

基于改进 NS-SOMA 的变循环发动机解耦控制方法

何凤林,李秋红,陈尚晰

(南京航空航天大学 江苏省航空动力系统重点实验室,南京 210016)

摘要: 针对 XTE76 变循环发动机的控制结构问题,研究了 2 分块之间进行解耦的控制方法。基于内模原理,设计状态反馈控制器结构,以无超调快速跟踪和耦合抑制为目标,提出了改进的非支配序自组织迁移(NS-SOMA)多目标优化算法,在每代中按照与领导者的欧式距离均匀选择粒子进行迁移,提高了算法的收敛速度和精度,以此优化控制器参数,有效抑制了分块之间的耦合。同时研究了变循环发动机不分块的 3 变量控制方法,直接通过多目标优化抑制回路之间的耦合效应。在某型变循环发动机部件级模型上进行仿真验证,结果表明:不分块结构优于其他 2 种结构,相比分块控制结构,引起的最大耦合降低了 30%,说明多变量综合控制更能充分利用现代控制理论解决回路之间的耦合问题。

关键词: 变循环发动机;多目标优化;ALQR 控制器;分块解耦;航空发动机

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2019.04.004

Variable Cycle Engine Decoupling Control Method Based on Improved NS-SOMA

HE Feng-lin, LI Qiu-hong, CHEN Shang-xi

(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the control structure problem of XTE76 variable cycle engine, the decoupling control method between two blocks was studied. The structure of state feedback controller was designed based on the internal model principle. Aiming at non-overshoot fast tracking and coupling suppression, an improved multi-objective optimization algorithm of Non-dominant Sorting Self-organizing Migration Algorithm (NS-SOMA) was proposed. The convergence speed and precision of the algorithm were improved by selecting migration particles evenly according to the Euclidean distance from the leader in each generation. In this way, the parameters of the controller were optimized, and the coupling between the blocks was effectively suppressed. Meanwhile, the three variable control method without blocking of variable cycle engine was studied, and the coupling between loops was suppressed directly by multi-objective optimization. The simulation verification was carried out based on component level model of a certain variable cycle engine. The results show that the structure without blocking is superior to the other two structures. Compared with the blocking control structure, the maximum coupling is reduced by 30%, which indicates that multivariable integrated control can make full use of the modern control theory to solve the coupling problem between loops.

Key words: variable cycle engine; multi-objective optimization; ALQR controller; blocking decoupling; aeroengine

0 引言

几何可调的变循环发动机(VCE)能够在超声速状态下提供足够的单位推力,在亚声速状态下降低耗油率,是应用于第 4 代多用途战斗机的理想动力装置^[1-2]。国外早在 20 世纪 70 年代就开展了变循环多变量控

制技术研究^[3-4]。Shutler^[5]研究了变循环发动机的控制结构设计方法,通过灵敏度分析,以燃油流量、喷口面积控制风扇转速和外涵出口马赫数;Frederick^[6]则基于鲁棒多变量控制方法对 H ∞ 技术进行改进;文献^[7]研究了 3 输入 3 输出 2 个分块的 XTE76 变循环发动机控制结构,其中双变量分块以燃油流量和尾喷口面

收稿日期:2018-07-24 基金项目:国家自然科学基金(51576096)资助

作者简介:何凤林(1994),女,在读硕士研究生,研究方向为航空发动机控制;E-mail:hfl_0727@163.com。

引用格式:何凤林,李秋红,陈尚晰. 基于改进 NS-SOMA 的变循环发动机解耦控制方法[J]. 航空发动机, 2019, 45(4): 20-26. HE Fenglin, LI Qiu-hong, CHEN Shangxi. Variable cycle engine decoupling control method based on improved NS-SOMA[J]. Aeroengine, 2019, 45(4): 20-26.

积控制风扇换算转速和发动机压比,单变量分块以外涵出口面积控制外涵出口和内涵出口的总压比,2个分块的控制器相互独立。在国内,李嘉^[8]针对飞行包线内外部扰动引起的多变量鲁棒自适应控制器设计问题提出了基于射影算子的自适应律设计方法,同时针对建模不确定性提出基于 LQR 基准控制器的增广模型参考自适应跟踪补偿方法^[9];王元^[10]利用不同的优化算法对 VCE 的控制规律进行优化设计;聂友伟^[11]针对变循环性能寻优控制提出了序列二次约束二次规划(SQCQP)算法,其控制模块输入输出与王元的控制系统设计相同,但观察其仿真可以看出控制效果不佳,上升时间较长并且有超调。

变循环发动机具有更多的可调几何机构,应采取3变量的闭环控制结构。由于多变量控制系统控制器参数较多,设计过程中可以调整参数使得控制系统获得满意的性能,而群智能算法由于其全局搜索能力,在控制器参数优化过程中得到了广泛的应用^[12-13]。其中自组织迁移算法具有需要设置的参数少、收敛速度快的特点,为此本文提出了1种改进非支配序自组织迁移算法(Non-dominated Sorting Self-organizing Migration Algorithm, NS-SOMA),实现对控制器参数的多目标优化。本文针对文献[7] XTE76 变循环发动机的分块控制结构开展研究,鉴于其2个单独分块之间的耦合,提出了分块之间的解耦控制方法,同时研究了3输入3输出不分块的控制器的设计方法,提出了基于改进 NS-SOMA 进行多目标优化的解耦控制方法,并在变循环发动机部件级模型^[2]上验证3种控制结构的仿真效果。

1 2分块独立控制结构

以某型带核心机驱动风扇级(CDFS)的双涵道变循环航空发动机作为研究对象,其结构如图1所示。

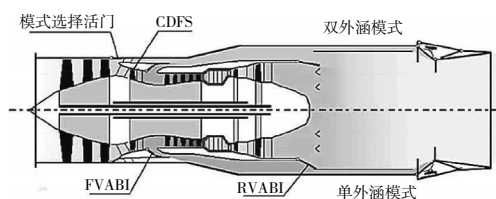


图1 发动机结构

从图中可见,相较于普通航空发动机,变循环发动机增加了模式选择活门、核心级风扇(CDFS)、前可调面积涵道引射器(FVABI)以及后可调面积涵道引

射器(RVABI)。

文献[7]中的 XTE76 发动机的主控系统结构如图2所示(总体控制结构见文献[7])。为了简化控制器设计,整个控制系统采用双变量分块和单变量分块的二一分块控制方式,控制器之间相互独立。

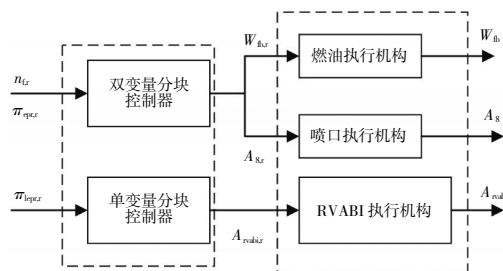


图2 XTE76 发动机的主控制器结构

双变量分块控制输入为燃油量 W_{fb} 和尾喷管面积 A_8 , 被控制输出为低压转子转速 n_f 和发动机压比 π_{lepr} ; 单变量分块控制输入为后涵道引射器面积 A_{rvabi} , 输出为外涵出口与内涵出口总压之比 π_{lepr} 。

由于2个分块之间相互独立,可以按照传统的双变量控制方法和单变量控制方法分别设计控制器,对发动机进行控制。然而由于变循环发动机是1个复杂的被控对象,变量之间存在着不可忽略的耦合,2个分块之间必然相互影响,为此本文开展2个分块之间解耦的控制方法研究。

2 分块之间解耦的控制方法

实际发动机在工作时, W_{fb} 和 A_8 的变化会引起 π_{lepr} 的变化,同样 A_{rvabi} 的变化也会引起 n_f 和 π_{lepr} 的变化。在设计点采用小扰动法进行输出对输入变化的灵敏度分析,对各输入分别施加1%的小阶跃,记录输出相对输入的变化量,得到 $\frac{\pi_{lepr}}{W_{fb}} = -0.21$, $\frac{\pi_{lepr}}{A_8} = 0.0643$, $\frac{n_f}{A_{rvabi}} = -0.49$, $\frac{\pi_{lepr}}{A_{rvabi}} = -0.28$ 。可见虽然喷口变化引起 π_{lepr} 的变化较小,但其他变量引起另外分块输出均在20%以上,为此需要对分块控制器进行解耦研究。

首先进行双变量分块的控制器设计,将 A_{rvabi} 视为干扰量,抑制其对 n_f 和 π_{lepr} 的影响。考虑各执行机构动态,得到按输出分块之后的被控对象模型

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= A_1 x_1 + B_{11} u_{1r} + B_{12} u_{2r} \\ y_1 &= C_1 x_1 + D_{11} u_{1r} + D_{12} u_{2r} \\ y_2 &= C_2 x_1 + D_{21} u_{1r} + D_{22} u_{2r} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $x_1 = [W_{fb} \ A_8 \ A_{rvabi} \ n_f \ n_c]^T$, 为双变量分块的状态变量; $\dot{x}_1$ 为状态变量的 1 阶导数; $u_{1r} = [W_{fbr} \ A_{8r}]^T$, 为燃油量和尾喷口面积指令; $u_{2r} = A_{rvabi,r}$ 为 RVABI 指令; $y_1 = [n_f \ \pi_{eqr}]^T$, 为双变量分块的输出; $y_2 = \pi_{leqr}$, 为单变量分块的输出。

应用现代控制理论, 采用状态反馈控制方法, 并考虑鲁棒跟踪性能和干扰抑制能力, 在控制系统的前向通路中引入输入信号的内模。由于输入信号在稳态的值恒定, 因此可以将其理想化为阶跃信号, 则其内模表现为串联在前向通路中的 1 个积分环节, 得到闭环系统控制结构如图 3 所示^[12]。

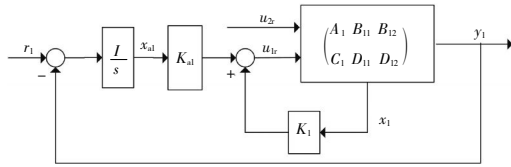


图 3 双变量分块控制器结构

从图中可见, 状态反馈控制率为

$$u_{1r} = [K_1 \ K_{al}] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_{al} \end{bmatrix} = K_1 x_1 + K_{al} x_{al} \quad (2)$$

式中: K_1 为 x_1 的状态反馈矩阵; K_{al} 为 x_{al} 的状态反馈矩阵; x_{al} 为误差的积分。

则其状态反馈控制律的设计模型为

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \bar{A}_1 \bar{x}_1 + \bar{B}_{11} u_{1r} + \bar{B}_{12} u_{2r} \\ y_1 &= \bar{C}_1 \bar{x}_1 + D_{11} u_{1r} + D_{12} u_{2r} \end{aligned} \quad (3)$$

将式(2)带入式(3)得到闭环系统模型为

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= A_{1c} \bar{x}_1 + B_{11c} r_1 + \bar{B}_{12} u_{2r} \\ y_1 &= C_{1c} \bar{x}_1 + D_{12} u_{2r} \\ y_2 &= C_{2c} \bar{x}_1 + D_{22} u_{2r} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $A_{1c} = \begin{bmatrix} A_1 + B_{11}K_1 & B_{11}K_{al} \\ -C_1 - D_{11}K_1 - D_{11}K_{al} \end{bmatrix}$; $B_{11c} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}$; $C_{1c} = [C_1 + D_{11}K_1 \ D_{11}K_{al}]$; $C_{2c} = [C_2 + D_{21}K_1 \ D_{21}K_{al}]$; A_{1c} , B_{11c} , C_{1c} , C_{2c} 为闭环系统模型的系数矩阵。

常用的状态反馈控制方法包括极点配置方法和线性二次型调节器(LQR)方法^[14], 对于多变量系统, 给定 1 组期望的闭环极点, 其状态反馈控制器不惟一, 且零点对系统性能也会产生较大的影响, 为此本文以 LQR 控制方法求解状态反馈控制器, 控制目标为输出 y_1 能够快速输入信号 r_1 的变化, 并且超调量小, 同时能够有效抑制 u_{2r} 对 y_1 的影响, 因此定义控

制系统的性能指标为

$$\begin{aligned} \min J_1 &= \int_0^t \|r_1(t) - y_1(t)\|^2 dt + \rho_1 \sigma_1 \\ \min J_2 &= \|T_{y_1 u_{2r}}(s)\|_\infty \end{aligned} \quad (5)$$

式中: ρ_1 为超调惩罚系数; σ_1 为超调量; $T_{y_1 u_{2r}}(s)$ 为从 u_{2r} 到 y_1 的闭环传递函数。

性能指标 J_1 反映了对输出跟踪和无超调的性能要求, 性能指标 J_2 通过无穷范数反映了对干扰抑制的性能要求。能够快速响应的系统通常带宽较大, 对干扰抑制不利, 因此 J_1 和 J_2 为 1 对互相矛盾的性能, 在控制器设计过程中, 需要均衡考虑二者对系统性能的影响, 适合采用多目标优化方法对问题进行求解。由于本文采用 LQR 方法计算状态反馈控制器参数, 为此待优化参数为 LQR 控制器的加权矩阵 Q , R , 其为状态量和控制量的加权, 对于本文所研究的系统, 所形成的二次型指标为

$$J = \frac{1}{2} \int_0^t \bar{x}_1^T(t) Q \bar{x}_1(t) + u_{1r}^T(t) R u_{1r}(t) dt \quad (6)$$

则 $Q \in R^{7 \times 7}$, $R \in R^{2 \times 2}$ 。

将 Q , R 矩阵视为对角阵, 则共有 9 个待优化参数, 采用改进的 NS-SOMA 多目标优化算法对参数进行优化。区别于单目标优化算法, 多目标优化算法在选择算子之前根据个体之间的支配与非支配关系进行排序, 其非支配解集形成 Pareto 前沿面。在 Pareto 前沿面上的解均具有较好的性能, 而本节主要针对分块解耦研究, 所以选择 Pareto 前沿面上干扰抑制能力最优的个体形成 Q , R 矩阵, 进行控制器设计, 得到如式(2)所示的状态反馈控制律, 进而形成如式(4)所示的闭环控制系统。

在完成双变量分块设计的基础上, 进一步开展单变量分块控制器设计, 其基于内模原理的控制系统结构如图 4 所示。从图中可见, 此时的单变量分块为以 u_{2r} 为输入、 y_2 为输出、 r_1 为干扰的被控对象, 与式(4)的相同。

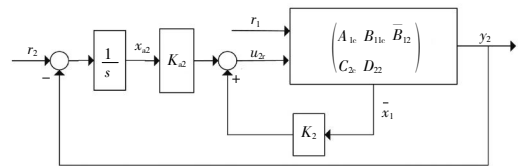


图 4 单变量分块控制器结构

状态反馈控制率为

$$u_{2r} = [K_2 \ K_{a2}] \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ x_{a2} \end{bmatrix} = K_2 \bar{x}_1 + K_{a2} x_{a2} \quad (7)$$

则可以采用与双变量分块相同的控制方法进行控制器参数的优化设计。采用解耦方法之后的控制系统结构如图5所示。

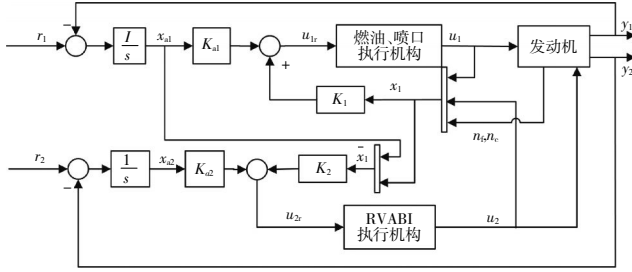


图5 分块解耦控制系统结构

3 3 变量不分块控制方法

分块解耦控制是将2个分块之间的耦合关系作为外部干扰处理,而文献[7]中的设计方法没有考虑2个分块之间的耦合,在耦合较小的情况下可以采用这种控制结构;若耦合较大,采用不分块的综合设计更易获得良好的性能。为此本文还研究了3输入、3输出的综合控制方式,即将式(1)中的输入输出合并考虑,由于变循环发动机控制过程中通常保持 π_{eqr} 为常数^[6-7],为此在3变量综合控制中,优化的目标为

$$\begin{aligned} \min J_1 &= \int_0^t \|r_1(t) - y_1(t)\|^2 dt + \rho_1 \sigma_1 \\ \min J_2 &= \int_0^t \|0 - y_2(t)\|^2 dt + \rho_2 \sigma_2 \end{aligned} \quad (8)$$

式中: σ_2 为最大耦合响应幅值; ρ_2 为惩罚系数。

若想使 y_1 能够快速无超调跟踪 r_1 ,势必会引起 y_2 较大的耦合响应,为此二者同样为1对矛盾的指标,同样适合采用多目标优化的方法进行控制器设计。本文采用与双变量分块相同的设计方法进行控制器设计,只是将评价指标改成了式(8),以改进的NS-SOMA进行控制器参数优化,实现基于多目标优化的控制回路之间的解耦。

4 基于 NS-SOMA 的控制器参数优化

自组织迁移算法是1999年提出的1种模拟社会环境下群体自组织行为的新群体智能算法^[15],具有需要设置的参数少、收敛速度快的特点。由于多变量控制器对应矩阵元素较多且元素取值差异较大,NSGA II优化时速度较慢,影响了收敛的速度和精度,为此本文采用自组织迁移算法代替传统的遗传算法。SOMA通过改变粒子的位置实现对最优解的逼近。种群中的最优个体称之为种群领导者^[16]。在每次迭代过

程中,除了领导者以外的所有个体均向领导者的方向迁移,每次迭代之后更新种群领导者。SOMA算法的变异与其他进化算法不同,通过参数PRT获得摄动。这个参数的意义跟遗传算法中的变异一样。

SOMA算法以种群领导者为方向,对其他个体进行迁移,迁移过程如下:

(1) 根据个体维数,随机生成介于0~1之间的值,若该数值小于参数 P_{PRT} ,摄动向量 P_v 对应元素为1,否则为零。

(2) 生成迁移后的个体

$$x_{\text{temp}} = x_i + S_{\text{step}} \cdot (x_{\text{leader}} - x_i) \cdot P_v$$

(3) 贪婪选择。计算适应度值 $f(x_{\text{temp}})$; 若 $f(x_{\text{temp}}) < f(x_i)$,则将 x_{temp} 赋予 x_i 。

(4) 增加迁移步长 $S_{\text{step}} = S_{\text{step}} + S_{\text{step}}$,若 $S_{\text{step}} > P_p$,则当前粒子迁移结束,否则转(1)。

由此可见,基本SOMA算法解决的是单目标优化问题,因此具有领导者,也就是全局最优粒子,而对于多目标优化来说,没有最优个体,为此需要对其进行改进。本文对每个即将迁移的粒子进行非支配排序,从支配序为1的个体中随机选择1个个体为领导者,则不同的粒子具有更大的机会向不同领导者迁移,可以确保种群的多样性,同时确保领导者本身的优越性。为了提高算法的收敛速度,记支配序为1的个体形成前沿面中间位置的个体为 $x_{1,\text{mid}}$,以个体与其的欧氏距离为评价标准 $\text{dist} = \|x_i - x_{1,\text{mid}}\|_2$,从中均匀选出部分粒子进行迁移,避免了迁移所有粒子影响收敛速度,同时可以设置较大的初始种群规模,以获得解的多样性。

为验证改进后的NS-SOMA的有效性,采用3个典型多目标优化算法对函数ZDT1、ZDT2、ZDT3进行测试^[17],设定初始种群数为100,根据距离,每隔10个粒子选择1个进行迁移,则每代有10个粒子参加迁移,迁移步长 $S_{\text{step}}=0.11$,最大迁移路径 $P_p=3$,摄动参数 $P_{\text{PRT}}=0.9$ 。当允许适应度函数调用次数为10万次时,3个测试函数获得的Pareto前沿均收敛于已知Pareto最优解 P^* 上,ZDT3的对比如图6所示。以GD指标评价其收敛精度(GD指标为Pareto解集与已知Pareto最优解的距离),允许的适应度函数调用次数分别设为10万次、3万次和1万次,每种情况运行10次优化程序计算平均GD指标,其结果与文献[18]中的结果(支配的自组织迁移算法(EMSOMA)及经典

NSGAII 算法结果的对比见表 1。

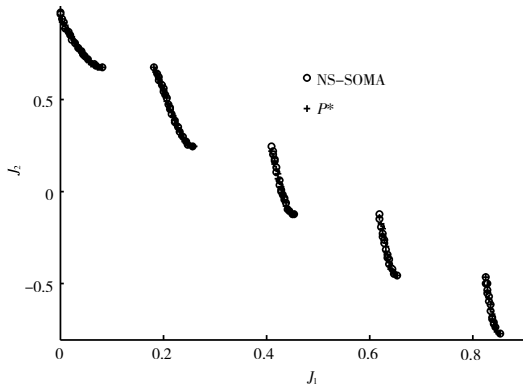


图 6 ZDT3 的 Pareto 前沿效果

表 1 NS-SOMA 的 GD 指标对比

算法	评价 次数 / 万次	测试函数		
		ZDT1	ZDT2	ZDT3
NSGAII	10	2.47×10^{-2}	1.00×10^{-3}	1.97×10^{-2}
EMSOMA	10	2.42×10^{-4}	2.27×10^{-4}	4.70×10^{-6}
	10	1.58×10^{-4}	9.13×10^{-5}	6.15×10^{-4}
NS-SOMA	3	2.02×10^{-4}	9.35×10^{-5}	6.26×10^{-4}
	1	2.10×10^{-4}	1.26×10^{-4}	5.321×10^{-4}

从表中可见,所提出的改进 NS-SOMA 算法在测试函数 ZDT1 和 ZDT2 上获得的 GD 值更小,解集更接近 Pareto 最优解。在 ZDT3 上的 GD 值大于采用 EMSOMA 算法得到的,但也远小于采用 NSGAII 算法得到的,同时发现在 ZDT3 上,调用评价函数 1 万次的 GD 值反而小于 3 万次和 10 万次的,进一步研究发现,此时解比较密集,其拥挤度指标比较差。改进的 NS-SOMA 算法仅需要较少的评价函数调用次数就能取得优秀的解,验证了其在收敛精度和速度上的优越性。实际上,SOMA 算法与同样通过改变粒子位置来实现进化的粒子群算法相比,其在多目标优化上的效果也具有明显优势^[19],但其获得的关注度远低于粒子群算法。

以此多目标优化算法优化分块解耦控制器参数和不分块的综合控制器参数,优化流程如图 7 所示。参数设置与测试时相同,以其干扰抑制效果最佳的 Q, R 值设计状态反馈控制器。

5 仿真对比验证

首先基于控制器设计所用的状态变量模型对解耦控制器与不分块综合控制器的动态跟踪性能和解

耦性能进行对比验证。状态变量模型采用经典的拟合法建立^[20],具有较高的精度。在模型中, n_f, π_{lepr} 阶跃 1%, π_{lepr} 不阶跃,线性模型输出响应曲线如图 8 所示。从图中可见,不分块系统获得了更快的响应速度,其上升时间和调节时间明显小于分块解耦控制系统的,其 π_{lepr} 耦合最大幅值虽然大于分块解耦控制系统的,但其波动幅度却明显小于分块解耦控制系统的。

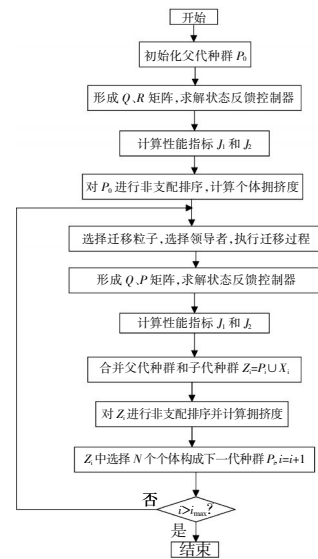


图 7 改进 NS-SOMA 算法流程

为了进一步对比控制器效果,将通过优化获得的分块解耦控制器、不分块综合控制器与文献[7]中分块控制器(分块控制器仅以最优跟踪进行单目标优化)进行控制效果对比,在变循环发动机部件级数学模型^[2]上开展仿真验证,该模型能够完整模拟变循环发动机模式切换过程,并且在飞行包线内、不同工作模式下的性能符合变循环发动机基本性能规律。在高度 $H=0$ km、马赫数 $Ma=0$ 、 $n_f=100\%$ 的状态下, $t=2$ s 时,保持 π_{lepr} 不变,

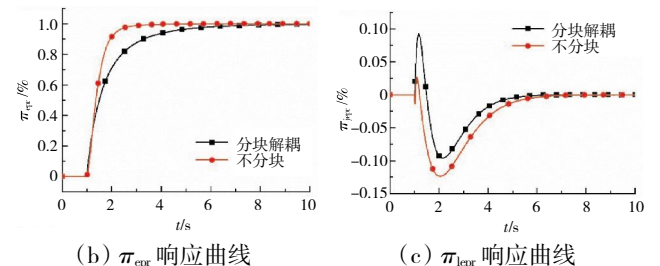


图 8 线性模型输出响应

n_f 、 π_{eqr} 同时阶跃 1%, 各输出响应如图 9 所示。

从图中可见, 在 3 种控制结构下, n_f 、 π_{eqr} 均实现了对阶跃 1% 目标的快速跟踪, 不分块控制系统在综合响应速度上占优势。观测 2 个变量阶跃引起的 π_{leqr} 耦合, 可见分块系统的耦合最大幅值约为 0.25%, 分块解耦之后耦合降低到 0.2%, 不分块解耦之后耦合降低到 0.175%, 与分块控制系统相比, 最大耦合降低 30%, 且随着最大耦合幅值的减小, 耦合的作用时间也减短, 从而说明采用多变量综合控制的方式能够有效抑制回路之间的耦合, 同时也说明本文所提出的多目标优化解耦控制方法的有效性。

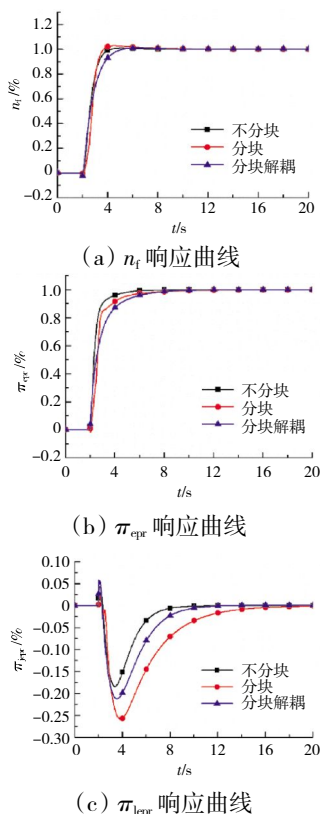


图9 部件级模型输出响应

6 结束语

本文针对变循环发动机的多变量控制结构, 在国外采取的 3 变量 2 个分块控制的基础上, 研究了 2 个分块之间的解耦控制方法和 3 变量综合控制的解耦方法, 提出了基于改进 NS-SOMA 的多目标优化解耦控制方法, 根据欧式距离选择迁移粒子, 提高了算法的收敛速度和寻优精度。针对 3 种控制结构在变循环发动机上开展了仿真验证, 结果表明分块解耦控制方法能够降低回路之间的耦合, 不分块综合解耦控制方法更能够发挥多变量控制系统的性能效益, 取得了更好的解耦控制效果。

参考文献:

- [1] 苟学中, 周文祥, 黄金泉. 变循环发动机部件级建模技术[J]. 航空动力学报, 2013, 28(1): 104-111.
- GOU Xuezhong, ZHOU Wenxiang, HUANG Jinqian. Component-level modeling technology for variable cycle engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(1): 104-111. (in Chinese)
- [2] 王元, 李秋红, 黄向华. 变循环发动机建模技术研究[J]. 航空动力学报, 2013, 28(4): 954-960.

- WANG Yuan, LI QiuHong, HUANG Xianghua. Reserach of variable cycle engine modeling techniques [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(4): 954-960. (in Chinese)
- [3] Przybylko S, Rock S. Evaluation of a multivariable control design on a variable cycle engine simulation [C]// Joint Propulsion Conference. Reston: AIAA, 1982: 1-7.
- [4] Adibhatla S, Johnson K. Evaluation of a nonlinear PSC algorithm on a variable cycle engine [C]// Joint Propulsion Conference. Reston: AIAA, 1993: 1-7.
- [5] Shutler A G. Control configuration design for the aircraft gas turbine engine [J]. Computing & Control Engineering Journal, 1995, 6(1): 22-28.
- [6] Frederick D K, Garg S, Adibhatla S. Turbofan engine control design using robust multivariable control technologies [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8(6): 961-970.
- [7] Abidhatla S, Collier G, Zhao X, et al. H-infinity control design for a jet engine[R]. AIAA-98-3753.
- [8] 李嘉, 李华聪, 韩小宝, 等. 基于射影算子的变循环发动机鲁棒自适应控制器设计[J]. 推进技术, 2018, 39(2): 440-449.
- LI Jia, LI Huacong, HAN Xiaobao, et al. Robust adaptive controller design of variable cycle engine based on projection [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(2): 440-449. (in Chinese)
- [9] 李嘉, 李华聪, 韩小宝, 等. 建模不确定性下变循环发动机自适应控制器设计[J]. 推进技术, 2018, 39(4): 872-880.
- LI Jia, LI Huacong, HAN Xiaobao, et al. Adaptive controller design with modeling uncertainties of variable cycle engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(4): 872-880. (in Chinese)
- [10] 王元. 变循环发动机建模及性能寻优控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- WANG Yuan. Research on modeling techniques and performance seeking control of variable cycle engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [11] 聂友伟, 李秋红, 王元, 等. 基于 SQCP 算法的变循环发动机性能寻优控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(12): 2564-2572.
- NIE Youwei, LI QiuHong, WANG Yuan, et al. Variable cycle engine performance seeking control based on SQCP algorithm [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(12): 2564-2572. (in Chinese)
- [12] 梅小华, 郑力新, 周凯汀. 多变量系统调节器参数的优化设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2005(2): 134-137.
- MEI Xiaohua, ZHENG Lixin, ZHOU Kaiting. Optimization design of regulator parameters for multivariable systems [J]. Journal of Huaqiao University(Natural Science), 2005(2): 134-137. (in Chinese)
- [13] 张葛祥, 金炜东, 胡来招. 多变量系统中多参数多目标满意优化研究[J]. 信息与控制, 2003(6): 481-485.
- ZHANG Gexiang, JIN Weidong, HU Laizhao. Satisfactory optimization of multi-parameters and multi-objective in multivariable system[J]. Information and Control, 2003(6): 481-485. (in Chinese)
- [14] Chen C T. Linear system theory and design [M]. Oxford: Oxford University Press, 1999: 231-233.

- [15] Dipti S, Seema A. Self organizing migrating algorithm with quadratic interpolation for solving large scale global optimization problems [J]. Applied Soft Computing, 2016, 38: 1040–1048.
- [16] Seema A, Dipti S. Modified Nelder–mead self organizing migrating algorithm for function optimization and its application [J]. Applied Soft Computing, 2017, 51: 341–350.
- [17] 王元, 李秋红, 黄向华, 等. 基于改进 NSGA II 的航空发动机 LQ/H ∞ 控制器设计[J]. 航空动力学报, 2015, 30(4): 985–991.
WANG Yuan, LI Qiuhong, HUANG Xianghua, et al. LQ/H ∞ controller design for aero-engine based on improved NSGA II [J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(4): 985–991. (in Chinese)
- [18] 林志毅, 王玲玲. 一种基于 ε -支配的多目标自组织迁移算法[J]. 控制与决策, 2014, 29(12): 2177–2182.
LIN Zhiyi, WANG Lingling. A new ε -dominance based multi-objective self-organizing migrating algorithm[J]. Control and Decision, 2014, 29(12): 2177–2182. (in Chinese)
- [19] 胡旺, YEN G G, 张鑫. 基于 Pareto 熵的多目标粒子群优化算法[J]. 软件学报, 2014, 25(5): 1025–1050.
HU Wang, YEN G G, ZHANG Xin. Multiobjective particle swarm optimization based on pareto entropy [J]. Journal of Software, 2014, 25(5): 1025–1050. (in Chinese)
- [20] 冯正平, 孙健国, 黄金泉, 等. 一种建立航空发动机状态变量模型的新方法[J]. 航空动力学报, 1998(4): 86–89, 114.
FENG Zhengping, SUN Jianguo, HUANG Jinquan, et al. A new method for establishing state variable model of aeroengine [J]. Journal of Aerospace Power, 1998(4): 86–89, 114. (in Chinese)

(编辑: 刘 静)