

Control of Induction Motors

异步电动机的控制



Andrzej M. Trzynadłowski 著
李鹤轩 李杨 译

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



异步电动机的控制

ANDRZEJ M. TRZYNADLOWSKI 著

李鹤轩 李杨 译

机械工业出版社

Andrzej M. Trzynadlowski: Control of Induction Motors.

Copyright © 2001 by Elsevier Science (USA).

Translation Copyright © 2003 by China Machine Press. All rights reserved.

本书中文简体字版由 Elsevier Science (USA) 授权机械工业出版社独家出版。

版权所有 侵权必究。

本书版权登记号: 图字 01-2002-4803 号

图书在版编目 (CIP) 数据

异步电动机的控制/塔济那特罗斯基著; 李鹤轩, 李杨译. —北京: 机械工业出版社, 2003.9

ISBN 7-111-12610-6

I. 异… II. ①塔…②李…③李… III. 异步电动机-控制 IV. TM343

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 070555 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 孙流芳 版式设计: 霍永明 责任校对: 樊钟英

责任印制: 路琳

北京蓝海印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

890mm×1240mm A5·7 印张·204 千字

0 001—4 000 册

定价: 15.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

译 者 的 话

作为机电能量变换的电气传动装置在国民经济各部门中起着重要的作用。它实现转矩、加速度、转速和位置等各种控制。从工业、农业、交通运输、航空航天、军事系统到办公自动化、家用电器等领域都有它的应用。

现代的电气传动是包括电力半导体器件与功率变换器电路、电机、传感器、微处理器、仿真技术和控制理论等方面的多学科综合性技术领域，常定义为运动控制。总的发展趋势是：驱动的交流化；功率变换器的高频化和集成化，控制的数字化、智能化和网络化。

对于许多机械负载已证实，若采用可调速传动装置，不但将会改善其性能，而且也能大大提高生产效率和用电效率，大量节省能量。在近一个世纪，高性能可调传动绝大部分是采用有机机械换向器的直流电动机。由于其结构上的特点，它的励磁磁场和电枢磁场空间上互相正交，控制转矩的两个分量——励磁电流和电枢电流互相独立，致使它有优良的静、动态转矩控制特性。但也正由于它有机机械换向器需要经常维护，转速、电压、功率和使用环境都受到限制，价格又昂贵。而交流电动机特别是异步电动机，它的优点却非常突出：坚实、少维护、适应环境广、容量大、电压和转速高。但它本身是一多变量、强耦合、非线性的对象，造成转矩控制上的困难。所以近百年来，控制工程师们都在努力解决交流电动机的调速问题。直到 20 世纪 70 年代才有突破性的进展，原因有两个：一是电力电子技术和微电子技术的发展。随着新型电力半导体器件相继出现，可为交流电动机的控制提供高性能的功率变换器，并且价格逐年下降，能够为人们所接受。微电子技术的惊人发展，高性能微处理器的引入，使硬件简化；柔性的控制算法使控制具有很大的灵活性；可实现复杂的控制规律，使现代控制理论及人工智能技术在运动控制系统中的应用成为现实；易于与上层系统连接进行数据传输；便于故障诊断加强保护和监视功能，提

高系统的可靠性。以上这些都为可调交流传动的发展创造了物质条件。另一个原因是,交流电动机控制理论上的突破。这方面要首推20世纪70年代初创立的磁场定向矢量控制方法和此后的直接转矩控制方法、非线性解耦控制方法等。技术发展到今天,可调交流传动已具有了优良的控制性能,获得越来越广泛的应用,交流传动取代直流传动已成为今后明显的发展趋势。

面临交流电动机控制技术日新月异的发展形势,从事本学科领域的工程技术人员今天正受到挑战,他们必须适应这种综合的和日益增长的多学科先进技术。我们翻译这本书的目的,就是将国际上有关异步电动机控制技术方面的基本概念、理论、典型系统介绍给国内广大读者,以便大家了解该领域中的现代技术水平。

本书是工程方面系列丛书中的一本,丛书的总编辑是J.D.Irwin教授,他是一位富有经验的工程技术教育家。Irwin教授已经任Auburn大学电气工程系主任27年。本书的作者为Nevada Reno大学电气工程的Andrzej M.Trzynadlowski教授,他是IEEE的资深委员和IEEE工业应用学会的工业传动与工业电力变换器委员会委员,他是电力电子与电气传动系统领域发表超过80篇论著的作者,且已经被授予11种专利权,他也是另两本书(《现代电力电子学导论》和《异步电动机控制中的磁场定向原理》)的作者。

本书专门论述交流异步电动机控制的各个方面,包括异步电动机的工作原理,运行特性,静、动态模型;传动用功率变换器;系统的控制策略(标量控制、磁场定向矢量控制、直接转矩和磁通控制以及如神经网络与模糊控制的智能控制)和实用的异步电动机转速和位置控制系统,还有目前国内、外普遍关注的无传感器传动。内容综合、全面、实用,而且反映了该领域发展的最新技术。论述的思路清晰,用易于理解的实例说明介绍的概念,并用许多插图使读者易于了解正文。本书适合具有一定相关知识基础的从事实际工作的工程技术人员阅读,可作为工程技术教育的教材,也可作为大专院校师生有价值的参考书。

本书第1~3章由李杨译出,前言和第4~10章由李鹤轩译出。全书译稿经清华大学袁曾任教授审校,对他付出的辛劳,在此谨致衷

心感谢!

由于时间仓促, 学识所限, 译文中可能存在某些错误和不妥之处, 恳请广大读者批评指正。

译 者

2003 年 4 月于北京

前言

发达国家中生产总电能的一半以上由电动机转换为机械能，使社会免除让人厌烦的体力劳动负担。许多类型的电动机中间，三相异步电动机仍旧像它们 1 世纪以前那样享有同样无比的声望。至少 90% 的工业传动系统使用异步电动机。

大多数电动机是不受控的，但是由电力电子变换器馈电的可调速异步电动机传动的份额正在稳步地增长，使直流传动逐步淘汰。估计由受控的电动机代替所有“低能”电动机，每年可以节约超过 500 亿美元。然而，异步电动机的控制比直流电动机的控制有多得多的挑战性任务。两个主要的困难是需要提供可调频率的电压（直流电动机是可调节供电电压的幅值控制）和电动机分析模型的非线性与复杂性，由于参数不确定性而增加。

本书专门论述异步电动机控制的各个方面。与可调速传动的若干现有专题著作形成对照，为使覆盖的内容容易为非专业人员所了解，对此作出极大努力。尽管首先是为从事实际工作的工程师，本书也可很好地用作电机、电力电子或电气传动方面研究生的教科书或者大学生课程中的辅助参考资料。

从一般基础知识开始，本书叙述异步电动机的结构和稳态运行，以及概括不受控传动中的基本问题。电力电子变换器，特别是脉冲宽度调制逆变器，构成可调速传动的重要部件。因此，用整个一章专门论述它们。本书涉及的控制课题部分，从用于低性能传动系统的标量控制方法开始。其次，引入异步电动机的动态模型，作为介绍更先进控制思想的基础。随后阐明磁场定向原理，它是高性能矢量控制传动背景的基本思想。本书还详尽地陈述异步电动机控制的另一个常见的方法——直接转矩和磁通控制以及用图解说明异步电动机在转速和位置控制系统中的应用。最后，覆盖无传感器控制的重要课题，包括在今日市场上可以获得的商品化传动装置的简要回顾。

已经略去异步电动机传动方面文献中遇到的某些题目。这种电动机的控制问题是如此理智地挑战，以致一些研究者试图探索基本上不同于已建立的方法。根据现在的资料，像基于控制的反馈线性化或无源性这样一类的思想，对于实际的 ASD（可调速传动）尚未找到它们的途径。时间将表明这些理论上的概念比起进入商品化传动领域的现有技术是否有足够程度的改进。

以精选过的文献，符号汇编和索引结束本书。用易于理解的例题说明介绍的概念，为数众多的插图使读者容易理解正文。每一章用简单的摘要开始并以小结结束，遵循优良的教学哲理三条原则：（1）告诉你什么是正要讲述的，（2）讲述和（3）随后告诉你什么是正确的讲述。

我要感谢 Auburn 大学的 J. David Irwin 教授为承担这本丛书努力写作的鼓励。我的妻子 Dorota 和孩子们 Bart 与 Nicole，对于他们的不断的支持，请接受我深深的感激。

目 录

译者的话

前言

第 1 章 基础知识	1
1.1 异步电动机	1
1.2 异步电动机的传动系统	2
1.3 常见的负载	3
1.4 运行象限	8
1.5 标量和矢量控制方法	9
1.6 小结	10
第 2 章 异步电动机的结构和稳态运行	12
2.1 结构	12
2.2 旋转磁场	13
2.3 稳态等效电路	18
2.4 产生的转矩	21
2.5 稳态特性	24
2.6 异步发电机	29
2.7 小结	33
第 3 章 不受控异步电动机传动	34
3.1 异步电动机的不受控运行	34
3.2 辅助起动	35
3.3 制动与反转	37
3.4 变极数	40
3.5 不正常的运行状态	41
3.6 小结	42
第 4 章 异步电动机传动用的电力电子变换器	44
4.1 定子电压的控制	44
4.2 整流器	45
4.3 逆变器	52

4.4 变频器	57
4.5 电压源逆变器的控制	58
4.6 电流源逆变器的控制	71
4.7 可变速传动中变换器运行的副作用	74
4.8 小结	76
第5章 标量控制方法	78
5.1 异步电动机的两电感等效电路	78
5.2 开环标量转速控制 (恒定电压/频率)	81
5.3 闭环标量转速控制	84
5.4 标量转矩控制	85
5.5 小结	88
第6章 异步电动机的动态模型	89
6.1 电动机变量的空间矢量	89
6.2 异步电动机的动态方程	92
6.3 旋转参考坐标系	95
6.4 小结	98
第7章 磁场定向	99
7.1 直流电动机中转矩的产生和控制	99
7.2 磁场定向原理	100
7.3 直接磁场定向	102
7.4 间接磁场定向	105
7.5 定子和气隙磁通定向	107
7.6 具有电流源逆变器的传动	112
7.7 小结	113
第8章 直接转矩和磁通控制	115
8.1 用逆变器状态选择的异步电动机控制	115
8.2 直接转矩控制	117
8.3 直接自控制	125
8.4 空间矢量直接转矩和磁通控制	131
8.5 小结	132
第9章 转速和位置控制	134
9.1 异步电动机传动中的控制变量	134
9.2 转速控制	135

9.3 机器智能控制器	138
9.4 位置控制	146
9.5 小结	148
第 10 章 无传感器传动	149
10.1 异步电动机无传感器控制中的问题	149
10.2 磁通计算器	150
10.3 转速计算器	154
10.4 参数自适应和自投入运行	162
10.5 商品化的可调速传动	167
10.6 小结	170
参考文献	171
符号汇编	193
英汉术语对照	198

第1章 基础知识

在本绪论章中，给出异步电动机的一般特性及其在交流传动系统中的应用。介绍常见的机械负载及其特性，并阐明运行象限的概念。简单地回顾异步电动机的控制方法。

1.1 异步电动机

三相异步电动机在工业中应用是如此普遍，以致在许多工厂中未能找到其他类型的电机。作者记得曾与制造设备的维修管理人员的谈话，当问及在工厂现场他们有什么类型的“马达”时，回答是：“当然是电动机，还能有什么？”。当弄清楚时，所有数以百计的电动机都是感应的、笼型的。这种简单又坚实的电机，19世纪末的一个精巧的发明，在工业实际中仍旧保持它的广泛的普及性。

异步电动机采用简单但又灵巧的机电能量变换方案。在构成绝大多数异步电机的笼型电动机中，转子是不能进入的。它没有运动接触，例如没有在直流电机中需要的换向器和电刷或者在交流同步电动机和发电机中需要的集电环和电刷。这种结构大大地提高了异步电动机的可靠性，且消除了火花的危险，允许笼型电机安全地用于苛刻的环境中，甚至在爆炸性的大气中。转子中没有绕组，提供了更加坚固的结构，它的“绕组”由无绝缘材料的导条形成“鼠笼”，电动机也由此得名。这样坚实的转子可以在高速下运转，且可经受住繁重的机械和电气的过载。在可调速传动（ASD）中，它有低的电时间常数加快对控制指令的动态响应。一般，异步电动机有大的转矩储备和转速不太取决于负载转矩。

不太普及的绕线转子异步电动机用于专门应用，其中实际存在的和可进入的转子绕组是一个优点。电流经由定子上压在转子集电环上的电刷可以流入绕组。在最简单情况下，在传动系统的起动期间，为了减小电动机电流，把可调电阻（变阻器）连接到绕组上。当电动机

已经到达运行转速时短接绕组端子。在结构更复杂的所谓串级系统中,在某种条件下,从转子吸取过量的电功率并回馈给电网,使转速能够控制。要为由绕线转子电动机提供的这种附加的可能性付出代价,即它们比笼型电动机更昂贵和较低的可靠性。今日工业中,绕线转子电动机已日益罕见,已经被笼型电动机的可控传动逐步淘汰。因此,在本书中将只考虑后一种电动机。

尽管异步电动机的运行原理仍保持不变,这些年来,特别是最近几十年,已经取得了重要的技术进步。与它们的原型比较,今日的电动机是更小、更轻、更可靠和效率更高。所谓的高效率电动机被广泛地应用,其中减小电阻的绕组和低损耗的铁磁材料导致消耗能量有确实的节省。高效率电动机比标准电动机稍微昂贵一点,但在大多数应用中,简单的偿还周期是短的。保守地说,一台异步电动机的平均使用寿命可以设想为大约 12 年(虽然恰当地维护电动机可以工作数十年),所以常用例如在 2 年内补偿它的较高价格的高效率电动机来替代旧的标准电动机,这是简单的常识问题。

1.2 异步电动机的传动系统

驱动机械负载的电动机,直接或通过齿轮箱或 V 带传动以及有关的控制设备,譬如功率变换器、开关、继电器、传感器和微处理器,构成一个电气传动系统。应该强调,根据今天的资料,大多数异步电动机传动基本上仍是不受控的,控制功能限于接通和切断电动机。偶然地,在由于负载的大转矩和/或惯性起动困难的传动系统中,使用减小起动电流的简单方法。在必须控制转速、位置或转矩的应用中,直流电动机的 ASD 仍是常见的。然而,异步电动机的 ASD 在工业实际中已经日益普及。这些电动机控制原理和方法方面的进展,在最近 10 年特别引人注目,已经导致具有超过直流传动明显竞争优势的若干种交流 ASD 的研制。

工业中被异步电动机消耗的大多数能量可以追踪到大功率但相对不复杂的机械,譬如泵、风机、鼓风机、研磨机或压缩机。显然,这些传动不需要高动态性能,但转速控制在大多数情况中可以带来明显的能量节约。例如,考虑恒速鼓风机,用控制阀门中的空气流量来调

节它的输出。如果鼓风机是可调速传动系统的一部分，同一阀门可以在全部时间内保持全开放（或者甚至于去掉它）。在低空气输出时，由于降低转速和转矩，电动机会比在它不受控情况下消耗更少的功率。

高性能异步电动机传动，例如机床或电梯的情况，这里精确的转矩和位置控制是必需的，尽管许多复杂的控制技术早已达到实用性的阶段，但它仍旧是相对罕见的。为了有更好的传动性能，高性能可调速传动也日益增加，并用于电力牵引和其他电动车。

除了基于变极数简单的两、三或四速方案之外，异步电动机 ASD 必须包括变频电源（称为**逆变器**）。逆变器是直流电变为交流电的变换器，为此必须由从交流电网馈电的**整流器**供给直流电源。所谓**直流环节**，以放置在整流器和逆变器之间的电容器或者电抗器的形式，获得电压源或电流源的整流器特性。因为整流器从电源系统吸取畸变的、非正弦电流，为了减少电源电流中的低频谐波分量，在它们的输入端需要有无源或有源滤波器。另一方面，逆变器产生高频电流噪声，应不使它影响系统。否则，敏感的通信和控制设备的运行可能会受合成的**电磁干扰**（EMI）的扰动。因此，有效的 EMI 滤波器也是需要的。

对于 ASD 的控制，广泛地采用微型计算机、微控制器和数字信号处理器（DSP）。当加入电压、电流、转速或位置传感器时，ASD 比不受控电动机更显得复杂和昂贵。这是为什么工厂管理者在设置 ASD 时经常是如此谨慎的一个原因。另一方面，运动控制工业已经发展了日益提高效率、可靠性和用户友好系统，而在将来具有异步电动机的 ASD 将肯定获得工业应用的实际份额。

1.3 常见的负载

异步电动机及其控制方案的选择取决于负载。风机的 ASD 将一定不同于造纸厂中的卷纸机，在后一种情况中，加工过程中把狭窄的容差带强加给电动机的转速和转矩。对于负载可以采用各种不同的类型。尤其是，可以根据（a）惯性；（b）转矩对转速特性；（c）控制要求，把它们分类。

大惯性负载，例如电动车辆、卷绕机或离心机，比起泵或研磨机加速和减速更加困难。归算到电动机轴上的总转动惯量可以从传动的动能来计算。例如，考虑具有转子转动惯量 J_M 的电动机通过齿轮比为 N 的传动装置驱动具有转动惯量 J_L 的负载。以角速度 ω_L 旋转的负载的动能 E_L 是

$$E_L = \frac{J_L \omega_L^2}{2} \quad (1-1)$$

而转子角速度是 ω_M 的动能为

$$E_M = \frac{J_M \omega_M^2}{2} \quad (1-2)$$

因此，传动的总动能 E_T 可以表示为

$$E_T = E_L + E_M = \left[\left(\frac{\omega_L}{\omega_M} \right)^2 J_L + J_M \right] \frac{\omega_M^2}{2} = \frac{J_T \omega_M^2}{2} \quad (1-3)$$

式中， J_T 是指归算到电动机轴上的系统的总转动惯量。因为

$$\frac{\omega_L}{\omega_M} = N \quad (1-4)$$

则

$$J_T = N^2 J_L + J_M \quad (1-5)$$

电动机中产生的转矩 T_M 与其负载反抗运动的静态转矩 T_L 之间的差 T_d ，被称为动态转矩。按照牛顿第二定律

$$T_d = T_M - T_L = J_T \frac{d\omega_M}{dt} = \frac{J_T}{N} \cdot \frac{d\omega_L}{dt} \quad (1-6)$$

或

$$\frac{d\omega_L}{dt} = \frac{NT_d}{J_T} \quad (1-7)$$

毫不惊奇，上述方程表明，大的转动惯量造成传动的惰性，故为了负载迅速加速或减速，需要大的动态转矩。

为了计算归于驱动电动车辆或别的线性运动负载的电动机轴上总的转动惯量用等效飞轮的概念是方便的。等效飞轮是设想由电动机直接驱动且它的圆周速度 u_L 等于负载线速度的假设的飞轮。用 r_{eq} 表示等效飞轮的半径，负载的速度可以根据半径和电动机转速表示为

$$u_L = r_{eq} \omega_M \quad (1-8)$$

用 m_L 表示负载质量，它的动能 E_L 方程为

$$E_L = \frac{m_L u_L^2}{2} \quad (1-9)$$

因而可以重新整理成

$$E_L = \frac{m_L (r_{eq} \omega_M)^2}{2} = \frac{J_L \omega_M^2}{2} \quad (1-10)$$

用 J_L 表示负载的有效转动惯量，它由下式得到。

$$J_L = m_L r_{eq}^2 \quad (1-11)$$

因为假设电动机直接地传动等效飞轮（即 $N=1$ ），总的转动惯量 J_T 等于 J_L 与 J_M 之和。

【例 1-1】 如果一台车辆由若干台电动机传动（例如像在电力机车中那样），从单电动机看的负载转动惯量由各个部分的 J_L 来表示。确定由三台电机牵引货运列车的每单台电动机负载转动惯量，每一台用 10 台电动机传动。列车重量 20 000t 且当它运转在 50m/h 时，电动机转子转速为 1500r/min。

等效飞轮半径等于 $(50 \times 1609\text{m}/3600\text{s}) / (1500 \times 2\pi \text{ rad}/60\text{s}) = 0.142\text{m}$ 。按照式 (1-11)，负载的总转动惯量为 $20000 \times 1000\text{kg} \times (0.142\text{m})^2 = 403280\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。从 30 台电动机的每一台看，转动惯量为 $403280\text{kg} \cdot \text{m}^2 / 30 = 13443\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ，仍是一巨大的值。 ■

大多数负载中，静态转矩 T_L 取决于负载角速度 ω_L 。 $T_L(\omega_L)$ 关系通常称为机械特性，它是一个重要的负载特征，因为它与电动机的类似特性 $T_M(\omega_M)$ 的交点确定传动的稳态运行点。用一般方程表示机械特性为

$$T_L = T_{L0} + \tau \omega_L^k \quad (1-12)$$

式中， T_{L0} 和 τ 是常数，可以区别在图 1-1 中所示的三种基本类型：

1. 恒转矩特性， $k=0$ ，典型的为起重机和输送机，以及一般说对于速度只在一窄小范围内变化的负载。

2. 递增转矩特性， $k>0$ ，典型的为泵、风机、鼓风机、压缩机、电动车，以及一般说对于具有宽变化速度的大多数负载。

3. 递减转矩特性， $k<0$ ，典型的为卷绕机。这里，对于卷绕带

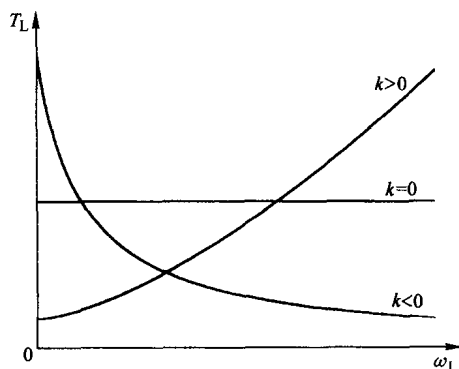


图 1-1 常见负载的机械特性

的恒定张力和线速度，伴随圈径增加转速降低和转矩增加。

用运行区而不是机械特性能更好地描述实际负载。运行区表示一组在 (ω_L, T_L) 平面中所有可能的运行点。拿泵作为一个例子，它的转矩对转速特性显著地取决于泵流体的压力和粘度。类似地，卷绕机的机械特性随着带张力和速度的变化而改变。因此，单一的机械特性不能说明全部可能的运行点。递增转矩负载的一个运行区实例如图 1-2a 所示。显然，如果负载由电动机直接驱动，在 (ω_M, T_M) 平面中电动机运行区和负载的一样。然而，如果负载用齿轮与电动机连接，则负载和电动机的运行区不同，因为齿轮充当机械功率变换器。图 1-2a 中驱动负载的电动机运行区经由 0.5 齿轮比的无摩擦传递如图 1-2b 所示。

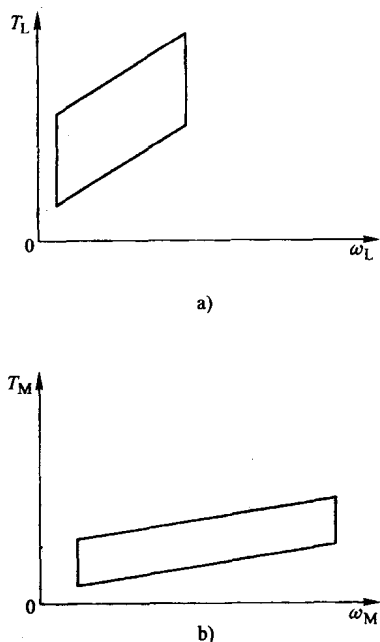


图 1-2 运行区实例

a) 负载 b) 电动机

(两个图中采用相同的转速和转矩标尺)