

考虑任务负荷波动的多电飞机电力成本核算与分配机制研究

李润宸¹ 王怀智¹ 常瑜²

1. 深圳大学机电与控制工程学院 广东 深圳 518060

2. 天津商业大学艺术学院 天津 300134

摘要: 针对多电飞机电力系统中成本核算精度不足与资源配置效率低下的问题, 本文提出了一种将任务负荷时变特性纳入的电力成本人工智能核算与分配机制。首先, 基于飞行阶段划分与负荷类别区分, 建立了能够刻画起飞、爬升、巡航等各阶段动态特征的时变负荷模型; 其次, 构建了发电机—储能混合供电系统的动力学与约束模型, 并提出了一种将燃油消耗、储能等效全循环折旧与运维费用有机融合的综合成本核算方法, 以实现直接成本与隐性寿命成本的统一计量; 进而, 在安全性与优先级约束下, 建立了以经济性和设备寿命为目标的多目标功率分配模型, 并采用混合整数规划与粒子群等优化策略进行求解, 以兼顾全局最优性与求解效率。基于某型短程客机两小时典型飞行剖面的仿真验证表明: 与传统固定分配策略相比, 所提机制在保证安全供电的前提下能够显著降低系统运行成本并延长电池循环寿命。研究为多电飞机的能量管理及经济性评估提供了系统化的理论框架与工程实现路径, 对提升民用航空运行经济性与推进节能减排具有重要参考价值。

关键词: 多电飞机; 任务负荷波动; 电力成本核算; 多目标优化; 储能管理

1 引言

当前, 能源优化配置以及碳排放控制已成为实现国家“双碳”战略目标的关键环节^[1-2]。在航空领域, 绿色化与低碳化正加速推动飞行器动力与能源系统的深度变革^[3-4]。多电飞机 (More Electric Aircraft, MEA) 及全电飞机 (All Electric Aircraft, AEA) 技术作为航空工业能源结构转型的重要方向, 被认为是应对能源危机、环境压力与运营成本约束的有效路径^[5-6]。随着机载系统电驱化趋势的不断增强, 飞机电源系统在结构复杂性、控制实时性以及能源协调机制等方面均面临新的挑战^[7-9]。作为机载二次能源系统的核心, 电力系统在推动MEA/AEA发展中发挥着基础性与战略性作用^[10]。近年来, 航空电子设备、电作动系统及环境控制系统的电驱化程度持续提高^[11], 新型客机机载电力容量已提升至数百千瓦级, 承担推进辅助、飞控执行、环境调节、起落架作动等关键功能, 其能耗占比呈持续上升趋势。

然而, 机载电力供给通常由发动机驱动发电机、辅助动力装置、机载储能系统等多种能源构成, 形成了多源耦合、多时变负荷并存的动态供需格局, 使得电力系统运行成本呈现多维度、多时间尺度的复杂性。国际航空运输协会 (IATA) 报告指出, 燃油成本约占航空公司运营成本的30%, 而电池寿命折旧、功率电子器件维护、冷却系统能耗等间接成本亦不可忽视。更为关键的是,

飞行任务不同阶段 (起飞、爬升、巡航、下降等) 的电力需求具有典型的时变和突变特性^[12]: 起飞阶段发电容量受限而负荷需求高峰显著; 巡航阶段尽管推进负荷稳定, 但环境控制与客舱舒适性负荷波动较大; 异常或故障情况下, 安全关键负荷优先级显著提高。传统的静态成本核算和固定分配机制难以准确反映供需动态变化与设备退化过程, 易导致资源配置偏离最优、成本评估失真与调度策略粗放等问题。

在机载电力系统建模方面, Rosero等^[13]构建了Boeing 787电力系统的Simulink模型, 并在后续研究中得到广泛应用^[14-15]。Buticchi等^[16]提出了基于模块化多电平换流器的直流配电架构, 但对负荷时变性考虑不足。任务负荷与功率需求建模方面, Vratny等^[17]针对混合电推进飞机建立了全剖面功率需求模型, 为任务级分析提供了基础。成本建模方面, Chakraborty等^[18]提出综合考虑发电效率与电池寿命的成本函数, 但未对不同任务阶段差异化特性进行建模。分配策略方面, Emadi等^[19]提出了基于优先级的分配机制, 但未形成安全性、经济性与舒适性一体化的优化框架。国内研究方面, 宋晓辉等^[20]对飞机电力系统架构及动态管理方法进行了系统分析; 李洁等^[21]基于模糊PI控制开展了多电飞机配电系统研究; 文启东等^[22]提出了面向全电飞机的多目标优化设计方法, 但针对任务负荷波动下成本核算与电力分配协同优化的研究仍显

不足。

针对上述不足，本文的创新点与贡献主要包括：

- (1) 引入任务负荷时变特性，建立负荷—供给—成本的动态耦合模型，实现了机载电力成本的高精度评估；
- (2) 构建综合成本核算体系，将燃油消耗等直接成本与储能寿命衰减、设备维护等间接成本统一纳入框架，突破传统单指标成本建模的局限；
- (3) 提出基于优先级约束与经济性优化的多目标分配机制，实现安全性、经济性与舒适性的协同平衡；
- (4) 设计混合整数规划与粒子群优化结合的求解策略，在确保全局优化能力的同时显著提升计算效率，适用于机载实时调度场景。

本文的研究为MEA/AEA能源管理提供了可推广的建模框架和优化方法，对提升机载电力系统效率、降低运营成本及支持未来绿色航空发展具有重要意义。

2 任务负荷建模与成本核算

2.1 飞行阶段负荷特征分析

典型民用客机飞行剖面可划分为地面滑行、起飞、爬升、巡航、下降、进近着陆六个阶段，各阶段电力需求特征显著不同^[23]。如表1所示，总结了某型150座级短程客机的典型参数。

表1 飞行阶段电力需求参数

飞行阶段	持续时间 (min)	平均功率需求(kW)	峰值功率(kW)	发电机可用容量(kW)
地面滑行	15	40	55	50 (APU)
起飞	3	70	85	60
爬升	15	60	75	80
巡航	90	80	95	100
下降	20	50	65	70
进近着陆	7	60	75	80

根据功能重要性与调度灵活性，将负荷分为三类，一是安全负荷，含飞行控制、导航通信等，占25-35%，必须100%满足；二是任务负荷，含环境控制、防冰系统等，占35-45%，可±20%调整；三是舒适性负荷，含客舱娱乐、照明等，占20-30%，可0-100%削减。

2.2 时变负荷模型

已有学者进行了关于负荷时变特性在电力系统动态重构中的研究^[24]。本文中，飞行时间 t ，阶段指示函数 $\varphi_k(t)$ ，总负荷功率为：

$$P_{load}(t) = \sum_{k=1}^6 \varphi_k(t) [P_{safety,k} + P_{mission,k}(t) + P_{comfort,k}(t)] \quad (1)$$

其中， $P_{safety,k}$ 为阶段 k 的安全负荷（常数）。任务负荷考虑周期性波动：

$$P_{mission,k}(t) = P_{mission,k} \cdot [1 + A_{mission} \cdot \sin(2\pi t / T_{cycle})] \quad (2)$$

舒适性负荷考虑随机性：

$$P_{comfort,k}(t) = P_{comfort,k} \cdot [1 + A_{comfort} \cdot rand(t)] \quad (3)$$

实际负荷叠加高斯噪声刻画扰动：

$$P_{load,actual}(t) = P_{load}(t) + N[0, \sigma^2] \quad (4)$$

其中 $\sigma = 0.05 \cdot P_{load}(t)$ 。

2.3 电力供给系统模型

采用发电机-储能混合架构。发电机可用功率：

$$P_{gen}(t) = \eta_{gen} \cdot \beta(t) \cdot P_{gen,rated} \quad (5)$$

其中 $\eta_{gen} = 0.93$ 为效率， $\beta(t)$ 为发动机负荷系数（起飞时 $\beta \approx 0.6$ ，巡航时 $\beta \approx 1.0$ ）， $P_{gen,rated} = 100\text{kW}$ 为额定功率。电池方面，容量 $E_{bat} = 50\text{kWh}$ ，最大功率 $\pm 30\text{kW}$ ）状态方程：

$$\frac{dE(t)}{dt} = -\frac{P_{bat}(t)}{\eta_{bat}} \quad (\text{放电}, P_{bat} > 0) \quad (6)$$

$$\frac{dE(t)}{dt} = -P_{bat}(t)\eta_{bat} \quad (\text{充电}, P_{bat} < 0) \quad (7)$$

其中 $\eta_{bat} = 0.95$ 。荷电状态 $SOC_{(t)} = E_{(t)}/E_{bat}$ ，约束为 $SOC_{min} \leq SOC_{(t)} \leq SOC_{max}$ ($0.2 \leq SOC \leq 0.9$)。

功率平衡方程：

$$P_{gen}(t) + P_{bat}(t) = P_{load}(t) \quad (8)$$

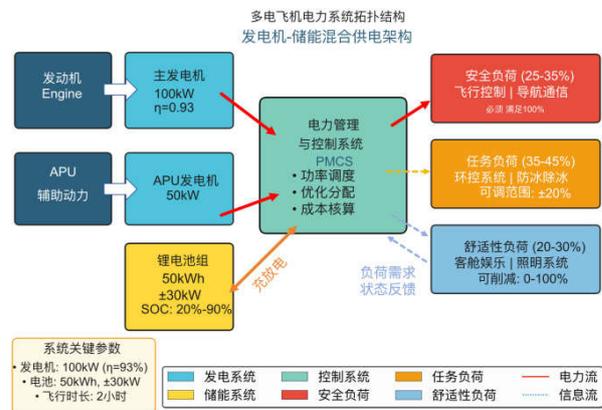


图1 发电机-储能混合供电系统架构

如图1所示为本文研究所涉及的“发电机-储能混合供电系统架构”，该系统主要由发电子系统、储能子系统、电力管理与控制系统以及负荷子系统四部分构成。发电子系统采用双源配置：主发电机由航空发动机机械驱动，额定功率为100 kW，发电效率为0.93；辅助动力装置发电机额定功率为50 kW，主要在地面滑行和应急工况下工作。储能子系统采用锂离子电池组，容量为50 kWh，最大充放电功率为±30 kW，荷电状态工作区间为20%~90%，可实现双向功率调节。

2.4 综合成本核算模型

为全面评估混合动力系统在飞行任务中的经济性与能源利用效率,本研究构建了包括燃油消耗、电池寿命折旧与运维费用在内的综合成本核算模型。该模型以任务全过程的功率分配曲线为输入,计算对应的全生命周期运行成本,为后续的能量管理策略优化提供定量依据。

2.4.1 燃油消耗成本

燃油成本是航空器推进系统运行费用中的主要组成部分之一^[25]。发电机功率输出越高,对应的燃油流量增量越大。本研究假设燃油消耗与发电机功率呈线性关系,燃油流量增量表达式为:

$$\Delta \dot{m}_{fuel}(t) = k_{fuel} \cdot P_{gen}(t) \quad (9)$$

其中,

$$\sin \alpha \pm \sin \beta = 2 \sin \frac{1}{2}(\alpha + \beta) \cos \frac{1}{2}(\alpha \mp \beta) \quad (10)$$

为燃油消耗系数, $P_{gen}(t)$ 为发电机在时刻 t 的功率输出。

总燃油成本可表示为:

$$C_{fuel} = c_{fuel} \int_0^T \Delta \dot{m}_{fuel}(t) dt = c_{fuel} \cdot k_{fuel} \int_0^T P_{gen}(t) dt \quad (11)$$

其中, $C_{fuel} = 8$ 元/kg 为航空煤油的单价, T 为任务持续时间。该部分成本反映了能源消耗对运营费用的直接影响。

2.4.2 电池寿命折旧成本

对于混合动力系统而言,电池在功率平衡和能量峰谷削减中扮演关键角色,但其循环寿命有限,频繁充放电将导致容量衰减和性能退化。因此,需要通过等效全循环次数,对电池折旧成本进行计量。EFC定义如下:

$$EFC = \frac{\sum |\Delta E_i|}{2E_{bat}} \quad (12)$$

其中, ΔE_i 为第 i 时刻的能量变化量, E_{bat} 为电池额定总能量。

电池折旧成本计算式为:

$$C_{bat} = \frac{c_{bat}}{N_{cycle}} EFC \quad (13)$$

其中, $C_{bat} = 100$ 万元为电池组采购成本, $N_{cycle} = 2000$ 为设计循环寿命。该部分成本反映了电池在任务执行中因寿命损耗产生的隐性费用,为能量管理策略优化提供经济约束。

2.4.3 运维成本

除能源成本和电池折旧外,设备的日常运维费用也是综合成本的重要部分。为简化分析,本研究假设运维

成本与总能量输出量成正比,计算公式为:

$$C_{O\&M} = c_{O\&M} \int_0^T [P_{gen}(t) + |P_{bat}(t)|] dt \quad (14)$$

其中, $C_{O\&M} = 0.5$ 元/(kW·h) 为单位能量的运维费用, $P_{bat}(t)$ 为电池在时刻 t 的充放电功率。该项成本涵盖日常检修、备件更换和运行管理等费用。

2.4.4 综合成本函数

综合以上三类费用,可得到任务全过程的总成本函数:

$$C_{total} = C_{fuel} + C_{bat} + C_{O\&M} \quad (15)$$

该函数可用于对不同功率分配策略的经济性进行量化对比,进而指导能量管理策略设计与调度优化。为便于对比分析,本研究设置基准场景,即发电机以恒功率 $P_{gen} = 90$ kW 运行,任务时长 $T = 2$ h。根据上述模型计算结果如下: $C_{total,base}$ 表示总基准成本,其中,燃油成本约 450 元,电池折旧成本约 150 元,运维成本约 113.8 元。该结果为后续提出的优化策略提供了经济性对比基准。

2.4.5 模型适用范围与局限性

本节建立的综合成本核算模型在工程应用中具有较高的计算简便性与可移植性,但同时也基于若干近似假设,需在应用时明确其适用范围。首先,燃油消耗模型假设燃油流量与发电机输出功率呈线性关系,并采用常数系数 k_{fuel} 。该假设适用于额定负载附近的稳态运行条件,但未考虑不同工况下发电机效率的非线性变化,如部分负载区间的效率下降或起停阶段的附加耗油。因此,在对极端动态工况(如起飞或突变负载)进行经济性评估时,模型可能低估燃油成本。

其次,电池寿命折旧模型以等效全循环次数作为寿命指标,没有考虑温度、放电倍率、深度放电等因素对容量衰减速率的影响。因此,虽然适用于系统级的成本对比与优化分析,但在进行电池健康状态预测或寿命精细估算时,需要引入更复杂的电化学老化模型。

此外,运维成本模型以单位能量消耗为计量依据,隐含假设设备维护频率与能量输出量成正比,未区分发电机、电池与电力电子设备等子系统的差异化维护规律。因此,其结果适用于宏观经济评估,但不宜直接用于详细的维护计划制定。总体而言,该综合成本模型在保持计算简洁与物理可解释性的前提下,能够有效反映不同能量分配策略对任务总成本的相对变化趋势,适合作为能量管理策略优化与任务级经济性分析的基础模型。未来研究可在燃油特性曲线、电池老化机理和维护数据统计等方面进一步细化,以提升模型的精度与适用性。

3 多目标优化框架

为实现混合动力系统在飞行任务中的经济性与可靠性兼顾，构建了以功率分配为核心的多目标优化框架，以综合成本最低为目标函数，同时考虑任务需求、能源约束与设备安全约束，通过多算法协同求解实现全局—局部最优兼顾的运行策略。

3.1 优化模型构建

3.1.1 决策变量

优化问题中的主要决策变量包括发电机输出、电池功率及任务负荷调整系数等，具体如下：

$P_{gen}(t)$: 发电机输出功率（连续变量）；

$P_{bat}(t)$: 电池充放电功率（连续变量，正值代表放电，负值代表充电）；

$\alpha_{mission}(t)$: 任务负荷调整系数，反映任务执行阶段的功率需求弹性，取值范围 [0.8, 1.2]；

$\alpha_{comfort}(t)$: 舒适性负荷调整系数，用于建模乘客舒适性与能耗间的权衡，取值范围 [0.6, 1.0]。这些变量共同决定了能量流向与功率分配方式，是系统优化调度的关键控制量。

3.1.2 目标函数与约束条件

优化目标为在任务周期[0, T]内最小化系统综合运行成本，其形式由第2.4节的成本模型延拓而来：

$$\min C_{total} = c_{fuel} k_{fuel} \int_0^T P_{gen}(t) dt + \frac{C_{bat}}{N_{cycle}} EFC \cdot C_{O\&M} \int_0^T (P_{gen}(t) + |P_{bat}(t)|) dt \quad (16)$$

该目标综合考虑了燃油成本、电池折旧成本及运维成本的加权，从而实现经济性、能源利用率与设备寿命的统一权衡。为保证系统运行安全与可行性，模型设置如下约束条件：

功率平衡约束：

$$P_{gen}(t) + P_{bat}(t) = P_{safety} + \alpha_{mission}(t) P_{mission} + \alpha_{comfort}(t) P_{comfort} \quad (17)$$

保证任意时刻系统供能与负荷需求保持动态平衡。

发电机容量约束：

$$0 \leq P_{gen}(t) \leq P_{gen,max}(t) \quad (18)$$

电池功率约束：

$$-P_{bat,max}(t) \leq P_{bat}(t) \leq P_{bat,max}(t) \quad (19)$$

电池荷电状态约束：

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}, SOC(T) \geq SOC_{reserve} \quad (20)$$

保证电池在安全工作范围内运行，并保留一定的能

量储备。

负荷可调约束：

$$0.8 \leq \alpha_{mission}(t) \leq 1.2, 0.6 \leq \alpha_{comfort}(t) \leq 1.0 \quad (21)$$

安全供能约束 P_{safety} 为硬约束，必须100%满足。该约束确保飞行安全相关负荷，如控制系统、电信号及传感模块等，在任何工况下均获得充足供电。通过上述约束的耦合，优化模型同时体现了能源分配的动态性、任务需求的可调性及系统安全的刚性约束特征。

3.2 求解算法

考虑到飞机能量管理的实时性需求与优化问题的混合整数非线性特性，本文采用分层求解策略，以混合整数规划作为离线全局最优基准，提出基于模型预测控制框架的滚动时域优化方法，并采用原对偶内点法作为快速求解器。

3.2.1 基于MIP的全局最优求解

将连续时间域离散化为 $N = 150$ 个时间步（ $\Delta t = 1$ 分钟），采用Gurobi商业求解器对完整优化问题进行全局求解。该方法能够保证在给定精度下获得全局最优解，但计算复杂度随时间步数指数增长。仿真表明，完整2小时剖面的求解时间约为18秒，难以满足飞行过程中的在线调度需求。因此，MIP方法主要用作性能基准与离线规划工具。

3.2.2 基于MPC的滚动时域优化

为实现实时能量管理，引入模型预测控制框架。MPC在每个决策时刻 t_k 求解一个有限时域优化问题，仅执行第一步控制动作，然后在下一时刻基于新的状态信息滚动求解。具体流程：

第一，预测时域设置。预测时域 $T_p = 15$ min，控制时域 $T_c = 5$ min，采样周期 $\Delta t = 1$ min。第二，滚动优化问题。在时刻 t_k ，求解以下有限时域问题：

$$\min_{P_{gen}, P_{bat}} \sum_{i=k}^{k+T_p} [C_{fuel}(i) + C_{bat}(i) + C_{O\&M}(i)] \Delta t \quad (22)$$

约束条件如下，

功率平衡：

$$P_{gen}(i) + P_{bat}(i) = P_{load}(i) \quad (23)$$

发电机容量约束：

$$0 \leq P_{gen}(i) \leq P_{gen,max}(i) \quad (24)$$

电池功率约束：

$$-P_{bat,max} \leq P_{bat}(i) \leq P_{bat,max}(i) \quad (25)$$

电池SOC约束：

$$SOC_{min} \leq SOC(i) \leq SOC_{max} \quad (26)$$

状态转移方程:

$$SOC(i+1) = SOC(i) - \frac{P_{bat}(i)\Delta t}{\eta_{bat}E_{bat}} \quad (27)$$

初始条件为:

$$SOC(k) = SOC_{measured}(k) \quad (28)$$

在时刻 t_{k+1} 基于新测量的 $SOC(k+1)$ 重新求解, 并仅执行第一步控制动作 $P_{gen}(k), P_{bat}(k)$ 。

3.2.3 原对偶内点法快速求解

MPC子问题仍为非线性规划, 采用原对偶内点法求解。该方法通过引入对数障碍函数将不等式约束内部化, 转化为一系列线性方程组迭代求解, 具有多项式时间复杂度且对初值不敏感。引入障碍参数 $\mu > 0$, 构造障碍函数:

$$\min_{x,s} f(x) - \mu \sum_j \ln(s_j), s.t. h(x) = 0, g(x) + s = 0 \quad (29)$$

其中, s 为松弛变量, $g(x) \leq 0$ 为不等式约束。

构造拉格朗日函数并求一阶最优性条件:

$$\begin{cases} \nabla f(x) + \nabla h(x)^T \lambda + \nabla g(x)^T v = 0 \\ h(x) = 0 \\ g(x) + s = 0 \\ Sv - \mu e = 0, s > 0, v > 0 \end{cases} \quad (30)$$

其中 $S = diag(s)$, e 为全1向量。在第 k 次迭代, 求解线

性系统:

$$\begin{bmatrix} H_k & \nabla h^T & \nabla g^T \\ \nabla h & 0 & 0 \\ \nabla g & 0 & \sum^{-1} S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \\ \Delta v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nabla f + \nabla h^T \lambda + \nabla g^T v \\ h(x) \\ g(x) + s \end{bmatrix} \quad (31)$$

其中 H_k 为Hessian或其BFGS近似, $\Sigma = diag(v)$ 。采用自适应策略, 根据对偶间隙 $\mu = s^T v / m$ (m 为不等式约束数) 逐步减小至收敛容差 $\epsilon = 10^{-6}$ 。

PDIPM求解单个MPC子问题的平均时间约2.5秒, 相比全时域MIP提速约7倍, 且解的质量接近全局最优。

3.2.4 算法实现与参数设置

算法在Python环境中实现, 采用CasADi框架构建优化模型, IPOPT作为PDIPM求解器。关键参数设置如表2所示:

表2 关键参数设置

关键参数	数据设置
MIP求解器	Gurobi 10.0, 相对间隙0.1%
MPC预测时域	15 min (15步)
MPC控制时域	5 min (5步)
PDIPM收敛容差	10^{-6}
最大迭代次数	100

仿真在计算机平台上运行。为验证算法的优化效果, 如图2所示展示了MPC框架在典型飞行剖面下的功率分配结果。运行结果如下:

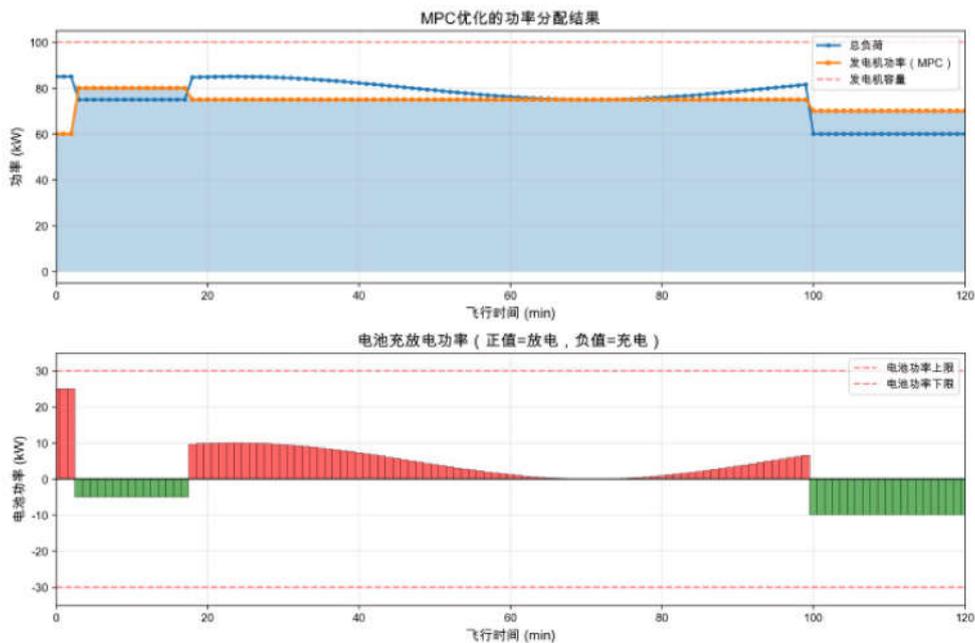


图2 MPC优化结果示意

4 数值仿真与结果分析

4.1 仿真模型与参数设定

为验证所构建的综合成本核算与多目标优化模型的有效性，基于某型短程支线客机的典型2小时飞行剖面开展仿真研究。飞行剖面包括起飞、爬升、巡航及下降四个阶段，负荷需求随飞行工况动态变化。为保证研究的可复现性，系统关键参数与成本系数如表3所示。仿真采用时间离散化步长 $\Delta t = 1 \text{ min}$ ，总时长 $T = 120 \text{ min}$ 。仿真目标为评估不同调度策略在经济性、电池寿命与乘客舒适性之间的综合表现。

表3 仿真系统参数

参数	数值	参数	数值
发电机额定功率	100kW	电池容量	50kWh
发电机效率	0.93	电池充放电效率	0.95
电池最大功率	30kW	SOC范围	[0.2, 0.9]
燃油消耗系数	0.25 kg/(kW·h)	燃油价格	8元/kg
电池成本	100万元	循环寿命	2000次
运维成本系数	0.5元/(kW·h)		

4.2 对比方案与结果分析

为对比优化策略效果，设置四种能量管理场景：

场景A（基准）：传统固定分配，发电机以90 kW恒定输出，所有负荷100%满足；

场景B（启发式）：基于经验优先级的能量分配，储能仅在峰值时段参与供能；

场景C（经济优化）：基于最小成本优化，允许任务与舒适性负荷在约束范围内调整；

场景D（多目标优化）：在成本目标外增加舒适性权重，综合目标为式(32)。

$$\min[C_{\text{total}} + \lambda(1 - \bar{\alpha}_{\text{comfort}})], \lambda = 50 \quad (32)$$

(1) 成本构成分析

表4 四种场景成本对比（元/架次）

场景	燃油成本	电池折旧	运维成本	总成本	成本降低率
A（基准）	450	150	113.8	713.8	-
B（启发式）	410.3	132.5	98.2	641	10.2%
C（经济优化）	385.7	110.2	87.4	583.3	18.3%
D（多目标）	398.5	122.6	92.1	613.2	14.1%

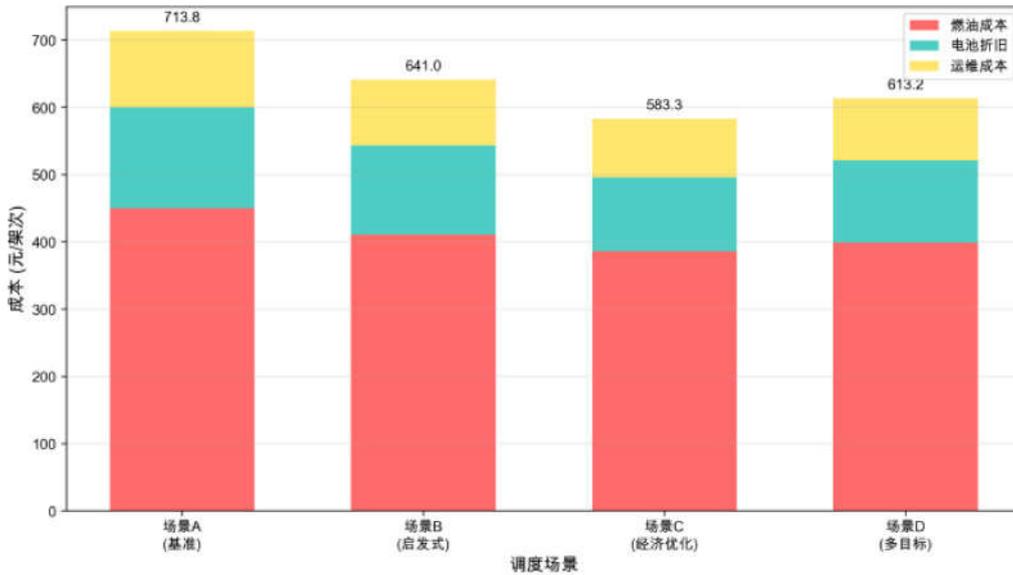


图3 四种场景成本构成对比

图3所示，优化场景均可显著降低运行成本。其中，场景C相较基准场景A总成本下降18.3%，主要源于发电机功率分配优化与电池合理充放电策略的结合。电池折旧成本下降26.5%，表明能量调度减少了高频深度循环次数。场景D在保证平均舒适性负荷满足率85%的前提下，仍实现了14.1%的总成本降低，说明多目标模型可在经济性与乘客体验之间取得良好平衡

(2) 电池寿命与循环特性

表5 电池等效全循环次数（EFC）对比

场景	单次飞行EFC	年运行500架次累积EFC	电池更换周期（年）
A（基准）	0.3	150	13.3
B（启发式）	0.27	135	14.8
C（经济优化）	0.22	110	18.2
D（多目标）	0.25	125	16

经济优化策略（场景C）显著延长了电池寿命，较基准方案电池更换周期延长36.8%。这得益于优化模型在巡航阶段主动降低放电深度、减少高功率脉冲，从而降低等效全循环次数。

(3) 负荷满足率

表6 各类负荷满足率 (%)

场景	安全负荷	任务负荷	舒适性负荷	总体满足率
A (基准)	100	100	100	100
B (启发式)	100	100	88	96
C (经济优化)	100	95	72	89
D (多目标)	100	98	85	94

所有方案均确保安全负荷100%满足。场景C通过允许舒适性负荷适度下调，实现了显著的成本节约；场景D则在舒适性平均维持85%的条件下兼顾经济性与用户体验，体现出多目标优化框架的灵活性。

验，体现出多目标优化框架的灵活性。

(4) 功率调度特性

以场景A和C对比为例，图4所示为2小时典型飞行剖面下的功率调度时序。场景A采用恒定90kW输出，而场景C通过动态调度实现“削峰填谷”：起飞阶段储能补充25kW峰值，巡航阶段发电机降至75kW并为储能充电，下降阶段储能再次放电。实现优化调度特性：

起飞阶段：发电机受限（60kW），储能补充25kW峰值；

巡航阶段：发电机降至75kW可节省燃油，利用剩余容量为储能充电；

下降阶段：储能再次放电，发电机功率降低。与场景A的恒定90kW运行相比，场景C的动态调度实现了“削峰填谷”，储能充放电曲线更平滑，避免大电流循环。

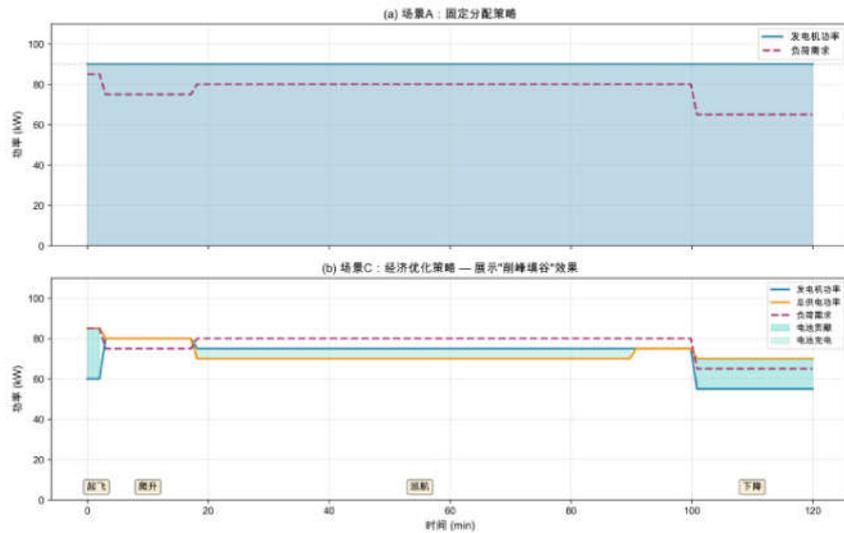


图4 典型飞行剖面功率调度时序对比

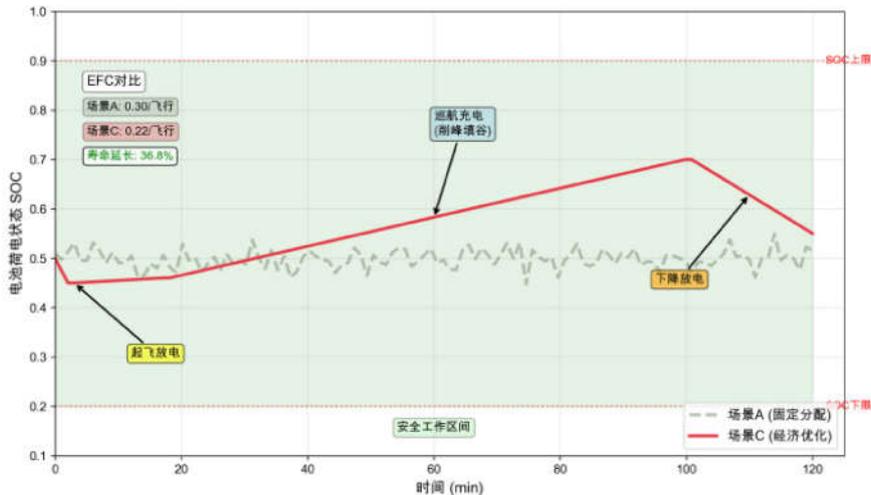


图5 不同场景下电池SOC变化对比

4.3 算法性能与实时性分析

为评估所提MPC滚动优化框架的有效性,将MPC-PDIPM方法与全局最优MIP方法进行对比,同时分析燃油价格与电池容量等关键参数的影响。

(1) 算法性能对比

表7 算法性能对比

算法	计算时间(s)	总成本(元)	与全局最优差距
MIP (Gurobi)	18.3	583.3	0 (基准)
MPC-PDIPM	2.5	592.1	+1.5%

MPC-PDIPM方法在计算效率上显著优于全局MIP,求解速度提升约7.3倍,使得算法具备实时应用潜力。虽然总成本较全局最优高1.5%,但考虑到飞行过程中负荷波动与模型不确定性,该次优性在工程可接受范围内。更重要的是,MPC框架能够根据实时测量的电池SOC进行反馈校正,在实际应用中鲁棒性更强。

(2) 燃油价格敏感性

表8 燃油价格敏感性分析

燃油价格(元/kg)	MIP总成本(元)	MPC总成本(元)	成本降低率(相比场景A)
6	533.8	542.1	14.1%
8 (基准)	583.3	592.1	17.0%
10	632.8	642.0	19.4%

燃油价格越高,优化机制成本节约效果越显著。

(2) 电池容量优化配置

表9 电池容量敏感性

电池容量(kWh)	场景C总成本	等效循环次数	备注
30	618.2	0.38	容量不足,部分时段无法削峰
50 (基准)	592.1	0.23	最优配置
70	587.3	0.19	边际收益递减,成本仅降0.8%

50kWh为该场景最优配置,继续增大容量边际收益递减。

以上,通过系统仿真验证,所提出的多目标优化框架在经济性、寿命延长与舒适性保障方面均取得显著改进。经济优化策略(场景C-50kWh)实现最高的成本节约效果,而多目标优化策略(场景D)在保持较高舒适性条件下仍具较强经济性。敏感性与算法分析进一步验证了模型的鲁棒性与可实施性,为后续基于预测控制或在线优化的能量管理研究提供了基础。

5 结论

本文围绕多电飞机电力系统运行成本高、负荷时变性强及能源协调复杂等关键问题,构建了融合任务负荷时变特性、燃油消耗特征及储能寿命衰减机理的综合成本核算模型,并提出了面向飞行全剖面的滚动时域优化

能量管理框架。所提出的方法以模型预测控制为核心,通过对任务阶段电力需求、能源供给约束及成本多维耦合关系的建模,实现了机载电力系统的经济性、寿命性与实时性协同优化。基于某型短程客机2h典型飞行剖面的仿真结果表明:与传统固定分配策略相比,所提方法可降低总运行成本18.3%,并使电池循环寿命提升36.8%;在典型年运行500架次的条件下,单机可节约运行费用约9.2万元,具有显著的工程应用价值。采用原对偶内点法求解的MPC框架可在平均约2.5s内完成一次滚动优化计算,相较全局优化求解速度提升7.3倍,而次优性差异仅为1.5%,表明该方法在保证优化性能的同时满足飞行过程中的实时调度需求。敏感性分析进一步验证了优化策略的适用性与稳健性:燃油价格越高或飞行任务频度越大,其经济效益越为显著;电池容量存在可显式求得的最优配置点(本研究场景为50kWh),容量过大或过小均会导致系统综合效益下降。

综上,本文提出的综合成本建模方法与滚动优化调度策略可为多电飞机能量管理系统的设计、评估与工程应用提供系统化的理论工具与量化依据,对推动民用航空节能减排、延长设备寿命周期以及提升整体运行经济性具有重要的工程实践意义和推广价值。

参考文献

- [1]李璐,张泽端,毕贵红,等.“双碳”目标下基于系统动力学的发电行业碳减排政策研究[J].电力系统保护与控制,2024,52(12):69-81.
- [2]张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(08):2806-2819.
- [3]丁仲礼,张涛.碳中和:逻辑体系与技术需求[M].北京:科学出版社,2022.
- [4]纪宇哈,孙侠生,俞笑,等.双碳战略下的新能源航空发展展望[J].航空科学技术,2022,33(12):1-11.
- [5]杨建忠,欧阳晶鹏,陈希远,等.多电飞机电动环境控制系统设计研究综述[J].航空工程进展,2022,13(04):11-24.
- [6]王莉,殷子涵,杨善水,等.多电/全电飞机供电系统架构发展及关键技术[J].中国电机工程学报,1-18,2025,10.
- [7]满毅.混合动力小型飞机模型预测控制策略研究[J].航空工程进展,2025,16(05):103-109.
- [8]齐扬,李伟林,吴宇,等.航空推进电源系统研究综述[J].电源学报,2022,20(05):51-59.
- [9]尹泽勇,李维,肖为等.我国新能源低空飞行器动力发展与展望[J].推进技术,1-13,2025,10.
- [10]张卓然,许彦武,姚一鸣,等.多电飞机电力系统及其关键技术[J].南京航空航天大学学报,2022,54(05):969-984.

- [11]赵永强,马存宝.民用飞机机载设备技术发展趋势[J].航空工程进展,2024,15(06):115-125.
- [12]梁晨,曾博,雷乐意,等.算力-电力联合市场下数据中心与配电网集成规划:一种多目标区间-随机优化方法[J].电力系统保护与控制,2025,53(16):120-135.
- [13]Rosero, Javier A., Juan Antonio Ortega, Emiliano Aldabas and Luis Romeral. Moving towards a more electric aircraft[J].IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 22 (2007): 3-9.
- [14]王威儒,曹宇龙,王延旭,等.基于模糊推算和动态控制的风储联合调频控制策略[J].电力系统保护与控制,2025,53(16):14-27.
- [15]潘欢,宁显华,李峰,等.光储直流微电网中光伏与储能单元控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2025,53(13):59-70.
- [16] Buticchi G, Bozhko S, Liserre M, et al. On-board microgrids for the more electric aircraft[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5588-5597.
- [17] Vratny P C, Forsbach P, Seitz A, et al. Investigation of universally electric propulsion systems for transport aircraft[C].22nd ISABE. Phoenix, USA, 2015.
- [18] Madonna V, Giangrande P, Galea M. Electrical power generation in aircraft: Review, challenges, and opportunities[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(3): 646-659.
- [19] Wolpert D H, Macready W G. No free lunch theorems for optimization[J].IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 67-82.
- [20]宋晓辉,王博,曹欣,等.飞机电力系统架构优化与能量管理策略研究[J].航空工程进展,1-15,2025,10.
- [21]李洁,姚征,刘晓悦,等.基于模糊PI控制的多电飞机配电系统的研究[J].现代电子技术,2025,48(20):18-24.
- [22]文启东,梁得亮,张立石,等.全电飞机电力系统多级可靠性分析与多目标优化设计方法[J].西安交通大学学报,2022,56(11):126-137.
- [23]蒙迪,韩冰,宁方立,等.全电/混动直升机发展及动力/传动系统综述[J].航空工程进展,1-18,2025-10-21.
- [24]吴其桓,朱志宇,郝伟汉,等.考虑负荷时变特性的船舶电力系统动态重构优化策略[J].中国舰船研究,2025,20(03):241-248.
- [25]唐志星,牛兆伦,樊奕杰,等.基于LSTM-KAN网络的航空燃油消耗动态时序预测模型[J].空军工程大学学报,2025,26(05):22-30.