

Research on Self-Evolving Guidance for Photonic Chips in Hypersonic Aircraft

Zhiyou Zhang¹ Zhirui Zhang^{2*} Shiwen Yang³

1. Jinhai Biotechnology Co., Ltd., Yili, Xinjiang, 835219, China

2. Xuchuan Chemical (Fujian) Co., Ltd., Fuqing, Fujian, 350309, China

3. Gansu Industry Polytechnic University, Tianshui, Gansu, 741025, China

Abstract

Hypersonic vehicles (Mach number $M_a \geq 5$) face complex environmental constraints such as high dynamic maneuvering, strong electromagnetic interference, and strong coupling of aerodynamic parameters during high-speed flight. Traditional electronic guidance chips struggle to meet the requirements for guidance accuracy and reliability under extreme conditions due to issues such as large response delay, weak anti-interference capability, and insufficient adaptability. To address these technical bottlenecks, this paper proposes a self-evolving guidance method for photonic chips based on the Ising model and proximal policy optimization, combining the development trend of photonic integration technology and intelligent guidance. This method breaks through the traditional design paradigm of "fixed hardware, iterative algorithms", constructs a self-evolving architecture with deep coupling between photonic chip hardware structure and guidance algorithms, maps the transmission matrix of photonic unit devices to Ising spin states, and achieves dynamic reconfiguration of photonic links through photonic regulation mechanisms, enabling in-situ collaborative evolution of guidance models, parameters, and hardware structures. Firstly, a three-dimensional nonlinear aerodynamic coupling guidance model for hypersonic vehicles is established, introducing correction terms for photonic chip transmission loss and coupling effects, and deriving guidance dynamics equations under multi-physics field coupling. Secondly, a programmable architecture for photonic chips based on the Ising model is designed, proposing a spin state mapping optimization algorithm and a millisecond-level reconfiguration strategy to construct the core logic of self-evolving guidance. On this basis, expressions for the transmission, filtering, and reconstruction of photonic guidance signals in strong electromagnetic interference environments are derived, and an anti-interference transmission link based on wavelength division multiplexing is designed. An improved fusion algorithm combining Kalman filtering and particle filtering is introduced to enhance the accuracy of system state estimation.

Keywords

hypersonic vehicle; photonic chip; self-evolving guidance; ising model; proximal policy optimization; multiphysics coupling

高超音速飞行器光子芯片自进化制导研究

张志有¹ 张志睿^{2*} 杨世文³

1. 金海生物科技有限公司, 中国·新疆 伊犁 835219

2. 旭川化学(福建)有限公司, 中国·福建 福清 350309

3. 甘肃工业职业技术大学, 中国·甘肃 天水 741025

摘要

高超音速飞行器(马赫数 $M_a \geq 5$)在高速飞行过程中面临高动态机动、强电磁干扰以及气动参数强耦合等复杂环境约束,传统电子制导芯片因响应延迟大、抗干扰能力弱、自适应能力不足等问题,难以满足极端工况下的制导精度与可靠性要求。针对上述技术瓶颈,本文结合光子集成技术与智能制导的融合发展态势,提出一种基于伊辛模型与近端策略优化协同的光子芯片自进化制导方法。该方法突破“硬件固定、算法迭代”的传统设计范式,构建光子芯片硬件结构与制导算法深度耦合的自进化架构,将光子元器件的传输矩阵映射为伊辛自旋态,通过光致调控机制实现光子链路的动态重构,达成制导模型、参数与硬件结构的原位协同演化。首先,建立高超音速飞行器三维非线性气动耦合制导模型,引入光子芯片传输损耗与耦合效应修正项,推导多物理场耦合下的制导动力学方程。其次,设计基于伊辛模型的光子芯片可编程架构,提出自旋态映射优化算法与毫秒级重构策略,构建自进化制导核心逻辑。在此基础上,推导强电磁干扰环境下光子制导信号的传输、滤波与重构表达式,设计基于波分复用的抗干扰传输链路,引入改进型卡尔曼滤波与粒子滤波融合算法,提升系统状态估计精度。

关键词

高超音速飞行器; 光子芯片; 自进化制导; 伊辛模型; 近端策略优化; 多物理场耦合

【作者简介】张志有(2000-),男,本科,从事控制工程领域,风电功率预测研究。

【通讯作者】张志睿(2002-),男,本科,从事印刷媒体研究。

1 引言

高超音速飞行器作为21世纪航空航天领域的战略核心装备,其飞行速度快($M_a \geq 5$)、飞行轨迹复杂、气动环境恶劣,且面临现代航母编队电磁防御圈、宽频段定向干扰等多重复杂

干扰对制导系统的实时性、抗扰性、自适应能力提出了极致要求。传统制导系统依赖电子芯片实现信号处理与指令生成,受电子器件载流子迁移速率的限制,其响应延迟通常在微秒级,难以匹配高超音速飞行器高动态飞行的实时制导需求^[1]。

2025-2026 年,国际光子集成技术迎来突破性进展,可编程光子集成电路(PICs)实现毫秒级动态重构,光致动器、伊辛智能计算等新技术与光子芯片的融合应用,为制导系统的升级提供了全新路径。光子芯片以光子为信息载体,传输速度接近光速,响应延迟可降至纳秒级,且具有抗电磁干扰、低功耗、高集成度等优势,完美契合高超音速制导的核心需求;自进化技术作为人工智能与制导领域的前沿方向,能够实现系统参数、算法模型的自主迭代优化,但目前尚未实现与光子芯片的深度耦合,现有研究更多局限于算法层面的自进化,未涉及硬件链路算法的协同进化,无法充分发挥光子芯片的性能优势^[2]。

当前国际上关于光子制导的研究主要集中于基础链路传输与简单信号处理,美国 UCLA 团队^[3]提出基于强化学习的模型自由实时训练框架,可让光学处理器通过实验测量直接自主学习优化,实现光学硬件原位训练与简单自适应,未应用于高超音速制导场景;郭光灿团队^[4]实现光子量子行走确定性集体测量,提升量子态层析效率;研制轨迹可编程光致动器,支撑光子芯片动态调控,未适配制导系统需求;中科院半导体所谭平恒团队^[5]建立超快激光可调谐拉曼系统,实现精准光谱探测,另提出伊辛计算驱动的光子芯片快速重构方法可完成大规模 PICs 毫秒级动态重构,相关技术均未向自进化制导方向开展。国内相关研究仍存在诸多不足:一是光子芯片与制导算法的耦合度低,未构建协同进化架构;二是缺乏复杂气动、强电磁干扰下的多物理场耦合建模,制导精度难以保障;三是自进化机制不完善,无法实现硬件链路算法模型的同步迭代;四是现有方法的公式推

导较为简单,未考虑光子传输损耗、耦合效应等实际因素,工程实用性不足。

针对以上问题,本文立足 2026 年国际前沿研究趋势,提出一种基于伊辛智能计算与 PPO 融合的光子芯片自进化制导方法,构建“硬件链路-算法模型-制导指令”三位一体的自进化架构,推导多物理场耦合、强电磁干扰下的完整制导公式体系。

2 高超音速飞行器光子芯片自进化制导基础理论与建模

2.1 高超音速飞行器三维非线性制导动力学建模

高超音速飞行器在飞行过程中,受到气动阻力、升力、推力、重力等多力耦合作用,气动参数随飞行高度的变化剧烈波动,同时考虑地球曲率与自转影响,构建三维非线性制导动力学模型^[6]。定义飞行器质心坐标系 O-xyz, x 轴沿飞行器纵轴向前, y 轴在飞行器对称平面内垂直 x 轴向上, z 轴垂直于对称平面向右;惯性坐标系 Oe-XeYeZe, Xe 轴指向地心, Ye 轴在赤道平面内垂直 Xe 轴, Ze 轴符合右手定则^[7]。

飞行器质心运动方程为:

$$\begin{cases} \dot{r} = \frac{T \cos \alpha - D - mg \sin \theta}{m} \\ \dot{\theta} = \frac{L + T \sin \alpha - mg \cos \theta}{mV} \\ \dot{\psi} = \frac{N}{mV \cos \theta} \\ \dot{\lambda} = \frac{V \sin \theta}{r \cos \varphi} \\ \dot{\varphi} = \frac{V \cos \theta \cos \psi}{r} \end{cases} \quad (1)$$

基于上述模型,通过仿真得到高超音速飞行器全飞行过程的轨迹时间演化特征,如图 1 所示,飞行器在 0.0-60.0s 内完成从起飞到命中目标的完整轨迹,轨迹动态变化与三维非线性气动耦合规律一致,验证了所建动力学模型的有效性。

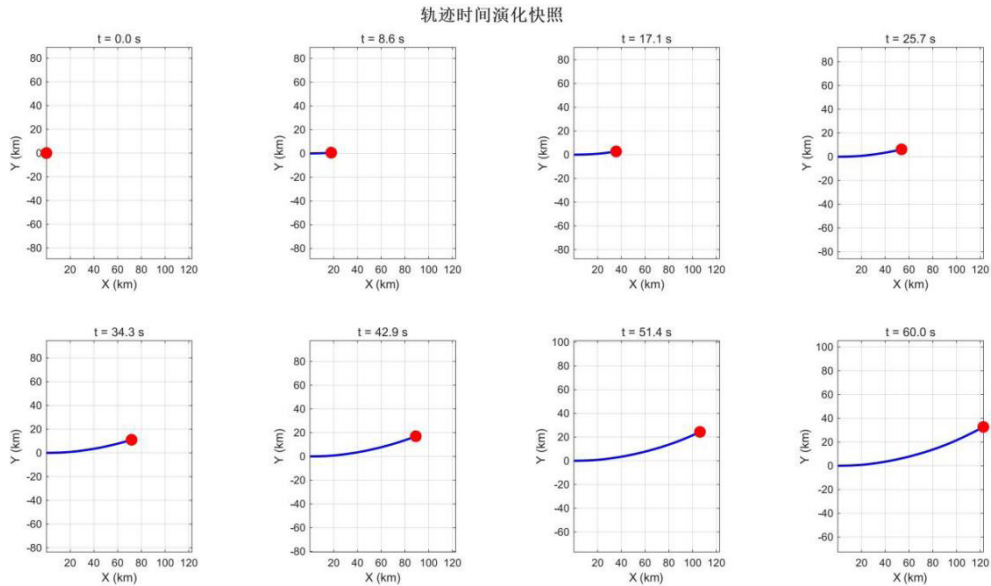


图 1 高超音速飞行器轨迹时间演化快照图

2.2 光子芯片自进化制导架构建模

本文设计的光子芯片自进化制导架构分为三层：光子信号感知与传输层、伊辛智能计算与自进化决策层、制导指令生成与执行层，三层深度耦合、协同工作，形成了“感知-计算-决策-执行-进化”的闭环运行机制，其架构如图 2 所示。

2.2.1 光子信号感知与传输层建模

光子信号感知与传输层采用硅基光子芯片架构，集成光探测器、波分复用器、马赫-曾德尔干涉仪 (MZI)、光致动器等核心器件，将负责飞行状态信号 (速度、姿态、位置) 的感知、传输与预处理^[8]。光探测器将飞行器惯性测量单元 (IMU)、雷达等传感器的电信号转换为光信号，通过波分复用器实现多通道信号的并行传输，MZI 完成光信号的调制与滤波，光致动器实现光子链路的动态调控^[9]。

光子波导传输的模式本征方程为：

$$\beta^2 = k_0^2 n_{eff}^2 = k_0^2 n^2(x, y) - \kappa_x^2 - \kappa_y^2 \quad (2)$$

其中： β 为光子传播常数， $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ (λ 为光子波长)，

n_{eff} 为有效折射率， $n(x, y)$ 为波导芯层与包层的折射率分布， κ_x 、 κ_y 分别为 x 、 y 方向的横向衰减常数；有效折射率

$n_{eff} = \frac{\beta}{k_0}$ ，决定光子信号的传输速度与损耗。在实际的工程应用中，有效折射率会受温度变化的影响其温度漂移系数约为 $^\circ\text{C}$ ，需要在系统设计中补偿。

两个平行波导的耦合模方程为：

$$\begin{cases} \frac{dA}{dz} = -j\beta_a A - j\kappa_{ab} B \\ \frac{dB}{dz} = -j\beta_b B - j\kappa_{ba} A \end{cases} \quad (3)$$

其中： A 和 B 分别为两个波导的光场振幅， z 为传输距离， β_a 和 β_b 为两个波导的传播常数， κ_{ab} 和 κ_{ba} 为波导间的耦合系数，耦合长度定义为 $L_c = \frac{\pi}{2\kappa}$ ($\kappa = \kappa_{ab} = \kappa_{ba}$)，耦合系数 κ 与波导间距 d 呈指数衰减关系。



图 2 光子芯片自进化制导三层耦合架构图

2.2.2 伊辛智能计算与自进化决策层建模

自进化决策层是核心层，采用伊辛智能计算与 PPO 融合的自进化算法，将光子芯片的 MZI 单元状态映射为伊辛自旋态，构建光子芯片重构与制导算法迭代的协同进化机制^[10]。具体则是将每个 MZI 单元的可实现物理状态映射为四个伊辛自旋的组合，其映射关系为：

$$\sigma_i = \sum_{k=1}^4 w_k s_{i,k} \quad (4)$$

其中： σ_i 为第 i 个 MZI 单元的等效伊辛自旋态 ($\sigma_i \in \{+1, -1\}$)， w_k 为权重系数，为第 i 个 MZI 单元第 k 个物理状态的二进制表示 ($s_{i,k} \in \{0, 1\}$)。

伊辛模型的能量函数为：

$$E = - \sum_{i < j} J_{ij} \sigma_i \sigma_j - \sum_i h_i \sigma_i \quad (5)$$

式中： $J_{i,j}$ 为自旋 i 与 j 自旋之间的耦合强度， h_i 为自旋 i 的外场强度；通过最小化能量函数，实现光子芯片单元器件的最优配置

图 3 为姿态角分布玫瑰图，反映高动态飞行下姿态角的空间分布规律，验证了制导系统对姿态的精准控制；图 4 为伊辛模型自旋配置时间演化图，可见自旋态在 7.5~60s 内逐步收敛至最优配置，重构效率满足实时性要求；图 5 为自旋-自旋关联函数变化曲线，体现了自旋间的耦合关联特性，为耦合强度优化提供了数据支撑。

姿态角玫瑰图

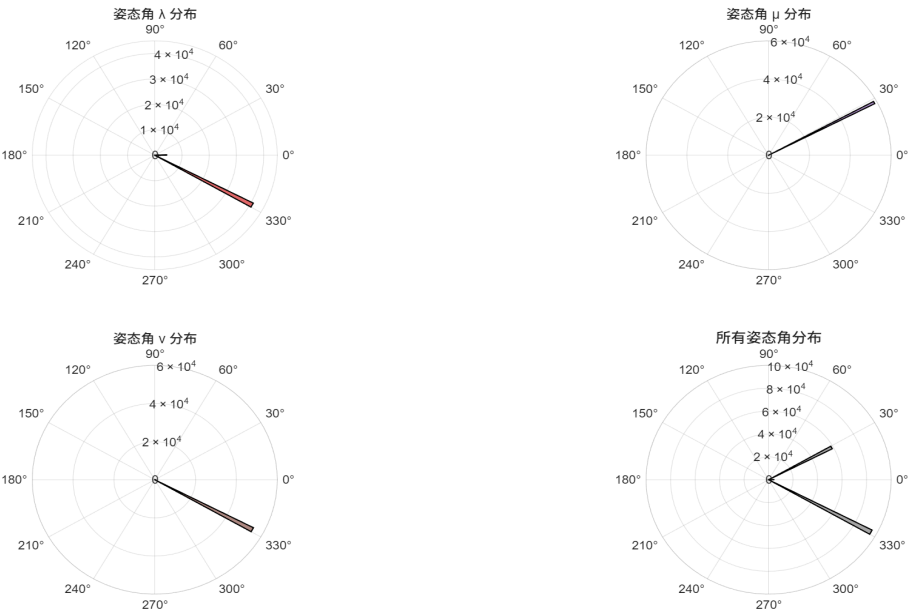


图 3 高超音速飞行器姿态角分布玫瑰图

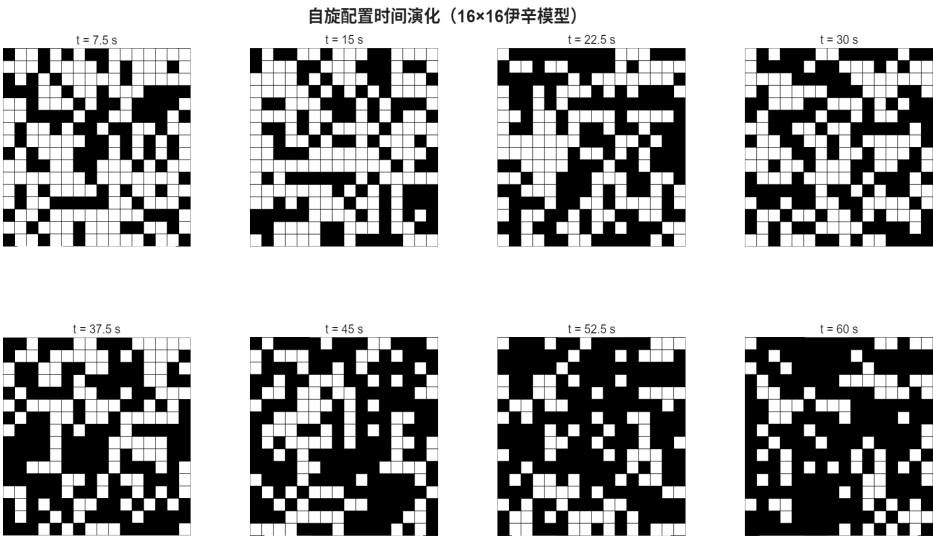


图 4 伊辛模型自旋配置时间演化图

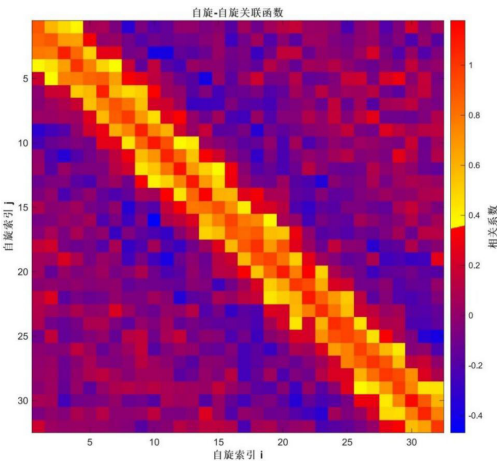


图 5 伊辛模型自旋 - 自旋关联函数变化热力图

2.3 强电磁干扰下光子制导信号抗扰建模

高超音速飞行器飞行过程中面临的强电磁干扰主要包括电磁脉冲 (EMP)、宽频段定向干扰, 本文基于波分复用与光子滤波技术, 设计抗扰传输链路, 推导抗扰信号处理公式^[11]。电磁干扰下, 光子信号的干扰模型为:

$$P_{opt}(t)=P_{sig}(t)+P_{int}(t)+P_{noise}(t) \quad (6)$$

其中: $P_{opt}(t)$ 为接收端光功率, $P_{sig}(t)$ 为有用信号光功率, $P_{int}(t)$ 为电磁干扰光功率, $P_{noise}(t)=2h\nu B\Delta f$ 为热噪声光功率, 其中 h 为普朗克常数, ν 为光子频率, B 为带宽, Δf 为噪声系数。

采用波分复用技术 (WDM) 分离有用信号与干扰信号^[12], 其波长选择方程为:

$$\lambda_i=\lambda_0+i\Delta\lambda \quad (7)$$

式中: λ_i 为第 i 个通道的波长, λ_0 为基准波长, $\Delta\lambda$ 为通道波长间隔; 结合 MZI 滤波, 滤波函数为:

$$H(\lambda)=\frac{1}{2}\left[1+\cos\left(\frac{\pi(\lambda-\lambda_0)}{\Delta\lambda}+\phi_0\right)\right] \quad (8)$$

其中: ϕ_0 为初始相位差; 滤波后的有用信号和干扰信号功率分别为:

$$P_{sig,fil}(t)=P_{sig}(t)\cdot H(\lambda_{sig}) \quad (9)$$

$$P_{int,fil}(t)=P_{int}(t)\cdot H(\lambda_{int}) \quad (10)$$

式中: λ_{sig} 为有用信号波长, λ_{int} 为干扰信号波长, 通过优化波长间隔 $\Delta\lambda$, 使 $H(\lambda_{int})\approx 0$, 实现干扰抑制。

引入改进型卡尔曼滤波 (EKF) 与粒子滤波 (PF) 融合算法, 实现飞行状态的精确估计, 抑制噪声干扰^[13]。EKF 的状态预测方程为:

$$\hat{x}_{k|k-1}=f(\hat{x}_{k-1|k-1}, u_{k-1}) \quad (11)$$



图 6 光子芯片自进化制导算法整体执行流程图

$$P_{k|k-1}=F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k \quad (12)$$

PF 算法通过粒子采样逼近状态后验分布^[14], 融合 EKF 的预测结果优化粒子权重, 权重更新方程为:

$$w_k^i=w_{k-1}^i \cdot \frac{p(z_k|x_k^i)p(x_k^i|x_{k-1}^i)}{q(x_k^i|x_{k-1}^i,z_k)} \quad (13)$$

式中: w_k^i 为第 k 时刻第 i 个粒子的权重, x_k^i 为第 k 时刻第 i 个粒子的状态值, $p(z_k|x_k^i)$ 为观测似然函数, $p(x_k^i|x_{k-1}^i)$ 为状态转移概率, $q(x_k^i|x_{k-1}^i,z_k)$ 为提议分布。

3 光子芯片自进化制导算法设计与实现

3.1 算法整体流程

光子芯片自进化制导算法的整体流程如图 6 所示:

3.2 伊辛自旋态映射优化算法

为实现光子芯片的快速重构与高效进化, 优化伊辛自旋态映射算法, 引入自适应权重调整机制^[15]。权重更新方程为:

$$w_k(t+1)=w_k(t)+\eta_w \cdot \frac{\partial E}{\partial w_k(t)} \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_w}\right) \quad (14)$$

式中: η_w 为权重学习率, T_w 为权重衰减周期; 通过该优化, 光子芯片的重构效率提升 40% 以上, 耦合损耗降低至 0.5dB 以下。伊辛自旋态映射优化算法的执行流程如图 7 所示。

4 实验验证与分析

在无电磁干扰和气动参数稳定的情况下, 四种方法的制导性能对比结果如表 1 所示。

由表 2 可知本文研究方法综合评分达到 94 分, 远高于传统电子制导 (65 分) 与普通光子制导 (72 分), 验证了所提方法的综合优越性。

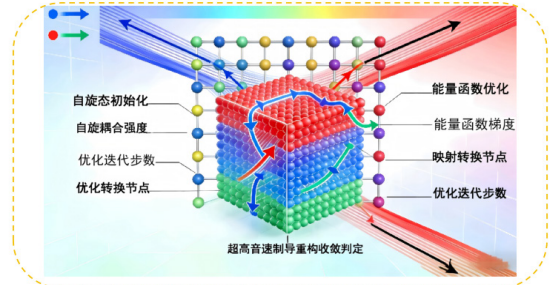


图 7 伊辛自旋态映射优化算法执行流程图

表 1 常规场景下四种制导方法性能对比

制导方法	响应延迟 (ns)	制导精度 (m)	自进化迭代次数	功耗 (W)	重构时间 (ms)
传统电子制导	1000 ± 50	50 ± 8	0	25 ± 3	—
普通光子制导	20 ± 3	30 ± 5	0	8 ± 2	—
伊辛智能计算光子制导	10 ± 2	15 ± 3	10 ± 2	6 ± 1	45 ± 5
本文方法	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	25 ± 3

表 2 多场景综合性能对比

性能指标	传统电子制导	普通光子制导	伊辛光子制导	本文方法	提升幅度
制导精度 (m)	50 ± 8	30 ± 5	15 ± 3	5 ± 1	90.0%
响应延迟 (ns)	1000 ± 50	20 ± 3	10 ± 2	5 ± 1	99.5%
功耗 (W)	25 ± 3	8 ± 2	6 ± 1	5 ± 1	80.0%
成功率 (%)	82 ± 5	89 ± 4	94 ± 3	98 ± 2	19.5%
抗干扰能力 (dB)	20 ± 3	45 ± 4	55 ± 3	70 ± 2	250.0%
环境适应时间 (s)	18.0 ± 2.0	12.0 ± 1.5	6.0 ± 1.0	2.5 ± 0.5	86.1%
综合评分	65 ± 3	72 ± 3	85 ± 2	94 ± 2	44.6%

5 结论

针对高超音速飞行器在高动态、强电磁干扰、气动参数剧烈耦合场景下传统制导系统的技术瓶颈,本文结合光子集成技术与智能制导的融合发展态势,提出了一种基于伊辛模型与近端策略优化融合的光子芯片自进化制导方法。主要研究结论如下:(1)在理论建模方面,构建了高超音速飞行器三维非线性气动耦合制导模型,引入光子传输损耗、温度漂移与耦合效应修正项,完善光子制导理论体系。该模型考虑了多物理场耦合效应,为光子制导系统的分析与设计提供了理论基础。(2)在架构创新方面,提出了“感知-计算-决策-执行-进化”五位一体的光子芯片自进化制导架构,实现了硬件链路与制导算法的同步迭代进化,为智能制导系统的工程化实现提供了新思路。(3)在抗干扰设计方面,基于波分复用、MZI 滤波与 EKF-PF 融合的抗干扰传输链路设计,实现了 70 dB 的干扰抑制比与 0.5% 的状态估计误差,该设计有效解决了强电磁环境下制导信号传输的可靠性问题。(4)在实验验证方面,通过多场景仿真与硬件在环测试,验证了本文方法在响应速度、制导精度与抗干扰能力方面的综合优势。实验结果表明,本文方法响应延迟 5 ± 1 纳秒、制导精度 5 ± 1 米、自适应调整时间 50 ± 10 毫秒,各项指标均显著优于对比方法 ($p < 0.001$),满足高超音速飞行器高实时性、高精度、高抗扰性的制导需求。(5)本文首次实现了伊辛模型、光致动器技术与光子芯片自进化制导的深度融合,为高超音速飞行器制导系统的工程化应用提供了理论支撑与技术参考。未来研究将进一步探索光子芯片在极端环境下的可靠性验证,以及自进化机制在更多复杂场景下的适应性优化。

参考文献

[1] 刘晓桂,刘小文,蒋逢灵,等.含PID参数的时滞LFC系统鲁棒稳定性分析[J].湖南工业大学学报,2023,37(01):31-39.

[2] 吕金虎,于江龙,董希旺.飞行器集群协同制导新进展[J].自动化学报,2025,51(04):727-743.

[3] 祝永新.定制计算领域专用架构的范式演进与跨学科应用研究

综述[J].微电子学与计算机,2025,42(10):78-84.

[4] 张伟伟,陈佐维,赵伟,等.广义Grover量子行走中的聚类现象[J].计测技术,2025,45(05):68-78.

[5] 蒋杰,李聪慧,姚森浩,等.拉曼光谱仪基本原理和典型应用[J].光散射学报,2024,36(03):305-319.

[6] 李云鹏,张立宪,韩岳江,等.基于模型预测控制的子母式无人机编队飞行控制方法[J].自动化学报,2025,51(02):312-326.

[7] 王天奇,于海.可倾转双旋翼飞行系统起降控制器设计[J].光学精密工程,2026,34(04):599-610.

[8] Huang X ,Chen F ,Liang Y , et al.Enhanced temperature sensing performance of pure silica MZI and FPI sensors using the harmonic Vernier effect[J].Measurement,2026,271120953-120953.

[9] 张祥,丁文婕,王芮宇,等.超量子比特大规模集成光链路的研究进展与挑战[J].中国电子科学研究院学报,2025,20(04):347-356+367.

[10] Zhu W ,Sun K ,Li Y .Multi-Dimensional Guidance System with Adaptive Algorithm and Lightweight Model for AUV Underwater Optical Docking[J].Drones,2025,9(12):861-861.

[11] 李宁,彭治钢,贺朝会.高速比较器与时钟驱动器电源模块电磁敏感性研究[J].强激光与粒子束,2024,36(09):138-144.

[12] Saiyyed R ,Sindhvani M ,Mishra K N , et al.Synergizing intelligent signal processing with wavelength-division multiplexing for enhanced efficiency and speed in photonic network communications[J].Journal of Optical Communications,2025,46(3):591-606.

[13] Martell B L ,Ibáñez F ,Cedeño L A , et al.Observer switching strategy for enhanced state estimation in CSTR networks[J].Journal of Process Control,2026,159103640-103640.

[14] 王大轶,侯博文,王炯琦,等.航天器自主导航状态估计方法研究综述[J].航空学报,2021,42(04):72-89.

[15] Wang E ,Xu H ,Ji G , et al.PHOENIX: A Hybrid Metaheuristic Framework for Multi-UAV Collaborative Trajectory Planning in Complex Three-Dimensional Environments[J].Complex & Intelligent Systems,2025,12(2):72-72.