

doi: 10.7690/bgzdh.2022.02.014

舰载察打无人机概念设计与隐身特性数值模拟

岳奎志¹, 程亮亮², 赵建忠³

(1. 海军航空大学一院, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空大学二院, 山东 烟台 264001;

3. 海军航空大学三院, 山东 烟台 264001)

摘要: 为提高海军航空兵远洋战略投送能力, 概念设计一种舰载察打无人机, 并进行隐身特性分析。采用 CATIA 软件概念设计 3D 数字样机, 基于物理光学法计算三角形面源散射, 基于等效电磁流法计算劈边缘绕射, 并将二者结合进行隐身特性分析, 综合数值模拟飞机的雷达散射截面 (radar cross-section, RCS) 散射特性。实验结果表明: 采用 CATIA 软件, 能高效地概念设计飞机的 3D 数字样机, 可用于论证飞机设计方案; 该 RCS 计算方法可高效地计算复杂飞机的 RCS 散射特性。

关键词: 概念设计; 无人机; 隐身; 数值模拟; 雷达散射截面

中图分类号: V221 **文献标志码:** A

Conceptual Design and Numerical Simulation of Stealth Characteristics for Shipborne Surveillance and Attack UAV

Yue Kuizhi¹, Cheng Liangliang², Zhao Jianzhong³

(1. No.1 School, Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 2. No. 2 School, Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 3. No. 3 School, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to improve the ocean-going strategic delivery capability of naval aviation, a carrier-based reconnaissance and attack UAV is conceptually designed, and its stealth characteristics are analyzed. The 3D digital prototype is conceptually designed by using CATIA (computer aided three-dimensional interface application) software. The scattering of a triangular surface source is calculated based on the physical optics method, and the diffraction of the wedge edge is calculated based on the equivalent current method. The stealth characteristics are analyzed by combining the two methods, and the radar cross section (RCS) scattering characteristics of the aircraft are numerically simulated. The experimental results show that the 3D digital prototype of aircraft can be designed efficiently by using CATIA software, which can be used to demonstrate the aircraft design scheme, and the RCS calculation method can calculate the RCS scattering characteristics of complex aircraft efficiently.

Keyword: conceptual design; UAV; stealth; numerical simulation; RCS

0 引言

目前, 察打无人机已成为研究热点, 代表型号有美国的 X-47B 飞翼无人验证机、MQ-1 捕食者无人机、MQ-9 死神无人机, 土耳其的“贝拉克塔”察打无人机等。飞机无人化意味着己方人员伤亡率为 0, 飞机察打化意味着既可侦察又可打击敌方目标。察打无人机效率高, 可执行危险任务, 作战能力强, 如果再具有隐身性能, 在作战能力强的同时还具有生存力高的特点。

各国学者对察打无人机的研究主要有隐身算法、无人机结构、优化策略等方面。文献[1]提出了一种基于麦克斯韦积分方程离散伴随方程的雷达散射截面 (RCS) 梯度高效计算方法, 解决有限差分法效率低的问题。文献[2]提出了一种改进的经典多

重信号分类法, 解决边缘绕射的 RCS 测量问题。文献[3]提出了适用于代理模型全局优化的自适应参数优化方法, 可优化设计质量和效率。文献[4]以无附面层隔道超声速进气道的 3 维鼓包压缩面为设计对象, 开展进气道的气动、隐身多目标优化设计。文献[5]提出采用贝叶斯-蒙特卡洛方法提高 RCS 起伏模型的参数估计精度, 减小模型的拟合误差。文献[6]基于计算流体力学和计算电磁法相耦合的方法, 研究优化翼型气动/隐身特性。文献[7]研究多种飞翼飞机, 并详细分析飞机表面分布对电磁散射特性的影响。文献[8]研究三角形、梯形和矩形进气口在背负式的 S 弯进气道中的应用, 并进行气动、隐身综合分析。文献[9]为解决飞翼飞机气动隐身设计优化问题, 建立了基于 Parsec 参数优化方法、径

收稿日期: 2021-10-10; 修回日期: 2021-11-28

基金项目: 国家自然科学基金 (51975580)

作者简介: 岳奎志 (1981—), 男, 辽宁人, 博士, 副教授, 从事飞机隐身设计、舰载机工程、飞行原理研究。E-mail: 316710343@qq.com。

向基函数神经网络、Pareto 遗传算法和松散式代理模型管理方法的翼型多目标优化设计平台。文献[10]基于计算流体力学法研究飞翼的气动特性，基于物理光学法研究飞翼的 RCS 特性，并选择分层交换差分粒子群算法进行综合寻优设计研究。文献[11]基于参数化模型和网格自动划分技术，完成气动隐身综合优化设计。文献[12]结合多层快速多机子方法和混合网格计算方法，开展保形进口格栅气动和隐身综合特性研究。以上研究均不够深入。针对察打无人机上舰服役的问题，笔者概念设计舰载察打无人机并对其进行隐身特性分析，可对飞机总体与隐身特性的研究提供理论依据与技术支持。

1 理论基础

笔者采用物理光学法和等效电磁流法综合数值模拟舰载察打无人机的 RCS 特性。

物理光学法计算面元散射的公式^[13]:

$$\sqrt{\sigma_{po}} = -j \sqrt{\frac{k}{\pi}} \int \hat{n} \cdot (\hat{e}_r \times \hat{h}_i) \exp[jkr(\hat{i} - \hat{s})] dS. \quad (1)$$

等效电磁流法计算边缘绕射的公式^[14]:

$$\sqrt{\sigma_{ecm}} = (1/\sqrt{\pi \sin \theta}) [(E_o^i \cdot \hat{t}) f \hat{s} \times (\hat{s} \times \hat{t}) - Z_0 (H_o^i \cdot \hat{t}) g \hat{s} \times \hat{t}] \cdot e^{-j2kr \cdot s} (\sin(kl \cdot \hat{s}) / (kl \cdot \hat{s})). \quad (2)$$

式中： $\sqrt{\sigma_{po}}$ 为单个面元的 RCS， m^2 ； j 为虚数单位， $j^2=-1$ ； $k=2\pi/\lambda$ 为自由空间波速，其中 λ 为雷达入射波波长， m ； \hat{n} 为面元外法向； \hat{e}_r 为接收天线电场方向； \hat{h}_i 为入射波磁场方向； \cdot 为点积； \times 为叉积； r 为局部原点到表面单元 dS 的矢量； \hat{i} 为入射方向； \hat{s} 为散射方向； \hat{t} 为强制边缘单位矢量方向； θ 为入射线 \hat{i} 与 \hat{s} 的夹角；其他符号定义见文献[15]。

飞机的 RCS 叠加公式^[16]:

$$\sigma = \left| \sum_{i=1}^n (\sqrt{\sigma_{po}})_i + \sum_{i=1}^n (\sqrt{\sigma_{ecm}})_i \right|^2; \quad (3)$$

$$\bar{\sigma}_{n \sim N}^\beta = 1/(N-n+1) \sum_{\varphi=n}^N \sigma_\varphi^\beta; \quad (4)$$

$$\sigma_{dBm^2} = 10 \lg \sigma. \quad (5)$$

式中： σ_φ^β 为入射波俯仰角为 β 时飞机方位角为 φ 的飞机 RCS 值， m^2 ； $\bar{\sigma}_{n \sim N}^\beta$ 为入射波俯仰角为 β 时飞机方位角为 φ ($\varphi=n \sim N$) 时飞机 RCS 算数平均值， m^2 ； σ 为飞机的 RCS， m^2 ； $\bar{\sigma}$ 为飞机的 RCS 算数平均值， m^2 ； σ_{dBm^2} 为飞机的 RCS， dBm^2 。

2 无人机概念设计

针对军用飞行器侦察与攻击的使命任务和面临的威胁，需发展侦察打击一体化平台特点，笔者采用 CATIA 软件，它是由法国达索公司开发的一款 3D 设计软件，用该软件创造性地设计未来飞行器，即舰载察打无人机如图 1 所示。舰载察打无人机 3D 数字样机的参数设置情况见表 1。

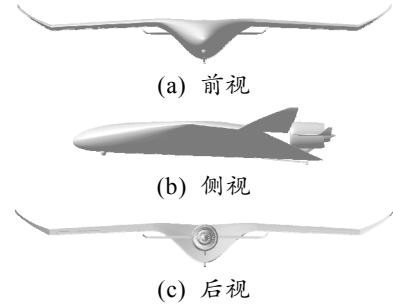


图 1 舰载察打无人机

舰载察打无人机是一种长航时、远距离、隐身化、舰载化、集侦察功能于一身的翼身融合体的智能无人机，拥有 1 台涡扇发动机、可收放的前三点式起落架。

表 1 模型参数设置

名称	参数设置
机长/m	19.20
翼展/m	22.52
机高/m	3.40
机翼翼型	GOE 622
平尾翼型	GOE 622
机身翼型	AG-10
前缘后掠角/(°)	30
后缘后掠角/(°)	10

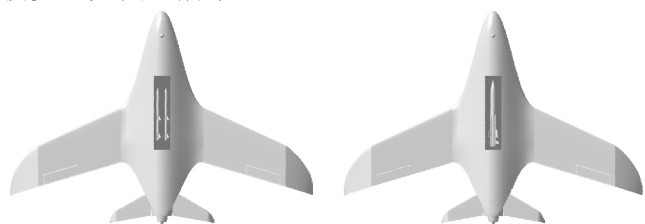
2.1 双飞翼气动布局设计

舰载察打无人机具有双飞翼气动布局的设计特点，机翼与平尾都提供正升力，共同组成无人机的双飞翼气动布局。该无人机采用静不稳定设计：飞机的压力中心及焦点在飞机重心之前，飞机机翼的升力对飞机产生抬头力矩；发动机前部有向下 3° 的安装角，由于上单翼布局，发动机推力轴线通过重心；发动机外侧装有提供正升力的平尾，平尾前缘向上有 3° 的安装角，对飞机产生一个低头力矩；飞机机翼产生升力的抬头力矩与平尾产生升力的低头力矩达到平衡状态。

2.2 隐身布置侦察打击一体化设计

舰载察打无人机具有隐身布置侦察打击一体化设计特点。在察打一体化设计中，侦察时使用 1 部实时传送数据的摄像头侦察系统；打击时挂载方案

较多，如图 2 所示。



(a) 隐身布置内埋空空导弹 (b) 隐身布置内埋空面导弹

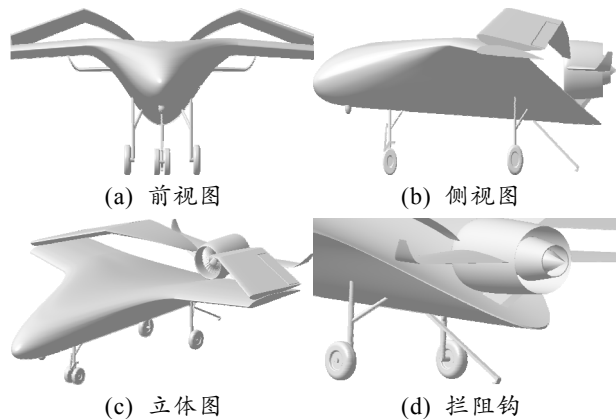
图 2 多任务察打一体化设计

隐身布置侦察打击一体化设计方案如下：

- 1) 隐身布置内埋空空导弹方案：在执行隐身、战斗任务时，在机身内挂 2 枚空空导弹；
- 2) 隐身布置内埋空面导弹方案：在执行隐身、攻击任务时，在机身内挂 1 枚空面导弹。

2.3 舰载化设计

舰载察打无人机具有舰载化设计特点，见图 3。



(a) 前视图

(b) 侧视图

(c) 立体图

(d) 拦阻钩

图 3 舰载化设计

舰载化设计具体体现在以下 3 方面：

- 1) 对带翼尖小翼的机翼进行可折叠化设计，用于舰载无人机在航母上停放时所用，减小停机面积；
- 2) 前起落架采用双轮设计，并安有拖曳杆，用于舰载无人机在航母上弹射起飞；
- 3) 无人机后部装有拦阻钩，用于在航母飞行甲板上着舰拦阻减速所用。

2.4 隐身化设计

舰载察打无人机具有隐身化设计特点，具体措施如下：

- 1) 结构外形隐身化设计：① 机体表面采用连续曲面设计，机翼和平尾的前缘后掠角及后缘前掠角都各自相同，机身表面和转折处设计成使反射波集中于水平面内的几个窄波束；② 发动机进气口由前机身遮挡；③ 采用内埋式武器舱、可伸缩的天线等。

2) 材料隐身化设计：飞机表面的包覆物后有规则的蜂巢式空穴的复合材料，可吸收雷达波；飞机前缘全部包覆上一层特制吸波材料及吸波油漆。

3) 红外隐身化设计：涡扇发动机通过外涵道在排气口掺混冷空气，采用喷口波瓣冷却技术改进燃料成分及其添加剂，在排气口注入吸收剂以吸收红外辐射，降低被探测到的发动机燃气辐射热量。

4) 射频隐身化设计：设定最小天线孔径数量，减小天线孔径外形尺寸，缩减天线孔径特征信号，采用低截获概率技术。无人机外表面铺上一层内裹银导线的碳纤维编织网，通电后在飞机表面形成法拉第笼，电磁波照不进去，射频信号也泄露不出来，形成静电屏蔽。

3 无人机隐身特性数值模拟

舰载察打无人机在执行作战任务时，为提高生存力和攻击效果，要进行隐身飞行。在隐身飞行阶段，起落系统收起放入机身内部，内部弹舱门关闭，摄像头侦察系统收入机身内部。

对舰载察打无人机进行隐身特性分析，在雷达、红外、可见光、声和射频隐身中，因为雷达隐身占了主要地位，所以笔者主要分析无人机的雷达隐身特性。

由于 X 波段是机载火控雷达(如 F-22A 飞机的相控阵雷达)、远程防空系统(如萨德系统)探测雷达常用的雷达波段，所以选取 X 波段进行舰载察打无人机的雷达隐身性能的数值模拟。

先对舰载察打无人机的网格数据进行分析，基于式(1)~(5)，提炼出三角形面元、劈边缘和腔体，采用物理光学法计算三角形面元散射，采用等效电磁流法计算劈边缘绕射，然后对二者进行叠加，得出整架飞机的 RCS。

基于自主研发的 RCSAnsys 软件，可以数值模拟出舰载察打无人机雷达隐身性能的效果，见图 4、图 5 和表 2。

表 2 舰载察打无人机的 RCS 数理统计 dBm²

俯仰角/(°)	X 波段方位角±30°的 RCS 均值(λ=3 mm)		
	前向	侧向	后向
-5	-7.691	18.189	5.276
0	-10.321	12.428	9.005
5	-4.566	21.864	8.895

从图 4 可知：雷达入射波俯仰角为-5°、0°和+5°时，飞机全向的 RCS 数值模拟图。在雷达入射波俯仰角为 0°时，飞机前向±30°范围内 RCS 很小，均在 -5 dBm² 以内，飞机头部的雷达隐身性能很好；

飞机侧向 $\pm 30^\circ$ 范围内 RCS 相对其他飞机来说也很小,均在 10 dBm^2 以内,飞机侧向的雷达隐身性能也很好;飞机后向 $\pm 30^\circ$ 范围内 RCS 均在 5 dBm^2 以内,飞机后向的雷达隐身性能相对来说也很好。同理,在雷达入射波俯仰角为 -5° 和 $+5^\circ$ 时,也可分析出飞机的前向、侧向和后向的 RCS 情况。

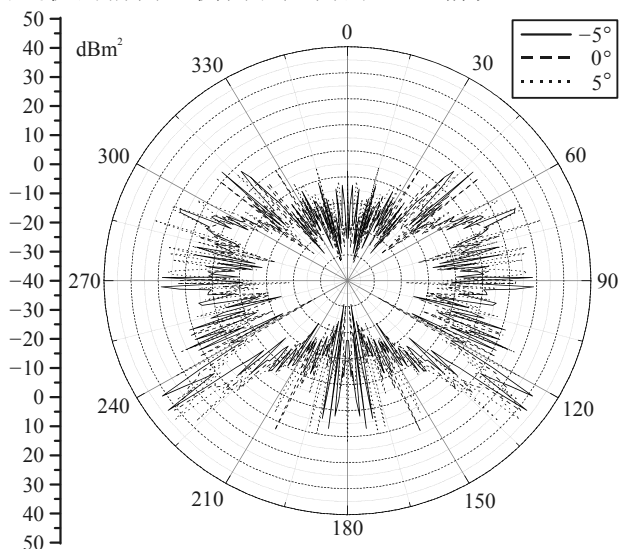


图 4 舰载察打无人机的 RCS 全向图

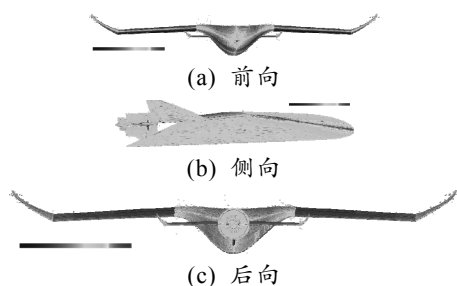


图 5 舰载察打无人机的 RCS 散射图

在进行 RCS 数值模拟的过程中,在雷达入射波俯仰角为 0° 时,雷达入射波的方位角在 $1^\circ \sim 360^\circ$ 范围内,每隔 1° 进行一次 RCS 数值模拟,并得出 1 张飞机 RCS 散射图,在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内,得出 360 张飞机 RCS 散射图。同理,在雷达入射波俯仰角为 -5° 和 $+5^\circ$ 时,雷达入射波的方位角在 $1^\circ \sim 360^\circ$ 范围内,也可以再得出 720 张飞机 RCS 散射图。对这 1 080 张飞机 RCS 散射图片进行分析,在雷达入射波俯仰角为 0° 时,选择具有代表性的 3 张图片,分别是方位角为 0° 、 90° 和 180° 的飞机 RCS 散射图片,即前向、侧向和后向图。从图 5(a)中可知,飞机机头正前方有一点白色区域,表示该点 RCS 散射强度偏大;从图 5(b)中可知,飞机机头侧向有一条白色线段,表示该线段区域的 RCS 散射强度偏大;从图 5(c)中可知,飞机后向尾部的发动机尾喷管有间断

的白色圆环,表示该区域的 RCS 散射强度偏大。对飞机 RCS 散射强度偏大的区域采取措施以缩减雷达散射特性,同时兼顾飞机的气动特性,最终是隐身与气动相互平衡的优化过程。

表 2 是舰载察打无人机的 RCS 数理统计情况。从表中可知,在 X 波段条件下,在俯仰角为 0° 时,飞机前向方位角 $\pm 30^\circ$ 范围内,其 RCS 算数平均值为 -10.321 dBm^2 。同理,可知飞机在其他情况下的 RCS 算数平均值。

本文中的 RCS 数值模拟算法经过微波暗室电磁散射测试,计算精度很高,满足飞行器隐身设计前期论证的精度要求。

4 结束语

笔者概念设计舰载察打无人机,并基于物理光学法和等效电磁流法,数值模拟飞机的 RCS 特性,得出以下结论:

1) 采用物理光学法计算飞机的面源散射、采用等效电磁流法计算劈边缘散射,二者相结合的方法,可以有效计算飞机的 RCS 散射特性;

2) 采用 CATIA 软件,概念设计翼身融合体的舰载察打无人机的 3D 数字样机,在飞机设计的论证阶段,能够高效地论证飞机的初步设计方案;

3) 对概念设计的飞机 3D 数字样机,采用自主知识产权的 RCSAnsys 软件,能快速地分析飞机的雷达隐身特性。

参考文献:

- [1] 周琳,黄江涛,高正红.基于离散伴随方程的三维雷达散射截面几何敏感度计算[J].航空学报,2020,41(5):128-138.
- [2] 郑舒予,张小宽,宗彬锋.基于改进 MUSIC 算法的散射中心参数提取及 RCS 重构[J].系统工程与电子技术,2020,42(1):76-82.
- [3] 张伟,高正红,周琳.基于代理模型全局优化的自适应参数化方法研究[J/OL].航空学报,http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20200403.1033.002.html.
- [4] 樊华羽,詹浩,程诗信.基于 EHVI 加点准则的 DSI 进气道气动/隐身多目标代理优化方法研究[J].西北工业大学学报,2019,37(5):918-927.
- [5] 代小霞,曹晨,冯圆.基于 Bayesian-MCMC 估计的隐身飞机 RCS 模型优化[J].北京航空航天大学学报,2016,42(4):851-857.
- [6] JIANG X W, ZHAO Q J, ZHAO G Q. Numerical Optimization on Aerodynamic/Stealth Characteristics of Airfoil Based on CFD/CEM Coupling Method[J].

Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 33(3): 274-284.

[7] LIU D W, HUANG J, SONG L. Influence of aircraft surface distribution on electromagnetic scattering characteristics[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(2): 759-765.

[8] 张乐, 周洲, 徐晓平. 飞翼无人机 3 种保形进气口进气道气动与隐身综合特性对比[J]. 航空动力学报, 2015, 30(7): 1651-1660.

[9] 张彬乾, 罗列, 陈真利. 飞翼布局隐身翼型优化设计[J]. 航空学报, 2014, 35(4): 957-967.

[10] 夏露, 张欣, 杨梅花. 飞翼布局翼型气动隐身综合设计[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(5): 821-826.

[11] 王荣, 闫溟, 白鹏. 飞翼无人机平面外形气动隐身优化设计[J]. 航空学报, 2017, 38(s1): 1-8.

[12] 张乐, 周洲, 许晓平. 飞翼无人机保形进气道耦合进口格栅气动与隐身综合特性[J]. 航空动力学报, 2018, 33(7): 1612-1721.

[13] YUE K Z, LIU W L, LI G X. Numerical Simulation of RCS for Carrier Electronic Warfare Airplanes[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(2): 545-555.

[14] YUE K Z, GAO Y, LI G X. Conceptual design and RCS performance research of shipborne early warning aircraft[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2014, 25(6): 968-976.

[15] YUE K Z, TIAN Y F, LIU H. Conceptual design and RCS property research of three-surface strike fighter[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2014, 15(3): 309-319.

[16] 岳奎志. 作战飞机 RCS 的静态与动态特性分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016: 35-36.

(上接第 59 页)

4 思维拓展

笔者以一块 18 Mbits 的 SRAM 芯片作为 LCD 驱动器的显存。优点: FPGA 软件设计简单, 且图像更新速度快, 实时程度高。缺点: 1) SRAM 成本较高; 2) SRAM 容量较小, 方案可扩展性差。如果是 10 寸、12 寸的 LCD 显示屏, 很难找到合适的 SRAM 芯片。

利用 FPGA 进行 LCD 驱动器设计的另一种方案就是采用 FPGA 搭配 2 个 128 Mbits 的 SDRAM 作为驱动器的显存。基本思路如图 9 所示。

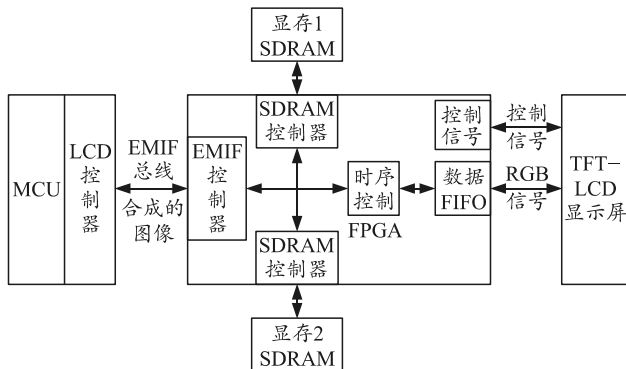


图 9 双 SDRAM 作为显存设计方案

MCU 和 FPGA 通过 EMIF 总线进行连接, FPGA 外接 2 块 SDRAM 芯片作为显存。首先将 MCU 发来的图像数据存储在显存 1 中, 经过 FPGA 转换为 RGB 信号不断刷新显示在屏幕上; 如果图像数据更新或使用按键进行图像切换则将更新后的图像数据存储在显存 2 中, 等待显存 2 中数据写入完成, 则从下一帧画面开始 LCD 屏幕显示显存 2 中的图像, 如此循环。

2 块 SDRAM 作为显存方案, 优势如下: 1) SDRAM 价格较 SRAM 低很多, 节省成本; 2) 方案可扩展性强, 适用于大尺寸屏幕; 3) 可避免单显存设计中显存图像更新时处于写入状态, 无法读出数据进行显示的问题(单显存设计中此时容易出现花屏等现象)。

5 结束语

笔者提出的基于 FPGA 的 LCD 驱动器设计能够实现 MCU 芯片的 RGB 接口扩展。在显存选择上提出了 2 种方案: 单片双口 SRAM 方案软件设计简单且已经过产品验证; 双 SDRAM 充当显存的方案则可大大降低项目成本, 同时具有较好的扩展性, 可广泛应用于国产化设计升级中的显示接口扩展中。

参考文献:

[1] 陈文明. 大屏幕 TFT-LCD 驱动电路设计[J]. 光电技术应用, 2019, 34(1): 35-40.

[2] 陆耀强. 基于 FPGA 的液晶显示控制器的设计与实现[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.

[3] 李璐, 余英. 基于 FPGA 的 LCD 动态显示控制系统设计与实现[J]. 信息系统工程, 2016(1): 96-97.

[4] 陈东成. LCD 控制器的 FPGA 实现[J]. 电子器件, 2017(5): 1115-1120.

[5] 唐徐立, 黄君凯, 刘明峰. 基于 FPGA 的 TFT-LCD 控制器设计与实现[J]. 半导体技术, 2010(11): 1134-1137.

[6] 陈刚, 康林, 陈航, 等. 基于 FPGA 的 SRIO 端点设计与实现[J]. 兵工自动化, 2021, 40(2): 49-52.

[7] 隋旭阳, 陈卓, 刘议聪, 等. 基于 FPGA 的实时视频边缘检测系统[J]. 兵工自动化, 2021, 40(2): 58-60.