

非线性无源控制理论 及其在风力发电机组中的应用

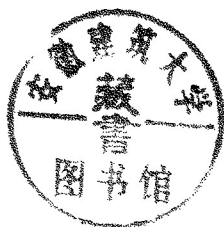
王冰 袁越 编著



科学出版社

非线性无源控制理论 及其在风力发电机组中的应用

王 冰 袁 越 编著



科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍了非线性无源控制理论及其在风力发电机组控制中的应用,全书共分为8章.第1章介绍本书的背景知识.后续章节分为三部分内容:第一部分是理论基础部分,其中第2章介绍非线性系统基本概念,第3章介绍无源性及相关理论;第二部分是技术路线部分,其中第4章是无源控制设计方法,第5章是Hamilton系统无源性设计;第三部分是应用研究部分,叙述风力发电机组的无源性设计方法,其中第6章介绍风力机和风力发电机组的基本知识,第7章对风力发电机组各环节进行无源性设计,第8章则进行了风力发电机组多种无源控制研究.

本书可供从事控制理论及其应用研究的科研工作者、工程技术人员、高校教师和研究生阅读和参考.

图书在版编目(CIP)数据

非线性无源控制理论及其在风力发电机组中的应用/王冰,袁越编著. —北京:科学出版社,2015.3

ISBN 978-7-03-043241-4

I. ①非… II. ①王… ②袁… III. ①自动控制理论-应用-风力发电机-发电机组-研究 IV. ①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 023351 号

责任编辑:惠 雪 李涪汁 / 责任校对:朱光兰

责任印制:李 利 / 封面设计:许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河骏杰印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年3月第一次印刷 印张:13 1/2

字数:270 000

定价:69.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着控制理论的发展,研究对象由线性系统转移到非线性系统,非线性对象的复杂多样性成为控制理论研究的难点,得到了广泛的关注.非线性系统和线性系统相比有本质的差别.在参数空间中,代表线性系统的只是一个点,而对于非线性系统,参数空间的概念已不能适用.影响系统动态特性的是一些非线性函数,这些函数千差万别,且一般说来很难确切地加以描述,这给非线性系统的分析与设计带来极大的困难,所取得的成果也没有线性系统那么丰富、成熟.另一方面,非线性和线性系统的控制也并非是泾渭分明的,一个非线性系统中的非线性特征如果退化为不变的参数,那么就与原系统的线性情况一样.因此,一个“弱”非线性系统的动态特性不至于脱离其一次线性近似太远,这就为这两种系统控制理论和方法的相互借鉴提供了条件.

非线性系统控制领域是当前控制理论中成果最为突出的领域,而无源性理论和无源控制方法正是其代表性成果之一.本书对近十年来无源性理论和方法进行总结和整理,引入当前最新的一些理论成果和设计方法,一方面说明以无源性为核心的理论框架及其灵活实用的设计方法,另一方面最新成果的引入也为无源性理论未来的发展提供一些线索.通过对无源性理论和无源控制方法的介绍,吸引更多科研工作者关注该研究领域的进展,为非线性控制理论发展注入动力.

能源、环境是当今人类生存和发展所要解决的紧迫问题.常规能源以煤、石油、天然气为主,不仅资源有限,而且造成了严重的大气污染.因此,对可再生能源的开发利用,特别是对风能的开发利用,已受到世界各国的高度重视.与此相对应,可再生能源领域成为当前备受关注的前沿领域,而风力发电是该领域的重中之重.面对风力资源的大规模开发利用,对风力发电机组的控制问题,专家和学者进行了大量的研究,其中既有传统的线性控制方法,也包括一些非线性领域新的研究成果.因此,介绍风力发电机组的无源控制成果是本书的重要特色,当前还没有看到类似著作.在风力发电机组传统的控制方法之外,无源控制为其开辟了一条新的途径.该方法充分利用系统自身的物理特性,简化控制策略,改善控制效果,具有较强的理论价值和实际意义.本书可为高校的科研人员和研究生提供风力发电系统研究的新思路,也可为新能源领域的工程技术人员改进风力发电机组控制提供新方案.

本书的结构如下:第1章是绪论部分,主要介绍无源控制理论的发展脉络和风力发电机组控制的研究背景,进而提出本书的主要线索和特点.第2章简要介绍有关的理论知识,其中包括非线性系统模型描述、Lyapunov 稳定性、输入输出稳

定性、坐标变换和一些图论的基础知识. 第 3 章叙述无源性概念及相关理论, 一方面说明无源性的概念和无源性的实现方法, 另一方面则注重无源性与相关概念的联系, 将无源性理论拓展到更为广阔的理论空间中. 第 4 章在上一章理论的基础上, 进一步给出无源控制设计方法, 首先是基本无源控制设计, 进而介绍鲁棒无源控制设计、自适应无源控制设计等, 并介绍了分布式无源性系统的最新研究成果. 第 5 章是第 4 章的延续, 通过 Hamilton 系统实现来完成无源性设计并加以拓展. 首先由 Euler-Lagrange 系统开始, 发展到 Hamilton 系统实现方法; 而后, 将这类系统由一般形式聚焦到端口受控耗散 Hamilton 系统; 进而, 研究端口受控耗散 Hamilton 系统的互联与控制、自适应鲁棒控制和协同控制问题. 第 6 章是风力发电机组的内容, 介绍风力机的结构和相关理论, 以及风力发电机组的模型和相关控制技术. 第 7 章利用无源性设计方法对风力发电机组内部相关控制环节加以设计, 包括变桨机构、传动环节、变流器、发电机等. 第 8 章相比于第 7 章则更关注于几类典型发电机组的无源控制问题, 具体包括定速风力发电机组、双馈感应风力发电机组、永磁风力发电机组; 并且在对单机研究的基础上, 进一步讨论了风力发电机组多机系统的协同控制问题.

本书的出版得到了国家自然科学基金 (51007019) 和国网科技项目的资助. 在本书撰写过程中, 得到了河海大学能源与电气学院各位领导和老师的关心和支持, 在此对他们表示由衷的感谢! 同时本书撰写工作还得到一些研究生的直接帮助, 特别要提到的是刘海巍、徐枫、徐偲喆、查晓锐和窦玉等同学, 在此对他们表示诚挚的谢意!

由于编著者水平有限, 书中难免存在一些缺点和错误, 敬请读者给予批评和指正.

王 冰

2014 年 8 月于南京

目 录

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	无源性概念与无源控制方法	1
1.2	风力发电机组发展与控制	3
1.2.1	风力发电机组的发展	3
1.2.2	风力发电机组的控制	4
1.3	本书的内容和特点	6
第 2 章	非线性系统基本概念	7
2.1	非线性系统描述	7
2.2	Lyapunov 稳定性理论	8
2.2.1	Lyapunov 稳定性	8
2.2.2	Lyapunov 稳定定理	10
2.3	输入输出稳定性概述	12
2.3.1	L_p 空间及其拓展	12
2.3.2	输入输出稳定性与 L_p 稳定性	13
2.3.3	L_2 增益与小增益定理	16
2.4	坐标变换及相关概念	18
2.5	图论基础	22
第 3 章	无源性及相关理论	24
3.1	无源性概念	24
3.2	无源性实现	27
3.3	无源性与耗散性	30
3.3.1	耗散系统特性	30
3.3.2	耗散性判据	32
3.4	无源性与稳定性	37
3.4.1	Lyapunov 稳定性与 L_2 稳定性	37
3.4.2	绝对稳定性	39
3.5	反馈系统无源性	44
第 4 章	无源控制设计方法	51
4.1	无源控制设计基础	51

4.2 鲁棒无源控制设计	57
4.2.1 鲁棒无源性	57
4.2.2 鲁棒无源镇定控制	60
4.2.3 鲁棒无源 L_2 性能综合	65
4.3 自适应无源控制设计	74
4.3.1 自适应无源控制器设计	74
4.3.2 自适应无源 L_2 性能设计	76
4.4 改进型无源控制设计	79
4.4.1 输入受限无源控制设计	79
4.4.2 多输入协调无源控制设计	80
4.5 分布式无源性系统研究	82
第 5 章 Hamilton 系统无源性设计	88
5.1 Euler-Lagrange 系统概述	88
5.1.1 Euler-Lagrange 方程形式	88
5.1.2 含控制的 Euler-Lagrange 系统与无源性	89
5.1.3 Euler-Lagrange 系统控制器设计	91
5.2 Hamilton 系统产生与实现	92
5.2.1 由 Euler-Lagrange 系统到 Hamilton 系统	92
5.2.2 端口受控 Hamilton 系统	94
5.2.3 端口受控耗散 Hamilton 系统	98
5.3 耗散 Hamilton 系统互联与控制	101
5.3.1 标准反馈互联控制	101
5.3.2 无源性反馈互联控制	111
5.4 耗散 Hamilton 系统自适应鲁棒控制	115
5.4.1 端口受控耗散 Hamilton 系统鲁棒控制	115
5.4.2 端口受控耗散 Hamilton 系统自适应鲁棒控制	119
5.5 耗散 Hamilton 系统多机协同控制	120
5.5.1 两个端口受控耗散 Hamilton 系统协同控制	120
5.5.2 多个端口受控耗散 Hamilton 系统协同控制	123
第 6 章 风力机与风力发电机组	128
6.1 风力机的结构与分类	128
6.2 风力机的基础理论	130
6.2.1 贝兹理论	130
6.2.2 最大功率跟踪	133
6.3 典型风力发电机组结构与模型	135

6.3.1	定速感应风力发电机组	135
6.3.2	双馈式风力发电机组	139
6.3.3	直驱式永磁风力发电机组	144
6.4	风力发电机组控制技术	149
6.4.1	风力发电控制的发展	149
6.4.2	风力发电控制技术研究现状	151
第 7 章	风力发电机组环节无源性设计	155
7.1	桨距角与传动机构无源控制	155
7.1.1	桨距角与传动机构模型	155
7.1.2	无源控制器设计	157
7.1.3	仿真验证	159
7.2	风能转换系统无源控制	161
7.2.1	风能转换系统模型	161
7.2.2	无源控制器设计	163
7.2.3	仿真验证	165
7.3	网侧变流器无源控制	166
7.3.1	双 PWM 变换器模型	166
7.3.2	无源控制器设计	167
7.3.3	仿真验证	168
7.4	双馈感应发电机组无源控制	171
7.4.1	双馈感应发电机组模型	171
7.4.2	无源控制器设计	172
7.4.3	仿真验证	175
7.5	永磁发电机组无源控制	177
7.5.1	永磁发电机组模型	177
7.5.2	无源控制器设计	178
7.5.3	仿真验证	179
第 8 章	风力发电机组多种无源控制研究	181
8.1	定速风电机组控制分析	181
8.2	双馈感应风电机组输入受限无源控制	182
8.2.1	双馈感应风电机组无源性实现	182
8.2.2	输入受限无源控制设计	183
8.2.3	仿真验证	185
8.3	永磁风电机组多输入协调无源控制	186
8.3.1	永磁发电机组增量模型	186

8.3.2 协调无源控制器设计	187
8.3.3 仿真验证	189
8.4 风电多机组系统协同控制	190
8.4.1 协同控制设计方法拓展	190
8.4.2 双馈感应风电机组双机协同控制	193
8.4.3 永磁风电机组多机协同控制	197
参考文献	203

第1章 绪 论

1.1 无源性概念与无源控制方法

控制对象的内在非线性本质,使非线性系统的研究逐渐成为控制领域的焦点.现代非线性科学揭示的大量事实说明非线性现象自身的复杂多样性,不但无法用线性理论来解决,而且对于这些形式各异的非线性对象,很难找到统一、有效的方法进行处理.近二十年来,非线性控制系统理论和方法得到了蓬勃发展,有更多的研究者转入非线性系统的研究,在非线性理论和非线性控制器设计方面取得了丰硕的成果^[1-5].

在众多非线性理论和方法中,无源性概念和无源控制方法独具特色且自成体系.最初,Popov^[6]和Zames^[7]提出了无源性的概念和无源性定理;进一步,针对更为一般的非线性系统,Willems^[8]提出了耗散性的概念和耗散系统理论.此后,这些描述性的概念逐步转化为重要的设计工具,比如Kokotovic等^[9]提出的反馈无源性设计方法,可对互联系统进行控制器设计.无源性的概念提出后,经过多年国内外学者辛苦的工作,形成了一系列基于系统无源性的控制策略,为应用于实践奠定了坚实的理论基础^[10,11].从20世纪90年代末期以后,Ortega等在使用无源性控制方法应用于Euler-Lagrange方程模型中得到启发,提出了一类系统模型,即端口受控耗散Hamilton系统(ported-controlled Hamiltonian with dissipation, PCHD)^[12,13].此类系统不仅包括了基本的Euler-Lagrange系统,而且对于稳定的仿射系统,可以把它转化为PCHD模型,并由此产生了基于PCHD的模型以及结合Hamilton系统理论与无源控制方法的能量平衡控制设计方法.

1. 无源控制方法

无源性的概念首先出现在一些物理系统中,如动力系统、相对阶数小于等于1的电路系统等.20世纪70年代,Willems通过引入一种基于系统状态的函数——存储函数,来表示系统所储存能量的大小,再引入由系统输入与特定输出描述的系统的输入能量,称为供给率,得到了无源网络系统的能量平衡方程:输入能量=最后存储能量-初始储量能量+系统耗散的能量,由此定义了耗散性.存储函数总是半正定的,这就为使用Lyapunov稳定判据提供了很大的便利,因为对于无源系统来说,存储函数在一定情况下可以作为Lyapunov函数,这一特性为无源性理论和非线性理论的结合提供了很好的条件.1991年,Byrnes等运用非线性几何方法完

整地解决了仿射非线性系统在状态反馈下实现无源化的充分必要条件, 成为了非线性系统无源性方法的里程碑^[14]. 后来, Lin 等对无源性理论做了更深入系统的研究, 对无源性理论的拓展作出了很大的贡献^[15]. 与此同时, 国内对于无源控制方法的研究和应用也取得了一系列优秀的成果^[16,17], 其应用领域包括电力系统^[18]、发电机组^[19,20]、机器人控制^[21] 等.

2. 互联与阻尼配置无源性方法

Ortega 等针对无源性方法在由 Euler-Lagrange 方程描述的系统应用中的弊端, 对系统进行了扩展, 并推导出基于扩展系统的一套有效的设计方法. 选择闭环系统期望的存储函数, 配置与系统结构相关的互联矩阵、阻尼矩阵等, 最后通过求取偏微分方程获得控制率. 这就是互联与阻尼配置无源性方法 (interconnection and damping assignment passivity-based control, IDA-PBC)^[22,23]. 所以使用 IDA-PBC 实现镇定问题, 最终可以归结为求解一类偏微分方程, 这里可以利用能量平衡方程来选择合适的闭环 Hamilton 函数, 将偏微分方程转换成简单易于求解的一组常微分方程. IDA-PBC 的主要特点是应用于由 PCHD 模型所表示的系统, 其中 Hamilton 函数是系统的存储函数, 可以作为 Lyapunov 函数来判定系统的稳定性. 在文献 [24] 中给出 PCHD 系统的能量平衡特性, 表明了能量的转化形式, 即系统内部所储存的能量总是小于等于外界对系统所做的功. 给定一个 PCHD 和一个期望的平衡点, 寻找一个反馈控制使得闭环系统仍然是 PCHD 模型, 并且使得闭环系统的存储函数在平衡点处严格取极小值.

3. 分布式无源性系统控制

分布式控制系统是空间分布的动态系统, 其来源于大量的工程实例, 比如飞行器的编队飞行、多机器人系统协作、无线传感网络等^[25-27]. 随着网络技术的迅猛发展和广泛应用, 分布式控制系统向网络化、智能化和综合化发展的趋势日益显现^[28-32]. 最近, 在节点满足无源性条件下, 进一步提出了分布式无源性系统的控制问题^[33,34], 希望基于无源性理论的成果, 为分布式控制系统提出新的解决方案和研究思路. 分布式无源性系统是由多个无源性节点所构成的基于网络的分布式系统. 最初为解决同步问题, 无源性概念和设计方法被引入互联系统的控制中^[35]. 由于无源性系统具有明确的物理背景和工程意义, 这一思想迅速被运用到多种互联系统的控制中^[36,37]. 基于无源性与 Lagrange 系统的内在联系, 且多数机械系统可转化为 Lagrange 系统, 无源性理论与分布式系统相结合在 Lagrange 系统的协调控制中得到快速推广^[38,39]. 在国内, 对于分布式无源性系统的研究方兴未艾, 这一新的系统形式和相应的设计方法, 正在理论上逐步深化, 并在实际中得到应用^[40-42].

1.2 风力发电机组发展与控制

1.2.1 风力发电机组的发展

随着社会的快速发展和经济规模的不断扩大,能源短缺以及能源开发利用所带来的环境问题逐渐成为制约人类社会进步的瓶颈。开发和利用水能、风能、太阳能等可再生能源,改善能源结构已成为解决生存问题、保持社会可持续发展的战略选择^[43-45]。作为可再生能源领域的重要组成部分,风力发电(简称风电)是当前发展最快、最具潜力的清洁能源,因此深入分析和研究风力发电控制技术具有非常重要的意义^[46-48]。

风力发电经过了几十年的发展,发电机组类型多种多样,从运行过程中转速是否变化可以分为两大类:恒速恒频和变速恒频机组。风力发电机在稳定发电运行时,要求发出电能的频率保持恒定,并与电网频率保持一致。恒速恒频风力发电机组是指在发电过程中,发电机的转速基本不变,从而得到频率恒定的电能;而变速恒频是指随着风速的变化,发电机组的转速也在变化,并借助其他变换装置和控制方法来得到频率恒定的电能。

1) 恒速恒频风电机组

恒速恒频风电机组包括定桨距和变桨距两种类型。定桨距风机技术主要利用桨叶翼形的失速特性,在高于额定风速时,如果达到失速条件,桨叶表面产生涡流,效率降低,达到限制功率的目的。变桨距风机在风速高于额定风速时,通过调节桨距角的变化,减少吸收的风能,从而使风电机输出的有功保持稳定,这体现了变桨距风机的优势。恒速恒频风电机组运行中需要从电网中吸收无功,这会导致电网功率因数变差,因此一般在风机出口处装设可投切的并联电容器组进行无功补偿。

2) 双馈式风电机组

双馈风力发电系统的控制方式为变桨距控制,使得风机在较大范围内按最佳参数运行,提高了风能利用率。双馈电机的定子与电网直接连接,转子通过变频器连接到电网中,变频器可以改变发电机转子输入电流的频率,进而可以保证发电机定子输出跟电网频率保持同步,实现变速恒频控制。

3) 直驱式永磁风电机组

永磁直驱风力发电系统通过两个全功率变频器与电网相连。发电机可以在不同的频率下运行,变频器将频率变化的电能转换为与电网频率相同的恒频电能。这种类型风力发电系统的发电机一般采用低速多极永磁同步发电机,可省去风机与发电机之间的传动机构,降低系统成本,并增加系统的可靠性。

1.2.2 风力发电机组的控制

1. 风力发电机组常规控制技术

1) 变桨距控制技术

风电行业刚起步时, 由于风力发电机组可靠性不高, 定桨距风力发电机组在前期得到了大量的应用, 定桨距风机桨叶固定不可调节. 从 1990 年开始, 随着风力发电机组的可靠性大幅度提高, 变桨距风力发电机组得到广泛的应用, 其桨叶不像定桨距风力发电机组一样是固定的, 可随着风速的变化进行调节, 改变迎风角度, 调节吸收的风能, 进而调节风力发电机的输出功率. 随着变桨距技术的不断提高, 变速风力发电机组开始进入市场, 由于这种机组对于风能的利用效率更高, 运行方式更加灵活, 基于变桨距的变速恒频风力发电机组已成为目前风电行业应用的主流机型^[49]. 变桨距控制技术一般采用 PID 控制算法, 文献 [50] 设计了基于模糊 PID 控制算法的变桨距控制策略, 文献 [51] 在分析 PID 变桨距控制器缺点的基础上, 提出模糊前馈与模糊 PID 结合的新型变桨距控制方法, 而其他改进的桨距角控制方法也得到了广泛的研究^[52,53]. 变桨距风力发电机组的总体结构如图 1-1 所示.

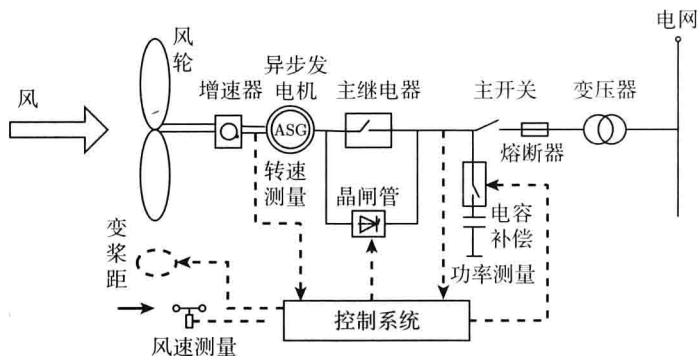


图 1-1 变桨距风力发电机组结构

2) 变速恒频控制技术

变速恒频风电机组的一个主要特点就是发电机转速跟随风速的变化而变化, 风力发电机组通过风力机桨距角控制和发电机转矩控制, 获取最大能量, 这是风力发电机组控制的主要目标^[54-56]. 比较流行的交流电机调速控制策略有矢量控制、直接转矩控制等. 矢量控制的基本思路为, 采取坐标变换方法, 把三相系统转变成两相系统, 完成定子磁链分量与转矩电流分量的解耦, 获取和直流电机相同的良好静、动态性能. 文献 [57] 针对永磁同步电机, 通过推导建立了其基于矢量控制下的简化数学模型, 仅通过控制电机交轴电流就可对其进行控制. 文献 [58] 利用定子磁链定向矢量控制方法, 在同步坐标系下, 双馈电机模型的基础上, 建立了矢量控制

方程式, 通过控制转子电流的转矩分量和励磁分量来调节定子输出的有功功率和无功功率. 直接转矩控制技术则采用定子磁场定向直接控制转矩. 文献 [59] 针对变速恒频无刷双馈风力发电系统, 提出采用直接转矩控制方法, 通过控制发电机转矩和功率因数来调节其有功功率, 进而实现最大风能捕获, 提高发电效率. 文献 [60] 基于直接转矩控制提出一种无刷双馈风力发电机控制方法, 实现风电机组在低风速下的最大风能追踪.

2. 风力发电机组非线性控制技术

除了常规控制技术外, 随着现代控制理论的发展, 一些新的控制思想和方法已在风电机组的控制中得到应用^[61-63], 尤其是非线性控制技术在风电机组控制中的发展, 更成为该研究领域的热点^[64-66].

1) 增益调度控制

增益调度控制技术为目前常用的非线性控制技术之一. 其原理是通过设计局部控制器, 利用插值的方法得到全局控制器; 其本质特征是用线性控制器的方法, 设计参数随非线性时变的系统控制器. 风力发电机组的动态特性是一个非线性系统, 其主要参数风速、桨距角和叶尖速比是非线性时变参数, 经过模型线性化可以得到线性变参数模型, 对于兆瓦级风力发电机组的发电系统, 将增益调度和 H_∞ 控制理论相结合, 利用增益调度设计方法完成风力发电机组控制器的设计^[67].

2) 滑模控制

滑模控制又称变结构控制, 为一种特殊的非线性控制, 具有能够快速、频繁切换控制状态, 对参数变化及扰动不敏感、设计简单、易于物理实现等优点, 目前被广泛应用到电力电子以及风力发电系统中. 文献 [68] 围绕双馈感应发电机空载并网问题, 提出了一种具有鲁棒性的高阶滑模空载并网控制器, 文献 [69] 基于定子磁场定向的矢量控制方案, 结合滑模控制与比例积分控制, 得到一种有效的双馈风力发电机功率解耦控制策略. 滑模控制在控制状态切换时容易出现抖振, 文献 [70] 设计一阶动态滑模控制器将常规变结构控制中的切换函数通过微分环节构成新的切换函数, 有效降低了抖振.

3) H_∞ 鲁棒控制

鲁棒控制方面的研究始于 20 世纪 50 年代. 当系统存在一定的不确定扰动时, 鲁棒控制器能使闭环系统稳定, 并保持一定的动态性能品质. H_∞ 鲁棒控制为鲁棒控制的一个分支, 可解决包含建模误差、参数不确定或未知干扰系统的控制问题. 文献 [71] 采用 H_∞ 混合灵敏度鲁棒控制原理, 开发了风力机的转速控制器, 文献 [72] 利用非线性鲁棒控制技术, 设计了能实现发电机输出有功功率和无功率解耦的鲁棒控制器.

1.3 本书的内容和特点

无源性的概念来源于工程问题,最早出现在一些物理系统中,经过发展已形成一系列基于无源性的控制器设计方法,为应用于实际系统奠定了基础。本书基于非线性系统无源性理论,运用无源控制方法和 Hamilton 设计方法的研究成果,解决风力发电机组控制中存在的设计问题,主要按照以下三条线索展开论述:

(1) 理论框架. 以无源性概念为核心,说明无源性、稳定性(包括 Lyapunov 稳定性和输入输出稳定性)、耗散性、正实性等相关概念的联系与区别,从线性系统到非线性系统描述无源性理论的框架,同时作为本书的理论基础部分(详见第 2 章和第 3 章)。

(2) 技术路线. 从物理背景明确的 Euler-Lagrange 方程出发,通过泛化得到更为一般的 Hamilton 系统,解决其实现问题和控制问题,这是无源控制技术应用一条重要路径。与此并行,书中叙述了非线性系统基于能量的存储函数构造方法和基于无源性的控制器设计方法,并进一步将内容拓展到鲁棒无源控制、协调无源控制等方面。另外,分布式无源性系统的最新成果也整合到相关章节中(详见第 4 章和第 5 章)。

(3) 应用研究. 风力发电是新能源中最主要的发展领域,将风力发电机组作为控制对象,既有理论价值也有实际意义。本书针对风力发电机组的主要模块:变桨机构、传动环节、发电机等,分别进行控制策略研究。考虑到风力发电系统是一个非线性的复杂系统,重点集中在运用无源控制方法解决系统中存在的非线性控制问题,并通过无源控制实现多输入协调控制和多机组协同控制的目标。对于风电机组的主流机型:双馈感应机组和直驱永磁机组,将基于其不同的结构和模型,分不同章节阐述相应的无源化方法和无源控制策略(详见第 6 章、第 7 章和第 8 章)。

本书在对近十年来无源性理论成果总结的基础上,系统介绍无源控制理论和方法。在理论方面,注重其发展脉络,通过与相关概念与方法的联系和比较,阐明无源性的理论框架;在技术方面,以能量函数和无源性设计为核心,将 Euler-Lagrange 系统、Hamilton 系统等典型模型的控制问题统一到无源控制的体系中。与同类介绍无源性的书籍相比,本书更注重无源性理论的系统性和完整性。本书首次总结了非线性无源控制应用于风力发电机组的系列成果,分别从机组内部结构和主流机型两个角度说明无源控制的设计方法和控制效果。一方面,这是风力发电机组控制中新的设计思路;另一方面,也为无源控制方法开辟了新的应用领域。这部分内容主要来自于作者完成国家自然科学基金的研究成果,体现了该研究方向的新颖性和独创性。本书引入无源性理论和方法研究的最新成果,在 Hamilton 系统互联、分布式无源性系统实现与控制等方面,说明了无源控制发展可能的方向,为开拓无源性理论和无源控制方法更广阔的空间提供了思路,同时也体现了本书的前瞻性。

第2章 非线性系统基本概念

非线性系统的稳定性理论、输入输出稳定性概念是非线性系统无源性理论的基础,本章在介绍非线性系统模型后,对相关的稳定性理论和方法进行概述,为后续章节提供一些必要的基础知识.

2.1 非线性系统描述

线性系统有多种不同形式的标准型,且可以相互转化.非线性系统的情况比较复杂,有多种描述方法,且不都能相互转化.一个非线性系统通常可以用如下微分方程描述:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \\ \mathbf{y}(t) = h(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \end{cases} \quad (2.1)$$

其中,状态向量 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, 输出向量 $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^q$, 输入向量 $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^p$; $f(\cdot)$ 和 $h(\cdot)$ 为相应维数的向量函数.通常,第一式称为系统的状态方程,第二式称为系统的输出方程.这里的输出 $\mathbf{y}$ 有时并不仅仅指整个系统的实际输出,往往还包含了部分状态的测量信号.

系统式 (2.1) 代表了一般的非线性控制系统,它包含了以下几种常见的特定形式:

(1) 如果系统式 (2.1) 中的函数向量不明显依赖于时间 t , 则系统的描述变为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y}(t) = h(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \end{cases} \quad (2.2)$$

此时,该系统称为自治系统或时不变系统.

(2) 对于系统式 (2.2), 如果关于控制输入 $\mathbf{u}$ 是线性的, 其描述变为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x})\mathbf{u} \\ \mathbf{y}(t) = h(\mathbf{x}) + d(\mathbf{x})\mathbf{u} \end{cases} \quad (2.3)$$

这类系统称为仿射系统,也是研究最多的一类非线性系统.

(3) 在多数情况下,系统状态方程中不出现输入 $\mathbf{u}$, 则系统描述为非驱动状态方程形式

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, t) \quad (2.4)$$

该系统也称为非自治系统.

(4) 如果系统中不存在动态过程, 则退化为静态系统, 系统的描述变为

$$y = \varphi(u) \quad (2.5)$$

(5) 线性系统可以看作非线性系统的特例, 对应于系统式 (2.1) 是线性时变系统, 描述为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t)x + B(t)u \\ y(t) = C(t)x + D(t)u \end{cases} \quad (2.6)$$

式中, $A: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$, $B: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^p$, $C: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^q \times \mathbb{R}^n$, $D: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^q \times \mathbb{R}^p$ 均为具有相应维数的时变系数矩阵.

对应于系统式 (2.2) 是线性定常系统, 描述为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax + Bu \\ y(t) = Cx + Du \end{cases} \quad (2.7)$$

式中, $A \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$, $B \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^p$, $C \in \mathbb{R}^q \times \mathbb{R}^n$, $D \in \mathbb{R}^q \times \mathbb{R}^p$ 均为相应维数的常数矩阵.

(6) 另外, 还有一类系统介于线性系统与非线性系统之间, 可看作包含非线性环节的线性系统. 其中比较有名的是 Lurie 系统, 具体描述为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + bf(u) \\ y = c^T x \end{cases} \quad (2.8)$$

式中, b 和 c 均为 n 维常数向量.

2.2 Lyapunov 稳定性理论

2.2.1 Lyapunov 稳定性

考虑非自治系统式 (2.4), 形式如下

$$\dot{x} = f(x, t)$$

其中, $f: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^n$ 关于变量 x 是局部 Lipschitz 的, 对于 t 是分段连续的.

定义 2.1 对于系统式 (2.4), 如果

$$f(0, t) = 0, \quad \forall t \geq 0 \quad (2.9)$$

成立, 则原点 $x = 0$ 称为系统式 (2.4) 的平衡点.