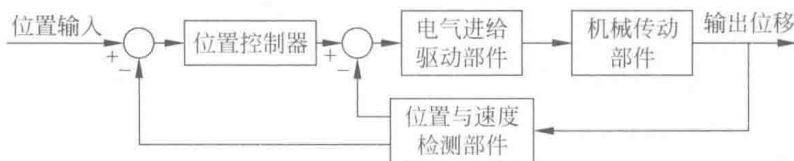


图 1-4 数控机床的进给驱动伺服系统结构方框图

由图 1-4 可知,该系统装置的任务就是把位置输入控制指令转换成数控机床刀架或工件滑板的直线移动或旋转运动。伺服电机轴输出的是旋转运动,正是机械传动部件把伺服电机轴旋转运动变成工具或工件的移动或旋转运动。这个过程的运动一般都是降速的,因而在变换运动形式的同时,力矩或力是增大的。常用的机械传动部件包括引导和支承执行部件的导轨、丝杠螺母副、齿轮齿条副、蜗杆蜗轮副、同步齿形带等,但其中应用最多的还是滚珠丝杠副。

## 1.6 伺服系统的典型输入信号

首先阐述为什么要研究典型测试信号:

(1) 实际伺服系统在工作中,可能遇到各种不同的输入信号,而这些信号的变化规律完全是不确定的,往往不可能以解析方法表达。例如,火炮跟随系统在跟踪打击目标敌机的过程中,火炮操作者根本不可能事先确定飞机的飞行轨迹,火炮伺服系统的输入信号就是一个变化多端的复杂未知信号。

(2) 另外,伺服系统的性能不但与被控对象的特性相关,同时也与输入信号有关。输入信号通过对象与控制器组成的闭环系统得到输出被控量,研究输入信号的形式是很重要的。

(3) 在选择控制方案、设计与分析各种伺服控制系统的性能时,需要相互对比其性能优劣,这就需要有一个比较的基准作为参考,而且根据伺服控制对象的需要,选择同一类型的输入信号才能作出比较与判断。

(4) 实际的输入信号往往是一种或多种典型信号的组合。典型信号是可以解析方法表达的时间函数,尽管与实际输入信号有一定的差别,但在输出性能的主要方面可以得到与实际系统相一致的结果。

综合各方面的情况来看,研究典型的输入信号,并以此作为测试信号是特别有意义的。典型的输入信号有如下几种。

1) 阶跃输入函数(step input function)

阶跃信号表示输入量的一种瞬变,如图 1-5 所示。其数学表达式为

$$r(t) = R \cdot u(t) = \begin{cases} R, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$$