用于视觉芯片的磁隧道结器件模数随机转换器

预印本

Naoya Onizawa 跨学科前沿研究所，东北大学 仙台，宫城 980-8578，日本 nonizawa@m.tohoku.ac.jp

Daisaku Katagiri 电气通信研究所，东北大学 仙台，宫城 980-8577，日本 katagiri@ngc.riec.tohoku.ac.jp

Warren J. Gross 电气与计算机工程系，麦吉尔大学 蒙特利尔，魁北克 H3A 0E9，加拿大 wjgross@mcgill.ca

Takahiro Hanyu 电气通信研究所，东北大学 仙台，宫城 980-8577，日本 hanyu@ngc.riec.tohoku.ac.jp

arXiv:2601.14640v1 [cs.ET] 21 Jan 2026

摘要

本文介绍了一种面向基于随机计算的视觉芯片、采用磁性隧道结（MTJ）器件的模拟-随机转换器。近年来，随机计算已应用于低密度奇偶校验（LDPC）解码器和图像处理器等面积高效的硬件实现。然而，将模拟信号转换为随机信号需要功耗和面积开销较大的两步转换器（模拟-数字转换和数字-随机转换）。为实现一步转换，本文采用磁隧道结器件，因为它天然具有在两种电阻态之间呈现概率性开关行为的特性。利用器件本身的概率行为，可将模拟信号直接且高效地转换为随机信号，从而降低信号转换开销。本文从理论上描述了模拟-随机信号转换，并利用器件和电路参数评估其转换特性。此外，为补偿磁隧道结器件的电阻变化对信号转换的影响，本文还考虑了该器件的电阻变异性。基于理论分析，本文采用90纳米互补金属氧化物半导体和100纳米磁隧道结技术设计了模拟-随机转换器，并使用可同时处理晶体管和磁性隧道结器件的SPICE仿真器（NS-SPICE）对其进行了验证。

关键词：随机　计算、自旋转移力矩磁性隧道结、信号转换、图像传感器、特征提取、认知系统　m

1 引言

近年来，随机计算 [1, 2] 已被用于通过称为伯努利序列的随机比特序列表示概率，从而实现面积高效的硬件实现。随机计算的一些应用包括低密度奇偶校验（LDPC）译码器 [3–7] 和图像处理器 [8–10]。随机计算

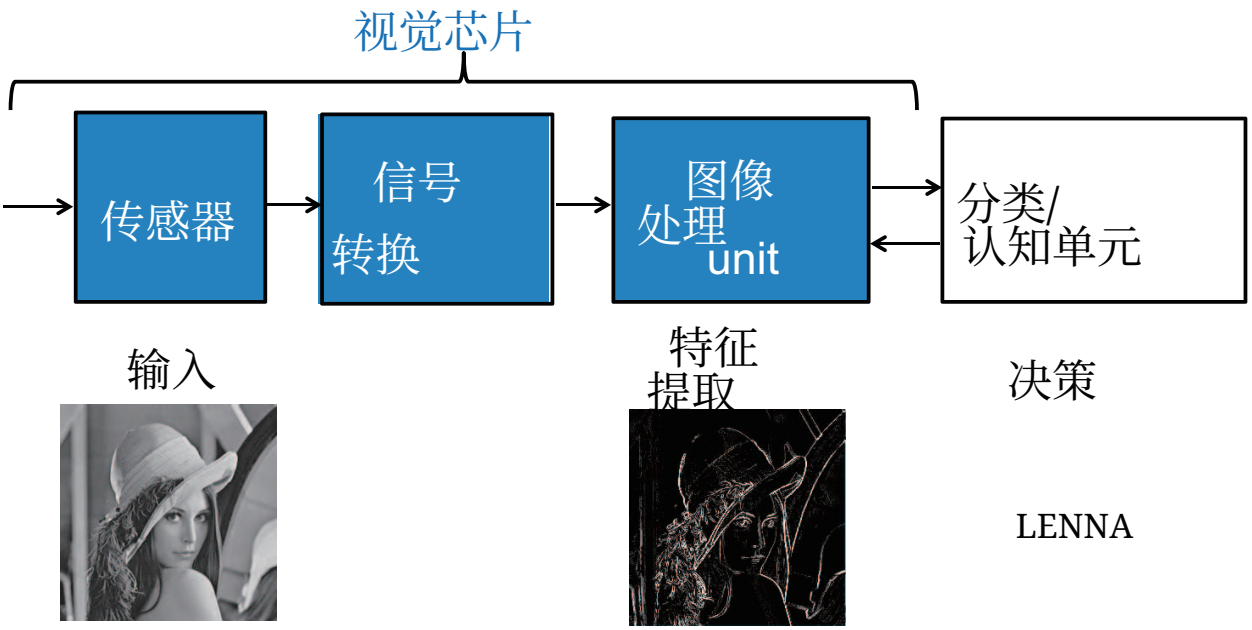


图 1：认知系统中使用的视觉芯片示例。

相比传统二进制系统通常具有更强的容错能力，因为随机计算中的位翻转对应于最低有效位（LSB）错误，而传统系统中的最高有效位（MSB）发生位翻转会严重影响数值 [11]。

基于随机计算的硬件易于高效实现，但仍需要用于连接随机硬件的接口电路。在随机图像处理器中，来自图像传感器的模拟信号通过模数转换器（ADC）转换为数字信号。随后，数字信号通过数字信号转换器转换为随机比特流。此类转换器通常体积较大，因为它们由寄存器、线性反馈移位寄存器（LFSR）和比较器构成。为了充分发挥随机计算在面积效率方面的优势，需要降低信号转换开销。在 [12], , 已有研究提出了利用忆阻器实现模拟到随机转换的概念。然而，忆阻器的切换行为非常缓慢（量级为 ms）。

本文介绍一种利用磁性隧道结（MTJ）器件、面向大规模并行视觉芯片的模拟-随机转换器。如图 1 所示，视觉芯片是认知计算中特征提取的前端图像处理器。MTJ 器件 [13] 常被用作非易失性存储器，以电阻的形式存储一位信息，并应用于磁性随机存取存储器和内容可寻址存储器 [14, 15]。MTJ 器件处于两种电阻态之一，在这两种状态之间切换的速度量级为 ns。这两种状态之间的切换行为具有概率性 [16–18]。利用这种概率行为，所提出的模拟-随机转换器可将模拟信号直接转换为随机比特流。本文从理论上描述了信号转换，并利用器件和电路参数进行评估，以确定设计模拟到随机转换时的合适参数。

本工作的简短版本曾发表于 [19], , 但其中仅介绍了模拟-随机转换器的理论分析。本文介绍的扩展工作包括：（1）通过考虑电压偏置效应，对模拟-随机转换器进行更详细的理论分析；（2）考虑MTJ器件的电阻变化；（3）在晶体管级设计并仿真模拟-随机转换器；以及（4）仿真一个包含所提出的转换器和随机边缘检测器的简易视觉芯片。

本文其余部分安排如下。第二节回顾磁性隧道结（MTJ）器件，并介绍其概率行为。第三节介绍随机计算。第四节介绍采用MTJ器件的模拟-随机转换器，并展示其电路实现。第五节介绍电阻变异性对转换器的影响，以及针对变异性的补偿技术。第六节利用器件和电路参数评估信号转换特性，并通过晶体管级仿真器验证信号转换。第七节总结全文。

2 磁隧道结器件的概率性开关行为

2.1 磁隧道结器件

图2(a)展示了一个垂直自旋转移力矩（STT）磁隧道结器件 [13]，该器件堆叠在互补金属氧化物半导体层 [13] 上。磁隧道结器件由三个主要层构成：自由层、隧穿势垒层和固定层；实际器件中还包含许多附加层。固定层中的自旋方向是固定的，而自由层中的自旋方向可以改变为两个方向之一。如果两层中的自旋方向相同，磁隧道结器件处于平行态，此时磁性隧道结电阻（R_{MTJ}）较低（R_P）。否则，器件处于反平行态，此时 R_{MTJ} 较高（R_{AP}）。

在自旋转移力矩磁性隧道结器件中，利用电流信号 I_w 将一位信息存储为电阻。图 2 (b) 展示了 R_{MTJ} 与 I_w 之间的特性。通过在特定时段（例如数纳秒，见 [13]）施加大小为 $I_{AP->P}$ 的写入电流 I_w，可将磁隧道结器件的反平行态切换为平行态。从平行态切换到反平行态时，则使用方向相反的 I_w，其电流大小为 $I_{P->AP}$。

2.2 切换概率

在 [16–18] 中，磁隧道结器件的切换行为具有概率性。在一些文献中，这种概率行为被用于磁性随机存取存储器、突触系统和随机数生成器 [20–22]。图 3 展示了磁隧道结器件的概率行为。假设磁隧道结器件的初始状态为平行态。当向磁隧道结器件写入一位信息时，在特定时段 t 内施加写入电流信号 I_w。磁隧道结器件的切换概率 p_w 定义如下 [16]:

$$p_w = 1 - \exp(-t/\tau_p), \tag{1}$$

其中，τ_p 是切换时间常数。式（1）基于 [23]，其模型源自 [24]。τ_p 在区域 I 或区域 II 中计算，具体如下所述。

为计算 p_w，需要定义临界电流 I_c。I_c 在两个区域中的定义不同：区域 I（$\tau_p \gg \tau_0$）和区域 II（$\tau_p <$，约为 τ_0的数十倍），其中 τ_0 是热开关的尝试时间（约 1 纳秒）（参见 [16]）。在区域 I（热激活区）中，磁隧道结器件的状态主要因热效应而改变。热效应表示为 $\ln(\tau_p/\tau_0) = (E/k_BT)$，其中 E 是磁性单元的实际磁各向异性能，k_B 是玻尔兹曼常数，T 是绝对温度。I_c 定义如下：

$$I_c = I_{c0t}(1 - (k_BT/E)\ln(\tau_p/\tau_0)), \tag{2}$$

其中，I_{c0t} 是在 $\tau_p = \tau_0$处外推得到的 I_c。在区域 II 中，磁隧道结器件的状态主要通过自旋注入效应改变。I_c 定义如下：

$$I_c = I_{c0s}\left(1 + \frac{\tau_{relax}}{\tau_p}\ln\left(\frac{\pi/2}{\sqrt{k_BT/E}}\right)\right), \tag{3}$$

其中，I_{c0s} 是 I_c 在 $\tau_p \sim \infty$ 处的外推 I_{c0s}，τ_{relax} 是磁矩的弛豫时间。利用这种概率行为，可以为基于随机计算的图像处理器设计模拟-随机转换器。

3 随机计算

随机计算于 20 世纪 60 年代首次提出 [1]，近年来已应用于一些领域 [2],，例如 LDPC译码 [3–7] 和图像处理 [8–10]。随机计算在概率域中运算，概率由称为伯努利序列的随机比特序列表示。概率由序列中 1 或 0 的频率决定，而同一概率可以用许多不同的比特序列表示。例如，不同的比特序列 (1010) 和 (0011) 表示相同的概率。

随机计算的优势在于硬件实现成本低。图 4 展示了一个基于随机计算的乘法器。设 $p(A)$ = Pr(A=1) 和 $p(B)$ = Pr(B=1) 分别为两个输入比特流所表示的概率，$p(C)$ = Pr(C=1) 为输出比特流所表示的概率。乘法可描述为$p(C) = p(A) * p(B)$，只需使用一个二输入与门即可实现，其中计算以位串行方式进行。因此，该技术可为使用概率进行计算的算法（如 LDPC译码器）实现高效的硬件。

相比之下，随机计算的缺点在于需要进行信号转换。图 5 (a) 展示了用于随机计算的传统模拟-随机转换器。例如，在图像处理中，传感器接收模拟信号

，随后使用模数转换器 (ADC) 将其转换为数字信号。数字信号存储在寄存器中，然后与随机比特进行比较，这些随机比特通常由线性反馈移位寄存器 (LFSR) 生成，以转换为随机信号。三种信号之间的关系总结于图 6 (a) 中。

模数转换器的功耗在图像传感器的总功耗中占比较大（例如，在 [25] 中占 65%）。此外，在随机电路中，数字-随机转换器往往占用较大面积。为估算其开销，使用 Verilog-HDL 设计了基于随机计算的边缘检测电路 [8]，并采用 Synopsys Design Compiler 在 Silterra 0.13 μm CMOS 技术上进行综合。综合结果表明，当线性反馈移位寄存器的位宽为 10 比特时，数字-随机转换器的面积占总面积的 43.6%。
为降低信号转换的开销，本文提出了一种模拟-随机转换器，如图 5 (b) 所示，该转换器可将模拟信号直接转换为随机信号。

4 使用磁隧道结器件进行模拟到随机转换

4.1 总体结构

图 7 展示了所提出的采用磁性隧道结器件的模拟-随机转换器。假设对数图像传感器接收到模拟电流信号，并实现高动态范围 [26–28]。模拟电压信号是图像传感器的输出，也是模拟-随机转换器的输入。该模拟-随机转换器由三个晶体管和一个磁隧道结器件构成。转换器的输出连接至锁存器，用于存储生成的随机比特。

图 8 展示了所提出的模拟-随机转换器的电路运行。转换器在三个阶段之一运行：写入、置位和擦除。擦除阶段结束后，转换器返回写入阶段。

4.2 写入阶段

在写入阶段，模拟输入电流信号 I_{ph} 按如下方式转换为模拟输出电压信号 V_{ph}：

$$V_{ph} = V_{dd} - n\frac{k_B T}{q}\ln\Big(\frac{I_{ph}}{I_{d0}}\Big), \tag{4}$$

其中，n 为 1.3 - 2，I_{d0} 为依赖于工艺的参数，q 为元电荷 [27]。随后，将 V_{ph} 施加至模拟-随机转换器，以生成写入电流信号 I_w，其定义如下：

$$I_w = \frac{V_{dd} - V_{bias}}{R_{MTJ}} - n\frac{k_B T}{qR_{MTJ}}\ln\Big(\frac{I_{ph}}{I_{d0}}\Big), \tag{5}$$

其中，V_{bias} 是用于控制 I_w的偏置电压。
电阻 R_{MTJ}会随施加于磁隧道结器件上的偏置电压 V_b(=V_{ph}-V_{bias})而变化，其中电流流经磁隧道结器件 [13]。特别是，反平行态下的电阻比平行态下的电阻对偏置电压更敏感。为减轻偏置电压效应，转换器中的磁隧道结器件采用平行态作为初始态。考虑偏置电压效应时，平行态下的电阻定义为 R_{Pb}，其描述如下：

$$R_{Pb} = R_P(1 + BC1|V_b| + BC2|V_b|^2), \tag{6}$$

其中，BC1 和 BC2 分别为第一和第二偏置系数。R_P 是偏置电压 e 为 0 时 I_w 重新定义为

$$I_w = \frac{V_{dd} - V_{bias}}{R_{Pb}} - n\frac{k_B T}{qR_{Pb}}\ln\Big(\frac{I_{ph}}{I_{d0}}\Big). \tag{7}$$

假设磁隧道结器件的切换特性由公式（3）所描述的区域 II 决定。切换时间常数 τ_p定义如下：

$$\tau_p = \frac{I_{c0s}\tau_{relax}\ln\frac{\pi/2}{\sqrt{k_B T/E}}}{I_w - I_{c0s}}. \tag{8}$$

非切换概率 $\overline{p_w}$ 定义为 $1 - p_w$，其中 p_w 由公式 (1) 描述。对数域中的非切换概率 $\ln\overline{p_w}$ 描述如下：

$$\ln\overline{p_w} = -t/\tau_p. \tag{9}$$

根据公式 (8) 和 (9)，$\ln\overline{p_w}$ 定义如下：

$$\ln\overline{p_w} = -\alpha(I_w - I_{c0s}), \tag{10}$$

其中，α 为 $t/\Big(I_{c0s}t_{relax}\ln\Big(\frac{\pi/2}{\sqrt{k_BT/E}}\Big)\Big)$。利用公式（7）和（10），$\ln\overline{p_w}$ 重新定义如下：

$$\ln\overline{p_w} = \beta\ln\Big(\frac{I_{ph}}{I_{d0}}\Big) + \alpha\Big(I_{c0s} - \frac{(V_{dd}-V_{bias})}{R_{Pb}}\Big), \tag{11}$$

其中，$\beta = \alpha n\frac{k_BT}{qR_{Pb}}$。为确保模拟输入信号 I_{ph}与随机比特流的概率 p_w之间呈线性关系，β 必须等于 1。模拟-随机转换器需要这种线性关系。由此可推导出 α 如下：

$$\alpha = \frac{qR_{Pb}}{nk_BT}, \tag{12}$$

因此，脉冲持续时间 t为：

$$t = \Big(I_{c0s}t_{relax}\ln\Big(\frac{\pi/2}{\sqrt{k_BT/E}}\Big)\Big)\cdot\frac{qR_{Pb}}{nk_BT}. \tag{13}$$

4.3 置位和擦除阶段

在 p_w处将一位信息存储到磁隧道结器件后，转换器进入图 8（b）所示的置位阶段。在置位阶段，V_{set} 为高电平，因此电压信号 V_R由磁隧道结状态决定，如下所示：

$$V_R = \begin{cases} \text{High (“1”)} & \text{if } R_{MTJ}\text{=}R_P \\ \text{Low (“0”)} & \text{otherwise} \end{cases} \tag{14}$$

然后，V_R 存储在转换器旁边的锁存器中，如图 7 所示。

输出随机比特后，转换器进入图 8 (c) 所示的擦除阶段。在擦除阶段，施加擦除电流 I_e，将 R_{MTJ}恢复为 R_P，其中 I_e的电流方向与I_w的电流方向相反。最后，操作阶段返回写入阶段，以生成新的随机比特。

5 磁性隧道结变化性的考量

5.1 理论分析

本节将考虑磁隧道结器件的电阻变化。在模拟-随机转换器中，电阻变化会影响方程（7）中的写入电流，进而影响方程（11）中的切换概率。在这种情况下，模拟输入信号无法在转换器中正确转换为随机比特流。

此处，电阻变化定义为 ΔR。考虑电阻变化后的写入电流 I'_w 根据方程（7）定义如下：

$$I'_w \simeq \frac{V_{dd}-V'_{bias}}{(R_{Pb}+\Delta R)} - n\frac{k_BT}{q(R_{Pb}+\Delta R)}\ln\Big(\frac{I_{ph}}{I_{d0}}\Big), \tag{15}$$

其中，V'_{bias} 是在考虑磁性隧道结变化性时对 V_{bias} 更新后的参数。假设方程（6）中定义的 R_{Pb} 不受将 V_{bias} 改为 V'_{bias}的影响。

此外，考虑磁性隧道结变化性时的切换概率 p'_w，根据方程（11）定义如下：

$$\ln\overline{p'_w} \simeq \beta'\ln\Big(\frac{I_{ph}}{I_{d0}}\Big) + \alpha'\Big(I_{c0s} - \frac{(V_{dd}-V'_{bias})}{(R_{Pb}+\Delta R)}\Big), \tag{16}$$

其中，α' 和 β' 分别是在考虑磁性隧道结变化性时对 α 和 β更新后的参数。如这两个方程所示，写入电流和切换概率会受到 ΔR的影响。为了补偿 ΔR效应，需要控制三个参数，即 α'、β'和 V_{bias}。

首先，让我们考虑方程（16）中的 β'。由于 β 是 $\alpha n\frac{k_BT}{qR_{Pb}}$，$\beta'$ 定义如下：

$$\beta' \simeq \frac{t'}{\Big(I_{c0s}t_{relax}\ln\Big(\frac{\pi/2}{\sqrt{k_BT/E}}\Big)\Big)}\cdot\frac{nk_BT}{q(R_{Pb}+\Delta R)}, \tag{17}$$

其中， t' 是考虑电阻变化时 t 的更新参数。在方程（17）中，存在一个变量参数 t'，用于补偿电阻变化。为了在电阻变化的情况下实现模拟输入信号 I_{ph} 与随机比特流的概率 p_w 之间的线性关系， β' 必须为 1。因此，关于 β' 的电阻变化通过写入尝试时间 t' 进行补偿，如下所示：

$$t' \simeq \Big(I_{c0s} t_{relax} \ln\Big(\frac{\pi/2}{\sqrt{k_B T/E}}\Big)\Big) \cdot \frac{q(R_{Pb}+\Delta R)}{n k_B T}. \tag{18}$$

利用方程（13）和（18）， t' 重新定义如下：

$$t' \simeq t(1+\frac{\Delta R}{R_{Pb}}). \tag{19}$$

当 β' 等于1时，根据方程（12）， α' 表示为：

$$\alpha' \simeq \frac{q(R_{Pb}+\Delta R)}{n k_B T}. \tag{20}$$

接下来，考虑方程（16）中的 α' 和 $(V_{dd}-V'_{bias})$ $(R_{Pb}+\Delta R)$。为了在电阻变化下保持相同的切换概率，我们需要利用方程（11）和（16）满足以下方程：

$$\alpha\Big(I_{c0s} - \frac{(V_{dd}-V_{bias})}{R_{Pb}}\Big) \simeq \alpha'\Big(I_{c0s} - \frac{(V_{dd}-V'_{bias})}{(R_{Pb}+\Delta R)}\Big) \tag{21}$$

根据（12）、（20）和（21）， V'_{bias} 定义如下：

$$V'_{bias} \simeq V_{bias} - \Delta R I_{c0s}. \tag{22}$$

根据理论分析，我们可以控制 t' 和 V_{bias} ，以在电阻变化下保持相同的切换概率。

5.2 电阻变化的补偿 **y**

图 9 展示了考虑电阻变化的所提模拟-随机转换器框图。该转换器由脉冲信号发生器、随机比特发生器、计数器和概率控制器组成。假设参数 t' 和 V'_{bias} 在使用转换器之前被设置为校准步骤。

首先，使用 t 和 V_{bias} 的默认参数测试输入电压信号 V_{ph}，以生成概率为 50% 的随机比特流。然后，对比特流中 1 的数量进行计数，并在概率控制器中检查概率。如果概率不是 50%，则对 V'_{bias} 进行控制。例如，如果概率低于 50%，则磁性隧道结电阻大于不存在变异性时的电阻。

获得 50% 的概率后，测试不同的输入电压信号以生成不同的概率。如果模拟输入信号与概率之间的关系不是线性的，则控制 t' 以设置 β' 1。设置好所需的两个参数后，模拟-随机转换器即可启动。

6 评估

6.1 理论分析

所提出的模拟-随机转换器使用表1所示的器件和电路参数进行评估。图像传感器中的参数 I_{d0} 和 n 源自 [27]；器件参数（如 I_{c0s}、 R_P、 R_{AP}、 E/K_BT 和 t_{relax}）则源自 [13, 16]。电路参数基于 ASPLA 90纳米 CMOS工艺，磁隧道结器件参数基于 100纳米磁隧道结工艺。

图10根据方程（7）展示了磁隧道结器件的写入电流 I_w 与模拟输入电流 I_{ph} 之间的关系。在方程（7）中， I_{ph} 只是一个变量。除 V_{bias} 之外，其余参数均取决于器件且为常数。 V_{bias} 用于控制 I_w 的量。

图11展示了当 V_{bias} 为0.4 V时，根据方程（8）得到的切换时间常数倒数 τ_p 与 I_w 之间的关系。当临界电流 I_{c0s} 减小时， τ_p 也会减小。这意味着，当 I_{c0s} 较小时，使用相同大小的电流 I_w，磁隧道结器件更容易切换到另一种状态。随着磁隧道结技术的进步， I_{c0s} 会减小 [29], ，从而降低写入能量和写入尝试时间 t_s。

表1：器件和电路参数。

参数	Name	值
V_{dd}	电源电压	1.2 V
I_{d0}	-	0.1 纳安
n	-	2
T	绝对温度	300 K
I_{c0s}	临界电流	50 微安至 200 微安
R_P	平行态电阻	1 kΩ
R_{AP}	反平行态电阻	3 kΩ
E/k_BT	-	60
t_{relax}	弛豫时间	500 ps
t	I_w的尝试时间	1 - 10 ns
V_{bias}	偏置电压	0 - 0.4 V

图12展示了当 V_{bias} 为0.4 V、 I_{c0s} 为200 微安时，根据方程（11）得到的磁隧道结器件非切换概率 $\overline{p_w}$与 I_{ph} 之间的关系。尝试时间 t在1至10纳秒之间变化。当 I_{ph} 增加时，I_w 减小，从而降低 p_w。根据 t，方程（11）中的参数 β会发生变化，进而影响图12中的斜率。当通过选择 t = 4.73纳秒将 β 设为1时， p_w 与 I_{ph} 之间呈线性关系，从而实现模拟到随机转换。

6.2 该在线视频精品 考虑磁性隧道结变异性的理论分析 性

图 13 显示了磁隧道结器件电阻变化下 $\overline{p'_w}$ 与 I_{ph} 之间的关系，其中 V'_{bias} 为 0.4 V， I_{c0s} 为 200 微安， t 为 4.73 纳秒。该关系由公式 (16) 给出。考虑最大为 10% 的电阻变化。与不考虑变异性的关系相比，考虑变异性时的切换概率有所不同。

为补偿变异性，如图 14 所示，仅控制 V'_{bias}。 V'_{bias} 根据公式 (22) 确定。设置 V'_{bias} 后，切换概率接近不考虑电阻变化时的切换概率。然而，切换概率与模拟输入电流信号之间并未呈现线性关系。

为同时控制 $V_{bias'}$ 和 t'，如图15所示，在电阻变化的影响下，切换概率与模拟输入电流信号之间的关系几乎呈线性。 t' 根据公式(19)确定。

6.3 仿真结果

为验证所提出的模拟-随机转换器的电路运行，使用图12中采用的器件和电路参数对该转换器进行设计。图16显示了所提出的模拟-随机转换器的仿真波形。该转换器使用NS-SPICE [23]在90纳米CMOS和100纳米磁隧道结技术下进行仿真。NS-SPICE是一种晶体管级仿真器，可处理晶体管和磁性隧道结器件。转换器的周期时间设为10纳秒，其中写入阶段为5纳秒，置位阶段为1纳秒，擦除阶段为4纳秒。在写入阶段，写入电流持续4.73纳秒，无电流持续0.27纳秒。写入电流 I_w为236微安，对应的切换概率 p_w为50%。

在本次仿真中，所提出的转换器生成了三个随机比特。请注意，由于偏置电压效应，磁隧道结器件的电阻不同于 R_P 或 R_{AP}。在第一次和第二次试验中，磁隧道结器件的电阻在写入阶段从平行态变为反平行态。因此，转换器的输出V_{OUT} 为“0”。相比之下，在第三次试验中，即使将 I_w 施加到磁隧道结器件上，其电阻也未发生变化。在这种情况下， V_{OUT} 为“1”。
图17展示了所提出的模拟-随机转换器在写入阶段的蒙特卡罗仿真。试验次数为100， I_w 为236微安，对应于50%的 p_w。仿真波形表明，磁隧道结器件的切换行为具有概率性，且开关时序是随机的。在本次仿真中，将一个比特写入磁隧道结器件后，其电阻以50%的概率变为 R_{AP}，即3 kΩ。

6.4 面向认知系统的视觉芯片设计示例

图18展示了一个简易视觉芯片的仿真模型，其中包含一个误差注入模块。假设该简易视觉芯片接收来自传感器的图像模拟输入信号，并提取图像特征，供认知系统使用。

特征提取单元采用随机边缘检测器 [8, 9]设计。该仿真模型使用 MATLAB 设计并评估，其中模拟-随机转换器被简化建模为随机比特发生器。这是因为磁隧道结器件的精确模型需要进行晶体管级建模。也可以在 MATLAB 中集成 NS- SPICE，以模拟 [30] 中磁隧道结器件的切换行为。该仿真模型还包含一个误差注入模块，用于模拟模拟-随机转换器可能产生的错误比特。

图19(a)展示了在输入软错误影响下，基于图18得到的随机边缘检测结果。我们使用标准灰度测试图像 LENNA 来评估错误的影响。随机比特数设为1,000。模拟图像表明，输入错误并未显著影响图像质量，因为随机计算对软错误具有很强的鲁棒性。相比之下，如图19(b)所示，传统二进制实现受到软错误的严重影响。因此，即使所提出的转换器以较低错误率生成错误的随机比特，随机边缘检测结果仍可用于认知系统。

7 结论

本文为基于随机计算的视觉芯片提出了一种使用磁隧道结器件的模拟到随机转换器。得益于磁隧道结器件的概率行为，来自图像传感器的模拟信号无需使用耗费大量功耗和面积的模数转换器及数字到随机转换器，即可直接、高效地转换为随机比特流。本文从理论上描述了基于磁隧道结的模拟到随机转换，并使用器件和电路参数对其进行了评估。结果表明，通过为写入电流设定特定的尝试时间，可以实现模拟信号与随机比特流概率之间的线性关系。此外，本文还从理论上分析了磁隧道结器件的电阻变化。分析表明，在使用转换器之前的校准步骤中，通过控制写入的尝试时间和偏置电压，可以补偿这种变化。基于理论分析，我们采用90纳米CMOS和100纳米磁隧道结技术设计了模拟到随机转换器。使用NS-SPICE对所提出的转换器进行仿真后，它能够生成随机比特流。此外，为面向未来的认知系统，我们还设计了一个包含模拟到随机转换器和随机边缘检测器的简易视觉芯片，并使用MATLAB进行了仿真。

未来的工作包括为制造而对所提出的转换器进行更详细的电路实现，其中包括校准模块。此外，还包括设计一个完整的认知系统，其中包含基于模拟-随机转换器的随机视觉芯片。

致谢

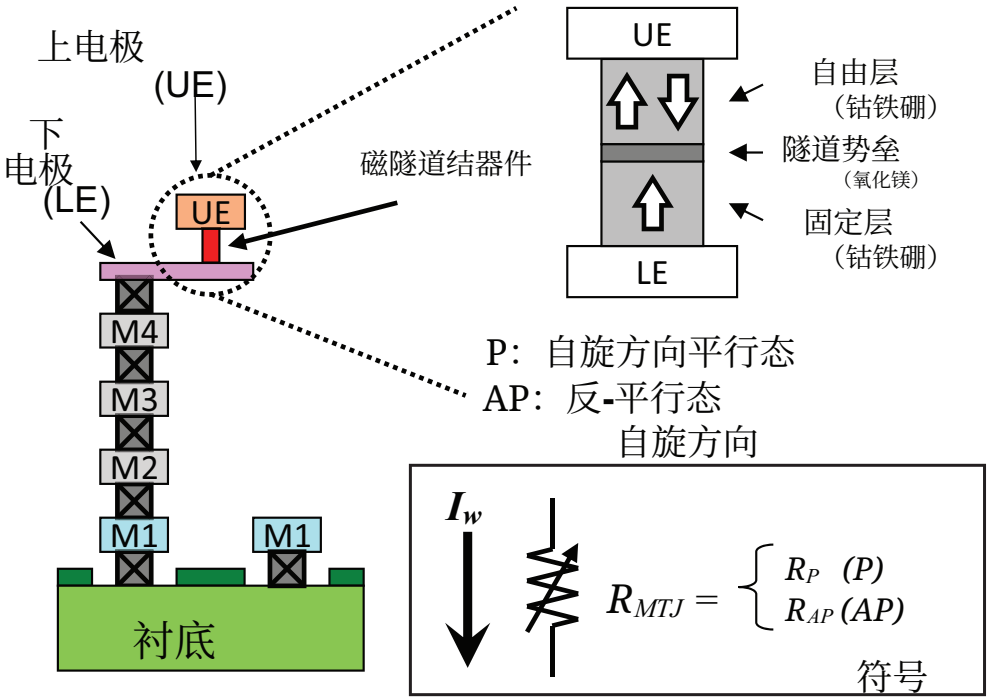
本研究获得了日本学术振兴会科研补助金编号26700003和文部科学省Brainware LSI项目的支持。本研究还得到东京大学超大规模集成电路设计与教育中心（VDEC）的支持，并与新思科技公司合作开展。

参考文献

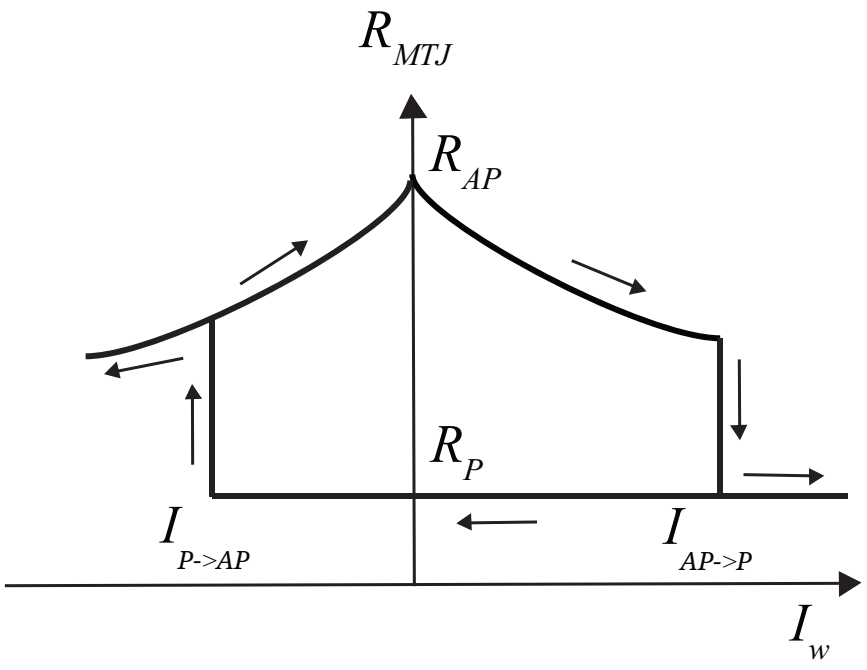
[1] B. R. Gaines，“随机计算系统”，Plenum《高级信息系统科学》，第2卷，第2期，第37–172页，1969年。[2] B. Brown和H. Card，“随机神经计算：I. 计算单元”，IEEE 计算机汇刊，第50卷，第9期，第891–905页，2001年9月。[3] V. Gaudet和A. Rapley，“使用随机计算进行迭代译码”，《电子快报》，第39卷，第3期，第299–301页，2003年2月。[4] S. Sharifi Tehrani、W. Gross和S. Mannor，“低密度奇偶校验码的随机译码”，《IEEE通信快报》，第10卷，第10期，第716–718页，2006年10月。[5] S. Sharifi Tehrani、S. Mannor和W. Gross，“全并行随机低密度奇偶校验译码器”，《IEEE信号处理汇刊》，第56卷，第11期，第5692–5703页，2008年11月。[6] S. Sharifi Tehrani、A. Naderi、G.-A. Kamendje、S. Hemati、S. Mannor和W. Gross，“用于随机低密度奇偶校验译码的基于多数表决的跟踪预测存储器”，《IEEE信号处理汇刊》，第58卷，第9期，第4883–4896页，2010年9月。[7] N. Onizawa、W. Gross、T. Hanyu和V. Gaudet，“低密度奇偶校验码的无时钟随机译码：架构与仿真模型”，《信号处理期刊》，2013年9月。[8] P. Li和D. Lilja，“使用随机计算实现数字图像处理算法”，载于2011年第29届 IEEE 计算机设计国际会议（ICCD），2011年10月，第154–161页。

[9] P. Li、D. Lilja、W. Qian、K. Bazargan和M. Riedel，“随机比特流上的计算：数字图像处理案例研究”，IEEE 超大规模集成电路系统汇刊，第22卷，第3期，第449–462页，2014年3月。[10] N. Onizawa、D. Katagiri、K. Matsumiya、W. Gross和T. Hanyu，“基于随机计算的Gabor滤波器”，IEEE 信号处理快报，第22卷，第9期，第1224–1228页，2015年9月。[11] W. Qian、X. Li、M. Riedel、K. Bazargan和D. Lilja，“采用随机逻辑的容错计算架构”，IEEE 计算机汇刊，第60卷，第1期，第93–105页，2011年1月。[12] P. Knag、W. Lu和Z. Zhang，“由忆阻器实现的原生随机计算架构”，IEEE 纳米技术汇刊，第13卷，第2期，第283–293页，2014年3月。[13] S. Ikeda等，“一种垂直各向异性钴铁硼–氧化镁磁性隧道结”，《自然·材料》，第9卷，第721–724页，2010年。[14] T. Kawahara、R. Takemura、K. Miura、J. Hayakawa、S. Ikeda、Y. M. Lee、R. Sasaki、Y. Goto、K. Ito、T. Meguro、F. Matsukura、H. Takahashi、H. Matsuoka和H. Ohno，“2 Mb自旋转移力矩随机存取存储器（SPRAM）：支持逐比特双向电流写入和平行方向电流读取”，IEEE 固态电路期刊，第43卷，第1期，第109–120页，2008年1月。[15] S. Matsunaga等，“采用分层功率门控实现的、能耗降低99%的非易失性多功能内容寻址存储器芯片，用于大规模并行全文搜索引擎”，载于2013年超大规模集成电路研讨会（VLSIC），2013年6月，第C106–C107页。[16] K. Yagami、A. Tulapurkar、A. Fukushima和Y. Suzuki，“自旋转移磁化翻转的本征临界电流检测”，IEEE 磁学汇刊，第41卷，第10期，第2615–2617页，2005年10月。[17] Z. Diao、Z. Li、S. Wang、Y. Ding、A. Panchula、E. Chen、L.-C. Wang和Y. Huai，“磁性隧道结中的自旋转移力矩翻转及自旋转移力矩随机存取存储器”，《物理学杂志：凝聚态》，第19卷，第16期，第165209页，2007年。[在线]。可访问：http://stacks.iop.org/0953-8984/19/i=16/a=165209[18] H. Zhao、Y. Zhang、P. Amiri、J. Katine、J. Langer、H. Jiang、I. Krivorotov、K. Wang和J.-P. Wang，“自旋力矩驱动翻转概率密度函数不对称性”，IEEE 磁学汇刊，第48卷，第11期，第3818–3820页，2012年11月。[19] N. Onizawa、D. Katagiri、W. Gross和T. Hanyu，“使用磁性隧道结器件的模拟-随机转换器”，载于2014年IEEE/ACM 纳米尺度架构国际研讨会（NANOARCH），2014年7月，第59–64页。[20] Y. Zhang、W. Zhao、J.-O. Klein、W. Kang、D. Querlioz、C. Chappert和D. Ravelosona，“基于随机翻转的多层单元自旋转移力矩磁阻式随机存取存储器”，载于2013年第13届 IEEE 纳米技术会议（IEEE-NANO），2013年8月，第233–236页。[21] A. Vincent、J. Larroque、W. Zhao、N. Ben Romdhane、O. Bichler、C. Gamrat、J.-O. Klein、S. Galdin-Retailleau和D. Querlioz，“作为随机忆阻突触的自旋转移力矩磁性存储器”，载于2014年 IEEE 国际电路与系统研讨会（ISCAS），2014年6月，第1074–1077页。[22] A. Fukushima、T. Seki、K. Yakushiji、H. Kubota、H. Imamura、S. Yuasa和K. Ando，“自旋骰子：一种基于自旋电子学的可扩展真正随机数生成器”，《应用物理快报》，第7卷，第8期，第083001页，2014年。[在线]。可访问：http://stacks.iop.org/1882-0786/7/i=8/a=083001[23] N. Sakimura、R. Nebashi、Y. Tsuji、H. Honjo、T. Sugibayashi、H. Koike、T. Ohsawa、S. Fukami、T. Hanyu、H. Ohno和T. Endoh，“包含精确磁性隧道结模型的高速模拟器，用于自旋电子集成电路设计”，载于2012年 IEEE 国际电路与系统研讨会（ISCAS），2012年5月，第1971–1974页。[24] N. D. Rizzo、M. DeHerrera、J. Janesky、B. Engel、J. Slaughter和S. Tehrani，“用于磁阻式随机存取存储器的亚微米磁性隧道结中的热激活磁化反转”，《应用物理快报》，第80卷，第13期，2002年。[25] Y. Oike和A. El Gamal，“具有逐列 ΣΔ 模数转换器和可编程压缩感知的CMOS图像传感器”，IEEE 固态电路期刊，第48卷，第1期，第318–328页，2013年1月。[26] D. Stoppa、A. Simoni、L. Gonzo、M. Gottardi和G.-F. Dalla Betta，“具有132 dB动态范围的新型CMOS图像传感器”，IEEE 固态电路期刊，第37卷，第12期，第1846–1852页，2002年12月。[27] H. Amhaz、H. Zimouche和G. Sicard，“用于包含运动检测方案的对数型CMOS图像传感器的智能读出技术”，载于2011年第9届 IEEE 新型电路与系统国际会议（NEWCAS），2011年6月，第49–52页。[28] W.-F. Chou、S.-F. Yeh、C.-F. Chiu和C.-C. Hsieh，“具有像素固定模式噪声抑制和可调响应曲线的线性对数型CMOS图像传感器”，IEEE 传感器期刊，第14卷，第5期，第1625–1632页，2014年5月。

[29] H. Sato、T. Yamamoto、M. Yamanouchi、S. Ikeda、S. Fukami、K. Kinoshita、F. Matsukura、N. Kasai 和 H. Ohno，“采用单界面和双界面缩放至1X nm的CoFeB-MgO磁性隧道结特性的综合研究”，载于《2013年IEEE国际电子器件会议》（IEDM），2013年12月，第3.2.1–3.2.4页。[30] S. Oosawa、T. Konishi、N. Onizawa 和 T. Hanyu，“使用数字控制概率锁定环设计基于自旋转移力矩磁性隧道结的真随机数生成器”，载于《第13届IEEE新型电路与系统会议》（NEWCAS），2015年6月，第1–4页。



(a)



(b)

图 2：自旋转移 力矩（STT）磁隧道结器件：（a）堆叠在 CMOS层上；（b）其电阻-电流特性。

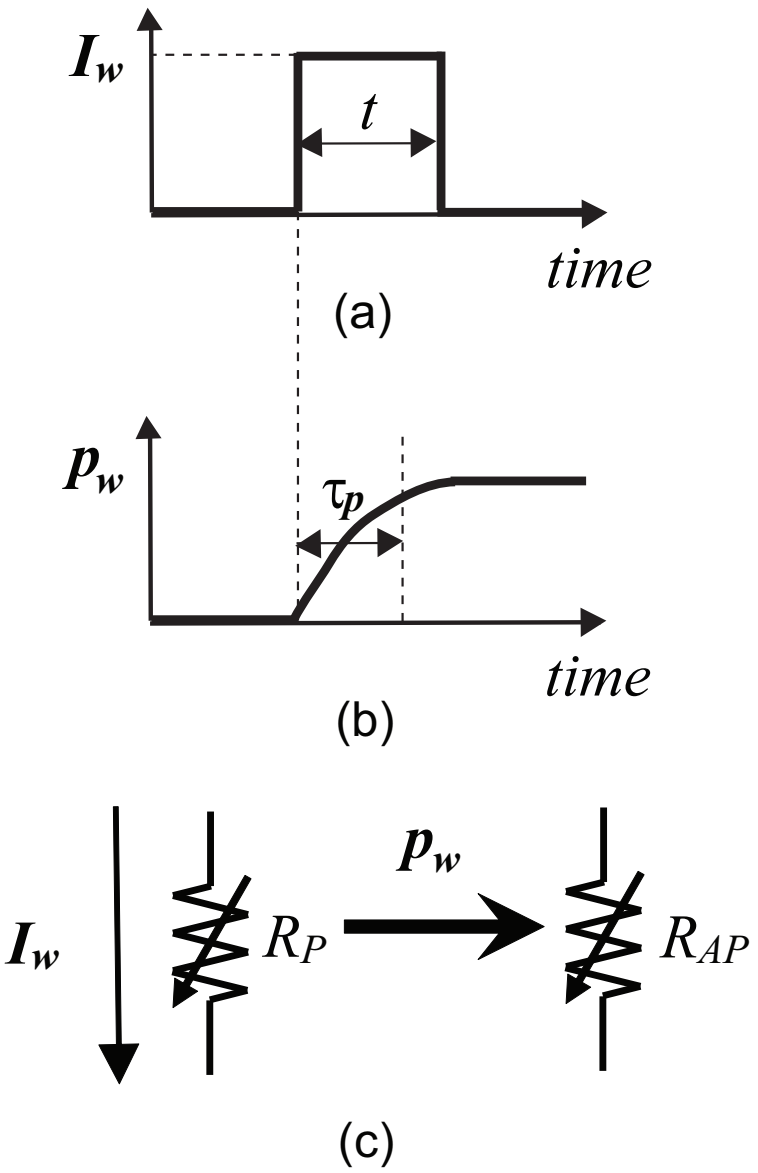


图3：磁隧道结器件的概率行为：(a) 写入电流（I_w），(b) 切换概率（p_w）和 (c) 切换行为。磁隧道结状态以概率方式切换到另一状态。

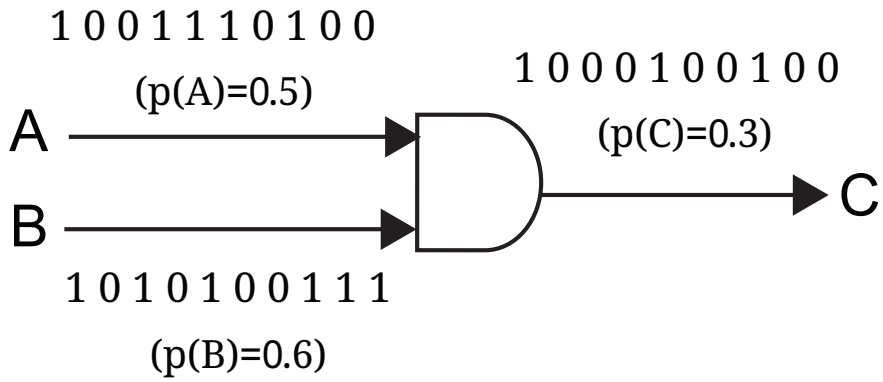


图4：基于随机计算、采用二输入与门设计的乘法器。

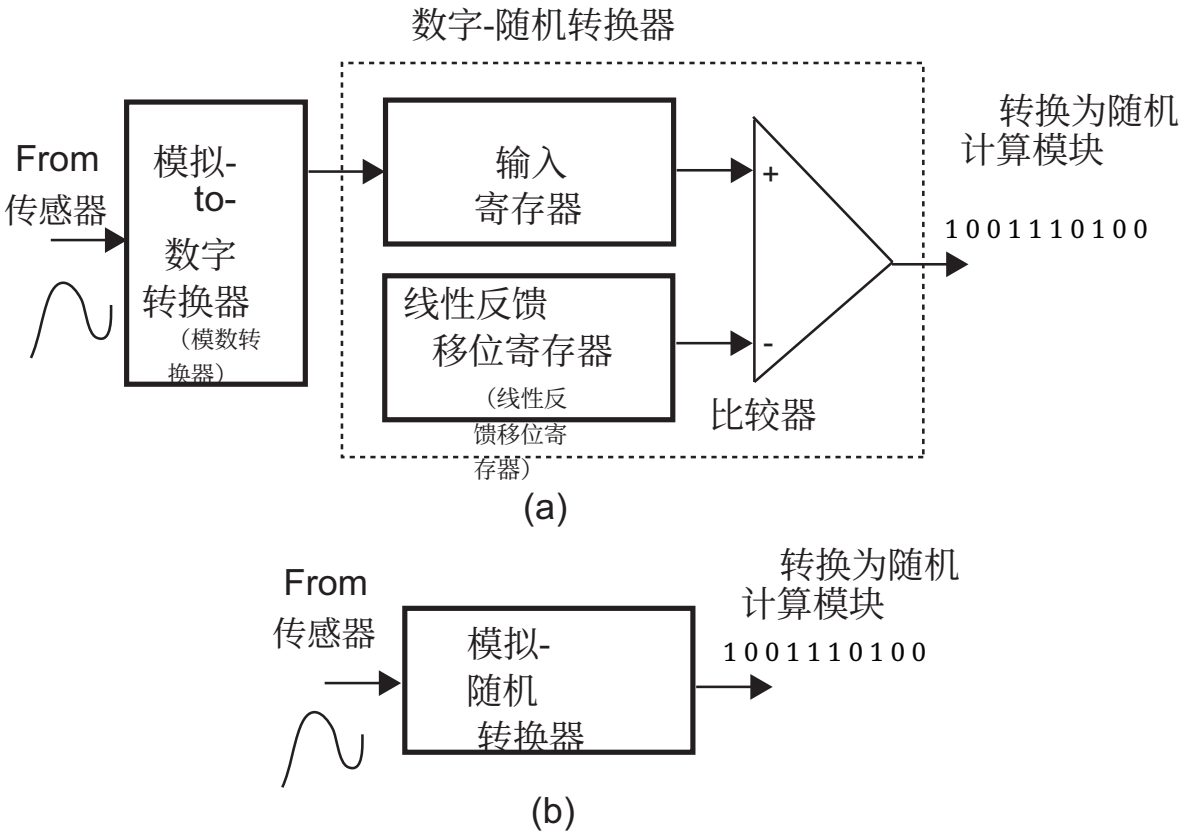


图5：模拟-随机转换器：（a）传统方案和（b）所提出的方案。所提出的转换器直接将模拟信号转换为随机信号，以减少传统系统的信号转换开销。

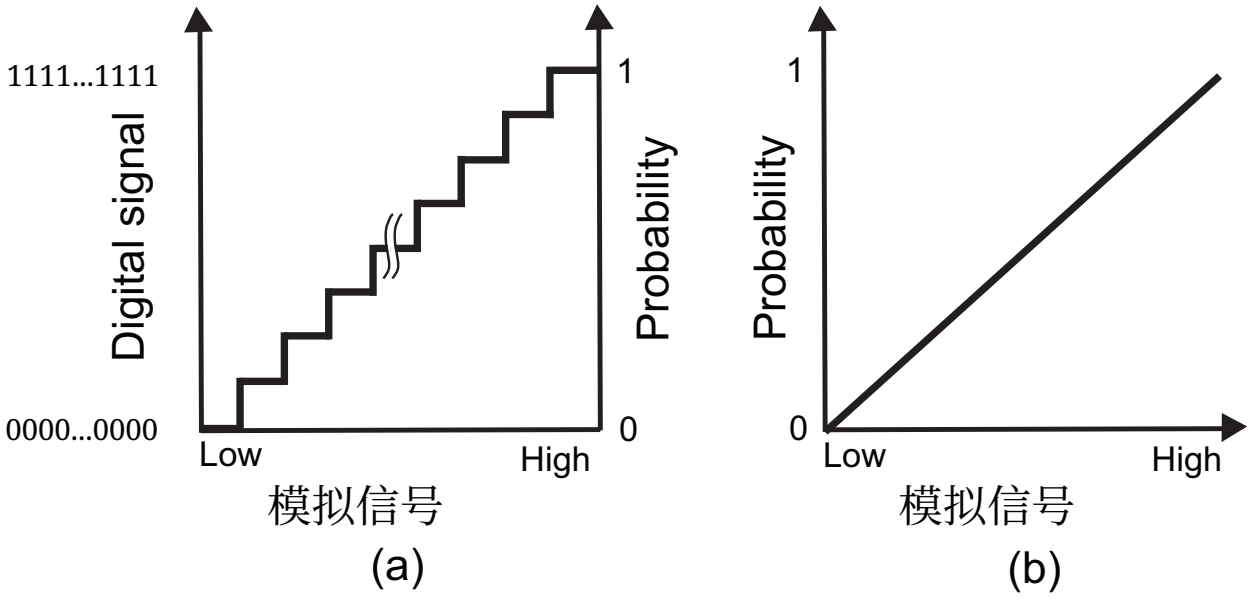


图6：信号转换：（a）传统方式和（b）所提出的方法。

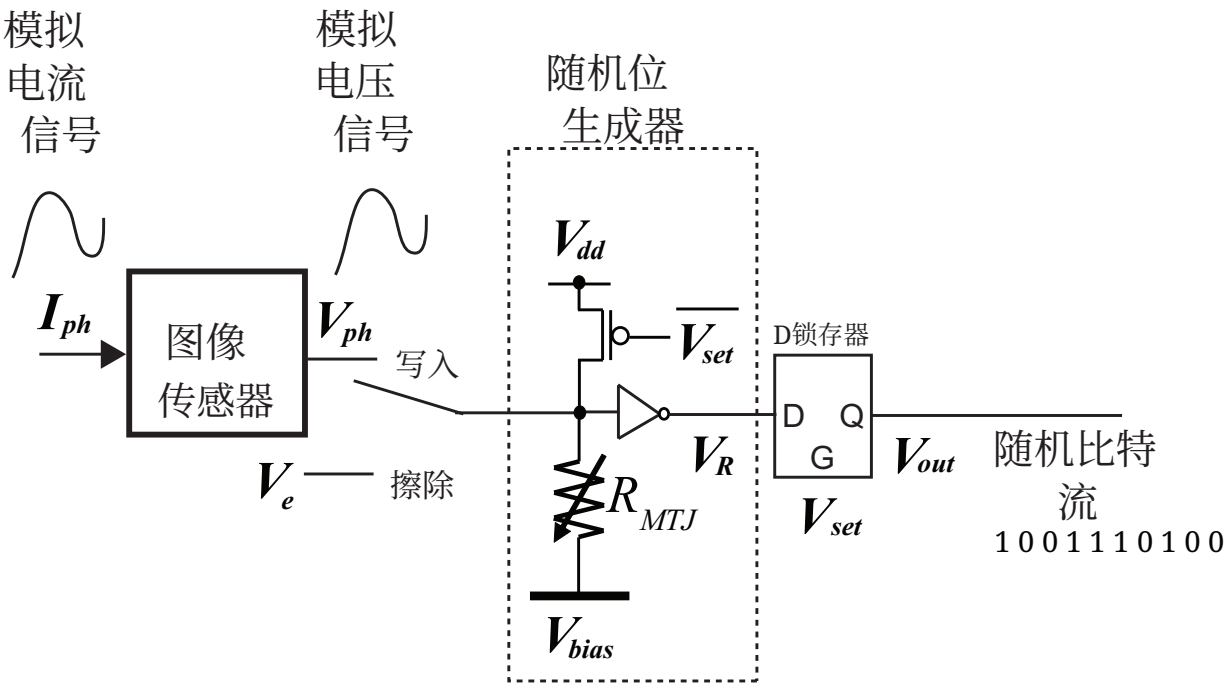


图 7：所提出的模拟-随机转换器的总体结构。

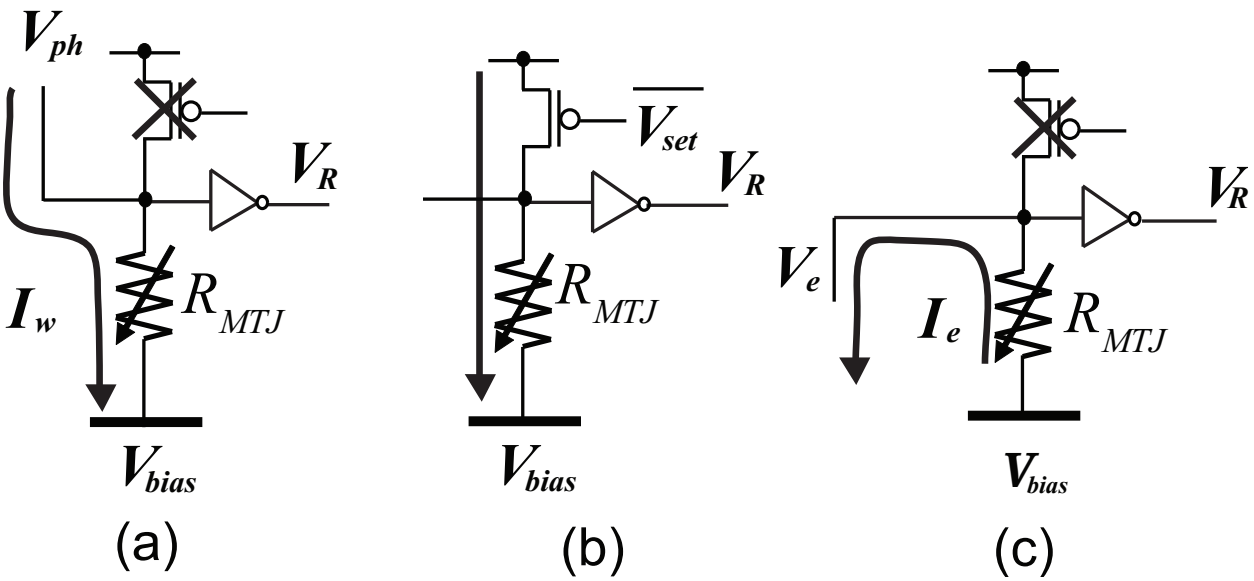


图 8：模拟-随机转换器在以下阶段之一运行的电路：(a) 写入阶段、(b) 置位阶段和 (c) 擦除阶段。在写入阶段，一位信息存储于 p_w，在置位阶段，存储的磁隧道结状态被设为输出，最后在擦除阶段擦除磁隧道结状态。

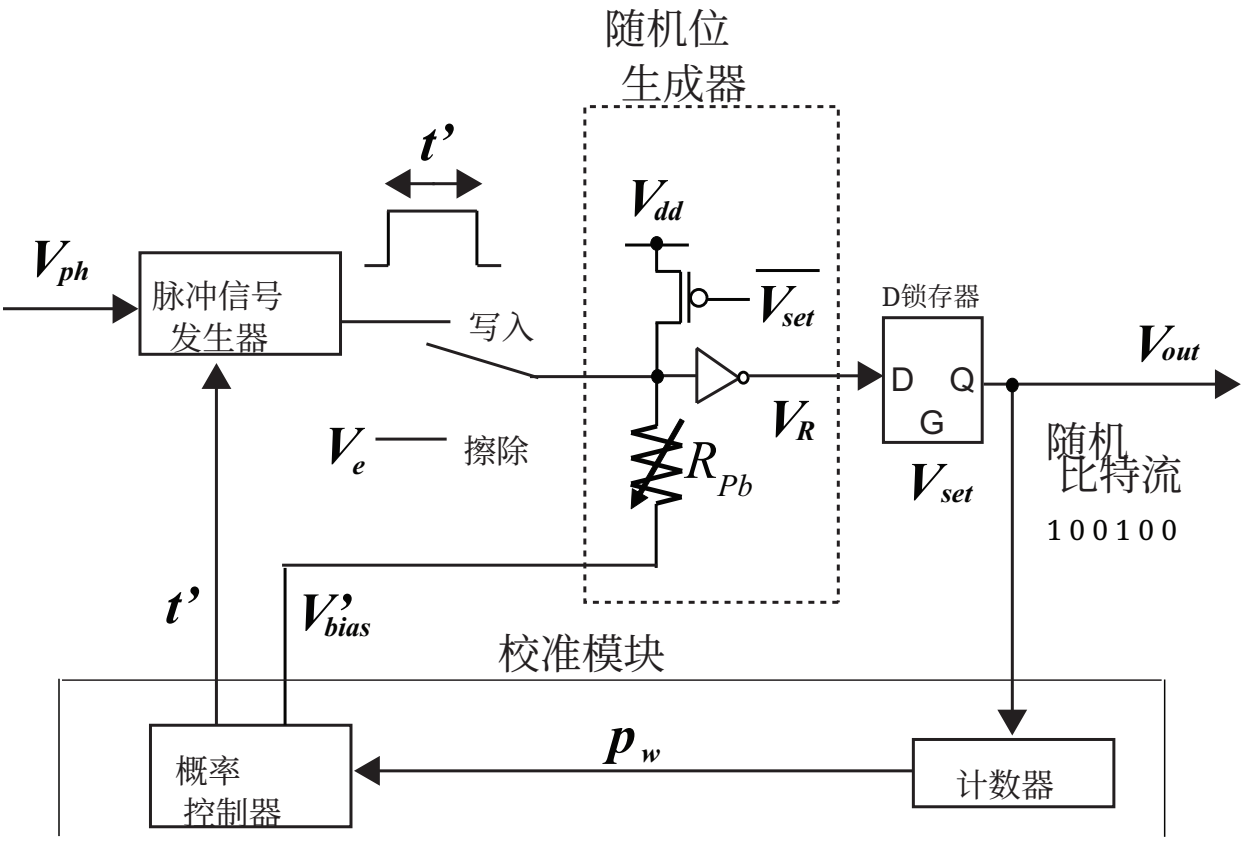


图 9：考虑磁隧道结器件电阻变化的所提出模拟-随机转换器的总体结构。通过控制 t' 和 V'_{bias}，以校准步骤补偿这种变化。

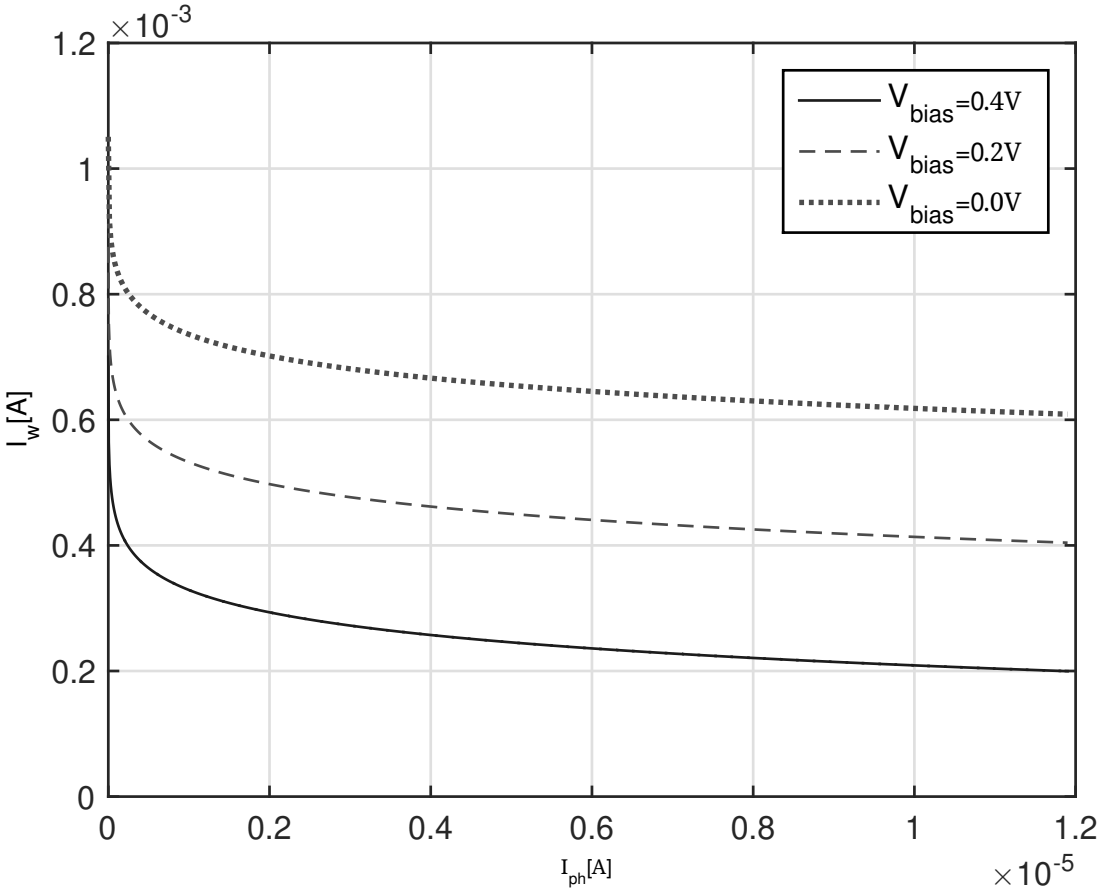


图 10：Rel　磁隧道结器件的写入电流（I_w）与模拟输入电流（I_{ph}）之间的关系。

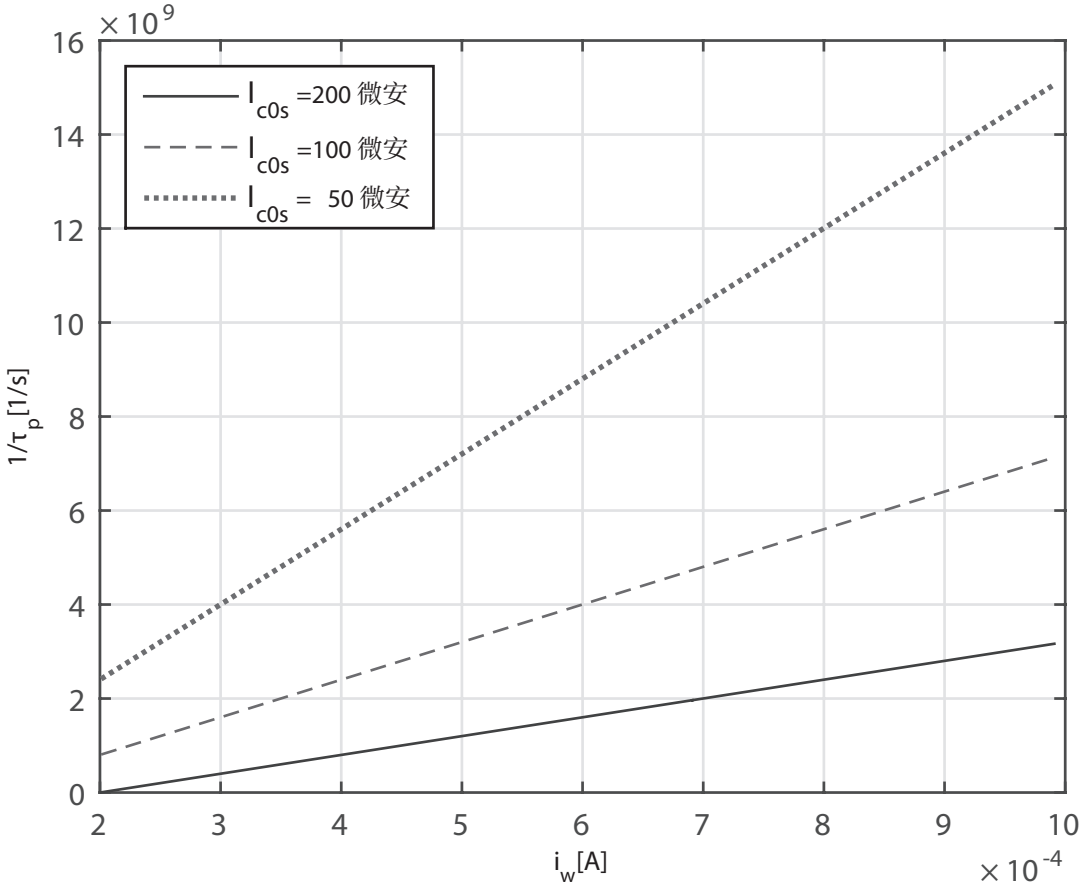


图11 ：切换时间常数倒数（τ_p）与 I_w 的关系，其中 V_{bias} 为0.4 V .

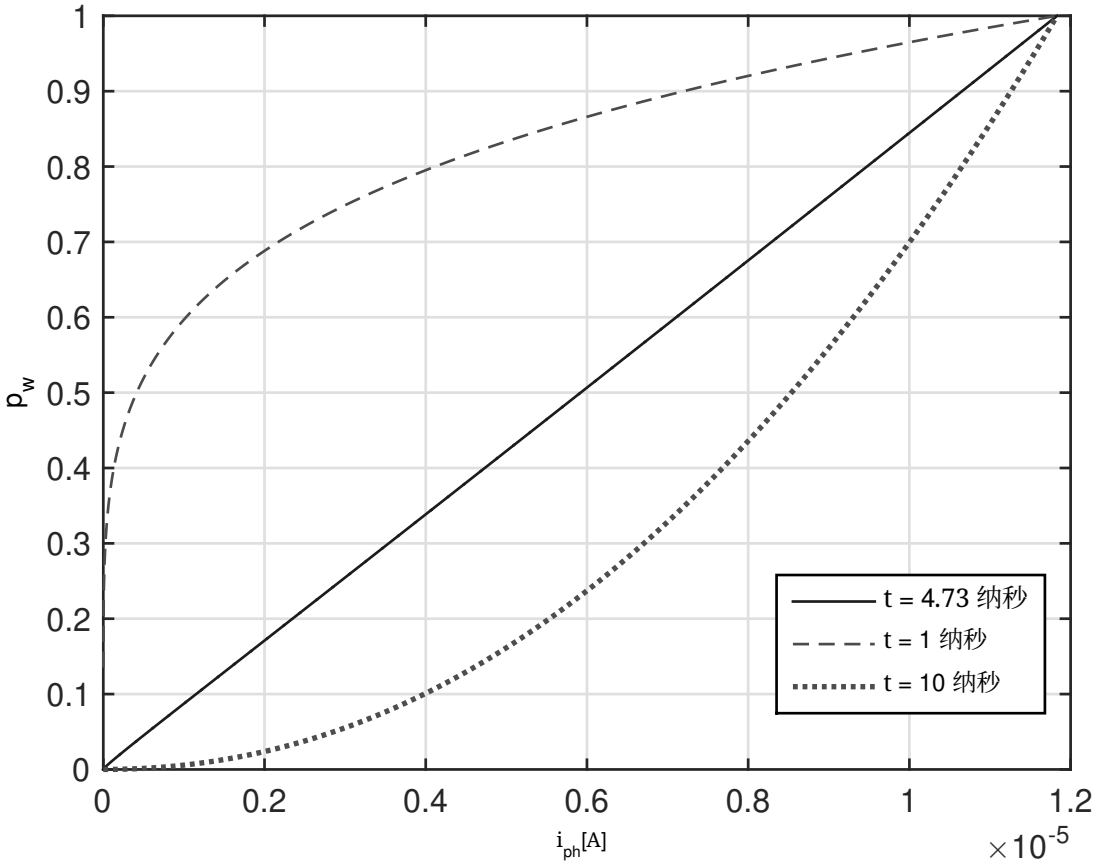


图12：磁隧道结器件的非切换概率（$\overline{p_w}$）与 I_{ph} 之间的关系，其中 V_{bias} 为 0.4 V， I_{c0s} 为 200 微安。通过设置 t = 4.73 纳秒，可适当设计模拟-随机转换器，从而实现线性关系。

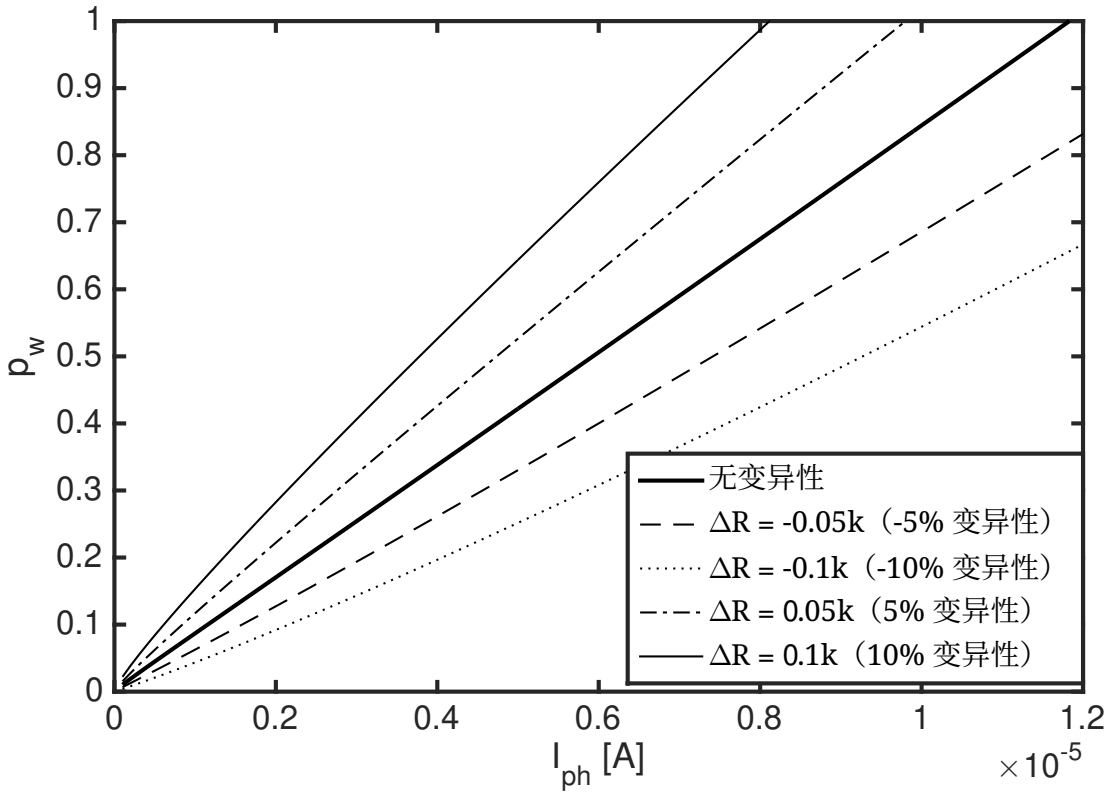


图13：在磁隧道结器件的电阻变化条件下，磁隧道结器件的非切换概率与 $\overline{p'_w}$ 和 I_{ph} 之间的关系，其中 V_{bias} 为 0.4 V，I_{c0s} 为 200 μA， t 为 4.73 纳秒。

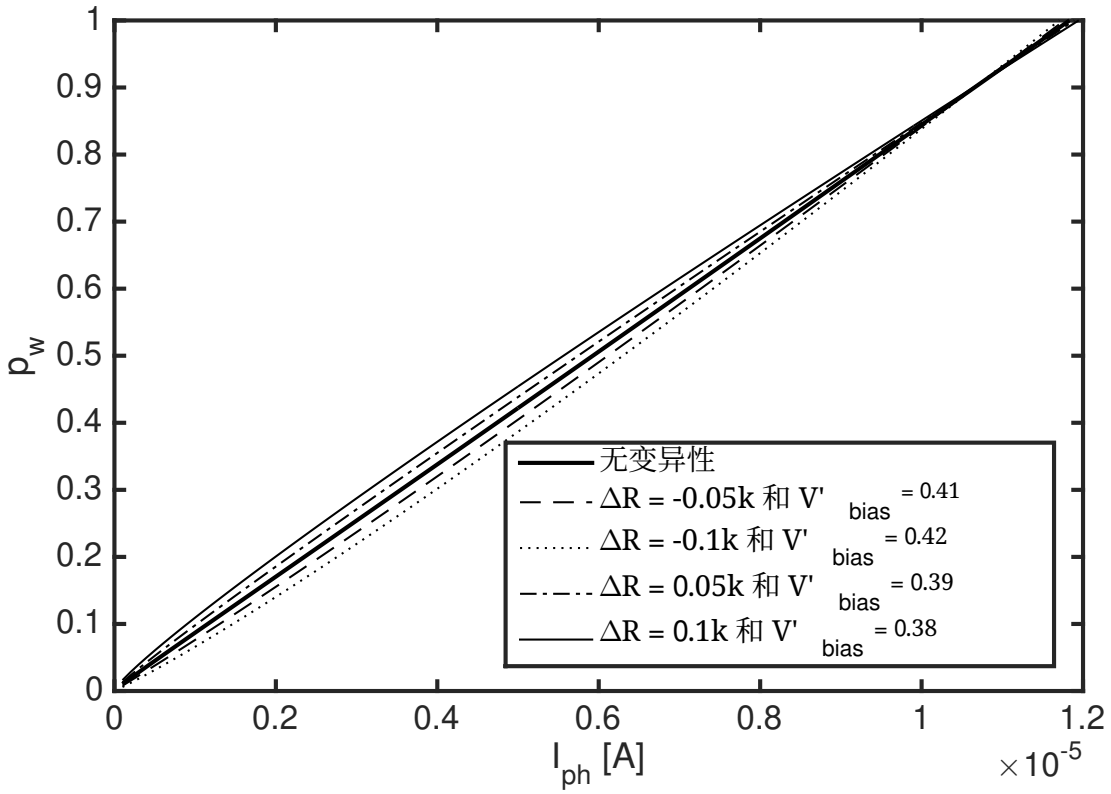


图 14：磁隧道结器件 $\overline{p'_w}$ 在电阻变异性下的非切换概率与 I_{ph} 之间的关系，其中 I_{c0s} 为 200 微安， t 为 4.73 纳秒。通过仅控制 V'_{bias}来补偿电阻变异性。

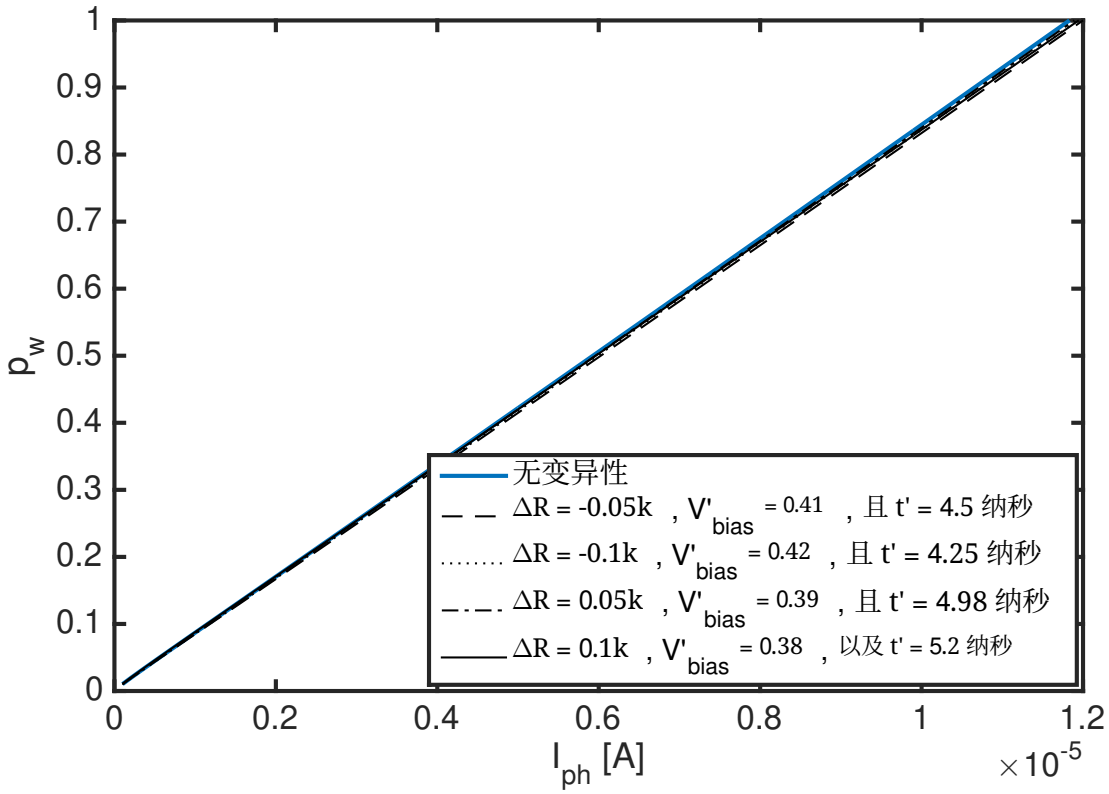


图15：在 I_{c0s} 为 200 微安时，磁隧道结器件 $\overline{p_w}$ and I_{ph} 的非切换概率与电阻变化之间的关系。通过控制 V'_{bias} 和 t' 来补偿电阻变化。

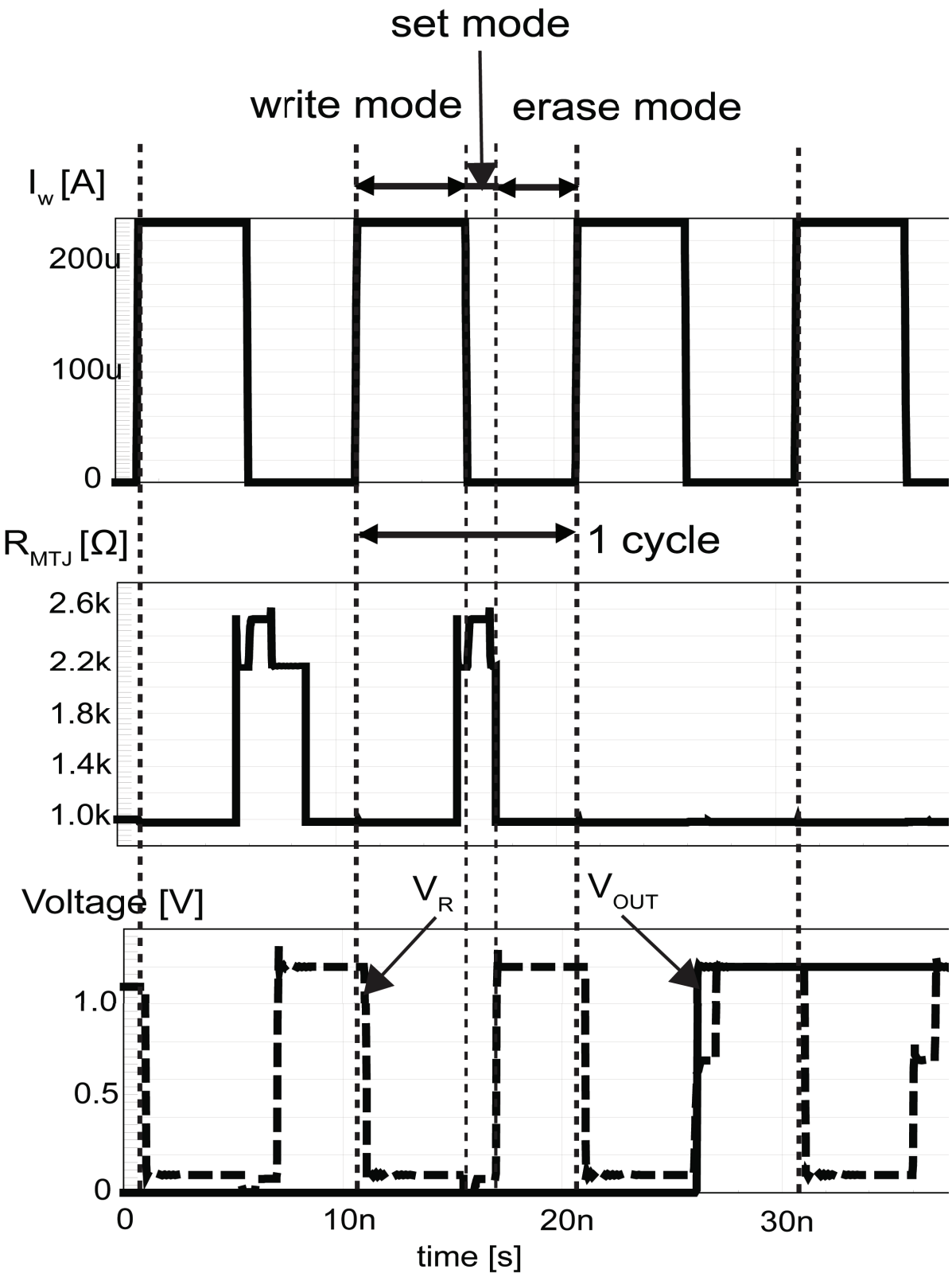


图16：使用 NS-SPICE 对采用 90纳米CMOS 和 100纳米磁隧道结技术的所提出模拟-随机转换器进行仿真得到的波形。写入电流 I_w 为 236微安，对应的切换概率 p_w 为 50%。

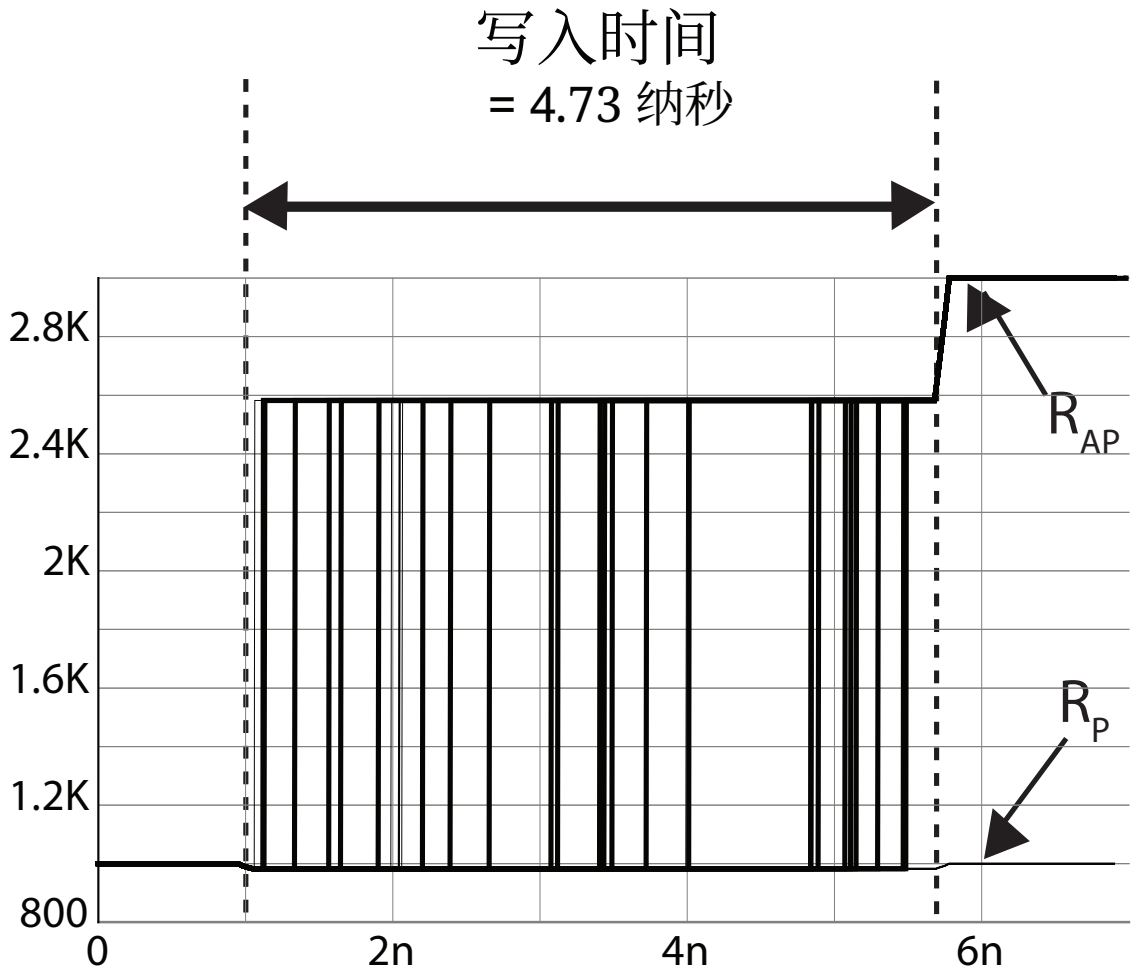


图17：所提出的模拟-随机转换器的蒙特卡罗仿真，其中 I_w 为 236 微安，对应于 p_W=50%，试验次数为 100。

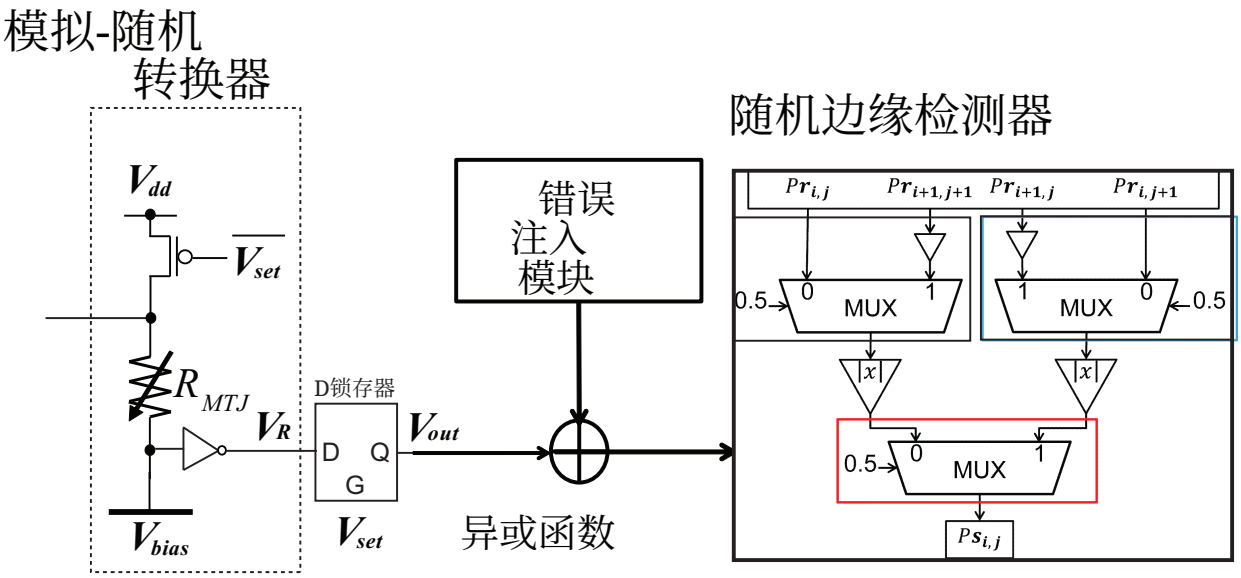


图18：MATLAB 中包含误差注入模块的简易视觉芯片仿真模型。

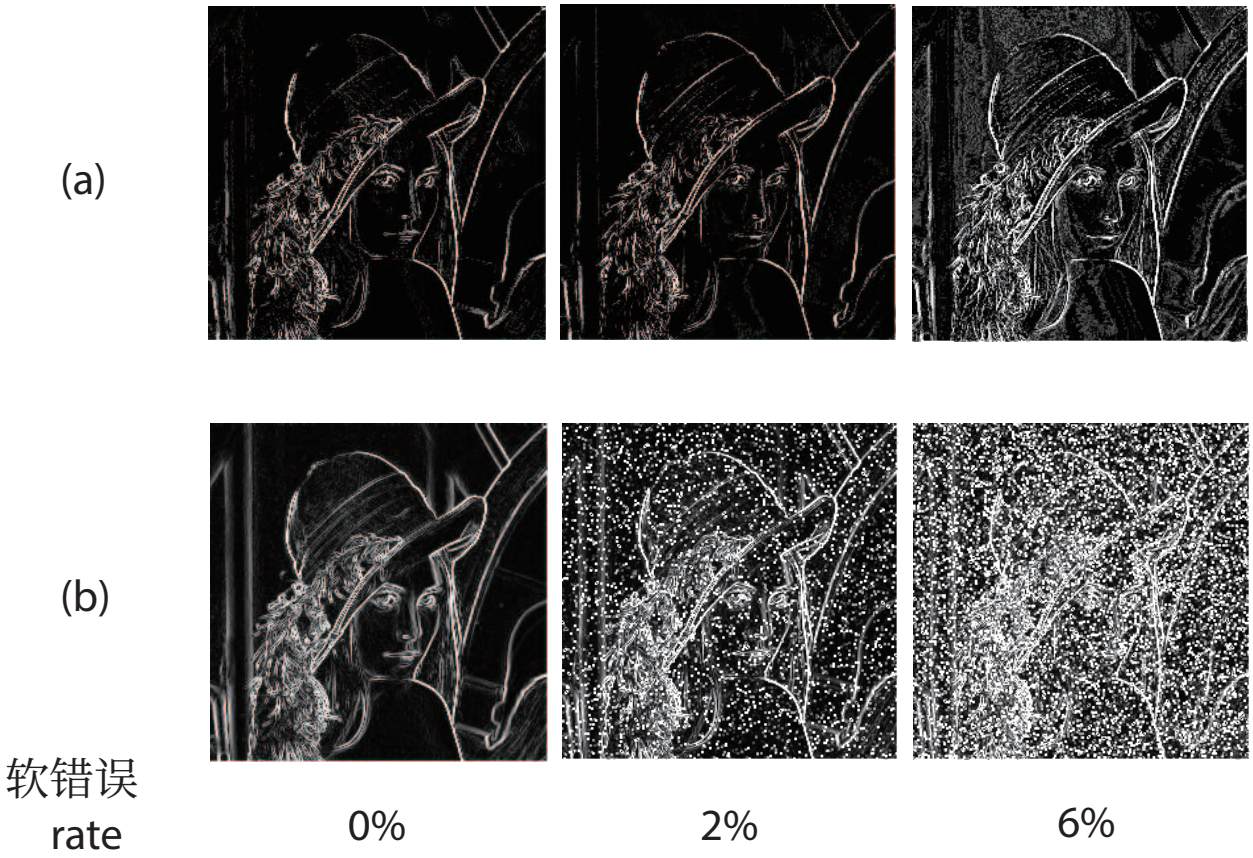


图19：输入软错误下的边缘检测结果：(a) 随机实现；(b) 传统二进制实现。