用于磁刺激及其他电磁学的开源线圈匹配工具箱（COMATOSE）

Max Koehler 和 Stefan Goetz

摘要

经颅磁刺激（TMS）中的线圈决定头部电磁场的空间形状、同时被激活的结构以及局灶刺激的程度。现有的大多数线圈都是凭直觉设计的，而不是通过系统的数学物理优化设计，因为当时还没有可用的方法。然而，先前的研究表明，这些线圈远非最优，例如在脉冲能量或效率方面仍有很大的改进空间。严格的数学优化技术已经得到开发，但目前只有全球极少数研究团队能够使用。本文介绍了一个开源工具箱 COMATOSE，旨在改变这一状况，使这些方法能够为更广泛的群体所用。该工具箱包含基础形式化方法，并提供向量空间分解和基映射作为显式前向方法；与迭代计算优化相比，这种方法的计算负担较小，同时还可以根据需要作为后续优化运行的初始解。

引言

作为经颅磁刺激（TMS）的核心要素，刺激线圈决定了头部电磁场的空间形状、哪些结构会同时被激活，以及局灶刺激的程度。大多数现成线圈都基于数十年前的设计，当时人们对相关物理方面的理解还较为有限 [F,G]。实际上，几乎所有商业化程度较高的线圈，都是凭借人的直觉并通过反复试错设计出来的，而不是基于对物理和生理特性的系统性设计 [J]。Ke available

数学形式体系和软件包当时还无法实现这一点。然而，先前的研究表明，这些线圈远非最优，例如在脉冲能量或效率方面仍存在很大改进空间 [N–FP]。

系统化优化或数学生成式设计可以根据目标和约束条件 [FF,FG] ，或结合向量空间分解（VSD）[FJ]进行前向投影，计算出线圈。然而，这些技术此前只有全球少数几个团队能够运用，因为他们掌握了足够的数学和物理知识，可以自行开发内部软件包。开源工具箱 COMATOSE 旨在改变这一现状，让更广泛的群体能够使用这些方法。它纳入了基础形式体系，并提供向量空间分解和基映射作为显式前向方法；与迭代计算优化相比，这种方法的计算需求较低，也可按需作为后续优化过程的初始解。此外，它还提供了进行模态优化所需的所有要素。

背景

磁场的基向量表示和基变换源于理论电磁学与量子场论，用于一般性地描述整个解空间，并且已经纳入所有约束条件，因此要找到特定解，本质上只需确定系数，即各基向量所需的占比。如果将基向量按顺序排列，例如按照结构尺寸逐渐变细的顺序排列，那么由于某些基向量的特征尺寸小得不切实际，对解的识别可以只关注有限数量的基向量，而忽略其余部分。该方法已应用于医学中的其他领域，例如磁

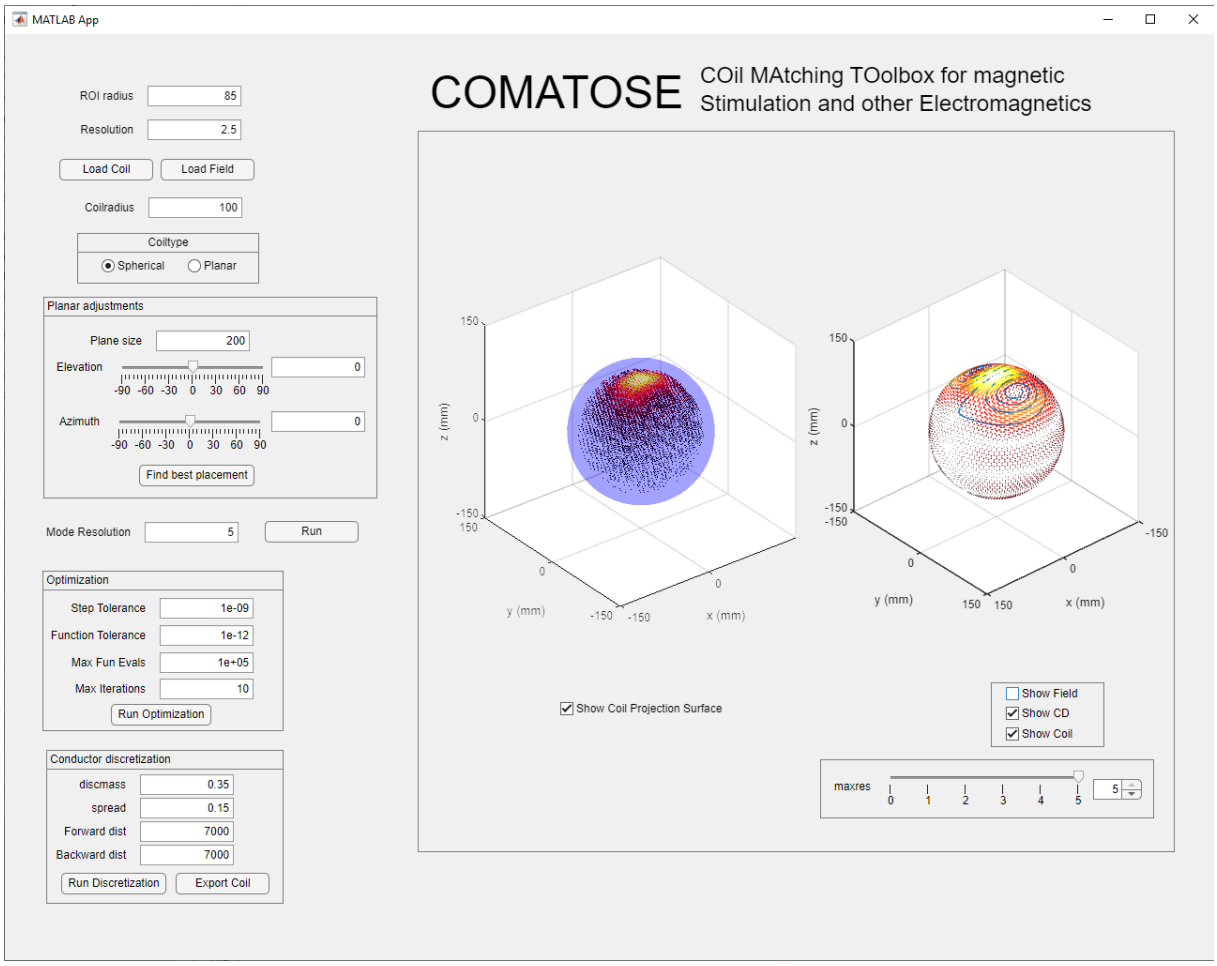

图 1. COMATOSE 主窗口。左侧可设置或选择所有环境参数，并执行相应操作。右侧最左侧的图显示待匹配场和线圈投影表面（本例中为球面）。最右侧的图可显示下拉菜单中的内容（结果场、结果电流密度和离散化导线路径）。通过该图下方的滑块，可以限制投影的分辨率，从而限制投影结果。

共振成像场，用于描述和推导具有特定特征的梯度线圈和匀场线圈 [FN]。它能够紧凑地描述所需和不需要的场贡献，并建立线圈几何形状、电流分布与结果场模态之间的直接联系，而结果场模态代表向量空间的基向量。

对于经颅磁刺激，通过无散模式的叠加（即基向量的加权和），可以描绘出所有可能线圈的解空间，例如在平面上，或在其他任意表面上（如头部周围某种弯曲形状的表面），并且已经满足所有约束条件 [8]。因此，所有可能的组合都代表一个有效的线圈，而且任何可能的线圈都可以表示出来。此外，按照空间频率递增（即特征越来越小）排序的模式，使我们能够专注于有限数量的模式。

通过系数表示线圈的模态表示，与将函数表示为傅里叶级数中正弦基向量之和有相似之处，但本质上将其扩展到了更多维的空间。同样，出于实用考虑，通常可以忽略较高频率，从而专注于有限数量的元素。要找到各系数，即所需线圈中各种模式所占的比例，可以使用映射；从数学上说，这代表一种基变换和／或优化。

一旦确定了各种模式对构成解的贡献，线圈特性便得到了充分描述。然而，具体采用离散导线绕制的方式仍未确定。在映射或优化结束时，对连续矢量场进行离散化，可生成一条集中的导线路径。从数学上说，这一步最好形成一条穿过线圈电流分布场的积分曲线

；叠加梯度场后会生成螺旋 [FJ]。该过程摒弃了以往临时采用的方法和启发式做法，例如将闭合回路连接起来作为无散模式 [Fb] 的结果。离散化通过梯度场的大小确定线圈的电感。

该工具箱包含将线圈映射到不同表面（无论平面还是曲面）所需的全部组件和代码，并能在头部产生相同空间场分布的同时，降低脉冲能量和线圈发热。此外，它还能生成此前从未有任何线圈实现过的场形状和目标线圈。

应用

我们开发了 COMATOSE 工具箱，以解决现有线圈设计工具的局限，并打破目前只有少数团队能够使用这些技术的局面。我们将其实现为一款基于 MATLAB 的开源应用，提供用户友好的图形用户界面（GUI），以支持线圈优化和磁场匹配。该工具箱实现了向量空间分解、基向量映射和优化。如果要将现有线圈设计或目标重新设计成不同的线圈，例如效率更高、更小或更实用的线圈，那么前者在计算上更高效 [FJ]。

该应用的工作流程包含四个不同的步骤。第一步，用户通过设置关键参数来定义仿真环境，例如感兴趣区域（*ROI*）的半径（将大脑近似为球形区域）以及分辨率（决定 ROI 内采样点的密度）。随后，用户加载待分析的磁矢势或线圈几何形状。对于预定义的磁矢势，软件提供选项，可沿 x、y 或 z 轴调整磁场的位置。或者，也可以加载现有线圈并计算其对应的磁矢势；这一功能与此前介绍的 TMS线圈设计工具等工具类似 [Fg]。

第二步用于定义线圈投影面。目前，COMATOSE 允许用户选择球形或平面线圈几何形状。由于该工具箱是开源的，用户也可以添加其他形状。对于平面线圈，用户可以手动调整方位角和仰角，也可以使用 查找最佳放置位置 功能，让应用程序自动将投影面与目标磁场对齐。用户还可以指定模式分辨率，它决定球形线圈所用球谐函数的次数和阶数。对于平面线圈，它决定投影面沿 x 轴和 y 轴的分辨率，即顶点数量。

在第三步中，应用程序会根据指定的投影表面，计算所选线圈投影表面上的电流密度、ROI 中对应的磁矢势以及 VSD系数。用户点击运行按钮即可启动这些计算。该工具箱以图形方式显示结果，供进一步评估。用户可以通过交互式滑块调整最大分辨率，以优化投影磁场。对于需要更多功能的用户，还可以在投影结果的基础上执行可选的优化步骤。用户可以通过 GUI 配置优化参数，以满足特定要求。

第四步也是最后一步，会将得到的电流密度离散化为导体路径，以便用于下游应用，例如制造中的计算机辅助设计（CAD）。有几个参数可以控制离散化过程：*Discmass*会为离散化引入一种可选的类惯性效应，从而抑制导体路径中过小的结构和弯折。*Spread*决定叠加梯度场的系数，因此也决定所得线圈的匝数和电感。*Forward*和*backward distance*用于设定线圈在两个方向上的长度，因为离散化从电流密度最高的点开始。

图 F 左侧展示了球形感兴趣区域内磁矢势的目标空间分布。右侧图像表示计算得到的匹配线圈电流密度，其上方还显示了可能的离散化导体路径。以导体路径形式呈现的线圈绕组形状可以导出为逗号分隔值（CSV）文件。

结论

COMATOSE 提供了多项功能，我们发现目前只有少数团队能够使用这些功能，而这可能会阻碍技术的进一步发展。该工具支持用户重新设计并简化现有线圈，以提高效率；创建针对特定应用定制的新型线圈几何形状；并无缝导出可直接用于计算机辅助设计软件的导体路径。该工具还包括基于向量空间投影的正向映射功能，可降低计算需求，并支持迭代计算优化。

致谢

这些作者是脑刺激技术相关专利及专利申请的发明人，但这些专利与本研究无关。

可用性

该应用可在 MATLAB 加载项管理器中以 COMA- TOSE 的名称获取，也可通过 GitHub 获取（https://github.com/maxxkoehler/COMATOSE）。GitHub 仓库提供的工具箱既可作为应用在 MATLAB 中打开，也可作为预编译的独立应用使用；后者只需 MATLAB 运行时，该运行时可免费下载。

参考文献

["] Barker AT、Jalinous R、Freeston I L。人类运动皮层的非侵入性磁刺激。《柳叶刀》（伦敦，英格兰）"GHI; "(HKLM): "" OP–M.[R] Ueno S、Tashiro T、Harada K。利用时变磁场的成对配置对脑神经组织进行局部刺激。《应用物理学杂志》"GHH; PK("O): IHPR–K.[L] Peterchev AV、Deng Z-D、Goetz SM。经颅磁刺激技术的进展。载于：Reti I，编者。《脑刺激：方法与干预》。新泽西州霍博肯：Wiley Blackwell；RO"I, 第"PI–HG.[K] Zhang Z、Ding H、He Z、Yu S、Fang X、Zhao C 等。用于提升经颅磁刺激选择性的波形优化与分析。《IEEE Access》RORI; "L: "MKHPH–HR.

[I] Goetz SM, Deng Z-D. 经颅磁刺激设备与范式的开发和建模。《国际精神病学评论》（阿宾顿，英格兰）RO"M; RG(R): ""I–KI.[P] Deng Z-D, Lisanby SH, Peterchev AV. 深部经颅磁刺激的线圈设计考量。《临床神经生理学》官方期刊《国际临床神经生理学联合会》RO"K; "RI(P): "ROR–"R.[M] Gomez LJ, Goetz SM, Peterchev AV. 经颅磁刺激线圈设计：在刺激深度、聚焦性和能量之间实现最佳权衡。《神经工程学杂志》RO"H; "I(K): KPOLL.[H] Koponen LM, Nieminen JO, Ilmoniemi RJ. 经颅磁刺激最小能量线圈：用于聚焦刺激。《Brain Stimulation：神经调控基础、转化与临床研究》RO"I; H("): "RK–LK.[G] Koehler M, Goetz SM. 仅含单层表面导体的简化 H" 线圈。《IEEE Access》RORK; "R: IGHP"–M.["O] Koponen LM, Nieminen JO, Mutanen TP, Stenroos M, Ilmoniemi RJ. 在真实头部几何结构中进行经颅磁刺激的线圈优化。《Brain Stimulation：神经调控基础、转化与临床研究》RO"M; "O(K): MGI–HOI.[""] Membrilla JAV, Pantoja MF, Puerta APV, Souza VH, Sánchez CC. 优化刺激深度的经颅磁刺激线圈设计。《IEEE Access》RORK; "R: "LLO–KO.["R] Cobos Sánchez C, Garcia-Pacheco FJ, Rodri- guez JMG, Hill JR. 用于设计最佳经颅磁刺激线圈的逆边界元计算框架。《边界元工程分析》RO"H; HH: "IP–PG.["L] Koehler M, Goetz SM. 任意形状表面上磁刺激线圈与解剖结构无关的投影和优化的封闭形式。《IEEE 生物医学工程汇刊》RORK; M"(P): "MKI–"MII.["K] Roméo F, Hoult DI. 磁场剖面分析：线圈设计的分析与校正。《医学磁共振》"GHK; "("): KK–PI.["I] Wang Y, Xin X, Liu F, Crozier S. 用于圆柱形磁共振成像的螺旋梯度线圈设计

系统。《IEEE 生物医学工程汇刊》RO"H; PI(K): G""–RO. ["P] Köhler M, Götz S. 经颅磁刺激线圈设计工具（Kl/Codein Box）：用于创建的工具箱根据导体路径数据生成的用户定义线圈。Brain Stimulation RORL；“P(L)：PGH–MOO。