

文章编号: 1000-8055(2024)11-20220321-10

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220321

考虑变负载效应的油电混合系统能量管理研究

赵 洋¹, 潘天宇¹, 郑孟宗¹, 李秋实^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 航空发动机研究院, 北京 102206;

2. 西华大学 流体及动力机械教育部重点实验室, 成都 610039)

摘 要: 以串联式结构作为航用油电混合系统能量管理方法研究的对象, 针对发动机不同的负载匹配形式对能量管理进行研究。基于 MATLAB/SIMULINK 软件搭建一套研究能量管理方法的仿真平台, 其中动力部件性能由实验获得, 分别搭建了以 PSO 算法为基础的全局优化策略以及基于 ECMS 的瞬时优化策略, 并应用于仿真平台。计算结果表明: 考虑发动机变负载的匹配形式后, 不同的能量管理方法下的耗油量相比于不变负载均有所降低, 在全局优化策略下降低了 6.27%; 在瞬时优化策略下降低了 7.4%。

关 键 词: 航用油电混合动力; 变负载; 能量管理; 全局优化; 瞬时优化

中图分类号: V279

文献标志码: A

Research on energy management of oil-electric hybrid system considering variable load effect

ZHAO Yang¹, PAN Tianyu¹, ZHENG Mengzong¹, LI Qiushi^{1,2}

(1. Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 102206, China;

2. Key Laboratory of Fluid and Power Machinery,

Ministry of Education, Xihua University, Chengdu 610039 China.)

Abstract: Taking the series structure as the research object of the energy management method of the aviation fuel-electric hybrid system, the energy management was studied according to different load matching forms of the engine. A simulation platform for studying energy management methods was built based on MATLAB/SIMULINK software, whereby the performance of power components was obtained by experiments. The global optimization strategy based on PSO algorithm and the instantaneous optimization strategy based on ECMS were built and applied to the simulation platform. The calculation results showed that after considering the matching form of engine variable load, the fuel consumption under different energy management methods was reduced compared with the constant load, and the global optimization strategy was reduced by 6.27%; the instantaneous optimization strategy decreased by 7.4%.

Keywords: oil-electric hybrid aircraft; variable load; energy management; global optimization; instantaneous optimization

航空活塞发动机以其燃料能量密度高、经济性好, 一直被作为通用航空领域动力首选。但是活塞发动机在与螺旋桨匹配时, 在部分工况下存

在效率低等问题^[1], 进而导致了飞机飞行时的运行效率低下。因此, 研究学者逐渐把目光投向航用油电混合系统, 该系统具有更高的灵活度、高

收稿日期: 2022-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(51976005, 52006002); 重点实验室基金项目(2022-JCJQ-LB-062-0101)

作者简介: 赵洋(1997—), 男, 硕士生, 研究领域为航空混合动力系统能量管理。

通信作者: 郑孟宗(1989—), 男, 助理研究员, 博士, 研究领域为仿生流体力学、混合动力系统。E-mail: zhengmengzong@buaa.edu.cn

引用格式: 赵洋, 潘天宇, 郑孟宗, 等. 考虑变负载效应的油电混合系统能量管理研究[J]. 航空动力学报, 2024, 39(11): 20220321. ZHAO Yang, PAN Tianyu, ZHENG Mengzong, et al. Research on energy management of oil-electric hybrid system considering variable load effect[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(11): 20220321.

效率和低燃油消耗等优点,可以较好地提升能源的利用率。对于油电混合系统,能量管理策略是决定混合动力系统动力性能、可靠性、燃油经济性和排放性的关键^[2]。目前混合动力能量管理策略可以分为两大类:基于规则的策略(rule-based strategies, RBSs)和基于优化的策略(optimization strategies, OBSs)。

针对基于规则的策略,黄波^[3]和刘文弢^[4]在对混合动力能量分配进行研究时,使用了确定规则以及模糊规则,对于发动机定转速下的控制取得了相较于原动力机型不错的燃油消耗节省;韩奎超^[5]在此基础上对门限值的设置引入了遗传算法,以此求解的门限值在某些工况下其燃油经济性上有了很大的提高,但是对于不同的工况,其节省的燃油量不同。该策略具有简单性、有效性等优点,但是其优化程度取决于门限值的设定以及实时的飞行任务,相同的门限值不能适用于任何工况。

针对基于优化的策略,又可以分为全局优化和瞬时优化。对于全局优化,Harmon 等人^[6-7]将 CMAC 神经网络应用在小型混合动力无人机上,利用全局优化的管理策略优化燃油消耗后,得到的燃油消耗值与原动力比较降低了 37.8%; Donateo 等人^[8]将动态规划(DP)应用在混合动力飞机中,目标为优化全局燃油消耗量,全局最优解与局部最优解相比相差很小; Geiss 等人^[9]运用了 MATLAB 中 fmincon() 函数对最优问题进行求解,在以燃油消耗最小为目标进行优化时,燃油消耗量较原系统降低了 3%。而对于瞬时优化,比较经典的是等效燃油消耗最小策略(equivalent consumption minimization strategy, ECMS),朱庆林^[10]从理论上推导了电池等效油耗的表达式,为 ECMS 的研究提供了理论基础;王春凯^[11]对油电混合动力汽车平台的能量管理方法应用了 ECMS 控制策略,采用一种相对简单的惩罚函数,建立了等效燃油因子与电量的关系,张树彬^[12]建立了离线下油电等效因子与电池初始电池电量以及行驶里程的 MAP。

总结上述研究可以发现能量管理策略可以提高油电混合动力系统的收益。但是前期针对油电混合动力系统能量管理策略的研究中,普遍是从方法本身对整个系统进行优化,以发动机匹配螺旋桨单一工作状态,即不变负载作为研究对象,没有对部件之间的匹配进行过系统的研究。对于

最为简单的串联式油电混合动力系统,发动机与发电机相连接,此时发动机的匹配形式发生了变化,如果仅考虑不变负载情况,并不能发挥串联式结构的最大优势,需要研究考虑发动机变负载下的工作状态。考虑到基于规则的策略依赖于门限值,为了减少经验对于实施效果的影响,本文利用全局优化以及瞬时优化策略,研究发动机的匹配形式对能量管理的影响,揭示发动机匹配变负载时的优势。

本文针对一个串联式油电混合动力系统,通过 MATLAB/SIMULINK 软件建立了仿真模型,利用实验方法得到动力部件的运行性能作为输入参数;在能量管理方法上,建立了以粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法为基础的全局优化策略和基于 ECMS 建立的瞬时优化策略;进而在发动机匹配不同负载下进行能量管理。从仿真结果上看,在相同的飞行任务下,发动机匹配变负载时的低燃油消耗率的时间普遍较长,且耗油量要明显优于匹配不变负载。

1 研究方法

本文基于 MATLAB/SIMULINK 软件搭建一套研究能量管理方法的仿真平台,其中动力部件性能由实验获得,能量管理策略则是包括以 PSO 算法为基础的全局优化策略以及基于 ECMS 的瞬时优化策略。

1.1 仿真平台模型搭建

本文所用的仿真平台基于 MATLAB/SIMULINK 软件进行搭建^[13-15]。

图 1 为串联式结构系统运行示意图,其中蓝色连接线代表物理连接,包括发动机连接发电机,电动机连接螺旋桨,考虑到发动机与发电机之间以及电动机与螺旋桨之间的转速匹配关系,相应的增加了减速器环节,示意图中未标注;黑色的连接线代表电力连接,发电机发出的交流电经过整流器输出直流电,直流电经过逆变器输出交流电,供给电动机运行,电池并联在直流母线上;红色的连接线为能量管理模块的控制线,螺旋桨的需求功率经过求解计算输入到能量管理模块中,经过控制策略将发动机的目标转速、发电机整流器输出的目标母线电压、逆变器的目标转速经过求解计算,控制到相应器件,包括发动机的转速控制和发电机的转矩控制,而发动机转速控制是通过调整节气门的开度来实现的。

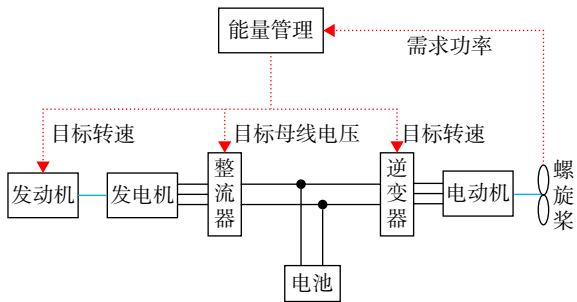


图 1 串联式结构系统运行示意图

Fig. 1 Schematic of serial structure system operation

根据图 1 串联式结构运行规律,在 SIMULINK 中搭建平台如图 2 所示。整个平台划分为 6 个部分——发动机模块、发电机模块、电动机模块、电池模块、螺旋桨模块、能量管理模块。发

动机与发电机通过减速器相连接,发出的交流电通过整流器并联到直流母线上,为电动机提供电能;电池并联到直流母线上为电动机提供电能;直流母线上的电流经过逆变器为电动机供电;电动机通过减速器为螺旋桨提供动力;能量管理模块的作用是根据螺旋桨的功率需求,调配发电机以及电池的能量分配情况。

本文主要研究发动机的匹配形式对能量管理的影响,上述模块中发动机、发电机、电动机等部件的性能通过实验获得,相关内容详见文中第 1.2 节;能量管理策略包括以 PSO 算法为基础的全局优化策略以及基于 ECMS 的瞬时优化策略,相关能量管理策略建模详见文中第 1.3 节和第 1.4 节。

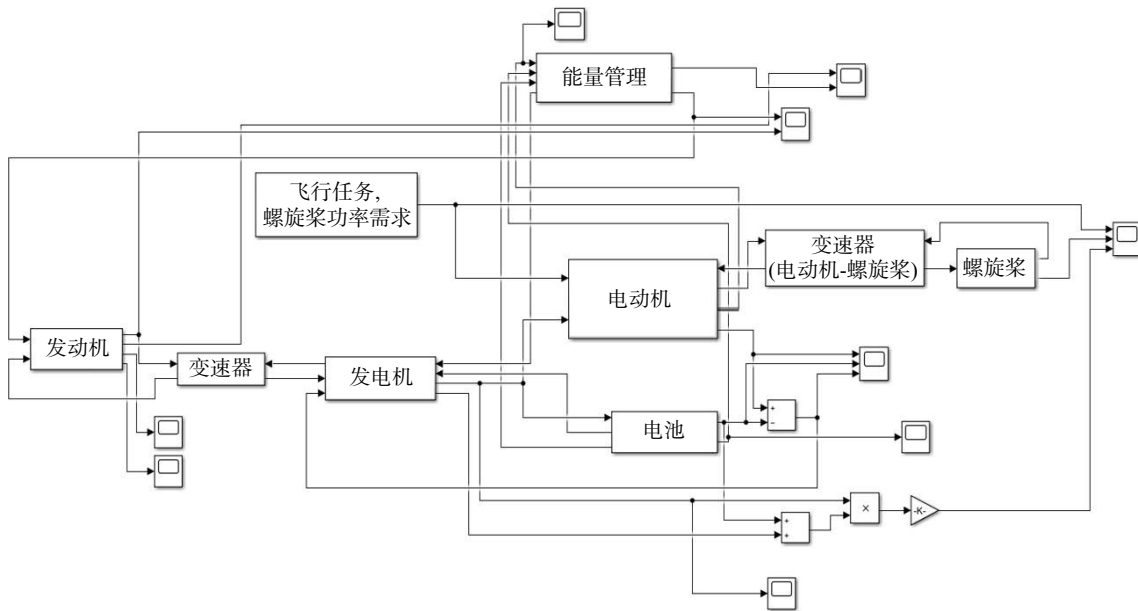


图 2 能量管理方法模型

Fig. 2 Model of energy management

1.2 混动系统部件性能实验结果

本文研究的串联式油电混合系统的原型机为领航者 JA600,动力由 Rotax912ULS 活塞发动机单独提供,实验室搭建的油电混合动力系统参考原型机的飞行功率需求、螺旋桨匹配以质量,选择的发动机型号为 Rotax582UL,两款发动机参数对比如表 1 所示,可以发现相较于原动力发动机,本实验采用的 Rotax582UL 最大功率减小了 33.3%,为了匹配原系统功率需求,需要和电池共同提供功率。虽然最大功率下降,但是与之对应的质量有着显著的下降,减少了 57%,可以为电动机以及电池的

增加提供了更多的可能性。最终实验选择的电动机型号为 EMRAX268,电池选用钛酸锂电池,通过测功机模拟动力部件在变负载下的运行情况,为上述仿真平台提供部件性能输入参数。

表 1 两款发动机参数对比

Table 1 Comparison of parameters of two engines

发动机型号	功率/kW	质量/kg	转速/(r/min)
Rotax912ULS	73.5	67.7	
Rotax582UL	49	29.1	6 800

图 3 为发动机万有特性图,红色曲线为发动机最优燃油消耗率曲线,对应着每个转速下的最大开度,将这条曲线作为发动机变负载下能量管理

策略的输入,在此基础上进行寻优;黑色的带点曲线为匹配某一个螺旋桨时的性能曲线,此曲线作为研究发动机在不变负载时能量管理策略的输入,在此基础上进行寻优。此外将燃油消耗率平均分为 3 等分,由低到高依次为低消耗率区(412~588 g/(kW·h))、中消耗率区(588~764 g/(kW·h))、高消耗率区(764~940 g/(kW·h))。

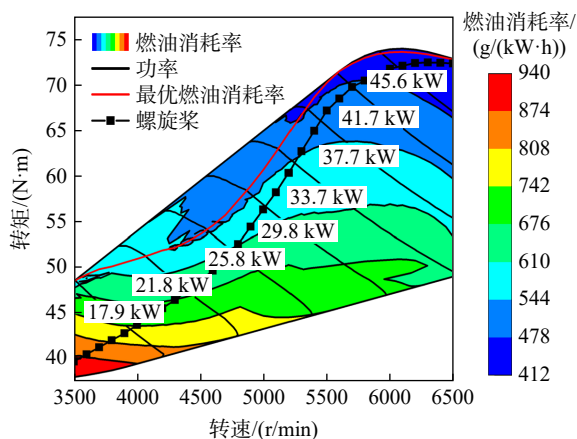


图 3 发动机万有特性

Fig. 3 Engine universal characteristic

图 4 为电动机实验的效率图,由于发电机与电动机采用同一型号,因此发电机的特性与电动机特性基本一致。由图 4 可以发现,对于实验中所用电动机,在不同的转速下,当转矩高于 50 N·m 时,其运行效率基本维持在 70% 以上,并且在中间区域内效率达到了 80% 以上,这对于发动机与发电机的匹配发电是有利的。

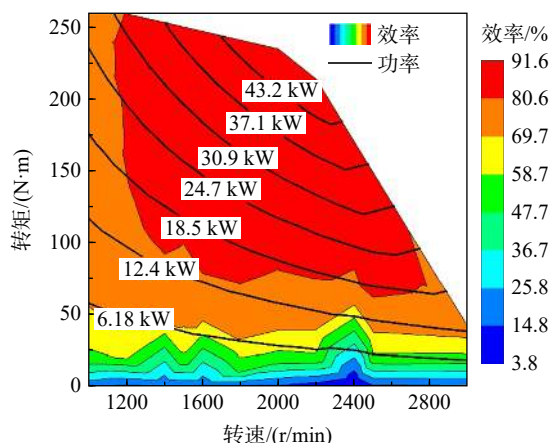


图 4 电动机效率 MAP 图

Fig. 4 Motor efficiency MAP

1.3 全局优化策略

首先建立了一套基于 PSO 算法的全局优化策略^[16],全局优化策略能够快速的一个飞行任

务进行能量分配,对任务所需最少燃油量提供一个参考值,本文中飞行任务功率需求如图 5 所示,满足“高-低-高-低-高”,此功率需求为螺旋桨实际功率输出。

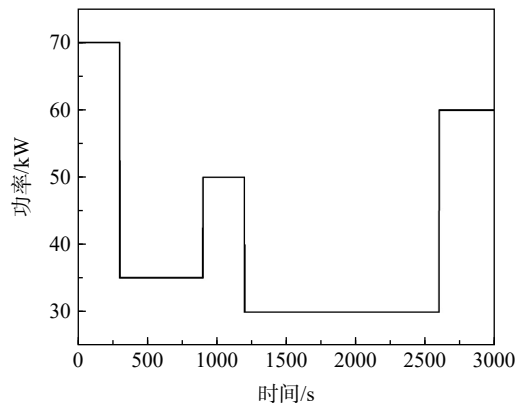


图 5 飞行任务的功率需求

Fig. 5 Power requirement of flight mission

PSO 算法的表达如下:假设在一个 D 维的目标搜索空间中,有 N 个粒子组成一个粒子群,其中第 i 个粒子表示为一个 D 维向量,其位置记为式(1)

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

第 i 个粒子的速度也是一个 D 维向量,记为式(2)

$$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

第 i 个粒子从历史状态到当前状态搜索到的个体极值,记为式(3)

$$p_{best} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

整个粒子群从历史状态到当前状态搜索到的全局极值,记为式(4)

$$g_{best} = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD}) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

两个最优值被确定后,所有的粒子根据如下的公式来调整自己的速度和位置如式(5)、式(6)

$$v_{id} = w \times v_{id} + c_1 \times R \times (p_{id} - x_{id}) + c_2 \times R \times (p_{gd} - x_{id}) \quad (5)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (6)$$

其中 w 为惯性权重, c_1 和 c_2 是学习因子, R 为 $[0,1]$ 范围内的均匀随机数。

式(5)的等式右边由 3 部分组成:第 1 个部分代表着粒子的惯性部分,它反映了粒子之前的运

动习惯,表示粒子将会沿着先前的运动方向继续运动。第 2 个部分代表着粒子的认知部分,它反映了粒子对过往记忆的回忆,表示粒子将会对过往的最近位置进行逼近。第 3 个部分代表着粒子的社会部分,它反映了粒子群中各个粒子的之间的相互影响,表示粒子有向粒子群的过往最佳位置逼近的趋势。流程图如图 6 所示。

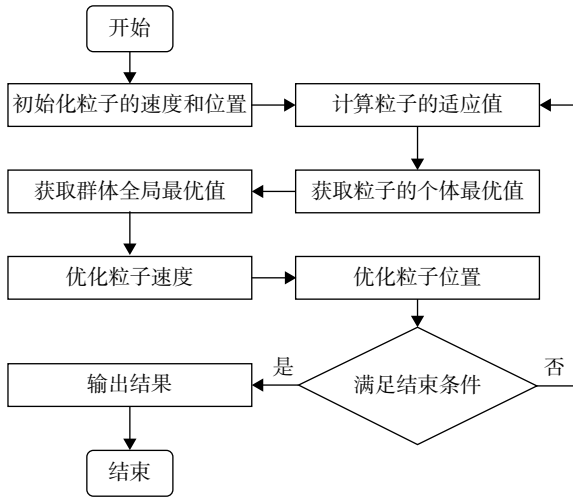


图 6 PSO 流程图

Fig. 6 PSO flow chart

开始时初始化粒子的速度以及位置,计算粒子的目标值,设定粒子的个体最优值,进而获得全局的最优值,根据全局最优值优化粒子的速度,进而更新粒子的位置,当满足结束条件时,退出循环,否则继续计算新位置下的粒子适应值,直到满足结束条件。

寻优目标为式(7)

$$J = \min \sum_{t=1}^D m_e(t) \quad (7)$$

其中 J 代表全局优化中粒子的适应值,在本文选择为燃油消耗量的最小值。其约束条件为式(8)

$$\begin{cases} P_x(t) = P_e(t) + P_b(t) \\ P_{x_min} \leq P_x(t) \leq P_{x_max} \\ P_{e_min} \leq P_e(t) \leq P_{e_max} \\ B_{min} \leq B(t) \leq B_{max} \\ P_{b_min}(B(t), t) \leq P_b(t) \leq P_{b_max}(B(t), t) \end{cases} \quad (8)$$

其中 $P_x(t)$ 为需求功率, $P_e(t)$ 为发动机发电功率, $P_b(t)$ 为电池提供功率。 P_{x_max} 与 P_{x_min} 分别代表电动机提供的最大功率与最小功率。 P_{e_max} 与 P_{e_min} 分别代表发动机发电提供最大最小功率。 $P_{b_max}(B(t), t)$ 与 $P_{b_min}(B(t), t)$ 代表某一时刻电

池能够提供的最大最小功率,其数值跟 B 有关。 B_{max} 与 B_{min} 分别代表电池的最大以及最小电量。

根据飞行任务,由式(1)~式(8),设置 PSO 算法相关系数^[17-18]如表 2 所示。其中 M 为迭代步数, w_{max} 与 w_{min} 为惯性权重的上下限。

$$w = w_{max} - (w_{max} - w_{min}) * \frac{k}{M} \quad (9)$$

式(9)展示了惯性权重的表达式。其中,为了能更加符合实际的发动机控制,在上述的寻优过程的基础上,将原有飞行任务分段,在任何被划分后的小段飞行任务内部,不允许发动机工作状态发生改变,即在特定的分段内,将发动机运行的工况点进行固定。对于飞行任务的分段,采取的原则是在任意的分段内,飞行任务的功率需求不允许变化超过 5 kW。这样可以保证在任意一段飞行任务内,发动机工况点不会频繁地发生变化。

表 2 PSO 算法中各参数取值

Table 2 PSO parameter values

D	N	M	c_1	c_2	w_{max}	w_{min}
3 000	50	100	1.5	2.5	0.9	0.4

以上是利用 PSO 算法对全局进行寻优的过程,搭建的此全局优化策略可以分析任意的飞行任务所带的初始油量以及电量是否支撑此飞行任务完成,在离散寻优的基础上利用将飞行任务进行分段取平均的方法能够很好地得到符合实际的一系列发动机工况点。

1.4 瞬时优化策略

本文旨在建立一种适应性高的航用油电混合系统的瞬时优化策略。根据本系统的特点,对 ECMS 策略做出相应调整,得到相对较优的控制策略。ECMS 以当前时刻燃油消耗值最小为目标,对应的目标函数为式(10)

$$J_{min}(t) = m_e(p_e(t)) + S \times \frac{p_b(t)}{H} \quad (10)$$

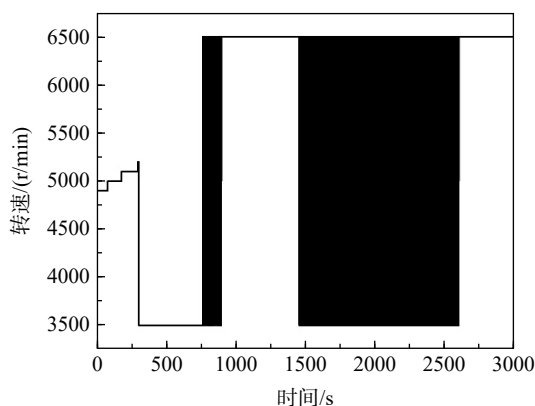
其中 $J_{min}(t)$ 是目标函数值, m_e 是单位时间发动机燃油消耗(g/s), H 是汽油热值(J/kg), S 是等效燃油因子, $p_e(t)$ 某时刻发动机输出功率(kW), $p_b(t)$ 某时刻电池输出功率(kW)。其中约束条件仍为式(8)。

油电混合的能量分配过程中,其核心的任务是优化发动机运行工况,使发动机运行在效率更

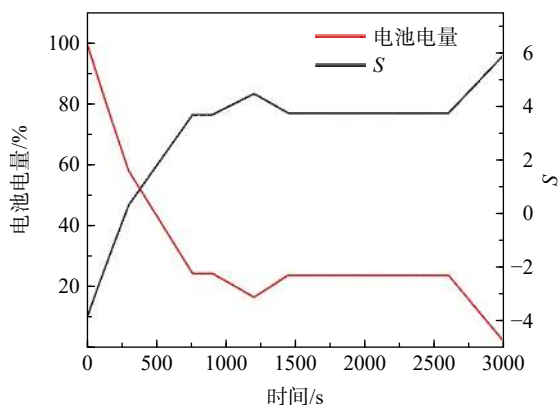
高的工况点,并使油量得到节省,油量的变化可以从实验数据中直接获得,并直接量化为 m_e ,其单位是 g/s,电量的变化可以通过电池消耗功率来求得,消耗的功率单位是 kW,因此想要在某一时刻将发动机的油耗与电动机的电耗联系起来,必须将两者的单位进行统一,即引入了等效燃油因子的概念,用燃油的热值和燃油因子共同作用使得油量消耗与电能消耗统一单位。由于燃油热值是固定的常数,因此,构建 ECMS 控制策略核心问题是寻找等效燃油因子 S ,其值决定了任意时刻能量的分配。在 S 的选用上,建立 S 与电池电量的联系,能够更好地对能量进行分配。其表达式为

$$S(t) = k \times B(t) + b \quad (11)$$

本文电池电量以变量 B 表示。通过 PSO 算法计算得到式(11)中的系数 k 为 -0.1 , b 为 6.16 。其仿真结果如图 7 所示,可以发现通过式(11)会发生发生在某一时间段发动机转速反复变化的问题,如图 7(a)中黑色阴影部分,此时 B 值会保持稳定,从而 S 会随着 B 的稳定而稳定,如图 7(b)所示,



(a) 转速变化情况



(b) 电池电量以及 S 变化情况

图 7 瞬时优化修正前的结果

Fig. 7 Results of instantaneous optimization before correction

在实际中显而不允许这样的情况出现。造成这种情况的原因是对于飞机飞行在巡航状态下,功率需求不会改变,但是随着电池电量的改变,电池输出的最大功率会相应改变,导致了目标函数在进行寻优时会出现前一时刻电池大功率放电,后一时刻发动机大功率充电的反复现象。

因此本文在式(11)的基础上,借鉴全局优化时的分段手段,保证了 S 在某一时间段内不变的思想,做出改变如式(12)

$$\begin{cases} S(t) = k \times B(t) + b, t = k_1, k_2, \dots, k_N \\ S(t+1) = S(t), k_1 < t < k_2, \dots, k_{N-1} < t < k_N \end{cases} \quad (12)$$

其中 k 、 b 为常数, $k_1, \dots, k_N$ 为时间节点,相邻的两个时间节点的间隔相同。在相邻的两个时间节点间, $S(t)$ 保持不变,修正之后电池电量随时间变化趋势如图 8 所示,可见不再存在电池电量保持稳定的时间段。

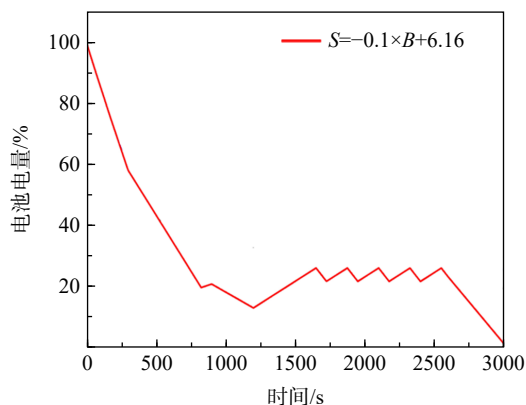


图 8 瞬时优化修正后电池电量随时间的变化

Fig. 8 Change of state of charge with time after instantaneous optimization correction

2 结果分析

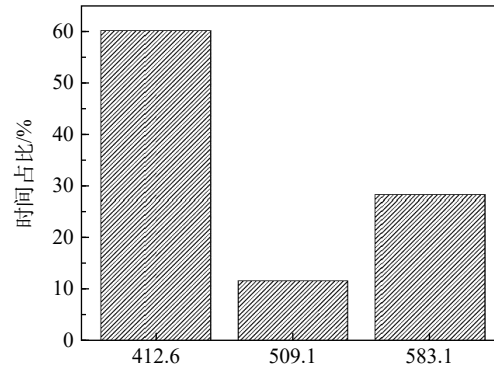
在搭建了全局优化策略以及瞬时优化策略后,对发动机不同的匹配形式进行仿真研究。

2.1 全局优化策略结果与分析

基于全局优化策略,发动机匹配变负载与不变负载下仿真结果如图 9 和图 10 所示。

从转速变化规律来看(图 9(a)和图 10(a)),相较于不变负载,变负载下转速变化更为频繁,但是两者转速变化都倾向于两个工作点,即最大转速(对应最低燃油消耗点)和最低转速工作点;从电池电量的变化(图 9(b)和图 10(b))可以看到,两种匹配形式的电池电量变化均有着充电行为,

合理地分配了能量的使用, 变负载在任务结束时电池电量基本用尽, 而不变负载电池电量仍剩余 7.6%, 未实现充分利用; 从燃油消耗率情况(图 9(c)和图 10(c))可以看到, 变负载下最低转速时耗油率为 583.1 g/(kW·h), 比不变负载下最低转速耗油率减小了 34.2%; 通过时间积分后(图 9(d)和图 10(d))可以看到变负载下工作状态均分布在低消耗率区, 而不变负载工作状态为低消耗率时间占比 70%, 高消耗率时间占比 30%, 从耗油量的比对可以得知, 基于 PSO 算法的全局优化策略, 发动机匹配变负载相较于不变负载耗油量降低



(d) 燃油消耗率的时间占比

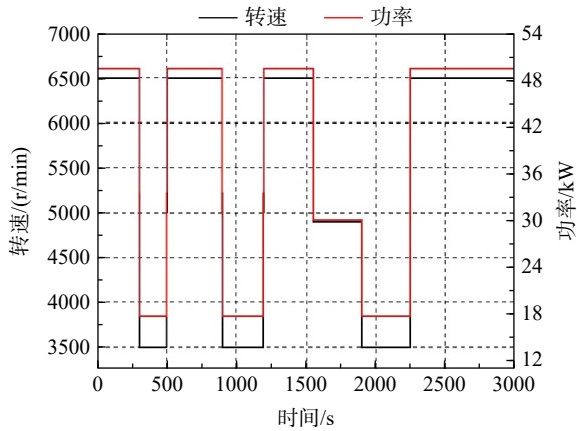
图 9 变负载时全局优化结果

Fig. 9 Global optimization results under variable load

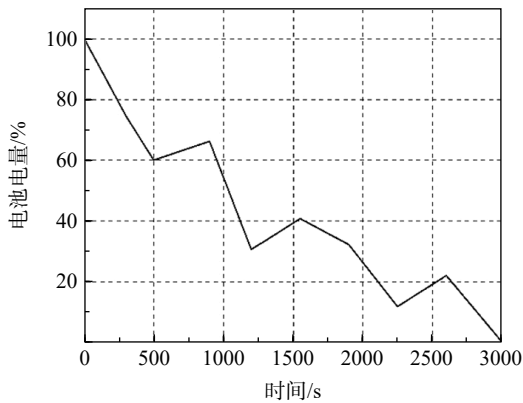
了 6.27%。由此可以发现基于全局优化策略, 发动机匹配变负载情况下, 降低了最低转速下的燃油消耗率, 使得在飞行任务过程中工作状态均分布在低消耗率区, 从而提高了工作效率。

2.2 瞬时优化策略结果与分析

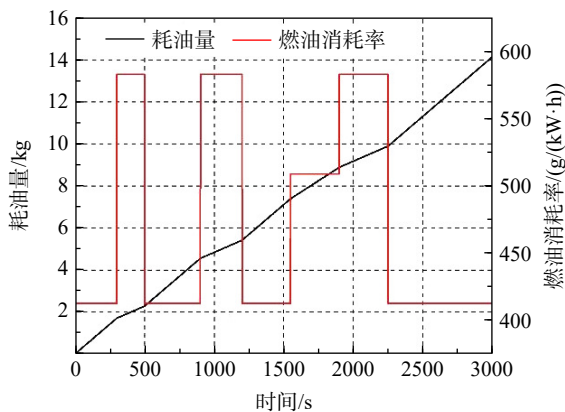
上述全局优化策略属于系统在离线下的优化情况。现采用 ECMS 的瞬时优化策略对发动机在不同的匹配形式下进行实时优化分析。采用



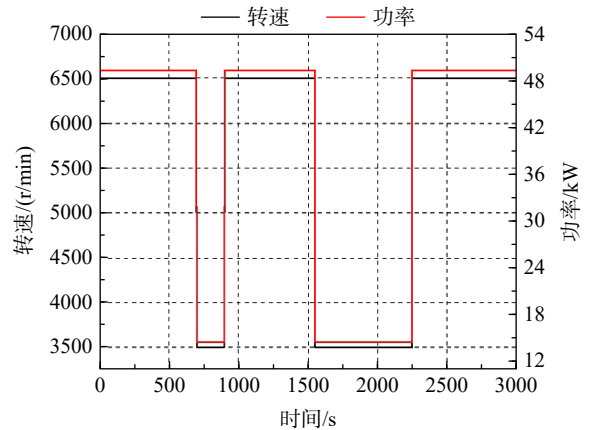
(a) 发动机转速、功率随时间变化



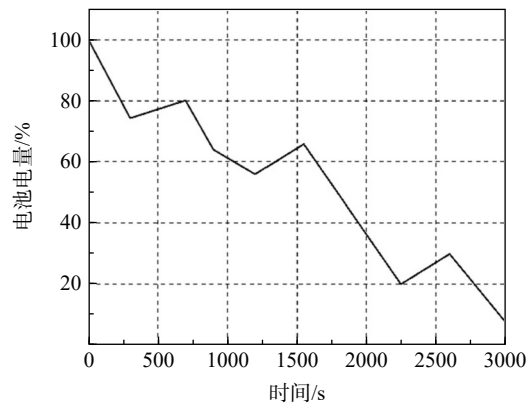
(b) 电池电量随时间变化



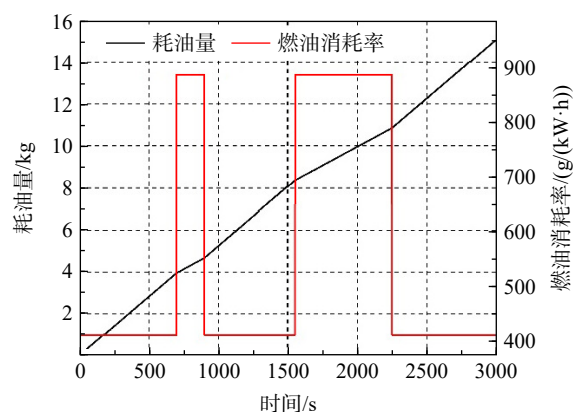
(c) 耗油量、燃油消耗率随时间变化



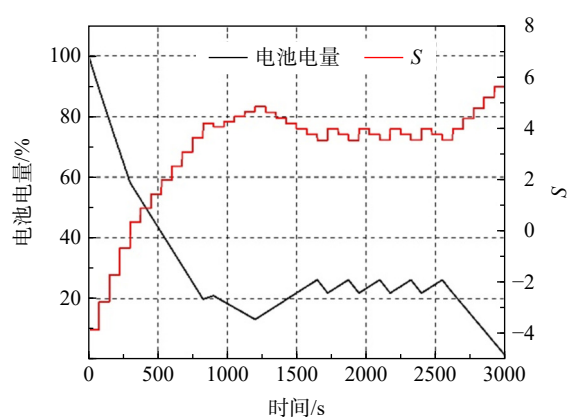
(a) 发动机转速、功率随时间变化



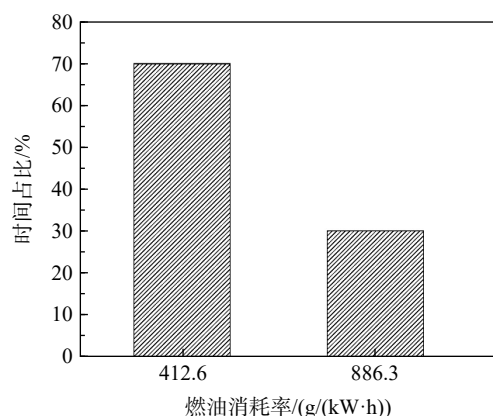
(b) 电池电量随时间变化



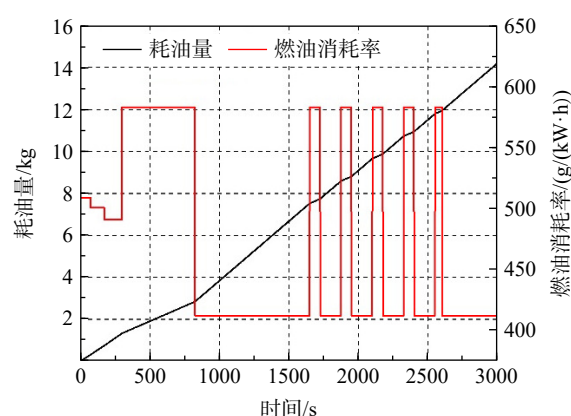
(c) 耗油量、燃油消耗率随时间变化



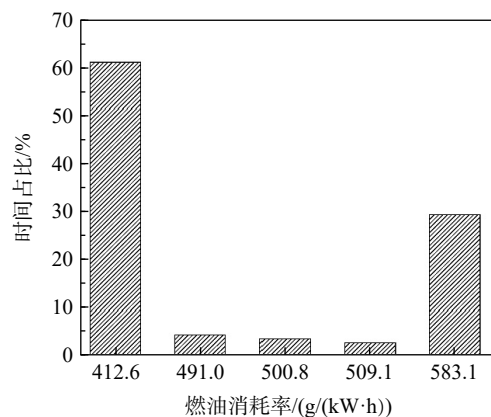
(b) 电池电量、S随时间变化



(d) 燃油消耗率的时间占比



(c) 耗油量、燃油消耗率随时间变化

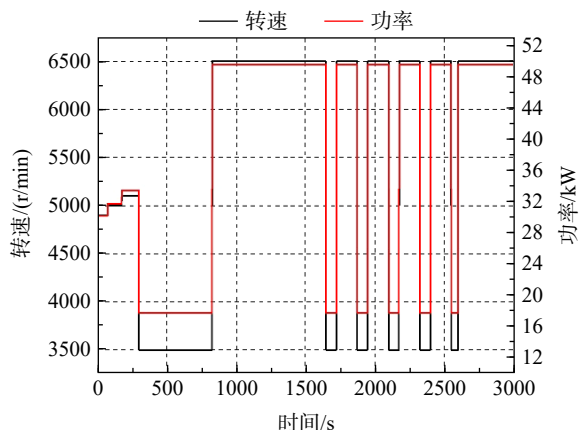


(d) 燃油消耗率的时间占比

图 10 不变负载时全局优化结果
Fig. 10 Global optimization results under constant load

式(12), 经比较, 选取合适的参数为: k 选择 -0.1 , b 选择 6.16 , 时间间隔为 75 s 。发动机匹配变负载与不变负载下仿真结果如图 11 和图 12 所示。

上述全局优化策略属于系统在离线下的优化情况。现采用 ECMS 的瞬时优化策略对发动机在不同的匹配形式下进行实时优化分析。发动机匹配变负载与不变负载下仿真结果如图 11 和图 12



(a) 发动机转速、功率随时间变化

图 11 变负载时瞬时优化结果

Fig. 11 Instantaneous optimization results under variable load

所示。

从转速变化规律来看(图 11(a)和图 12(a)), 在 $500\sim 800\text{ s}$ 不变负载时出现了转速和功率的波动, 而 1500 s 之后变负载下转速集中在最大转速和最低转速工作点, 不变负载情况下转速下限维持在 4000 r/min 左右, 并未达到最低转速;从电池电量和 S 的变化(图 11(b)和图 12(b))可以看到, 两种匹配形式的电池电量变化均有着充电行为,

按照式(12)的运行规律,会在某一个时间段内有着充放电维持等效燃油效率(S)在一定数值的行为,主要收益于等效燃油因子的改变,变负载在任务结束时电池电量基本用尽,而不变负载电池电量仍剩余 12.8%,说明在此之前的充电行为是浪费的;燃油消耗率情况(图 11(c)和图 12(c))与全局优化策略类似,变负载下最大的燃油消耗率依然远小于不变负载情况;通过时间积分后(图 11(d)和图 12(d))可以看到变负载下工作状态均分布在低消耗率区,而不变负载工作状态为低消

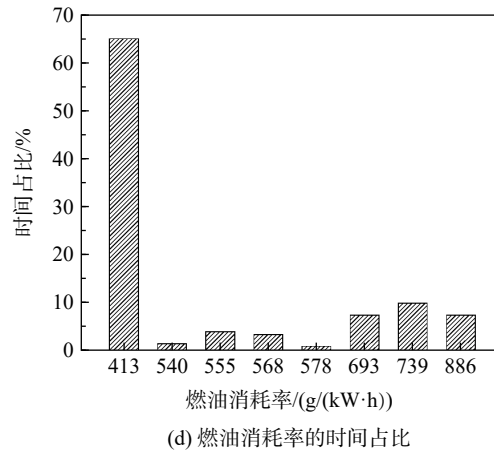
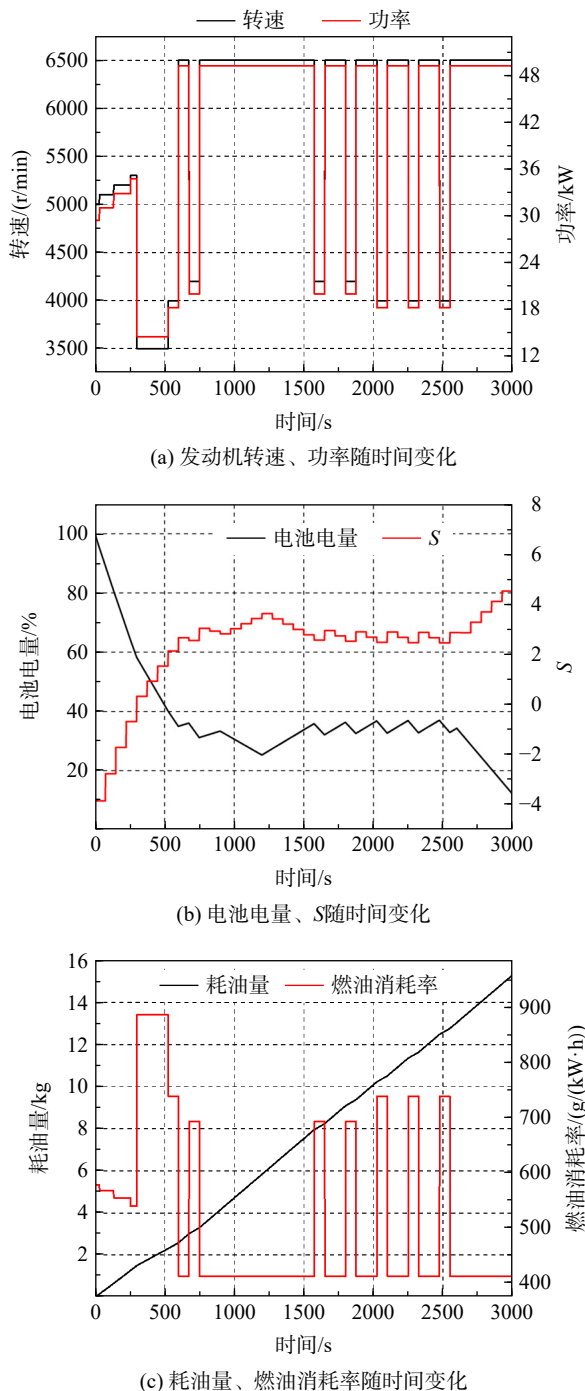


图 12 不变负载时瞬时优化结果

Fig. 12 Instantaneous optimization results under constant load

耗率时间占比 75%,中消耗率时间占比 17.5%,高消耗率时间占比 7.5%,从耗油量的比对可以得知,基于 PSO 算法的全局优化策略,基于 ECMS 策略,发动机匹配变负载相较于不变负载耗油量降低了 7.4%。由此可以发现基于瞬时优化策略,发动机匹配变负载情况下,降低了低转速下的燃油消耗率,同时最大限度利用了电池电量,使得在飞行任务过程中工作状态均分布在低消耗率区,从而提高了工作效率。

3 结 论

本文基于 MATLAB/SIMULINK 软件搭建一套研究能量管理方法的仿真平台,研究了发动机与负载的不同匹配形式对能量管理的影响。主要结论如下:

- 1) 建立了全局优化的离线策略以及基于 ECMS 的瞬时优化策略,并将两种策略应用于仿真平台;
- 2) 发动机匹配负载的形式对整个系统的能量分配有着至关重要的作用,发动机匹配变负载的形式相比于匹配不变负载在燃油消耗上有了明显的降低,在全局优化策略下降低了 6.27%;在瞬时优化策略下降低了 7.4%;
- 3) 在对航用电电混合系统进行能量管理设计时,除了要考虑优化策略外,还要重点考虑部件的匹配形式。

参考文献:

- [1] MOORE M D, BUSAN R C, FREDERICKS W J. Benefits of hybrid-electric propulsion to achieve 4x in cruise efficiency for a VTOL aircraft: NF1676L-16092[P]. 2014-03-07.

- [2] TING C C, TSAI D Y, HSIAO C C. Developing a mechanical roadway system for waste energy capture of vehicles and electric generation[J]. *Applied Energy*, 2012, 92: 1-8.
- [3] 黄波. 无人直升机混合动力驱动技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- HUANG Bo. Research on hybrid power driving technology of unmanned helicopter[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [4] 刘文澍. 多动力源固定翼无人飞行器的动力匹配与控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- LIU Wentao. Research on dynamic match and control strategy of fixed wing unmanned aerial vehicle with multiple power sources[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [5] 韩奎超. 插电式气电混合动力城市客车动力匹配及能量管理策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- HAN Kuichao. Study on power matching and energy management strategy for a plug-in hybrid urban bus[D]. Jinan: Shandong University, 2017. (in Chinese)
- [6] HARMON F G, FRANK A A, JOSHI S S. Application of a CMAC neural network to the control of a parallel hybrid-electric propulsion system for a small unmanned aerial vehicle[C]//Proceedings of 2005 IEEE International Joint Conference on Neural Networks. Piscataway, US: IEEE, 2005: 355-360.
- [7] HARMON F G, FRANK A A, CHATTOT J J. Conceptual design and simulation of a small hybrid-electric unmanned aerial vehicle[J]. *Journal of Aircraft*, 2006, 43(5): 1490-1498.
- [8] DONATEO T, FICARELLA A, SPEDICATO L. Applying dynamic programming algorithms to the energy management of hybrid electric aircraft[C]//ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Oslo, Norway: American Society of Mechanical Engineers, 2018: 432-440.
- [9] GEISS I, NOTTER S, STROHMAYER A, et al. Optimized operation strategies for serial hybrid-electric aircraft[C]//Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Atlanta, US: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2018: 101-113.
- [10] 朱庆林. 基于瞬时优化的混合动力汽车控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- ZHU Qinglin. Study on the control strategy of hybrid electric vehicle based on instantaneous optimization[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- [11] 王春凯. 基于遗传算法的混合动力公交车能量管理策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- WANG Chunkai. Research on energy management strategy of hybrid electric bus based on genetic algorithm[D]. Jinan: Shandong University, 2020. (in Chinese)
- [12] 张树彬. 插电式混合动力汽车自适应等效油耗能量管理策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- ZHANG Shubin. Study on adaptive equivalent consumption energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [13] 夏飞. 基于 MATLAB/SIMULINK 的航空发动机建模与仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- XIA Fei. Modeling and simulation of aeroengines based on MATLAB[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [14] 朱闪闪. 基于 MATLAB/Simulink 的航空发动机仿真建模[J]. *机械工程与自动化*, 2019(2): 48-50, 53.
- ZHU Shanshan. Aeroengine modeling and simulation based on MATLAB/simulink[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2019(2): 48-50, 53. (in Chinese)
- [15] 张书刚, 郭迎清, 陆军. 基于 GasTurb/MATLAB 的航空发动机部件级模型研究[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(12): 2850-2856.
- ZHANG Shugang, GUO Yingqing, LU Jun. Research on aircraft engine component-level models based on GasTurb/MATLAB[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(12): 2850-2856.
- [16] 刘浩, 韩晶. MATLAB R2018a 完全自学一本通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- LIU Hao, HAN Jing. MATLAB R2018a is a completely self-taught all-in-one book[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019. (in Chinese)
- [17] 吴永红, 曾志高, 邓彬. 基于惯性权重和学习因子动态调整的粒子群算法[J]. *湖南工业大学学报*, 2021, 35(1): 91-96.
- WU Yonghong, ZENG Zhigao, DENG Bin. Particle swarm optimization algorithm based on dynamic adjustment of inertial weight and learning factors[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2021, 35(1): 91-96. (in Chinese)
- [18] 徐生兵. 基于动态调整惯性权重下改进学习因子的粒子群算法[J]. *信息安全与技术*, 2014, 5(4): 26-28.
- XU Shengbing. A new modified acceleration coefficient in PSO base on dynamic adjustment of inertia weights[J]. *Information Security and Technology*, 2014, 5(4): 26-28.

(编辑: 张 雪)