基于PSO的航天器太阳能电池阵机理模型构建

何 佩¹, 尹溶森², 孙 波²

¹西北工业大学计算机学院,陕西 西安 ²北京空间飞行器总体设计部,北京

收稿日期: 2025年6月19日; 录用日期: 2025年7月22日; 发布日期: 2025年7月30日

摘要

航天器太阳能电池阵是航天器重要的能源供给系统,其性能直接影响航天器的在轨运行寿命和任务执行 能力。为精确评估和管理太阳能电池阵的在轨性能,本文提出了一种基于粒子群优化(PSO)算法的航天 器太阳能电池阵机理模型构建方法。首先,建立了太阳能电池阵的初步机理模型,该模型能够反映电池 阵的电学特性。其次,详细阐述了PSO算法的基本原理及其在模型参数辨识中的应用。通过将PSO算法与 机理模型相结合,实现了对模型关键参数的高效、精确辨识,有效克服了传统辨识方法易陷入局部最优 的缺点。最后,通过仿真验证和实际数据分析,对所构建模型的参数辨识结果进行了分析,并验证了模 型的准确性和有效性。研究结果表明,该方法能够为航天器太阳能电池阵的在轨性能评估、故障诊断及 健康管理提供可靠的理论依据和技术支持。

关键词

太阳能电池阵,粒子群优化,机理模型,参数辨识

Construction of the Mechanism Model of Spacecraft Solar Cell Array Based on PSO

Pei He¹, Rongsen Yin², Bo Sun²

¹School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi ²Beijing Space Vehicle Master Design Department, Beijing

Received: Jun. 19th, 2025; accepted: Jul. 22nd, 2025; published: Jul. 30th, 2025

Abstract

The spacecraft solar array is a crucial energy supply system for spacecraft, and its performance directly affects the on-orbit operational life and mission execution capabilities of the spacecraft. To accurately evaluate and manage the on-orbit performance of solar arrays, this paper proposes a method for constructing a mechanistic model of spacecraft solar arrays based on the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. Firstly, a preliminary mechanistic model of the solar array is established, which can reflect the electrical characteristics of the array. Secondly, the basic principles of the PSO algorithm and its application in model parameter identification are elaborated. By combining the PSO algorithm with the mechanistic model, efficient and accurate identification of key model parameters is achieved, effectively overcoming the drawback of traditional identification methods easily falling into local optima. Finally, through simulation verification and actual data analysis, the parameter identification results of the constructed model are analyzed, and the accuracy and effectiveness of the model are verified. The research results indicate that this method can provide reliable theoretical basis and technical support for on-orbit performance evaluation, fault diagnosis, and health management of spacecraft solar arrays.

Keywords

Solar Cell Array, Particle Swarm Optimization, Mechanism Model, Parameter Identification

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u>

CC Open Access

1. 引言

对于航天器作为人类探索宇宙、开发空间资源的重要平台,其在轨长期可靠运行是各项空间任务成 功实施的基础。在航天器众多关键分系统中,太阳能电池阵作为其唯一的或主要的能源供给系统,其性 能的稳定与高效直接决定了航天器的任务寿命和功能实现[1][2]。随着空间任务的日益复杂化和多样化, 对航天器能源系统的可靠性、效率以及在轨健康管理提出了更高的要求。因此,建立精确、高效的航天 器太阳能电池阵机理模型,对于指导电池阵的设计、优化其性能、进行故障诊断以及实现全生命周期管 理具有不可替代的理论与工程意义[3][4]。

当前,太阳能电池阵的建模方法主要可分为经验模型、物理模型和混合模型[5]。经验模型通常基于 大量的实验数据进行拟合,其优点在于形式简单、易于实现,但在缺乏足够实验数据或工作环境发生变 化时,其预测精度往往难以保证,且模型参数缺乏明确的物理意义[6]。物理模型则从半导体物理学基本 原理出发,通过建立复杂的电学方程来描述太阳能电池的伏安特性。这类模型能够更深入地反映电池阵 的内在机理,理论上具有更高的精度和更广的适用性。然而,物理模型通常包含较多的未知参数,这些 参数往往难以直接测量,且模型的复杂性也增加了参数辨识的难度[7]。混合模型则试图结合两者的优点, 在保证一定物理意义的基础上,通过引入经验修正项来提高模型的实用性,但其参数辨识问题依然是制 约模型精度的关键[8]。

在模型参数辨识领域,传统的辨识方法,如最小二乘法、牛顿法等,在处理非线性、多峰值问题时, 常常面临收敛速度慢、易陷入局部最优以及对初始值敏感等挑战[9] [10]。近年来,随着计算智能理论的 快速发展,以粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法为代表的群智能优化算法因其全局搜索 能力强、收敛速度快、实现简单等优点,在解决复杂优化问题中展现出巨大的潜力[11] [12]。PSO 算法模 拟鸟群觅食行为,通过个体间的信息共享和协作,在解空间中逐步逼近最优解,已被广泛应用于光伏系 统参数辨识[13]、电力系统优化调度[14]、图像处理[15]等多个工程领域。然而,针对航天器太阳能电池 阵这一特殊应用场景,尤其是在考虑空间复杂环境因素(如极端温度变化、高能粒子辐射、光照强度衰减 等)影响下,如何利用 PSO 算法高效、精确地辨识其机理模型参数,并结合实际在轨数据进行验证,仍是 当前研究面临的重要课题。

本文旨在构建一套基于 PSO 算法的航天器太阳能电池阵机理模型构建方法。首先,将详细阐述机理 模型的建立流程,并初步建立太阳能电池阵的电学模型。其次,深入探讨 PSO 算法的基本原理,并将其 应用于太阳能电池阵机理模型的参数辨识。最后,通过仿真验证和实际数据分析,对所构建模型的参数 辨识结果进行分析,并验证模型的准确性和有效性,以期为航天器太阳能电池阵的在轨性能评估、故障 诊断及健康管理提供理论依据和技术支持。

2. 航天器太阳能电池阵建模

太阳电池阵作为能量转换系统的核心组件,在光照期间为整个系统供能,并同时对蓄电池组进行充 电以及直接向负载供电。电池阵由多个太阳能电池片组成,其整体输出特性取决于各个单体电池的性能 表现[16]。

在特定的光照强度和温度条件下,太阳能电池的 I-V 特性曲线能够展示其电气性能,如图 1 所示。



Figure 1. Characteristic curves of I-V and P-V of solar cells 图 1. 太阳能电池 I-V 和 P-V 特性曲线

曲线上存在一个最大功率点,此时电池阵的输出功率达到最大值。随着环境条件的变化,如温度、 光照强度以及带电粒子辐射剂量的不同,太阳电池的 I-V 曲线也会随之变化,最大功率点的位置也可能 发生相应的移动[17]。

应用最广泛的单二极管等效电路模型如图2所示。



Figure 2. The equivalent circuit model of a single diode in solar cells 图 2. 太阳电池单二极管等效电路模型

基于图 3 太阳电池片的等效数学模型表达式如下:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} = I_{ph} - I_d \left\{ \exp\left[\frac{q(V + IR_s)}{AkT}\right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$
(1)

式中, I 表示太阳电池输出电流,单位为A; T 为太阳电池工作温度,单位为K; I_{ph} 表示光生电流,单位为A; I_d 表示二极管反向饱和电流,单位为A; R_s 表示串联电阻,单位为 Ω ; R_{sh} 表示并联电阻,单位为 Ω ; V 为负载端电压,单位为V; A 为二极管理想因子; q表示电子电荷常数, $1.6 \times 10^{-19}C$; k 为 玻尔兹曼常数, $1.38 \times 10^{-23} J/K$ 。

尽管此模型具有参数物理意义明确和精度较高的优点,但是由于其 I-V 曲线的隐含性,导致参数确 定困难、计算时间长、计算资源消耗过大,在一定程度上限制了其在工程实践中的应用。在工程领域中, 模型的实用性和精确性之间的平衡至关重要,因此,研究者们提出了多种基于不同假设的太阳电池工程 简化模型,提升模型的实用性。其中,最为典型的一种简化策略是采用模型参量降级法,该方法通过将 原本包含五个参数的复杂模型简化为仅含两个参数的更为简洁的模型,仅依赖于标准测试条件(Standard Test Conditions, STC)下的出厂参数,从而确定并计算模型所需的参数值,降低了模型复杂度和计算成本, 提高了其在工程实践中的应用可行性[18]。

太阳电池的工程用数学模型简化过程如下:

1) 并联电阻的影响可以忽略不计。在太阳能电池阵的正常工作条件下,特别是当光照强度较高时, 并联电阻 *R*_{sh}通常远大于串联电阻 *R*_s和二极管的正向电阻。这意味着流经并联电阻的电流相对较小,对 总输出电流的影响可以忽略不计。在工程实践中,为了简化模型和降低计算复杂度,通常会在高光照条 件下忽略并联电阻的影响。然而,在低光照或部分遮蔽条件下,并联电阻的影响可能变得显著,这需要 在特定应用中进行评估。未来的研究可以考虑在更广泛的工况下对这一假设进行实验验证,并分析其对 模型精度的量化影响。

2) 二极管暗电流的影响可以忽略不计。单体太阳电池的等效串联电阻通常远小于二极管的正向导通 电阻。在强光照射和短路状态下(即太阳电池的输出电压为 0),光生电流远大于二极管的反向饱和电流(暗 电流)。因此,暗电流对整体电流的贡献非常小,可以忽略不计。这一简化有助于降低模型的非线性程度, 提高参数辨识的效率。然而,在极低光照或开路电压附近,暗电流的影响可能需要更精细地考虑。建议 在后续研究中,通过实验数据进一步验证此简化在不同工况下的适用性。即:

$$I_{d}\left\{\exp\left[\frac{q\left(V+IR_{s}\right)}{AkT}\right]-1\right\}\approx0$$
(2)

则有:

$$I_{sh} \approx I_{ph} \tag{3}$$

并定义:

a) 开路状态下: *I* = 0, *V* = *V*_{oc};
b) 最大功率点处: *I* = *I*_{mn}, *V* = *V*_{mn}.

则太阳电池的工程实用模型如下:

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp\left(\frac{V}{C_2 V_{oc}}\right) - 1 \right] \right\}$$
(4)

其中 C_1 、 C_2 的计算公式如下:

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) \exp\left(-\frac{V_m}{C_2 V_{oc}}\right)$$
(5)

DOI: 10.12677/mos.2025.147537

$$C_{2} = \frac{\frac{V_{m}}{V_{oc}} - 1}{\ln\left(1 - \frac{I_{m}}{I_{sc}}\right)}$$
(6)

随着航天器在轨时间的增加,太阳电池片逐渐受到多种环境因素的影响。宇宙中的高能粒子和电磁 辐射会对太阳电池片的材料结构造成损伤,从而降低其光电转换效率。太空环境中极端的温度波动会进 一步加速太阳电池片的老化过程,不仅导致最大输出功率下降,还会改变其 I-V 特性曲线的关键参数。 根据上式可知,只需要知道给定工况下太阳能电池片 *I_{se}、V_{oe}、 I_m、 V_m* 的值,即可求出太阳电池片在该 工况下的 I-V 特性曲线。

结合生产厂家提供的太阳电池片在 STC (太阳辐射光 AM1.5,太阳辐射强度1000 W/m^2 ,工作温度 25 \mathbb{C})下寿命初期的参数,包括短路电流值 $I_{sc,B}$ 、开路电压值 $V_{oc,B}$ 、最大功率点电流值 $I_{m,B}$ 以及最大功率 点电压值 $V_{m,B}$,可以通过以下公式计算单体太阳电池片在轨任一时刻的短路电流 I_{sc} 、开路电压 V_{oc} 、峰值 电流 I_m 和峰值电压 V_m 。

$$\Delta T = T - T_{ref} \tag{7}$$

$$\Delta S = \frac{S}{S_{ref}} - 1 \tag{8}$$

$$I_{sc} = I_{sc,B} \frac{S}{S_{ref}} \left(1 + a\Delta T \right)$$
⁽⁹⁾

$$V_{oc} = V_{oc,B} \left(1 - c\Delta T \right) \ln \left(e + b\Delta S \right)$$
⁽¹⁰⁾

$$I_m = I_{m,B} \frac{S}{S_{ref}} \left(1 + a\Delta T \right) \tag{11}$$

$$V_m = V_{m,B} \left(1 - c\Delta T \right) \ln \left(e + b\Delta S \right)$$
(12)

式中, $T 和 S 分别为给定工况下的温度和光照强度; <math>T_{ref} \pi S_{ref} 分别为标准温度和标准光照强度; 补偿系数 a、b、c 分别为 0.0025(°C)^{-1}、0.0005 W/m^{2^{-1}}、0.00288(°C)^{-1}。将修正后的 <math>I_{sc} \times V_{oc} \times I_m \times V_m$ 代入式(4)中,可以得到任一时刻太阳电池片输出特性曲线。

太阳能电池阵在轨输出功率受到多种因素的影响,包括太阳光照强度、空间环境、太阳入射角、航 天器姿态、工作温度、天线遮挡及寿命衰减等。其中,日地距离因子和太阳入射角可以利用航天器轨道 根数得到[19] [20]。假设太阳电池阵的串联数为*M*,并联路数为*N*,且每个太阳电池单体具有相同的模 型参数,则可建立太阳能电池阵的工程模型,其表达式如下:

$$I = NI_{sc}K_d \left\{ 1 - C_1 \left[\exp\left(\frac{V}{C_2 V_{oc} M}\right) - 1 \right] \right\} \cos\theta$$
(13)

式中, θ 为电池阵太阳入射角(°), K_d 为日地距离因子,其表达式如下:

$$K_d = 1/d^2 \tag{14}$$

式中, d 为太阳能电池阵与太阳的距离。

根据式(13)结合该时刻的电压,从而得到相应的电流 I_{op} ,基于所得的电流和电压数据,可以进一步计算该时刻的输出功率 P_{op} ,其表达式如下:

$$P_{op} = V_{op} I_{op} \tag{15}$$

3. 基于 PSO 算法的模型参数辨识

3.1. PSO 算法基本原理

受鸟类觅食行为的启发,学者们提出了粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO) [21]。其模 拟过程为:在一个特定的搜索区域内存在唯一的食物源,一群鸟的任务是在此区域内找到这一食物源。 在寻找过程中,鸟类通过群体内部的信息交流机制,共享个体的位置信息,以此方式评估每个个体是否 为最优解,并将最优解的信息传播至整个群体。最终,所有鸟类都会聚集于食物源周围。

算法原理如下:

a) 初始化。随机初始化大小为*N*, 维度为*D*的种群,其中第*i*个粒子的位置和速度可分别表示为 $X_i^t = (x_{i1}^t, x_{i2}^t, \cdots, x_{iD}^t)$ 和 $V_i^t = (v_{i1}^t, v_{i2}^t, \cdots, v_{iD}^t)$;

b) 个体最优和全局最优。每个粒子自身的历史最佳位置为个体最优, 群体最优为所有粒子中的最佳 位置;

c) 粒子速度与位置的迭代更新。粒子在第t代的速度和位置的更新公式如下:

$$\begin{cases} v_{id}^{t} = wv_{id}^{t-1} + c_{1}r_{1}\left(p_{id}^{t-1} - x_{id}^{t-1}\right) + c_{2}r_{2}\left(g_{id}^{t-1} - x_{id}^{t-1}\right) \\ x_{id}^{t} = x_{id}^{t-1} + v_{id}^{t}, i = 1, 2, \cdots, N; d = 1, 2, \cdots, D \end{cases}$$
(22)

式中,t-1为迭代数, p_i^{t-1} 为第i个粒子所发现的最优位置, g_i^{t-1} 为整个粒子群发现的最优位置,w表示 惯性权重, c_1 、 c_2 表示加速因子, r_1 、 r_2 是区间[0,1]之间的随机数;

d) 个体最优和种群最优的更新;

e) 在达到算法终止条件后,输出找到的全局最优解。

3.2. 太阳电池阵机理模型的参数辨识

随着航天器太阳电池阵在轨运行环境的变化以及太阳电池阵的长期使用,其部分硬件参数可能会发 生漂移或变化。如果继续沿用原厂家提供的参数作为模型输入,往往难以准确反映太阳电池的实际运行 状态。为确保机理模型能够更精准地表征物理实体的动态特性,有必要结合遥测数据并采用参数辨识算 法对模型关键参数进行修正。在进行模型参数辨识的过程中,要求实际系统与仿真模型接受相同的输入 激励,通过对比二者的输出结果来评估差异,并以差异作为基础,进一步用于参数辨识方法的调整和优 化。基于此,本文以某卫星的历史遥测数据为基础,利用 PSO 算法对太阳电池阵机理模型中的关键参数 进行离线寻优。

太阳电池阵机理模型参数说明如表 1 所示。其中,太阳电池阵串并联数按设计参数填写,标准测试 条件下的 $V_{m,B}$ 、 $I_{m,B}$ 、 $V_{oc,B}$ 、 $I_{sc,B}$ 和补偿系数 a、b、c 根据历史数据进行修正,记为 $X = (I_{m,B}, V_{m,B}, V_{oc,B}, I_{sc,B}, a, b, c)$ 。将待辨识参数 X 及辐照度 S、温度 T、入射角 θ 、日地距离因子 K_d 和工作 电压 V 代入模型中,以电池阵输出电流 I 为输出目标,表示为:

$$I = f(T, S, \theta, K_d, V, X)$$
⁽²³⁾

定义目标函数如下:

$$m = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (I_i - I'_i)^2}$$
(24)

式中, N为样本的个数, I_i和 I'分别表示第 i 个样本的实测输出电流值和模型输出电流值。

参数名称	确定方法
太阳电池阵入射角 0	历史数据输入
太阳电池阵温度 T	历史数据输入
太阳电池阵日地距离因子 K _d	历史数据输入
太阳电池阵光照强度 S	历史数据输入
太阳电池阵工作点电压V	历史数据输入
太阳电池阵工作点电流 I	历史数据输出
太阳电池片短路电流 I _{sc,B}	设计资料 + 历史数据修正
太阳电池片开路电流 V _{oc,B}	设计资料 + 历史数据修正
太阳电池片峰值电流 I _{m,B}	设计资料 + 历史数据修正
太阳电池片峰值电压 V _{m,B}	设计资料 + 历史数据修正
补偿系数 a 、 b 、 c	经验值 + 历史数据修正
太阳电池阵并联数、串联数	设计资料

 Table 1. Parameter description of the solar cell array mechanism model

 表 1. 太阳电池阵机理模型参数说明

4. 机理模型参数辨识及仿真验证

4.1. 太阳电池阵参数辨识结果及分析

本文以某卫星 2023 年至 2024 年的历史数据集为主要验证数据,该数据集详细记录了不同在轨环境 下的动态输出电流变化情况。卫星运行周期约为 24 小时,每个周期以 30 min 采样间隔记录数据,最终 选取前 50 个周期共计 2400 个样本数据,采用 PSO 优化算法对模型进行修正,部分测点电流修正前、修 正后和实测值的对比和误差如图 3 和图 4 所示。



Figure 3. The calculated and measured current values before and after the correction of the period number 50, as well as the error 图 3. 周期数 50 修正前、修正后计算值与实测电流值以及误差



Figure 4. The calculated and measured current values before and after the correction of the period number 25, as well as the error 图 4. 周期数 25 修正前、修正后计算值与实测电流值以及误差

由图 3 和图 4 可知,机理模型修正后计算值更接近实测值,误差显著减小,表明修正后的模型在描述电池片部分电性能参数时具有更高的精度和适应性。

4.2. 太阳电池机理模型仿真及验证

基于前文建立的太阳电池阵机理模型,然后在 Matlab/Simulink 环境下进行了仿真实现,如图 5 所示。 该仿真模型的输入包括在轨环境条件、结构配置参数、修正后的硬件参数及补偿系数等,输出为电 池阵电流。为了验证模型的正确性,本文将 51 周期的在轨工况输入到模型中,将模型仿真结果和实测点 电流值进行对比,计算得出模型仿真匹配度为 94.72%,且其均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)和 决定系数(R²)等均优于常规模型。这些指标从不同角度衡量模型预测值与实际值之间的偏差,从而更客 观、全面的表明该仿真模型能够准确反映电池阵的工作状态,验证了模型搭建的正确性。





(b) 修正系数计算子模型

Figure 5. Simulation model of solar cell array 图 5. 太阳电池阵仿真模型

5. 总结

本文从机理角度实现了航天器太阳能电池阵机理模型的"建-组-验-校"环节。针对供能模块太 阳能电池阵,首先建立了任意工况下电池阵的在轨伏安模型;其次基于 PSO 算法对初步机理模型中的参 数进行辨识;最后在 Matlab/Simulink 搭建了符合其机理的仿真模型,并基于仿真模型匹配度指标对模型 进行了验证。实验结果表明,经过参数辨识后的模型输出更为接近实测值,搭建的仿真模型也符合太阳 电池阵的机理特性。

参考文献

- [1] 姜东升,程丽丽. 空间航天器电源技术现状及未来发展趋势[J]. 电源技术, 2020, 44(5): 785-790.
- [2] Sazonov, V.V. (2022) Mathematic Modeling of Spacecraft's Solar Panels. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 14, 322-334. <u>https://doi.org/10.1134/s2070048222020120</u>
- [3] 谢宗武, 宫钇成, 史士财, 等. 空间太阳能电池阵列技术综述[J]. 宇航学报, 2014, 35(5): 491-498.
- [4] Sgorlon Gaiatto, C., Antonello, F., Segneri, D., Sousa, B., Abascal Palacios, B., Schiavo, A., et al. (2025) A Novel Physics-Based Computational Framework to Model Spacecraft Solar Array Power under Degradation: Application to European Space Agency (ESA) Cluster Mission. Acta Astronautica, 226, 341-348. <u>https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.10.052</u>
- [5] 赵光权, 王盟, 刘大同, 等. 航天器电源建模仿真综述与展望[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(4): 1-18.
- [6] 秦涛. 航天器电源系统建模与仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [7] Liu, C., Li, H., Zhang, F. and Wang, X. (2022) Improvement on the Passive Method Based on Dampers for the Vibration Control of Spacecraft Solar Panels. *Advances in Mechanical Engineering*, 14, 3. <u>https://doi.org/10.1177/16878132221080596</u>
- [8] 张辉, 董珂琪, 姚伟. 月球科研站能源技术研究进展与展望[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(5): 423-434.
- [9] 胡浪, 乔俊叁, 何涛. 基于最小二乘向量机的锂离子电池建模及参数辨识研究[J]. 金属功能材料, 2021, 28(6): 52-56.
- [10] 卢昊, 李广军, 张兰春. 基于动态遗忘因子递推最小二乘法和改进粒子滤波算法的锂电池 SOC 估计[J]. 车用发动机, 2024(3): 66-73.
- [11] Guo, X., Alharbi, A. and Alansari, A.M. (2024) Application of Innovative SVM-PSO-GA Algorithm to Study Vibrations of Improved Perovskite Solar Cells. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, **32**, 2233-2250.

https://doi.org/10.1080/15376494.2024.2377412

- [12] Singh, S., Chauhan, P. and Singh, N. (2020) Capacity Optimization of Grid Connected Solar/Fuel Cell Energy System Using Hybrid ABC-PSO Algorithm. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 10070-10088. <u>https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.018</u>
- [13] 康童,姚建刚,金敏,等. 采用改进型 SOS 算法的光伏组件模型参数辨识[J]. 计算机应用研究,2020,37(4):1034-1042.
- [14] 胡清清, 曹渝昆. 一种基于改进 PSO 和 GA 的动态低碳调度方法[J]. 上海电力大学学报, 2022, 38(1): 9-16.
- [15] Almahdawi, H., Akbas, A. and Rahebi, J. (2025) Deep Learning Neural Network Based on PSO for Leukemia Cell Disease Diagnosis from Microscope Images. *Journal of Imaging Informatics in Medicine*, 1-10. https://doi.org/10.1007/s10278-025-01474-x
- [16] Cao, Y., Zhang, X., Hao, Y., Ge, X. and Cao, D. (2024) Coupled Vibration Analysis of the Spacecraft with the Flexible Shaft and Solar Panels Assembly. *Aerospace Science and Technology*, **151**, Article ID: 109259. https://doi.org/10.1016/j.ast.2024.109259
- [17] Sedelinkov, A., Nikolaeva, A., Serdakova, V. and Khnyryova, E. (2024) Technologies for Increasing the Control Efficiency of Small Spacecraft with Solar Panels by Taking into Account Temperature Shock. *Technologies*, 12, Article No. 207. <u>https://doi.org/10.3390/technologies12100207</u>
- [18] Wu, B., Huang, X. and Wu, X. (2025) Transparent Smart Radiation Device for Efficient Thermal Management of Spacecraft Solar Cells. *Case Studies in Thermal Engineering*, **71**, Article ID: 106161. <u>https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106161</u>
- [19] 孟婷玉. 深空探测器能源建模与仿真系统[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [20] 贺广松,李新洪,王谦. 模块化航天器电源系统仿真研究[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(10): 137-140+170.
- [21] Yoshida, H., Kawata, K., Fukuyama, Y., Takayama, S. and Nakanishi, Y. (2000) A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Security Assessment. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15, 1232-1239. <u>https://doi.org/10.1109/59.898095</u>