光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021062401

激光直写系统中 DMD 控制方法的设计与改进

张　林[1]，胡丹峰[1*]，朱鹏飞[2]，浦东林[3]，徐　杰[1]，王加俊[1]

（1. 苏州大学 电子信息学院，江苏 苏州 215006；2. 苏州苏大维格科技集团股份有限公司，江苏 苏州 215026；
3. 苏州大学 光电科学与工程学院，江苏 苏州 215006）

摘　要： 为解决在激光直写系统中利用数字微镜器件(DMD)无法对纵向像素数大于 768 的灰度图像进行滚动显示的问题，文章在其控制电路的数据传输、存储及显示驱动技术方面开展了研究。利用 FPGA 中丰富的逻辑资源实现了图像数据传输方式的改进，通过移位寄存器对数据进行拆分和位宽转换。提出间隔存储方法实现大尺寸灰度图像数据的存储，基于此方法可实现灰度图像滚动显示时的数据读取。同时，省去在上位机中进行位平面拆分和图像分割的预处理步骤，简化了上位机操作流程并提高了系统数据传输效率。实验结果表明，该系统能够以 419.6 Hz 的刷新率对大尺寸灰度图像进行滚动显示。

关键词： 数字微镜器件；现场可编程门阵列；数据存储；激光直写

中图分类号： TN216　**文章编号：** 1001－5868(2021)05－0741－06

Design and Improvement of DMD Control Methods in Direct Laser Writing System

ZHANG Lin[1], HU Danfeng[1], ZHU Pengfei[2], PU Donglin[3], XU Jie[1], WANG Jiajun[1]

(1. School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, CHN;
2. SVG Optronics, Co. Ltd., Suzhou 215026, CHN;
3. School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, CHN)

Abstract: In order to solve the problems of scrolling grayscale images of a vertical pixel count higher than 768 using digital micromirror device (DMD) in direct laser writing system, the data transmission and storage and display driving technology of the control circuit was studied. The improvement in image data transmission mode was realized based on the rich logic resources in the FPGA which were used to split the data and convert the bit-width through shift registers. In addition, an interval storage method was proposed to realize the storage of large-size image data. Based on this method, the data can be read during the scrolling display of grayscale images. The workflow of the DMD display device was simplified and the efficiency was promoted by saving the operations of bit-plane splits and images segment in the upper computer. The experimental results show that the system can complete the scrolling display of grayscale image with 419.6 Hz.

Key words: DMD; FPGA; data storage; direct laser writing

0　引言

数字微镜器件(DMD)是德州仪器公司(TI)开发的一种将光机械和电子机械相结合的微机电系统(MEMS)器件，由于拥有高图像分辨率、高光学效率以及全数字化控制等优点，DMD 被广泛应用于激光直写光刻、3D 打印、3D 机器视觉、光谱分析及投影等领域[1-6]。

DMD 作为空间光调制器(SLM)被广泛应用于

收稿日期：2021－06－24.
基金项目：江苏省自然科学基金面上研究项目(BK20171249).
* **通信作者：**胡丹峰

激光直写系统中，在工作时 DMD 需要配合不停运动的光刻基板进行显示刷新，从而完成大面积扫描曝光[6-11]。所显示图像的纵向像素数往往大于 DMD 的纵向像素数，为实现对此类大尺寸图像的滚动显示，常利用上位机软件进行分割，DMD 依次显示分割后的图像以实现滚动显示刷新[7]。

目前对 TI 的 DMD 芯片组进行开发时，难点主要集中在数据传输及 DMD 显示驱动上。常见的数据传输方式包括使用 TI 公司的开发套件中的 USB 接口以及单独设计一个数据接收板通过视频传输接口完成[4-6,10-12]。使用 USB 接口传输数据时，通常需要上位机将灰度图像进行位平面拆分，依次传输拆分后的各个位平面数据。池文明和 Peng 等[10-11]实现了二值图像的滚动显示，但未实现灰度图像的滚动显示。宋振清及刘龙[12-13]使用视频传输接口传输数据，受视频传输接口性能限制，只能传输固定大小的图像数据，若要实现 DMD 对图像的滚动显示，需要将图像进行预分割，DMD 再依次显示分割后的各个图像。若滚动步进仅有几行，各个分割后的图像中有大量的数据是重复的，这些重复的数据被多次传输并存储，导致数据传输效率低下，浪费设备内存空间。且这种方法需要根据图像尺寸将存储器空间进行分割，将每个位平面数据存储在相应的分区中，这种方式仅能够存储固定尺寸的图像，若图像尺寸改变，便需要调整每个分区大小，操作较为不便。同时，现有方法还存在内存读取效率低下的问题，如文献[10]中内存数据读取速率低于 DMD 所需的数据速率，导致其实际灰度显示帧率为 357.1 Hz，远低于其理论计算的 421.1 Hz。

针对现有方法中存在的问题，本文基于 DLP Discovery 4100 开发套件实现了对 DMD 控制方法的设计与改进，进而完成对大尺寸灰度图像数据读取、传输、存储、加载及图像的滚动显示。本文设计了上位机软件和 DMD 板卡固件，上位机软件读取位图图像(BMP)文件，通过 USB 接口将图像数据发送至 DMD 板卡。在 DMD 板卡接收到图像数据后，利用移位寄存器实现各位平面数据的拆分和数据位宽转换。设计使用间隔存储法以完成对图像数据的存储，并利用脉冲宽度调制(PWM)完成灰度图像的显示。本方法省去了对图像的分割和对位平面的拆分操作，同时提高了数据传输效率，提出了间隔存储法，改进了图像数据存储及读取方式，实现了对大尺寸图像数据的存储，并基于此方法完成了对灰度图像的滚动刷新，简化了激光直写系统的操作流程。

1 DMD 设计平台及灰度调制

1.1 DMD 工作原理及设计平台

DMD 是一种 MEMS 器件，由若干个独立的微镜片组成，DMD 中每个微镜可以向±12°两个方向进行偏转。微镜偏转+12°时，光线能够通过投影透镜，微镜处于“打开”状态；微镜偏转−12°时，光线无法通过投影透镜，微镜处于关闭状态[1-6,10-13]。

本文基于 DLP Discovery 4100 开发套件完成 DMD 显示设备的设计，使用的 DMD 芯片型号为 DLP7000，该组合是目前刷新速率最高的一款套件[14-15]。图像文件读取和 DMD 显示参数设置通过上位机完成，并利用图形用户界面(GUI)完成交互。DMD 设备的结构框图如图 1 所示。

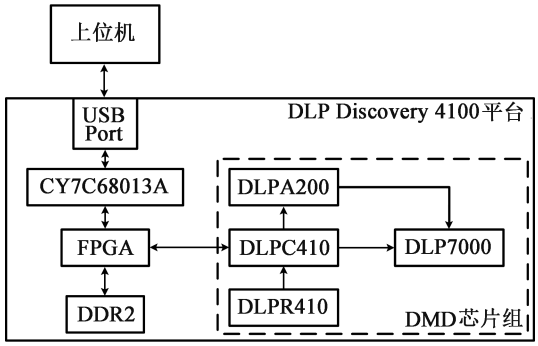


图 1 显示设备结构框图

1.2 DMD 灰度调制方法

FPGA 通过数据总线发送图像数据至 DMD 芯片组后，还需要通过行控制信号、块控制信号发送复位指令，复位完成后 DMD 才会刷新显示[4-6,12-14]。DMD 的物理特性决定其只能够显示黑白二值图像，若显示灰度图像，需通过基于 PWM 的灰度调制方法完成灰度图像显示[3-6,11-14]。

8 位灰度图像每个像素通过一个 8 位二进制数据表示，将每个像素中处于相同位的二进制数据取出，并按原像素位置进行排列，便可得到 8 个黑白二值图像。这 8 个黑白二值图像可称为原图像的 8 个位平面，并按照组成该位平面的数据在原像素数据中所处的位置，将位平面从 0 到 7 进行编号。PWM 灰度调制方法通过控制每个位平面的显示时间，利用“视觉暂留”完成灰度图像显示[3-6,11-13]。为保证图像显示灰度值正确，需控制每个位平面的显示时间为前一个位平面时间的两倍。将位平面 0 显示时

间记为基准时间，此时完成 8 位灰度图像的调制需要 255 个基准时间。

图像数据通过 2 组 16 位双倍数据速率(DDR)数据总线传输，时钟上下边沿均可传输数据，每位数据总线可在一个时钟内传输 2 位数据。数据总线每个时钟能够发送 64 位数据，数据接口时钟频率为 400 MHz，因此每次加载 1 个位平面数据所用时间为

$$t_{\mathrm{load}}=n_{\mathrm{w}}\times n_{\mathrm{h}}\div n_{\mathrm{width}}\times\frac{1}{f_{\mathrm{clk}}}=30.72\ \mu\mathrm{s} \quad (1)$$

DMD 进行全局复位操作之后需等待 8 μs 让微镜稳定，稳定之后才能加载数据或者进行其他操作[4-5,11-14]。若每次刷新 DMD 显示内容均通过显示新的位平面来完成，此时时间基准为

$$t_{\mathrm{base}}=t_{\mathrm{load}}+t_{\mathrm{wait}}=38.72\ \mu\mathrm{s} \quad (2)$$

且每次进行复位操作还需要占用 5 μs，基于此时间基准完成一次灰度调制周期：

$$T=255\times t_{\mathrm{base}}+8\times t_{\mathrm{rst}}=9\,913.6\ \mu\mathrm{s} \quad (3)$$

此时显示帧率为 100.87 Hz[11-13]。

为提高灰度图像显示帧率，可使用 DMD 芯片组提供的块清除功能。DLP7000 芯片中 768 行被分为 16 个块，每个块包括 48 行[10-14]。块清除功能可以在一个行数据加载周期内将指定块的数据置 0，因此相较于通过数据加载将 DMD 中数据置 0，速度提高至原来的 48 倍。此时将整个 DMD 中数据置 0 仅需要

$$t_{\mathrm{clear}}=t_{\mathrm{load}}\div 48=0.64\ \mu\mathrm{s} \quad (4)$$

使用块清除功能后，PWM 灰度调制基准时间为

$$t_{\mathrm{base}}=t_{\mathrm{wait}}+t_{\mathrm{clear}}=8.64\ \mu\mathrm{s} \quad (5)$$

使用 8.64 μs 作为时间基准进行灰度调制，位平面 0、位平面 1 及位平面 2 的显示时间均小于 38.72 μs，在这 3 个位平面显示后需进行清除操作，其余位平面显示时间大于 38.72 μs，无需进行清除操作。清除操作后该位平面显示时间为延时与清除操作占用时间之和，其余位平面显示时间为延时与下一个位平面数据加载时间之和[5,11-13]。每次进行清除操作后，还需经过复位、等待 8 μs 及数据加载，所以每次清除操作还需占用时间为

$$t_{\mathrm{blank}}=t_{\mathrm{rst}}+t_{\mathrm{wait}}+t_{\mathrm{load}}=43.72\ \mu\mathrm{s} \quad (6)$$

完成一次灰度调制的周期为

$$T=255\times t_{\mathrm{base}}+8\times t_{\mathrm{rst}}+3\times t_{\mathrm{blank}}=2\,374.36\ \mu\mathrm{s} \quad (7)$$

此时显示帧率可达 421.16 Hz，灰度调制实现时序如图 2 所示。

为实现数据加载、复位、清除及延时的功能，并对各位平面显示时间进行精确控制，完成 PWM 灰度调制，本文设计了如图 3 所示的有限状态机(FSM)对 DMD 进行控制。

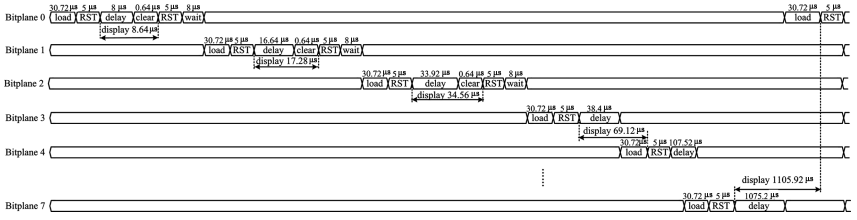


图 2　灰度调制控制时序

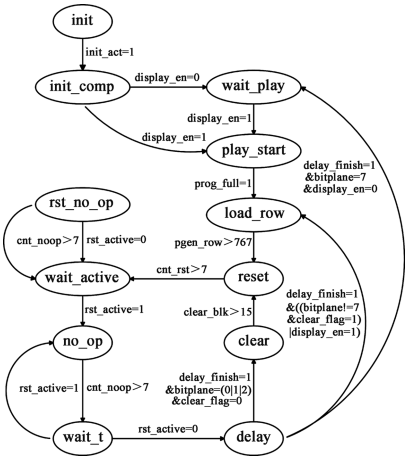


图 3　DMD 控制状态机

2　数据传输及存储

2.1　上位机软件与 USB 接口

上位机软件中设计了如图 4 所示的 GUI 界面，通过 GUI 进行 BMP 文件选择及 DMD 显示参数设置。选择 BMP 文件后，不必进行分割、位平面拆分等预处理操作，上位机软件直接将 BMP 文件数据通过 USB 接口发送至 DMD 板卡。数据发送完成后，发送相关指令，可指定显示图像并设置播放时间。DMD 板卡利用 USB 芯片 CY7C68013A 接收上位机软件发送的数据及指令，CY7C68013A 通过通用可编程接口(GPIF)将接收到的数据及指令发

送给 FPGA[10]。

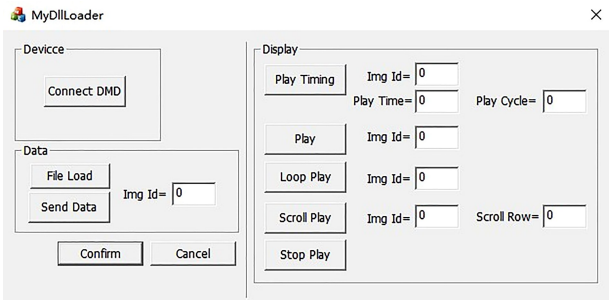


图 4 上位机图形用户界面

2.2 数据拆分及位宽转换

USB 芯片与 FPGA 之间通过双向数据端口 FD[15：0]进行数据传输，因此每个有效的 16 位数据中包含 2 个 8 位灰度数据。DMD 进行灰度显示时需要依次加载各个位平面数据，所以需将数据根据位平面进行拆分。DDR2 内存的数据位宽是 64 位，工作在突发长度(Burst Length，BL)为 4 的突发读写模式下，每次读写操作都是对 4 个地址中的数据进行读写，因此每次突发写需 256 位数据。

为满足上述要求，本文通过移位寄存和计数器相结合的方式完成对各个位平面数据的拼接。使用 8 个 256 位寄存器对数据进行暂存，每得到一个有效的 FD[15：0]数据，将 256 位寄存器左移 2 位，同时将新得到的数据放入对应的低两位中完成移位寄存，伪代码表示如下：

$$data_bitplane_n = data_bitplane_n \ll 2 | FD(n) \ll 1 | FD(n+8) \tag{8}$$

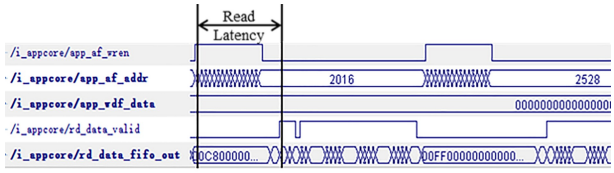
与此同时计数器进行计数，每经过 128 次移位寄存后，寄存器中数据均被更新，此时触发一轮 DDR2 写入，通过 8 次突发写操作将 8 个位平面的数据写入 DDR2 中。

2.3 间隔存储法

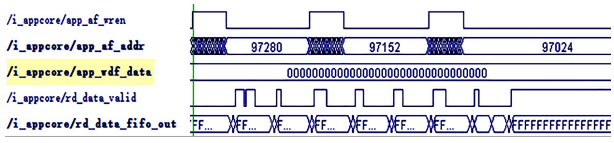
针对现有方法在灰度图像存储时，需要根据图像尺寸对 DDR2 中存储空间进行分区，无法完成对大尺寸灰度图像的灵活存储的问题，本文提出间隔存储的方法。

上位机软件加载的图像文件是 BMP 格式，BMP 文件是以图像的左下角作为起点，而 DMD 加载数据时是以左上角作为起点。为了正向显示图像，数据读取时，需逆向读取每行图像的数据。为此需要在读取一行数据后进行读取地址的跳转。DDR2 内存数据读取时序如图 5 所示。

图 5(a)是读取顺序地址时的时序，图 5(b)是频繁进行地址跳转时数据读取时序。可以看到，如在读取数据过程中频繁进行地址跳转，将出现很多不必要的延时，这些延时会导致等效读取速率低于系统需求。为提高数据读取速率，需尽量减少数据读取时的地址跳转，将地址跳转在数据写入时完成。



(a) 顺序读取时序



(b) 地址跳转读取时序

图 5 DDR2 读取时序

存储的图像是横向像素数为 1 024 的 8 位灰度图像，每个地址存储 64 位数据，所以每行像素所占用地址数是：

$$N_{addr} = n_w \times n_{bitplane} \div n_{bit\text{-}width} = 128 \tag{9}$$

所以每行数据的首地址均比前一行首地址小 128。仅需确定第一次存储数据的地址，之后每行数据存储地址一次递减，便可得到每行数据所对应的首地址，通过下式可计算倒数第 n 行数据的首地址：

$$Addr_n = HA - N_{addr}(n-1) = HA - 128(n-1) \tag{10}$$

	Data of the last line				Data of the last but one					Data of the 768th line from the end				
Bitplane0→	HA	HA+32	HA+64	HA+96	HA-128	HA-96	HA-64	HA-32	……	HA-98176	HA-98144	HA-98112	HA-98080	……
Bitplane1→	HA+4	HA+36	HA+68	HA+100	HA-124	HA-92	HA-60	HA-28	……	HA-98172	HA-98140	HA-98108	HA-98076	……
Bitplane2→	HA+8	HA+40	HA+72	HA+104	HA-120	HA-88	HA-56	HA-24	……	HA-98168	HA-98136	HA-98104	HA-98072	……
Bitplane3→	HA+12	HA+44	HA+76	HA+108	HA-116	HA-84	HA-52	HA-20	……	HA-98164	HA-98132	HA-98100	HA-98068	……
Bitplane4→	HA+16	HA+48	HA+80	HA+112	HA-112	HA-80	HA-48	HA-16	……	HA-98160	HA-98128	HA-98096	HA-98064	……
Bitplane5→	HA+20	HA+52	HA+84	HA+116	HA-108	HA-76	HA-44	HA-12	……	HA-98156	HA-98124	HA-98092	HA-98060	……
Bitplane6→	HA+24	HA+56	HA+88	HA+120	HA-104	HA-72	HA-40	HA-8	……	HA-98152	HA-98120	HA-98088	HA-98056	……
Bitplane7→	HA+28	HA+60	HA+92	HA+124	HA-100	HA-68	HA-36	HA-4	……	HA-98148	HA-98116	HA-98084	HA-98052	……

图 6 DDR2 中数据存储地址

其中，HA(Head Address)为进行数据存储时第一个写入数据的地址，即倒数第一行数据的首地址。若所接收的图像纵向尺寸大于 DMD 纵向分辨率，可依旧按照式(10)计算每行的首地址并存储。上述方法可以完成大尺寸图像数据的存储，从而省去在上位机中进行位平面拆分和图像分割的操作，可提高数据传输效率并简化激光直写系统操作流程。得到如图 6 所示的数据存储地址表，可以看到同一个位平面数据分布在地址相差 32 的存储空间内，同一个位平面地址分布是顺序的。在读取同一个位平面数据时，仅需要按照相应地址读取即可。

2.4　数据读取

在数据存储过程中，记录当前行的首地址并将该地址写入指定寄存器中，在所有数据存储完成后，此寄存器中地址即为图像第一行数据的首地址，在进行数据读取时将此地址作为数据读取首地址，记为 HAR(Head Address of Read)。DMD 加载数据时，依次加载各个位平面数据，读取时同样按照位平面进行读取。各位平面数据的首地址可通过下式计算：

$$\mathrm{Addr}_{\mathrm{BIT}n}=HAR+4n \tag{11}$$

得到每个位平面数据的首地址后，读取每个位平面数据时从首地址开始依次加 32 即可。DMD 芯片横向像素数为 1 024，纵向像素数为 768，所以每读取一个位平面数据需进行的突发读操作次数为

$$N_{\mathrm{read}}=n_{\mathrm{w}}\times n_{\mathrm{h}}\div(n_{\mathrm{bit\text{-}width}}\times BL)=3\,072 \tag{12}$$

在滚动显示大尺寸图像时，仅需更新 HAR 即可完成，读取滚动 k 行后的数据首地址为

$$HAR_{\mathrm{scroll}\text{-}k}=HAR+128k \tag{13}$$

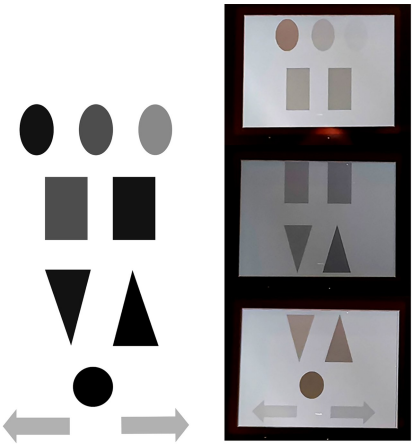
根据此首地址更新各个位平面数据的首地址，并进行数据读取即可得到滚动 k 行后的图像数据。按照修改后的地址进行数据读取，并将数据加载到 DMD 中，便实现了 DMD 滚动显示 k 行。通过改变各位平面数据读取地址即可完成灰度图像的滚动显示，相较于现有的需要在上位机中对大尺寸图像进行预分割的方法，可更为方便地设置滚动步进，提高系统灵活度。

如图 5(a)所示，读取 DDR2 时先发送要读取的地址，经过读取延时(Read Latency)后数据才能够被读取出来，所以 DDR2 实际的读取速率会偏低。等效的数据读取速率低于向 DMD 加载的数据速率，因此需要使用 FIFO 对数据进行暂存。现有方法均是通过 4 次突发读操作读取一行图像数据，此时由于存在读取延时，整个读取过程中会有一段时间未被利用，等效读取速率较低[5,11-13]。

为提高 DDR2 的等效读取速率，可将读取延时这段时间加以利用。每次数据读取都进行 16 次突发读操作，可读取 4 行数据，即 32 个 128 位数据，这 32 个数据需要连续写入 DDR2 中。若通过判断 FIFO 满信号 full 是否有效，决定是否继续从 DDR2 中读取数据。可能出现 FIFO 中剩余深度低于 32，但此时 full 信号无效，仍开始新一轮的读取操作，从 DDR2 中读取的 32 个数据无法全部写入 FIFO，会造成数据丢失。为避免数据丢失，引入 prog_full (programmable full)信号，该信号在 FIFO 中已用空间大于或等于指定值时有效[16]。DDR2 读写电路监测 prog_full 信号，只要 prog_full 信号无效时，FIFO 中就有足够空间写入 32 个数据，保证不会造成数据丢失。

3　实验结果

为验证系统是否完成设计目标，利用上位机读取 BMP 文件，通过 USB 接口将数据发送给 DMD 板卡，FPGA 完成对数据的拆分和数据位宽转换，并利用间隔存储法将数据写入 DDR2 中。通过上位机发送滚动显示指令至 DMD 板卡，DMD 板卡收到指令后，读取 DDR2 中数据并进行滚动显示。通过观察 DMD 显示图像是否正常，若滚动显示图像与上位机软件读取的图像一致，则表明系统完成了数据读取、传输、储存及加载功能，并能够完成对 DMD 显示灰度图像的驱动。测试结果如图 7 所示，测试时使用如图 7(a)所示的图像，滚动显示过程如图 7(b)所示。



(a)　测试图片　　(b)　DMD 滚动显示

图 7　DMD 显示测试结果

对比 DMD 显示图像和原始图像，可以看到 DMD 能够将原始的灰度图像完整显示，并且完成了对灰度图像的滚动刷新显示，表明上位机软件、USB 数据传输、DDR2 数据存储及 DMD 显示部分设计均达到目标。

为测试 DMD 灰度图像显示帧率，设置了一个测试信号，该信号仅在显示位平面 6 时被置位，通过示波器观测此信号，便可得到 DMD 灰度显示帧率。测试结果如图 8 所示，可以看到 DMD 完成一帧灰度图像显示周期为 2.383 ms，帧率为 419.6 Hz。

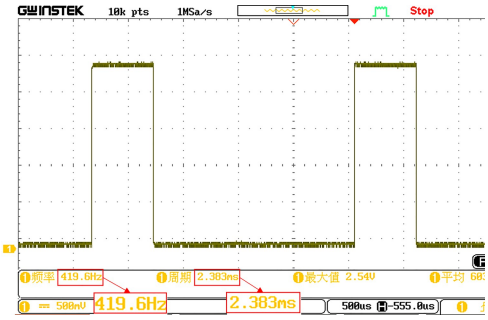


图 8 DMD 显示帧率测试结果

4 结论

本文针对现有方法存在的无法完成灰度图像滚动显示的问题，修改了图像数据的传输方式，提出间隔存储法并改进了灰度显示调制方法，实现了对灰度图像的滚动显示，并通过 PWM 调制方法完成 8 位灰度图像显示。

测试表明，本文所设计方法能够很好地完成大尺寸图像数据的传输、存储及读取，并能够对存储的大尺寸图像进行滚动显示，灰度显示帧率达到 419.6 Hz。在解决现有方法无法实现 DMD 对灰度图像进行滚动显示的同时，省去了在上位机中进行图像分割及位平面拆分的步骤，可更好地满足 DMD 在激光直写系统中的应用需求。

参考文献：

[1] Texas Instruments. DMD 101: Introduction to Digital Micromirror Device (DMD) Technology[EB/OL]. (2018-02)[2021-04-20]. https://www.ti.com.cn/.

[2] 朱悠微，梁志毅，乔永征. 基于 FPGA 的 DMD 驱动控制电路的研究设计[J]. 计算机测量与控制，2010，18(3)：547-550.
Zhu B W, Lang Z Y, Qiao Y Z. A research of drive control system for DMD based on FPGA[J]. Computer Measurement and Control, 2010, 18(3): 547-550.

[3] 徐 君，谢正茂. 基于数字微镜器件的 Hadamard 变换编码模板设计及空间光谱调制分析[J]. 半导体光电，2019，40(4)：600-604.
Xu Jun, Xie Zhengmao. Design of Hadamard transform encoding mask and analysis of spatial spectral modulation based on digital micromirror device [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(4): 600-604.

[4] 徐正平，王德江，黄厚田，等. 数字微镜器件视频显示性能分析[J]. 液晶与显示，2013，28(2)：255-260.
Xu Zhengping, Wang Dejiang, Huang Houtian, et al. Analysis on performance of video displaying system based on DMD[J]. Chinese J. of Liquid Crystals and Displays, 2013, 28(2): 255-260.

[5] 张颖新，王云萍，侯军燕. 高帧频 DMD 红外景象仿真设备电路与光学系统设计[J]. 红外与激光工程，2017，46(4)：82-88.
Zhang Y X, Wang Y P, Hou J Y. Circuit and optical system design for high frame rate DMD infrared scene simulation equipment[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(4): 82-88.

[6] 王延杰，陈怀章，刘艳滢，等. 数字微镜器件在高动态辐射场景成像探测系统中的应用[J]. 光学精密工程，2014，22(9)：2508-2517.
Wang Yanjie, Chen Huaizhang, Liu Yanying, et al. Application of DMD to high dynamic scene image detection system[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(9): 2508-2517.

[7] 吕 帅. 提升光刻机运动控制平台精度方法的研究[D]. 苏州：苏州大学，2020.
Lv Shuai. Research on the methed of improving the precision of the motion control platform of lithography machine [D]. Suzhou: Soochow University, 2020.

[8] 李威威. 基于 DMD 光刻机的关键图像处理技术研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2018.
Li Weiwei. Research on key image processing technology based on DMD lithography machine[D] Xi'an: Xidian University, 2018.

[9] Li Q K, Yao X, Liu H, et al. Analysis and correction of the distortion error in a DMD based scanning lithography system [J]. Optics Commun., 2019, 434: 1-6.

[10] 池文明. 用于光刻成像的 DMD 图像曝光方法研究与实现[D]. 成都：电子科技大学，2017.
Chi Wenming. Research and implementation of DMD image exposure method for lithography[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technol. of China, 2017.

[11] Peng C, Zhang Z, Zou J, et al. A high-speed exposure method for digital micromirror device based scanning maskless lithography system[J]. Optik, 2019, 185: 1036-1044.

[12] 宋振清. DMD 高帧频动态场景模拟器控制系统设计[D]. 西安：西安电子科技大学，2017.

（下转第 759 页）

[11] 安　冬，国凌明，邵　萌，等. 基于暗通道先验的自适应超像素去雾算法[J]. 控制与决策，2020，35(8)：1929-1934.
An D，Guo L M，Shao M，et al. An adaptive superpixel defogging algorithm based on dark channel prior[J]. Control and Decision，2020，35(8)：1929-1934.

[12] 陈　永，卢晨涛. 基于超像素分割和暗亮通道结合的单幅图像去雾[J]. 激光与光电子学进展，2020，57(16)：239-247.
Chen Y，Lu C T. Single image dehazing based on superpixel segmentation combined with dark-bright channels[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2020，57(16)：239-247.

[13] Tang X，Sun J，He K. Guided image filtering[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence，2013，35(6)：1397-1409.

[14] 徐　晶，刘　鹏，唐降龙. 大气光估计对单幅图像去雾复原的影响[J]. 智能计算机与应用，2012，2(3)：68-71.
Xu J，Liu P，Tang X L. Impact on single image haze removal caused by the estimation of atmospheric light[J]. Intelligent Computer and Applications，2012，2(3)：68-71.

[15] 张国权，李战明，李向伟，等. HSV 空间中彩色图像分割研究[J]. 计算机工程与应用，2010，46(26)：179-181.
Zhang Guoquan，Li Zhanming，Li Xiangwei，et al. Research on color image segmentation in HSV space[J]. Computer Engineering & Applications，2010，46(26)：179-181.

[16] Tarel J，Hautiere N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]// IEEE Inter. Conf. on Computer Vision，2009：2201-2208.

[17] Berman D，Treibitz T，Avidan S. Non-local image dehazing[C]// IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition，2016：1674-1682.

[18] 刘海波，汤群芳，杨　杰. 去雾图像质量客观评价方法研究[J]. 量子电子学报，2016，33(1)：20-28.
Liu H B，Tang Q F，Yang J. Research of objective assessment method for defogged image quality[J]. Chinese J. of Quantum Electron.，2016，33(1)：20-28.

作者简介：

何柯辰(1996－)，男，遂宁人，硕士研究生，主要从事图像处理方面的研究；

刘　奇(1966－)，男，成都人，博士，教授，研究生导师，主要从事信号与信息处理、生物医学工程方面的研究。

(上接第 753 页)

[15] 彭海峰，巩　岩，赵　磊. 光刻投影物镜中柔性多弹片支撑方式的性能分析[J]. 光电工程，2013，40(2)：71-75.
Peng Haifeng，Gong Yan，Zhao Lei. Performance index analysis of the support of lithographic lens with multi flexural brackets[J]. Opto-Electronic Engineering，2013，40(2)：71-75.

[16] 华洋洋，巩　岩. 光刻物镜高精度挠性结构镜框设计及分析[J]. 光电工程，2013，40(7)：39-43.
Hua Yangyang，Gong Yan. Design and analysis for the high-precision lens flexible structure of lithography objective lens[J]. Opto-Electronic Engineering，2013，40(7)：39-43.

[17] 赵　磊，彭海峰，于新峰，等. 具有整体径向挠性的光学元件多点均匀支撑结构[J]. 光电工程，2015，42(10)：43-48.
Zhao Lei，Peng Haifeng，Yu Xinfeng. et al. Lens support structure of multi point equal supporting with wholly radical freedom[J]. Opto-Electronic Engineering，2015，42(10)：43-48.

作者简介：

刘　绚(1997－)，女，四川资阳人，硕士研究生，主要从事光学检测方面的研究；

贾　辛(1982－)，男，博士，副研究员，硕士生导师，主要从事亚纳米级面形检测方面的研究。

(上接第 746 页)

Song Zhenqing. The control system design of DMD high frame rate dynamic scene simulator[D]. Xi'an：Xidian University，2017.

[13] 刘　龙. 基于 DMD 的动态同步高帧频投影技术研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2020.
Liu Long. Research on dynamic synchronous high frame rate projection technology based on DMD[D]. Xi'an：Xidian University，2020.

[14] Texas Instruments. DLP® Discovery™ DLPC410 DMD Digital Controller[EB/OL]. (2020-02)[2021-04-20]. https://www.ti.com.cn/.

[15] Texas Instruments. DLP7000 DLP® 0.7 XGA 2x LVDS Type A DMD[EB/OL]. (2019-6)[2021-04-20]. https://www.ti.com.cn/.

[16] Xilinx. FIFO Generator v13.2 Product Guide[EB/OL]. (2017-10)[2021-04-20]. https:// china.xilinx.com/.

作者简介：

张　林(1997－)，男，江苏泰兴人，硕士研究生，主要研究方向为嵌入式数字系统设计；

胡丹峰(1978－)，男，安徽蚌埠人，硕士，副教授，主要研究方向为嵌入式系统应用和生物医学信号处理。