

個人化經顱脈冲電流刺激(tPCS)的建模與神經元反應分析

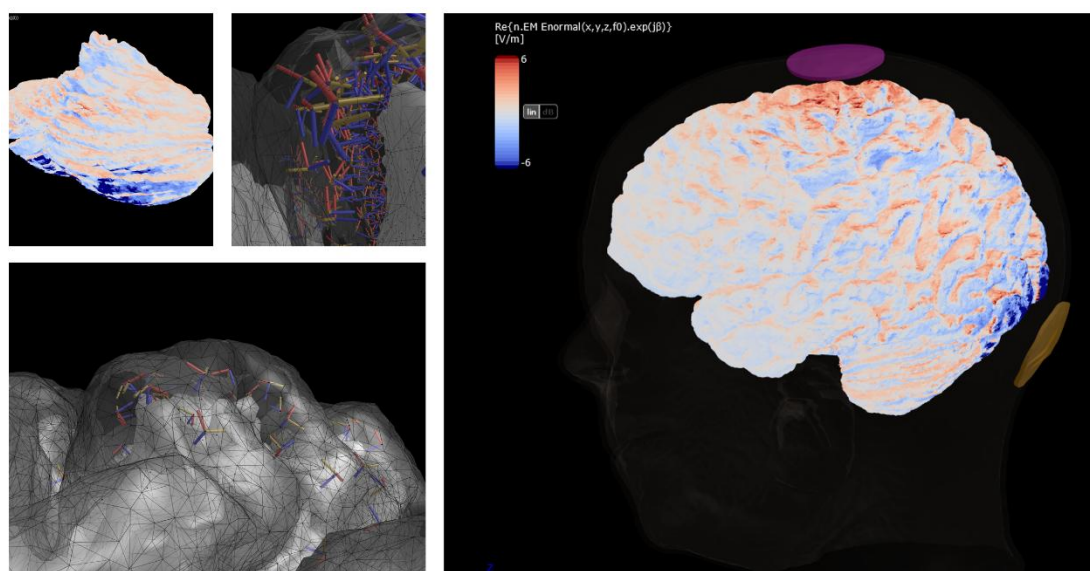
本文翻譯自 IT'IS 基金會文章: [Personalized tPCS Modeling and Neuronal Response Analysis](#)

一、解剖學和電磁建模

本研究採用了一組高解析度的[頭部解剖模型](#)，以捕捉受試者間的變異性。這些模型考量了頭皮與顱骨層、硬腦膜、血管系統、灰質與白質、腦脊液以及眼部組織之間的導電率差異。Sim4Life 根據經過精心整理、可追溯且經過品質保證的 [IT'IS 組織特性資料庫](#)，來處理組織特性的指派。

電極位置依照腦電圖(EEG)記錄的標準化 10–10 系統(採用基於人工智慧的定位技術)進行配置，並作為計算電流歸一化電位和電場分佈的邊界條件。模擬採用 Sim4Life 的高效能低頻電準靜態求解器，該求解器針對真實解剖結構中的高解析度醫療器材模擬進行了最佳化 – 這項要求已透過嚴謹的收斂性研究得到驗證。

此外，Sim4Life 新增了一種用於產生錨點(即局部座標系)的採樣表面工具(Sample-Surface tool)，藉此在不同神經元群體相對應的神經解剖學真實深度上對整個皮質的暴露條件進行採樣。



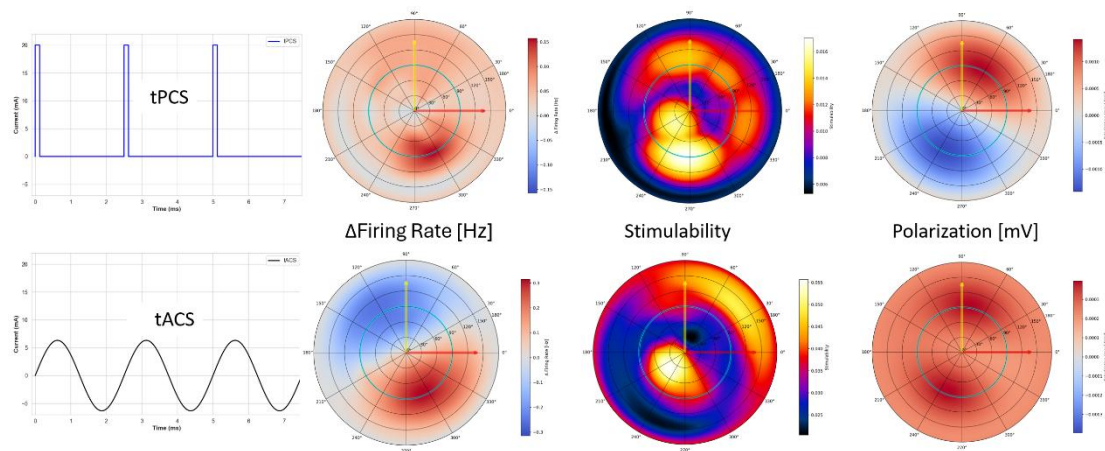
透過 400Hz 電刺激在大腦中誘導出的電場，並在大腦與小腦的灰質表面進行了可視化。圖中顯示了灰質內部分採樣神經元及其局部座標系。

二、神經元層級響應建模

從廣受認可的 ModelDB 模型庫中導入了形態學和電生理學上精細描述的相關皮層神經元模型，例如：小腦普金傑(Purkinje)細胞、第 5 層錐體神經元和小白蛋白細胞。隨後利用 Sim4Life 的 T-Neuro 模組來確定依刺激強度而異的亞閾值細胞體極化、放電率調變，以及超閾值刺激極限。

這些反應函數與脈衝形狀相關，並針對三種刺激模式進行了確定：經典交流刺激、理想脈衝形狀的脈衝電流刺激以及考慮電極-組織界面(ETI)畸變的脈衝電流刺激。對於後者，Sim4Life 提供了預先定義的厚皮膚和薄皮膚 ETI 等效電路模型。

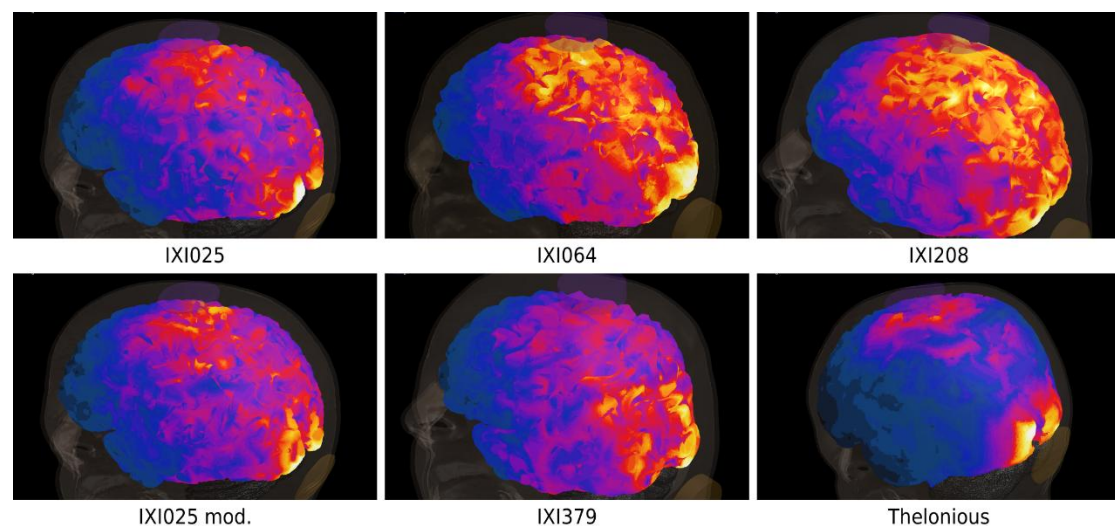
隨後，將這些響應函數與解剖學相關皮質位置的局部暴露條件相結合，以針對每種頭部解剖結構生成大腦和小腦的初始神經響應圖。



用於對頭部模型進行「神經功能化」的方向依賴性神經反應函數，比較 400 Hz 下的 **tPCS** (上排) 與 **tACS** (下排)。

極座標圖呈現各類細胞在固定峰值電場強度下，其反應如何隨電場方向而變化，其中電場方向由仰角 θ (elevation)與方位角 ϕ (azimuth)描述; tPCS 與 tACS 所採用的峰值電場強度相同。由左至右各欄分別對應**普金傑(Purkinje)細胞**、**L5 錐體細胞**與 **PV 中間神經元**。

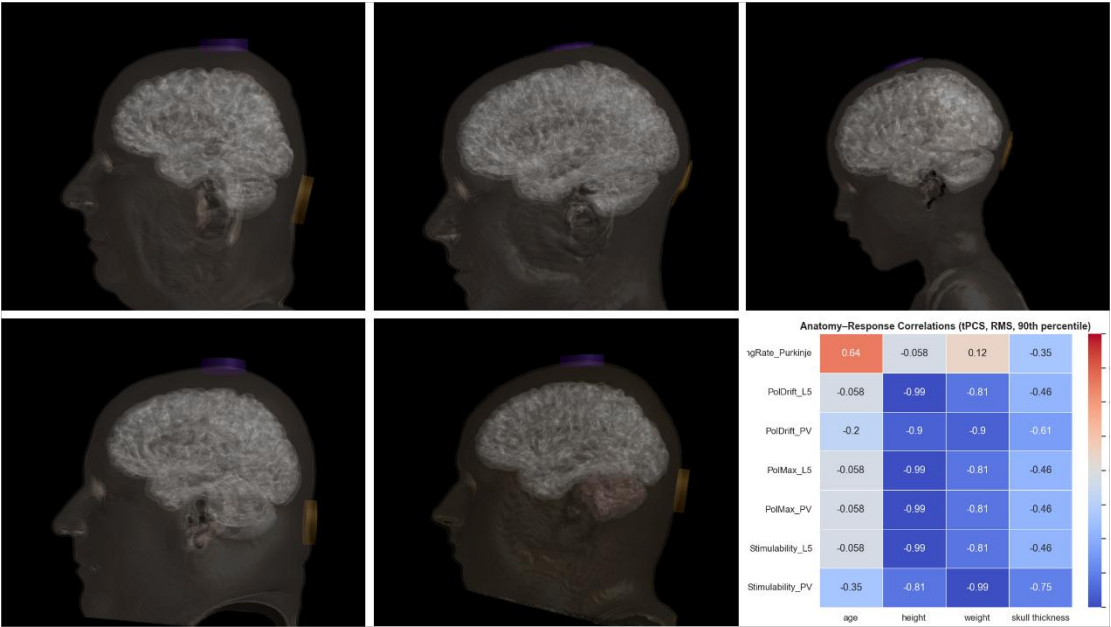
所呈現的指標包括: **$\Delta Firing Rate$** (普金傑細胞的放電率變化量)、**Stimulability** (可刺激性，即放電閾值的倒數; 數值越高表示越容易被激發)，以及 **Soma Polarization** (胞體極化，即相較於未刺激狀態，細胞胞體膜電位變化的峰值)。



皮層圖顯示了不同頭部模型(IXI 受試者和 Thelonious)下，經顱脈冲電流刺激(tPCS)所誘發之 L5 錐體細胞刺激性的空間分佈。顏色代表相對興奮性，凸顯出因個體解剖結構差異所造成的顯著受試者間差異，包括刺激效應強度及其空間分布模式的不同。

三、個體間變異性

Sim4Life 的人工智慧驅動分割工具，能夠直接從磁共振造影數據中全自動生成詳細且個人化的頭部模型(包含 40 種不同組織)，並搭配詳細的大腦圖譜進行配準，以識別與腦部刺激相關的結構。這使得完整的建模流程(從電極配置到神經元層級的反應估算)得以實際應用於一系列解剖學頭部模型上。隨後的分析量化了皮質刺激範圍與神經反應的受試者間變異性，證實了進行解剖學上個人化刺激規劃的必要性。



解剖學特徵與在經顱直流電刺激(tPCS)下模擬 QOI 的第 90 百分位數之間的斯皮爾曼相關係數 (ρ)。顏色表示關聯的方向與強度(以零為中心)。

四、研究結論

這項研究闡明了經顱刺激的交互作用機制，包括腦褶皺如何與神經形態相互作用以形塑電生理反應的空間分佈，並有助於解釋高脈衝刺激方案的優勢。此外，該研究還確立了基於 Sim4Life 建模能力所開發之個人化治療規劃工具所需的條件與方法論。