

眨眼反射习惯化的忆阻桥突触实现与特性分析

王 晨,杜天一,常 辉,李玉霞

(山东科技大学 电气与自动化工程学院,山东 青岛 266590)

摘要:基于个人集成电路专用模拟程序(PSPICE),设计了六忆阻桥突触电路。通过三角脉冲电压刺激信号,对忆阻桥突触的眨眼反射特性进行了仿真与分析,实现了眨眼反射的短暂习惯化、长期习惯化、恢复习惯化等特性。仿真结果表明,六忆阻桥突触电路能够模拟实现眨眼反射的习惯化,具有快速学习、记忆和抗遗忘等特点,可以模拟生物学习、记忆和对环境的适应性。基于人工突触电路的眨眼反射习惯化的探索对于将生物学习引入神经系统具有一定的现实意义。

关键词:突触电路;六忆阻桥;眨眼反射;习惯化

中图分类号:TP183.1

文献标志码:A

Realization and characteristic analysis of memristor bridge synapse of blink reflex habituation

WANG Chen, DU Tianyi, CHANG Hui, LI Yuxia

(College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology,
Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Based on personal simulation program with integrated circuit emphasis(PSPICE), a six memristor bridge synaptic circuit was designed. The system simulation and characteristic analysis of blink reflex was then carried out by simulating the stimulus signal with triangular pulse. The short-term habituation, long-term habituation and recovery habituation of blink reflex were finally realized. The simulation results show that the six memristor bridge synaptic circuit, which can simulate the realization of blink reflex habituation and has the characteristics of fast learning, memory and anti-forgetting, can simulate biological learning, memory and environmental adaptability. The exploration of the habituation of blink reflex based on artificial synaptic circuit has a certain practical significance for introducing biological learning into the neuromorphic system.

Key words: synaptic circuit; six-memristor bridge; blink reflex; habituation

突触作为神经网络的节点,是神经元连接的枢纽。电子突触作为生物突触物理实现模式,可以通过改变动作电位调节其连接强度,模拟生物突触功能,为人工神经网络的构建提供支撑。然而,传统设计是基于互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)器件的突触电路,存在电路复杂度高、所占面积大和功耗高等不足,不利于突触数量的大幅增加。与传统突触相比,忆阻突触具有纳米尺寸、结构简单和低能耗等特点,可以降低电路的复杂度^[1-2]。忆阻器可通过控制流过的电荷量或磁通量来改变其阻值,与突触连接权值类似。因此,单个忆阻器即可模拟突触的基本功能,促进电路设计的简化。目前,很多学者已经设计出各种基于忆阻器的突触电路来实现长短期可塑性^[3]、尖峰速率依赖可塑性^[4]、尖峰时序依赖可塑性^[5]、学习算法^[6]、联想记忆^[7]等等。突触可塑性是神经元连接的重要机制,是神经系统实现各项功能

收稿日期:2021-07-22

基金项目:国家自然科学基金项目(61973200,91848206)

作者简介:王 晨(1994—),男,山东烟台人,硕士研究生,主要从事忆阻器在神经网络方面的研究。

李玉霞(1968—),女,山东滨州人,教授,博士生导师,主要从事控制理论及应用研究,本文通信作者。

E-mail:yuxiali2004@sdust.edu.cn

的基础。利用人工突触实现神经网络的学习和记忆对于实现神经计算和人工神经网络具有重要意义。

神经记忆分为联想记忆和非联想记忆^[8]。其中,巴普洛夫提出的联想记忆被广泛研究^[9]。非联想记忆作为生物学习和适应环境不可或缺的模式,主要包括习惯化和敏化^[8]。习惯化是对外界刺激的储存和提取的表达,是最简单的学习方式。对非联想记忆学习的研究大部分基于结构简单的无脊椎生物,例如海兔鳃缩反射^[10]、蝇和秀丽隐杆线虫的学习和记忆以及无脊椎生物的防御性撤退反射^[11]。对于复杂生物非联想记忆的习惯化,科研人员较为关注的是眨眼反射习惯化^[12-14]。眨眼反射属于自发的、非习得的非条件反射,而眼睛对刺激无反应的过程又属于条件的、习得的条件反射,眨眼反射的习惯化过程是一种学习记忆过程。因此,利用眨眼反射习惯化作为研究非联想记忆的载体具有现实的可行性和合理性。文献[12]研究正常被试者和精神分裂被试者的眨眼反射习惯化行为,发现了精神分裂者眨眼习惯化所需时间比正常被试者长,说明眨眼反射习惯化的过程属于受大脑控制的学习过程;文献[13]研究分析了眨眼反射习惯化过程中脑干信号逐渐变弱的原因;文献[14]研究了短电刺激眼神经,诱发眨眼反射,进而形成习惯化直至眨眼反射消失的过程,并且对眨眼反射与大鼠全身惊吓进行了比较。以上眨眼反射的研究主要基于临床试验,通过采集电信号进行动态分析。

忆阻器作为一种理想的结构模式,可以在神经网络中实现突触权重,充当乘法器电路代替传统的模拟乘法器^[15-16]。构造忆阻突触电路可以实现非联想记忆的仿真,为进一步揭示人类思维模式提供必要的支撑。如文献[8,10]构造了单忆阻的突触电路,模拟海兔鳃缩反射习惯化过程中的信号特征及信号的动态变化。然而,设计忆阻突触电路对眨眼反射由非条件反射向条件反射的构建过程的研究仍鲜见报道。本研究设计了忆阻桥突触电路,通过忆阻桥突触电路的阻值和电路输出电压的变化模拟生物眨眼反射的相关特性。

1 基于忆阻桥的突触电路构建

1.1 忆阻器模型

忆阻器描述了电荷与磁通量之间的关系:

$$M(q) = \frac{d\varphi(q)}{dq} \quad (1)$$

式中: $M(q)$ 表示忆阻器的阻值, $\varphi(q)$ 表示电荷和磁通量的关系^[16], q 表示流经忆阻器的电荷。惠普公司制造的惠普忆阻器由铂电极之间夹两层钛氧化物薄膜组成,其结构如图 1 所示。其中,一层为没有氧空位的 TiO_2 薄膜,表现出高阻抗特性,为非掺杂层;另一层具有氧空位的 TiO_{2-x} 薄膜,称为掺杂层(TiO_{2-x} 层)。忆阻两端施加电压时,掺杂层和非掺杂区层之间的边界会发生移动,引起阻值变化^[17]。

惠普忆阻器的电阻为掺杂区和非掺杂区的电阻之和,即

$$R_{\text{mem}}(x) = R_{\text{on}}x + R_{\text{off}}(1 - x), \quad (2)$$

$$x(t) = \frac{w(t)}{D} \in [0, 1]. \quad (3)$$

式中: R_{mem} 是惠普忆阻器的阻值; R_{on} 、 R_{off} 分别是惠普忆阻器阻值导通和闭合时两个极限值,通常 R_{on} 远大于 R_{off} ; x 是忆阻器内部状态,为掺杂层厚度 w 与总 TiO_2 薄膜厚度 D 的比值, x 对应的动态方程为:

$$\frac{dx}{dt} = ki(t). \quad (4)$$

式中: $k = \frac{\mu_v R_{\text{on}}}{D^2}$, 为状态变量的变化速度与流经电流之间的比例因子; μ_v 表示平均离子迁移率; i 表示流经惠普忆阻器的电流。

特别地,对于给定的理想惠普忆阻器, μ_v 、 R_{on} 以及 D 的值都是固定不变的(即比例因子 k 为常数),说明

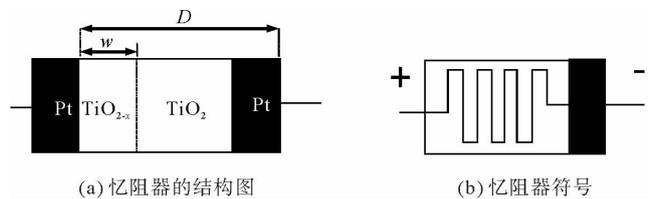


图 1 惠普忆阻器模型

Fig. 1 HP memristor model

该模型中离子的运动呈线性变化,因此这种惠普忆阻器模型也可以称为线性杂质漂移模型或理想忆阻器模型^[18]。但对实际忆阻器施加微小电压就能够产生巨大的电场,导致能量势垒快速减少,使惠普忆阻器内部离子的运动呈现明显的非线性特征。特别地,这种非线性特征在惠普忆阻器的边界尤为显著,严重影响离子迁移速度,即掺杂区与非掺杂区之间的边界移动速度逐渐降低至零,这个现象称为非线性掺杂漂移^[17]。为了解决这个现象,引入 Joglekar 窗函数^[18-19],即在式(4)右侧乘以一个非线性窗函数 $f(x)$,式(4)可简化为:

$$\frac{dx}{dt} = ki(t)f(x), k = \frac{\mu_v R_{on}}{D^2} \quad (5)$$

式中: $\mu_v = 10^{-14} \text{ m}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$; $f(x)$ 是用来模拟非线性漂移现象的窗函数, $f(x) = 1 - (2x - 1)^{2p}$; p 用于描述非线性程度, $p = 0.7$ 。在惠普忆阻器模型中引入窗函数,可以解决边界效应,控制参数较少,使得基于惠普忆阻器设计的电路能够较好地展示突触特性。

1.2 忆阻桥突触电路

在个人集成电路专用模拟程序 (personal simulation program with intergrated circuit emphasis, PSPICE) 中,用 6 个惠普忆阻器模型组成六忆阻桥结构、差分比例运算电路和反向放大器构建突触模拟电路,如图 2 所示。

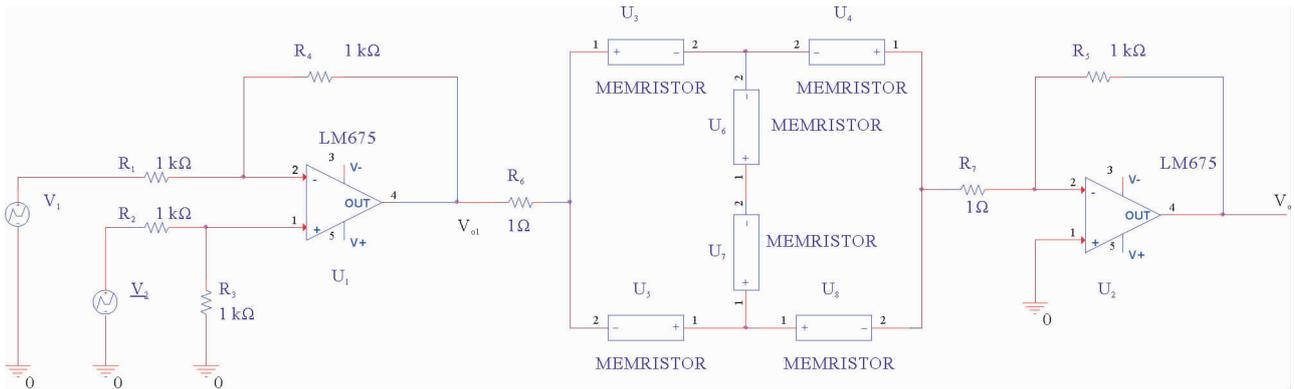


图 2 突触模拟电路

Fig. 2 Synaptic analog circuit

图 2 中, V_1 和 V_2 代表输入电压信号,忆阻桥阻值的增大或减少由差分比例运算电路的输出电压 V_{o1} 控制, V_o 幅值大小表示突触电路对刺激的反应程度。

$$V_{o1} = -\frac{R_4}{R_1}V_1 + \left(1 + \frac{R_4}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3}V_2 \quad (6)$$

式中: R_i 表示图 2 中电阻 R_i 的电阻值, $i = 1, 2, 3, 4$ 。令 $R_1 = R_2, R_3 = R_4$, 则式(6)可简化为:

$$V_{o1} = \frac{R_4}{R_1}(V_2 - V_1) \quad (7)$$

设忆阻桥总电阻 R_m , 则有

$$V_o = \frac{R_5 V_{o1}}{R_m + R_6 + R_7} \quad (8)$$

将式(7)代入式(8),且令 $R_6 = R_7$, 可得:

$$V_o = \frac{R_4 R_5}{R_1 (R_m + 2R_6)} (V_2 - V_1) \quad (9)$$

由式(9)可得:

$$R_m = \frac{R_4 R_5 (V_2 - V_1)}{R_1 V_o} - 2R_6 \quad (10)$$

为了分析突触电路的特性,设置参数为: $R_1=R_2=R_3=R_4=R_5=1\text{ k}\Omega$, $R_6=R_7=1\text{ }\Omega$;采用运算放大器 LM675, $R_{\text{on}}=100\text{ }\Omega$, $R_{\text{off}}=10\text{ k}\Omega$, $D=10\text{ nm}$, $u_v=10^{-14}\text{ m}^2/(\text{s}\cdot\text{V})$, $p=0.7$, $R_{\text{int}}=600\text{ }\Omega$; V_1 为脉冲电压, V_2 为直流正电压。

2 眨眼反射习惯化特性分析

2.1 眨眼反射的习惯化

眨眼反射作为生物的一种自我保护,各种刺激均会触发这种行为,是生物对潜在危险作出快速反应的自我保护机制^[12,14,20]。眨眼反射并不是单纯的条件或者非条件反射,不经意地眨眼属于非条件反射,而随意眨眼或者刻意不眨眼则属于条件反射。眨眼反射的习惯化是眼睛适应无害刺激,对刺激反应逐渐减弱直至消失的过程(即学习过程)。当眨眼形成习惯化后,同种刺激将不会触发眨眼反射;当停止刺激一段时间后,再次施加刺激,则仍会触发眨眼反射,称之为习惯化恢复。

习惯化是生物逐渐适应无害刺激的过程,习惯化地恢复为生物忘记部分已经具有的特定反应。例如,当对眼睛进行单次刺激时,会产生眨眼反射,当对眼睛进行连续的同种无害刺激,眼睛就会产生习惯化,该类刺激不再触发眨眼反射,从而实现学习行为的巩固与强化。用突触电路模拟生物的学习过程在人工智能应用领域具有重要的现实意义。

2.2 单忆阻和忆阻桥突触的反应特性及耗能比较

当使用一个惠普忆阻器替换图 2 中 6 个惠普忆阻器组成的忆阻桥结构时,该电路称为单忆阻突触,单忆阻突触的总阻值表示为 R_{m} 。分别对单忆阻突触和忆阻桥突触施加峰值为 5 V、周期为 2 ms 的脉冲电压刺激信号进行学习训练,如图 3 所示。

由图 3(b)、3(c)可见,单忆阻突触与忆阻桥突触的阻值均随刺激信号的输入而逐渐增大,表明突触的连接不断增强,同时对刺激信号的反应不断减弱。其中,单忆阻突触在每次受到刺激信号时,连接增强后会阶段性出现强度变弱,这与生物突触由于遗忘特性而出现连接强度变弱的过程类似,如图 3(b)所示。在施加持续刺激时,单忆阻突触对刺激形成习惯化,其习惯化过程所需时间较长,约 50 ms。忆阻桥突触受到刺激时连接也会增强,同时在短暂刺激去除后继续保持一段时间的记忆,表现为抗遗忘过程,如图 3(c)所示。在施加持续刺激时,忆阻桥突触形成习惯化,其习惯化过程所需时间较短,约 24 ms。

对比两种突触对相同刺激的反应可以看出,忆阻桥突触存在较强的尖峰(图 3(c)中的 34、50 ms 等处),说明忆阻桥突触在形成习惯化过程中的某时刻对刺激作出强烈反应,突触的阻值瞬间大幅度变化并立即恢复,这个现象符合生物单个神经元的特性,表明忆阻桥突触具有自我调节能力,能够对后续刺激快速反应,促进记忆的形成与保持,具有抗遗忘性,这也与生物体的学习记忆和保存特征一致。

对刺激信号学习的过程中,由于单忆阻突触具有遗忘性,在后续刺激信号的学习中,会损耗一部分能量“复习”上一次的学习过程,导致周期内的损耗逐渐增加。忆阻桥突触比单忆阻突触的结构复杂,在开始的学习中,需要损耗较多的能量激活忆阻桥突触,而由于忆阻桥突触的抗遗忘特性,后续刺激信号的学习所损耗的能量逐渐降低,即周期内的损耗逐渐降低。两种突触的耗能分别如图 4(a)、4(b)所示。

计算给予突触刺激信号一段时间内的损耗电能

$$W(t) = \int_0^t p(t) dt = \int_0^t \frac{[V_2(t) - V_1]^2}{R_{\text{m}}} dt. \quad (11)$$

令 W_1 和 W_2 分别为单忆阻突触和忆阻桥突触训练 60 ms 消耗的总电能, S_t 为第 t 个周期内突触电路消耗的电能,每个周期为 2 ms, $S_t = \int_0^2 \frac{[V_2(t) - V_1]^2}{R_{\text{m}}} dt$, $t=1, 2, \dots, 30$, 则

$$W_1 = S_1 + S_2 + \dots + S_{30} = 6.63 \times 10^{-3} \text{ J}, W_2 = S_1 + S_2 + \dots + S_{30} = 6.31 \times 10^{-3} \text{ J}. \quad (12)$$

由式(12)结果可知,忆阻桥突触在学习过程中消耗的总电能比单忆阻突触消耗的电能低 $3.2 \times 10^{-4} \text{ J}$,两种突触的耗能变化曲线如图 4(c)所示。在 11.3 ms 之前,忆阻桥突触的损耗比单忆阻突触高 5%;11.3~60 ms 内,忆阻桥突触的损耗比单忆阻突触低 7.3%。在突触电路学习 60 ms 的过程中,忆阻桥突触的总损

耗比单忆阻突触的总损耗低 4.8%。

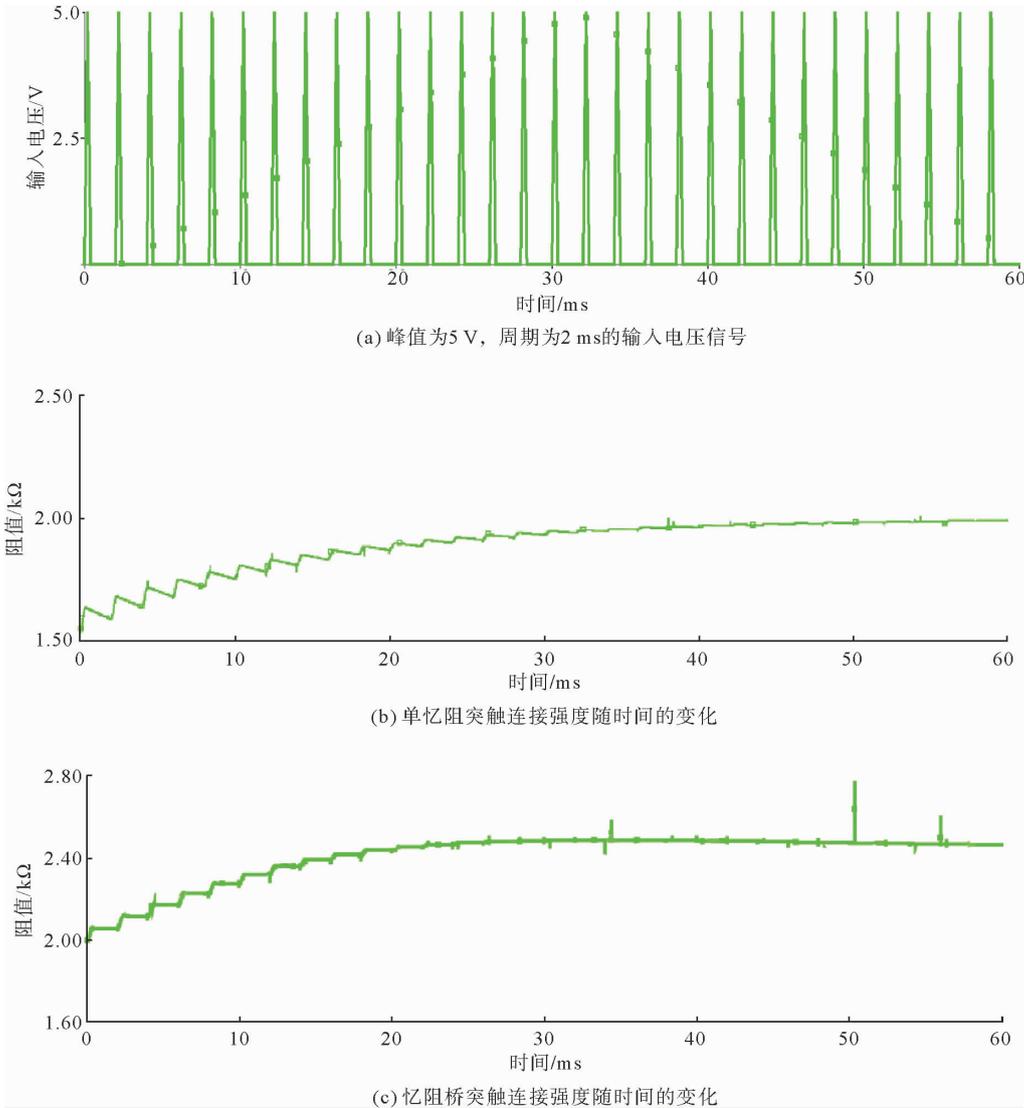


图3 同种刺激信号下单忆阻突触和忆阻桥突触的连接强度随时间的变化

Fig. 3 Changes in the bonding strength of mono-memristor and memristor bridge synapses with time of the same stimulus

对比以上结果可知,忆阻桥突触具有两个优势:一是忆阻桥突触在学习达到饱和的过程中所需要的时间相对较少;二是忆阻桥突触学习过程的损耗降低,且忆阻桥突触在形成习惯化的过程中可以保持记忆,具有抗遗忘特性,能快速达到习惯化,有利于后续开展眨眼反射习惯化特性的仿真研究。忆阻桥突触对刺激作出反应过程中出现的尖峰现象有利于加速形成习惯化,对遗忘有抵抗作用。

2.3 忆阻桥突触的学习与抗遗忘特性

由于三角波电压信号的值可以从零逐渐增加到最大值,之后再逐渐减少到零,可以模拟实验所需要的一个由远及近过程的外界刺激。故选择三角波电压信号输入忆阻桥突触,模拟眨眼反射所需的外界刺激,如图5所示,共施加5次刺激信号。其中,三角波电压信号最大值代表刺激信号最强,距离眼睛最近;最小值代表刺激最弱,距离眼睛最远。

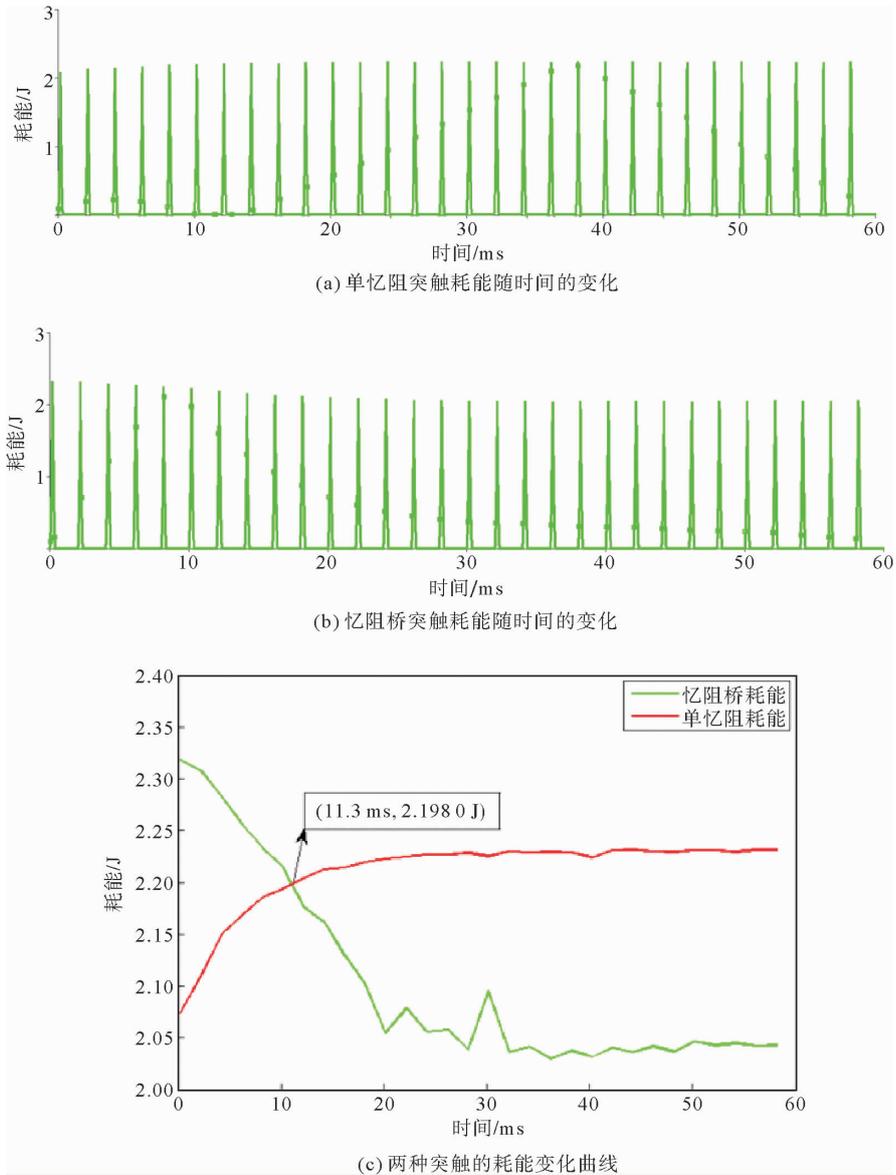


图 4 两种忆阻突触的耗能

Fig. 4 Energy consumption of two memristor synaptic circuits

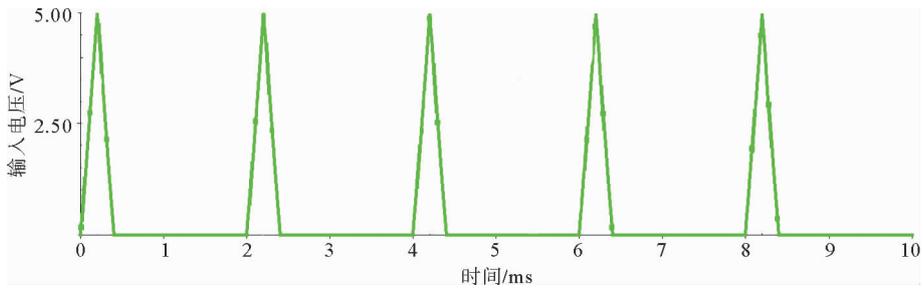


图 5 三角波电压信号

Fig. 5 Triangular wave voltage signal

如图 6 所示, 受到三角波电压信号的刺激时, 忆阻桥突触的阻值增加, 连接增强。在刺激消失后的一段

时间内,忆阻桥突触阻值基本保持不变,再次受到刺激时,突触的阻值在原有基础上继续增强后保持不变。这个过程与生物的学习过程和眼睛适应外界刺激过程是一致的,表明忆阻桥突触能够记忆先前刺激所产生的反射信息,具有记忆性和抗遗忘性。

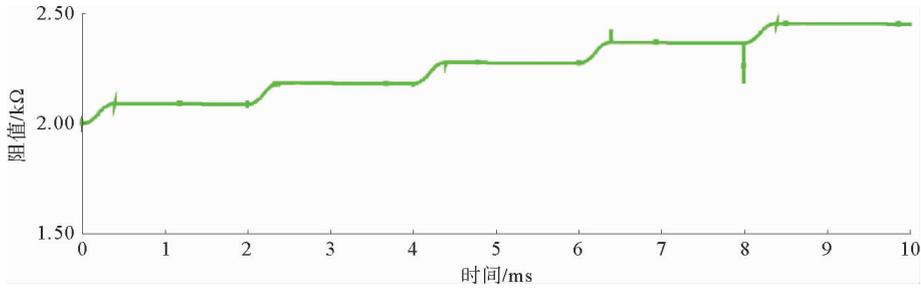


图6 三角波电压信号刺激下的忆阻桥突触的阻值

Fig. 6 Synaptic resistance of memristor bridge under triangular wave voltage signal

2.4 忆阻桥突触对强、弱刺激信号的反应

为便于研究,规定低于 50 V 的电压信号为弱刺激信号,高于 50 V 的电压信号为强刺激信号。对忆阻桥突触电路分别施加弱、强刺激信号,分析忆阻桥突触的反应特性。

2.4.1 弱信号下忆阻桥突触的反应特性

在忆阻桥突触的 R_1 左侧输入图 7 所示的弱刺激信号时,忆阻桥突触的阻值变化情况,如图 8 所示。

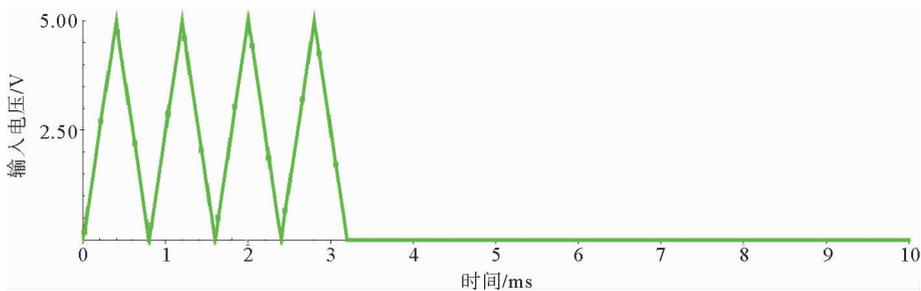


图7 连续弱刺激信号

Fig. 7 Continuous weak stimulus signal

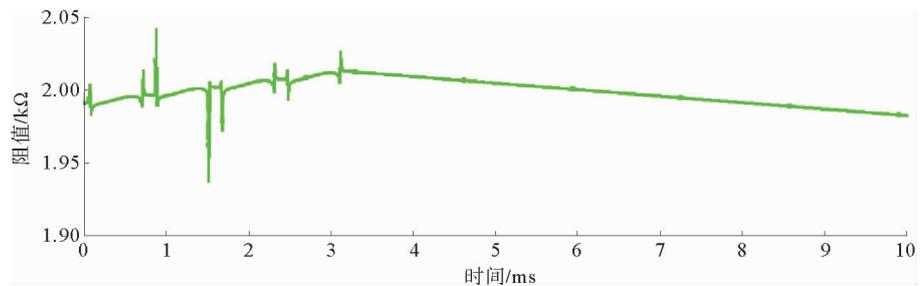


图8 忆阻桥突触阻值的变化

Fig. 8 Changes of synaptic resistance of memristor bridge

由图 8 可见,当施加弱刺激信号时,忆阻桥突触的阻值产生明显尖峰,即阻值瞬间增加后急剧减少,这与生物突触的反应过程一致。受到初次刺激时突触的阻值增大,连接增强。经过几次同种信号刺激,突触对刺

激产生的波峰逐渐变弱,连接强度降低,逐渐形成习惯化。当刺激信号取消约 3.2 ms 后,突触的阻值开始降低,对弱刺激信号习惯化开始遗忘。

2.4.2 强信号下忆阻桥突触的反应特性

图 9 为将电压为 50 V 且与弱刺激信号相同波形的强刺激信号施加给忆阻桥突触时的阻值变化情况。对比图 8 发现,忆阻桥突触的阻值增大,连接不断增强且无明显的波动。0~0.8 ms 时,突触的阻值增量为 0.12 k Ω ;0.8~1.6 ms 时,阻值增量为 0.11 k Ω ;1.6~2.4 ms 时,阻值增量为 0.09 k Ω ;2.4~3.2 ms 时,阻值增量为 0.07 k Ω 。表明随着刺激的输入,阻值的增量逐渐减少,这个现象类似生物突触连接稳定的过程,即学习过程。当强刺激信号消失后,突触的阻值下降缓慢,保持学习后的特性,即受到刺激作出的反应没有消失而是记忆在系统中。整个过程表明,忆阻桥突触对强信号刺激产生学习行为,并且具有记忆和抗遗忘性。

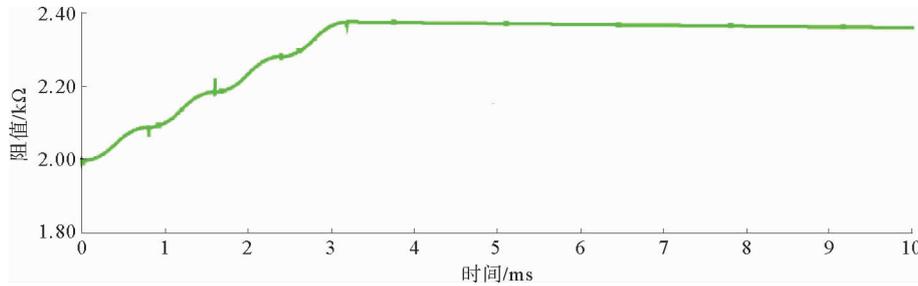


图 9 忆阻桥阻值变化

Fig. 9 Change of memristor bridge resistance

实验表明:对忆阻桥突触施加弱刺激信号时,突触的阻值出现明显的尖峰现象;施加强刺激信号时,突触的阻值出现尖峰现象相对较少。当弱刺激信号消失后,突触建立的连接会大幅度减弱,表示对弱刺激信号遗忘,类似眼睛对弱刺激的遗忘过程;当强刺激信号消失后,突触电路在强刺激信号下建立的连接在一段时间内基本不变,表示对强刺激信号具有抗遗忘性。这个过程与眼睛对强、弱刺激的学习记忆过程相似,可以模拟眼睛对强、弱刺激的不同反应特性。

2.5 眨眼反射的短期习惯化实现

眨眼反射的短期习惯化是指眼睛在短期内受到刺激时,眼睛不发生眨眼动作,一段时间后再受到刺激时,眼睛仍会产生眨眼动作的过程。

2.5.1 忆阻桥突触对无间隔刺激的反应特性

如图 10(a)所示,在忆阻桥突触 R_1 左侧施加两段间隔约 10 ms、时长约 2 ms 的刺激信号,在 R_2 端施加 5.5 V 的正电压。输入第一段连续刺激信号时,突触的阻值连续增大;撤去该刺激信号后,突触的阻值缓慢降低。输入第二段连续刺激信号时,突触的阻值在抗遗忘的基础上继续增加,表现出记忆保持和更新特性,如图 10(b)所示。

图 10(c)为忆阻桥突触对无间隔刺激的电压输出变化情况。输出电压增大,表明突触的抵抗眨眼能力增强。在 0~2 ms 时间段内,输出电压 $V_{0.2\text{ ms}} = 152.47\text{ V}$, $V_{0.6\text{ ms}} = 158.97\text{ V}$, $V_{1\text{ ms}} = 173.56\text{ V}$, $V_{1.4\text{ ms}} = 183.02\text{ V}$ ($V_a = b$ 表示 a 时刻对应的电压值为 b), 计算输出电压变化率为:

$$\begin{aligned} v_{(0.2\text{ ms}, 0.6\text{ ms})} &= \frac{\Delta V_{(0.2\text{ ms}, 0.6\text{ ms})}}{\Delta t} = 16.25\text{ V/ms}, v_{(0.6\text{ ms}, 1\text{ ms})} = \frac{\Delta V_{(0.6\text{ ms}, 1\text{ ms})}}{\Delta t} = 36.48\text{ V/ms}, \\ v_{(1\text{ ms}, 1.4\text{ ms})} &= \frac{\Delta V_{(1\text{ ms}, 1.4\text{ ms})}}{\Delta t} = 23.65\text{ V/ms}. \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $v(a, b)$ 表示起始两时刻 a 、 b 之间的变化率; $\Delta V_{a, b}$ 表示 a 、 b 两点的电压差。

在 12~14 ms 时间段内,输出电压 $V_{12.2\text{ ms}} = 153.9\text{ V}$, $V_{12.6\text{ ms}} = 167.17\text{ V}$, $V_{13\text{ ms}} = 183.59\text{ V}$, $V_{13.4\text{ ms}} = 190.89\text{ V}$, 计算输出电压幅值变化率为:

$$\begin{aligned}
v_{(12.2\text{ ms},12.6\text{ ms})} &= \frac{\Delta V_{(12.2\text{ ms},12.6\text{ ms})}}{\Delta t} = 33.17\text{ V/ms}, v_{(12.6\text{ ms},13\text{ ms})} = \frac{\Delta V_{(12.6\text{ ms},13\text{ ms})}}{\Delta t} = 41.05\text{ V/ms}, \\
v_{(13\text{ ms},13.4\text{ ms})} &= \frac{\Delta V_{(13\text{ ms},13.4\text{ ms})}}{\Delta t} = 18.25\text{ V/ms}.
\end{aligned}
\tag{14}$$

比较不同时段输出电压的变化率可知,第一次刺激对应的输出电压幅值增长率比第二次低,即受到第一次刺激后经过一段时间再受到相同刺激时,电压幅值增大的速率明显增加。表明忆阻器突触对之前受到的刺激进行了学习和记忆,再次受到相同刺激时快速作出反应,也验证了忆阻器突触具有快速学习和记忆保持能力,能够模拟眨眼反射的短期习惯化。

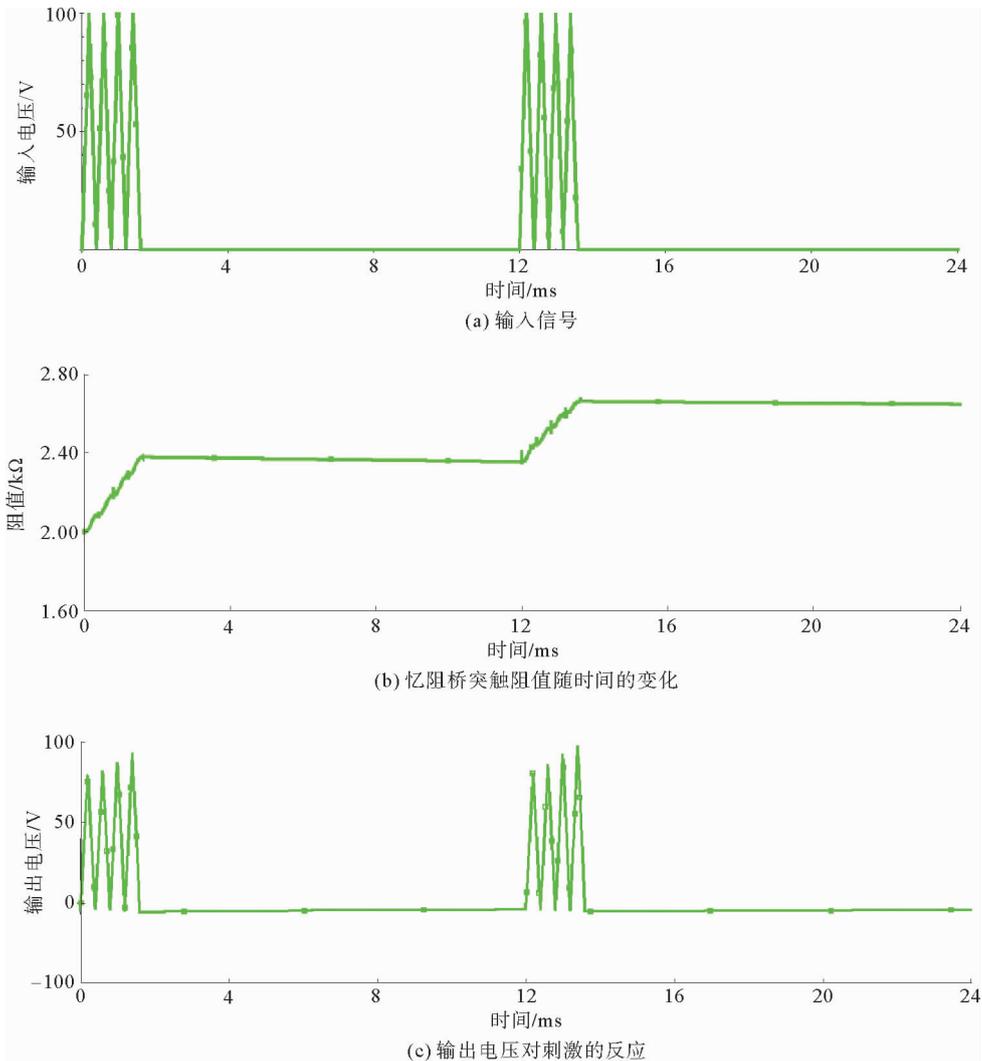


图 10 无间隔刺激下忆阻桥突触的反应

Fig. 10 Response of memristor bridge synapse without interval stimulation

2.5.2 忆阻桥突触对有间隔刺激的反应特性

对忆阻桥突触 R_1 左侧施加 4 次三角波信号,每次间隔为 0.2 ms,总时长为 2.2 ms,如图 11(a)所示。同时在 R_2 端施加 5.5 V 的正电压,忆阻桥突触的阻值变化情况如图 11(b)所示。结果表明,忆阻桥突触阻值连续增大的过程中,即使存在 0.2 ms 的时间间隔,阻值仍有一段时间的记忆保持过程。

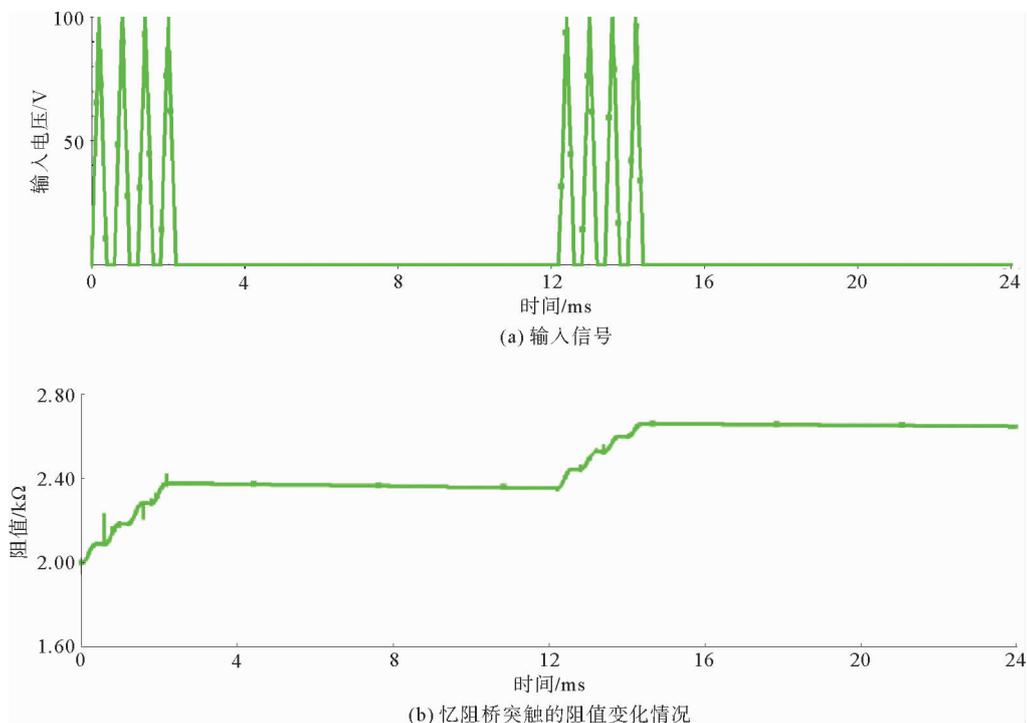


图 11 间隔刺激下忆阻桥突触的反应

Fig. 11 Response of memristor bridge synapse under interval stimulation

综上所述,施加两种刺激信号于忆阻桥突触,均可实现短期习惯化,无论刺激过程中是否有时间间隔,忆阻桥突触在短期习惯化过程中均表现出良好的抗遗忘性。

2.6 长期习惯化的实现

从生物角度讲,长期习惯化是指生物经过长时间刺激学习后,生物突触原先有效功能连接中断历时较长的过程,如眼睛受到多次无害刺激后,眨眼反射弱化或无眨眼行为,经过一段时间再次受到刺激眨眼反射仍然很弱或无眨眼行为。

在忆阻桥突触 R_1 左侧施加多组刺激,每组持续 2.2 ms(有时间间隔),如图 12(a)所示。同时在 R_2 左侧施加 5.5 V 的正电压,忆阻桥突触的阻值变化情况如图 12(b)所示。观察发现,忆阻桥突触的阻值逐渐增加并保持一段时间;在 15 ms 之前突触的阻值变化明显,15 ms 之后阻值变化微弱,表明忆阻桥突触的连接趋于稳定。

实验表明,当突触对输入电压信号习惯化后,无论是内部无间隔刺激还是间隔性刺激,忆阻桥突触的阻值下降时间均很缓慢,也说明忆阻桥突触具有抗遗忘特性,经过多次信号刺激后,突触部位原先有效功能连接无中断,能保持原先记忆。该特性类似眼睛习惯外界刺激后,会对此产生的反应进行记忆,再次受到无害刺激后,由于先前的经验会弱化眨眼反射,从而形成无眨眼行为的长期习惯化。

2.7 恢复习惯化

恢复习惯化是指习惯化经过长时间遗忘恢复到初始状态或者施加新的刺激信号使其恢复至初始状态的过程。在突触电路形成习惯化的过程中,在 5 ms 内对忆阻桥突触 R_1 左侧依次施加 4 次刺激,第 6 ms 时在 R_2 左侧额外施加电压为 200 V 强刺激信号,忆阻桥突触的阻值出现急速弱化,骤然恢复到初始状态,如图 13 所示,表明对突触电路施加新的强刺激时,可快速恢复习惯化。

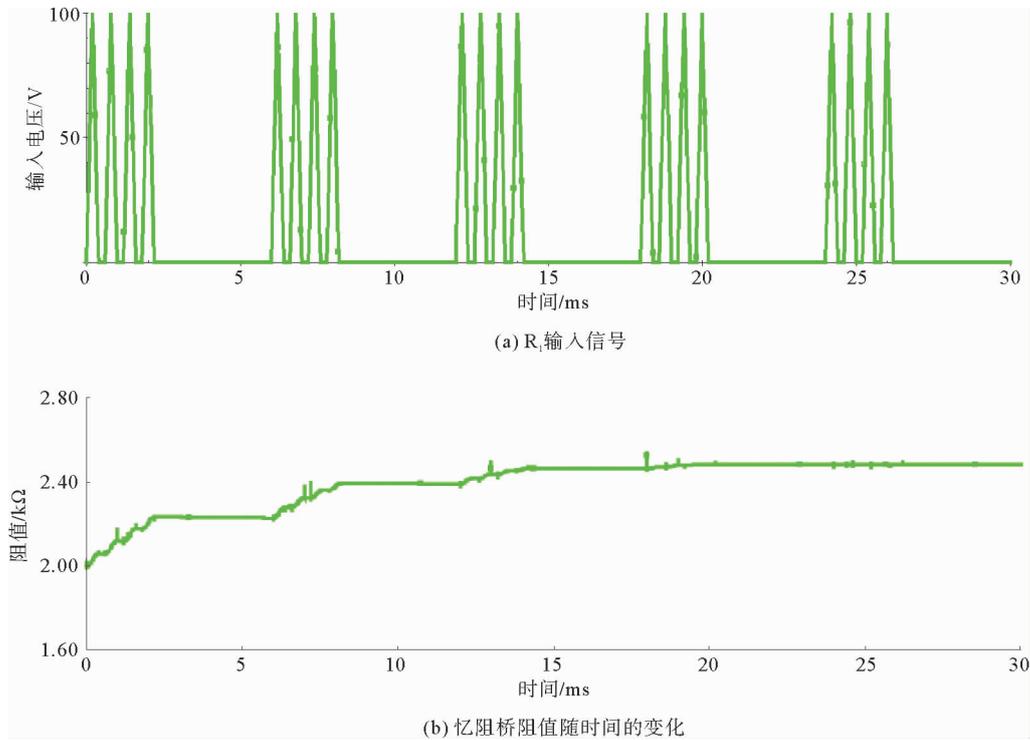
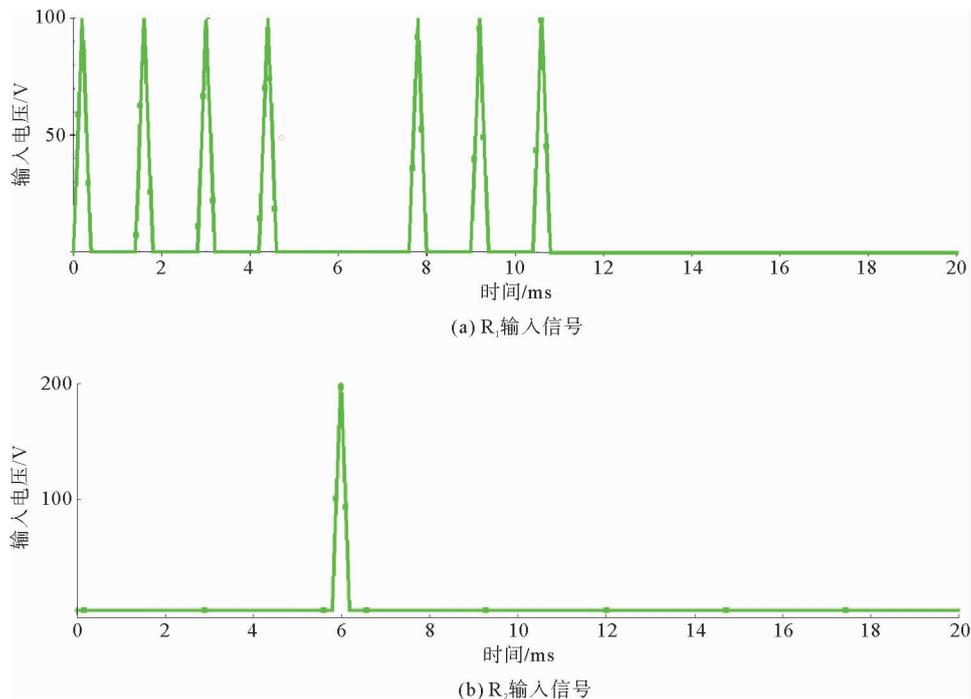


图 12 长期习惯化的实现

Fig. 12 Realization of long-term habituation

观察输出信号电压 V 。可知,在 6 ms 时强刺激信号类似于一种负反馈信号,如图 13(d)所示,这是系统快速恢复至平衡状态的原因。当恢复至初始态时(6 ms),继续对突触电路施加 3 次相同刺激,突触电路对新的刺激信号能够重新进行学习和记忆。这种变化与生物眨眼反射的习惯化恢复过程相似,即在多次同种刺激后,眼睛不再做出眨眼行为,但是当施加新的强刺激后,眼睛重新恢复眨眼反射的过程。



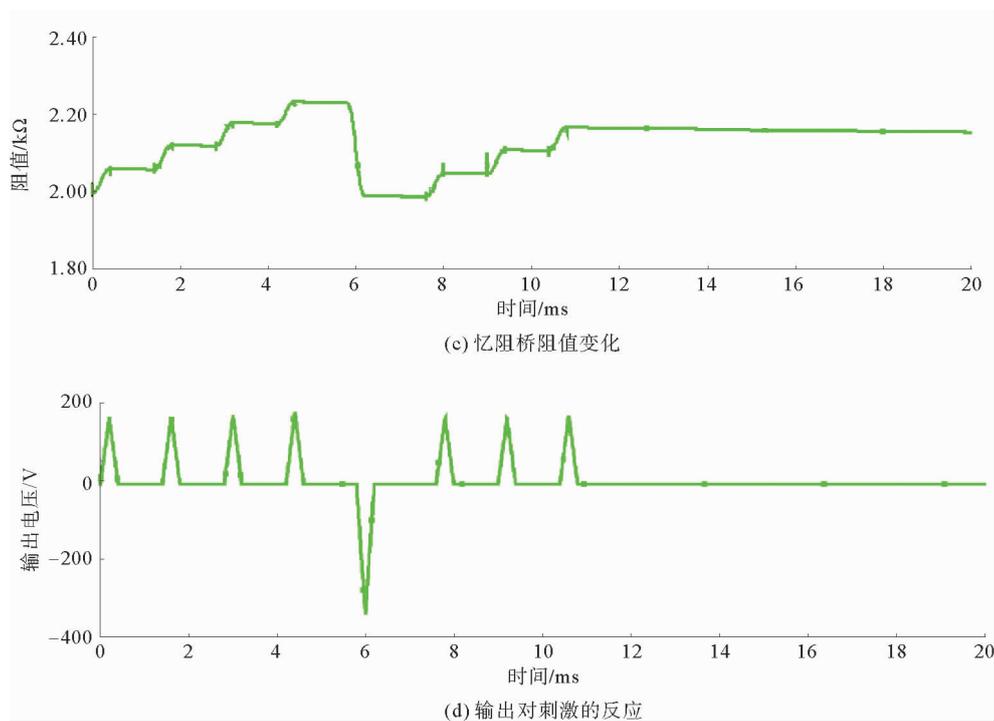


图 13 恢复习惯化的实现

Fig. 13 Realization of restoring habituation

3 结论

本研究利用 6 个忆阻器构建了六忆阻桥突触电路,分析了其在不同刺激信号下短期习惯化、长期习惯化和习惯化恢复的反应特性。研究发现,在同种信号刺激下忆阻桥突触比单忆阻突触习惯化形成的时间更短,具有记忆性和良好的抗遗忘性。在习惯化形成的过程中,阻值尖峰的出现有利于提高突触的学习能力,增强突触的抗遗忘性。仿真结果表明:忆阻桥突触电路能够模拟眨眼习惯化,具有快速学习、记忆和抗遗忘的特点,在施加刺激记忆的基础上能够快速形成和恢复习惯化,可以模拟生物学习、记忆和环境适应能力,为后续生物联想记忆、快速记忆及抗遗忘研究提供理论参考。

参考文献:

- [1] CHUA L. Memristor: The missing circuit element[J]. IEEE Transactions on Circuit Theory, 1971, 18(5): 507-519.
- [2] 张冲, 黄霞. 不连续时滞分数阶忆阻神经网络的非线性动力学分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38(3): 82-90.
ZHANG Chong, HUANG Xia. Nonlinear dynamic analysis of discontinuous fractional memristive neural networks with time delay[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2019, 38(3): 82-90.
- [3] WANG L G, ZHANG W, CHEN Y, et al. Synaptic plasticity and learning behaviors mimicked in single inorganic synapses of Pt/HfO_x/ZnO_x/Ti Nmemristive system[J]. Nanoscale Research Letters, 2017, 12(1): 1-8.
- [4] LIU Q, WANG L D, YANG J, et al. Fusion of image storage and operation based on Ag-Chalcogenide memristor with synaptic plasticity[J/OL]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2017, 26(10). DOI: 10.1142/S0218126617501614.
- [5] PAN R B, LI J, ZHUGE F, et al. Synaptic devices based on purely electronic memristors[J/OL]. Applied Physics Letters, 2016, 108(1). DOI: 10.1063/1.4939436.
- [6] CHEN J, DUAN S K, DONG Z K, et al. A novel spintronic memristor synapse and its RWC learning algorithm[J]. IET Circuits, Devices & Systems, 2018, 12(5): 579-588.
- [7] FLYE-RADAMS J G, RIVER-ARODRIGUEZ E J, YU J W, et al. Regulation of olfactory associative memory by the circadian clock output signal pigment-dispersing factor[J]. The Journal of Neuroscience, 2020, 40(47): 9066-9077.
- [8] BYRNE J H, HAWKINS R D. Nonassociative learning in invertebrates[J/OL]. Cold Spring Harbor Perspectives in Biology,

- 2015,7(5).DOI:10.1101/cshperspect.a021675.
- [9]WANG L D,LI H F,DUAN S K,et al.Pavlov associative memory in a memristive neural network and its circuit implementation[J].Neurocomputing,2016,171(1):23-29.
- [10]周梦哲.基于忆阻器的神经突触学习电路设计[D].重庆:西南大学,2019:98-101.
ZHOU Mengzhe.Memristor-based synapse learning circuit design[D].Chongqing:Southwest University,2019:98-101.
- [11]BAILEY C H,KANDEL E R.Synaptic remodeling,synaptic growth and the storage of long-term memory in Aplysia[J].Progress in Brain Research,2008,1699(1):179-198.
- [12]GEYER M A,BRAFF D L.Habituation of the blink reflex in normals and schizophrenic patients[J].Psychophysiology,1982,19(1):1-6.
- [13]KOUTROUMANIDIS M,PAPADIMITRIOU A,BOUZAS E,et al.Reduced brain stem excitability in mitochondrial myopathy:Evidence for early detection with blink reflex habituation studies[J].Muscle & Nerve,2015,19(12):1586-1595.
- [14]FERNADEZ I,DELETIS V.Blink reflex[J].Neurophysiology in Neurosurgery,2020,2:229-237.
- [15]朱任杰,张涛,柯志强.基于忆阻器的模拟人工神经元电路设计[J].微电子学与计算机,2014,31(8):171-176.
ZHU Renjie,ZHANG Tao,KE Zhiqiang.Design of analog artificial neuron circuit based on memristor[J].Microelectronics & Computer,2014,31(8):171-176.
- [16]唐浩文.忆阻型多层神经网络的设计与应用研究[D].成都:电子科技大学,2020.
TANG Haowen.Research on design of memristive multilayer neural network and its application[D].Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China,2020.
- [17]BIOLEK Z,BIOLEK D,BIOLKOVA V.SPICE model of memristor with nonlinear dopant drift[J].Radioengineering,2009,18(2):210-214.
- [18]GEORGIU P S,YALIRAKI S N,DRAKAKIS E M,et al.Window functions and sigmoidal behaviour of memristive systems[J].International Journal of Circuit Theory and Applications,2016,44(9):1685-1696.
- [19]WANG L D,DRAKAKIS E,DUAN S K,et al.Memristor model and its application for chaos generation[J/OL].International Journal of Bifurcation and Chaos,2012,22(8).DOI:10.1142/S0218127412502057.
- [20]VALLS-SOLE J.Spontaneous,voluntary,and reflex blinking in clinical practice[J].Journal of Clinical Neurophysiology,2019,36(6):415-421.

(责任编辑:齐敏华)