

1-2-2019

Modeling and Simulation of Potential Detection System Based on Woven Electrode

Longfei Li

Engineering Research Center of Digitized Textile & Fashion Technology, Ministry of Education, College of Information Sciences and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China;

Yongsheng Ding

Engineering Research Center of Digitized Textile & Fashion Technology, Ministry of Education, College of Information Sciences and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Simulation of Potential Detection System Based on Woven Electrode

Abstract

Abstract: Range of interlacing resistance of woven electrode is induced. Mathematical models of field point potential, electrode potential and electrode potentials difference are constructed. Electrode potential is the weighted mean of field point potentials at interlacing points. Effects of position, size of electrode, and contact resistance on electrode potential are investigated by simulation. Results indicate that there exists two extreme value points at which electrode potential reaches maximum and minimum, respectively. The absolute value of electrode potential extreme value decreases with the increase of electrode's size. The electrode potential is independent of contact resistance if the expectation of contact resistance isn't far greater than the interlacing resistance.

Keywords

woven electrode, potential detection, interlacing resistance, electrode potential

Recommended Citation

Li Longfei, Ding Yongsheng. Modeling and Simulation of Potential Detection System Based on Woven Electrode[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(1): 171-175.

基于机织电极的电势检测系统建模与仿真

李龙飞, 丁永生*

(数字化纺织服装技术教育部工程研究中心, 东华大学信息科学与技术学院, 上海 201620)

摘要: 推导了机织电极交织电阻的大小范围。建立了场点电势、电极电势、电极电势差三者的数学模型。电极电势为交织点处场点电势的加权平均。采用仿真方法探讨了电极位置、尺寸、接触电阻对电极电势的影响。结果表明, 存在两个极值点使电极电势分别取得极大值、极小值; 电极电势极值绝对值随电极尺寸增大而减小; 接触电阻期望非远大于交织电阻时, 电极电势不受接触电阻影响。

关键词: 机织电极; 电势检测; 交织电阻; 电极电势

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 01-0171-05

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201801021

Modeling and Simulation of Potential Detection System Based on Woven Electrode

Li Longfei, Ding Yongsheng*

(Engineering Research Center of Digitized Textile & Fashion Technology, Ministry of Education,
College of Information Sciences and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Range of interlacing resistance of woven electrode is induced. Mathematical models of field point potential, electrode potential and electrode potentials difference are constructed. Electrode potential is the weighted mean of field point potentials at interlacing points. Effects of position, size of electrode, and contact resistance on electrode potential are investigated by simulation. Results indicate that there exists two extreme value points at which electrode potential reaches maximum and minimum, respectively. The absolute value of electrode potential extreme value decreases with the increase of electrode's size. The electrode potential is independent of contact resistance if the expectation of contact resistance isn't far greater than the interlacing resistance.

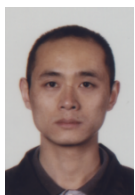
Keywords: woven electrode; potential detection; interlacing resistance; electrode potential

引言

近年来, 织物电极在柔性感知领域(如生物体表电势检测)的应用正在逐步扩大。织物电极具有几何尺寸较大、自身电阻较高等特点。正确回答织物电极的电势输入输出问题, 以及相关参数的影响作用, 对织物电极的应用具有重要意义。

从感知、检测角度看, 由若干电极构成的电势检测系统主要涉及场点电势、电极电势、电极电势差三者的关系。对于电极电势与场点电势的关系, 通常将具有实际尺寸的电极理想化为一个点电极, 简单认为电极电势等于场点电势。对于若干电极之间的电势差与电极电势的关系, 通常忽略电极自身电阻、接触电阻的衰减作用, 简单认为电极电势差等于电极电势之差。

事实上, 对于针织或机织的织物电极^[1-5], 通常具有较大几何尺寸。织物电极置入电场时, 所占据的几何空间上存在着场点电势的分布。若简单将



收稿日期: 2015-10-12 修回日期: 2015-11-02;
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61134009),
国家自然科学基金(61473078), 教育部长江学者奖励
计划, 上海领军人才专项资金, 上海市科学技术委员
会重点基础研究项目(13JC1407500);
作者简介: 李龙飞(1976-), 男, 河南, 博士, 研究方
向为柔性感知、智能系统等。

织物电极视为点电极，忽略场点电势的空间分布，是不适当的。构成织物电极的导电纤维通常具有较大电阻率。若完全忽略织物电极自身电阻、接触电阻的衰减作用，也是不适当的。

本文提出一种基于机织电极的电势检测系统的数学模型。通过建立场点电势、电极电势、电极电势差三者的数学模型，解决机织电极的电势输入输出问题，并采用仿真分析法探讨相关参数对电极电势、电极电势差的影响作用。

1 数学模型

基于机织电极的电势检测系统的数学模型包括：机织电极的交织电阻；电极电势与场点电势的关系；以及电极之间电势差与电极电势的关系。

1.1 机织电极的交织电阻

机织电极设计为由导电纤维相互交织而成的平纹机织结构，如图1(a)所示。先用织机将导电纤维加工成为由水平方向的纬线与垂直方向的经线相互交织而成的织物，再用导电胶将织物的一面连接至屏蔽电缆，从而构成以织物另一面为电接触面的电极。将若干电极置于电势场中（如贴合于生物体表），屏蔽电缆连接至放大电路，则构成电势检测系统，如图1(b)所示。

从电路角度看，电极可近似为由两类电阻组成的电路。一类电阻称为斜向电阻 R_S ，表示相邻两个交织点之间倾斜于电极面的纬线或经线的电阻，如图1(c)所示。另一类电阻称为法向电阻 R_N ，表示交织点处垂直于电极面的纬线与经线之间的电阻，如图1(d)所示。设电极结构均匀（导电纤维材质均匀、机织工艺稳定），则每一斜向电阻均相等，每一法向电阻均相等。

设电极的连接于屏蔽电缆的一面为电极反面，另一面为电极正面。容易得出，电极正面每一交织点与电极反面之间的交织电阻 R_{ij} 均可表示为2个斜向电阻与1个法向电阻的并联

$$R_{ij} = \frac{R_S \cdot R_N}{R_S + 2R_N} \quad (1)$$

图1(c)所示的斜向电阻 R_S 可近似为一个圆形截面沿S形轨迹线所成拉伸体的电阻，其大小满足

$$\frac{2\sqrt{1+w^2}}{\pi} \cdot \frac{\rho_F}{r_F} < R_S < \frac{2(1+w)}{\pi} \cdot \frac{\rho_F}{r_F} \quad (2)$$

式中： ρ_F 为纤维电阻率($\Omega \cdot m$)； r_F 为纤维半径(m)，机织参数 w 表示相邻交织点间距与纤维直径之比。

图1(d)所示的法向电阻 R_N 可近似为一个正方体电阻与接触电阻的串联，其大小满足

$$R_N > \frac{\rho_F}{2r_F} \quad (3)$$

由式(1)、(2)、(3)，得交织电阻 R_{ij} 的范围为

$$\frac{\sqrt{1+w^2}}{2\sqrt{1+w^2} + \pi} \cdot \frac{\rho_F}{r_F} < R_{ij} < \frac{1+w}{\pi} \cdot \frac{\rho_F}{r_F} \quad (4)$$

这一大小范围对下文的进一步讨论已足够了。

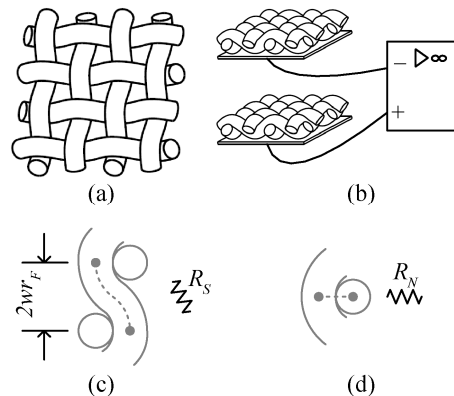


图1 机织电极及其斜向、法向电阻示意图
Fig. 1 Woven electrode and its normal, slope resistance

1.2 电极电势

当电极置于电势场中，电极正面每一交织点处场点电势 V_{ij} 均通过对应的交织电阻 R_{ij} 作用于电极反面，如图2(a)(b)所示。

根据集中参数电路(集总电路)的节点分析法，推导电极反面电势与场点电势的关系为

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{V_{ij}}{R_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_{ij}}} \quad (5)$$

其中， U 为电极反面电势(V)，称为电极电势。这表明，电极电势为交织点处场点电势的加权平均，权值为交织电阻的倒数。

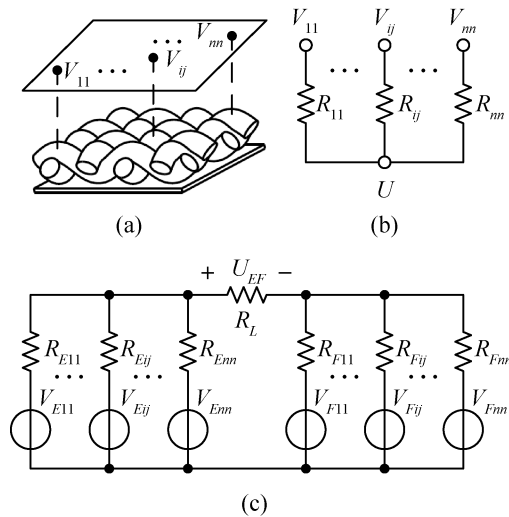


图 2 电极电势与电极电势差电路图
Fig. 2 Electrode potential and electrode potentials difference

根据式(1), 交织电阻均相等时, 式(5)简化为

$$U = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_{ij} \quad (6)$$

即电极电势为交织点处场点电势的算术平均。

若电极正面只有一个交织点受到场点电势的作用, 式(5)简化为

$$U = V \quad (7)$$

这时, 电极电势等于交织点处场点电势, 为式(5)在特定情形下的简化。

1.3 电极电势差

当若干电极置于电势场中, 电极电势通常不同。下面推导电极电势差与电极电势的关系。

设两个电极 E 、 F 置于电势场中, 并连接至放大电路输入端, 如图 1(b)所示。考虑放大电路的输入电阻, 容易得到电极电势差电路, 如图 2(c)所示。

根据集中参数电路的电源等效变换方法, 推导电极电势差与电极电势的关系为

$$U_{EF} = \frac{U_E - U_F}{1 + (R_E + R_F)/R_L} \quad (8)$$

其中, U_{EF} 为电极 E 反面与电极 F 反面之间的电势差(V), 称为电极电势差, U_E 、 U_F 分别为电极 E 、 F 的电势, R_L 为放大电路输入电阻(Ω), R_E 、 R_F 分别表示电极 E 、 F 的交织电阻并联

$$\frac{1}{R_E} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_{Eij}}, \frac{1}{R_F} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_{Fij}} \quad (9)$$

若交织电阻并联 R_E 、 R_F 远小于放大电路输入电阻, 式(8)简化为

$$U_{EF} = U_E - U_F \quad (10)$$

这时, 电极电势差等于电极电势之差, 为式(8)在特定情形下的简化。

2 分析与讨论

下面以电偶极子激发的电场中某一平面(表示生物体表)为例, 分析探讨电极位置、尺寸对电极电势的影响; 并进一步以均匀分布为例, 分析探讨电极正面与该平面接触区域上的接触电阻随机分布对电极电势离散度的影响。

2.1 电极位置与尺寸的影响

根据库仑定律, 电偶极子激发的电场中电势为

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{\mathbf{p} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^3} \quad (11)$$

其中, V 为场点 \mathbf{r} 的电势(V), \mathbf{r}_0 为电偶极子位置(m), \mathbf{p} 为电偶极矩矢量(C·m), ϵ 为电容率(F/m)。

以电偶极子位置 \mathbf{r}_0 为坐标原点建立直角坐标系 $O-xyz$, 电偶极矩方向为坐标轴 $O-z$ 正方向。设电场中某一与电偶极矩方向平行的平面为

$$x - a = 0 \quad (12)$$

该平面内与电偶极矩方向平行且与电偶极子位置距离最小的直线为

$$\frac{x-a}{0} = \frac{y}{0} = \frac{z}{1} \quad (13)$$

设电极正面贴合于上述平面, 电极中点在上述直线上, 参数 a 取值 0.1m, 纬线、经线分别平行于坐标轴 $O-y$ 和 $O-z$, 纬线、经线数量 n 分别取值 32、64、96, 纤维半径 r_F 取值 $0.25 \cdot 10^{-3}$ m, 机织参数 w 取值 2, 电偶极矩大小 p 取值 10^{-12} C·m, 电容率取值 $7.08 \cdot 10^{-10}$ F/m。根据式(6)、(11)、(12)、(13), 计算电极电势 U 与电极中点处天顶角 θ (坐标轴 $O-z$ 转至该点的角度)的关系, 如图 3 所示。

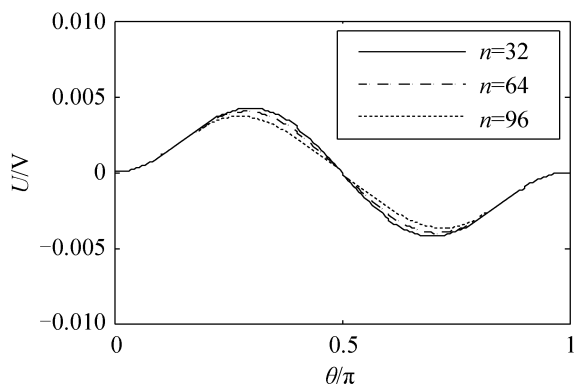


图3 电极位置与尺寸对电极电势的影响图
Fig. 3 Effects of position and size of electrode on electrode potential

根据仿真结果, $(0, \pi/2)$ 范围内, 存在极大值点, 使电极电势取得极大值; $(\pi/2, \pi)$ 范围内, 存在极小值点, 使电极电势取得极小值。当天顶角趋于 0 或 π 时, 电极电势对交织点与电偶极子的距离比较敏感而趋于零; 当天顶角趋于 $\pi/2$ 时, 电极电势对天顶角比较敏感而趋于零。

根据仿真结果, 电极尺寸(纬线、经线数量 n) 能够影响电极电势极值, 电极电势极值绝对值随电极尺寸增大而减小。根据式(6), 电极电势为交织点处场点电势的加权平均。当电极尺寸增大时, 交织点数量随之增加。这些新增交织点处的场点电势, 由于距离或角度因素, 均小于极值点处的场点电势, 从而导致电极电势绝对值减小。电极尺寸也能够影响极值点, 极值点随电极尺寸增大而远离 $\pi/2$, 即极值点与电偶极子的距离随电极尺寸增大而增大。

2.2 接触电阻随机分布的影响

考虑电极正面与上述平面接触区域上的接触电阻时, 式(5)修正为

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{V_{ij}}{R'_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{1}{R'_{ij}}} \quad (14)$$

其中, R'_{ij} 为包含了接触电阻的交织电阻。

设接触电阻符合期望为 R_C 的均匀分布

$$(R'_{ij} - R_C) \sim U_D(0, 2R_C) \quad (15)$$

取样本容量 20。设电极中点为上述直线上的点(0.1, 0, 0.07)m, 其它参数同上文。

根据式(11)、(14)、(15), 计算两个比值之间的关系, 其中第一个比值为电极电势 U 的标准差与期望之比(即变异系数) σ_U/μ_U , 第二个比值为接触电阻期望与交织电阻之比 R_C/R , 如图 4 所示。

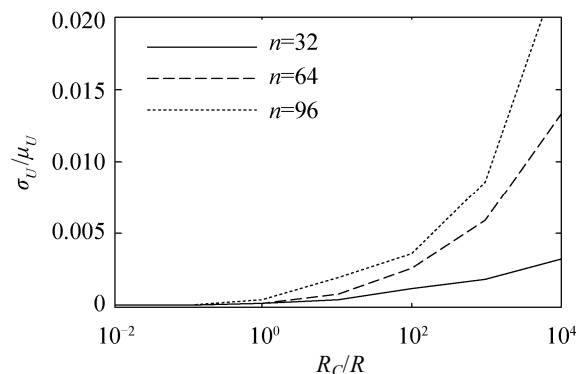


图4 接触电阻对电极电势的影响图
Fig. 4 Effects of contact resistance on electrode potential

根据仿真结果, 当接触电阻期望小于交织电阻时, 电极电势变异系数几乎为零, 可忽略不计。当接触电阻期望大于交织电阻时, 变异系数随接触电阻期望与交织电阻之比增大而增大。其中, 接触电阻期望远大于交织电阻时, 变异系数可能超过约 0.01, 概率上不可忽略; 接触电阻期望非远大于交织电阻时, 变异系数基本小于约 0.01, 概率上可忽略。因此, 接触电阻期望非远大于交织电阻时, 接触电阻随机分布对电极电势变异系数的影响可忽略。

当上述影响可忽略时, 不妨设每一接触电阻均取值 R_C , 式(14)简化为式(6)。这表明, 电极电势大小不受接触电阻影响。当上述影响不可忽略时, 这种影响随电极尺寸的增大而变得显著。这表明, 采用较小尺寸的电极, 能够减弱这种影响。

2.3 电极参数的取值范围

根据式(8), 交织电阻并联相对较大时, 对电极电势差的衰减作用将变得显著。若规定相关电极参数(电极尺寸、纤维半径、纤维电阻率等)的取值范围, 可使电极电势差的衰减程度限制在一定范围内。

假设式(8)右侧分母满足

$$1 + (R_E + R_F) / R_L \leq \sqrt{2} \quad (16)$$

若两个电极 E 、 F 参数相同, 由式(4)、(9), 得式(16)的充分条件为

$$\rho_F \leq \frac{\sqrt{2}-1}{2(1+w)} \pi n^2 r_F R_L \quad (17)$$

这表明, 纤维电阻率上限与纬线、经线数量的平方成正比, 与纤维半径成正比。

设纬线、经线数量 n 的取值范围为(20, 100), 纤维半径 r_F 的取值范围为(0.1, 0.5)· 10^{-3} m, 机织参数 w 取值 2, 放大电路输入电阻 R_L 取值 $10^6 \Omega$, 则纤维电阻率 ρ_F 的上限约为 10^4 – $10^6 \Omega \cdot \text{m}$ 。这恰好符合目前填充式导电纤维材料的电阻率范围^[6-7]。

3 结论

推导了机织电极交织电阻的大小范围。根据集中参数电路的节点分析法、电源等效变换方法, 建立了场点电势、电极电势、电极电势差三者的数学模型。电极电势为作用于电极每一交织点处场点电势的加权平均。

由电偶极子激发的电场中某一平面上, 存在两个极值点, 使电极电势分别取得极大值、极小值。电极尺寸影响电极电势极值, 电极电势极值绝对值随电极尺寸增大而减小。

接触电阻期望非远大于交织电阻时, 接触电阻随机分布对电极电势变异系数的影响可忽略, 且电极电势大小不受接触电阻影响。接触电阻期望远大于交织电阻时, 接触电阻随机分布对电极电势变异系数的影响不可忽略; 采用较小尺寸的电极, 能够减弱这种影响。

规定纤维电阻率上限, 可使电极电阻对电极电

势差的衰减程度限制在一定范围内。纤维电阻率上限与纬线、经线数量的平方成正比, 与纤维半径成正比。

参考文献:

- [1] Banaszczyk J, De Mey G, Schwarz A. Current Distribution Modelling in Electroconductive Fabrics [J]. *Fibers and Textiles in Eastern Europe* (S1230-3666), 2009, 17(2): 28-33.
- [2] Merritt C R, Nagle H T, Grant E. Fabric-Based Active Electrode Design and Fabrication for Health Monitoring Clothing [J]. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine* (S1089-7771), 2009, 13(2): 274-280.
- [3] 丁永生, 李龙飞, 郝矿荣. 具有机织结构的柔性心电电极 [P]. 中国专利: CN201431463, 2009-05-26.
Ding Y S, Li L F, Hao K R. Flexible electrocardioelectrode based on woven structure [P]. CN Patent: CN201431463, 2009-05-26.
- [4] 刘光达, 郭维, 李肃义. 穿戴式人体参数连续监测系统 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2011, 41(3): 771-775.
Liu G D, Guo W, Li S Y. Wearable system for continuously monitoring physiological parameters [J]. *Journal of Jilin University: Eng and Technol Ed*, 2011, 41(3): 771-775.
- [5] 袁会锦, 张辉, 谢光银. 织物结构对纺织结构电极阻抗性能的影响 [J]. *纺织学报*, 2015, 36(9): 44-49.
Yuan H J, Zhang H, Xie G Y. Influence of textile structure on impedance of textile-structured electrodes [J]. *Journal of Textile Research*, 2015, 36(9): 44-49.
- [6] Bauhofer W, Kovacs J Z. A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites [J]. *Composites Science and Technology* (S0266-3538), 2009, 69(10): 1486-1498.
- [7] De Volder M F L, Tawfick S H, Baughman R H. Carbon nanotubes: Present and future commercial applications [J]. *Science* (S0036-8075), 2013, 339(6119): 535-539.