

磁悬浮磁力搅拌器悬浮控制及实验研究

朱生 王海丰 陈圭

(温州市博奥机械制造有限公司, 浙江温州 325000)

摘要: 磁力搅拌器决定疫苗质量, 现有搅拌器所用轴承不利于清洗, 会导致疫苗污染的问题。而磁悬浮轴承由于无接触、无摩擦以及主动可控等特点, 可以提供稳定的悬浮间隙, 便于清洗与灭菌操作, 使磁力搅拌器能满足更高的制药行业清洗标准要求。为此, 研究一种磁悬浮轴承支承的磁力搅拌器, 解决磁力搅拌器存在的清洗问题, 保证疫苗质量。首先分析了磁力搅拌器磁悬浮支承的布置方式, 确定了径向采用主动磁悬浮轴承、轴向采用被动永磁轴承的组合支承方案, 基于 dSPACE 实时仿真系统构建了控制系统, 搭建了磁悬浮磁力搅拌器实验平台, 进行了磁力搅拌器悬浮控制实验, 实验结果表明, 所述磁悬浮磁力搅拌器叶轮转子能够实现稳定悬浮。

关键词: 磁力搅拌器; 磁悬浮轴承; 悬浮控制; dSPACE 实时仿真

磁力反应釜起着混合、换热、溶解、悬浊、乳化、传热、均质等作用, 可提高产品的生产效率, 广泛应用于化工和食品生产。磁力搅拌器作为磁力反应釜中的核心部件, 其性能好坏直接影响被搅拌物的品质和合格率。随着制药机械行业标准的逐渐提升, 在位清洗 (Clean in Place, CIP) 与在位灭菌 (Sanitize in Place, SIP) 成为行业内的规范操作。

现有磁力搅拌器所用轴承定、转子接触, 不利于清洗, 会导致疫苗污染的问题。磁悬浮轴承在近些年高速发展, 由于无机械接触、无须润滑、主动控制以及低能耗的特点, 磁悬浮轴承在压缩机、分子泵、心脏泵、飞轮储能等行业中广泛应用。为此, 采用磁悬浮轴承代替现有轴承, 实现转子和定子稳定的悬浮间隙, 便于清洗与灭菌操作, 使磁力搅拌器能满足更高的制药行业清洗标准要求。且无接触支承更符合制药机械 CIP 与 SIP 的标准要求。

因此, 研究一种磁悬浮轴承支承的磁力搅拌器, 分析磁力搅拌器磁悬浮支承的布置方式, 基于 dSPACE 实时仿真系统构建控制系统, 搭建磁悬浮磁力搅拌器实验平台, 进行磁力搅拌器悬浮控制, 解决现有磁力搅拌器存在的清洗问题。

一、磁悬浮磁力搅拌器结构及布局

本文选择八极主动磁悬浮轴承、被动永磁轴承分别作为搅拌轴转子的径向支承和轴向支承。搅拌器转子属于长悬臂轴系, 其叶轮处受到的力主要是径向力与轴向力, 叶轮处受到径向力会产生大弯矩影响, 而轴向力主要产生推力, 其弯矩影响较小。

主动磁悬浮轴承能提供可变刚度, 其支撑力是可调的, 但同时需要闭环控制, 既要配置位移传感器、控制器与功率放大器, 因此, 其成本相对较高。被动永磁轴承是利用永磁体之间的磁场相互作用力悬浮, 其结构简单, 成本较低, 但承载力会受到环境温度、冲击等因素的影响。混合悬浮是由两种支承方式结合而成, 能够降低能耗, 但其控制相对复杂。结合磁力搅拌器转子的工况, 同时考虑成本, 确定了径向采用主动磁悬浮轴承支承、轴向采用永磁轴承的组合支承方式, 驱动电机通过磁力联轴器无接触带动密封着的转子旋转, 如图 1 所示。

图 2 为磁悬浮支承的磁力搅拌器机械部分渲染图, 主要包括驱动电机、磁力耦合器、电涡流位移传感器、轴承供电航空插头以及配重轴等。航空插头为磁悬浮轴承供电, 电涡流位移传感器检测转子产生的径向位移, 并转化为电压信号输出, 形成轴系的

反馈控制闭环。

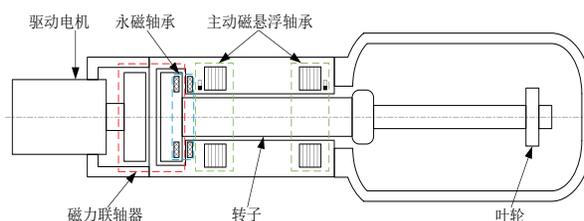


图 1 磁悬浮磁力搅拌器支承示意

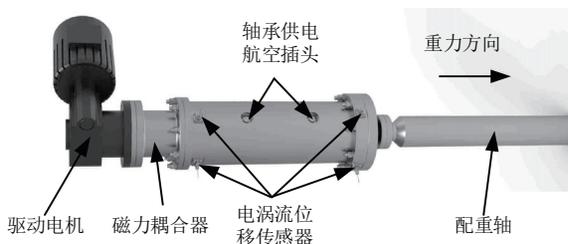


图 2 磁力搅拌器三维模型

二、磁力搅拌器悬浮控制设计及构建

磁悬浮支承的磁力搅拌器的径向支承采用主动磁悬浮轴承, 需要外加控制器以维持对搅拌器转子轴系的径向稳定支承, 控制系统框图如图 3 所示。在控制策略方面, 采用 PID 控制器, 其结构简单, 易于调节, 稳定性好。为了方便控制方案的设计和离线仿真, 实时快速控制原型、验证设计向产品型控制器, 这里选择 dSPACE 实时仿真系统, 该控制器基于 Simulink 仿真平台开发, 其有着实时计算能力强、系统可靠性高以及拓展性高等特点。为了避免实验过程中的电流噪声等因素的干扰, 本文选用模拟功率放大器。

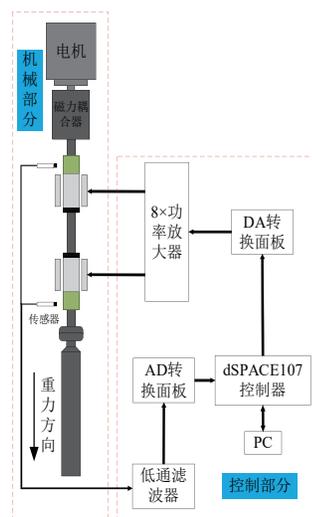


图 3 磁力搅拌器悬浮控制框图

三、磁力搅拌器悬浮控制实验

(一) 实验平台

磁力搅拌器实验平台如图 4 所示, 其工作原理为: 电涡流位

移传感器检测搅拌机转子的位置，将位移信号转化为电压信号，并输入到 A/D 转化板，把得到的数字信号输入到 dSPACE1007 控制器，通过与预设位置对比，计算出调整转子位置的控制信号，控制信号通过功率放大器转化为控制电流，作用到主动磁悬浮轴承对应磁极上，实时调整磁力搅拌机转子位置。

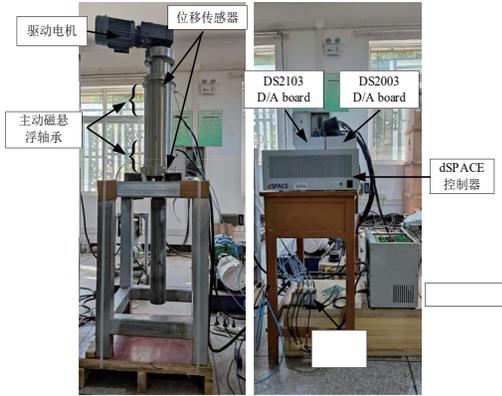


图 4 磁力搅拌机实验平台

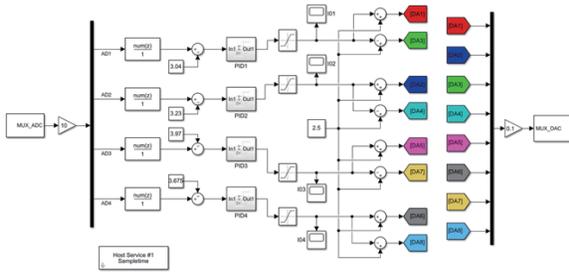


图 5 dSPACE 控制程序

dSPACE 中控制程序是根据差动原理建立的。左侧的输入为传感器检测的位移数据，以电压形式通过 DS2003 输入。输入的电压信号通过与设定的中心位置进行对比产生偏差信号，经过 PID 控制器控制，输出为各路中的电流信号，通过 DS2103 输出到功率放大器中。功率放大器将各路电流信号进行放大后给到主动磁悬浮轴承线圈中，实现对搅拌机转子的主动控制。在 dSPACE 中建立的控制程序如图 5 所示。

(二) 悬浮实验

将图 5 所示控制框图进行编译，在与 dSPACE1007 相匹配的软件 ControlDesk 中，给不同方向的磁极线圈通电，叶轮端轴承的 PID 参数为: $k_p = 0.6$, $k_i = 1.1$, $k_d = 0.0003$ ，而驱动端的 PID 参数为: $k_p = 0.82$, $k_i = 1.2$, $k_d = 0.0006$ 。取其中一路的位移信号与控制电流进行分析，绘制起浮曲线，如图 6 所示。搅拌机转子竖直放置时，转子与保护处无径向接触，因此起始位置不在保护间隙处 ($500 \mu\text{m}$)。由图 6 可知，转子在 0.9s 时开始起浮，在 1.7s 左右开始稳定，而稳定后的搅拌机转子位移振幅 $\pm 10 \mu\text{m}$ ，满足工作要求。

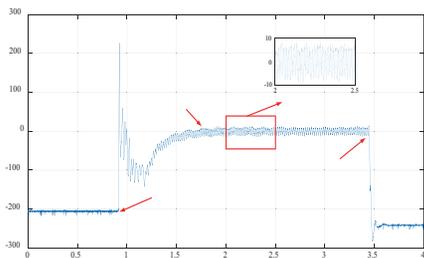


图 6 起浮曲线

图 7 为驱动端与叶轮端磁悬浮轴承静态悬浮轴心轨迹。可以看出，驱动端轴承处的轴心轨迹在 $\pm 15 \mu\text{m}$ ，叶轮端轴承处的 $\pm 20 \mu\text{m}$ 。叶轮端振动位移大一些，将叶轮端 k_p 值增大控制叶轮端的力增大，得到图 8 所示轴心轨迹，可以看出驱动端以及叶轮端振动位移减小，驱动端轴承处的轴心轨迹在 $\pm 5 \mu\text{m}$ ，叶轮端轴承处的 $\pm 10 \mu\text{m}$ 。

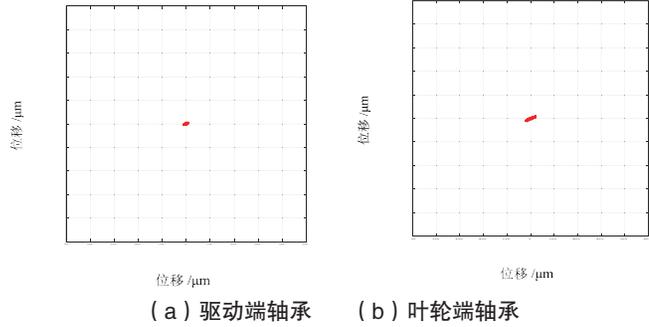


图 7 驱动端与叶轮端静态悬浮轴心轨迹

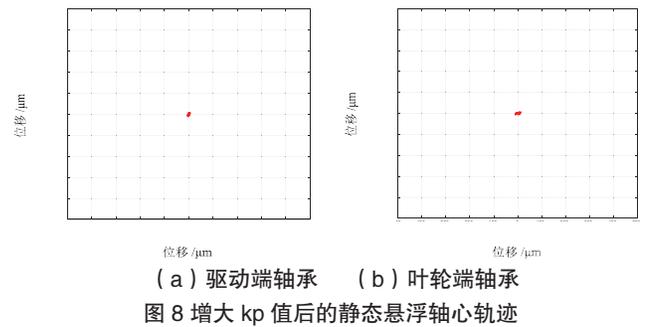


图 8 增大 k_p 值后的静态悬浮轴心轨迹

四、总结

- (1) 研究了一种磁悬浮轴承支承的磁力搅拌机，解决磁力搅拌机存在的清洗问题，保证疫苗质量。
- (2) 分析了磁力搅拌机磁悬浮支承的布置方式，确定了径向采用主动磁悬浮轴承、轴向采用被动永磁轴承的组合支承方案。
- (3) 基于 dSPACE 实时仿真系统构建了控制系统，搭建了磁悬浮磁力搅拌机实验平台，进行了磁力搅拌机悬浮控制实验。本文通过实时仿真系统研究初步证明了所提算法的有效性，后续将在对应工况下进行旋转试验研究。

参考文献:

[1] 胡余生, 李立毅, 郭伟林, 等. 磁悬浮制冷离心压缩机停机气流冲击抑制研究 [J]. 电机与控制学报, 2022, 26 (01): 24-31.

[2] 天津飞旋科技股份有限公司. 磁悬浮分子泵掉电控制方法、装置和磁悬浮分子泵: CN202110978245.1[P].2021-11-23.

作者简介: 朱生 (1973-), 男, 浙江温州人, 工程师。