

1种N-dot过渡态PI控制律的设计方法

王曦^{1,2}, 党伟^{1,2}, 李志鹏^{1,4}, 胡忠志³, 殷铠³, 张荣³

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191; 2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191;

3. 中国商用航空发动机有限责任公司, 上海 200108; 4. 中航工业航空动力控制系统研究所, 江苏无锡 214063)

摘要: 转子加速度的过渡态控制律已应用于先进的航空发动机控制系统的设计中, 以改善过渡态的加减速性能, 其优点在于N-dot控制计划能够保证同一型号发动机加减速性能的一致性, 而不随发动机加工制造误差、材料差异及部件性能退化等因素变化。针对双转子涡扇民用发动机, 提出了1种N-dot过渡态控制律的设计方法, 基于差分进化算法, 在发动机慢车到最大状态对应的若干稳态工作点, 设计了相应的N-dot PI控制律, 采用增益调度计划构建了全飞行包线内的N-dot过渡态控制律。在发动机性能退化的情况下, 对N-dot闭环过渡态控制与油气比开环过渡态控制的加速性能进行了仿真。仿真结果表明: N-dot闭环过渡态控制性能优于油气比开环过渡态控制性能。

关键词: 过渡态控制律; 转子加速率控制; 差分进化算法; 增益调度; 航空发动机

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2015.06.001

A Design Method of N-dot Transient State PI Control Laws

WANG Xi^{1,2}, DANG Wei^{1,2}, LI Zhi-peng^{1,4}, HU Zhong-zhi³, YIN Kai³, ZHANG Rong³

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China; 3. AVIC Commercial Aircraft Engine CO., LTD. Shanghai, 200108 China; 4. AVIC Aviation Motor Control Research Institute, Wuxi Jiangsu 214063, China)

Abstract: Transient state control law based on rotor acceleration has been used in many advanced aeroengine to improve the performance of transient process. Under this control mode, the acceleration and deceleration performances for same type engines are consistent, not change with manufacture, materials and performance degradation. A design method of N-dot transient controller for a two-spool civil turbofan engine was proposed. Using differential evolution algorithm for corresponding set-points of engine from idle to maximum rotor speed, a set of PI controllers which constitute a control component using gain scheduling were designed. When performance of aeroengine deteriorated the acceleration performance between N-dot control and W_f/P_{33} control was simulated and compared. Simulation results show that the N-dot control method is more suitable in transient process of aeroengine.

Key words: transient state control law; rotor acceleration control; differential evolution algorithm; gain scheduling; aeroengine

0 引言

几十年来, 工程上常采用开环油气比(W_f/P_{33})的设计方法实现航空发动机慢车以上过渡态加减速控制和起动过渡态加速控制, 如 A Π-31Φ 双转子加力涡扇发动机。这种控制律存在以下问题: 发动机性能会随着飞行时数的延长, 或因发动机制造、加工、装配等原因, 出现不同程度的退化和衰减, 按油气比的加减速控制律设计的控制器会使过渡态性能降低, 最终

影响飞机的性能; 另外, 在发动机起动过程中, 油气比加速起动控制律性能的好坏随不同的地域、气候环境条件变化, 在平原地区可能成功率高, 但在高原环境条件下, 起动成功率可能很低; 在温和的春、秋季环境条件下, 起动性能可能很好, 但在炎热的夏季或寒冷的冬季, 起动性能可能变得很差, 这显然难以满足飞机对发动机起动性能的技术要求。

相比油气比过渡态控制律, 欧美国家普遍使用

收稿日期: 2015-06-18

作者简介: 王曦(1961), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为航空发动机控制; E-mail: xwang@buaa.edu.cn。

引用格式: 王曦, 党伟, 李志鹏, 等. N-dot过渡态PI控制律设计问题[J]. 航空发动机, 2015, 41(6): 1-5. WANG Xi, DANG Wei, LI Zhipeng, et al. Design problem of N-dot transient state PI controller laws[J]. Aeroengine, 2015, 41(6): 1-5.

$N\text{-dot}$ 闭环控制律^[1-3],其最突出的优点在于能够把握发动机过渡态期间的非线性时变特性,按能够代表发动机时变特性的转速变化率设计闭环加速控制律,实现按发动机转子转速加速度的需求自动调节燃油流量以匹配发动机涡轮和压气机在不同环境条件下所具有的剩余功率,充分反映发动机的过渡态所要求的本质特性,从根本上克服上述油气比开环控制律中存在的内在缺陷,而不会因发动机制造、加工、装配的不确定性以及元器件老化导致的性能退化和衰减影响过渡态加减速性能。此外,该方法还可以使发动机在起动过渡态下具有更好的环境适应性。

本文针对 $N\text{-dot}$ 闭环控制律的设计问题进行了方法性的探讨,采用 PI 控制器构建了 $N\text{-dot}$ 闭环控制回路,基于差分进化算法对性能约束优化目标进行求解,获得了 $N\text{-dot}$ 闭环 PI 控制器参数的优化结果。在设计过程中考虑了执行机构、传感器、滤波器的动态特性,以考察与工程相一致的设计效果。最后,与油气比开环过渡态控制律的性能进行了仿真对比,结果显示,这种方法能显著地提高发动机的过渡态性能。

1 $N\text{-dot}$ 闭环 PI 控制器

1.1 $N\text{-dot}$ 闭环 PI 控制回路结构

以双转子不加力分开排气喷口不可调涡扇发动机为研究对象,构建 $N\text{-dot}$ 闭环 PI 控制回路(考虑到 PI 控制的结构简单,本文未采用相对结构较为复杂的 PID 控制方案),如图 1 所示。考虑到发动机过渡态的非线性时变特性,为使其具备更好的加减速环境适应性,将 $N\text{-dot}$ 加减速控制计划设计为发动机进口温度和高压转子转速的函数^[2]。

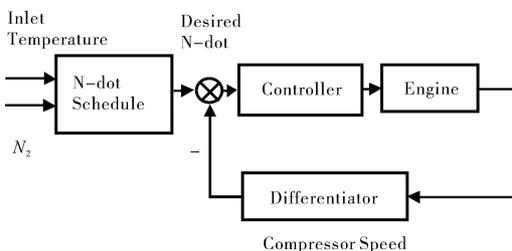


图 1 $N\text{-dot}$ 闭环 PI 控制回路结构

过渡态控制有多种控制器设计方案可供选择,如滑模控制^[6]、模糊控制^[7]等,为使过渡态控制与稳态控制易于切换,并考虑到切换前后不同的抗积分保护效果,采用 PI 结构能够在切换过程中通过积分冻结处理达到这一设计目标。

1.2 差分进化算法

$N\text{-dot}$ 前向回路中存在 1 个虚轴上的零点,且控制回路中不可避免地存在非线性特性,如执行机构的位置饱和、速率饱和等非线性特性等,本文选择差分进化优化算法进行设计。

差分进化算法是遗传算法的变种,其原理简单易实现、收敛速度快,是 1 种不需要初始信息就可以寻求全局最优解的优化方法。该算法基于种群内的个体差异度生成临时个体,然后随机重组实现种群进化,具有很好的全局收敛性和鲁棒性。差分进化算法包括初始化、变异操作、交叉操作和选择操作几部分^[8],具体流程如图 2 所示。差分进化算法中的设置参数(如种群数量 NP、变异算子 F、交叉算子 CR 等)的选取对差分进化算法的性能有着重要影响。

鉴于差分进化算法的优化效果,对求解 $N\text{-dot}$ 闭环 PI 控制器的参数进行探讨。

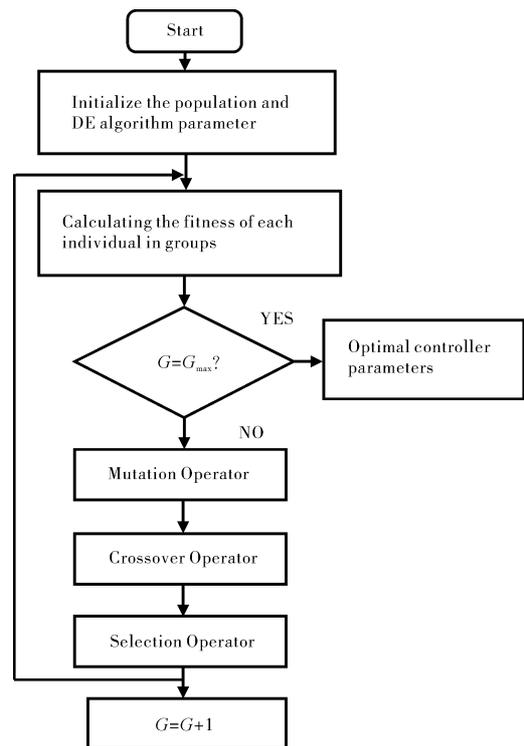


图 2 差分进化算法流程

2 PI 控制器的差分进化优化

发动机动态特性主要由机械转子动力学的惯性效应和温度动力学的能量储存效应决定^[4]。温度动力学的能量储存效应由容腔内燃气热力学状态改变引起的快速温度变化和发动机热端金属部件与燃气之

间的热传导引起的慢速温度变化构成,其动态响应时间相差 1 个数量级以上。考虑到本文研究的涡扇发动机在动态变化过程中,其动态特性主要受到高低压转子转速的惯性、温度变化范围大的高压涡轮机匣温度以及高压涡轮叶片温度的热惯性影响,同时考虑到燃油执行机构动态特性是时间常数为 0.05 s 的惯性环节,与其串联后增广为具有 5 阶动态的被控对象传递函数,在飞行高度为 0、飞行马赫数为 0,且发动机工作在慢车状态的情况下,从控制器输出的燃油流量指令到发动机高压转子转速的传递函数为

$$\frac{N_2(s)}{W_{f,cmd}(s)} = \frac{3346s^3 + 104300s^2 + 909000s + 2.45e006}{0.05s^5 + 2.698s^4 + 50.42s^3 + 381.1s^2 + 1054s + 311.4} \quad (1)$$

式中: N_2 为发动机高压转子转速, r/min; $W_{f,cmd}$ 为燃油流量指令, kg/h。

伺服跟踪的物理意义是要求发动机转速响应相对于目标指令转速的上下偏差分布,为了在优化过程中保证伺服跟踪性能和控制能量不出现非线性饱和限制问题,在优化目标中可采用对偏差取绝对值的加权,对控制输出取绝对值的加权反映对控制能量的限制,能有效防止控制输出的非线性饱和,反馈设计优化目标为

$$J = \int_{begin}^{end} (\lambda |e(t)| + (1-\lambda) |e(t)|) dt \quad (2)$$

考虑到上述被控对象传递函数中零点、极点的分布,选择差分算法 PI 参数的搜索范围为

$$K_i/K_p \in [0, 200], K_p \in [1e-5, 0.01]$$

设种群数量为 $N_p = 100$, 变异算子 $F = 1.2$ 、交叉算子 $C_R = 0.9$, 最大迭代次数 $G = 50$, 加权因子 $\lambda = 0.99$ 。

PI 控制器采用上述差分进化算法所求优化参数结果为 $K_p = 0.00105734$ $K_i = 79.545$ 。

按照上述差分进化算法求解的 PI 控制器仅适用于某一稳态工作点,而加速过渡态的范围起于慢车状态止于最大状态,对于这种参数变化较大的过渡态特性,用 1 个控制器很难满足其要求。因此,采用分段设计再增益调度的方法,从慢车状态到最大状态选择了 4 个稳态工作点进行设计,设计结果见表 1。N-dot 加

表 1 4 个工作点对应的控制器参数

| $(N_2/N_{2max})/\%$ | 55.8479 | 83.2033 | 91.9119 | 99.9736 |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|
| K_p | 0.00106 | 0.00132 | 0.00164 | 0.00169 |
| K_i/K_p | 79.545 | 54.778 | 53.966 | 79.755 |
| $P_M / (^\circ)$ | 63.004 | 70.657 | 74.109 | 65.079 |
| W_c / Hz | 14.5332 | 11.8658 | 14.01 | 15.0742 |

速控制器以发动机转子转速对其进行增益调度,即按插值或区域切换的方法可获得适用于整个过渡态工作范围的 N-dot 加速控制器。

在过渡态下 N-dot 控制以发动机转子转速的变化率为设计目标,未考虑加减速过渡态下发动机可能出现的压气机喘振、高压涡轮进口超温的问题, N-dot 控制自身不具备防止发动机进入喘振、超温、熄火的能力,发动机过渡态下转子转速加速率的限制边界条件如图 3 所示^[4]。

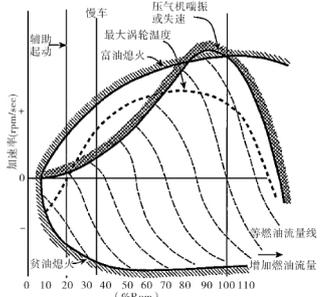


图 3 发动机过渡态转速加速率限制边界条件

考虑如图 3 所示的加减速过程中喘振、超温、熄火边界条件的的安全裕度限制,可得 N-dot 控制计划,如图 4 所示。

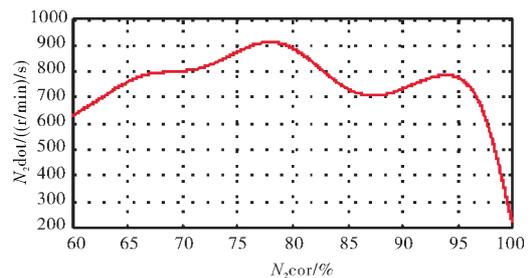


图 4 N-dot 控制计划

3 仿真分析

为了验证 N-dot 控制器的过渡态加速性能,构建如图 5 所示的包含稳态控制和过渡态控制的仿真结构,并加入 W_f/P_{33} 油气比加速规律,用来比较各自的加速控制性能。稳态与过渡态的状态切换采用低选逻辑设计,同时针对不同状态控制器工作时出现的积分饱和问题,采用积分冻结的抗积分保护策略,即在稳态控制器工作时,冻结 N-dot 加速控制器;而当 N-dot 加速控制器工作时,冻结稳态控制器。

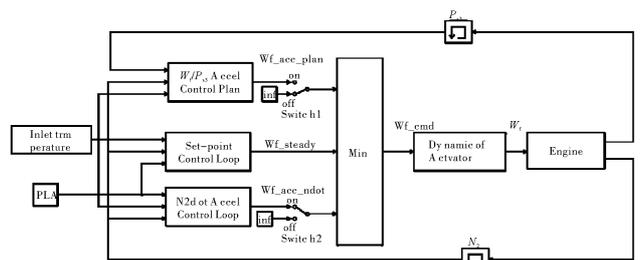


图 5 N-dot 控制仿真结构

设高压压气机和高压涡轮的效率均损失 5%，按图 5 的切换方式，置 W_f/P_{33} 油气比加速控制为关闭状态，接通 N-dot 控制器，作为 W_f/P_{33} 油气比加速验证方案 1；置 N-dot 控制器为关闭状态，接通 W_f/P_{33} 油气比加速控制，作为 N-dot 控制器验证方案 2；在地面状态下，从慢车状态的第 5 s 开始快推油门杆，在 1 s 内将油门杆推到最大状态的位置，分别按方案 1 和方案 2 在压气机和涡轮的效率均处于未衰减状态的情况下，按 W_f/P_{33} 油气比加速供油规律加速与按 N-dot 闭环控制规律加速获得的加速过程燃油流量动态响应曲线如图 6 所示。2 种工作方式下的燃油加速供油曲线比较接近，在第 8 s 时完成从加速过程到稳态过程的切换，随后进入最大状态的稳态控制。在压气机和涡轮的效率均衰减 5% 的情况下，按方案 1 油气比加速供油规律工作所得的燃油流量仿真曲线与按方案 2 的 N-dot 闭环控制器工作所得的燃油流量仿真曲线的对比如图 7 所示。通过对比 2 种不同的加速控制方案下供油量的变化(图 6 和图 7)中看出，发动机效率降低时，采用油气比加速供油规律的供油明显不足，不能充分发挥发动机的潜能。

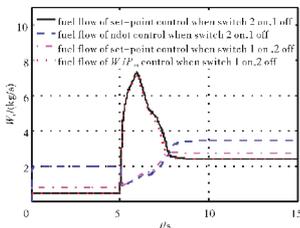


图 6 2 种工作情况下的燃油加速供油曲线

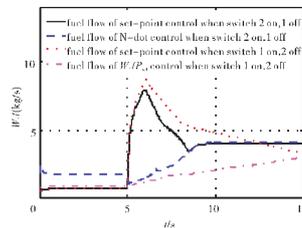
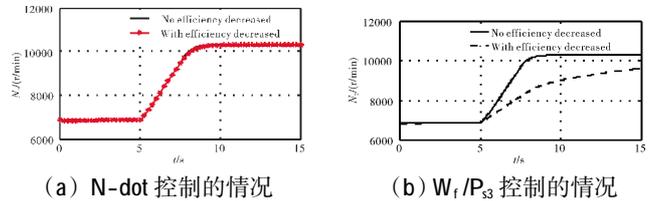


图 7 在压气机、涡轮效率衰减 5% 的情况下，2 种方式下燃油加速供油曲线

在 2 种不同的加速方案下高压转子转速 N_2 、排气温度 EGT(exhaust gas temperature)以及压气机喘振裕度响应曲线分别如图 8-10 所示。其中图 (a) 为 N-dot 控制律的工作情况，图 (b) 为油气比开环供油规律的工作情况，图 (a)、(b) 都加入了与发动机正常工作效率情况下的对比以验证控制策略的好坏。对比图 8(a)、(b) 可知，采用 N-dot 闭环控制器的加速控制方案时，无论气机和涡轮的效率是否有衰减，加速效果基本一致；而采用油气比加速供油规律时，在压气机和涡轮的效率出现衰减的情况下，加速性能明显变差。但是，采用 N-dot 闭环控制器的加速控制方案会带来排气温度的升高，压气机喘振裕度的减小，且变化程度大于采用油气比加速控制方案时的情况，如图 9、10

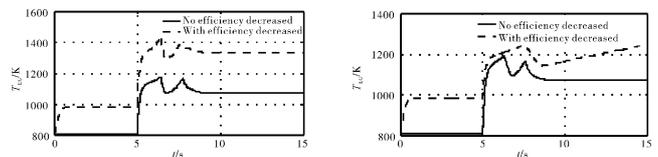
所示。因此在采用 N-dot 闭环控制器的加速控制方案时必须做好对各种参数(如转速、排气温度及喘振裕度等)的限制，即顶层管理，或称为限制保护控制。



(a) N-dot 控制的情况

(b) W_f/P_{33} 控制的情况

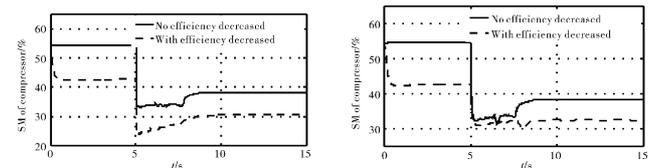
图 8 2 种方式工作情况下高压转子转速响应对比



(a) N-dot 控制的情况

(b) W_f/P_{33} 控制的情况

图 9 2 种方式下排气温度响应对比



(a) N-dot 控制的情况

(b) W_f/P_{33} 控制的情况

图 10 2 种方式下压气机喘振裕度响应对比

在加速过程中 N-dot 在发动机效率正常及衰减 2 种工作方式下的响应对比情况如图 11 所示。图中实线为 N-dot 控制指令曲线，虚线为压气机和涡轮的效率在正常情况和有衰减情况下的 N-dot 响应曲线。N-dot 控制采用了闭环策略，在加速过程中，控制策略不受发动机性能退化的影响，通过 N-dot 控制可以自发调节燃油流量保证 N-dot 信号的伺服跟踪，进而保证了发动机的加速性能不变。

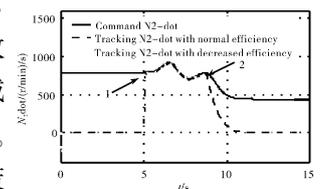
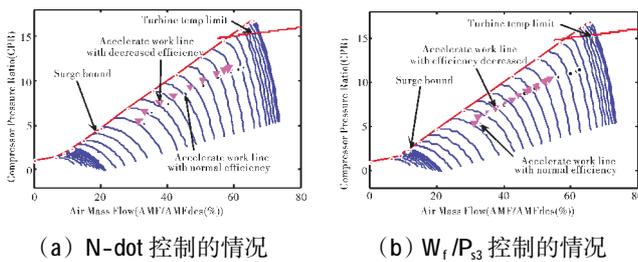


图 11 在加速过程中 N-dot 在 2 种工作方式下的响应对比

在压气机特性线上，绘制出采用 N-dot 闭环和油气比开环 2 种工作方式下的加速工作线，如图 12 所示。从图 12(a) 中可见，在 N-dot 控制律的加速情况下，当压气机和涡轮的效率衰减后，加速线更靠近喘振线和排气温度限制线，而采用 W_f/P_{33} 油气比供油规律的加速线基本与压气机和涡轮的效率未衰减情况下的加速线一致，这进一步论证了以上分析的正确



(a) $N\text{-dot}$ 控制的情况 (b) W_f/P_{33} 控制的情况
图 12 在压气机特性线上反映的 2 种工作方式下的加速工作线

性。

上述仿真对比分析表明:不论发动机性能是否退化,采用 $N\text{-dot}$ 闭环加速控制的策略,都能保证加速性能为最优,但是喘振裕度和排气温度裕度均有减小;与此相反,采用 W_f/P_{33} 油气比开环供油规律的加速控制策略,虽然喘振裕度和排气温度裕度减小不大,但不能保证加速快速性能。

发动机控制包括稳定控制、过渡态控制和限制保护控制(顶层管理)3部分。在工程实际中,限制保护控制逻辑保证了关键的气动热力参数不超出一定工作范围,与 $N\text{-dot}$ 加速控制策略配合,共同完成期望加速过渡态控制,使得这些关键参数在加速过程中能够保证各自的安全裕度,同时获得不随发动机性能退化而变化的加速性能。为了反映 $N\text{-dot}$ 加速控制的真实效果,在上述仿真中未加入压气机喘振裕度限制和排气温度限制的保护控制逻辑。

4 结论

提出了 1 种基于差分进化算法设计 $N\text{-dot}$ 加速控制律的方法,并采用增益调度的策略对双转子不加力分开排气喷口不可调涡扇发动机设计了 $N\text{-dot}$ 闭环加速控制器。在发动机性能退化的情况下与以 W_f/P_{33} 油气比开环供油规律的加速性能进行了仿真对比,结果表明 $N\text{-dot}$ 加速控制律不会因发动机性能的退化程度而降低加速性能。

在后续研究中,将考虑发动机气动热力参数的限制保护逻辑设计问题,以构建完整的 $N\text{-dot}$ 加速控制律。

参考文献:

[1] Parsons. D A. $N\text{-dot}$ schedules dynamic compensation system for gas turbines-inputs sum of speed and rate of change of speed of gas gen-

erator to schedule to output desired acceleration as function of generator speed :US, 5029441[P].1991-7-9.

- [2] Merrill W, Lehtinen B, Zeller J. The role of modern control theory in the design of controls for aircraft turbine engines [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1984, 7 (6):652-661.
- [3] Spang HA, Brown H. Control of jet engines [J]. Control Engineering Practice, 1999, 7 (9):1043-1059.
- [4] Link C J, Jack D M. Aircraft engine controls: design, system analysis, and health monitoring[M]. Alexander: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009: 118-124.
- [5] Deore P J, Patre B M. Design of robust compensator for jet engine: an interval analysis approach [C]// Control Applications, Proceeding of 2005 IEEE Conference, Toronto, 2005: 376-381.
- [6] Hanz R A. Multi-regulator sliding mode control strategy for output-constrained systems[J]. Automatica, 2011, 47(10): 2251-2259.
- [7] 董劲, 黄金泉. 航空发动机多变量模糊 PID 控制[J]. 航空动力学报, 2003, 18(4):538-541
- DONG Jin, HUANG Jinquan. Multivariable fuzzy-PID control for aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(4):538-541. (in Chinese)
- [8] Rainer Storn, Kenneth Price. Differential evolution—a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 22(11): 341-359.
- [9] 吴亮红, 王耀南, 袁小芳, 等. 自适应二次变异差分进化算法[J]. 控制与决策, 2006, 21(8):898-903.
- WU Lianghong, WANG Yaonan, YUAN Xiaofang, et al. Differential evolution algorithm with adaptive second mutation [J]. Control and Decision, 2006, 21(8):898-903. (in Chinese)
- [10] WU Lianghong, WANG Yaonan, ZHOU Shaowu, et al. Design of PID controller with incomplete derivation based on differential evolution algorithm[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2008, 19 (3):578-583.
- [11] Montazeri-Gh M, Jafari S. Evolutionary optimization for gain tuning of jet engine min-max fuel controller [J]. Journal of Propulsion and Power, 2011, 27(5):1015-1023.
- [12] KONG Xiangxing, WANG Xi, TAN Daoliang, et al. An extrapolation approach for aero engine's transient control law design [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(5):1106-1113.
- [13] Price K V. Differential evolution: a fast and simple numerical optimizer [C]// Biennial Conference of the North American, New York: 1996:524-527.
- [14] Eberhart R C, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory [C]// Proceeding of the Sixth International Symposium on, Nagoya: Micro Machine and Human Science, 1995:39-43.
- [15] Richter H. Advanced control of turbofan engines [M]. New York: Springer, 2011: 78-82.

(编辑:赵明菁)