

文章编号 :1001 - 2486(2005)06 - 0009 - 05

# 基于多目标优化的液体火箭发动机减损与延寿控制\*

魏鹏飞, 吴建军, 刘洪刚, 陈启智

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** :着重分析了减损与延寿控制律的综合过程, 提出其基于多目标优化方法的理论基础。在建立某型液体火箭发动机系统动力学模型、关键部件之涡轮叶片的结构分析模型及其材料损伤模型的基础上, 分析了应用非线性规划求解减损与延寿控制律的过程。对发动机起动过程实施减损与延寿控制, 结果表明在系统性能略微损失的情况下, 可以较大幅度地减小涡轮叶片的损伤, 从而达到延长发动机工作寿命的目的。

**关键词** :液体推进剂火箭发动机; 减损与延寿控制; 多目标优化; 非线性规划

**中图分类号** :V434      **文献标识码** :A

## The Damage-mitigating and Life-extending Control for Liquid-propellant Rocket Engine Based on Multiobjective Optimization

WEI Peng-fei, WU Jian-jun, LIU Hong-gang, CHEN Qi-zhi

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

**Abstract** :The damage-mitigating and life-extending control (DMLEC) based on multiobjective optimization (MOO) is presented by DMLEC policy analysis and synthesis. The progress of solving DMLEC policy by using nonlinear programming is analysed which combines with the dynamics modelling, the structural analysis of turbine blade and the damage modelling of a certain liquid-propellant rocket engine. Then, the start-up process of the LRE under the control of DMLEC is simulated. The result indicates that the damage of blade is mitigated and the service life of LRE is extended considerably while the system performance is only debased a little.

**Key words** :liquid-propellant rocket engine; damage-mitigating and life-extending control; multiobjective optimization; nonlinear programming

为了提高液体火箭发动机的可靠性、安全性、可操作性与未来天地往返运输系统中的可重复使用液体火箭发动机的可维护性, 达到规避航天发射中的高风险、降低成本与延长发动机工作寿命的目的, 近年来围绕着液体火箭发动机健康监控技术开展了为数众多的技术专题研究, 为了实现健康监控的目的, 通常采取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是很难实现的。因此, 近年来围绕着液体火箭发动机健康监控系统的故障控制措施, 一种称为减损与延寿控制 (damage-mitigating and life-extending control, DMLEC) 的技术应运而生。液体火箭发动机延寿控制的基本概念是由 Lorenzo 与 Merrill 于 1991 年首先提出的<sup>[1, 2]</sup>。随后, 美国宾州州立大学机械工程系 Asok Ray 教授的研究小组十多年来以减损与延寿控制技术为研究方向开展了一些理论与应用基础研究, 文献<sup>[3]</sup>较全面地分析了他们的贡献。

## 1 建模

### 1.1 发动机系统动力学模型

本文研究的对象发动机采用高压分级燃烧富氧燃气循环方式, 推进剂供应系统提供的高压氧化剂

\* 收稿日期 :2005 - 03 - 10  
基金项目 :国家自然科学基金资助项目(50276068)  
作者简介 :魏鹏飞(1975—), 男, 博士生。

全部进入燃气发生器,与经过燃料泵增压后进入燃气发生器的小股流量燃料燃烧,所产生的富氧燃气驱动涡轮,涡轮排气经燃气导管进入燃烧室,与经过冷却夹套后进入燃烧室的其余燃料再燃烧,提高了燃烧效率和循环效率。本文主要建立该发动机的推进剂供应系统(包括氧化剂供应系统、燃料供应系统)、燃气系统、起动机点火等分系统的集中参数形式的非线性动力学模型<sup>[5,6]</sup>,其中选取表征系统性能的参数(燃烧室压强与混合比、燃气发生器压强与混合比等)以及为下一模块提供输入的参数(涡轮转速与功率)作为系统动力学模型的输出,用统一形式表示为:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = F(X(t), U(t), t), & X(t_0) = X_0 \\ Y(t) = G(X(t), U(t), t) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $X(t)$ 为系统状态变量, $U(t)$ 为控制输入变量, $Y(t)$ 为系统输出变量, $t$ 为时间。

### 1.2 涡轮叶片结构模型

涡轮泵是液体火箭发动机的重要组件之一,在高温、高压、高转速下工作,涡轮叶片是一种几何形状比较复杂的结构组件,主要承受本身质量离心力、作用于叶身表面的气体载荷、复杂的温度场以及工作中的上述各因素的瞬态变化所引起的振动响应等。因此叶片也是发动机系统的关键零件之一,在一定程度上,它决定着发动机的工作寿命。本文依据文献<sup>[7]</sup>建立涡轮叶片结构模型:

$$Q(t) = H(Y(t), t) \quad (2)$$

其中, $Q(t)$ 表示叶片应力危险点处的应力载荷向量。

### 1.3 结构材料损伤模型

本文根据文献<sup>[8]</sup>建立涡轮叶片材料的连续时间损伤模型,应用线性损伤累积法则估算结构材料的损伤,其模型的数学表述为:

$$D(t) = S(Q(t), t) \quad (3)$$

其中, $D(t)$ 为包含损伤变化率与累积损伤的向量。

## 2 减损与延寿控制律的综合分析——多目标优化问题的形成及求解

### 2.1 问题的形成

由于减损与延寿控制要求较大幅度地减少关键部件损伤即延长系统工作寿命,同时系统性能不发生明显的损失,因此在构造目标函数时需要考虑三个指标:表示系统性能的目标函数 $J^{\text{perf}}$ ,表示关键部件损伤的目标函数 $J^{\text{damage}}$ 与表示系统控制作用的目标函数 $J^{\text{control}}$ 。

通过分析某型发动机,选择燃烧室压强 $P_C$ 与混合比 $K_C$ 、燃气发生器压强 $P_G$ 与混合比 $K_G$ 、主涡轮转速 $n_{Mt}$ 、氧化剂入口流量 $\dot{m}_0$ 与燃料入口流量 $\dot{m}_f$ 这七个参数构造目标函数 $J^{\text{perf}}$ 。由于要求系统性能不发生明显的损失,因此,将这些参数按相对偏差的形式进行处理:

$$\Delta \bar{Y} = \frac{Y - Y_{SS}}{Y_{SS}} \quad (4)$$

其中, $Y = (P_C, K_C, P_G, K_G, n_{Mt}, \dot{m}_0, \dot{m}_f)^T$ ,下标“SS”表示 $Y$ 的稳态值。由于这些参数在系统中的重要程度不同, $\Delta \bar{Y}$ 的正负性不确定,因此采取加权二次型的性能指标表示形式。在液体火箭发动机的工作过程中追求较高的系统性能,即要求 $|\Delta \bar{Y}|$ 尽可能小,故形成

$$\text{Minimize} \left( J^{\text{perf}} = \int_{t_0}^{t_f} \Delta \bar{Y}^T V \Delta \bar{Y} dt \right) \quad (5)$$

其中,加权系数 $V \in R^{7 \times 7}$ ,且为对角阵,根据对各性能参数的要求来确定 $[t_0, t_f]$ 是系统工作时间范围。

由于关键部件的累积损伤 $D$ 与损伤变化率 $\dot{D}$ 非负,因此目标函数 $J^{\text{damage}}$ 可表示为此二者的加权和的形式。最小化涡轮叶片的损伤,以期极大地延长发动机系统工作寿命,因此提出如下问题:

$$\text{Minimize} \left( J^{\text{damage}} = P_1(D - D_0) + \int_{t_0}^{t_f} P_2 \dot{D} dt \right) \quad (6)$$

其中, $D_0$ 是初始损伤,加权系数 $P_1$ 与 $P_2$ 为标量,表示系统性能与涡轮叶片损伤之间的折中程度。

流量调节器控制着发动机系统的工作状态,其输入指令与流通面积简化为线性变化关系以及流通面积与输出流量之间用拟合的经验关系模拟,因此选取流量调节器的输入指令  $U$  为控制作用,采用控制能量形式构造目标函数  $J^{\text{control}}$ ,通常期望以最小的控制作用获得最大化的系统性能,故

$$\text{Minimize} \left( J^{\text{control}} = \int_{t_0}^t U^T L U dt \right) \quad (7)$$

其中,加权系数  $L$  为标量,表示在减损与延寿控制律的分析与综合过程中对控制作用的限制水平。

通过抑制发动机工作过程中出现突变的工作点或限制某些较高工况实施减损与延寿控制的措施,可明显地体现在部件结构材料损伤变化率的改变上,因此可约束损伤变化率;另一方面,根据发动机维护周期(多次可重复使用)、工作寿命与允许的风险程度明确给定累积损伤的最大值,也可将其作为约束条件,故损伤及其变化率不大于指定的损伤向量  $D^{\text{prescribe}}$ ,表示为

$$D \leq D^{\text{prescribe}} \quad (8)$$

综上所述,由于在系统性能、关键部件损伤与控制作用方面所追求的目标  $J^{\text{perf}}$ 、 $J^{\text{damage}}$  与  $J^{\text{control}}$  是互相竞争、互相制约的,因此如何确定此三者之间的恰当折中,就是一个多目标优化问题。此处,利用加权(各个权重系数分别反映了决策者对各目标的侧重程度)和形式对其进行权衡,将多目标优化问题转化为式(9)表示的单目标优化问题,所求结果为非劣解<sup>[9]</sup>。为了叙述的简便性,令原目标函数中的加权系数包含此处的加权系数,仍使用原符号表示。

$$\begin{cases} \text{Minimize} (J = J^{\text{perf}} + J^{\text{damage}} + J^{\text{control}}) \\ \text{Subject to } D \leq D^{\text{prescribe}} \end{cases} \quad (9)$$

## 2.2 非线性规划方法求解加权和形式的多目标优化问题

减损与延寿控制律的分析与综合过程是在仿真发动机工作过程的基础上,分析关键部件的结构动力学特性得到应力载荷向量,将其输入到损伤模型中估算该部件的损伤量,并与系统输出一起作为控制律设计与综合时的重要信息,进行优化求解得到系统的最优控制序列  $U^{\text{optimal}}$ 。由于此问题是高度非线性且非常复杂,难以得到其解析解,因此首先对式(9)中的目标函数进行离散化处理,如式(10)所示,然后应用 MATLAB 优化工具箱提供的非线性规划求解函数进行优化,求解过程如图1所示。

$$J = \sum_{k=1}^N J(k) = \sum_{k=1}^N [J^{\text{perf}}(k) + J^{\text{damage}}(k) + J^{\text{control}}(k)] \quad (10)$$

其中,  $N$  为时间区间  $[t_0, t_f]$  离散后的整数个时刻。

## 3 仿真结果与分析

对某型火箭发动机的起动过程进行减损与延寿控制的仿真,假设性能参数  $Y$  的各分量同等地表征系统性能,在发动机的起动过程中不限制控制能量,对损伤变化率施加约束,并且系统性能与部件损伤具有相同的重要性,则目标函数中的各加权系数如表1所示,在损伤变化率上施加的约束如表2所示。

表1 目标函数中的加权系数

Tab.1 Weights in objective function

$V$	$L$	$P_1$	$P_2$
Diag(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0	1	0

表2 施加在损伤变化率上的约束

Tab.2 Constraints on damage rate

无约束	约束1	约束2
参考值	$2 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-7}$

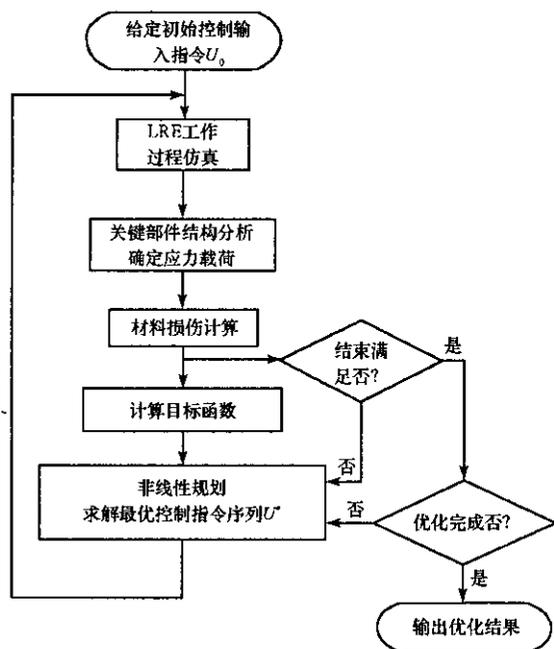


图1 液体火箭发动机减损与延寿控制律综合分析流程图

Fig.1 Flow chart of LRE DMLEC policy synthesis

经仿真计算, 所得结果如表3与图2所示。表3给出了在不同约束条件下系统性能参数值及其相对偏差与部件材料的损伤及其增益。结果表明(1)在减损与延寿控制作用下, 在发动机的起动过程性能参数损失很小的情况下, 可以较大幅度地降低涡轮叶片的损伤, 从而延长发动机的工作寿命(2)施加在损伤变化率上的约束越严厉, 系统的性能损失越大, 同时得到的损伤增益越大, 说明在系统性能与部件损伤之间的折中程度不同, 所获的结果亦不同。

表3 液体火箭发动机减损与延寿控制律综合分析的仿真计算结果

Tab.3 Results of LRE DMLEC simulation

	燃烧室压强 (MPa)	燃烧室 混合比	燃气发生器 压强(MPa)	燃气发生器 混合比	涡轮转速 (rpm)	氧化剂质量 流量(kg/s)	燃料质量 流量(kg/s)	损伤量
								减损倍数
参考值	18.719	2.415	37.36	55.08	18 841	305.06	117.3	$1.888 \times 10^{-6}$
约束1	18.730	2.413	37.39	55.02	18 848	305.12	117.7	$1.399 \times 10^{-6}$
相对偏差	0.059%	0.083%	0.08%	0.1%	0.038%	0.02%	0.33%	1.35
约束2	18.437	2.432	36.57	56.24	18 623	301.34	115.3	$8.839 \times 10^{-7}$
相对偏差	1.50%	0.7%	2.13%	2.11%	1.16%	1.22%	1.74%	2.14

图2表明了通过改变发动机流量调节器的控制指令序列, 调整发动机起动过程, 避免涡轮叶片应力危险点处发生较大的应力变化率, 可以减小其损伤。由图2显而易见, 在减损与延寿控制作用下, 在发动机起动的初始阶段燃烧室压强上升较快, 增大了损伤变化率; 而在较高工况(燃烧室压强高于15MPa)时, 燃烧室压强上升较慢, 明显抑制了损伤变化率的突然增加, 并使其降低到较小的水平。相反地, 起动过程变慢、系统性能发生略微的损失, 这正好表明了能够减少损伤的原因。

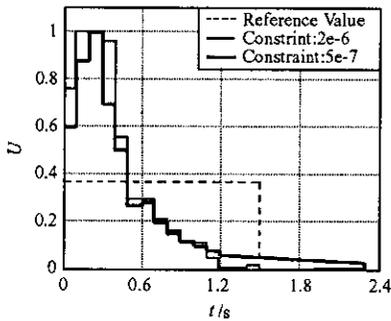


图 2(a) 控制输入序列

Fig. 2(a) Control input sequence under DMLEC

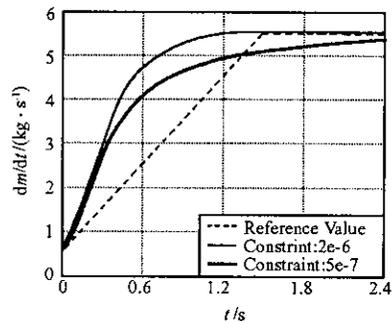


图 2(b) 流量调节器的质量流量响应

Fig. 2(b) Mass flowrate response of regulator

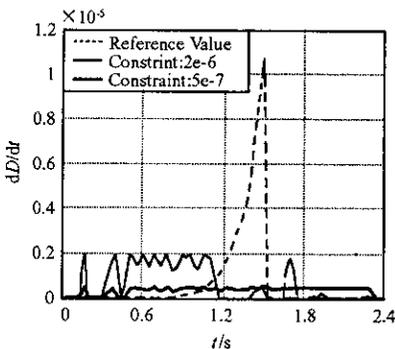


图 2(c) 涡轮叶片的损伤变化率

Fig. 2(c) Damage rate under DMLEC

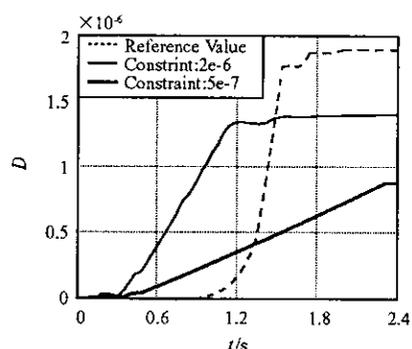


图 2(d) 涡轮叶片的累积损伤

Fig. 2(d) Accumulated damage under DMLEC

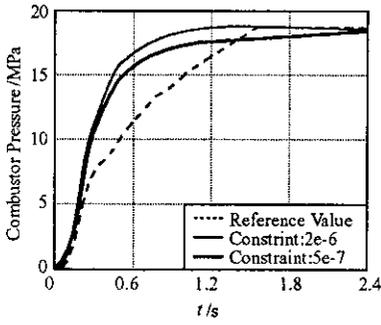


图 2(e) 燃烧室压强的响应

Fig. 2(e) Response of combustor pressure

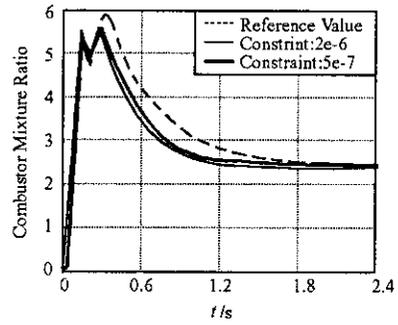


图 2(f) 燃烧室混合比的响应

Fig. 2(f) Response of combustor mixture ratio

## 4 结 论

通过前述的理论分析与仿真计算,可以得到如下的结论:

(1)通过对液体火箭发动机减损与延寿控制律的综合分析,依据非线性规划法分析了该问题的求解过程,论述了该问题基于多目标优化方法的理论基础及其求解方法。

(2)以涡轮叶片作为发动机系统中一个关键部件,着重分析了针对其进行减损与延寿控制的方法,所研究的方法同样也可应用于其它关键部件的减损与延寿控制研究中。

(3)通过对某型火箭发动机起动过程减损与延寿控制的仿真研究,结果表明在系统性能略微损失的情况下,可以较大幅度地减小关键部件上的损伤,从而可以达到延长发动机工作寿命的目的。

在此研究的基础上,今后开展相关的研究工作可以考虑系统性能与关键部件损伤之间的权衡如何影响系统性能损失程度与减损倍数之间的量化关系,进一步考虑如何实现此二者之间的权衡等问题。

## 参 考 文 献:

- [1] Lorenzo C F, Merrill W C. Life Extending Control: A Concept Paper[ R ]. NASA TM - 104391, 1991.
- [2] Lorenzo C F, Merrill W C. An Intelligent Control System for Rocket Engines: Need, Vision, and Issue[ J ]. Control Systems, 1991, 11( 1).
- [3] 吴建军, 魏鹏飞. 液体火箭发动机智能减损与延寿控制技术[ J ]. 推进技术, 2003, 28( 6).
- [4] 魏鹏飞. 可重复使用液体火箭发动机智能减损控制方法研究[ D ]. 国防科技大学研究生院论文, 2005.
- [5] 魏鹏飞, 吴建军, 等. 液体火箭发动机一种通用模块化仿真方法研究[ J ]. 推进技术, 2005, 28( 4).
- [6] 刘红军. 补燃循环发动机静态特性与动态响应特性研究[ D ]. 航天工业总公司第十一研究所, 1998.
- [7] 张远君, 主编. 液体火箭发动机涡轮泵设计[ M ]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995.
- [8] Ray A, Wu M. Damage-mitigating Control of Space Propulsion Systems for High Performance and Extended Life[ R ]. NASA - CR - 194470, 1994.
- [9] Miettinen K. Nonlinear Multiobjective Optimization[ R ]. Helsinki University of Technology/System Analysis Lab, Mat - 2. 412 Seminar on Optimization, 1999.



