

高超声速飞行器多源能量动态优化管理方法研究



王小平¹, 陈丽君¹, 金行健², 梁国梁², 陈俞初², 施良宇²

1. 航空工业金城南京机电液压工程研究中心, 江苏 南京 211106

2. 南京航空航天大学, 江苏 南京 211106

摘 要:为实现高超声速飞行器的能效管控,有效减少系统油耗,以高超声速飞行器的多源能量系统为研究对象,建立主动力及多源能量系统提取的模型,分析多源能量提取对发动机的能效影响机理及多源能量优化管理策略。针对高超声速飞行器的能量优化管理问题,本文提出一种基于改进粒子群算法的多源能量动态优化管理方法。该方法以燃油消耗为优化目标,以发动机稳定裕度为约束条件,并针对多源能量提取系统的强非线性特征进行惯性权重自适应变化以提高优化精度。最后,通过仿真验证宽域飞行包线内该方法的可行性。仿真结果表明,多源能量优化管理后平均降低的燃油量在涡轮发动机模式占总燃油量的0.0948%,在冲压发动机模式占总燃油量的0.1229%。

关键词:高超声速飞行器;多源能量优化管理;能效影响分析;粒子群算法;燃油消耗率

中图分类号:V236

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.08.002

随着飞行器向多电/全电的方向发展,高超声速飞行器对用电的需求也越来越大,这对飞行器上的电能生成系统提出了更高要求,涡轮基组合动力下的多源能量提取是亟待解决的核心技术^[1-2]。涡轮基组合动力主要通过主动力进气/油气总焓提取、轴功率提取、热能提取及燃油冷焓利用等方法实现多源电能生成,这些均会对主动力单位燃油消耗率、涡轮动力压气机稳定裕度、冲压动力进气稳定裕度、燃烧稳定性等性能产生影响,且不同能量提取方式及其参数对主动力的性能影响程度与影响机理不同^[3-5]。因此加强多源能量提取对主动力性能影响机理及对多源能量优化管理方法研究,有利于促进高超声速飞行器系统技术的平衡发展,满足其更高推重比和更低的燃料消耗率的综合优化设计方法要求。

目前优化方法应用在飞行器的能量管理策略的相关成果较少,鉴于优化方法在其他混合动力系统的能量管理策略中的应用较为广泛^[6],如地铁、混合动力汽车、混合动力船舶等,可为解决高超声速飞行器的多源优化管理问题提供有效途径。杨少兵^[7]等将遗传算法用于地铁能耗管理及运行图优化;李平等^[8]用粒子群算法优化了多工况下混合动力汽车的

燃油消耗;Cheng等^[9]、陈征等^[10]将进化算法用于插电式混合动力汽车的能量优化管理策略。粒子群算法适合在动态、多目标优化环境中寻优,与传统优化算法相比,计算速度更快,全局搜索能力更好,易于在工程上实现应用。高超声速飞行器的飞行参数高动态变化会引起主动力和其能量关联部件强非线性变化,这导致多源能量提取系统能效演化呈多峰值、不连续特征。因此,研究基于粒子群算法的高超声速飞行器多源能量动态优化管理方法十分必要。

本文从综合化的多源能量高效管控的角度,对高超声速飞行器主动力及多源能量提取系统进行建模,对多源能量提取系统进行能效和管理策略进行分析,以此为基础提出多源能量优化管理方法,最后验证了该方法的可行性和有效性。

1 高超声速飞行器主动力及多源能量提取系统建模

1.1 并联式涡轮基组合循环发动机模型

本文选取并联式涡轮基组合循环(TBCC)发动机作为

收稿日期: 2022-01-20; 退修日期: 2022-03-15; 录用日期: 2022-04-26

引用格式: Wang Xiaoping, Chen Lijun, Jin Xingjian, et al. Research on multi-source energy dynamic optimization management method of hypersonic hypersonic aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(08): 9-15. 王小平, 陈丽君, 金行健, 等. 高超声速飞行器多源能量动态优化管理方法研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(08): 9-15.

高超声速飞行器的主动力进行建模。并联式TBCC发动机由涡轮发动机和冲压发动机并联组合而成,其并联式的双通道相对独立,因而研制难度相对较小,具有很好的工程应用前景,是国内外发展高超声速飞行器的主要动力^[11-12]。图1为并联式TBCC发动机结构,针对并联式TBCC发动机的特性,对发动机的涡轮发动机、冲压发动机两个独立的通道分别进行建模^[13-16]。

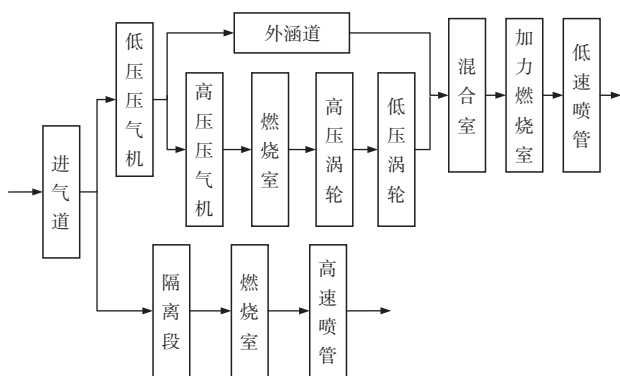


图1 并联式TBCC发动机结构

Fig.1 Structure diagram of parallel TBCC engine

1.2 多源能量提取系统模型

如图2所示,在涡轮发动机模式拟采用三种能量提取方式:轴功提取发电、引气发电和燃气发电。轴功提取发电从涡轮发动机的高/低压经过齿轮箱调节传动比后带动电机发电;引气发电从涡轮发动机的高压级/中间级/外涵道引出气体驱动电机发电;燃气发电在引出气体后经过燃烧室燃烧再驱动电机发电。

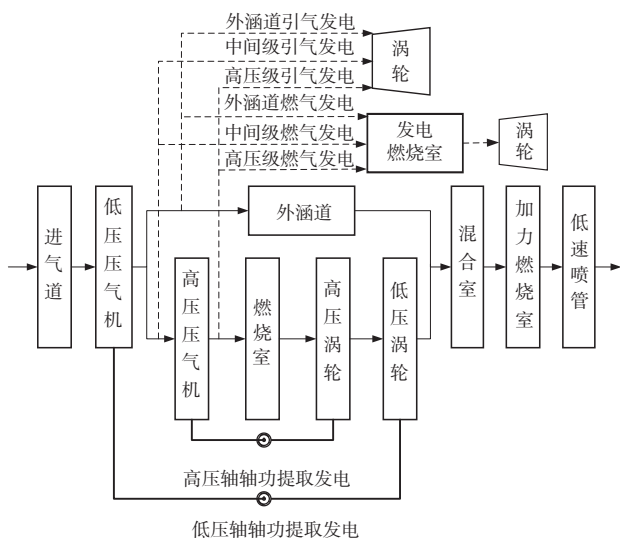


图2 涡轮发动机模式的多源能量提取系统

Fig.2 Multi source energy extraction system for turbine engine mode

如图3所示,在冲压发动机模式拟采用4种能量提取方式:引气发电、燃气发电、半导体温差发电和蓄电池。引气发电、燃气发电是从冲压发动机的隔离段引出气体驱动电机;半导体温差发电即从燃烧室壁面引热,形成的温差使P、N型热电偶产生电势差,从而给负载供电;蓄电池由化学能直接转化为电能,无须从发动机中提取能量,仅有重量造成燃油代偿。

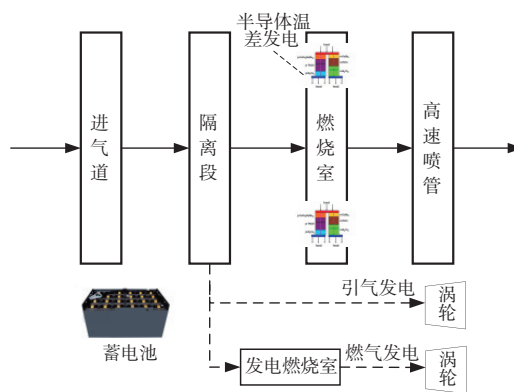


图3 冲压发动机模式的多源能量提取系统

Fig.3 Multi-source energy extraction system for ramjet engine mode

2 多源能量提取能效分析及优化管理策略

2.1 多源能量提取对发动机能效影响机理

本文以单位推力下燃油消耗率的变化(ΔSFC)为评价指标,其中 ΔSFC 为多源能量提取前后单位推力燃油消耗率的差值。数值仿真对比了宽域飞行包线内多源能量提取对发动机的性能影响。

表1为涡轮发动机模式仿真工况。从图4可以得出,随着飞行高度、马赫数的上升,轴功提取发电、燃气发电、引气发电依次为最适用的能量提取方式;对于轴功提取发电,随着高压轴转速的降低,适用的提取部位从高压轴变化至低压轴;对于引气发电和燃气发电,随着冲压空气能量的增大,适用的提取部位的变化趋势为从高压级至中间级、外涵道。

表2为冲压发动机模式仿真工况。从图5可以得出,在 $H>21\text{km}$, $Ma>4$ 时,适用的能量提取方式由引气发电变为半导体温差发电。由于此时空气涡轮的效率过低,引气发电不再适用,而半导体温差发电的效率随温差增大而升高,此时半导体温差发电的燃油经济性优于引气发电。

2.2 多源能量优化管理策略

根据多源能量提取的能效分析可以得出,随着飞行状态改变,多源能量提取系统的燃油消耗会随着提取方式不同而改变,故在飞行包线内需要进行多源能量优化管理以

表 1 涡轮发动机模式多源能量提取能效分析工况

Table 1 Energy efficiency analysis of multi-source energy extraction in turbine engine mode

工况	飞行高度 H/km	马赫数 Ma
1	10.5	1.0
2	10.5	1.1
3	10.5	1.2
4	11.0	1.1
5	11.0	1.2
6	11.0	1.3
...		
40	17.0	2.3
41	17.0	2.4
42	17.0	2.5

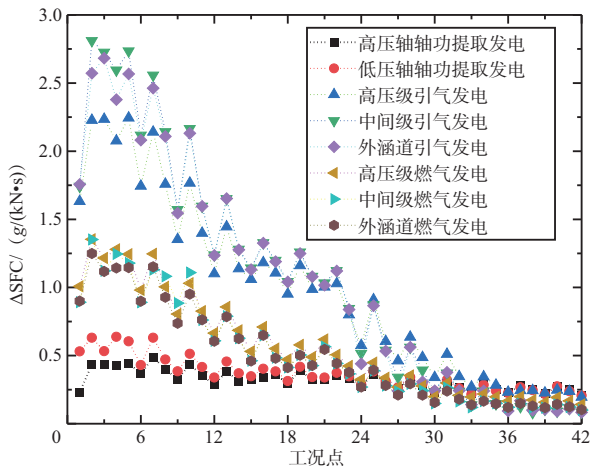


图 4 涡轮发动机模式多源能量提取的 ΔSFC 对比

Fig.4 ΔSFC comparison of multi-source energy extraction in turbine engine mode

表 2 冲压发动机模式多源能量提取能效分析工况

Table 2 Energy efficiency analysis of multi-source energy extraction in ramjet engine mode

工况	飞行高度 H/km	马赫数 Ma
1	18	3
2	18	3.5
3	18	4
4	21	3.5
5	21	4
6	21	4.5
...		
13	30	5
14	30	5.5
15	30	6

获得最优的燃油经济性。

本文拟采用瞬时能量优化控制策略的方法实现系统的能效优化。如图 6 所示,该方法根据当前飞行状态判断系

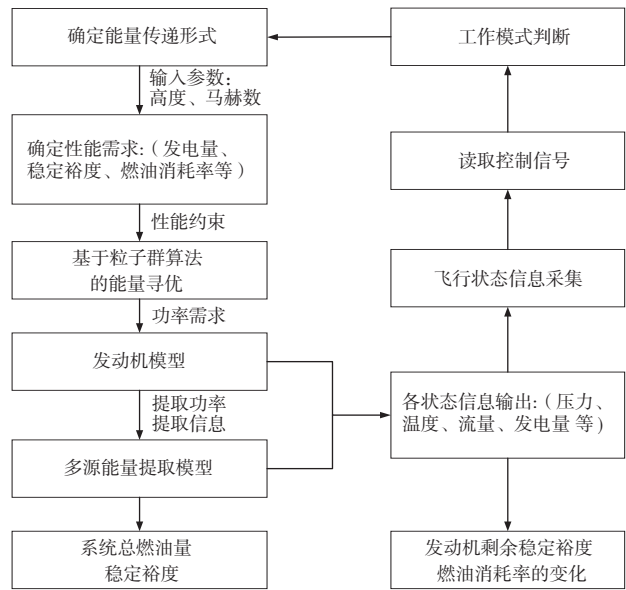


图 5 冲压发动机模式多源能量提取的 ΔSFC 对比

Fig.5 ΔSFC comparison of multi-source energy extraction in ramjet engine mode

统的工作模式,分析系统的能量形式,自动选择适用的能量提取方式进行多源能量提取,在保证主发稳定裕度的基础上,以每个时刻的总燃油量作为目标进行寻优,保证每个时刻的燃油消耗最小,实现宽域飞行包线内多源能量提取的能量利用率最高。

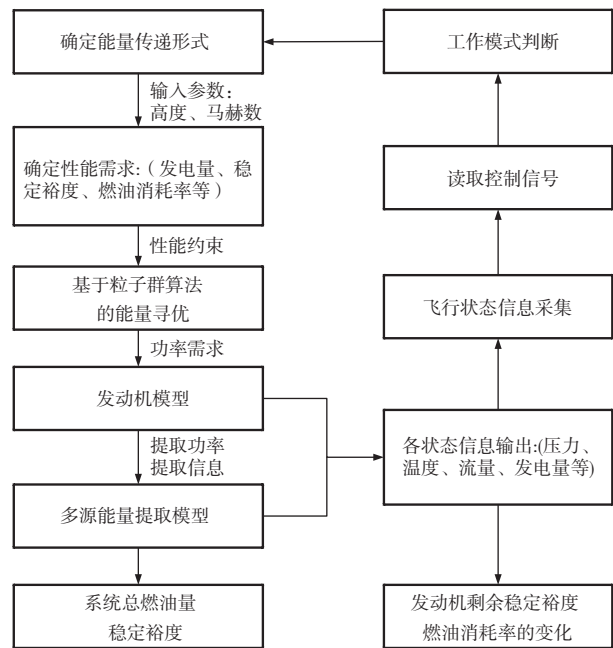


图 6 瞬时能量优化策略

Fig.6 Multi source instantaneous energy efficiency optimization strategy

综上所述,高超声速飞行器多源能量优化分配目标函数 F 描述如下

$$F = \begin{cases} Wf_{\text{turbine}}(P_{1,1}, P_{1,2}, P_{2,1}, P_{2,2}, P_{2,3}, P_{3,1}, P_{3,2}, P_{3,3}) \\ Wf_{\text{ramjet}}(P_4, P_5, P_6, P_7) \end{cases} \quad (1)$$

式中: Wf_{turbine} 、 Wf_{ramjet} 分别为涡轮发动机模式、冲压发动机模式的燃油量; $P_{1,1}$ 、 $P_{1,2}$ 为涡轮发动机模式高压轴、低压轴轴功提取发电的输出功率; $P_{2,1}$ 、 $P_{2,2}$ 、 $P_{2,3}$ 为涡轮发动机模式高压级、中间级、外涵道引气发电的输出功率; $P_{3,1}$ 、 $P_{3,2}$ 、 $P_{3,3}$ 为涡轮发动机模式高压级、中间级、外涵道燃气发电的输出功率; P_4 、 P_5 、 P_6 、 P_7 为冲压发动机模式引气发电、燃气发电、半导体温差发电、蓄电池的输出功率。约束如下

$$\begin{cases} SM_{\text{turbine}} = \min(SM_{\text{hpc}}, SM_{\text{lpc}}) > 15\% \\ SM_{\text{ramjet}} = \min(SM_{\text{inlet}}) > 15\% \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_{\text{demand1}} = P_{1,1} + P_{1,2} + P_{2,1} + P_{2,2} + P_{2,3} + \\ \quad P_{3,1} + P_{3,2} + P_{3,3} \\ P_{\text{demand2}} = P_4 + P_5 + P_6 + P_7 \end{cases} \quad (3)$$

式中: SM_{turbine} 和 SM_{ramjet} 为涡轮发动机模式、冲压发动机模式的稳定裕度限制; SM_{hpc} 、 SM_{lpc} 、 SM_{inlet} 为高压压气机、低压压气机、进气道的稳定裕度; P_{demand1} 、 P_{demand2} 为涡轮发动机模式、冲压发动机模式的负载功率需求。

3 基于改进粒子群算法的多源能量优化管理方法

3.1 改进粒子群算法

粒子群算法本质是一种随机搜索算法,通过适应度值来评价个体的优劣程度和进行一定的随机搜索。该算法中惯性权重 w 对粒子群算法的性能至关重要,它负责平衡粒子群的全局搜索能力和局部搜索能力; w 较大,则全局收敛能力较强,局部收敛能力较弱; w 较小,则局部收敛能力较强,全局收敛能力较弱。

因此,可在算法搜索过程中对惯性权重 w 进行自适应动态变化:计算整个粒子群适应度值的平均值,并与当前粒子的适应度值相比较,以判断当前适应度值的优劣性。个体适应值较好的粒子对当前最优解临近区域做局部细致搜寻,个体适应值差的粒子会以较大步长搜寻。本文自适应惯性权重 w 更新公式如下:

$$w = \begin{cases} w_{\min} + \frac{(w_{\max} - w_{\min}) * (f_i - f_{\min})}{f_{\text{av}} - f_{\min}}, & f_i \leq f_{\text{av}} \\ w_{\max}, & f_i > f_{\text{av}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $w_{\max}$ 、 $w_{\min}$ 为惯性权重的最大值、最小值, f_i 为当前粒

子的适应值, f_{av} 、 $f_{\min}$ 分别为当前整个粒子群适应值的平均值和最小值。此更新方法把惯性权重的变化与粒子的位置状态信息关联起来,以更加精确地调整惯性权重,进而保证了整个群体解的多样性,减少了算法陷入局部极值的概率,提高了粒子群算法的收敛性。

在多源能量优化管理过程中,可将多源能量提取的输出功率视为粒子,将系统的总燃油消耗视为适应度值,多源能量优化流程如图7所示。

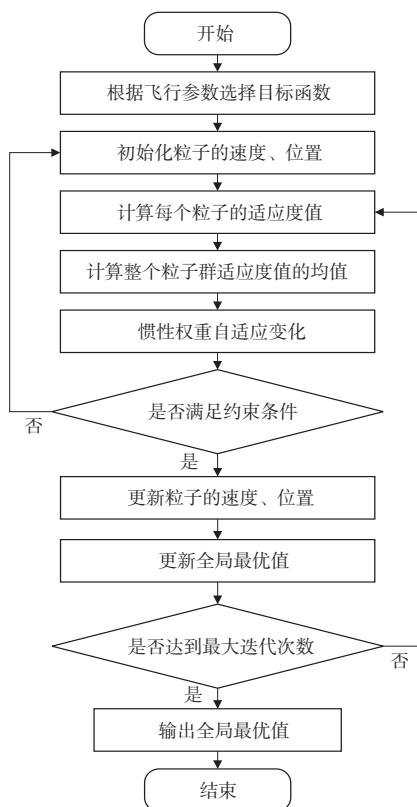


图7 改进粒子群算法优化流程

Fig.7 Multi source energy optimization process based on PSO

3.2 多源瞬时能量优化仿真验证

对于高超声速发动机主动力及多源能量提取模型,在宽域飞行包线内验证基于粒子群算法的高超声速飞行器多源能量优化管理方法的有效性。粒子群优化算法参数见表3。

如图8所示,在涡轮发动机模式经过多源瞬时能量优化后,多源能量提取系统 ΔSFC 都低于优化前。其中,前25个工况 ΔSFC 微量减小,即多源能量提取的燃油消耗可优化空间较小;后17个工况 ΔSFC 减小幅度较大,即优化后燃油消耗有明显下降。

从图9中可以得出,由于轴功提取发电对发动机能效影响规律近似线性,所以在前25个工况中,轴功提取的输

表 3 粒子群优化算法参数
Table 3 Parameters of PSO algorithm

参数	数值
群体粒子个数 N	20
粒子维数 D	50
最大迭代次数 T	200
惯性权重最大值 $w_{\max}$	0.9
惯性权重最小值 $w_{\min}$	0.4
位置最大值 $X_{\max}$	500
位置最小值 $X_{\min}$	0
速度最大值 $V_{\max}$	-5
速度最小值 $V_{\min}$	5
学习因子 c_1	1.495
学习因子 c_2	1.495

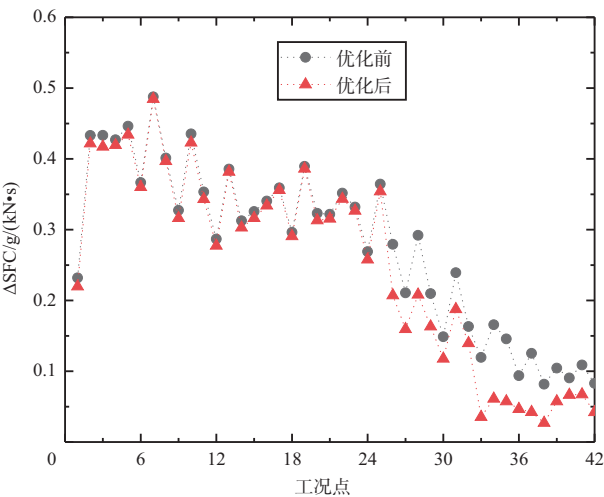


图 8 涡轮发动机模式多源瞬时能量优化后 ΔSFC 的对比
Fig.8 Comparison between ΔSFC after multi-source instantaneous energy optimization in turbine engine mode

出功率占主要比例,可优化的空间较小,降低的燃油量占总燃油量的 0.006%~0.048%;而引气/燃气发电在一定提取量下可以提高压气机的效率,其提取量和 ΔSFC 呈较强的非线性关系,因此在后 17 个工况中,引气/燃气发电的输出功率占主要比例,经过瞬时能量优化后燃油量减小幅度较大,降低的燃油量占总燃油量的 0.071%~0.307%。在涡轮发动机模式飞行包线内,优化后平均降低的燃油量占总燃油量的 0.0948%。

如图 10 所示,在冲压发动机模式经过多源瞬时能量优化后,多源能量提取系统 ΔSFC 都低于优化前,且随着飞行高度、马赫数的升高, ΔSFC 减少的幅度在变小。

从图 11 中可以得出,在冲压发动机模式,由于蓄电池对发动机的影响仅表现为重量造成的燃油代偿损失,因此蓄电

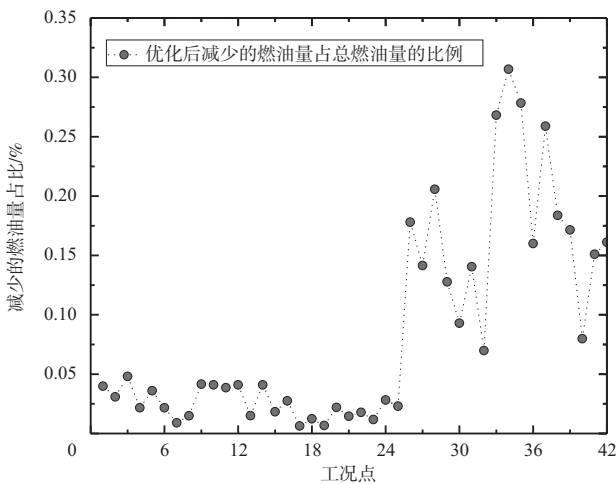


图 9 涡轮发动机模式多源瞬时能量优化后减少的燃油量占总燃油量的比例
Fig.9 Ratio of reduced fuel quantity to total fuel quantity after multi-source instantaneous energy optimization in turbine engine mode

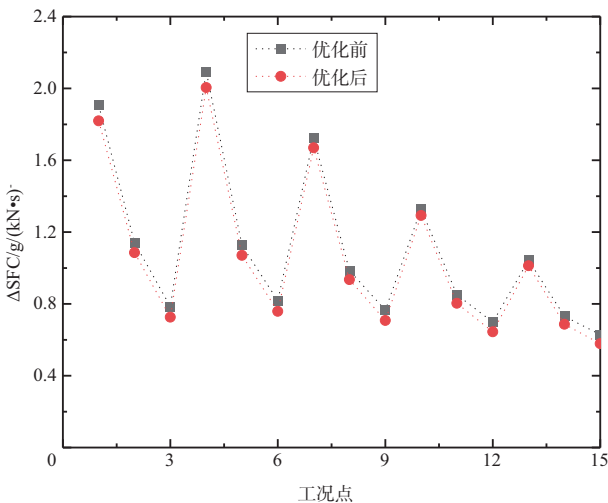


图 10 冲压发动机模式多源瞬时能量优化后 ΔSFC 的对比
Fig.10 Comparison between ΔSFC after multi-source instantaneous energy optimization in ramjet engine mode

池输出部分功率可以较好地弥补引气发电、半导体温差发电造成的功率代偿,经过能量优化后在降低的燃油量占总燃油量的 0.082%~0.165%。在冲压发动机模式飞行包线内,优化后平均降低的燃油量占总燃油量的 0.1229%。

4 结论

本文首先对高超声速飞行器的主动力及多源能量提取系统进行建模,再分析多源能量提取对发动机的性能影响机理和多源能量优化管理策略,最后提出一种基于改进粒

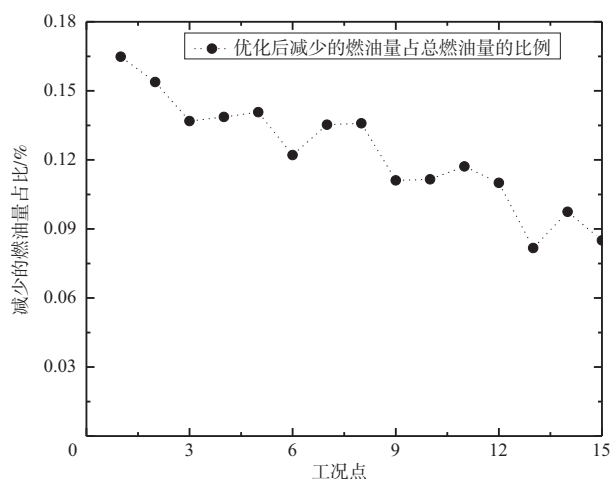


图 11 冲压发动机模式多源瞬时能量优化后减少的燃油量占总燃油量的比例

Fig.11 Ratio of reduced fuel quantity to total fuel quantity after multi-source instantaneous energy optimization in ramjet engine mode

子群算法的高超声速飞行器宽域多源能量动态优化管理方法,并对其进行数值仿真验证,实现了在宽域飞行包线内对高超声速飞行器的能效管控,有效减少了系统油耗。主要结论如下:

(1)本文提出了一种自适应惯性权重修正方法来改进粒子群算法,减少算法陷入局部极值的概率,可适应多源能量提取系统的强非线性变化,提升系统优化效果。

(2)经过仿真验证,多源能量优化管理后平均降低的燃油量在涡轮发动机模式占总燃油量的0.0948%,在冲压发动机模式占总燃油量的0.1229%。

AST

参考文献

- [1] 梁向东. 电动飞行器及其关键技术的研究探析[J]. 航空科学技术, 2020, 31(6): 1-6.
Liang Xiangdong. Research on electric vehicle and its key technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(6): 1-6. (in Chinese)
- [2] 雷屹坤. 飞机综合一体化热/能量管理系统方案研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
Lei Yikun. Research on integrated heat/energy management system for aircraft [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [3] 张镜洋, 郑峰婴, 谢业平. 轴功提取与引气一体化管控对航空发动机燃油经济性的影响分析[J]. 航空发动机, 2019, 45(6): 9-14.

Zhang Jingyang, Zheng Fengying, Xie Yeping. Influence of shaft work extraction and entrainment integrated control on aero-engine fuel economy [J]. Aircraft Engine, 2019, 45 (6) : 9-14. (in Chinese)

- [4] 黄星. 飞机自适应动力与热管理系统能效分析研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
Huang Xing. Energy efficiency analysis of aircraft adaptive power and thermal management system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [5] 王俊琦, 赵海刚, 张媛. 辅助动力装置的稳态和过渡态特性试飞[J]. 航空科学技术, 2020, 31(9): 41-46.
Wang Junqi, Zhao Haigang, Zhang Yuan. Flight test of steady and transient characteristics of APU[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(9): 41-46. (in Chinese)
- [6] 王志勇, 韩善灵, 张鑫, 等. 插电式混合动力汽车能量管理策略发展综述[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(12): 8-15.
Wang Zhiyong, Han Shanling, Zhang Xin, et al. Summary of energy management strategy development of plug-in hybrid electric aircraft [J]. Science, Technology & Engineering, 2019, 19 (12): 8-15. (in Chinese)
- [7] 杨少兵, 张征, 叶晶晶, 等. 考虑停站延误随机性的地铁供电节能优化策略[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(7): 94-99.
Yang Shaobing, Zhang Zheng, Ye Jingjing, et al. Energy saving optimization strategy of metro power supply considering the randomness of stop delay [J]. Journal of Railway Engineering, 2021, 38 (7): 94-99. (in Chinese)
- [8] 李平. 基于SA-PSO的Plug-In混合动力汽车模糊控制策略优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
Li Ping. Research on fuzzy control strategy optimization of plug in hybrid electric aircraft based on SA-PSO [D]. Jinan: Shandong University, 2017. (in Chinese)
- [9] Cheng Yuhuei, Ching Minglai. Control strategy optimization for parallel hybrid electric aircrafts using a memetic algorithm [J]. Energies, 2017, 10(3): 305-326.
- [10] 陈征, 刘亚辉, 杨芳. 基于进化-增强学习方法的插电式混合动力公交车能量管理策略[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 86-93.
Chen Zheng, Liu Yahui, Yang Fang. Energy management strategy of plug-in hybrid bus based on evolutionary reinforcement learning method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 (16): 86-93. (in Chinese)

- [11] 陈博, 桂丰, 李茜, 等. 国外并联式涡轮基组合循环发动机技术发展途径浅析[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2019, 32(1): 57-62.
Chen Bo, Gui Feng, Li Qian, et al. Study on the development approach of foreign overlunder TBCC engine technology[J]. Gas Turbine Experiment & Research, 2019, 32(1): 57-62. (in Chinese)
- [12] 全福旭. TBCC组合发动机仿真模型的结构化建模及性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
Quan Fuxu. TBCC combination engine simulation model structure modeling and performance analysis [D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2020. (in Chinese)
- [13] 潘慕绚, 陈强龙, 周永权等. 涡扇发动机多动力学建模方法[J]. 航空学报, 2019, 40(5): 99-110.
Pan Muxuan, Chen Qianglong, Zhou Yongquan, et al. Multi-dynamics modeling method for turbofan engine [J]. Acta Aeronautical et Astronautica Sinica, 2019, 40(5): 99-110. (in Chinese)
- [14] 姜波. 涡扇发动机部件级建模与起动控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
Jiang Bo. Research on component-level modeling and starting control technology of turbofan engine [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [15] 吴坤, 范学军. 超声速燃烧数值模拟中复杂化学反应的建模方法[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(3): 552-576.
Wu Kun, Fan Xuejun. Modeling method of complex chemical reaction in numerical simulation of supersonic combustion [J]. Chinese Journal of Aerodynamics, 2020, 38(3): 552-576. (in Chinese)
- [16] 赵哲龙. 超燃冲压发动机建模与控制方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
Zhao Zhelong. Research on modeling and control method of scramjet [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. (in Chinese)

Research on Multi-Source Energy Dynamic Optimization Management Method of Hypersonic Aircraft

Wang Xiaoping¹, Chen Lijun¹, Jin Xingjian², Liang Guoliang², Chen Yuchu², Shi Liangyu²

1. AVIC Jincheng Nanjing Electromechanical Hydraulic Engineering Research Center, Nanjing 211106, China

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

Abstract: In order to realize the energy efficiency control of hypersonic aircraft and effectively reduce the fuel consumption of the system, taking the multi-source energy system of hypersonic aircraft as the research object, the model of its main power system and multi-source energy extraction system is established, and the influence mechanism of multi-source energy extraction on engine energy efficiency and multi-source energy optimization management strategy are analyzed. Aiming at the energy management optimization problem of hypersonic aircraft, a multi-source energy dynamic optimization management method based on improved PSO algorithm is proposed. This method takes fuel consumption as the optimization objective and engine stability margin as the constraint condition. Based on the basic particle swarm optimization algorithm, according to the strong nonlinearity of multi-source energy extraction system, the inertia weight is changed adaptively to improve the optimization accuracy. Finally, the feasibility of this method in the wide-range flight envelope is verified by simulation. The simulation results show that the average reduced fuel volume after multi-source energy optimization management accounts for 0.0948% of the total fuel volume in turbine engine mode and 0.1229% in ramjet mode.

Key Words: hypersonic aircraft; multi source energy optimization management; energy efficiency impact analysis; PSO; fuel consumption rate