

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.040

基于细胞多层介电模型的脉冲电场生物学效应研究*

张晓辉¹ 张志霞² 李艳贞¹ 马红标³ 张宏伟⁴ 刘伍丰¹

(1. 河南工业大学电气工程学院, 郑州 450001; 2. 河南科技学院信息工程学院, 新乡 453003;

3. 河南科技学院新科学院, 新乡 453003; 4. 中国电子科技集团公司第27研究所, 郑州 450047)

摘要: 为确定脉冲电场生物学效应的电场参数, 从细胞多层介电模型出发, 通过研究其等效电路模型在外加电场中生物响应的仿真分析得出植物细胞外膜具有低通滤波特性, 内膜具有带通滤波特性。同时对细胞外膜跨膜电压进行时域分析表明频率小于 2.83 Hz、电场强度大于 69.7 kV/m、ms/ μ s 级脉宽的极低频脉冲电场可以在植物细胞外膜产生可逆电穿孔。采用电场强度为 100 kV/m、频率为 1 Hz、脉宽为 80 ms 的极低频脉冲电场处理萌发绿豆种子, 在萌发第 4 d 时, 绿豆种子的芽长和根长分别比对照组增加了 65.8% 和 80.2%。

关键词: 脉冲电场 生物学 细胞多层介电模型 仿真

中图分类号: Q64; TM836 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0253-06

引言

目前, 农业物理中的电场生物学效应研究很多, 但基本上涉及的是高压静电场和工频电场, 没有考虑脉冲电场^[1-7]。实际上, 脉冲电场对生物的影响比静电场和一般的变化电场要复杂和剧烈的多, 因为脉冲电场除了能在细胞内产生感生电流影响细胞活动以外, 还可能通过诱导电荷与偶极子的平移和旋转运动, 改变化学反应速率、分子之间的化学键联与蛋白质分子形状和结构等直接或间接的若干机制影响生物系统^[8]。更为重要的是, 在一定剂量的脉冲电场持续冲击下, 细胞跨膜电势差会发生连续和短暂的变化, 这种变化会影响定位于膜上的离子通道而使细胞通透性发生改变; 同时, 细胞膜还可能产生短暂的可逆电穿孔, 使细胞通透性增加^[9]。因此, 脉冲电场作用更有利于水分和氧气等元素迅速渗入种子细胞, 启动细胞代谢和酶的合成。已有脉冲电场通过细胞通透性的改变影响细胞活力和植物代谢的实验报道^[10-15], 包括诱导活性氧产生、刺激次生代谢产物的生产和使萌发的植物种子、分生组织有丝分裂指数和各种类型的染色体发生畸变, 从而引起植物个体发育早期阶段的基因变化, 由此有可能产生一类生物电磁新技术^[16]。

研究脉冲电场生物学效应时, 确定脉冲电场的的作用参数是个非常重要的问题, 因为不同的频率、强

度和宽度可能会引起不同的生物学效应。本文从细胞多层介电模型出发, 分析和计算脉冲电场作用下细胞内外膜跨膜电位的频域特性及外膜跨膜电位的时域特性, 从频域角度研究内外膜跨膜电位的频率响应, 从时域角度研究电场参数、细胞参数对细胞外膜电位的影响规律, 为脉冲电场生物学效应中的电场参数选择提供理论依据, 期望推动电场生物学效应的研究。

1 植物叶片细胞等效电路模型

细胞由细胞膜、细胞质和细胞核等膜内细胞器构成, 各部分均呈现出一定的传导特性和介电特性。细胞膜对离子具有一定的通透性, 因而具有一定的导电性, 但是与以电解质溶液为主的细胞质的电导相比则小得多。因此, 可以将细胞视为由具有介质特性的细胞膜或核膜包围着的易导电的细胞质和核质组成的系统。假定细胞为球形, 细胞多层介电模型如图 1 所示^[17]。在图 1 中, $E(t)$ 为外加电场, 箭头表示电场方向。 R_c 和 R_n 分别表示为细胞、细胞核的半径, d_c 和 d_n 分别表示细胞膜和细胞核膜的厚度, γ_o 、 γ_m 、 γ_c 、 γ_{nm} 、 γ_{nc} 分别表示细胞器外介质、细胞膜、细胞质、细胞核膜和细胞核质的电导率, ϵ_o 、 ϵ_m 、 ϵ_c 、 ϵ_{nm} 、 ϵ_{nc} 分别表示细胞器外介质、细胞膜、细胞质、细胞核膜和细胞核质的介电常数, θ 为极轴方向和外加电场方向的夹角。 $\theta = 0$ 和 $\theta = \pi$ 处内外膜跨膜

收稿日期: 2013-05-15 修回日期: 2013-08-01

* 国家自然科学基金资助项目(11005136)、中科院西部之光人才培养计划资助项目(Y107130XBB)和校高层次人才基金资助项目(2012BS036、2013BS063)

作者简介: 张晓辉, 讲师, 博士, 主要从事生物光电和生物信号分析研究, E-mail: xiaohui_xh@163.com

电位最大,分别对应 V_n 和 V_m 。任意 θ 处内外膜跨膜电位分别为 $V_n \cos\theta$ 和 $V_m \cos\theta$ 。

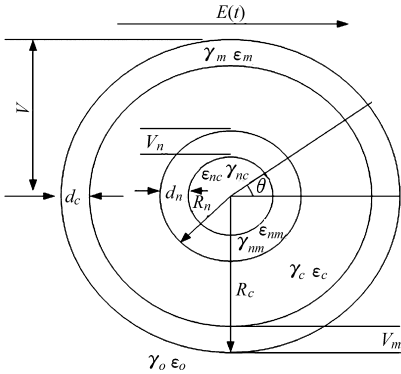


图 1 球形单细胞多层介质电模型

Fig.1 Multi-shelled dielectric model of spherical cell

对细胞施加电场时,细胞外介质、细胞膜、细胞质、细胞核膜和细胞核质均可用电导与电容的并联电路描述。根据细胞各部分的生物电特性,细胞外介质、细胞质、细胞核质主要表现出电导特性,其电容分量可以忽略,而细胞膜、细胞核膜主要表现出介电特性,其电导分量可以忽略^[17-20]。

在研究细胞膜跨膜电位时,考虑到细胞内部大部分是具有电导特性的细胞质、细胞核质等基质,因此可将细胞膜等效为电容 C_m ,细胞质、细胞核等膜内细胞器等效成一个总电导 G 。同理,在研究细胞核膜跨膜电位时,可将细胞核膜等效为电容 C_n ,细胞核内细胞核质等效为电导 G_n 。依据上述分析,从图 1 所示的细胞结构出发,并选取 $\theta = 0^\circ$ (此时具有最强的细胞响应),可以提出如图 2 所示的脉冲电场作用下的细胞内外膜跨膜电位的电路模型^[17]。其中,假定细胞球心为零电位,由于球形细胞的对称性,只考虑细胞与细胞核球体的一半。

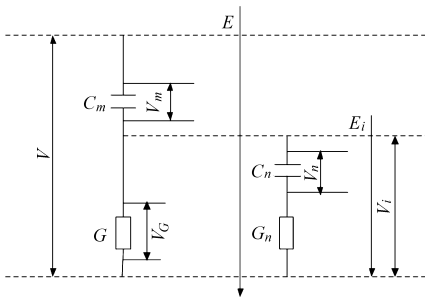


图 2 脉冲电场作用下细胞电路模型

Fig.2 Circuit model of cell subjected to pulsed electric field

1.1 细胞内外膜传递函数

在图 2 的电路模型中,脉冲电场作用下细胞上的电压 V 与电场 E 的关系为^[21]

$$V(s) = f_s E(s) R_c \cos \theta \quad (1)$$

其中

$$f_s = \frac{3\gamma_o [3d_c R_c^2 \gamma_c + (3d_c^2 R_c - d_c^3)(\gamma_m - \gamma_c)]}{2R_c^3 (\gamma_m + 2\gamma_o) \left(\gamma_m + \frac{1}{2} \gamma_c \right) - 2(R_c - d_c)^3 (\gamma_o - \gamma_m)(\gamma_c - \gamma_m)} \quad (2)$$

式中 f_s 为常量^[22],下标 s 表示细胞在电场的静态模型状态。由于细胞参数一般满足条件 $\gamma_c, \gamma_o \gg \gamma_m$ 和 $R_c \gg d_c$,因此,式(2)中 $f_s \approx 1.5$ 。

根据文献[17],细胞膜跨膜电位为

$$V_m(s) = V(s) \frac{\frac{1}{sC_m}}{\frac{1}{G} + \frac{1}{sC_m}} =$$

$$1.5 E(s) R_c \frac{\frac{1}{sC_m}}{\frac{1}{G} + \frac{1}{sC_m}} = \frac{1.5 R_c E(s)}{\tau_c s + 1} \quad (3)$$

式中 τ_c ——外膜充电时间常数

在细胞内电场 E_i 作用下的横跨细胞核的电压为

$$V_i(s) = E_i(s) R_n = \frac{1.5 \tau_c s}{\tau_c s + 1} E(s) R_n \quad (4)$$

细胞核的跨膜电位为

$$V_n(s) = V_i(s) \frac{\frac{1}{sC_n}}{\frac{1}{G_n} + \frac{1}{sC_n}} = \frac{1.5 \tau_c s}{\tau_c s + 1} \frac{\frac{1}{sC_n}}{\frac{1}{G_n} + \frac{1}{sC_n}} E(s) R_n \quad (5)$$

根据文献[23-24],外膜充电时间常数 τ_c 和内膜充电时间常数 τ_n 分别为

$$\tau_c = \left(\rho_c + \frac{\rho_o}{2} \right) C_m R_c = \left(\frac{1}{\gamma_c} + \frac{1}{2\gamma_o} \right) \frac{\epsilon_i \epsilon_m R_c}{d_c} \quad (6)$$

$$\tau_n = \left(\frac{1}{\gamma_{nc}} + \frac{1}{2\gamma_c} \right) \frac{\epsilon_i \epsilon_{nm} R_n}{d_n} \quad (7)$$

式中 ϵ_i ——真空介电常数

由式(3)和式(5)可求得任意 θ 处细胞外膜跨膜电压和内膜跨膜电压与外加电场 E 之间的传递函数分别为

$$H_m(s) = \frac{V_m(s)}{E(s)} = \frac{1.5 R_c}{\tau_c s + 1} \cos \theta \quad (8)$$

$$H_n(s) = \frac{V_n(s)}{E(s)} = \frac{1.5 R_n \tau_c s}{(\tau_c s + 1)(\tau_n s + 1)} \cos \theta \quad (9)$$

1.2 细胞内外膜电位的时域分析

根据式(8)和式(9)确定的传递函数,对其进行拉普拉斯变换与反变换,可求出任意时变脉冲电场 $E(t)$ 作用下的细胞外膜与内膜的电位响应。本文采用的是方波脉冲电场(脉宽 τ ,场强 E ,频率 f),细

胞外加电场的输入信号为 $E(t) - E(t - \tau)$, 对式(8)进行反拉普拉斯变换, 脉冲结束时外膜的跨膜电压为

$$V_m(t) = 1.5R_c E \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_c}}\right) \cos\theta \quad (10)$$

对式(9)进行反拉普拉斯变换, 脉冲结束时内膜的跨膜电压为

$$V_n(t) = \frac{1.5R_n \tau_c E}{\tau_c - \tau_n} \left(e^{-\frac{t}{\tau_c}} - e^{-\frac{t}{\tau_n}}\right) \cos\theta \quad (11)$$

2 仿真计算结果与分析

2.1 植物细胞仿真参数确定

细胞各部分的化学成分极为复杂, 不同的作物细胞几何参数、电导率和介电常数等参数有所不同。在参照文献[25-29]的基础上, 选取植物细胞参数的典型值作为仿真默认值, 各仿真参数如表1所示。

表1 细胞仿真计算参数

Tab.1 Simulation parameters of cell

参数	细胞构成	数值
几何参数/ μm	细胞半径	3.5 ~ 50
	细胞膜厚度	0.007 ~ 0.01
	细胞核半径	1 ~ 10
	细胞核膜厚度	0.006 ~ 0.04
电导率/ $(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	细胞外液	0.4 ~ 0.8
	细胞膜	$8 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$
	细胞质	0.033 ~ 1.1
	细胞核膜	$8.3 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3}$
	细胞核质	0.25 ~ 2.2
相对介电常数	细胞外液	60 ~ 90
	细胞膜	1.4 ~ 20
	细胞质	60 ~ 200
	细胞核膜	6.8 ~ 100
	细胞核质	32 ~ 300

2.2 内外膜跨膜电位的频率特性分析

令 $s = j\omega = j2\pi f$, 将表1中细胞的各项参数代入式(8)和式(9), 选取 $\theta = 0^\circ$ 处细胞内外膜跨膜电压进行仿真计算及讨论。内外膜频率特性如图3所示。

由图3可知, 当外加电场频率小于 10^4 Hz, 电场主要作用于细胞外膜, 其频率响应可视为一阶低通滤波器, 截止频率为 1.1 MHz。而细胞内膜的跨膜电压频率响应可视为一阶带通滤波器, 下限截止频率为 0.78 MHz, 上限截止频率为 5.2 MHz, 中心频率为 1.83 MHz。同时相频特性表明细胞外膜对信号的响应速度明显慢于内膜。当外加电场频率超过 10^4 Hz 时, 内膜对数幅值增加, 而外膜对数幅值降低。此时, 电场易透入细胞内部, 对细胞内的细胞器产生较大影响。当外加电场频率大于 10^8 Hz 时,

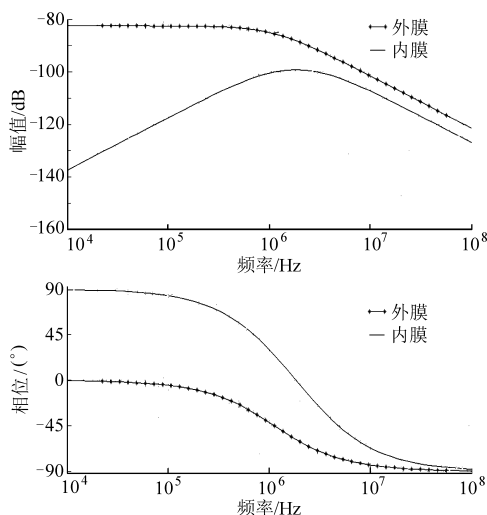


图3 跨膜电位频率响应波特图

Fig.3 Frequency response of transmembrane potential (Bode plot)

内、外膜对特高频信号分量均有滤波效应。在频率为 1.1 MHz 以下时, 外膜跨膜电压大于内膜, 同时外膜跨膜电压能保持在较高水平, 由此推断在此频段以下对植物进行低频信号刺激时不会对植物的核质产生影响, 而有利于细胞外膜发生穿孔。因此在研究脉冲电场对植物的生物学效应时, 为了使外膜穿孔而不损伤细胞核等细胞器, 应对植物细胞施加较低频率的电场。

2.3 电场参数对细胞跨膜电位的影响

由于本文主要研究脉冲电场生物学效应的参数选择, 因此重点对植物细胞在外加脉冲电场作用下外膜电压进行时域分析。脉冲电场的参数包括频率、脉宽和场强, 通过对这3个参数的仿真, 进一步分析电场参数对植物细胞跨膜电位的影响规律。

根据脉冲结束时外膜的跨膜电压表达式(式(10)), 推知细胞外膜跨膜电压随脉冲电场频率的变化如图4所示。由图4可见, 随着脉冲电场频率逐渐增大, 细胞外膜的跨膜电压响应逐渐减小。在电场频率小于 2.83 Hz 时, 细胞外膜的跨膜电压大于 1 V (细胞膜发生可逆穿孔时跨膜电压的临界值^[23]), 表明在此频率范围内, 脉冲电场对细胞外膜通透性的影响最为显著。

同理根据脉冲结束时外膜的跨膜电压表达式(式(10)), 对脉冲电场脉宽变化进行分析, 当脉宽 τ 变化时细胞外膜跨膜的电压变化如图5所示。由图5可见, 外膜电压初始随着脉宽的增大而增大, 当脉宽达到 6 μs 时, 其电压不再发生变化且外膜跨膜电压大于 1 V。图5表明, 脉宽过窄将导致外膜跨膜电位极低, 因此, 对细胞施加脉冲电场作用时应采用 $\mu\text{s}/\text{ms}$ 级脉宽, 这样可使细胞外膜跨膜电压大于穿

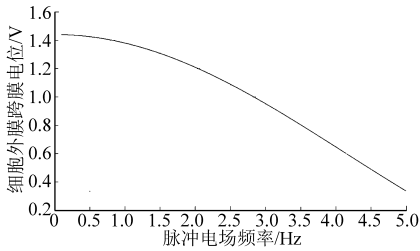


图4 脉冲电场频率对细胞外膜电位的影响

Fig. 4 Influence of pulsed electric field frequency on transmembrane potentials

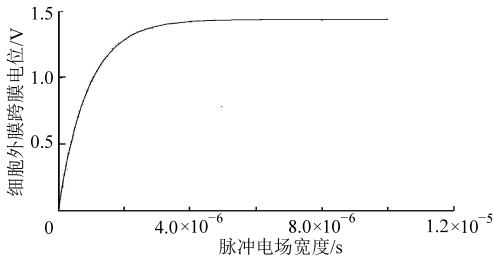


图5 脉宽对细胞外膜电位的影响

Fig. 5 Influence of electric field width on transmembrane potentials

孔阈值,诱导外膜发生可逆电穿孔。

同样根据脉冲结束时外膜的跨膜电压表达式(式(10)),对脉冲电场场强变化进行分析,得到场强幅度变化时细胞外膜跨膜电压的变化,结果如图6所示。图6中,细胞外膜的跨膜电压随脉冲电场强度的增大而增大,二者呈线性关系。从仿真结果可知当电场强度大于 69.7 kV/m 时,细胞外膜的跨膜电压大于 1 V 。因此,若采用电场强度幅值大于 69.7 kV/m 的脉冲电场可使细胞外膜发生可逆电穿孔。

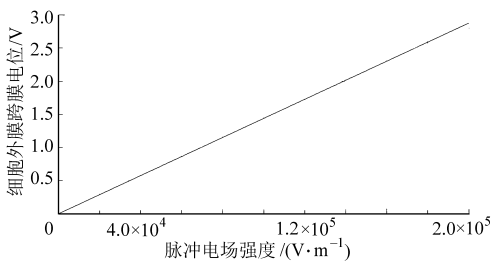


图6 脉冲电场强度对细胞外膜电位的影响

Fig. 6 Influence of electric field intensity on transmembrane potentials

2.4 实验研究

上述仿真结果表明,强度大于 69.7 kV/m 、频率小于 2.83 Hz 、脉宽为 $\mu\text{s/ms}$ 级的极低频高压脉冲电场作用可以使细胞外膜的跨膜电压大于发生可逆电穿孔时跨膜电压的临界值^[19],从而在细胞外膜诱发可逆电穿孔。按照这个结果,如果采用满足上述条件的脉冲电场处理作物种子,可以有效地提高吸胀初期种子细胞外膜的通透性,使水分、氧气和一些

微量元素迅速渗入种子细胞,加速各种酶和蛋白质的合成,促进种子萌发。为了验证这个推测,根据绿豆的各项细胞参数,研究了 100 kV/m 、 1 Hz 、 80 ms 脉宽的极低频高压脉冲电场对绿豆种子萌发的影响。

绿豆品种中绿2号由西北农林科技大学提供(实验绿豆的各项细胞参数符合表1中提供的细胞仿真参数)。挑选籽粒饱满的种子,用质量分数 $0.2\% \text{ HgCl}_2$ 消毒 2 min ,洗涤后在蒸馏水中充分吸胀,挑选均匀一致的种子,绿豆品种以 50 粒为一组,设 3 组,每组均匀放在培养皿中,培养皿底部放置一张中速滤纸,加入适量蒸馏水,置于 $(25 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ 恒温培养箱中暗中培养,每天定时加入蒸馏水。出芽后将种子放置在极低频脉冲电场生物学效应仪^[30]的 2 个极板间有机玻璃支架上处理,每天处理 10 h 。另取相同种子作为对照组,在相同条件下培养,除不经脉冲电场处理外,一切其他条件均相同。图7为经过脉冲电场处理 4 d 时的绿豆幼苗(右)与未经电场处理的对照(左)的比较,由图7可见,处理组的幼苗生长明显优于对照。表2为对绿豆幼苗根长和芽长的测量结果。由表2可见,经过极低频脉冲电场处理的绿豆种子的芽长和根长与对照组相比较,增长率分别达到了 65.8% 和 80.2% ,显示出了 1 Hz 极低频脉冲电场对绿豆幼苗的生长具有明显的促进作用。统计分析表明,处理组与对照组相比,各指标的差异均达到极显著水平($P < 0.01$)。



图7 极低频脉冲电场对绿豆幼苗生长的影响

Fig. 7 Effect of extremely low frequency pulsed electric field on growth of mung beans

表2 极低频脉冲电场对绿豆芽长和根长的影响

Tab. 2 Effect of extremely low frequency pulse electric field on shoot and root length of mung beans

指标	对照组/cm	处理组/cm	增长率/%
芽长	2.05 ± 0.25	3.40 ± 0.50	65.8
根长	2.84 ± 0.15	5.12 ± 0.25	80.2

采用LEICA M205FA型立体显微镜对处理前后的绿豆芽体细胞进行观察,实验结果如图8所示。图8a为对照组(未处理组),可见其细胞外膜无规则,活性一般;图8b为处理组,可见处理后细胞外膜发生电穿孔现象,与对照组相比其细胞含有更多的

细胞质,细胞外膜也更富有活性。正由于此原因,在上述脉冲电场的处理下对照组和处理组的绿豆芽幼苗的根长和芽长才有了很大的差别。

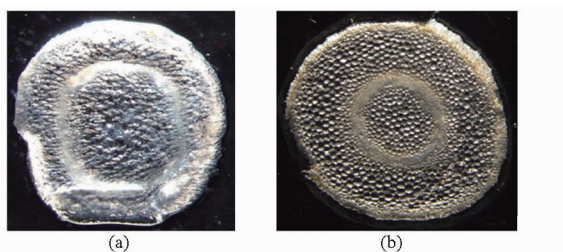


图8 细胞实验透射电镜照片

Fig. 8 TEM pictures of cell experiment

(a) 对照组 (b) 处理组

3 讨论

本文将细胞外膜和内膜看作具有导电性质的电容,将细胞质视为具有导电性质的电导,于是细胞系统可以等效为一个电路模型,通过分析该等效电路模型在外加脉冲电场中的响应,获得能够产生显著生物学效应的脉冲电场参数。研究表明(图3),细胞外膜电位频率响应具有一阶低通滤波器的特性,细胞内膜电位频率响应具有一阶带通滤波器的特性。因此,在考虑外加脉冲电场对细胞的生物学效应时,为了不对细胞核等细胞器造成伤害,而只引起细胞外膜的物质交换,通过改变细胞外膜的通透性来影响细胞代谢,则应施加低频脉冲电场。

在对脉冲电场作用参数的仿真研究中发现,随着脉冲电场频率的增大,细胞外膜的跨膜电压逐渐减小,当脉冲电场频率小于2.83 Hz时,细胞外膜的跨膜电压即达到1 V(图4),这意味着频率小于2.83 Hz的极低频脉冲电场对细胞外膜通透性的影响最为显著。此外,研究还发现,不同脉宽和场强对细胞外膜通透性也有显著差异,脉宽为 $\mu\text{s}/\text{ms}$ 级、

电场强度大于69.7 kV/m的脉冲电场可以在细胞外膜上产生可逆电击穿,而明显提高细胞外膜通透性(图8)。总结这些结果可知,频率小于2.83 Hz、脉宽为 $\mu\text{s}/\text{ms}$ 级、电场强度大于69.7 kV/m的极低频高压脉冲电场可以通过增加细胞通透性而获得显著的生物学效应。

为了证明上述结果,研究了频率为1 Hz、振幅为100 kV/m、脉宽为80 ms的极低频高压脉冲电场对绿豆幼苗生长的影响。从表2和图8的结果来看,经过脉冲电场处理的绿豆芽长和根长都明显优于未经脉冲电场处理的对照组,增长率分别达到了65.8%和80.2%,这个结果明显高于Costanzo^[3]采用的强度为3.6 kV/m和1.8 kV/m、频率为50 Hz的交变电场使得大豆幼苗的长度分别增加8%~12%的水平,证明了本文所述的脉冲电场参数条件可以获得显著的生物学效应。

4 结论

(1)基于细胞的多层介电模型,通过研究其等效电路模型在外加电场中的响应,对其传递函数的仿真得出植物细胞外膜具有低通滤波特性,内膜具有带通滤波特性。

(2)频率小于2.83 Hz、电场强度大于69.7 kV/m、 $\text{ms}/\mu\text{s}$ 级脉宽的极低频脉冲电场可以在植物细胞外膜产生可逆电穿孔,对细胞外膜通透性的影响最为显著,有利于水分和氧气等元素迅速渗入种子细胞。

(3)强度为100 kV/m、频率为1 Hz、80 ms脉宽的极低频脉冲电场处理明显促进了绿豆芽长和根长生长,在宏观形态上获得了明显和稳定的生物学效应,同时通过细胞的透射电镜照片表明了该电场参数能够植物细胞产生可逆电穿孔现象,实验与理论仿真结果吻合。

参 考 文 献

- 1 Neichitailo G, Gordeev A. Effect of artificial electric fields on plants grown under microgravity condition[J]. *Advances in Space Research*, 2001, 28(4): 629-631.
- 2 Cramariuc R, Donescu V, Popa M, et al. The biological effect of the electrical field treatment on the potato seed: agronomic evaluation[J]. *Journal of Electrostatics*, 2005, 63(6-10): 837-846.
- 3 Costanzo E. The influence of an electric field on the growth of soy seedlings[J]. *Journal of Electrostatics*, 2008, 66(7-8): 417-420.
- 4 那日, 冯璐. 我国静电生物学效应机理研究新进展[J]. *物理*, 2003, 32(2): 87-93.
Na Ri, Feng Lu. Mechanism of the biological effects of electrostatics[J]. *Physics*, 2003, 32(2): 87-93. (in Chinese)
- 5 包斯琴高娃, 杨体强, 马占新, 等. 高压电场对优化小麦种子生长特性的时效性[J]. *高电压技术*, 2010, 36(2): 467-473.
Bao Siqingawa, Yang Tiqiang, Ma Zhanxin, et al. Aging property of the effect on wheat seed in high voltage electric field[J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(2): 467-473. (in Chinese)
- 6 Dietrich K. Impact of non-thermal processing on plant metabolites[J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 56(2): 131-134.
- 7 Daniela I, Dorina C, Alina R. The influence of the electrostatic stress on cell proliferation in plants[J]. *Journal of Electrostatics*, 2007, 65(7): 408-413.

- 8 Vernier P T, Sun Y H, Marcu L, et al. Calcium bursts induced by nanosecond electric pulses[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2003, 310(2): 286 – 295.
- 9 Sabri N, Pelissier B, Teissié J. Electroporation of intact maize cells induces an oxidative stress[J]. *European Journal of Biochemistry*, 1996, 238(3): 737 – 743.
- 10 Federico G G, Lars W, António V, et al. Exploring metabolic responses of potato tissue induced by electric pulses[J]. *Food Biophysics*, 2008, 3(4): 352 – 360.
- 11 姚学玲, 陈景亮, 徐传骧. 脉冲电流电磁场对生物膜的非热效应分析[J]. *电工电能新技术*, 2003, 22(2): 76 – 80.
Yao Xueling, Chen Jingliang, Xu Chuanxiang. Analysis for non-thermal effects of pulsed current electromagnetic fields on biological membranes[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2003, 22(2): 76 – 80. (in Chinese)
- 12 Federico G, Galindo P, Thomas V, et al. Pulsed electric field reduces the permeability of potato cell wall[J]. *Bioelectromagnetics*, 2008, 29(4): 296 – 301.
- 13 习岗, 杨运经, 刘镡, 等. 基于植物电位波动的极低频脉冲电场对绿豆幼苗生长的影响[J]. *高电压技术*, 2012, 38(1): 199 – 204.
Xi Gang, Yang Yunjing, Liu Kai, et al. Effect of extremely low frequency pulsed electric field based on potential fluctuations in plant on growth of mung bean[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(1): 199 – 204. (in Chinese)
- 14 习岗, 刘镡, 杨运经, 等. 基于玉米幼苗电位波动的脉冲电场生物学效应[J]. *高电压技术*, 2013, 39(1): 129 – 134.
Xi Gang, Liu Kai, Yang Yunjing, et al. Biological effects of pulsed electric field based on potential fluctuations in maize seedlings [J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(1): 129 – 134. (in Chinese)
- 15 Daniela I, Dorina C, Alina R. The influence of the electrostatic stress on cell proliferation in plants[J]. *Journal of Electrostatics*, 2007, 65(7): 408 – 413.
- 16 米彦, 姚陈果, 李成祥, 等. 基于场-路复合模型的细胞内外膜跨膜电位时频特性[J]. *电工技术学报*, 2011, 26(2): 14 – 20.
Mi Yan, Yao Chenguo, Li Chengxiang, et al. Time-frequency characteristics of transmembrane potentials on cellular inner and outer membranes based on dielectric-circuit compound model[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2011, 26(2): 14 – 20. (in Chinese)
- 17 Schoenbach K H, Katsuki S, Stark R H. Bioelectrics—new applications for pulsed power technology[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, 30(1): 293 – 300.
- 18 Buescher E S, Schoenbach K H. Effects of submicrosecond, high intensity pulsed electric fields on living cells-intracellular electromanipulation[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2003, 10(5): 788 – 794.
- 19 马飞宇, 郭玉明. 高压脉冲电场影响果蔬介电特性试验与机理分析[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(10): 177 – 180.
Ma Feiyu, Guo Yuming. Influence experiment and mechanism analysis of high voltage pulsed electric on dielectric properties of fruits and vegetables[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(10): 177 – 180. (in Chinese)
- 20 Kotnik T, Miklavčič D. Theoretical evaluation of the distributed power dissipation in biological cells exposed to electric fields[J]. *Bioelectromagnetics*, 2000, 21(5): 385 – 394.
- 21 Kotnik T, Bobanović F, Miklavčič D. Sensitivity of transmembrane voltage induced by applied electric fields—a theoretical analysis[J]. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 1997, 43(2): 285 – 291.
- 22 Schoenbach K H, Joshi R P, Kolb J F, et al. Ultrashort electrical pulses open a new gateway into biological cells [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92(7): 1122 – 1137.
- 23 Schoenbach K H, Beebe S J, Buescher E S. Intracellular effect of ultrashort electrical pulses [J]. *Bioelectromagnetics*, 2001, 22(6): 440 – 448.
- 24 Foster K R. Thermal and nonthermal mechanism of interaction of radio-frequency energy with biological systems [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, 28(1): 15 – 23.
- 25 Ermolina I, Poleyeva Y, Feldman Y, et al. Study of normal and malignant white blood cells by time domain dielectric spectroscopy[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2001, 8(2): 253 – 261.
- 26 Feldman Y, Ermolina I, Hayashi Y. Time domain dielectric spectroscopy study of biological systems [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2003, 10(5): 728 – 753.
- 27 米彦, 孙才新, 姚陈果, 等. 基于等效电路模型的细胞内外膜跨膜电位频率响应[J]. *电工技术学报*, 2007, 22(6): 6 – 11.
Mi Yan, Sun Caixin, Yao Chenguo, et al. Frequency response of transmembrane potential on cell inner and outer membrane based on equivalent circuit model[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2007, 22(6): 6 – 11. (in Chinese)
- 28 颜小飞, 黄岚, 王忠义, 等. 植物叶肉细胞电信号模型与仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2008, 25(11): 106 – 110.
Yan Xiaofei, Huang Lan, Wang Zhongyi, et al. Modeling and simulation of electrical signals in mesophyll cells [J]. *Computer Simulation*, 2008, 25(11): 106 – 110. (in Chinese)
- 29 杨运经, 习岗, 张社奇, 等. 极低频高压脉冲电场生物学效应仪的设计与应用[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(2): 49 – 54.
Yang Yunjing, Xi Gang, Zhang Sheqi, et al. Development and application of the instrument of extremely low frequency high-voltage pulsed electric field on biological effects [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(2): 49 – 54. (in Chinese)

2012, E95D(7): 1721.

- 13 Lorente D, Aleixos N, Gómez-Sanchis J, et al. Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5(4): 1121 – 1142.
- 14 Tian Yuanyuan, Liu Siyang, Tan Qingchang. Application of detecting part's size online based on machine vision [C] // 2012 International Conference on Future Energy, Environment and Materials, 2012: 1948 – 1956.
- 15 Wang Yan, Tian Subo, Li Chunqiu. Application of machine vision in grading and identification of grafting seedlings [C] // 2nd International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Processes, 2011: 1705 – 1708.

Evaluation of Pearl Quality Based on Monocular Multi-view Machine Vision

Tang Yiping Xia Shaojie Li Chenrong Zhu Zhiliang Chen Xinfeng Feng Yijun
(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In order to evaluate pearl color and luster, a monocular multi-view imaging device was designed by placing a HD camera in front of a symmetric bucket cavity body which constituted by the multiple pieces of plane mirror. The device could achieve the pearl's surface images taken from five different perspectives. Then image processing was used to fuse the five pearl images and achieve a new image which contained the pearl's whole surface. After that, a pearl's region was divided into highlight areas and bright area, then the characteristic parameter of color was picked-up from bright area and the characteristic parameter of luster from highlight area. Finally, the feature fusion was used to determine the quality of the pearl. The experimental results showed that the monocular multi-view machine vision device could obtain the entire surface of the pearl in the same color system, and accomplish the real-time detection and grading for pearl's color, luster and uniformity.

Key words: Pearl Quality detection Machine vision Monocular multi-view Image fusion

(上接第 258 页)

Biological Effects of Pulsed Electric Field Based on Multi-shelled Dielectric Model of Spherical Cell

Zhang Xiaohui¹ Zhang Zhixia² Li Yanzhen¹ Ma Hongbiao³ Zhang Hongwei⁴ Liu Wufeng¹

(1. College of Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China

2. School of Information Engineering, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China

3. Xinke College, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China

4. The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China)

Abstract: In order to determine the electric parameters of pulsed electric field (PEF) biological effects, we researched the response of the equivalent circuit model in the PEF based on multi-shelled dielectric model of spherical cell. The simulation of the transfer function revealed that the cell outer membrane had low-pass filter characteristic and the inner membrane had band-pass filter characteristic. Time domain characteristic of transmembrane potentials on cell outer membrane showed that the pulsed electric field, which had less than 2.83 Hz of PEF frequency, more than 69.7 kV/m of PEF electric field intensity, and ms/ μ s class of pulse width, could produce reversible electroporation on cell outer membrane. Extremely low frequency pulsed electric field of 100 kV/m, 1 Hz and 80 ms was used to treat germinating mung beans seedling. It was found that the seed germination process was significantly promoted: on the 4th day of germination, and the shoot length and root length of germinating mung beans seed increased by 65.8% and 80.2% respectively compared with those of the control group.

Key words: Pulsed electric field Biological Cell multi-shelled dielectric model Simulation