

# 面向耐辐照摄像机系统的机电一体化设计与性能评估体系研究

陈进操 吴灵华 王海峰

中科核泰技术(杭州)有限公司 浙江 杭州 310000

**【摘要】**：耐辐照摄像机系统是核设施运维、高能物理实验、深空探测等极端环境视觉感知的核心装备，其稳定性受电离辐射引发的半导体损伤、机械形变与时序紊乱制约。本文基于机电一体化设计，融合感知、控制与执行单元，构建涵盖光电转换、时序控制、辐照防护与数据处理的一体化架构，阐明关键单元设计逻辑与协同机制，建立功能完整性、环境适应性与可靠性评估体系。通过理论推演与场景化分析，验证模块化协同设计对提升耐辐照能力的核心作用，揭示时序同步与结构适配的机电协同规律，为系统工程化研发与场景应用提供理论框架与方法支撑。

**【关键词】**：耐辐照摄像机；机电一体化；时序控制；辐照加固；性能评估；极端环境适配

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.003

核反应堆堆芯监测、乏燃料储存库巡检等场景中，电离辐射引发摄像机系统多维度退化：电子层面，硅基传感器晶格位移与陷阱电荷累积致暗电流激增；控制层面，单粒子效应破坏时序逻辑，造成图像错位；机械层面，结构热形变与应力集中引发几何畸变。传统分立设计缺乏协同补偿机制，难以保障极端辐照环境下的可靠性与成像质量。机电一体化设计通过感知、控制、执行单元深度融合，构建闭环协同体系以优化性能。然而，当前研究多聚焦单一器件加固，缺乏系统级机电耦合机制分析与全面评估体系，导致设计缺乏顶层指导、单元匹配与协同性不足。本文从机电耦合底层逻辑出发，研究耐辐照摄像机一体化设计方法，构建覆盖功能完整性、环境适应性与可靠性的性能评估体系，为极端环境成像设备研发提供理论支撑。

## 1 耐辐照摄像机系统的机电耦合理论基础

辐照环境中，机电耦合体现为电子信号、机械结构与环境的非线性、累积性双向动态交互。电子单元受辐照扰动（如单粒子翻转致时序信号相位偏移），驱动机械系统按错误节律运动，引发镜头振动或偏移，造成图像几何畸变（如行同步偏移致行错位）。机械结构因辐照与温度梯度产生热胀冷缩及辐照肿胀，改变光电传感器与镜头相对位置，引入离焦与畸变；装配应力增大暗电流与噪声，振动传导至光敏元件，引发信号抖动与拖影，降低信噪比。二者耦合形成累积性损伤循环：电子噪声加剧机械运动误差，机械误差反增信号补偿负载，推高电路功耗与温升，加速电子单元辐照损伤，恶性循环促使系统性能加速劣化，最终失效。

## 2 耐辐照摄像机系统的机电一体化架构设计

耐辐照摄像机系统的机电一体化架构设计遵循功能分层、协同控制与冗余容错原则，构建了感知层、控制层、存储编码层与机械支撑层的四层协同架构，各层级通过标准化接口双向传输信号与能量，确保系统在辐照环境下的稳定性。其核心逻辑是通过控制层的时序同步与协同调度，实现感知层、机械支撑层与存储编码层的精准匹配，整体架构流程如图1所示。

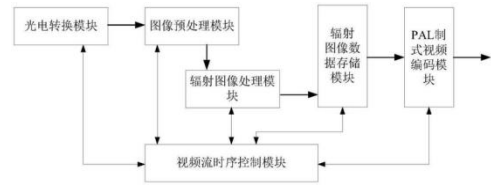


图1 耐辐照摄像机电子系统架构图

该架构以视频流时序控制模块为核心，实现各功能模块协同运行。光电转换模块将光信号转电信号输入图像预处理模块，进行噪声抑制与信号增强；辐射图像处理模块对预处理信号进行畸变校正与细节恢复，处理后的信号一方面存入辐射图像数据存储模块，另一方面反馈至视频流时序控制模块；视频流时序控制模块接收光电转换模块与机械支撑层状态信号，生成同步时序指令，确保各电子单元与机械结构同步；辐射图像数据存储模块负责稳定存储数据，PAL制式视频编码模块将处理后的图像信号转换为标准视频格式输出。

在架构设计中，时序同步是机电协同的核心，基于PAL制式行场时序标准，通过视频流时序控制模块的多级计数与脉冲生成机制，实现电子信号与机械运动的精准同步，详细时序控制逻辑如图2所示。图2的时序控制模块包含行、场、像素计数器，行计数器生成行时序基准，场计数器区分奇偶场，像素计数器实现像素级定位。行时序分为行消隐区与有效视频区，行、场消隐脉冲发生器分别生成消隐信号，有效视频信号发生器生成匹配机械扫描节奏的视频信号；通过奇偶场交替扫描与行场消隐信号精准控制，确保数据读写节奏同步，最终叠加信号输出稳定视频信号。

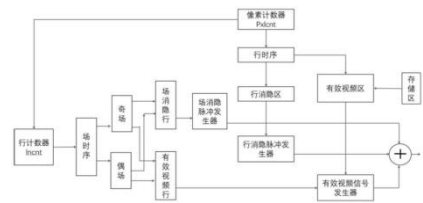


图2 详细时序控制逻辑图

为提升架构耐辐照能力，各层级采用模块化与冗余化设计策略。感知层光电转换模块多通道冗余，控制层时序逻辑三模

冗余，机械支撑层采用浮动连接架构，存储编码层辐射图像数据存储模块采用非易失性存储介质。全层级冗余设计提升了系统在辐照环境下的容错与运行可靠性。

### 3 耐辐照摄像机系统的关键机电单元设计

#### 3.1 光电转换模块的辐照加固与机电适配设计

光电转换模块是系统前端感知单元，其性能决定图像原始质量，设计核心是实现辐照损伤抑制与机械结构适配。辐照引发的位移损伤和电离损伤影响光电转换性能，位移损伤破坏硅基传感器晶格结构致暗电流增加，电离损伤使材料电导率变化致量子效率下降和噪声升高。为抑制损伤，采用外延层减薄与钝化层优化工艺，外延层减薄降低位移损伤概率，钝化层优化缓解暗电流增加。

在机械适配方面，安装结构用柔性铰链设计，缓冲形变应力，避免光敏面晶格变形；模块与机械支撑结构集成热电制冷单元，稳定工作温度，抑制暗电流、减少结构形变，提升机电适配性；模块外壳采用铅硼聚乙烯复合材料，阻挡射线和中子，提升辐照加固能力。

#### 3.2 视频流时序控制模块的逻辑设计与同步机制

视频流时序控制模块是机电协同核心枢纽，设计核心是生成符合 PAL 制式的稳定时序信号，实现电子与机械单元精准同步，其时序信号结构如图 3 所示。图 3 显示 PAL 制式行时序由行同步脉冲、行消隐后肩、有效视频区和行消隐前肩组成，各部分有固定时长，行同步脉冲触发扫描，色同步信号用于色彩同步，有效视频区承载核心信息，保证电子信号采样与机械扫描节奏一致。

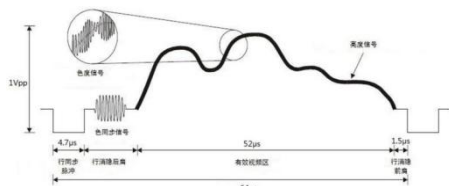


图 3 时序信号结构图

在场时序设计上，采用隔行扫描，将一帧图像分奇数场和偶数场，场结构划分如图 4 所示。奇数场和偶数场各有不同行范围的场消隐区和有效视频区，交替显示减少图像闪烁、降低机械负载。为应对辐照引发的时序紊乱，场同步信号错位设计，奇偶场场同步脉冲相位有固定偏移，如图 5 所示，确保机械扫描机构无缝衔接，避免场抖动。



图 4 视频场数据格式图

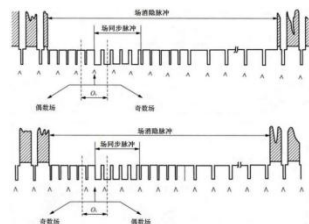


图 5 视频场时序图

在逻辑控制层面，采用多级计数与故障自修复机制。行、场、像素计数器通过级联生成时序基准，采用奇偶校验与周期复位机制，检测并纠正辐照引发的计数错误，避免错误累积。同时，模块与机械支撑结构驱动单元建立闭环通信，模块根据反馈信号实现

#### 3.3 机械支撑结构的环境适配与辐照防护设计

机械支撑结构承载光电转换模块等，设计核心是实现辐照环境下的结构稳定性与环境适配性。材料选择钛合金与碳纤维复合材料混合设计，钛合金导热性好、力学性能佳，可传导辐照热量；碳纤维复合材料低热膨胀、高比强度，耐辐照，能抑制形变。结构布局采用分层式与模块化设计，各模块分置不同层级，通过浮动连接架构连接，可抵消应力、适应位置调整。内部设独立散热通道，热管与散热鳍片组合，减少温度梯度引发的形变。辐照防护上，外壳双层设计，外层铅硼聚乙烯挡射线，内层电磁屏蔽抑干扰。连接处密封，用耐辐照氟橡胶。表面喷涂防辐照涂层，提升耐辐照能力。

#### 3.4 存储与编码模块的耐辐照设计

辐射图像数据存储与 PAL 制式视频编码模块是数据处理与输出单元，设计核心是实现辐照环境下数据稳定存储与标准格式输出。存储模块用非易失性闪存芯片，采用数据冗余存储与差错控制编码技术，保障数据完整性。

PAL 制式视频编码模块将图像信号转为标准视频信号，采用硬件编码，内置辐照损伤补偿算法校正信号，电源单元用抗辐照稳压电路，避免编码错误。

### 4 耐辐照摄像机系统的性能评估体系构建

性能评估体系构建围绕机电一体化系统核心特征，从功能完整性、环境适应性与可靠性三个维度，建立多维度评估指标体系，全面评估系统在辐照环境的运行状态。

#### 4.1 功能完整性评估

聚焦系统在辐照环境的核心功能实现能力，分成像和时序功能完整性两方面。成像功能完整性评估分析光电与图像处理模块协同性能，指标有信噪比、分辨率、色彩还原度与畸变率。通过分析相关信号能量比、高频细节保留程度、色彩偏差、几何畸变程度等评估各模块性能。时序功能完整性评估分析视频流时序控制模块同步性能，指标包括行同步相位偏移量、场同步抖动幅度与时序恢复时间。通过对比相位差、分析幅度波动范围和恢复时间评估相关性能。

#### 4.2 环境适应性评估

聚焦系统在不同辐照剂量率、温度梯度与湿度条件下的性能响应特性，分辐照、温度与综合环境适应性评估三方面。辐照适应性评估分析系统性能随辐照累积剂量的变化趋势，通过推演损伤程度与退化规律，评估性能稳定性。温度适应性评估

分析系统在极端温度下的机电协同性能，通过热 - 结构 - 电子耦合分析，评估温度梯度影响。综合环境适应性评估分析辐照与其他环境因素耦合作用对系统性能的影响，通过模拟极端工况，评估极限承载能力。

### 4.3 可靠性评估

聚焦系统全生命周期的无故障运行能力，采用故障树分析方法，从机电耦合角度识别薄弱环节，评估平均无故障时间与故障恢复能力。以系统失效为顶事件，各类故障为中间和底事件，通过逻辑门构建模型，推导顶事件发生概率。电子单元故障分析重点考虑辐照引发的单粒子。分析翻转、单粒子门锁与器件老化等故障模式对时序控制、信号处理与数据存储功能的影响；机械结构故障分析中，重点考虑辐照肿胀、材料疲劳、应力集中与结构形变等故障模式对光电转换模块安装精度与运动同步性能的影响；机电协同故障分析中，重点考虑时序偏差、结构形变与信号干扰的耦合作用对系统整体性能的影响。通过故障树分析，明确系统薄弱环节，如时序控制模块的计数器单元、机械支撑结构的浮动连接单元等，为系统优化设计提供理论依据。同时，评估系统的故障自修复与冗余容错能力，分析故障后恢复效率，完善可靠性评估体系。

## 5 机电一体化设计的场景化理论验证

为验证耐辐照摄像机系统机电一体化设计有效性与性能评估体系科学性，本文选取核反应堆堆芯监测与深空探测两个极端场景进行理论验证，分析系统机电协同性能与运行稳定性。

### 5.1 核反应堆堆芯监测场景验证

核反应堆堆芯监测场景有高剂量率辐照、大温度梯度与机械振动特点，系统需长期运行并实时监测堆芯状态。在此场景中，光电转换模块采用外延层减薄与钝化层优化设计抑制暗电流，热电制冷单元稳定传感器温度；机械支撑结构用钛合金与碳纤维复合材料混合设计抑制形变，浮动连接架缓冲振动；视频流时序控制模块根据温度与振动信号调整脉冲，补偿时序偏差；辐射图像数据存储模块用冗余存储与差错控制编码技术确保数据完整。经评估，系统信噪比超 35 分贝，分辨率无明显下降，时序恢复时间小于 10 毫秒，满足应用需求。

### 5.2 深空探测场景验证

深空探测场景有瞬时强辐照、极端温度变化与真空环境特点，系统需应对复杂空间环境实现成像与数据采集。在此场景

### 参考文献：

- [1] 李磊,陈政涛,张龙强,等. 核电厂耐辐照摄像机使用现状及国产化思考[J]. 仪器仪表用户,2022,29(5):75-78.
- [2] 韩春雷,张彦敏,陈兵.新型耐辐射摄像机的设计[J].舰船科学技术.2013,(6).
- [3] 李文龙,安彦波,王多尧,等.基于光纤传像束的高耐辐照成像系统研究[J].光学学报.2025,45(16).
- [4] 王屹崧,徐灿,王礼坤. 国产耐辐照摄像机在某核电站的应用[J]. 现代企业文化,2019(16):192.

中，机械支撑结构采用双层防护与密封设计，浮动连接架适应温度变化；视频流时序控制模块采用三模冗余设计屏蔽错误，奇偶场错位同步设计避免闪烁；光电转换模块用铅硼聚乙烯复合材料外壳减少轰击；PAL 制式视频编码模块内置算法校正图像噪声与畸变。经评估，系统在累积辐照剂量达 100 千戈瑞时功能完整，平均无故障时间超 10000 小时，满足应用需求。

## 6 耐辐照摄像机系统的优化策略

基于机电耦合理论与场景化验证结果，从材料、结构、算法与控制四个层面提出优化策略，提升系统耐辐照能力与机电协同性能。材料层面，用碳化硅等宽禁带半导体材料替代传统硅基材料，其宽禁带、高导热、强耐辐照，能抑制辐照损伤，提升光电转换模块性能；机械支撑结构采用碳化硅陶瓷基复合材料，耐辐照与热稳定性好，可减少辐照肿胀与结构形变。结构层面，引入主动减振与主动调焦机电协同机制，主动减振通过压电陶瓷传感器检测振动信号，驱动执行机构反向振动抵消影响；主动调焦通过图像清晰度检测算法调整镜头位置，补偿离焦。同时，优化散热通道设计，采用微流道散热技术提升散热效率，减少结构形变。算法层面，开发基于深度学习的辐照损伤补偿算法，训练数据集让算法学习图像损伤特征，实现智能化处理；优化时序控制算法，采用自适应相位调整策略，根据实时数据调整行场同步脉冲，提升机电协同精准度。控制层面，构建多物理场耦合实时监测与预警系统，部署多种传感器采集运行状态数据，通过多物理场耦合模型分析，预判性能退化趋势，参数超阈值时触发冗余切换与故障自修复机制，提升系统可靠性。

## 7 结论

本文以耐辐照摄像机系统为研究对象，分析辐照环境下机电耦合理论，构建机电一体化架构，推导关键单元设计逻辑与协同机制，建立性能评估体系，并通过典型场景验证方案有效性及评估体系科学性。研究结果表明，机电协同冗余设计与时序同步机制是提升系统耐辐照能力核心，柔性铰链与浮动连接架缓冲机械应力，三模冗余时序逻辑屏蔽单粒子翻转错误，多维度评估体系反映系统状态。通过多层次优化策略可提升系统机电协同与极端环境适配能力。本文研究为系统工程化研发提供理论框架，未来可探索多物理场耦合建模方法，实现辐照损伤预测与补偿，开展原型机研制与验证，为极端环境成像设备提供技术支撑。