



# 可重复使用液体火箭发动机 减损控制理论与方法

Damage-Mitigating Control  
Theory and Methods for Reusable  
Liquid-propellant Rocket Engine

吴建军 程玉强 著  
魏鹏飞 黄 强



科学出版社

# 可重复使用液体火箭发动机 减损控制理论与方法

吴建军 程玉强 魏鹏飞 黄 强 著

国防科技大学学术专著出版资助专项经费资助

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是作者在可重复使用液体火箭发动机减损控制研究方向上近十年研究成果的系统总结,是国内第一本全面论述可重复使用液体火箭发动机减损控制技术概念与内涵、关键技术与主要研究内容、实现方法的著作。本书在总结目前国内外该研究方向发展现状的基础上,着重介绍了发动机系统、结构与损伤动力学建模和仿真,发动机减损控制律的综合优化分析方法,以及发动机实时在线减损控制器的设计与实现等。

本书可以为液体火箭发动机研制、生产和试验等部门从事发动机结构优化设计、健康监控与故障诊断、容错控制等方向的科研人员和工程技术人员提供有益参考,也可以作为相关专业高等院校博士生、研究生的教学用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

可重复使用液体火箭发动机减损控制理论与方法/吴建军等著. —北京:科学出版社, 2013. 6

ISBN 978-7-03-037671-8

I. ①可… II. ①吴 III. 液体推进剂火箭发动机-研究 IV. ①V434

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 117505 号

责任编辑:陈 婕 / 责任校对:朱光兰

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 6 月第一次印刷 印张:17

字数:330 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

减损控制是近年来迅速发展的一种新型故障控制技术,是指在不影响系统完成任务和不明显损失系统性能的前提下,通过减少系统中关键部件的损伤或抑制其发展,从而达到显著延长系统工作寿命的目的。减损控制技术的研究对改进航天动力系统型号研制、地面试车以及飞行过程中的控制技术的可靠性和安全性的提高有着十分重要的理论意义和工程实用价值,而且其研究成果可以广泛应用于其他大型复杂热动力系统,如发电站、化工系统、飞机等,有利于提高这些系统的可靠性、可用性、可维护性与部件的耐用性等一些十分关键的性能指标。

作为一个多学科综合交叉的前沿研究领域,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,其研究内容横跨控制理论与工程、材料科学、发动机技术、计算机科学、人工智能等多个领域。然而,尽管减损控制技术已经过近二十年的发展,但其本身的理论与方法还很不成熟,无论是在研究方案的选择与论证,还是在关键技术的解决方面,均需要开展更多、更深入的研究。目前,我国对该领域的研究甚少。

作者所在单位——国防科技大学航天科学与工程学院是国内最早开展可重复使用液体火箭发动机减损控制技术研究单位。而本书正是作者在该领域多年研究成果的系统总结,也是国内第一本全面论述可重复使用液体火箭发动机减损控制技术概念与内涵、主要研究内容、实现方法以及国内外最新研究进展的著作。本书不仅适合于液体火箭发动机研制、生产和试验等部门从事发动机结构优化设计、健康监控与故障诊断、容错控制等方向的科研人员和工程技术人员使用,而且可供高等院校相关专业的博士生、研究生参考。

全书共8章。第1章详细介绍了减损控制技术的概念及其应用意义,综述了减损控制技术国内外研究进展,并对可重复使用液体火箭发动机减损控制技术的研究方案进行了分析讨论。第2章以我国某大型液氧煤油火箭发动机为对象,详细论述了其动力学建模、动态特性分析与仿真计算等问题,并对发动机各瞬变过程如起动过程、转工况过程和关机过程中流量调节器起动流量、转级速率、末端流量等参量的影响进行了分析讨论。第3、4章针对液体火箭发动机关键部件——推力室冷却夹套隔片和涡轮叶片,详细阐述了其结构动力学、损伤动力学的建模与仿真方法,并分析探讨了发动机瞬变过程中上述关键部件损伤的动态特性和发展规律。第5、6章针对可重复使用液体火箭发动机减损控制律的综合分析问题,详细论述

了减损控制技术基于多目标优化的理论基础,然后基于主要目标法、线性加权和法、遗传算法和粒子群算法等优化方法,深入研究分析了发动机控制输入序列的优化选择以及系统性能与关键部件损伤之间的权衡机制。第7章针对发动机工作过程中的在线减损控制问题,详细介绍了基于模糊逻辑和模糊神经网络的智能减损控制器设计方法,并对其结构设计、控制规则库构建以及网络结构中连接权值的学习算法等问题进行了深入分析。第8章介绍了减损控制技术在某氢氧液体火箭发动机中的应用。

特别感谢国际宇航科学院院士陈启智教授多年来的悉心培养和指导。感谢博士生李艳军、彭小辉在本书文字录入、格式编排和校对等方面付出的辛勤劳动。感谢国家自然科学基金委员会(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 50276068、可重复使用液体火箭发动机突变减损控制理论与方法研究 51206181)的资助,感谢国防科技大学学术专著出版资助专项经费的资助,同时感谢科学出版社对本书的出版给予的大力支持。

减损控制是一个较新的研究方向,涉及的研究内容范围较广。由于作者水平有限、经验不足,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2013年1月

# 目 录

## 前言

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....                  | 1  |
| 1.1 引言 .....                           | 1  |
| 1.2 减损控制的基本概念与内涵 .....                 | 3  |
| 1.3 减损控制的研究方案与关键技术 .....               | 5  |
| 1.3.1 以往采取的研究方案与关键技术分析 .....           | 6  |
| 1.3.2 本书采取的研究方案与关键技术分析 .....           | 8  |
| 1.3.3 研究对象的选择 .....                    | 9  |
| 1.4 减损控制技术的研究进展 .....                  | 12 |
| 1.4.1 发动机系统动力学 .....                   | 13 |
| 1.4.2 关键部件结构动力学 .....                  | 19 |
| 1.4.3 关键部件损伤动力学 .....                  | 24 |
| 1.4.4 减损控制律综合分析 with 减损控制器设计 .....     | 26 |
| 1.4.5 减损控制技术应用于其他系统的研究进展分析 .....       | 33 |
| 参考文献 .....                             | 35 |
| <b>第 2 章 液氧煤油发动机动力学建模与动态特性分析</b> ..... | 40 |
| 2.1 引言 .....                           | 40 |
| 2.2 液体火箭发动机简介 .....                    | 41 |
| 2.2.1 发动机工作过程及原理 .....                 | 41 |
| 2.2.2 发动机的模块化构成 .....                  | 43 |
| 2.3 发动机动力学模型 .....                     | 45 |
| 2.3.1 液涡轮模型 .....                      | 45 |
| 2.3.2 燃气涡轮模型 .....                     | 46 |
| 2.3.3 泵模型 .....                        | 47 |
| 2.3.4 热力组件模型 .....                     | 48 |
| 2.3.5 液体管路模型 .....                     | 49 |
| 2.3.6 冷却通道模型 .....                     | 49 |
| 2.3.7 流量调节器模型 .....                    | 50 |
| 2.3.8 带阀液体管路模型 .....                   | 51 |

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 2.4 组件可视化仿真模型与发动机动力学仿真软件·····        | 51         |
| 2.4.1 软件的总体设计·····                   | 52         |
| 2.4.2 发动机组件模块库的建立·····               | 53         |
| 2.4.3 动力学仿真软件及数值仿真求解·····            | 55         |
| 2.5 发动机动态过程仿真与分析·····                | 58         |
| 2.5.1 发动机工作全过程仿真·····                | 58         |
| 2.5.2 起动过程仿真与分析·····                 | 61         |
| 2.5.3 转工况过程仿真分析·····                 | 69         |
| 2.5.4 关机过程仿真分析·····                  | 72         |
| 2.5.5 仿真结果与试车结果的比较·····              | 74         |
| 2.6 本章小结·····                        | 75         |
| 参考文献·····                            | 76         |
| <b>第3章 冷却夹套隔片结构损伤建模与动态特性分析</b> ····· | <b>78</b>  |
| 3.1 引言·····                          | 78         |
| 3.2 冷却夹套隔片的夹芯梁结构模型·····              | 79         |
| 3.2.1 等效夹芯梁模型·····                   | 79         |
| 3.2.2 几何关系·····                      | 80         |
| 3.2.3 平衡方程·····                      | 81         |
| 3.2.4 控制方程·····                      | 81         |
| 3.2.5 边界条件·····                      | 82         |
| 3.2.6 夹芯梁模型方程的封闭形式解·····             | 83         |
| 3.3 冷却夹套隔片损伤建模与分析·····               | 85         |
| 3.3.1 细化模型·····                      | 85         |
| 3.3.2 黏塑性模型·····                     | 86         |
| 3.4 仿真结果与讨论·····                     | 88         |
| 3.4.1 蠕变温度和激活能的影响分析·····             | 89         |
| 3.4.2 结构尺寸的影响分析·····                 | 90         |
| 3.4.3 载荷的影响分析·····                   | 90         |
| 3.4.4 系统动态过程中冷却夹套隔片损伤发展规律研究·····     | 93         |
| 3.5 冷却夹套隔片结构有限元分析·····               | 99         |
| 3.6 本章小结·····                        | 102        |
| 参考文献·····                            | 103        |
| <b>第4章 涡轮叶片结构损伤建模与动态特性分析</b> ·····   | <b>104</b> |
| 4.1 引言·····                          | 104        |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 4.2 涡轮叶片结构动态特性的有限元分析 .....        | 106        |
| 4.2.1 用有限元分析法建立涡轮叶片的结构动力学模型 ..... | 106        |
| 4.2.2 涡轮叶片的应力分析 .....             | 107        |
| 4.2.3 涡轮叶片结构动态特性的有限元分析结果 .....    | 109        |
| 4.3 涡轮叶片应力的近似计算 .....             | 113        |
| 4.3.1 离心拉伸应力的计算 .....             | 114        |
| 4.3.2 弯曲应力的计算 .....               | 116        |
| 4.3.3 旋转下的振动应力 .....              | 119        |
| 4.3.4 计算结果与分析 .....               | 119        |
| 4.4 涡轮叶片的疲劳损伤分析方法及模型 .....        | 120        |
| 4.4.1 循环应力-应变曲线 .....             | 121        |
| 4.4.2 应变-寿命法 .....                | 121        |
| 4.4.3 Miner 疲劳累积损伤理论 .....        | 123        |
| 4.5 基于时间的疲劳损伤在线计算模型 .....         | 124        |
| 4.5.1 基于时间的损伤定义 .....             | 124        |
| 4.5.2 弹性损伤与塑性损伤的加权平均 .....        | 125        |
| 4.6 应用损伤曲线法建立非线性累积损伤模型 .....      | 127        |
| 4.6.1 加载序列效应对疲劳损伤的影响 .....        | 127        |
| 4.6.2 损伤曲线法 .....                 | 128        |
| 4.6.3 改进的损伤曲线法 .....              | 128        |
| 4.7 涡轮叶片的疲劳损伤算例 .....             | 131        |
| 4.7.1 涡轮叶片的应力-时间历程(应力谱) .....     | 131        |
| 4.7.2 疲劳损伤计算流程分析 .....            | 132        |
| 4.7.3 涡轮叶片疲劳损伤计算 .....            | 132        |
| 4.8 本章小结 .....                    | 139        |
| 参考文献 .....                        | 140        |
| <b>第5章 发动机减损控制的传统优化方法 .....</b>   | <b>141</b> |
| 5.1 引言 .....                      | 141        |
| 5.2 发动机减损控制律综合分析过程 .....          | 142        |
| 5.2.1 发动机减损控制的一般分析过程 .....        | 142        |
| 5.2.2 构造目标函数 .....                | 144        |
| 5.2.3 提取约束条件 .....                | 145        |
| 5.2.4 问题的解 .....                  | 147        |
| 5.3 减损控制律综合分析的主要目标法 .....         | 149        |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 5.3.1 理论基础 .....                    | 149        |
| 5.3.2 仿真结果与分析 .....                 | 151        |
| 5.4 减损控制律综合分析的线性加权和法 .....          | 157        |
| 5.4.1 理论分析 .....                    | 157        |
| 5.4.2 仿真结果与分析 .....                 | 159        |
| 5.5 液体火箭发动机减损控制研究算例 .....           | 165        |
| 5.5.1 算例一:起动过程中控制输入序列的优化选择 .....    | 165        |
| 5.5.2 算例二:起动过程的减损控制 .....           | 167        |
| 5.6 本章小结 .....                      | 170        |
| 参考文献 .....                          | 171        |
| <b>第6章 发动机减损控制的智能优化方法 .....</b>     | <b>173</b> |
| 6.1 引言 .....                        | 173        |
| 6.2 减损控制律综合分析的遗传算法 .....            | 174        |
| 6.2.1 遗传算法在减损控制律综合分析中的适用性 .....     | 174        |
| 6.2.2 遗传算法综合分析减损控制律的流程 .....        | 175        |
| 6.2.3 SPEA 在减损控制律综合分析中的应用 .....     | 178        |
| 6.2.4 仿真计算结果与分析 .....               | 182        |
| 6.3 减损控制律综合分析的多目标粒子群算法 .....        | 185        |
| 6.3.1 粒子群算法的基本问题 .....              | 185        |
| 6.3.2 多目标粒子群算法应用中的问题 .....          | 187        |
| 6.3.3 多目标粒子群算法综合分析减损控制律的流程 .....    | 188        |
| 6.3.4 计算结果与讨论 .....                 | 188        |
| 6.4 本章小结 .....                      | 198        |
| 参考文献 .....                          | 198        |
| <b>第7章 基于模糊神经网络的发动机在线减损控制 .....</b> | <b>201</b> |
| 7.1 引言 .....                        | 201        |
| 7.2 模糊减损控制的方案设计与分析 .....            | 201        |
| 7.2.1 模糊减损控制的适用性分析 .....            | 201        |
| 7.2.2 本书提出的模糊减损控制方案 .....           | 202        |
| 7.3 模糊减损控制器设计与实现 .....              | 203        |
| 7.3.1 模糊化与去模糊化处理 .....              | 204        |
| 7.3.2 模糊控制规则库 .....                 | 207        |
| 7.3.3 仿真结果与分析 .....                 | 207        |
| 7.4 基于模糊神经网络的减损控制研究 .....           | 224        |

---

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 7.4.1 模糊神经网络减损控制系统 .....          | 225        |
| 7.4.2 模糊神经网络减损控制器设计 .....         | 225        |
| 7.4.3 模糊神经网络减损控制器的训练与测试 .....     | 232        |
| 7.4.4 仿真计算结果与分析 .....             | 233        |
| 7.5 本章小结 .....                    | 236        |
| 参考文献 .....                        | 237        |
| <b>第8章 氢氧发动机减损控制技术研究与应用</b> ..... | <b>240</b> |
| 8.1 引言 .....                      | 240        |
| 8.2 氢氧发动机系统动力学模型 .....            | 240        |
| 8.2.1 液氢泵 .....                   | 242        |
| 8.2.2 涡轮 .....                    | 243        |
| 8.2.3 燃烧室 .....                   | 245        |
| 8.2.4 预燃室 .....                   | 246        |
| 8.2.5 液氧控制阀门 .....                | 247        |
| 8.2.6 液氢供应管路 .....                | 247        |
| 8.2.7 推力室冷却夹套隔片 .....             | 248        |
| 8.3 发动机工作过程仿真 .....               | 249        |
| 8.3.1 发动机工作过程稳态仿真 .....           | 249        |
| 8.3.2 发动机过渡过程仿真 .....             | 251        |
| 8.4 涡轮叶片减损控制仿真与分析 .....           | 254        |
| 8.5 冷却夹套隔片损伤演化过程仿真与分析 .....       | 260        |
| 8.6 本章小结 .....                    | 262        |
| 参考文献 .....                        | 262        |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引 言

随着人类在通信、气象、导航、地球资源勘察与国防等领域的航天活动的日益开展以及对宇宙空间不断深入的科学探索,航天技术在过去几十年的发展历程中取得了重大进展。在世界各航天大国大力发展航天技术的今天,降低成本、提高可靠性与安全性、缩短发射周期已成为发展航天运输技术的基本目标<sup>[1~3]</sup>。特别是近年来随着空间活动商业化和产业化的快速发展,以及外层空间在未来军事斗争中地位的日益提升,下一代航天运载器应当以完全重复使用为目标,以满足航天任务快速增长的需要。因此,在过去的 30 多年里,航天专家一致认为,研制和使用可重复使用运载器是大幅度降低进入空间费用最有效的手段,也是实现大规模航天应用的前提<sup>[4~8]</sup>。可重复使用运载器(reusable launch vehicles, RLV)将是 21 世纪航天运输技术的主要发展方向之一。

航天技术发展的历史表明,航天技术的日趋成熟在很大程度上取决于火箭推进技术的发展。可以说,液体火箭发动机技术水平直接影响航天运载器的发展,没有先进的液体火箭发动机就没有先进的航天器<sup>[9]</sup>。目前,世界各航天大国都在积极地进行可重复使用运载器的方案论证与关键技术攻关,其中又以发展可重复使用液体火箭发动机为其动力系统的核心关键技术之一。因此,作为可重复使用运载器的动力装置,可重复使用液体火箭发动机不仅是当前国际国内航天技术研究的一大热点,而且对未来可重复使用运载器的发展以及实现快速、可靠、廉价进入空间、开展大规模航天应用都具有至关重要的影响。我国对发展可重复使用液体火箭发动机技术也进行了广泛的论证,并制订了详细的发展战略。

可重复使用液体火箭发动机不仅工作环境恶劣(高温、高压、强腐蚀、强振动的极端热力-机械-流体工作环境)、多次重复使用,而且工作范围大、工作过程形式多样(包括涡轮泵高速机械旋转运动、预燃室和燃烧室高温高压燃烧过程等)。如何提高可重复使用液体火箭发动机的可靠性与安全性,延长其工作寿命,降低其使用费用,是其发展的关键。美国的航天飞机主发动机(space shuttle main engine, SSME)是典型的重复使用航天推进系统之一。SSME 最初的设计目标是进行 55 次飞行而不需要进行大的维修,但是其使用的实际情况是每飞行一次都要进行全系统大的维护(包括对其推进系统和防热系统进行检测、维护和维修,甚至需要更

换某些关键部件,如涡轮泵系统的主要零部件等),这样不仅大大增加了航天飞机的运行成本,而且延长了发射周期。

近年来,针对上述问题,国内外相继开展了众多的技术专题研究,其中具有代表性的有发动机设计过程中的安全寿命设计方法<sup>[10~13]</sup>和损伤容限设计方法<sup>[14,15]</sup>、生产过程的无损检测方法<sup>[16]</sup>、发动机工作过程的健康监控<sup>[17~21]</sup>和容错控制技术<sup>[22~24]</sup>等。

(1) 安全寿命设计方法是一种较为保守的方法。为了保证系统部件在安全运行寿命周期期间不发生破坏,设计过程中过于加大了安全系数和余度,这从降低成本和费用的观点考虑是不合理的。另外,此方法未考虑在发动机使用期间内如何实施视情检修制度,以排除可能出现的意外损伤和初始缺陷,因此该方法并不能完全保证系统安全。

(2) 损伤容限设计方法考虑的是在结构存在初始缺陷或疲劳裂纹的情况下,如何减缓裂纹扩展速率,以使含有裂纹的结构部件有足够的剩余寿命维持工作,直至下次检修时,发现后予以修复或更换。但是,损伤容限设计方法在寿命预估中未将裂纹的形成阶段考虑在内,而通常自某一初始裂纹开始计算。

(3) 无损检测方法是一种在避免对发动机结构拆卸、分解和安装,不对发动机造成损伤和破坏的前提下,快速有效发现结构部件损伤的检测技术,主要用于检测材料和构件中的宏观缺陷,但对于微观缺陷的检测,一般说来难以实施,而这往往是发动机工作过程中发生故障的根源。

(4) 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、定位与评估以及控制,来保证发动机与运载器的安全,并将故障引起的损失降到最低程度。

上述技术中以健康监控技术最为突出。为了实现液体火箭发动机(liquid-propellant rocket engine, LRE)健康监控的目的,其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。上述措施大都可以归结为以故障诊断为核心的容错控制策略。然而,由于航天运载器系统本身的复杂性和特殊性,如果对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将会增加其系统干重和复杂性,这是不可取的。事实上,目前对于运载器而言,其所使用的大型液体火箭发动机既没有冗余的系统备份,也很难进行发动机系统重构<sup>[19]</sup>。因此,目前,在液体火箭发动机中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<sup>[25]</sup>。

现有损伤检测方法的固有缺陷和健康监控技术存在的问题使得人们在使用液

体火箭发动机的过程中不可能发现其存在的所有故障隐患,因此迫切需要发展一种能有效提高发动机可靠性和耐用性,并对其部件损伤和故障起到预测和控制作用的新技术。近二十年来围绕着液体火箭发动机健康监控系统的故障主动控制措施,一种称为减损控制(damage-mitigating control,DMC)的技术引起了人们的广泛重视。

减损控制是近年来迅速发展的一种新型故障控制技术,它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发动机的研制成本。因此,减损控制技术的研究不仅对改进现有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,都具有十分重要的理论意义和工程实用价值,而且对未来可重复使用液体火箭发动机的发展将产生深远的影响。因为就可重复使用发动机而言,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。此外,减损控制技术还可以广泛应用于其他大型复杂热动力系统,如发电站、化工系统、飞机、汽车等,因为在这些系统中,其可靠性、可用性、可维护性与部件的耐用性也是人们十分关心的问题。

## 1.2 减损控制的基本概念与内涵

减损控制技术最初是针对 SSME 进行研究的,其基本概念由 Lorenzo 与 Merrill 于 1991 年首先提出<sup>[26,27]</sup>。但是,在以往的研究中,在概念的使用上存在“减损控制”与“延寿控制(life-extending control,LEC)”术语混用的现象。为此,作者在多年研究的基础上,将上述两者综合,提出“减损与延寿控制(但为表述方便,本书还是统一称之为减损控制)”的概念<sup>[25]</sup>,并明确地指出该项技术是在不影响系统完成任务和不明显损失系统性能的前提下,通过减少系统中关键部件的损伤或抑制其发展而达到显著延长系统工作寿命的目的。其中,减损是其采取的技术手段,而延寿则是其主要目的。

对于液体火箭发动机这样一个复杂的热力-机械-流体系统来说,其各部件是相互协调、相互影响的,其关键部件也有若干个。因此,发动机减损控制技术研究思路是:首先,对发动机易损部件的识别和对损伤的度量;其次,减损控制在关键部件已发生损伤的基础上,通过在发动机系统性能与关键部件损伤之间进行恰当的权衡(系统性能与关键部件损伤之间的权衡一般基于最优化思想进行综合分析)形成减损控制律;然后,依据该控制律设计相应的减损控制器,并据此对发动机系统的输入进行控制,以达到既完成任务又减少发动机工作过程(尤其指动态过程,如发动机

起动过程、转工况过程和关机过程)中关键部件(关键部件指发动机易损易失效的部件)的损伤增量、抑制损伤和故障发展来保证和延长发动机工作寿命的目的。

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,而且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<sup>[28]</sup>。减损控制器分析设计的前提和基础是对减损控制律的综合分析和建立,这需要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完成。然而,发动机工作过程中很难通过测量的手段直接获取关键部件的损伤信息,因此目前减损控制的研究(包括本书在内)更多的是基于第二种途径,即在发动机系统动力学模型的基础上,通过建立系统中关键部件的结构动力学模型与损伤模型,估计发生在关键部件上的损伤量,并将其作为分析建立减损控制律的重要输入信息。

由此可见,通过减损控制不仅可以实现并增强系统的可靠性、可用性、可维护性和部件耐用性,而且更重要的是,可以使系统避免发生灾难性事故。由于液体火箭发动机减损控制技术和导弹武器系统的延寿技术都是以延长系统的寿命来提高系统的可靠性、安全性并降低成本为研究的最终目的,两者存在广泛的联系与区别,故下面对此加以剖析和说明。

对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(在以液体火箭发动机为推进系统的战略导弹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。其研究内容主要包括:分析影响发动机系统寿命的薄弱部件;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。

从技术的实现途径来看,液体火箭发动机减损控制技术和导弹武器系统的延寿技术具有如下几个相似点:

- (1) 都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) 需要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) 研究结果可为发动机的维修保养制度的制定提供参考。

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。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,从而节省经费开支<sup>[29~31]</sup>。相对而言,液体火箭发动机减损控制技术更着重于对发动机的工作过程进行控制,即研究如何减小发动机系统在工作过程中关键部件的损伤,如何在系统性能与关键部件损伤之间寻求某种程度的权衡,并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。此二者之间的区别具体如下:

- (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,但是若将这两项技术有机融合,则可以为未来可重复使用火箭发动机减小损伤、延长寿命提供有效的研究方法,而这也正是作者将两者合并后提出“减损与延寿控制”概念的初衷。

综合前面的分析可见,减损控制本质上是一种对系统工作过程进行主动干预的故障控制技术,并在某种意义上集成了故障诊断和容错控制技术的思想。因此,作为一门横跨控制理论与工程、材料科学、发动机技术等领域的新兴技术,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。减损控制技术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、控制理论与工程以及材料学(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。此外,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可应用于减损控制技术研究之中,并为解决其中的一些关键技术提供支持,从而为进一步开展可重复使用液体火箭发动机智能减损控制技术奠定理论与技术基础。

### 1.3 减损控制的研究方案与关键技术

如前所述,减损控制技术的一般研究方法是通过建立研究对象的系统动力学模型、关键部件结构模型、结构材料损伤模型,进行仿真分析,然后在得到研究对象系统性能参数与关键部件结构材料损伤信息之后,在系统性能参数与关键部件损伤之间进行权衡考虑,分析建立减损控制律并对系统实施控制。减损控制技术一般采取的研究方案如图 1.1 所示。由于减损控制技术在应用中具有综合性、集成性和交叉性,而且自提出以来,就不同程度地与智能控制技术联系在了一起<sup>[26,27]</sup>,因而下面结合智能减损控制技术进行其研究方案与关键技术的分析。

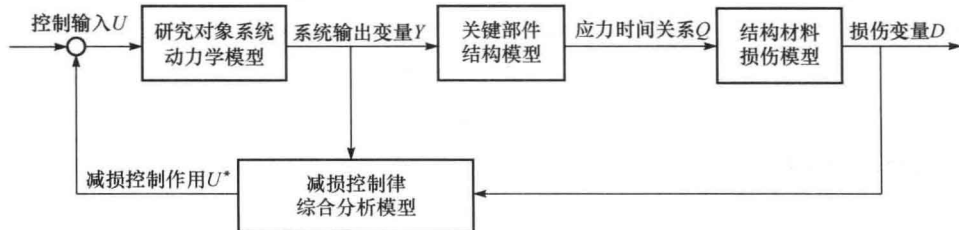


图 1.1 减损控制的一般研究方案

### 1.3.1 以往采取的研究方案与关键技术分析

在以往的研究中,智能减损控制技术主要是应用智能计算技术(如模糊逻辑)综合分析减损控制律和设计相应的减损控制器<sup>[32~34]</sup>,以及应用智能控制技术(如分层递阶智能控制)构建减损控制结构<sup>[32~37]</sup>。上述方案可总结为图 1.2。

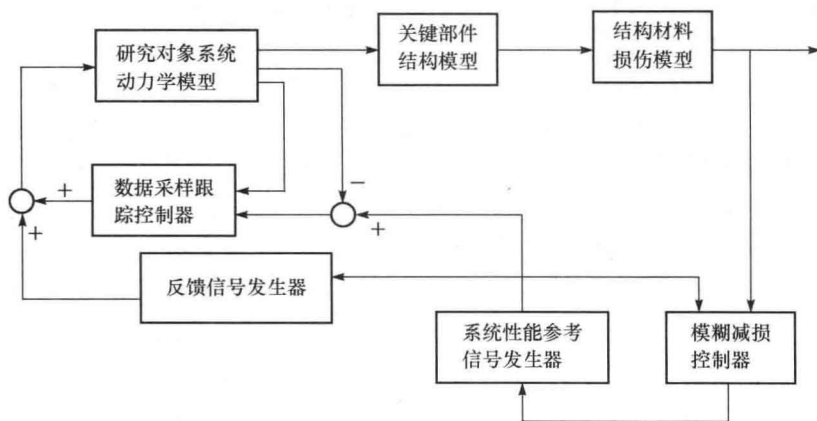


图 1.2 以往研究所采取的智能减损控制方案

该方案是一个两层控制结构,其中底层是一个数据采样跟踪控制器,应用  $H_2$  范数或  $H_\infty$  优化技术设计,其作用是跟踪系统性能的参考轨迹;顶层是一个减损控制器,通过模糊逻辑实现,其作用是在系统性能与关键部件损伤之间权衡考虑,对研究对象系统实现减损控制。整个减损控制系统可以在系统性能与关键部件损伤之间自动地进行调整,具有一定的智能性。

在该方案中,研究对象系统动力学模型、关键部件结构模型与结构材料损伤模型的建立与分析方法沿袭了减损控制技术中常用的方法。而系统性能控制器与模糊减损控制器的设计则是研究中需要解决的关键技术。其中,在设计系统性能控制器时,可应用诱导  $H_2$  范数或  $H_\infty$  优化技术,通过最小化外部输入能量与调整输出能量之间的最坏情况增益来实现<sup>[34]</sup>。此外,还需要结合时域与频域分析技术对系统进行鲁棒稳定性与动态响应性能分析。在设计减损控制器时,可采用模糊逻辑方法,通过构建模糊规则库、建立模糊推理机制、对控制器的输入变量进行模糊化、对输出变量进行去模糊化等具体的技术途径,使所设计的减损控制器可以模仿人工操作员的决策能力,在系统性能与关键部件损伤之间进行近似推理决策,从而使控制过程具有智能性。

将该方案用于在 SSME 简化系统中的仿真计算<sup>[32~34]</sup>,其结果表明方案是可行的,而且此方案中的减损控制器可以处理一些事先未考虑的情况,如外部干扰因

素所导致的损伤等。

由于通常所研究的对象系统比较复杂,并且关键部件也有若干个,因而在发展可实时在线应用的减损控制技术时,一方面,需要发展一种能够自主地监督系统中各关键部件的损伤情况,进而能够及时地采取相应控制措施的减损控制系统,不妨称之为实时自主减损控制技术;另一方面,该实时自主减损控制技术还需要具有处理一些非先验性情况的自学习与自适应能力。

为了能够进行实时自主减损控制,可采用更先进的分层递阶智能控制系统<sup>[38~40]</sup>来实现,如图 1.3 所示。

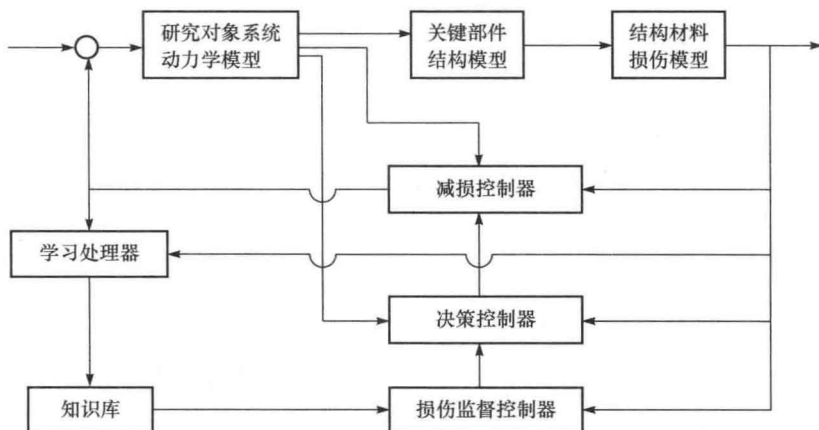


图 1.3 实时自主减损控制技术研究方案

实时自主减损控制系统由三层控制器构成。最外层是损伤监督控制器,通过对系统各关键部件的损伤进行实时监督,并与知识库中预设的部件损伤容限进行比较,为下一层的决策控制器提供决策依据。决策控制器接收上一层的命令,对系统工作过程中各性能参数与各关键部件损伤信息进行分析,然后做出应该在系统的哪些性能参数与哪些部件损伤之间进行权衡的决定,并发送给减损控制器。减损控制器作为最底层的执行级,其功能是在由决策控制器所确定的系统性能参数与关键部件损伤之间寻求最合适的权衡,然后经过综合分析计算得出减损控制律,并传送给系统输入指令,同时将控制信息传送到学习处理器,该处理器结合关键部件损伤信息产生新的知识,并储存于知识库中。

该方案中的关键技术包含建立液体火箭发动机系统动力学实时仿真模型,液体火箭发动机关键部件分析及建立各关键部件结构、损伤实时仿真模型,损伤监督控制器、决策控制器、减损控制器与学习处理器的设计等。其中,建立实时模型需要根据专家知识对模型作必要的简化,并充分结合试验结果对仿真模型进行修正。控制器设计方面的关键技术一般可采取如下的解决方法:应用离散事件系统理论