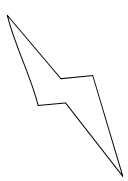


# 基于ANSYS的人体触电模拟

物院3班 王博 电磁学小论文

## 问题引入

- 很久之前的疑问
- 本人的亲自体验
- 对有限元的了解


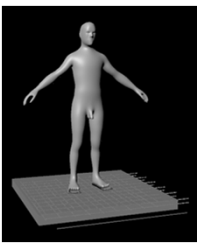


## 思路流程

选择场景    电学参数    软件建模    有限元

## 思路流程

选择场景

仅人体  人体和楼板 

## 思路流程

电学参数

7 papers, Wiki & Databases

-  人体电学特性：模型简化 / 电导率
-  触电安全：心脏承受 / 人体感知
-  环境电学性质：钢筋混凝土 / 橡胶

## 思路流程

软件建模



### 思路流程

有限元

### 情景概述与模型简化

情景: AC220V(峰值311V) 手脚触电

简化: 简化电学性质, 简化人体模型

#### 模型简化

电学性质: 趋肤效应, 电容

人体模型: 简化为6部分

### 电容与趋肤效应

美国海军1980年提出：  
电容值为100pF，电阻为1.5KΩ的“标准人体模型”

人体电容@50Hz:  $\left| \frac{1}{i\omega C} \right| \gg 1.5K$  (5个数量级)

人体趋肤效应深度@50Hz:  
 $\omega = 100\pi \text{ rad/s}, \mu \approx \mu_0 = \frac{4\pi}{10^7} \text{ Wb/(A}\cdot\text{m)}, \sigma \approx 0.4S/m$

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \approx 110\text{m}$$

### 人体模型简化

组件名称	适用部位	数据来源种类	电阻率(Ω·m)
MainBody	人体主要部分	肌肉组织	2.82
Brain	大脑	脑组织	4.27
Heart	心脏	心脏肌肉	2.62
Lungs	肺	肺组织(平均)	9.5
Bones	全身骨骼	皮质骨	333
Skin	手指和较低皮肤	皮肤(平均)	5.89

### 电流大小 与 接触面积

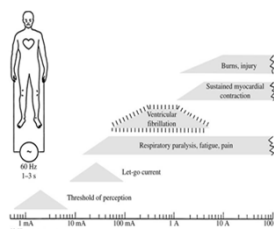
0.155 A 2.0 KΩ	0.162 A 1.91 KΩ	0.233 A 1.34 KΩ	0.253 A 1.18 KΩ
-------------------	--------------------	--------------------	--------------------

0.155 A 2.0 KΩ	0.162 A 1.91 KΩ	0.233 A 1.34 KΩ
-------------------	--------------------	--------------------

当接触面积在 $10^{-1} \sim 1 \text{ cm}^2$ 量级时，  
**电流能用更少的手指来触电！**  
 受接触点位置影响较大，  
 受接触处的**接触面积**大小的影响较小。

### 评估人是否安全的方法

- ▶ 人体的感知电流为1mA。
- ▶ 人体可自主摆脱的电流（安全电流），女性约为10mA，男性约为16mA。
- ▶ 开始引起心室颤动的电流约为30mA。
- ▶ 致命电流下限为50mA。
- ▶ 超过200mA时，心脏直接停止跳动，但是不会发生心室颤动。



### 评估人是否安全的方法

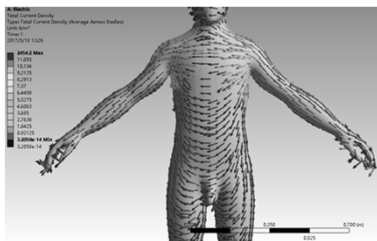
#### ▶ 模型测试（双手触电）

接入电流 (mA)	产生电压 (V)	心脏电流密度 min(A/m <sup>2</sup> )	心脏电流密度 max(A/m <sup>2</sup> )
16	32.13	0.124	0.210
30	60.24	0.233	0.394
50	100.40	0.388	0.656

▶ 人体安全电压：36V

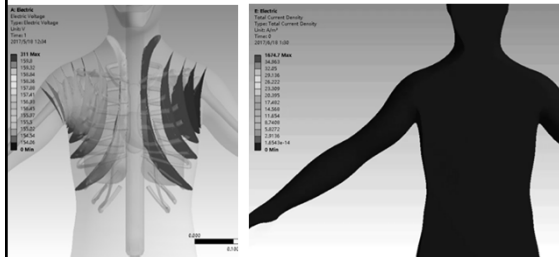
### 计算求解：左右手触电

▶ 总电流峰值：0.155A ◆ 心脏电流密度<sub>max</sub> = 2.03A/m<sup>2</sup>



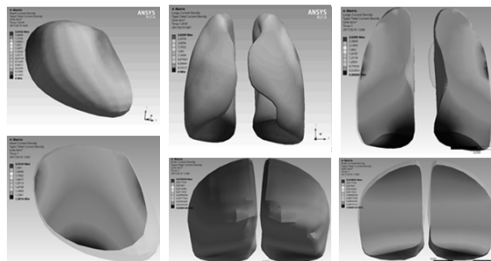
### 计算求解：左右手触电

▶ 总电流峰值：0.155A ◆ 心脏电流密度<sub>max</sub> = 2.03A/m<sup>2</sup>



### 计算求解：左右手触电

▶ 总电流峰值：0.155A ◆ 心脏电流密度<sub>max</sub> = 2.03A/m<sup>2</sup>



### 计算求解：左右手触电

▶ 心脏电流密度<sub>max</sub> = 2.03A/m<sup>2</sup>

发生心室颤动，不除颤将丧命。

◆ 肺部电流密度<sub>max</sub> = 2.63A/m<sup>2</sup>

◆ 脑部电流密度<sub>max</sub> = 0.02A/m<sup>2</sup>

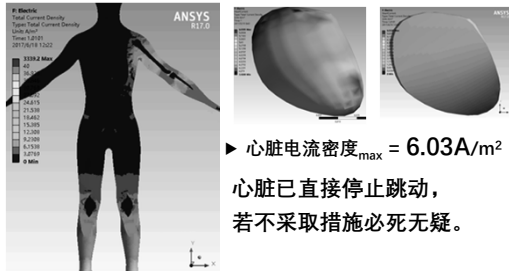
### 计算求解：左手/双脚触电

▶ 总电流峰值：0.271A ◆ 心脏电流密度<sub>max</sub> = 6.03A/m<sup>2</sup>



### 计算求解：左手/双脚触电

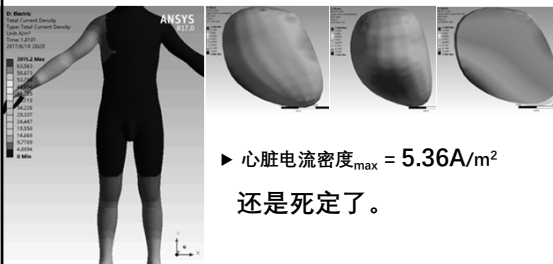
▶ 总电流峰值：0.271A ◆ 心脏电流密度<sub>max</sub> = 6.03A/m<sup>2</sup>



▶ 心脏电流密度<sub>max</sub> = 6.03A/m<sup>2</sup>  
心脏已直接停止跳动，若不采取措施必死无疑。

### 计算求解：右手/双脚触电

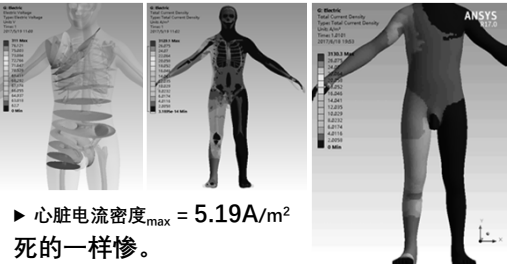
▶ 总电流峰值：0.256A ◆ 心脏电流密度<sub>max</sub> = 5.36A/m<sup>2</sup>



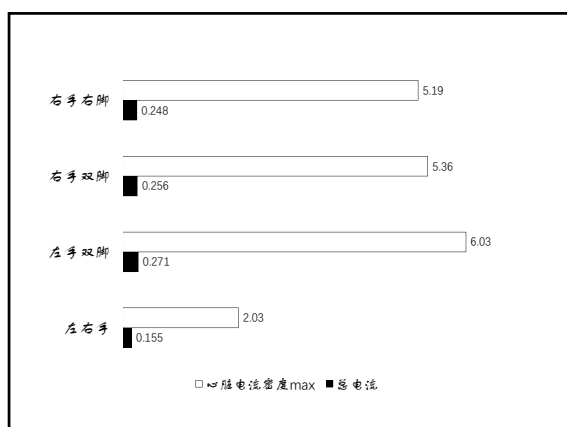
▶ 心脏电流密度<sub>max</sub> = 5.36A/m<sup>2</sup>  
还是死定了。

### 计算求解：右手/右脚触电

▶ 总电流峰值：0.248A ◆ 心脏电流密度<sub>max</sub> = 5.19A/m<sup>2</sup>

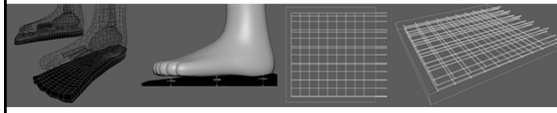


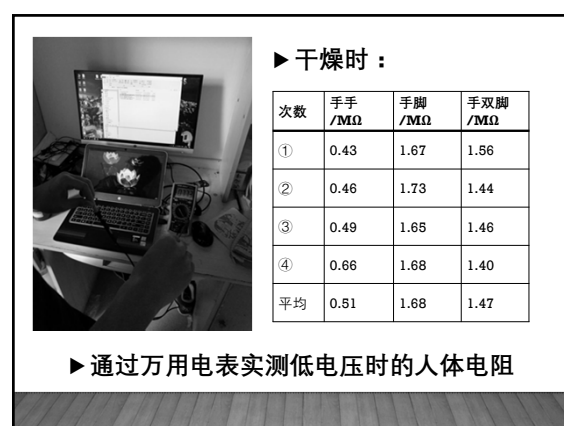
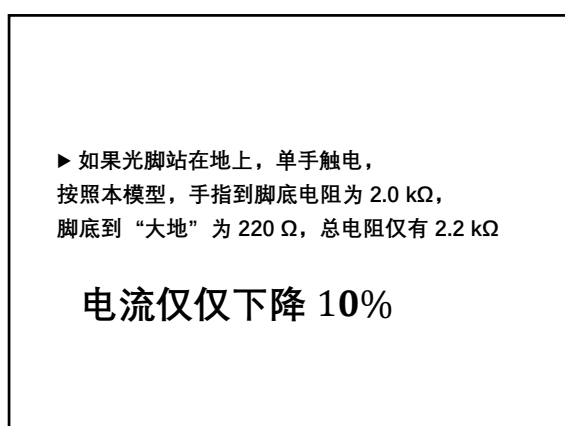
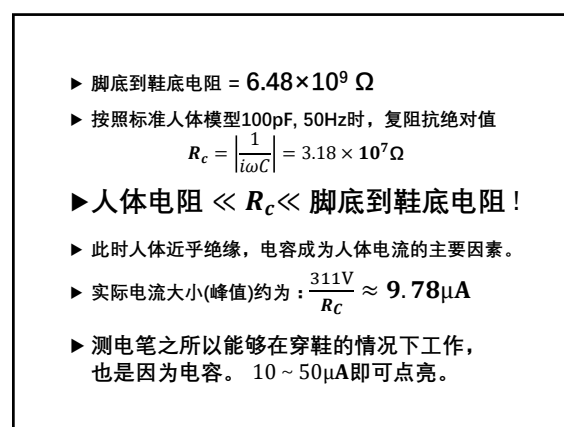
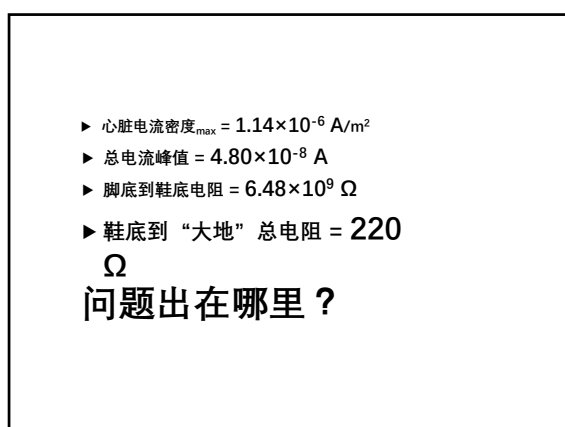
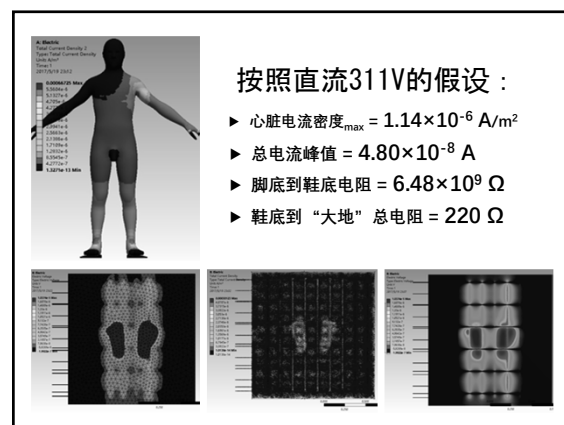
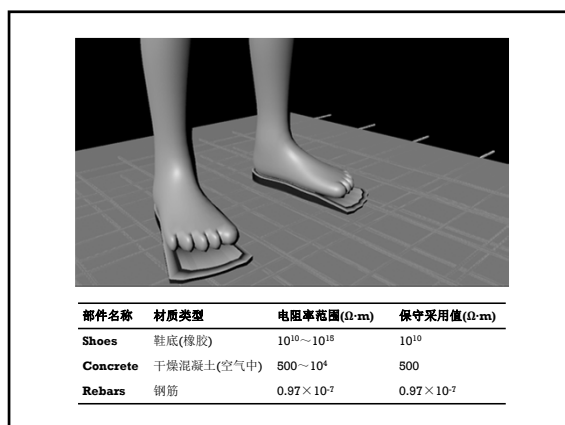
▶ 心脏电流密度<sub>max</sub> = 5.19A/m<sup>2</sup>  
死的一样惨。



### 更多讨论：实际情景

- ▶ 单手触电，双脚着地
- ▶ 橡胶鞋底 (1~3 cm厚)
- ▶ 混凝土楼板 (10 cm厚, 钢筋直径 6/8/10 mm)

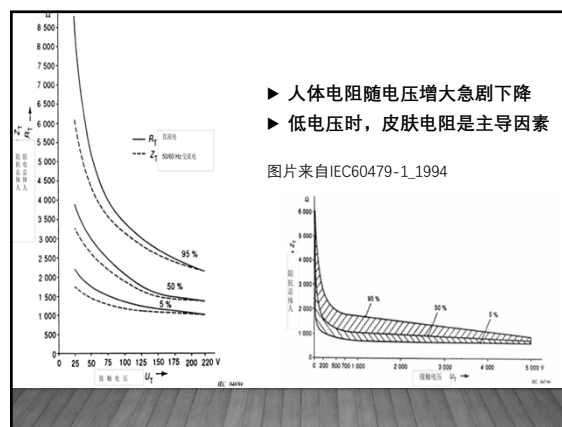




▶ 干燥时：                      ▶ 润湿时：

次数	手手 /MΩ	手脚 /MΩ	手双脚 /MΩ	次数	手手 /MΩ	手脚 /MΩ	手双脚 /MΩ
①	0.43	1.67	1.56	①	0.17	0.12	0.10
②	0.46	1.73	1.44	②	0.16	0.11	0.09
③	0.49	1.65	1.46	③	0.15	0.10	0.10
④	0.66	1.68	1.40	④	0.18	0.13	0.08
平均	0.51	1.68	1.47	平均	0.165	0.115	0.093

▶ 为什么用万用电表测得电阻这么大？



### 总结

- ▶ 触电位置和数量是触电情况的决定性因素，触电面积影响不大。
- ▶ 穿着干燥橡胶鞋手指触电，几乎绝缘，人体电容成为最主要因素，电流约 10μA，安全，人不会有感觉。
- ▶ 左右手触电总电流0.15A，会引发心室颤动，危险。
- ▶ 光脚站在楼板上手触电，总电流约0.22A，心脏停跳，更加危险。
- ▶ 手脚直接接触(左手双脚，右手双脚，右手右脚)总电流约0.25A，更加致命，死的更快。

### 不足与展望

- ▶ 缺少专业医学扫描数据
- ▶ 人体电学性质不稳定，影响因素复杂 (最大问题)
- ▶ 人体电学性质有个体差异
- ▶ 作者能找到的最好数据仍有较大方差
- ▶ 个人PC内存仅有8 GB，限制模型精细度

作者已尽可能找较好的实验数据来模拟，作者相信结果仍具有一定参考价值。

### 参考文献

- ▶ [1] Matrosov I, Matrosov V. Electromagnetic field modeling in human tissue[J]. World Academy of Science Engineering & Technology, 2010(6):296
- ▶ [2] ITIS Foundation. Low Frequency Conductivity (DB/OI). <https://www.itis.ethz.ch/virtual-population/issue-properties/databases/low-frequency-conductivity>, 2016-10-12.
- ▶ [3] Gabriel C. Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies[J]. Books Air Force Base, 1996.
- ▶ [4] Peten M J, Sintra J G, Leveses I. The Electrical Conductivity of Living Tissue: A Parameter in the Bioelectrical Inverse Problem[M]// Modeling and Imaging of Bioelectrical Activity, 3004-3013/19.
- ▶ [5] Wikipedia contributors. Electric shock[DB/OI]. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Electric\\_shock&oldid=778598138](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Electric_shock&oldid=778598138), 2017-5-4
- ▶ [6] Webster, John G. Medical Instrumentation: Application and Design. [J]. Journal of Clinical Engineering, 1978, 3(3): 306.
- ▶ [7] Layati H, Ghods P, Alizadeh A R, et al. Electrical resistivity of concrete[J]. Concrete International, 2015.
- ▶ [8] 石东平, 唐祖文, 陈武. 起酥效应理论研究与解析计算[J]. 重庆高教研究, 2009, 28(5):18-21.
- ▶ [9] 黄永生, 刘雨杰. 人体静电电容(ES)测试技术[J]. 测试技术学报, 1996(3): 673-678.

Thank you