

磁阻抗抗扰度 (Magnetic Susceptibility) 在微型机器人中的应用

叶家炜

Oct 16, 2026

微型机器人正从科幻概念逐步走向临床与工业的现实舞台。胶囊内镜已在消化道完成无创成像，血管介入机器人借助磁导航进入冠状动脉，而微创手术臂则可在腹腔镜孔径下完成缝合。这些系统在体积急剧缩小的同时，能源供给、通信链路和空间定位却成了难以逾越的瓶颈。磁场因其对生物组织的低衰减特性，成为无线能量与控制的首选媒介，而磁阻抗抗扰度正是决定磁场与机器人相互作用强度的核心材料参数。

磁阻抗抗扰度 (Magnetic Susceptibility, χ) 描述材料在外磁场作用下被磁化的难易程度。在国际单位制中，其量纲为无量纲的体积磁化率；典型顺磁材料的 χ 值在 10^{-6} 量级，逆磁材料则为负值，而铁磁或超顺磁纳米颗粒的 χ 可达数个数量级。 χ 的大小直接决定了微机器人对磁场梯度产生的磁力大小、旋转扭矩的响应灵敏度，以及在磁共振成像中的信号对比度。因此，理解并调控 χ ，相当于同时掌握了微机器人的「无线引擎」「内置传感器」与「抗扰外壳」。

1 磁阻抗抗扰度基础

从微观角度看，磁阻抗抗扰度源于电子自旋磁矩与轨道磁矩的总和。当外部磁场 H 施加于材料时，电子自旋沿或逆磁场方向排列，形成宏观磁化强度 M ，二者近似满足线性关系 $M = \chi H$ 。推导过程可从朗之万顺磁理论出发，考虑热扰动与磁能的竞争，最终得到 χ 与温度、有效磁矩的定量关系。在工程实践中，微机器人多选用 Fe_3O_4 或 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 超顺磁纳米颗粒，其 χ 值高且无磁滞； NiFe 或 CoFeB 软磁薄膜则提供面内高导磁率；生物可降解磁性水凝胶通过交联 Fe^{3+} 离子实现 χ 的体内可控衰减。

表征 χ 的常用手段包括振动样品磁强计与超导量子干涉仪。前者通过样品在均匀磁场中的机械振动，测量感应电动势，进而反演 M - H 曲线；后者则利用约瑟夫森结的磁通量化，可在微米尺度实现极低磁矩检测。空间分辨成像方面，磁共振相位图可反映局部 χ 引起的场偏移，而磁力显微镜则在探针尖端引入振荡电流，探测样品表面磁场梯度，实现纳米级 χ 分布。

2 驱动机制

磁力可表示为 $F = \mu_0 (m \cdot \nabla) H$ ，其中磁矩 m 与 χ 成正比。因此，设计高梯度磁场即可放大驱动力。临床 MRI 的梯度线圈可提供约 50 mT/m 的梯度，而电磁铁阵列则能通过相位编码实现任意方向的梯度合成。对旋转驱动而言，扭矩 $\tau = m \times B$ ， χ 越大，剩余磁矩越稳定，螺旋型磁性微游动机器人在低雷诺数流体中即可实现定向推进。实验表明，当 χ 从 0.1 增至 1.0 时，相同电流下的推进速度可提升近三倍，但同时比吸收率 SAR 也随之上升，需在能量效率与热耗散间取得平衡。

3 感知与反馈

χ 不仅用于驱动，亦可充当「内置传感器」。在磁共振成像中，超顺磁颗粒产生的局部场梯度会显著缩短 T2 弛豫时间，定量关系可近似为 $\Delta R_2 \propto \chi \cdot \text{浓度}$ 。利用这一特性，研究者已实现亚 100 μm 的实时定位精度。在血管壁压力监测中，磁弹性复合材料受应力作用时， χ 发生微小漂移，导致谐振频率偏移，通过外部线圈读取频率即可反演压力值。磁电复合结构则将磁致伸缩层与压电层叠加，应变信号可转化为电压输出，实现自供电的力-电转换。

4 抗扰度设计

微机器人工作于复杂生物电磁环境，需抑制外部干扰。 μ -metal 或铁氧体壳层可将低频磁场衰减 40 dB 以上；温度系数方面，掺杂 Gd^{3+} 可将布洛赫-布洛赫根温度系数降低至 0.1 %/K 以下；自适应 PID 算法则实时补偿场漂移。在血液流动与呼吸伪迹消除上，研究者采用多回波相位解缠与时空滤波相结合的方法，将 χ 伪影残差降至噪声水平。

5 典型应用

靶向给药中， χ 梯度场可将载药微球富集于肿瘤区域，随后交变磁场触发热释药。微创血栓清除则利用螺旋状磁性微钻头，通过 χ 调谐实现「钻」与「吸」两种模式切换。脑机接口探针采用 χ 匹配脑组织的柔性磁性材料，可显著降低伪影。体外诊断中的磁性微抓手阵列则通过 χ 编码实现并行分选，单次处理通量可达每秒千粒。

6 挑战与展望

高 χ 与生物相容性的矛盾仍是材料瓶颈。室温磁性有机框架的探索有望在保持高磁化率的同时实现完全可降解。多机器人集群控制中，个体 χ 差异引入耦合非线性，强化学习与模型预测控制正成为研究热点。法规层面，磁性颗粒长期滞留的毒理学阈值与 MRI 兼容性认证路径亟待完善。

7 结论

磁阻抗扰度已成为微型机器人「无线能源、信息、结构」三合一的使能参数。随着 MRI 兼容、完全可降解、亚毫米级自主集群技术的成熟，下一代磁性微系统将在精准医疗与微工厂领域发挥不可替代的作用。