doi: 10.7690/bgzdh.2026.03.009

DVFS 在低空飞行器中的发展现状与趋势

王鹏飞，张锦绣
（中山大学航空航天学院，广东 深圳 518107）

摘要：为应对低空飞行器（low-altitude aircraft，LAA）日益增长的自主计算需求与有限机载能源之间的日益突出的矛盾，动态电压频率调整（dynamic voltage and frequency scaling，DVFS）技术作为平衡性能与功耗的关键，对提升 LAA 续航与任务能力具有重要研究价值。在剖析 LAA 异构计算架构与动态负载特性的基础上，系统梳理了 DVFS 技术的演进路径，总结了从传统启发式、前瞻性预测式，到基于学习的自适应式与面向异构平台的系统级协同优化等主流方法，并对比分析了各类策略在实时性保障、动态响应与实现复杂度等方面的优劣。以水空跨介质飞行器（aerial-aquatic vehicles，AAVs）为例，重点探讨了极端工况对现有 DVFS 技术提出的严峻挑战。结合当前研究的不足，对未来融合模式感知、轻量化预测与多维度资源协同的整体式管理框架进行了展望。

关键词：LAA；DVFS；实时系统；能效优化；AAVS
中图分类号：TP316；V27　　**文献标志码：**A

Development Status and Trend of DVFS in Low Altitude Aircraft

Wang Pengfei, Zhang Jinxiu
(*School of Aeronautics and Astronautics*, *Sun Yat-sen University*, *Shenzhen* 518107, *China*)

Abstract: To cope with the increasingly prominent conflict between the increasing demand for autonomous computing and the limited on-board energy for low-altitude aircraft (LAA), as the key to balance performance and power consumption, dynamic voltage and frequency scaling (DVFS) technology has important research value to improve the endurance and mission capability of LAA. Based on the analysis of LAA heterogeneous computing architecture and dynamic load characteristics, the evolution path of DVFS technology is systematically combed, and the mainstream methods are summarized from traditional heuristic and forward-looking prediction to learning-based adaptive and system-level collaborative optimization for heterogeneous platforms. The advantages and disadvantages of these strategies in terms of real-time guarantee, dynamic response and implementation complexity are compared and analyzed. Taking the aerial-aquatic vehicles (AAVs) as an example, the severe challenges to the existing DVFS technology under extreme conditions are discussed. Considering the shortcomings of current research, the future integrated management framework, which integrates mode perception, lightweight prediction and multi-dimensional resource collaboration, is prospected.

Keywords: LAA; DVFS; real-time system; energy efficiency optimization; AAVS

0　引言

近年来，以无人机（unmanned aerial vehicles，UAVs）为代表的低空飞行器（LAA）技术快速发展，已成为现代战争关键装备，应用贯穿情报侦察至特种作战。然而，随着自主任务能力提升，LAA 有限的机载能源与日益增长的动态实时计算需求间的矛盾愈发尖锐，已构成制约其作战半径、任务续航与战场生存能力的核心瓶颈。

该矛盾主要体现在：1) 执行自主导航、目标识别等复杂任务，需在嵌入式平台上运行高强度计算密集型算法[1]；2) 高昂的计算需求与 LAA 严格的能源限制形成直接冲突，限制了作战时长[2]。更具挑战性的是，飞行器在不同任务阶段的计算负载剧烈变化，使静态电源管理策略失效；或为确保峰值性能而高功耗运行，导致能源浪费；或为节能而固守低功耗，却可能因无法响应突发计算而危及飞行安全。

水空跨介质飞行器（AAVs）作为新兴 LAA 形态，在隐蔽渗透、濒海侦察等方面具备广阔应用前景[3]，但其频繁的跨介质转换过程，对控制系统的动态响应和能源效率管理也提出了更严格的要求。

在这一背景下，动态电压频率调整（DVFS）已成为化解矛盾的关键技术路径。Weiser 等[4]和 Pouwelse 等[5]的验证为 DVFS 奠定了理论基础，开创了性能与功耗动态权衡的新范式。近年的研究持续证实 DVFS 的核心地位，例如 Zidar 等[6]在超低功耗嵌入式系统环境下实现了高达 47.7%的能效提

收稿日期：2024-11-16；**修回日期：**2024-12-22
基金项目：广东省科技计划项目（2025B1111130002）；广东省专项支持计划项目（2023TX07A477）；南方海洋科学与工程广东省实验室（珠海）（SML2023SP229；SML2024SP007）
第一作者：王鹏飞（2001—），男，四川人，硕士。

升；Liubimov[7]强调了 DVFS 与 DPM 的协同优化需求；Ramegowda 等[8]在 FreeRTOS 平台验证了有效性。这些研究表明，DVFS 不仅是节能手段之一，而且是在微秒级时间尺度内实现性能与能耗权衡的主要技术路径。

将 DVFS 技术直接应用于高安全、高可靠的 LAA 平台，尤其是在军事应用场景下，面临着独特的挑战。飞行器固有的硬实时约束、任务攸关的可靠性要求，以及复杂电磁对抗环境下的鲁棒性需求，都对 DVFS 策略的设计提出了全新课题。特别是在 AAV 这类跨域平台上，DVFS 算法还必须适应任务场景的剧烈切换与极端物理环境的考验。

笔者系统性地梳理与分析 DVFS 技术在低空飞行器，特别是面向国防应用领域的研究现状与挑战。探讨该技术在 LAA 复杂运行环境下面临的挑战，评述现有策略，并展望其在 AAV 这一新兴平台上的应用前景与技术难点。通过对现有文献的整合与分析，力求为该交叉领域的后续研究提供理论参考与技术方向。

1　LAA 中 DVFS 的硬件与系统

1.1　LAA 混合关键性计算架构

为应对复杂任务，现代 LAA 机载平台普遍采用异构与分布式设计[9]，以契合飞行安全与智能计算的需求。这种架构的核心特征是飞行控制器（flight controller，FC）与伴飞计算机（companion computer）在物理和逻辑上的分离。这种分离式设计是混合关键性系统（mixed-criticality systems，MCS）理念的硬件体现，旨在通过物理隔离为不同关键等级的任务提供可靠保障[10]，并天然地将 DVFS 的应用场景划分为 2 个截然不同的领域。这种典型的分离式硬件架构如图 1 所示。

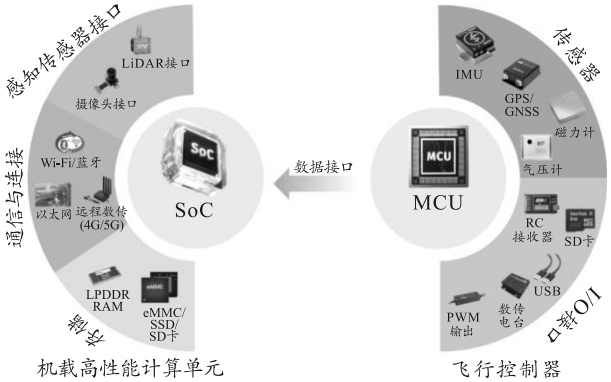

图 1　飞行控制器与机载计算单元的硬件架构

1.1.1　飞行控制器

FC 是保障 LAA 飞行安全的核心，专用于处理“内环”飞行控制任务。它通常基于 STM32 等可预测的微控制器（microcontroller unit，MCU）。其核心职责包括：高频率融合传感器数据、实时解算飞行器姿态以及输出精确的电机控制信号。

这些任务具严格的硬实时截止时间，延迟可能破坏飞行稳定，故 FC 设计优先保证时序可预测性。硬实时系统的可调度性分析依赖于精确的最坏情况执行时间（worst-case execution time，WCET）的精确界定[11]。

FC 端的 DVFS 策略以保守稳定为原则，通常采用能满足 WCET 边界的一组受限频点，运行期仅在安全阈内小幅调节，避免破坏可调度性。

1.1.2　伴飞计算机

与 FC 不同，伴飞计算机是 LAA 高级自主功能的计算核心，也是应用 DVFS 的理想平台。它通常是高性能异构片上系统（system-on-chip，SoC），如英伟达的 Jetson 系列或高通的骁龙飞行平台，集成了多核中央处理器（CPU）、图形处理器（GPU）及 AI 加速器（NPU）等复杂的异构计算资源。

伴飞计算机承载如视觉同步定位与建图、目标检测、路径规划等计算与数据密集型任务，其计算负载动态变化剧烈[12]。例如，在开阔区域负载较低，但在障碍物密集时计算需求会激增[13]。由于这些智能任务具软实时特性，允许时间裕度，这为 DVFS 在满足性能约束下最大化能效创造了巨大空间。

图 2 总结了 LAA 中常见的支持 DVFS 的处理器/微控制器型号及其主要应用领域。

1.2　SoC 上 DVFS 的实现机制与现实挑战

上述分析指出，LAA 中的伴飞计算机 SoC 是应用 DVFS 技术的核心。然而，在 SoC 上有效实施 DVFS 并非简单的软件调用，必须深入理解硬件机制并正视现实挑战。若忽视底层约束，节能效果会大打折扣，甚至总能耗不降反升。

DVFS 技术的有效实施，根植于其底层的硬件支持。其核心物理原理在于互补金属氧化物半导体电路的动态功耗模型：

$$P_{\text{dynamic}} \propto \alpha C V_{dd}^2 f \text{。} \tag{1}$$

式中：P_{dynamic} 为动态功耗；α 为活动因子，表征在一个时钟周期内发生状态转换的晶体管比例；C 为总开关电容；V_{dd} 为供电电压；f 为工作频率[14]。式(1)表明，同步降低电压与频率能够带来功耗的指数级节省。硬件上，电源管理集成电路和锁相环负责生成稳定电压和时钟信号，而软件则在一组由厂商

预定义和验证的、被称为操作性能点(OPP)的离散电压/频率对之间进行选择与切换[15]。

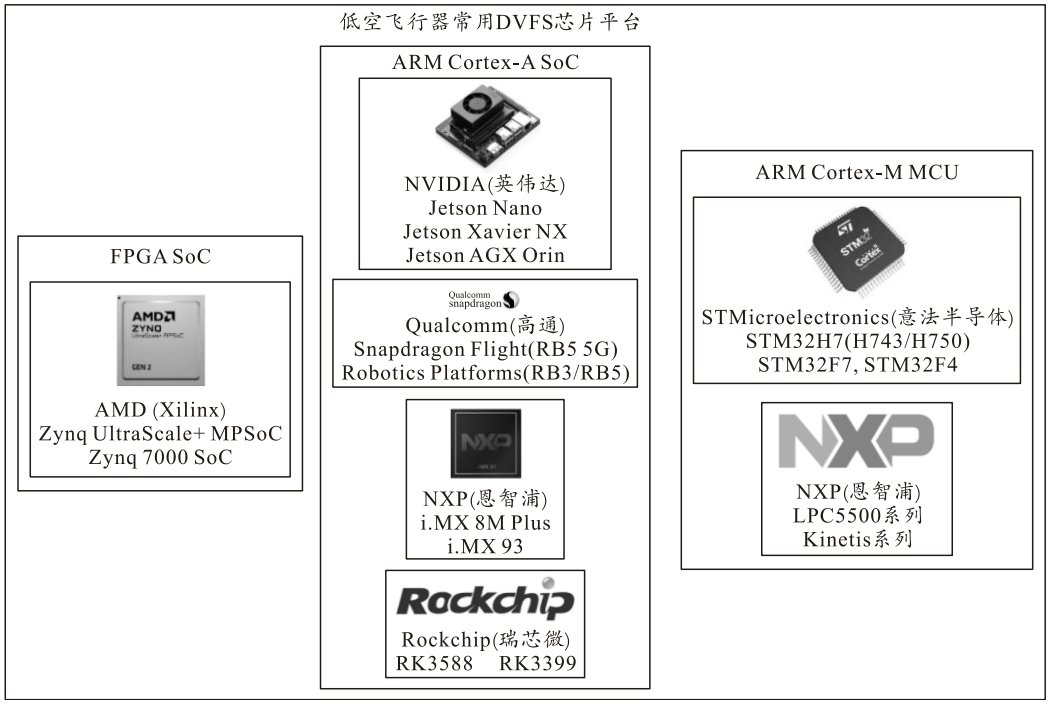

图 2 低空飞行器中常见的支持 DVFS 的处理器/微控制器型号及其主要应用

尽管原理明确，但实际应用中 DVFS 面临 3 大挑战：

1) 性能伸缩非线性：任务执行时间并非与频率严格成反比。许多智能任务呈现“内存密集型”特征，其瓶颈在于 DRAM 访存延迟而非 CPU 运算[16]。降频无法有效改善性能，甚至可能因执行时间延长而反增总能耗[17]。

2) 系统功耗构成复杂：总能耗非仅由 CPU 决定，SoC 非核心模块、传感器等功耗占比显著，且与 CPU DVFS 状态弱相关。单纯 DVFS 节能潜力有限，需与 DPM 等系统级方法协同[18]。实测表明 Jetson AGX Xavier 平台中，图像传感器功耗占比达 28%，且与 CPU 频率呈弱相关性，需独立电源域管理[19]；因此，单纯依靠 DVFS 节能潜力有限，需与动态电源管理等系统级方法协同优化[20]。

3) 切换开销不可忽视：每次电压/频率切换均伴随延迟与能量消耗。若调节过于频繁，其开销可能抵消节能效果[21]。故策略需具备“成本感知”能力。

综上所述，SoC 上的 DVFS 并非孤立的技术问题，而是一个涉及硬件、系统和安全性的多维度优化问题。

2 LAA 对 DVFS 技术的挑战与需求

LAA 的机载计算负载因多样化任务和复杂环境而高度动态变化[22]。这种剧烈波动与飞行安全所需的严格实时性约束相结合，给 DVFS 策略设计带来挑战。同时，超视距飞行、多机协同等新兴应用正不断推高计算需求，使该挑战在尺寸、重量和功率受限的 LAA 上尤为明显[23]。

2.1 低空飞行器控制系统的动态负载特性

LAA 机载控制系统的计算负载波动，主要源于飞行任务剖面的变化、环境感知需求的差异以及突发事件的响应。

2.1.1 不同飞行阶段的负载差异

图 3 展示了不同飞行阶段的计算负载变化。

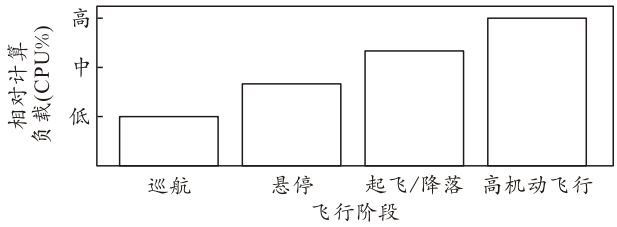

图 3 LAA 不同飞行阶段的计算负载变化

平稳巡航时，负载处基线水平(维持姿态)。起降阶段因涉及精密控制和地面效应处理，负载显著升高。而在有风扰的悬停或剧烈机动时，控制系统需高频解算姿态以维持稳定，导致计算负载瞬时达峰值[24]。这种贯穿任务全程的可预测负载起伏，是 DVFS 策略首先要适应的基本场景。

2.1.2　环境感知与任务载荷的计算需求

LAA 的计算负载亦随环境复杂性与任务载荷剧烈波动。在城市峡谷等非结构化环境中，系统需持续运行 SLAM 和动态避障等计算密集型算法[25]。研究表明，即便部署轻量级算法（如 YOLOv4-Tiny[26]）或在不同嵌入式平台上使用专用硬件实现视觉里程计[27-29]，机载实现复杂视觉算法仍面临严峻算力挑战。为应对此挑战，学术界在探索新技术，如 Kulkarni 等[30]提出一种基于“事件相机”的视觉惯性里程计方法，通过自适应事件累积来降低计算开销，这表明新的传感和处理范式有望与 DVFS 协同，进一步优化能效。

更关键的是，这些计算任务通常是并发执行的，其负载会相互叠加，共同构成总体的系统计算压力。图 4 直观地展示了这种负载叠加效应。

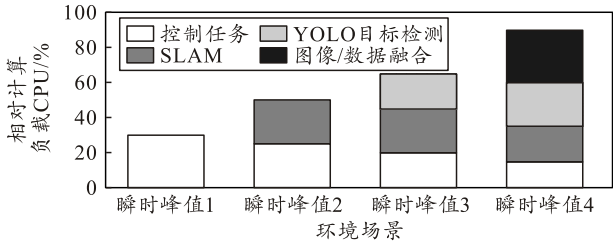

图 4　LAA 在不同任务组合下的计算负载构成

2.1.3　突发事件与模式切换引发的负载波动

应急响应（如传感器异常、避障）和飞行模式切换也会导致计算负载骤增，需即时启动诊断与容错算法。此现象在 AAV 跨介质转换时尤为突出，系统需在极短时间内应对流体动力变化和模式切换，对 DVFS 的响应速度和实时性提出极高要求[31]。

2.2　实时性要求

LAA 的飞行控制系统属于硬实时系统，任何计算延迟都可能引发严重后果，因此实时性是 DVFS 策略设计的首要约束。其核心挑战主要体现在：1) 截止时间保障。DVFS 通过调节处理器频率直接影响任务执行时间，若缺乏精确分析或保守设计，可能导致关键任务错过截止时间，破坏系统可调度性[32-33]。2) 可预测性与安全性。频率和电压的动态切换会引入额外开销和不确定性，降低系统时序可预测性，甚至在缺乏安全机制时成为潜在的攻击入口[34]；因此，DVFS 策略的设计必须以保证系统行为的可预测性为前提。

2.3　对 DVFS 策略的需求

综合前述分析，LAA，尤其是 AAV 的动态负载特性与实时性约束，对应用于其上的 DVFS 策略提出了核心需求：

1) 实时性保证：策略的首要任务是绝对保障所有关键控制任务的截止时间，这是飞行安全的基石。

2) 自适应性：策略必须能快速、准确地感知并响应计算负载的剧烈波动。

3) 能源效率：在满足性能与实时性约束的前提下，最大化地节省能源，以延长续航[35]。

4) 低开销：策略自身的算法复杂度、运行时计算开销及 OPP 切换引入的延迟与功耗，都必须被控制在最低水平[36]。

5) 高鲁棒性：策略需在各种飞行场景、计算负载及外部干扰下，始终保持稳定、可靠的工作状态。

如图 5 所示，这 5 大需求相互交织，共同构成了一个复杂的多目标优化问题。

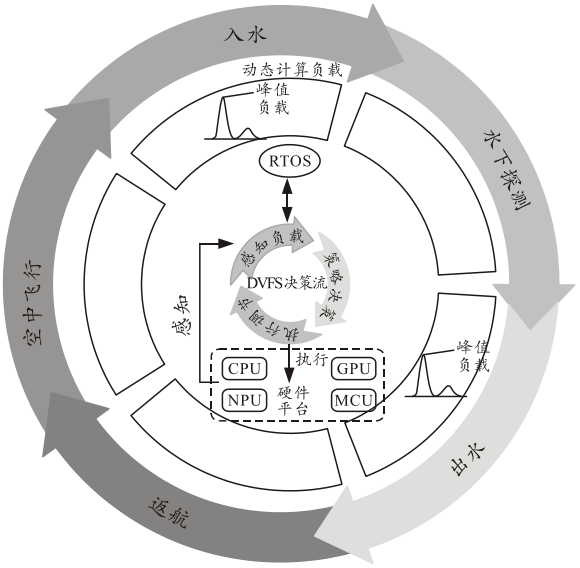

图 5　AAV 任务场景下从宏观任务到微观硬件调控的系统

图 5 所描绘的 AAV 任务场景，正是一个将本章所讨论的各项挑战与需求进行整合的系统视图，它直观地论证了为何上述需求缺一不可。

3　主流动态 DVFS 方法

DVFS 技术的发展史，本质上就是为更优地满足上述 5 大需求而不断演进的历史。本章将剖析主流 DVFS 方法如何在此多目标优化空间中权衡，揭示其为满足 LAA 需求而向智能化、系统化演进的清晰路径。这一演进路径及其核心驱动力在图 6 中得到了直观展示。

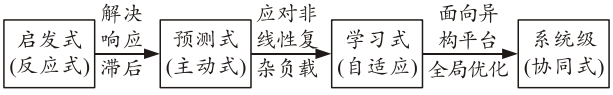

图 6　DVFS 技术演进路径与核心驱动力

3.1 传统的基于阈值的启发式方法

在 DVFS 技术发展初期，研究者倾向于采用基于阈值的启发式方法，典型代表是 Linux 内核中的 Ondemand 与 Conservative 调速器。这类方法以实现简单、开销极低为主要优势，其逻辑仅涉及基础比较和查表，运行时开销微乎其微，因此在资源受限的平台上极具吸引力，构成了早期动态功耗管理的基础。

它们均属于事后响应机制。在 LAA 这种负载剧烈波动的平台上，容易出现升频滞后或降频延迟，导致错过截止时间或能耗浪费，难以满足飞行安全的实时性要求[37]，如图 7 所示。

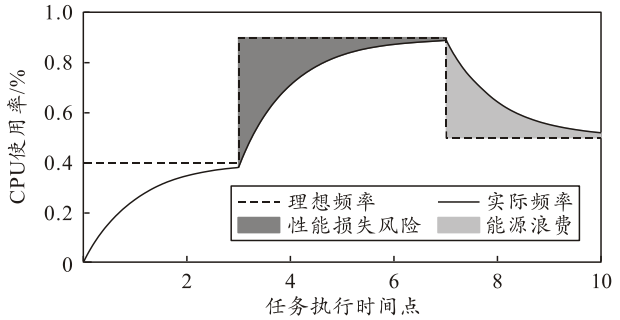

图 7 反应式 DVFS 响应滞后性问题

为缓解启发式 DVFS 的响应滞后问题，研究者对传统框架进行了改进。例如，陈道品等[38]通过引入双阈值机制实现多核处理器的精细化功耗调控，在保证性能的同时显著降低能耗；类似地，王晓莹等[39]基于潜在负载处理能力匹配任务与处理核，实现了更高效的调度与节能。

尽管改进方法提升了启发式策略的效能，但其被动响应的根本局限仍未解决；因此，研究逐渐转向前瞻性的预测策略，以实现更及时的负载调控。

3.2 前瞻性预测策略

预测式方法的关键在于由被动响应转向主动预测。通过利用历史数据和模型推演，系统可以在负载变化发生前进行电压频率调节，从而更好地保障实时性约束[40]。常用的模型包括时间序列分析与卡尔曼滤波等。

预测式 DVFS 在处理地理测绘等规律性任务剖面时具有显著潜力。针对传统 CPU 利用率难以准确刻画负载的问题，Moghaddam 等[41]利用更细粒度的性能计数器(如 IC、CPI)并结合卡尔曼滤波进行负载预测，在保证性能约束的同时实现了稳定的能耗降低。与此同时，为提升模型在负载剧烈波动下的适应性，李昌硕等[42]提出基于预测误差自适应加权的指数平滑模型，在 STM32 平台上验证了最高达 66%的能效提升。

预测方法在处理高度动态与非线性负载时仍存局限，进一步推动了基于学习的自适应控制方法的发展。

3.3 基于学习的智能控制

由于依赖精确模型，预测式 DVFS 在非结构化环境下面对非线性、非周期性负载时表现受限。为此，研究者引入基于强化学习的智能控制方法，通过与环境交互在无需显式模型的情况下学习最优策略，实现能效、实时性与自适应性的动态权衡，如图 8 所示[43]。

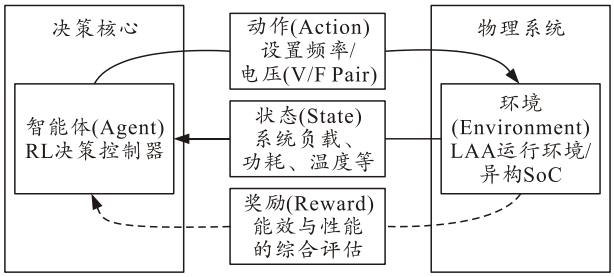

图 8 基于强化学习的 DVFS 智能控制模型

针对异构 SoC 管理中信息不完备导致的部分可观测性问题，Zhou 等[44]引入深度循环 Q 网络，利用循环神经网络的记忆能力推断系统状态，实现更优的频率调控。在视频渲染任务中，该方法获得了最高 2.1 倍的单位功耗性能提升，展示了学习方法在紧耦合异构资源管理中的潜力。

针对传统能耗优化方法对平台特定功率模型依赖强、构建成本高且难以迁移的问题，Yu 等[45]提出了一种模型无关的在线学习框架。该方法基于 Actor－Critic 架构，直接与 NVIDIA Jetson TX2 等平台的功耗管理单元交互，避免了显式功率建模。在实际硬件实验中，该框架能够快速适应不同任务与平台，实现了最高 34.6%的能效提升，体现了学习式方法的通用性与部署效率。

针对多任务并发场景下传统 DVFS 难以区分负载特性、决策次优的问题，Lin 等[46]提出了 GearDVFS 框架，通过引入“元状态”并利用性能计数器感知负载上下文，结合分支动作 DQN 分解决策空间。在视频处理任务中，该方法实现了 23.9%～26.9%的单位功耗性能提升，验证了上下文感知机制在并发任务资源调控中的有效性。

叶宇欣[47]针对异构多核处理器提出了基于 DQN 的节能调度算法，相比传统启发式方法实现了

10%～51%的能耗降低，并在高负载条件下将任务调度成功率提升 20%以上。其后续工作通过引入混合 DVFS 策略，使智能体能够动态选择最优调控方式，进一步增强了系统自适应性。

值得注意的是，学习式方法已由处理器级调控拓展至系统级跨域协同优化。李新民等[48]通过构建综合飞行能耗、通信速率与感知增益的多目标奖励函数，利用强化学习实现了飞行轨迹与功率分配的联合优化，总能耗降低 12.36%～21.08%；类似地，周以恒[49]在通信感知一体化场景下采用深度强化学习优化无人机飞行路径，在提升通信与感知性能的同时显著降低了能源消耗。

基于学习的智能控制方法显著提升了 DVFS 在复杂环境下的适应性，尤其在多任务并发和跨域优化中潜力强大。但强化学习等方法亦面临训练成本高、安全性验证困难等问题。随着 LAA 平台日益异构化，仅靠处理器级学习优化已难满足全局能效与鲁棒性需求；因此，研究正迈向系统级的协同优化。

3.4　系统级协同优化

随着 LAA 机载平台演变为复杂的异构 SoC，单一处理器层面的优化已难以满足系统级能效与鲁棒性需求，促使 DVFS 向与任务调度、容错机制及异构资源管理协同的系统级优化发展。在该框架下，CPU、GPU、NPU 等单元的性能与功耗被统一建模与调控，DVFS 与任务调度在异构架构中紧密耦合[50]，需协同解决任务分配与执行功耗状态选择 2 个核心问题[51]。

一个典型的系统级协同优化框架如图 9 所示。

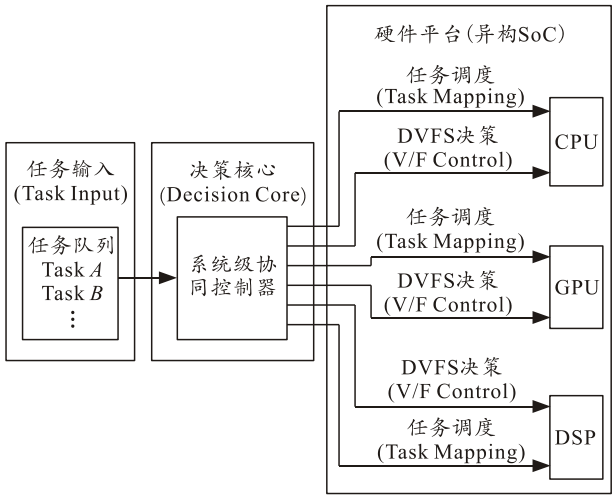

图 9　系统级协同优化框架

在系统级协同优化中，一类思路是通过领域专用化的硬件架构设计缓解通用处理器的能效瓶颈。Valente 等[52]提出的“Shaheen”异构 SoC 即为代表，针对安全型纳米无人机导航任务集成高性能 RV64 核心与低功耗 RV32 集群，实现基于任务特性的天然分工，为 LAA 领域专用化 SoC 设计提供了有益启示。

视觉自主导航是 LAA 的核心任务之一，对 CNN 能效提出了较高要求。Li 等[53]利用深度学习模型的容错性，提出了一种激进 DVFS 框架，允许电压与频率降低至可能发生时序违例的水平，在仅引入极小精度损失的前提下实现了显著的能耗优化。该研究表明，通过挖掘算法固有鲁棒性，可突破传统 DVFS 的安全裕度限制，形成跨层协同优化的新思路。

在安全关键系统中，能耗、可靠性与实时性的联合优化是调度算法设计的核心难题。王泽元[54]提出了融合任务调度、DVFS、动态电源管理与容错机制的协同优化框架，通过降低冗余开销并结合空闲回收策略，在保持高可靠性的同时实现了 28.8%～53.1%的能耗优化。

综合来看，不同团队在多种嵌入式平台上的实证研究均揭示：即便是经过轻量化或硬件加速，高级自主任务的计算需求依旧是 LAA 机载系统的主要性能瓶颈和功耗来源。这为应用 DVFS 等动态能效优化技术提供了最直接的动因与最广阔的空间。

系统级协同优化方法虽算法复杂，但为 LAA 等高安全性飞行平台提供了兼顾能效、实时性与可靠性的整体解决方案。

3.5　关键交叉性议题

在上述所有策略的演进过程中，低开销与高鲁棒性始终是贯穿不同层次的关键约束。由于电压与频率切换本身会引入额外的时间与能量开销[55]，过于频繁的调节甚至可能抵消节能收益，因此有效的 DVFS 设计必须具备对切换成本的显式感知与约束能力[56]。

对于 LAA 等安全关键系统，可靠性是不可妥协的设计基石，而 DVFS 通过降低供电电压会增加瞬态故障发生概率，使能耗优化与系统可靠性形成天然冲突[57]。针对这一问题，吴昊天[58]提出“先保安全，再求节能”的多目标优化调度策略，在降频前预先建立任务冗余防护，使系统在低电压状态下仍保持高可靠性。实验结果表明：该方法在将能耗降低 20.8%～54.6%的同时，将平均故障率控制在较

低水平，验证了通过调度与容错协同设计实现能效与可靠性平衡的可行性。

综上，笔者梳理了 DVFS 方法由启发式调节向预测式与智能化控制，并进一步走向系统级多目标协同优化的演进脉络。这些策略为应对 LAA 复杂动态负载提供了方法基础，也为水空跨介质飞行器等更极端场景下的能效管理奠定了技术路径。

4 面向 AAV 的 DVFS 应用探讨

4.1 跨介质转换的动力学挑战

AAV 的运行模式较传统单介质 LAA 更为复杂，其任务剖面涵盖空中、水面、水下运行以及最具挑战性的跨介质转换阶段[59]。其中，跨介质转换对计算能力和实时响应提出了最为严苛的要求。

在高速入水和出水过程中，AAV 需应对剧烈的流体冲击、浮力变化及推进特性突变，控制系统必须在极短时间内完成姿态调节、模式切换与多源传感器数据融合，导致计算负载瞬时达到峰值。已有研究表明，跨介质转换伴随着复杂的流体动力学效应、瞬态动力学模型切换以及推进器输入饱和上限的快速变化[60-61]，共同构成了 AAV 面临的核心技术挑战。

图 10 描绘了一次典型的 AAV 任务剖面，直观地展示了其计算负载在不同阶段，特别是跨介质转换期间的剧烈变化。

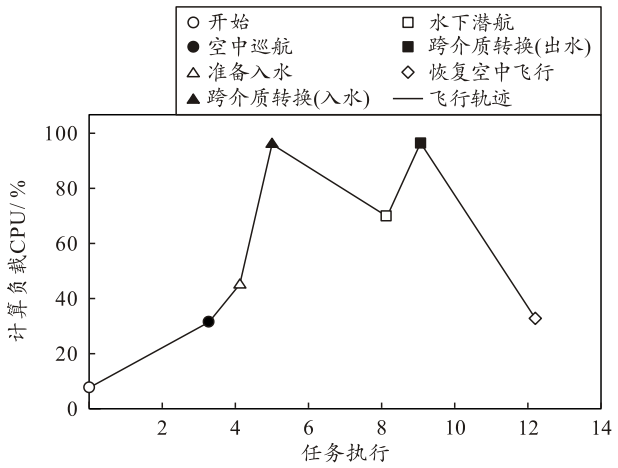

图 10 典型 AAV 任务剖面

上述严苛的物理约束直接转化为对机载计算能力的极高需求，多种计算密集型任务在跨介质阶段短时并发，导致系统计算负载瞬时达到峰值。该峰值主要源于多介质动力学模型的实时求解、多源异构传感器数据的高频融合、先进控制算法的在线执行以及控制模式的快速切换。

AAV 的 DVFS 策略必须能够在极短时间内将处理器从低功耗状态迅速提升至高性能，并在负载回落后及时降频；在秒级甚至毫秒级的负载突变下，响应迟缓的策略可能因计算能力供给不足而危及飞行安全。

4.2 面向 AAV 的未来研究方向

基于 AAV 独特的运行剖面和极端技术挑战，应用于其上的 DVFS 策略除了满足 LAA 的一般性需求外，还必须具备以下特殊属性：

1) 模式感知的动态实时性保障：能够识别当前运行模式，并动态调整最低安全工作频率等实时性约束。

2) 轻量化的上下文感知自适应性：在资源受限条件下，将运行模式等上下文信息与简化预测机制相结合，实现低开销的前瞻性频率调节。

3) 切换开销感知的鲁棒设计：显式考虑频繁模式转换带来的 OPP 切换成本，通过迟滞或抑制机制避免无效调节。

4) 系统级协同能效优化：突破单一 CPU 优化，将 DVFS 与任务调度、异构资源管理及系统级电源管理协同设计，实现全局能效最优。

5 结束语

系统梳理了 DVFS 技术为适应 LAA 发展而不断演进的技术脉络，论证了以 CPU 为中心的局部节能手段，向面向异构平台、具备智能决策能力的系统级性能—功耗协同管理策略转变的必然性。这一转变源于现代 LAA 为实现高级自主性而引入的复杂异构计算架构，以及其在动态、非结构化环境下面临的严苛实时性、可靠性与安全性约束。作为该演进的前沿平台，AAV 的极端跨介质运行环境将上述挑战推向极致，成为新一代动态电源管理技术的重要试验场。

为应对上述挑战，推动 DVFS 技术在先进 LAA 平台上的应用与发展，未来的研究可以从以下关键方向展开：

1) 面向实时控制的可认证人工智能。

基于深度强化学习(DRL)的 DVFS 策略虽具高度自适应性，但其“黑箱”特性缺乏可解释性，难以在航空航天等安全关键领域提供形式化的安全性与实时性保证，成为其工程应用的主要障碍。未来研究亟需在保持自适应能力的同时，通过轻量化智能体设计与控制策略的形式化验证，弥合先进 AI

与航空系统严苛安全要求之间的鸿沟，为 LAA 提供可信、可界定的稳定性与实时性保障。

2) 统一的异构计算资源管理框架。

当前 SoC 各处理单元的功耗管理多由不同驱动或软件栈独立实现，缺乏统一的全局视角，难以实现系统级最优能效。一个重要的研究前沿是在 RTOS 内核层面构建统一的电源与性能管理框架，对异构计算资源进行抽象，并依据任务的计算特性和实时性需求，协同完成任务调度与各处理单元的 DVFS 配置。实现该目标仍需解决异构任务建模、跨设备依赖分析以及能效—性能的全局联合优化等关键问题。

3) 可靠性作为一等设计约束。

在传统 DVFS 设计中，可靠性往往作为事后约束或通过保守电压裕度加以保证，显著限制了节能潜力，而激进降压虽可提升能效，却会增加瞬态故障风险。未来 DVFS 策略需将可靠性与性能、功耗并列为一等设计目标，通过建立融合电压、频率、温度及器件老化等因素的在线可靠性模型，并将其引入多目标优化控制器，实现能效提升与系统长期可靠性的协同权衡。

综上所述，解决 DVFS 技术在 AAV 等先进 LAA 平台上所面临的应用瓶颈，不仅是推动此类特种飞行器发展的关键，其研究成果，即可认证的智能控制、统一的资源管理、可靠性与能效的协同设计以及高保真的验证平台，而且将对整个低空飞行器领域乃至更广泛的自主移动机器人和安全关键嵌入式系统的能源效率管理技术体系，产生深远而持久的影响。

参考文献：

[1] HONG Z, XU S, ZHANG Y, et al. Designing and implementing a low-cost unmanned aerial vehicle based on BeiDou/GPS[J]. Sensors and Materials, 2020, 32(12): 4615−4626.

[2] MOHSAN S A H, OTHMAN N Q H, KHAN M A, et al. A comprehensive review of micro UAV charging techniques[J]. Micromachines, 2022, 13(6): 977.

[3] WU S, SHAO M, WU S, et al. Design and demonstration of a tandem dual-rotor aerial-aquatic vehicle[J]. Drones, 2024, 8(3): 100.

[4] WEISER M, WELCH B, DEMERS A, et al. Scheduling for reduced CPU energy[M]. Mobile computing. Boston, MA: Springer, 1994: 13−24.

[5] POUWELSE J, LANGENDOEN K, SIPS H. Dynamic voltage scaling on a low-power microprocessor[C]//the 7th annual international conference on Mobile computing and networking. IEEE, 2001: 251−259.

[6] ZIDAR J, VUKOBRATOVIĆ D, MILINKOVIĆ D, et al. Dynamic voltage and frequency scaling as a method for reducing energy consumption in ultra-low-power embedded systems[J]. Electronics, 2024, 13(5): 826.

[7] LIUBIMOV V. Energy saving methods in real-time systems[J]. Computers, 2024, 12(12): 235.

[8] RAMEGOWDA S, KUMAR K, SHENOY P D, et al. Energy-aware real-time scheduling using DVFS in Free RTOS based embedded systems[J]. Systems Architecture, 2022, 132: 102759.

[9] WANG Y, ZHANG L, WANG P, et al. FPGA-based UAV heterogeneous computing platform architecture[C]//2021 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS). China: Beijing, 2021: 535−540.

[10] BURNS A, DAVIS R I. Mixed criticality systems: A review[R]. University of York, Department of Computer Science, Technical Report, 2017.

[11] WILHELM R, ENGBLOM J, ERMOLINSKI A, et al. The worst-case execution-time problem—overview of methods and survey of tools[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2008, 7(3): 1−53.

[12] 李奔. 无人自主飞行器的能效优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.

[13] FALCONI F, FÜRST A, MANTIA M, et al. A comparative study of V-SLAM algorithms on the NVIDIA Jetson TX2 for autonomous racing[C]//2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). China: Beijing, 2020: 1618−1624.

[14] 段维虎, 卢海涛. 基于 DVFS 技术的 SOC 架构分析[J]. 中国集成电路, 2020, 29(12): 73−77.

[15] CUCINOTTA T, AMORY A, ARA G, et al. Multi-criteria optimization of real-time DAGs on heterogeneous platforms under P-EDF[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2024, 23(1): 1−35.

[16] CHEN Y, YANG L T, CHEN J, et al. A survey on memory-aware DVFS for multi-core systems[J]. Systems Architecture, 2017, 79: 1−13.

[17] EYERMAN S, EECKHOUT L. A memory-level parallelism aware performance model for DVFS in out-of-order processors[C]//2010 IEEE International Symposium on Workload Characterization (IISWC). USA: Atlanta, GA, 2010: 123−132.

[18] STANCIU A, ZAHEDI S, MOHAJERZADEH A, et al. A comprehensive model for power consumption in unmanned aerial vehicles[C]//2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). USA: Arlington, VA, 2016: 1123−1130.

[19] 屠耿涛. SoC 系统中的通用 DVFS 控制器设计及验证[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.

[20] BENINI L, BOGLIOLO A, DE MICHELI G. A survey of design techniques for system-level dynamic power management[J]. Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2000, 8(3): 299−316.

[21] BURD T D, BRODERSEN R W. Design issues for dynamic voltage scaling[C]//the 2000 International

Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED '00). Italy: Rapallo, 2000: 9−14.

[22] HUANG C, FANG S, WU H, et al. Low-altitude intelligent transportation: System architecture, infrastructure, and key technologies[J]. Industrial Information Integration, 2024, 42: 100694.

[23] REINA G, EYISI E, AN-TOU A. Embedded computation architectures for autonomy in unmanned aerial vehicles[J]. Aerospace, 2021, 8(2): 52.

[24] JARRAYA I, BEKKOUCHE M B, AYADI H, et al. GNSS-denied unmanned aerial vehicle navigation: Analyzing computational complexity, sensor fusion, and localization methodologies[J]. Satellite Navigation, 2025, 6(1): 21−35.

[25] VANEK B, FARKAS M, RÓZSA S. Position and attitude determination in urban canyon with tightly coupled sensor fusion and a prediction-based GNSS cycle slip detection using low-cost instruments[J]. Sensors, 2023, 23(14): 6614.

[26] LO L Y, YIU C H, TANG Y, et al. Dynamic object tracking on autonomous UAV system for surveillance applications[J]. Sensors, 2021, 21(23): 7888.

[27] JEON J, JUNG S, LEE E, et al. Run your visual-inertial odometry on NVIDIA Jetson: Benchmark tests on a micro aerial vehicle[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(3): 5563−5570.

[28] HAYAJNEH A H, BWIDYAN M A, AL-DHAIFALLAH M. An evaluation of embedded GPU systems for visual simultaneous localization and mapping[J]. Electronic Imaging, 2022, 31(6): 063004.

[29] LOPEZ-NICOLAS S, PECO-MARCO M, GUERRERO J J, et al. Implementation of visual odometry on Jetson Nano[J]. Sensors, 2024, 24(4): 1025.

[30] KULKARNI R, GEHRIG D, SCARAMUZZA D. Event-based visual/inertial odometry for UAV indoor navigation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024, 9(7): 6331−6338.

[31] FARINHA A, DI TRIA J, ZUFFEREY R, et al. Challenges in control and autonomy of unmanned aerial-aquatic vehicles[C]// 2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). Italy: Bari, 2021: 937−942.

[32] IVASHKO V, KRULIKOVSKYI O, HALIUK S, et al. Review of operating systems used in unmanned aerial vehicles[J]. Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska, 2025, 15(1): 95−100.

[33] SUN Y, YANG F, LU K, et al. A multimodal aerial-aquatic vehicle based on the coupled power system[C]//Unmanned System Technologies. Singapore: Springer, 2025: 473−482.

[34] WANG J, LI A, LI H, et al. RT-TEE: Real-time system availability for cyber-physical systems using ARM TrustZone[C]//2022 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). USA: San Francisco, CA, 2022: 352−369.

[35] KHRIJI S, CHÉOUR R, KANOUN O. Dynamic voltage and frequency scaling and duty-cycling for ultra low-power wireless sensor nodes[J]. Electronics, 2022, 11(24): 4071.

[36] EYERMAN S, EECKHOUT L. Fine-grained DVFS using on-chip regulators[J]. ACM Transactions on Architecture and Code Optimization, 2011, 8(1): 1−24.

[37] MACCIO V J, DOWN D G. On optimal policies for energy-aware servers[C]//Proceedings of the IEEE 21st International Symposium on Modelling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2013: 31−39.

[38] 陈道品, 武利会, 罗春风, 等. 高效能多核处理器芯片功耗测试及其 DVFS 调度算法研究[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(8): 149−152, 160.

[39] 王晓莹, 张仲雯, 何海生. 嵌入式多核多任务实时 DVFS 调度方法仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(8): 500−504.

[40] SONG T, LO D, SUH G E. Prediction-guided performance-energy trade-off with continuous run-time adaptation[C]//the International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED). New York, NY, USA: ACM, 2016: 224−229.

[41] MOGHADDAM M G, ABABEI C. Dynamic energy management for chip multi-processors under performance constraints[J]. Microprocessors and Microsystems, 2017, 54: 1−13.

[42] 李昌硕, 周伟, 杨群慧, 等. 适用于海洋动态观测设备嵌入式系统的低功耗管理预测模型[J]. 海洋技术学报, 2024, 43(2): 10−17.

[43] PANDA S K, LIN M, ZHOU T, et al. Energy-efficient computation offloading with DVFS using deep reinforcement learning for time-critical IoT applications in edge computing[J]. Internet of Things, 2022, 9(12): 9865−9878.

[44] ZHOU Q, ZHAO Y, ZHANG W. An integrated CPU-GPU frequency scaling governor based on deep recurrent Q-network for partially observable rendering applications[C]//the IEEE 5th International Conference on Artificial Intelligence Circuits and Systems (AICAS). Hangzhou, China: IEEE, 2023: 1−5.

[45] YU Z, ZHANG C, MACHADO P, et al. Deep reinforcement learning for energy-efficient on the heterogeneous computing architecture[J]. arXiv proprint arXiv, 2024(3): 168.

[46] LIN C, WANG K, LI Z, et al. A workload-aware DVFS robust to concurrent tasks for mobile devices[C]//the 29th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom). Madrid, Spain: ACM, 2023: 1−16.

[47] 叶宇欣. 多核处理器的任务节能调度研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2021.

[48] 李新民, 张徐浩, 刘易阳, 等. 基于强化学习的无人机

通信感知一体化能耗优化[J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(1): 23−28, 51.

[49] 周以恒. 通信感知一体化系统下基于强化学习的无人机路径规划研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.

[50] KANG D, LEE S, KIM Y, et al. Scheduling of deep learning applications onto heterogeneous processors in an embedded device[C]//the International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS). New York, NY, USA: ACM, 2020: 1−10.

[51] PANG C, LI Y, SHI Z, et al. Energy-efficient scheduling for heterogeneous multi-core real-time systems with DVFS and DPM[J]. IEEE Transactions on Sustainable Computing, 2023, 8(3): 459−470.

[52] VALENTE L, GAROFALO A, BARCHI F, et al. A heterogeneous RISC-V based SoC for secure nano-UAV navigation[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2024, 71(5): 2266−2279.

[53] LI R, YU H, JIANG W, et al. Optimizing energy efficiency of CNN-based object detection with dynamic voltage and frequency scaling[J]. Semiconductors, 2020, 41(2): 022406.

[54] 王泽元. 异构多核实时系统中任务能耗与可靠性的联合优化调度研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.

[55] WU H, CHEN C, WENG K. An Energy-Efficient Strategy for Microcontrollers[J]. Applied Sciences, 2021, 11(6): 2581.

[56] 张冬松, 吴飞, 陈芳园, 等. 开销敏感的多处理器最优节能实时调度算法[J]. 计算机学报, 2012, 35(6): 1297−1312.

[57] 宋金林. 能量感知的 ACPS 调度研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.

[58] 吴昊天. 嵌入式系统的低功耗与可靠性技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院沈阳计算技术研究所), 2021.

[59] SUN X, CAO J, LI Y, et al. Transmedia performance research and motion control of unmanned aerial-aquatic vehicles[J]. Marine Science and Engineering, 2024, 12(1): 51.

[60] 周航宇, 魏照宇, 祝发勋, 等. 海空跨域航行器研究现状及关键力学问题[J]. 力学与实践, 2024, 40(4): 683−688.

[61] 赵怡. 水空跨介质航行器推进系统设计与性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.

****

（上接第 33 页）

[21] COLORADO H A, CARDENAS C A, GUTIERREZ-VELAZQUEZ E I, et al. Additive manufacturing in armor and military applications[J]. Materials Research and Technology, 2023, 27: 3900−3913.

[22] MARKOVSKY P E, IVASISHIN O M, SAVVAKIN D G, et al. Titanium-Based Layered Armour Elements Manufactured with 3D-Printing Approach[J]. Metallofizikai Noveishie Tekhnologii, 2022, 44(10): 1361–1375.

[23] RAHMANI R, ANTONOV M, BROJAN M. Lightweight 3D printed Ti6Al4V-AlSi10Mg hybrid composite[J]. Materials Research and Technology, 2020, 9(6): 13842−13854.

[24] ZHOU S, LIANG Y J, ZHU Y, et al. Ultrashort-time liquid phase sintering of high-performance fine-grain tungsten heavy alloys by laser additive manufacturing[J]. Materials Science & Technology, 2021, 90: 30−36.

[25] MARKOVSKY P E, SAVVAKIN D G, STASIUK O O, et al. Ballistic Resistance of Layered Titanium Armour Made Using Powder Metallurgy and Additive 3D Printing[J]. Metallofizika i Noveishie Tekhnologii, 2021, 43(12): 1573−1588.

[26] COSTAS M, EDWARDS-MOWFORTH M, KRISTOFFERSEN M, et al. Ballistic impact resistance of additive manufactured high-strength maraging steel: An experimental study[J]. Protective Structures, 2021, 12(4): 577−603.

[27] KRISTOFFERSEN M, COSTAS M, KOENIS T, et al. On the ballistic perforation resistance of additive manufactured AlSi10Mg aluminium plates[J]. Impact Engineering, 2020, 137: 103476.

[28] SZACHOGŁUCHOWICZ I, FIKUS B, GRZELAK K, et al. Selective Laser Melted M300 Maraging Steel-Material Behaviour during Ballistic Testing[J]. Materials, 2021, 14(10): 2681.