

DOI: 10.3901/JME.2021.02.001

# 人工自愈概论<sup>\*</sup>

高金吉<sup>1,2</sup>

- (1. 北京化工大学高端机械装备健康监测与自愈化北京市重点实验室 北京 100029;  
2. 北京化工大学发动机健康监测及网络化教育部重点实验室 北京 100029)

**摘要:** 论述了仿生机械学研究的新领域——人工自愈原理: 借鉴中华传统医学“自主调理是治疗学的第一原理”, 将人和动物的自愈机制赋予机器, 使机器储存、补充和调动自愈力以维持机体健康状态。人工自愈技术包含自修复、代偿、自防护和自愈调控技术。人工智能模仿人脑的意识思维控制行为实现自动化, 可使机器更聪明; 人工自愈可模仿人体无意识思维的自愈机制, 在运行中防止和抑制故障实现自愈化。论述了工程自愈论是控制论研究领域的一个新的分支学科, 拓展了控制论和工程控制论研究领域。提出人工自愈和人工智能赛博-物理系统 CPS 三体模型。人工自愈会让机器装备更健康, 从故障快准溯源诊断到精稳自愈调控, 是机器乃至人造物系统自主健康基础, 应用前景广阔。

**关键词:** 仿生人工自愈; 人工智能; 工程自愈论; 自愈调控; 自主健康

**中图分类号:** TP277; TH165; TB17

## Overview on Artificial Self-recovery

GAO Jinji<sup>1,2</sup>

- (1. Beijing Key Laboratory of High-end Mechanical Equipment Health Monitoring and Self-Recovery,  
Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;  
2. Key Lab of Engine Health Monitoring-Control and Networking of Ministry of Education,  
Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029)

**Abstract:** The new field of bionic mechanics research, artificial self-recovery principle is discussed. Artificial self-recovery refers to the Chinese traditional medicine “self-conditioning is the first principle of therapeutics”, and the self-recovery mechanism of human and animal is given to the machine to make the machine store, supplement and mobilize the self-recovery force to maintain health. Artificial self-recovery technology includes self-repairing, compensatory, self-protection and self-recovery regulation technology. The artificial intelligence imitates the human brain’s consciousness thought to control behavior, realizes the automation and makes machines smarter; Artificial self-recovery can imitate the self-recovery mechanism of human body’s unconscious thinking, and realize self-recovery by preventing and restraining faults in operation. It is discussed that the theory of engineering self-recovery is a branch of cybernetics research field, expanding the research field of cybernetics and engineering cybernetics. Three body model of artificial self-recovery and artificial intelligence cyber physics system is proposed. Artificial self-recovery will make machines healthier, from fault fast and exact diagnosis to accurate and stable self-recovery regulation and control, and is the autonomous healthy foundation of machine and even artificial creation system, which has broad application prospect.

**Key words:** bionic artificial self-recovery; artificial intelligence; engineering self-recovery theory; self-recovery regulation; autonomous health

## 0 前言

现代工业生产日趋大型化、高速化、自动化、

智能化, 特别是石化、冶金、有色等流程工业的透平机械、压缩机、大型泵、风机等与生产过程紧密相连成大系统, 许多具有高温、高压、易燃、易爆等特点。装备故障可能导致机毁人亡的重大事故, 经济损失巨大。迄今为止, 国际工程界与故障作斗争的对策主要有紧急停车系统、监测诊断与智能运

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(50635010, 51135001, 51775030)和国家重点基础研究发展计划(2012CB026000)资助项目。20191030 收到初稿, 20200925 收到修改稿

维,对人的依赖是必须的,发生故障停机后须由人去修复机器。机器是生物以另一种方式的延续,与故障作斗争是与疾病作斗争以另一种方式的延续。机器故障能否像人和动物一样可以“自愈”?为此,本文提出研究应用人工自愈原理和开发自主健康技术。

人工自愈是借鉴中华传统医学“自主调理是治疗学的第一原理”,将人和动物的自愈机制赋予机器,人工自愈会让机器更健康,从故障快准溯源诊断到精稳自愈调控,是机器乃至人造物系统自主健康的基础,应用前景广阔。

2012 年,美国 GE 提出工业互联网的概念,2009 年,IBM 又正式揭开“智慧地球”中国战略的序幕,我国工业互联网平台和智慧工厂建设风起云涌。中国具有门类齐全、世界上数量最多的工业装备,工业装备特别是高危流程工业和空天飞行器安全与自主健康至关重要,而且是未来发展的必然趋势。为实现制造业安全可靠、降本增效仅仅建设智慧工厂是不够的。在人工自愈理论指导下,实现装备系统辅助康复和自主健康,进而实现高危系统本质安全化和无人化,这些远远超出智慧工厂理论和实践的领域。要实现这一目标,需要工业互联网和人工智能人与工自愈两个轮子驱动构建智慧健康工厂。

中国应该敢于人先,自主创新,要率先开发应用人工自愈理论和自主健康技术,不应等外国人提出来再跟人家跑,再去“弯道超车”。我国是工业装备第一大国,理应在世界上最先揭开“健康工厂”乃至“健康地球”发展战略的序幕。“人工自愈概论”一文,抛砖引玉,旨在与我国装备和信息科技工作者一道,共同努力创建研究人工自愈理论,开发应用自主健康技术,为助力新一轮科技革命,迈进自愈化时代贡献力量。

## 1 机器崛起与中华医学催生人工自愈

机器是双刃剑,可以为人类带来福祉,但也可能导致灾难。机器的故障导致事故,使其部件损伤、生产中断、爆炸污染甚至机毁人亡,在某些场合机器的故障具有破坏力。一台机器在正常工况/环境和没有干扰的条件下大都可以安全稳定运行。在上述条件发生小变化时,机器通过自身调节仍可保持正常运行,但是当上述条件发生较大变化或有干扰时,机器往往会进入异常状态甚至会发生故障和事故。

迄今为止,工程界与机器运行中故障作斗争的对策有二:① 为了防止故障酿成机器损坏等事故,许多重要装备都设有状态监测和紧急停车系统

(Emergent shut down, ESD),对保护机器起到了重要作用,但故障停机会造成经济损失;② 机器发生故障停机后由人去排故和修复机器,再重新启动使其恢复正常,对人的依赖是必须的。

随着生产大型化和自动化程度的不断提高,维修在现代企业中的地位也日益重要。据统计,在一些现代企业中,故障维修和停机损失费用已占其生产成本的 30%~40%;航空航天飞行器运行过程中的故障根本无法由人去维修。故障控制与预防必然成为当代面临的重大课题。

人造物机器是生物以另一种方式的延续<sup>[1]</sup>,与机器故障作斗争是与疾病作斗争以另一种方式的延续。人与疾病作斗争的 300 万年历史是在漫长的完全依靠“自愈”之后,近一万年才产生医学,逐步出现“治愈”的。从 1781 年瓦特发明蒸汽机到 1800 年广泛用于工业化生产至今,仅有 200 多年历史。人与故障作斗争主要是靠“治愈”,即机器出了故障要停机由人来检修。如所周知,动物和人都有自愈功能,许多病可以自行康复。机械装备系统故障可否在其运行中得到控制或自行消除?故障能否像人和动物的疾病一样可以“自愈”?这是在理论上值得探讨的重要课题。

同自动化理论的发展一样,工程控制论是在自动化技术开发和工程应用中逐步产生的,自愈化的理论也是滞后于自愈技术工程实践,在学术界对工程自愈的理论的研究刚刚起步。机器故障自愈技术源自现代工程实践和发展的需求。作者在 33 年石化企业机械装备故障诊断的工程实践中深刻认识到,除了少数突发故障以外大多数故障发生是一个渐进过程,而相互作用是故障的终极原因,应致力研究通过监测和诊断发现故障初始原因并且适时采取抵消调控手段,在运行中避免发生或消除故障。2003 年在国际学术会议上首次提出了机器的故障自愈原理<sup>[2]</sup>,受到学术界的关注。

我国古代著名医书《素问》说:“是故圣人不治已病治未病,不治已乱治未乱,此之谓也”。未病就是尚未形成的病,疾病在未病的阶段,在未形成的阶段,就发现它,截获它,使它消灭于无形。我国古代医学这种见微知著、防微杜渐的功夫,至今对人类与故障和事故作斗争仍有着指导意义<sup>[3]</sup>。

中华医学认为“自主调理是治疗学的第一原理”,人的疾病可以“自愈”,也可以“治愈”,保持健康的根本点不在于那种宏观的稳定状态,而在于调节控制那些建立和保持这种状态的具体机制。疾病的痊愈终归还得依靠人体的自愈能力,包括免疫、

防御、代偿、自修复和自适应等<sup>[4]</sup>。人工自愈是借鉴和移植现代医学“自主调理”治疗的原理，集成状态监测诊断技术、人工智能技术、主动和自适应控制技术、智能结构和自修复材料、嵌入式技术等，研究并应用以故障预防和自消除为目标的装备自主调控和自修复技术，使机械装备系统具备故障自愈功能。

人工自愈是现代机器与中华医学崛起催生出的治“未故障”或自修复的科学理论。人工自愈的研究领域非常广泛，与人工自愈密切相关的自愈化技术大致可以分为如下四类：① 自修复技术；② 代偿技术；③ 自保护技术；④ 自愈调控技术，如图 1 所示。前三类的研究内容详见文献[5]。本文论述的是与故障自愈调控相关的人工自愈原理和自愈化技术。

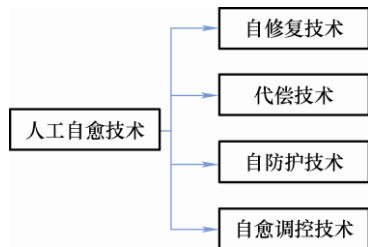


图 1 自愈化技术的研究领域

## 2 仿生人工自愈与人工智能

自古以来，自然界就是人类各种技术思想、工程原理及重大发明的源泉<sup>[6]</sup>。人工智能是对生物界进化的最高成果——人脑的仿生研究，是对人脑有意识思维的模仿。为了能够思考，需要拥有像大脑那样的一个器官，依赖它去学习、理解事物，去处理问题和做出决策。因此，智能可以定义为“学习和理解事物、处理问题并做出决策的能力”。计算机能否智能化，机器能否思考？作为一门科学，人工智能的目标，是使机器像人那样具有智能去做事情<sup>[7]</sup>。人工智能(Artificial intelligence, AI)，百度百科将其定义为研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科学。MIT 大脑与认知科学学院医院神经科学系主任 JAMES DiCarlo 教授提出，要革新人工智能领域，我们应该继续研究智能的根源：大脑。

仿生学和计算机萌发了人工智能技术科学就其本质而言，人工智能旨在让计算机像人一样思考，是对人脑意识思维过程的模拟。按照思维的分类，思维主体人脑可以直接意识到的思维称为意识思

维；把思维主体人脑无法意识到的思维称为无意识思维。人体的无意识思维指导着生物体自身的生理，生长发育，创伤修补，疾病抵抗，繁殖和变异等。这个“无意识思维”的过程是发自一个有别于人脑功能的另一个“主体”。仿生机械学对人工智能的研究大大增强了模仿人脑的功能，但忽略了人体的无意识思维，忽略了人体维持自身健康的无处不在的重要系统和功能——自愈系统及自愈功能。

人工自愈和人工智能均属于仿生机械学研究的领域。人工自愈是将人和动物所特有的自愈机制赋予机器，改变仅靠故障停机保护机器安全和完全依赖人去修复机器的传统方式。从故障快准诊断到基于人工自愈的精稳抑制，将大幅度提高装备的本质安全化水平。

人工自愈和人工智能一样是研发智能装备的理论基础。人工智能模仿人脑的意识思维，控制行为实现自动化；人工自愈模仿人无意识思维的自愈机制，抑制故障实现自愈化。人工智能会使装备更聪明，人工自愈会让装备更健康。人工自愈与人工智能对比如表 1 所示。

表 1 人工自愈与人工智能对比

	人工自愈	人工智能
仿生模拟对象及特点	人体自愈机制 分布式 多自愈功能	人的大脑功能 集中式 多控制功能
模拟思维方式	无意识思维	意识思维
研究领域	自修复技术、代偿技术、自防护技术、自愈调控技术等	自动控制系统与自动调节系统：模型抽象、优化控制、自我进化、容错系统、仿真技术
主要目标	是机器储存、补充和调动自愈力以维持机体健康状态的协同性动态系统	使机器能够胜任一些通常需要人类智能才能完成的复杂工作
相互关系	人工自愈的故障溯源诊断智能化，是在人工智能基础上发展起来的	为故障溯源诊断智能化提供支撑
作用	让机器更健康	使机器更聪明

## 3 人工自愈与人工智能赛博-物理系统

计算机的出现为人类打造了一个全新的数字虚拟空间，形成了物理实体、意识人体、数字虚体，从二元世界拓展为三元世界，有的学者将其称为“三体智能革命”<sup>[8]</sup>。在过去的几十年里，由于人体的主导作用，以前完全以机械和电等实物形态存在的元素，特别是那些描述逻辑、决策和控制的元素，越来越多地采用嵌入式系统和软件的形式精准映射到虚拟空间，并与人工物理实体交汇紧密相连，形成了赛博-物理系统(Cyber physical system, CPS)。

赛博-物理系统 CPS 是由人造物实体和数字虚体两体组成,在工程实际中第三体——人体总是要发挥主导作用,其一是模拟人的大脑有意识思维融入两体,形成人工智能;其二是模拟人的自愈机制无意识思维融入两体,形成人工自愈。图 2 所示为三体模型由人体(大脑有意识思维、自愈机制无意识思维)与人造物实体和数字虚体组成,人造物实体和数字虚体彼此之间交汇的界面内涵为人工智能和人工自愈。

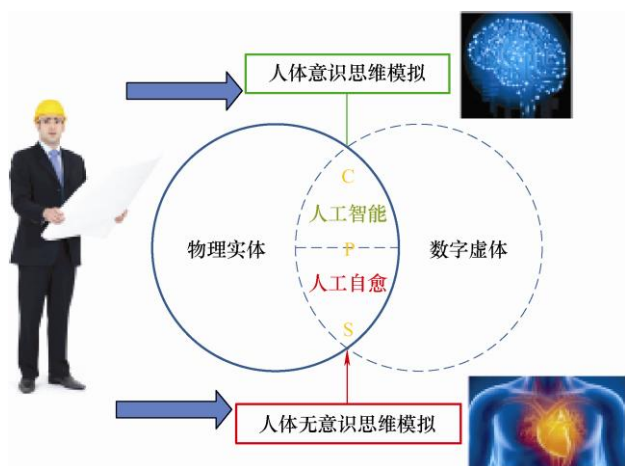


图 2 人工自愈与人工智能赛博-物理系统模式图

人工智能 CPS: 人体大脑有意识思维模拟-物理实体-数字虚体。

人工自愈 CPS: 人体自愈机制无意识思维模拟-物理实体-数字虚体。

不难看出,在三体模型中 CPS 为智能装备和智能制造提出新的途径,发挥着核心作用,但人还是整个系统不可或缺的最重要因素。图 3 所示是机器的人-赛博-物理智能运维系统,人利用人工智能(专家系统和智能联锁等)实施智能运维,对人的依赖是必须的。

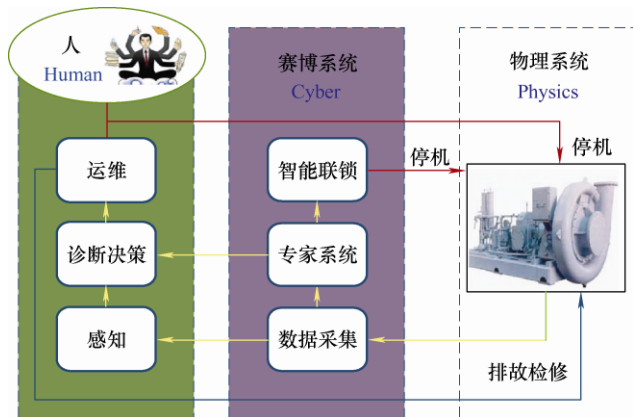


图 3 机器的人-赛博-物理智能运维系统

图 4 所示是机器赛博-物理健康系统(Cyber-physical health systems, CPHS),它由人-赛博-物理

智能运维系统和赛博-物理自愈调控系统(Cyber-physical self-recovery systems, CPSS)组成。基于人工自愈原理的机器赛博-物理自愈调控系统可大幅度减少停机次数和依赖人检修的工作量。

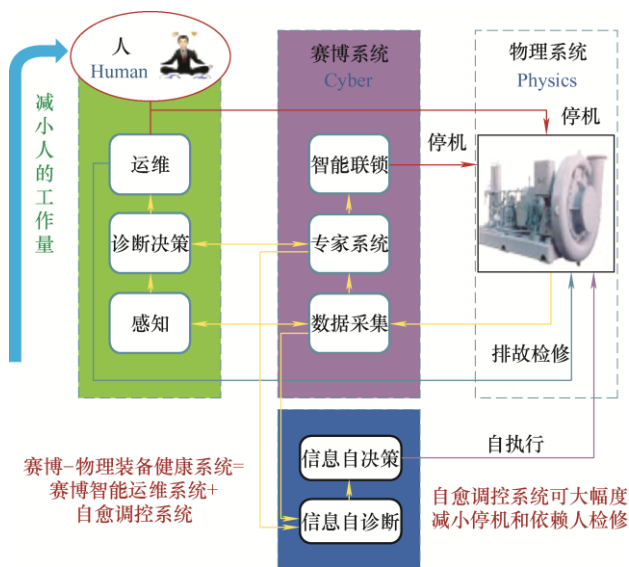


图 4 机器赛博-物理健康保障系统

## 4 工程自愈论与工程控制论

维纳的控制论的产生和发展,为生物系统与技术系统的连接架起了桥梁。工程控制论突破了动物和机器、控制工程和通讯工程的界线,将动物的目的性行为赋予机器共有的特征,概括综合形成新理论<sup>[9]</sup>。工程自愈论(Engineering self-recovery)是应用仿生原理,将动物自愈机制赋予机器,移植概括综合形成新的理论。

维纳的控制论成为联系生物学与工程技术的理论基础。但在 1948 年维纳发表控制论时,由于历史背景的局限,他是模仿狩猎从研究火炮自动打飞机的实践中研究“目的性行为”。按照控制论的观点,所谓目的性行为是指一个对象可以从外部探知的任何改变都可以称之为行为<sup>[10]</sup>。显然控制论中的目的性行为是不包含动物体内、由自愈力驱动的自愈过程的。

工程自愈论遵循控制论的规律,但与控制论相比又有其独特之处(表 2)。控制论和工程控制论都是把目的性行为这个动物所特有的概念赋予机器,而工程自愈论则扩展了其研究领域,把自愈机制这个概念赋予机器。工程控制论是生产过程自动化和自动控制系统的基础理论<sup>[11]</sup>,工程自愈论与工程控制论研究的领域不尽相同,工程自愈论是生产装备和过程系统自愈化及自愈调控系统的基础理论,为人

工自愈的研究和自愈化技术推广应用奠定了坚实基础。

表 2 控制论与工程自愈论及工程控制论对比表

理论范畴	控制论 (Cybernetics)	工程控制论 (Engineering cybernetics)	工程自愈论 (Engineering self-recoveries)
产生背景	从模仿狩猎研究火炮自动打飞机的实践中研究“目的性行为”	对航天等工程技术领域的各个自动控制系统与自动调节系统做了全面的理论分析与探究，是工程实际中所用到的许多设计原则的整理与总结。	现代化工业生产越来越大型化、复杂化，自动化，连续生产，设备投资巨大，非计划停产损失巨大，飞行器在运行中根本无法由人去维修。
学科方向	联系生物学与工程技术的理论基础	控制论的一个分支学科，是关于受控工程系统的分析、设计和运行的理论。	拓展控制论研究领域的一个分支学科，是关于机器系统运行中故障自诊断和自愈调控的理论。
突破界线	突破动物和机器、控制工程和通讯工程的界线	突破动物和机器、控制工程和通讯工程的界线	突破动物和机器、诊断预测和主动控制的界线
研究对象	动物和机器目的性行为	动物和机器目的性行为	保持动物和机器自身的健康状况
工程应用	机器自动控制主系统	机器自动控制主系统	机器自愈调控系统
指导方向	指导设计制造使机器实现自动化	指导设计制造使机器实现自动化	指导设计制造使机器实现自愈化

5 自愈化与自动化

自动化技术形成于 18 世纪末至 20 世纪 30 年代期间。1788 年，英国机械师瓦特发明了离心式调速器，并把它与蒸汽机的蒸汽入口阀门连接起来，构成了蒸汽机转速的闭环自动控制系统。瓦特的这项发明开创了近代自动调节装置应用的新纪元，对第一次工业革命及后来控制理论的发展有着重要影响。人们开始采用自动调节装置，来对付工业生产中提出的控制问题。“自动化(Automation)”一词是美国人 HARDER 于 1936 年提出的。他认为在一个生产过程中，机器之间的零件转移不用人去搬运就是“自动化”。今天，自动化已远远突破了上述传统的概念，具有更加宽广和深刻的内涵。

20 世纪 40 年代，通过维纳等人的努力，在自动调节、计算机、通信技术、仿生学以及其他科学互相渗透的基础上，产生了控制论。这一理论对自动化技术有着深远影响。维纳提出的反馈控制原理，至今仍是控制理论中的一条重要规律。如果说动作机械(机器)延伸了人的四肢，传感器及检测技术延伸了人的感觉器官，电脑与计算机技术延伸了人的大脑，通信技术延伸的人的神经传导与信息传递功

能，那么自动化则全面提升、取代和拓展了人的功能<sup>[12]</sup>。

机器的自愈技术始于 20 世纪初。自 1916 年环型平衡器出现以来，人们研制出了多种自动平衡装置。在线自动平衡的概念最早由 VEGTE<sup>[13]</sup>于 1964 年提出，他在 1978 年报道了采用不平衡齿圈周向移动的方式来调整不平衡量的设计，并用它做了在线平衡试验。1982 年 BISHOP<sup>[14]</sup>用电动的平衡头对一个多盘挠性转子做了自动平衡。2002 年密芝根大学发表了多平面自动平衡研究成果<sup>[15]</sup>。我国哈尔滨工业大学、浙江大学、西安交通大学、北京化工大学等高校在旋转机械自动平衡技术研究也取得重要成果。1993 年浙江大学申请了名为“电磁式自平衡头”的发明专利<sup>[16]</sup>。2015 年北化气压液动平衡技术取得美国和欧盟发明专利<sup>[17-18]</sup>，在振动故障控制方面也取得一些成果。其他的自愈技术，如智能材料与自修复智能结构、摩擦自修复技术等，也被开发研制出来并开始在工程上得到应用。

自动化可以模仿人的有目的行为研制各种自动化机器如无人飞机、深海探测器等。他们的共同特点是，其控制系统像人的大脑一样，用有目的思维控制机器有目的的行为，来保持其功能。自愈化旨在让机器系统像人体一样具有自愈功能。生命体和机器的自愈系统，如人体的免疫系统和机器自动平衡系统，是为保持自身的健康状态，并不属于“目的性行为”。因此，对这一系统的研究超出了控制论的范畴。从仿生设计的角度，应用自愈原理可以模仿人和动物的自愈机制，研制具有自愈功能的机器如旋转机械的自动平衡系统。其特点在于不是靠“大脑”控制机器有目的的行为，而是模仿人体无意识思维的自愈机制调控机器自身系统，抵消故障产生条件和原因使机器保持健康状态。自愈化研究领域除了上述故障自愈调控技术，还包括自修复技术、代偿技术、自防护技术等。自愈化可以减少机器对人的依赖程度，抑制机器的破坏力或修复机器，使其在健康状态下工作，从而延长机器的运转周期和使用寿命。

6 自愈调控与自动控制系统

自愈调控技术的产生和发展与人工智能和自动控制技术的发展和日益成熟密切相关，人工智能可以指导认清机器系统故障产生的规律，采用数据驱动与先验知识相融合的智能方法，实现故障实时自诊断溯源。另外，抵消故障产生条件和原因的过程



中,要应用反馈原理,这与自动控制技术有相似之处,但反馈的内容完全不同。自动控制反馈的是被控制量偏离规定值,适时纠正可能引起的偏差来抑制干扰,而自愈调控反馈的是机器状态,适时自主抵消产生故障的条件和原因来抑制异常和故障苗头,既不错调又不过调,以确保机器恢复和保持健康稳定状态。

反馈控制原理。反馈控制是自动控制的主要形

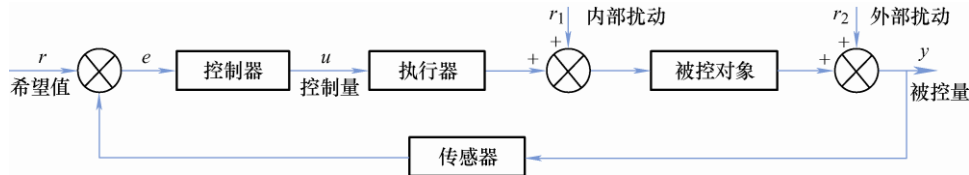


图 5 自动控制系统的组成原理框图

自愈调控是自愈化技术的主要形式,自愈调控的核心思想是建立在借助于人和动物随处可见的自愈功能。自愈调控系统由状态工况监测、诊断和决策及执行机构组成,如图 6 所示。自愈调控系统实时监测机器运行状态,一旦捕捉到异常或故障苗头及时自诊断溯源,快准确定异常部位、故障产生条件或原因,确定调控目标,运用专家系统自愈决策,通过执行器产生靶向自愈力,抵消故障产生条件和原因,在决策过程中也要通过机器状态的反馈不断修正以防止过调和错调,达到精稳抑制故障发生或在运行中消除之目标。

故障自愈调控系统(Fault self-recovery regulation, FSR)。对机器复杂系统的运行状态及工况进行实时监测,探测分析可能产生故障的条件及早期故障征兆,采用比较判别、诊断预测、自愈决策和主动控制等方法,在运行中使机器系统不具备产生故障的条件或自行将故障消除在萌芽中,从而使机器不发生故障或可不停机由异常状态恢复到正常状态,确保机器健康运行,如图 6 所示。

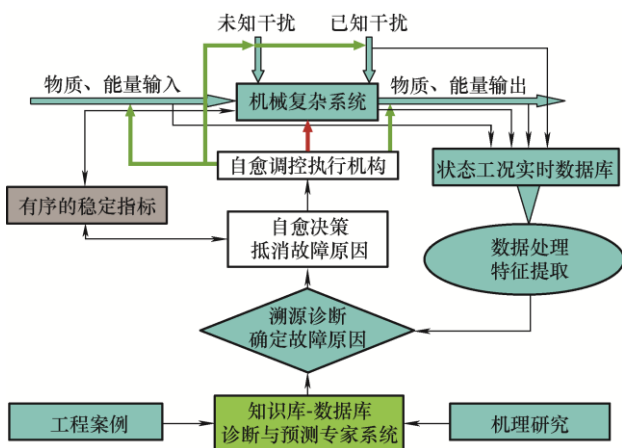


图 6 故障自愈调控基本组成原理模式图

式。自动控制的核心思想都是建立在借助于自然界中随处可见的“反馈”现象。反馈控制系统由控制器、受控对象和反馈通路组成,如图 5 所示。控制装置对受控对象施加的控制作用,是取自被控量的反馈信息,不管出于什么原因(外部扰动或系统内部变化),只要被控制量偏离规定值,就会产生相应的控制作用去消除偏差来抑制干扰,实现对被控对象进行控制的任务<sup>[19]</sup>。

综上所述,自动控制的核心思想和自愈调控的核心思想截然不同。自动控制的目标是被控对象目的性行为即机器的功能,反馈控制是自动控制的主要形式。而自愈调控的目标是机器的有序稳定状态即机器的健康,自溯源诊断并实时抵消故障产生条件和原因是自愈调控的主要形式。

振动故障靶向抑制方法:机器故障自愈调控也应借鉴当代医学靶向治疗思路,深入研究机器复杂系统的动力学行为,辨清故障的原因、性质、部位,从而在运行中有的放矢地施加自愈力进行调控,抑制异常状态,防止故障发生<sup>[20]</sup>。振动故障靶向抑制方法如图 7 所示,在机器运行中实时诊断预测振动故障的原因和产生条件,确定靶点目标,通过自愈决策和执行器适时适量地改变系统的刚度、阻尼及质量分布等施加自愈力或外激励力,不错调不过调,以精稳抑制振动故障苗头或使其不发生,进而实现故障自愈<sup>[5]</sup>。

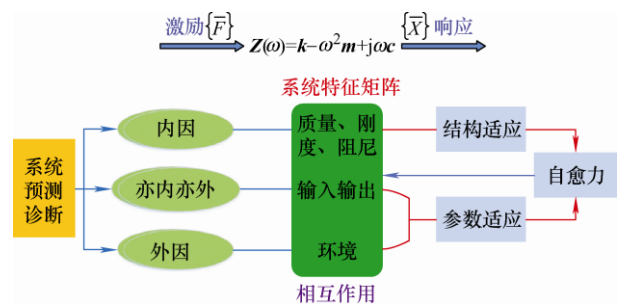


图 7 通过参数、结构适应产生自愈力靶向抑制振动

图 7 中  $Z(\omega)$ ,  $k$ ,  $m$ ,  $c$  分别表示系统的阻抗矩阵、刚度矩阵、质量矩阵、阻尼矩阵;  $\{F\}$ ,  $\{X\}$  分别表示系统的激励和响应。

机器自愈调控系统能抑制机器可能产生的损坏力使其不产生或在运行中自行消除故障。在紧急停

车系统之前采用故障自愈调控系统,可显著减少停车损失,降低维修成本,并减少机器对人的依赖程度。

对于重要的生产设备,会同时设有自动控制(主控制系统)(Basic control system, BCS)和自愈调控系统 FSR,两个系统其功能和工作方式均不相同。主控制系统 BCS 和自愈调控系统 FSR 对比如表 3 所示。

表 3 机器的自愈调控与自动控制对比表

技术领域	自愈调控	自动控制
基本概念	机器或装置及其监控系统在无人干预的情况下按设计的自愈机制自行抑制或消除故障的过程	机器或装置在无人干预的情况下按规定的程序或指令自动进行操作或控制的过程
基础理论	工程自愈论,拓展控制论研究领域的一个分支学科	工程控制论,控制论的一个分支学科
控制原理	实时监测机器运行状态,对故障苗头自诊断溯源,快准确定异常部位、故障成因,自愈决策确定调控目标,通过执行器抵消故障产生条件和原因,通过机器状态的反馈不断修正以防过调和错调,达到精稳抑制故障之目标	反馈控制:控制装置对受控对象施加的控制作用,是取自被控量的反馈信息,只要被控制量偏离规定值,就会产生相应的控制作用去消除偏差来抑制干扰,实现对被控对象进行控制的任务
研究对象	机器自身的健康状况和安全长周期运行	机器目的功能和优化运行
仿生原理	把自愈机制这个动物特有的概念赋予机器	把目的性行为这个动物特有的概念赋予机器
工作方式	在正常情况下,不产生任何动作,只有当自诊断发现机器出现异常,达到设定的动作条件时,通过自愈决策才能激活系统动作	机器的主控制功能,机器运行时一直发挥其作用
主要特点	参数适应或/和结构适应	参数适应
功能目标	仿生设计健康监控一体化机器,代替人的体力和脑力劳动,在运行中自行消除故障	用机器及其控制系统代替人的体力劳动和代替或辅助脑力劳动,以自动地完成特定的作业

## 7 透平机械自愈调控技术与工程应用研究

透平压缩机、发电机组、航空发动机、燃气轮机等透平机械等是工业和国防的心脏设备,一旦发生故障和事故损失巨大。基于人工自愈原理防止或在运行中抑制故障的发生实现自愈化,是动力装备智能化的主要手段。在透平机械自愈调控及应用领域,北京化工大学诊断与自愈工程研究中心十多年来取得一些研究成果,其部分成果及参考文献如下。

透平压缩机轴位移故障自愈调控系统<sup>[21-24]</sup>。

基于电磁力参数快速寻优的转子多频振动抑制

技术<sup>[25-26]</sup>。

基于电磁阻尼力的离心压缩机转子振动靶向抑制<sup>[27-28]</sup>。

多转子轴系失衡引起振动与基于自愈力的多靶点自愈调控方法<sup>[25-26]</sup>。

气压液体式不平衡振动故障靶向自愈调控系统<sup>[29-31]</sup>。

动静压混合气膜端面密封的自愈调控<sup>[32-33]</sup>。

旋转机械自动平衡原理及系统<sup>[34-37]</sup>。

航空发动机振动故障监控与本机动平衡原理和方法<sup>[38]</sup>。

## 8 人工自愈展望

工欲善其事必先利其器。我国拥有门类齐全的工业和世界上最多的装备,自主健康装备是智能制造发展的核心突破点。人工自愈是新的工业革命核心驱动力,可使高危装置本质安全化无人化,杜绝事故;促进装备维修方式改革,实现自修复、免维修;对关键装备、空天飞行器运行过程中等可自诊断、自维护、自恢复;自动平衡和振动自愈调控,可使精密机床等高端装备提加工精度和产品高质量,使桨扇发动机等动力装置提高平稳性能;可研制具有自愈功能的长寿命的“活”材料及结构。

中国科学院先进制造领域战略研究组指出,至 2030 年,在装备的安全与健康维护方面,装备的自诊断、自维护、自恢复将成为现实。至 2050 年,装备的智能化水平将得到本质的提高。体现在根据环境和任务的变化,装备不仅具有参数调节的适应能力,同时也具有结构适应能力。结合材料、信息技术的进步,装备的自我进化和升级的能力,将会促进装备的智能化水平由可控化、自动化真正实现自维护、自适应和自进化的高级智能阶段<sup>[39]</sup>。

未来机器的智能化将向高级智能化阶段发展。现阶段机器的智能化是指机器的可控化和自动化,主要解决代替人的体力和部分脑力劳动,使得机器能够自行完成特定的功能。机器的高级智能化阶段,是指机器不但可控化和自动化,而且具备故障的自愈化、性能的自优化和功能的自进化,主要解决进一步代替人的体力和脑力劳动。

人工智能会使未来的机器越来越聪明,而人工自愈能让未来的机器更健康。开发智能装备不仅靠网络在云端,也要重视装备自身及其与系统的和谐,故障机理、知识及工程经验也同样重要。我国在重视人工智能、工业互联网平台和机器人发展的同时,

也要重视人工自愈和自主健康装备的发展。

人工自愈是研发自主健康装备乃至所有人造系统自愈化的理论基础,可创造出具有自愈功能的新概念机电装备和人造系统。可以大胆假设人工自愈将与人类健康医学同步发展,并能补充和协助人类自愈康复功能。仿生人工自愈能让未来的机器装备、制造系统乃所有人造物系统更自主健康,进入自愈时代,具有广阔的发展前景。

### 参 考 文 献

- [1] WULF W A. International engineering challenges for the 21 century[C/CD]//The 8th General Assembly of Chinese Academy of Engineering Innovation and Development, Beijing Jun. 5-6 2006.
- [2] GAO Jinji. A study of the fault self-recovery regulation for process equipment[C]//Proceedings of International Conference on Intelligent Maintenance Systems. Xi'an : Intelligent Maintenance Systems, 2003, 781.
- [3] 高金吉. 装备系统故障自愈原理研究[J]. 中国工程科学, 2005, 7(5): 43-48.  
GAO Jinji. Research on the fault self-recovery principle of equipment system[J]. Engineering Sciences, 2005, 7(5): 43-48.
- [4] 祝世讷. 中西医差异与交融[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2001.  
ZHU Shine. Differences and communication of traditional Chinese and western medicine[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2001.
- [5] 高金吉. 机器故障诊治与自愈化[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.  
GAO Jinji. Mechanical fault diagnosis and self-recovery[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [6] 张春林, 赵自强. 仿生机械学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.  
ZHANG Chunlin, ZHAO Ziqiang. Biomechanics[M]. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [7] NEGNEVISKY M. Artificial intelligence: A guide to intelligent systems third edition[M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [8] 胡虎, 赵敏, 宁振波. 三体智能革命[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.  
HU Hu, ZHAO Min, NING Zhenbo. Three-body intelligence revolution[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [9] 湛垦华, 沈小峰. 普利高津与耗散结构理论[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998.  
ZHAN Kenhua, SHEN Xiaofeng. Prigogine and dissipative structure theory[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1998.
- [10] 维纳. 控制论(或关于在动物和机器中控制和通信的科学)[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.  
WIENER N. Cybernetics or control and communication in the animal and the machine[M]. Beijing: Peking University Press, 2007.
- [11] 钱学森. 论技术科学[J]. 科学通报, 1957, 2(4): 97-104.  
QIAN Xuesen. On science and technology[J]. Chinese Science Bulletin, 1957, 2(4): 97-104.
- [12] 夏洪永. 自动化概论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.  
XIA Hongyong. Introduction to automation[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [13] VEGTE J V, LAKE R T. Balancing of rotating system during operation[J]. Journal of Sound and Vibration, 1978, 57(2): 225-235.
- [14] BISHOP R E D. On the possibility of balancing rotating flexible shafts[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1982, 24(4): 215-220.
- [15] DYER S W, NI Jun, SHI Jianjun, et al. Robust optimal influence-coefficient control of multiple-plane active rotor balancing systems[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2002, 124(1): 41-46.
- [16] 汪希萱, 王群峰. 电磁式自平衡头: 中国, 93102971.6 [P]. 1993-03-12.  
WANG Xixuan, WANG Qunfeng. Electromagnetic self-balancing head: China, 93102971.6[P]. 1993-03-12.
- [17] WU Haiqi, PAN Xin, GAO Hui. Pneumatic liquid on-line automatic balancer of rotor: USA, US9212723[P]. 2015-12-15.
- [18] WU Haiqi, PAN Xin, GAO Hui. Pneumatic liquid on-line automatic balancer of rotor: EU, EP2799831[P]. 2015-03-17.
- [19] 韩璞. 现代工程控制论[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.  
HAN Pu. Modern engineering cybernetics[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.
- [20] 高金吉. 人工自愈与机器的自愈调控系统[J]. 机械工程学报, 2018, 54(8): 83-94.  
GAO Jinji. Artificial self-recovery and machinery self-recovery regulation system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 5(8): 83-894.
- [21] 高金吉, 王维民, 江志农. 高速透平机械轴位移故障自愈调控系统研究[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(11): 1261-1264.



- GAO Jinji, WANG Weimin, JIANG Zhinong. Research on the axial displacement fault self-recovery and control of a high speed turbo-machine[J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24(11): 1261-1264.
- [22] 王维民. 离心压缩机轴位移故障自愈调控及密封改进增效技术研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2006.
- WANG Weimin. Study on centrifugal compressor's rotor axial displacement fault self-recovering regulation and rotating sealling improvement for better efficiency[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2006.
- [23] 王维民, 高金吉, 李双喜. 离心压缩机轴向力调控与平衡盘密封改进研究[J]. 流体机械, 2006, 34(7): 15-18, 23.
- WANG Weimin, GAO Jinji, LI Shuangxi. Thrust load adjustment and seal improvement of centrifugal compressor[J]. Fluid Machinery, 2006, 34(7): 15-18, 23.
- [24] 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[J]. 北京化工大学学报, 2009, 36(5): 92-96.
- 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[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2009, 36(5): 92-96.
- [25] YAO Jianfei, GAO Jinji, WANG Weimin. Multi-frequency rotor vibration suppressing through self-optimizing control of electromagnetic force[J]. Journal of Vibration & Control, 2017, 23(5): 701-715.
- [26] 姚剑飞, 高金吉, 王维民. 电磁力参数自寻优的转子多频振动主动抑制[J]. 振动与冲击, 2015, 34(18): 45-50.
- YAO Jianfei, GAO Jinji, WANG Weimin. Active suppression of multi-frequency vibration of rotor-bearing system through self-optimizing control[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(18): 45-50.
- [27] 王维民, 齐鹏逸, 李启行, 等. 离心式压缩机转子系统稳定性控制方法研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(6): 102-106.
- WANG Weimin, QI Pengyi, LI Qihang, et al. Instability control strategy for rotor-bearing system in centrifugal compressor[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(6): 102-106.
- [28] 李启行, 王维民, 齐鹏逸, 等. 转子轴承系统稳定性分析与识别方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(7): 54-59.
- LI Qihang, WANG Weimin, QI Pengyi, et al. Stability analysis and identification method for rotor-bearings system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(7): 54-59.
- [29] PAN Xin, WU Haiqi, GAO Jinji, et al. New liquid transfer active balancing system using compressed air for grinding machine[J]. Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the ASME, 2015, 137(1): 011014.
- [30] PAN Xin, WU Haiqi, GAO Jinji, et al. Study on online active balancing system of rotating machinery and target control method[J]. WSEAS Transactions on Systems, 2014, 13(29): 302-311.
- [31] 潘鑫, 吴海琦, 高金吉. 旋转机械气液体式不平衡故障靶向自愈调控系统[J]. 机械工程学报, 2015, 51(1): 146-152.
- PAN Xin, WU Haiqi, GAO Jinji. Rotating machinery targeting self-recovery regulation system for imbalance vibration fault with liquid-transfer active balancing device[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(1): 146-152.
- [32] 李双喜. 动静压混合自愈调控气膜端面密封原理及关键技术[D]. 北京: 北京化工大学, 2011.
- LI Shuangxi. principle and key technology of self-healing regulating-controlling hydrodynamic-hydrostatic gas film seal[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2011.
- [33] 李双喜, 蔡纪宁, 张秋翔. 外加压式动静压气膜端面密封装置: 中国, 201010119546.0[P]. 2010-03-05.
- LI Shuangxi, CAI Jining, ZHANG Qiuxiang. Outside pressurized type dynamic and static pressure gas lubricating and sealing device: China, 201010119546.0 [P]. 2010-03-05.
- [34] 何立东. 转子在线自动平衡及其工程应用研究的进展[J]. 力学进展, 2006, 36(4): 553-563.
- HE Lidong. Advanced of the rotor on-line active balancing technology and its engineering applications[J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(4): 553-563.
- [35] 沈伟, 何立东, 高金吉. 主动平衡技术在带尾透的离心压缩机上的应用研究[J]. 热能动力工程, 2005, 20(2): 174-177.
- SHEN Wei, HE Lidong, GAO Jinji. Applied research of automatic balance technology for centrifugal compressors fitted with a tail[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy, 2005, 20(2): 174-177.
- [36] 沈伟, 何立东, 高金吉. 应用电磁式主动平衡装置解决烟气轮机转子的振动问题[J]. 动力工程, 2006, 26(3): 337-341.

- SHEN Wei, HE Lidong, GAO Jinji. Dealing with vibration problems of a fume turbine's rotor by using an electromagnetic active balancing device[J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(3): 337-341.
- [37] 刘锦南. 电磁式自动平衡系统的实验研究及其在超重力机中的应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2006.
- LIU Jinnan. The experiments and applications in higee of electromagnetic auto-balancing systems[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2006.
- [38] 高金吉. 航空发动机振动故障监控智能化[J]. 测控技术, 2019, 38: 1-4.
- GAO Jinji. Intelligent monitoring of aero-engine vibration failure[J]. Measurement and Control Technology, 2019, 38: 1-4.
- [39] 中国科学院先进制造领域战略研究所. 中国至 2050 年先进制造科技发展路线图[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- Institute for Strategic Research in Advanced Manufacturing, Chinese Academy of Sciences. Advanced manufacturing technology in China: A roadmap to 2050[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- 
- 作者简介: 高金吉, 男, 1942 年出生, 教授, 博士研究生导师, 中国工程院院士, 设备诊断工程专家。主要研究方向为设备故障诊断与自愈工程。
- E-mail: gaojinji@263.net