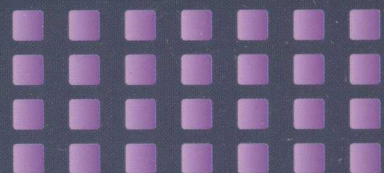


伺服控制技术

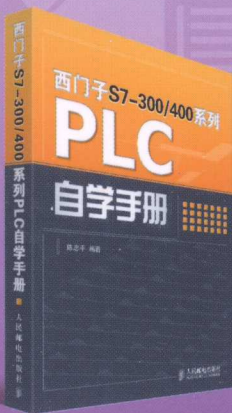
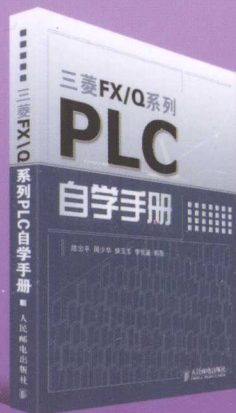
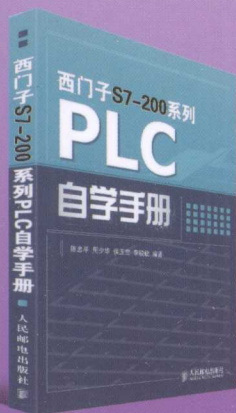
自学手册



陈先锋 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

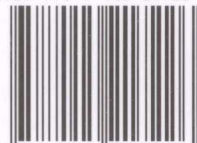


伺服控制技术 自学手册

封面设计：任文杰



ISBN 978-7-115-21722-6



9 787115 217226 >

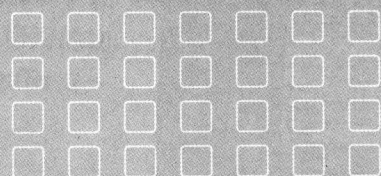
ISBN 978-7-115-21722-6

定价：49.00 元

人民邮电出版社网址：www.ptpress.com.cn

伺服控制技术

自学手册



陈先锋 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

伺服控制技术自学手册 / 陈先锋编著. — 北京 :
人民邮电出版社, 2010.1
ISBN 978-7-115-21722-6

I. ①伺… II. ①陈… III. ①伺服控制—自学参考资料 IV. ①TP275

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第198544号

内 容 提 要

本书围绕伺服控制技术,介绍了伺服电机及其驱动的基本概念;伺服电机以及驱动的结构特点、测试/实验方法、选型技术;位置测量系统的基本原理和伺服控制技术的应用特点。书中不仅介绍了传统的脉冲形式伺服驱动的应用,而且详细地分析了基于PLC的PROFIBUS-DP控制技术的系统组态编程以及应用。本书以典型案例讲解伺服控制技术的应用,图文并茂,侧重实际,实用性强。

本书是自动化控制领域广大技术人员的实用自学手册,也可供大专院校自动化、机电一体化专业的师生参考,同时也是一本非常实用的职业技术培训教材。

伺服控制技术自学手册

-
- ◆ 编 著 陈先锋
责任编辑 张 伟
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京昌平百善印刷厂印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 18
字数: 450千字
印数: 1—4000册
- 2010年1月第1版
2010年1月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-21722-6

定价: 49.00元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

前 言

运动控制作为控制领域的一个分支，获得越来越深入的发展，而伺服控制技术是运动控制的关键技术。随着运动控制系统的应用复杂化和控制性能要求的提高，伺服控制技术的优势显得越来越突出。深入掌握伺服控制技术也成为构建一个优秀的运动控制系统的关键。从简单的单机设备到高端的总线式运动控制系统，伺服控制有不同的应用特点。通常经济型的运动控制系统会选择脉冲形式伺服驱动，而总线式运动控制系统往往需要支持诸如 CAN 总线、PROFIBUS-DP 等。

伺服控制技术日益蓬勃发展，无论是企业还是高等院校都非常重视这方面的研究。国内外涌现了大量的伺服产品，其应用也越来越广泛和深入，而如何根据应用需求选择合适的伺服驱动，如何让设备的伺服系统发挥出最优的性能，以及如何让系统的调试时间和故障停机时间最小化，甚至如何深入理解伺服控制技术，这些都是广大工程技术人员关注的焦点，也符合读者想成为伺服控制技术高级应用工程师的需求。

通常，工程技术人员在设计、安装、调试和维护过程中也常常遇到疑问，他们遇到的不是公式的推导、理论的证明的问题，而是遇到一个问题如何解答，遇到某个现象，如何解释它的“所以然”。

本书从脉冲式和总线式伺服驱动出发，抛开烦琐的理论分析和证明推导，以简洁明了的形式分析概念，用简单的例子说明问题，用实际中的应用案例把读者带入最终的应用实践，揭开伺服控制的技术“内幕”。编者结合设计开发、工程实践以及技术培训经验编写，理论精简、通俗、叙述到位；结合大量图形详尽地分析并配以相应的操作步骤；做到图文并茂；直接根据工程实际需求编写，删繁就简，实用性强。

本书由上海第二工业大学陈先锋老师编写，在编写的过程中参考和引用了国内外许多专家的论文和著作，以及一些厂商的网站资料、产品说明书以及产品测试手册和培训资料，作者在此一并致谢。

由于编者的水平有限，书中难免存在一些不足之处，希望广大读者能够批评指正，将不胜感激。

编 者

目 录

第 1 章 伺服控制技术在典型行业的应用分析	1	3.3.1 变流装置	39
1.1 概述	1	3.3.2 直流中间电路	42
1.2 伺服控制在机床行业的应用	3	3.3.3 开关电源电路	42
1.3 伺服控制在纺织行业的应用	4	3.3.4 逆变电路	43
1.4 伺服控制在包装行业的应用	5	3.4 伺服控制回路	44
1.5 伺服控制在印刷行业的应用	6	3.4.1 PID 调节器基础	45
第 2 章 伺服电机基础	7	3.4.2 伺服控制电流环	47
2.1 伺服电机基本原理	8	3.4.3 速度环 PI 设计	51
2.2 永磁同步伺服电机	11	第 4 章 伺服电机与驱动的检测技术	52
2.2.1 永磁体技术基础	11	4.1 伺服电机的术语	52
2.2.2 永磁同步电机的结构形式	13	4.2 伺服电机的检测项目与检测方法	54
2.2.3 永磁同步伺服电机运行原理	16	4.3 伺服驱动器的检测标准与方法	61
2.3 异步伺服电机	17	4.4 伺服驱动器的 EMC 及环境测试	65
2.4 直接驱动伺服电机	21	4.4.1 伺服驱动器的 EMC 测试	65
2.4.1 力矩电机	21	4.4.2 伺服驱动器的环境测试	68
2.4.2 直线电机	23	4.5 伺服驱动测试实例	69
2.5 铁芯分割式伺服电机定子制造工艺	26	4.5.1 输入/输出功能测试实验	71
2.5.1 技术概述	26	4.5.2 伺服控制 PWM 死区时间实验	76
2.5.2 铁芯分割式定子构造	27	4.5.3 速度控制性能测试	77
2.6 永磁式电机的齿槽定位转矩	28	4.5.4 扭矩控制实验	81
2.6.1 齿槽定位转矩概述	28	4.5.5 伺服控制 SMPS 的性能实验	81
2.6.2 齿槽转矩抑制方法	28	4.5.6 伺服控制 DC-Link 性能实验	91
第 3 章 伺服控制理论基础	32	第 5 章 伺服电机及驱动的选择型技术	93
3.1 矢量控制原理	32	5.1 电机选择的基本方法	93
3.1.1 永磁同步电机的数学模型与坐标变换	32	5.2 电机的规格、定额与容量的选择	94
3.1.2 永磁同步电机矢量控制方法	34	5.3 选择伺服电机考虑的问题	95
3.2 PWM 控制技术基础	35	5.4 负载转矩及转动惯量的计算	97
3.3 伺服驱动主回路	38	5.5 永磁同步伺服电机的选型	99
		5.6 直接驱动伺服电机的选型	102
		5.6.1 直线电机的选型	102
		5.6.2 力矩电机的选型	106

5.7 伺服驱动外围电路选型技术	108	优化	170
5.7.1 主电路、控制电路用电线	109	7.5.1 速度环的优化说明	171
5.7.2 变压器	110	7.5.2 位置环的优化说明	172
5.7.3 配线用断路器和漏电 断路器	110	7.5.3 西门子 611D 优化详细 步骤	174
5.7.4 电磁接触器	111	7.5.4 611D 速度控制环的设定	175
5.7.5 电抗器和滤波器	112	7.5.5 位置环优化	178
5.7.6 制动电阻	113		
5.8 驱动装置选型实例	115	第 8 章 基于 PROFIBUS 的 SIMODRIVE 611U 系列伺服驱动	181
5.8.1 工程选型步骤	115	8.1 SIMODRIVE 611U 接口端子	182
5.8.2 电源模块的选择	115	8.2 SIMODRIVE 611U 的连接方式	192
5.8.3 外围部件的选择	120	8.2.1 使用显示器和操作人员 进行参数化	193
第 6 章 伺服控制的测量系统	125	8.2.2 通过 RS232/RS485 连接	195
6.1 测量系统基本原理	125	8.2.3 PROFIBUS-DP 模块的 连接	197
6.2 编码器测量系统	126	8.2.4 611U 驱动的初始化设置	198
6.2.1 增量式光电编码器	126	8.3 PROFIBUS 通信控制基础	199
6.2.2 绝对值编码器	131	8.3.1 硬件组态	199
6.2.3 多圈绝对值编码器	135	8.3.2 控制字的功能描述	202
6.2.4 光电编码盘的制造技术	137	8.4 611U 速度环控制的调试	210
6.2.5 混合式光电编码器	139	8.4.1 速度环基本调试	210
6.3 旋转变压器	145	8.4.2 通过 PROFIBUS 通信控制 速度	212
6.4 光栅尺	147	8.4.3 固定速度值运行	213
6.5 磁尺	149	8.4.4 主轴定位控制	215
6.5.1 磁尺的分类	149	8.5 读写 PKW 参数区域	217
6.5.2 磁头	150	8.5.1 PKW 参数区的结构与基础	217
第 7 章 伺服驱动的优化技术	152	8.5.2 读写参数	219
7.1 伺服系统的参数调整理论基础	152	8.6 驱动 611U 的位置控制运行	222
7.1.1 伺服驱动的控制回路	152	8.6.1 电机点动运行——Jog	222
7.1.2 优化基本概念	153	8.6.2 返回参考点	224
7.1.3 机械建模分析	156	8.6.3 MDI 方式运行	225
7.2 频率响应的测量点	160	8.6.4 AUTO 编程序段运行	227
7.3 伺服驱动相关参数的设定	165		
7.4 伺服控制特性的整定	166	第 9 章 伺服控制技术的应用实例	229
7.4.1 交流伺服系统速度控制特性及 整定	166	9.1 基于伺服控制技术的磁场磁力 三维测试系统	229
7.4.2 交流伺服系统位置控制特性及 整定	167		
7.5 西门子 SIMODRIVE 的驱动			

9.1.1 主要硬件及结构设计	229	应用基础	250
9.1.2 位置伺服控制实现	234	9.2.2 西门子 611U 伺服驱动在组合 机床上的应用	252
9.1.3 测试装置的伺服性能和技术 参数	237	9.3 基于高端运动控制卡的全自动 玻璃切割机	266
9.1.4 测试系统软件设计原理及 结构	241	9.3.1 运动控制系统架构	267
9.2 西门子 SIMODRIVE 611U 的 典型应用	250	9.3.2 伺服连接与伺服调整	269
9.2.1 西门子 SIMODRIVE 611U 的		9.3.3 软件系统设计	278
		参考文献	280

第 1 章 伺服控制技术在典型行业的应用分析

1.1 概述

伺服产品在我国还属于技术含量较高的领域，目前主要应用在机床、工业机器人、印刷机械、包装机械、塑料机械和纺织机械等行业。20 世纪末，国产交流伺服电机及其全数字式伺服驱动器基本自主开发成功，然而，由于产业化滞后，产品的应用还依靠进口。从 2004 年起，我国的伺服控制系统无论是在应用或是在市场研讨方面均渐成关注点。

伺服产品的运用以机械配套使用为主，目前在机床工具、包装、纺织、印刷、电子设备等行业的运用相对较多，2005 年这几个行业的伺服市场占到整个市场的一半以上。

在所有的行业中，机床行业依然是伺服产品用量最多的行业，这种状况在未来几年内将持续。包装是潜力最大的行业市场，中国包装行业装备水平与国外水平差距最大，是伺服产品潜力巨大的市场。此外，印刷也是潜力较大的行业。同时，伺服产品在玻璃加工、汽车、医疗设备、通信、安防、仪器和试验装置上也大量使用。

“伺服机构系统”源自英文“servomechanism system”，指经由闭环控制方式达到一个机械系统的位置、速度或加速度的控制。伺服的概念应该从控制任务的层面去理解，伺服的任务就是要求执行机构能够快速、平滑、精确地执行上位控制装置的指令要求。

一个伺服系统的构成通常包含被控对象 (plant)、执行器 (actuator)、控制器 (controller) 等几部分，机械手臂、机械工作平台通常作为被控对象。执行器的功能在于主要提供被控对象的动力，执行器包含了电机与功率放大器，特别设计应用于伺服系统的电机称之为伺服电机 (servo motor)，通常内含位置反馈装置，如光电编码器 (optical encoder)、旋转变压器 (resolver)，目前主要应用于工业界的伺服电机包括直流伺服电机、永磁交流伺服电机、感应交流伺服电机，其中又以永磁交流伺服电机占绝大多数。控制器的功能在于提供整个伺服系统的闭路控制，如扭矩控制、速度控制、位置控制等。目前一般工业用伺服驱动器 (servo drive) 通常包含了控制器与功率放大器。图 1-1 所示为一般工业用伺服系统组成框图。

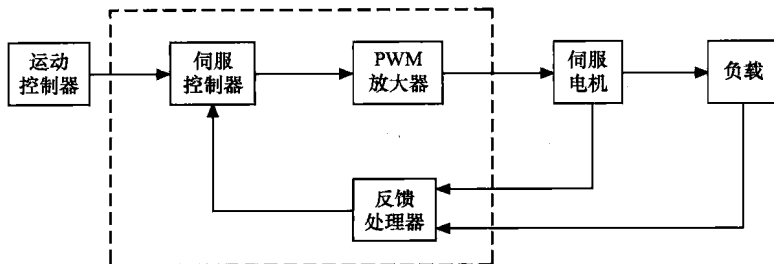


图 1-1 一般工业用伺服系统组成框图

目前，高性能电伺服系统，大多采用永磁同步交流伺服电机，控制驱动器大多采用快速、

准确定位的全数字位置伺服系统。国外主要生产永磁交流伺服系统的生产商及其系列产品列表如表 1-1 所示，其中 Kollmorgen 公司工业驱动分部的“金系列”（Goldline）代表了当前永磁交流伺服技术的最新水平。

中国伺服驱动发展迅速，市场潜力巨大，应用广泛，不断有新的企业进入到这一行业来，但目前在国内市场上比较有影响的产品却不是非常多。市场的占有量以日本品牌为主，达到 40%~50%，其次是欧美伺服产品，再者就是中国自产的伺服产品。这些厂家的伺服产品各有特色：日本伺服进入中国市场较早，产品性能、质量较好，价位较高；而欧美的伺服产品性能和功能最好，价格最高；国产伺服产品在性能和功能方面暂时逊色很多，只能跟在欧美和日本的后面走，但是具有明显的价格优势。

国内广泛采用的通用伺服品牌如下。

日系：三菱、安川、松下、三洋、富士、日立等。

欧系：Lenze、AMK、Rexroth、KEB 等。

美系：Danaher（原 Kollmorgen）、Baldor、Parker、Rockwell 等。

数控和高端运控伺服品牌：Siemens、Fanuc、三菱、Rexroth 等。

数控伺服情况与数控系统状况相当，Siemens 和 Fanuc 为主，三菱次之。

国产通用伺服主要有台达、东元、和利时、埃斯顿、时光、珠海运控、星辰伺服、步进科技等；国产数控伺服主要有华中数控、广州数控、大森数控、凯奇数控等；国产伺服电机主要有华大、登奇、强磁（苏强）、中源等。

以下 3 个方向可以说是伺服发展的突破口：

第 1 个方向是伺服的功能最简单实用、价格成本最低，这部分伺服可以适应国内对低成本设备的大量需求及部分步进电机的市场。

第 2 个方向就是专用伺服领域，在某些特殊行业中，伺服的用量非常大，如袜机、绣花机、喷绘机等行业。由于这些行业只需要伺服的个别功能，因此可以专用伺服打开这部分行业的市场。

第 3 个方向也是以后发展的主要方向，即发展高端、高性能的伺服市场。

表 1-1 国外永磁交流伺服系统厂商及其系列产品一览表

序号	生产商	系列产品
1	日本安川电机公司	D、R、M、F、S、H、C、G 共 8 个系列，功率范围 0.05~6kW
2	日本法兰克公司（Fanuc）	S 系列：13 种规格；L 列：5 种规格
3	日本三菱电机公司	HC-KFS、HC-MFS、HC-SFS、HC-RFS、HC-UFS 系列
4	日本松下电器公司	全数字 MINAS 系列，其中小惯量 MSMA 系列：功率范围 0.03~5kW，18 种规格；中惯量 MDMA、MGMA、MFMA 系列：功率范围 0.75~4.5kW，23 种规格；大惯量 MHMA 系列：功率范围 0.5~5kW，7 种规格
5	德国 Rexroth 公司 Indramat 分部	MAG 系列，共 7 个机座号，92 种规格
6	德国西门子公司	IFTS 三相永磁交流伺服电机，分标准型和短型 2 大类，8 个机座号，98 种规格

续表

序号	生产商	系列产品
7	德国 BOSCH 公司	SD 铁氧体系列: 17 种规格, SE 稀土永磁系列: 8 种规格, 配 Servodyn SM 系列驱动控制器
8	美国 Gettys 公司	先期推出 M600 系列和 A600 系列, 后期推出 A700 全数字化交流伺服系统
9	美国 A-B 公司 (Allen-Bradley)	1326 型铁氧体系列, 1391 型 PWM 伺服控制器, 3 个机座号, 30 种规格
10	I.D. (Industrial Drives, Kollmorgen 工业驱动分部) 公司	Goldline 系列, 其中包括 B (小惯量)、M (中惯量)、EB (防爆) 3 大类, 有 10、20、40、60、80、5 种机座号, 每个机座号 42 种规格, 全部采用钕铁硼永磁。力矩范围 0.84~111.2N·m, 功率范围 0.54~15.7kW
11	爱尔兰 Inland 公司 (现并入 AEG 公司)	有 3 种机座号: BHT1100、2200、3300, 共 17 种规格, 采用 SmCo 永磁, 配有 8 种控制器
12	法国 Alsthom 集团 Parvex 工厂	LG (长型) 和 GC (短型) 系列, 14 种规格, 配 AXODYN 系列伺服驱动器
13	原苏联 (公司名不详)	д BY 铁氧体系列: 2 个机座号, 12 种规格, 力矩范围 7~35N·m; 2 д BY 稀土永磁系列: 6 个机座号, 17 种规格, 力矩范围 0.13~170N·m。均配套 3 д B 型控制器
14	韩国三星公司	FAGA 全数字控制交流伺服电机及驱动器系列, 其中有 CSM、CSMG、CSMZ、CSMD、CSMF、CSMH、CSMN、CSMX8 种型号, 功率范围 15W~5kW

除了上述公司的永磁伺服系统产品外, 尚有日本东芝精机公司 (SM 系列)、信浓电机公司 (CC 系列)、大隈铁工所 (BL 系列)、三洋电气公司 (BL 系列)、立石电机公司 (S 系列) 等厂商也在角逐永磁交流伺服系统的市场份额。

我国微特电机工业在新世纪要由生产大国转向既是生产大国又是技术强国, 开发自主知识产权的永磁交流伺服系统, 也是一个非常重要的途径和举措。

1.2 伺服控制在机床行业的应用

在数控机床中, 伺服驱动接收数控系统发出的位移或速度指令, 经驱动器之后, 由伺服电机和机械传动机构驱动机床坐标轴、主轴等, 带动工作台及刀架运动, 通过轴的联动使刀具相对工件产生各种复杂的机械运动, 从而加工出图纸所要求的工件, 如图 1-2 所示。

机床上所有设计到的电机驱动按照功能可以分为进给轴驱动、主轴驱动以及辅助驱动。

进给伺服以数控机床的各坐标为控制对象, 产生机床的切削进给运动。进给轴驱动有两个任务: ①快速进给; ②工件或刀具的工进。工进时进给轴按照编程的轮廓运行, 运行速度较低。对于进给轴需要具有以下特点: 宽的调速范围; 高转矩; 转矩、转速波动范围小; 驱动及电机的物理尺寸小, 也就是功率密度高; 易于维护。进给轴电机一般采用永磁同步电机、直线电机, 电机控制技术通常称为伺服控制, 相应的电机也称为伺服电机。

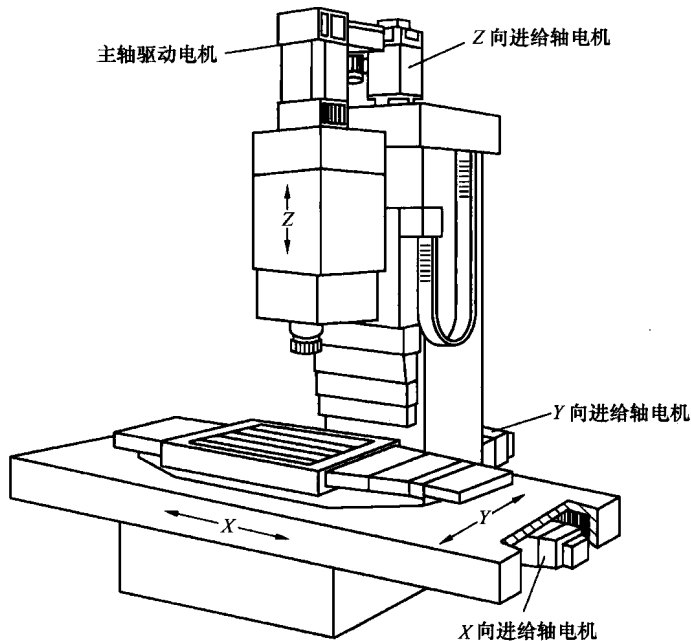


图 1-2 伺服控制在机床中的应用

主轴驱动用于带动刀具或工件旋转运动，它的主要任务就是去除工件的加工余量。对于主轴驱动要求能够长时间运行，因此要求主轴驱动能够具有恒定的输出功率，以快速地去掉毛坯的加工余量；需要在恒定输出功率情况下的宽调速范围；在不同的切削工况下的速度调整平滑性能；切削小工件时具有较高的最大转速。

另外，要求机床有螺纹加工、准停和恒线速加工等功能时，对主轴也提出了相应的位置控制要求，因此，要求其输出功率大，具有恒转矩段及恒功率段，有准停控制，主轴与进给联动，零速信号等功能。通常主轴电机采用异步电机、电主轴，异步电机需要在非负载端集成编码器作为反馈测量系统，电主轴有异步式电机或永磁同步式电机，异步式主轴电机也可以称为异步伺服电机。

辅助电机驱动主要用于控制，例如传送装置、液压泵、空压机、风扇、排屑装置等。通常使用的是异步电机，或使用变频器，或直接连接到主电源，通过 PLC 来控制。

目前，机床的伺服控制技术主要有模拟式和数字式。在数控机床中，位置环通常是由数控系统来实现的，伺服控制器主要实现速度环和电流环的控制。

作为数控机床的重要功能部件，伺服系统的特性一直是影响系统加工性能的重要指标。围绕伺服系统动态特性与静态特性的提高，近年来发展了多种伺服控制技术。可以预见随着超高速切削、超精密加工、网络制造等先进制造技术的发展，具有网络接口的全数字伺服系统、直线电机及高速电主轴等将成为数控机床行业关注的热点，并成为伺服系统的发展方向。

1.3 伺服控制在纺织行业的应用

纺织是典型的物理加工生产工艺，整个生产过程就是纤维之间结构的整理和再组织的过程，在化纤的产生和织物的处理方面也包括一些工艺流程。传动是纺织行业控制的重点。纺

1.5 伺服控制在印刷行业的应用

伺服控制产品很早就开始应用于印刷机械，主要是在印中机械上，包括卷筒纸印刷中的张力控制、彩色印刷的自动套色、墨刀控制和给水控制，其中自动套色的位置控制需求量最大。

伺服驱动技术去除了机械传动的影 响，使得机速可以达到 213.36m/min (700 英尺/分)。可以对机器进行特定的功能组合：前面是印刷部分、模切、涂胶折叠、堆码等，背后是由伺服电机连接。可以完成模切、折叠和堆码过程，而不用任何的人力操作。

因为其闭环控制系统，伺服电机提高了机器对各种印刷承印物的传动精度并具有更高的动态套印精度，消除了因印版滚筒和承印滚筒齿轮连接而产生的共振以及表面线速度不精确的影响。

使用伺服驱动印刷机，从完全的停机状态到正常的印刷生产速度——91.44m/min (300 英尺/分) 或者 121.92m/min (400 英尺/分)，或者其他任何需要的速度，可以有更好的动态套印、更稳定的生产套印以及更好的套印恢复。

准备速度快，极少甚至没有标签原材料浪费，允许预套印等，机器起动就可以达到很好的套印。运作一个工件一次，下次即可完全调出此工单的设置，从而快速投入生产。套印的快速反应和操作简单直接带来了印刷损耗的降低。通常情况下，机器起动过程中的材料损耗非常小，有一个机器长度那么长，而一般的机械传动印刷机大概需要 3~4 个机器长度。关于减少了浪费的具体数据，会随着操作人员的不同而不同，随着机器的不同而不同。但总体来讲，准备过程更快了，达到生产套印的过程更快了，材料损耗降低了。

应用伺服驱动技术，除了能够提高套印精度和反应速度外，张力控制也得到极大的改善，使得机器在生产重复性订单时显得更加高效。除了控制印刷密度、缩短准备时间、减少材料浪费等优点外，通过使用伺服技术，还可消除机器使用过程中老化带来的产品质量问题，比如版滚齿轮和压印滚齿轮的啮合不好带来的墨杠等。这也大大拓宽了印刷机的承印范围，而不需要印刷操作人员花大量的时间来更换机器的传动装置。除此之外，市场对组合式印刷机的需求量也越来越大，包括柔印、丝印、凹印和平版印刷的组合。

然而，由于价格的原因，目前国产印刷机基本上没有采用全自动套色功能，而是采用了半自动的套色方案，使用步进产品和人工校准的办法。国内只有国家级的新闻出版单位的印刷厂和外资印刷厂会采购全自动套色印刷机，这类设备的价格都接近 1000 万元或者更高，通常采用进口品牌的设备，如海德堡和罗兰。

目前在印刷行业表现最好的品牌为 Mitsubishi，它为一些重点企业提供成套解决方案，包括 PLC、CC-Link 组件、伺服、变频器及电器产品。其他品牌如 Sanyo、和利时电机、Panasonic 等也拥有一定的客户。

由于广告、包装、新闻出版等印刷市场的逐步成熟，中国对印刷机械的需求将保持稳定增长，尤其是对中高端产品的需求增长较快。因此，印刷行业对伺服控制产品的需求也将快速增长。

第 2 章 伺服电机基础

按照“伺服”的概念，伺服电机并非单指某一类型的电机，只要是在伺服控制系统中能够满足任务所要求的精度、快速响应性以及抗干扰性，就可以称之为伺服电机。通常，控制电机为能够达到伺服控制的性能要求，都需要具有位置/速度检测部件。表 2-1 和表 2-2 所示为电机的不同分类形式。

表 2-1 按照原理分类

电机 (电动机)	电磁型电机	直流电机		电磁型直流电机					
				永磁式直流电机	有刷直流电机				
					无刷直流电机				
		交流电机		感应式电机 IM (异步电机)	三相异步电机	笼型异步电机			
						绕线型异步电机			
				同步电机 SM		单相/两相异步电机			
						永磁式同步电机			
		电磁型同步电机							
		步进电机		磁阻电机					
				磁滞电机					
				VR					
				PM					
		非电磁型电机		HB					
				齿极型					
超声波电机									
压电控制电机									
		磁滞控制电机							
		静电控制电机							

表 2-2 按照结构分类

电机 (电动机)	旋转电机	内转子型电机			
		外转子型电机			
	直线电机	直流直线电机			
		直线步进电机			

电机(电动机)	直线电机	交流直线电机	直线感应电机	
			直线同步电机	磁阻型
				永磁型 (SPM & IPM)
			超导型	

伺服电机可以是交流异步电机、永磁同步电机，也可以是直流电机或步进电机，当然还可以是直线电机，但是通常所说的伺服电机多半指的是永磁同步电机。

2.1 伺服电机基本原理

理解伺服电机的基本原理还是从最基本的直流电机分析起。普通的直流电机是带有电刷的，严格说应该称为直流整流子电机。它比较能够实现高精度的速度控制，控制实现起来比较容易、效率比较高并且成本较低。而控制电机的最终目的也就是希望能够达到高精度、高动态性能、控制容易且效率高。因此，理解直流电机是分析伺服电机的基础。

直流电机的基本原理就是利用洛仑兹力定律 ($F = iBl$) 产生转矩。图 2-1 为洛仑兹力的示意图，一个载流导体位于一个磁场中，空间上与磁力线垂直，这样会产生一个力（洛仑兹力），它与磁力线垂直，与导体垂直。

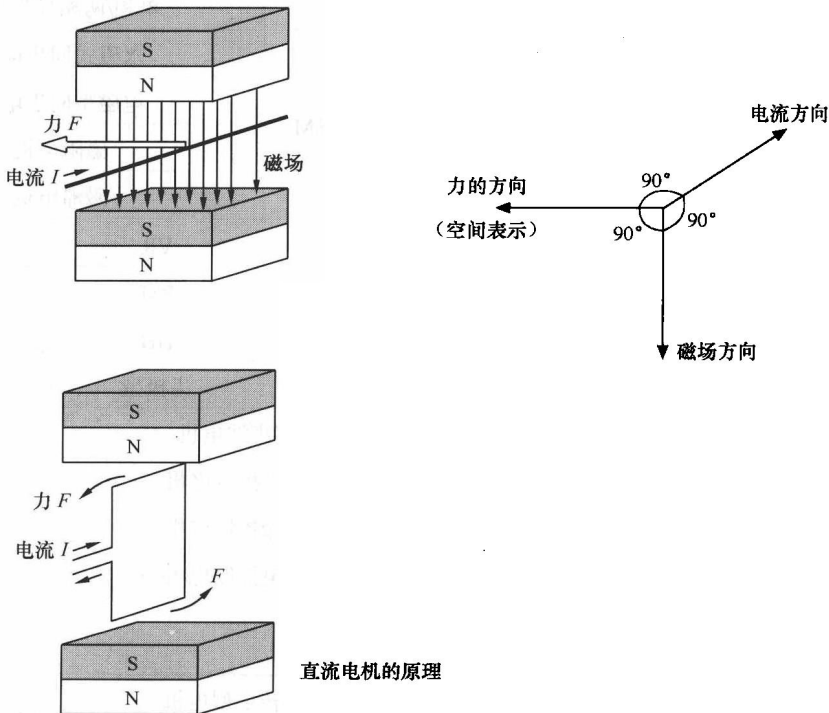


图 2-1 洛仑兹力

为了连续旋转的实现，需要电刷和换向器，换向器也常称为整流子。如图 2-2 部分所描述的，换向器是由相互绝缘的 2 片整流子片构成，而线圈的 2 个引出线分别接到整流子

片上。线圈的上下2个边产生的洛仑兹力让线圈逆时针转起来，当线圈转过90°时，在电刷和整流子的作用下，流过线圈的电流反向，根据洛仑兹力的原理，产生的力继续维持逆时针方向旋转。

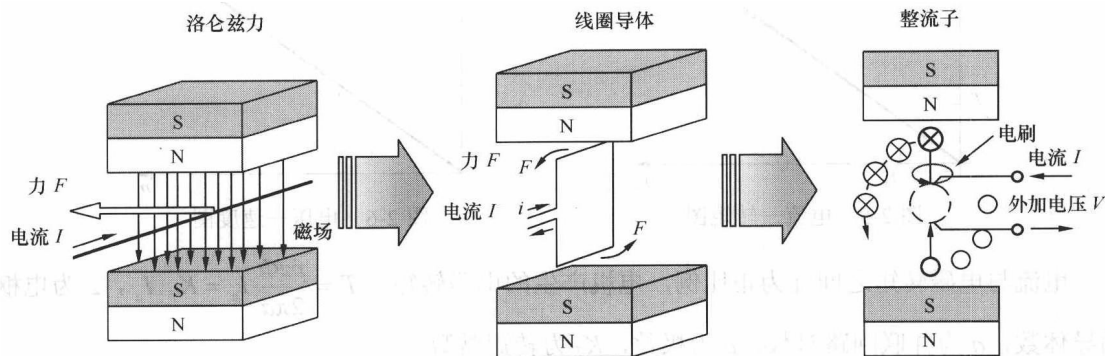


图 2-2 直流电机旋转的基本原理

事实上，用图 2-3 能够进一步描述励磁电流与电枢电流之间的关系。洛仑兹力可以用下面这个公式来表示： $f = iBl\sin\theta$ ， θ 角度表示磁场方向与电流方向的夹角。如果这个角度为 90°，则显然得出的洛仑兹力最大，也就是说电流方向与磁场方向垂直的时候能够有最大出力。这也就解释了为什么在设计电机时，会让电枢电流与磁场相互正交，因为这样可以使得电机得到最大出力。

结合图 2-2 的第 3 部分，假设外加的电枢电压为 V ，在导体中会感应出一个相反的电动势，方向与导体上原来的电流方向相反。这个电动势称为反电动势 EMF，在分析电机运行时尤为重要。

假设 E_g 为反电动势， $E_g = N \frac{d\Phi}{dt}$ ， N 为电枢绕组的匝数， Φ 为每极下的磁通。

根据直流电机的等效电路（如图 2-4 所示）， $V = I_a(r_f + r_a) + E_g$ 。式中 $r_f + r_a$ 为电枢绕组阻抗， I_a 为电枢电流， V 为电枢电压。

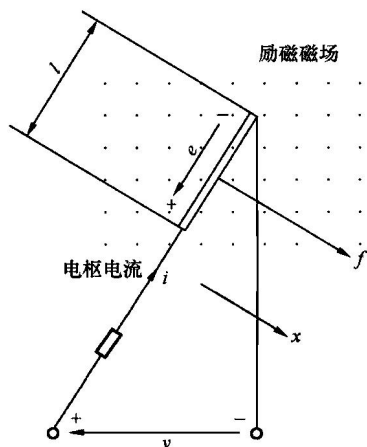


图 2-3 励磁电流与电枢电流之间的关系

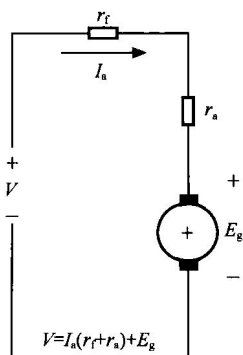


图 2-4 直流电机的等效电路

在直流电机中，电流—转矩图以及电压—速度图是理解直流电机运行的关键，如图 2-5、