

# 可重复使用液体火箭发动机 智能减损控制技术

吴建军, 魏鹏飞

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙, 410073)

**摘 要:** 液体火箭发动机减损控制技术是一门横跨控制理论与技术、材料科学、液体火箭发动机技术等领域的新兴交叉技术, 是工程上实现液体火箭发动机健康监控系统故障控制功能的核心技术之一。文中主要评述了可重复使用液体火箭发动机智能减损控制技术研究进展, 分析了减损控制技术与导弹延寿技术之间的区别, 指明了存在的主要技术问题和今后的发展趋势。

**关键词:** 液体推进剂火箭发动机; 系统动力学; 智能控制; 减损控制

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2005)04-0008-07

## Intelligent damage-mitigating control techniques for reusable liquid-propellant rocket engines

Wu Jianjun, Wei Pengfei

(School of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense  
Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Intelligent Damage-Mitigating (DM) control for Reusable Liquid-propellant Rocket Engines (RLRE) is an emerging and interdisciplinary technology, which is one of core technologies to realize fault control function in practical operation for health-monitoring system of RLRE. This paper presented a survey on the techniques of intelligent Damage-Mitigating control for Reusable Liquid-propellant Rocket Engines. Firstly, the development of some key technologies including system modeling and analysis, damage modeling and estimation, and techniques on design and realization of the DM controller and control algorithms were analysed in details. Then, the difference between the Damage-Mitigating control for RLRE and life-extending for missiles and weapon equipment is discussed. The main technology problems and trend were also indicated.

**Key words:** reusable liquid-propellant rocket engine; system dynamics; intelligent control; damage-mitigating control

收稿日期: 2005-4-30; 修回日期: 2005-6-28。

作者简介: 吴建军 (1967—), 男, 博士, 教授, 研究领域为火箭发动机技术。

## 1 引言

随着人类航天活动的日益增加和对宇宙空间不断深入的科学探索,对航天器及其推进系统的高性能、高可靠性与安全性以及低费用等要求日益增长。从人类发明和使用运载火箭以来,其推进系统沿着从简单到复杂、从一次性使用到可重复使用的发展方向在不断前进。在可以预见的本世纪前几十年中,可重复使用天地往返运载器(RLV, Reusable Launch Vehicles),特别是完全可重复使用单级入轨(SSTO, Single Stage to Orbit)运载器将是航天运输技术的主要发展方向之一。目前,世界各航天大国都在积极地进行可重复使用单级入轨运载器的方案论证与关键技术攻关。美国在这方面投入了大量的人力、物力和财力,近十年来做了大量卓有成效的研究工作,尽管X-33计划在2001年3月已经中止,但是该计划取得了十分丰硕的研究成果,攻克了大量关键技术,为RLV的成功研制奠定了雄厚的技术基础。我国有关技术领域对发展未来可重复使用天地往返运输系统技术也进行了广泛的论证,指明了先进火箭推进技术发展方向以及主要关键技术。

二十世纪七十年代研制成功的航天飞机主发动机(SSME, Space Shuttle Main Engine),作为当今最先进的航天推进系统之一,其最初的设计目标是进行55次飞行而不需要进行大的维修,但是使用的实际情况是每飞行一次,都要进行全系统大的维护,甚至需要更换某些关键部件(如涡轮泵系统的主要零部件),这样不仅增加了航天飞机的运行成本,而且延长了发射周期。为了提高SSME的可靠性、安全性、可操作性以及延长寿命和降低成本,近年来围绕着航天飞机的升级换代开展了为数众多的技术专题研究,其中以健康监控技术最为突出。

液体火箭发动机健康监控包括故障检测、故障诊断和故障控制等方面,主要目的是通过健康监控系统对发动机可能的运行故障进行检测、隔离、识别、定位与评估以及故障与容错控制,以保证发动机与运输系统的安全性,并将故障引起的损失降到最低程度。为了实现健康监控的目的,通常采取的控制技术包括故障报警、紧急关机、

启动冗余备份和系统重构等措施。传统上,这些措施可归结为以故障诊断为核心的容错控制策略。容错控制一般以启动冗余备份和系统重构技术来实现。由于航天系统本身的复杂性和特殊性,对于液体火箭发动机采用启动冗余备份和系统重构等控制措施基本上是不可行的。事实上,对于航天飞机和RLV的主动力系统——大型液体火箭发动机而言,既没有冗余备份,也基本不可能进行发动机系统重构。因此,近十年围绕着液体火箭发动机健康监控系统的控制措施,一种称为减损与延寿控制(Damage-Mitigating and Life-Extending Control)技术引起了人们的广泛重视。

可重复使用液体火箭发动机减损控制的基本概念是由Lorenzo与Merrill于1991年首先提出<sup>[1]</sup>。减损控制(Damage-Mitigating Control),又称为延寿控制(LEC, Life-Extending Control),这里所讲的延寿的基本含义是通过减少系统中关键部件上的损伤来延长系统的工作寿命。所谓减损控制(或延寿控制,本文统一称之为减损控制),就是在允许的范围内,在不影响系统完成任务的前提下,通过适当降低系统性能来较为明显地减少或抑制系统中关键部件损伤的发展,从而较大地延长系统工作寿命的一种控制策略<sup>[1,2]</sup>。其关键在于对系统性能与关键部件损伤做出适当权衡(系统性能与关键部件损伤之间的权衡是基于最优化思想进行的),达到既完成任务又延长系统工作寿命的目的,并以此来实现增强系统的可靠性、可用性、可维护性和部件耐用性的要求。更重要的是,通过减损控制,可以使系统避免发生灾难性事故,从而最终完成任务目标。对可重复使用液体火箭发动机而言,是通过所设计的减损控制器对发动机实施减损控制措施的。减损控制器不仅可以作为可重复使用液体火箭发动机综合控制(如健康监控系统)的一个有机组成部分,也可以单独应用于可重复使用液体火箭发动机系统并对其实施控制。减损控制器可以通过结合发动机系统中关键部件损伤传感器信号与发动机系统性能来综合减损控制律,或者在系统动力学模型的基础上,结合系统中关键部件的结构动力学模型及其损伤信息来仿真计算该部件的损伤,并将其作为减损控制律综合时的重要信息对系统的输入进行控制。

减损控制技术最初是针对 SSME 进行研究的, 其对未来可重复使用液体火箭发动机系统具有深远的影响, 不仅通过改变发动机的工作状态(可能会稍微损失一点系统性能)可以达到增强系统的可靠性、可用性、可维护性和部件耐用性的目的, 而且也可以通过延长发动机的工作寿命而降低其成本。目前, 在液体火箭推进系统所应用的控制技术水平远远落后于控制理论与技术本身发展的步伐, 尤其是在当前一次性使用液体火箭发动机中采用的仅仅是程序控制策略, 即发动机一旦开始工作, 就不能再对其采取控制措施, 唯一可做的就是当发动机系统发生严重故障时执行紧急关机或发出自毁指令。为了改进一次性使用液体火箭发动机的控制技术, 无论是针对型号研制、地面试车还是飞行过程, 进行减损控制研究都具有十分重要的工程实用价值。就完全可重复使用推进系统而言, 为了提高发动机系统可靠性、可用性、可维护性以及增强部件耐用性等, 如何减损、估计和延长其寿命是一个必须解决的关键技术问题。

## 2 减损控制技术研究进展

减损控制技术自提出以来的近十多年, 在相关研究机构的大力资助下, 针对不同的应用系统对象已经开展了较多的预先研究工作。其中, 美国宾州州立大学机械工程系 Asok Ray 教授领导的研究小组作为此项技术研究的开创者, 他们的主要研究课题包括美国国家科学基金(NSF, National Science Foundation)资助的项目“基于性能和寿命优化的机械系统智能控制”和“预测、维护与延寿控制一体化研究”, NASA Lewis 研究中心资助的项目“航天系统的延寿控制”、“可重复使用液体火箭发动机的减损控制研究”和“机械系统的减损控制研究”等, NASA Glenn 研究中心资助的项目“延寿控制”和“智能延寿控制”等, 美国国家能源部资助的项目“应用于气体涡轮先进材料的寿命预估”以及美国国家电能研究所资助的“基于延长寿命和提高性能的动力系统智能控制”等。国内目前除国防科技大学航天与材料工程学院完成航天科技集团公司第六研究院第十一研究所两项委托项目“液体火箭发动机寿

命预估与延寿控制概念研究”与“液氧/煤油发动机延寿控制技术研究”、承担一项国家自然科学基金项目“可重复使用液体火箭发动机智能减损与延寿控制技术研究”外, 在航天领域尚无其他研究机构及科研人员开展该项技术的研究工作。纵观这些研究项目, 可以发现减损控制技术已经在液体火箭发动机、航空发动机、火力发电站等大型机械动力系统中展开了应用研究, 其中液体火箭发动机是主要的研究对象。

迄今为止, 减损控制的研究方法基本上是基于仿真的论证性研究, 其一般过程是首先建立研究对象的系统动力学模型, 通过仿真计算, 模拟其工作过程, 然后将系统模型的输出变量作为分析计算所选关键部件应力分布的输入变量, 求得其应力危险点及其应力-时间关系, 为计算部件结构材料损伤提供输入参数。最后将系统动力学模型的输出变量与关键部件损伤变量作为综合分析减损控制律的输入参数, 通过最优化方法形成减损控制律, 为设计减损控制器提供依据。显而易见, 减损控制技术具有明显的模块化特点, 因此可将研究过程划分为如下四个模块: 系统动力学模型、关键部件结构模型、关键部件结构材料损伤模型、减损控制律的综合分析与减损控制器的设计。下面就按这四个模块来分析液体火箭发动机减损控制技术的研究进展。

### 2.1 发动机系统动力学模型研究

研究可重复使用液体火箭发动机减损控制技术, 对发动机建立有效的系统动力学模型是重要的基础工作。在建立系统动力学模型时, 可根据研究目的选取适当的状态变量(能够表征系统动态特征和系统中关键部件的动态特征的物理量), 而输入、输出变量应分别遵循便于控制、便于观测且与系统性能、结构动力学特性以及材料损伤特性联系紧密的原则来选取, 一般以非线性微分方程形式的数学模型作为系统动力学的描述。由于可重复使用液体火箭发动机(如 SSME)的工作范围大, 工况复杂(包括起动、转工况、主级运行和关机等过程), 多次循环使用, 工作过程形式多样(其中包括涡轮泵组件的高速机械旋转运动、预燃室和燃烧室中高温高压燃烧过程等)的特点, 因此对其进行系统特性分析、建模以及

系统仿真的难度较大。Asok Ray、Dai Xiaowen 等以 SSME 为对象进行减损控制研究时建立了一种 SSME 简化系统的数学模型(具有 20 个状态变量、2 个控制输入和 2 个可测量的输出变量),并应用 Hankel 模型降阶方法对其进行了降阶处理<sup>[3]</sup>,使该模型在减损控制的计算效率上较高一些。但是这一模型较为简单,它所考虑的工况单一(转工况)、工作范围较小(燃烧室压力从 14.48MPa 调节到 20.68MPa 的一个瞬态工作过程),针对可重复使用液体火箭发动机(具体以 SSME 为对象)所开展的减损控制研究大多引用了上述发动机系统动力学模型。此外,Asok Ray、Min-Kuang Wu 也建立了一种更为简单的 SSME 的简化模型<sup>[4]</sup>,此模型具有 18 个状态变量、2 个控制输入和 2 个可测量的输出变量,而发动机的燃烧室压力从 18.60MPa 调节到 20.68MPa 的一个瞬态工作过程。这些模型很难满足进一步深入开展发动机整个工作过程的减损控制研究的要求。此外,在 SSME 的实时仿真和故障检测等研究方面所建立的一些较为全面的数学模型,对于减损控制来说,显得过于复杂而不适用。因此,研究可重复使用液体火箭发动机减损控制技术中的系统动力学问题,建立既能够准确表征发动机系统在大范围变推力工作过程、多工况转换与瞬变过程中的动态特性,又具有计算量小和实时性好,且满足在线控制应用的动力学模型就是一个十分关键的问题。

## 2.2 关键部件结构模型研究

分析可重复使用液体火箭发动机系统中关键部件的结构动力学特性及其动力学模型的求解技术是进行减损控制技术研究的又一重要基础工作。关键部件的结构模型是联结系统性能和结构材料损伤特性的纽带。Asok Ray、Min-Kuang Wu 等建立了 SSME 涡轮泵组件中涡轮叶片的悬臂梁模型,并用有限元方法进行分析,求得导致叶片损伤的应力<sup>[4]</sup>。研究中仅考虑了两个单元,而且对涡轮叶片所作的近似形状模拟也不很恰当。由于涡轮叶片的形状是不规则的而且又处于高温高压下高速旋转,因此其所受的载荷除了气/液体的机械加载作用外,高温所导致的热应力以及高速旋转下动、静叶片之间的相互影响作用和叶片/轮盘之间的耦合振动等都是造成该部件发生损伤的

因素。此外,对于上述悬臂梁模型的结构动力学求解问题通常也比较复杂而且相当耗时,他们应用解耦结构动力学方程的方法来求解,提高了数值效率。Asok Ray、Dai Xiaowen 建立了 SSME 主推力室冷却夹套隔片的夹芯梁结构模型<sup>[3]</sup>,在该模型中考虑了几何变形与时间历程效应,所应用的夹芯梁模型比有限元模型的计算效率高,主要是通过控制方程中相应于空间变量的偏导数与相应于时间变量的偏导数相互独立来实现的。而一般用于结构动力学微分方程解耦的方法有特征值法、逆迭代法、行列式搜索法和子空间迭代法等,这些方法虽然能够简化耦合的微分方程并实现较高的数值效率,但是也很难满足减损控制技术进一步向实时在线应用发展的要求。因此在研究中,综合考虑发动机关键部件各种载荷的作用,通过建立恰当的结构动力学模型,采用高效的模型求解技术,使减损控制更可能接近于实时在线应用的层次是一个很关键的问题。

## 2.3 结构材料损伤模型研究

发动机各关键部件损伤特性的分析与建模是减损控制研究中一个关键的环节。发生在关键部件上的损伤描述得恰当与否、度量得精确与否关系着减损控制的可用性。Asok Ray、Min-Kuang Wu 针对 SSME 的涡轮叶片应用连续时间形式的应变寿命法建立了疲劳损伤模型<sup>[4]</sup>,该方法的实质是考察常幅平均峰值应力对材料损伤的影响,突破了传统的基于循环应变寿命法只能离线计算损伤的局限,使损伤模型和系统动力学模型在时域上有机地结合起来,非常便于关键部件损伤的在线计算。Ravindra Patankar、Asok Ray 研究了变幅应力载荷对结构耐用性的影响<sup>[5]</sup>,在他们的研究中,利用疲劳裂纹的状态空间模型,考虑了影响裂纹开始应力的因素,分析了裂纹生长迟滞和序列加载对结构损伤的影响。Hui Zhang、Asok Ray 等提出利用过载冲击减少损伤的减损控制思想,其主要利用了短暂的过载冲击而导致裂纹生长迟滞的物理现象,从而提出以一定的最佳间隔向经受较大常幅应力作用的部件施加过载脉冲,通过产生裂纹生长迟滞现象达到减小部件损伤的目的。而 Asok Ray、Dai Xiaowen 建立了 SSME 主推力室冷却夹套隔片的粘塑性损伤模型<sup>[3]</sup>,主要考察冷却夹

套隔片的蠕变损伤。此外, Asok Ray、Sekhar Tangirala 等专门研究了材料损伤中有关疲劳裂纹特性的随机建模以及裂纹扩展等问题。由于可重复使用液体火箭发动机在其工作过程中, 需要经历多次起动、关机、转工况、主级等工作过程, 不仅使各关键部件处于高温、高压、易蚀、高速旋转的工作环境下, 并且经受大范围变工况的影响, 因此对各关键部件在不同工作条件下的损伤特性分析、损伤大小度量等都需要进行深入的研究。此外, 由于受到材料性能研究水平的限制, 使得当前使用的发动机很难摆脱如下两方面的问题: 其一是由于过分保守的设计而不能达到材料的可用性; 其二是在材料性能上的超调导致不希望故障的发生和可用寿命的过度减少。为了提高材料的性能和可用性, 结合可重复使用液体火箭发动机的工作条件, 对构成关键部件的材料进行试验研究, 获得在不同工况下材料损伤产生过程的信息, 以此来描述材料在不同工况下的损伤特性并建立损伤模型或许是一种较好的解决方法。同时利用试验中的数据, 统计分析由于材料在生产、加工过程中所留痕迹、缺陷等不可建模因素对损伤的随机影响, 进行损伤随机建模这一关键问题的研究也是今后应关注的一个方向。

#### 2.4 减损控制律综合分析与减损控制器设计研究

减损控制律综合分析与减损控制器设计是减损控制技术的核心。Asok Ray、Min-Kuang Wu 等提出用最小化二次型代价函数表示系统性能与关键部件损伤之间的权衡函数, 并利用非线性规划法求解该最优问题。Ravindra Patankar、Asok Ray 等研究了一组基于频率加权的、可满足不同的发动机系统性能与其关键部件损伤权衡的减损控制器设计方法<sup>[5]</sup>, 该方法可以避免诸多最优控制算法的计算复杂性。M. Holmes、Asok Ray 与 Hui Zhang 等研究了分层混合减损控制系统, 其思想是: 在底层环节中应用线性控制器跟踪系统动态性能, 而在顶层环节中通过监督控制器来协调减损控制器的控制行为。M. Holmes、Asok Ray 与 P. Kallappa 等还提出了基于先验知识的模糊减损控制算法的综合分析与减损控制器的设计<sup>[6]</sup>, 在减损控制技术中应用了智能计算方法, 使其具有了智能化的特点。Hui Zhang、Asok Ray 等应用自动机理论将连

续系统与离散事件系统有机结合进行减损控制律的综合分析<sup>[7]</sup>, 其思想是应用自动机在离散事件系统中进行监督控制, 实现调节关键部件损伤与系统性能及其稳定性之间权衡的目的。由减损控制中提出的系统性能与关键部件损伤权衡的思想可知, 减损控制律的综合分析是一个典型的多目标最优化问题, 可以应用极大值原理、非线性规划等传统优化方法求解, 以得到系统最优的开环控制律, 并以此作为闭环反馈控制器设计的参考信息。利用基于  $L_2$  范数、 $H_\infty$  优化和  $m$  综合等技术设计系统闭环减损控制器可以补偿干扰和建模不确定性等因素对系统的影响, 并且具有较好的鲁棒性和稳定性<sup>[6,7]</sup>。在减损控制律综合分析与减损控制器的设计过程中, 既用到了时域上的相关理论也用到了频域上的相关理论, 同时还涉及到了模糊逻辑和神经网络等智能技术。在今后开展的研究中, 除了借鉴上述减损控制律综合分析与减损控制器设计的成熟经验外, 如果利用近年来所发展的非数值最优化算法(如遗传与进化算法、人工蚁技术等)与智能控制技术(如模糊神经网络控制、分层递阶智能控制、学习控制等)进行智能减损控制律的综合分析与智能减损控制器的设计, 以期降低减损控制律综合分析时数值优化计算的复杂性, 藉此也可进行智能减损控制的探索性研究。同时, 根据可重复使用液体火箭发动机的工况变化以及不同的部件损伤特性, 利用离散事件动态系统理论以及人工智能、模糊逻辑和神经网络等智能技术, 研究基于监督控制的减损控制系统, 可用于管理、协调不同工况下不同损伤时减损控制器所应采取的控制行为。

#### 2.5 减损控制技术应用与其他系统的研究

减损控制技术不仅在液体火箭发动机中进行了较多的研究, 而且在其他机械系统中也开展了一些研究工作。譬如, M. Holmes、Asok Ray、P. Kallappa 等针对火力发电站系统进行了减损控制研究<sup>[5]</sup>。Hui Zhang、Asok Ray 等针对一种简单的实验室机械装置进行了减损控制研究; Sekhar Tangirala、Asok Ray 等针对燃气涡轮发动机进行了减损控制研究。近几年以来, Ten-huei Guo 等承担 NASA 关于航空发动机的减损控制研究项目, 开展智能减损控制的相关研究工作<sup>[8,9]</sup>, 文献[8]阐

述了航空发动机减损控制的概念,通过对 NASA 有关火箭发动机减损控制研究项目所作的简要介绍,分析了航空发动机减损控制研究所包含的主要内容,即寿命预报模块、发动机工作模型、部件的应力与热分析模块、控制方案与智能控制系统等;此外,也对 NASA 有关减损控制研究计划的近期、中期及远期目标作了简单介绍。文献[9]针对航空发动机的特点,分析了影响其寿命的主要因素,提出了满足 NASA 近期减损控制研究计划的可行方案,即通过修改发动机的控制逻辑以及重新设计控制硬件,调节发动机的工作状况,达到延长发动机工作寿命的目的,并研究了几种可行的控制方案,如智能加减速逻辑控制、主动间隙控制、模式因素控制等。

### 3 减损控制技术与导弹武器系统延寿技术的联系与区别

以固体火箭发动机为代表的战略导弹推进系统的延长使用寿命(在液体火箭发动机为推进系统的战略导弹与战斗机等武器系统中也存在如此问题)的研究工作已经开展了几十年,研究内容主要包括:分析影响发动机系统寿命的薄弱部件并研究更换该部件的可行性问题、建立先进的维修保养与管理体系、控制贮存环境等,研究的目的是为了延长导弹武器系统的服役期限,从而节省经费开支<sup>[10]</sup>。而本文所研究的液体火箭发动机减损控制技术着重于研究发动机系统在工作过程中关键部件的损伤如何减小的问题,下面分析此二者之间的联系与区别。

#### 3.1 两者之间的联系

无论是液体火箭发动机的减损控制技术,还是导弹武器系统的延寿技术,都是以延长系统的寿命从而提高系统的可靠性、安全性并降低成本为研究的最终目的。从实现的技术途径来看,此二者具有如下几个相似点:

- (1) 需要分析发动机系统中的关键部件,即系统中寿命最短的部件;
- (2) 研究影响这些关键部件材料降格的因素,建立材料损伤(或破坏)的动态模型,以仿真计算与试验分析相结合对模型进行验证;
- (3) 经过研究后,可为发动机的维修保养制度

提供参考。

#### 3.2 两者之间的区别

尽管这两项技术之间存在着某些共同点,但是它们之间存在着更多的差别,这是因为减损控制技术研究侧重点是对发动机的工作过程进行控制,在系统性能与关键部件损伤之间寻求某种程度的权衡,通过主动减小或抑制关键部件的损伤来延长发动机的工作寿命。而导弹武器系统延寿技术研究的侧重点是通过更换关键部件、控制贮存环境与建立维修保养管理体系等手段来延长发动机的贮存寿命即服役期限。此二者之间的区别如下:

(1) 减损控制技术研究的是如何延长发动机系统的工作寿命,而导弹武器系统延寿技术研究的是如何延长该系统的贮存寿命;

(2) 减损控制技术的核心在于对发动机系统的工作过程进行控制,是一种带有预测性质的主动措施,而延寿技术并不对研究对象进行控制,只是一种维修保养措施。

总之,减损控制技术与延寿技术作为研究如何延长对象系统寿命的技术,虽然具有不同的研究侧重点,采取的是不同的研究方法,但是如果将此二者综合,则可以作为未来可重复使用火箭发动机减小损伤、延长寿命的有效研究方法。

### 4 结束语

减损控制技术在某种意义上,集成了故障诊断和容错控制技术。其建立损伤模型的目的就是为了估计发生在关键部件上的损伤量。对于一个复杂的热力-机械-流体系统来说,其各部件是相互协调相互影响的,关键部件也有若干个,因此,减损控制系统中就包括对易损部件的识别和对损伤的度量。减损控制的目的就是在关键部件已发生损伤的基础上,在性能和损伤之间进行恰当的折中,采取一定的控制措施,使系统的工作寿命得以延长,使其最终完成目标任务,这一点和容错控制技术是非常相似的。减损控制技术在借鉴故障诊断和容错控制方面成熟技术的同时,其本身发展过程中所取得的成果和成熟经验也将为这两项技术的发展产生推动作用。

作为横跨控制理论与技术、材料科学、发动

机技术等领域的—门新兴技术，减损控制在近十年的发展过程中，虽然已迈出了概念论证研究这一步，并显示出较为诱人的发展前景，但是该技术本身的理论与方法还很不成熟，需要进行深入地研究。减损控制的基础是系统科学和材料科学，研究该技术将会涉及这两大学科中的许多领域。特别是系统分析与建模、结构动力学、控制理论与工程和材料学（尤其是材料的疲劳、蠕变、腐蚀以及它们的合成作用所引起的损伤力学分支）等。同时，计算机科学、人工智能、模糊逻辑、神经网络、仿生技术等相关领域的新思想和最新研究成果也会应用于减损控制技术研究之中，解决其中的一些关键技术和技术难点。

智能减损控制在理论上具有新颖性，在应用中具有综合性、集成性和交叉性。由于该技术是以减小系统中关键部件的损伤同时使系统性能尽可能不发生损失为目的，因此它不仅可以作为可重复使用液体火箭发动机控制系统（包括健康监控系统）的一个有机组成部分发挥作用，而且也可单独使用。除了可用于航天动力装置，减损控制技术也可以广泛应用于其它大型复杂热动力系统，如发电站、化工系统、飞机、汽车等，因为它们的可靠性、可用性、部件的耐用性和可维护性也是人们十分关心的问题。

#### 参考文献：

- [1] Lorenzo, C F, Walter C Merrill. Life-extending control[R]. NASA TM-104391, 1991.
- [2] Lorenzo, C F. et al. Life extending control for rocket engines[R]. NASA TM 105789, 1992.
- [3] Xiaowen Dai, Asok Ray . Damage-mitigating control of a reusable rocket engine: Part I—life prediction of the main thrust chamber wall[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1996, 118(9).
- [4] Lorenzo, C F, Michael S, Holmes, Asok Ray . Nonlinear control of a reusable rocket engine for life extending[C]. 1998 Proceedings of the American Control Conference .
- [5] Ravindra Patankar, Asok Ray. Damage mitigating controller design for structural durability[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1999, 7(5).
- [6] Kallappa P, Asok Ray. Fuzzy wide-range control of fossil power plants for life extending and robust performance[C]. 1999 Proceedings of the American Control Conference.
- [7] Hui Zhang, Asok Ray, et al. Hybrid damage-mitigating control of mechanical structures[C]. 1998 Proceedings of the American Control Conference.
- [8] Ten-huei Guo. A roadmap for aircraft engine life extending control[C]. 2001 Proceedings of the American Control Conference.
- [9] Matthew W . Wiseman , Ten-huei Guo . An investigation of life extending control techniques for gas turbine engines[C]. 2001 Proceedings of the American Control Conference.
- [10] 刘兵吉 . 战略导弹延寿问题评述[C] . 导弹管理与维修工程文集 , 1992 , ( 1 ) .

（编辑：侯 早）