

## 基于神经元的方波发生器设计及参数优化

张明亮<sup>1,2,3</sup>, 徐新阳<sup>2</sup>, 杨新梦<sup>2</sup>, 刘丽茹<sup>2</sup>

1. 陆军工程大学石家庄校区电磁环境效应重点实验室, 河北 石家庄 050003; 2. 石家庄铁道大学机械工程学院, 河北 石家庄 050043; 3. 兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070

**【摘要】**为了保证电子设备在复杂的电磁环境中正常运行,需要对其进行电磁防护。传统的电磁防护方法尽管已取得较好的防护效果,但是还存在一定的不足。为了弥补传统电磁防护的不足,本研究提出基于神经抗扰机制的电磁仿生方法,并具体提出基于神经元抗扰机制的新型方波发生器。采用最接近生物神经元电生理活动的数学模型Hodgkin-Huxley模型对新型方波发生器进行设计。利用Matlab的Simulink工具箱搭建方波发生器的仿真程序,分析方波信号占空比的特性,得到模型参数对占空比的影响程度。基于田口方法的望小特性优化方波发生器的模型参数,从而得到特定占空比。该方波发生器可为智能电子设备提供稳定可靠的方波信号。

**【关键词】**电磁防护仿生;神经元;方波发生器;田口方法;望小特性

**【中图分类号】**R338.8;Q811.2

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2022)05-0590-09

## Design of a neuron-based square wave generator and parameters optimization

ZHANG Mingliang<sup>1,2,3</sup>, XU Xinyang<sup>2</sup>, YANG Xinmeng<sup>2</sup>, LIU Liru<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Electromagnetic Environment Effects, Shijiazhuang Campus of Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. Key Laboratory of Opto-electronic Technology and Intelligent Control (Ministry of Education), Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

**Abstract:** The electromagnetic protection for electronic equipments is necessary for ensuring the normal operation of the electronic equipments in complex electromagnetic environment. Although the traditional electromagnetic protection methods have achieved some protection effects, they still have drawbacks. In the study, a bio-inspired electromagnetic protection method is proposed based on the anti-interference mechanism of neuron to make up the shortcomings of traditional electromagnetic protection methods, and the corresponding square wave generator is designed by Hodgkin-Huxley model, a mathematical model closest to the electrophysiological activity of neurons. The simulation program for the novel square wave generator which is set up by the Simulink toolbox of Matlab is used to analyze the characteristics of the duty ratio of square wave signals and obtain the relationship between duty ratio and model parameters. In order to obtain the special duty ratio, the model parameters of the square wave generator are optimized based on smaller-the-better characteristics of Taguchi method. The proposed square wave generator can provide stable and reliable square wave signals for intelligent electrical equipments.

**Keywords:** bio-inspired electromagnetic protection; neuron; square wave generator; Taguchi method; smaller-the-better characteristic

**【收稿日期】**2021-11-19

**【基金项目】**河北省教育厅青年拔尖项目(BJ2018019);光电技术与智能控制教育部重点实验室(兰州交通大学)开放课题(KFKT2020-7);牵引动力国家重点实验室(西南交通大学)开放课题(TPL2010)

**【作者简介】**张明亮,博士,讲师,研究方向:电磁防护仿生、磁悬浮, E-mail: zmlhit@126.com

**【通信作者】**徐新阳,硕士研究生,研究方向:电磁防护仿生, E-mail: 540200728@qq.com

## 前言

神经系统是生物的重要组成部分之一,对生理活动起着重要的调控作用<sup>[1]</sup>。神经系统由数以万亿计的神经元组成,这些神经元具有传递和处理复杂信号的功能,且在信息传递处理时表现出很强的抗干扰能力。由于电子设备的智能化程度不断提高,电路中的电子元件越来越多,集成度越来越高。但随之而来的是电路工作时有意无意向外辐射和传导电磁场,使得自身和其它电子元件受到影响,需要对

电子设备进行电磁防护。传统的电磁防护方法已经取得了较好的防护效果,但随着电磁环境日益复杂,传统方法不能满足防护的全部要求。针对电磁防护的现状,中国工程院刘尚合院士在2002年以生物抗干扰现象和行为为启发提出了电磁防护仿生的概念,利用生物本身对电磁干扰的防护和自我修复能力实现电磁防护的目的<sup>[2]</sup>。电磁防护仿生的理论基础是生物的抗干扰机制,尤其是神经元的抗干扰机制。为了揭示神经元的抗干扰机制,需要对神经元的动力学特性进行研究。

在20世纪50年代,Hodgkin和Huxley两位学者首次提出描述神经元的数学模型,即Hodgkin-Huxley(HH)模型,该模型是最接近生物机理的神经元模型<sup>[3]</sup>。2015年,郭磊等<sup>[4]</sup>通过磁刺激脑部穴位获得了脑电信号,以此构建了脑功能网络,并对脑功能网络进行分析,发现信息传递速度在磁刺激下增强的现象。2017年,闻佳等<sup>[5]</sup>运用FPGA实现了基于HH模型的神经网络硬件仿真,验证了硬件仿真模型结果的正确性。2018年,易飞鸿等<sup>[6]</sup>通过数值模拟的方法分析了HH模型各个离子通道反电动势参数对动作电位的影响。2019年,徐桂芝等<sup>[7]</sup>运用经颅磁刺激技术进行相关研究,研究表明经颅磁刺激技术在治疗神经性疾病具有显著的作用。

为了更好地利用神经元的抗干扰机制,本研究提出基于神经元的方波发生器。利用Simulink搭建神经元仿真分析程序,在神经元仿真分析程序的基础上搭建基于神经元的方波发生器实现程序,利用Minitab软件设计田口试验方案,对方波发生器的影响参数进行研究,分析模型参数影响占空比的程度,得到最优组合参数方案。

## 1 基于HH模型的方波发生器建模

在众多神经元数学模型中,HH模型中的参数与电路参数比较接近,且具有含义明确的等效电路特征,易与仿生原型电路结合,故本研究重点对HH模型进行分析。

### 1.1 HH模型

HH模型的数学表达式<sup>[3]</sup>如下所示:

$$\begin{cases} CdV/dt = G_{Na}m^3h(E_{Na} - V) + G_Kn^4(E_K - V) + G_L(E_L - V) + I \\ dn/dt = \alpha_n(1 - n) - \beta_n \\ dh/dt = \alpha_h(1 - h) - \beta_h \\ dm/dt = \alpha_m(1 - m) - \beta_m \end{cases} \quad (1)$$

其中, $C$ 表示神经元膜电容, $V$ 表示神经元膜电位, $G_{Na}$ 表示钠离子通道最大导电率, $m$ 表示钠离子通道激活参数, $h$ 表示钠离子通道不激活参数, $E_{Na}$ 表示钠离子

通道反电动势, $G_K$ 表示钾离子通道最大导电率, $n$ 表示钾离子通道激活参数, $E_K$ 表示钾离子通道反电动势, $G_L$ 表示漏电流电导, $E_L$ 表示漏电流反电动势, $I$ 表示外界刺激电流, $\alpha$ 和 $\beta$ 函数是与神经元膜电位有关的速率常数, $\alpha$ 函数和 $\beta$ 函数表达式如下所述:

$$\begin{cases} \alpha_m = 0.1(V - V_{rest} - 25)/(1 - \exp((V_{rest} + 25 - V)/10)) \\ \beta_m = 4\exp((V_{rest} - V)/18) \\ \alpha_h = 0.07\exp((V_{rest} - V)/20) \\ \beta_h = 1/(1 + \exp((V_{rest} + 30 - V)/10)) \\ \alpha_n = 0.01(V - V_{rest} - 10)/(1 - \exp((V_{rest} + 10 - V)/10)) \\ \beta_n = 0.125\exp((V_{rest} - V)/80) \end{cases} \quad (2)$$

### 1.2 HH模型仿真程序搭建

HH模型是由4个一阶微分方程组式(1)组成,该方程具有非线性和耦合特性,解析求解十分困难。为了得到特定条件下的时频形影,需要对其进行数值求解。为了方便数值求解,本研究利用Simulink工具箱搭建了用于计算HH模型的仿真程序,如图1所示。

根据式(1)和式(2),可得到 $h$ 、 $m$ 、 $n$ 参数实现的子模块,如图2~图4所示。

为了能够得到 $V$ 的解,需对HH模型中的各个参数进行赋值,仿真参数见表1。

### 1.3 基于神经元的方波发生器实现程序搭建

方波信号被广泛用作通讯、雷达、计算机及其它电子设备的信号源。由于神经元具有抗干扰特性,本研究以HH模型为基础提出基于神经元的方波发生器,可以为电子信息和人工智能设备提供稳定抗干扰的信号源。在图1的基础上利用Simulink工具箱搭建新型方波发生器的实现程序,如图5所示。

方波发生器程序较HH模型程序而言,程序中加入了Switch模块,该模块的功能是用常数去截取动作电位。设置方波的高电平为5,低电平为0。当动作电位大于截取常数时,输出高电平5;当动作电位小于截取常数时,输出低电平0。假定外界刺激的幅值为50  $\mu A/cm^2$ ,周期10,占空比20,截取参数为30 mV时仿真结果见表2。由表2数据可以观察到方波波形在初始阶段会有较大的波动,即方波的占空比和周期在开始的一段时间内不稳定。随着仿真时间的增加,在第3个、第4个波形后,占空比和周期趋于稳定值。计算两个相邻波形的周期差(即后一个波形周期减去前一个波形周期)为:-0.247 2、-0.008 2、0.000 4、0.000 1、0、0、0、0,从周期差可以看出波形周期差值绝对值逐步趋于0,周期从第4组开始趋于稳定,并保持为10;同理,对相邻两个方波占空比做

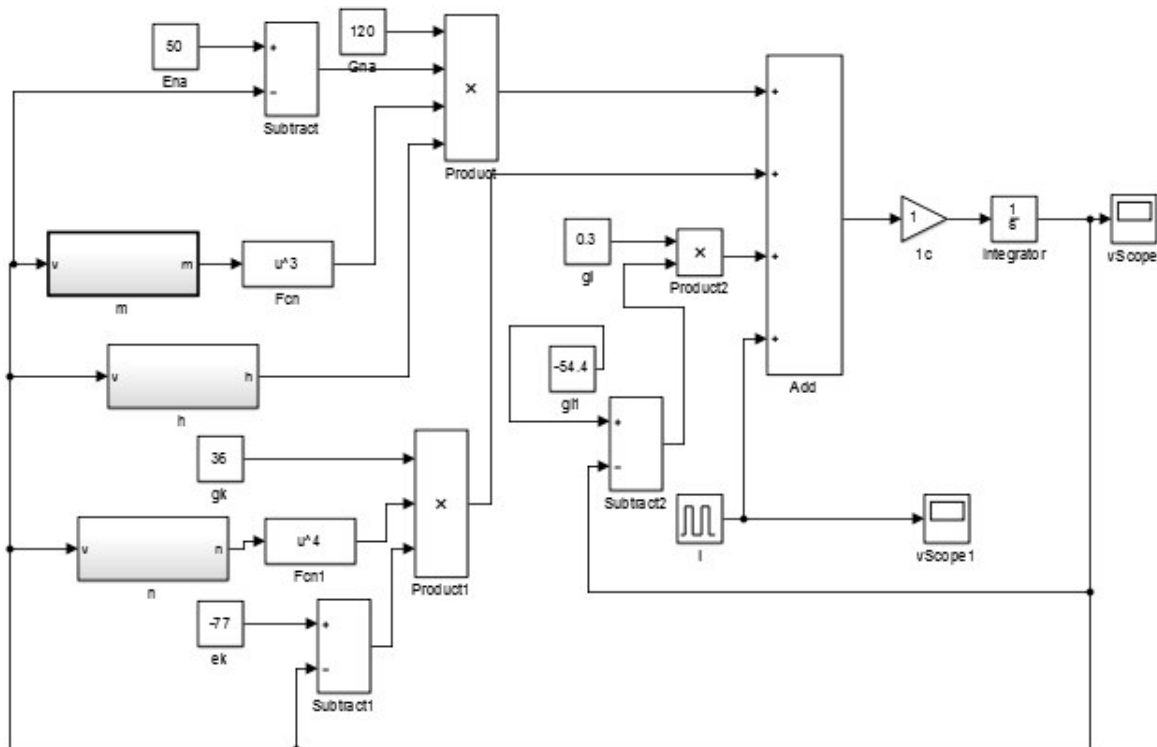


图 1 HH 模型整体程序图

Figure 1 The whole program of Hodgkin-Huxley (HH) model

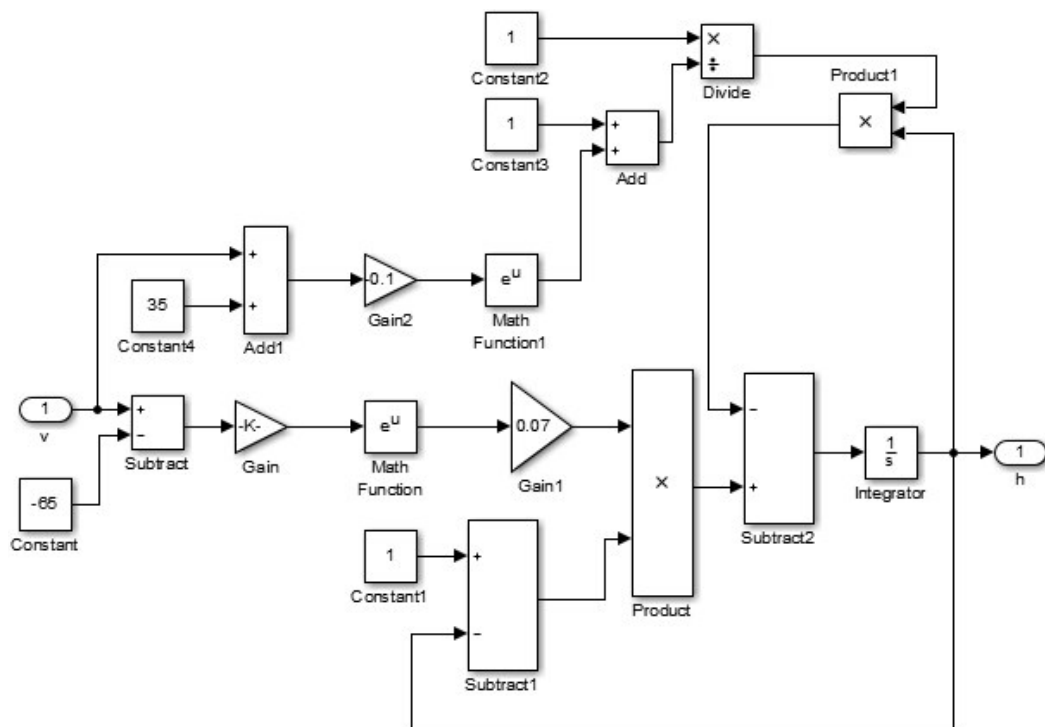


图 2 参数  $h$  程序模块

Figure 2 Parameter  $h$  program module

差,差值为-0.988 1、-0.071 5、0.000 8、0、0、0、0、0,占空比差值也逐步趋于0,并从第5个波形开始占空比趋于定值。为了波形稳定,本研究采用第10个波形作为标准,因为此时的周期和占空比已经比较稳定。

由于设置不同的截取常数,可以得到不同占空

比的方波信号。本研究取30、0、-15、-25、-30、-35 mV为截取常数,研究截取对方波发生器占空比的影响。不同截取常数时第10个波形的仿真结果见表3。由表3可以观察到以-35 mV作为截取常数时具有较大的占空比,波形的上升沿时间更小,故以这时截

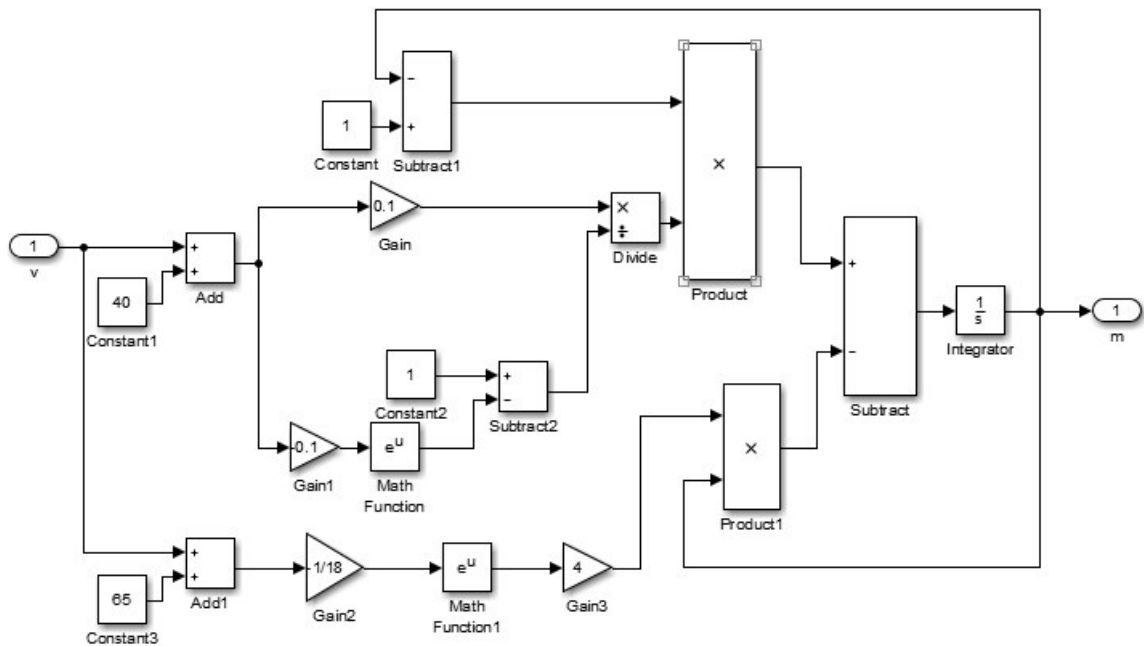


图3 参数  $m$  程序模块  
Figure 3 Parameter  $m$  program module

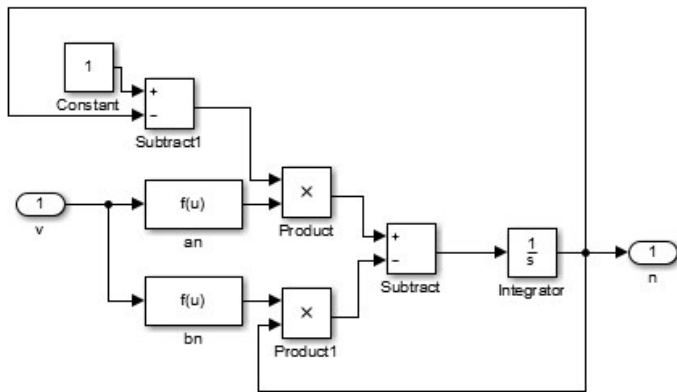


图4 参数  $n$  程序模块  
Figure 4 Parameter  $n$  program module

表 1 HH 模型中的各参数取值 Table 1 Value of each parameter in HH model		
参数	名称	取值
$C$	神经元膜电容	$1\text{ }\mu\text{F}/\text{cm}^2$
$G_{\text{Na}}$	钠离子通道最大导电率	$120\text{ mS}/\text{cm}^2$
$G_{\text{K}}$	钾离子通道最大导电率	$36\text{ mS}/\text{cm}^2$
$G_{\text{L}}$	漏电流电导	$0.3\text{ mS}/\text{cm}^2$
$E_{\text{Na}}$	钠离子通道反转电动势	$50\text{ mV}$
$E_{\text{K}}$	钾离子通道反转电动势	$-77\text{ mV}$
$E_{\text{L}}$	漏电流反转电动势	$-54.4\text{ mV}$

取的常数为截取标准,研究HH模型中不同参数(各离子通道的电导和反电动势)对占空比的影响。

由以上仿真结果可知,基于神经元的方波发生器具有一定的自我调节功能,方波的占空比和周期

逐渐趋于稳定。

2 基于田口法的参数优化

基于神经元的方波发生器可以作为其它电子设备的外部输入信号。现阶段,我国在磁悬浮列车方面取得了较大进展,磁悬浮列车的关键组成部分之一是悬浮斩波器<sup>[8-13]</sup>。悬浮斩波器作为控制执行单元,通过把悬浮间隙位移、加速度等信号转换为数字信号,对这些数字信号计算值与预设值进行比较,根据对比结果反馈到中央控制器,向悬浮斩波器发出控制指令,保证列车的正常行驶。中央控制器发出控制指令实质是通过脉冲激励信号不同占空比控制悬浮斩波器内部相关开关器件开闭时间占比,从而改变电磁铁的电流大小<sup>[14-18]</sup>。因此本研究以磁悬浮列车斩波器需要的方波信号要求为例进行分析。基



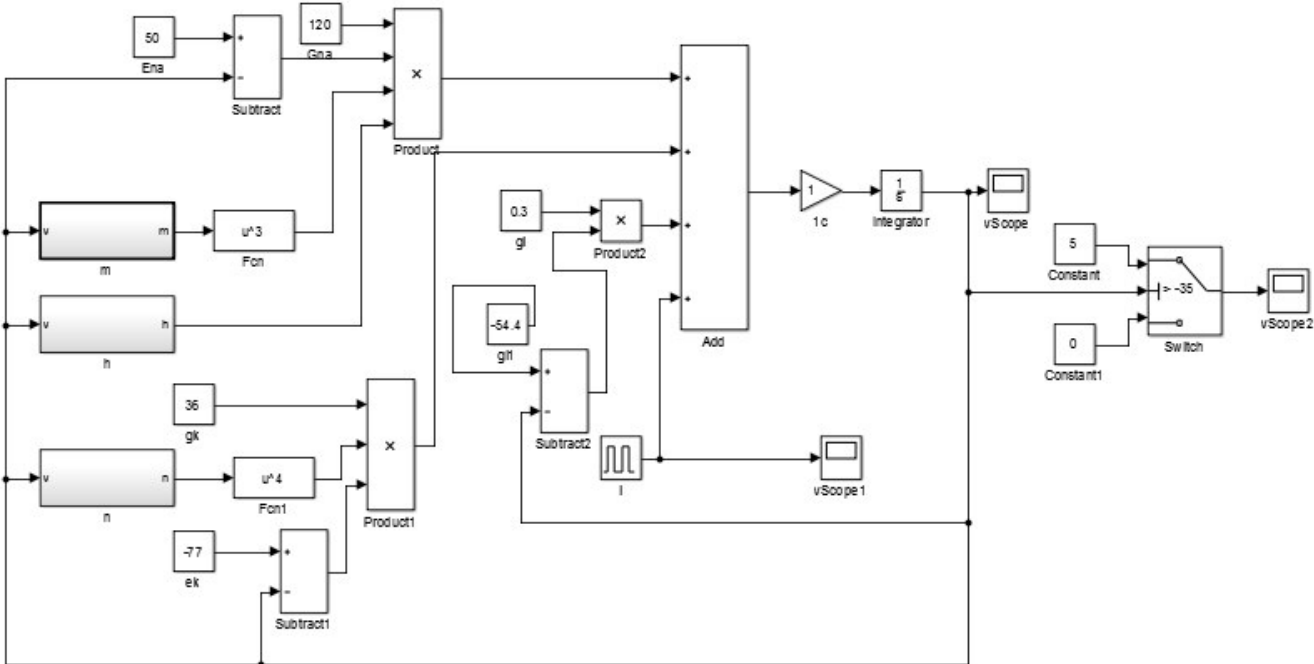


图 5 基于神经元的方波发生器程序图

Figure 5 Program chart of square wave generator based on neurons

表 2 截取常数为 30 mV 时的特征

Table 2 Features at intercept constant of 30 mV

波形数	上升沿/ms	下降沿/ms	时间间隔/ms	周期/ms	占空比/%
1	0.856 2	1.396 1	0.539 9	-	-
2	11.111 1	11.539 1	0.428 0	10.254 9	5.264 8
3	21.118 8	21.539 3	0.420 5	10.007 7	4.276 7
4	31.118 3	31.538 9	0.420 6	9.999 5	4.205 2
5	41.118 2	41.538 8	0.420 6	9.999 9	4.206 0
6	51.118 2	51.538 8	0.420 6	10.000 0	4.206 0
7	61.118 2	61.538 8	0.420 6	10.000 0	4.206 0
8	71.118 2	71.538 8	0.420 6	10.000 0	4.206 0
9	81.118 2	81.538 8	0.420 6	10.000 0	4.206 0
10	91.118 2	91.538 8	0.420 6	10.000 0	4.206 0
11	101.118 2	101.538 8	0.420 6	10.000 0	4.206 0

表 3 不同截取常数特征

Table 3 Features at different intercept constants

截取常数/ mV	上升沿/ms	下降沿/ms	时间间隔/ms	周期/ms	占空比/%
0	91.008 9	92.104 9	1.096 0	10	10.960 0
-15	90.942 2	92.409 1	1.466 9	10	14.669 0
-25	90.886 4	92.633 1	1.746 7	10	17.467 0
-30	90.846 8	92.745 0	1.746 7	10	17.467 0
-35	90.795 9	92.855 8	2.059 9	10	20.599 0

于神经元的方波发生器可为悬浮斩波器的内部开关器件提供脉冲激励信号。由于悬浮斩波器脉冲激励

的特殊性(占空比大于 50% 才能稳定悬浮),而基于神经元的方波发生器占空比小于 50%,故将方波发生器的反相波形作为脉冲激励,即低电平变为高电平,高电平变为低电平。由此可知,田口试验的期望特性要求方波发生器产生的方波波形的占空比越小越好。为了得到更小占空比的方波波形,接下来将利用田口对方波发生器的影响参数进行优化。

由于方波发生器的主要影响参数为 HH 模型的参数,分析 HH 模型可知有 6 个影响因子分别为:钠通道最大电导  $G_{Na}$ 、钾通道最大电导  $G_K$ 、漏电导  $G_L$ 、钠通道反转电势  $E_{Na}$ 、钾通道反转电势  $E_K$ 、漏电流反转电势  $E_L$ 。本研究采用 6 因子 3 水平田口试验分析模型参数影响方波占空比的规律。根据神经元模型生理学参数取值分别设计出每个因子的 3 个水平,见表 4。试验首先要运用 Minitab 软件进行田口设计,对各个因子和水平进行正交组合,然后根据因子组合进行试验,方波占空比作为试验响应。在 Minitab 中共获得 27 个正交组合  $L_{27}(3^6)$ ,即需要完成 27 组试验,试验各因子和水平见表 5。

根据田口试验正交表进行试验仿真分析,以第 1 组试验为例,分析每个波形的特征,见表 6。

由表 6 数据可以观察到从第 7 个波形数据开始周期和占空比都趋于稳定。为了保证稳定,以第 10 个波形特征为标准,周期稳定在 10,占空比稳定在 21.629%。根据第 1 组试验波形的特性,同理得到第 2 组到第 27 组试验第 10 个波形占空比响应,见表 7。根据表 7 的数据可以观察到第 9 组占空比最小,最小

表 4 田口试验参数设计表  
Table 4 Parameter design of Taguchi test

因素	水平		
	1	2	3
$E_{Na}/mV$	46	50	52
$E_K/mV$	-81	-77	-75
$E_L/mV$	-58.4	-54.4	-52.4
$G_{Na}/mS \cdot cm^{-2}$	116	120	122
$G_K/mS \cdot cm^{-2}$	32	36	38
$G_L/mS \cdot cm^{-2}$	0.1	0.3	0.4

表 5 田口试验正交表  
Table 5 Orthogonal array of Taguchi test

组别	$E_{Na}/mV$	$E_K/mV$	$E_L/mV$	$G_{Na}/mS \cdot cm^{-2}$	$G_K/mS \cdot cm^{-2}$	$G_L/mS \cdot cm^{-2}$
1	46	-81	-58.4	116	32	0.1
2	46	-81	-58.4	116	36	0.3
3	46	-81	-58.4	116	38	0.4
4	46	-77	-54.4	120	32	0.1
5	46	-77	-54.4	120	36	0.3
6	46	-77	-54.4	120	38	0.4
7	46	-75	-52.4	122	32	0.1
8	46	-75	-52.4	122	36	0.3
9	46	-75	-52.4	122	38	0.4
10	50	-81	-54.4	122	32	0.3
11	50	-81	-54.4	122	36	0.4
12	50	-81	-54.4	122	38	0.1
13	50	-77	-52.4	116	32	0.3
14	50	-77	-52.4	116	36	0.4
15	50	-77	-52.4	116	38	0.1
16	50	-75	-58.4	120	32	0.3
17	50	-75	-58.4	120	36	0.4
18	50	-75	-58.4	120	38	0.1
19	52	-81	-52.4	120	32	0.4
20	52	-81	-52.4	120	36	0.1
21	52	-81	-52.4	120	38	0.3
22	52	-77	-58.4	122	32	0.4
23	52	-77	-58.4	122	36	0.1
24	52	-77	-58.4	122	38	0.3
25	52	-75	-54.4	116	32	0.4
26	52	-75	-54.4	116	36	0.1
27	52	-75	-54.4	116	38	0.3

值为 19.946%。运用 Minitab 软件对试验占空比响应进行统计学分析,见表 8。

表 8 为采用望小特性对占空比处理所得计算结果,由表 8 的数据可以计算得到因子水平对占空比的信噪比影响,见表 9。表 9 中的 Delta 表示信噪比的极差值,极差值的大小反映了因子影响的重要程度,极

表 6 第 1 组试验数据  
Table 6 Test data in group 1

波形数	上升沿/ms	下降沿/ms	时间间隔/ms	周期/ms	占空比/%
1	0.580 1	2.720 0	2.139 9	-	-
2	10.835 2	13.014 4	2.179 2	10.255 1	21.399
3	20.881 8	23.045 6	2.163 8	10.046 6	21.792
4	30.877 8	33.040 4	2.162 6	9.996 0	21.638
5	40.878 4	43.041 3	2.162 9	10.000 6	21.626
6	50.878 3	53.041 1	2.162 8	9.999 9	21.629
7	60.878 3	63.041 2	2.162 9	10.000 0	21.628
8	70.878 3	73.041 2	2.162 9	10.000 0	21.629
9	80.878 3	83.041 2	2.162 9	10.000 0	21.629
10	90.878 3	93.041 2	2.162 9	10.000 0	21.629
11	100.878 3	103.041 2	2.162 9	10.000 0	21.629

表 7 第 2 组~第 27 组试验数据的响应特性  
Table 7 Response characteristics of test data from groups 2 to 27

组别	上升沿/ms	下降沿/ms	时间间隔/ms	周期/ms	占空比/%
2	90.844 9	92.892 6	2.047 7	10	20.477
3	90.840 7	92.839 1	1.998 4	10	19.984
4	90.817 8	92.980 7	2.162 9	10	21.629
5	90.795 6	92.843 2	2.047 6	10	20.476
6	90.793 9	92.788 7	1.994 8	10	19.948
7	90.801 3	92.962 7	2.161 4	10	21.614
8	90.771 9	92.816 7	2.044 8	10	20.448
9	90.770 6	92.765 2	1.994 6	10	19.946
10	90.799 4	92.946 5	2.147 1	10	21.471
11	90.794 5	92.851 3	2.056 8	10	20.568
12	90.872 9	92.968 0	2.095 1	10	20.951
13	90.766 8	92.871 2	2.104 4	10	21.044
14	90.770 6	92.785 6	2.015 0	10	20.150
15	90.841 3	92.892 7	2.051 4	10	20.514
16	90.794 6	92.926 2	2.131 6	10	21.316
17	90.811 4	92.858 4	2.047 0	10	20.470
18	90.836 8	92.902 2	2.065 4	10	20.654
19	90.761 3	92.876 4	2.115 1	10	21.151
20	90.855 1	92.977 6	2.122 5	10	21.225
21	90.796 2	92.835 9	2.039 7	10	20.397
22	90.800 0	92.926 2	2.126 2	10	21.262
23	90.847 8	92.959 8	2.112 0	10	21.120
24	90.829 7	92.872 9	2.043 2	10	20.432
25	90.757 8	92.847 7	2.089 9	10	20.899
26	90.821 4	92.901 9	2.080 5	10	20.805
27	90.796 9	92.806 7	2.009 8	10	20.098

差值越大说明因子对响应影响越大,反之因子对响应影响越小<sup>[19]</sup>。从占空比信噪比响应表可以观察因子对占空比的影响程度大小顺序为: $G_K>G_L>G_{Na}>E_K>$

表 8 信噪比和均值的计算结果  
Table 8 Calculation results of signal-to-noise ratios (SNR)  
and their mean values (dB)

组别	信噪比	均值	组别	信噪比	均值
1	-26.700	21.629	15	-26.241	20.514
2	-26.225	20.477	16	-26.574	21.316
3	-26.013	19.984	17	-26.222	20.470
4	-26.700	21.629	18	-26.300	20.654
5	-26.224	20.476	19	-26.506	21.151
6	-25.998	19.948	20	-26.537	21.225
7	-26.694	21.614	21	-26.191	20.397
8	-26.213	20.448	22	-26.552	21.262
9	-25.997	19.946	23	-26.493	21.120
10	-26.637	21.471	24	-26.206	20.432
11	-26.263	20.568	25	-26.402	20.899
12	-26.424	20.951	26	-26.363	20.805
13	-26.462	21.044	27	-26.063	20.098
14	-26.085	20.150	-	-	-

表 9 占空比信噪比响应表  
Table 9 SNR response of duty ratio

水平	$E_{Na}/mV$	$E_K/mV$	$E_L/mV$	$G_{Na}/mS \cdot cm^{-2}$	$G_K/mS \cdot cm^{-2}$	$G_L/mS \cdot cm^{-2}$
1	-26.31	-26.39	-26.37	-26.28	-26.58	-26.50
2	-26.36	-26.33	-26.34	-26.36	-26.29	-26.31
3	-26.37	-26.31	-26.33	-26.39	-26.16	-26.23
Delta	0.06	0.07	0.04	0.10	0.42	0.27
排序	5	4	6	3	1	2

$E_{Na} > E_L$ 。

在 Minitab 软件中还可以分析得到信噪比主效应图、信噪比残差图,如图 6 和图 7 所示。

由图 6 信噪比主效应图可以观察到因子对信噪比贡献的程度和水平情况中信噪比的变化趋势;由信噪比越大越好可以得到最优因子组合( $G_K$ 、 $G_L$ 、 $G_{Na}$ 、 $E_K$ 、 $E_{Na}$ 、 $E_L$ )取值为:38、0.4、116、-75、46、-52.4。

由图 7 信噪比残差图观察可以得到以下结论:

(1)正态概率图:均值和信噪比残差数值点分布近似

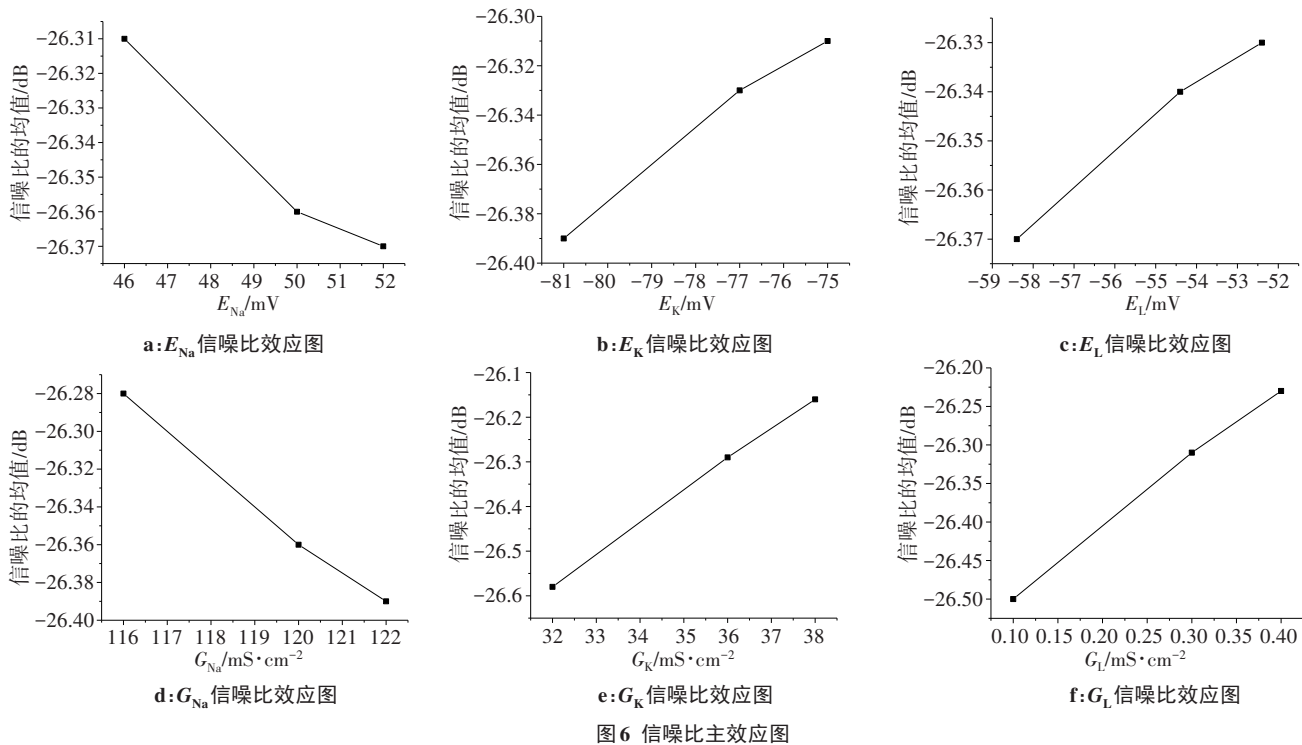


Figure 6 SNR main effect diagrams

一条直线,所以可以认定为正态分布;(2)直方图:残差的直方图近似为钟形曲线可以认定为过程稳定;(3)残差拟合图:数据点分布随机,没有异常点;(4)残差顺序图:数据点分布随机,没有异常点<sup>[20-23]</sup>。

利用田口法优化参数时通常根据方差分析确定因子对响应影响程度,根据表 8 的数据得到信噪比的方差分析数据见表 10。其中 Seq SS 为顺序偏差平方

和;Adj SS 为调整后的偏差平方和<sup>[24]</sup>。

在田口试验中为了判定各个因子的影响程度采用了统计学中的置信度,在田口法分析时通常取置信度大于等于 99.5%,当  $P < 0.5\%$  时,说明因子对实验结果影响显著,反之,因子对实验结果影响不显著。分析表 10 方差数据可以观察到实验中的 6 个因子的  $P$  值都小于 0.5%,所以 6 个因子都对响应指标有显著

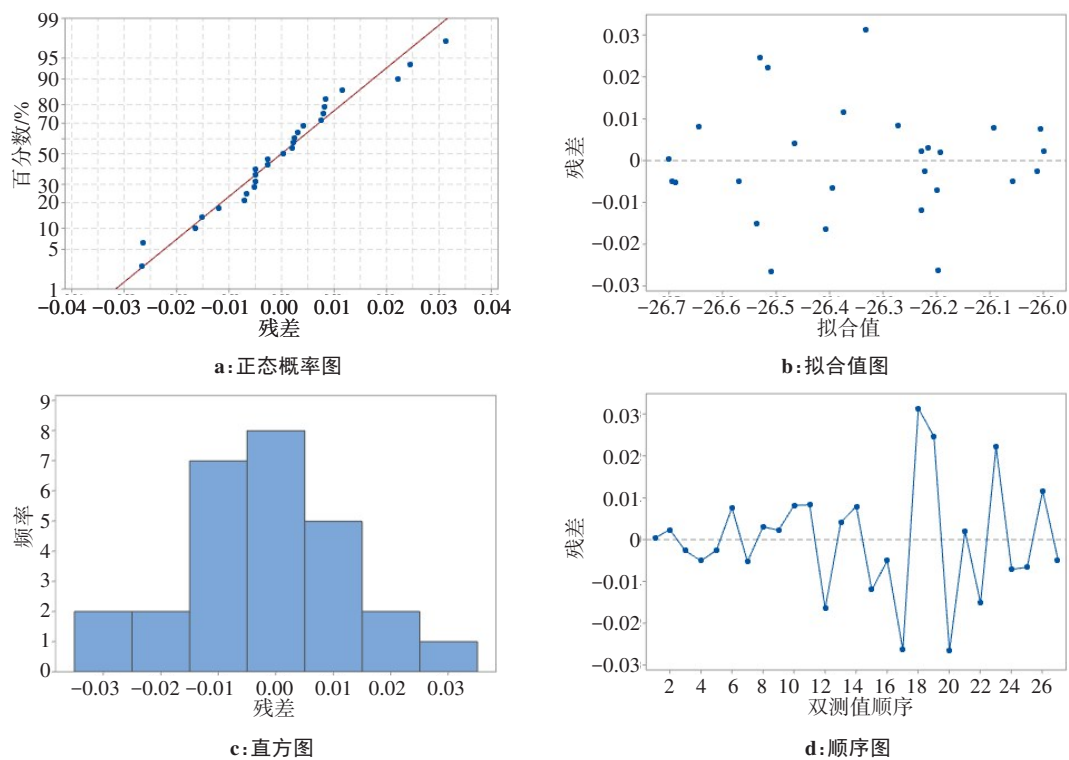


图7 信噪比残差图  
Figure 7 SNR residual graphs

表 10 信噪比的方差分析				
Table 10 Variance analysis of SNR				
来源	自由度	Seq SS	Adj SS	P 值
$E_{Na}$	2	0.018	0.018 7	0.000
$E_K$	2	0.027	0.027 8	0.000
$E_L$	2	0.007	0.007 2	0.002
$G_{Na}$	2	0.051	0.051 5	0.000
$G_K$	2	0.837	0.837 4	0.000
$G_L$	2	0.338	0.338 7	0.000
残差误差	14	0.004	0.004 7	-
合计	26	1.286	-	-

影响,都为重要因子<sup>[25]</sup>。根据上述方差分析得到重要因子,结合前面因子对结果的影响程度和根据信噪比主效应图得出的因子组合,可以确定优化方案为  $G_K=38\text{ mS/cm}^2$ 、 $G_L=0.4\text{ mS/cm}^2$ 、 $G_{Na}=116\text{ mS/cm}^2$ 、 $E_K=-75\text{ mV}$ 、 $E_{Na}=46\text{ mV}$ 、 $E_L=-52.4\text{ mV}$ 。

最后通过 Minitab 软件中“预测田口结果”功能对上述所得到的因子组合进一步优化<sup>[26]</sup>,仿真结果见表 11。由表 11 可以观察到采用正交方法的预测功能可以得到比设置因子和水平方案更优的组合,该组合可以使占空比更小,由设计组因子水平组的占空比 19.946 0% 改变到优化方案因子水平组合的占空比 19.703 2%,实现

方案	预测因子水平						预测值均值/%
	$E_{Na}/\text{mV}$	$E_K/\text{mV}$	$E_L/\text{mV}$	$G_{Na}/\text{mS}\cdot\text{cm}^{-2}$	$G_K/\text{mS}\cdot\text{cm}^{-2}$	$G_L/\text{mS}\cdot\text{cm}^{-2}$	
第 9 组	46	-75	-52.4	122	38	0.4	19.946 0
优化方案	46	-75	-52.4	116	38	0.4	19.703 2

了响应期望最小化。为了验证优化方案预测结果的正确性,利用图 5 的程序图得到仿真计算结果与预测结果对比情况,见表 12。由表 12 可以观察到预测结果和仿真结果十分接近,相对误差仅为 0.09%,因此可知利用田口方法预测得到优化方案和响应结果是可行的。运

用 Minitab 软件进行田口试验分析基于神经元的方波发生器占空比规律,提高分析效率,减少试验次数,降低仿真的计算量。

3 结 论



表 12 优化方案仿真计算结果与预测结果数据对比关系

Table 12 Comparison between simulation and prediction results of optimization scheme

方案	预测因子水平						预测值均值/%
	$E_{Na}/mV$	$E_K/mV$	$E_L/mV$	$G_{Na}/mS \cdot cm^{-2}$	$G_K/mS \cdot cm^{-2}$	$G_L/mS \cdot cm^{-2}$	
预测结果	46	-75	-52.4	116	38	0.4	19.703 2
仿真结果	46	-75	-52.4	116	38	0.4	19.685 0

本研究利用 Simulink 工具箱,搭建了基于神经元的方波发生器仿真程序,基于田口法优化方波发生器的主要影响参数,得到主要结果如下:(1)研究方波发生器程序中不同的截取常数对方波的影响,发现方波波形初始阶段有较大的波动,随着仿真时间的延长,方波的占空比和周期趋于稳定值,这一现象说明基于神经元的方波发生器具有一定的自我调节性能;(2)利用田口法进行 6 因子 3 水平试验研究发现各因素对方波发生器影响的主次顺序为: $G_K>G_L>G_{Na}>E_K>E_{Na}>E_L$ ;(3)根据田口法预测功能,得到最优影响因子及水平为: $G_K=38\text{ mS/cm}^2$ 、 $G_L=0.4\text{ mS/cm}^2$ 、 $G_{Na}=116\text{ mS/cm}^2$ 、 $E_K=-75\text{ mV}$ 、 $E_{Na}=46\text{ mV}$ 、 $E_L=-52.4\text{ mV}$ ,且优化方案的占空比为 19.703 2%,比原设计第 9 组方案的占空比 19.946 0%还要小,实现了方波信号占空比最小化,该方波信号可为智能电子设备提供稳定抗干扰的方波信号。

【参考文献】

[1] 唐孝威,尹岭,唐一源.人类脑计划和神经信息学[J].中国基础科学,2003,14(2):35-38.  
Tang XW, Yin L, Tang YY. Human brain planning and neuroinformatics [J]. China Basic Science, 2003, 14(2): 35-38.

[2] 刘尚合,原亮,褚杰.电磁仿生学-电磁防护研究的新领域[J].自然杂志,2009,31(1):1-7.  
Liu SH, Yuan L, Chu J. Electromagnetic bionics-new field of electromagnetic protection research[J]. Chinese Journal of Nature, 2009, 31(1): 1-7

[3] Hodgkin AL, Huxley AF. Currents carried by sodium and potassium ions through the membrane of the giant axon of Loligo[J]. J Physiol, 1952, 116(4): 449-472.

[4] 郭磊,王瑶,于洪丽,等.基于近似熵的磁刺激穴位脑功能网络构建与分析[J].电工技术学报,2015,30(10):31-38.  
Guo L, Wang Y, Yu HL, et al. Construction and analysis of magnetic stimulation acupoint brain functional network based on approximate entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 31-38.

[5] 闻佳,逯迈,董绪伟,等.基于 HH 模型的神经网络的数值模拟与 FPGA 实现[J].航天医学与医学工程,2017,30(1):38-45.  
Wen J, Lu M, Dong XW, et al. Numerical simulation and FPGA implementation of neural network based on HH model[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2017, 30(1): 38-45.

[6] 易飞鸿,逯迈,陈凯. Hodgkin-Huxley 神经元反转电势变化对动作电位的影响[J].中国医学物理学杂志,2018,35(10):1230-1235.  
Yi FH, Lu M, Chen K. The effect of the reversal potential change of Hodgkin-Huxley neurons on action potential[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2018, 35(10): 1230-1235.

[7] 徐桂芝,付蕊,朱海军,等.经颅磁刺激与神经调控[J].生命的化学,2019,39(5):917-923.  
Xu GZ, Fu R, Zhu HJ, et al. Transcranial magnetic stimulation and neuromodulation[J]. Chemistry of Life, 2019, 39(5): 917-923.

[8] 刘战涛.四象限软开关悬浮斩波器研究[D].成都:西南交通大学,2008.  
Liu ZT. Study on four-quadrant soft switch suspension chopper[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.

[9] 黎松奇.EMS 磁浮列车悬浮系统振动机理及抑制方法研究[D].成都:西南交通大学,2016.  
Li SQ. Study on vibration mechanism and suppression method of suspension system of EMS maglev train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

[10] 宋静文,王健安,郭育华,等.四象限三电平悬浮斩波器研究[J].电力电子技术,2012,46(2):72-73.  
Song JW, Wang JA, Guo YH, et al. Study on four-quadrant three-level suspension chopper[J]. Power Electronics, 2012, 46(2): 72-73.

[11] 张士臣,曹泽乾,任坤华.EMS 磁浮列车悬浮控制仿真研究[J].现代制造技术与装备,2020,56(7):15-19.  
Zhang SC, Cao ZQ, Ren KH. Simulation study on suspension control of EMS maglev train[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2020, 56(7): 15-19.

[12] 汪科任,罗世辉,张继业.磁悬浮控制器设计及静悬浮稳定性分析[J].西南交通大学学报,2017,52(1):118-126.  
Wang KR, Luo SH, Zhang JY. Magnetic levitation controller design and static levitation stability analysis [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(1): 118-126.

[13] 夏猛.四象限悬浮斩波器研究[D].成都:西南交通大学,2011.  
Xia M. Research on four-quadrant suspended chopper[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.

[14] 张东升,梅雪松,郝晓红,等.磁悬浮系统的电流控制方法[J].西安交通大学学报,2007,41(9):1096-1100.  
Zhang DS, Mei XS, Hao XH, et al. Current control method for magnetic suspension system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(9): 1096-1100.

[15] Grass EL, Brown E, Lee RH. An FPGA-based approach to high-speed simulation of conductance-based neuron models[J]. Neuroinformatics, 2004, 2(4): 417-435.

[16] Hyung WL, Ki CK, Ju L. Review of maglev train technologies [J]. IEEE Trans Magn, 2006, 42(7): 1917-1918.

[17] 肖乾,许旭,陈光圆.磁悬浮列车动力学研究方法综述[J].华东交通大学学报,2019,36(1):25-32.  
Xiao Q, Xu X, Chen GY. Review of research methods on dynamics of maglev train[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019, 36(1): 25-32.

[18] 熊嘉阳,邓自刚.高速磁悬浮轨道交通研究进展[J].交通运输工程学报,2021,21(1):177-198.  
Xiong JY, Deng ZG. Research progress of high speed maglev rail transit[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 177-198.

[19] 贾寓真,吴懿萍,刘刚,等.基于田口方法的双金属带锯条锯切参数优化[J].现代制造工程,2019,13(8):78-81.  
Jia YZ, Wu YP, Liu G, et al. Optimization of sawing parameters of double metal band saw blade based on Taguchi method[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019, 13(8): 78-81.

[20] 何桢,张于轩.多响应试验设计的优化方法研究[J].工业工程,2003,7(4):35-38.  
He Z, Zhang YX. Study on optimization method of multi-response test design[J]. Industrial Engineering Journal, 2003, 7(4): 35-38.

[21] 毛志伟,徐伟,周少玲,等.基于田口方法旋转电弧焊接工艺参数优化[J].热加工工艺,2016,45(11):169-173.  
Mao ZW, Xu W, Zhou SL, et al. Process parameters optimization of rotary arc welding based on taguchi method [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(11): 169-173.

[22] Rao SP, Kadirpatta A. An overview of Taguchi method evolution concept and interdisciplinary applications[J]. J Physiol, 2013, 4(10): 621-626.

[23] Tsui W. An overview of Taguchi method and newly developed statistical methods for robust design[J]. IIE Trans, 1992, 24(5): 44-57.

[24] 陈入领,潘双夏,沈彤.稳健设计研究现状[J].机械设计,2003,7(8):1-3.  
Chen RL, Pan SX, Shen T. Research status of robust design[J]. Journal of Machine Design, 2003, 7(8): 1-3.

[25] 万鹏.基于田口算法的汽车翼子板冲压成形过程模拟及其成形工艺参数优化[D].芜湖:安徽工程大学,2017.  
Wan P. Simulation of stamping process and optimization of forming process parameters for automotive wings based on Taguchi algorithm [D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2017.

[26] 杨晨光.基于稳健性设计的汽车平顺性优化与控制[D].重庆:重庆交通大学,2019.  
Yang CG. Vehicle ride comfort optimization and control based on robust design[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.

(编辑:陈丽霞)