基于 ASPCE 代理模型的 DBS 植入者在低频磁场下电磁响应的不确定性研究

田瑞[1]、刘金梦[1]、逯迈[1]
1 兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室

摘要

针对EV-WPT产生的低频磁场对植入DBS人群的电磁暴露不确定性问题，本文建立真实人体三维电磁模型、DBS及LCC-LCC无线充电系统模型，采用有限元法与自适应稀疏多项式混沌展开（ASPCE）代理模型，识别WPT系统产生的低频磁场对DBS植入者电磁暴露水平影响的关键因素。MOAT与Sobol敏感性分析一致表明，无论是否植入DBS线圈偏移参数x0、y0均为影响大脑与人体组织感应电场的关键参数。概率分布显示，植入DBS前后 $E_{brain\ avg}$ 和 $E_{body\ avg}$ 均低于85 kHz下ICNIRP限值11.475 V/m；但植入DBS后 $E_{brain\ max}$ 分布向高值方向偏移，$E_{body\ max}$ 超标概率由13.13%升至18.39%。结果表明，DBS植入会提高人体感应电场最大值超标风险约5个百分点，植入者应避免在电动汽车无线充电时长时间近距离暴露。

物理模型

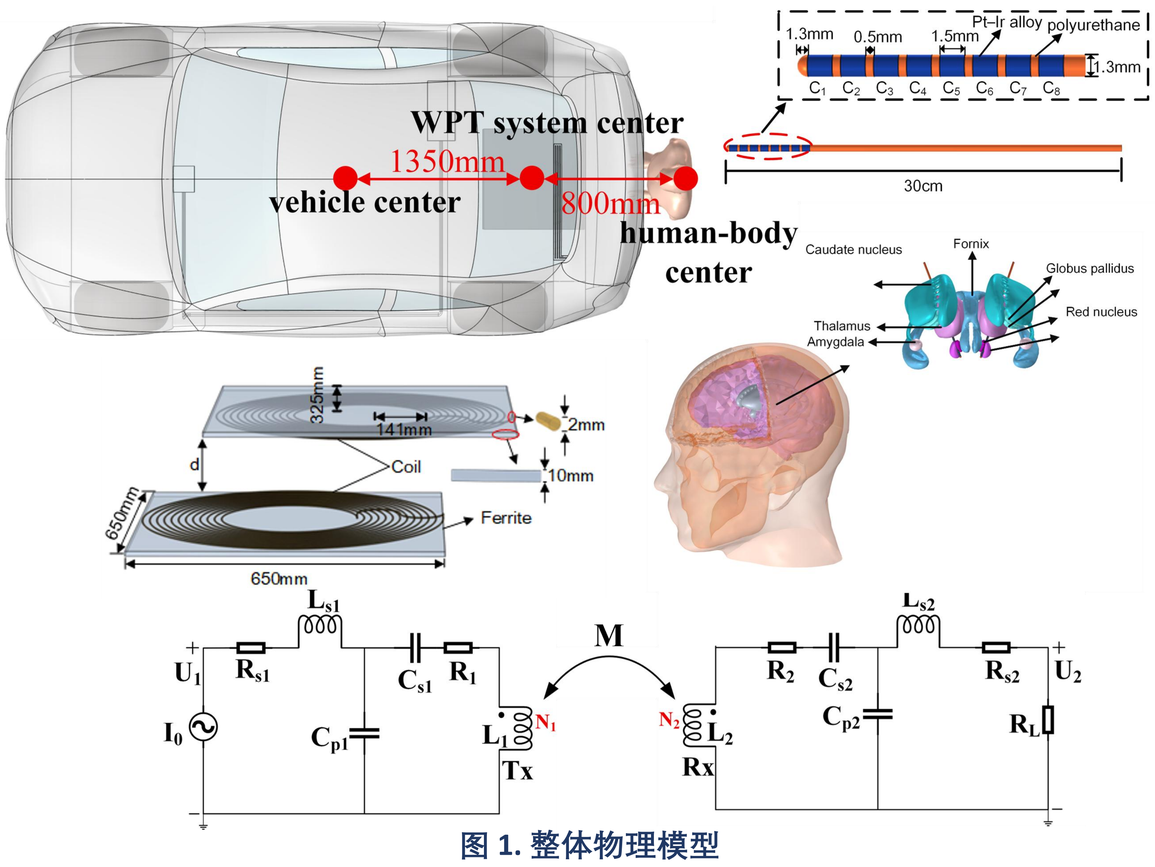


图 1. 整体物理模型

结果

图2显示了植入DBS后MOAT筛选结果。发现相较于植入前，植入DBS后各个输入参数的MOAT均值及标准差均增大。结果进一步表明：无论是否植入DBS，线圈偏移x0、y0均为大脑与人体组织感应电场的主导敏感参数，感应电场峰值对参数扰动更敏感。

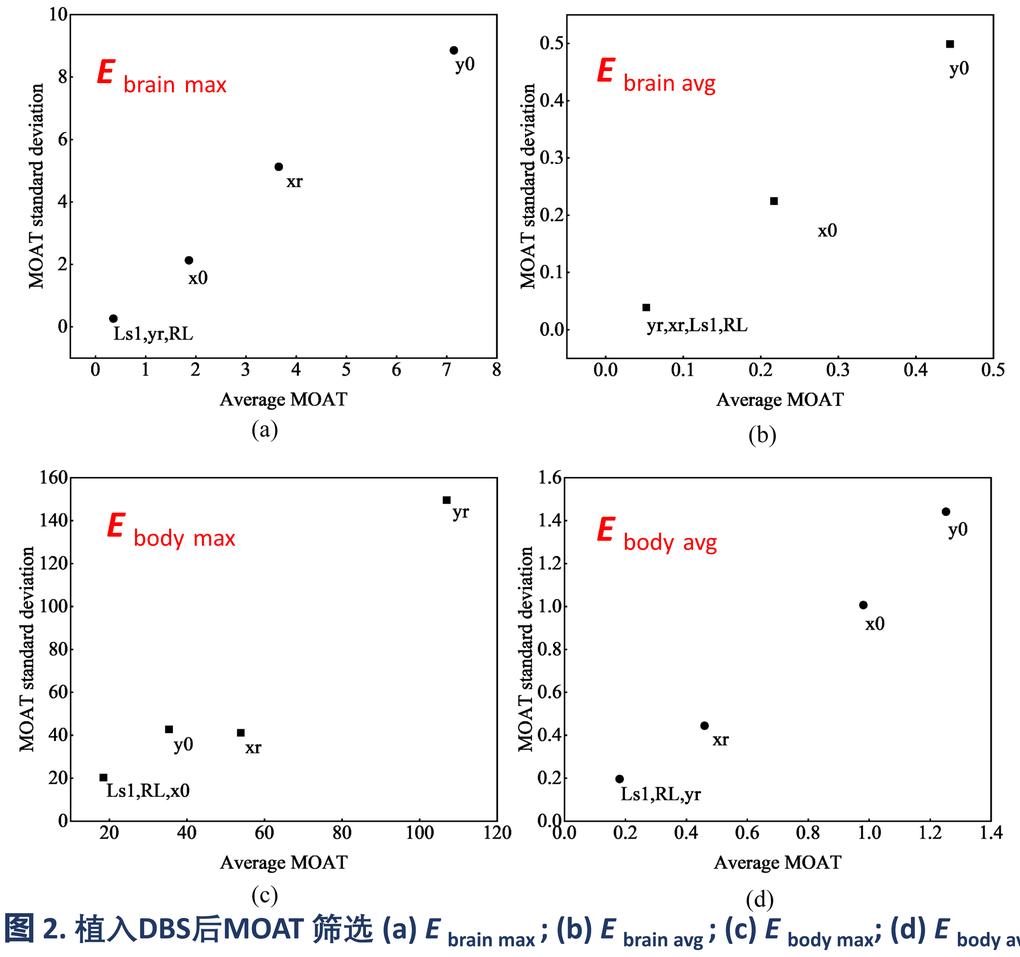


图 2. 植入DBS后MOAT 筛选 (a) $E_{brain\ max}$; (b) $E_{brain\ avg}$; (c) $E_{body\ max}$; (d) $E_{body\ avg}$

图3显示了植入DBS后Sobol敏感性分析结果。发现线圈偏移参数x0、y0均为大脑与人体组织感应电场方差的主导贡献项。植入DBS后Sobol总效应指数与一阶效应指数的差值增大，各参数间交互作用及输出的非线性效应均有所增强。

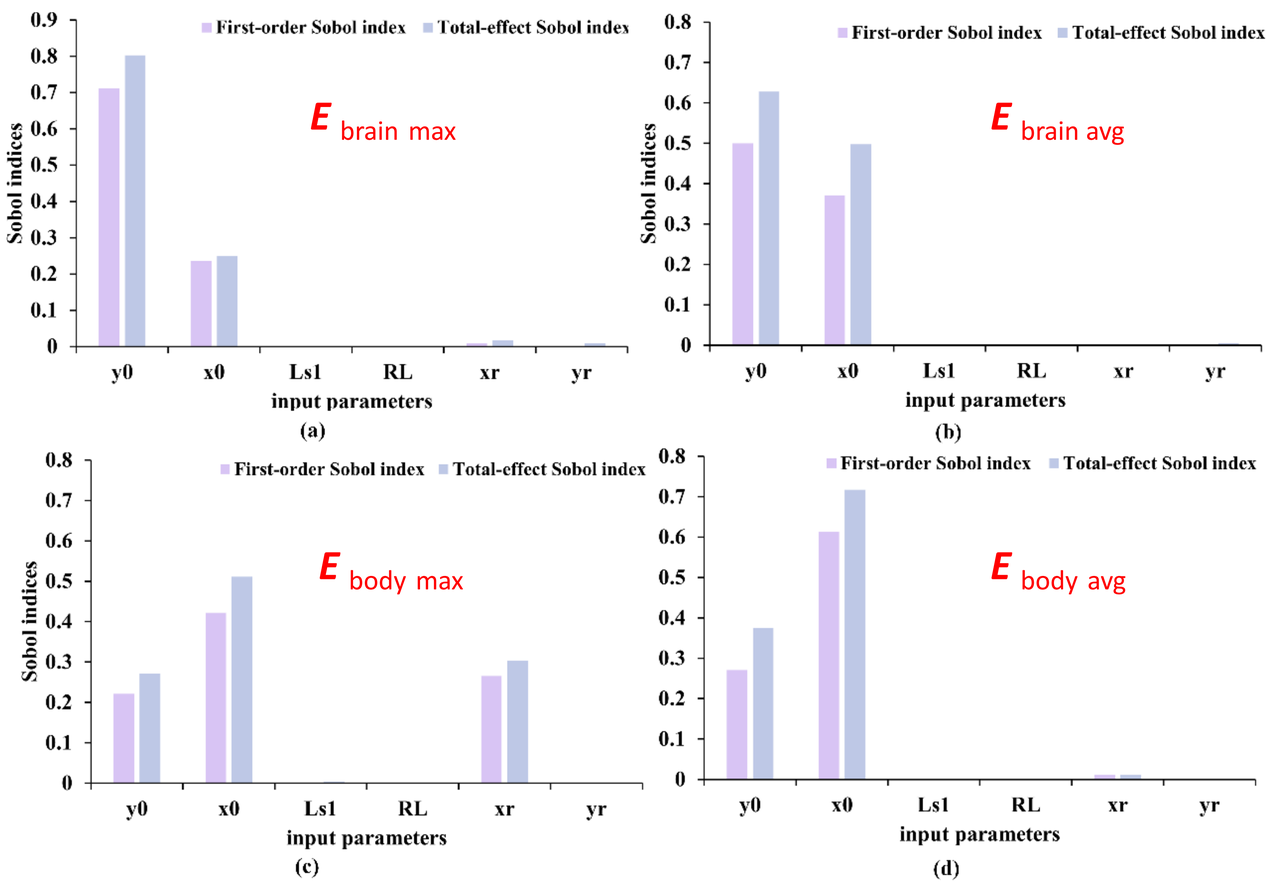


图 3. 植入DBS后Sobol敏感性分析 (a) $E_{brain\ max}$; (b) $E_{brain\ avg}$; (c) $E_{body\ max}$; (d) $E_{body\ avg}$

结论

（1）MOAT与Sobol敏感性分析结果一致：无论是否植入DBS，线圈偏移参数x0、y0是影响大脑和人体组织感应电场最大值与均值的关键参数。

（2）在设定参数变化范围内，植入DBS前后，人体和大脑的感应电场均值均满足ICNIRP规定的限值要求；但人体感应电场最大值的超限概率由13.13%升至18.39%，表明DBS植入会增加感应电场超标风险。

参考文献

[1] Chen Y, Yu Q, Zheng Y, et al. Electromagnetic Exposure Safety Assessment of Medical Implants in the Human Body for EV-WPT Considering Uncertainty[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(2): 2105-2115. DOI: 10.1109/TVT.2024.3349429.

[2] Dhuique-Mayer C, et al. Thermal Degradation of Antioxidant Micronutrients in Citrus Juice: Kinetics and Newly Formed Compounds[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55: 4209-4216.

[3] Wang T, Li B, Zhao K, et al. Evaluation of electromagnetic exposure of the human with a coronary stent implant from an electric vehicle wireless power transfer device[J]. Electronics, 2023, 12(20): 4231. DOI: 10.3390/electronics12204231.