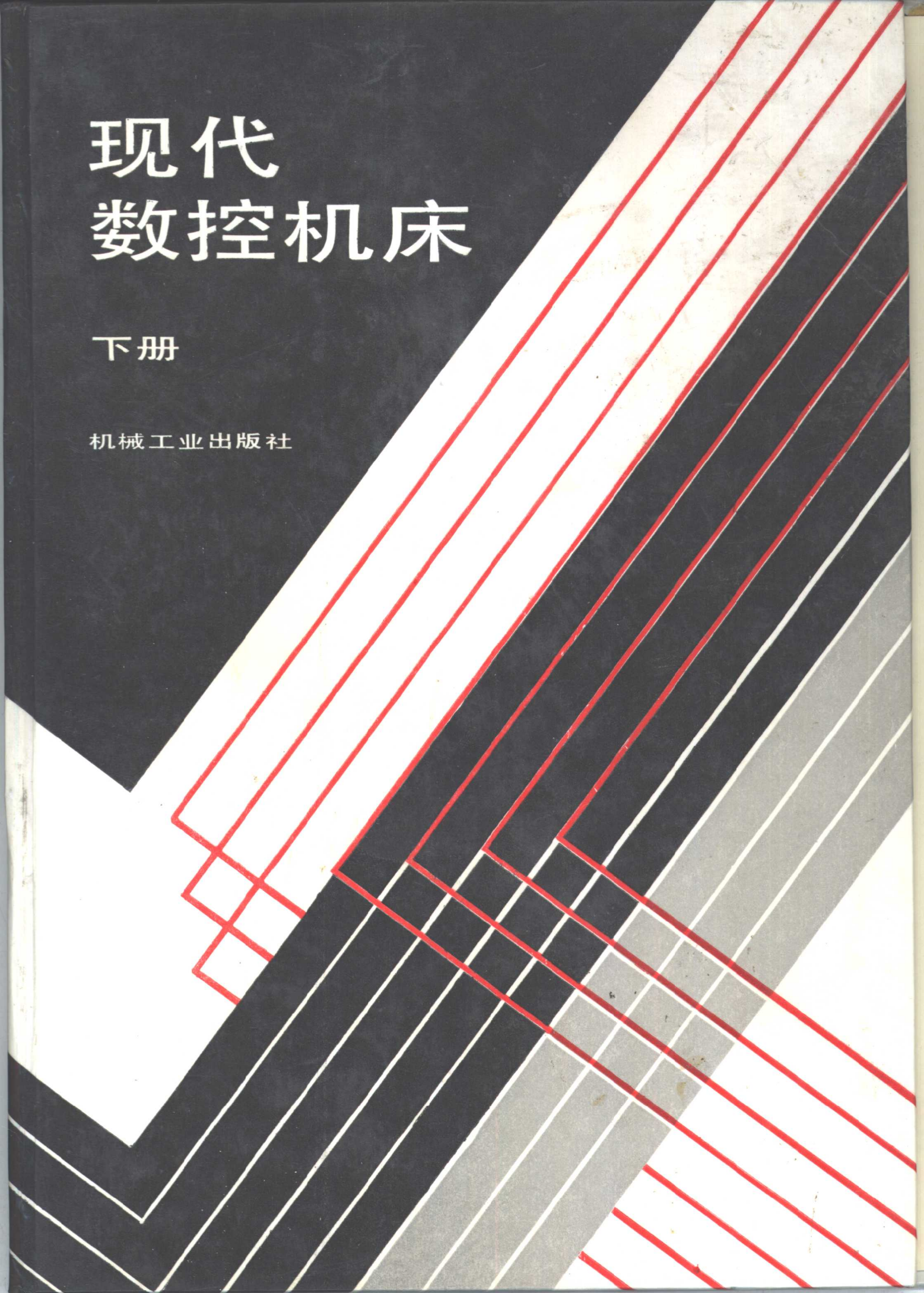


现代 数控机床

下册

机械工业出版社



现代数控机床

(下 册)

毕承恩 丁乃建 等编著

机械工业出版社

(京)新登字054号

本书着重叙述了现代数控机床的机械结构、计算机数字控制装置、伺服驱动和控制电机的工作原理和设计思想,同时还叙述了数控程编、机床用可编程控制器、数控机床的使用和维修、数控技术与计算机集成制造系统(CIMS),以及数控的标准化和可靠性等技术。在附录中,列出一些常用的标准和技术参数,最后列有中英对照的数控技术名词。特别适合高等院校,研究设计单位和工厂的数控技术人员使用,也可以作科研工作者的参考书。

现代数控机床

(下 册)

毕承恩 丁乃建 等编著

责任编辑:孙本绪 徐彤 责任校对:丁丽丽
封面设计:刘代 版式设计:冉晓华

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)
(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₁₆·印张22¹/₄·字数596千字
1991年12月北京第1版·1993年7月北京第1次印刷
印数 00,001—1500 定价:28元

ISBN 7-111-03177-6/TG·700(x)

《现代数控机床》编辑委员会

主 编	毕 承 恩
副主编	丁 乃 建
编 委	杨 惕 新
	郭 学 礼
	张 顺 花
	韩 克 礼
	厉 承 兆
	丘 家 秀
	孙 渝 梅
	俞 圣
	张 力
	何 重 远

11/26/05

前 言

数控机床已经用它所显示的效益和巨大潜力,引起世界各国科技界和工业界的普遍重视。发展现代数控机床是当前机械制造业技术改造,技术更新的必由之路,是未来工厂自动化的基础。数控技术作为计算机集成制造(CIM)技术的基础之一,正在注入新的动力。为了提高和发展数控技术,我们联合编写了《现代数控机床》一书,并配合电视系列录像片以飧读者。

本书着眼于80年代以来的国外新技术和国内实际应用的技术,力求做到先进性、科学性和实用性。我们广泛收集了近期的科技成果、设计资料,有些是我们实际科技工作中成熟的经验,为从事现代数控机床设计、科研、使用、维修工作者,提供一个内容丰富的科技参考书。同时,又可以为高等院校和工厂,作为培训教材使用。为了统一概念和技术术语,本书除了介绍数控标准外,在附录中,还列出中英文对照的数控技术名词。

本书第一章由丁乃建编写;第二章由杨惕新、孙渝编写;第三章由张日敏编写;第四章由邬学礼、张顺花、丘家秀、张力编写;第五章由韩克礼、厉承兆编写;第六章由何重远编写;第七章由厉承兆、俞圣梅编写;第八章和第九章由毕承恩编写;附录由上述同志分别编写。全书由毕承恩、丁乃建等审定。参加第二章部分编写的还有陈诗良、裘易乡、王俊峰、于胜军、于永亲、吴作霖、王杏卿、张铁铭、罗振壁、鄂牧人、盛伯浩等,参加第三章编写的还有周汉祥、刘晓云。为本书提供资料的,还有一些研究所、服务中心,机床行业的工厂中的几十名科技工作者。他们为本书提供了宝贵的意见、资料和插图照片等,在此一并致以衷心的感谢。

本书组织编著过程中,中国机床工具工业协会、前进音像出版社、国家教委录像中心和机械电子工业部北京数控技术开发中心等单位,均给以有力的支持和帮助,在此致以衷心的感谢。

由于我们水平有限,经验不足,书中难免存在错误疏漏之处,诚恳希望广大读者提出宝贵意见。

编 者

1990年10月于北京

目 录

第五章 数控机床的驱动与位置

控制	1
第一节 概述	1
第二节 进给驱动	3
一、对进给驱动的要求及其分类	3
二、直流伺服电机	5
三、直流速度控制单元	12
四、交流伺服电机	25
五、交流速度控制单元	29
六、典型生产厂的产品	46
第三节 主轴驱动	50
一、数控机床对主轴驱动的要求	50
二、直流主轴电机	51
三、直流主轴控制单元	52
四、交流主轴电机	53
五、交流主轴控制单元	55
六、主轴定向控制	60
七、典型生产厂的产品	63
第四节 检测元件	66
一、对检测元件的要求与分类	66
二、旋转变压器	67
三、感应同步器	70
四、脉冲编码器	77
五、绝对值脉冲编码器	80
六、光栅	81
七、磁栅	86
第五节 位置控制	90
一、分类	90
二、开环位置控制系统	93
三、相位伺服系统	97
四、幅值伺服系统	100
五、数字伺服系统概述	110

第六章 数控机床用可编程序控

制器	117
第一节 概述	117
一、PC的出现和在机械加工工业中的	

应用	117
二、PC与RLC在数控机床上的应用	
比较	117
三、数控机床用PC	119
四、PC的规模和几种常用名称	121
第二节 数控机床控制对象及接口信号	122
一、NC侧与MT侧的概念	122
二、数控机床接口	122
三、输入、输出信号规范	124
第三节 梯形图工作原理	126
一、梯形图结构	127
二、梯形图与继电器逻辑电路在操作	
上的差别	127
三、高级顺序和低级顺序	128
四、输入信号的同步处理	129
五、顺序处理时间的计算	130
六、顺序程序的执行	132
第四节 典型PC指令说明	132
一、基本指令	132
二、功能指令	134
第五节 程序编制设备和程序语言	144
一、程序编制设备	144
二、程序语言	147
第六节 数控机床顺序程序的设计和	
调试	149
一、确定PC型号及其硬件配置	149
二、制作信号接口技术文件	149
三、绘制梯形图	152
四、用程编机编辑顺序程序	152
五、顺序程序的调试与确认	152
六、顺序程序的固化	155
七、程序的存储和维修文件的整理	155
第七节 梯形图应用举例	156
一、润滑系统自动控制梯形图举例	156
二、刀库自动选刀控制梯形图举例	157
三、故障报警显示梯形图举例	164

第八节 国外PC典型产品和国内PC 发展概况	169
一、美国A-B公司	169
二、日本FANUC公司	170
三、德国SIEMENS公司	170
四、国内PC发展概况	171
第七章 数控机床的使用和维修	173
第一节 数控机床的选用	173
一、确定典型加工工件	173
二、数控机床规格的选择	173
三、机床精度的选择	174
四、数控系统的选择	176
五、工时和节拍的估算	176
六、自动换刀装置的选择及刀柄的 配置	177
七、数控机床驱动电机的选择	179
八、机床选择功能及附件的选择	188
九、技术服务	189
第二节 安装与调试	189
一、机床初就位	189
二、机床连接	190
三、数控系统的连接和调整	190
四、通电试车	193
五、机床精度和功能的调试	194
六、试运行	194
第三节 数控机床的验收	194
一、概述	194
二、机床几何精度检查	195
三、数控柜的外观检查	196
四、机床定位精度检查	196
五、机床切削精度检查	199
六、机床性能及NC功能试验	200
七、机床外观检查	202
第四节 数控机床的使用	202
一、机床使用要点	202
二、使用数控机床的配套要求	211
第五节 数控机床的维修及保养	213
一、数控机床维修的一些基本概念	213
二、预防性维护	214
三、常见故障分类	216
四、故障的判断及处理	217
五、旧数控机床再生改造	224

第八章 数控技术与计算机集成制造 (CIM)	226
第一节 数控技术的发展要面向计算机 集成制造技术	226
一、数控技术与工厂自动化的关系	226
二、世界机械制造业市场的变化	227
三、计算机集成制造技术为数控技术 的发展提出了新方向	227
第二节 柔性制造系统(FMS)	228
一、柔性制造系统的基本概念	228
二、柔性制造单元(FMC)与DNC	229
三、工业机器人	234
四、柔性制造系统的效益	236
五、设计柔性制造系统的原则	237
第三节 从自动化孤岛到计算机集成制造 系统(CIMS)	247
一、自动化孤岛	247
二、计算机集成制造系统的基本模式	247
三、计算机集成制造系统的单元技术	250
四、CIMS的集成技术	256
第九章 数控技术的标准化	265
第一节 概述	265
一、标准化的重要性	265
二、国际标准化体系	265
三、国内标准化体系	266
第二节 常用的数控标准	267
一、数控机床的坐标轴和运动方向	267
二、数控机床的编码字符	267
三、程序段格式	267
四、准备功能(G)和辅助功能(M)	268
第三节 其它数控标准和规约	268
一、有关数控机床方面	268
二、有关数控系统方面	269
附录	270
一、数控机床标准的参考资料	270
二、CNC典型产品的主要功能	279
三、伺服驱动典型产品主要性能	303
四、机床用可编程控制器典型产品 主要性能	322
五、常用数控名词中英对照	329
参考文献	350

第五章 数控机床的驱动与位置控制

第一节 概 述

如果说CNC部分是数控机床的“大脑”是发布“命令”的“指挥机构”，那么，驱动及位置控制部分便是数控机床的“四肢”，是一种“执行机构”，它忠实而准确地执行由CNC装置发来的运动命令。

本章主要内容讲述现代数控机床常用的进给驱动、主轴驱动及位置控制。为了说明闭环位置控制的原理，首先需要说明位置检测元件的原理和应用方法。

驱动系统及位置控制系统的性能，在很大程度上决定了现代数控机床的性能。例如，数控机床的最高移动速度、跟踪精度、定位精度等重要指标均取决于驱动及位置控制系统的动态与静态性能。因此，研究与开发高性能的驱动系统及位置控制系统，一直是研究现代数控机床的关键技术之一。

数控机床的驱动系统主要有两种：进给驱动系统和主轴驱动系统，前者控制机床各坐标轴的切削进给运动，后者控制机床主轴的旋转运动。驱动系统是由驱动部件（例如交、直流电机及速度检测元件）和速度控制单元所组成。它的职能是提供切削过程中所需要的转矩和功率，可以任意调节运转速度。

位置控制系统又分为开环和闭环两种。开环控制不需要位置检测及反馈，闭环控制需要位置检测及反馈。位置控制的职能是精确地控制机床运动部件的坐标位置，快速而准确地跟踪指令运动。

闭环位置控制系统又称作位置伺服系统，它是基于反馈控制原理工作的，即把被控变量与输入的指令值随机地进行比较，以形成误差值，并用此误差来控制伺服机构向着消除误差的方向运转（负反馈），最终达到使输出等于输入。

为了进行反馈，就需要有检测元件。检测元件的功能是对被控变量进行检测与信号变换，使之变成与指令信号可比的形式，以达到进行控制的目的。

现代数控机床的位置伺服系统的一般结构如图5-1所示。这是一个双闭环系统，内环是速度环，外环是位置环。用作速度反馈的检测元件，通常为测速发电机。速度控制单元是一个独立的单元部件，它是由速度调节器、电流调节器及功率驱动放大器等各部分组成。

位置环是由CNC装置中的位置控制模块与速度控制单元、位置检测及反馈控制等各部分组成。位置控制主要是对数控机床的进给运动的坐标位置进行控制。例如：工作台前后左右移动，主轴箱的上下移动，围绕某一个直线轴的旋转运动等。轴控制是数控机床上要求最高的位置控制，不仅对单个轴的运动速度和精度的控制有严格要求，而且在多轴联动时，还要求各移动轴有很好的动态配合，否则，会影响加工效率、加工精度和表面粗糙度。

对主轴的控制要求在很宽的范围内速度连续可调，并在每一种速度下均能提供足够的切削所需的功率。在某些高性能的CNC机床上还要求主轴位置可任意控制（即C轴位置控制）。

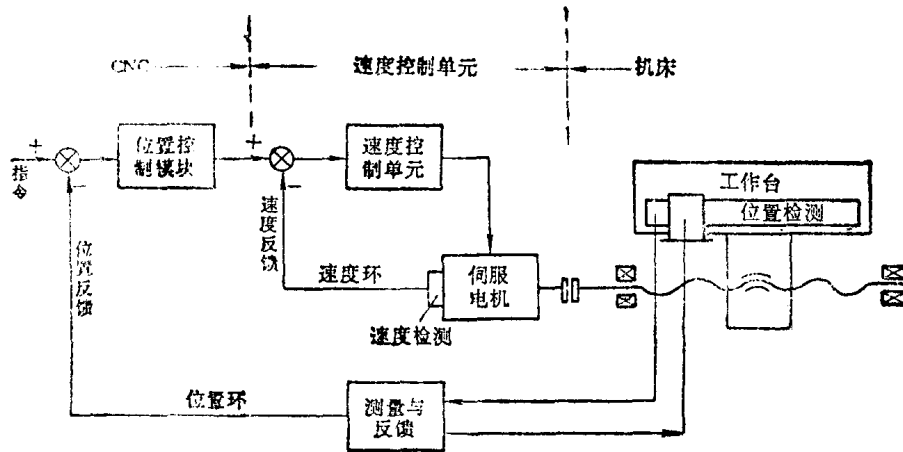


图5-1 位置伺服系统的结构图

在加工中心上有刀库位置控制。刀库装有许多把不同类型的刀具，供加工中选用。为了能任意选择刀库不同位置上的刀具，需要有位置控制，以控制刀库准确停在要选用的刀具位置。刀库位置控制与轴控制相比，性能要低得多，故称为简易位置控制。

如果按驱动部件的动作原理分类，可以把位置控制系统分为电液控制系统和电气控制系统。

开环系统分为电液脉冲马达驱动的电液控制系统和功率步进电机驱动的全电气位置控制系统。

闭环系统分为电液伺服系统和全电气的直流、交流伺服系统。

早期的数控机床，尤其是大中型数控机床采用电液伺服系统驱动的较多。它是由电液伺服阀，低速大转矩液压马达或液压缸及位置检测与反馈控制等各部分所组成。该系统的优点是功率大，响应快，低速性能好，传动刚度和精度也比较好；缺点是占地面积大，噪声大，效率较低，对油的质量要求高。

全电气的伺服系统，又有直流和交流之分。直流伺服系统，从70年代到80年代中期在数控机床上占据主导地位。当时的DC大惯量伺服电机具有良好的宽调速性能，输出转矩大，过载能力强，由于电机惯性与机床传动部件的惯量相当，因而构成闭环后易于调整。

为了适应一部分数控机床频繁启动、制动及快速定位和切削的要求，又发展了直流中小惯量的伺服电机和大功率晶体管脉宽调制（PWM）驱动装置。

到了80年代以后，由于AC伺服电机的材料、结构、控制理论及方法均有突破性的进展，使AC驱动及伺服系统发展快，有逐渐取代DC系统之趋势。AC系统的最大优点是AC电机不需要维修，制造简单，适合在较恶劣的环境中使用。

AC伺服系统向数字化方向发展是适应高速、高精度机械加工的需要。系统中的电流环、速度环和位置环的反馈控制全部数字化，全部伺服的控制模型和动态补偿均由高速微处理器及其控制软件进行实时处理，采样周期只有零点几毫秒。采用前馈与反馈结合的复合控制可以实现高精度和高速度。近来出现的所谓“学习控制”是一种智能型的伺服控制，在周期性的高速、高精度跟踪中，几乎可以消除除第一个周期以外的全部伺服误差。

数字化的软件伺服是当今的发展趋势。

第二节 进给驱动

一、对进给驱动的要求及其分类

(一) 对进给驱动的要求

数控机床集中了传统的自动机床、精密机床和万能机床三者的优点，将高效率、高精度和高柔性集中于一体。但是，好的传统机床加上好的数控系统并不一定能成为好的数控机床。这是由数控机床的特点和要求所决定的。在数控机床中，机床技术水平的提高，首先依赖于进给驱动和主轴驱动特性的改善以及功能的扩大。为此，数控机床对进给驱动提出了很高的要求。这里所述的进给驱动只包括速度控制和伺服电动机（简称伺服电机，下文中所述电机均指伺服电动机），其实还应包括位置控制和机械传动部件，尤其是后者，在以往的设计中往往被忽略。上述四个部分的设计及其参数的选择都应满足整个进给驱动的要求。本节只叙述前三部分，第四部分已在第二章中叙述。

由于各种数控机床所完成的加工任务不同，所以它们对进给驱动的要求也不尽相同，但大致可概括为以下四个方面。

1. 精度高 使用数控机床主要是为了解决下述问题：

- (1) 保证加工质量的稳定性、一致性，减少废品率。
- (2) 解决复杂空间曲面零件的加工问题。
- (3) 解决复杂零件的加工精度问题，缩短制造周期等。

为了满足这些要求，关键之一是保证数控机床的定位精度和加工精度。数控机床在加工时免除了操作者的人为误差，它是按预定的程序自动进行加工的，不可能应付事先没有预料到的情况及非复演性的问题。也就是说，它不能象普通机床那样，可随时用手动操作来调整和补偿各种因素对加工精度的影响。因此，要求定位精度和轮廓切削精度能达到机床要求的指标。为此，在位置控制中要求有高的定位精度。如 $1\mu\text{m}$ 甚至 $0.1\mu\text{m}$ 。而在速度控制中，要求有高的调速精度，强的抗负载扰动的能力。即要求静态和动态速降尽可能的小。

2. 快速响应 为了保证轮廓切削形状精度和低的加工表面粗糙度，除了要求有较高的定位精度外，还要求有良好的快速响应特性，即要求跟踪指令信号的响应要快。这一方面，要求过渡过程时间要短，一般要求在 200ms 以内，甚至小于几十毫秒；另一方面，为了满足超调要求，要使过渡过程的前沿陡，亦即上升率要大。

3. 调速范围宽 调速范围 R_N 是指生产机械要求电机能提供的最高转速 N_{max} 和最低转速 N_{min} 之比。通常

$$R_N = \frac{N_{\text{max}}}{N_{\text{min}}}$$

式中 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，也可以是实际负载时的转速。

在各种数控机床中，由于加工用刀具、被加工材质以及零件加工要求的不同，为保证在任何情况下都能得到最佳切削条件，就要求进给驱动必须具有足够宽的调速范围。

目前，最先进的水平是，在进给速度范围已可达到脉冲当量为 $1\mu\text{m}$ 的情况下，进给速度从 $0 \sim 240\text{m}/\text{min}$ 连续可调。

但对于一般的数控机床而言,要求进给驱动系统在 $0\sim 24\text{m}/\text{min}$ 进给速度下都能工作就足够了,而且可以分为以下几种状态:

1) 在 $1\sim 24000\text{mm}/\text{min}$ 即 $1:24000$ 调速范围内,要求速度均匀、稳定、无爬行,且速降要小。

2) 在 $1\text{mm}/\text{min}$ 以下时具有一定的瞬时速度,而平均速度很低。

3) 在零速时,即工作台停止运动时,要求电机有电磁转矩,以维持定位精度,使定位误差不超过系统定位误差允许范围。也就是说,应处于伺服锁住状态。

但以上是指整台数控机床的位置伺服控制而言的。正如前节所述,位置伺服控制系统是由速度控制系统和位置控制环组成的。如果对速度控制系统也过份地追求象位置伺服控制系统那么大的调速范围而又要可靠稳定地工作,那么速度控制系统将会变得相当复杂。这既会提高成本,又会降低可靠性。一般来说,对于要求速度范围为 $1:20000$ 的位置控制系统,在总的开环位置环增益为 $20(1/\text{s})$ 时,只要保证速度控制单元具有 $1:1000$ 的调速范围就完全可以满足需要。这样,可使速度控制单元线路既简单又经济可靠。当然,代表当今世界先进水平的速度控制单元实验系统已达到 $1:100000$ 的调速范围。

4. 低速大转矩 根据机床的加工特点,大都是在低速进行重切削,即在低速时进给驱动要有大的转矩输出。这样可使动力源尽量靠近机床的执行机构,从而可缩短进给驱动的传动链,使传动装置机械部分的结构简化,系统刚性增加,因而也使传动装置的动态质量和中间传动的运动精度得到提高。

为了满足上述四点要求,进给驱动系统对执行元件——伺服电机也相应提出了要具有高精度、快反应、宽调速和大转矩等特点。

具体的要求是:

1) 电机从最低进给速度到最高进给速度范围内都能平滑地运转;转矩波动要小,尤其在最低转速时,如 $0.1\text{r}/\text{min}$ 或更低转速时,仍有平稳的速度而无爬行现象。

2) 电机应具有大的、较长时间的过载能力,以满足低速大转矩的要求。比如,电机能在数分钟内过载 $4\sim 6$ 倍而不损坏。

3) 为了满足快速响应的要求,即随着控制信号的变化,电机应能在较短时间内完成必须的动作。快的反应速度直接影响到系统的品质。因此,要求电机必须具有较小的转动惯量和大的堵转转矩,尽可能小的机电时间常数和起动电压。电机必须具有 $4000\text{rad}/\text{s}^2$ 以上的加速度,才能保证电机在 0.2s 以内从静止起动到 $1500\text{r}/\text{min}$ 。

4) 电机应能承受频繁的起动、制动和反转。

(二) 进给用伺服电机类型

纵观世界上的数控机床,进给驱动用的伺服电机主要有以下几类:

1. 改进型直流电机 这类电机在结构上与传统的直流电机没有区别,只是它设计成转动惯量较小,过载能力较强,且具有较好的换向性能。它在静态特性和动态特性方面较普通直流电机有所改善。在早期的欧美数控机床上多用这种电机。

2. 小惯量直流电机 这类电机又分无槽圆柱体电枢结构和带印刷绕组的盘形电枢结构两种。因为小惯量直流电机最大限度地减少了电枢的转动惯量,所以能获得最好的快速性。在早期的数控机床上应用这类电机也较多。有些国家,如法国等,小惯量直流电机在数控机床上至今仍应用。

为了追求电机的高角加速度，无论是小惯量直流电机还是改进型直流电机，都设计成有高的额定转速和低的惯量。因此，一般都要经过中间的机械传动（如齿轮副）才能与丝杠相连接。

3. 步进电机 由于步进电机制造容易，它所组成的开环进给驱动装置也比较简单易调，在60年代至70年代初，这种电机在数控机床上的应用曾风行一时。但到现在，一般数控机床上已不使用，而在功能简单的数控机床（有时称之为“经济型数控机床”）上仍不失为一个好的驱动元件。另外，在某些机床上也有用作补偿刀具磨损运动以及精密角位移等方面的驱动。

4. 永磁直流伺服电机 由于永磁直流伺服电机能在较大过载转矩下长期地工作以及电机的转子惯量较前述几种电机都大，因此它能直接与丝杠相连而不需中间传动装置。而且因为无励磁回路损耗，所以它的外形尺寸比与其相类似的励磁式直流电机小。它还有一个特点是可在低速下运转，如能在1 r/min甚至在0.1 r/min下平稳地运转。因此，这种电机在数控机床上获得了广泛的应用。自70年代至80年代中期，在数控机床应用的进给驱动中，它占据着绝对统治地位，至今，许多数控机床上仍使用着永磁直流伺服电机。

5. 无刷直流电机 无刷直流电机也叫无换向器直流电机，是由同步电机和逆变器组成，而逆变器是由装在转子上的转子位置传感器控制。因此，它实质上是交流调速电机的一种。由于这种电机的性能达到直流电机的水平，又取消了换向器及电刷部件，使电机寿命大约提高了一个数量级，因此多年来引起人们很大的兴趣。

6. 交流调速电机 自80年代中期开始，以异步电机和永磁同步电机为基础的交流进给驱动得到了迅速的发展，已经形成了潮流。它是机床进给驱动的一个方向。到今天，有些国家，如日本生产的数控机床已全部采用交流进给驱动。而所用的异步电机多是批量生产的普通结构型式的异步电机。可以预见，在将来的数控机床上必定是采用具有大转矩、适用于宽调速运行的、并装有反馈用各种传感器和辅助装置的所谓机-电一体化的专用异步电机和永磁同步电机。

二、直流伺服电机

直流电机具有良好的调速特性，为一般交流电机所不及。因此，在对电机的调速性能和起动性能要求较高的生产机械上，以往大都采用直流电机驱动，而不顾其结构复杂和价格较贵等缺点。

（一）直流电机分类及其特性

直流电机的工作原理是建立在电磁力定律基础上的，电磁力的大小正比于电机中的气隙磁场。直流电机的励磁绕组所建立的磁场是电机的主磁场。按对励磁绕组的励磁方式不同，直流电机可分为他激式（包括永磁式）、并激式、串激式和复激式四种，其示意图如图5-2所示。

上述几种直流电机的机械特性，亦即电机转速 n 、电机电枢电流 I 与电磁转矩 M 的

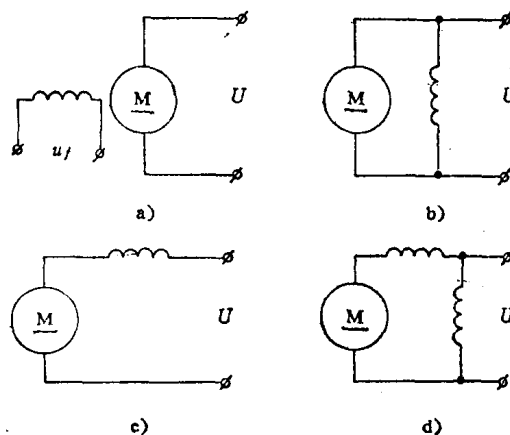


图5-2 直流电机电路原理图
a) 他激式 b) 并激式 c) 串激式 d) 复激式

关系如图5-3所示。

从图5-3可见,并激电机和他激电机,尤其是永磁电机是能满足进给驱动系统对执行元件的要求的。

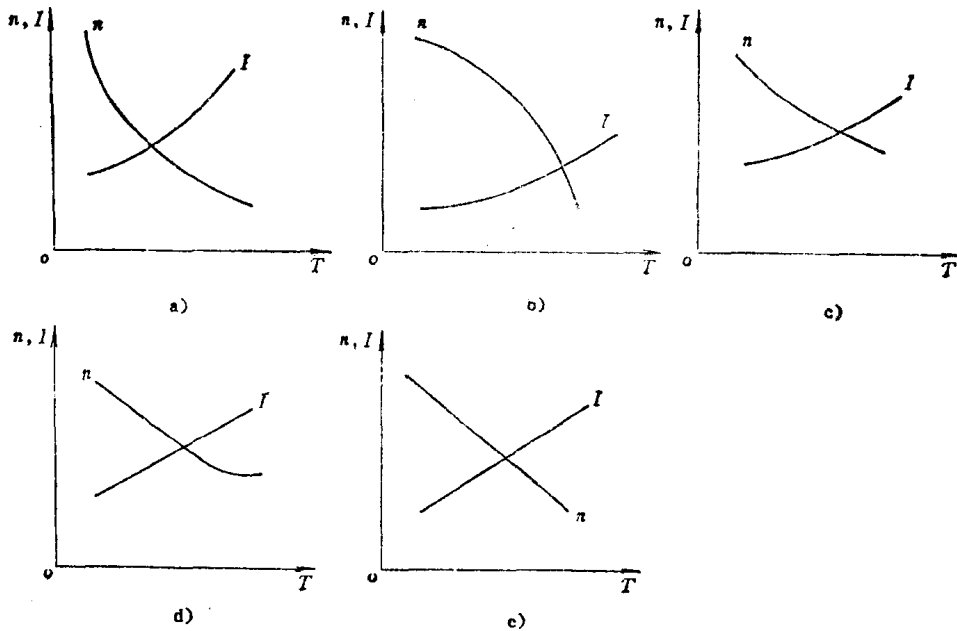


图5-3 直流电机的机械特性

a) 串激电机 b) 并激电机 c) 复激电机 d) 他激电机 e) 永磁电机

但从图5-3b)中可见,一般并激电机有一个明显的缺点,即在大的转矩时,机械特性曲线呈非线性。这是由于电机内电枢反应磁场作用的结果。大家知道,在任何一种电机中,电枢反应磁场总是正交于定子主磁场,且以最短的途径形成磁回路。图5-4示出了并激电机磁场,它的气隙磁场由于电枢反应磁场的作用而发生畸变,即在N极下右半部分的磁场增加而左半部分的气隙磁场减弱。S极下的气隙磁场亦同样发生畸变。由于气隙磁场的畸变造成气隙磁密降低,从而引起了机械特性的非线性。

在普通的他激直流电机中,由于电枢反应磁场的影响,使每极磁通降低,从而造成机械特性在大负载时呈上翘现象。为此,往往在主磁极上加入一个匝数甚小的串激绕组(即与电枢绕组相串联)以便获得近似线性的机械特性。因为该串激绕组产生的磁势可以抵消电枢反应磁场的去磁作用。但这时的直流电机在实际上已由他激式变为积复激电机,称之为补偿式直流电机。它与一般直流电机相比,具有主磁极绕组多、带补偿绕组、电枢直径较小等结构特点。这两种电机的结构示意图如图5-5所示。

这种补偿式直流电机也就是前面提到的改进型直流电机。它与一般直流电机相比具有下述优点:

- 1) 过载能力强,甚至能达到额定转矩的5

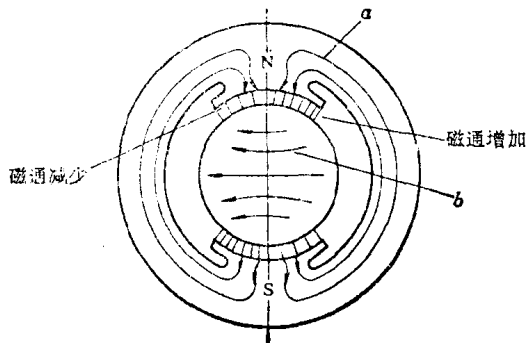


图5-4 并激电机磁场

a) 主磁场 b) 电枢反应磁场

至10倍。

- 2) 电气时间常数短。
- 3) 转子的转动惯量较小。
- 4) 调速范围宽。
- 5) 允许有大的电流上升率，甚至可达到 $di/dt > 2000A/s$ 。

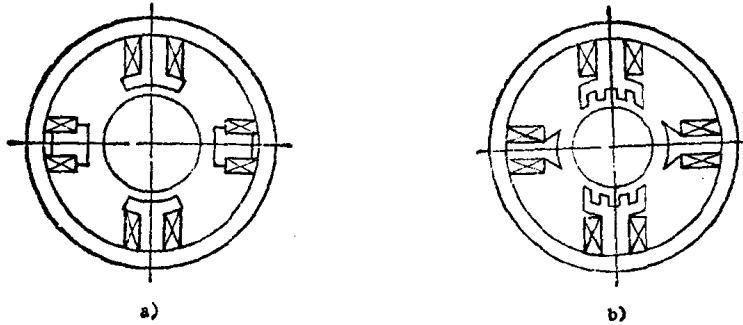


图5-5 两种直流电机结构图
a) 普通直流电机 b) 补偿式直流电机

由图5-3e中可见，永磁直流电机的机械特性曲线在整个范围内都呈线性关系。这是由于永磁电机中的永磁体的磁导极低（几乎与空气相同）。另外，永磁体的高矫顽力也阻止电枢反应磁场的进入。所以磁极下的气隙磁场几乎没有什么畸变，从而获得了线性的机械特性。

在数控机床的直流进给驱动中补偿式直流电机和永磁式直流电机都有采用，但后者用得最普遍。这是因为永磁直流电机不需要激磁功率，具有较高的堵转转矩，在同样的输出功率下有较小的体积和较轻的重量。

(二) 永磁直流伺服电机的结构

永磁直流电机又可分为驱动用永磁直流电机和永磁直流伺服电机两大类。驱动用永磁直流电机通常是指不带稳速装置，没有伺服特性要求的电机，而永磁直流伺服电机则除具有驱动用的永磁直流电机的性能外，还具有一定的伺服特性和快速响应能力。在结构上往往与反馈部件做成一体。当然，永磁直流伺服电机也可作为驱动电机用。因为永磁直流伺服电机允许有宽的调速范围，所以也叫做宽调速直流电机。这类电机结构的一般形式如图5-6所示。电机本体由三部分组成：机壳、定子磁极和转子电枢。反馈用的检测部件有高精度的测速发电机、旋转变压器以及脉冲编码器等，它们安装在电机的尾部（非轴伸端），这些检测部件的结构和性能将在本章第四节中详述。

永磁直流电机的定子磁极是一个永磁体，它可以用铸造型铝镍和铝镍钴合金制造。但这种制造永磁电机的主要材料却有着价格昂贵、加工性能差以及过载能力低的缺点。

从50年代末期开始采用各向异性的铁氧体磁铁作为定子磁极。由于铁氧体磁铁的矫顽力很高，有很强的抗去磁能力，它的去磁曲线近似于直线，它的回复线也基本上与去磁曲线相重合，因此不存在电机运行时磁铁工作点的稳定性问题。另外，

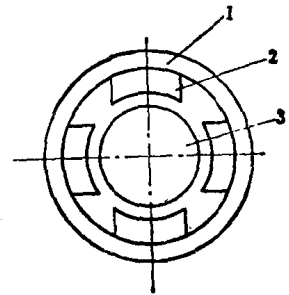


图5-6 四极永磁直流电机
1—机壳 2—定子磁极 3—电枢

磁铁装配后不需要进行开路、短路、堵转或反转等稳定性处理，也没有铝镍钴合金那样稳定点过低的缺点。而且，铁氧体原料价格便宜（不含贵金属），铁氧体的密度很小重量轻，电阻率高。因此，采用铁氧体的永磁电机不但成本低、重量轻，而且电枢反应的去磁作用很小，使电机过载能力强。当然，铁氧体磁铁也有缺点。主要是剩磁感应不高，环境温度对磁性能的影响较大。因此，它不适用于环境温度变化大而又要求温度稳定性高的场合。

近年来，各国又研究出一种新颖的永磁材料——稀土钴永磁合金。稀土钴永磁材料具有极大的矫顽力（是铁氧体的2~3倍）和很高的最大磁能积（为铁氧体的10倍）。因此，采用稀土钴合金的永磁电机其抗去磁的能力大为提高，尤其适用于瞬间短路、堵转和突然反转等运行状态。用稀土钴合金制造的永磁电机的体积可以大为缩小。这是一种极有前途的永磁材料。但在当前，由于它的原材料贵重，制造工艺复杂，因而影响了它的大量推广应用。

至于磁极的形状，可以是矩形也可以是瓦状的，目前多用瓦状结构，如图5-7所示。这是由于铁氧体采用矩形之后，虽有磁体容易加工，气隙磁密高的优点（因为磁体上加有极靴），但机座加工困难（机座内孔为多边形）。

由于铁氧体磁铁的剩磁感应强度 B_r 很低，约为0.2~0.4T，因此图5-7所示结构的电机气隙磁密很低，电枢铁心没有被充分利用。为了提高气隙磁密，可以增加极靴以聚集气隙磁通，如图5-8所示的结构。

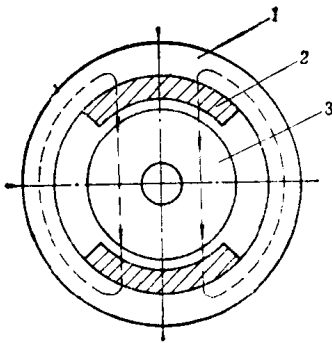


图5-7 无极靴瓦状永磁定子结构
1—机壳 2—瓦状永磁材料 3—电枢

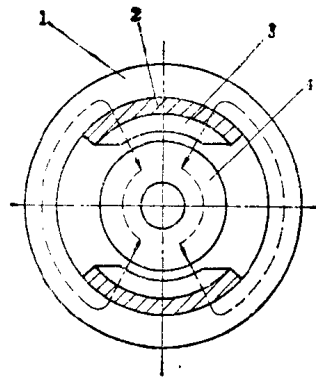


图5-8 有极靴瓦状永磁定子结构
1—机壳 2—瓦状永磁材料 3—极靴 4—电枢

在电枢方面，可以分为普通型和小惯量型两大类。小惯量型电枢又可分为空心杯形电枢、无槽电枢和印刷绕组电枢三类。空心杯形电枢的主要特点是电枢由漆包线编织成杯形，用环氧树脂将其固化成一整体，且无铁心。因此，这种电机特别轻巧、惯量极小、电枢绕组电感很小、电气时间常数小，重复起、停频率可达200Hz以上。其缺点是气隙较大；与普通有槽电枢相比，单位体积的输出功率较小，且电枢结构复杂，工艺难度大。无槽电枢的电枢铁心上没有槽，为一光滑的由矽钢片叠成的圆柱体，用漆包线在其表面编织成包子形的绕组。由于电枢上无槽，所以气隙磁密高，且无齿槽效应，使得电机运转平稳，噪声小。印刷绕组电枢，因其电枢圆盘很轻，惯量很小，且由于电枢无铁心，铁耗很小，电气时间常数和机械时间常数均很小，很适合于低速和频繁起动及反转的场合。上述三种小惯量型电枢的共同特点是电枢惯量小，适合于要求有快速响应的伺服系统。因此，在早期的数控机床中得到应用。但由于其过载能力低，电枢惯量与机械传动系统匹配较差，因此在近期数控机床上的永磁直流伺服电机多用普通型的有槽电枢。普通型有槽电枢的结构与一般的直流电机电枢相

同，只是电枢铁心上的槽数较多，采用斜槽，亦即铁芯叠片扭转一个齿距，且在一个槽内分布了几个虚槽，以减小转矩的波动。

这种普通型电枢的永磁直流伺服电机与改进型直流电机和小惯量直流电机相比，具有下述优点：

- 1) 能承受的峰值电流和过载倍数高（能产生高至10倍的瞬时转矩） 这种电机的定子磁极采用具有高矫顽力的铁氧体磁铁；它能满足数控系统提出的执行元件应有快的加速和减速能力的要求。
- 2) 具有大的转矩/惯量比 电机的加速度大，响应快。
- 3) 低速时输出的转矩大，惯量比较大 这种电机能与机械直接相连，省去了齿轮等传动机构，且避免了齿隙造成的振动和噪声，以及齿间误差，提高了机床的加工精度。
- 4) 调速范围大 当与高性能的速度控制单元组成速度控制系统时，调速范围超过1:1000以上。
- 5) 转子的热容量大 电机的过载性能好，一般能加倍过载几十分钟。
- 6) 具有高精度的检测元件（包括速度检测元件和转子位置检测元件） 它与电机同轴安装，保证了电机能平滑旋转和稳定工作，使整个伺服机构具有良好的低速刚度和高的动态性能，得以进行高精度定位。

但是这类电机也有缺点：一是电机允许温度可达150~180℃。由于转子温度很高，它可通过转轴传到机械上去，这会影晌精密机床的精度。二是转子惯量相对来说比较大，为了满足快速响应的要求，需要加大电机的加速转矩，因此需增大电源装置的容量以及加强机械传动链等的刚度。

（三）永磁直流伺服电机工作原理及性能

永磁直流伺服电机的工作原理与普通的直流电机相同。为了在直流电机中产生感应电势和电磁转矩，在电机中需要有一个气隙磁场（或称主磁通），为此，电机磁路需要有一定的磁势源来励磁。在普通的直流电机中采用直流电流励磁，所以，这类电机也称为电磁式电机。而在永磁式电机中，永久磁铁在经过外界磁场预先磁化（亦即充磁）之后，在没有外界磁场的作用下，仍能保持很强的磁性。因此，当用永久磁铁代替普通直流电机的励磁绕组和磁极铁心时，它同样可在电机气隙中建立主磁通，从而产生感应电势和电磁转矩。

永磁直流伺服电机的性能，由于其伺服系统的要求，已经不能用简单的电压、电流、转速参数来描述，而需要用一些特性曲线和数据表来全面描述。

特性曲线主要有二种

1) 转矩-速度特性曲线 转矩-速度特性曲线，又叫工作曲线，如图5-9所示。

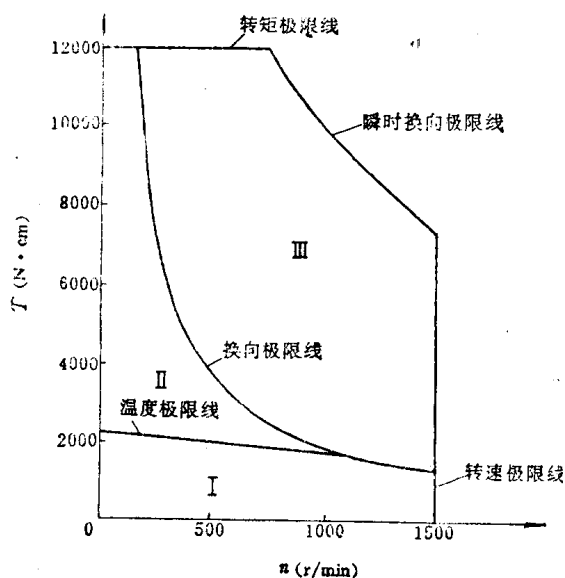


图5-9 直流伺服电机工作曲线
I—连续工作区 II—间断工作区 III—瞬时加速区

由图可见, 伺服电机的工作区域被温度极限线、转速极限线、换向极限线、转矩极限线以及瞬时换向极限线划分成三个区域: I 区域为连续工作区, 在该区域内可对转矩和转速作任意组合, 都可长期连续工作。II 区域为断续工作区, 此时电机只能根据负载周期曲线 (见图5-10) 所决定的允许工作时间和断电时间作间歇工作。III 区域为加速和减速区域, 电机只能用作加速或减速, 工作一段极短的时间。

2) 负载周期曲线 负载周期曲线如图5-10所示。图中给出了在满足机械所需转矩, 而又确保电机不过热的情况下, 允许电机的工作时间。因此这些曲线是由电机温度极限所决定的。

负载周期曲线的使用方法如下:

1) 根据实际负载转矩的要求, 求出电机在该时的过载倍数 $T_{m,d}$ 。

$$T_{m,d} = \frac{\text{负载转矩}}{\text{连续额定转矩}}$$

2) 在负载周期曲线的水平轴线上找到实际机械所需要的工作时间 (t_R), 并从该点向上作垂线, 与所要求的 $T_{m,d}$ 的那条曲线相交。再从该交点作水平线, 与纵轴相交的点即为允许的加载周期比 d 。

$$d = \frac{t_R}{t_R + t_f}$$

式中 t_R —— 电机的工作时间;

t_f —— 电机的断电时间。

3) 电机的最短断电时间, 可由下式求得

$$t_f = t_R \left(\frac{1}{d} - 1 \right)$$

电机的数据表, 给出了有关电机性能的一些参数值。表5-1列出了北京数控设备厂生产的FB15型直流伺服电机的数据。

数据表中的一些参数定义如下:

1) 连续额定电流 I_0 。这是指电机在全封闭下, 转子处于堵转 (即静止不动) 时连续流过电枢的电流均方根值。

2) 连续额定转矩 T_0 。它是指在流经 I_0 电流时的电机堵转转矩。

3) 允许最大电流 I_m 。该电流值是指不使永磁体去磁的最大峰值电流。一旦超过此电流, 即使只有几个脉冲, 也将使磁体产生不可逆的去磁。因此一定要限制电机的峰值电流在此允许值的范围之内。

4) 反电势常数 K_v 。它反映永磁磁场强度。当伺服电机的转子在磁场中被其它机械拖动, 并按规定速度转动时电枢所产生的电压值。反电势常数的单位为 $V \cdot s / \text{rad}$ 或 $V / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 。这二者之间的换算关系为:

$$1 \text{ V} / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1}) = 9.55 \text{ V} \cdot \text{s} / \text{rad}$$

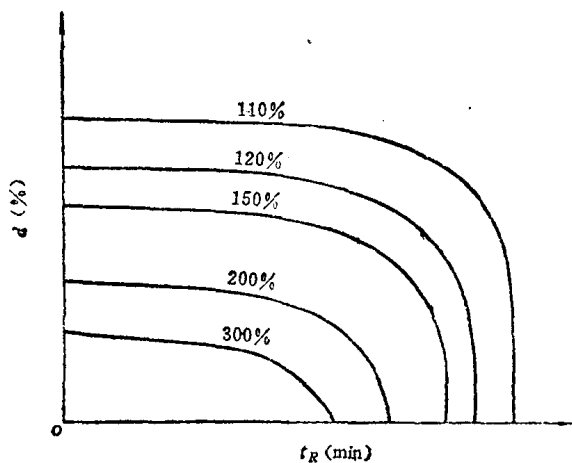


图5-10 伺服电机负载周期曲线