

装备系统故障自愈原理研究

高金吉

(北京化工大学 诊断与自愈工程研究中心 北京 100029)

[摘要] 装备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”? 在系统科学的指导下, 移植现代医学“自主调理”治疗原理, 包括免疫、防御、代偿、自修复和适应等, 可以用来指导研究装备自愈原理及工程应用; 重点研究了以故障预防和消除为目标的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科学依据。

[关键词] 装备系统; 故障自愈原理; 故障自愈调控; 诊断; 主动控制

[中图分类号] TB114; TB21 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)05-0043-06

1 故障自愈——来自工程实践的重大课题

现代装备日趋大型化、高速化、自动化和智能化, 特别是广泛应用于石化、冶金、电力、有色冶金等流程工业的高速透平机械、工业泵、风机、压缩机、离心机等重大装备与生产过程紧密相连, 形成大系统。这类系统一旦发生故障可能导致重大事故, 并造成巨大经济损失。从上世纪60年代开始, 国际工程科技界开发了设备监测诊断技术, 在工业企业逐步推行预知维修和智能维修, 并广泛采用紧急停车连锁系统, 这为确保安全生产发挥了重要作用, 取得了实效。但是, 故障停机检修也会造成巨大的经济损失, 启停机过程中也可能产生新的安全隐患。

笔者提倡开发一种新的与装备故障作斗争的理论和办法, 旨在改变仅靠紧急停车保护机器和完全靠人来检修消除故障的传统方法。这种理论与方法又有别于设备诊断与预知维修技术, 是研究使装备系统具备故障自愈功能, 在运行中“自行”消除故障, 而不完全是停机由人来排除故障。

工程实践表明, 除了少数突发故障以外, 大多

数故障发生是有一个渐进过程的, 如果早期发现, 及时采取恰当的措施是完全可以防止的。造成这一问题的主要原因在于: 在观念上没有“防微杜渐”的超前意识, 从装备的设计制造到运行操作都没重视故障发生的渐进过程, 因而错过了调控的大好时机, 导致设备故障的发生; 另一个重要原因是装备尚没实现监控一体化, 且智能化程度不够。

故障自愈原理研究和应用技术开发是十分必要的, 其理由如下:

1) 装备发生故障靠连锁停机或是人为停机解体检修来排除故障, 不但减少了生产时间, 增加了检修费用, 而且容易在开停机过程中发生新的故障乃至事故。故障自愈是提高装备可靠度, 确保其安全长周期运行, 从而降低生产成本的有效途径。

2) 现代装备越来越自动化、智能化, 独立完成特定任务的功能越来越强, 对人的依赖性越来越小, 有的根本不可能由人去维修。如美国发射的“勇气”号和“机遇”号火星车, 在太空飞行半年之久, 一旦有了故障靠人去诊断和维修是根本不可能的。

3) 设计制造的装备一般总是能在既定条件下有序稳定运行, 但实际运行可能偏离设计条件而使

[收稿日期] 2004-09-15

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50375014); 教育部科学技术研究重点项目(重点03024)

[作者简介] 高金吉(1942-), 男, 辽宁本溪人, 中国工程院院士, 北京化工大学教授, 博士生导师

装备产生故障乃至缺陷。检修只能在停机时消除已发现的缺陷，而故障自愈调控可以实时调控确保装备在设计的条件下运行，并及时消除装备在运行中新产生的并随机变化的缺陷，实时地抑制和消除故障苗头，防患于未然。

4) 在故障自愈原理指导下，可以将与故障作斗争提前到设计阶段，应用嵌入式技术和智能材料开发监控一体化的装备，可使设备诊断技术与主动控制技术密切结合，研制具有故障自愈功能的新一代装备。

2 故障自愈是工程科学发展的必然^[1~5]

如图1所示，从人类的疾病史和治疗史的角度来看，人的疾病已有300万年历史，而真正意义上的医疗活动不过万年左右，这说明人类历史有99%以上的时间是“缺医少药”的，而人类并没有被疾病征服和消灭，靠的就是生命的自组织机制，是机体对内外环境复杂作用地防御、调节、适应的机制和能力，是机体对自身所发生的异常（病变）自主地调节、恢复到正常值并保持稳定的机制和能力。不难看出，人与疾病作斗争的历史是在漫长的完全依靠“自愈”之后，逐步产生“治愈”的，形成至今两种方式并存的局面。

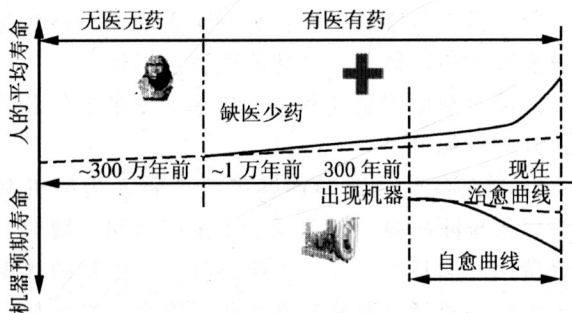


图1 人与机器自愈与治愈发展的历史

Fig.1 Phylogeny of self-recovering and healing about human and machines

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。和人与疾病作斗争的方式相反，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。

中国古代思想家老子讲“道法自然”，就是说世间一切事物必然遵循客观规律。在人与故障和与疾病作斗争的过程中能否遵循共同的规律，能否在治愈的基础上创造和发展装备故障自愈功能，这是

在理论上值得探讨的重要课题。

按照耗散结构理论，宇宙中的各种系统，不论是有生命的和无生命的，实际上无一不是与周围环境有着相互依存和相互作用的开放系统。因而，运行的装备和人一样，都是开放系统，两者并无严格界限。运行中的“活机器”不是远离而是靠近乃至符合耗散结构的三个基本条件：其一，机器是开放系统；其二，机器在运行时，不是简单的热力学平衡系统，而是与外界有物质、能量和信息交换的动态的有序稳定系统，与外界的交换并不能使机器瓦解；其三，机器存在非线性的相互作用。

在生命过程中，离开自身及其环节上的各种控制便没有生命。广义地说，世间各种事件的因果关系都是控制。就是说，追求和保持那些合目的的状态，避免和消除那些不合目的的状态，这个过程就是实施控制。显然，机器无故障运行和人健康地活着一样，都应该是控制的目标之一。众所周知，工程控制论（Cybernetics）是工程中产生和发展起来的，它的一些理论和规律同样也适用于生物。这说明人工装备和有生命的人可能遵循某些共同的规律。这就为移植和借鉴现代医学与疾病作斗争的理论和方法，开展与装备故障作斗争的理论和方法的研究提供了科学依据。

医学上认为“自主调理是治疗学的第一原理”，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、自修复和适应等。这些都可以用来指导研究装备自愈调控原理，研制出装备的自愈系统。该系统可在装备运行中测试分析可能产生故障的条件及早期故障征兆，采用诊断预测、智能决策和主动控制方法使装备系统不具备产生故障的条件或自行将故障消除在萌芽中。现代医学已经向修理机器学习，更换人的心脏、肾等零部件了，工程上也应借鉴移植现代医学的“自主调理”治疗原理，以故障预防和消除为目标，研究重大装备复杂系统自主调控原理及其在工程上的应用，实现故障在装备运行中的“自愈”。

3 故障自愈技术的现状和未来^[6~14]

近年来，装备的故障自愈技术在国内外已有应用或正在开发中，列举如下：

高速离心压缩机、透平机、航空发动机转子和

高速精密磨床、加工中心主轴的自动平衡 (autobalancer) 技术;

机器的关键部件损坏可在运行中自修复, 如在柱塞泵的润滑油中注入润滑-修复剂, 在运行中修复已磨损的轴承或摩擦副等;

离心压缩机的防喘振控制系统;

集散控制系统 (DCS) 的热后备智能切换系统;

基于自愈机制的军事卫星通信系统。

迄今为止, 对故障自愈技术的应用研究还处于起步阶段, 往往仍局限于某一个专业技术的范围内, 如主动平衡系统和自修复技术主要是机械工程技术, 防喘振系统是属于工艺上的控制与调节, 集散控制系统的热后备智能切换属于过程的测控系统, 而基于自愈机制的军事卫星通信系统完全属于信息技术。综合相关交叉学科和不同专业技术集成的自愈技术还没有形成。特别是有关故障自愈的科学理论研究在国内外学术界还没有引起重视。因而, 应用故障自愈原理在研究和设计阶段就指导新一代装备的研制还远没有开始。

在系统论的指导下, 打破传统的专业壁垒, 借鉴和移植现代医学“自主调理”治疗原理, 应用现代非线性动力学等理论, 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、嵌入式计算机技术等, 研究以故障预防和消除为目标的装备自主调控和自修复技术, 使装备具备故障自愈功能, 完全有可能大幅度减少故障停机。

重大装备系统故障自愈是预防故障和减免维修的减灾增效工程, 是用信息技术改造传统制造业和促进信息行业大发展的必然趋势, 是涉及到多学科交叉的前沿技术和涉及到多专业、多部门的系统工程。至今国内外还没有大力倡导、开发和推广, 因而应用范围还很小, 成效还不显著。因此, 有必要调研国内外装备故障自愈技术开发及应用现状和发展趋势, 研究故障自愈的理论和关键技术, 为提高我国技术装备安全保障和经济运行水平提供科学依据。

4 故障自愈原理研究的主要内容

4.1 故障自愈原理^[1,6,9]

医学上认为“自主调理是治疗学的第一原理”, 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、修复和适应等。这些“自愈能力”在工程科技领域已经并将得到越来越广泛的应用, 如图 2 所示。笔者借鉴医学的自愈原理重点研究在现代装备中建立故障自愈机制的理论和办法。首先要研究装备与有生命的机体的异同以及与故障作斗争和与疾病作斗争遵循的共同规律。

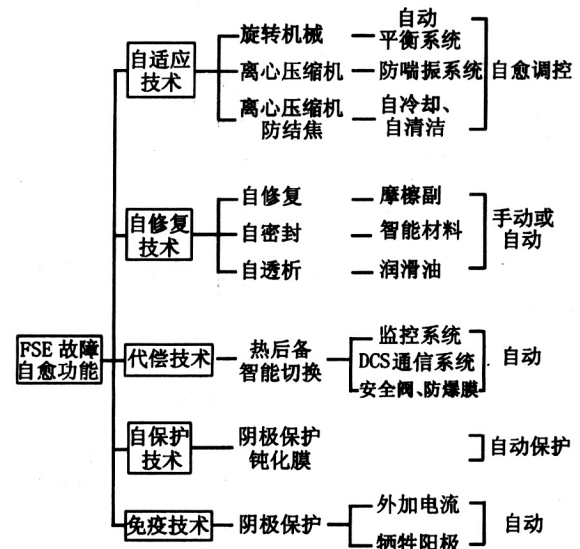


图 2 装备故障自愈工程研究的主要领域

Fig.2 The main domain of equipment self-recovering investigation

装备和有生命的机体一样, 实际上是由许多相互联系、相互作用的各个要素组成的复杂系统, 它同时也是以一定的组织性 (有序性)、多样性 (复杂性) 处于一定的稳定状态, 并通过各系统之间的相互联系和相互作用, 实现生命过程的调节, 保持机体的有序稳定状态。一旦机体出现故障 (病态), 那么这时一定是机体中某一局部系统 (子系统) 偏离其稳定状态, 表明它的有序性、组织性、复杂性与多样性发生某种程度的变化。故障自愈原理的研究就是要建立一种机制, 确保装备在运行中具有预防和自动消除故障的能力。

4.2 装备系统故障产生和发展的规律

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。夫病已成而后药, 乱已成而后治之, 譬犹渴而穿井, 斗而铸锥, 不亦晚乎!” 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。这种见微知著, 防微杜渐

的功夫,至今对人类与故障作斗争仍有着指导意义。

医学研究病理的深层规律并提出“系统的整体性原理”和“系统的联系性”原理,认为“相互作用是疾病的真正终极原因”,可以借鉴这些原理和方法去研究装备部件、整机及其与输入输出相互作用的关系,在多因多果的复杂关系中,找出故障原因与征兆的因果对应关系,攻克当前故障机理、故障诊断和预测方法研究中的技术难关。

4.2.1 研究故障产生的条件,预测可能产生故障时的工况和状态 把装备看作多层次、非线性的复杂整体进行研究,建立多维、多参数、非线性复杂系统模型。深入研究系统内部各组成部分的动力特性、系统与环境以及与输入和输出物质、能量之间的相互作用、相互依赖关系。通过对监测信息的分析,研究系统从稳定的有序状态变成无序状态的过程、特点和规律,研究工艺、设备、仪表自控、电气等复杂系统,找出故障形成过程、发展和防治规律,特别是产生故障萌芽时的条件和特征。

预测。不仅预测已发生故障的发展趋势,而且要预测可能产生故障时的条件(工况和状态)。通过对诸多故障征兆信息的信号处理,分析提取特征参数以及计算输入、输出系统物流、能量的协调性及其有害能量的转化和输出物质特性的变化异常,计算分析装备系统状态和工况参数之间的非线性关系,探测分析产生故障的原因,特别是故障萌芽时的条件和特征,研究预测可能故障产生时的工况和状态的方法。

4.2.2 故障初始原因的早期探测和诊断 除了极少数突发故障以外,绝大多数故障的产生是有一个过程的,是渐进的。信息技术的进步,为探测故障早期征兆提供了可能。

诊断。不仅研究信息,而且研究关系。要研究复杂系统及其与输入输出物质和能量的相互作用。通过对监测信息的分析,打破工艺、设备、仪表自控、电气等专业壁垒,研究其相互作用、相互影响,找出故障形成过程、发展和防治规律。据此分析故障的因果链,研究机电仪和工艺复杂系统,从多因多果的因果链中找出产生故障征兆的最初始原因。

4.3 基于参数监测的故障自愈决策系统研究

对具体对象,理论上可以通过相关方法建立起系统参数与系统各种可能响应模式之间的关系。若

某种响应模式是故障或非期望模式,则与其对应的参数区域可视为故障参数域;若某种响应模式是期望的或可容忍的,则与其对应的参数区域可视为正常参数域。显然系统的参数应设计在正常参数域内,并且在此类区域内参数一定范围的变化是容许的。在运行工程中,如果各种环境因素导致系统参数发生了改变,但这种改变后的参数接近故障参数区域边界时,就需要采取自愈的步骤——调整系统的参数。改变哪个参数,改变量要多大,选用何种工程可用的方式改变参数,都需要决策系统提前做好预案。

4.4 故障自愈机制建模研究^[7~14]

装备系统都是复杂系统,正常运行情况下是处于有序稳定状态。建模是人客观存在的结构系统的相互关系和相互作用认识的数学描述。信息是可以表征结构系统的变化和其输入、输出及其相互作用的,当装备系统自身内部子系统间和其与输入输出的物质、能量、环境的关系和相互作用发生异常,即开始偏离有序稳定状态产生故障时,探测和处理的信息即故障征兆可以实时表征出来,据此可以进行诊断和预测。

把装备看作多层次,非线性的复杂整体进行研究,可考虑用大系统的建模方法,把系统分解成若干子系统,然后再找出子系统之间以及子系统与整体系统之间的关联。

建立的模型是非常复杂的,可能是非线性,多维性,混杂性,随机性的混合体。也可能难以确定精确的数学模型,控制的难度很大,传统的控制方法是难以实施的。多种控制方法可考虑协调进行(如非线性控制、混杂控制、分布参数控制、自适应控制、模糊控制等),智能化的新型分层协调控制策略的研制势在必行。系统的智能化程度越高,自愈调控的效果就可能越好。可以从如下几个方面进行故障自愈调控系统研究。

1) 研究系统刚度、阻尼和质量分布变化产生的机械振动故障的条件和原因;

2) 计算输入、输出系统能量的协调性及其有害能量的转化,探测分析故障产生的条件和原因;

3) 通过输出物质的量和特性的变化异常,研究故障产生的条件和原因。

所谓控制就是施控者选择适当的控制手段,作用于受控者,以期引起或达到受控者的行为状态发生合目的的变化。或者呈现有益的行为,或者抑制

并消除不利的行为。以故障的抑制和消除为目标的控制系统即故障自愈调控系统应具备检测、诊断、决策、中间转换和执行等环节几个环节。

故障自愈机制的建立可以实施以故障预防和消除的主动控制：

4.4.1 消除故障产生的后果或启动反作用，抑制故障的发展 对装备故障进行早期探测和诊断，通过智能决策，实时主动调控或适时采取技术对策如改变结构、注入介质等：**a.** 消除这一初始原因刚刚产生的后果；**b.** 启动一个反作用因果链，抵消故障的因果链的作用。从而可以将故障抑制在萌芽中，恢复和保持了系统结构的有序稳定。

4.4.2 消除故障的苗头，抑制故障的产生 除了极少数突发故障以外，绝大多数故障的产生是有一个过程的，是渐进的。信息技术的进步，为探测故障早期征兆提供了可能，据此分析故障的因果链，找出产生故障的初始原因，通过智能决策和主动控制消除这一初始原因，将故障消除在萌芽之中。

4.4.3 消除产生故障的条件，抑制故障的苗头 在装备运行中，通过对工况和状态的智能判别和调控或改变系统结构，避开或消除可能产生故障的条件，从而消除故障产生的土壤，抑制故障的发生。

在故障自愈建模研究过程中，要研究系统反应的速度性和正确性。所研究的系统是复杂的系统，那么系统的信息量也非常大，如何根据大量信息提取出有用的信息，及时做出正确的反应，对于系统的自愈调控的顺利实施至关重要。可考虑使用系统工程理论中的系统分析的方法，对系统信息进行筛选，分析，建立智能专家库，及时提供有用的控制方案供智能决策层选择。

5 装备系统故障自愈关键技术研究

故障自愈技术大体有如下几类：免疫技术、防御技术、代偿技术、自修复技术和自愈调控技术（如图 3 所示）。装备系统故障自愈调控（fault self-recovery regulation, FSR）技术的开发应用，是用信息技术改造传统装备制造业的必然趋势。

在装备复杂系统故障初始原因的早期探测诊断和故障产生条件预测的基础上，采取智能决策和主动调控方法或其他相应对策来预防和消除故障。研究自主调控方法对复杂系统内部及上层次更大系统多模型的关联和影响，以及如何确保过程装备自身系统和其所在的大系统均进入稳定的有序状态。

笔者拟以流程工业广泛应用的关键装备离心压缩机和离心机为对象，采用嵌入式技术和人工智能、主动控制等技术，开发监控一体化的自愈调控技术^[6,7,10]：

通过改变高速旋转流体机械平衡盘压差，实现转子轴向力主动调控，以减少轴位移停机和防止轴瓦烧损的技术；

烟气轮机主动平衡技术及离心机差速双转子主动平衡技术；

基于运行状态自动冲洗的离心机振动故障自愈技术；

高速涡轮机械转子轴系半速（或低频振动）失稳控制与自愈技术。

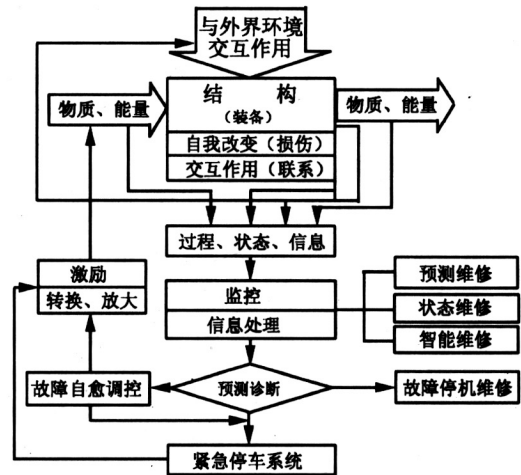


图 3 故障自愈调控系统 (FSR) 模式简图
Fig.3 Scheme of faults self-recovering and controlling

在流程工业广泛应用的紧急停车系统 (ESD) 之前增设故障自愈调控系统，可在确保安全的前提下大幅度减少自动连锁紧急停车，应用于上述重大装备，使其具备自愈功能，改变或减少靠人去治愈的传统维修方式。

6 结语

装备系统故障自愈原理研究不仅是工程实践的迫切需求，也是人类未来要建造什么样装备的重大课题。人类将会遵循与疾病作斗争的规律去和装备故障作斗争。人类的自愈能力，比如免疫、自保护、代偿、自修复（再生）以及自适应等，将会指导我们对装备故障自愈原理的研究。

以系统论为指导，研究故障发生的规律及其产

生的条件,在诊断故障的初始原因和预测可能故障产生时的工况和状态的基础上,打破传统的专业壁垒,在装备系统中引入以故障预防和消除为目标的自主调控机制,故障自愈调控是不同于传统的处理机械故障的新方法。

在流程工业广泛应用的ESD系统之前,增设FSR系统,可在确保安全前提下大幅度减少故障停机,降低维修费,取得巨大经济效益。

应用FSR原理,在设计阶段就统筹考虑装备的监控一体化。可使装备减小依赖人的程度,使维修的责任从装备的使用方转移到装备的设计制造方,研制出具有故障自愈调控功能的、免维修、少维修的新一代过程装备。

参考文献

- [1] 恩格尔. 需要新的医学模型:对生物医学的挑战[J]. 医学与哲学, 1980, (3): 88
- [2] 祝世讷. 中西医学差异与交融[M]. 北京:人民卫生出版社, 2001, 38~39
- [3] 钱学森. 建立系统学[M]. 太原:山西人民出版社, 2001
- [4] 沈禄庚. 系统科学概要[M]. 北京:北京广播学院出版社, 2000
- [5] 湛昱华, 沈小峰, 等编. 普利高津与耗散结构理论[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1998
- [6] 汪希萱, 顾超华. 旋转机械故障的在线消除[C]. 浙江大学化工机械研究所论文集
- [7] 徐滨士, 张伟, 刘世参, 等. 现代装备智能自修复技术[J]. 中国表面工程, 2004, 17(1): 1~4
- [8] Gao Jinji. A study of the fault self-recovering regulation for process equipment [A]. proceedings of IMS2003, Xi'an China, 2003
- [9] Shiyu Zhou, Jianjun Shi. Active balancing and vibration control of rotating machinery: a survey [J]. The Shock and Vibration Digest. 2001, 33(4): 361~371
- [10] Wang Wilson Quansheng, Rotary machinery health condition monitoring, fault diagnosis and prognosis [D]. University of Waterloo (Canada), 2002
- [11] Yuen Kaveng. Model selection, identification and robust control for dynamical systems [D], California Institute of Technology, 2002
- [12] Chen Minghsien. Combining the active control of gear vibration with condition monitoring [D], University of Southampton (United Kingdom), 1999
- [13] Files Bradley Steven. Design of a biomimetic self-healing superalloy composite [D], Northwestern University, 1997
- [14] Gao Jinji, Jiang Zhinong. Research on fault self-recovery engineering [A], IMS2004 proceedings 2-c, Arles France, 2004

Research on the Fault Self-recovery Principle of Equipment System

Gao Jinji

(Diagnosis & Self-recovery Research Center, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

[Abstract] Can mechanical faults be controlled and eliminated at machine's run-time? Can a machine heal itself, as a living person or animal? What can be done before shutting down and overhauling a machine? Under the guidance of the systemics theory, borrowing the idea of "self-recuperation" therapeutic methodology in modern medicinal science, e. g., the knowledge about the mechanisms of immunity, protection, compensation, regeneration, adaptation, etc., with the fault prevention and self-healing as the goal, this paper focuses on the study of the fault self-recovery principle and its engineering application, i. e. Fault Self-recovery Engineering (FSE), which can provide theoretical basis in developing a new generation of self-healing machine.

[Key words] equipment system; principle of fault self-recovery; fault self-recovery regulation; diagnosis; active control