



装备科技译著出版基金

电动作动器 ——参数辨识与状态观测

Electrical Actuators:
Identification and Observation

[法] Bernard de Fornel Jean-Paul Louis 编
祝晓辉 李颖晖 译
甘德强 主审

WILEY | 国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

电动作动器

——参数辨识与状态观测

Electrical Actuators:
Identification and Observation

[法] Bernard de Fornel Jean-Paul Louis 编

祝晓辉 李颖晖 译

甘德强 主审

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字：军-2014-132 号

图书在版编目（CIP）数据

电动作动器：参数辨识与状态观测/（法）德芙奈儿，（法）路易

斯编；祝晓辉，李颖晖译. —北京：国防工业出版社，2015.10

ISBN 978-7-118-10248-2

I. ①电… II. ①德… ②路… ③祝… ④李… III. ①电机学

IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 227324 号

Electrical Actuators, by Bernard de Fornel, Jean-Paul Louis, ISBN 978-1-84821-096-7.

© ISTE Ltd 2010

All rights reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with National Defence Industry Press and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书简体中文版由ISTE Ltd和John Wiley & Sons, Inc. 授权国防工业出版社独家出版。

版权所有，侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

（北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048）

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 24¼ 字数 508 千字

2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 119.00 元

（本书如有印装错误，我社负责调换）

国防书店：（010）88540777

发行邮购：（010）88540776

发行传真：（010）88540755

发行业务：（010）88540717

前 言

电动作动器（就最为传统的基于派克假设学说的直流电动机与交流电动机而言）一直是科学研究重点关注的学科方向，并已在工业上获得了极为广泛的应用。电动作动器的工作原理已广为人知，其控制建立在电机交直流解耦特性基础之上，即直轴用于控制激磁磁通，交轴用于控制电磁转矩，基于这种解耦控制思想的控制器无论是在性能上还是鲁棒性上都与电动作动系统的特性参数极为匹配。

经交直流解耦独立调节后的叠加控制策略使得对电机磁链、转速（通过调节电磁转矩来实现）等关键变量的动态控制成为可能，并且还可借以实现“主动安全控制”（例如应对驱动器的瞬时功率限制）。如果设计者能够获得具有确定性参数的精确数学模型，那么这种控制策略实施起来就更为有效。实际上，控制器设计应用的就是电动作动器的最为本质的内在特性。电动作动器的“直接模型”建立在电机的物理运动方程之上，从这个模型方程出发，就可以得到电机的“可逆模型”，利用该模型进而可以直接深入到控制器结构设计的本质问题并选择相应的控制算法，以使调节器或控制器与原系统达到最佳程度的匹配。由此可见，了解电动作动器的物理定律以及模型方程的参数值就成为一个十分必要的前提。

此外，对电动作动器进行控制所需要的一些变量（例如异步电机的磁链与电磁转矩）不易通过物理测量直接获取，即便是存在磁链传感器和电磁转矩传感器，由于其价格非常昂贵，因此很少在实际系统中得以应用，电动作动器的转速控制也存在类似的情况，因此无机械传感器控制日益得到广泛的研究和应用。机电作动器的高性能控制需要用到这些变量的精确数值。

本书的付梓得益于相关作者在科研、教学以及实际应用方面的丰富经验与专业知识。该书出版的目的在于为读者提供关于交流电机参数辨识与状态观测的专业性参考，书中电机的参数辨识既包含“离线辨识”，也包含电机实际运行状态下的“在线辨识”，而状态观测主要解决交流电机不便于直接测量的参数的估计问题。

通过阅读本书，读者会发现书中所有的章节都花费一定的篇幅讨论电机数学模型的建立问题，这些数学模型形式各异、数量众多，从用于转速无传感器估计的数学模型到用于磁路饱和和感应电机参数估计的数学模型，林林总总，不一而足。这样做的目的就在于帮助读者根据研究问题的需要选择最适合的数学模型，而不

是一成不变地使用电机的理想数学模型,况且能够解决所有问题的完美数学模型也是不存在的。

本书对参数辨识与状态观测许多不同方法的研究与阐述出于这样一个目的,即寻找以下建立电动作器数学模型两个相互矛盾的限制条件的最佳折中解决方案。

- 为了使数学模型尽可能多地反映出电机实际运行的物理现象,模型应该足够精确,但对精确模型有效性的验证往往极为复杂;
- 为了使数学模型能够被现代数字控制系统中的计算机进行实时处理,要求所建立的模型必须足够简化。事实上,计算机的处理周期直接取决于处理器的运算速度,电动作器在计算机实时控制过程中对相关算法的执行时间提出了较高要求。

同理,在线或离线测量得到的变量也要通过模拟滤波器或数字滤波器进行数据处理。

第1章、第2章、第3章为本书的第一部分,这些篇章主要致力于解决同步电机与异步电机的参数测量以及辨识问题。作者力图就以下两个方面进行系统的概述与总结:一是关于电动作器物理参数的稳态测量,其中包含对一些非线性问题的处理,比如由电机磁路饱和带来的非线性问题;二是关于电动作器的动态运行参数估计,对这一问题的阐述将有助于读者更好地理解交流电机运行时的物理特性,同时也有助于读者建立系统的动态模型并将其用于控制器的设计。在研究参数测量与辨识问题的过程中,作者着力在用于系统模型描述的“白箱”与“黑箱”两种研究方法中寻求折中与平衡,为此,主要完成了以下两个方面的工作。

- 离线状态下进行物理参数的测量或辨识,这些参数主要用于建立系统的仿真模型并进行控制器设计;
- 在线状态下进行物理参数的实时辨识,这些参数主要用于自适应控制器设计,自适应控制需要考虑由于实际运行条件、磁路状态以及温度变化等因素带来的参数变化,实时在线参数辨识主要使用卡尔曼滤波技术。

“正弦模式下异步电机的模型参数辨识”一章由爱德华·拉罗史(E. Laroche)与让·保罗·路易斯(J. P. Louis)共同撰写,本章关于感应电机的参数辨识方法是对经典测量方法的扩展。书中研究的参数辨识算法使用感应电机的等效电路,该等效电路首先对漏磁链在转子侧以及定子侧进行分解,为方便起见,一般以转子侧为参考。通过利用该方法建立的稳态模型可以获得感应电机的一些关键参数,而这些参数可用来对电机进行瞬态分析与控制(例如用于矢量控制策略)。基于该等效电路的模型方程精确性较高,但存在的问题是模型参数可能不便于通过实际测量得到,或者即使能够通过实际测量得到,却存在难以接受的测量误差;此外,应用电机领域内广为熟知的“空载测试法”及“短路电流测试法”也无法

获得所需精度的数学模型；最后，在设计高性能控制器时，必须对电机的磁路饱和效应加以考虑并将其体现在数学模型当中。基于以上种种原因，寻找最优参数辨识方法就显得尤为必要，这里需要考虑的问题是：应该选用哪种类型的数学模型？如何识别这些数学模型？应该进行哪些必要的测量工作？现代参数辨识方法已经超越简单的最优化方法从而用来获取最优的参数估计值，这体现出模型参数辨识方法追寻“优中取优”的客观需求。

“饱和状态下异步电机的建模及参数辨识”一章由欧内斯特·马塔涅（E. Matagne）与伊曼纽尔·德耶格（E. de Jaeger）共同撰写，作者在本章中提出一种派克模型，与一般派克模型不同的是，该模型的建立忽略了通常的所谓线性假设条件。应用该模型不仅可以通过常规测试方法确定模型方程的一般参数值，而且也可以反映由于永磁材料本质非线性特性导致的磁路交叉饱和现象。这就调和了传统建模方法与现代建模方法的相悖之处，由此获得了异步电机较为适当实用的数学模型。尤为值得一提的是，书中“磁性正交”条件的提出需要用到“磁共能”的概念，磁共能只不过相当于磁场能的一部分，而磁场能则能够全面反映磁场最为根本的物理含义。本章中，作者竭力阐述“审慎测量”的基本观点，要求测试人员必须熟知并理解数学模型所反映的物理特性，因为所建立的数学模型正是依据这些物理特性来确定与其相对应的参数，这些物理特性包括非线性现象以及铁损等。建模过程中确定相关参数的精确度也是非常有益的，这使得我们可以根据需要进行一定限度的精确测量并引入必要的近似处理方法。显然，作者在这一过程中试图将其自身的经验融入异步电机模型建立与参数辨识领域。

“异步电机实时参数估计”一章由卢克·欧诺伦（Luc Loron）撰写，作者在本章中研究了异步电机参数变量的在线或实时估计的处理过程。异步电机的参数在电机运行过程中有些会发生变化，而有些参数又不能够通过机械传感器直接测量得到，例如，绕组电阻在电机运行时受温度的影响而发生变化，绕组电感数值则由铁芯的磁饱和状态决定；磁链和转速则无法直接测量，而这两个参数对于控制器设计又是必须的。前面章节讨论的数学模型能够充分反映电机实际的物理状态，但模型参数的辨识算法非常复杂，运算周期长，需要对测试数据进行离线处理。相反，参数在线辨识对算法提出了较高的要求，要求算法运算速度快、算法稳定性好，参数辨识实时算法在控制系统中不能破坏原系统的稳定性，同时能够提供精度比较高的实时辨识数据。读者在本章中将会发现，作者不仅应用最小二乘法、扩展卡尔曼滤波理论以及伦伯格观测器等方法来获得准确的参数，同时还对以下问题提供了具体的参考建议，包括模型的相关度问题（即参数的重新整定）、算法的验证问题、状态监测问题（这一问题直至目前仍处于研究中）、采样周期对算法的影响问题、对测量值的模拟电路滤波问题以及算法对参变量无法实现有效辨识时的适应性问题等。此外，作者基于自己的专业经验亦对未来的研究者提供了可供思考的线索。

第4章、第5章、第6章、第7章、第8章为本书的第二部分，这些章节集中论述包括同步电机与异步电机控制在内的具体问题。

- 研究并设计实现降阶观测器及其相关方法，据此确定异步电机观测器的参数鲁棒性；
- 研究同步电机负载转矩以及转子位置角变量的估计与观测方法。

“异步电机线性估计器与观测器”一章由玛利亚·派扎克·大卫（Maria Pietrzak-David）、伯纳德·德芙奈儿（Bernard de Fornel）和艾伦·博斯凯罗尔（Alain Bouscayrol）合作撰写，该章主要论述不可直接测量变量的估计与观测问题。异步电机的磁链是实现异步电机控制的一个非常关键的变量，但磁链很难通过物理测量获得，即使通过在异步电机的气隙中安放磁链传感器来获得磁通量，这又将导致电机的制造成本急剧攀升，而且磁链传感器的组件极易损坏，工作过程中往往产生大量的噪声信号，因此，磁链传感器仅在原型机中加以使用。据此，本章大部分内容讨论磁链的估计与观测问题，同时也研究了转速和负载转矩的观测问题。本章数学模型的建立与选用显得至关重要，这是因为代表实际电机绕组物理状态变化的“本体模型”必须要经过修改，以便用于状态观测的特殊需要。作者在本章中详尽研究异步电机状态变量（定子磁链、转子磁链、绕组电流）以及参考坐标系（定子磁场定向、转子磁场定向、旋转磁场定向）的选取问题，这些工作在基于矢量控制策略或直接解耦控制策略的转速控制器设计中发挥了非常重要的作用。状态变量和参考坐标系的选择、同时影响到估计器与观测器的性能。作者在异步电机磁链估计与观测中运用了以下两种信号自动处理方法：一是全阶确定性状态观测器（由极点配置方法进行综合），二是线性随机状态观测器（由最优化方法对卡尔曼-布西（Kalman-Bucy）滤波器进行综合）。这些观测器算法通过改变相应的结构就可以用来对转速进行观测。文中同时考虑了非线性观测器设计方法，诸如自适应非线性观测器以及滑模变结构观测器。这些算法均经过作者的实际工作加以实例验证。研究人员与工程技术人员在处理类似的问题时可以根据需要选择合适的观测算法，从而快速高效地解决相关实际问题。

“异步电机确定性磁链观测器的结构分解：笛卡儿结构与降阶结构”一章由艾伦·博斯凯罗尔（Alain Bouscayrol）、玛利亚·派扎克·大卫（Maria Pietrzak-David）和伯纳德·德芙奈儿（Bernard de Fornel）共同主笔，该章研究了一些具体问题与解决方案。本章的目的在于通过研究降阶观测器从而获得电动作动器更为简化的模型与算法，传统的基于扩展模型的观测器在结构上往往比较复杂。对于传统意义上比较复杂的扩展状态观测器，作者独辟蹊径，使用颇有趣味的原创性“笛卡儿结构”简化了观测器设计，这种方法将扩展状态观测器解耦为各个独立的子观测器，每个子观测器将各自的变量对应于独立的参考坐标轴。必须说明的是，这种降阶解耦的有效性利用了一定程度的近似假设条件，即转子旋转速度与电气参量两者之间的时间尺度（时间常数）相差较大，因此可以

独立地对机械变量与电气变量进行估计,这样,四阶状态观测器就可以在一定假设条件下分解为两个独立的二阶状态观测器的组合形式。该方法特别适合于解决以下实际问题:

- 可以实现直接转矩控制策略下的定子磁链的鲁棒估计;
- 可以实现传统矢量控制策略下的转子磁链的鲁棒估计。

作者通过使用笛卡儿观测器对定子磁链与转子磁链进行观测,强调静止状态下磁通量的不可观测性,并且给出了该观测器完整的综合方法。笛卡儿结构观测器的离散化相比扩展状态观测器要更为简单实用。书中同时列举了几种降阶观测器的结构变换形式,并给出了相应的综合实例。降阶观测器的研究成果不胜枚举,但是读者通过本书作者丰富的实践经验,相信可以感悟到其可以自如地解决实际问题。

“基于参数变化敏感性分析法的观测器增益设计”一章由本华·罗宾斯(Benoît Robyns)撰写,本章针对传统而复杂的观测器增益设计方法提出一种全新的解决方案。矢量控制策略中转子磁链观测器是一种针对电气方程的实时仿真算法,磁链观测器既可以是扩展状态观测器,也可以是降阶状态观测器,而且这些观测器的增益是不确定的。观测器增益的选取一般根据极点配置技术,然而,由于电机的运行速度是变化的,观测器增益需要在每一采样周期进行实时计算更新,这必将极大地增加计算负担。实际应用中,通常根据定义的转速范围取恒定的增益值,但这与观测器增益的最优设置以及观测器对参数变化鲁棒性的要求截然相悖,为了解决这个矛盾,作者采取了一种非常有效但还没有被深入研究的方法,这里称为“参数变化敏感性分析法”,该方法可以直接深入到由观测器误差导致磁链观测误差的相互关系问题当中,基于这样的误差敏感性分析,就极大地降低了观测器增益对参数变化的敏感性,从而可以使观测器保持优异的动态特性。在本章中,作者阐明了模型建立、算法设计以及增益选择标准的基本问题,理论分析结果通过有代表性的精确算例进行了很好地验证。结论表明,经参数变化敏感性分析方法设计的扩展状态观测器要优于前面的降阶状态观测器,降阶观测器的特点是对转子电阻误差更为敏感,而转子电阻是异步电机矢量控制中最为关键的一个参数。

在“电机负载转矩观测”一章中,作者莫里斯·桑托罗(Maurice Fadel)和伯纳德·德芙奈儿(Bernard de Fornel)利用可测量的机械参数设计了几种不同结构的负载转矩观测器。对电动作动器来说,转速与转子位置控制对驱动控制环路的影响非常明显,因此,必须通过精确控制电磁转矩来获得转速与转子位置控制的满意效果。

此外,机械负载在电机低速或零速以及准零速范围运行时,经常表现出一些病态特性,调速控制器在这些区域运行时会发生诸多问题,传统控制律往往会失效。本书就此提出一种精确数学模型,以此改善作动器的全局运行特性。

本书的主要贡献在于转矩观测器的设计,正是由于该转矩观测器的结构特性和运行特性,使得其能够监测由于机械负载变化导致的各种扰动,这些扰动因素来自于电机的内部构造,包括齿槽转矩以及反电势扰动等。对转矩扰动量应该进行补偿,方法就是将扰动量注入到控制律当中,由控制器产生转矩补偿量,这样就能平滑电机的有效电磁转矩。据此,称系统具有抗扰功能。

本章提出的解决方案是基于法国图卢兹电子学与电子学工业实验室(Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle, LEEI)的研究成果,该实验室目前为拉普拉斯实验室的一个分支机构,实验过程中完成了基于数字控制器的原型机设计以及全方位测量系统。书中主要对以下内容进行了详细讨论。

- 转速和(或)转子位置测量值的降噪与滤波;
- 参数误差的辨识;
- 控制器或观测器具有充分稳定裕度的动态响应。

一些结论(主要由实验获得)证实了本章所提出方案的相关特点,即当负载和模型(或两者之间任取其一)参数发生变化时系统运行具有较好的鲁棒性。该研究项目的一个主要目标就是寻找当系统具有抗扰功能且驱动参数变化发生时,如何才能在控制稳定性和观测器动态响应之间进行综合地权衡,对这些问题的研究最终导致在确定观测器动态响应特性时,要根据观测器与控制器参数设置以及传感器数量之间的关系进行具体详尽地分析。

本书最后一章命名为“同步电机无机械传感器控制的转子位置观测”,由斯特凡·康克斯(Stéphane Caux)和莫里斯·法德尔(Maurice Fadel)共同撰写,作者在该章中回顾了几种转子位置角的估计方法,应用这样的方法就可以避免对转子位置角进行直接测量,从而可以省掉相应的机械传感器。对一些工程应用来说,即使是使用“低分辨率”的重构后转子位置角也足以保证系统的稳定运行,这主要表现在梯形波反电势同步电机的控制当中。在本章中,作者使用了两种较为精确的估计方法,一种是卡尔曼滤波法,另外一种是解析余度方法,称为“松井观测器”。卡尔曼滤波器算法系统性非常强且数值运算量较大,根据卡尔曼滤波增益的定义,应用卡尔曼滤波器需要考虑初始协方差以及噪声统计特性的问题,此外,卡尔曼滤波器对初始误差比较敏感。解析余度算法相比卡尔曼滤波算法更为简单,并且能够在低速运行时提供相比后者更为准确的估计结果。作者在不同转速区域内对两种算法的性能进行了对比,同时也研究了两种算法的参数敏感性以及初始误差敏感性。本书研究工作对两种算法的实现(滤波)以及调整提供了具体的可操作的建议,包括增益选取、观测器选择、噪声源识别、初始化以及测量校准。这些研究工作证明了转子位置角估计的可行性,并为如何选择合适的估计算法提供了基本的参考依据。

本书第二部分解决了第一部分所述有关测量的定义,对重要模型的选取以及

如何使用状态估计与状态观测算法都进行了解答。本节应用这些方法和工具提供了基于异步电机和同步电机的电动作动器的控制实现。特别地，本书重点研究了以下两方面的问题。

- 异步电机降阶状态观测器的理论研究及算法实现，使异步电机状态观测器具有鲁棒性的方法；
- 同步电机负载转矩以及转子的状态估计与状态观测方法。

目 录

第一部分 测量与辨识

第 1 章 正弦模态下异步电机的模型参数辨识	3
1.1 引言	3
1.2 数学模型	3
1.2.1 异步电机动态模型	3
1.2.2 四参数模型的建立	5
1.2.3 磁路饱和	8
1.2.4 铁损	9
1.2.5 正弦模态	10
1.2.6 对不同数学模型的归纳总结	11
1.2.7 参数测量	13
1.2.8 铭牌的使用	14
1.3 基于有限参数测量的传统方法	15
1.3.1 定子电阻测量	15
1.3.2 基于转子总漏磁折算的模型	15
1.3.3 基于定子总漏磁折算的模型	18
1.3.4 饱和特性	19
1.3.5 实验结果	19
1.4 以导纳最小化为目标函数的估计法	22
1.4.1 目标函数最小化的参数估计	22
1.4.2 目标函数的选择	22
1.4.3 方法实现	23
1.4.4 估算误差分析	23
1.4.5 实验结果	28
1.4.6 最优实验设计	29
1.4.7 方法总结	31
1.5 线性估计法	31
1.5.1 基本原理	31
1.5.2 五参数模型实例	32

1.5.3	精度分析	34
1.5.4	实验结果	36
1.5.5	“线性化”方法主要结论	39
1.6	结论	39
1.7	附录	40
1.7.1	参数变化敏感性的表示方法	40
1.7.2	所使用电机的特性	41
1.8	参考文献	41
第2章	饱和状态下同步电机的建模及参数辨识	44
2.1	同步电机建模: 一般理论	44
2.1.1	同步电机描述与一般建模假设	44
2.1.2	用于电机研究的基础电路定律	46
2.1.3	用 abc 坐标系内变量表示的模型方程	47
2.1.4	康科迪亚变换: 用 $0\alpha\beta$ 坐标系内变量表示的模型方程	51
2.1.5	派克变换: 用 $0dq$ 坐标系内变量表示的模型方程	57
2.1.6	电机与三相轴系的连接关系	61
2.1.7	转子电路到定子电路的化简	62
2.1.8	相对单位(标么值)	68
2.2	经典模型及其参数测试	69
2.2.1	非饱和状态同步电机	69
2.2.2	通用经典测试方法	72
2.2.3	保梯方法	80
2.3	高等模型: 饱和状态同步电机	83
2.3.1	冯·德恩伯理论关于饱和电机的基本假设: 磁路饱和状态下的电感电路	83
2.3.2	饱和状态下的磁耦合一般研究	84
2.3.3	模型实现	92
2.4	参考文献	95
第3章	异步电机实时参数估计	97
3.1	简介	97
3.2	参数估计的目标	98
3.2.1	关于电机的控制	98
3.2.2	关于电机的故障诊断	100
3.3	基本问题	101
3.3.1	模型的可辨识性、可参数化及可验证性	102

3.3.2	采样周期的选择及数字化实现问题	104
3.3.3	状态监测与数据分析	107
3.4	最小二乘法	113
3.4.1	最小二乘法与辅助变量法的原理	113
3.4.2	最小二乘法在异步电机中的应用	115
3.5	扩展卡尔曼滤波器	120
3.5.1	基本原理	120
3.5.2	协方差矩阵 Q 与 R 的调整	122
3.5.3	在异步电机中的应用	123
3.6	扩展伦伯格观测器	130
3.6.1	基本原理	130
3.6.2	异步电机转速估计	132
3.7	结论	138
3.8	附录: 电机特性	138
3.9	参考文献	138

第二部分 观测器实例

第 4 章	异步电机线性估计器与观测器	147
4.1	简介	147
4.2	异步电机状态估计模型	147
4.2.1	异步电机派克模型	148
4.2.2	用于磁链估计的几种状态模型	150
4.2.3	磁链估计不同参考坐标系研究	152
4.3	磁链估计	154
4.3.1	简介	154
4.3.2	定子磁链估计器	154
4.3.3	转子磁链估计器	156
4.4	磁链观测	157
4.4.1	全阶确定性状态观测器	157
4.5	线性随机观测器——卡尔曼-布西滤波器	164
4.5.1	简介	164
4.5.2	卡尔曼-布西滤波器模型	164
4.5.3	卡尔曼滤波器的收敛性	166
4.5.4	仿真及实验结果	168
4.6	用于转速估计的独立观测器结构设计	172
4.6.1	简介	172
4.6.2	一般原理	173

4.6.3	转速估计与观测方法	174
4.7	自适应观测器	183
4.7.1	简介	183
4.7.2	观测器增益的确定	185
4.7.3	速度自适应律	186
4.7.4	仿真及实验结果	188
4.8	变结构机械变量观测器 (VSMO)	191
4.8.1	基本原理	191
4.8.2	VSMO 的构造	192
4.8.3	变结构观测器增益设计	193
4.8.4	观测器性能介绍	194
4.8.5	低速运行	198
4.8.6	观测器对参数变化的鲁棒性	199
4.9	结论	201
4.10	参考文献	201

第 5 章 异步电机确定性磁链观测器的结构分解:

	笛卡儿结构与降阶结构	204
5.1	简介	204
5.2	异步电机估计模型	205
5.2.1	异步电机派克模型	205
5.2.2	笛卡儿观测器和降阶观测器的状态方程	207
5.2.3	控制参考坐标系内磁链的确定	209
5.3	笛卡儿观测器	210
5.3.1	笛卡儿观测器的原理和结构	211
5.3.2	几种不同结构的笛卡儿观测器	212
5.3.3	以定子磁链和转子磁链为变量的笛卡儿观测器综合法	214
5.3.4	以定子磁链和转子磁链为变量的笛卡儿观测器的离散化	216
5.3.5	定子磁链与转子磁链笛卡儿观测器的有效性验证	218
5.3.6	笛卡儿观测器评价	219
5.4	降阶观测器	220
5.4.1	降阶观测器的原理和结构	220
5.4.2	几种不同的降阶观测器	222
5.4.3	降阶磁链观测器综合	224
5.4.4	降阶磁链观测器的离散化	226
5.4.5	降阶磁链观测器的有效性验证	226
5.4.6	降阶观测器评价	227

5.5	笛卡儿观测器和降阶观测器的主要结论	227
5.6	附录: 所研究异步电机的参数	228
5.7	参考文献	228
第 6 章	基于参数变化敏感性分析法的观测器增益设计	231
6.1	简介	231
6.2	磁链观测器	232
6.2.1	转子磁链估计器	232
6.2.2	降阶磁链观测器	233
6.2.3	全阶磁链观测器	234
6.2.4	观测器增益选择	235
6.2.5	参考坐标系选择	236
6.3	参数敏感性分析方法	236
6.3.1	磁链幅值与相位差估计	236
6.3.2	磁路饱和带来的影响	239
6.3.3	磁链估计误差的计算算法	239
6.3.4	定子电流的变化	240
6.4	观测器增益的选取	240
6.4.1	极点配置与参数变化敏感性	240
6.4.2	最优状态观测器	242
6.5	降阶磁链观测器	243
6.5.1	控制策略	243
6.5.2	磁链定向和幅值的估计误差	244
6.5.3	理论结果	244
6.5.4	实验结果	247
6.6	全阶磁链观测器	250
6.6.1	控制策略	250
6.6.2	磁链定向和幅值的估计误差	250
6.6.3	理论结果	250
6.6.4	实验结果	254
6.7	结论	257
6.8	附录: 鼠笼转子式异步电机的主要参数	257
6.9	参考文献	257
第 7 章	电机负载转矩观测	259
7.1	简介	259
7.2	旋转轴系内的负载转矩特性描述	260

7.2.1	简介	260
7.2.2	电机电磁转矩的崩溃	260
7.2.3	改变接触方式造成的负载转矩崩溃	263
7.3	基于负载转矩观测的作动器模态控制	267
7.3.1	简介	267
7.3.2	作动器的状态空间描述	268
7.3.3	能控性和能观测性分析	269
7.3.4	状态反馈控制律	270
7.4	负载转矩观测	277
7.4.1	简介	277
7.4.2	积分环路观测器	277
7.4.3	全阶观测器	284
7.4.4	基于位置角测量的降阶双变量状态观测器	290
7.4.5	基于转速测量的降阶单变量状态观测器	298
7.4.6	不同类型观测器的对比研究	302
7.5	基于阻转矩观测的状态反馈控制律鲁棒性分析	303
7.5.1	简介	303
7.5.2	研究背景	304
7.5.3	作动器位置角的鲁棒性	305
7.5.4	作动器旋转速度的鲁棒性	307
7.5.5	结论	310
7.6	实验结果	312
7.6.1	简介	312
7.6.2	基于扰动转矩观测器的模态控制主要结论	313
7.6.3	非线性摩擦造成的影响	319
7.7	结论	323
7.8	参考文献	323

第 8 章 同步电机无机械传感器控制的转子位置观测 328

8.1	最新研究进展	328
8.2	低分辨率转子位置信息重构	332
8.2.1	等效反电势测量	333
8.2.2	利用电机中性连接点重构反电势和值	334
8.2.3	扩展派克变换参考坐标系的应用	334
8.2.4	两相参考坐标系的应用	335
8.3	基于冗余观测器的精确状态重构	335
8.3.1	解析冗余的原理与实现	336

8.3.2	观测器误差校正增益的调整	340
8.3.3	参数敏感性与鲁棒性	348
8.3.4	实验结果	350
8.4	基于卡尔曼滤波器的状态精确重构	351
8.4.1	概述	351
8.4.2	卡尔曼滤波器在同步电机无机械传感器控制的应用	355
8.4.3	在同步电机中的应用	356
8.4.4	增益调节	358
8.4.5	对卡尔曼滤波器因子调整方法的综合分析	363
8.5	卡尔曼滤波器及解析冗余观测器用于状态重构的比较	364
8.5.1	转速变化对观测器的影响	364
8.5.2	转子初始位置对观测器的影响	365
8.5.3	电气参数敏感性	366
8.5.4	负载转矩对观测器的影响及管理	367
8.6	参考文献	369