

# 交流伺服系统

---

郭庆鼎 王成元 编著



机械工业出版社

# 交流伺服系统

郭庆鼎 王成元 编著



机械工业出版社

# (京) 新登字 054 号

本书主要介绍永磁式同步电动机交流伺服系统的组成与工作原理。着重论述了机电一体化产品与伺服技术基础,伺服系统用的各种传感器、功率电子器件、交流永磁伺服电动机的结构与数学模型,交流伺服系统的控制方法。并对两种常见的永磁电动机交流伺服系统进行了较详细的介绍。

本书适用于从事数控机床、工业机器人等工业自动化技术的科技工作者,也可供高等院校师生参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

交流伺服系统/郭庆鼎,王成元编著. —北京:机械工业出版社,1994

ISBN 7-111-04071-6

- I. 交…
- II. ①郭…②王…
- III. 交流伺服系统
- IV. TM921.54

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)

责任编辑:余茂祚 版式设计:胡金瑛 责任校对:韩晶

封面设计:肖晴 责任印制:卢子祥

河北三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1994年7月第1版·1994年7月第1次印刷

787mm×1092mm<sub>1/32</sub>·9印张·190千字

0 001—4 100册

定价11.50元

# 前 言

伺服驱动装置是典型机电一体化产品的重要组成部分，也是工厂自动化（FA）不可缺少的基础技术。从发展的历程来看，伺服技术与电机、功率器件、传感器、微电子器件、微机技术以及控制理论等学科的发展密切相关。经历了几代的发展，时至今日，伺服技术正朝着交流化、数字化的方向迅速发展。具有代表性的标志是：高分辨率的速度与位置传感器和稀土永磁转子电机组成一体化的结构；主电路采用高频大功率开关组件组成 SPWM 逆变器；控制回路采用高速的数字信号处理器（DSP），可以高速、高精度地完成各种复杂控制算法；现代控制理论的某些成果应用于交流伺服系统；伺服系统具有高精度、高柔性、高响应能力、高可靠性，为传统伺服系统性能所不能比拟的。

为了推动我国伺服技术向交流化的方向发展，我们结合近年来沈阳工业大学电气工程系同志们的科研工作与所收集的资料，编写了《交流伺服系统》一书，期盼对我国交流伺服技术的发展能有些帮助。

我们十分感谢交流伺服技术课题组的孙荣斌、周美文、马俊芳、夏加宽、付强诸位同志，他们为本书提供了许多有益的资料。孙荣斌、付强、马俊芳同志参与了第七章的编写。

我们对郭淑芳、袁宏、汪海鹰同志在整理手稿与绘图工作中所付出的辛勤劳动，深表谢意。

作者尤其要感谢合肥工业大学电气工程系王孝武教授在

IV

繁忙工作中审阅书稿并提出了许多宝贵意见，使本书得以及时出版。

由于我们水平所限，本书难免存在错误之处，诚恳希望广大读者指正。

郭庆鼎

王成元

1993年6月

# 常用符号

## 一、元件和装置用的文字符号

A	放大器；A 相绕组；机器人手臂
ACR	电流调节器
AR	反号器
ASR	速度调节器
BDCM	无刷直流电动机
BR	旋转变压器
C	电容器
CL	控制器
CMOS	互补型金属氧化物半导体
CPU	中央处理器
DCM	直流电动机
DMOSFET	扩散型场效应晶体管
DSP	数字信号处理器
F	各种门电路及触发器
FBS	测速反馈环节
G	减速器
GTO	门极可关断晶闸管
GTR	功率晶体管
H	机器人手爪
IGBT	绝缘门极晶体管
IM	感应电动机
IPM	智能功率模块
L	电感

LED	发光二极管
MOSFET	MOS 场效应晶体管
MR	磁阻元件
PM	永磁电动机
P-MOSFET	功率场效应晶体管
PMSM	永磁同步电动机
PROM	可编程只读存储器
R	电阻器
ROM	只读存储器
RP	电位器
S	开关；传感器
SD	伺服驱动器
SM	伺服电动机
TG	测速发电机
UI	(功率) 逆变器
VD	二极管
VF	场效应管
V-MOSFET	纵向场效应晶体管
VT	三极管

## 二、常用缩写符号

AC	交流 (Alternating Current)
A/D	模拟/数字 (Analogue to Digital)
ASO	安全工作区 (Area Safe of Operation)
CIMS	计算机集成制造系统 (Computer-Integrated Manufacture System)
CNC	计算机数字控制 (Computer Numerical Control)
CP	连续路径 (轨迹) (Continuous Path)

CRPWM	电流控制脉宽调制 (Current-Regulated Pulse Width Modulation)
D/A	数字/模拟 (Digital to Analogue)
DC	直流 (Direct Current)
DC→SIN	直流→正弦 (Direct Current→Sinusoidal)
DD	直接驱动 (Direct Drive)
FA	工厂自动化 (Factory Automation)
FB	反馈 (Feedback)
FBASO	正向偏置安全工作区 (Forward Bias Area Safe of Operation)
FMS	柔性制造系统 (Flexible Manufacture System)
F/U	频率/电压 (Frequency to Voltage)
FWC	弱磁控制 (Flux-Weakening Control)
I-P	积分-比例 (Integration-Proportion)
I-PD	积分-比例微分 (Integration-Proportion Differentiation)
PI	比例积分 (Proportion-Integration)
PLL	锁相环路 (Phase-Locked Loop)
PTP	点位 (控制) (Point to Point)
PWM	脉宽调制 (Pulse Width Modulation)
RBASO	反向偏置安全工作区 (Reverse Bias Area Safe of Operation)
R/D	旋转变压器 (轴角)/数字 (Resolver to Digital)
SPWM	正弦脉宽调制 (Sinusoidal Pulse Width Modulation)
TTL	晶体管-晶体管逻辑 (电路) (Transistor-Transistor Logic)
U/F	电压/频率 (Voltage to Frequency)
VVVF	变压变频 (Variable Voltage Variable Frequency)



### 三、参数和物理量文字符号

$A$	面积；功
$a$	加速度
$B$	粘滞摩擦系数；磁通密度
$B_g$	气隙磁通密度
$B_m$	永磁体励磁磁通密度
$B_r$	永磁体剩磁
$BU_{beo}$	集电极开路时，基极与发射极之间能承受的最高反压
$BU_{bco}$	发射极开路时，基极与集电极之间能承受的最高反压
$BU_{ceo}$	基极开路时，集电极与发射极之间能承受的最高反压
$C$	电容
$D$	调速比；直径
$E, e$	电动势；误差
$E_k$	动能
$E_0$	空载电动势
$F$	力；磁通势；频率
$F_c$	磁通势波幅；频率值
$F_f$	刀具纵向进给力
$F_h$	水平力
$F_l$	负载阻力
$F_p$	刀具横向进给力
$F_v$	垂直力；切削力的主分力
$f$	频率
$G(s)$	传递函数
$G(z)$	脉冲传递函数
$g$	重力加速度

$H$	磁场强度
$h_{FE}$	晶体管直流电流放大系数
$I$	直流电流；交流电流有效值
$i$	交流电流瞬时值
$I_d, I_q$	直、交轴电流（直流量）
$I_d^*, I_q^*$	直、交轴电流指令值（直流量）
$i_d, i_q$	直、交轴电流瞬时值
$i_d^*, i_q^*$	直、交轴电流瞬时指令值
$I_f$	反馈电流
$J$	转动惯量
$K_f, K_v$	感应电动势常数
$K_I$	积分增益
$K_i$	电流反馈回路放大系数
$K_p$	比例增益
$K_{pi}$	电流环放大系数
$K_t$	转矩系数
$K_w$	基波绕组系数
$K_\sigma$	$I$ - $P$ 控制时的比例系数；前馈增益
$k$	旋转变压器的变压比
$L$	电感
$L_a$	电枢电感
$L_d, L_q$	直、交轴电感
$L_{md}, L_{mq}$	直、交轴励磁电感
$L_{sl}$	交直轴绕组漏感
$l$	长度
$l_g$	气隙等效长度
$l_{gd}, l_{gq}$	直、交轴等效长度
$l_{gm}$	气隙长度
$l_m$	永磁体厚度
$M_{AB}$	$A$ 、 $B$ 相间互感
$M_{BC}$	$B$ 、 $C$ 相间互感

$M_{AC}$	A、C 相相互感
$m$	电流调制系数
$N$	匝数
$n$	转速；位置传感器输出的脉冲数
$P$	功率
$P_{CM}$	晶体管最大耗散功率
$p$	微分算子 $\left(\frac{d}{dt}\right)$ ；瞬时功率
$p_n$	电机极对数
$Q_1, Q_2$	电机定转子槽数
$R$	电阻
$R_s$	电枢电阻（定子电阻）
$r$	半径
$s$	距离；Laplace 变量
$T$	周期；时间常数；转矩；温度
$T_a$	加速转矩
$T_c$	晶体管壳温
$T_{cg}$	齿槽转矩
$T_{em}$	电磁转矩
$T_f$	摩擦转矩
$T_j$	晶体管结温
$T_l$	负载转矩
$T_o$	平均转矩
$T_{or}$	旋转变压器转子输出信号周期
$T_p$	转矩纹波峰—峰值间的脉动程度
$T_r$	对应转子角速度的周期
$t_d$	延迟时间
$t_f$	下降时间
$t_{off}$	关断时间
$t_{on}$	导通时间
$t_r$	上升时间

$t$	存储时间
$U$	直流电压；交流电压有效值
$u$	交流电压瞬时值
$U_i$	变量 $x$ 的给定电压
$u$	交流电压的瞬时值
$u_d, u_q$	直、交轴电压
$V$	体积
$v$	速度
$W_g$	气隙储存的能量
$W_s(s)$	PI 调节器的传递函数
$w_d, w_q$	对应直、交轴的脉宽信号
$X$	电抗
$Z$	齿数；电阻抗
$\alpha$	减速比；角度
$\alpha_m$	磁状态角
$\alpha_T$	测速反馈系数
$\alpha_s$	槽斜度角
$\theta$	角度
$\theta_m$	磁化角；位置误差振幅
$\lambda$	波长；N-S 极间距离
$\mu$	磁导率；摩擦系数
$\mu_0$	真空磁导率
$\xi$	阻尼比
$\rho$	密度；凸极系数；占空比
$\tau$	时间常数
$\Phi$	磁通
$\Phi_f$	永磁体产生的磁通
$\varphi$	相位角
$\Psi$	磁链
$\Psi_f$	永磁体基波励磁磁场链过定子绕组的磁链
$\Omega$	机械角速度

$\Omega_r$	转子机械角速度
$\omega$	角频率
$\omega_c$	开环特性截止频率
$\omega_n$	(二阶系统) 自然振荡频率
$\omega_o$	旋转变压器励磁信号频率
$\omega_r$	转子电角速度 ( $p_n=1$ 时即为转子角速度)
$\omega_r^*$	转子角速度指令 ( $p_n=1$ 时)

# 目 录

前言

常用符号

第一章 机电一体化产品和伺服技术 .....	1
第一节 机电一体化基本概念 .....	1
第二节 工业机器人和伺服驱动技术 .....	5
第三节 数控机床和伺服驱动技术 .....	8
第四节 交流伺服电动机与直流伺服电动机的比较 .....	11
第五节 永磁同步电动机交流伺服系统简介 .....	14
第二章 伺服技术应用基础 .....	19
第一节 旋转体的运动方程 .....	19
第二节 负载的转矩特性 .....	25
第三节 伺服控制基础 .....	30
第四节 交流伺服系统的控制形式 .....	35
第五节 模拟控制与数字控制 .....	42
第三章 位置和速度传感器 .....	45
第一节 概述 .....	45
第二节 光电编码器 .....	47
第三节 磁性编码器 .....	58
第四节 旋转变压器 .....	63
第五节 高分辨率激光编码器 .....	68
第六节 高分辨率多极旋转变压器 .....	70
第七节 由二极和多极旋转变压器组成的位置检测器 .....	75

第四章	交流永磁伺服电动机 .....	83
第一节	交流永磁伺服电动机的分类与结构 .....	83
第二节	交流永磁伺服电动机的设计特点 .....	89
第三节	三相永磁同步电动机的数学模型 .....	92
第四节	无刷直流电动机的数学模型 .....	105
第五节	交流永磁伺服电动机的矢量控制 .....	109
第六节	纹波转矩和齿槽转矩 .....	122
第五章	常用的电力半导体器件 .....	141
第一节	概述 .....	141
第二节	大功率晶体管 .....	142
第三节	功率晶体管模块的驱动技术 .....	149
第四节	典型的基极驱动与保护电路 .....	154
第五节	功率场效应晶体管 .....	162
第六节	绝缘门极晶体管 .....	167
第七节	GTR、P-MOSFET 和 IGBT 的特性比较 .....	173
第八节	智能功率模块 .....	176
第六章	交流伺服系统的控制回路 .....	178
第一节	交流伺服系统控制回路的组成 .....	178
第二节	交流伺服驱动系统的数学模型 .....	188
第三节	交流伺服电动机的速度控制系统 .....	201
第四节	根据部分模型匹配法设计速度控制系统 .....	206
第五节	按反馈补偿设计速度控制系统 .....	211
第六节	对负载转矩扰动的补偿 .....	215
第七节	交流伺服电动机的弱磁控制 .....	218
第七章	交流伺服系统举例 .....	225
第一节	交流伺服系统的现状及发展趋势 .....	225
第二节	方波电流型 BDCM 交流伺服系统 .....	231
第三节	三相 PMSM 交流伺服系统 .....	242
参考文献	.....	270

# 第一章 机电一体化产品和伺服技术

## 第一节 机电一体化的基本概念

当前，全球正面临着一场新技术革命。这场新技术革命以信息技术为主角，极大地提高了劳动生产率和工作效率。信息技术已成为社会经济发展中最活跃的生产力。信息技术，特别是微电子信息技术和软件技术与机械技术的有机融合，给机械（或机器）赋予了极大的柔性，使传统的机械工业焕发了青春，出现了新的机电一体化产品，带来了巨大的经济效益和社会效益。

这种微电子学和机械学的相互渗透和结合，形成了一门新兴的学科和技术，从学科上国外称为机械电子学（Mechatronics），从技术上国内更多地称为机电一体化。

由于机电一体化是由多种相关学科和技术复合而成，而且目前又在不断地发展着，所以，至今还没有一个众所公认的确切定义。就是在提出机电一体化这一概念的日本，也众说不一。较有权威的解释是在1981年日本人提出的如下定义：“机电一体化一词乃是在机构的主功能、动力功能、信息处理功能和控制功能上引进电子技术，将机械装置与电子化设计及软件结合起来所构成的系统的总称”。美国有关专家所下的定义是：“机电一体化是用计算机网络协调、控制各种机械或机电部门的相互联系，以完成包括机械力、运动及能量流的动态作业”。



现代科学技术的重要特征之一，就是新技术以群体的形式出现。多种学科和技术互相渗透，综合发展，产生出一系列的边缘学科和复合技术。机械电子学就是这样的边缘学科，机电一体化就是这样的复合技术。机电一体化产品就是现代最完备的技术工具。

所谓机电一体化产品，按照当前的理解，就是指精密机械技术与微电子技术、信息技术、计算机技术、电力电子技术、传感器技术、自动化技术等多种相关学科和技术有机地融合在一起，用系统工程的观点实现整体优化，从而构成一个完整的高性能产品或系统。机电一体化作为一种技术，它是许多高新技术的一种复合。由这些高新技术作为基础，构成了成千上万种机电一体化产品。通常，把那些规模较大而又十分复杂的机电一体化产品，称为机电一体化系统，如柔性制造系统（FMS）、计算机集成制造系统（CIMS）等。把规模相对较小的独立的机电一体化装置称为机电一体化产品，如数控机床、工业机器人等。这里，主要是说明这一类机电一体化产品的基本构成问题。典型的机电一体化产品由五大基本要素组成。这五大要素是：传感器、信息处理器、驱动装置、能源及机构-结构，见图 1-1 所示。

各组成要素作用大致如下：

**传感器：**感知系统内部和外部的状态，向信息处理器提供内部和外部的有关信息。

**信息处理器：**完成信息的转换、加工处理、

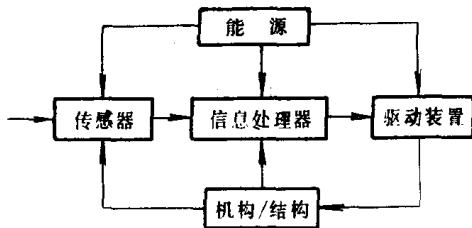


图 1-1 机电一体化产品的组成