

三维磁拓扑模拟程序 TOP2D

作者：贾曼妮、孙有文等，联系方式：jiamanni@ipp.ac.cn

该程序是一个基于磁力线追踪算法开发的三维磁拓扑模拟程序。

基本原理：

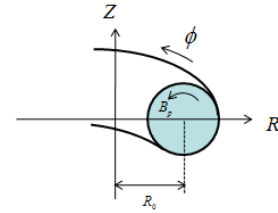
根据磁场无源性条件： $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ ，可写成 $\vec{B} = \nabla\phi \times \nabla\psi_p + g(\psi)\nabla\phi$

在 (R, ϕ, Z) 坐标系下可分解为：

$$B_R = \frac{1}{R} \frac{\partial\psi_p}{\partial Z}$$

$$B_Z = -\frac{1}{R} \frac{\partial\psi_p}{\partial R}$$

$$B_\phi = g(\psi)/R$$



根据磁力线方程 $\frac{dl_R}{B_R} = \frac{dl_\phi}{B_\phi} = \frac{dl_Z}{B_Z}$ 可得到磁力线追踪的基本公式，

并利用数值积分(这里使用四阶或六阶荣格库塔积分法)，得到磁力线轨迹，分析磁拓扑结构：

$$\frac{dR}{dl_\phi} = \frac{B_R}{B_\phi} = \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{\psi_p}{g} \right)$$

$$\frac{dZ}{dl_\phi} = \frac{B_Z}{B_\phi} = -\frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{\psi_p}{g} \right)$$

由于利用了磁通守恒性，计算精度可达到 10^{-9} m，且误差不随追踪圈数累积。

进一步利用 Monte-Carlo 方法，将径向的垂直输运（反常输运模型）以随机行走算法加入磁力线追踪，

$$\chi_e \approx \Delta^2 \nu = \Delta^2 \frac{v_{th}}{\lambda}$$

其中 Δ 代表径向随机位移， ν 代表碰撞频率， v_{th} 代表热速度， λ 代表粒子平均自由程。

通过在最外闭合磁面释放携带能量的一定数量的粒子，可以对偏滤器靶板上的热负荷分布进行一个粗略的估计。

通过程序的计算，能够绘制磁场在任意环向和水平截面上的庞加莱图以及偏滤器靶板上的磁足迹图，提供磁力线连接长度、深度等信息，为分析三维磁扰动下的边界磁场随机化程度、偏滤器热负荷分布等提供参考。

参考文献：

- [1] **M. Jia**, Y. Sun, F. Zhong, H. Li, G. Li, L. Wang, K. Gan, B. Zhang, J. Qian, B. Shen *et. al.*, Vacuum modeling of three-dimensional magnetic field topology under resonant magnetic perturbations on EAST [J]. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2016, 58(5): 055010.
- [2] **M. Jia**, Y. Sun, Y. Liang, L. Wang, J. Xu, S. Gu, B. Lyu, H.H. Wang, X. Yang, F. Zhong *et. al.*, Control of three dimensional particle flux to divertor using rotating RMP in the EAST tokamak [J]. *Nuclear Fusion*, 2018, 58(4): 046015.

