

自愈控制系统研究的综述、分析与展望

尹逊和[†], 王 忻

(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要: 近年来, 为了改变依靠紧急停车、人工维护和故障排除的传统的维修方法, 在一些技术应用领域中人们提出了自愈控制的思想. 本文通过梳理智能电网的自愈控制、飞行控制系统的自愈控制和机器故障自愈调控的相关研究成果, 明确了自愈控制的特征和功能并给出了其定义; 其次, 讨论了自愈控制、自愈系统和容错控制的联系与区别; 最后, 总结了研究自愈控制的意义并分析了其发展趋势. 作者对自愈控制的相关技术应用领域及成果进行综述和深入分析, 旨在提高自愈控制系统的规范化和重用性、提炼和总结其共性并给出自愈控制系统的基本架构, 从而为其将来的理论研究奠定初步的基础、为指导实际的自愈控制的应用提供一定的参考.

关键词: 自愈控制; 智能电网; 机器故障自愈调控系统; 飞行控制系统; 容错控制

引用格式: 尹逊和, 王忻. 自愈控制系统研究的综述、分析与展望. 控制理论与应用, 2021, 38(8): 1145 – 1158

DOI: 10.7641/CTA.2020.00057

Review, analysis and prospect of self-healing control system

YIN Xun-he[†], WANG Xin

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In recent years, the thought of self-healing control is presented in some technical application fields, in order to improve traditional maintenance methods that rely on emergency shutdown, manual maintenance and troubleshooting. In this paper, the relevant research achievements of self-healing control for smart power grids, flight control systems and mechanical faults have been combed. First, characteristics and functions of self-healing control are clarified and its definition is formulated. Second, the relationship and difference between self-healing control and self-healing system as well as fault-tolerant control are analyzed. Finally, the significance of self-healing control is summarized and its development trend is discussed. The relevant technologies and applications of the self-healing control are reviewed and analyzed in depth, which helps to improve the standardization and reusability of the self-healing control system, refine and summarize their commonness, and thus build up the basic architecture of the control system. The preliminary foundation for the future theoretical research is laid and technical support is provided for the applications of self-healing control.

Key words: self-healing control; smart power grids; mechanical faults self-healing and regulation system; flight control systems; fault-tolerant control

Citation: YIN Xunhe, WANG Xin. Review, analysis and prospect of self-healing control system. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(8): 1145 – 1158

1 引言

随着科学技术的发展, 各类系统日趋复杂化, 自动化、高速化和智能化的程度也越来越高, 系统的各部分之间的耦合度也随之增加. 特别是高速涡轮机械、工业泵、风机、压缩机、离心机等广泛应用于石油化工、冶金、电力、有色冶金等工艺行业的主要设备与生产过程紧密相连, 形成了一个庞大的系统. 当发生由不确定性因素导致的软件或硬件故障时, 系统中会产生一系列连锁反应, 从而影响整个系统的正常运

行. 自愈控制系统具备及时检测故障状态、采取合理措施抑制或消除故障对系统运行性能的影响的能力, 可提高系统运行的可靠性; 同时, 在实际的工业生产中, 除少数突发故障外, 大多数故障的发生是一个渐进的过程; 当早期发现设备故障趋势时, 自愈控制 (self-healing control) 就可以通过及时地采取适当的策略加以预防. 因此, 研究自愈控制对于提高系统的安全性、可靠性以及使系统能够高效率的运行具有重要意义.

收稿日期: 2020-02-02; 录用日期: 2020-12-30.

[†]通信作者. E-mail: xhyin@bjtu.edu.cn.

本文责任编辑: 潘泉.

国家自然科学基金项目(51977004)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51977004).

本文提及的“故障”一词可参考国际自动控制联合会安全过程技术委员会对故障的定义^[1]: 系统至少一个参数或特性偏离了其可接受的/通常/标准的状态. 科学技术的发展使得系统功能多样化、运行高效化和数据智能化的同时, 也对系统的安全性和可靠性提出了更高的要求. 于是, 为了提高系统对自身故障情况的监测和应对能力, 近年来学者们提出了自愈控制的思想. 由于自愈控制仍然处于初级发展阶段, 自愈控制的应用和研究目前还局限于特定的领域. 虽然自愈控制已经初步形成了一个研究领域, 在应用方面有很强的吸引力, 并获得了越来越多的关注, 但并没有学者给出自愈控制的明确定义, 同时在研究范畴上也没有很好地界定. 以目前自愈控制的研究和发展现状来看, 给出自愈控制的统一定义和界定其学科研究内容不是一件容易的事情. 自愈控制理论的研究是滞后于自愈控制的工程应用的, 学术界对自愈控制理论的研究才刚刚起步. 为了促进学科发展, 在一定阶段通过梳理和研究自愈控制在工程领域的应用现状来明确其特征、功能和研究范畴是一个必要的过程.

本文的结构如下: 第2部分梳理了智能电网领域、飞行控制系统领域和机器故障自愈调控系统领域中与自愈控制相关的文献, 展现了自愈控制系统的发展历程及研究现状; 第3部分分析了自愈控制系统的特征、功能并给出了其定义; 第4部分讨论了自愈系统、容错控制与自愈控制的联系和区别; 第5部分给出了自愈控制系统的基本架构, 初步界定了自愈控制的研究范畴; 最后一部分总结了研究自愈控制的必要性及其发展趋势.

2 自愈控制的技术应用领域

对自愈控制的技术应用领域进行分析是自愈控制形成有效理论的重要部分之一, 自愈控制理论的研究、发展和完善又将促使自愈控制的应用领域更加广泛, 二者是相辅相成的. 本节将通过梳理智能电网、飞行控制系统和机器故障自愈调控系统等领域与自愈控制相关的文献, 理清自愈控制系统的发展历程及其技术应用的现状, 旨在通过分析自愈控制在特定领域的应用, 明确自愈控制的特征和功能.

2.1 智能电网的自愈控制

由于电网的复杂分布式结构和现代社会对高质量供电水平的需求, 它亟需一套有效的方法处理来自电网内部或外部的威胁. 1999年美国电力科学研究院和国防部在“复杂交互网络与系统计划”中首次提出自愈电网的概念^[2], 该计划的目标是开发新的工具和技术, 使大型国家基础设施能够自愈以应对威胁、材料故障和其他不稳定因素, 并将自愈控制作为重要研究领域^[4, 10]. 2005年起, 我国的学者和工程技术人员开

始关注并开展自愈控制的相关技术应用研究^[3-20]. 2011年, 在国家高技术研究发展计划(“863”计划)中发起名为“智能配电网自愈控制技术与开发”的计划, 并于2015年1月27日在广东佛山通过验收. 结合研究人员潜心研究的成果与在工程项目中积累的实践经验, 可以将智能配电网的自愈控制描述为^[4]: 在含分布式电源的配电网的不同层次和区域内实施充分协调且技术经济优化的控制手段与策略, 使其具有自我检测、自我诊断、自我决策、自我恢复的能力, 实现配电网在不同状况下的安全可靠与经济运行.

2.1.1 自愈控制架构的发展概况

在智能电网自愈控制提出的早期, 一些学者致力于研究实现自愈控制的体系架构以及关键技术^[4-10]. 文献[4]围绕智能配电网自愈控制系统的目标和实现策略, 阐述了智能配电网自愈控制系统应具有的功能, 总结了完善的智能配电网自愈控制系统分层架构, 如图1所示.

文献[5]介绍了智能电网自愈控制的体系架构和3种控制的实现方式: 集中控制方式、分散控制方式和集中分散调控方式. 文献[6]介绍了实现配电网自愈的关键技术, 给出了配电网自愈控制的工作流程, 如图2所示, 图中: f_e , f_r , f_c , f_p 为紧急状态、恢复状态、异常状态和报警状态下的系统限定值; f_0 为系统状态函数计算值. 文献[7]利用统一建模语言(unified modeling language, UML), 建立了配电网自愈控制系统的示意图和时序图, 清晰地阐述了自愈控制系统的系统架构. 文献[8]考虑了智能电网包含分布式电源的特点, 总结了智能配电网自愈控制的体系结构、自愈控制策略, 说明了自愈控制的关键技术包含先进的监测技术、快速仿真建模技术、电网设备在线监测技术和故障隔离与配电网重构技术4个方面, 指明了自愈控制涵盖了自动化通信(automatic communication)、智能决策和计算机控制等新技术领域. 这些成果对于智能配电网自愈控制的实现具有参考价值, 但在实现自愈控制的具体技术和控制方法方面的研究有所不足. 文献[9]提出了城市自愈电网的概念结构和实现方式. 文献[10]分析了智能配电网自愈控制的实际需求, 设计了新技术支撑下的智能配电网自愈控制的架构.

随着对智能电网的自愈控制架构和技术的深入研究, 建立电网自愈能力的评估体系的重要性逐渐显现, 文献[11]建立了一套智能配电网发生故障后的自愈能力评估体系, 有助于评价自愈控制方案的优劣. 该评估体系的不足之处在于未将系统预防故障的能力作为纳入衡量系统自愈控制性能优劣的指标; 故障预防作为智能电网自愈控制的重要组成部分, 应该予以考虑.

文献[4-11]系统地介绍了智能电网自愈控制系统

的体系结构和关键技术,以及配电网自动化的支撑技术.但相关研究对智能配电网特性的考虑不全面,建

立的自愈控制的评价指标也不够成熟,对智能电网的自愈控制的研究尚未形成统一的理论体系.

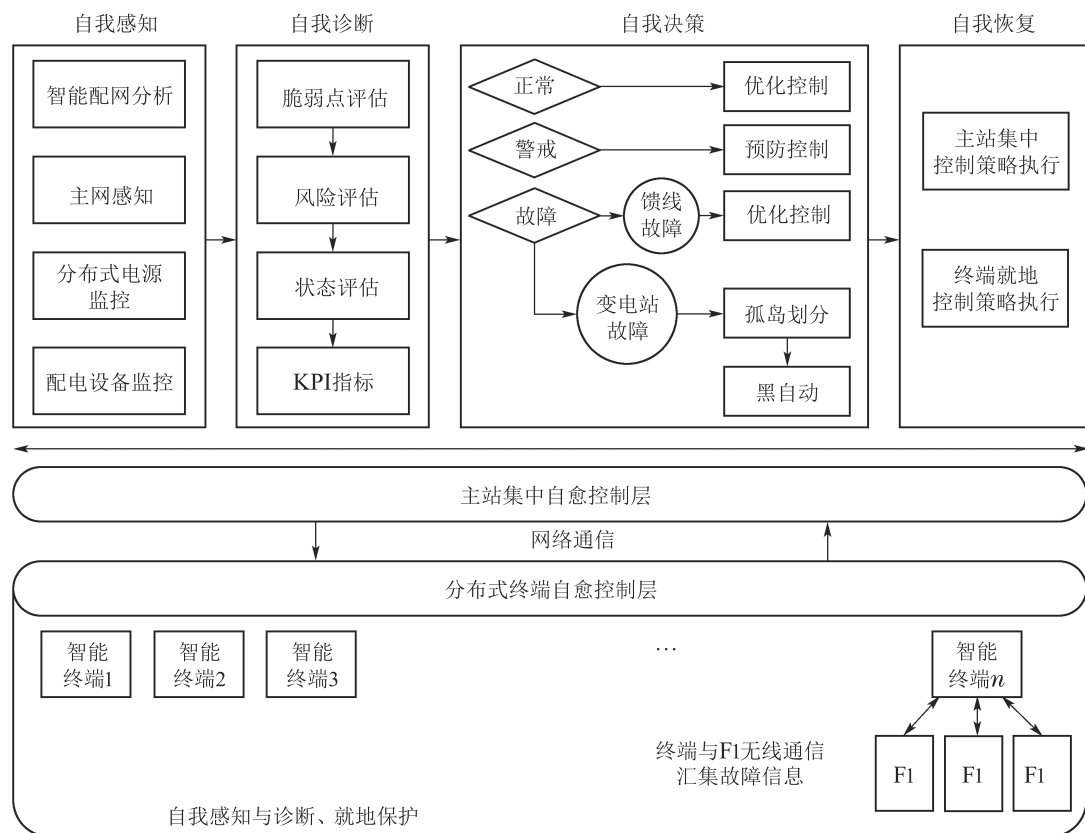


图1 智能配电网的自愈控制系统分层架构示意图^[4]

Fig. 1 Schematic diagram of layered architecture of self-healing control system for intelligent distribution network^[4]

2.1.2 智能电网的自愈控制应用技术的研究现状

可再生能源发电和分布式发电的技术的广泛应用,为智能电网自愈控制的实现提供了技术支撑,提高了电网的可靠性.文献[12]提出了一种基于分布式控制的中压(medium-voltage, MV)网络自愈系统,该系统由若干个断路器和环形馈线的分段开关组成,系统可以自动识别网络的拓扑结构并进行自配置,从而实现电网的自愈.文献[13]针对分布式电网系统的概率性、间歇性和负荷逐时变化的特点,提出了一个综合的设计和运行规划的自愈框架.文献[14]结合现阶段国内主站集中式和分布智能式配电网自动化的决策特点,提出一种基于快速自愈控制技术的分布式馈线线路自愈控制方案.文献[15]介绍了主干线常用的分布式集中自愈控制方案,并且针对目前常用的自愈控制方案的不足,结合分布式自愈控制方案和集中式自愈控制方案的优点,提出了一种改进的自愈控制方案.文献[12-15]分别结合不同的智能电网的特性,设计了自愈控制方案,但缺乏对自愈控制的理论方面的深入研究.

近年来,学者们对基于多智能体的智能电网的

自愈控制进行了研究.文献[16]提出了一种基于多智能体系统(multi-agent system, MAS)的电网分布式分层自愈控制方法:当电网出现故障时,采用分层优化思想进行快速修复,实现了电网在任意情况下的最优运行.文献[17]搭建了基于多智能体容错思想的自愈控制框架结构,建立了智能配电网冗余资源网络结构模型,提出了一种智能配电网容错自愈方法.文献[18]提出了一种基于多智能体控制系统(multi-agent control system, MACS)的控制方法:通过适当地重新配置配电网,消除了馈线的拥塞,同时通过配电网电压控制装置的协调运行,改善了电压越限的问题,满足了智能配电网的自愈需求.智能电网的自愈控制与多智能体技术的结合为自愈控制的发展注入了新的活力.配电网重构也是实现自愈控制的关键技术,它属于多目标非线性组合优化问题,其中智能优化算法^[19-20]被多数研究人员视为当前有效的求解方法之一.

近20年来,自愈控制在智能电网领域的技术应用有了一定的进展和研究成果.通过梳理文献,将实现智能电网自愈控制的方法进行简要的归纳,具

体如表1所示.

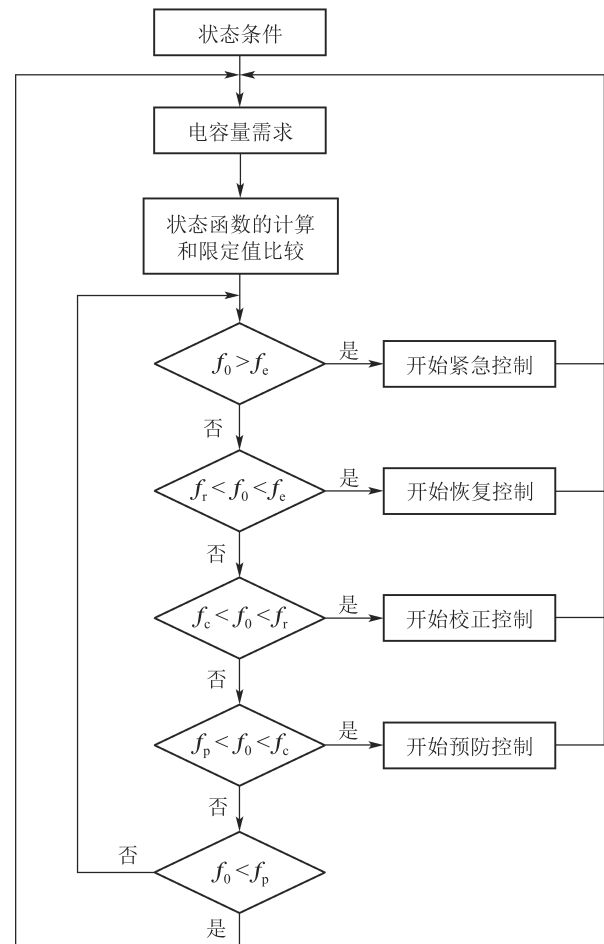


图 2 配电网自愈控制流程图^[6]

Fig. 2 Flow chart for distribution network self-healing control^[6]

表 1 实现智能电网自愈控制的方法

Table 1 Methods for realizing self-healing control of smart power grids

领域	方法描述	参考文献
智能电网	① 自愈控制的不同类型的架构和相关技术.	[4–10]
	② 建立对智能电网的自愈能力的评估体系.	[11]
	③ 利用分布式智能终端的自愈控制方法.	[12–13]
	④ 分布式智能终端与主站协调配合的自愈控制方法.	[14–15]
	⑤ 基于多智能体的自愈控制方法.	[16–18]
	⑥ 与智能优化算法相结合的智能电网的自愈控制方法.	[19–20]

2.2 飞行控制系统的自愈控制

几年前,有学者认为:飞行控制系统领域的自愈

控制就是将故障诊断和容错控制方法纳入统一的框架^[21–22].飞行控制系统的自愈控制主要是基于主动容错控制技术,对发生的故障进行实时检测和辨识,并充分利用飞行控制系统的冗余有效控制机能来进行控制律的重构设计^[23],使飞行器能够补偿故障带来的影响;重构控制技术可以降低飞行器对硬件冗余的需求,允许在出现较严重的故障或者外部干扰的情况下,仍然能使系统性能保持在可接受的范围之内.研究表明,失控仍然是全球致命飞机事故的最大原因之一^[24],研究飞行控制系统的自愈控制是有必要的.

2.2.1 飞行控制系统的自愈控制的研究现状

自愈控制是具有前瞻性的新概念.近年来,随着学者和工程技术人员对系统运行可靠性和安全性的重视程度逐渐提高,自愈控制也将成为研究的热点之一.文献[25]针对执行机构的卡死故障,提出了一种自愈控制框架,该框架能保证系统在执行机构故障的情况下,尽可能地跟踪安全或期望的参考点.为了确保执行器故障和约束条件下单转子的安全运行,文献[26]提出了一种自愈控制方法,并说明提出的自愈控制方法是一种基于在线参考再设计(reference redesign on-line)的扩展主动容错控制方法.文献[27]首先建立了具有执行器故障的高超音速飞行器系统的数学模型,然后提出了一种容错算法来估计由于状态误差引起的故障幅值,并对这些误差进行补偿.文献[25–27]研究的自愈控制方法是主动容错控制方法的扩展,其目的是提高飞行控制系统的自修复能力,但提出的自愈控制方法中只考虑了线性模型,在飞行控制系统的自愈控制的研究中考虑系统非线性因素将成为未来研究的方向之一.

2.2.2 飞行控制系统的容错控制

飞行控制系统的自愈控制主要是基于主动容错控制技术,为了更好地理解飞行控制系统的自愈控制,介绍飞行控制系统的容错控制是必要的.文献[28]设计了滑模干扰观测器和滑模控制器,以改善飞行器的内外部干扰和模型不确定性,同时提高该系统对执行器故障的容忍能力,但此方法在系统发生故障时的处理能力是有限的.文献[29]设计了一种高超声速飞行器自适应容错控制器,该控制器采用自适应算法在线估计未知的控制器参数,在执行器发生卡死或部分失效故障时,实现了对故障的容错控制和对制导指令的鲁棒输出跟踪.文献[30]介绍了利用模型参考自适应控制设计直升机容错控制系统的方法,提出了一种基于外环补偿技术的直升机故障直接自适应控制方案.文献[29–30]设计的基于自

适应的容错控制方法以隐含的方式处理故障,这一类方法不需要精确的故障信息,并且响应快速,但是其中的自适应环节需要每时每刻对相应的参数进行估计并给控制器提供调整信号,需要大量的计算资源,对系统配置要求较高,具有一定的局限性。

传感器作为控制器或观测器的关键信号来源,它出现故障所带来的危害是不容忽视的,因此,传感器故障在容错控制系统设计中也受到了较大的关注.文献[31]将飞行控制系统的传感器故障、执行器故障和随机噪声同时考虑在统一的框架内,提出了一种新的广义模糊滑模观测的方法,并设计了一种基于观测器的容错控制方案来使闭环系统稳定;利用设计的观测器对故障的传感器所测量的信号进行重构,这些设计可减少冗余的传感器的配置,但不足之处在于,系统中多个传感器发生故障或传感器和执行器同时故障的情况下,无法满足信号重构的条件.文献[32]提出了一种基于鲁棒故障估计和同时补偿执行器和传感器故障的新型容错跟踪控制策略,此文献在执行器故障和传感器故障的估计方面进行了相对深入的研究,但对于执行器和传感器出现故障时的处理方式的研究还仅停留在理论研究层面。

2.2.3 飞行控制系统自愈控制与容错控制的关系

虽然有些学者认为飞行控制系统领域的自愈控制是将故障诊断与容错控制纳入统一的框架^[21-22],但并不能由此断定自愈控制就是将故障诊断和容错控制纳入统一框架,只能说明将故障诊断和容错控制纳入统一框架是自愈控制的研究内容之一.飞行控制系统的自愈控制将故障诊断和容错控制纳入统一框架与自愈控制系统的关系如图3所示。

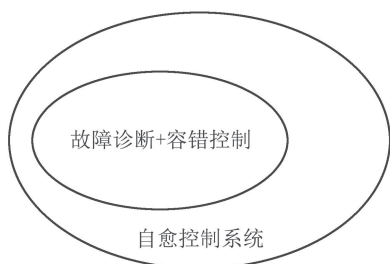


图3 自愈控制系统与飞行控制系统的自愈控制的关系图

Fig. 3 Relationship between self-healing control system and self-healing control of flight control systems

随着系统复杂化、系统各部件的交互增加和系统异质异构链接,传统的系统分析理论和方法不再完全适用,必须结合当下系统的实际需求和面临的问题对原有的系统理论体系加以完善.通过归纳相关文献,将实现飞行控制系统自愈控制的方法进行

简要的总结,具体如表2所示。

表2 实现飞行控制系统自愈控制的方法

Table 2 Methods for realizing self-healing control of flight control systems

领域	方法描述	参考文献
飞行控制系统	① 考虑在故障情况下,分析系统对原参考信号的可达性,并根据系统状态,设计安全的参考信号,以此为基础设计了一种自愈控制方法。	[25-26]
	② 在线故障估计和容错控制相协作的自愈控制系统。	[27]

2.3 机械系统的自愈调控

2.3.1 机器故障自愈调控系统概述

机器故障自愈调控系统领域强调“故障在线消除”:深入研究故障机理,实时检测并诊断故障行为的原因,预测故障产生的条件,通过智能决策和主动控制,在运行中抑制和消除故障,实现故障的自愈化^[33].文献[33]给出了机器的监测诊断、维修和故障自愈功能示意图,如图4所示.由图4可知,机器故障自愈调控系统主要包括监测环节、诊断与预测环节和自愈环节,它的目的是在机械系统启用紧急停车之前增设故障自愈调控系统,使系统具备自愈功能,在确保系统安全的前提下大幅度减少紧急停车的次数。

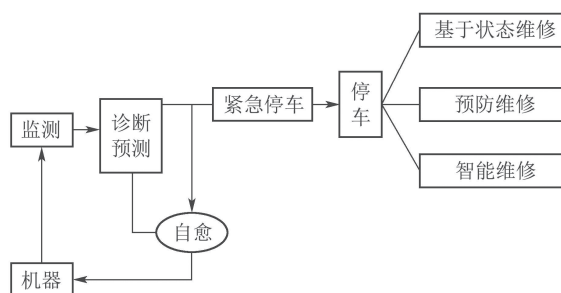


图4 机器的监测诊断与自愈功能^[33]

Fig. 4 The monitoring diagnosis and self-healing function of the machine^[33]

文献[34]指出了国内外装备的故障自愈技术研究主要包括高速离心压缩机、透平机、航空发动转子的自动平衡技术和过程装备复杂系统的故障自愈调控系统.文献[35]从系统学理论和现代医学中自恢复理论的角度,阐明了过程装备自愈调控原理的提出和发展历程,装备系统自愈调控原理为研制出具有自愈功能的新一代装备提供了科学依据.文献[36]研究了以故障预防和故障消除为目标的故障自愈原理,分析了故障自愈技术的现状和未来,并

明确了装备故障自愈工程研究的主要领域,为研制出具有自愈功能的装备提供了依据,强调了装备系统的故障自愈原理研究不仅是工程实践的迫切需求,也是未来需要研究的重大课题之一,同时总结了故障自愈工程(fault self-recovery engineering, FSE)研究的主要领域,如图5所示。

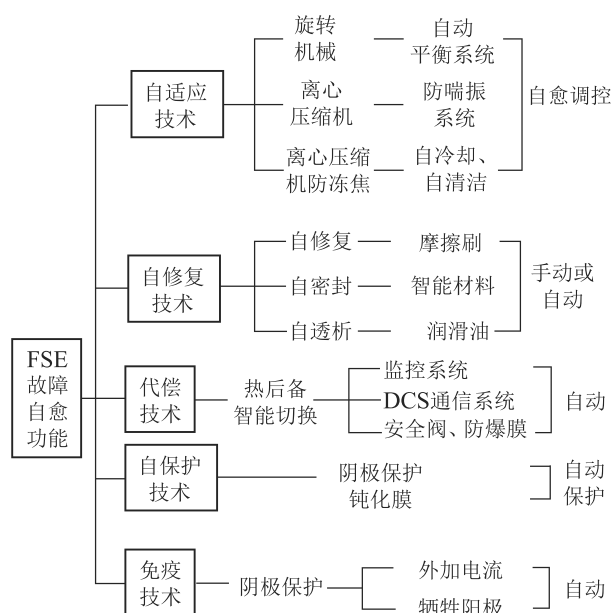


图5 备故障自愈工程研究的主要领域^[36]

Fig. 5 Main fields of research on equipment failure self-healing engineering^[36]

在高速离心压缩机、透平机、航空发动转子这类设备中,由于对可靠性要求高,研究其故障自愈调控方法是必要的。文献[37]针对离心压缩机存在的轴位移故障,设计了离心压缩机轴位移故障自愈调控系统。文献[38]提出一种转子同频振动的在线消除策略,在理论推导和论述的基础上,结合电磁力式平衡装置,设计了一种基于寻优策略的转子振动补偿控制算法,实现了机械自愈调控。文献[39]针对伺服控制系统,将人工免疫系统与自愈系统相结合,建立了故障自愈系统的仿真模型。

由于大规模的工业生产对透平机械的转子稳定性提出了更高的要求,文献[40]提出一种针对电机运行时“亚健康”状态的双闭环自愈调控算法。文献[41]基于可靠性设计和故障仿生自愈原理,提出了一种基于功能代偿的多靶点电液控制系统故障自愈调控方法。机器故障自愈调控技术正逐渐成为预防故障和降低维修成本的有效手段。

2.3.2 人工自愈与工业过程系统的自愈控制

人工自愈的提出,为控制领域的发展提供了新的方向,文献[42]在仿生机械学研究的这个新领域首次提出了人工自愈的概念。人工自愈是在故障机

理和风险分析的基础上,仿生设计并赋予机器自发作用的、维持健康状态的能力,使机器储存、补充和调动自愈力以维持机体的健康状态;阐明了工程自愈论是应用仿生原理、遵循控制论、突破生命与非生命的界线,将自愈机制这个人和动物所特有的概念赋予机器。说明了工程自愈论是控制论研究的新领域,是人工自愈的理论基础,并对自动化与自愈化的异同进行了详细的分析和对比。

由于基于知识的故障诊断技术的发展,引起了工业过程的自愈控制对数据和知识的重视。文献[43]通过分析工业过程系统中各种工况的不同特点,提出了一种基于数据驱动的异常状态识别与自愈控制系统。文献[44]介绍了基于数据驱动的工况的异常情况的诊断与自愈控制方法的研究现状。文献[45]介绍了基于振动故障机理和数据驱动的智能诊断、人工自愈原理与振动故障自愈调控系统、航空发动机整机平衡与自动平衡等原理和技术。

在机器故障自愈调控领域,北京化工大学的高金吉院士所提出的人工自愈和工程自愈论在自愈控制领域具有重大意义。工业过程运行监控及优化的自愈调控技术中将故障机理与数据处理紧密结合,实现了在系统运行过程中对机器故障状态的自愈化。通过梳理文献,将实现机器故障自愈调控的方法进行简要的归纳,具体如表3所示。

表3 实现机器故障自愈调控系统的方法

Table 3 Methods for realizing mechanical fault self-healing control system

领域	方法描述	参考文献
机械故障自愈调控系统	① 介绍了自愈调控系统的应用领域、功能、基本原理和概念等。	[34-36]
	② 在系统故障的状态下,对自愈调控技术进行了探索和研究,其研究重点在于控制策略对故障的补偿和抑制。	[37-41]
	③ 基于智能诊断的自愈控制系统,将基于数据的智能诊断方法与控制方法相协作,实现自愈控制。	[43-45]

2.4 小结

智能电网主要通过实时在线监测、故障隔离和网络重构实现系统的自愈控制。飞行控制系统的自愈控制是首先对发生的故障进行实时检测和诊断,再通过控制律的重构来补偿故障带来的负面影响,最后实现飞行控制系统的自愈控制。机器故障自愈调控系统则是通过研究机械故障机理来提出抑制或消除故障的方法,试图从机械动力学加控制的角度

来解决设备的故障问题,以此来实现机器设备的自愈化.总体来看,智能电网自愈控制为实现系统的自愈控制的应用提供了指导思想,飞行控制系统的自愈控制为实现系统的自愈控制提供了实践依据,机器故障自愈调控系统为自愈控制的发展提供了方向.自愈控制可以优化系统运行性能,实时检测系统性能,预估潜在的故障概率,在渐进式故障发生

的初期进行抑制,提升系统运行水平.

通过梳理智能电网的自愈控制、飞行控制系统的自愈控制和机器故障自愈调控系统的相关技术应用成果,对实现其他领域的自愈控制具有一定的借鉴意义.

综合上述3个领域的分析,本节对自愈控制系统的共性技术进行提炼,具体如表4所示.

表4 自愈控制的技术及应用实例

Table 4 Technology and applications of self-healing control

技术的分类	技术的描述	文献应用实例
基于代偿机制的自愈控制	主要基于系统的硬件冗余和软件冗余来实现,自愈控制利用代偿机制实现系统结构和功能上的自愈.	[13,17,39,41]
基于参数优化的自愈控制	主要在系统非正常状态时(退化和可以自愈的故障),通过故障诊断和适当的控制,及时调节参数,使得系统恢复正常状态.	[16,19,22,25–32,38,40,43]
基于结构优化的自愈控制	主要通过系统实时的监测诊断和控制,在运行过程中改变系统的结构,以此来抑制、消除甚至预防故障对系统的影响.	[12,14–15,18,20,37]

3 自愈控制的特征、功能与定义

3.1 自愈控制的特征

首先,通过对智能电网的自愈控制、飞行控制系统的自愈控制和机器故障自愈调控系统的技术应用领域的文献的梳理,可将自愈控制的一般特征总结为:1) 无人干预;2) 检测与诊断故障;3) 预防、抑制和消除故障;4) 知识支撑.无人干预是自愈控制系统的基本特征.检测与诊断故障是自愈控制系统的基础:检测的目的是实时检测系统的状态并及时发现故障状态的存在,诊断的目的是对故障进行辨识甚至找到故障原因.预防、抑制和消除故障是自愈控制系统的主要目的:预防是对潜在的故障进行提前干预;抑制是先阻止系统中发生的故障对系统性能造成的进一步的不良影响,再通过采取特定措施优化系统的运行状态;消除则是针对系统中发生的可修复故障,采取相应措施来消除故障,从而使系统恢复到正常状态.知识支撑的核心是关于系统和故障机理的相关知识的掌握.

其次,为了进一步理解自愈控制,通过对第2部分中3个领域的自愈控制发展现状的梳理,本文总结出了自愈控制发展的从低级到高级的目标层次,如图6所示.第1层的目标是建立具有容错能力的控制系统,系统的容错能力是实现自愈控制的基础.第2层的目标是实现系统的状态诊断机制:即,在容

错能力的基础上实时获得系统的状态以及故障信息,这是自愈控制的重要组成部分.第3层的目标是完成在线优化机制,它以第2层目标获得的信息为依据,对系统的非正常状态采取一定的措施,在线优化系统性能,达到预防或抑制故障的目的.第4层的目标是实现系统自愈机制,这是自愈控制的最高目标;在系统的自愈机制下,系统可以灵活地采取抑制、消除和预防故障的措施,使系统从非正常状态转换为正常状态.

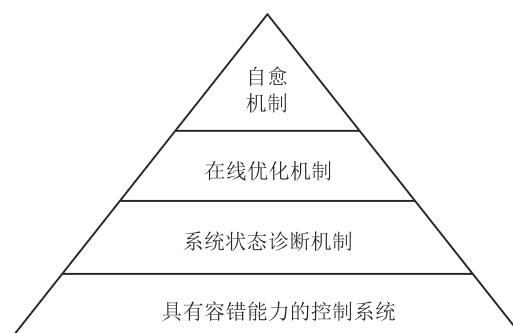


图6 自愈控制的目标层次图

Fig. 6 The target hierarchy of self-healing control

生物自身所具有的完整的自愈能力是在自然界中经过上亿年的演化才具有的性能,而学者们利用半个世纪的时间已基本实现自愈控制的前3层目标,但整体实现自愈控制的最高目标,需要一定的时间,

有关自愈控制的研究目前正在逐步迈入实现最高目标的时代。

3.2 自愈控制系统的功能与定义

实现自愈控制系统需要控制技术与多学科知识的交叉,需要打破各个学科之间的壁垒。虽然面临着巨大的挑战,但自愈控制在工程实践中依旧蓬勃发展,展现出其强大的生命力。自愈控制的强大生命力与它所具有的与当代产业发展需求高度契合的功能有着密不可分的关系,以无人干预为主要特征之一的自愈控制的功能可简要描述为以下3个方面:

1) 系统监测功能:通过监测可以实时获得系统的运行状态,再通过分析系统的运行状态数据可以评估系统的运行状态、预估潜在故障的概率、检测故障和诊断故障的特征信息等,从而为自愈控制提供制定控制策略的依据。

2) 故障处理功能:在系统处于性能退化或高故障风险状态的情况下,及时采取措施,抑制系统状态的恶化并预防高风险故障的发生;当系统发生故障时,在获得的故障信息的基础上,通过采取先进的控制方法抑制或消除故障对系统的影响,恢复系统性能。

3) 信息积累功能:通过对系统的监测和故障处理信息的长久积累,可将获得的信息转化为关于系统和故障机理的知识,支撑自愈控制系统的高效运行。

综上所述,可将广义的自愈控制系统定义为:在系统的元部件或子系统出现故障时,通过合理的资源协调和控制策略,使得系统具有自检测、自诊断、自决策、自恢复的能力,其目的是对系统中潜在的故障进行预防、已发生的故障进行抑制和消除的同时使整个系统基本地维持正常运行。简单来说:自愈控制利用系统状态诊断技术,通过先进的控制方式,使系统具有状态在线诊断、实时在线优化、预防潜在故障、已知故障快速自愈和未知故障自适应修复的功能。所以自愈控制的发展依赖于高精度的监控设备、完备的故障诊断技术以及先进的控制方法。从某种程度上来说,控制技术与信息处理技术的进步为自愈控制的诞生奠定了基础,自愈控制也是这些技术发展的必然产物。

4 自愈系统、容错控制与自愈控制

在计算机领域有一种与自愈控制较为相似的概念被称为自愈系统,本节将通过回顾自愈系统的发展概况,分析自愈控制与自愈系统的关系。另外,在提及自愈控制的文献中,或多或少总会提及容错控制及其相关的技术,但讨论自愈控制和容错控制关

系的资料相对匮乏。为了深入理解自愈控制,研究自愈控制和容错控制的关系是必要的,本节也将从容错控制和自愈控制的发展历程和各自的研究的侧重点的角度出发,对自愈控制与容错控制的联系和区别进行分析。

4.1 自愈系统与自愈控制

在计算机和网络通信领域中具有自愈属性的系统一般被称为自愈系统(self-healing system),在文献[46]中自愈的概念首次作为自主计算(autonomic computing)的4个自我属性之一被提出,并将其描述为:发现、诊断和对于干扰做出反应(discover, diagnose and react to disruptions)。

文献[47-50]介绍了自愈系统的发展概况,研究了网络自愈系统的概念和特点,建立了自愈系统体系架构。文献[49-54]采用调节网络中的关键性能参数、改进网络协议、优化诊断方式、设置恢复程序和选取最优策略等多种方式实现计算机自愈系统。

在计算机领域,最早提出自愈控制概念的相关文献可追溯至1968年由学者Briley提出的计算机领域的自愈控制^[55],并将其描述为一种不需要系统复制的电子计算机自修复(self-repairing)技术。在之后的有关计算机领域的“自愈”研究中,由于大多数学者将自愈视为系统的一种属性进行研究,并没有广泛沿用“自愈控制”一词,而是多采用“自愈系统”来代表具有自愈属性的系统。

计算机领域中自愈和容错的关系也是研究自愈系统的重要组成部分之一。在计算机领域,容错系统于1965年由学者Pierce提出并将容错系统描述为处理瞬态和掩盖永久故障,以便使系统返回到有效状态^[56]。目前个别文献对自愈系统和容错系统间的关系进行了探讨,在文献[47]认为容错系统与自愈系统有着根本的区别:容错系统不包含面向恢复的计算,但也承认了在某些情况下,自愈系统被视为从属于容错系统。文献[48]指出,自愈系统的研究起源于容错和自稳定系统的研究,并从自愈系统的起源和发展历程的角度对自愈系统与容错系统的关系进行了一定的分析。文献[57]指出,判断自愈系统是否属于容错计算领域的看法为时过早,要解决这个问题,首先需要更好地理解“自愈”这一术语的含义。

自愈系统与自愈控制虽然有着相似的思想,但最终由于学科背景的不同,在具体的实践中两者的技术和方法产生了较大的差异。由于近年来信息处理技术的飞速发展,计算机领域与其他学科的交叉变得越来越多,自愈系统与自愈控制系统存在着融合应用的趋势。

4.2 容错控制与自愈控制

容错原本是计算机设计技术中的一个概念,容错即容忍错误(故障)的简称.学者Niederlinski早在1971年即提出了完整性控制的概念^[58],将容错的概念引入控制系统中.Siljak于1980年发表了关于可靠镇定的文章^[59],意味着容错控制技术发展成了一种高可靠技术.1985年,Eterno等人将容错控制进行分类^[60],完善了容错控制体系.1986年9月美国国家科学基金会和美国电气和电子工程师协会(IEEE)控制系统学会在美国加州桑塔卡拉大学联合召开了关于控制所面临的机遇与挑战的讨论会,在提交给大会的一份报告中,将容错控制列为当今和未来7个挑战性课题之一^[61].在1997年,Patton教授撰写了容错控制方面有一定代表性的综述文章,全面阐述了容错控制所面临的问题和基本的解决方案^[62].从2007年开始各大国际会议针对容错控制的应用设立了专题报告.经过近40年的发展,容错控制的体系基本成熟.2007年之后,其体系并没有标志性

的变化,容错控制发展概况的时间轴,如图7所示.

最早提及自愈控制的文献可追溯至1968年由学者Briley在计算机领域提出的自愈控制的概念^[55].1984年美国颁布实施“飞行控制系统自修复大纲”,开始研究具有自愈能力的模型.1997年,美国提出的“展望2010年下一代制造计划”中将自维修和自修复列为研究重点之一^[33].1999年美国电力科学研究院与国防部在“复杂交互网络与系统计划”中首次提出自愈电网的概念,并将自愈控制作为重要的研究领域,电网领域的自愈控制被正式提出.2007年NASA开启了名为“综合自愈合飞行器控制(integrated resilient aircraft control, IRAC)技术的计划”,以增强飞行控制系统的自愈合能力^[63].2015年的文献[21-22]将故障诊断与容错控制纳入自愈控制的统一框架.自愈控制系统还处于概念提出和形成阶段,其体系还在发展中,根据现有的资料和文献将自愈控制标志性发展的年份总结到2015年.自愈控制发展概况时间轴,如图8所示.

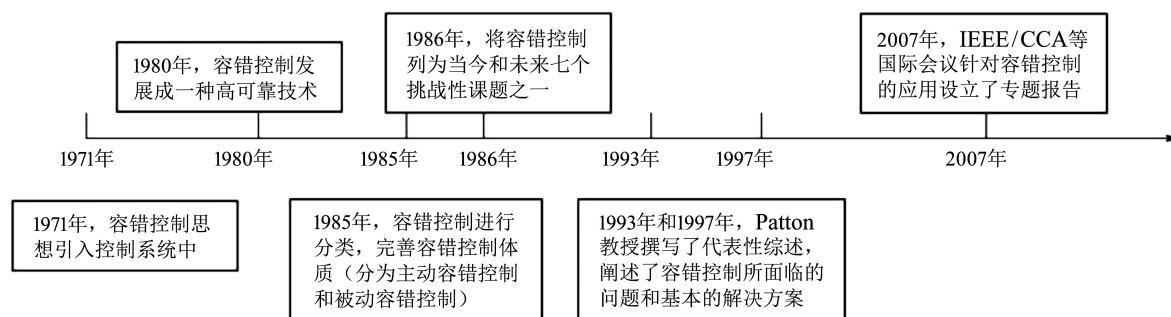


图7 容错控制发展概况图

Fig. 7 Overview of fault-tolerant control development

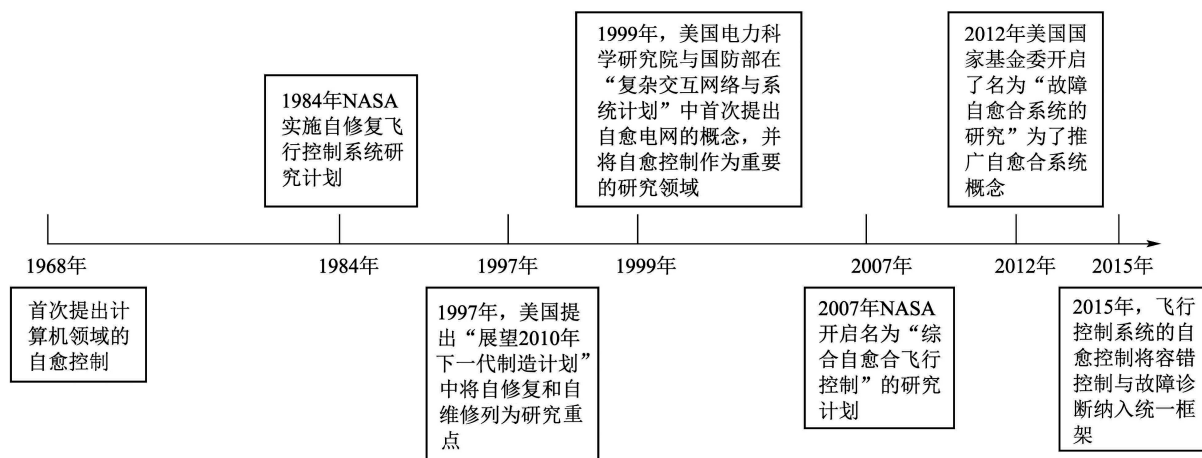


图8 自愈控制发展概况图

Fig. 8 Overview of self-healing control development

由于冗余系统与容错控制和自愈控制均具有密切关系,在此讨论冗余系统、容错控制和自愈控制

的区别和联系.冗余系统是为了增加系统的可靠性,采取两套或两套以上相同、相对独立配置的备份设

计.一般通过重复配置系统的一些部件,当系统发生故障时,冗余配置的部件介入并承担故障部件的工作,由此减少系统的故障时间.由于冗余系统需要重复配置相应的部件,具有较高的成本;同时,在处理不确定性和故障时的措施相对单一,所以冗余系统的自愈度是初级的.容错控制就是使系统具有容忍故障的能力,在系统出现故障的情况下,它仍可以实现系统的基本功能.容错控制在处理系统故障时可采取的措施比冗余系统更加灵活多样,容错控制的自愈度是中级的.自愈控制是在系统具有容忍故障能力的前提下,对系统非正常状态实施对应的策略,使系统具有预防、抑制和消除故障的能力.通过系统监测诊断、智能决策和先进控制等方法,自愈控制在系统运行时将实现预防故障和消除系统的可修复故障的目的,与冗余系统和容错控制相比,自愈控制更加全面地利用了系统运行时的状态信息,同时具备智能的决策方式,自愈控制的自愈度相对较高.总体来说,冗余系统强调相关部件的重复配置,容错控制强调系统与故障的共存能力,自愈控制强调系统对故障的预防、抑制和消除,自愈控制包含面向恢复的控制策略,因而这3方面研究的侧重点是不同的.

为了进一步说明容错控制和自愈控制的关系,将系统的工作模式分为正常、退化、故障和失效模式.本文可以利用图9分析系统模式的转换过程:a过程属于理想的系统运行模式,b,c,d,e,f和g的转换过程是系统中由于各种因素丧失原有性能的过程,均不属于自愈控制和容错控制研究的范畴.而转换过程1-5分别为:退化模式到正常模式、故障模式到退化模式、故障模式到正常模式、退化模式到退化模式和故障模式到故障模式.

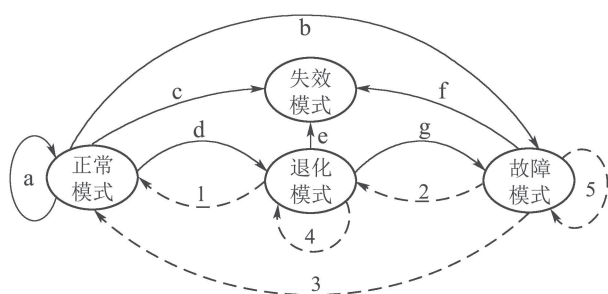


图9 系统工作模式转换图

Fig. 9 Diagram of system working mode conversion

要确定在5种转换过程中哪几个过程属于容错控制,又有哪几个过程属于自愈控制的范畴呢?首先得明确容错和自愈这两个词的基本意义,容错即容忍故障的简称,可知容错其并不强调故障的恢复,所以转换过程4-5属于容错控制的范畴.但对“自

愈”一词目前还没有一个基于共识的明确定义,一般认为“自愈”是一种稳定和平衡的自我恢复调节机制,抑制自毁或者说抑制事物的衰减即自愈.结合自愈是一种稳定和平衡的自我恢复调节机制可知,转换过程1-3符合自愈的特点,再结合抑制自毁或者说抑制事物的衰减即自愈,可知,过程4-5也属于自愈的范畴.

通过对系统工作模式转换过程的分析可知,转换过程1-5均属于自愈控制的研究范畴.从这个角度分析,自愈控制是包含容错控制的,此结论与第3.1节提及的自愈控制的目标层次是相呼应的,容错控制属于自愈控制的研究范畴,为实现自愈控制提供了先决条件,研究容错控制是实现自愈控制的基石.

5 自愈控制系统的基本架构与研究范畴

自愈控制系统的实现,受制于监测诊断系统的完善程度、关键设备的自动化程度、通信系统的可靠程度以及控制方法的先进程度等诸多因素.近年来,监测诊断系统逐渐完善、设备自动化程度大大提高、通信系统持续升级和智能化控制方法等技术在各领域中得到应用,极大提升了对所要控制的被控系统的快速感知与精准协调控制能力.在先进技术的支撑下,本文总结出的自愈控制系统的基本架构,如图10所示,大体上可以分为自检测与自诊断和自决策与自恢复两部分.

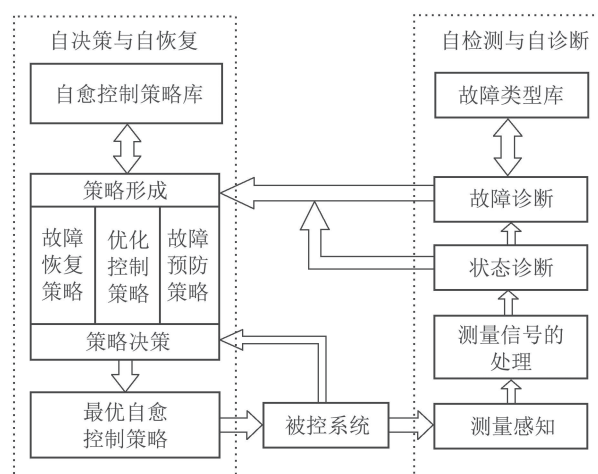


图10 自愈控制系统的基本架构图

Fig. 10 Basic architecture of the self-healing control system

自检测与自诊断部分主要包括测量感知、测量信号的处理、状态诊断、故障诊断和故障类型库5个单元:测量感知单元主要是利用测量及感知技术将系统的数据信息进行融合、共享,为自愈控制系统的实现提供有效的数据信息支撑;测量信号的处理单元是用于滤除测量的信息数据中冗余的数据,

并重构不能直接获得的关键数据信息;状态诊断单元则是在线评估系统的运行状态和预估潜在的故障风险水平;故障诊断单元是通过对故障运行状态的分析获得故障信息;故障类型库主要存储已知的故障信息,也可以通过“学习”来发现被控系统中新的故障信息,并把这些新的故障信息在线添加在故障类型库中,所以,故障类型库将积累不同类型的故障信息,为故障的快速诊断提供支撑。

自决策与自恢复部分主要是基于数据信息分析的结果,在系统发生故障或状态退化时快速制定和形成恢复及优化方案。自愈控制策略库主要存储已知故障的自愈控制策略,也可以在线存储策略形成单元对未知故障采取的新的自愈控制策略。也就是说自愈控制策略库具备在线提取、存储和更新自愈控制策略的功能,为快速恢复及优化被控系统的运行状态提供支持。“策略形成”主要包括预防控制策略、恢复控制策略和优化控制策略,其中,潜在的故障风险水平的信息促使预防控制策略的形成;在线评估系统运行状态的信息促使优化控制策略的形成,故障信息促使恢复控制策略的形成;“策略决策”的目的是综合被控系统状态,从形成的(故障预防、优化控制和故障恢复)策略中选择出“最优自愈控制策略”。

自检测与自诊断和自决策与自恢复两大部分通过相互协作,共同完成对被控系统的自愈控制目标。其具体过程可描述为:测量感知单元测量被控系统的状态,并把获得的被控系统运行状态的信息传输给测量信号的处理单元,测量信号的处理单元对获得的数据信息进行一系列的处理之后,状态诊断单元再根据测量信号的处理单元输出的信息数据对被控系统的运行状态进行诊断,评估其运行状态和潜在的故障风险水平:当状态诊断结果为正常、潜在的故障风险水平较高或退化状态时,状态诊断单元将信号传输到自决策和自恢复模块;当状态诊断单元的结果为故障时,状态诊断单元将信号传输到故障诊断单元。根据状态诊断单元和故障诊断单元的结果,自决策和自恢复部分会做出如下4种对应动作:

- 1) 若状态诊断结果为系统处于正常状态,则“策略形成”单元会根据系统的运行状态形成最优的静态的“优化控制策略”;
- 2) 若状态诊断的结果为动态系统发生某种潜在的故障风险水平较高,则“策略形成”单元会根据系统潜在的故障风险水平形成“故障预防策略”;
- 3) 若状态诊断结果为系统处于退化状态,“策略形成”单元会根据运行状态的退化程度形成动态

的“优化控制策略”;

4) 若状态诊断的结果为被控系统处于故障状态,则利用“故障诊断”单元对故障状态进行分析诊断,获得故障信息,获得故障信息的方式有两种:第1种,针对已知的故障类型,经过匹配机制,直接从故障类型库中提取故障信息;第2种,对于未知的故障类型,则需要故障诊断单元进行自适应诊断,如果可以获得故障信息,将此故障信息上传至故障类型库并增加为已知故障类型,同时传给“策略形成”单元;如果无法获得故障信息,则采取紧急停机等方式进行应急处理。对应获取故障信息的两种不同的方式,其“故障恢复策略”的形成也有两种方式:针对已知故障类型,“策略形成”单元直接从自愈控制策略库中提取对应的“故障恢复策略”;对于未知的故障类型,“策略形成”单元根据故障诊断单元提供的未知故障的信息,形成新的“故障恢复策略”,并将其上传至自愈控制策略库中存储。

“策略形成”单元通过上述对应关系,分别形成“故障预防策略”、“优化控制策略”和“故障恢复策略”。由于被控系统的运行状态比较复杂,运行状态交叉的情况时有发生,例如:被控系统即处于退化状态又处于高潜在故障风险水平的情况下,“策略决策”单元将通过合理的决策方式从已形成的控制策略中决策出“最优自愈控制策略”,作用于被控系统,达到实时优化系统的运行状态、预防故障的发生和对故障进行抑制和消除的目的,以此提升系统的安全、可靠、经济运行水平。

综合对自愈控制的应用领域的研究和自愈控制与容错控制关系的分析,本文初步界定的自愈控制的研究范畴包括优化控制、容错控制、故障诊断、监测系统、冗余系统、故障机理和决策方法,如图11所示。

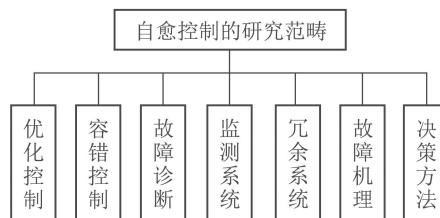


图 11 自愈控制研究范畴的示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the research category of self-healing control

6 总结与展望

本文通过对自愈控制的应用领域的研究,总结了自愈控制的特征、功能和研究范畴等基本特性,给出了自愈控制系统的定义及其基本架构,并将它们作为描述自愈控制和对自愈控制进行理论研究的

基点. 同时, 本文从发展历程、从属关系和研究侧重点等方面分析了自愈控制与容错控制的不同之处, 使我们从更加完备和综合的角度来认识自愈控制这一整体, 但自愈控制所研究的内容与其他控制方法并非是割裂的关系, 它们具有共有的特征: 整体性、目的性、反馈性和信息性等. 总体来说, 自愈控制系统将监测诊断与先进的控制方法有机地结合在一起, 通过实时监测运行状态, 根据系统的运行状态通过先进的控制方法达到一定的控制目标.

由于自愈控制系统还处于概念提出和形成阶段, 要成为相对独立的研究方向, 还有不少工作要做.

如何使系统在运行中完成对故障的预防、抑制和消除, 同时恢复系统性能将成为未来研究的重点. 自愈控制系统涉及到多学科、多专业的理论和技术, 它是先进的信息处理技术与现代装备高度融合的体现. 加强自愈控制理论的研究和应用领域的开发, 对提高系统性能、延长系统寿命、预防系统故障、减少系统的维修成本、提高系统的技术保障水平具有重要意义. 结合自愈控制的特征、功能、定义及基本架构, 笔者认为自愈控制在以下领域具有较大的发展潜力: 1) 网络控制系统: 它以网络作为媒介, 其通信方式减少了控制系统中信息传输的地域限制和传输成本, 但也使得控制系统中存在更多的隐患, 除了传统的故障外, 还面临着网络攻击对系统的威胁等安全问题^[64-68]. 在网络控制系统中可以有效地将通信网络的自愈系统和自愈控制相结合, 通过监测系统实时获得网络和系统的状态, 利用自愈机制来抑制或消除外部攻击造成的故障和系统内部的可修复的故障, 并恢复系统性能; 2) 分布式控制系统: 它采用分散控制和集中管理的基本设计思想, 采用分散递阶结构形式. 由于分布式控制系统一般具有多个子系统, 子系统之间相互耦合, 对系统的状态进行实时的监测, 因而可以通过设计的自愈控制方法自动地抑制或消除部分常见的故障, 在不采取停机措施的情况下恢复系统的性能, 可节省经济成本; 3) 智能控制系统: 智能控制是具有智能信息处理、智能信息反馈和智能控制与决策的控制方式. 若智能控制系统与自愈控制相协作, 即自愈控制利用智能控制系统的优势, 优化对故障的预防、抑制或消除的效果, 使智能控制系统具有更强的恢复系统性能的能力, 可以提高智能控制系统对非正常状态的应对能力, 使其具有更高的自治性.

参考文献:

[1] ISERMANN R, BALLE P. Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes. *Control Engineering Practice*, 1997, 5(5): 709 – 719.

- [2] AMIN M. Toward self-healing energy infrastructure systems. *IEEE Computer Applications in Power*, 2001, 14(1): 20 – 28.
- [3] JIA D L, MENG X L, SONG X H. Study on technology system of self-healing control in smart distribution grid. *International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*. Beijing, China: IEEE, 2011: 26 – 30.
- [4] QIN Hongxia, TAN Zhihai, GE Liang, et al. Study and design of smart distribution grid self-healing control system technology. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(22): 134 – 139.
(秦红霞, 谭志海, 葛亮, 等. 智能配电网自愈控制系统技术研究与设计. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(22): 134 – 139.)
- [5] DONG Xuzhu, HUANG Shaoyuan, CHEN Rouyi, et al. Self-healing control technology for smart distribution system. *Automation of Electric power systems*, 2012, 36(18): 17 – 21.
(董旭柱, 黄邵远, 陈柔伊, 等. 智能配电网自愈控制技术. *电力系统自动化*, 2012, 36(18): 17 – 21.)
- [6] GU X X, JIANG N, JI K, et al. *Self-healing Control Technology for Distribution Networks*. Beijing, China: China Electric Power Press, 2017.
- [7] LIU W, KANG T F, CHENG W X, et al. The modeling of self-healing control system for distribution network based on UML. *The 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*. Changsha, China: IEEE, 2015: 1435 – 1439.
- [8] ZHOU S H, REN T X, MA Y J, et al. An overview of self-healing control in smart distribution grid. *Proceedings of the 36th Chinese Control Conference*. Dalian, China: IEEE, 2017: 10652 – 10656.
- [9] LIU H M, CHEN X Y, YU K, et al. The control and analysis of self-healing urban power grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(3): 1119 – 1129.
- [10] WANG Jinli, WEI Chunyuan, LIU Zhihong, et al. Development and prospect of self-healing control technology for smart distribution network. *Distribution & Utilization*, 2019, 36(7): 13 – 19.
(王金丽, 韦春元, 刘志虹, 等. 智能配电网自愈控制技术发展展望. *供用电*, 2019, 36(7): 13 – 19.)
- [11] LI Zhenkun, ZHAO Xiangyang, ZHU Lan, et al. Evaluation of self-healing ability for smart distribution network after failure. *Power System Technology*, 2018, 42(3): 789 – 796.
(李振坤, 赵向阳, 朱兰, 等. 智能配电网故障后自愈能力评估. *电网技术*, 2018, 42(3): 789 – 796.)
- [12] YIP T, WANG J H, XU B Y, et al. Fast self-healing control of faults in MV networks using distributed intelligence. *CIGRE-Open Access Proceedings Journal*, 2017, 2017(1): 1131 – 1133.
- [13] AREFIFAR S A, MOHAMED A R I, EL-FOULY T H M. Comprehensive operational planning framework for self-Healing control actions in smart distribution grids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(4): 4192 – 4200.
- [14] WANG Yulei. *Research and implementation of self-healing control technology for distribution grid*. Nanjing: Southeast University, 2016.
(王郁垒. 分布式配电网自愈控制技术研究. 南京: 东南大学, 2016.)
- [15] GE L, TAN Z H, ZHAO F Q, et al. Design of an improved feeder self-healing control scheme. *China International Conference on Electricity Distribution*. Shenzhen, China: IEEE, 2014: 257 – 260.
- [16] LI R, ZHANG X B, ZHAO Q, et al. Economic optimization of self-healing control of power grid based on multi-agent system. *Advanced Information Management, Communicates, Electronic & Automation Control Conference*. Xi'an, China: IEEE, 2016: 1334 – 1337.
- [17] KANG Jiabin. *Research on self-healing control method of smart distribution network based on multi-agent fault tolerance*. Nanchang: East China Jiaotong University, 2017.
(康嘉斌. 基于多智能体容错的智能配电网自愈控制方法研究. 南昌: 华东交通大学, 2017.)

- [18] ELMITWALLY A, ELSAID M, ELGAMAL M, et al. A fuzzy-multiagent self-healing scheme for a distribution system with distributed generations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(5): 2612 – 2622.
- [19] WU Jingzi, WEI Dengfeng. Distribution network fault self-healing algorithm based on improved PSO. *Journal of Electric Power*, 2014, 29(3): 206 – 222.
(吴静子, 魏登峰. 基于改进粒子群算法的配电网故障自愈算法. 电力学报, 2014, 29(3): 206 – 222.)
- [20] LIU Kai, LI Wenpei, CHENG Qianshan, et al. Self-healing of smart distribution network based on heuristic rules and artificial immune. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2016, 49(2): 218 – 222.
(刘凯, 李文佩, 程潜善, 等. 基于启发式规则和人工免疫的智能配电网自愈. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(2): 218 – 222.)
- [21] CASAVOLA A, RODRIGUES M, THEILLIOL D. Self-healing control architectures and design methodologies for linear parameter varying systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2015, 25(5): 625 – 626.
- [22] HOU M, WANG Z H, THEILLIOL D, et al. A self-healing control method for satellite attitude tracking based on simultaneous fault estimation and control design. *Control & Fault-tolerant Systems*. Barcelona, Spain: IEEE, 2016: 349 – 354.
- [23] CHEN Fuyang, WANG Jing. *Resilient Control of Flight Control System*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017.
(陈复扬, 王瑾. 飞行控制系统的自愈合控制. 北京: 电子工业出版社, 2017.)
- [24] BELCASTRO C M, FOSTER J V. Aircraft loss-of-control accident analysis. *Navigation and Control Conference*. Toronto, Canada: AIAA Guidance, 2010: 1 – 41.
- [25] QI X, THEILLIOL D, QI J T, et al. Self-healing control method against unmanned helicopter actuator stuck faults. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*. Orlando, USA: IEEE, 2014: 842 – 847.
- [26] QI X, QI J T, THEILLIOL D, et al. Self-healing control design under actuator fault occurrence on single-rotor unmanned helicopters. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2016, 84(1): 21 – 35.
- [27] WANG A, CHEN F Y, GONG H J. Self-healing control for attitude system of hypersonic flight vehicle with body flap faults. *IEEE Access*, 2018, 6: 19121 – 19130.
- [28] BESNARD L, SHTESSEL Y B. Quadrotor vehicle control via sliding mode controller driven by sliding mode disturbance observer. *Journal of the Franklin Institute*, 2012, 349(2): 658 – 684.
- [29] SONG Chao, ZHAO Guorong, LIU Xu. Adaptive fault-tolerant control for hypersonic vehicle. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2012, 35(3): 593 – 596.
(宋超, 赵国荣, 刘旭. 高超声速飞行器的自适应容错控制. 固体火箭技术, 2012, 35(3): 593 – 596.)
- [30] LUAN W L, CHEN F Y, HOU R. A direct adaptive control scheme for a faulty helicopter using the outer loop compensation technique. *International Conference on Intelligent Control and Information Processing*. Harbin, China: IEEE, 2011: 351 – 354.
- [31] LIU M, CAO X B, SHI P. Fuzzy-model-based fault-tolerant design for nonlinear stochastic systems against simultaneous sensor and actuator faults. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2013, 21(5): 789 – 799.
- [32] SAMIN M, PATTON R J. Active fault tolerant control for nonlinear systems with simultaneous actuator and sensor faults. *International Journal of Control Automation & Systems*, 2013, 11(6): 1149 – 1161.
- [33] GAO Jinji. *Diagnosis and Treatment of Machine Faults and Self-healing*. Beijing: Higher Education Press, 2012.
(高金吉. 机器故障诊治与自愈化. 北京: 高等教育出版社, 2012.)
- [34] XU Binshi, ZHANG Wei, LIU Shican, et al. Smart self-repairing technology for modern equipment. *China Surface Engineering*, 2004, 17(1): 1 – 4.
(徐滨士, 张伟, 刘世参, 等. 现代装备智能自修复技术. 中国表面工程, 2004, 17(1): 1 – 4.)
- [35] GAO J J, MA B, JIANG Z N. Research on fault self-recovery engineering. *Journal of Dalian University of Technology*, 2006, 46(3): 460 – 468.
- [36] GAO Jinji. Research on the fault self-recovery principle of equipment system. *China Engineering Science*, 2005, 7(5): 43 – 48.
(高金吉. 装备系统故障自愈原理研究. 中国工程科学, 2005, 7(5): 43 – 48.)
- [37] LI Yan, WANG Weimin, LI Shuangxi, et al. Study of a rotor axial displacement fault self-recovery and regulation system in a high speed turbo-compressor. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science)*, 2009, 36(5): 92 – 96.
(李燕, 王维民, 李双喜, 等. 离心压缩机轴位移故障自愈调控系统的研究. 北京化工大学学报(自然科学版), 2009, 36(5): 92 – 96.)
- [38] HUANG Liquan, WANG Weimin, SU Yiru, et al. Rotor automatic balancing method and test based on electromagnetic self-recovery force. *Journal of vibration and shock*, 2011, 30(1): 208 – 212.
(黄立权, 王维民, 苏奕儒, 等. 基于电磁自愈力的转子自动平衡方法与实验研究. 振动与冲击, 2011, 30(1): 208 – 212.)
- [39] SUN W L, JIAN D D, YUAN Y H, et al. Fault simulation of electro-hydraulic servo system for fault self-healing based on immune principle. *International Symposium on Computational Intelligence & Design*. Hangzhou, China: IEEE, 2016: 136 – 139.
- [40] XIA Tian. *The research of double close loop self-healing system based on the improved particle swarm optimizer*. Shenyang: Liaoning University, 2015.
(夏天. 基于改进粒子群优化的双闭环自愈调控算法研究. 沈阳: 辽宁大学, 2015.)
- [41] WANG Qingfeng, GAO Jinji, YUAN Qingbin, et al. Research and application of self-recovery smart electro-hydraulic control system on axial-blower static blade adjustable actuator. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(20): 185 – 192.
(王庆锋, 高金吉, 袁庆斌, 等. 主风机静叶可调执行机构自愈化智能电液控制系统研究与应用. 机械工程学报, 2016, 52(20): 185 – 192.)
- [42] GAO Jinji. Artificial self-recovery and machinery self-recovery regulation system. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(8): 83 – 94.
(高金吉. 人工自愈与机器自愈调控系统. 机械工程学报, 2018, 54(8): 83 – 94.)
- [43] WU Z W, WU Y J, CHAI T Y, et al. Data-driven abnormal condition identification and self-healing control system for fused magnesium furnace. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(3): 1703 – 1715.
- [44] LIU Qiang, ZHUO Jie, LANG Ziqiang, et al. Perspectives on data-driven operation monitoring and self-optimization of industrial processes. *Acta Automatic Sinica*, 2018, 44(11): 1944 – 1956.
(刘强, 卓洁, 郎自强, 等. 数据驱动的工业过程运行监控与自优化研究展望. 自动化学报, 2018, 44(11): 1944 – 1956.)
- [45] GAO Jinji. Intelligent monitoring of aircraft engine vibration faults. *Measurement & Control Technology*, 2019, 38(1): 1 – 4.
(高金吉. 航空发动机振动故障监控智能化. 测控技术, 2019, 38(1): 1 – 4.)
- [46] GANEK A G, CORBIT A. The dawning of the autonomic computing era. *IBM System Journal*, 2003, 42(1): 5 – 18.
- [47] GHOSH D, SHARMAN R, RAO H R, et al. Self-healing systems-survey and synthesis. *Decision Support Systems*, 2007, 42(4): 2164 – 2185.
- [48] PSAIER H, DUSTDAR S. A survey on self-healing systems: Approaches and systems. *Computing*, 2011, 91(1): 43 – 73.

- [49] AL-ZAWI M M, AL-JUMEILI D, HUSSAIN A, et al. Autonomic computing: Applications of self-healing systems. *International Conference on Developments in E-Systems Engineering*. Dubai, UAE: IEEE, 2011: 381 – 386.
- [50] BARCO R, LAZARO P, MUNOZ P. A unified framework for self-healing in wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(12): 134 – 142.
- [51] KHATIB E J, BARCO R, GOMEZ-ANDRADES A, et al. Diagnosis based on genetic fuzzy algorithms for LTE self-Healing. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 65(3): 1639 – 1651.
- [52] AL-OQIPLY I, SUBAIIH B, BANI-MOHAMMAD S, et al. A survey for self-healing architectures and algorithms. *International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*. Chemnitz, Germany: IEEE, 2012: 1 – 5.
- [53] FERGUSON C, GU Q J. Self-healing control flow protection in sensor applications. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2011, 8(4): 602 – 616.
- [54] NIKMANESH S, AKBARI M, JODA R. Proactive self-healing analysis-framework based on discrete-time markov decision process in 5G network and beyond. *International Symposium on Telecommunications*. Tehran, Iran: IEEE, 2018: 690 – 695.
- [55] BRILEY B E. A self-healing control. *Bell System Technical Journal*, 1968, 47(10): 2367 – 2378.
- [56] WILLIAM P. *Failure-tolerant Computer Design*. New York, USA: Academic Press, 1965.
- [57] KOOPMAN P. Elements of the self-healing system problem space. *Workshop on Software Architectures for Dependable Systems*. Portland, USA: ICSE, 2003: 1 – 6.
- [58] NIEDERLINSKI A. A heuristic approach to the design of linear multivariable interacting control system. *Automatica*, 1971, 7(6): 691 – 701.
- [59] SILJAK D D. Reliable control using multiple control systems. *International Journal of Control*, 1980, 31(2): 303 – 329.
- [60] ETERNO J S, LOOZE D P, WEISS J, et al. Design issues for fault-tolerant restructurable aircraft control. *IEEE Conference on Decision & Control*. Florida, USA: IEEE, 1985: 900 – 905.
- [61] LEVIS A, PERKINS W R, MARCUS S I, et al. Challenges to control: A collective view. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 1987, 32(4): 275 – 285.
- [62] PATTON R. Fault-tolerant control: The 1997 Situation. *Proceedings of IFAC Symposium on fault Detection and Safety for Technical process*, 1997, 30(18): 1029 – 1051.
- [63] TOTAH J. Integrated Resilient Aircraft Control. NASA, 2007.
- [64] YANG S H, DING Y L, LYU X R. Safety and security risk assessment in cyberphysical systems. *IET Cyber-Physical Systems Theory & Applications*, 2019, 3(4): 221 – 232.
- [65] TARIQ M U, FLORENCE J, WOLF M. Improving the safety and security of wide-area cyber-physical systems through a resource-aware, service-oriented development methodology. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 106(1): 144 – 159.
- [66] HUMAYED A, LIN J Q, LI F J. Cyber-physical systems security-a survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 6(4): 1802 – 1831.
- [67] PAL R J, PRASANNA V. The stream mechanism for CPS security the case of the smart grid. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2017, 36(4): 537 – 550.
- [68] ALTAWY R, YOUSSEF A M. Security tradeoffs in cyber physical systems: A case study survey on implantable medical devices. *IEEE Access*, 2017, 4: 959 – 979.

作者简介:

尹逊和 教授, 博士生导师, 研究方向为网络控制系统的理论与应用、信息-物理系统、认知控制、自愈控制、智能电网中的通信与控制等, E-mail: xhyin@bjtu.edu.cn;

王忻 硕士研究生, 研究方向为自愈控制及其在网络控制系统中的应用, E-mail: 18120262@bjtu.edu.cn.