

前言

在“双碳”目标引领下，我国能源结构正经历深刻变革，风电、光伏等新能源发电装机容量持续增长。但风光能源的随机性、间歇性、波动性特征给电力系统的安全稳定运行带来了严峻挑战。作为电力系统的“压舱石”，火电机组的角色已从传统的基荷电源向调峰调频、应急备用的柔性电源转变，这对其控制性能提出了前所未有的严苛要求。《新一代煤电升级专项行动实施方案(2025—2027年)》落地后，对火电机组提出更高的要求：既要实现宽负荷范围内的精准调节，快速响应电网频率与电压波动；又要兼顾节能环保目标，在深度调峰、启停过程中控制污染物排放与能耗水平；更要应对多变量耦合、参数时变、外部扰动复杂等固有特性带来的控制难题。

在此背景下，寻找一种兼具强抗扰能力、高鲁棒性与自适应特性的先进控制技术，成为火电机组控制领域的核心研究方向。自抗扰控制作为一种源于PID却优于PID的控制技术，凭借其独特的“扰动观测与补偿”核心思想，为解决复杂工业对象的控制难题提供了新的技术路径。

本书主要介绍火电机组适用的自抗扰控制设计方法、改进设计及与强化学习结合的自抗扰控制设计，以及相关理论分析、仿真实验及现场试验，并重点介绍自抗扰控制在火电机组协调控制系统、汽温系统、燃烧系统、脱硝系统和燃烧后CO₂捕集系统等实际过程的设计、分析和仿真以及现场应用。

本书的主要内容如下。

第1章为绪论，介绍火电机组基本原理、控制特点、控制研究现状，以及自抗扰控制的理论研究进展、结构设计、参数整定和工业应用，从而引出本书主要的研究内容。

第2章在自抗扰控制基本原理和稳定域的基础上，介绍概率鲁棒设计、输入/输出补偿、增益调度设计、基于BICO和TD3PG的改进设计，围绕结构设计、稳定性分析、参数整定、仿真和实验验证等方面进行阐述。

第3章介绍协调控制系统建模及其控制难点分析、自抗扰控制设计、仿真和现场应用效果。

第4章介绍汽温系统建模、过热/再热系统的自抗扰控制设计、仿真和现场应用效果。

第5章介绍燃烧系统建模、自抗扰控制的初始参数计算和优化、仿真和现场应用效果。

第 6 章介绍脱硝系统建模及其控制难点分析、自抗扰控制设计、仿真和现场应用效果。

第 7 章介绍燃烧后 CO_2 捕集系统建模、自抗扰控制设计、仿真效果。

在能源转型背景下，火电机组的柔性化、低碳化、智能化转型已成为必然趋势，而先进控制技术是实现这一转型的核心支撑。自抗扰控制技术凭借其不依赖精确模型、强抗扰能力、高鲁棒性等独特优势，在火电机组各核心子系统的控制中展现出巨大的应用潜力。未来，随着人工智能、数字孪生等技术与自抗扰控制的深度融合，火电机组控制将朝着“自主感知、自主决策、自主控制”的智能控制方向探索和发展。我们坚信，自抗扰控制技术将持续推动火电机组控制性能的迭代升级，为新型电力系统建设和“双碳”目标实现提供坚实的技术保障，在能源转型的历史进程中发挥更加重要的作用。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，殷切希望广大读者批评指正。

作 者

2026 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 火电机组基本原理	1
1.2 火电机组控制特点	2
1.3 火电机组控制研究现状	3
1.4 自抗扰控制研究现状	6
1.4.1 自抗扰控制理论研究进展	7
1.4.2 自抗扰控制的结构设计和参数整定	8
1.4.3 自抗扰控制的工业应用	10
参考文献	11
第 2 章 自抗扰控制设计	25
2.1 自抗扰控制原理和稳定域计算	25
2.1.1 自抗扰控制基本原理	25
2.1.2 自抗扰控制稳定域计算	31
2.2 自抗扰控制概率鲁棒设计	37
2.2.1 概率鲁棒设计流程	38
2.2.2 设计思路和流程	39
2.2.3 仿真验证	43
2.2.4 实验台验证	61
2.3 输入补偿自抗扰控制设计	64
2.3.1 输入补偿自抗扰控制结构	65
2.3.2 稳定性分析	66
2.3.3 参数整定方法	69
2.3.4 仿真验证	75
2.3.5 实验台验证	83
2.4 输出补偿自抗扰控制设计	88
2.4.1 输出补偿自抗扰控制结构	88
2.4.2 稳定性分析	91
2.4.3 参数整定方法	95
2.4.4 仿真验证	98

2.5	自抗扰控制增益调度设计	103
2.5.1	控制难点分析	103
2.5.2	稳定性分析	112
2.5.3	仿真验证	114
2.6	基于 BICO 的改进自抗扰控制设计	121
2.6.1	BICO 原理	121
2.6.2	参数整定方法	128
2.6.3	仿真验证	130
2.7	基于 TD3PG 的改进自抗扰控制设计	136
2.7.1	深度强化学习算法	136
2.7.2	基于 TD3PG 的 SCR 脱硝系统自抗扰控制	138
2.7.3	基于 TD3PG 的 SCR 脱硝系统自抗扰控制的仿真验证	143
2.7.4	基于 TD3PG 的 SCR 脱硝系统改进自抗扰控制	147
2.7.5	基于 TD3PG 的 SCR 脱硝系统改进自抗扰控制的仿真验证	152
2.8	本章小结	157
	参考文献	157
第 3 章	协调控制系统自抗扰控制	160
3.1	协调控制系统建模	160
3.2	协调控制系统控制难点分析	170
3.3	协调控制系统自抗扰控制设计	174
3.4	仿真验证	176
3.5	现场应用	180
	参考文献	195
第 4 章	汽温系统自抗扰控制	196
4.1	汽温系统建模	196
4.2	汽温系统自抗扰控制设计	204
4.2.1	过热汽温系统自抗扰控制设计	204
4.2.2	再热汽温系统自抗扰控制设计	205
4.3	仿真验证	209
4.4	现场应用	212
4.4.1	过热汽温现场应用	212
4.4.2	再热汽温现场应用	217
	参考文献	220
第 5 章	燃烧系统自抗扰控制	222
5.1	燃烧系统建模	222

5.2 燃烧系统自抗扰控制设计	224
5.2.1 一阶自抗扰控制的初始参数	224
5.2.2 一阶自抗扰控制的参数优化	237
5.2.3 所提设计与优化方法拓展到非线性系统	247
5.3 仿真验证	249
5.4 现场应用	252
附录 5.1	254
附录 5.2	257
参考文献	258
第 6 章 脱硝系统自抗扰控制	260
6.1 脱硝系统建模	260
6.1.1 SCR 脱硝反应机理	260
6.1.2 改进后 SCR 脱硝反应机理	262
6.2 脱硝系统控制难点分析	273
6.3 脱硝系统自抗扰控制设计	277
6.4 仿真验证	283
6.4.1 跟踪性能与抗干扰能力	283
6.4.2 鲁棒性能	286
6.5 现场应用	287
参考文献	290
第 7 章 燃烧后 CO₂ 捕集系统的自抗扰控制	292
7.1 燃烧后 CO ₂ 捕集系统建模	292
7.1.1 建模原理	292
7.1.2 动态模型分析及辨识	296
7.2 燃烧后 CO ₂ 捕集系统自抗扰控制设计	303
7.2.1 输入补偿自抗扰控制设计	303
7.2.2 等效变换	305
7.2.3 量化参数整定规则	305
7.2.4 稳定性分析	307
7.2.5 算法有效性验证	317
7.3 仿真验证	322
7.3.1 CO ₂ 捕集率设定值变化下的跟踪性能分析	322
7.3.2 烟气流量变化下的抗干扰性能分析	325
7.3.3 参数不确定性下的鲁棒性评估	329
参考文献	332

第1章 绪 论

1.1 火电机组基本原理

能源是现代社会的血液，是推动人类社会发展和进步的重要驱动力，也是不断提升人类生活水平和质量的基本保障^[1]。面对当前全球能源形势正发生的深刻调整 and 变化，习近平总书记指出“推动能源生产和消费革命是长期战略”^[2]。煤炭是我国一次能源的主要形式，这是基本现状也是长期存在的事实。相关能源机构分析，我国煤炭消费在 2030 年仍将占全部能源消费的 46.8%。电力作为人类使用能源的主要形式之一，2024 年我国电力行业耗用动力煤占全国动力煤总需求量超过 60%。由此可知，电力行业深受国家能源供应现状的影响。火电机组在我国电力供应中占有重要地位，《中国电力行业年度发展报告 2025》^[3]指出，2024 年火电装机和发电量占比分别为 43.0%和 63.2%。

火电机组是将燃料(如煤炭、天然气等)燃烧产生的热能转化为电能的发电装置，其核心原理是通过能量转换实现电力生产。火电机组的能量转换过程遵循“燃料化学能→热能→机械能→电能”的基本路径，以最常见的燃煤机组为例，其原理如下。

燃料燃烧与热能产生：煤炭通过输煤系统送入锅炉，在炉膛内与空气混合后燃烧，释放大量热能，加热锅炉中的水，使其变为高温高压的水蒸气。

热能转化为机械能：高温高压的水蒸气推动汽机转子旋转，将热能转化为机械能。汽机通常分为高压缸、中压缸和低压缸，蒸汽依次通过各缸做功，驱动转子转动。

机械能转化为电能：汽机转子与发电机转子同轴连接，转子旋转时切割发电机定子的磁场，产生感应电动势，从而输出电能。

蒸汽冷凝与循环：做功后的蒸汽进入凝汽器，被冷却水冷凝成水，通过给水泵送回锅炉，形成闭合的汽水循环系统。

火电机组的主要系统包括燃料供应系统、锅炉系统、汽机系统、发电机系统、凝汽与循环水系统、控制系统等部分。①燃料供应系统包括输煤皮带、磨煤机、给煤机等，负责将煤炭输送、磨碎并送入锅炉燃烧；②锅炉系统由炉膛、水冷壁、过热器、再热器等组成，是燃料燃烧和热能转换的核心场所；③汽机系统包括汽机本体、调速系统、润滑油系统等，将蒸汽能量转化为机械能；④发电机系统由定子、转子、冷却系统(如氢气冷却、水冷却)组成，实现机械能到电能的转化；

⑤凝汽与循环水系统中,凝汽器将排汽冷凝成水,循环水系统为凝汽器提供冷却水,通常采用冷却塔或直流冷却方式;⑥控制系统采用分布式控制,实现对机组运行参数(温度、压力、转速等)的实时监测与自动调节。

火电机组在电力系统中曾长期占据主导地位,尽管面临低碳转型挑战,但其在调峰、保供、基荷供电和电网稳定中的作用仍不可替代,未来将向高效、低碳、灵活的方向持续发展。

1.2 火电机组控制特点

通过加快现役火电机组的技术升级改造,提高火电机组的发电效率和降低供电煤耗逐渐成为推动能源生产和消费革命的一个方向。此外,通过新建大型超超临界火电机组可以进一步提高火电机组的发电效率和降低供电煤耗。随着机组容量提升和蒸汽压力、温度等参数的提高,火电机组的安全和经济运行面临如下几个挑战和压力。

(1)不确定性和鲁棒性问题。为减少具有随机性、不确定性的风能和太阳能等可再生能源并入电网带来的冲击,越来越多的火电机组接入电网自动发电控制(automatic generation control, AGC)系统,通过实时改变机组负荷输出来消纳和吸收可再生能源带来的冲击。负荷变化会引起机组所有设备的工况变化,如何保证火电机组特别是大型火电机组在偏离设计工况时仍具有良好的控制品质,即提升火电机组控制系统的鲁棒性来应对工况的不确定性,保证机组在低负荷下仍可以良好运行,是一个不容忽视的挑战。

(2)平衡跟踪和抗干扰问题。随着越来越多的火电机组参与深度调峰,机组负荷需要随着 AGC 指令进行快速响应。火电机组是一个具有超过 100 个控制回路的大型复杂系统,其他回路的耦合作用会对该回路的安全运行产生扰动,例如,过热蒸汽的温度会受到锅炉燃烧系统的烟气出口温度、给水流量的影响。此外,负荷是火电机组几乎所有回路的主要扰动因素。然而,跟踪和抗干扰是一个矛盾的问题,抗干扰能力增强会使得跟踪效果变差,反之亦然。如何从控制方法的设计出发,使得机组能够更好地兼顾跟踪和抗干扰是一个值得研究的问题。

(3)执行器速率饱和问题。为参与快速调整负荷,机组跟踪 AGC 负荷指令的响应速率要求也越来越高,由原来每分钟的 1.0% BMCR(锅炉最大连续出力, boiler maximum continuous rating)上升到更高的 2.0% BMCR,这给机组的阀门等执行器的响应速度带来了一定的挑战。如何尽可能降低执行器饱和对控制效果带来的不利影响,也是值得研究的问题。

(4)兼顾安全性和经济性。由朗肯循环可知,火电机组的蒸汽压力和温度等参数越高,机组的效率就会越高,机组的经济性也会越好。然而,更高的蒸汽压力

和温度对管道的材料要求很高,实际运行中不允许出现过多次数的超压和超温情况,因为超压和超温会对主蒸汽管道产生不可逆的损伤。在运行过程中要尽可能地将蒸汽压力和温度控制在一个较小的波动范围,这样可以保证机组在较高蒸汽压力和温度下运行又不会出现超压和超温的情况。这对于机组的控制运行提出了更高的要求。

火电机组作为现在和未来电力供应的中坚力量,都包含燃烧、热量传递等典型热力过程。火电机组面临着多重挑战,例如,大范围变工况带来模型不确定性问题;无法建立精确的数学模型;传热和燃烧带来近似高阶特性;多源扰动及快速负荷变化引起执行器速率饱和。本书以解决上述问题为主要任务,针对火电机组中存在的典型问题展开先进控制方法的研究和设计,并尝试将研究的先进控制方法应用在现场实际中来提高机组的经济性和安全性。

1.3 火电机组控制研究现状

自动控制是火电机组等热力系统自动化和智慧化的基础,控制方法是自动控制最核心的内容。随着控制理论的发展和控制工程的深入研究,除了经典的比例-积分-微分(proportional integral derivative, PID)控制方法,还有越来越多的控制方法,如改进 PID 控制、模型预测控制(model predictive control, MPC)、鲁棒控制、滑模控制、智能控制和抗干扰控制等,也开始在火电机组中尝试应用^[4]。接下来针对上述不同的控制方法进行讨论。

常规的 PID 控制在电站的控制回路中占有很大的比重^[5],然而常规的 PID 控制是通过反馈误差来消除误差的,其性能受到限制,不能很好地平衡闭环系统中出现的“快速性”和“超调”之间的矛盾^[6]。为此,许多学者通过将常规的 PID 控制与自适应控制、模糊控制、神经网络及各种进化优化算法相结合来提高控制性能^[7-12]。文献[7]针对火电机组给水加药系统存在的大滞后、强非线性和时变等难点,提出了一种自适应模糊 PID 控制方法,仿真结果和现场数据表明该算法能够提高不同工况下系统的运行品质和调节精度。文献[8]为提高集中式太阳能电站的运行水平,特别是偏离设计工况的运行水平,提出了一种基于模糊逻辑的 PID 控制方法;通过研究太阳能电站随工况变化的模型,设计出合理的模糊推理规则,从而实时对 PID 参数进行再校正和优化,实现了机组在所有工况下控制品质的提升。文献[9]针对锅炉汽包水位存在的非线性、虚假水位等特点,提出了一种基于推理的模型参考自适应 PID 控制方法,基于实际对象输出与参考模型输出的偏差、偏差的速率对 PID 参数进行在线调整,使得锅炉汽包水位的抗干扰性能和鲁棒性得到提升。文献[10]基于 2 阶 Rényi 熵准则和神经网络对串级过热汽温系统的外环 PID 进行训练,仿真结果表明其可有效降低过热汽温的波动范围。文献[11]通过

PID 与智能增益整定方法相结合来代替结构复杂、实现困难的改进预测优化控制。文献[12]通过混合跳跃粒子群优化算法对火电机组的 PI 控制器参数寻优, 实现控制性能的提升。分数阶 PID (fractional order proportional integral derivative, FOPID) 作为 PID 的一般化形式^[13], 得到了越来越多的关注。许多学者也开始研究 FOPID 在过热汽温回路、协调回路中的应用^[14-16]。文献[14]中, 借助粒子群优化算法, 对 FOPID 和 PID 串级过热汽温中的参数进行详细比较, 通过对标称模型和存在摄动的不确定性对象的比较, 分析 FOPID 在串级过热汽温控制的优势。文献[15]和[16]为克服协调控制系统存在的回路耦合、强非线性等难点, 提出了利用进化算法对 FOPID 参数进行优化, 从而使得协调控制系统的跟踪能力和抗干扰能力得到提升。

MPC 通过建立被控对象的动态模型, 采用滚动优化的方式求解特定的性能指标, 从而估计其在后续特定时间内的输出^[17,18]。MPC 在处理多变量耦合系统、带有输入输出限制的系统中具有明显的优势^[19], 并已经在主蒸汽压力回路、过热汽温回路和锅炉-汽机协调控制系统中得到应用^[20-25]。MPC 中, 可以将经济性指标融入优化性能指标, 形成经济模型预测控制 (economic model predictive control, EMPC), 该方法在火电机组中得到广泛的重视^[26]。文献[27]将汽机阀门开度等经济性指标作为优化的成本函数, 从而实现了锅炉-汽机协调控制系统在经济指标和动态性能的同时优化。由于火电机组模型大部分是微分方程描述的非线性模型, 负荷的大范围变化使得非线性更加明显, 为解决线性 MPC 处理强非线性系统能力较弱的问题, 非线性模型预测控制 (nonlinear model predictive control, NMPC) 逐渐成为一种有效的解决方案^[28,29]。文献[28]详细比较了 NMPC 与 MPC 在控制效果和计算时间等方面的优劣。此外, 基于多目标的 NMPC 也是文献[28]中详细讨论的内容。文献[29]针对 550MW 燃煤机组中燃烧后二氧化碳捕集中存在的不确定性、非线性等控制难点, 提出了 NPMC 策略, 并在五种不同工况下与 H_∞ 和 PID 等策略进行比较。此外, MPC 通过与扩张状态观测器 (extended state observer, ESO) 和滑模控制等结合来提高锅炉-汽机协调控制系统的抗干扰能力和应对系统不确定性的能力^[30,31]。文献[32]和[33]分别讨论了 MPC 与神经网络、迭代学习控制相结合来提高过热汽温系统和锅炉-汽机协调控制系统应对非线性的能力。

鲁棒控制最重要的控制目标是保证闭环系统的稳定性和可靠性, 在实际控制器设计过程中需要兼顾系统参数的不确定性和动态的不确定性^[34]。鲁棒控制方法在燃气轮机系统、过热汽温系统和锅炉-汽机协调控制系统中得到广泛的应用^[35-38]。文献[35]针对型号为 GE9001E 的燃气轮机模型进行辨识, 设计 H_∞ 鲁棒控制器来控制燃气轮机的转子转速和烟气出口温度。文献[36]提出了一种结合预测控制滚动优化、鲁棒预测控制和无记忆反馈控制的控制方法来提高过热汽温系统的跟踪性能和鲁棒性。文献[37]和[38]针对锅炉-汽机协调控制系统中存在的负荷跟踪问题,

提出了相应的鲁棒控制方法,从而协调系统在更大范围内仍具有较好的跟踪性能和抗干扰性能。滑模控制作为一类变结构非线性控制,能够随着系统动态变化进行结构变化^[39,40]。针对锅炉-汽机协调控制系统中存在的建模不准确、外部扰动等,文献[41]~[43]分别设计了鲁棒自适应滑模控制、高阶滑模观测器和非线性滑模控制,通过仿真验证上述方法在抑制内部不确定和外部扰动的优势。

随着人工智能和计算机技术的快速发展,结合神经网络^[44]、强化学习^[45]等人工智能技术的控制方法也逐渐成为热门的研究方向。基于神经网络和强化学习的控制方法也开始在火电机组中得到尝试和应用^[46-49]。文献[46]针对锅炉主蒸汽压力系统,提出了一种基于 Levenberg-Marquardt 算法的神经网络非线性控制结构,提高了暂态响应的速率和稳态的抗干扰能力。文献[47]针对亚临界火电机组面临大范围变工况带来的挑战,建立基于神经网络的扩展结构逆系统模型,提出了一种结合神经网络的前馈控制结构,并在全工况仿真机平台对上述控制结构的优势进行了验证。文献[48]针对模糊推理系统与人工神经网络模型提出了一个复合神经网络控制结构,该结构能够保证能量消耗最少并通过了实验台的验证。此外,强化学习等人工智能技术也应用于控制器的参数整定与优化。文献[49]针对过热汽温的串级结构,提出了基于强化学习的控制器参数优化方法,优化的控制器能够保证闭环系统具有很好的鲁棒性。非线性控制^[50,51]、基于定量反馈定理的控制^[52]、反馈线性化控制^[53]、非线性状态反馈和前馈控制^[54]也应用在锅炉-汽机协调控制系统中,显示了很理想的效果。

上述控制方法的优缺点已经在文献[55]中详细讨论,在这里不再赘述。总体来说,火电机组存在的精确模型难以建立、非线性较强以及回路的耦合等特点在一定程度上限制了控制方法的优势。此外,上述控制方法具有较大的计算量和实施的复杂度,在火电机组常用的分布式控制系统(distributed control system, DCS)平台上实现比较困难。扰动抑制控制是一种兼顾算法复杂性和控制效果的控制方法,显示了很好的工业应用前景和潜力。

扰动抑制控制的本质是将模型的不确定性和外部扰动通过扰动观测器进行估计和补偿,然后通过控制律进行控制达到理想的控制性能^[56]。扰动抑制控制主要有基于扰动观测器(disturbance observer, DOB)的控制^[57,58]、基于摄动观测器(perturbation observer, POB)的控制^[59,60]、基于等价输入干扰(equivalent input disturbance, EID)的控制^[61]、基于不确定性和干扰估计器(uncertainty and disturbance estimator, UDE)的控制^[62]、基于广义比例积分观测器(generalized proportional integral observer, GPIO)的控制^[63,64]、基于未知输入观测器(unknown input observer, UIO)的控制^[65]和自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)^[66,67]。DOB 控制将实际对象的输出与标称模型的输出之间的偏差视为扰动,通过扰动观测器进行估计和补偿,然后将被控对象补偿为标称模型,通过反馈控制律实现控

制^[68]。DOB 在循环流化床锅炉 (circulating fluidized bed, CFB) 控制^[69]和锅炉喷枪控制^[70]中得到很好的应用。POB 和 UDE 的控制设计需要获取系统的所有状态, 而火电机组很难获得所有系统的状态。目前的 POB 在能源系统中的应用, 如风能最优功率提取^[71]和太阳能光伏逆变器^[72], 是通过假设系统所有状态已知进行设计的。UDE 在火电机组中的应用是通过将被控对象降阶为一阶惯性加纯延迟 (first order plus time delay, FOPTD) 系统来设计 UDE 的控制方法, 如回热加热器系统^[73]和水位控制系统^[74]。EID、GPIO 和 UIO 控制方法在设计时需要依赖被控对象的模型, 因而在火电机组中的应用较少, 但它们在电力系统分层故障诊断^[75]、直流电机^[76]和飞机执行器故障检测与隔离^[77]中已得到成功应用。上述扰动抑制控制均依赖于模型的信息, 而 ADRC 不需要精确的数学模型。此外, ADRC 在通用控制平台 DCS 中具有简单易实现的优点, 可以作为火电机组大规模替代 PID 的控制方法。据此, 本书基于火电机组控制系统中存在的控制难点, 展开 ADRC 设计及在火电机组中的应用研究。

1.4 自抗扰控制研究现状

ADRC 是中国科学院数学与系统科学研究院的韩京清研究员自 20 世纪 80 年代开始对“模型论”和“控制论”进行批判性思考, 对 PID 的工作原理进行深入分析和研究, 提出的结合现代控制理论的方法和保留 PID 优势的控制方法^[78-84]。ADRC 主要包含微分跟踪器 (tracking differentiator, TD)^[81,82]、扩张状态观测器 (extended state observer, ESO)^[83]和非线性状态误差反馈 (nonlinear state error feedback, NLSEF)^[83], 如图 1-1 所示 (r 、 d 和 w 分别为闭环系统的设定值: 输入信号、输入扰动信号和外部测量噪声信号)。基于此, 韩京清研究员展开 ADRC 在多变量系统^[85]、时滞系统^[86,87]和具有热力系统中的协调控制系统^[88]的应用研究。非线性 ADRC 中的 TD、ESO 和 NLSEF 都是由非线性函数如 $\text{fhan}(\cdot)$ 和 $\text{fal}(\cdot)$ 描述的, 在控制平台如 DCS 中实现较为复杂, 且需整定的参数较多。为简化非线性 ADRC 的结构和参数整定, 美国克利夫兰州立大学的高志强教授基于非线性

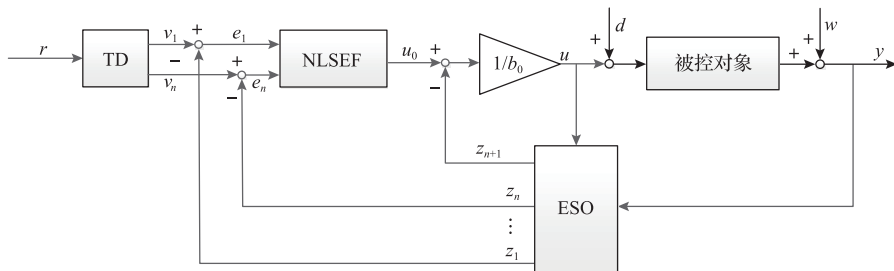


图 1-1 非线性 ADRC 结构

ADRC 提出了线性 ADRC 结构^[89], 通过对非线性 ESO 和 NLSEF 采用线性描述并不考虑非线性 TD, 得到包含线性 ESO 和线性状态反馈控制律 (state feedback control law, SFCL) 的线性 ADRC。线性 ADRC 由于参数较少、整定容易, 且仍然能够保持很好的鲁棒性, 便于现场实现, 因此得到广泛的研究。本书中若无特殊说明, ADRC 均指线性 ADRC。

ADRC 在提出之初没有受到广泛的关注, 相关的研究人员较少, 且研究进展不大, 但是韩京清研究员仍坚持自己动手做仿真并深入现场开展应用。韩京清研究员的学生如张荣^[90,91]、黄一^[92,93]等坚持展开 ADRC 的理论研究, 与此同时清华大学李东海课题组也开展 ADRC 在过热汽温系统^[94]、磨机制粉系统^[95]、机炉协调控制系统^[96]和水轮发电机组调速系统^[97]中的理论与仿真研究; 高志强在国外也对 ADRC 理论进行不懈的推广^[98-100]。国内的其他学者也开始尝试 ADRC 在电机^[101]、电力系统^[102]、航天器^[103]和机器人^[104]等领域的应用。

经过上述学者对 ADRC 的推广和宣传, ADRC 最近十几年经历了一个快速发展时期。2012 年, 美国控制会议举办了关于 ADRC 的专题研讨会^[105]; 黄一在第 33 届中国控制会议上作了关于 ADRC 方法和理论分析的报告, 此后几乎每年的中国控制会议均会组织关于 ADRC 的邀请专题分会; 李东海在 2016 年于韩国庆州举办的国际控制、自动化与系统会议上组织了 ADRC 相关的邀请专题分会。中文期刊《控制理论与应用》分别在 2013 年、2018 年、2023 年组织了 ADRC 专刊; 英文期刊 *ISA Transactions* 在 2014 年出版了 ADRC 专刊; 英文期刊 *Science China: Information Sciences* 和 *Control Engineering Practice* 在 2018 年均组织了 ADRC 专刊; 英文期刊 *Measurement and Control* 在 2019 年组织了扰动抑制的专刊。此外, 关于 ADRC 理论研究的微信群、公众号、QQ 群以及视频网站均有活跃的学者进行宣传 and 讨论。随着 ADRC 的研究和发展, 自抗扰理论如稳定性分析、ESO 收敛性证明、TD 的收敛性分析、适用能力等都取得了很好的研究成果, ADRC 在运动系统、航天器、热力系统和化工系统也得到了广泛应用。关于 ADRC 的相关综述论文也不断发表, 从 ADRC 的理论研究和应用情况等方面进行综述和讨论^[106-118]。接下来本节从 ADRC 的理论研究、结构设计和参数整定、工业应用等方面进行梳理。

1.4.1 自抗扰控制理论研究进展

ADRC 是结合了经典 PID 控制和现代控制理论的一种新型、实用的控制方法, 其理论研究主要集中在 ADRC 的频域分析、ADRC 的收敛性和稳定性分析、ESO 的收敛性分析、TD 的收敛性分析和 ADRC 的适用性分析等方面。

文献[119]对积分串联型和“总扰动” f 进行了系统和深入的剖析, 并研究了 ADRC 针对不可观/不可控的内外扰动的控制能力。ADRC 的频域研究也是理论研

究的一个关注点^[120-123]。文献[120]从频域响应特点出发研究了 ADRC 与 PID 之间的关系；文献[121]和[122]从频域响应特性出发，对非线性和线性 ADRC 的控制性能进行了分析；文献[123]从频域角度给出了 ADRC 的一些频率特性，并发现针对存在不确定性参数的闭环系统，相位裕度和穿越频率几乎是不变的现象。文献[124]~[127]则系统地研究了非线性 ADRC 的收敛性。文献[124]系统地研究了非线性 TD、非线性 ESO 和非线性 ADRC 的收敛性问题。文献[125]、[126]和[127]分别针对多输入多输出系统、单输入单输出系统和不确定随机非线性系统研究了闭环系统的李雅普诺夫(Lyapunov)稳定性。文献[128]借助 Sylvester 等式通过直接构造 Lyapunov 函数来分析线性 ADRC 的跟踪误差和观测器误差的收敛性。在文献[129]中，将 ADRC 与内模控制(internal model control, IMC)结构进行了等价，并给出了 ADRC 稳定性和跟踪性能的充分必要条件。文献[130]中讨论两种情况下的 ADRC 稳定性问题：在模型几乎全知的条件下，证明了闭环系统的渐近稳定性；在模型存在较大的不确定性时，证明了估计误差和跟踪误差都是有界的。类似地，文献[131]给出了在被控对象的动态模型已知或未知两种情况下的闭环系统在大范围渐近稳定时 ADRC 参数的可行域。针对带有执行器约束的系统、带有输入延迟的线性时不变系统、多维波动方程和非最小相位系统，基于 ADRC 的闭环系统的渐近稳定性也有相关研究^[132-135]。文献[136]和[137]从特征方程的角度和奇异值摄动原理分别证明了闭环系统的输入-输出有界稳定和 ADRC 指数稳定的条件。文献[138]中提出了一种自适应的线性 ESO，即 ESO 的增益随着工况进行平滑过渡，并通过构建 Lyapunov 函数证明了自适应 ESO 的收敛性。文献[139]针对非线性 TD 以及更高阶的非线性 TD，在弱假设条件下给出了收敛性的严格证明。此外，关于 ADRC 的其他理论研究也很有价值^[140-142]。文献[140]基于奇异摄动理论，证明了低阶 ADRC 可以很好地控制高阶系统，为 ADRC 在热力系统中的应用提供了很好的理论基础。此外，文中还就分散式 ADRC 与逆解耦控制之间的近似关系进行了推导和证明。在文献[141]中，为充分发挥线性 ADRC 和非线性 ADRC 各自的优势，提出了线性 ADRC 和非线性 ADRC 的切换应用，并给出了必要的条件和切换过程中的稳定性证明。文献[142]从一种批判的角度讨论了假设总扰动可能存在一定的局限性，并通过分析发现这个假设对于 ADRC 参数具有一定的依赖性。

1.4.2 自抗扰控制的结构设计和参数整定

ADRC 的理论分析和证明为 ADRC 的实验台验证和工程应用提供了很好的理论支撑，ADRC 在针对不同类型的对象进行设计 and 应用时也会出现控制效果不够理想的情况，在实际应用中会针对具体的对象特性做一些结构上的变化，既可以保留 ADRC 原有的优势又可以克服具体对象带来的控制难点。此外，ADRC 参数

也是值得关注的,进行ADRC的快速和可靠整定,对于ADRC在工业中的大规模应用是必不可少的。本节主要从ADRC针对不同被控对象的结构设计和参数整定两个方面进行讨论。

时滞系统是工业系统中很常见的一类对象,时滞会明显降低系统的稳定性。ADRC如何处理时滞对象,韩京清研究员已经明确给出四种方法^[6]:①忽略时滞法;②提升阶次法;③输入预估法;④输出预估法。第一种方法是一种最直接的方法,采用标准的ADRC直接控制时滞系统,该方法适用于时滞不大的系统。第二种方法则会带来ADRC的阶次提升。第三种方法和第四种方法是比较实用的方法,通过对输入或者输出进行估计从而提升控制品质。

针对一阶或者二阶时滞系统,通过在控制量进入ESO之前添加预估时滞来降低时滞对闭环系统的影响^[143],其中预估时滞等于系统的时滞时间。此外,文献[144]通过线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)完成了该结构下的稳定性分析。第四种方法是通过借助Smith预估的思想,对系统输出进行预估来减少时滞带来的不利影响,将预估之后的输出作为ESO的一个输入量从而提高ESO的估计精度^[144]。然而Smith预估器在时滞存在偏差时会出现严重的振荡,一种基于条件反馈预估的ADRC结构能够比较好地解决这个问题^[145],其核心思想是通过判断时滞的偏差大小来决定Smith预估是否投入。为了进一步提升基于Smith预估的ADRC结构的控制效果,文献[146]和[147]在Smith预估的基础上也进行了改进。针对阶次比较高的系统,从阶次匹配的角度出发,需要设计相同阶次的ADRC,这样会使得需要整定的参数很多。文献[148]提出了多个基于微分跟踪的低阶观测器和一个低阶ESO的串联结构,基于微分跟踪的低阶观测器采用相同的参数,从而简化了需要整定的参数。非最小相位系统也是工业系统中常见的一类对象,如锅炉汽包水位中存在的“虚假水位”问题和燃气轮机中出口烟温的响应。非最小相位系统具有位于右半平面的零点,使得响应具有反调的特性。为了提高该类对象的响应特性,文献[149]提出了一种基于辅助模型的ESO和前馈相结合的结构,并给出了改进ESO基于时域的收敛性证明。此外,文献[150]~[154]也针对各自的控制难点设计了改进的ADRC结构。

文献[155]详细讨论了四种针对时滞不确定对象的改进ADRC在抗输入扰动和测量噪声等方面的能力,以及能够容忍时滞变化的极限。文献[156]针对多变量系统,通过将第二个回路ESO的估计偏差($y_2 - z_{21}$)作为第一个回路ESO的一部分,提升了回路之间耦合的抑制能力。文献[157]针对含有不匹配扰动和非积分串联的对象提出了广义ESO(generalized ESO, GESO),并完成了稳定性分析。文献[158]针对微网逆变器存在的噪声问题,提出了将ESO对总扰动的估计值通过滤波器进行降噪的结构。文献[159]提出了一种分数阶ESO和分数阶的控制律来提升分数阶对象的控制效果,通过频域和根轨迹分析方法验证了其具有的优势。

在应用 ADRC 或者改进 ADRC 到实验台或者工程实际中时,理论分析提供了支撑,ADRC 结构设计是基础,而参数整定是必不可少的部分。如何根据被控对象快速整定参数或者定量计算 ADRC 参数也是一个很值得关注的方向。

非线性 ADRC 在进行参数整定时,可以采用“分离原理”进行设计,其中 ESO 的带宽可以采用时间尺度的方法或者斐波那契(Fibonacci)数列进行计算^[6]。线性 ADRC 的参数通过带宽化的方法大大减少^[111]。在 ADRC 的推广应用中,许多学者提出了多种 ADRC 的参数整定流程或者定量计算方法。文献[160]针对设计的一般化的 ADRC 提出参数整定的流程。文献[161]针对二阶 ADRC,基于预期调节时间,给出了控制器带宽与调节时间、控制器带宽和观测器带宽的定量关系。ADRC 与 PID 的参数关系以及如何根据 PID 参数快速计算 ADRC 初始参数也是很多人研究的问题^[162-164]。文献[162]根据 PI/PID 控制器参数,通过一阶/二阶 ADRC 的等价形式进行计算,然后对计算的参数进行倍数调整,从而取得满意的控制效果。文献[163]则从理论分析 PI/PID 与一阶/二阶 ADRC 等价的形式,并给出了快速计算的方法。文献[164]通过保证 PID 与 ADRC 具有相同的积分增益,给出了通过 PID 参数计算 ADRC 参数的方法。文献[165]和[166]针对形如 $K/(Ts+1)^n$ 的高阶对象,将鲁棒性(M_s)约束转化为渐近性约束,提出了 M_s 约束下的参数定量计算公式。文献[167]针对 FOPTD 系统设计满足幅值裕度和相角裕度的一阶降阶 ADRC 的参数定量计算方法,给出了不同约束下的计算公式。文献[168]针对 FOPTD 系统,借助积分增益与抗干扰能力负相关的思想和多目标优化的方法,拟合出满足鲁棒约束的二阶 ADRC 参数的定量计算公式。文献[169]针对文献[143]提出的一阶时滞匹配 ADRC,给出了参数定量计算公式。文献[170]提出了一种基于概率鲁棒的 ADRC 参数整定方法,能够解决基于标称模型设计方法对于参数不确定容忍能力较弱的问题。此外,借助优化算法,如果蝇算法^[171]、粒子群优化算法^[172]、多目标优化算法^[173],ADRC 参数整定方法也得到关注。

1.4.3 自抗扰控制的工业应用

通过在 ADRC 理论分析和参数整定方面的研究,ADRC 在工业界得到广泛的关注和应用。例如,德州仪器(Texas Instruments)推出了集成 ADRC 方法的运动芯片,LineStream 公司将 ADRC 成功应用于洗衣机控制系统。本节从两个方面进行讨论:①考虑执行器饱和的 ADRC 的应用;②ADRC 在工业实际对象中的应用。

执行器饱和是限制工业自动化水平不可忽视的因素,如何在执行器约束下考虑抗饱和补偿或者参数设计是一个值得关注的方向。ADRC 在抗执行器饱和方面已经有一些很好的进展。文献[174]提出了一个基于控制器与执行器输出误差来消除饱和的抗饱和结构,实现了对饱和约束的抑制。文献[175]基于 LMI 的计算方法,可以得到观测器带宽和抗积分补偿的增益。文献[176]针对神经网络控制系统,提