

电气自动化新技术丛书

交流传动 神经网络逆控制

戴先中 刘国海 张兴华 著



机械工业出版社

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展,对于改变社会的生产面貌,推动人类文明向前发展,具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合,特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天,电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问,电气自动化技术必将在提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术,中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会,负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色:

一、本丛书是专题论著,选题内容新颖,反映电气自动化新技术的成就和应用经验,适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际,重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出,条理清晰,语言通俗,文笔流畅,便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者,也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》,对于我们是一种尝试,难免存在不少问题和缺点,希广大读者给予支持和帮助,并欢迎大家批评指正。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

第4届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主 任：王 炎

副主任：王兆安 王志良 赵相宾 牛新国

委 员：王正元 王永骥 王兆安 王 旭

王志良 王 炎 牛新国 尹力明

刘宗富 许宏纲 孙流芳 阮 毅

李永东 李崇坚 陈伯时 陈敏逊

陈维均 周国兴 赵光宙 赵 杰

赵相宾 张 浩 张敬明 郑颖楠

涂 健 徐殿国 黄席樾 彭鸿才

霍勇进 戴先中

秘 书：刘凤英

第4届《电气自动化新技术丛书》 编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来，在学会领导和广大作者、读者的支持下，至今已出版发行丛书38种33万余册，受到广大读者的欢迎，对促进我国电气传动自动化新技术的发展和传播起到了很大作用。

许多读者来信，表示这套丛书对他们的工作帮助很大，希望我们再接再厉，不断推出介绍电气传动自动化新技术的丛书。因此，本届编委会决定选择一些大家所关心的新选题，继续组织编写出版，同时对受读者欢迎的已出版的丛书，根据技术的发展，我们将组织一些作者进行修订再版，以满足广大读者的需要。

我们诚恳地希望广大读者来函，提出您的宝贵意见和建议，以使本丛书搞得更好。

在本丛书出版期间，为加快与支持丛书出版，成立了丛书出版基金，得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位的支持，在此我们对所有资助单位再次表示感谢。

第4届《电气自动化新
技术丛书》编辑委员会
2002年10月12日

前 言

三相交流异步电动机突出的优点是结构简单、维护容易，适合在恶劣条件下工作，并可实现高压大功率及高速驱动，缺点是数学模型复杂、高性能（调速）控制困难。20 世纪 70 年代以来，以矢量控制为代表的交流电动机高性能控制方法，获得了与直流电动机控制系统相媲美的控制性能，开创了交流传动的新纪元。

矢量控制通过坐标变换将多变量、强耦合的异步电动机模型转化为类似于直流电动机的简单模型，使定子电流的两个相互垂直分量可分别控制转矩和转子磁链，从而获得类似于直流电动机的宽范围调速性能。但从控制方法上看，矢量控制实现了近似的稳态解耦控制，且依赖于系统参数。此外，对于多交流电动机的同步控制并无良策。

与此同时，对于一般非线性控制理论的研究，自 20 世纪 80 年代以来取得了一些突破性的进展，其中以逆系统为代表的反馈线性化控制方法已经被用来解决实际的非线性系统控制问题。所谓反馈线性化，就是通过状态反馈（或动态补偿）的方法将非线性系统变换为线性系统，实现复杂非线性系统的线性化和解耦，从而将复杂非线性系统的控制问题转化为线性系统的控制问题。逆系统等反馈线性化实现的是真正的线性化和动态解耦，理论上性能将优于矢量控制的近似稳态解耦，有可能为交流传动控制系统提供新的有效控制手段。

逆系统等反馈线性化虽能实现线性化和动态解耦，但要求被控对象的数学模型和具体的系统参数必须精确已知，这在实际应用中是很困难的。为此，本书作者自 1994 年始，将逆系统

方法与神经网络相结合,提出了多变量非线性系统的神经网络逆控制方法,据此构成的神经网络逆控制器不完全依赖于被控对象的数学模型,且结构简单、易于工程实现,经多领域的应用证实了该方法的有效性、先进性与广泛适用性。

本书在扼要介绍作者近年来提出的神经网络逆控制方法的基础上,着重阐述如何应用神经网络逆控制方法来解决单交流电动机解耦控制和多交流电动机同步控制问题,以满足广大技术人员对交流电动机新颖控制理论和方法的需求。本书内容新颖,是作者多年来在单交流电动机解耦控制和多交流电动机同步控制中取得的一系列研发成果的总结,反映了电气传动领域的新理论和新方法。

本书虽为专著,但尽可能通俗易懂,以适合一般大学生和工程技术人员阅读。真正为生产第一线的工程师和技术人员提供工程实用的交流传动新的控制方法与手段,为在校研究生、大学生提供解决复杂非线性系统控制问题的思路、方法和在(多)交流电动机传动控制系统中的应用示范。

本书由戴先中构思,在共同讨论的基础上,确定了全书的结构、框架。第1、3~5章由戴先中编写,第2、6章由张兴华编写,第7~9章由刘国海编写,全书由戴先中统稿、定稿。

在本书即将付梓之际,借此机会,作者衷心地感谢国家自然科学基金多年的资助,感谢机械工业出版社孙流芳编辑的热心支持,并对多年来关心作者研究工作的方方面面表示由衷的感谢。

本书是交流传动神经网络控制方面的一本专著,在内容和章节安排上,在概念引入和理论推导中,难免会存在不当甚至错误之处,诚挚地希望能听到各种批评意见。来信请寄:210096,南京市四牌楼2号,东南大学自动化学学院戴先中。
E-mail: xzdai@seu.edu.cn。

戴先中

2007年4月4日

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

第4届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会的话

前言

第1章 绪论	1
1.1 交流传动控制概述	1
1.1.1 交流传动控制分类	2
1.1.2 交流传动控制方法	3
1.2 交流传动的神经网络逆控制方法	8
1.2.1 逆系统及其线性化解耦作用	8
1.2.2 多变量非线性系统的神经网络逆控制方法	10
1.2.3 交流传动的神经网络逆控制例	12
1.3 本书章节安排	16
第2章 交流传动控制基础	19
2.1 交流感应电动机的数学模型	19
2.1.1 交流感应电动机的磁链、电压和转矩方程	19
2.1.2 坐标变换和变换矩阵	29
2.1.3 两相系中感应电动机的数学模型	35
2.1.4 两相系中感应电动机的状态方程描述	39
2.2 交流传动控制基础	44
2.2.1 交流调速的基本方法	44
2.2.2 交流变频调速原理	48
2.2.3 交流调速系统中的变频器	50
2.2.4 交流变频调速的脉宽调制 (PWM) 技术	55
2.3 交流传动系统的反馈信号检测与状态、参数估计	60
2.3.1 电流、电压信号检测	60
2.3.2 转速信号检测	61
2.3.3 转子磁链估计	63
2.3.4 转子电阻估计	69

第 3 章 逆系统线性化解耦原理	73
3.1 逆系统线性化解耦概述	73
3.1.1 逆系统基本概念	73
3.1.2 逆系统线性化解耦原理	76
3.1.3 逆系统控制方法	77
3.2 单输入单输出非线性系统的逆系统	78
3.2.1 单输入单输出非线性系统的相对阶	79
3.2.2 单输入单输出非线性系统的可逆性	81
3.3 多输入多输出非线性系统的逆系统	82
3.3.1 多输入多输出非线性系统的矢量相对阶	82
3.3.2 多输入多输出非线性系统的可逆性	96
3.4 逆系统的实现	100
3.4.1 逆系统的解析实现	101
3.4.2 逆系统的非解析实现——神经网络逆系统	109
3.5 完全线性化与部分线性化	111
3.5.1 伪线性复合系统的动态特性	112
3.5.2 非线性系统的完全线性化与部分线性化	114
3.6 附录 雅可比矩阵、雅可比矩阵的秩与行列式的关系	115
第 4 章 神经网络基础	120
4.1 神经元与神经网络	121
4.2 静态神经网络	124
4.3 动态神经网络	132
第 5 章 神经网络逆控制原理	135
5.1 神经网络逆系统组成原理	135
5.2 神经网络逆系统的结构	137
5.2.1 神经网络逆系统的基本结构	137
5.2.2 神经网络逆系统的简化结构	138
5.2.3 神经网络逆系统的扩展结构	142
5.3 神经网络逆系统的实现	145
5.3.1 神经网络逆系统结构的确定	146
5.3.2 神经网络的选型	147
5.3.3 神经网络逆系统的训练结构与步骤	147
5.3.4 激励信号的选取	148

5.3.5	训练样本的获取	150
5.3.6	神经网络的训练与校验	153
5.3.7	神经网络逆系统的校验	154
5.4	基于神经网络逆系统的复合控制器	156
5.4.1	神经网络逆复合控制器	156
5.4.2	神经网络逆+线性校正或 PID 闭环控制	161
5.4.3	神经网络逆+极点配置控制	164
第 6 章	交流电动机转速与磁链动态解耦控制	170
6.1	基于静止 (α - β) 坐标系感应电动机模型的动态逆解耦	170
6.2	基于旋转 (M-T) 坐标系感应电动机模型的动态逆解耦	175
6.3	基于旋转 (M-T) 坐标系简化感应电动机模型的动态逆解耦	180
6.4	神经网络逆复合控制器设计	182
6.4.1	神经网络逆系统结构	182
6.4.2	神经网络逆系统辨识	184
6.4.3	闭环线性控制器设计	188
6.5	感应电动机的神经网络逆动态解耦实验	195
6.5.1	基于 M-T 坐标系模型的神经网络逆解耦控制 (电压控制型)	196
6.5.2	基于 M-T 坐标系简化模型的神经网络逆解耦控制 (电流控制型)	198
第 7 章	交流电动机变频调速系统的高性能控制	201
7.1	恒压频比变频调速系统的神经网络逆控制	201
7.1.1	恒压频比变频调速系统的数学模型	201
7.1.2	恒压频比变频调速系统的可逆性分析	204
7.1.3	简化恒压频比变频调速系统的神经网络逆控制的实现	210
7.1.4	简化恒压频比变频调速系统的神经网络逆控制仿真	211
7.2	矢量控制变频调速系统的神经网络逆控制	213
7.2.1	矢量控制变频调速系统的数学模型	214
7.2.2	矢量控制变频调速系统的可逆性分析	214
7.2.3	简化矢量控制变频调速系统的神经网络逆控制实现	216
7.3	矢量控制变频调速系统神经网络逆控制试验	218
第 8 章	交流多电动机系统的同步控制	223

8.1 交流多电动机同步系统的物理模型和耦合特性	223
8.1.1 交流多电动机同步系统的物理模型	224
8.1.2 交流多电动机同步系统速度和张力的耦合特性	224
8.2 直接控制两电动机同步系统的速度和张力神经网络逆解耦 控制	225
8.2.1 直接控制两交流电动机同步系统数学模型	225
8.2.2 直接控制两交流电动机同步系统可逆性分析	227
8.2.3 直接控制两交流电动机同步系统零(隐)动态分析	230
8.2.4 直接控制两交流电动机同步系统的神经网络逆控制	234
8.2.5 直接控制两交流电动机同步系统的神经网络逆控制仿 真试验	234
8.3 矢量控制两电动机同步系统的速度和张力神经网络逆解耦 控制	236
8.3.1 矢量控制两交流电动机同步系统的数学模型	237
8.3.2 矢量控制两交流电动机同步系统可逆性分析	237
8.3.3 矢量控制两交流电动机同步系统的神经网络逆控制	241
8.4 简化矢量控制两电动机同步系统的神经网络逆控制试验	242
第9章 基于 dSPACE 的交流电动机动态解耦控制的实 现	246
9.1 dSPACE 基础	246
9.2 dSPACE 硬件设计	248
9.2.1 智能化单板系统	248
9.2.2 标准组件系统	250
9.3 dSPACE 软件设计	251
9.3.1 代码生成及下载软件	251
9.3.2 测试软件	254
9.4 dSPACE 交流电动机转速与磁链动态解耦控制的应用示例	256
9.4.1 交流电动机解耦控制任务与结构框图	256
9.4.2 全数学仿真	257
9.4.3 半物理仿真系统构建	257
9.4.4 半物理实时仿真的 ControlDesk 监测和控制器参数 调整	267
9.4.5 神经网络逆解耦控制试验结果	275
参考文献	277

第1章 绪 论

1.1 交流传动控制概述

众所周知，三相交流传动系统是最普遍的机电装置之一，在各个工业领域以及家用电器、电梯、电动汽车等民用领域均得到了广泛的应用。与直流电动机相比，交流电动机具有结构简单、维护方便、可靠性高等优点，适合在恶劣条件下工作，并可实现高压大功率及高速驱动。但由于三相交流电动机是一个多变量、强耦合、参数时变的非线性对象，很难对其进行高性能的控制，长期以来电气传动领域一直是直流传动占据统治地位。

20世纪70年代以来，以矢量控制为代表的交流电动机变压变频调速方法，获得了与直流电动机控制相媲美的控制性能，开创了交流传动的新纪元。

30多年来，随着电力电子技术及计算机技术的进步，特别是高速单片数字信号处理器、专用集成电路芯片以及高性能的集成化功率模块的发展，一些复杂的控制算法（如矢量控制、直接转矩控制、自适应控制、反馈线性化控制、神经网络控制等）得以在交流电动机的控制中运用，交流电动机的控制性能不断提高。目前，从几百瓦的家用电器到几兆瓦的工业调速装置，都可以采用交流传动方案。交流调速已由最初的只用于风机、水泵的开环变频调速等一般应用场合，扩展到各种高精度、快速响应的高性能调速控制领域。交流传动正逐步取代直流传动，成为电力传动系统中的主流。

本节扼要介绍（回顾）交流传动控制的分类与各种交流传动控制方法，让读者在学习本书介绍的交流传动控制方法之前，

能对交流传动控制有一个总体的了解。

1.1.1 交流传动控制分类

首先说明,本书只考虑三相交流电动机,并且主要针对三相交流异步电动机(或称为三相交流感应电动机)。因此除非特别说明,本书后面提到的交流电动机均指三相交流异步电动机。

不考虑交流电动机本身的差异(如可分为同步机、异步机;或分为绕线转子机、笼型机),仅依据被控对象的不同,交流传动控制可分为①单台交流电动机调速或位置控制;②多台交流电动机的同步控制;③(多)交流电动机的网络化控制。下面作一扼要的讨论。

1) 单台交流电动机的传动控制,是交流电动机控制的最基本内容,也是交流电动机传动控制研究与应用最多的领域。这一方面是由于单台交流电动机的应用最为普遍,另一方面是由于单台交流电动机的传动控制是多台交流电动机的同步控制和网络化控制的基础。此外,由于交流感应电动机本身是一复杂、多变量、强耦合的非线性系统,要想实现高性能的控制绝不是一件简单的事情。因此对单台交流电动机的传动控制研究,长期以来一直占据统治地位,下一小节将要介绍的各种交流传动控制方法均是针对单台交流电动机的传动控制方法。

2) 多台交流电动机的同步控制近年来越来越受到重视,这是由于多电动机同步系统是现代工业生产中应用比较普遍的电控系统。如在连续、高速化的工业生产过程中,需要多电动机同步传动,使产品维持一定的张力(或以恒定的张力来卷取产品),并尽可能地提高速度。这种张力控制系统在轧钢、造纸、纺织、建材等国民经济的各个领域得到了广泛的应用,而以往大多采用的是多直流电动机系统。随着电力电子、计算机和控制技术的进步,在多电动机同步控制领域,交流电动机也正逐步取代直流电动机,成为主流。

3) 交流电动机的网络化控制是近年来才开始发展起来的。顾名思义,网络化控制是通过计算机网络来实现单台或多台交

流电动机的集中或分散控制，这种控制往往还与其他设备的控制交织在一起，以实现更高控制或优化目标下的自动化。随着各种计算机网络，尤其是现场总线的快速发展与其在现代工业生产中的迅速应用，（多）交流电动机的网络化控制将很快成为交流电动机控制的主流。

本书介绍的神经网络逆控制方法将在以上 3 类交流传动控制中分别得到应用。

1.1.2 交流传动控制方法

对单个交流电动机的传动控制，目前正在应用或正在研究的高性能控制方法大致可分为 3 大类：

1) 直接针对交流电动机控制提出的方法——以矢量控制为代表；

2) 源于非线性系统控制理论的方法——以线性化解耦控制为代表；

3) 源于智能控制理论的方法——以神经网络控制为代表。

而针对多交流电动机的同步控制以及针对新近发展起来的网络化控制，至今仍未形成较系统的解决方案。为此，以下仅对单交流电动机传动控制的 3 大类方法作扼要介绍。

需要指出的是，下面介绍的 3 大类交流电动机传动的高性能控制方法，有一个共同的特点——均采用了能实现“变压变频”的三相逆变器（有关逆变器知识可参阅本书第 2 章），也就是说，各种交流电动机传动的高性能控制方法均建立在“变压变频”调速的基础上。

1. 直接针对交流电动机控制提出的方法——以矢量控制为代表

在众多的交流感应电动机控制技术当中，矢量控制是应用最普遍的一种高性能的控制方法。矢量控制的基本思想是，通过空间矢量坐标变换及磁场定向的方法，将多变量、强耦合的交流电动机模型转换成（近似解耦成）类似于直流电动机的等效模型，使（在同步旋转坐标系下的）定子电流的两个相互垂

直分量——磁链分量和转矩分量能（近似地）分别独立地控制转矩和转子磁链，从而获得类似于直流电动机的宽范围调速性能。

根据选择用于定向的参考矢量的不同，矢量控制可以分为按转子磁场定向和按定子磁场定向的矢量控制。按转子磁场定向的矢量控制方法是目前应用最为广泛的一种高性能的交流电动机控制方法，其调速范围可从零直到恒功率弱磁区域，图 1-1 是其实现结构。实际控制器设计时需知电动机的一些参数，包括转子时间常数，因此控制系统的性能很大程度上受电动机参数的影响。要取得理想的解耦控制效果，通常需对转子时间常数进行在线估计。

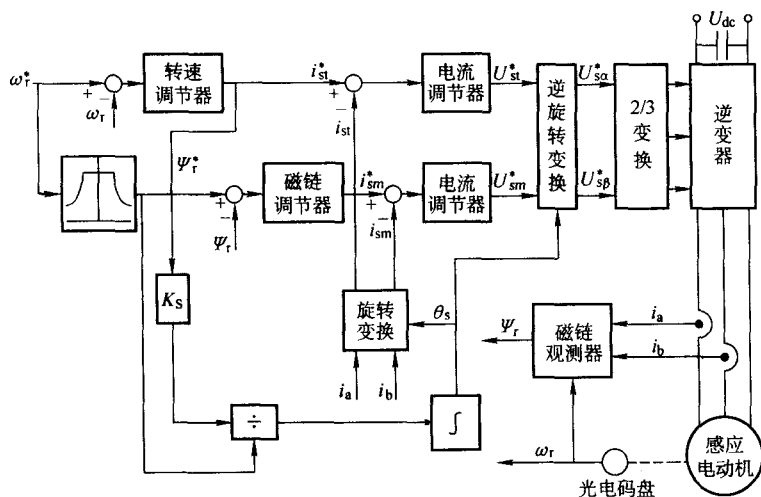


图 1-1 按转子磁场定向的矢量控制结构框图

矢量控制取得了空前的成功，获得了与直流电动机控制系统相媲美的控制性能，开创了交流传动的新纪元。但从控制方法上看，矢量控制实际上是一种近似的稳态解耦控制，仅当磁链达到稳态并保持恒定时，转矩与磁链的解耦关系才能成立。且矢量控制的准确实现依赖于系统参数的准确在线估计。

直接转矩控制是继矢量控制之后发展起来的另一种高性能的交流电动机变压变频调速方法。在基于直接转矩控制的交流电动机调速系统的转速环里面，利用转矩反馈直接控制电动机的电磁转矩（见图 1-2），因而得名。

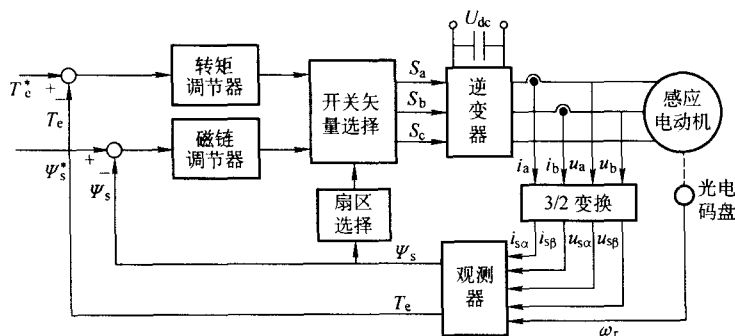


图 1-2 直接转矩控制结构框图

（注：实际应用时，还要加上转速外环）

直接转矩控制利用空间矢量的分析方法，直接在定子坐标系下计算与控制交流电动机的转矩，采用定子磁场定向，借助于离散的开关式调节（所谓的 Bang-Bang 控制），直接对逆变器的开关状态进行控制，以获得转矩的高动态性能。直接转矩控制避免了矢量控制中的坐标变换，减少了对模型参数的依赖性，但由于是开关式的非连续控制，存在低速下的转速抖动问题。

总之，30 多年来，矢量控制以及直接转矩控制的发明与发展，使交流调速系统正逐步取代直流调速系统，成为电力传动系统中的主流。但无论是矢量控制还是直接转矩控制，都或多或少存在一些需要解决的问题，其调速性能还不尽如人意，从而也促进了其他一些控制方法的提出与发展。

2. 源于非线性系统控制理论的方法——以线性化解耦控制为代表

对于一般非线性控制理论的研究，从 20 世纪 80 年代开始，取得了一些突破性的进展，并已被用来解决实际的非线性系统

控制问题，其中反馈线性化控制方法是其突出代表。

在控制理论中，反馈是实现控制目的的基本途径，而通过反馈将非线性系统变换为线性系统的思想是处理非线性系统最直接的思路。所谓反馈线性化，就是通过状态反馈、输出反馈或动态补偿的方法将非线性系统变换为线性系统，然后再按线性系统理论中成熟的方法完成系统控制的一种理论与方法。

经过 20 多年的发展，反馈线性化方法已经成为非线性控制理论中一种有效的方法，包括基于微分几何理论的输入对状态反馈线性化、输入输出线性化、直接反馈线性化和逆系统方法等。

逆系统方法是非线性反馈线性化方法中的一种比较形象直观、易于理解的方法。逆系统方法的基本思想是：首先，构造采用反馈方法实现的被控对象的逆系统，将被控对象补偿成为具有线性传递关系的系统，称为伪线性复合系统；然后，再用线性系统的理论来完成伪线性复合系统的线性闭环控制，从而（对非线性系统）实现在线性系统中才能实现的诸如解耦、极点配置、最优控制等目标。图 1-3 给出了对交流电动机采用逆系统方法实现的解耦控制结构框图。

包括逆系统方法在内的各种反馈线性化方法，在实际应用中存在所谓的“瓶颈”问题，即要求被控对象的数学模型和具体的系统参数必须预先知道，这严重影响了其在实际工程中的应用，也使其难以在交流传动中实现有效的控制。到目前为止，单独采用反馈线性化方法，大多限于实验室的交流传动控制研究。

但作为一种理论严谨的非线性控制方法，包括逆系统方法在内的各种反馈线性化方法正受到交流传动控制研究工作者的高度重视。而将逆系统方法及其他反馈线性化方法与（下面将要介绍的）智能控制方法相结合，非常有可能成为交流传动控制的重要发展方向。

3. 源于智能控制理论（方法）的控制方法——以神经网络

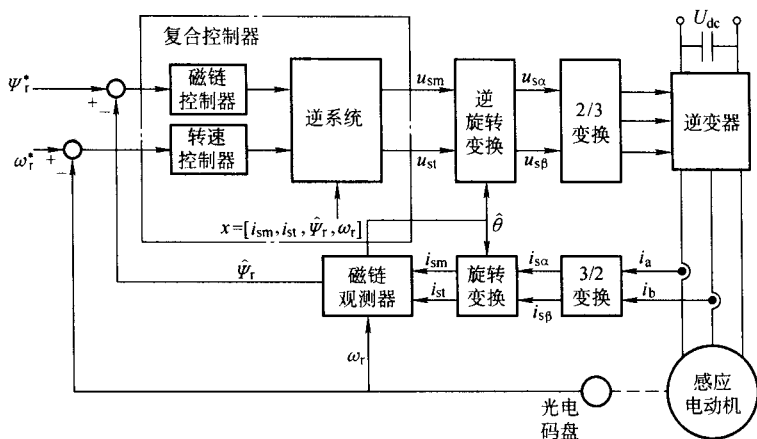


图 1-3 逆系统解耦控制结构框图

控制为代表

与反馈线性化方法恰好相反，针对控制对象及其环境、目标和任务的不确定性和复杂性而提出的智能控制，主要通过模仿人的某种智能（包括利用人的操作经验、知识和技术），来对被控对象实施相应的控制。由于其不依赖或不完全依赖被控对象的数学模型这一特点，理论上，智能控制能解决具有不确定性的复杂非线性过程或对象的控制，20 世纪 70 年代以来发展很快。

目前能称为智能控制的方法有：

- 1) 模糊控制——使用模糊推理和计算作为控制系统的决策环节；
- 2) 神经网络控制——使用人工神经网络作为控制系统的控制或辨识环节；
- 3) 专家系统控制——使用专家系统作为控制系统的决策环节。

神经网络是一个具有自适应能力的高度非线性的动力学系统，对未知非线性函数具有出色的逼近与学习功能，可以用来