

CHUANBO DIANLI XITONG DE FEIXIANXING LUBANG KONGZHI

船舶电力系统的 非线性鲁棒控制

张利军 主编
孟 杰 兰 海 副主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

船舶电力系统的 非线性鲁棒控制

张利军 主编

孟杰 兰海 副主编

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

不同于陆上电力系统,船舶电力系统的推进负载对电网的稳定性有着明显的影响。船舶电力系统中的动态/静态负载与发电机系统形成强非线性、强耦合的动态特征。船舶电力系统控制问题属于一类典型的非线性系统控制研究范畴,研究船舶电力系统的非线性控制问题具有重要的理论价值和现实意义。为此,本书基于鲁棒非线性控制理论,对包含推进负载的船舶电力系统进行稳定性分析,探讨船舶电力系统的非线性控制问题,旨在提高船舶电力系统的动态品质。主要内容包括船舶电力系统数学模型、非线性 L_2 干扰抑制控制、Hamilton 能量函数方法控制、多机系统模型及控制研究,书后的跋全面综述了非线性控制理论在船舶电力系统控制中所取得的主要进展。

本书可供船舶电力系统控制设计的高年级学生和研究生,以及有关电力系统的非线性控制设计专业的技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

船舶电力系统的非线性鲁棒控制 / 张利军主编. —
北京:国防工业出版社,2011. 12
ISBN 978-7-118-07823-7

I. ①船... II. ①张... III. ①船舶—电力系统—非线性
控制系统—鲁棒控制 IV. ①U665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 237105 号

※

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)
北京奥鑫印刷厂印刷
新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 7 字数 156 千字
2011 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 33.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474
发行业务:(010)68472764

前 言

非线性鲁棒控制方法可以使闭环系统达到抑制干扰的目的。船舶电力系统是一个复杂的非线性系统,系统的动态/静态负载与发电机形成强非线性、强耦合的动态特征,负荷切换以及工况的变化对柴油发电机组系统产生明显的非线性参数摄动,引起系统模型的不确定性,利用线性控制策略很难达到满意的控制效果。因此研究船舶电力系统控制问题时应该考虑存在模型不确定性情况下的非线性控制问题。

本书共分6章,第1章概述了目前船舶电力系统的现状;第2章介绍了本书的理论基础知识;第3章介绍了船舶电力系统的数学模型;第4、5章分别介绍了船舶电力系统非线性 L_2 干扰抑制控制器和基于Hamilton能量函数方法的控制器设计;第6章针对多机系统给出微分代数系统数学模型,并基于此模型设计控制器。

限于编者水平,书中难免有疏漏及错误之处,恳请读者指正。

编者
2011年9月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 电力系统非线性动态特性描述	2
1.3 电力系统的非线性控制理论研究概述	6
1.4 船舶电力系统的动态特殊性	8
1.5 船舶电力系统非线性控制研究现状	9
1.6 本书主要研究内容	11
第2章 基础知识及相关理论	12
2.1 非线性稳定性理论	12
2.1.1 稳定性概念及稳定性定理	13
2.1.2 拉萨尔不变集原理	15
2.1.3 有界性与最终有界性	16
2.1.4 输入—状态稳定性与输入—输出状态稳定性	16
2.2 Backstepping 控制方法	18
2.3 非线性系统 L_2 鲁棒控制方法概述	21
2.3.1 L_q 空间及 L_q 稳定性	21
2.3.2 耗散系统简述	22
2.4 Hamilton 函数理论	25
2.4.1 广义 Hamilton 实现的概念及简单性质	25
2.4.2 耗散 Hamilton 系统的 L_2 干扰抑制问题	29
2.5 本章小结	31
第3章 计及动态/静态负载的船舶电力系统数学模型	32
3.1 船舶电力系统结构及建模	32
3.1.1 同步发电机转子运动方程	32
3.1.2 同步发电机输出功率方程	36
3.1.3 柴油发电机组调速系统	37
3.1.4 柴油发电机组励磁绕组电磁方程	38
3.2 负载模型	39
3.2.1 静态负载模型	39
3.2.2 动态负载模型	40

3.3	螺旋桨负载对船舶电力系统动态响应特性分析	40
3.4	本章小结	45
第4章	船舶电力系统 L_2 干扰抑制控制策略研究	46
4.1	引言	46
4.2	仿射非线性系统的 L_2 干扰抑制方法简述	46
4.3	船舶电力系统调速系统 L_2 干扰抑制控制策略	49
4.4	船舶电力系统励磁系统 L_2 干扰抑制控制策略	56
4.5	船舶电力系统调速、励磁系统综合控制策略	62
4.6	本章小结	67
第5章	基于 Hamilton 能量函数方法的船舶电力系统的鲁棒控制研究	68
5.1	引言	68
5.2	基于 Hamilton 能量函数的非线性控制设计简述	68
5.3	基于 Hamilton 能量函数的综合控制设计	70
5.3.1	调速、调压系统的综合控制设计	72
5.3.2	推进负载对综合控制的影响分析	75
5.4	带有 SMES 的船舶电力系统 Hamilton 控制设计方法	78
5.5	本章小结	83
第6章	船舶多机电力系统的干扰抑制控制	84
6.1	引言	84
6.2	非线性微分代数系统的 Hamilton 实现	84
6.3	船舶电力系统微分代数模型	88
6.4	基于 Hamilton 函数方法的船舶多机系统的干扰抑制控制设计	90
6.4.1	调速、调压系统的综合控制设计	90
6.4.2	推进负载对负载功率的影响分析	93
6.5	本章小结	96
跋		97
参考文献		99

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

电力系统动态稳定性问题研究的主要目的是系统在受到大扰动(短路故障、负荷瞬间发生突变、切除大容量的发电机、输电或变电设备等)以后,系统各发电机组能否保持同步运行,电压和频率能否保持稳定,分析影响电力系统动态稳定的各种因素,研究提高电力系统稳定的措施。随着电力系统容量不断增加、电网结构日益复杂以及远距离大功率输电线路和系统间弱联系的出现,电网稳定性问题更为突出,稳定性遭到破坏将导致系统性事故和大面积停电。电力系统中任一地点发生故障,都会在不同程度上影响整个电力系统的正常运行,对经济及人民生活造成极大的损失甚至引发灾难。20世纪60年代以来,国际上出现多次大面积停电事故,如1977年7月13日,美国纽约市的雷击使得保护装置动作错误,从而引起调度中心通信困难最终造成全系统瓦解;1978年,意大利发生切除2500万kW负荷达1h的事故;1987年1月12日,法国出现了由有载调压变压器和发电机励磁特性引起的电网电压崩溃性事故;1987年7月23日,日本东京由于大量温控负荷的动态特性引起了电网电压崩溃性事故;等等。每一次电力事故的发生都与电力系统稳定性遭到破坏有关,因此,改善电力系统运行的稳定性仍然是保证电力系统安全供电的主要途径之一。电力系统暂态稳定分析的主要任务就是防止在大扰动下系统失去暂态稳定,分析系统在这些典型扰动下的暂态稳定性问题。从理论上讲,引起暂态过程的原因是系统参数的变化,即系统参数的变化引起了状态参数——电流和电压的变化,如短路是由发电机工作回路中阻抗突然减小造成的。电力系统常用的稳定性分析方法——时域仿真法^[1],就是将电力系统各元件模型根据元件间的拓扑关系形成的全系统模型,通过潮流计算得到系统的初值,研究系统参数的改变对状态量的影响,根据发电机转子摇摆曲线来判别电力系统的稳定性。本书就是基于时域仿真法来研究电力系统的稳定性问题的。

电力系统从用途方面可以分为两类:陆上电力系统和独立电力系统。船舶电力系统就是一种典型的独立电力系统。随着船舶电气化、自动化程度的提高,除了电气照明和电力拖动装置之外,现在普遍采用电力推进装置。船舶电力推进与传统的机械推进方式相比,具有经济性好、重量轻、体积小、操纵性好和电能储备大的优点。电力推进装置也有很多缺点,如在启动、反转、调速时要改变主机速度,且又必须在这种情况下维持发电机同步,增加了控制设备的复杂性,因此有必要对船舶电力系统的稳定性进行研究。

船舶电站负载发生变化,如电动机启动、停车时,由于系统的结构与参数发生了变化,会导致系统的潮流及各发电机输出的功率也随之发生突然变化,但是因为原动机和调速机均有一定惯性,使得柴油机油门来不及变化,需要经过一定时间以后才能改变原动机输出的机械功率,这样就破坏了发电机与原动机间的功率平衡,在发电机的轴上出现不平衡

转矩,因而在各发电机转子之间出现了相对运动。船舶电网频率波动不仅影响导航与通信装置,而且会使电动机运行恶化。发电机频率降低时将导致铁芯和绕组发热,电动机转速降低,输出功率和效率降低;相反,发电机频率增加导致电动机输出功率增加,电动机严重过载。如何使暂态过程逐渐衰减,使系统过渡到一个新的稳定运行情况,而不造成失步、功率与电压强烈振荡与解列,研究产生振荡的原因和防止振荡的措施,这是船舶电站动态研究的一个重要课题。船舶电站一般以柴油机作为原动机拖动同步发电机组成柴油发电机组,柴油机与调速器构成的调速系统决定了同步发电机的交流频率,船舶电力系统的频率稳定性取决于柴油机调速系统的转速特性。因此,原动机的频率调整是十分必要的。

除原动机的机械功率与发电机电功率不平衡而引起发电机转子摇摆以外,电力系统各元件中还伴随着由发电机端电压和电流的变化引起的电磁暂态过程和励磁调节的动态过程。由于船舶用电设备多为感性负载,负载电流对交流同步发电机起去磁作用,电流大小和功率因数的变化都会引起发电机端电压的变化,所以船舶交流同步发电机必须装设励磁调整装置。与此同时,为了提高电站供电的可靠性和经济合理地发电,一般船舶电站要根据不同工况,有数台发电机组并联运行,为了使并联系统稳定运行,各发电机间无功功率必须合理地进行分配,这一任务也是由励磁系统进行调节的。另外,当船舶电网发生短路故障时,为提高船舶电力系统发电机并联工作的稳定性和某些保护继电器动作的可靠性,也需要励磁系统适时地进行强行励磁。因此船舶交流同步发电机必须装设励磁调整装置,否则将导致其他保护电器动作、电网解列、全船停电的严重事故发生。

船舶电站动态过程既包含电磁过渡过程,又包含机电过渡过程,两者互相联系,互相牵制,为此,同步发电机的励磁控制系统与原动机的转速控制系统的有机结合是调节电网稳定性的主要策略,其综合控制可以作为改善电力系统暂态稳定性的有效措施。然而,现有的船舶电力系统控制策略大多仅考虑其中的一种方法,而忽略了发电机组励磁调压与原动机调速的双重控制功能,这一方面是因为控制性能要求不高,另一方面是因为励磁调压与原动机调速是一对耦合的非线性变量,控制难度增大。

这些都是目前船舶电力系统所面临的迫切需要解决的问题。如何建立包含发电机、负载、电力网络的数学模型,探讨大功率电动机的引入对船舶多机系统的暂态影响问题具有重要现实意义。船舶电力系统暂态过程研究的一般方法是以船舶电力系统状态数学模型为基础,找出影响系统稳定的参数与状态参数彼此的联系,再运用现代控制理论给出控制器抑制系统的外部 and 内部扰动。

1.2 电力系统非线性动态特性描述

电力系统一般由电源、变换器、配电与控制装置、输电连接线和用电设备组成。船舶电力系统单线图如图 1.1 所示。

由图 1.1 可以看出船舶电力系统是一个复杂而庞大的非线性系统。充分考虑系统的每一个元件的动态特性进行稳定分析是不符合实际的,所以要对系统失稳起主要作用的元件的动态特性进行分析建模,包括同步发电机、电动机和静负载的建模。船上的电源为某种原动机驱动的发电机,按其原动机的形式主要可分为柴油机、汽轮机和蒸汽机。多数

抗及发电机的暂态电抗 x_d' 追加到导纳阵中,使网络只保留发电机节点。图 1.2(a)是多机电力系统等效图;图 1.2(b)是经典模型关系图,从中可以看出发电机采用的是经典数学模型,其中 $f(\delta, V)$ 是非线性函数,扰动前、扰动中和扰动后系统都满足二阶摇摆方程式,由于网络拓扑结构不同所带来的差异仅是导纳阵 Y_{ij} 。

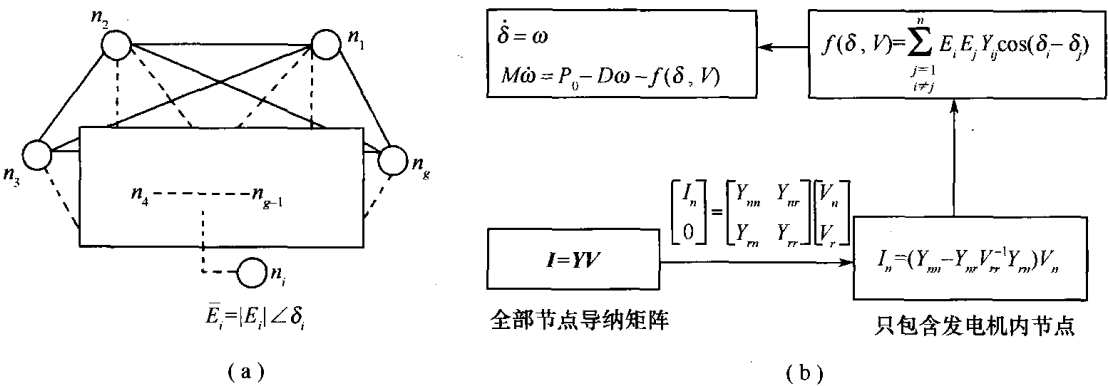


图 1.2 多机电力系统等效图及经典模型关系图
(a) 多机电力系统等效图; (b) 经典模型关系图。

网络降阶模型对网络进行简化,使得方程个数较少,易于非线性方法的应用与实现,其研究较成熟,但是它是在某些假设条件下得到的简化模型,从而带来以下不足^[5-7]:

(1) 模型过于简单,无法抓住与扰动类型相关的重要特性。仅用恒定的无源阻抗来表示负荷,通过模型计算得到的负荷功率将小于故障时所期望的值,而大于故障切除后的正常值,所以忽略负荷的动态影响将导致系统的控制精度不高。

(2) 机械功率恒定的假设与实际系统的运行情况不相符,是不真实的。忽略阻尼功率也就忽略了大系统之间的弱联系,考虑带有阻尼功率的模型,才能更加准确地反映系统的动态行为。

(3) 网络节点的收缩使得网络拓扑结构丢失,从而不能研究系统中影响发电机稳定的各个不同元件的动态,这将造成稳定估计方面的偏差。

进入 20 世纪 90 年代后,开始考虑通过具有动态特性的系统元件来研究电力系统的稳定性,负荷模拟更符合实际,不再使用恒阻抗模型,网络不再简化成只含发电机节点,从而使负荷节点的特性得以计及;更多地采用微分—代数方程组 (DAE) 描述系统模型^[8,9],代数方程组反映元件定子回路和其连接馈电线间的关系。微分方程组由几个分组构成,各个分组由数个相同类型元件的微分方程组组成,它们以基尔霍夫定律的形式出现,并以电流对时间的导数和角速度对时间的导数进行求解。由于保留了网络结构,所以称之为电力系统结构保留模型。Bergen 和 Hill 在 1981 年最早建议电力系统模型中保留电网结构,即在经典发电机模型基础上,进行网络结构保留并且加入负荷有功功率特性,并在此基础上设计了一个结构保留能量函数,克服了由于忽略转移电导引起的缺陷,回避了构造李雅普诺夫 (Lyapunov) 函数的困难。但是该模型中的负荷只考虑了恒有功功率与正比于节点瞬时频率变化率的分量这两部分,采用了恒电压幅值,未计及无功潮流, B-H 模型仍是不符合实际的。文献[10,11]提出考虑负荷无功电压静态特性和加入负荷无功动态特性,综合考虑了发电机功角稳定性和负荷电压稳定性特性。上述模型均是使用经典同步发电机模型,即假设发电机内电势 E' 恒定,事故后的暂态过程中转子纵轴磁链保持不

变。1985 年 Tsolas 提出了较为精确的发电机单轴模型的结构保留模型,网络图及模型结构框图如图 1.3 所示,该模型考虑了发电机内电势的变化,以及 d 轴与 q 轴暂态电抗的区别。用微分方程表示发电机、励磁机、原动机、负荷等动态元件的数学模型,代数方程则表示电力系统动态元件之间的相互作用及网络拓扑约束。这里将第 i 台发电机的端电压表示成 $V_i \angle \theta_i$,它的横轴内电势表示为 $E'_{qi} \angle \delta_i$,它取代经典模型的 $E_i \angle \delta_i$,因为模型中没有有功功率需求同电压幅值的关系,因而不能表示纯电阻性负荷装置的特性。

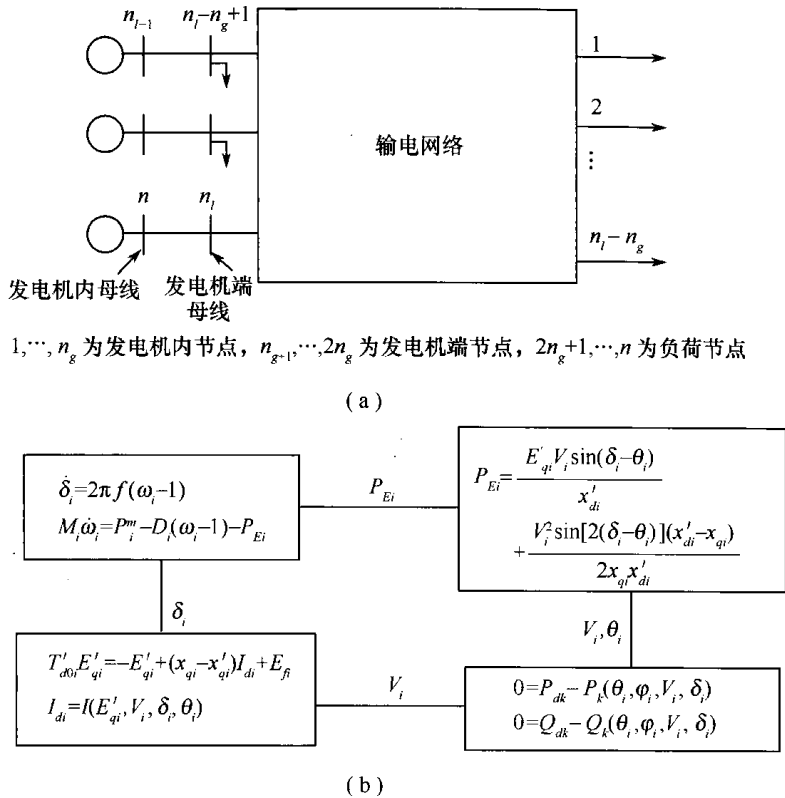


图 1.3 多机电力系统网络图及模型框图
(a)多机电力系统网络图;(b)结构保留模型结构框图。

由于结构保留模型中没有对电网进行节点收缩,更真实地反映了电力系统各元件模型,有利于考虑静态/动态负荷的暂态影响问题,同时考虑了扰动后的暂态过程中转子纵轴磁链的变化,并构造了相应的能量型的 Lyapunov 函数,有利于用能量函数的方法研究电力系统的电压稳定性问题^[12-16]。同时又因为没有对网络进行收缩,利用结构保留模型也给暂态稳定带来一定的困难,负荷节点的个数远多于发电机节点,导致模型中状态维数的增大;结构保留模型中代数约束的存在,使得应用于经典模型中较为成熟的稳定性理论很难推广到结构保留模型,DAE 的研究还有待成熟。

上述模型都是对电力系统的非线性描述,从负荷与发电机的耦合关系看,无论是等效恒值负载还是动态负载,都对发电机的输出功率有非线性的参数摄动,进而影响发电机转子的功率平衡方程,通过发电机转子摇摆曲线来反映负荷对电网的影响。三种模型各有长处与不足,每种模型在某些方面、某种程度上都可以反映系统的性能,选取哪种模型进行电力系统暂态稳定分析,需要视情况而定,不同的模型在控制设计中会存在一些困难,相应的控制手段也在逐步完善。

1.3 电力系统的非线性控制理论研究概述

电力系统控制理论的发展与系统控制的发展相适应,总是由单变量到多变量,由线性到非线性,最后到包含智能化的控制方式。当前大部分电力系统控制都是建立具有固定参数和结构的非线性数学模型,然后将其在某一平衡点进行近似线性化,得到线性化数学模型——传递函数或线性状态方程,最后按照线性控制理论设计线性控制器,如广泛应用的线性系统稳定器(PSS)和线性最优控制器。然而,电力系统具有高度非线性,当系统的运行点和运行方式改变时,系统的动态特性会显著随之变化,此时线性控制器不能满足系统的稳定性要求,从而发展了电力系统非线性控制理论。

自1989年微分几何方法控制理论首次应用到汽轮发电机汽门控制^[17]以来,滑模变结构控制、自适应控制、鲁棒控制、神经网络控制被不断地应用于电力系统。文献[18-21]直接采用电力系统非线性模型,将近代微分几何控制理论与电力系统的动态系统结合起来,用非线性状态反馈精确线性化和零动态方法解决SVC非线性控制问题。然而,精确反馈线性化不能有效解决系统具有参数不确定性或存在干扰时的鲁棒性问题^[22-28]。电力系统的运行点是在时刻变化的,某特定运行点设计的固定参数控制器不能适应运行状态的变化,自适应控制可以很好地在线调整控制参数和控制策略,使之适应不同的运行点^[29-41]。文献[41]针对具有非线性负荷的多机电力系统(MMEPS)励磁控制的跟踪和系统参数的不确定,采用非线性微分代数系统(NDAS)的反馈线性化技术,得到相应的以电磁功率作为输入量的标准化控制方程,提出了参数自适应控制律,并给出相应的非线性控制规律的表达式,实现了具有非线性负荷的MMEPS的目标跟踪及其稳定性。文献[42]设计了一种应用于互联电网的TCSC鲁棒自适应调制控制器(RAMC)。该控制器采用广域测量系统中的全局信号,对各区域的惯量中心进行控制并保持同步运行,利用反推法推导了自适应控制规律,并在2区域4机系统中进行了控制器性能检测。

滑模变结构控制具有高响应及鲁棒性强的特点,文献[43-48]将滑模变结构控制应用于励磁控制中,对单机无穷大系统和含可控串联补偿(Thyristor Controlled Series Compensation, TCSC)的电力系统,提出了一种解耦逆推自适应励磁滑模控制方法,以提高电力系统的鲁棒稳定性。该方法针对一类具有不确定性的反馈线性化形式的非线性系统,将构造Lyapunov函数的逆推设计方法和自适应机制以及滑模变结构控制有机结合,获得了一种保证该类系统全局渐近稳定的自适应滑模控制律以及自适应增益控制律,有效地稳定了不确定电力系统的机端电压。所设计的控制器可以做到与系统完全解耦,滑模面和控制器的设计均在子系统进行,并且参数易于选取,对系统网络结构和运行点的变化具有很强的鲁棒性。当然,变结构控制也存在着一些缺点,如开关过程的时滞及惯性等因素将引起系统状态不在滑模面运动而产生抖振,有可能激励系统未建模部分,引起高频振荡。因此消除抖动是电力系统变结构控制的重要问题,还有待于进一步解决。

神经网络可以逼近任意属于 L_2 空间的非线性函数,它采用并行、分布式处理信息,有较强的容错性,适用于多信号耦合,可同时综合定量和定性的信号,对多输入、多输出系统特别方便,能够实现在线与离线的学习,满足某种控制要求,灵活性大。近年来,在电力系统理论研究方面出现了大量的研究成果^[49-61],它既可以应用到建模,又可以充当控制器,

还可以在控制系统中起优化计算的作用。2002 年尤勇利用混沌方法重构相空间系统吸引子,用前向神经网络拟和吸引子上的全局整体映射,构成了短期负荷混合预测模型^[61]。文献[62]对神经网络和专家系统在电力系统故障诊断中的应用进行了研究。采用基于 RBF 的神经网络进行故障诊断,使用专家系统自动生成训练样本,预处理故障报警信息,并对开关和保护的动作情况进行评价,提高了系统管理样本的能力。S. Wei 等在文献[60]探讨了两种人工神经网络 BPN 和 ANN 用作电力系统暂态分析工具的适用性,首先将一个适度规模电网的暂态稳定性分析问题转化为适合人工神经网络处理的识别问题,对样本数据进行适当的预处理并对比两种神经网络用于该系统暂态分析问题的映射能力、插值可信度估计、网络大小等问题。目前就神经网络本身还存在着如何选取合适的网络结构和学习算法以提高收敛速度等问题。

近年来,非线性控制理论的第二个分支——非线性鲁棒控制取得了长足的进展,非线性鲁棒控制问题即针对系统寻找控制器,该控制器可以使得系统的闭环系统从干扰输入到输出的增益不超过一个事先给定的正数。最为常见的是受线性 H_∞ 的启发,提出的目前非线性鲁棒控制中最有代表性的非线性 H_∞ 控制^[63-79]。由于电力系统在实际运行中存在着负荷的波动、故障引起的系统拓扑结构的改变、模型参数的不准确性等各种不确定性,为了提高这类电力系统非线性控制的鲁棒性,基于鲁棒非线性控制方法,研究提高电力系统的暂态稳定的控制策略是电力系统控制理论中的重要课题。

非线性鲁棒控制设计包括基于耗散理论的设计方法和哈密顿(Hamilton)系统控制方法。耗散理论方法的实质是通过构造一个半正定存储函数,使得某段时间内系统消耗的能量小于同一段时间内系统吸收的能量,即系统本身不产生能量。基于耗散理论的鲁棒非线性控制方法主要是针对于无源系统和有限 L_2 增益系统。无源性是指系统外界输入时的能量衰减特性,利用无源系统实现鲁棒控制的思想是通过对非线性系统无源化得到控制律,无源过程所构造的正定存储函数就是保证闭环系统稳定的 Lyapunov 函数。阮映琴^[80]采用无源协调性的思想方法,对发电机励磁和静止无功补偿器(SVC)同时进行协调控制。首先利用 Backstepping 的设计方法得到 SVC 的控制设计,再根据协调无源性的特点,得到了发电机励磁的控制律,使整个系统的功角和电压达到双重稳定的效果。文献[81]简要介绍了一类基于无源系统理论的最优控制方法——PBC 方法,基于该方法设计了晶闸管控制的串联补偿器(TCSC)无源控制器。由于该控制器中的变量均可实现本地测量,故使其能有效地应用于实际电力系统中。文献[82]中孙元章基于广义受控 Hamilton 能量函数方法,对多机系统汽轮机调速系统进行无源化控制器的设计。该控制策略的所有变量都是本地可量测的,只与本机组的状态量有关,与其他机组的状态量和输电网络的参数无关,具有分散性。

利用有限 L_2 增益系统概念实现鲁棒控制的思想是设计控制器使得干扰对系统的输出的 L_2 增益不超过一个事先给定的正数 γ ,达到干扰抑制的目的^[83-93]。1981 年 G. Zames 提出 H_∞ 鲁棒控制思想,即以系统某些信号间的传递函数的 H_∞ 范数为优化指标,希望干扰频谱对输出的频率响应最小。由于非线性系统的传递函数难以获得,也就不存在函数矩阵的 H_∞ 范数,线性控制系统中传递函数矩阵的 H_∞ 范数与其 L_2 增益相等,所以一些学者把非线性鲁棒控制又称为非线性 H_∞ 控制,更准确的说法是非线性系统的 L_2 增益最优控制。Isidori 利用耗散系统理论和微分对策,将鲁棒非线性控制问题归结于一个偏微分

不等式的非负解问题,即寻找 HJI 不等式的非负解。HJI 的求解非常困难,目前比较好的方法是采用 Backstepping 和 Forwarding 方法与非线性鲁棒控制相结合,构造存储函数,可以避免求解 HJI 不等式的困难,关天祺^[94]提出了一种新的设计多机电力系统中励磁和超导储能装置的分散 L_2 增益干扰抑制控制器的方法,首先建立了含超导储能装置的多机电力系统的动态模型,继而利用递推方法设计励磁和超导储能装置的 L_2 增益干扰抑制控制器,所得控制器可以利用本地测量量实现。申铁龙^[95]在 2003 年提出利用 L_2 干扰抑制的思想设计单机无穷大系统的非线性励磁反馈控制器,针对系统内部有未知干扰及外部的线路短路干扰两种情况,该控制器都可以保证系统暂态稳定性。卢强^[96]等人利用 L_2 干扰抑制思想设计了水轮发电机组的调速控制器。

Hamilton 函数从能量观点出发,避开了构造 Lyapunov 函数的问题,并且充分利用了系统本身能量函数的非线性特性,使控制策略具有简洁的形式,为电力系统非线性控制器的设计提供了新的途径,具有广阔的应用前景^[97-106]。经典 Hamilton 是由经典牛顿力学推导出的一种规范形式,可以用来刻画任何可忽略耗散效应的物理过程,包含半导体、超导、力学、电磁系统和生物学领域。然而经典的 Hamilton 系统是在偶数维相空间上定义的,具有局限性,由此人们提出了更为广泛适用性的广义 Hamilton 系统。广义 Hamilton 系统是考虑能量耗散来处理系统与外部能量的关系,是一类更为广泛的系统。Hamilton 能量函数方法在非线性控制中包含两个步骤,一是 Hamilton 实现;二是反馈控制设计。王玉振^[107]给出了不同类型广义 Hamilton 实现的条件及多个系统 Hamilton 实现问题,并基于电力系统经典模型给出单机、多机、带无功补偿装置系统的协调控制器。卢强等人^[108-110]先后将非线性鲁棒控制方法应用于汽门调速控制、发电机励磁控制以及二者的协调控制,其中非线性影响通过非线性控制器设计得以补偿,控制器具有良好的抗干扰能力。2010 年刘艳红^[89]采用 Hamilton 函数方法研究了包含静止无功补偿器(SVC)和非线性负荷的电力系统的耗散 Hamilton 实现和反馈控制问题,首先基于电力系统非线性微分代数模型,通过预置状态反馈完成了耗散 Hamilton 实现,然后基于耗散实现,设计了非线性 SVC 控制器,该控制器结构简单、物理意义明确。2006 年王玉振^[111]利用递推的思想设计了带有 SMES 多机系统的 L_2 干扰抑制控制器。文献[111-113]利用 Hamilton 函数方法设计了多机励磁、带 SMES 的多机励磁控制器和蒸汽轮机的调速控制器。

微分代数系统是广义系统中最为典型且极为普遍的一类系统,把代数方程看作是系统内部的一个约束方程,与系统的能量无关。基于这一思想,刘艳红在文献[109,114]中提出了非线性微分代数系统的一种耗散 Hamilton 实现的条件,并给出耗散 Hamilton 的 H_∞ 镇定控制律,对包含扰动的非线性微分代数系统给出了 L_2 干扰抑制控制器。文献[115]探讨了电力系统微分代数方程模型及其奇异性,分析了暂态电压稳定分析的保留结构模型的能量函数法,采用奇异诱导分岔判断暂态电压失稳,在电力系统发生大扰动后快速判断故障后系统的暂态电压稳定性,从而有利于及时采取控制措施避免系统电压崩溃。

1.4 船舶电力系统的动态特殊性

船舶电力系统是一个独立的电力系统,相比于陆地电力系统而言,主要有以下特点:

(1) 发电机是供电负载的唯一电源。陆地电力系统中电源失电即电站损坏的情况很

少,基本上是输电线路的故障。舰船在遭受攻击后,电源很可能受到损伤,把无穷大系统理论应用到船舶电力系统分析是不合理的,在分析中必须要考虑发电机电压与频率的波动。

(2) 输电线路电压等级较低、短路功率因数较低,正常运行和故障情况下电流非常大,短路或者工况切换都会引起发电机和其他负荷的运行。与陆上电力系统不同,稳定分析时不能简单地把负荷等效为恒定阻抗,要考虑负荷变化对电网的影响。

(3) 供配电系统连接比较近。电缆受舰船长度所限,变压器容量较小,电网仅相当于陆地电网的配电部分。

(4) 电站总容量较小,负载可以与发电机相比拟。船舶电力系统有一些大型的动态负载,如电力推进感应电动机消耗发电机输出总功率的大部分,且有很大一部分非线性负载。大容量负载启动时的冲击电流将引起电网电压的急剧波动,对发电机调压器和原动机调速器的动态性能有较高的要求(一般万吨级船约为 1000kW)。

(5) 不同用途的船舶电网结构不同,稳定分析要根据不同船舶系统的特征来建模。舰船电力系统战斗损伤会在某一集中的地方产生多个故障,如遭受导弹打击导致的故障具有位置集中性,易出现多重同时性短路和断路故障。

(6) 电气设备的工作环境比较恶劣,发生各种事故的可能性较大。舰船应该能在遭受单个打击后,仍有较强的生命力与可靠性。

(7) 发电机是多台机组并联工作,根据负荷需求,各台发电机并联和解除并联的转换比较频繁。

上述特点,决定了船舶电力系统的运行状态是一系列动态过程的连续。船舶电力系统的动态过程,一般有以下一些特点:

(1) 船舶电力系统的各组成元件内部的电磁过程一般都比较复杂,而且有明显的强非线性和强耦合特性,若要比准确地描述,系统是一个高阶非线性微分代数系统,它的阶数高达 50 ~70。

(2) 系统参数存在未知扰动。

(3) 负载频繁切换引起电网电压频率波动,特别是推进负载对电网的影响不可忽略。

(4) 船舶电力系统动态过程是一个多自由度的振荡系统,每一台发电机或电动机的转子都可以进行振荡。它们之间没有机械联系,只有电路上的联系。这样的多自由度振荡系统,给分析带来了很大的困难。

(5) 与陆上的无穷大系统不同,独立电网中,调节某一台发电机的电压或频率都有可能影响电网的电压和频率。

1.5 船舶电力系统非线性控制研究现状

现在的船舶电力系统,无论是普通的水面船舶还是用于作战的大容量舰船,其电力系统稳定控制都是借鉴陆地上的暂态控制经验。船舶电力系统的控制结构框图如图 1.4 所示。

下面从系统建模分析与系统设计两个方面谈船舶电力系统非线性控制。

目前,现有的船舶电力系统数学模型主要分为两种,一类采用的是电力系统单轴模

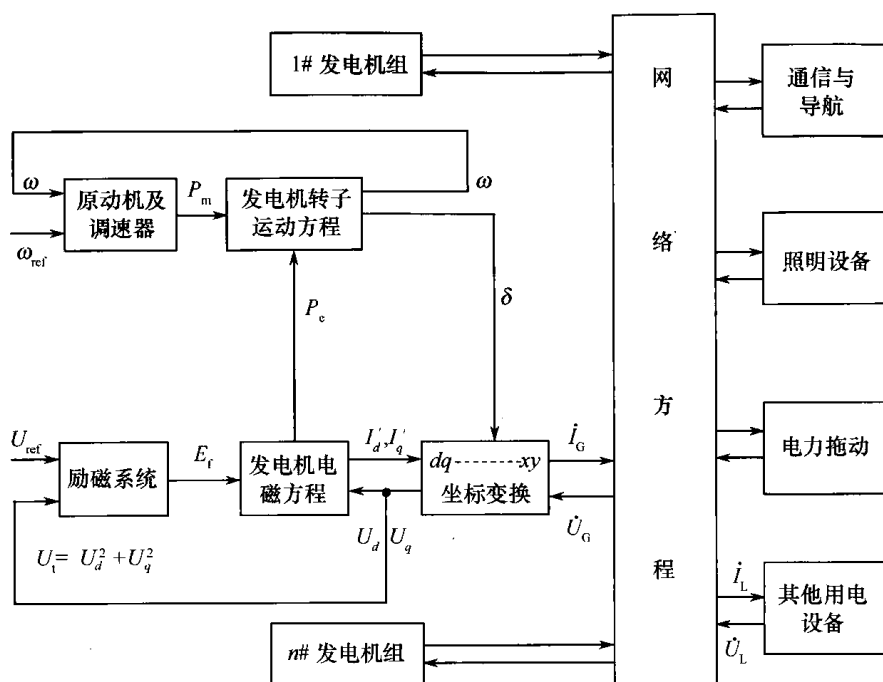


图 1.4 船舶电力系统的控制结构框图

型^[116-120],研究的是四台相同型号机组组成的船舶电力系统,将其近似线性化,采用的方法为线性 H_{∞} 控制设计策略。文献[121-123]提出的智能控制技术应用船舶电站同步发电机励磁控制,与PID控制器相结合可以解决船舶发电机在负荷变化尤其是大负荷变化时能更好地稳定发电机端电压的问题。该算法可以在线学习并调整PID控制器的参数。但是该方法依赖于系统的线性化数学模型,而实际电力系统是包含干扰和测量误差的非线性模型。另外,舰船载电压不能看作是无穷大系统,大容量负载对系统的稳定性影响很大,这就要求所设计的控制器比陆上电力系统具有更强的鲁棒性和响应速度,从而使得舰船电力系统稳定性问题的研究具有一定的挑战性。

另一类是黄曼磊在文献[124-132]中给出的船舶电站柴油机非线性数学模型,该模型采用机理建模的方法准确地描述了转速和电压的相互作用与相互影响的关系,并利用虚拟控制量作坐标变换,将非线性系统转化为线性系统设计 H_{∞} 调速控制器、励磁控制器以及综合控制器。文献[132,133]针对双机并联系统,设计了船舶电站柴油发电机组的混合 H_2/H_{∞} 调速与励磁控制器。孙勇^[134]基于柴油机数学模型提出了一种基于最小熵 H_{∞} 控制理论的鲁棒调速控制策略。该控制策略从熵的角度将 H_2 最优控制和 H_{∞} 最优控制结合起来,以闭环系统的熵函数为目标函数,用最小熵 H_{∞} 控制的理论来设计控制器,该控制器可以有效提高系统的频率稳定性。船舶电力系统是一个含有多非线性元件的多自由度系统,该系统的动态/静态负载与发电机形成强非线性、强耦合的动态特征,负荷切换以及工况的变化对柴油发电机组系统产生明显的非线性参数摄动,引起系统模型的不确定性,利用线性控制策略很难达到满意的控制效果。因此研究船舶电力系统控制问题时,应该考虑在模型不确定性情况下的非线性控制问题。

综上,船舶电力系统的控制理论研究主要是采用线性控制理论,而采用非线性模型,同时考虑负荷变化引起的参数变化,设计非线性鲁棒控制器还是空白。众所周知,提高舰

船系统应对各种攻击时电网的稳定性一直是控制器设计的难点,针对系统的未知扰动,建立多工况非线性数学模型,一些常用的非线性控制算法,如非线性 H_∞ 控制,基于 Backstepping 的控制,Hamilton 系统理论方法等都可以提高系统的稳定性。目前,该控制理论在电力系统中日益受到重视,但研究领域主要集中于陆上电力系统,舰船电力系统相对较少。此外,用基于舰船电力系统的微分代数模型进行其动态特性分析也并非易事。这是因为处理多机系统间的耦合量、负荷的非线性参数摄动,以及系统模型的不确定性问题是多机系统的控制设计难点。针对船舶的微分代数系统设计协调控制器有待于进一步深入探讨。特别是由于船用电力系统负载的强非线性特征,控制器的鲁棒性研究具有很强的工程适用性。现有的包含电力推进系统的船舶电站研究多数结合船桨模型以及电动机模型研究,如推进电动机的鲁棒控制并没有研究电力推进系统对发电机的影响,而电力推进系统的分级启动势必造成电网电流电压的变化,从而影响发电机的输出功率,进而影响发电机的功角频率的稳定性。电力推进方式的兴起,对含有螺旋桨负载的电力系统稳定性问题提出了更高的要求。

1.6 本书主要研究内容

针对船舶电力系统稳定运行存在的非线性控制问题,以非线性控制理论为基础,应用鲁棒非线性控制方法,本书研究了包含推进负载特性的船舶电力系统非线性鲁棒综合控制问题。主要研究内容如下:

(1) 针对不同负载特征下的船舶电力系统的调速/励磁控制问题,在充分分析了柴油发电机组的非线性数学模型及其动态/静态负载的相互耦合的非线性动态结构特性的基础上,提出采用 Backstepping 控制技术与 L_2 干扰抑制相结合的综合控制策略来设计发电机组的调速/励磁控制器。

(2) 针对不同负载特征下的船舶电力系统的综合控制问题,根据船舶柴油发电机组和推进负载的数学模型的结构特性,深入分析发电机转子轴、原动机和负载扰动引起的不确定性,利用 Backstepping 控制技术的强鲁棒性及其构造 Lyapunov 函数的能力,结合 L_2 干扰抑制特性,给出基于 Backstepping 的鲁棒 L_2 控制设计方法。

(3) 针对 L_2 控制设计方法所得控制器结构难实现的问题,基于 Hamilton 能量函数控制设计思想,结合系统的模型特征给出了动态系统非线性稳定控制器的设计方法,研究保证系统稳定运行的综合控制器设计方法。为了给出螺旋桨负载对控制性能影响的显式解,利用 Backstepping 控制设计技术,给出包含螺旋桨转速的控制律,并以启动螺旋桨负载的动态变化曲线为外部扰动进行仿真分析。

(4) 针对包含 SMES 的船舶电力系统综合控制问题,基于耗散理论设计 SMES、调速与励磁综合控制器。

(5) 针对船舶电网多机并联运行,负荷对系统的非线性扰动问题,研究多负载多机并联系统,建立包含螺旋桨负载的多机结构保留系统鲁棒数学模型,并利用 Hamilton 能量理论控制方法,设计包含螺旋桨推进负载的船舶多机电力系统的励磁与调速的综合控制律。