

文章编号: 1000-8055(2008)08-1530-06

液体火箭发动机基于主要目标的 减损与延寿控制方法

刘洪刚¹, 魏鹏飞², 谢廷峰¹, 程玉强¹, 吴建军¹

(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院, 长沙 410073;

2. 二炮驻 7103 厂军代室, 西安 710100)

摘 要: 首先通过构造目标函数、提取约束条件与问题解的分析, 对液体火箭发动机减损与延寿控制技术的优化问题进行了数学描述, 然后以某大型液氧/煤油火箭发动机为对象, 考虑其涡轮叶片为关键部件, 研究了发动机起动过程减损控制律综合分析的主要目标法, 并在不同的约束条件下, 对实现不同意义下的减损控制进行了仿真计算. 结果表明该方法可行且有效, 能够有效实现系统性能与关键部件损伤间的权衡并实现预期的减损目标, 结果为工程中液体火箭发动机的改进和优化设计提供了重要的参考价值.

关 键 词: 液体火箭发动机; 减损与延寿控制; 主要目标; 多目标优化

中图分类号: V434

文献标识码: A

Research of damage mitigating and life extending method for liquid-propellant rocket engines based on main object

LIU Hong-gang¹, WEI Peng-fei², XIE Ting-feng¹,
CHENG Yu-qiang¹, WU Jian-jun¹

(1: School of Aerospace and Material Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha, Hunan, 410073, China;

2: The military delegacy of 2nd artillery in factory 7103, Xian, Shanxi, 710100, China)

Abstract: The optimization method of damage-mitigating and life-extending control (DML EC) for liquid-propellant rocket engines was presented mathematically in this paper by constructing the object function, acquiring the constraints and analyzing the solutions. Then, the main object method of DML EC policy analysis and synthesis was developed for a certain LOX/kerosene rocket engine with turbine blade selected as the critical component. Simulated results under diverse situations show that, the method proposed is feasible and effective, since it can not only achieve the expected goal of damage-mitigating by implementing the tradeoff between the system performance and the damage of critical components, but also provide valuable reference for improving and optimizing the design of engines being developed.

Key words: liquid-propellant rocket engine, damage-mitigating and life-extending control, main object, multi-objective optimization

由于液体火箭发动机 (Liquid-propellant rocket engine, LRE) 本身的复杂性和特殊性, 它

收稿日期: 2007-08-09; 修订日期: 2007-12-17

基金项目: 湖南省自然科学基金(08JJ4023)

作者简介: 刘洪刚(1975-), 男, 湖南双峰人, 博士, 副教授, 主要从事液体火箭发动机健康监控技术的研究.

既没有冗余的系统备份,也很难进行发动机系统重构.因此,当前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,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^[1].而减损与延寿控制技术(以下简称减损控制)^[2-3]作为一种能在较大程度上延长系统工作寿命的控制策略,可在不影响系统完成任务的前提下,通过权衡系统性能与关键部件损伤,并适当降低系统性能来较为明显地减小关键部件的损伤或抑制其发展.这对改进现有液体火箭发动机的控制技术,增强其可靠性、可用性、可维护性和关键部件耐用性,避免发生灾难性事故,具有十分重要的工程实用价值.减损控制技术经过十多年的发展,已经在飞机发动机、热电站等热力、机械、流体动力系统进行了概念性的探索研究,并取得了一定的研究成果^[4-6].

然而,在液体火箭发动机系统中,一方面,各关键部件之间存在着较强的耦合作用,对某一部件进行减损控制所采取的控制律可能会增加其他部件的损伤;另一方面,系统的性能目标函数、关键部件的损伤目标函数与系统控制作用的目标函数之间存在着强烈的竞争关系.因此,如何在发动机各关键部件的损伤之间及其与发动机性能之间做出合适的权衡,是当前减损控制技术研究面临的关键问题.

本文首先通过构造目标函数、提取约束条件与问题解的分析,对液体火箭发动机减损控制技术的优化问题进行了数学描述,然后以某大型液氧/煤油火箭发动机为对象,考虑其涡轮叶片为关键部件,研究了发动机起动过程减损控制律综合分析的主要目标法.仿真计算结果表明该方法可行且有效,而且同样适用于发动机的其他工作过程(如主级、关机过程等).

1 LRE 减损控制的优化问题描述

通过建立发动机的系统动力学模型,将其输出组成系统的性能目标函数,并与关键部件的损伤目标函数以及系统控制作用的目标函数一起构成目标函数空间,则 LRE 的减损控制问题,就是在上述目标函数空间施加一定的约束之后,所形成的有约束最优化问题描述^[1],如式(1)所示:

$$\begin{cases} \text{minimize} & J(Y,U,D) \\ \text{subject to} & g(Y,U,D) \leq 0 \\ & h(Y,U,D) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 $J(Y,U,D)$ 为目标向量函数; $g(Y,U,D)$ 和 h

(Y,U,D) 分别是不等式约束条件和等式约束条件向量.但在发动机减损控制技术分析过程中,函数 J 需要考虑三个指标,其一是表征系统性能的目标函数 J^{perf} ,它是系统动力学模型输出变量的函数;其二是表征关键部件损伤的目标函数 J^{damage} ,包含了关键部件的累积损伤与损伤变化率;其三是表征系统控制作用的目标函数 J^{control} .因此目标向量函数又可分解为:

$$\text{minimize} \left\{ J^{\text{perf}} = \int \Delta \bar{Y}^T M \Delta \bar{Y} dt \right\} \quad (2)$$

$$\text{minimize} \left\{ J^{\text{damage}} = (D - D_0) + \int \dot{D} dt \right\} \quad (3)$$

$$\text{minimize} \left\{ J^{\text{control}} = \int U^T N U dt \right\} \quad (4)$$

其中 $\Delta \bar{Y}$ 为由性能参数组成的标准化偏差向量,作为衡量发动机性能损失的指标;加权系数矩阵 M 根据各性能参数对系统性能的影响程度确定; $[t_0, t_f]$ 是发动机工作时间范围; D 为损伤变化率; D_0 是初始损伤; U 为控制输入变量; N 为加权系数,表示在减损控制律综合过程中对控制作用的限制水平.

减损控制能够实现系统性能与关键部件损伤的权衡,主要原因之一就是抑制系统工作过程中所出现的某些参数的突变.通常这些突变能够产生较大的损伤变化率,从而使损伤在短时间内迅速增加.因此,在综合分析减损控制律的优化过程中,产生在关键部件上的损伤变化率是一个必须限制的变量,通过对该变量不同程度的约束,便可实现系统性能与关键部件损伤之间某种不同的权衡水平.另一方面,通过调整系统的工作状态,以期避免在发动机工作过程中出现较恶劣工况(一般地,在关键部件应力危险点处可能产生较大的应力幅值,从而加速材料的损伤过程),在这种情况下,可以限制控制输入指令 U 的取值范围^[1].

综上所述,可提取问题式(1)的约束条件,如式(5)所示:

$$\begin{cases} U^{\text{lower}} \leq U \leq U^{\text{upper}} \\ \sum U = \text{const} \\ \dot{D} \leq \dot{D}^{\text{prescribe}} \end{cases} \quad (5)$$

其中 U^{lower} 与 U^{upper} 分别为控制输入指令 U 的取值区间的上下边界值, $\sum U(k) = \text{const}$ 可保证系统性能不会发生较大的损失, $\dot{D}^{\text{prescribe}}$ 为预先指定的损伤变量.

2 减损控制律综合分析的主要目标法

系统性能、关键部件损伤与控制作用之间存

在着竞争关系,如何确定此三者之间的适当权衡,是一个多目标优化问题.一方面,如果减小关键部件的损伤,则会导致系统性能参数偏离其额定值,引起系统性能的损失,并随着损伤减小程度的增加而增大.另一方面,在系统性能与关键部件损伤之间的权衡考虑会增加控制输入的复杂程度,从而较多地消耗控制作用的功率.

由于液体火箭发动机的控制输入限制在一定的范围,因此可将输入作为约束条件处理,而发动机性能不发生明显损失的要求可根据工作任务选定一个损失范围来实现.另外,由于较大程度地减小关键部件的损伤是减损控制研究中所追求的主要目标,因此可选取关键部件损伤目标函数作为主要目标函数,而将系统性能目标函数作为次要目标函数,并根据工作任务要求可确定出性能目标函数的限定值,如此,即可将其作为约束条件处理.为了进一步简化问题,可根据需要权衡的程度,将损伤变化率作为约束条件,代替损伤目标函数中包含损伤变化率的项,从而原多目标优化问题转化为如下所述的单目标优化问题:

$$\begin{cases} \text{minimize} & J^{\text{damage}} = D - D_0 \\ \text{subject to} & U \in [U^{\text{lower}}, U^{\text{upper}}] \\ & \dot{D} \leq \dot{D}^{\text{prescribe}} \\ & J^{\text{perf}} \leq J_0^{\text{perf}} \end{cases} \quad (6)$$

其中 J_0^{perf} 为根据系统工作任务要求所确定出的系统性能目标函数的上界限值.

上述即为减损控制律综合分析所用的主要目标法原理.

由于式(6)描述的有约束单目标优化问题的高度非线性特点与系统内各因素的强耦合性,选取非线性规划法求解该问题.首先对发动机系统工作时间区间进行离散化处理,将其均匀离散为 n 个小区间

$$t_k = t_0 + \frac{t_f - t_0}{n} \times k \quad (k = 0, 1, 2, \cdots, n) \quad (7)$$

然后,应用非线性规划的数值计算方法进行求解,流程如图 1 所示.

通过图 1 所示的流程进行求解后,得到最优控制输入序列 U^* 及相应的系统性能参数 Y^* 与累积损伤 D^* ,即式(6)所表示的有约束单目标优化问题的最优解 (Y^*, U^*, D^*) .但实际上,液体火箭发动机减损控制律的综合分析涉及多目标优化问题,其数学描述为复杂的互相耦合的非线性常微分方程.一般情况下,难以从严格的数学分析角度求出问题的准确解,通常采用数值方法对其

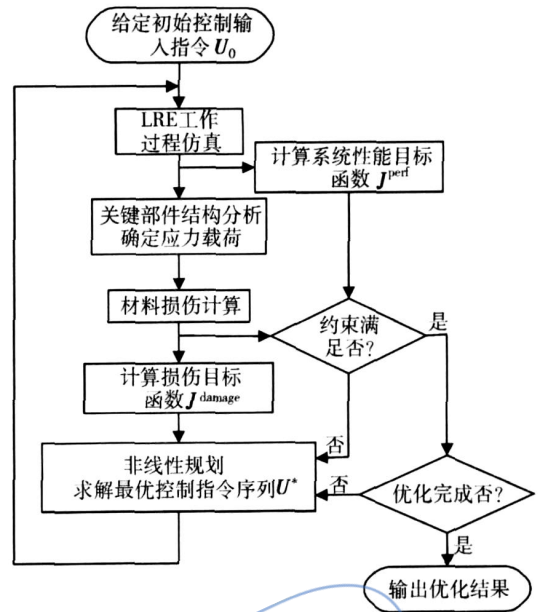


图 1 LRE 减损控制律综合分析的主要目标法流程图

Fig. 1 Analysis chart of damage-mitigating control law for LRE based on the method of main object

求解,但是如何保证这种近似解就是原多目标优化问题(1)的最优解,即是否就是期望得到的减损控制律,尚需论证.为此,下面介绍相关的定义,并证明两个定理.

定义 减损控制律的有效解和弱有效解:在减损控制律综合分析问题中求解向量目标函数 $J(Y, U, D)$, 得到控制输入 U^* 及相应的系统性能参数 Y^* 与损伤变量 D^* , 且 $(Y^*, U^*, D^*) \in S_f$, S_f 为可行解集. 若不存在 $(Y^1, U^1, D^1) \in S_f$, 满足 $J(Y^1, U^1, D^1) \leq J(Y^*, U^*, D^*)$, 称 (Y^*, U^*, D^*) 为减损控制律的有效解; 若不存在 $(Y^1, U^1, D^1) \in S_f$, 满足 $J(Y^1, U^1, D^1) < J(Y^*, U^*, D^*)$, 则称 (Y^*, U^*, D^*) 为减损控制律的弱有效解.

定理 1 式(6)所表示单目标优化问题的全局最优解 (Y^*, U^*, D^*) 是式(1)所表示多目标优化问题的弱有效解.

证明 假设 (Y^*, U^*, D^*) 不是式(1)的弱有效解, 则存在 $(Y^1, U^1, D^1) \in S_f$, 满足 $J(Y^1, U^1, D^1) < J(Y^*, U^*, D^*)$, 即满足(6)中的约束条件 $J^{\text{perf}} \leq J_0^{\text{perf}}$, 则说明 $(Y^1, U^1, D^1) \in S_f$ 也是式(6)的可行解. 该结论与 (Y^*, U^*, D^*) 是式(6)的全局最优解矛盾, 故假设不成立, (Y^*, U^*, D^*) 是式(1)所表示多目标优化问题的弱有效解.

由定理 1 可知, 仅当 (Y^*, U^*, D^*) 为式(6)的全局最优解时, 才能保证得到所期望的减损控制律. 但是, 由于所研究的问题本身非常复杂, 难以

分析所得到的解是否就是全局最优,因此需要比较简单的判别方法.

定理 2 若主要目标 J^{damage} 是凸函数,且问题式(6)中的约束集是凸集,则式(6)的最优解 (Y^*, U^*, D^*) 是式(1)所表示多目标优化问题的有效解.

证明 假设 (Y^*, U^*, D^*) 不是式(1)的有效解,则存在 $(Y^1, U^1, D^1) \in S_f$, 满足 $J(Y^1, U^1, D^1) \leq J(Y^*, U^*, D^*)$. 因为主要目标 J^{damage} 是凸函数,约束集 C 是凸集,则对任意 $\alpha \in [0, 1]$, 有 $\alpha(Y^1, U^1, D^1) + (1 - \alpha)(Y^*, U^*, D^*) \in S_f$, 为式(6)的可行解,且

$$\begin{aligned} J(\alpha(Y^1, U^1, D^1) + (1 - \alpha)(Y^*, U^*, D^*)) &\leq \\ \alpha J(Y^1, U^1, D^1) + (1 - \alpha) J(Y^*, U^*, D^*) &\leq \\ \alpha J(Y^*, U^*, D^*) + (1 - \alpha) J(Y^*, U^*, D^*) &= \\ J(Y^*, U^*, D^*) \end{aligned}$$

该结论与 (Y^*, U^*, D^*) 是式(6)的最优解矛盾,所以,假设不成立,故 (Y^*, U^*, D^*) 是式(1)所表示多目标优化问题的有效解.

定理 2 提供了一种易于操作的判别方法. 另一方面,该定理也为目标函数的构造指出了方向.

3 仿真结果与分析

以某型液氧/煤油火箭发动机^[1]为研究对象,以发动机起动过程为例,在综合分析该过程的减损控制律时,选取其关键部件之涡轮叶片的损伤目标函数为主要目标函数,其系统性能目标函数

为次要目标函数. 由于在发动机的起动过程中,要求各性能参数的增长速度不能太快;而当起动过程结束时,要求各性能参数达到稳态值,根据这些特点,可对单目标优化问题式(6)做进一步的转换,即得到

$$\begin{cases} \text{minimize} & J^{\text{damage}} = D - D_0 \\ \text{subject to} & U \in [U^{\text{lower}}, U^{\text{upper}}] \\ & \sum U(k) = \text{const} \\ & \dot{D} \leq \dot{D}^{\text{prescribe}} \end{cases} \quad (8)$$

其中约束条件 $\sum U(k) = \text{const}$ 可以保证系统性能不会发生较大的损失. 通过指定不同的损伤变化率约束 $\dot{D}^{\text{prescribe}}$ 来实现系统性能与涡轮叶片损伤之间不同程度的权衡.

仿真一:在式(8)中,给定 $U \in [0, 1]$, 不考虑约束条件 $\sum U(k) = \text{const}$, 而指定不同的损伤变化率约束 $\dot{D}^{\text{prescribe}}$, 其优化仿真结果如表 1 所示.

表 1 给出了在不同的损伤变化率约束 $\dot{D}^{\text{prescribe}}$ 下,系统各性能参数与涡轮叶片累积损伤的仿真结果. 显而易见,在所给定 $\dot{D}^{\text{prescribe}}$ 的计算范围内,损伤得到了较大程度的减小. 例如当 $\dot{D}^{\text{prescribe}} = 0.2 \times 10^{-6}$ 时,损伤约减小 25.5 倍,但是,发动机的系统性能也发生了较大的损失,其中,燃烧室压强约降低了 12.6%,而且其它各性能参数也较大程度地偏离了相应的额定值.

表 1 不考虑约束条件的发动机减损控制仿真结果

Table 1 Simulated results of damage-mitigating control for the engine without constraints

约束	燃烧室		燃气发生器		涡轮转速/ (r/min)	氧化剂流量/ (kg/s)	燃料流 量/(kg/s)	累积损伤 / 10^{-6}	优化是否 成功终止
	压强/MPa	混合比	压强/MPa	混合比					
参考值/ 10^{-6}	18.719	2.415	37.36	55.08	18 841	305.06	117.30	1.888	-
10	18.682	2.416	37.26	55.20	18 812	304.49	117.07	1.792	是
9	18.628	2.417	37.10	55.39	18 770	303.66	116.71	1.658	是
8	18.568	2.418	36.93	55.59	18 724	302.76	116.31	1.521	是
7	18.503	2.419	36.75	55.81	18 674	301.77	115.87	1.383	是
6	18.431	2.420	36.54	56.05	18 618	300.68	115.39	1.243	是
5	18.352	2.422	36.32	56.32	18 556	299.47	114.85	1.102	是
4	18.264	2.424	36.07	56.62	18 488	298.13	114.26	0.962	是
3	18.098	2.427	35.60	57.18	18 359	295.59	113.15	0.765	是
2	17.852	2.432	34.92	58.01	18 168	291.82	111.50	0.569	是
1	17.449	2.439	33.81	59.36	17 854	285.65	108.79	0.334	是
0.9	17.283	2.442	33.35	59.91	17 724	283.09	107.68	0.265	是
0.8	17.209	2.444	33.15	60.18	17 666	281.95	107.19	0.238	是
0.7	17.144	2.445	32.98	60.43	17 616	280.95	106.75	0.215	是
0.2	16.365	2.462	30.96	63.40	17 007	269.00	101.49	0.074	是

该仿真结果说明通过指定不同的损伤变化率约束可以实现发动机性能与关键部件损伤之间的权衡,但若不对总控制作用(反映系统性能目标函数)施加约束,则会使系统性能发生明显的损失。

这一结果的工程实际意义在于,通过适当降低已出现故障的发动机系统的工况,使部件损伤减小到不足以引起灾难性后果的水平,不仅可以完成预期的任务,而且也避免了事故的发生。

仿真二:在式(8)中,给定 $U \in [0, 1]$,考虑发

动机系统总控制作用的约束条件 $\sum U(k) = \text{const}$,并且指定不同的损伤变化率约束 $\dot{D}^{\text{prescribe}}$,优化仿真结果如表 2 所示。

从表 2 中可看出,当 $\dot{D}^{\text{prescribe}} = 5 \times 10^{-6}$ 时,损伤减小的程度最大,为 1.59 倍,而燃烧室压强的相对偏差仅为 0.25%;但是,当 $\dot{D}^{\text{prescribe}} \leq 4 \times 10^{-6}$ 时,减损程度反而降低,并且随着 $\dot{D}^{\text{prescribe}}$ 的减小,损伤几乎保持不变,同时,系统各性能参数几乎不变。

表 2 考虑约束条件的发动机减损控制仿真结果

Table 2 Simulated results of damage-mitigating control for the engine with constraints

约束	燃烧室		燃气发生器		涡轮转速/ (r/min)	氧化剂流 量/(kg/s)	燃料流量/ (kg/s)	累积损 伤/ 10^{-6}	优化是否 成功终止
	压强/MPa	混合比	压强/MPa	混合比					
参考值/ 10^{-6}	18.719	2.415	37.36	55.08	18 841	305.06	117.30	1.888	-
10	18.718	2.416	37.36	55.09	18 842	305.10	117.29	1.832	是
9	18.716	2.417	37.36	55.10	18 843	305.14	117.25	1.761	是
8	18.714	2.418	37.36	55.11	18 844	305.20	117.21	1.693	是
7	18.712	2.418	37.36	55.12	18 845	305.25	117.16	1.629	是
6	18.710	2.419	37.36	55.14	18 847	305.31	117.12	1.570	是
5	18.672	2.436	37.26	55.55	18 815	305.53	116.34	1.188	是
4	18.681	2.436	37.37	55.34	18 867	306.19	116.42	1.270	是
3	18.680	2.436	37.37	55.35	18 868	306.22	116.40	1.271	是
2	18.674	2.440	37.37	55.39	18 872	306.41	116.25	1.277	是
1	18.687	2.438	37.38	55.37	18 869	306.34	116.34	1.266	是
0.9	18.688	2.436	37.37	55.35	18 866	306.22	116.27	1.263	否
0.8	18.685	2.436	37.37	55.35	18 865	306.18	116.29	1.261	否
0.7	18.685	2.437	37.37	55.35	18 866	306.20	116.27	1.263	否
0.6	18.683	2.437	37.37	55.36	18 866	306.26	116.24	1.262	否

仿真结果说明,在该优化仿真设定的条件下,主要目标法实现了期望的减损控制律的综合分析,即在系统性能损失不超过百分之一的前提下,通过适当地指定损伤变化率约束,可以不同程度地减小发动机关键部件上的损伤。

其工程应用价值在于,通过优化火箭发动机的控制程序,在不明显降低工况的情况下,使其关键部件上的损伤得到一定程度的减小,从而保证

了发动机工作过程的可靠性与安全性。

仿真三:为了考察仿真二中优化过程没有成功终止的 4 个结果,约束条件与仿真二相同,设定优化算法的终止条件为:当 $\dot{D}^{\text{prescribe}} \geq 1 \times 10^{-6}$ 时,计算目标函数的终止容限为 1×10^{-9} ;当 $\dot{D}^{\text{prescribe}} < 1 \times 10^{-6}$ 时,计算目标函数的终止容限为 1×10^{-15} ,优化仿真结果如表 3 所示。

表 3 设定算法终止条件的发动机减损控制仿真结果

Table 3 Simulated results of damage-mitigating control for the engine with given termination condition

约束	燃烧室		燃气发生器		涡轮转速/ (r/min)	氧化剂流 量/(kg/s)	燃料流量/ (kg/s)	累积损 伤/ 10^{-6}	优化是否 成功终止
	压强/MPa	混合比	压强/MPa	混合比					
参考值/ 10^{-6}	18.719	2.415	37.36	55.08	18 841	305.06	117.30	1.888	-
0.9	18.690	2.436	37.37	55.35	18 863	306.12	116.31	1.258	是
0.8	18.690	2.432	37.37	55.30	18 861	305.98	116.473	1.257	是
0.7	18.689	2.432	37.36	55.30	18 861	305.95	116.56	1.257	是
0.6	18.687	2.433	37.36	55.31	18 862	306.01	116.51	1.257	是

结果表明,优化过程成功终止.表 3 表明在强化了计算条件后,虽然优化过程成功终止,但是损伤并没有随着损伤变化率约束程度的加强而进一步减小,其值约保持在 1.257×10^{-6} 这个水平.

仿真二与仿真三的结果同时说明,在系统性能损失不超过百分之一的前提下,采用主要目标法综合分析减损控制律时,所能获得的减损效益是有限的(最大的减损水平为 1.59 倍),当达到一定的限度时,累积损伤不再随着约束的加强而减小.

上述三种仿真结果都表明,减损控制律综合分析的主要目标法是有效的,并且在不同的约束条件下,可以实现不同意义下的减损控制,应用于不同的实际问题中.但是,在不允许系统性能发生明显损失的情况下,该方法的减损效益比较有限.

4 结 论

首先对液体火箭发动机减损控制技术的优化问题进行了数学描述,然后以某大型液氧/煤油火箭发动机为对象,研究建立了发动机起动过程减损控制律综合分析的主要目标法,并在不同的约束条件下,对实现不同意义下的减损控制进行了仿真计算,结果表明该方法可行且有效.但是,上述优化方法在综合分析减损控制律时,求解效率较低,因此,结合诸如遗传算法、模糊逻辑与神经网络等智能计算技术综合分析减损控制律将是下

一步的重要研究方向.

参考文献:

- [1] 魏鹏飞,吴建军,刘洪刚,等. 基于多目标优化的液体火箭发动机减损与延寿控制[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(6): 9-13.
WEI Pengfei, WU Jianjun, LIU Honggang, et al. The damage mitigating and life extending control for liquid-propellant rocket engine based on multiobjective optimization [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2005, 27(6): 9-13. (in Chinese)
- [2] ZHANG H, Ray A. Damage-mitigating control with overload injection: experimental validation of the concept [J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2000, 122(2): 336-342.
- [3] Wiseman M W, Guo Tenhuei. An investigation of life extending control techniques for gas turbine engines [R]. VA, USA: 2001 American Control Conference, 2001.
- [4] Jaw L. Design of an intelligent life-extending control for turbine engines [R]. VA, USA: 2001 American Control Conference, 2001.
- [5] Holmes M, Ray A. Fuzzy damage mitigating control of a fossil power plant [J]. IEEE Trans. on Control Systems Technology, 2001, 9(1): 140-147.
- [6] Ray A, Caplin J. Life extending control of aircraft: trade-off between flight performance and structural durability [J]. The Aeronautical Journal, 2000, 104(1039): 397-408.