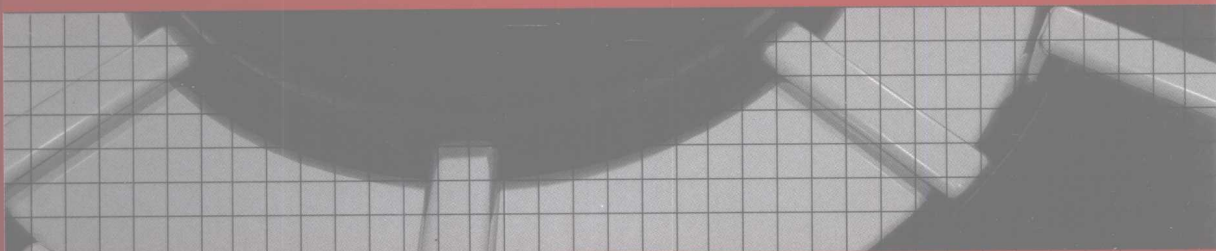




伺服与运动控制系统设计



■ 田宇 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



伺服与运动控制 系统设计

■ 田宇 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

伺服与运动控制系统设计 / 田宇编著. -- 北京 :
人民邮电出版社, 2010.5
ISBN 978-7-115-22363-0

I. ①伺… II. ①田… III. ①伺服系统—系统设计
IV. ①TP275

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第024552号

内 容 提 要

本书围绕运动与伺服控制技术, 首先介绍了运动系统的基本概念; 然后分章对运动系统的各个组成部分, 包括伺服电机、伺服驱动编码器、伺服驱动器和运动控制器等, 进行了详细的介绍, 同时还介绍了伺服系统优化方面的内容; 最后举例说明了伺服控制的应用, 以加深读者对运动与伺服系统的认识。

本书是自动化控制领域广大技术人员的实用自学手册, 也可供高等院校自动化、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。

伺服与运动控制系统设计

-
- ◆ 编 著 田 宇
责任编辑 韦 毅
 - ◆ 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>
北京铭成印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 9.25
字数: 220千字 2010年5月第1版
印数: 1-4000册 2010年5月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-22363-0

定价: 29.00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

目前，运动控制系统在机械工业自动化中的运用日益增多。但国内市场上大部分品质优良的运动控制系统（包括伺服控制技术）都依赖于进口，并且对于控制系统的应用仅限于使用经验，而使用经验的积累也大都是点滴记录，少有完整的系统论述的书籍，同时又缺乏理论依据。本书立足于伺服电机、驱动器、控制器的原理特性，对于伺服系统日常问题及各种常用功能进行解释，注重理论与经验相结合。针对系统设计者，本书讲述了如何选购各种组件，如何构建一个优良的系统；针对使用者，对系统运行中的各种现象给予了合理的解释；针对设备研发者，则向其推荐各种先进功能及其实现方法。因此，无论是系统设计者、使用者、学生还是研发人员，都能通过本书学习到伺服与运动控制的相关知识。

西门子运动控制器因其性能在控制行业处于优势地位，本书以西门子运动控制系统作为主线，但并不局限于该公司的产品，每章内容都是从伺服系统的共性出发展开，然后以西门子产品为例进行总结。因此，无论是西门子产品的使用者还是其他产品的使用者，都能通过本书得到借鉴。

本书作者希望通过深厚的控制理论基础与多年积累的应用经验，用简单易懂的语言向读者展示控制的魅力和伺服的魅力。全书共分为7章，第1章首先从概念上介绍什么是运动控制系统，什么是伺服控制，接着介绍伺服系统的构成以及各个构成部分对系统性能的影响，然后讨论运动控制系统的发展趋势。第2章至第6章分别对运动控制系统的构成（包括伺服电机、编码器、驱动器、运动控制器）进行详细介绍，同时也介绍了伺服系统优化方面的内容。第7章针对西门子运动控制系统在不同行业的应用举例进行说明，以加深读者对伺服应用的理解。

由于作者水平有限，加之时间仓促，书中错误和疏漏之处在所难免，恳请广大读者不吝指正。对本书有任何意见或建议，请发送至本书责任编辑的信箱 weiyi@ptpress.com.cn，衷心感谢！

作 者

目 录

第 1 章 运动系统的基本概念	1
1.1 运动控制的定义	1
1.2 伺服系统的定义	2
1.3 伺服系统的组成	2
1.4 伺服系统的性能要求	4
1.5 影响伺服系统性能的因素	5
1.6 交流永磁同步电机伺服系统	7
1.7 交流伺服的行业应用	8
1.8 伺服技术的发展过程及趋势	10
第 2 章 伺服电机	13
2.1 伺服电机的介绍	13
2.2 伺服电机的特点	13
2.3 伺服电机的分类	14
2.3.1 同步电机与异步电机	14
2.3.2 永磁同步电机与无刷直流电机	14
2.4 电机数据	15
2.5 西门子伺服电机	22
2.5.1 1FK、1FT 同步伺服电机	22
2.5.2 1FW 系列扭矩电机	23
2.5.3 1FN 系列直线电机	27
2.5.4 1PH7、1PL6 系列异步电机	29
2.6 伺服电机的选择	30
2.7 带 Drive-CliQ 接口的伺服电机	31
2.8 电机的谐振频率	33
2.9 选择电机的基本原则	34
2.10 电机容量的计算步骤	35
2.11 永磁同步电机的研究现状	35
2.12 永磁同步电机的控制	36
第 3 章 伺服驱动编码器	39
3.1 编码器介绍	39

3.2 伺服编码器的特点与连接	43
3.2.1 EnDat	44
3.2.2 SSI	44
3.2.3 正/余弦编码器	45
3.2.4 编码器的相位调整	47
3.2.5 编码器的倍频	48
3.2.6 编码器的特征参数	49
3.2.7 驱动器与编码器的连接	49
第 4 章 伺服驱动器	55
4.1 交流变频技术的发展	55
4.2 基于矢量控制的伺服控制	57
4.3 伺服系统的控制模型	57
4.4 西门子伺服驱动器介绍	59
4.5 西门子伺服驱动器 Sinamics S120	61
4.6 伺服控制方式	65
4.7 驱动器的过载能力	66
4.8 Sinamics S120 的调试软件	67
4.9 S120 的基本定位功能	68
4.10 Trace 功能介绍	71
4.11 数字滤波器	72
4.12 自动优化功能	75
4.13 功能函数发生器	76
4.14 Measuring 功能介绍	77
4.15 驱动器的通信功能	85
第 5 章 伺服系统的优化	87
5.1 控制器模型	87
5.2 系统模型	88
5.3 伯德图	95
5.4 控制器优化的关键	96
5.5 电流环、速度环、位置环的优化	97
第 6 章 运动控制器	99
6.1 西门子运动控制器 Simotion	100
6.2 工艺对象	101
6.2.1 轴	101
6.2.2 虚轴	102
6.3 运动控制功能	102

6.3.1 定位	102
6.3.2 回零	106
6.3.3 点动	107
6.3.4 齿轮同步	108
6.3.5 圆周测试	109
6.3.6 凸轮	110
6.3.7 路径插补功能	111
6.3.8 凸轮输出	113
6.3.9 快速测量输入	113
6.3.10 位置控制器	114
6.3.11 压力控制器	115
6.4 调试软件 Scout	116
6.4.1 Scout 软件介绍	116
6.4.2 编程语言	117
6.5 Simotion 的执行系统	119
6.6 运动控制器的通信功能	120
6.6.1 与驱动器之间的通信	120
6.6.2 与控制器之间的通信	121
6.6.3 OPC	122
6.6.4 TCP/IP	122
6.7 Simotion 顺应了运动控制的发展趋势	122
6.8 Simotion 的应用场合	123
第 7 章 伺服控制应用举例	125
7.1 印刷	125
7.2 包装	127
7.3 冲压	134
7.4 轨道拖拽系统	135
7.5 飞锯	137
参考文献	140

第 1 章 运动系统的基本概念

1.1 运动控制的定义

从广义上讲，运动控制（Motion Control）就是控制物体的运动。还有人解释运动控制是在电驱动技术研究基础上发展而成的一门综合性、多学科交叉技术。从实现方式上解释，运动控制系统是通过对电动机电压、电流、频率等输入电量的控制，来改变工作机械的转矩、速度、位移等机械量，使各种工作机械按人们期望的要求运行，以满足生产工艺及其他应用的需要。

现代运动控制已成为电机学、电力电子技术、微电子技术、计算机控制技术、控制理论、信号检测与处理技术等多门学科相互交叉的综合性学科，如图 1.1 所示。

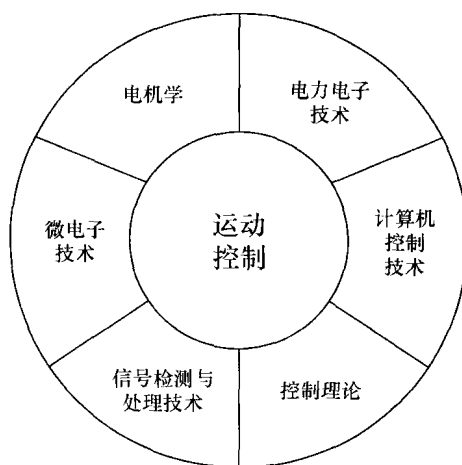


图 1.1 运动控制系统的组成

当谈及运动控制时，人们往往会联想到伺服控制，但是实际上，伺服控制仅仅是运动控制中的一种，即伺服控制是高精度、高速度的运动控制。

当今自动化生产技术中，运动控制代表着用途最广而又最复杂的任务。运动控制系统的发展可以实现驱动控制功能的多样化和复杂性，满足新的生产要求，同时运动控制系统的发展将使生产更灵活，并能提高产品质量和降低设备成本。要实现驱动控制功能的多样化和复杂性，使运动控制系统具有高速度、高精度、高效率和高可靠性这样的四位一体的高性能控制能力，伺服控制便成为运动控制的基础和关键技术之一。本书的主要内容也聚焦到运动控制系统中的伺服控制上。

1.2 伺服系统的定义

伺服来自英文单词“servo”，指系统跟随外部指令进行人们所期望的运动，运动要素包括位置、速度和力矩。伺服系统的发展经历了从液压、气动到电气的过程，而电气伺服系统包括驱动器伺服电机、反馈装置和控制器。

伺服系统是使物体的位置、方位、状态等输出被控量能够跟随输入目标值（或给定值）的任意变化而变化的自动控制系统。

伺服的主要任务是按控制命令的要求，对功率进行放大、变换与调控等处理，使驱动装置输出的力矩、速度和位置能被控制得非常灵活、方便。

伺服系统通常根据伺服驱动机的种类来分类，有液压式、气动式以及电气式。液压伺服系统与电气伺服系统相比有以下 3 个优点。

- ① 体积小，重量轻，惯性小，可靠性好，输出功率大。
- ② 快速性好。
- ③ 刚度大（即输出位移受外负载影响小），定位准确。

液压伺服系统的缺点是加工难度大，抗污染能力差，维护不易，成本较高。

气动伺服系统按功能一般可分为位置控制系统、速度控制系统、力控制系统、位置与力复合控制系统。其中，位置控制系统和力控制系统应用和研究得比较多，速度控制系统应用和研究得比较少。气动伺服的缺点是定位精度低。

电气式伺服系统根据电气信号可分为直流伺服系统和交流伺服系统两大类。交流伺服系统又分为异步电机伺服系统和同步电机伺服系统两种。

本书主要讨论电气式伺服系统中的一种——交流电机伺服系统。

1.3 伺服系统的组成

伺服系统是具有反馈的闭环自动控制系统。它由位置检测部分、误差放大部分、执行部分及被控对象组成，如图 1.2 所示。具体分为以下几个组成部分：

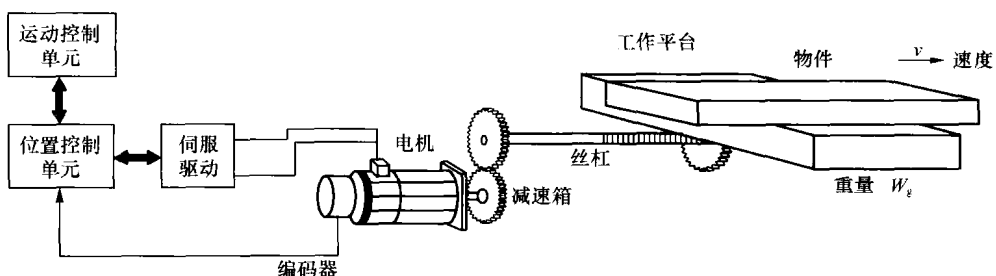


图 1.2 伺服系统构成

- ① 负载；
- ② 机械传动机构（直接刚性轴连接、丝杠、减速机、同步齿形带等）；
- ③ 电机（步进电机和伺服电机）；
- ④ 抱闸（电机内部、外部）；
- ⑤ 反馈元件（各种类型的编码器或传感器）；
- ⑥ 驱动器（电流以及速度的开闭环控制）；
- ⑦ 运动控制器（运动方式、位置控制）；
- ⑧ 供电电源（强、弱电源）；
- ⑨ 限位开关（硬限位）；
- ⑩ 人机界面。

通常情况下，运动控制单元与位置控制单元是一体的，也就是说，位置控制是在运动控制单元中实现的，比如西门子（Siemens）运动控制器 Simotion、TCPU。

图 1.3 所示为西门子整个运动控制系统的装配图。其中，运动控制器（如 Simotion 控制器或者是 PLC）通过 Profibus 对伺服驱动器进行控制，Drive-CLiQ 是伺服驱动器的控制单元、整流单元、电机模块以及编码器进行数据交换的电缆。驱动器与电机的接线包括动力电缆与编码器信号电缆¹。

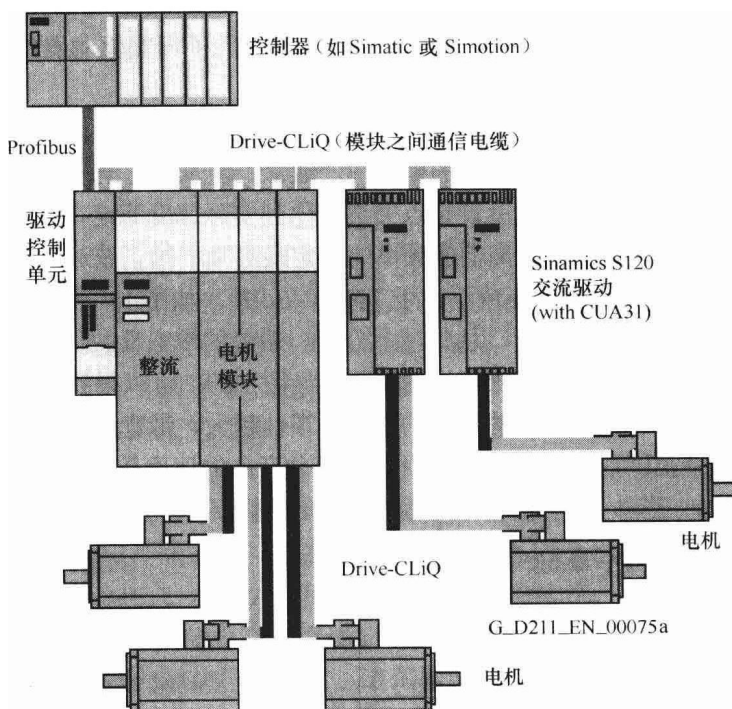


图 1.3 伺服系统实物连接图

¹ 出自 Siemens Simotion function manual。

1.4 伺服系统的性能要求

伺服系统必须具备可控性好、稳定性高和速应性强等基本性能。可控性好是指信号消失以后系统能立即自行停转，稳定性高是指转速随转矩的增加而均匀下降，速应性强是指反应快、灵敏，响态品质好。交流伺服系统的性能指标可以从调速范围、定位精度、稳速精度、转矩波动、动态响应和运行稳定性等方面来衡量。

调速范围是指电机的最高转速与最低平稳转速之比。低档的伺服系统调速范围在 1 : 1 000 以上，一般的在 1 : 5 000 ~ 1 : 10 000，高性能的可以达到 1 : 100 000 以上。定位精度取决于编码器的脉冲数与驱动器对编码器的倍频细分数，例如 2 048 线的编码器，在其倍频数为 2 048 的条件下，理论定位精度可以达到 $360^\circ / (2\,048 \times 2\,048)$ 。过去在测量技术比较落后的情况下，用户还采取附加措施来提高系统的精度，例如将测量元件（如自整角机）的测量轴通过减速器与转轴相连，使转轴的转角得到放大，来提高相对测量精度。采用这种方案的伺服系统称为精测粗测系统或双通道系统。通过减速器与转轴啮合的测角线路称为精读数通道，直接取自转轴的测角线路称为粗读数通道。稳速精度，尤其是低速（比如速度给定 1r/min 时）下的稳速精度，一般在 $\pm 0.1\text{r/min}$ 以内，高性能的可以达到 $\pm 0.01\text{r/min}$ 以内。通常情况下，一些驱动器还以其额定转速的百分数来作为速度精度，例如西门子伺服驱动器的理想速度精度通常为其额定转速的 0.001%。

转矩波动也是衡量伺服系统性能的指标，它是由驱动器、电机以及负载共同决定的。性能优良的伺服系统其转矩波动要求在 $\pm 3\%$ 的范围内。通常，衡量动态响应的指标是系统最高响应频率和上升时间。上升时间指当速度设定点突然变化到实际速度稳定在设定值 $\pm 2\%$ 的范围的时间，其中包括系统的死区延迟。最高响应频率即给定最高频率的正弦速度指令，系统输出速度波形的相位滞后不超过 90° 或者幅值不小于 71% (-3dB)。如图 1.4 所示， $X(t)$ 与 $Y(t)$ 信号分别为系统的输入与输出。另外，从频域上分析，系统的带宽反映伺服系统跟踪的快速性。带宽越大，快速性越好。根据速度闭环的伯德图（见图 1.5），可以得到系统的带宽。伺服系统的带宽主要受控制对象和执行机构的惯性的限制，惯性越大，带宽越窄。通常情况下，伺服系统的带宽会随着功率范围的增加而变小。目前大部分产品的速度频带在 200 ~ 500Hz，少数产品可以达到更高，如三菱伺服电机 MR-J3 系列的响应频率声称可高达 900Hz。

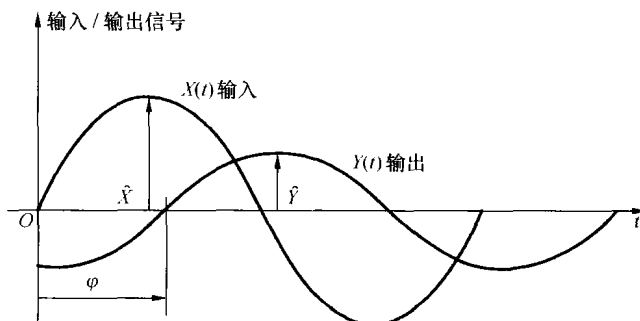


图 1.4 时域范围内的信号曲线

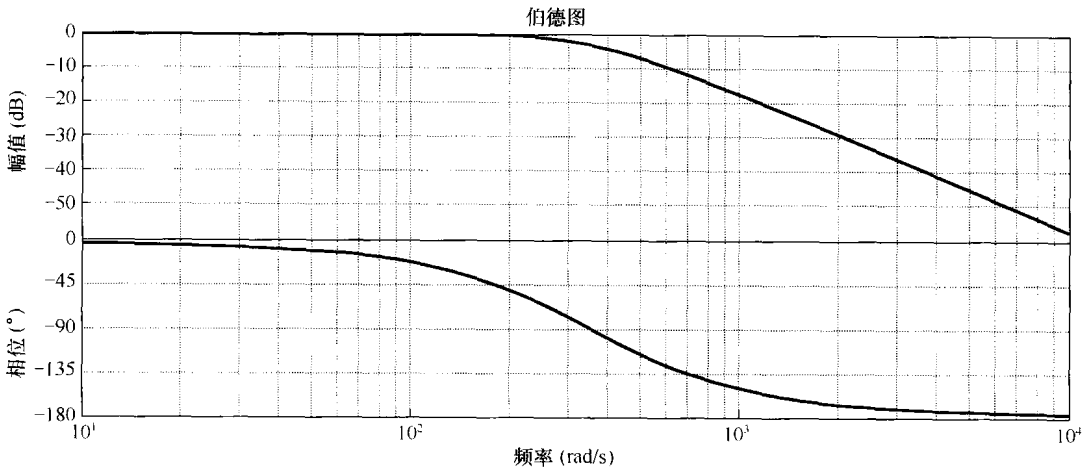


图 1.5 速度闭环的伯德图

运行稳定性主要是指系统在电压波动、负载波动、电机参数变化、上位控制器输出特性变化、电磁干扰以及其他特殊运行条件下，维持稳定运行并保证一定的性能指标的能力。这方面我国产品（包括部分台湾产品）和世界先进水平相比差距较大。

1.5 影响伺服系统性能的因素

(1) 电机

电机是伺服系统的重要组成部分，电机执行能力的好坏将决定整个伺服系统的控制特性。常见的伺服电机可以分为直流调速电机与交流调速电机。和直流电机相比，交流伺服电机没有直流电机的换向器和电刷等带来的缺点。同时，电机的转动惯量、转子阻抗、电刷结构以及散热等都会影响伺服系统的性能。

(2) 编码器

编码器作为控制的反馈元件，也是影响系统精度的重要因素。首先，编码器的脉冲数会直接影响系统的定位和速度控制精度；其次，编码器的最高转速也制约电机的最大转速。目前，用于伺服控制系统的编码器通常为光电编码器，分为增量式、绝对值、正余弦以及旋转变压器等类型。编码器的抗干扰能力会给系统的稳定性带来直接的影响。对于永磁同步电机，正确的转子位置识别也是控制的前提，因此，编码器能提供给驱动器正确的转子位置，也是控制的关键。

(3) 驱动器

驱动器是伺服控制的核心。根据电机类型的不同，驱动器也分为不同的种类，如晶体管放大驱动器、直流驱动器及交流驱动器，目前工控行业比较常见的是交流驱动器。例如，西门子公司推出的 Sinamics S120 驱动器，其实是通过 SPWM 方式来控制电机的，其控制方式是空间矢量控制。通常情况下，电流环与速度环都是在驱动器中实现的，而位置控制可以在运动控制器中完成，也可以在驱动器中实现。电流环与速度环的闭环特性是衡量一个控制系

统性能的标准，如电流环与速度环的采样周期，速度环与电流环的带宽，控制回路上的各种滤波、延迟等，都会影响系统的精度与动态响应能力。

(4) 运动控制器

运动控制是在驱动器的速度环基础上，增加了位置控制、齿轮同步、凸轮、插补等运动控制功能的控制方式。

运动控制器对驱动器的控制方式有 3 种，即数字通信方式、模拟量方式、脉冲方式。

① 数字通信方式：分辨率高，信号传输快速、可靠，可以实现高性能的灵活控制，需要通信协议。例如，西门子的 Simotion 与驱动器之间的数据交换采用基于 Profibus 或 Profinet 的 Profidrive 协议。还有其他一些欧系公司采用 CAN 总线的方式，日系安川公司推出了基于 MECHATROLINK 总线的驱动产品，通过以上的总线方式，实现了传动与运动控制器之间的数据传输控制，特别适合于需要各轴间的协调同步和插补控制的应用，除了实现机械所必需的转矩、位置、速度控制功能以外，还可实现要求精度极高的相位协调控制等。

② 模拟量方式：分辨率低，信号可靠性与抗干扰性能差，但兼容性好。例如，西门子的运动控制器 Simotion 与第三方驱动器之间的控制可以通过模拟量的方式来实现。

③ 脉冲方式：可靠性高，快速性差，灵活性差。驱动对象为步进电机。

在系统选型配置过程中，运动控制器对驱动器的控制方式是设计者需要考虑的重要因素。通信是最稳定、快捷的控制方式，同时要考虑通信的传输速度。通信周期受通信速率与数据量大小的制约，以西门子的运动控制器 Simotion 为例，在传输速率为 1.5Mbit/s 的情况下，控制 6 个以上的轴时，系统的通信周期默认为 3ms。同时，受通信周期的限制，运动控制器的插补周期与位置环采样周期通常为通信周期的整数倍。对于运动控制器来说，其插补周期与位置环采样周期是衡量系统性能的关键。

(5) 机械传动

电机通常靠机械传动结构（如联轴器、齿轮箱、丝杠、传送带、机械凸轮等）与负载相接。这样，联轴器的刚性、齿轮间隙、传送带的松紧都会影响系统的控制精度。例如，对于直线移动的执行部件，电机通常靠同步皮带轮或者丝杠进行连接，同步皮带轮的啮合间隙或者丝杠螺母的滚珠与滚道间隙等，都会对直线运动位移精度造成影响。而对于机械凸轮，必须保证速度或加速度边界条件，才能使系统不至于产生机械谐振。

(6) 负载

作为控制的最终对象，负载对系统性能的影响也不可忽略。负载的转动惯量的大小会影响系统的动态特性，如转动惯量大，其加速与停止过程中会要求系统的输出扭矩大，要求驱动器的驱动能力高。另外，负载与电机的转动惯量比也会影响系统的性能，转动惯量比越小，控制越容易，但电机的效率越低；惯量比大，会给系统的高频带来谐振点，从而增加控制难度。关于负载与电机惯量比的分配，可以参考 Bosch Rexroth 公司给出的“适配标准”²：快速定位 < 2 : 1，修正定位 < 5 : 1，高速率变换 < 10 : 1。

(7) 安装

待上述对象都得到确认后，现场装置的安装也会给整个系统带来新的问题，比如如何做好系统的接地，如何避免 EMC 干扰，使用合适的屏蔽电缆等，都是系统设计不可忽视的问

² 出自 Frank J. Bartos 的《控制系统应用技巧》，《软件》2007 年第 4 期。

题。例如，在编码器的电缆屏蔽层没有真正接地的情况下，反馈信号会夹杂着噪声，这种噪声对控制的精度有很大的影响，甚至会导致装置停机。

(8) 系统的成套性

在整个运动控制系统的设计中，建议使用者尽可能采用同一厂家的产品，包括运动控制器、驱动器、伺服电机等，保证系统的成套性，因为这样能够避免如连线、配置、通信等方面的问题。单独购买各部件所带来的问题首先是连接顺序的复杂化，电机、驱动终端和反馈设备（包括编码器、分解器、霍尔传感器等）可以有多种不同的连接次序。采用同一供应商的电机和驱动器还有一个好处，就是能更好地安装、调试软件，并确保其兼容性³。另外，每一款电机的参数都不一致，与其匹配的驱动器都有其默认参数，从电机参数的识别方式来看，驱动器也有专有的识别方式。对于第三方电机，驱动器所能够识别的程序可能不够准确；而在精密的运动控制系统中，一个参数的差别可能会影响电机的驱动性能，从而影响控制精度。因此，建议用户尽量采用同一厂家的配套产品。

1.6 交流永磁同步电机伺服系统

在 20 世纪 60 年代，最早是直流电机作为主要执行部件，到 20 世纪 70 年代以后，交流伺服电机性价比不断提高，逐渐取代直流电机成为伺服系统的主导执行电机。控制器的功能是完成伺服系统的闭环控制，包括力矩、速度和位置等的控制。通常说的伺服驱动器已经包括了控制器的基本功能和功率放大部分。虽然采用功率步进电机直接驱动的开环伺服系统曾经在 20 世纪 90 年代的所谓经济型数控领域获得广泛使用，但是其迅速被交流伺服所取代。进入 21 世纪，交流伺服系统越来越成熟，市场呈现快速、多元化发展趋势，国内外众多品牌进入市场竞争中。目前，交流伺服技术已成为工业自动化的支撑性技术之一。

在交流伺服系统中，电机的类型有永磁同步交流伺服电机（PMSM）和感应异步交流伺服电机（IM）。其中，永磁同步电机具备十分优良的低速性能，可以实现弱磁高速控制，调速范围宽广，动态特性和效率都很高，已经成为伺服系统的主流之选。而异步伺服电机虽然结构坚固、制造简单、价格低廉，但是在特性上和效率上存在差距，只在大功率场合得到重视。例如，西门子的伺服电机在功率为 30kW 以下多采用永磁同步电机 1FK、1FT 系列，而功率在 30kW 以上多采用 1PH 异步电机。

目前，国外品牌电机占据了我国交流伺服市场 85% 左右的份额，它们主要来自日本、德国和美国，日本品牌有安川、发那科（Fanuc）、三菱、松下、三洋、富士等，美国品牌有罗克韦尔（Rockwell Automation）、丹纳赫（Danaher）、派克（Parker）等，德国品牌有西门子（Siemens）、博世力士乐（Bosch Rexroth），另外还有法国品牌施耐德（Schneider）等。

中国国内的品牌主要有和利时电机、华中数控、广数、兰州电机等，其中和利时电机面向整个自动化产业机械市场提供步进、无刷、伺服等系列产品，在技术上和品牌上有一定优

³ 出自 Frank J. Bartos 的《伺服系统应用技巧》。

势；华中数控、广数和兰州电机等主要集中在数控机床行业，伴随着近几年数控行业的大发展，它们的出货量也保持了快速增长，积累了相对较强的实力。国产品牌产品功率范围多在 5kW 以内，技术路线上与日系产品接近，目前总市场占有率在 10% 左右。

1.7 交流伺服的行业应用

现代交流伺服系统最早被应用到导航和军事领域，比如火炮、雷达控制，后来逐渐进入到工业领域和民用领域。工业应用主要包括高精度数控机床、机器人和其他广义的数控机械，比如纺织机械、印刷机械、包装机械、医疗设备、汽车制造、冶金机械、自动化流水线、各种专用设备等等。

在数控机床中使用永磁无刷伺服电机代替步进电机做进给已经成为标准，部分高端产品开始采用永磁交流直线伺服系统。在主轴传动中采用高速永磁交流伺服取代异步变频驱动来提高效率和速度也成为热点。20 世纪 90 年代以来，欧、美、日各国争相开发应用新一代高速数控机床，高速电主轴单元转速为 30 000~100 000r/min。工作台的进给速度在分辨率为 1 μ m 时达到 100m/min，甚至 200m/min 以上；在分辨率为 0.1 μ s 时，在 24m/min 以上。当今数控机床突出高速、高精、高动态、高刚性的特点，对位置系统的要求包括定位速度和轮廓切削进给速度、定位精度和轮廓切削精度、精加工的表面粗糙度和在外界干扰下的稳定性。这些要求的满足主要取决于伺服系统的静态、动态特性。数控系统由计算机数字控制 (CNC)、伺服驱动器 (SD)、永磁同步伺服电机 (SM) 及位置 (速度) 传感器 (S) 等组成。CNC 用来存储零件加工程序，进行各种插补运算和软件实时控制，向各坐标轴的伺服驱动系统发出各种控制命令。如西门子的 Sinumerik 系列数控系统，可以实现复杂的加工任务。SD 和 SM 接收到 CNC 的控制命令后，快速平滑地调节运动速度并精确地进行位置控制，西门子的 Sinumerik 与驱动器 Simodrive 611 或者是 Sinamics S120 一起构成全数字化的系统，具有革新的系统结构、更高的控制品质、更高的系统分辨率以及更短的采样时间，确保了一流的工作质量。

在机器人领域，无刷永磁伺服系统得到大量应用。工业机器人拥有多个自由度，每台工业机器人需要的电机数量在 10 台以上。国际上工业机器人采用的伺服系统属专用系统，其特点是多轴合一、模块化、特殊的散热结构、特殊的控制方式，并且对可靠性要求极高。国际机器人巨头都有自己的专属伺服系统配套，比如安川、松下和 ABB。工业机器人要求伺服电机作为机器人的手臂和腰、腿的驱动执行元件，要求其体积小、重量轻且能产生大转矩。又由于工业机器人有不同的运动姿态，伺服电机轴上惯量和力矩将发生很大变化，因此，对适应性有更高要求。

纺织行业当前应用伺服的比例很低，但却是未来交流伺服大批量应用的重要行业之一。从 20 世纪 90 年代初期至今，纺织行业的技术进步主要是依靠变频化、PLC 化，只有少量纺织机械采用高档伺服技术用于提高精度和效率。目前已有高档梳棉机、带自调匀整的并条机、新型粗纱机、数控细纱机、分条整经机、浆纱机、印花机等设备应用了交流伺服系统。无梭织机上已经开始采用带交流伺服的电子送经和电子卷取设备，印染设备上也要用到伺服系统。

这些设备每年的伺服用量为 20 000~30 000 套,且几乎全部是进口产品,如 Lenze、Danaher、西门子和 Baumuller,还有三菱和松下等。如西门子 Simotion D 系统借助其标准化的同步、恒张力控制程序在浆纱机、定型机上有很多成功的应用。

无轴(电子轴)传动技术在印刷机上应用,也是目前全球印刷企业和机械制造商的焦点。无轴传动就是用多个单独的伺服电机取代传统的机械传动链,伺服驱动器之间依靠高速现场总线进行联系,通过软件保证各伺服轴与内部的虚拟电子轴严格同步。无轴传动技术为印刷机的生产制造和为印刷业服务革命带来了最佳解决方案,目前欧洲 50%的凹印机采用了无轴技术,日本也有 30%以上采用。其他采用无轴传动的机械包括卷筒纸印刷机、柔印机、上光机、烫金机、模切机等各类印刷设备。这一领域最顶级的伺服控制解决方案提供商是来自德国的博世力士乐、西门子、伦茨以及日本的住友和奥地利的贝加莱。例如,国内某家印刷包装设备有限公司生产的卫星式柔版印刷机(柔版印刷工艺流程如图 1.6 所示)采用了西门子的 Simotion D 控制系统。在该项目中,伺服轴的数目超过 90 个,借助于几个 Simotion D 控制器,控制器与控制器之间进行 Profinet 方式的通信,以实现分布式的同步。

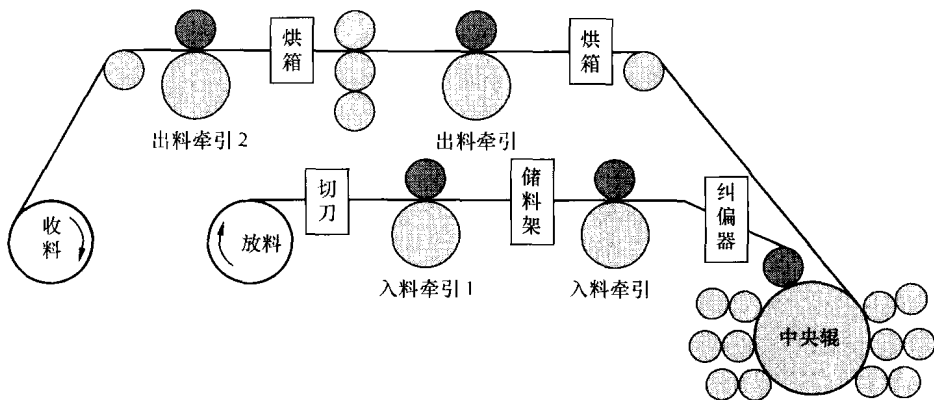


图 1.6 柔版印刷工艺流程

包装设备上,采用伺服控制可以提高单位时间的产量、提高资源利用率、增加品种适应性和提高产品质量,因此,交流伺服在包装机械上的广泛使用只是时间问题。采用数字伺服技术的电子齿轮和电子凸轮将代替传统机械部件;随着价格的下降,成本也逐渐接近纯机械的方案。欧洲 Elau 公司专门针对包装机械设计开发数字伺服和运动控制解决方案,在大型连续包装设备方面居于领先地位,而我国尚没有出现如此专业的解决方案提供商。

汽车行业,伺服系统的应用也日益广泛,如冲压、仪表板生产线都采用了伺服控制系统。有些仪表板生产线上利用西门子 S7-300 PLC 及位控模块 FM357、伺服驱动模块 Simodrive611A、伺服电机 1FK6 构成的控制系统,实现了对发炮机以及转盘线等系统的控制。在冲压生产线上使用西门子的运动控制器 Simotion P 系统,实现了对抓、送料机械手的控制。

另外,如橡胶、连续物料加工、造纸等众多行业都有多处用到伺服控制系统。可以说,随着伺服系统成本的下降以及工业生产需求的不断提升,交流伺服系统的市场范围会不断扩大。

1.8 伺服技术的发展过程及趋势

电气伺服技术应用最广，主要原因是控制方便、灵活，容易获得驱动能源，没有公害污染，维护也比较容易。特别是电子技术和计算机软件技术的发展，为电气伺服技术的发展提供了广阔的前景。

从电机发展过程看，异步交流伺服电机特性软，并且控制比同步电机复杂。步进电机一般为开环控制而无法准确定位，电机本身还有速度谐振区，PWM 调速系统对位置跟踪性能较差，变频调速较简单但精度有时不够。直流电机伺服系统以其优良的性能被广泛地应用于位置随动系统中，但也有其缺点，例如结构复杂，在超低速时死区矛盾突出，并且换向刷会带来噪声和维护保养问题。考虑以上不足，无刷直流电机（BLDCM）用装有永磁体的转子取代有刷直流电机的定子磁极，将原直流电机的电枢变为定子。有刷直流电机是依靠机械换向器将直流电流转换为近似梯形波的交流电流供给电枢绕组，而无刷直流电机是将方波电流（实际上也是梯形波）直接输入定子。这种方波会引起系统转矩的波动，系统的平稳度不如永磁交流伺服电机。

由于永磁材料的性能不断提高，价格不断下降，控制又比异步电机简单，容易实现高性能等缘故，永磁同步电机的交流伺服系统应用更为广泛。

在控制策略上，基于电机稳态数学模型的电压/频率控制方法和开环磁通轨迹控制方法都难以达到良好的伺服特性，目前普遍应用的是基于永磁电机动态解耦数学模型的矢量控制方法，这是现代伺服系统的核心控制方法。虽然人们为了进一步提高控制特性和稳定性，提出了反馈线性化控制、滑模变结构控制、自适应控制等理论，还有不依赖数学模型的模糊控制和神经网络控制方法，但是大多是在矢量控制的基础上附加应用这些控制方法。此外，高性能伺服控制必须依赖高精度的转子位置反馈，当前的转子位置识别都是靠对编码器的 Z 脉冲或者 C/D 通道的识别来实现的，这给控制系统带来很大难度。人们一直希望取消这个环节，于是发展了无位置传感器技术（Sensorless Control）。至今，在商品化的产品中，采用无位置传感器技术只能达到大约 1:100 的调速比，可以用在一些低档的、对位置和速度精度要求不高的伺服控制场合中，比如单纯追求快速启停和制动的缝纫机伺服控制。这个技术的高性能化还有待进一步发展。

从前面的讨论可以看出，数字化交流伺服系统的应用越来越广，用户对伺服驱动技术的要求越来越高。总体来说，伺服系统的发展趋势可以概括为以下几个方面。

（1）交流代替直流

伺服技术将继续迅速地由直流伺服系统转向交流伺服系统。从目前国际市场的情况看，几乎所有的新产品都是交流伺服系统。在工业发达国家，交流伺服电机的市场占有率已经超过 80%。如西门子正在致力推出 Sinamics S120 交流伺服装置，而传统机床上的直流伺服 6RA26 设备将逐渐被淘汰。可以预见，在不久的将来，除了在某些微型电机领域之外，交流伺服电机将完全取代直流伺服电机。

（2）数字代替模拟

模拟控制器常用运算放大器及相应的电气元件实现，具有物理概念清晰、控制信号流向