光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021110502

一种适用于昼夜兼容CMOS图像传感器的动态范围拓展方法

刘业琦*，刘戈扬，祝晓笑

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 为了提高CMOS图像传感器的动态范围并应用于昼夜兼容成像，提出了一种新的动态范围拓展方法。该方法在像素中设置多个复位屏障，以延长曝光过程中光电二极管的饱和时间，同时通过在不同成像环境中切换像素积分电容大小，提高微光成像时的响应灵敏度和强光成像时的满阱容量，从而实现昼夜兼容高动态成像。经MATLAB仿真证明，该方法可将传统CMOS图像传感器的动态范围从61 dB拓展到102 dB。

关键词： 动态范围；昼夜兼容；CMOS图像传感器

中图分类号： TP212；TN791　**文章编号：** 1001－5868(2022)04－0760－05

A Dynamic Range Expansion Method for Day Night Compatible CMOS Image Sensor

LIU Yeqi，LIU Geyang，ZHU Xiaoxiao

（Chongqing Optoelectronics Research Institute，Chongqing 400060，CHN）

Abstract： In order to improve the dynamic range of CMOS image sensor and apply it to day night compatible imaging，a new dynamic range expansion method is proposed in this paper. In this method，multiple reset barriers are set in the pixel to prolong the saturation time of photodiode in the exposure process. At the same time，by switching the pixel integral capacitance in different imaging environments，the response sensitivity of low light level imaging and the full well capacity of high light level imaging are improved，so as to realize day night compatible high dynamic imaging. MATLAB simulation shows that this method can expand the dynamic range of traditional CMOS image sensor from 61 dB to 102 dB.

Key words： dynamic range；day night compatible；CMOS image sensor

0　引言

安防监控和车载摄像等对图像传感器提出了昼夜兼容成像、低功耗、低成本、小体积等要求，使得昼夜兼容CMOS图像传感器的需求不断增加。成像场景中经常包含光源、反光、阴影等亮度差别巨大的目标，需要获取的图像具有足够高的动态范围，这对昼夜兼容CMOS图像传感器的动态范围(DR)和信噪比(SNR)提出了更高的要求[1-2]。动态范围是可变化信号最大值和最小值的比，可分为场景动态范围和相机动态范围两种概念。场景动态范围是拍摄场景中目标的最高亮度和最低亮度的比。相机动态范围是相机在一帧图像中能获取的最高亮度信号和最低亮度信号的比。本文只讨论图像传感器的动态范围，不考虑相机对图像的处理。图像传感器动态范围的最高亮度信号取决于饱和信号的大小，最低亮度信号则受限于图像传感器的噪声水平，并且只有当图像信号的信噪比大于特定阈值时，才能称为有效信号。因此计算图像传感器动态范围时的最低亮度必须是信噪比大于阈值时的亮度。为了获取拍摄场景中目标的信息，相机动态范围不能小于场景动态范围。

收稿日期：2021－11－05.

* **通信作者：**刘业琦　**E-mail：** lyqcetc44@163.com

目前拓展 CMOS 图像传感器动态范围的方法[3]可分为两类：一类是改变图像传感器对光信号的响应曲线，这类方法主要有对数响应曲线[4]、线性-对数结合响应曲线[5]、像素内 AD 转换[6]、像素内光频转换、像素内可变电容结构等；另一类是改变像素的工作时序，这类方法主要有多次曝光、多次复位[7]等。

这些方法各有优缺点，适合不同的应用需求。对数响应曲线、线性-对数结合响应曲线、像素内 AD 转换、像素内光频转换等方法需要在像素内增加较多电路，会明显减小像素的填充因子，降低灵敏度，不适用于微光成像。像素内可变电容结构通过改变电容大小，在不同的成像环境下调整灵敏度和电荷电压转换增益，可用于昼夜兼容成像，但必须结合行数据融合或帧数据融合处理来提高动态，这会造成分辨率或帧频的降低，并且需要较大的存储空间。多次曝光有多帧融合多次曝光和单帧多次曝光法，前者同样会降低帧频且需要较大存储空间，后者则需要增加较多电路，减小了填充因子，降低了灵敏度。多次复位可在单帧图像拓展动态范围，并且增加的电路不多，适合大数据量及低成本低功耗的应用，但由于白天和夜晚成像环境的亮度区间差别很大，只依靠多次复位无法兼顾微光成像和强光成像，昼夜兼容成像效果不佳。

本文根据多次复位技术和像素内可变电容结构，提出了一种可变电容多次复位法，该方法既能在单帧图像中拓展动态范围，又能兼顾昼夜成像环境，适用于昼夜兼容高动态 CMOS 图像传感器。

1　工作原理

1.1　方法概述

本文提出的方法主要针对像素结构进行改进，在传统 4T 像素结构上增加了复位管 RESET、电容 C_{PN}、电容 C_{boost} 和开关 HDR，可实现多次复位和可变电容功能，像素原理图如图 1 所示。

CMOS 图像传感器像素工作时，光电二极管在复位后开始收集光生电子，随着曝光时间的增加，电势逐渐降低，光强越大，电势下降的速度越快，电势降为 0 时信号饱和。如果 CMOS 图像传感器的动态范围小于成像场景的动态范围，当最亮处信号饱和时，最暗处的细节还无法分辨，导致暗处细节的丢失，若继续增加曝光时间，图像会出现过曝，导致亮处细节的丢失。

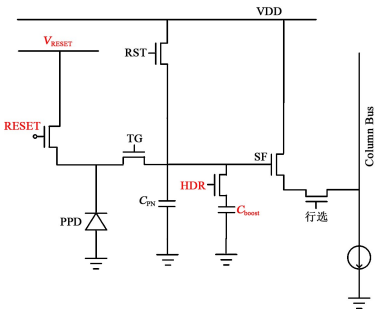


图 1　像素结构原理图

本文设计的像素结构通过在传统 4T 像素结构上增加一个复位管 RESET，并将其连接到可配置电平 V_{RESET}，在像素曝光过程中多次将光电二极管复位，使其不得低于指定电势，延长像素饱和所需时间，拓展 CMOS 图像传感器的动态范围。

采用多次复位技术可以满足白天或夜晚单一成像环境的动态范围要求，而用于昼夜兼容成像时，由于动态范围区间变化较大，还需要根据成像环境调整满阱容量才能获得满意的成像效果。

像素的满阱容量由 PPD 能收集的光生电子数和电荷电压转换节点能转换的电子数共同决定。一般将 PPD 能收集的电子数设计得较大，主要由电荷电压转换增益限制满阱容量，当转换的电压达到输出最大值时所转换的电子数就是满阱容量，此时信号饱和。电荷电压转换增益（CVF）由电荷电压转换节点的电容决定，电容越小，CVF 越大。

本文设计的像素结构用电容 C_{PN}、电容 C_{boost} 和开关 HDR 组成可变电容，通过开关时序在不同成像环境切换电容大小，改变灵敏度和满阱容量。当在强光环境下成像时，切换为大电容，电荷电压转换增益低，满阱容量大，图像不容易过曝；当在微光环境下成像时，切换为小电容，电荷电压转换增益高，提高灵敏度的同时降低噪声，提升微光成像质量。

本文设计的像素结构将多次复位技术与可变电容技术相结合，发挥出两种方法各自的优点，并使缺点互补，既可以在单帧图像内提高动态范围，又能根据不同成像环境切换像素电容大小，实现昼夜兼容高动态成像。

下文先讨论如何在单一成像环境中实现动态拓展，再说明如何通过切换像素积分电容扩展至昼夜兼容成像。

1.2　动态拓展的实现

当多次复位功能开启时，本文设计的像素工作流程如下：曝光开始前，RESET 开启，PPD 电势被

复位至可调电源 V_{RESET}，这时 V_{RESET} 的值被设置为 V_{DD}；随后 RESET 关闭，开始曝光，随着 PPD 持续收集光生电子，其电势逐渐降低，当曝光经过一定时间后，再次开启 RESET，PPD 电势被复位至 V_{RESET}，这时 V_{RESET} 的值根据实际光照环境进行设置，然后关闭 RESET，继续曝光。根据情况可在曝光过程中多次对 PPD 电势进行复位，延长饱和前的积分时间，提高图像传感器的动态范围。曝光过程中像素电势与曝光时间的关系如图 2 所示，暗光像素实线代表受到光照强度最弱的像素，它们几乎不受多次复位影响，响应是线性的。随着光照强度的提高，像素逐渐受到 1 次、2 次和多次复位的限制，得到分段线性的响应曲线，如图 3 所示。

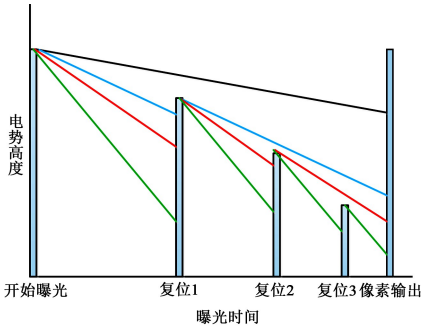


图 2 多次复位电势和曝光时间的关系

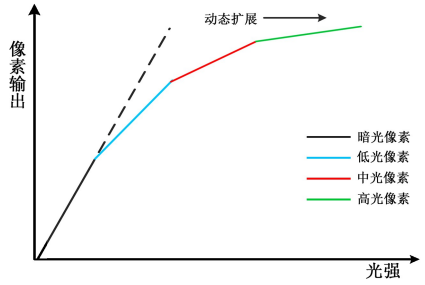


图 3 多次复位像素输出和光强的关系

多次复位的次数、时机和电势等参数非常重要，为了保持图像的信噪比始终大于阈值，这些参数被设置为实时可调，以适应不同的成像环境。本文首先通过单次复位模型进行分析，研究参数设置和图像质量的关系，然后再扩展到多次复位。

图 4 显示了单次复位时电势和曝光时间的关系，动态范围拓展程度和复位设置时间的比例，即 $S=t_{int}/(t_{int}-t_1)$ 正相关，复位时刻 t_1 距离 t_{int} 越近，S 越大，动态范围拓展也越宽。S 并不是越大越好，暗噪声会随光强的增大而增大，当单次复位 t_1 距离 t_{int} 很近时，像素输出信号和被限制前相比会有大幅下降，但噪声几乎不变，信噪比会断崖式下跌至阈值以下，造成成像质量降低。

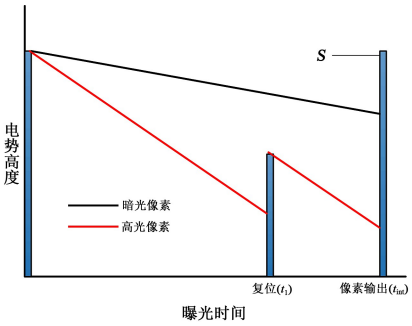
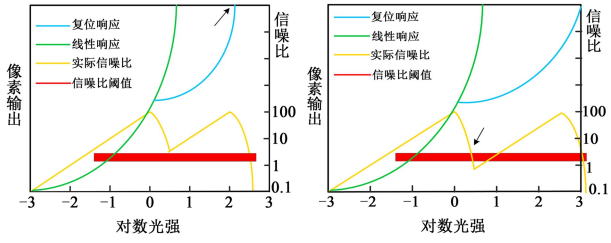


图 4 单次复位电势和曝光时间的关系

图 5 显示了 S 较小和 S 较大时的信噪比随光强的变化情况，当 S 较大时，信噪比降低至阈值以下，出现了一个信噪比“黑洞”，在这个区间内成像质量不满足要求。增加复位次数可以减小 S 变化对信噪比的影响。



（a）S 小 （b）S 大

图 5 单次复位不同 S 条件下 SNR 变化图

通常情况下，像素输出在 ADC 量程上的分布和曝光时间是线性正相关的，多次复位后，像素输出会按照复位次数被压缩为几段，在 ADC 量程上的分布方式也有所不同。图 6 显示了两次复位时电势高度对曝光时间的响应曲线以及像素输出在 ADC 量程上的分布。在两次复位屏障的作用下，斜率最大的电势高度响应曲线是一条三段折线，本文将其称为最大响应曲线。

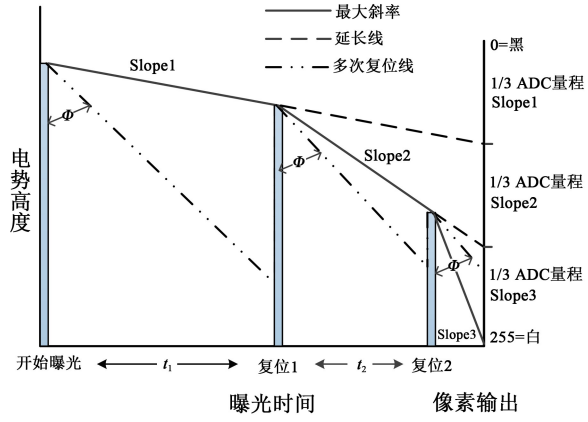


图 6 两次复位像素输出在 ADC 量程上的分布

通过设置复位时间点和复位电势值，可改变各个积分区间对应的像素输出在 ADC 量程上的分布。本文选择将 ADC 量程均分，再选取恰当的复位时间和电势。在曝光过程中，光强越大，电势的响应曲线越陡峭。当积分斜坡斜率的绝对值大于 Slope2 时，像素接收的光强非常大，像素输出将受到两次复位的限制。当斜坡斜率介于 Slope1 和 Slope2 之间时，像素输出只受到第一次复位限制。当斜坡斜率小于 Slope1 时，像素接收的光强很弱，像素输出将是线性的，不受复位限制。图中黑色实线表示各个区间的最大响应曲线，各个区间提前饱和的输出信号都等效于最大响应曲线。当复位屏障间隔不变时，区间数量越多，每个区间的最大响应曲线斜率越大。图中虚线代表积分斜率大于 Slope2、小于 Slope3 的像素，且在动态范围量程内受到两次复位限制。从图中可以看出，曝光时间增加产生的电势变化在 ADC 量程上对应的像素输出被压缩，复位次数越多，压缩程度越大。Slope3 决定了动态范围拓展后的最大值，Slope3 越陡，动态范围越大。但在设置复位参数时，不能随意扩大动态，还要考虑信噪比的变化，不能出现信噪比“黑洞”，因此必须遵循以下原则：

(1)每个时间区间对应的 ADC 量程由复位次数决定。例如复位 3 次，那么每个区间对应的 ADC 量程就是总量程的 1/4，由此可以确定每个区间的最大响应曲线斜率 Slope1～Slope4。

(2)复位时机由信噪比决定。当 Slope1 确定后，下一步就是确定第一次复位的时间 t_1。确定 t_1 的原则是当复位后，像素输出信噪比应等于最小阈值，这样当复位完成后，曝光继续，像素输出会快速增加，信噪比会增大并保持大于最小阈值。确定了 t_1 后即可按照原则(1)确定 Slope2，然后再按原则(2)确定 t_2，…，以此类推。

当复位时机和复位电势全部确定后，即可根据 Slope4 确定动态范围。可以看出，复位次数越多，最后一个区间的 Slope 越陡，动态范围也越大。根据仿真结果，5 次复位的动态范围比 2 次复位高出 60 dB。

1.3　昼夜兼容的实现

可变电容由图 1 所示像素结构中的电容 C_{PN}、电容 C_{boost} 和开关 HDR 组成。像素工作模式分为白昼模式和夜晚模式两种，白昼模式下采用大电容，HDR 开关开启，电荷电压转换节点电容 C_{total} 由 C_{PN} 和 C_{boost} 共同构成，如式(1)所示，此时电荷电压转换增益低，本文设计值为 20 μV/e。

$$C_{total}=\frac{q}{CG}=\frac{1.6\times10^{-19}\ \mathrm{C}}{20\ \mu\mathrm{V/e}}=8\ \mathrm{fF} \tag{1}$$

白昼模式像素具体工作时序如图 7 所示，HDR 在像素工作期间始终开启。曝光过程中通过 RESET 管对 PPD 电势进行多次复位，延长信号饱和所需曝光时间，由于电容较大，满阱容量也较大，与普通的多次复位相比，动态范围进一步提高了，适合在白天强光环境下成像。

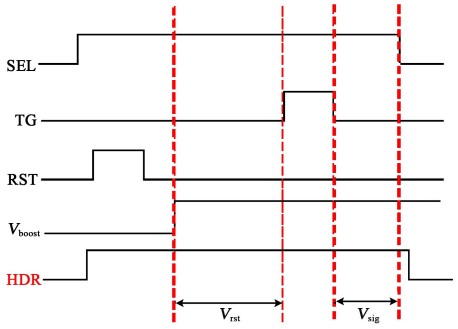


图 7　像素工作时序(白昼模式)

当工作在夜晚模式时，采用小电容，HDR 开关关闭，电荷电压转换节点电容 C_{total} 仅由 C_{PN} 构成，如式(2)所示。此时电荷电压转换增益高，本文设计值为 80 μV/e。

$$C_{PN}=\frac{1.6\times10^{-19}\ \mathrm{C}}{80\ \mu\mathrm{V/e}}=2\ \mathrm{fF} \tag{2}$$

具体工作时序如图 8 所示，HDR 开关在像素工作期间一直保持关闭。像素灵敏度与白昼模式相比提升了 4 倍，同时噪声降低，提升了微光条件下的成像质量。曝光过程中通过 RESET 管对 PPD 进行多次复位，以提高动态范围，适合在夜间微光环境下成像。

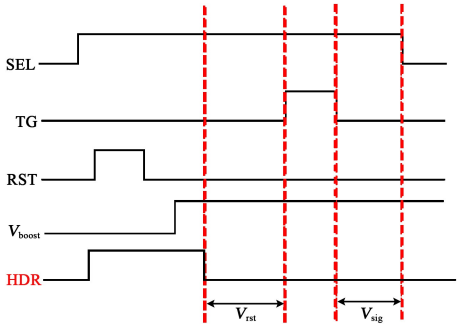


图 8　像素工作时序(夜晚模式)

1.4　仿真结果

本文使用 MATLAB 对两次复位模型进行了仿

真试验，用图像的灰度级数表示动态范围，假设灰度级数为 12 bit 即 2 048，设定阈值为 1.8，则动态范围为 20log(2 048/1.8)＝61.1 dB。为了验证本文方法的效果，根据白昼和夜晚两个场景分别设定图像灰度级数和阈值，代表场景动态范围；图像传感器根据白昼模式和夜晚模式设定普通成像的灰度级数，代表相机动态范围；然后建立两次复位仿真模型，将场景灰度级数分为三段压缩，通过比较压缩后的灰度级数与相机灰度级数来判断成像效果，最后转换为对相机动态范围的拓展。

仿真结果显示本文方法取得了良好的效果。图 9(a)是未使用多次复位的成像效果，动态较小，亮处和暗处细节都出现了丢失；图 9(b)是本方法获得的白昼模式的成像效果，图像没有出现过曝、细节清楚；图 9(c)是夜间未使用多次复位的成像效果，路灯和车灯出现了过曝，暗处细节无法分辨；图 9(d)是本文方法获得的白昼模式的成像效果，可以看到动态提高、亮处不再过曝，但暗处细节不够清楚；图 9(e)是本文方法夜晚模式的成像效果，暗处细节更加清晰，同时路灯和车灯等亮处也没有出现过曝，成像效果更好。



(a) 白天普通模式 (b) 白天多次复位白昼模式 (c) 夜间普通模式 (d) 夜间多次复位白昼模式 (e) 夜间多次复位夜晚模式

图 9 不同模式下的成像结果

2 结论

可变电容多次复位法将多次复位技术和可变电容技术相结合，白天工作在白昼模式，采用大电容多次复位提高动态范围和满阱容量，防止图像过曝；晚上工作在夜晚模式，采用小电容多次复位提高动态范围和灵敏度，提高微光成像质量，同时保持图像的信噪比始终大于阈值，使 CMOS 图像传感器具备昼夜兼容高动态成像能力。经 MATLAB 模型仿真证明，动态范围可从 61.1 dB 提高到 102 dB，高动态范围场景下的成像效果良好。下一步研究可针对复位参数设计和大小电容设计进行优化，提升 CMOS 图像传感器的成像效果并拓展应用领域。

参考文献：

[1] 徐 星，陈永平，陈世军，等. 长线列 CMOS 图像传感器的性能优化设计[J]. 半导体光电，2021，42(1)：52-56.
Xu Xing，Chen Yongping，Chen Shijun，et al. Performance optimization of long linear array CMOS image sensor [J]. Semiconductor Optoelectronics，2021，42(1)：52-56.

[2] 翟江皞，张语哲，李 明，等. 应用于微小卫星的 CMOS 图像传感器芯片设计[J]. 半导体光电，2021，42(2)：191-195.
Zhai Jianghao，Zhang Yuzhe，Li Ming，et al. The design of CMOS image sensor applied in microsatellite [J]. Semiconductor Optoelectronics，2021，42(2)：191-195.

[3] 裴志军，国澄明，姚素英，等. CMOS 图像传感器动态范围扩展技术[J]. 传感器技术，2003，22(6)：1-3，7.
Pei Zhijun，Guo Chengming，Yao Suying，et al. Dynamic range extension technique of CMOS image sensor [J]. J. of Transducer Technol.，2003，22(6)：1-3，7.

[4] Chamberlain S G，Lee J P Y. A novel wide dynamic range silicon photodetector and linear imaging array[J]. IEEE J. of Solid-State Circuits，1984，SC-19(2)：41-48.

[5] Storm G，Henderson R，Hurwitz J E D，et al. Extended dynamic range from a combined linear-logarithmic CMOS image sensor[J]. IEEE J. of Solid-State Circuits，2006，41(9)：2095-2106.

[6] Yang D，Gamal A E，Fowler B，et al. A 640×512 CMOS image sensor with ultrawide dynamic range floating-point pixel-level ADC[J]. IEEE J. of Solid-State Circuits，1999，SC-34(12)：1821-1834.

[7] Hertel D，Betts A，Hicks R，et al. An adaptive multiple-reset CMOS wide dynamic range imager for automotive vision applications[C]// 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium，2008.

作者简介：

刘业琦(1988－)，男，重庆市人，工程师，2011 年毕业于南开大学物理学专业，主要研究方向为 CMOS 图像传感器及图像处理。