

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.05.008

## 考虑电系统热限制的倾转翼 eVTOL 巡航性能优化

魏志强, 杨天哲

(中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300)

**摘要:** 为分析倾转翼 eVTOL 在考虑电系统热管理对巡航性能的影响, 以及不同工况下性能参数的选择, 根据飞机二维动力学、阻力、能耗和电系统热管理计算模型, 以飞机巡航速度作为控制变量, 以巡航时间和电能消耗作为目标函数, 建立倾转翼 eVTOL 巡航仿真模型。结合实际飞行条件设定不同权重, 根据模型的具体特征, 基于改进粒子群算法进行优化求解, 以典型倾转翼 eVTOL 飞机 Vahana 为例, 得出性能参数并对比分析。仿真结果表明: 模型在各种权重组合下, 对减少飞机巡航时间和降低电能消耗均有良好的优化效果; 最快到达与最节能到达的飞行工况相比, 可以节省约 50% 的时间, 但同时会多消耗 120% 的电耗; 与既考虑时间又考虑能耗的折中情况相比, 节省了 20% 时间的同时会多消耗 28% 的电能。

**关键词:** 飞机性能; 改进粒子群算法; 电动垂直起降; 电系统热管理; 巡航性能

中图分类号: V212.13

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2024)05-0854-08

## Cruise Performance Optimization of Tilt-Wing eVTOL Considering Thermal Limitations in Electrical Systems

WEI Zhiqiang, YANG Tianzhe

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** To analyze the impact of electrical system thermal management on cruise performance and the selection of performance parameters under different operating conditions for the tilt-wing eVTOL, a tilt-wing eVTOL cruise simulation model is established by using the aircraft cruising speed as the control variable, the cruising time and electrical energy consumption as the objective functions, based on the 2D dynamics, drag, energy consumption and electrical system thermal management calculation model of the aircraft. Set different weights according to actual flight conditions, and optimize the solution based on the specific characteristics of the model using an improved particle swarm optimization algorithm. Taking the typical tilt-wing eVTOL aircraft Vahana as an example, performance parameters are obtained and compared. The simulation results show that the model has good optimization effects on reducing aircraft cruising time and reducing electrical energy consumption under various weight combinations. Compared to the most energy-efficient flight conditions, the fastest arrival can save about 50% of time but also consume 120% more electricity. Compared to the compromise of considering both time and energy consumption, the fastest arrival saves 20% of time while consuming 28% more electricity.

**Key words:** aircraft performance; improved particle swarm optimization algorithm; eVTOL; thermal management of electrical systems; cruise performance

**基金项目:** 国家自然科学基金(U2133210); 中央高校基本科研业务费专项资金(3122021066)。

**收稿日期:** 2023-12-19; **修订日期:** 2024-07-02

**通信作者:** 杨天哲, 男, 硕士研究生, E-mail: 2022031008@cauc.edu.cn。

**引用格式:** 魏志强, 杨天哲. 考虑电系统热限制的倾转翼 eVTOL 巡航性能优化[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(5): 854-861. WEI Zhiqiang, YANG Tianzhe. Cruise performance optimization of tilt-wing eVTOL considering thermal limitations in electrical systems[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(5): 854-861.

飞机推进系统的电气化已被确定为航空业降低碳足迹的潜在解决方案之一。然而,推进系统电气化仍然存在一些挑战,倾转翼eVTOL作为一种创新的低空交通工具,被视为未来城市空中交通(Urban air mobility, UAM)的重要组成部分。eVTOL必须重量轻,且电推进系统部件需提供足够的电力以持续飞行,电推进系统中的发热部件主要包括电池、电机和逆变器,各部件在飞行过程中处于相当大的热应力之下,为了保持它们正常运行,必须去除热量,否则可能会损坏部件,并导致灾难性故障。因此,在关注eVTOL运行参数优化的同时,考虑电系统热限制对其飞行性能的影响是十分重要的,这不仅可以帮助减少事故的发生,还可以降低运营商的运营成本。在未来的研究中,通过对电推进系统内部件参数的优化可能还会为eVTOL的设计改进以及UAM的政策实施和发展带来贡献。

国外学者对考虑电系统的飞行性能做了大量研究工作,Harrison等<sup>[1]</sup>使用系统仿真建立了一个多物理系统模拟模型来预测Vahana eVTOL电池组的电-热流体性能,并与来自概念的eVTOL任务轮廓的测试数据进行了比较。Falck等<sup>[2]</sup>为NASA X-57电动试验台飞机开发了一个电气子系统模型,将此模型与二维飞机动力学模型相结合,使用了最优控制方法来找到有和没有热约束的飞机最优轨迹。Qiao等<sup>[3]</sup>基于标准飞行剖面 and 详细的电池模型开发了直接运营成本模型,确定电池性能对城市空中交通的影响,研究了以能耗为性能指标的固定时间多相最优控制问题。Pradeep等<sup>[4]</sup>提出了多相最优控制问题的配方和数值解,使eVTOL飞机满足给定的所需到达时间的最佳速度曲线的最节能到达。Sánchez等<sup>[5]</sup>基于欧洲飞机性能数据库(Base of aircraft data, BADA)提出了一种通用的飞机性能模型,可以针对不同的eVTOL进行参数化,并计算飞机轨迹变化所需包括电池消耗的性能变量。Warren等<sup>[6]</sup>探讨了航程和电池技术因素对eVTOL飞机在城市空中交通任务的背景下运行的尺寸和性能的影响。

国内对于飞行性能优化也进行了大量研究,余樾等<sup>[7]</sup>进行了垂直剖面性能数据分析,采用遗传算法完成纵向飞行轨迹优化求解,实现了最低燃油消耗、最小运营成本设计。魏志强等<sup>[8]</sup>建立了污染物排放成本计算模型,改进了飞行成本计算模型,建立了基于搜索方法的综合成本指数优化流程,开发相应的计算软件,以考虑污染物排放对飞行成本优化的影响。回忆等<sup>[9]</sup>建立了高空航路优化算法,针

对典型飞行任务,分析了成本指数、飞机起始质量和飞行高度层等因素对航路优化的影响。以上学者的研究都没有对倾转翼eVTOL电系统飞行时的温度和限制进行考虑。

针对上述问题,首先以典型倾转翼eVTOL飞机为例构建了二维空气动力学和电系统热管理仿真计算模型,然后考虑速度、电系统热限制以及加速度等约束,以巡航时间和电能消耗为优化目标,利用改进粒子群算法对倾转翼eVTOL巡航段进行优化求解,并对不同工况下的巡航性能参数进行对比分析。

## 1 巡航飞行模型

倾转翼eVTOL可以在不同飞行阶段通过改变拉力方向,实现起飞、巡航、悬停和降落。当倾转翼eVTOL巡航飞行时,可参照固定翼飞机的飞行状态进行性能分析并做出假设:整个巡航过程都是在标准大气温度下进行的;不考虑倾转旋翼的过渡阶段;不考虑电系统中各部件间电线的热效应;不考虑螺旋桨功率的损失;螺旋桨在产生推力的工作过程中不存在能量损耗。

### 1.1 二维运动学模型

在巡航状态飞行时,可以认为纵向和横向飞行动力学解耦,通过对姿态和位置控制,使飞机的横向和航向运动保持稳定。为简化问题,在整个巡航过程中不考虑偏航、滚转、侧滑角的变化,因此只分析二维平面内的受力情况,建立运动学模型,如图1所示。

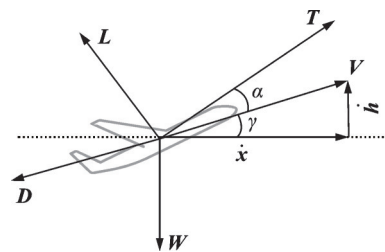


图1 eVTOL自由体示意图

Fig.1 Free body diagram of eVTOL

图1中: $V$ 为巡航速度; $\alpha$ 为迎角,即拉力矢量与气动速度之间的夹角; $\gamma$ 为航迹角; $T$ 为飞机的分布式电力推进(Distributed electric propulsion, DEP)产生的净拉力; $D$ 为阻力; $L$ 为净升力; $W$ 为重力; $\dot{x}$ 为速度水平方向的分量; $\dot{z}$ 为速度垂直方向的分量。

因此,倾转翼eVTOL在气动参考系中的运动方程为

$$\frac{dV}{dt} = \frac{T \cos \alpha - D - W \sin \gamma}{m} \quad (1)$$

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = V \cos \gamma \quad (2)$$

$$\dot{h} = \frac{dh}{dt} = V \sin \gamma \quad (3)$$

$$T = \sum_{i=1}^n T_i \quad (4)$$

式中:  $t$  为巡航时间,  $x$  为巡航距离;  $h$  为巡航高度;  $T_i$  是由第  $i$  个螺旋桨产生的拉力;  $n$  为螺旋桨个数;  $m$  为倾转翼 eVTOL 质量。

## 1.2 阻力模型

倾转翼 eVTOL 飞机的巡航性能基于传统的二次阻力曲线, 使用的阻力模型基于文献[10]的阻力模型, 因此阻力可表示为

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S_{\text{ref}} \left( C_{D0} + \frac{C_L^2}{\pi A_R e} \right) \quad (5)$$

式中:  $C_{D0}$  为基于总阻力模型的寄生阻力系数(机翼与机身寄生阻力系数之和);  $C_L$  为升力系数;  $A_R$  为倾转翼 eVTOL 等效展弦比;  $S_{\text{ref}}$  为机翼的总参考面积;  $e$  为跨度效率;  $\rho$  为巡航高度处的空气密度。其中  $A_R$  和  $S_{\text{ref}}$  可表示为

$$A_R = \frac{b_{\text{ref}}^2}{S_{\text{ref}}} \quad (6)$$

$$S_{\text{ref}} = \frac{2L}{\rho V_{\text{stall}}^2 C_{L\text{max}}} \quad (7)$$

式中:  $b_{\text{ref}}$  为翼展;  $C_{L\text{max}}$  为飞机的最大升力系数;  $V_{\text{stall}}$  为失速速度。升力  $L$  可表示为

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S_{\text{ref}} C_L \quad (8)$$

## 1.3 能量消耗模型

倾转翼 eVTOL 飞行器在巡航阶段的 DEP 功耗模型是由标准升力、阻力和拉力模型导出的<sup>[11]</sup>, 假设飞机的准定长和恒定高度, 倾转翼 eVTOL 的巡航功率为

$$P = \frac{TV \cos \alpha}{\eta_{\text{prop}}} \quad (9)$$

式中  $\eta_{\text{prop}}$  为螺旋桨效率。因此, 倾转翼 eVTOL 在巡航阶段消耗的总能量  $E_{\text{cruise}}$  可表示为

$$E_{\text{cruise}} = \int_0^{t_{\text{cruise}}} P dt \quad (10)$$

## 1.4 电推进系统热管理模型

电动飞机的电推进系统一般由蓄电池、电机、逆变器和螺旋桨构成<sup>[12]</sup>。蓄电池在电池舱内进行供电, 逆变器将蓄电池的直流电转化为三相交流电提供给电机, 电机带动螺旋桨旋转产生飞机所需的拉力; 通过控制螺旋桨的拉力调整飞机的运行状态。电推进系统结构如图2所示。

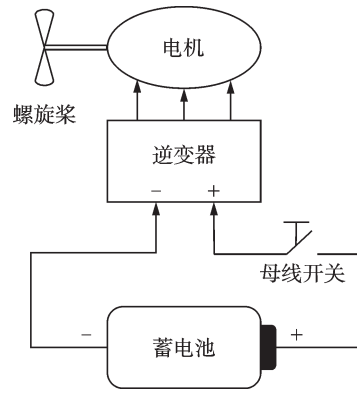


图2 电推进系统构成示意图

Fig.2 Composition diagram of electric propulsion system

### 1.4.1 电池模型

为了计算电池的热效应, 采用文献[13]的模型来模拟电池内阻和电压作为电池温度的函数。戴维南(Thevenin)模型由于其简单性和数据可用性而被确定为该应用的理想模型, 因此电池平均温度变化率  $\dot{T}_{\text{batt}}$  可由微分方程表示为

$$\begin{cases} \dot{U}_{\text{Th}} = \frac{-U_{\text{Th}}}{R_{\text{Th}} C_{\text{Th}}} + \frac{I_L}{C_{\text{Th}}} \\ U_L = U_{\text{oc}} - U_{\text{Th}} - I_L R_0 \\ S = \frac{-I_L}{Q_{\text{max}}} \\ \dot{T}_{\text{batt}} = (1 - \eta_{\text{cell}}) \frac{I_L U_L}{m_{\text{cell}} C_{\text{pcell}}} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\dot{U}_{\text{Th}}$  为戴维南电压瞬时变化率;  $U_{\text{Th}}$ 、 $R_{\text{Th}}$  和  $C_{\text{Th}}$  分别为戴维南电压、电阻和比热容;  $Q_{\text{max}}$  为电池容量;  $S$  为充电状态;  $U_{\text{oc}}$  为开路电压;  $I_L$ 、 $U_L$  和  $R_0$  分别为导线电流、电压和电阻;  $\eta_{\text{cell}}$ 、 $m_{\text{cell}}$  和  $C_{\text{pcell}}$  分别为单个电池的效率、质量和比热容。

### 1.4.2 电机模型

电机部件基于螺旋桨所需转速和扭矩来确定电机的效率, 电机效率  $\eta_{\text{motor}}$  用于确定电机部件上的功率损耗, 该功率损耗转换为热量。电机允许空气通过机舱的散热器被动冷却, 空气通过散热器后, 被输送到电机后面的逆变器, 就形成了电机和逆变器之间的循环关系: 逆变器为电机提供功率, 电机将热量排入气流, 气流反过来冷却逆变器。电机的产热率  $Q_{\text{motor}}$  和散热率  $Q_{\text{cool-motor}}$  及电机排出的冷却气流温度  $T_{\text{exh}}$  可表示为

$$\begin{cases} Q_{\text{motor}} = P_{\text{in-motor}} (1 - \eta_{\text{motor}}) \\ Q_{\text{cool-motor}} = h_{\text{c,motor}} A_{\text{motor}} (T_{\text{motor}} - T_{\text{atm}}) \end{cases} \quad (12)$$

$$T_{\text{exh}} = T_{\text{atm}} + \frac{Q_{\text{cool-motor}}}{g C_{\text{pair}}} \quad (13)$$

式中:  $P_{\text{in-motor}}$  为电机输入功率;  $A_{\text{motor}}$  为电机内部导热系数;  $h_{\text{c,motor}}$  为电机对流换热系数;  $T_{\text{atm}}$  为大气温度;  $T_{\text{motor}}$  为电机平均温度;  $g$  为冷却空气质量流率;

$C_{\text{pair}}$ 为气流比热容。因此,电机温度变化率 $\dot{T}_{\text{motor}}$ 可表示为

$$\dot{T}_{\text{motor}} = (Q_{\text{motor}} - Q_{\text{cool-motor}}) / C_{\text{h,motor}} \quad (14)$$

式中 $C_{\text{h,motor}}$ 为电机热容量。

### 1.4.3 逆变器模型

逆变器为电机提供功率,由于逆变器也不是100%的效率,因此逆变器也会产生热负荷。逆变器由电机排气冷却,同时每个逆变器上都会配有翅片散热器,用来改善逆变器到电机间的热传递,逆变器的产热率 $Q_{\text{inv}}$ 和散热率 $Q_{\text{cool-inv}}$ 可表示为

$$\begin{cases} Q_{\text{inv}} = P_{\text{in-inv}}(1 - \eta_{\text{inv}}) \\ Q_{\text{cool-inv}} = h_{\text{c,inv}} A_{\text{inv}}(T_{\text{inv}} - T_{\text{exh}}) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_{\text{in-inv}}$ 为电机输入功率; $\eta_{\text{inv}}$ 为逆变器效率; $A_{\text{inv}}$ 为逆变器内部导热系数; $h_{\text{c,inv}}$ 为逆变器对流换热系数; $T_{\text{inv}}$ 为逆变器平均温度。因此逆变器温度变化率 $\dot{T}_{\text{inv}}$ 可表示为

$$\dot{T}_{\text{inv}} = (Q_{\text{inv}} - Q_{\text{cool-inv}}) / C_{\text{h,inv}} \quad (16)$$

式中 $C_{\text{h,inv}}$ 为电机热容量。

## 2 巡航性能优化模型

针对不同工况的飞行,考虑巡航时电系统中电池和电机发热限制,使巡航时间最短或能量消耗最小,以及二者在不同权重下的性能指标。可以通过控制倾转翼eVTOL巡航速度让飞机在巡航时加速或减速,并利用启发式算法进行优化求解。

### 2.1 约束条件

倾转翼eVTOL飞机在巡航阶段的约束如下。

(1)假设巡航阶段由恒定水平飞行段组成

$$\begin{cases} T \sin \alpha + L - W \cos \gamma = 0 \\ \frac{dh}{dt} = 0 \\ \gamma = 0 \end{cases} \quad (17)$$

(2)巡航速度及加速度 $a$ 的下限和上限

$$\begin{cases} 1.3V_{\text{stall}} \leq V \leq V_{\text{maxcruise}} \\ -a_{\text{max}} \leq a \leq a_{\text{max}} \end{cases} \quad (18)$$

(3)电池温度 $T_{\text{batt}}$ 及电机温度 $T_{\text{motor}}$ 的下限和上限

$$\begin{cases} T_{\text{batt-min}} \leq T_{\text{batt}} \leq T_{\text{batt-max}} \\ T_{\text{motor-min}} \leq T_{\text{motor}} \leq T_{\text{motor-max}} \end{cases} \quad (19)$$

### 2.2 目标函数

根据建立的倾转翼eVTOL巡航飞行模型,在适当的初始状态和必要的约束条件下,建立性能优化模型。鉴于未来低空经济环境,eVTOL运营商通常关注飞行任务的成本、服务水平以及环境影响等方面,即主要考虑运营时间和电能消耗的影响,

并根据实际情况调整它们之间的权衡,用来提高飞行任务的经济性和满足乘客需求。因此,将巡航时间 $t_{\text{cruise}}$ 和巡航电能消耗 $E_{\text{cruise}}$ 作为优化目标函数,对二者赋予不同的权重值相加形成一个新的目标函数,由于两个目标的单位不同,需进行归一化以确保它们可以在相同的尺度上计算。将巡航速度 $V$ 作为控制变量,可得到目标函数

$$J(V) = \omega_1 f_1(V) + \omega_2 f_2(V) \quad (20)$$

式中 $f_1$ 、 $f_2$ 为归一化后的巡航时间 $t_{\text{cruise}}$ 和电能消耗 $E_{\text{cruise}}$ 的函数,表示方法为

$$f_1(V) = \frac{t_{\text{cruise}}(V) - t_{\text{min}}}{t_{\text{max}} - t_{\text{min}}} \quad (21)$$

$$f_2(V) = \frac{E_{\text{cruise}}(V) - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}} \quad (22)$$

式中: $t_{\text{min}}$ 、 $t_{\text{max}}$ 、 $E_{\text{min}}$ 、 $E_{\text{max}}$ 分别表示为倾转翼eVTOL以最小和最大巡航速度飞行时需要的时间和电能消耗。 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 分别表示巡航时间和电能消耗的权重,二者之和为1。当 $\omega_1$ 为1时,即 $\omega_2$ 为0,则表示求解巡航时间 $t_{\text{cruise}}$ 的最小值;同理,当 $\omega_1$ 为0, $\omega_2$ 为1时,求得的结果为巡航时电能消耗 $E_{\text{cruise}}$ 的最小值。

### 2.3 基于改进粒子群算法的巡航性能优化

粒子群优化算法是一种基于群体智能的启发式优化算法,其在计算效率上的优势使其成为诸多学者关注的重点,并已广泛应用于轨迹和参数优化问题中<sup>[14]</sup>。通过引入惯性权重和动态调节参数( $k_M$ 、 $k_P$ 、 $k_G$ )的机制,可以改善全局搜索能力,平衡全局和局部搜索的需求,提高收敛速度。同时,对搜索空间边界进行限制,通过粒子迭代更新机制实现对边界的回避,使算法更加稳健和高效。

对于有 $n$ 个待优化参数的问题,粒子的搜索空间为 $n$ 维空间,其位置代表该问题1个可能参数取值,记某粒子在第 $w$ 次迭代后的位置和速度分别为 $x_i$ 和 $v_i$ ,则该粒子在 $w+1$ 次迭代后的位置为

$$x_{w+1} = x_w + v_w \quad (23)$$

设该粒子历史上达到最佳适应性时对应的位置为 $x_p$ ,该粒子所在的粒子群历史上达到最佳适应性时对应的位置为 $x_G$ ,则粒子的速度为

$$v_{w+1} = v_w + r_1 k_G (x_G - x_{w+1}) + r_2 k_P (x_p - x_{w+1}) \quad (24)$$

式中: $k_G$ 和 $k_P$ 为粒子个体评价和群体评价对速度贡献的权重; $r_1$ 和 $r_2$ 为区间(0,1)上服从均匀分布的随机数。

为提高算法的收敛性,平衡算法在全局最优和局部最优之间搜索的需求,向式(24)中引入惯性



权重  $k_M$ , 得到

$$v_{w+1} = k_M v_w + r_1 k_G (x_G - x_{w+1}) + r_2 k_P (x_P - x_{w+1}) \quad (25)$$

进一步地, 为了使算法具备更好的收敛性, 同时提高算法的全局搜索能力,  $k_M$ 、 $k_P$  和  $k_G$  均采用基于适应性的动态调节,  $c_{11}$ 、 $c_{12}$ 、 $c_{21}$ 、 $c_{22}$ 、 $c_{31}$  和  $c_{32}$  为常数,  $f_{w+1}$  为第  $w+1$  次迭代的适应度函数,  $f_G$ 、 $f_P$  为个体评价和群体评价的适应度函数, 即

$$\begin{cases} k_G = \left( c_{11} \frac{|f_{w+1} - f_G|}{f_G} \right)^{c_{12}} \\ k_P = \left( c_{21} \frac{|f_{w+1} - f_P|}{f_P} \right)^{c_{22}} \\ k_M = c_{31} |1 - k_G - k_P|^{c_{32}} \end{cases} \quad (26)$$

对于搜索空间存在边界的情况, 则通过对粒子适应性的调整进行限制。若粒子超出搜索空间所限制的边界, 则其适应性将被记为 1 个不利的惩罚值, 同时重新设置  $k_M$ 、 $k_P$ 、 $k_G$  为常数, 从而通过粒子迭代更新机制实现对搜索空间边界的回避。

通过上述的改进粒子群优化算法确定初始状态、约束条件和目标函数再利用 MATLAB 软件对问题进行求解。具体流程按以下步骤进行优化。

如图 3 所示, 首先定义了倾转翼 eVTOL 巡航开始的初始参数如飞机重量、航段距离和电系统温度等, 同时确定粒子群搜索空间的划分以及控制变

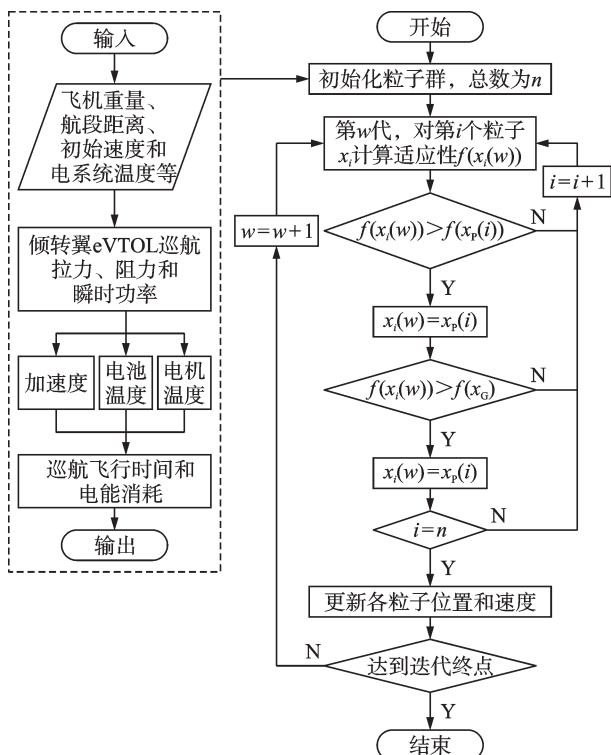


图3 改进粒子群算法优化巡航性能流程图

Fig.3 Flowchart of improved particle swarm optimization algorithm for cruise performance

量  $V$  的初始值和范围。然后计算巡航性能参数如螺旋桨拉力、阻力、功率及每时刻电系统温度变化, 通过随机初始化粒子群的位置和速度, 进行迭代搜索, 在每次迭代中更新粒子速度和位置并确保不超出搜索空间, 最终输出找到最优巡航时间  $t_{cruise}$  和电能消耗  $E_{cruise}$  值。其中粒子群总数  $n$  设置为 200, 最大迭代次数为 500, 惯性权重为 0.5, 个体学习因子和社会学习因子为 1.5。

### 3 典型飞机算例分析

#### 3.1 优化计算条件

以典型倾转翼 eVTOL-Vahana 为研究对象, 飞机采用前后两个可转动的机翼和鸭式布局, 可以改变由电力推进驱动的 8 个螺旋桨的推力方向, 其主要参数见表 1<sup>[15]</sup>。

表1 参考飞机规格

Table 1 Reference aircraft specifications

基本参数	数值
起飞质量 $m/kg$	725
机翼总平面面积 $S/m^2$	9
螺旋桨半径 $R/m$	0.75
平均叶片弦长 $c_w/m$	0.1
电池质量 $M_{batt}/kg$	272
电机质量 $M_{motor}/kg$	49

将倾转翼 eVTOL 实际可飞行的数据代入电推进系统热管理模型的电机和逆变器模块中, 假设巡航高度为 1 000 ft (305 m), 巡航速度 54 m/s, 电机初始温度  $T_{motor}$  为 90 °C, 逆变器初始温度  $T_{inv}$  为 45 °C, 电机效率为 95%, 可以得到电机和逆变器模块的热特性如图 4 所示。

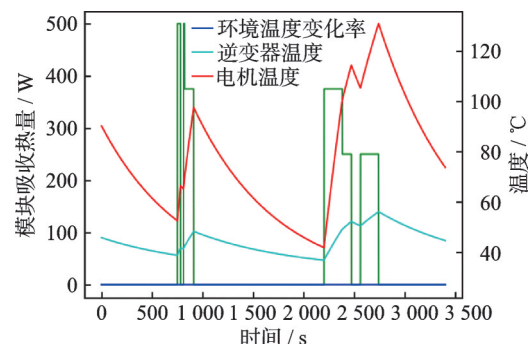


图4 电机和逆变器模块热特性

Fig.4 Thermal characteristics of motor and inverter modules

#### 3.2 性能参数优化分析

倾转翼 eVTOL 在经历起飞爬升后, 螺旋桨和机翼由直升机模式完全过渡到固定翼模式, 进入巡航平飞阶段。假设倾转翼 eVTOL 电池初始温度

$T_{batt}$  为  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,电机初始温度  $T_{motor}$  为  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。其他参数设置为:失速速度  $V_{stall}$  为  $35\text{ m/s}$ ,最大巡航速度  $V_{max}$  为  $80\text{ m/s}$ ,最大加速度  $a_{max}$  为  $0.5\text{ m/s}^2$ ,电池和电机最小温度  $T_{batt-min}$  和  $T_{motor-min}$  分别为  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最大温度  $T_{batt-max}$  和  $T_{motor-max}$  分别为  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

根据参考倾转翼 eVTOL 数据和巡航参数初始值,代入 2.3 节的基于改进粒子群算法的巡航性能模型进行优化求解。分别列举在不同权重  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  下归一化的巡航时间  $f_1$  和巡航电能消耗  $f_2$  函数,并进行对比分析。不同工况下的粒子群算法进化图如图 5 所示。由图 5 可知,算法在 200 次迭代后均逐渐趋于稳定,在 500 次迭代内均搜索到了最优值。

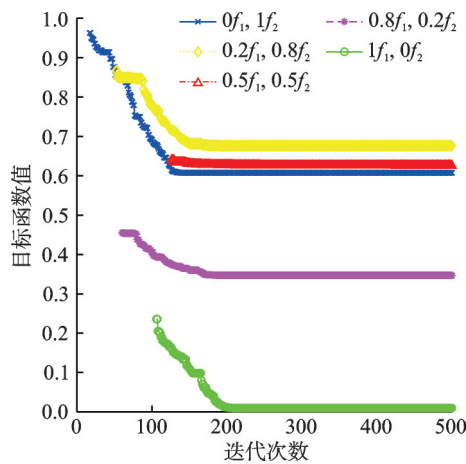
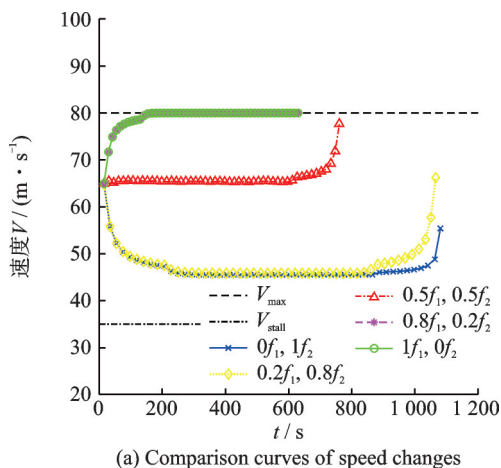


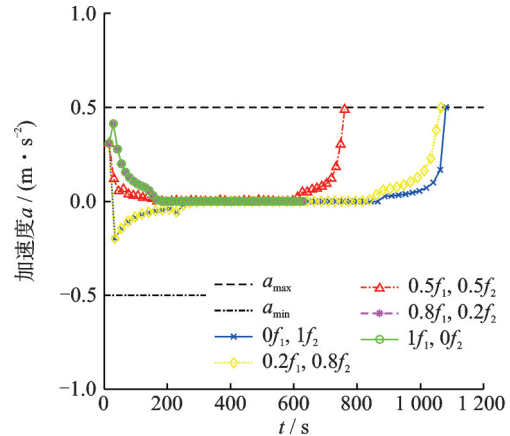
图 5 改进粒子群算法进化图

Fig.5 Evolutionary graph of improved PSO algorithm

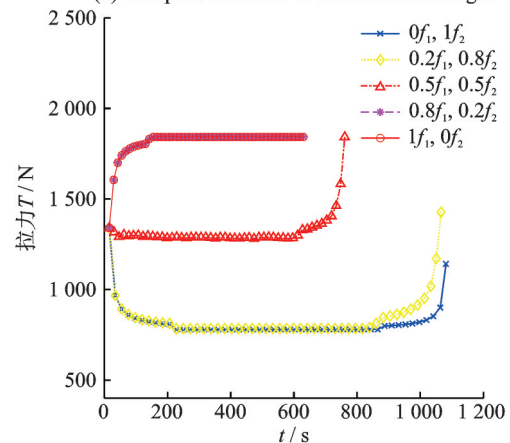
倾转翼 eVTOL 巡航性能参数和电推进系统温度变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知,当  $\omega_1$  为 1 和 0.8 时,倾转翼 eVTOL 各个巡航性能参数完全相同。从图 6(a~c) 可得,飞机在初始速度相同的情况下,都会通过改变螺旋桨的拉力进行加速或减速,到各自的最优速度后进行匀速飞行,最后加速到达目标距离,且加速度均可以保持在约束范围内



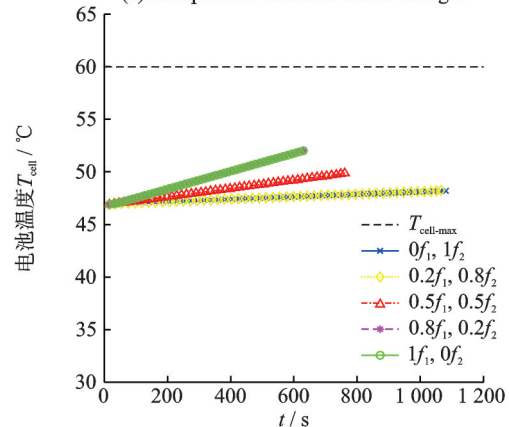
(a) Comparison curves of speed changes



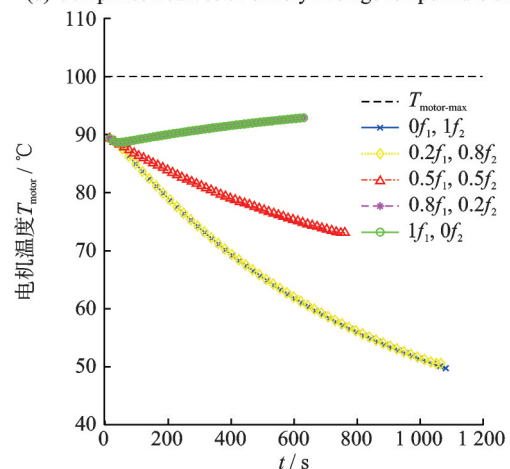
(b) Comparison curves of acceleration changes



(c) Comparison curves of thrust changes



(d) Comparison curves of battery average temperature changes



(e) Comparison curves of motor average temperature changes

图 6 参考倾转翼 eVTOL 巡航性能参数对比

Fig.6 Comparison of cruise performance parameters for reference tilt-wing eVTOL

以保证乘客舒适度。从图6(d~e)可得,当更注重时间权重时,飞机将加速并一直以最大巡航速度  $V_{\max}$  飞行,同时电池平均温度会增加到  $52\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,电机平均温度会增加到  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,二者均没有超过规定温度范围;而更注重电能消耗权重和权重组合为0.5和0.5的条件下,电池平均温度也会继续上升,但此时电机的散热率大于产热率,电机平均温度将下降。

为了确保优化结果的正确性,将图6(a)中对优化变量即巡航速度  $V$  的所得结果与文献[4]中Vahana在要求到达时间(Required time of arrival, RTA)约束下执行各种巡航速度任务时的对地速度剖面 and 飞行时间关系图进行了对比,如表2所示。

表2 优化后的巡航速度与时间关系对比

Table 2 Comparison of relationship between optimized cruising speed and time

基于改进粒子群算法的 eVTOL 巡航性能优化		考虑RTA约束的倾转翼 eVTOL 能量最优速度剖面 <sup>[4]</sup>	
巡航速度 $V_{\text{cruise}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	巡航时间 $t_{\text{cruise}}/\text{s}$	对地速度 $V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	飞行时间 $t/\text{s}$
45.5	1 081	45.5	约 1 100
—	—	50	约 1 000
65	760	60	约 850
—	—	70	约 710
80	630	80	约 600

由表2可得,本文基于改进粒子群算法对倾转翼 eVTOL 巡航性能参数优化的结果与相关文献中所示结果具有一定的相似度,证明了模型的合理性。

### 3.3 目标函数对比分析

不同工况下的具体的目标函数值  $J$ 、巡航时间  $t_{\text{cruise}}$  和电能消耗  $E_{\text{cruise}}$  值如表3所示。

表3 各权重对应的目标值

Table 3 Target values corresponding to each weight

权重 $\omega_1, \omega_2$	目标函数值 $J$	巡航时间 $t_{\text{cruise}}/\text{s}$	电能消耗 $E_{\text{cruise}}/(\text{kW}\cdot\text{h})$
$0f_1 1f_2$	0.608	1 081	14.9
$0.2f_1 0.8f_2$	0.677	1 066	15.0
$0.5f_1 0.5f_2$	0.626	760	23.7
$0.8f_1 0.2f_2$	0.347	630	33.1
$1f_1 0f_2$	0.010	630	33.1

由表3可知,当  $\omega_1$  为1时,目标函数值  $J$  最小,  $\omega_1$  为0.8时  $J$  增大了0.337,但巡航时间和电能消耗完全相同,也就是粒子群都收敛到了同一组最优解,说明当更注重时间短的巡航飞行工况时,权衡

能耗的变化对于整体目标参数变化影响较小。当  $\omega_2$  为1时,电能消耗最小,当  $\omega_2$  的从1减小到0.5,目标函数值  $J$  先增大后减小,说明当系统开始注重巡航时间的工况时,搜索  $f_1$  的最优值时会导致在能耗上牺牲一些效益。

## 4 结 论

针对考虑电系统热限制的倾转翼 eVTOL 巡航性能优化问题,建立了二维巡航飞行和电系统热管理的仿真模型,并提出了一种改进粒子群优化模型,针对不同目的飞行工况,对巡航过程中的时间和电能消耗的权衡进行优化计算分析,研究表明:

(1)倾转翼 eVTOL 巡航在考虑电系统热管理的条件下,采用改进粒子群算法的性能参数优化是可行的。为兼顾不同飞行工况目标的飞机性能,可选用不同的权重进行优化研究。

(2)电系统的温度主要与飞机功率有关,倾转翼 eVTOL 在确定的巡航高度和距离飞行时,速度越大会导致越多的电能消耗,速度越小能耗越小,但需要更长时间的飞行。

(3)在权重组合为1和0的条件下,飞机将加速到最大巡航速度  $80\text{ m/s}$  飞行到目标距离;在权重组合为0.5和0.5的条件下,飞机将先以  $65\text{ m/s}$  左右的巡航速度保持  $600\text{ s}$  左右后加速飞行到目标距离;在权重组合为0和1的条件下,飞机将以最小巡航速度  $45\text{ m/s}$  保持  $840\text{ s}$  左右后加速飞行到目标距离。

因此,通过基于改进粒子群算法的倾转翼 eVTOL 巡航性能优化,可以为未来 eVTOL 运营商对飞机的飞行性能参数选择提供一定的帮助,从而提高飞行任务的经济性、效率和可持续性,从而创造更大的价值和竞争优势。

### 参考文献:

- [1] HARRISON J, CHARLE D, ZENKER J, et al. Using multi-physics system simulation to predict battery pack thermal performance and risk of thermal runaway during eVTOL aircraft operations[C]//Proceedings of 2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS). [S.l.]: IEEE, 2019: 1-13.
- [2] FALCK R D, CHIN J C, SCHNULO S L, et al. Trajectory optimization of electric aircraft subject to subsystem thermal constraints[C]//Proceedings of the 18th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. [S.l.]: AIAA, 2017.
- [3] QIAO X, CHEN G, LIN W, et al. The impact of battery performance on urban air mobility operations

- [J]. *Aerospace*, 2023, 10(7): 631.
- [4] PRADEEP P, WEI P. Energy optimal speed profile for arrival of tandem tilt-wing eVTOL aircraft with RTA constraint[C]//Proceedings of 2018 IEEE CSAA Guidance, Navigation and Control Conference (GNCC). [S.l.]: IEEE, 2018.
- [5] SÁNCHEZ C N, SANCHEZ J C, RUIZ M Á V, et al. BADA eVTOL performance model for UTM traffic simulation and analysis[C]//Proceedings of the 11th SESAR Innovation Days. Brussels, Belgium: SESAR, 2021: 91.
- [6] WARREN M, GARBO A, HERNICZEK M K, et al. Effects of range requirements and battery technology on electric VTOL sizing and operational performance[C]//Proceedings of AIAA SciTech 2019 forum. [S.l.]: AIAA, 2019: 527.
- [7] 余越,牛欣怡,索晓杰.基于遗传算法的飞机垂直剖面优化研究[J].*电脑编程技巧与维护*, 2023(5): 132-134, 173.  
YU Yue, NIU Xinyi, SUO Xiaojie. Research on optimization of aircraft vertical profile based on genetic algorithm[J]. *Computer Programming Skills & Maintenance*, 2023(5): 132-134, 173.
- [8] 魏志强,张文秀,韩博.考虑飞机排放因素的飞机巡航性能参数优化方法[J].*航空学报*, 2016, 37(11): 3485-3493.  
WEI Zhiqiang, ZHANG Wenxiu, HAN Bo. Optimization method of aircraft cruise performance parameters considering pollution emissions[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(11): 3485-3493.
- [9] 回忆,魏志强,魏路欢.基于飞机性能影响的路径优化算法[J].*南京航空航天大学学报*, 2022, 54(6): 1145-1151.  
HUI Yi, WEI Zhiqiang, WEI Luhuan. A trajectory optimization algorithm based on impact of aircraft performance[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2022, 54(6): 1145-1151.
- [10] LOVERING Z. Vahana configuration trade study part I[EB/OL]. (2016-12-14) [2023-10-01]. <https://acubed.airbus.com/blog/vahana/vahana-configuration-trade-study-part-i/>.
- [11] KLESH A T, KABAMBA P T. Solar-powered aircraft: Energy-optimal path planning and perpetual endurance[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2009, 32(4): 1320-1329.
- [12] 王书礼,孙金博,康桂文,等.一种电动飞机电推进系统的能效优化方法[J].*航空学报*, 2021, 42(3): 53-61.  
WANG Shuli, SUN Jinbo, KANG Guiwen, et al. Energy efficiency optimization method for electric aircraft propulsion system[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(3): 53-61.
- [13] CHIN J, SCHNULO S L, MILLER T, et al. Battery performance modeling on sceptor X-57 subject to thermal and transient considerations[C]//Proceedings of AIAA Scitech 2019 Forum. [S.l.]: AIAA, 2019: 784.
- [14] 罗鸣,左林玄.基于改进粒子群算法的高超声速飞机爬升轨迹优化[J].*飞机设计*, 2023, 43(4): 7-11.  
LUO Ming, ZUO Linxuan. Climb trajectory optimization of hypersonic aircraft based on improved particle optimization[J]. *Aircraft Design*, 2023, 43(4): 7-11.
- [15] LEE B S, YUN J Y, HWANG H Y. Flight range and time analysis for classification of eVTOL PAV [J]. *Journal of Advanced Navigation Technology*, 2020, 24(2): 73-84.

(编辑:刘彦东)