

数字微反射镜的机械光学特征研究

孙华权

(南京模拟技术研究所 江苏 南京 211800)

摘要: 数字微反射镜本质上是一个由多个高速数字式光反射开光组成的阵列, 其具有反射率高、对比度大的特点, 通过数字微反射镜期间控制, 能快速实现物体的扫描成像。本文在阐述数字光处理技术和数字微反射镜装置内涵的基础上, 分析微反射镜片的运动过程, 指出数字微反射镜的机械光学效果。期望能准确把握数字微反射镜的机械光学特征, 提升数字微反射镜的使用效果。

关键词: 数字光处理技术; 微反射镜; 机械光学特征

0 引言

数字微反射镜是应用较为广泛的一种微电子机械, 其能通过微反射镜的机械运动产生视觉效果, 进而为数字光处理功能的实现创造有利条件。现阶段, 投影电视机中大量使用了数字微反射镜, 在整个投影成像过程中, 数字微反射镜充当着成像器件的作用; 基于数字微反射镜作用发挥, 含数字微反射镜装置的投影电视机也被称为21世纪的高清电视。新时期, 为进一步提升数字微反射镜片应用效果, 还应重视其机械光学特征的有效分析。

1 数字光处理技术和数字微反射镜装置内涵

1.1 数字光处理技术

作为一种光反应应用的显像技术, 数字光处理技术在投影仪、背投电视中的应用较为广泛。在整个投影显像过程中, 数字微反射镜发挥着基础性作用, 通过微反射镜的作用, 能较为清晰准确地完成物体的投影显像。现阶段, 基于数字微反射镜的数字光处理流程如图1所示。

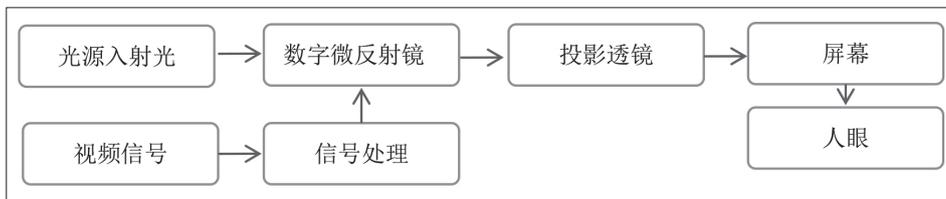


图1 数字光处理技术流程

1.2 数字微反射镜装置

数字微反射镜是由许多小型铝制反射镜面构成的, 一般一个小的镜片对应一个像素, 而像素分辨率的大

小由数字微反射镜镜片的多少决定。在整个数字光处理系统中, 数字微反射镜相当于一个数字光阀, 其不仅是投影电视机的核心部件, 而且是整个显示系统的枢纽, 通过自身高反射率、高对比度作用的发挥, 数字反射镜能快速、准确地完成物体成像, 实现物体被动或主动式的扫描成像。

微反射镜单元一般建立在SRAMCMOS结构之上; 深层次分析微反射镜的光调制结构可知, 其本身是一种可扭动的轴式微型反光镜阵列, 一般该阵列由10万多个方形反射镜组成, 每个反射镜规格为 $16\mu\text{m} \times 16\mu\text{m}$; 这样在一个镜片对应一个像素的模式下, 整个光调制结构相当于包含数万个数字式光开关的矩阵。就数字微反射镜而言, 其镜面悬挂在对角线顶点处的细扭转轴上, 并且在两个支柱的作用下, 能实现镜面的有效固定。数字微镜的光开关调节通过微电容极板的静电力进行驱动。从作用过程来看, 一旦操作人员驱动电压信号, 并将该电压信号施加在镜面和对应电极上时, 受确定电压本身的差异, 镜面也会发生一定的切斜, 通过微反射镜位置的调节, 微反射镜能将入射光反射到投影透镜, 然后在屏幕上显示出来,

形成一个完整的亮像素。在此过程中, 工作人员通过对微反射镜机械运动状态、运动次数的控制, 即可完成光束在屏幕上滞留时间的调节, 由此形成完整的数字灰度图像。现阶段, 数字微反射镜在数字光处理系统中得以经营,

已经逐步成熟, 基于数字微反射镜芯片使用数量差异, 可将数字微反射镜装置分为单系统、双系统和三系统三种类型。

2 数字微反射镜的运动过程分析

2.1 微反射镜自由转动及碰撞过程

一般在数字微反射镜应用中,除基底、反射镜片外,其扭转轴、铰和电极多会使用铝合金材料制成,而在其他部分制作中,除单晶硅、多晶硅材料外,半导体材料的应用也较为广泛。在整个数字光处理成像过程中,数字微反射镜的运动过程可通过拉格朗日-麦克斯韦方程进行表达,表达公式见式(1)。

$$J\theta + \eta\dot{\theta} + K_r\theta = \frac{\partial W_e}{\partial \theta} = \frac{1}{2}[U] \frac{dC}{d\theta} [U]^T \quad (1)$$

数字微反射镜片运动分析中,考虑微反射镜的工作环境,可有效判断微反射镜片的阻尼比;同时在考虑数字微反射镜单元静电场能量的基础上,通过对静电转矩与温度场可比性的分析,能准确掌握静电场的能量大小,并精准获得静电转矩;最后分析电场能的大小,即可准确获得阻尼系数的大小。

利用微反射镜进行数字光处理时,通过对电压序列的控制,能使得数字微反射镜开始动作,并较为准确地完成预定动作的电压向量序列。就电压向量本身而言,其不仅包含了一定的偏离电压,而且涉及相应的寻址电压;两种电压类型在控制方式上具有一定差异,其中偏离电压通过数字微反射镜芯片的控制总线控制,经控制后,偏离电压会作用在反射镜片和铰上;而在寻址电压控制中,CMOS电路数据总线发挥着重要作用。一般在偏离电压、寻址电压控制中,控制电压的序列值不同,则整个系统动态响应的结果也会出现一定的差异。在整个数字光处理及投影成像中,微反射镜的运动过程大致可分为两种类型:其一,反射镜自由转动;其二,反射镜存在能量损耗的碰撞运动过程。两个系统的运动方程表达见式(2)。

$$\begin{cases} J\theta + \eta_r\dot{\theta} + K_r\theta = \frac{\partial W_e}{\partial \theta} = \frac{1}{2}[U] \frac{dC}{d\theta} [U]^T \\ J\theta + \eta_c\dot{\theta} + K_c\theta = \frac{\partial W_e}{\partial \theta} = \frac{1}{2}[U] \frac{dC}{d\theta} [U]^T \end{cases} \quad (2)$$

式中,自由转动: $|\theta| \leq 10^\circ$;碰撞过程: $> 10^\circ$)

微反射镜运动中,系统考虑其所处的状态,求解自由转动和碰撞过程的微分方程,并将求解的数据按照时间顺序进行连接,即可准确得到微反射镜连续角的位移曲线。

2.2 微反射镜不稳定运动

数字光处理过程中,微反射镜还有可能出现不稳定

运动的现象,这会对投影成像的结果造成影响。结合微反射镜自由转动和碰撞过程的曲线可知,其不稳定状态主要存在于镜片反转的过程,该过程中,反射的光束会在理想像素点附近出现抖动问题,这会对人眼的视觉感应造成影响。

当受到光刺激后,人眼会产生一定的刺激响应,并且这种响应是呈指数变化的。对比发现,人眼对光刺激的响应与RC电路响应具有同样的性质,该响应过程中,若令刺激光线的光强为 L ,则人眼感觉的光强可通过式(3)中的 L' 表示。

$$L' = L \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (3)$$

经过微反射镜投影显像过程中,微反射镜存在4种翻转状态。深层次分析这4种翻转状态的角度移图可知,在最开始的时候,微反射镜处于原始状态,然后颤动飞行,经 1×10^{-5} s后,微反射镜会达到稳定状态,在此过程中,若人眼的感觉亮度引不起视觉变化,这可认为即便是微反射镜发生了飞行颤动,则这种颤动对微反射镜投影显像也是没有影响的。

研究表明,人眼的视觉时间常数约为0.1s,同时人眼亮度感觉的最低值为 0.01cd/m^2 ,基于这两个条件,可准确获得人眼感觉的光强为 1000cd/m^2 ;也就是说只有当刺激光线的光强超过 1000cd/m^2 时,微反射镜的不稳定飞行才会影响人眼的刺激响应。但是现阶段,CCIR等相关规定对CRT的显示相关最高亮度提出了明确要求,即该亮度应控制在 $(70 \pm 10) \text{cd/m}^2$,这远远低于数字微反射镜投影电视的极限亮度,故而可认为在数字光处理系统中,即便微反射镜存在不稳定性运动,其也不会对整体的成像质量造成影响。

3 数字微反射镜的机械光学效果

在微反射镜控制显影成像中,其控制脉冲多采用二进制控制方式,同时为保证控制脉冲调控的合理性,在脉宽调节中,还会使用分时脉宽调制技术。在控制方式下,每一个投影帧会被划分为多个独立的时间片段,通过对二进制权值的判断与控制,能实现时间片段长短的有效调节。另外基于微反射镜进行数字光处理,还应注重其基色的有效控制,数字光处理中的基色包含三种,每一个基色的灰度等级为256。

3.1 灰度值与微反射镜机械动作理想状态分析

经光学系统作用后,微反射镜的出射光会在屏幕的像素点上成像。在此过程中,微反射镜的带像光束不仅

要经过光学系统，而且应投射在屏幕上，这使得出射光出现了一定的衰减现象，衰减常系数可用 C_1 、 C_2 表示。对于人体而言，到达人眼中的画面亮度和微反射镜出射光亮度存在一定差异，且两者之间存在一定的线性关系。在微反射镜机械光学效果研究中，为达到简化研究的目的，可只计算人眼直接对 DMD 出射光亮度的响应。该

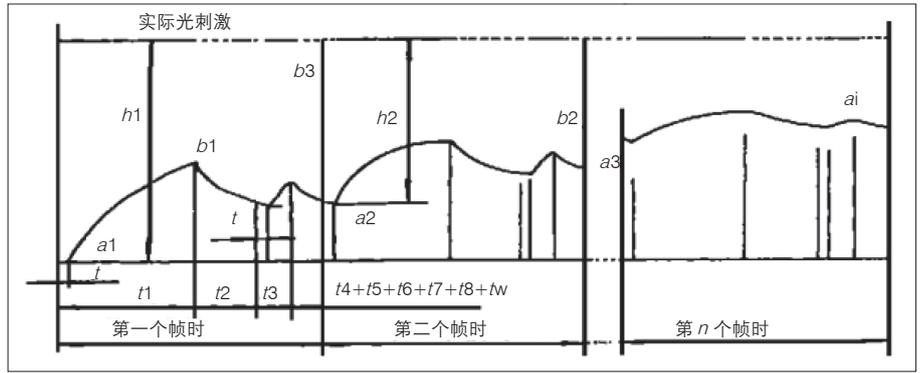


图2 人眼对微反射镜数字光处理系统的刺激响应

计算模式下，只需在 DMD 出射光亮 度上乘以 C_1 、 C_2 两个常系数即可获得人眼对屏幕上像素点亮度感觉。在考虑物理光学特征的基础上，对人眼的生理特性进行深层次分析，可知：人眼本质上也是一个能量接收器，在数字微反射镜的数字光处理中，若相同时间内人眼接收的能量越多，则可感知到的亮度也就越大。通过微反射镜进行投影显像时，按照 CCIR 等规定，照在微反射镜上的光线光强是不变的，这样微反射镜的“开”状态的时间决定了能量的改变情况。深层次分析微反射镜控制脉冲序列，可知在 256 个灰度编码中，其所对应的时间片长度总存在线性变化特征，同时在每一帧时内，它们所对应的能量也具有线性变化特征。在此状态下，若不考虑微反射镜飞行所造成无效时间和未利用的 1/256 帧时间，则微反射镜入射光在一帧时内的能量会全部被人眼接收，此时亮度最大，且为光源亮度。

3.2 灰度值与微反射镜机械动作现实分析

在现实生活中，人们的视觉存在一定的惰性，这使得人眼对光线的刺激响应程度呈现出指数变化趋势。对此，在计算电视亮度、开展电视机调试过程中，多设计采用彩色条纹画面，这影响了人眼对光真实的刺激响应。在实际建设中，一般选择连续帧时，并且要求光刺激每一帧时灰度编码相同。在一帧时内，最大的时间片约为帧时的 1/2，这远远小于人眼视觉时间常数；由此可知，在通过数字微反射镜进行数字光处理过程中，不论是在哪一个时间片内，人眼对亮度的响应均会出现偏差，且实际的响应亮度是不能达到光刺激的实际亮度的。

分析人眼对微反射镜数字光处理系统的刺激响应，可得到图 2 所示的响应数据。

在图 2 中， t 代表微反射镜的飞行时间，在这一时间段内，光刺激尚处于投影透镜、屏幕阶段，即光刺激未能作用于人眼，而 tw 代表了位于第 8 编码后尚未利用的时间片。为实现人眼亮度 (L') 响应情况的准确判断，不仅需要考虑光刺激亮度 (L)，而且需要对

有效光刺激的时间强度进行深层次分析 (t)，此外，工作人员还需要考虑在指数曲线开始上升阶段时应存在的人眼亮度。基于上述条件，当时间片编码设置为 1 时，人眼响应亮度表示为式 (4)。

$$L' = L \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + L_0 \quad (4)$$

当时间片编码设置为 0 时，人眼响应亮度表示为式 (5)。

$$L' = L \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (5)$$

实际计算过程中，从每个帧时的低 1 个时间片开始，人眼对微反射镜数字光处理系统的刺激响应指数开始上升，并且这一刺激响应的指数曲线会依次经历上升段、下降段等过程，通过对这些指数响应曲线的分析，可准确获得人眼对光刺激的亮度响应。结合图 2 可知，在各帧的指数上升段中，指数曲线的上升速率有一定变化，且这种变化呈逐渐下降趋势，并且在特定帧时内，这一指数会趋于稳定，由此可得出人眼对光刺激的主观亮度响应。

考虑到微反射镜存在无效飞行时间，同时第 8 位编码后，微反射镜还存在一小段未利用的时间片，这样在分析人眼对微反射镜出射光的主观亮度响应值时，应考虑实际曲线的离散情况。对比分析理想状态下的亮度响应曲线和人眼主观亮度响应曲线可知，这一离散量较小，整体离散程度不超过 0.5%，故而不会对人的观看效果造成影响。

值得注意的是，在稳态后，人眼主观亮度和 256 个灰度编码之间存在线性对应关系，在此过程中，人眼的灰度感觉较为均匀地分布在了 0 ~ 255 个灰度等级之间。可见通过机电控制脉冲序列时，微反射镜的机械运动能如实反应灰度等级，具有良好的机械光学效果。并且在微光反射镜应用中，三微光反射镜芯片的数字光处理系统在亮度方面较优，对此可将其广泛应用于

大场景高亮度投影,而就单微光反射镜芯片的数字光处理系统而言,其虽然在亮度程度上有一定局限,但是其系统的结构较为简单,故而在制作便于携带且亮度较低的投影设备时,可深化其系统单元的具体使用。

4 结语

深层次分析数字微反射镜的机械光学特征能为数字微反射镜的高效应用奠定良好基础。新时期,人们只有充分掌握数字光处理技术原理和数字微反射镜运作机制,然后在了解其运动过程的基础上,对其机械光学特征进行深层次分析,才能准确把握数字微反射镜的投影成像特征,为数字微反射镜的现实应用提供指导。

参考文献:

[1] 郑雅卫,胡煜,郭云强,等.基于双DMD的红外场景投影仪光学系统设计[J].激光与红外,2021,51(10):1330-1335.

[2] 刘壮,王超,江伦,等.低空高分辨率激光雷达光学系统设计[J].红外与激光工程,2021,50(01):280-286.

[3] 于百华,田志辉,苏东奇,等.基于自由曲面反射镜的低投射比超短焦投影物镜的光学设计[J].中国光学,2020,13(02):363-371.

[4] 吴小丽,杨晓燕,余徽.基于凸面光栅的Offner型编码孔径多光谱成像光学系统设计[J].光学与光电技术,2019,17(03):77-82.

[5] 刘璐,闫佩正,但西佐,等.基于条纹投影的显微镜自动对焦研究[J].光学学报,2019,39(08):268-275.

[6] 孙永强,胡源,王月旗,等.数字微镜器件在会聚成像光路中的像差分析[J].光学学报,2019,39(03):136-141.

作者简介:孙华权(1991.03-),男,汉族,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,工程师,研究方向:光机设计。

(上接第91页)

常时,会导致车辆无法检测本牵引单元各部件工作状态,从而显示问号。

可能导致故障单元显示问号的原因有以下几点:

(1) 故障牵引单元两个HMI屏本身故障,工作异常。当故障牵引单元HMI屏本身故障时,HMI屏会报出6CC1、6CC2、0053、0021等故障码;

(2) 故障牵引单元两个HMI屏供电异常;

(3) 故障牵引单元两个HMI屏软件版本异常;

(4) 故障牵引单元远程主机故障,网络通信异常,存在干扰源,对HMI屏进行干扰;

(5) 故障牵引单元主CCU网关异常,在列车网络重新配置过程中会出现短时间错误信号,造成制动、车门、空调界面显示问号。

5 应急处置建议

CRH380B(L)型动车组运行中出现某个牵引单元的制动、车门、空调界面显示问号的网络通信故障,先确认HMI屏是否报故障码,若报有关HMI屏故障的代码如0053,6CC1、6CC2、6146、6147,则复位HMI屏;若无效,则尝试拔下故障牵引单元的远程主机电源线,待故障牵引单元制动、车门、空调等界面恢复正常后正常行车,否则维持运行;若无代码报出,则维持运行至前方站后,对故障牵引单元进行CCU主从转换,故障消除后正常运行,否则维持运行(时间允许的情况下进行大复位);若为换

端引起的故障,优先考虑对故障牵引单元CCU进行主从转换,若无效则大复位,故障消除后正常运行。

6 结语

当动车组某个牵引单元制动、车门、空调界面同时显示问号时,分别从故障牵引单元的主CCU网关、HMI屏和远程主机故障三个方面着手解决,根据列车实际运行情况,采取相应的应急处置方案。

参考文献:

[1] 中国铁路总公司.CRH380B(L)系列动车组途中故障应急处置指导手册[M].北京:中国铁道出版社,2019.

[2] 中国铁路总公司.动车组诊断代码总表CRH380B(L)型[Z].

[3] 中国铁路总公司劳动和卫生部,中国铁路总公司运输局.CRH3C CCRH380B(L)CRH380CL型动车组机械师高速铁路岗位培训教材.北京:中国铁道出版社,2015.

[4] 《技规》条文说明编写组.铁路技术管理规程(高速铁路部分)条文说明(下册)[M].北京:中国铁道出版社,2014.

作者简介:李维泰(1991.08-),男,汉族,山东青岛人,本科,工程师,研究方向:CRH380B型动车组运行故障应急处置优化。