



·效应、试验与评估·

典型光电系统强电磁脉冲耦合分析与加固方法*

刘文聪, 梁圆龙, 黄贤俊, 徐延林, 姚理想, 文奎, 田涛, 刘培国

(国防科技大学 电子科学学院, 长沙 410076)

摘要: 随着电磁环境的日益复杂, 电子设备面临的电磁威胁愈加严峻。光电系统作为高灵敏集成化电子设备, 强电磁脉冲能量耦合进入系统内部, 影响防护能力本就薄弱的光电系统的正常运行。为明晰典型光电系统强电磁耦合过程, 通过仿真分析不同强电磁辐照条件下筒型、侧窗型和多窗口型三种典型光电系统的强电磁耦合情况, 提取了光电系统强电磁耦合特征及其制约因素, 验证了光电系统进行强电磁防护加固的必要性和紧迫性。为解决光电系统强电磁防护能力薄弱的问题, 通过仿真分析, 验证了透明电磁防护窗口的强电磁加固效能; 开展了基于支撑台阶与导电侧壁的电磁缝隙防护加固方法研究, 分析了透明防护窗口缝隙耦合泄露的关键安装结构参数, 提出了一种非电接触式装配缝隙强电磁防护加固方法。经测试, 当缝隙防护结构长度为 6 mm 时, 在 0.2~4 GHz 频率范围光电系统平均强电磁防护效能提升 4.51 dB。研究结果为光电系统强电磁防护能力提升提供了理论指导和具体解决方案。

关键词: 光电系统; 强电磁耦合分析; 透明防护光窗; 电磁防护方法

中图分类号: O441.4

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230321

Coupling analysis and reinforcement method of high electromagnetic pulse in typical optoelectronic systems

Liu Wencong, Liang Yuanlong, Huang Xianjun, Xu Yanlin, Yao Lixiang, Wen Kui, Tian Tao, Liu Peiguo

(College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: With the increasing complexity of the electromagnetic environment, the threats posed of electromagnetic weapons to electronic equipment are becoming increasingly serious. As a sensitive integrated electronic device, the optoelectronic system is coupled with high-power electromagnetic pulse energy. This can disrupt the normal operation of the optoelectronic system, especially when it lacks sufficient electromagnetic protection. To clarify the high-power microwave coupling process of typical optoelectronic systems including barrel type, side window type, multi-window type under different irradiation conditions, simulations and analyses are conducted. The characteristics of high-power microwave coupling in optoelectronic systems and their constraints are extracted. The necessity and urgency of protecting reinforcing optoelectronic systems with high-power microwave are verified. For addressing the issue of weak high-power microwave protection ability in optoelectronic systems, the simulation analysis verifies the effectiveness of reinforcing transparent electromagnetic protection windows for high-power microwave. The study focuses in the method of electromagnetic gap protection and reinforcement, which is based on the support step and the conductive side wall. The key parameters of the installation structure for the gap coupling leakage of transparent electromagnetic protection windows are analyzed, and a method of non-electric contact assembly gap high-power microwave protection and reinforcement method is proposed. When the length of the gap protection structure is 6 mm, the average high-power microwave protection efficiency of the 0.2–4 GHz optoelectronic system increases by 4.51 dB. The study provides theoretical guidance and specific solutions for enhancing the high-power microwave protection capability of optoelectronic systems.

Key words: optoelectronic system, high-power electromagnetic impulse coupling analysis, transparent electromagnetic protection window, electromagnetic protection method

* 收稿日期: 2023-09-18; 修订日期: 2024-01-04

基金项目: 湖湘英才项目 (2020RC3028); 湖南省自然科学基金优秀青年项目 (2022JJ20045)

联系方式: 刘文聪, wencong96@sina.com。

通信作者: 黄贤俊, huangxianjun@nudt.edu.cn。

随着强电磁脉冲武器在军事上的应用逐渐成熟,各类综合装备平台均面临强电磁攻击威胁^[1-3]。强电磁脉冲普遍具有能量强度大、峰值高、作用范围广等特点^[4]。光电系统作为装备平台的“眼睛”^[5],其光通道、表面孔缝及后端线缆等位置极易成为强电磁的耦合途径,造成系统损伤^[6]。其中,光电系统要求光通道整体透过率高、杂散光少、热噪声低,常规“前门”防护手段受限^[7];同时其探测灵敏、集成度高,电磁效应阈值低^[8],抗电磁毁伤能力较弱。在壳体衰减的情况下,光电转换设备在 20 W/cm^2 的辐照条件下即出现了干扰和扰乱的效应现象^[9]。在文献 [10] 中,CCD 光学成像设备在强电磁辐照条件为 0.4 kV/m 时发生设备功能异常,随着辐照功率的增加,还出现了成像质量下降甚至端口部件烧毁等效应。因此,亟需系统性分析光电系统强电磁耦合效应,开展光通道强电磁防护加固研究。

光电系统光通道强电磁防护加固研究的核心,在于解决其电磁防护和高透光率的兼容问题。当前,防护的主要手段是将透明电磁防护材料镀制于原有镜头或新增防护光窗上,根据透明电磁防护材料的结构及导电网络的不同,可将其划分为连续型薄膜和孔径型薄膜,但这两类材料均存在导电性与透光性之间的制约^[11]。目前,获得高性能透明电磁防护材料一般采用复合薄膜结构设计,通过连续型与孔径型薄膜优化组合的方式,充分发挥不同材料的特点,兼顾高光学透明性与高效电磁屏蔽效能^[12-15]。国防科技大学的研究团队提出“微纳波导”技术,通过将孔径型和连续型两类材料优点相结合,实现了材料高透光与屏蔽的解耦,获得了 90.4% 的可见光透过率和宽频带内 60.8 dB 的平均电磁防护效能,在同等可见光透过率条件下,防护效能提升约 17 dB^[16]。但高性能透明电磁防护材料与窗口材料一体集成后形成的透明防护窗口,在如何与系统结构装配和结合才能更有效提升光电系统强电磁防护效能方面,还需进一步探究。

在透明防护窗口满足性能要求的前提下,光电系统加装透明防护窗口还需重点关注设备壳体与透明电磁屏蔽材料层之间的装配缝隙,该装配缝隙主要出现在高振动、高温冲击等外部环境影响下,在面临强电磁辐照时,电磁能量会从该缝隙耦合进入系统内部,影响光电系统强电磁防护效能。当前光电系统电磁防护研究中,对于装配缝隙的关注较少,针对不同应用场景的装配缝隙处置方式缺乏系统性研究,装配缝隙导致的强电磁防护效能下降问题亟待创新解决。

本文针对以上典型光电系统强电磁耦合效应分析与防护加固存在的问题,开展了以下工作:一是针对光电系统光通道强电磁耦合效应特点不清晰、强电磁防护加固研究不便的问题,对三种典型光电系统光通道展开强电磁耦合效应分析,提取典型光电系统强电磁耦合特征,形成典型光电系统强电磁耦合效应分析方法;二是对光电系统加装透明防护光窗的强电磁防护方法进行研究,分析了三种典型光电系统加装透明防护光窗的有效性和可行性;三是围绕装配缝隙致使系统强电磁防护效能下降的问题,研究装配缝隙主要尺寸对系统强电磁耦合效应的影响,提出了一种非接触式装配缝隙抑制结并验证了其有效性。本文的研究将对光电系统光通道强电磁防护提供理论指导和具体解决方案,对提升光电系统强电磁防护能力具有重要意义。

1 典型光电系统光通道强电磁效应耦合分析

光电系统内部存在多条强电磁耦合通道,当强电磁辐照至系统壳体处时,会在辐照位置激发产生表面电流,若系统表面存在孔缝等边界不连续处,表面电流会二次耦合进入设备内部。从系统结构来看,通常有光通道、光窗与壳体缝隙、线缆等多种耦合途径。从耦合发生类型来看,可分为直接耦合(光通道直接耦合)与间接耦合(孔缝耦合、线缆耦合、腔体内部谐振等)。

光电系统光通道(后简称“光通道”)为单端敞口结构,在面临强电磁辐照时会产生耦合,是光电系统的主要耦合通道之一。在实际应用中,由于光通道结构的具体差异,存在不同的耦合特点。按照光通道结构差异,可将光电系统分为筒型、侧窗型和多窗口型三种典型结构。筒型结构为经典的光电系统结构,具备结构简单、适用于杂散光复杂环境、具有长焦和窄视角等特点,多用于星敏传感器^[17]、空间相机^[18]等光电设备。侧窗型结构主要用于气动热环境下,配置在弹体侧面以避开弹体头部的热流密集区,保证在大气层高速作战导弹的探测范围,该型光电系统通常用于红外光学导引头等设备^[19-21]。多窗口型结构主要应用于多孔径、大视场光学系统中,例如机载光电瞄准器等,通常具备多模式光电探测功能。

本文对上述三种典型光电系统展开强电磁辐照耦合分析。在光电系统内部中心位置设置电场幅度探针,用以检测进入系统内部的耦合电场幅值,确定强电磁波辐照下的系统耦合情况。通过改变辐照源的辐照角度、极化方式等输入参数,分析光电系统强电磁耦合特性。此外,对筒型和多窗口型光电系统的光通道结构进行拆分,明确不同光通道结构对于强电磁耦合的影响,结合具体应用场景,给出强电磁防护薄弱环节和加固建议。最后,总结了三种典型光电系统强电磁耦合效应的特点,提取出光电系统强电磁耦合的基本特征,给出具体防护建议。

1.1 筒型光电系统

以文献[17]中筒型光电系统为例,开展强电磁耦合效应研究。该系统主要由一个锥状遮光罩与一个长方体线路盒连接组成,其结构尺寸如图1(a)所示。其中遮光罩长160 mm,上、下开口直径分别为110 mm和22 mm,遮光环宽度25 mm,两个相邻遮光环之间距离30 mm。遮光罩下方连接的线路盒尺寸为166 mm×166 mm×100 mm。在其中心处设置电场检测探针,用于监测线路盒内强电磁耦合情况。为方便理论分析,将系统材质设置为理想导体(PEC)。在仿真设置方面,采用电磁仿真软件CST中的有限积分法(FIT),对光电系统强电磁耦合问题开展仿真计算。其中强电磁辐射入射角度设定为 θ (θ 分别为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° 、 180°)。由于脉冲源与光电系统距离较远,设置开放边界下的平面波激励模拟脉冲源,信号类型为默认的高斯脉冲。综合MIL-STD-464C等标准,电场幅值为10 kV/m,模型结构设置为PEC。本文仿真均采用以上仿真设置。筒型光电系统辐照角度如图1(b)所示,此处设定辐照电磁波磁场方向为 $-y$ 方向,辐照方向与 $+x$ 方向夹角 θ ,极化方式为线极化。

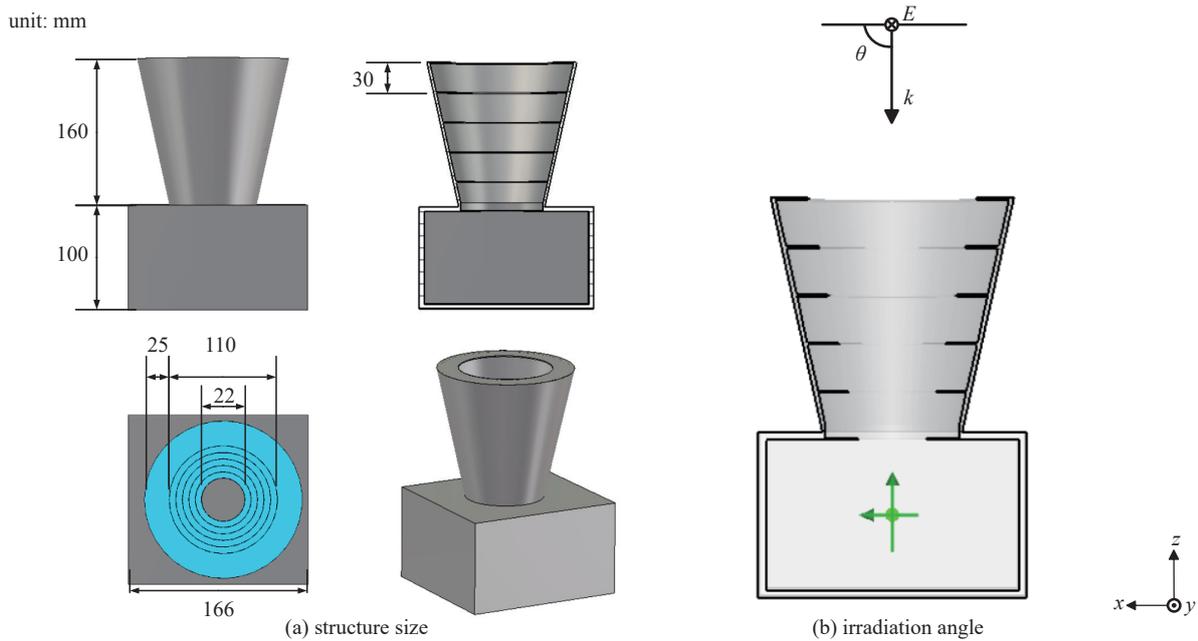


Fig. 1 Structure size diagram and irradiation angle diagram of tube optoelectronic system

图1 筒型光电系统结构尺寸和辐照角度示意图

当 θ 分别为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° 、 180° 时,强电磁耦合电场幅值如图2(a)所示:随着入射角度的增大,耦合电场幅值先增大后减小。其中 0° 和 180° 强电磁耦合效应最弱,随着 θ 接近 90° ,强电磁耦合效应最强,最高场强可达近70 kV/m。此外, 60° 和 120° 时与 90° 的耦合电场幅值差异明显,系统强电磁耦合效应在 θ 接近 90° 时快速增强,并在 $\theta=90^\circ$ 时达到最大。综上,辐照角度直接影响筒型光电系统强电磁耦合效应,具有较强的辐照角度选择性。

在强电磁波能量耦合进入系统过程中,六个挡光环、遮光筒壁结构与线路盒组合形成多个谐振腔体,会在传

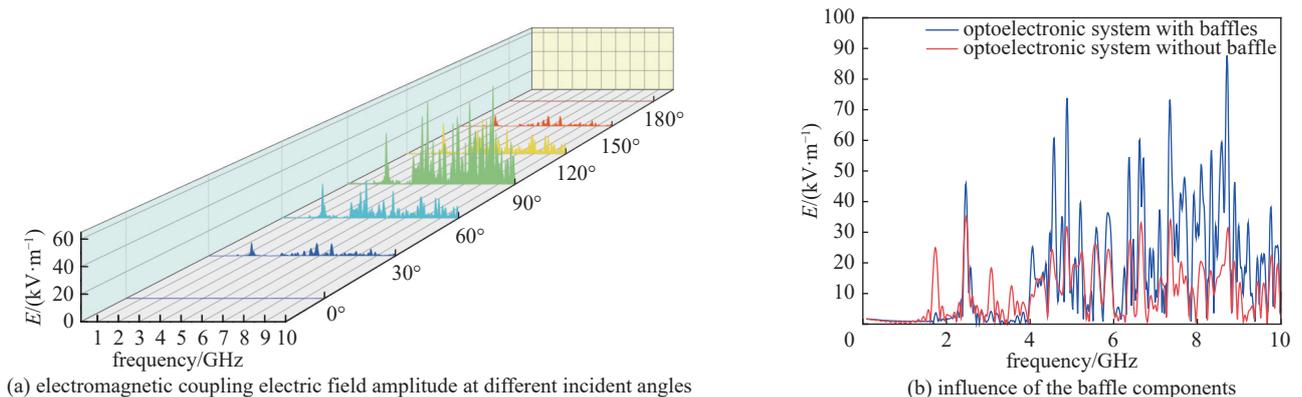


Fig. 2 High-power electromagnetic coupling characteristics of straight tube optoelectronic system

图2 筒型光电系统电磁耦合特性

播过程中对不同频率的电磁波进行“调制”，在多个频点下形成强谐振。为明确遮光筒结构对系统强电磁耦合效应的影响，展开仿真实验研究，强电磁耦合效应如图2(b)所示。

当线路盒腔体直接面临强电磁辐照时，在1.73 GHz频率处耦合电场幅值高于10 kV/m，出现明显的强电磁耦合效应，耦合电场幅值约25 kV/m；当系统包含遮光筒时，1.73 GHz处无明显耦合效应，2 GHz以上频率强电磁耦合效应明显增强。可以看出，由于遮光罩锥形结构会根据光通道的最小通过孔径（不包含遮光环）形成典型截止效应，1.73 GHz频点的强电磁耦合被截止。通过圆波导截止频率计算^[22]，下开口半径为44 mm，TE₁₁模式截止频率为1.99 GHz，符合仿真结果。

在面临2 GHz以上持续强电磁辐照时，遮光罩明显增强了强电磁耦合效应。这是由于遮光罩的锥形结构对强电磁能量具有明显的聚束效应，能量由平均分布向光通道中心集中，产生明显的效应增强。因此，可通过对遮光罩结构设计，改变在强电磁辐照下的“截止”频率，降低强电磁耦合效应。

综上，筒型光电系统强电磁耦合效应主要存在以下特点：一是对于辐照源辐照角度具有较强的角度选择性，其中直线光路方向下的强电磁耦合效应最强；二是存在典型截止效应，其截止频率与光通道的最小空间通过路径直接相关，可通过圆波导等类似结构公式进行估算；三是从结构来看，遮光罩结构对筒型光电系统在截止频率后的强电磁耦合效应增强效果明显。

1.2 侧窗型光电系统

在气动热应用环境下，侧窗型光电系统应用场景如图3(a)所示（实线为体视线坐标系LOS，虚线箭头为光电视场范围）。典型侧窗型光电系统由侧向光通道及下方连接的长方体线路盒组成，基于结构特征构建模型，具体结构尺寸如图3(b)所示，其中窗口尺寸为150 mm×97 mm，下方侧向光通道高40 mm，横向宽度243 mm，线路盒为192 mm×157 mm×195 mm的长方体（边缘为半径16 mm的圆角），模型结构设置为PEC。侧窗型光电系统辐照角度实验如图3(c)所示（绿色十字为电场幅值监测点）。此处设定辐照电磁波磁场方向为-y方向，辐照方向与+x方向夹角 θ ，极化方式为线极化。

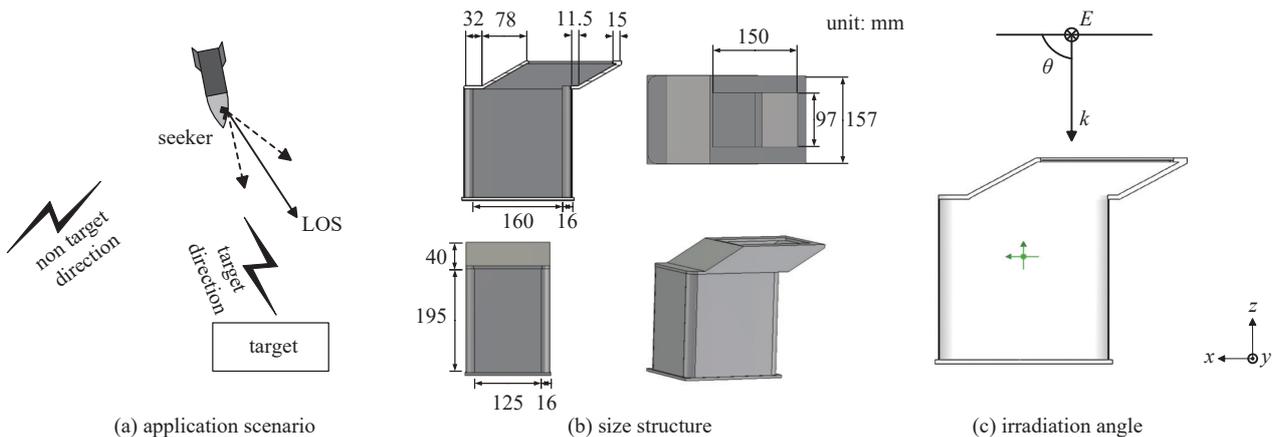


Fig. 3 Application scenario, structure size and irradiation angle diagram of lateral window type optoelectronic system

图3 侧窗型光电系统应用场景、结构尺寸和辐照角度示意图

当 θ 分别为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° 、 180° 时，强电磁耦合效应结果如图4(a)所示：在0.2~10 GHz频率范围内，当辐照角度可直接辐照至系统内部时，系统内部耦合电场幅值最大，强电磁耦合效应最为明显。七个辐照角度中， 60° 和 90° 两个入射角度的强电磁耦合效应最为明显。在频域上，存在典型截止效应，强电磁耦合效应主要出现在1 GHz频率以上，与理论估算^[22]结果一致。此外，侧窗型光电系统结构的主要耦合结构为光学窗口所在位置，并在下方连接较为平滑的腔体，电磁波耦合能量几乎无衰减。

此外，根据文献[19]，在实际应用中，若目标与强电磁辐照方向一致，则 30° – 55° 为侧窗型光电系统的主要辐照角度，此时光电系统与辐射源距离较近，强电磁能量最强，面临的强电磁威胁最大。展开细化仿真实验，结果如图4(b)所示。

在该辐照范围内，耦合电场幅值较高，产生强电磁耦合效应。随着辐照角度的增大，耦合电场幅值增大，强电磁耦合效应增强。综合辐照角度对侧窗型光电系统强电磁耦合效应实验结果，在特定频点和辐照角度下，侧窗型光电系统结构强电磁防护存在薄弱环节。因此，在实际应用中，导弹在飞行末段侧窗型光电系统面临强电磁辐照

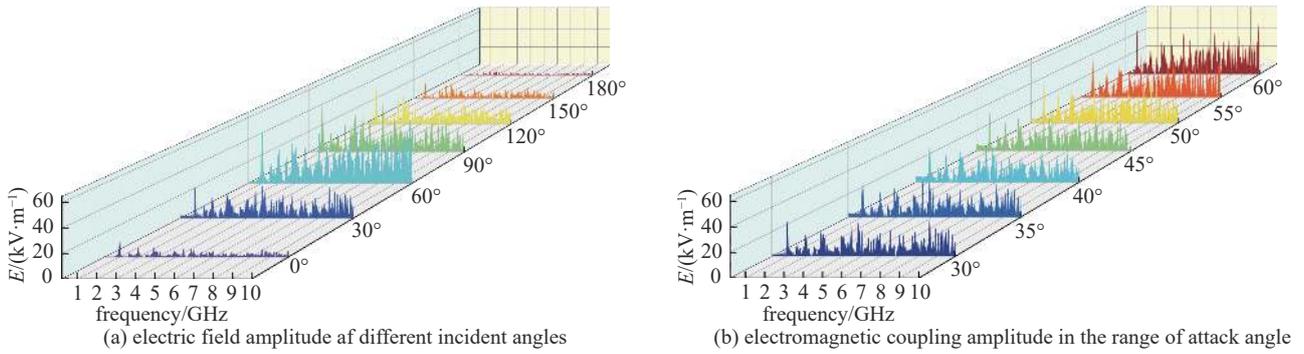


Fig. 4 Electric field detection values of side window structure at different incident angles

图 4 侧窗型结构不同入射角度电场检测值

威胁最大、防护需求最高,应优先强化该场景下的强电磁防护能力。

辐照方向为垂直辐照时,侧窗型光电系统强电磁耦合效应极化敏感性如图 5 所示。两种辐照条件下,侧窗光电系统均会在 1 GHz 频率以上产生强电磁耦合效应。其中,超过 30 kV/m 电场幅值频点数量上,垂直极化多于水平极化。此外,两种极化方式在谐振频率上也存在不同,在 1.30、3.58、4.86 GHz 等多个频点附近差异明显,耦合电场幅值最高相差近 44 倍。

综合侧窗型光电系统强电磁耦合效应特点如下:一是存在典型截止效应。其截止频率主要与窗口及光通道结构中的最小通过口径相关;二是辐照源的角度、极化方式均会影响强电磁耦合效应。在兼顾光学性能要求的前提下,应对系统结构采取适当设计,提高系统结构的截止频率,降低耦合效应,再进行相应的电磁防护加固措施,例如加装透明防护窗口、贴附吸波材料或结构等,形成宽频段防护能力。

1.3 多窗口型光电系统

多窗口型光电系统通常应用于大视场、多光学功能、多光学路径等多功能的光电系统。其主要由多窗口框架和长方体线路盒组成,其结构尺寸如图 6(a) 所示,多窗口框架高 100 mm,顶部窗口尺寸为 75 mm×75 mm,边缘为 5 mm

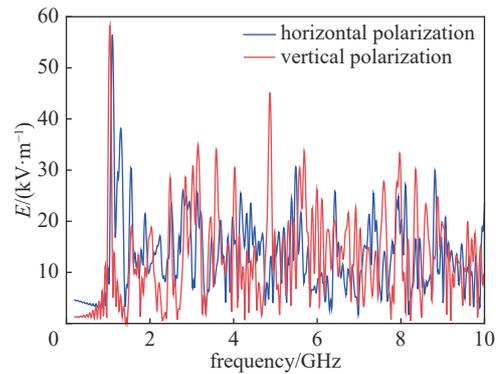


Fig. 5 High-power microwave coupling effect of side window structure under vertical and horizontal polarization irradiation

图 5 侧窗型结构垂直极化与水平极化辐照下的强电磁耦合效应

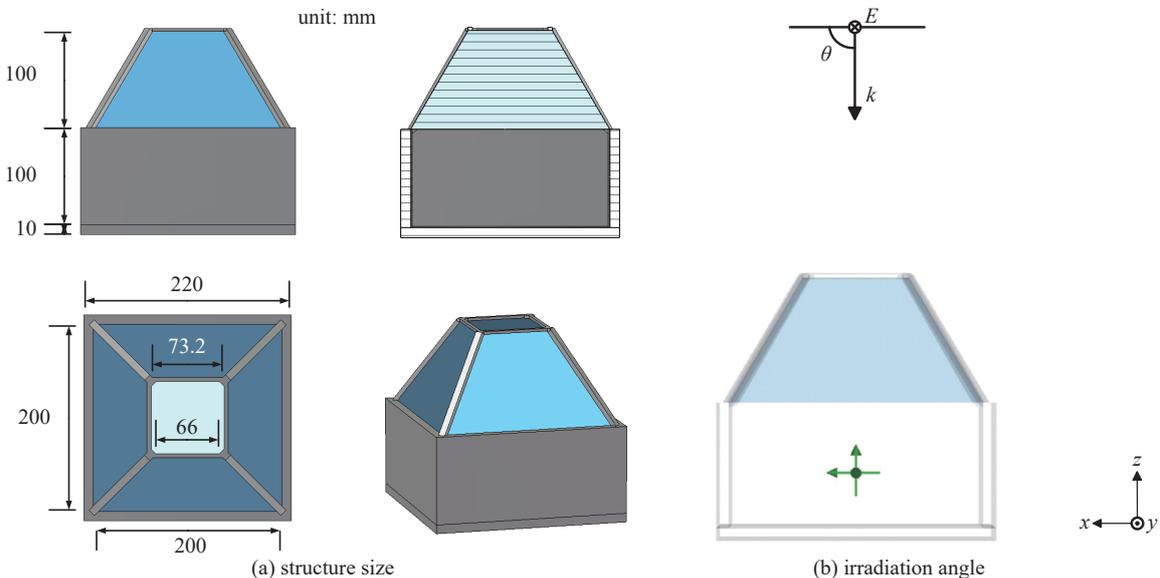


Fig. 6 Structure size diagram and irradiation angle diagram of multi-window optoelectronic system

图 6 多窗口型光电系统

的45°倒角,线路盒内部为200 mm×200 mm×100 mm的长方体。模型材料设置为PEC。图6(b)为多窗口型光电系统辐照角度示意图,其中蓝色处为系统光学窗口,绿色箭头十字为电场幅值检测点(位于线路盒中心点)。此处设定辐照电磁波磁场方向为 $-y$ 方向,辐照方向与 $+x$ 方向夹角 θ ,极化方式为线极化。

当 θ 分别为0°、30°、60°、90°、120°、150°、180°时,强电磁耦合效应结果如图7(a)所示:在1 GHz首先出现强腔体谐振,1.62、6.82 GHz等多处频点附近频段耦合电场幅值较高,系统内部形成强谐振,系统在全辐照角度存在强电磁耦合效应。在 $\theta=0^\circ$ 和180°时,耦合效应较弱,30°≤ θ ≤150°时,均出现较强耦合效应,其中 $\theta=60^\circ$ 时,6.82 GHz处达到最高电场幅值33601 V/m。系统的大视场特点使得在大辐照范围内,均可直接辐照至光电系统内部,产生强电磁耦合效应。

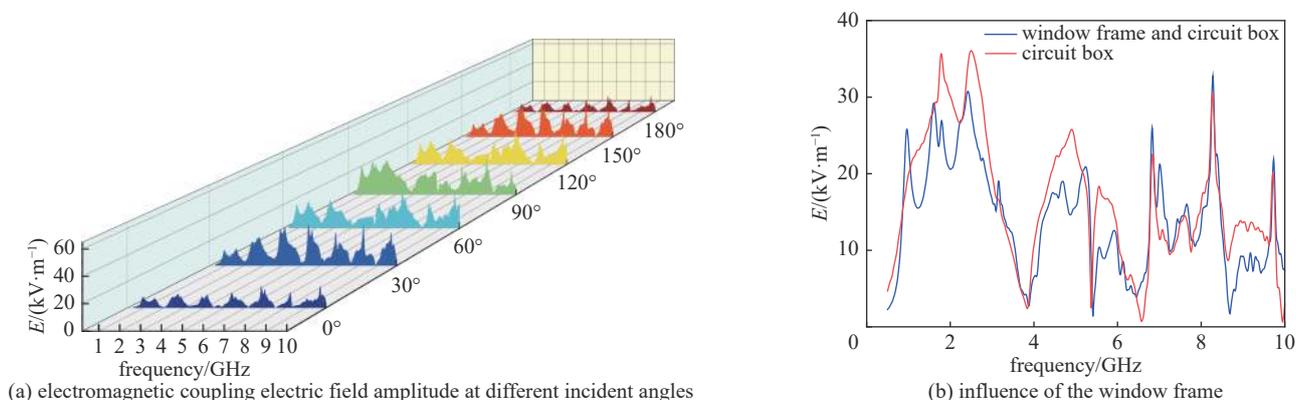


Fig. 7 High-power electromagnetic coupling characteristics of multi-window optoelectronic system

图7 多窗口型光电系统电磁耦合特性

多窗口框架对耦合效应的影响如图7(b)所示。强电磁耦合效应出现在1 GHz频率以上,窗口框架对截止频率无影响。在频域上,系统的耦合电场幅值在有窗口框架时普遍小于无窗口框架时。从系统耦合效应来讲,窗口框架对系统结构谐振在频域上存在总体抑制、局部增强的现象。

通过上述分析,总结多窗口型光电系统强电磁耦合特点如下:一是具备典型截止效应,截止频率主要与系统下部线路盒开口大小有关。二是辐照角度不敏感,在7个辐照角度中,当入射角度大于30°后,均呈现明显的强电磁耦合效应。三是窗口框架具有一定的耦合抑制效果。实际应用过程中,因光电系统内部空间的限制,会采取折射或反射的方式折叠光路。因此,从系统强电磁防护角度来说,一是对光学窗口进行防护加固,如加装透明电磁防护窗口、适当调整窗口大小和形状等;二是可以结合反射折射镜,在光通道内部设置吸波材料或装置,作为增强系统强电磁防护效能手段的补充;三是对光学窗口的拼接结构展开设计,降低结构本身的强电磁耦合效应。

1.4 光通道强电磁耦合特征

通过总结三种典型结构强电磁耦合效应特点,提取光通道强电磁耦合特征如下:

(1)存在典型截止效应。典型光通道通常为单端敞口结构,该型结构在面临强电磁脉冲辐照时,频率低于截止频率(通常可通过光通道的主要结构尺寸快速估算)的电磁波会迅速衰减,频率高于截止频率的电磁波耦合效应明显。可通过光通道的结构设计,减少对低频强电磁的耦合,提升系统低频强电磁防护能力。

(2)直视路径耦合效应明显。光通道的直线光路范围越大,产生强电磁耦合效应的辐照角度范围越大。若强电磁波在光通道传播过程中无绕射、反射等变化,直接无遮挡辐照至系统内部,则强电磁耦合效应更明显。因此,应根据光通道的具体结构,在外部窗口、光通道等直视路径的关键位置采取防护措施,降低强电磁耦合效应。

(3)具有极化敏感性。当强电磁辐照源极化方式改变时,光电系统窗口形状、光通道对称性等因素会影响光电系统的强电磁耦合情况。在特定频带的不同极化方式下,典型光电系统会存在强电磁防护薄弱环节,在强电磁防护加固中应考虑。

总结特点如表1所示。

综上,典型光电系统光通道在未设置强电磁防护措施时,是强电磁耦合的主要通道。强电磁波能量通过光通道耦合进入光电系统内部后,部分频段还会产生二次谐振,极大威胁光电设备正常运行。因此,要综合考虑光电系统结构和实际工作需求,对光通道采取强电磁防护措施,提升光电系统强电磁防护效能。在此基础上,展开差异化设计,增强具体应用场景下的系统强电磁防护能力,形成多状态综合一体化防护能力,保证设备的正常运行。

表 1 三种典型光电系统的强电磁耦合特性

Table 1 High-power microwave coupling characteristics of three typical optoelectronic systems

type of optoelectronic system	frequency/GHz	resonance	maximum coupling irradiation angle	irradiation angle sensitivity ranking	polarization sensitivity ranking	maximum coupling $E/(V \cdot m^{-1})$
tube	2~10	√	90°	high	low	70 000
side window	0.8~10	√	90°	middle	high	58 556
multi window	0.9~10	√	60°	low	low	33 601

2 光通道加装透明防护窗口

光通道作为光电系统强电磁耦合的主要通道,目前主要采用加装透明防护窗口的方式进行防护。透明防护窗口是通过将透明电磁屏蔽材料镀制在原有镜头或新增防护光窗上,使透明防护窗口与光电系统壳体形成“法拉第笼”,形成电磁屏蔽外壳,达到强电磁防护效果。此外,还可通过在光通道内加装吸波材料、对光电系统器件分区隔离等方式进行防护。综合成熟度与防护效果来看,光电系统加装透明防护窗口的方式强电磁防护效果最好。但在实际工程应用中,还需对透明防护窗口与系统壳体间存在的装配缝隙导致的缝隙耦合进行抑制,以保证光电系统强电磁防护整体效果。

基于以上分析,本节进行了以下几方面研究工作:一是验证了透明防护光窗对光电系统强电磁防护的效能;二是研究了在实际应用中装配缝隙产生的缝隙耦合对整体防护效能的影响;三是对装配缝隙耦合抑制方法展开研究。

2.1 透明电磁防护窗口防护效能验证

透明防护光窗是通过在高透光基材上镀制高导电透明薄膜,以达到透光与电磁屏蔽的效果。典型地,镀制金属网栅材料的透明防护窗口能在微波频段达到 20 dB 以上的电磁防护性能^[23]。同时,光电系统在运行过程中,外部环境带来的高振动、高温等因素,会导致透明电磁防护窗口与系统壳体间产生应力,积累形成装配缝隙。在强电磁波辐照时,能量可通过装配缝隙耦合进入系统内部,降低系统强电磁防护效能。装配缝隙结构和耦合路径如图 8(a)所示。

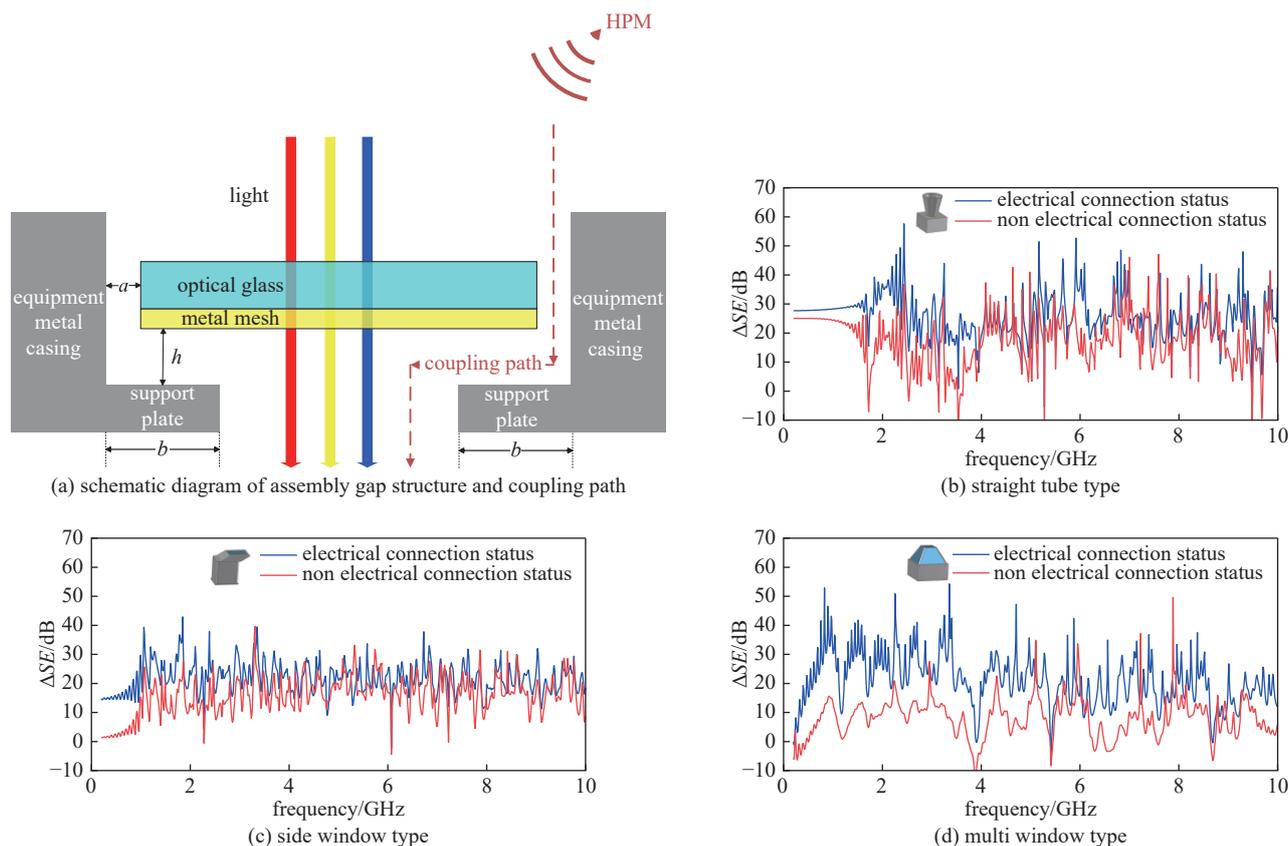


Fig. 8 Schematic diagram of assembly gap structure and coupling path, improvement of ΔSE in the optoelectronic system under ideal conditions and with assembly gaps after installing a transparent protective light window

图 8 装配缝隙结构示意图及三种典型光电系统加装透明防护光窗后理想条件与存在装配缝隙两种情况强电磁防护效能提升情况

透明电磁防护材料设置为表面电阻 $10 \Omega/\text{sq}$ (电磁防护效能约 26 dB), 透明防护窗口与设备壳体距离 $a=1 \text{ mm}$, 距下方支撑台阶 $h=1.5 \text{ mm}$, 支撑台阶长为 $b=4 \text{ mm}$ 。此处设定辐照方向与 z 轴夹角 θ 。本小节对三种典型光电系统加装透明电磁防护窗口后, 主要辐照角度的系统整体电磁防护效能情况展开研究。为此, 设定筒型和多窗口型两种光电系统辐照角度为 90° , 磁场方向为 $-y$ 方向; 侧窗型光电系统辐照角度为 45° (1.2 中攻角范围内), 磁场方向为 $-y$ 方向。

此处采用 ΔSE 表征加装透明防护窗口后电磁防护能力的改善情况, ΔSE 可表述为

$$\Delta SE = 20 \lg \frac{E_0}{E_1} \quad (1)$$

式中: ΔSE 单位为 dB; E_0 为无透明防护光窗时的电场强度; E_1 为安装透明防护光窗时的接收电场强度。

下面对强电磁辐照时三种典型光电系统加装透明防护窗口后, 形成电连接与存在装配缝隙两种情况进行仿真实验。

由于光电系统强电磁防护能力由其防护频段内的综合强电磁能力来评价, 故透明防护窗口的防护价值通常采用平均系统强电磁防护效能进行衡量。如图 8 和表 2 所示, 当透明防护光窗和系统壳体电连接良好时, 系统强电磁防护效能提升明显。三种典型光电系统的系统平均强电磁防护效能提升均在 20 dB 以上。虽然与透明防护窗口本身强电磁防护效能存在一定差距 (26 dB), 但这主要是因为此处测试为系统整体的强电磁防护效能, 与矩形波导测试法有一定区别。当光电系统面临强电磁辐照时, 首先通过光学窗口耦合进入光通道, 强电磁能量在进入系统后还会产生进一步耦合与谐振。此外, 出现个别频点强电磁防护效能较低、 ΔSE 小于 0 的情况, 这主要是因为未加装透明防护窗口时, 该部分频点的强电磁耦合效应不明显, 在设置透明防护窗口后, 光电系统结构发生改变, 频点偏移, 原频点耦合效应增强造成的。同时可以看出, 形成了良好电连接时, 系统强电磁防护效能提升明显。

表 2 三种典型光电系统加装透明防护窗口理想条件与存在装配缝隙两种情况强电磁防护效能

Table 2 Three typical optoelectronic systems with transparent protective windows ideal conditions and high-power microwave protection effectiveness with assembly gaps

type of optoelectronic system	forms an effective electrical connection/dB	with assembly gaps/dB ($a=1 \text{ mm}$, $h=1.5 \text{ mm}$, $b=4 \text{ mm}$)	assembly gaps coupling effect
tube	26.07	17.79	low
side window	21.78	15.73	middle
multi window	20.95	8.01	high

当透明防护窗口与系统壳体间存在装配缝隙时, 相同辐照条件下, 能量可通过缝隙耦合进入系统内部, 系统平均强电磁防护效能下降明显, 筒型、侧窗型和多窗口型三种典型光电系统分别下降 8.28 dB、6.03 dB 和 12.94 dB。对比三种典型光电系统, 筒型、侧窗型和多窗口型在该极化方式和辐照角度下的装配缝隙耦合有效长度存在明显差异, 粗略估算分别为 100 mm、300 mm 和 988 mm。同样地, 装配缝隙耦合有效长度越长, 装配缝隙耦合效应越强, 光电系统强电磁防护效能下降越明显。此外, 多窗口型光电系统同时存在多个装配缝隙, 装配缝隙耦合效应更加突出, 易激励其更多谐振频率^[24], 影响系统强电磁防护效能。

总的来看, 典型光电系统光通道加装透明防护窗口后, 能有效提升光电系统强电磁防护效能。在实际应用中, 需着重注意装配缝隙耦合对强电磁防护效能的影响, 尤其是对类似多窗口型光电系统结构。当装配缝隙有效电长度越长, 装配缝隙越多, 耦合效应越明显, 对系统强电磁防护效能影响越大。需通过装配缝隙结构设计或者材料填充等方式, 降低缝隙耦合对光电系统强电磁防护效能的影响, 保证光电系统在强电磁脉冲辐照下的正常运行。

2.2 光电系统装配缝隙强电磁防护加固方法

对于缝隙结构耦合的抑制, 通常采用将导电胶或结构衬垫结合, 填入系统壳体与透明防护窗口的贴合处, 既能增强两者的贴合度, 还可形成有效电连接。导电胶是由多种基材混合形成的具有导电性能的可塑型胶体, 在一般环境条件下, 通常具备较低的固化温度、对各种材料例如玻璃等材料具有较好粘合力、对基材的应力可忽略不计、成本较低等优点^[25], 基于以上特点, 在常规环境条件下, 该种方式可在透明防护窗口安装过程中应用。

虽然导电胶体可有效抑制缝隙的耦合效应, 但填入过程中存在的溢胶会使设备壳体与金属网栅薄膜产生过度粘结。飞行器在高速飞行过程中产生的高速振动、高温冲击等因素, 可能致使导电胶与金属网栅薄膜从基板上剥离, 透明防护窗口与系统壳体失去稳定电连接, 甚至损坏金属网栅膜层结构并导致透明防护窗口失效。此外, 导电

结构胶或衬垫是通过填充导电材料得以实现的,但是填充颗粒会降低其耐高温、抗振动性能。当前,开发兼具耐高温、高振动、高导电性和高粘接能力特性的导电胶体材料依然是一大难点^[25]。

为此,针对光电系统装配缝隙强电磁加固方法展开研究,在系统壳体与透明防护光窗间设计适当的安装结构,抑制装配缝隙强电磁耦合,开展以下工作:一是以侧窗型光电系统为例,研究透明防护光窗装配缝隙具体尺寸对耦合效应的影响,给出具体设计建议;二是设计了一种非接触式装配缝隙防护结构,应用于侧窗型光电系统并验证了其防护加固有效性。通过上述研究,为极端使用场景装配缝隙耦合抑制提供了行之有效的解决方案。

(1) 装配缝隙结构尺寸对强电磁耦合的影响

如图 8(a)所示,典型光电系统装配缝隙结构通常由透明防护窗口与系统边缘的距离 a 、与下方支撑台阶距离 h 及支撑台阶长度 b 共同决定。透明防护窗口与设备边缘留出部分距离 a ,通常是为了安装方便以便于透明防护窗口嵌入。透明防护窗口与下方支撑台阶距离 h ,该距离是胶粘接窗口与设备壳体的结构胶厚度。在高温冲击、高振动等环境下, h 还会进一步增大。支撑台阶长度 b 则是在满足光学性能要求,不遮挡光路的条件下为窗口提供支撑的安装结构。实验仿真以侧窗型光电系统结构为例,辐照方向 45° ,极化磁场方向为 y 方向,极化方式为线极化,电场幅值为 10 kV/m ,设备壳体与支撑台阶为 PEC。装配缝隙耦合对光电系统强电磁防护效能的影响 ΔSE_1 为

$$\Delta SE_1 = SE_1 - SE_2 \quad (2)$$

式中: SE_1 为无装配缝隙、透明防护窗口与设备壳体形成电连接防护状态下的系统强电磁防护效能; SE_2 则为存在装配缝隙耦合时系统的强电磁防护效能。下面对装配缝隙结构三个主要尺寸变化对系统强电磁防护效能的影响进行研究。

透明防护光窗与设备壳体间的距离 a 对系统强电磁防护效能的影响研究结果如图 9(a)所示,当 a ($h=1 \text{ mm}$ 、 $b=4 \text{ mm}$ 保持不变)分别为 1、2 和 3 mm 时,系统平均强电磁防护效能分别下降 6、7.5 和 8.8 dB,表明系统壳体与透明防护窗口的距离在 $0.2 \sim 10 \text{ GHz}$ 频率范围内对强电磁耦合效应存在影响。当 a 由 1 mm 增大到 3 mm 时,3.29、5.3 GHz 等单一频率点的 ΔSE_1 下降 7 dB 以上,降低明显。此外,随着 a 的增大,部分频点 ΔSE_1 激增,这是装配缝隙导致谐振频率改变造成的。

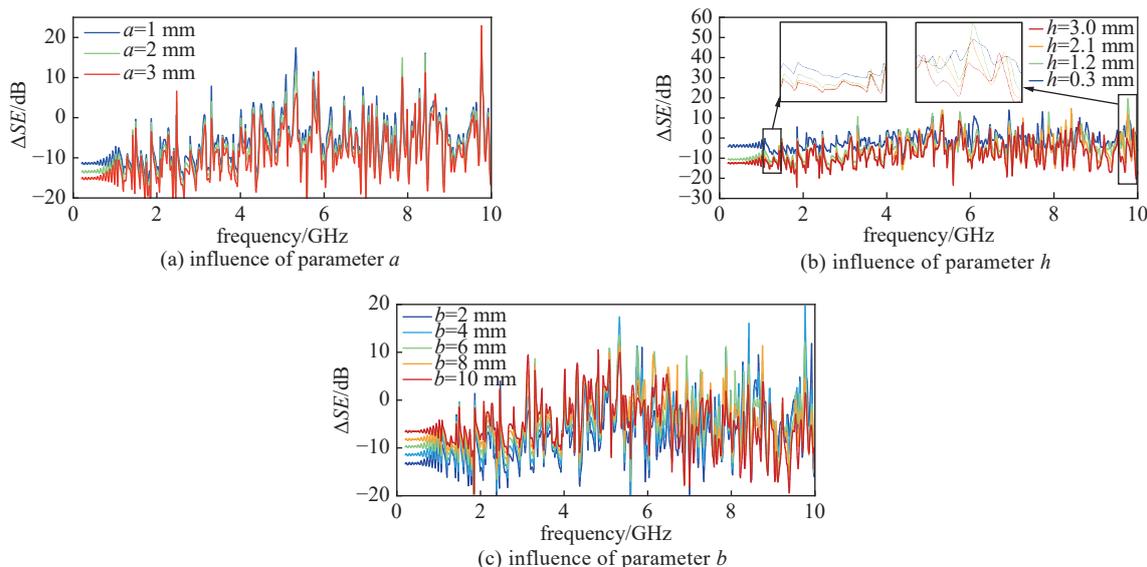


Fig. 9 Influence of three main parameters between the transparent protection window and the equipment shell on the high-power electromagnetic protection efficiency of the system

图 9 透明防护光窗与设备壳体间的三个主要参数对系统强电磁防护效能的影响

透明防护窗口与下方支撑台阶距离 h 对系统强电磁防护效能影响的研究如图 9(b)所示,随着 h ($a=1 \text{ mm}$ 、 $b=4 \text{ mm}$ 保持不变)的增大,装配缝隙耦合逐渐增强, ΔSE_1 下降。在插图中分别给出了 $1 \sim 1.5 \text{ GHz}$ 和 $9.5 \sim 10 \text{ GHz}$ 两个频率范围 ΔSE_1 的影响。在低频率下,随着 h 的增大, ΔSE_1 逐渐降低,装配缝隙耦合效果随着 h 的增大而增强;在高频率下, ΔSE_1 曲线距离较近, h 与 ΔSE_1 变化无明显关系。这是因为当频率较低时,电磁波波长大,大尺寸的装

配缝隙更易产生强电磁耦合；随着频率的上升，电磁波长减小，装配缝隙尺寸与 h 尺寸相比拟，易产生装配缝隙耦合。

如图 9(c) 所示，对支撑台阶长度 b ($a=1\text{ mm}$ 、 $h=1\text{ mm}$ 保持不变) 进行试验仿真。在 $0.2\sim 10\text{ GHz}$ 频率范围内，在低频率下，随着 b 的增加， ΔSE_1 提升，装配缝隙电磁耦合降低；在高频率下，随着 b 的增加， ΔSE_1 降低，耦合效应增强。根据耦合缝隙研究，延长支撑台阶 b 的长度，支撑台阶与透明防护窗口间形成缝隙平板波导，波导的截止效应会对低频的强电磁波产生快速损耗，故低频段随着 b 的增加装配缝隙耦合降低；但同样随着 b 长度的增加，形成的缝隙平板波导结构会产生进一步谐振，使高频段产生强电磁耦合效应。

综合 a 、 h 和 b 三个装配缝隙结构参数对缝隙耦合的影响，可以看出，应使透明防护窗口的透明电磁屏蔽材料层与系统设备壳体贴合，设计适当支撑台阶的长度，以降低装配缝隙耦合对系统强电磁防护效能的影响。其中透明防护窗口与下方支撑台阶距离 h 对装配缝隙耦合的影响最为显著 (建议 h 不超过 0.3 mm)，须在设计安装过程中着重考虑。此外，还可根据不同频率范围的强电磁防护需求，展开典型光电系统结构设计，平衡好不同频率强电磁辐照下的系统整体强电磁防护性能。在此基础上，还可依托透明防护窗口设计非电连接式加固方法，进一步降低装配缝隙耦合，提升光电系统整体强电磁防护能力。

(2) 非接触式光电系统装配缝隙强电磁防护加固方法

在高速振动、高温冲击等环境下，无法采取导电胶和导电衬垫结合的方式抑制缝隙耦合，能量会通过装配缝隙耦合进入系统内部，如图 8(a) 所示。为此，设计一种非接触式缝隙防护结构，对装配缝隙耦合进行抑制。非接触式结构是在光学玻璃侧边缘溅射金属薄层 (该薄层与下层金属网栅相同材料)，并与金属网栅形成电连接，具体结构如图 10(a) 中右侧黑色矩形部分所示。根据 J. P. Quine 和 A. J. Pesta 的研究，该细缝看作平行板波导^[26]。通过该种方式，可以将缝隙耦合的电磁波进行抑制，达到提升系统整体强电磁防护的效果。设非接触式缝隙加固结构高为 h_1 ，厚度为 0.1 mm ，材料选择 PEC。辐照条件设置与 2.2(1) 相同。

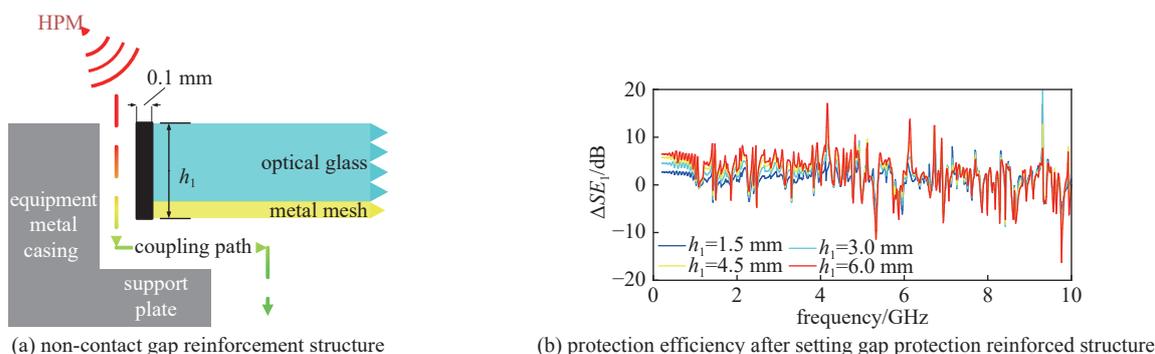


Fig. 10 Structural schematic diagram and protection efficiency improvement after setting the gap protection reinforced structure

图 10 设置缝隙防护加固结构示意图和防护效能提升情况

在添加缝隙防护结构后 ΔSE_1 提升如图 10(b) 所示，在 $0.2\sim 10\text{ GHz}$ 频率范围内，随着 h_1 的增加， ΔSE_1 分别提升了 1.22 、 1.96 、 2.43 和 2.66 dB ，防护频段内装配缝隙耦合降低，平均防护效能提升。从频域角度来看，在 $0.2\sim 4\text{ GHz}$ 频率范围内，随着 h_1 的增加， ΔSE_1 分别提升了 1.41 、 2.72 、 3.77 和 4.51 dB ，低频段明显好于在高频段的装配缝隙耦合抑制效果。从结构参数来看，非接触式结构高度的增加，在低频段的装配缝隙耦合抑制能力逐渐提升，而在高频段的装配缝隙耦合抑制能力逐渐降低。出现该种现象是因为非接触缝隙耦合抑制结构与设备间形成的平板缝隙波导，该结构具有低频电磁耦合抑制、高频电磁耦合增强的特点，故出现装配缝隙耦合效应增强的情况。

因此，应用非接触式装配缝隙耦合抑制结构需要综合各频率范围的强电磁防护指标进行设置。在实际应用中，该方法主要针对气动力学要求苛刻、难以形成稳定电连接的场景中。此外，该型结构可通过溅射等方式进行加工以提升结构的附着性与牢固度。

3 结 论

通过对典型光电系统强电磁耦合效应及光通道强电磁防护与加固问题展开研究，结合具体应用场景，分析得到三种典型光电系统强电磁防护薄弱环节，形成典型光电系统强电磁耦合分析方法，归纳提取光电系统存在典型截止效应、直视路径耦合效应明显和具有极化敏感性三点强电磁耦合特征。在典型光电系统光通道加装屏蔽效

能为 26 dB 的透明防护窗口并形成良好电连接后, 系统平均强电磁防护效能提升大于 20 dB。实际应用中存在装配缝隙时, 加装透明防护窗口效果下降明显。最后, 对装配缝隙结构设计提出具体建议, 尤其需要注意安装透明防护窗口时的结构胶厚度。设计了一种应用于高振动、高温冲击等极端环境条件下的装配缝隙电磁防护加固方法, 并研究了其在不同频段下的有效性。完成了从典型光电系统结构分析, 到薄弱环节提取, 再到系统强电磁防护及加固的一系列工作, 为后续光电系统强电磁防护结构设计和防护加固提供了具体思路与建议。

参考文献:

- [1] 刘培国, 刘晨曦, 谭剑锋, 等. 强电磁防护技术研究进展[J]. *中国舰船研究*, 2015, 10(2): 2-6. (Liu Peiguo, Liu Chenxi, Tan Jianfeng, et al. Analysis of the research development on HPM/EMP protection[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2015, 10(2): 2-6)
- [2] 刘培国, 刘翰青, 王轲. 石墨烯材料在舰船强电磁防护技术中的应用[J]. *中国舰船研究*, 2020, 15(4): 1-8. (Liu Peiguo, Liu Hanqing, Wang Ke. Application of graphene in strong electromagnetic protection technology for ships[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2020, 15(4): 1-8)
- [3] 龚芳海, 李刚. 外军预警装备电子防护关键技术与运用研究[J]. *现代雷达*, 2021, 43(7): 54-62. (Gong Fanghai, Li Gang. A study on key technologies and application of electronic protection of foreign military early warning equipment[J]. *Modern Radar*, 2021, 43(7): 54-62)
- [4] 徐哲, 黄珏. 舰船电子信息装备强电磁脉冲防护技术发展[J]. *舰船电子对抗*, 2021, 44(4): 35-38,93. (Xu Zhe, Huang Jue. Protection technology development of ship electronic information equipment to strong electromagnetic pulse[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2021, 44(4): 35-38,93)
- [5] 郭家祥, 谢润章, 王鹏, 等. 多维度红外光电探测器[J]. *红外与毫米波学报*, 2022, 41(1): 40-60. (Guo Jiaxiang, Xie Runzhang, Wang Peng, et al. Infrared photodetectors for multidimensional optical information acquisition[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, 41(1): 40-60)
- [6] 王永胜, 李伟, 郭文卿. 强电磁环境下无人机的电磁防护技术[J]. *安全与电磁兼容*, 2020(5): 95-99. (Wang Yongsheng, Li Wei, Guo Wenqing. Protection technology of UAV in strong electromagnetic environment[J]. *Safety & EMC*, 2020(5): 95-99)
- [7] 谭志良, 李亚南, 宋培姣. 射频前端强电磁脉冲防护研究进展[J]. *北京理工大学学报*, 2020, 40(3): 231-242. (Tan Zhiliang, Li Yanan, Song Peijiao. Relevant research on electromagnetic pulse protection of RF front-end[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2020, 40(3): 231-242)
- [8] 牛佳佳, 刘铭, 邢伟荣, 等. 基于低维材料的光电探测器的发展[J]. *红外*, 2022, 43(3): 8-15,21. (Niu Jiajia, Liu Ming, Xing Weirong, et al. Development of photoelectric detectors based on low-dimensional materials[J]. *Infrared*, 2022, 43(3): 8-15,21)
- [9] 林江川, 陈自东, 陈小群, 等. 高功率微波作用下光电转换器的抗干扰特性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 013002. (Lin Jiangchuan, Chen Zidong, Chen Xiaoqun, et al. Analysis of anti-interference effects for fiber converter under high power microwave radiation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 013002)
- [10] 吴平, 姜云升, 徐志谦, 等. CCD 成像设备在强电磁脉冲环境下的效应实验研究[J]. *光学学报*, 2019, 39: 0611002. (Wu Ping, Jiang Yunsheng, Xu Zhiqian, et al. Experimental research on CCD imaging equipment in intensive electromagnetic-pulse environment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39: 0611002)
- [11] 梁圆龙, 黄贤俊, 姚理想, 等. 透明电磁屏蔽材料的研究进展[J]. *安全与电磁兼容*, 2021(2): 61-68,103. (Liang Yuanlong, Huang Xianjun, Yao Lixiang, et al. Recent research advances on transparent electromagnetic shielding materials[J]. *Safety & EMC*, 2021(2): 61-68,103)
- [12] Lu Zhengang, Ma Limin, Tan Jiubin, et al. Graphene, microscale metallic mesh, and transparent dielectric hybrid structure for excellent transparent electromagnetic interference shielding and absorbing[J]. *2D Materials*, 2017, 4: 025021.
- [13] Wang Heyan, Ji Chengang, Zhang Cheng, et al. Highly transparent and broadband electromagnetic interference shielding based on ultrathin doped Ag and conducting oxides hybrid film structures[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(12): 11782-11791.
- [14] Yuan Changwei, Huang Jinhua, Dong Yuxuan, et al. Record-high transparent electromagnetic interference shielding achieved by simultaneous microwave Fabry-Pérot interference and optical antireflection[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(23): 26659-26669.
- [15] Xie Qindong, Yan Zhiyang, Wang Shengyan, et al. Transparent, flexible, and stable polyethersulfone/copper-nanowires/polyethylene terephthalate sandwich-structured films for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2021, 23: 2100283.
- [16] Liang Yuanlong, Huang Xianjun, Pan Jisheng, et al. Shorted micro-waveguide array for high optical transparency and superior electromagnetic shielding in ultra-wideband frequency spectrum[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8: 2201532.
- [17] 陈卓, 杨晓宁, 杨勇. 卫星星敏感器结构强电磁耦合效应仿真及实验研究[J]. *航天器环境工程*, 2020, 37(2): 131-136. (Chen Zhuo, Yang Xiaoning, Yang Yong. Effects of strong electromagnetic coupling on the structure of satellite star tracker[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2020, 37(2): 131-136)
- [18] 吴永康, 翟正一, 毛晓楠, 等. 星敏感器遮光罩的力学分析及优化设计[J]. *环境技术*, 2023, 41(5): 6-10. (Wu Yongkang, Zhai Zhengyi, Mao Xiaonan, et al. Mechanical analysis and optimization of a star tracker baffle[J]. *Environmental Technology*, 2023, 41(5): 6-10)
- [19] 余英, 侯明善, 殷春武. 防空导弹红外成像跟踪探测范围研究[J]. *计算机仿真*, 2016, 33(4): 130-135,423. (Yu Ying, Hou Mingshan, Yin Chunwu. Research on antiaircraft missile's infrared imaging tracking and detection range[J]. *Computer Simulation*, 2016, 33(4): 130-135,423)
- [20] 余英, 侯明善, 张斯哲, 等. 侧窗探测自适应制导研究[J]. *西北工业大学学报*, 2016, 34(2): 287-293. (Yu Ying, Hou Mingshan, Zhang Sizhe, et al. A new adaptive proportional navigation based on side window detection[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2016, 34(2): 287-293)
- [21] 孟奇, 马丽芳, 张航. 气动加热影响下弹载红外侧窗成像方法研究[J]. *指挥控制与仿真*, 2022, 44(6): 96-101. (Meng Qi, Ma Lifang, Zhang Hang. Research on infrared lateral window imaging method under the influence of aerodynamic heating[J]. *Command Control & Simulation*, 2022, 44(6): 96-101)
- [22] Pozar D M. *Microwave engineering*[M]. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2005.
- [23] Liang Yuanlong, Huang Xianjun, Wen Kui, et al. Metal mesh-based infrared transparent EMI shielding window with balanced shielding properties over a wide

- frequency spectrum[J]. [Applied Sciences](#), 2023, 13: 4846.
- [24] 刘恩博, 王丹丹, 陈珂, 等. 带缝隙腔体电磁谐振特性的仿真分析[J]. [中国科技论文](#), 2016, 11(16): 1808-1812. (Liu Enbo, Wang Dandan, Chen Ke, et al. Simulation analysis on electromagnetic resonance characteristics of cavity with slots[J]. [China Sciencepaper](#), 2016, 11(16): 1808-1812)
- [25] 章炜, 姚建吉, 詹科, 等. 导电胶研究进展[J]. [科技导报](#), 2018, 36(10): 56-65. (Zhang Wei, Yao Jianji, Zhan Ke, et al. Research progress of conductive adhesives[J]. [Science & Technology Review](#), 2018, 36(10): 56-65)
- [26] Robinson M P, Benson T M, Christopoulos C, et al. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures[J]. [IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility](#), 1998, 40(3): 240-248.