

高帧频宽温度范围红外点源干扰装置设计

李延伟, 高清京, 魏浩东, 李江涛

(哈尔滨新光光电科技股份有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150028)

摘要: 针对机动性能好、突防能力强的红外成像制导系统, 利用极薄金属片可以快速加热升温与自然降温的特性, 提出了一种适用于末制导阶段的新型红外干扰方法。建立了金属片加热升温及自然降温过程的数学模型, 确定了金属片结构形式及材料特性; 设计了结构简单、密封环境良好的红外点源干扰装置。试验结果表明: 金属片优选 2 μm 厚的镍片, 其加热时间为 50 ms (500~1 000 $^{\circ}\text{C}$), 自然降温时间为 75 ms (1 000~500 $^{\circ}\text{C}$), 可以满足帧频要求 (10 Hz); 并实现了温度规律性的周期变化。分析与试验结果证实了红外点源干扰装置能够模拟红外辐射特性的快速变化, 可为末制导阶段干扰提供一种新思路。

关键词: 红外干扰; 辐射特性; 传热学

中图分类号: TQ173; TN941 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210218

Design of infrared point source interference device with high frame frequency and wide temperature range

Li Yanwei, Gao Qingjing, Wei Haodong, Li Jiangtao

(Harbin New Optoelectronics Technology CO. LTD., Harbin 150028, China)

Abstract: Aiming at the infrared imaging guidance system with good maneuverability and strong penetration ability, a new type of infrared interference method was proposed by using the characteristics of ultra-thin metal sheets that can quickly heat up and naturally cool down. A mathematical model of the heating and natural cooling process of the metal sheet was established, and the structure and material of the metal sheet were determined; the infrared interference device with a simple structure and a good sealing environment was designed. The test results indicate that the nickel sheets is the best material. The heating time is 50 ms (500-1 000 $^{\circ}\text{C}$), and the natural cooling time is 75 ms (1 000-500 $^{\circ}\text{C}$), which meet the frame rate requirement (10 Hz). And the regular periodic change of temperature is realized. The analysis and test results confirm that the device can simulate the rapid changes of infrared radiation characteristics, and could provide a new idea for interference in the terminal guidance phase.

Key words: infrared interference; radiation characteristics; heat transfer

收稿日期: 2021-05-10; 修订日期: 2021-06-25

基金项目: 国防预研项目 (315095404)

作者简介: 李延伟, 男, 副研究员, 主要从事可见光/红外成像系统的光机系统设计方面的研究。

0 引言

在要地目标防御体系中,针对机动性能好、突防能力强的红外成像制导系统^[1-3],末制导阶段的防空是保护目标的最后保障。现有的红外诱饵^[4-6]、光电假目标^[7]等欺骗性、压制性防空方法,或因难以欺骗光学成像末制导技术,或因使用不方便,或因保护范围过小,均难以防护红外成像制导系统对要地目标的打击,迫切需要新的有效防护方法。

提出一种适用于末制导阶段的新型红外干扰方法,在要地目标防御区域内均匀分布多个红外点源干扰装置,每个红外点源干扰装置辐射强度(温度)可控、可调,并满足一定帧频要求;工作时,首先通过控制系统控制多个红外干扰装置,使被保护目标变为一个无辐射亮度差异的面,让被保护目标隐身,使红外成像制导系统无法辨识;其次控制被保护目标附近红外干扰装置的辐射强度,形成一个与被保护目标相同,亮度、对比度更强的红外假目标;控制不同位置处红外点源干扰装置的辐射强度,形成一个移动的假目标。移动的假目标将导弹引偏到固定地点爆炸,实现对大型要地目标的保护。

为实现新型红外干扰系统,要求红外点源干扰装置必须具备以下特性:一是可实现温度快速变化,可模拟目标温度范围为 500~1 000 ℃,升温及降温时间均不大于 100 ms;二是高可靠性,可以适应不同条件下的外场环境,具备长时间连续工作能力,安全性好;三是小型化设计,适应各种安装需求,且重量要尽量轻,不大于 200 g;四是低功耗,以降低系统总功耗,避免使用大功率电源。

利用极薄金属片快速加热升温及快速自然降温的特性,实现了高帧频宽温度范围红外点源干扰装置设计,红外点源干扰装置能够模拟目标红外辐射特性快速变化,证实了末制导新型红外干扰系统的可行性。

1 末制导新型红外干扰系统

末制导新型红外干扰系统主要由红外点源干扰装置阵列及点阵控制系统组成,其组成图如图 1 所示。红外点源干扰装置的数量要依据被保护的要地目标尺寸、红外点源干扰装置的有效辐射面积、保护区尺寸等参数确定,在保护区域内间隔一定距离均匀分布多个红外点源干扰装置,每个点光源的发光强度可调,工作原理图如图 2 所示。

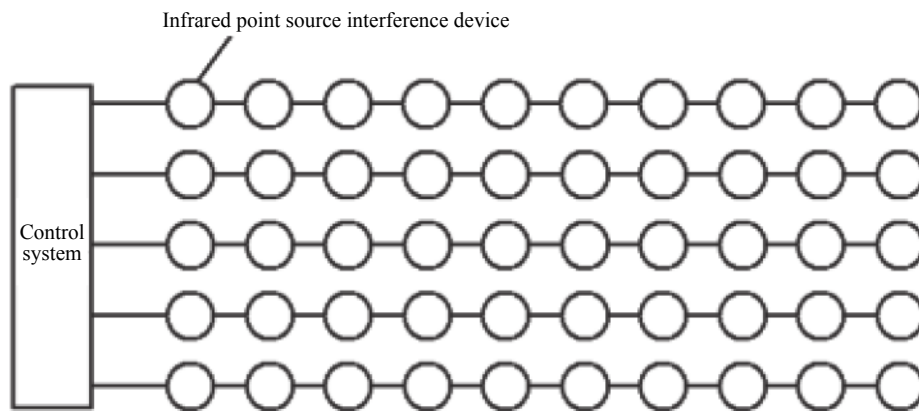


图 1 末制导新型红外干扰系统

Fig.1 New infrared interference system for terminal guidance

整个点阵控制系统主要由控制软件、LED 照明控制器、TM1914A 控制电路模块、控制电路直流供电电源、PWM 信号幅值放大电路模块及极薄金属片直流驱动电源等组成,其原理框图如图 3 所示。

控制系统借鉴楼体亮化工程的光源控制方案,其

优点在于应用成熟,成本较低,接线简单;因为实际需要的加热体功率较大,需要在每个像素点加入功放。软件通过网线发出控制信号给控制器,控制器再发送数据给芯片 TM1914A 的控制电路,即可控制红外干扰装置进行温度动态变化。

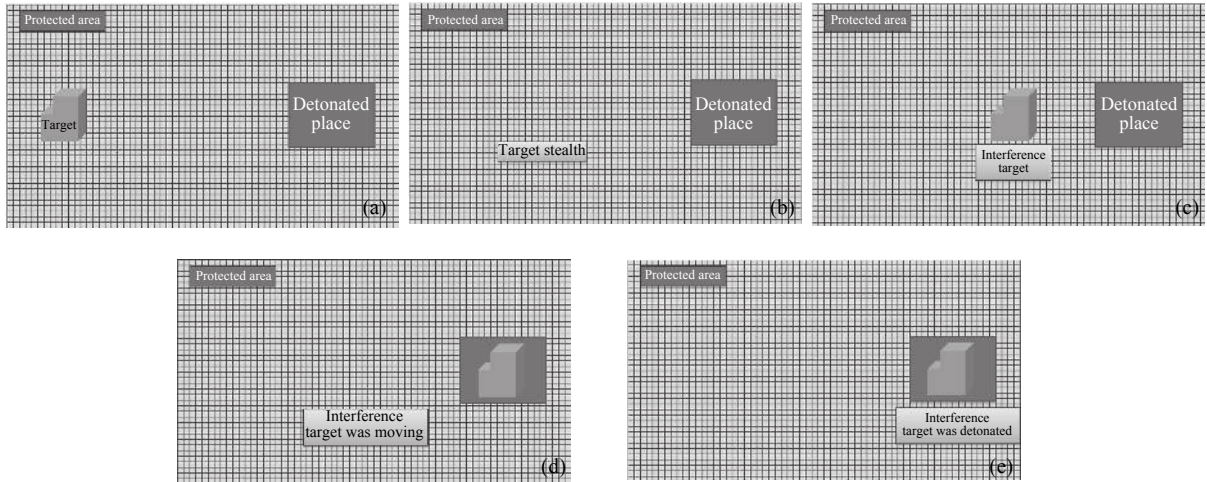


图 2 系统工作原理

Fig.2 System working principle

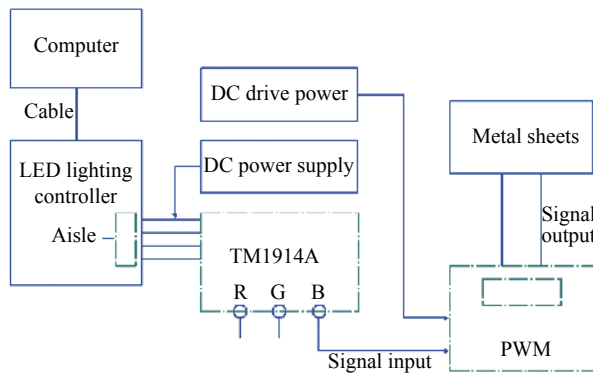


图 3 控制系统框图

Fig.3 Schematic diagram of control system

2 红外干扰装置设计

2.1 总体设计

采用极薄金属片通电加热与自然降温相结合方式,设计了内部充氮气的密封红外干扰装置,如图 4 所示。

整个红外点源干扰装置主要由密封壳体、辐射模块及 O 型圈组成,整体尺寸为 $\phi 50\text{ mm}\times 45\text{ mm}$ (辐射区域为 $15\text{ mm}\times 12\text{ mm}$)。辐射模块经安装调试后整体与密封壳体通过螺栓紧固连接,电源线通过接线柱接入辐射模块;利用 O 型圈进行密封,通过单向阀向系统内部充氮气,使腔内处在氮气环境中,可有效避免加热片加热后氧化现象。

密封壳体上安装有透红外波段的光学窗口,其材料可以根据红外波段进行选择;上述红外点源干扰装置中采用了力学性能优异、中波透过率优异的蓝宝石材料^[8](图 5),最后采用双向 O 型圈进行端面密封;辐

射模块主要由铜电极、绝缘底座,陶瓷压板、加热片、铜压块、接线柱、聚四氟密封垫及单向阀等组成,由于加热片厚度极薄,容易变形,因此加热片采用双层陶瓷压板挤压固定,陶瓷压板可承受 $2\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ 高温,能够满足长期使用要求。陶瓷压板与加热片整体安

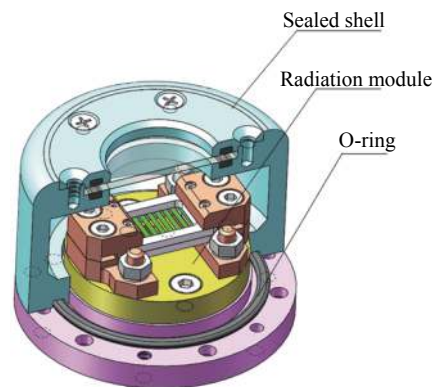


图 4 红外点源干扰装置

Fig.4 Infrared point source interference device

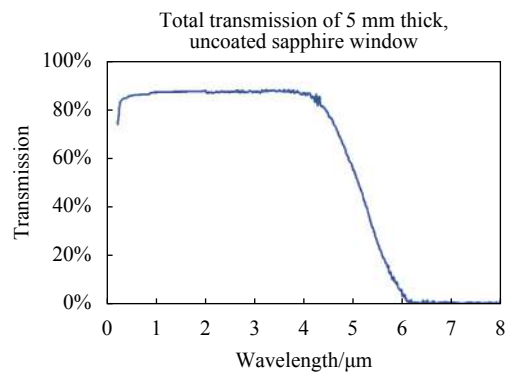


图 5 蓝宝石窗口的透过率

Fig.5 Transmittance of sapphire window

装在铜电极预留安装槽内,通过铜压块压紧加热片,实现加热片与铜电极良好接触导电;同时采用顶丝微调陶瓷上压片预紧力,以保证陶瓷压片压紧加热片。为减轻产品的质量,密封壳体采用 2A12 材料,同时进行了结构轻量化设计,整个装置质量为 150 g。

2.2 薄金属片材料及参数确定

2.2.1 升温时间

在不考虑能量损耗的情况下,根据能量守恒定律可知:

$$C \cdot m \cdot \Delta T = I^2 \cdot R \cdot t \tag{1}$$

式中: C 为薄金属片的比热容; m 为薄金属片的质量,其计算公式为: $m = \rho \cdot L \cdot S$; ρ 为薄金属片材料密度; L 为

薄金属片的长度; S 为薄金属片的截面积; ΔT 为薄金属片的温度变化; I 为通电电流; R 为薄金属片的电阻,其计算公式为 $R = \frac{\rho_0 \cdot L}{S}$, ρ_0 为薄金属片材料的电阻率; t 为加热时间。

薄金属片截面积 $S = a \cdot b$, 其中 a 为薄片的厚度, b 为薄片的宽度。则薄金属片的加热时间:

$$t = \frac{C \cdot \rho \cdot a^2 \cdot b^2 \cdot \Delta T}{I^2 \cdot \rho_0} \tag{2}$$

由上式可知,若提高红外点源干扰装置的帧频即降低薄金属片的加热时间,就得选择熔点高、比热容小、密度小、宽度小、厚度薄、电阻率高的材料,表 1 为常用耐高温材料的性能表。

表 1 常用耐高温材料性能表

Tab.1 Performance of high temperature resistant material

Number	Material	Density/ kg·m ⁻³	Elastic modulus/ GPa	Poisson ratio	Thermal conductivity/ W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	Specific heat capacity/ J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	Melting point/ °C	Boiling point/ °C
1	C	2 260	33		140	710	3 550	4 027
2	Ti	4 507	110	0.32	22	520	1 668	3 287
3	Fe	7 847	211	0.29	80	449	1 538	2 861
4	Co	8 900	209	0.31	100	421	1 495	2 927
5	Ni	8 908	200	0.31	91	445	1 455	2 913
6	Cu	8 920	130	0.34	400	384.4	1 084.62	2 927
7	Mo	10 280	329	0.31	139	251	2 623	4 639
8	Ta	16 650	186	0.34	57	140	3 017	5 458
9	W	19 250	411	0.28	170	132	3 422	5 555
10	Pt	21 090	168	0.38	72	133	1 768.3	3 825
11	Au	19 300	220	0.44	320	129.1	1 064.18	2 856
12	06Cr9Ni10	7 930	1 930	0.27	21.5 (500 °C)	500	1 398	

表 2 为 $t=0.1$ s, 薄片宽度为 1 mm 时所需薄金属片的厚度。由表 2 可知,当供电电流为 2 A 时,除钛合金和不锈钢材料外,其余材料所需的薄片厚度均为微米级;当供电电流为 1 A 时,钛合金薄片的厚度为 6.0 μ m, 不锈钢薄片的厚度为 6.13 μ m, 镍片的厚度为 1.85 μ m; 就目前工艺性来说,不锈钢片可以做到 3 μ m, 钛片和镍片可以做到 2 μ m。

考虑实际能量损耗情况,选用 $a = 3 \mu$ m, $b = 1$ mm 的不锈钢薄片作为薄金属片时,考虑窗口透过率的影响,当实测温度为 1 000 °C、500 °C 时,薄金属片的实际温度为 1 176 °C 和 588 °C,当电流为 1 A 时,则计算加热时间为 0.029 s,可以满足 10 Hz 帧频要求,其结

构形式如图 6 所示。

选用 $a = 2 \mu$ m, $b = 1$ mm 的钛薄片作为薄金属片时,考虑窗口透过率的影响,当实测温度为 1 000 °C、500 °C 时,薄金属片的实际温度为 1 176 °C 和 588 °C,当电流为 1 A 时,则计算加热时间为 0.013 s,可以满足 10 Hz 帧频要求。

选用 $a = 2 \mu$ m, $b = 1$ mm 的镍薄片作为薄金属片时,考虑窗口透过率的影响,当实测温度为 1 000 °C、500 °C 时,薄金属片的实际温度为 1 176 °C 和 588 °C,当电流为 1 A 时,则计算加热时间为 0.117 s;当电流为 2 A 时,则计算加热时间为 0.029 s,此时可以满足 10 Hz 帧频要求。

表 2 厚度参数

Tab.2 Thickness parameter

Number	Material	$C/J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$\rho/kg \cdot m^{-3}$	$\rho_0/\Omega \cdot m$	t/s	$\Delta T/K$	b/mm	$a/\mu m$			
								$I=1 A$	$I=2 A$	$I=3 A$	$I=5 A$
1	W	132	19 250	5.00E-08	0.1	500	1	1.983 799	3.967 598	5.951 397	9.918 995
2	Mo	251	10 280	5.00E-08	0.1	500	1	1.968 641	3.937 283	5.905 924	9.843 206
3	Ta	140	16 650	1.30E-07	0.1	500	1	3.339 762	6.679 524	10.019 29	16.698 81
4	Cu	384.4	8 920	1.70E-08	0.1	500	1	0.995 784	1.001 569	2.987 353	4.978 922
5	Au	129.1	19 300	2.20E-08	0.1	500	1	1.328 876	2.657 753	3.986 629	6.644 382
6	Ti	520	4 500	4.20E-07	0.1	500	1	5.991 447	11.982 89	17.974 34	29.957 23
7	06Cr19Ni10	500	7 930	7.30E-07	0.1	500	1	6.132 129	12.136 26	18.204 39	30.340 65
8	Ni	445	8 908	6.80E-08	0.1	500	1	1.852 249	3.704 498	5.556 747	9.261 244

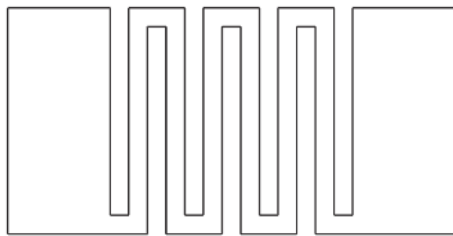


图 6 连续导电结构形式

Fig.6 Continuous conductive structure

2.2.2 降温时间

假定降温过程中不产生能量损耗,且传导换热忽略不计的情况下,根据能量守恒定律可知:

$$C \cdot m \cdot \Delta T = (\Phi_r + \Phi_c) \cdot t' \quad (3)$$

其中, Φ_r 为薄金属片辐射换热量,其计算公式^[9]为:

$$\Phi_r = A \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (4)$$

式中: A 为换热面积; ε 为发射率; σ 为玻尔兹曼常数; T_1 为辐射物体初始表面温度; T_2 为辐射物体最终表面温度; Φ_c 为薄金属片对流换热量,其计算公式为:

$$\Phi_c = hA\Delta T \quad (5)$$

式中: A 为换热面积; ΔT 为温差; h 为对流换热系统。根据努赛尔计算公式, $h = Nu \frac{\lambda}{l}$, 其中, λ 为导热系数, l 特征长度, Nu 为努赛尔值。可根据计算格拉晓夫数来选择努赛尔值计算公式,其中格拉晓夫数 $Gr = \frac{g\alpha_v \Delta T l^3}{\nu^2}$, g 为重力加速度; α_v 为流体的体膨胀系数,为定性温度的倒数; ν 为运动粘度。努赛尔值的计算公式为:

$$Nu = 0.059(Gr \cdot Pr)^{0.4} \quad (1700 < Gr \cdot Pr < 7000)$$

$$Nu = 0.212(Gr \cdot Pr)^{1/4} \quad (7000 < Gr \cdot Pr < 320000)$$

$$Nu = 0.061(Gr \cdot Pr)^{0.5} \quad (Gr \cdot Pr > 320000) \quad (6)$$

则降温时间计算公式为:

$$t' = \frac{C \cdot m \cdot \Delta T}{\Phi_r + \Phi_c} \quad (7)$$

经计算可知,当薄金属片选用图 4 形式的 3 μm 不锈钢薄片时,考虑红外窗口的透过率,其降温时间为 0.062 s; 选用 2 μm 钛薄片时,其降温时间为 0.025 s; 选用 2 μm 镍薄片时,其降温时间为 0.040 s; 均小于 0.1 s, 满足帧频要求。因此 3 μm 的不锈钢薄片、2 μm 的钛片及 2 μm 的镍片均可满足指标要求,均可作为薄金属加热片。

3 测试试验

整个试验装置主要由中波红外热像仪、电气控制系统(含电源)、红外干扰装置组成,如图 7 所示。

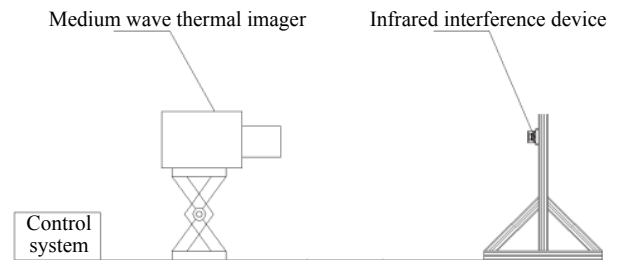


图 7 试验装置示意图

Fig.7 Schematic diagram of test device

3.1 加热及降温时间测试

选取了不同厚度的不锈钢、镍、钛材料的金属片

进行测试试验, 试验结果如表 3 所示, 试验效果如图 8~图 11 所示。

表 3 试验情况汇总

Tab.3 Summary of test results

Material	Thickness/ μm	Time (500-1 000 °C)/ ms	Time (1 000-500 °C)/ ms	Power/ W
06Cr19Ni10	3	50	78	18.8
Ti	2	50	50	33.9
Ni	2	50	75	16.4

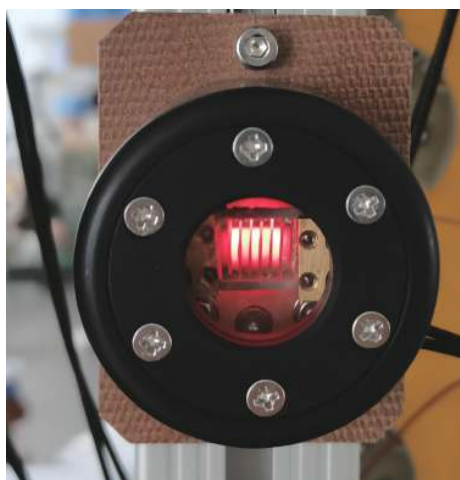


图 8 试验结果

Fig.8 Result of test

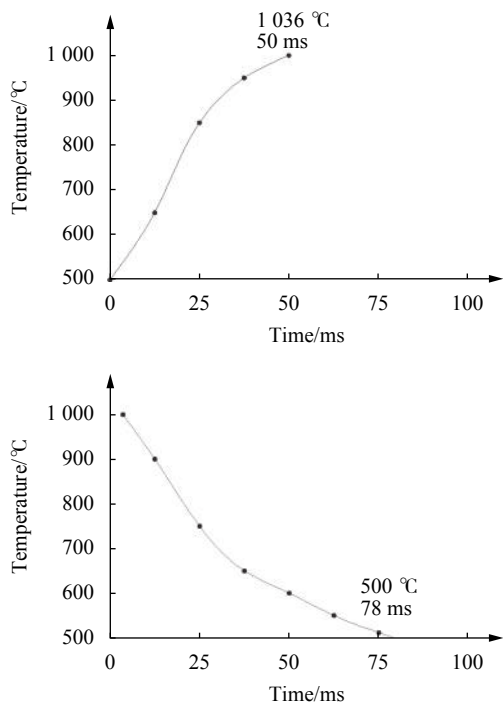


图 9 3 μm 不锈钢片试验结果

Fig.9 Test results of 3 μm stainless steel sheet

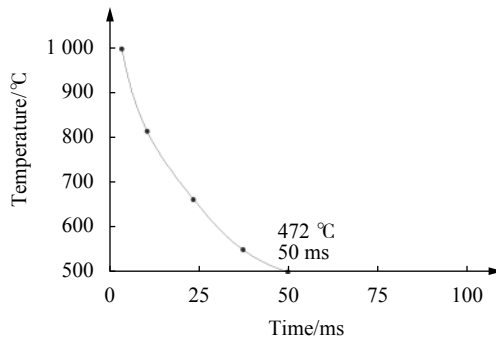
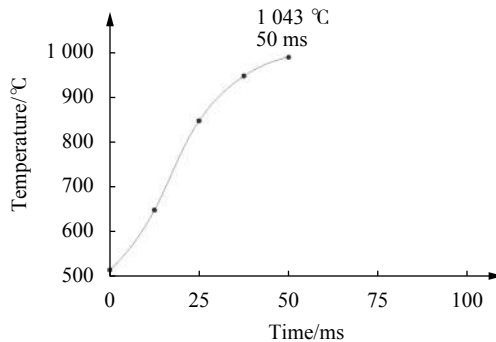


图 10 2 μm 钛片试验结果

Fig.10 Test results of 2 μm stainless titanium sheet

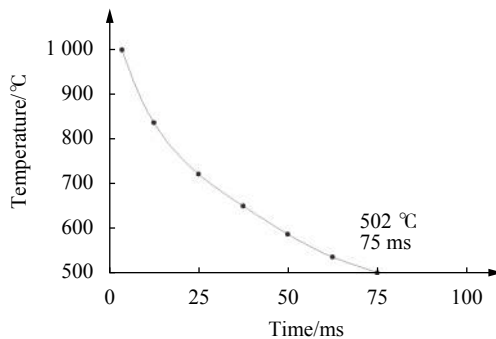
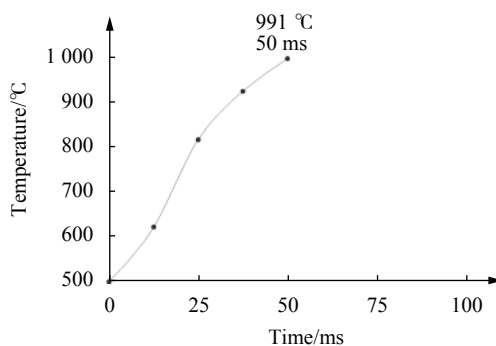


图 11 2 μm 镍片试验结果

Fig.11 Test results of 2 μm stainless nickel sheet

由以上试验结果可知, 3 μm 厚的不锈钢薄片、2 μm 厚的钛片、2 μm 厚的镍片均可以满足加热升温 (500~1 000 °C) 及自然降温 (1 000~500 °C) 的时间要

求, 2 μm 厚的钛片自然降温时间最短; 三种金属薄片所需功率分别为 18.8 W、33.9 W、16.4 W, 镍片所需功率最小; 综合考虑后, 优选 2 μm 厚镍片。

3.2 动态测试试验

通过控制软件, 实现将屏幕上的像素点的灰度值, 以温度的形式在“红外点源干扰装置”上显示出来, 并实现规律性的周期变化 (1 000℃~900℃~800℃~700℃~600℃~500℃, 每个温度时间为 1 s), 其试验结果如图 12 所示 (2 μm 厚的镍片)。

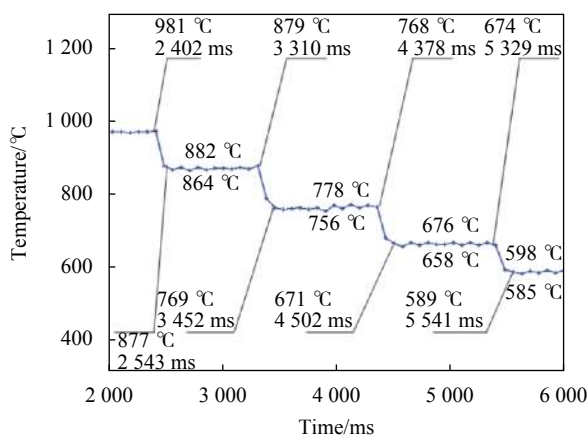


图 12 实测的温度变化曲线

Fig.12 Measured temperature curve

由图 12 可知, 红外点源干扰装置能够实现设定的温度变化规律, 且其变化规律与设定值基本吻合; 建立图像灰度值与温度值的对应关系后, 可以实现目标特性模拟及规律性的动态效果。

3.3 控制系统效果测试

为验证控制系统效果, 搭建了 10×10 的 LED 阵列。通过制作了一个 10×8 pixel 的 Gif 图片对系统进行了测试, 软件通过网线发出控制信号给控制器, 控制器再发送数据给芯片 TM1914A 的控制电路, 实现了简单的数字动态显示功能, 效果如图 13 所示, 图中显示了一个数字 5, 当 LED 灯足够多时即可实现移动效果。

在后续末制导新型红外干扰系统中, 根据被保护的靶地目标尺寸、红外点源干扰装置的有效辐射面积、保护区尺寸等参数确定红外点源干扰装置的数量, 配置好大功率点源, 即可实现目标图像的动态模拟。

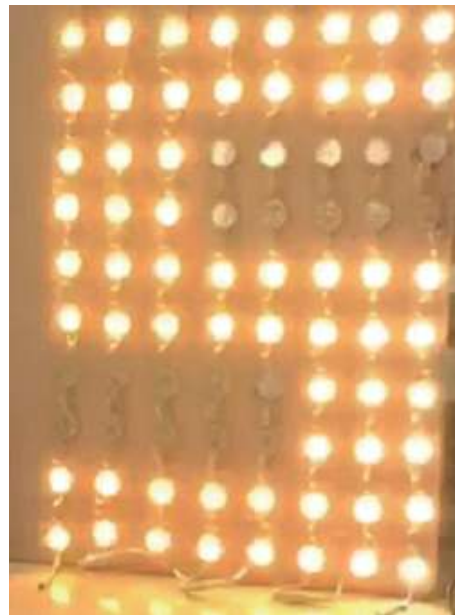


图 13 动态显示效果

Fig.13 Dynamic display effect

4 结论

针对末制导阶段新型红外干扰方式, 深入研究和开展了红外干扰装置的研制。建立了金属片加热升温及自然降温过程的数学模型, 分析确定了极薄金属片材料、厚度及宽度等参数; 采用连续导电结构形式、陶瓷夹持方式、内部充氮密封方式等完成了红外干扰装置的设计。试验结果表明, 优选 2 μm 厚镍片为辐射源材料, 其加热时间为 50 ms (500~1 000℃)、自然降温时间为 75 ms (1 000~500℃), 功耗为 16.4 W; 该装置可实现规律动态效果, 阵列布置后, 可模拟要地目标的红外辐射特性, 结构简单, 成本低, 是一种末制导系统中防空新思路、新探索。后期可将单一波段光源变为多波段复合光源, 以适应多波段末制导导弹防御要求。

参考文献:

[1] Ma Xianjie, Li Guoping, Wang Hongjing. Development roadmap and direction of infrared seekers and infrared decoys [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2020, 36(3): 58-64. (in Chinese)

[2] Yang Junyan, Wu Jiandong, Song Minmin. Development and prospect of infrared imaging guidance technology [J]. *Infrared*, 2016, 37(8): 1-6. (in Chinese)

[3] Bai Rui. Key Technology of roll-pitch seeker and its application

- to air-to-air missile[D]. Beijing: School of Aerospace Engineering, 2017.(in Chinese)
- [4] Lu Xiao, Liang Xiaogeng, Jia Xiaohong. Study on intelligent counter-countermeasures of infrared imaging air-to-air missiles [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(4): 20200240. (in Chinese)
- [5] Shao Xiaoguang. Research of anti-jamming technique [J]. *Guidance & Fuze*, 2019, 40(2): 12-16. (in Chinese)
- [6] Sun Wei, Wang Biao, Huang Jinke. Research on jamming strategy of surface-type infrared decoy against infrared guided missile [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(6): 706-713. (in Chinese)
- [7] Lu Xiangyin, Ling Rongshun. Brief analysis for the technique of electro-optical camouflage [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2003, 71(3): 25-28. (in Chinese)
- [8] Nie hui, Lu Bingzhe. Sapphire window and it's application in military electro-optical equipment [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2005, 146(2): 131-133. (in Chinese)
- [9] Li Ming. The research of precision thermal control technology for a CCD mapping camera[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)