

## 中文摘要

磁悬浮技术是利用磁力使物体处于无接触悬浮状态，具有高转速、无污染、无机械接触等优点，被广泛应用于航天、交通、工业等领域。

磁悬浮球是验证磁悬浮技术的一个重要实验装置，一个非线性开环不稳定系统。由于磁悬浮球系统控制器设计面临建模误差、外界扰动、平衡点漂移等多源不确定性扰动的影响，给磁悬浮球位置高性能控制带来巨大挑战。

为实现多源不确定扰动作用下磁悬浮球系统高性能控制，拟采用自抗扰控制策略，将系统内、外扰动视为“综合扰动”，利用自抗扰控制器设计不完全依赖于系统精确数学模型的优点，构建扩张状态观测器，实现多源不确定扰动在线估计并实施前馈补偿，将非线性不确定系统转化为无扰线性积分级联形式，从而进一步设计状态反馈控制器，以实现磁悬浮球系统高性能控制。主要研究内容如下：

(1)本文以磁悬浮球系统为研究对象，在分析系统结构与工作原理基础上，构建系统数学模型并进行线性化处理；

(2)提出一种基于模型辅助线性扩张状态观测器(Linear extended state observer, LESO)的线性自抗扰控制方法，以提升系统的控制性能。将已知磁悬浮球模型信息融入 LESO 设计过程，分析了模型辅助 LESO 的收敛性，并与模型完全未知时 LADRC(Linear Active Disturbance Rejection Control, LADRC)及 PID 进行仿真对比；

(3)为进一步抑制含有高频测量噪声的多源不确定扰动对系统控制性能的影响，提出一种基于改进扩张状态观测器的线性自抗扰控制方法。针对磁悬浮球系统中多源不确定扰动频率特性，采用扰动频率分层方法，根据 ESO 低频滤波特性和扰动估计精度/速度与 ESO 带宽的正相关性，提出了一种基于级联扩张状态观测器的磁悬浮球线性自抗扰控制方法，理论分析了 CESO(Cascade Extended State Observer, CESO)的收敛性，通过仿真验证该方法的可行性，分别对扩张状态观测器为 CESO<sub>(1)</sub>、CESO<sub>(2)</sub>、CESO<sub>(3)</sub>时 LADRC 及 PID 控制作用下的磁悬浮球性能对比，给出 CESO 层数与状态估计速度/精度之间的一般规律，并验证所提控制策略的优越性。

(4)为了进一步提高基于 CESO 的线性 ADRC 控制性能，在研究(3)的基础上，采用分数阶 PD 代替常规线性 PD 状态反馈控制律，以提高系统鲁棒性。并通过仿真验证所提控制方法的有效性。

本文通过对自抗扰控制器的改进，有效抑制含有高频测量噪声的多源不确定扰动对

系统控制性能的影响, 拓展了 ESO 带宽取值范围, 降低了 ESO 对高频测量噪声的敏感性, 提升了系统综合扰动估计/控制精度, 具有结构简单、易于实现、抗扰能力强的优点。

关键词: 磁悬浮球系统; 自抗扰控制; 级联扩张状态观测器; 分数阶控制

**ABSTRACT**

Magnetically suspended technology makes objects in a contactless suspension state by using magnetic force. It has the advantages of high speed, no pollution and no mechanical contact. It is widely used in the fields of space, transportation, industry and so on.

The magnetic suspension sphere is an important experimental device to verify the magnetic suspension technology. It is a non-linear open-loop unstable system. The design of controller for magnetic levitation sphere system is confronted with the influences of modeling error, external disturbance, balance point drift and other uncertain disturbances, which bring great challenges to the high performance control of magnetic levitation sphere position.

In order to achieve high-performance control of magnetic suspension sphere system under multi-source uncertain disturbances, an auto-disturbance rejection control strategy is proposed, which considers the internal and external disturbances as "comprehensive disturbances". Using the advantage that the design of auto-disturbance rejection controller is not entirely dependent on the precise mathematical model of the system, an extended state observer is constructed to realize on-line estimation of multi-source uncertain disturbances and to implement feed-forward compensation. The nonlinear uncertain system is transformed into a disturbance-free linear integral cascade form, and the state feedback controller is further designed to achieve high-performance control of the magnetic suspension sphere system. The main research contents are as follows:

(1) Based on the analysis of the structure and working principle of the magnetic suspension sphere system, the mathematical model of the system is built and linearized.

(2) A linear ADRC method based on model-assisted linear extended state observer (LESO) is presented to improve the control performance of the system. By incorporating the known LESO model information into the LESO design process, the convergence of the model-assisted LESO is analyzed and compared with the simulation of LADRC and PID when the model is completely unknown.

(3) To further suppress the influence of multisource uncertain disturbances with high frequency measurement noise on the system control performance, a linear active disturbance rejection control (LADRC) method based on an improved extended state observer is presented. In view of the frequency characteristics of multi-source uncertain disturbances in a magnetic suspension sphere system, a LADRC method for magnetic levitation sphere based on cascade extended state observer is presented. The convergence of CESO (Cascade Extended State Observer, CESO) is analyzed by using the disturbance frequency stratification method. The feasibility of this method is verified by simulation. By comparing the performance of the magnetic suspension sphere under LADRC and PID control when the extended state observer is  $\text{CESO}_{(1)}$ ,  $\text{CESO}_{(2)}$ ,  $\text{CESO}_{(3)}$ , the general rule between the number of CESO layers and the speed/accuracy of state estimation is given, and the superiority of the control strategy is verified.

(4) In order to further improve the performance of linear ADRC control based on CESO, on the basis of research (3), fractional order PD is used instead of conventional linear PD state feedback control law to improve the robustness of the system. The effectiveness of the proposed control method is verified by simulation.

By improving the self-disturbance rejection controller, this paper effectively suppresses the influence of multi-source uncertain disturbance with high frequency measurement noise on the system control performance, expands the range of ESO bandwidth, reduces the sensitivity of ESO to high frequency measurement noise, improves the system comprehensive disturbance estimation/control accuracy, and has the advantages of simple structure, easy implementation and strong disturbance rejection ability.

**Key words:** Magnetic levitation ball system; Auto disturbance rejection control; Cascade extended state observer; Fractional order control

## 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第一章 绪 论.....                    | 1  |
| 1.1 课题研究背景及意义.....              | 1  |
| 1.2 国内外磁悬浮控制策略的发展状况.....        | 2  |
| 1.3 论文研究的主要内容.....              | 6  |
| 第二章 磁悬浮球系统仿真平台搭建与数学建模.....      | 9  |
| 2.1 磁悬浮球系统的结构.....              | 9  |
| 2.2 磁悬浮球系统的数学模型.....            | 10 |
| 2.2.1 动力及电磁力方程.....             | 10 |
| 2.2.2 电磁线圈及功放器.....             | 11 |
| 2.2.3 系统模型线性化处理.....            | 11 |
| 2.3 本章小结.....                   | 13 |
| 第三章 基于 LESO 的磁悬浮球系统自抗扰控制.....   | 15 |
| 3.1 线性扩张状态观测器.....              | 16 |
| 3.1.1 模型未知 LESO 收敛性分析.....      | 18 |
| 3.1.2 模型辅助线性扩张状态观测器收敛性分析.....   | 20 |
| 3.2 仿真.....                     | 20 |
| 3.3 本章小结.....                   | 25 |
| 第四章 基于 CESO 的磁悬浮球系统线性自抗扰控制..... | 27 |
| 4.1 基于级联 ESO 的自抗扰控制器设计.....     | 27 |
| 4.1.1 常规线性扩张状态观测器.....          | 27 |
| 4.1.2 线性级联扩张状态观测器.....          | 29 |
| 4.2 仿真分析.....                   | 32 |
| 4.2.1 无高频测量噪声.....              | 32 |
| 4.2.2 有高频测量噪声.....              | 34 |
| 4.3 结论.....                     | 37 |
| 第五章 基于 CESO 的磁悬浮球系统分数阶控制.....   | 39 |
| 5.1 分数阶理论基础.....                | 39 |
| 5.1.1 分数阶微积分定义.....             | 39 |
| 5.1.2 分数阶微积分的基本函数.....          | 40 |
| 5.2 分数阶控制器结构.....               | 42 |
| 5.3 仿真分析.....                   | 43 |

## 第一章 绪 论

### 1.1 课题研究背景及意义

磁悬浮系统是通过控制磁力大小来控制物体的运动状态，具有无接触、无摩擦、无噪声、节能、环保等优点<sup>[1]</sup>。

磁悬浮技术集中了电磁学、力学、控制工程等诸多学科<sup>[2]</sup>，从构想到实现经历了较为漫长的一个发展过程。19 世纪 40 年代，德国科学家赫尔曼·肯佩尔提出了通过调节磁力的大小使物体处于悬浮状态的构想；20 世纪初，欧美学者提出了利用磁力克服物体自身重力的构想，为磁悬浮技术的实现提供了理论研究方向。由于受当时材料科学与技术、电子技术、自动控制等科学技术和工业水平发展的制约，磁悬浮技术仅停留在猜想阶段，直到 50 年代，法国 Hispano-Suiza 公司才提出通过电磁铁与传感器结合来构建磁悬浮系统的理论，并以此申请专利，磁悬浮技术正式从构想转变到实践。

随着磁悬浮技术的发展，磁悬浮系统在交通运输<sup>[3]</sup>、磁悬浮轴承<sup>[4]</sup>及航天领域<sup>[5]</sup>中得到了广泛的应用：磁悬浮列车在轨面无接触的情况下，可使车体悬浮移动，摒弃了传统列车在运动期间由于摩擦导致的能量损耗；与传统滚动轴承相比，磁悬浮轴承通过磁场力将转子和轴承分开，具有磨损小、能耗低、产品生命周期长等优点；磁悬浮飞轮电池可实现机械动能与电能之间的高效转换，为解决新能源汽车一直存在续航里程不足等问题提供一种有效途径。

综上所述，磁悬浮技术由于其本身具备的无摩擦等优点，被广泛应用于工程实践中，如：过程及运动控制等领域。具有良好的应用前景<sup>[6]</sup>。因此，对于磁悬浮技术的研究有着很高的实用工程价值。

目前对于磁悬浮技术研究集中于以下几个方面：

(1)无传感器检测：无传感器检测在磁悬浮系统中主要是为了检测悬浮物的位置，其主要工作原理是通过检测系统中电流和电压来确定悬浮物与磁极面的间隙位置。根据受力关系，线圈中的电流会相应得到改变。磁悬浮系统通过无传感器检测大大简化了检测设备的复杂性，从而大大降低系统解耦难度。通过此项技术可以使得磁悬浮系统结构能得到进一步优化、提高系统可靠性，使其应用领域更加广泛<sup>[7]</sup>。

(2)超导材料：超导材料在很多方面有着优良的性能，如提高电磁力及减少发热等。目前超导材料的研发多数还停留在实验阶段，由于超导材料有着较好的热稳定性等优点，在磁悬浮系统的应用中，可以减小在建模时的参数摄动，进而提高系统的控制精度。随着超导材料的不断研发，提高磁悬浮球系统的控制精度依然有很大的上升空间。

(3)控制策略研究：作为一类非线性开环不稳定系统，系统中电磁力同线圈电流有着很强的非线性，且运行过程中会产生较强的电磁干扰；由于系统没有摩擦力，系统阻尼较小，抗干扰性能差，在实际应用中，环境存在着风力、温度、气压等不确定扰动，使得悬浮物的间隙发生巨大的变化，因此对于磁悬浮系统的控制有很多困难。

控制策略决定了磁悬浮系统的控制性能，近年来引起了国内外学者的广泛关注，并对其进行深入的分析，最终取得了很多具有实际工程意义的成果。PID 控制、滑模控制及自适应控制等控制方法在磁悬浮领域广泛应用，逐步提高了磁悬浮系统的控制性能。因此，选取合适的控制算法是十分重要的。部分控制算法结果仅存在于模拟仿真，只有少数控制算法不依赖于系统精确模型而成功应用于磁悬浮系统中。大多数控制方法由于系统参数的摄动以及不确定多源扰动的出现，导致控制精度会有所降低，而自抗扰控制将内部扰动和外部扰动转变为综合扰动的特点，使得控制系统在抗干扰性和跟随特性中有着明显优势，满足工业过程控制中不依赖于精确模型就能达到满意的控制需求。因此，自抗扰控制成为了国内外研究的重要课题。

## 1.2 国内外磁悬浮控制策略的发展状况

磁悬浮系统关键在于控制策略的研究。与其他多自由度系统相比，磁悬浮球系统操作更加简单且建模方法及控制算法原理与多自由度复杂系统相通，能熟练应用于复杂系统中，因此，如何提高磁悬浮球系统的控制性能成为了当代学者研究的主要问题<sup>[8]</sup>。经过多年的发展，国内外学者进行了大量算法研究，目前用于磁浮球系统的算法主要包括 PID 控制、滑模控制、自适应控制、二自由度控制、神经网络控制、自抗扰控制等方法，且取得了不菲的研究成果。下面本文对目前已有的控制方法进行分类，总结出不同控制方法的优点，并探讨现有控制方法的不足之处。

### (1)PID 控制

作为一种线性时不变控制方法，PID 很早就应用于磁悬浮系统控制中，针对系统非线性问题通过将系统线性化处理，进而实现磁悬浮系统的稳定悬浮控制，但是该控制方法调节时间较长，只是采用比例、积分和微分线性组合的传统 PID 控制方法，磁悬浮系统由于没有摩擦力的存在，因此极易受到扰动影响，扰动存在时，在响应速度、控制精度等方面会有很大的偏差，很难满足系统对于实时性的要求<sup>[9]</sup>。基于此原因，诸多学者将创新方法放在 PID 参数优化问题上，通过与其他控制方法结合，来提高系统的控制性能<sup>[10]</sup>。李明然等通过与模糊控制结合，引入量化因子，设计了一种基于 GA 的自调整模糊 PID 控制器，并且通过仿真验证得到了满意的 PID 参数<sup>[11]</sup>；沈昕璐等人通过与模糊

等控制方法结合,设计了一种补偿控制方法,实现了对控制器的在线动态补偿,提高了系统的鲁棒性<sup>[12]</sup>;上官霞南等人设计了一种变参数 PID 控制算法,仿真实验证明此方法减小了系统超调量、缩短了上升时间并且提高了控制精确度<sup>[13]</sup>。国外学者通过与智能算法结合来优化 PID 控制器参数,文献[14,15]通过粒子群优化(PSO)算法来寻找受时域目标函数 PID 控制器参数的最佳值,使得磁悬浮球系统在快速性与稳定性得到进一步的提升。文献[16]基于拉格朗日思想提出一种控制器参数调优方法,对系统参数进行了有效的优化。并通过仿真及实验证明了该方法的有效性。Yadav S 等提出灰狼(GWO)算法和教学学习优化(TLBO)算法来对 PID 参数进行优化,并验证了两种方法的有效性<sup>[17]</sup>。

### (2)滑模控制

滑模控制出现于上世纪 50 年代,是针对系统的模型不确定性的一种非线性控制方法<sup>[18]</sup>,由于磁悬浮球系统具有建模困难、参数摄动等问题,而滑模控制算法具有诸多优点,如扰动抑制能力和强鲁棒性等,因此,基于磁悬浮系统的滑模控制方法得到了广泛的研究<sup>[19]</sup>。然而,传统滑模控制在切换面的转换容易引起系统的抖振,当系统受到外部风力、电压波动等不确定扰动时,切换增益会随之增大,进而导致系统抖振现象更趋明显。滑模控制律的设计严重依赖于磁悬浮球系统状态信息如:小球位移及速度等,而状态信息的采集不可避免的引入高频测量噪声,进而导致小球的抖振幅值和频率增大,恶化系统控制性能,甚至失稳。在面对单自由度磁悬浮球系统时,系统感应检测装置单一,高频测量噪声导致传统滑模算法很难发挥其自身的优势。为了对磁悬浮系统实现较好的控制性能。张井岗等人将滑模与分数阶结合,采用分数阶  $PD^\mu$  结构,并证明控制方法稳定性,通过实验表明磁悬浮系统更有着更好的动态性能<sup>[20]</sup>。韩士成等人为了解决传统滑模控制带来的颤振问题时,提出了一种改进幂次趋近率的滑模控制方法,提高了系统的趋近性能,减小了小球在稳定悬浮时的抖振<sup>[21]</sup>。文献[22]为了改进基于超级扭转算法-超扭转观察器(STA-STO)设计的控制器在磁悬浮球系统实现连续控制中的局限性,设计了一种高阶滑模观测器(HOSMO),仿真验证了该方法的有效性。为了提高磁悬浮系统的抗干扰性能,胡坤等将扩张状态观测器与改进趋近律的滑模控制相结合,设计了一种基于新型趋近律的改进滑模控制,消除了系统的抖振现象,且使得系统有了更好的鲁棒性,拥有较好的控制性能<sup>[23]</sup>。

### (3)自适应控制

自适应控制在对系统进行控制时,不需要精确的数学模型,且鲁棒性较强,能有效解决磁悬浮球系统中的时变、非线性等控制问题,对于磁悬浮球系统的环境和特征的变化也有着较强的包容能力<sup>[24]</sup>。但是由于其上述的特点,对于磁悬浮球系统建模误差,自

适应控制会对模型信息进行模糊处理,从而导致其控制精度大大降低,从而极大地影响了控制性能。欧阳清华为了解决磁悬浮系统中由于干扰过大而引起的超调较大问题,提出一种自适应径向基函数算法,并利用 Lyapunov 函数验证了该算法的稳定性,最后通过实验证明了该方法不仅可以解决超调较大的问题,而且优化了适应系统参数,使得变化范围进一步扩大<sup>[25]</sup>。蔡忠侯等人为了全格式无模型自适应控制算法中参数难以整定的问题,提出一种基于增量的参数整定方法,且通过仿真实验证明了该方法的有效性<sup>[26]</sup>。文献[27]为了优化系统的控制性能,通过与鲁棒控制相结合,将已知与未知信息进行分离,设计了一种 K-filter 观测器将未知信息进行有效观测,通过 backstepping 设计方法设计改进控制器,实验证明了控制器稳定性。磁悬浮系统固有的非线性导致其难以建立较为精确的数学模型,为解决此问题,钟志贤将全格式无模型自适应控制(FFDL-MFAC)方法应用于系统中。使得系统有了更好的鲁棒性<sup>[28]</sup>。针对磁悬浮系统中不确定物理参数的电压控制问题,郭一等为了优化控制器设计,引入了低通滤波器及自适应律,使得控制器设计复杂性降低,提高了系统的稳定性<sup>[29]</sup>。Yaseen H M S 等针对磁悬浮系统的非线性,设计了一种自适应终端滑模控制,利用 Lyapunov 理论证明了其所提出的控制器的全局渐近稳定性。并通过与自适应反步滑模控制(ABS-SMC)和基于自适应积分反步滑模(AIBS-SMC)的控制器进行了对比,结果表明可降低系统对于外部干扰及参数不确定性的影响<sup>[30]</sup>。

#### (4)二自由度控制

二自由度控制通过设定两种不同的控制算法,对磁悬浮球系统的给定值和扰动的响应进行有效解耦<sup>[31]</sup>。使磁悬浮球系统有更好的跟踪特性和干扰抑制特性<sup>[32]</sup>。由于二自由度控制器参数无法根据系统实际情况来进行自整定,限制了在磁悬浮系统中的鲁棒性。Debdoot Sain 为了解决上述的缺陷,设计了一种新的模拟实时磁悬浮(磁悬浮)系统的设定点加权比例积分导数(SPWPID)控制器,并与教学学习(TLBO)优化算法结合,极大的提高了系统的鲁棒性<sup>[33]</sup>。国内外学者通过与不同的人工智能算法(Jaya、人工电厂算法)来对磁悬浮系统控制器参数进行优化,极大的提高了系统的控制性,使其能更好的处理参考信号跟踪和干扰抑制<sup>[34, 35]</sup>。文献[36]为了优化参数整定方法,通过共生生物搜索算法(SOS)与分数阶控制结合,对控制器参数进行在线调整,采用时域、频域法证明了系统稳定性,通过实验验证了其改进方法有着更好的鲁棒性。

#### (5)模糊控制

模糊控制是针对系统的模型不确定性的一种非线性方法,该方法有效地解决了磁悬

浮系统的非线性问题<sup>[37]</sup>,通过建立模糊规则来弥补磁悬浮球系统建模误差及参数摄动带来的控制问题。但由于模糊控制的特性,导致该控制方法对于磁悬浮球系统的控制精度不太理想,且模糊规则归纳困难以及其算法设计过于复杂,在实际工程应用中,脱离了实际硬件和操作环境。为了进行参数优化,刘丽丽等人将模糊控制与 PID 控制算法相结合,通过模糊推理和重心法解模糊过程得到了 PID 参数的隶属度,最终实现 PID 参数的自调整有效的提升了系统的控制精度<sup>[38]</sup>。M.J. Mahmoodabadi 为了解决磁悬浮系统的非线性问题,提出一种基于多目标灰狼优化算法的鲁棒模糊自适应积分滑模控制器,通过采用模糊规则来调节鲁棒控制算法的参数,为了避免试错过程,采用多目标灰狼优化算法来提高所提出的控制器的性能<sup>[39]</sup>。

#### (6)神经网络控制

神经网络控制具有较强的自我学习能力,在对磁悬浮球系统进行控制时,通过自我学习过程,来改变权值来适应所处环境的需求,有着较强的控制性能<sup>[40]</sup>。但是由于其需要大量的参数,且学习过程没有太多的跟踪数据,导致其输出缺乏理论依据,且有时学习过程太长,难以达到满意的结果。王强等人为提高系统的抗干扰性能,提出一种径向基神经网络逼近算法,通过实验验证了该方法的强鲁棒性<sup>[41]</sup>。Yemei Qin 等为了更好地对磁悬浮系统进行建模,采用带有函数权重的径向基函数(RBF)神经网络(FWRBF)来逼近具有外生输入变量的状态相关自回归模型(SD-ARX)的系数。基于所建立的 FWRBF-ARX 模型在特定工作点的局部线性,设计了一种局部线性化模型预测控制器(MPC),实现了磁悬浮球的稳定悬浮,并具有很好的跟踪性能<sup>[42]</sup>。

#### (7)自抗扰控制

自抗扰控制具有不依赖于系统的数学模型,抗干扰能力强等优点<sup>[43]</sup>,在工业过程、伺服系统控制等各个领域都进行了成功的应用<sup>[44]</sup>,在磁悬浮系统中,也得到了诸多学者的研究。自抗扰控制的出现,成功解决了磁悬浮球系统中对于参数摄动以及建模误差带来的局限性,相比于 PID 控制,抗干扰能力得到了较大的提升。张鋆豪等通过对线性自抗扰控制的频域分析,对磁悬浮球系统的线性自抗扰控制方法进行高效的参数整定,并且通过实验验证了系统的鲁棒性和快速性<sup>[45]</sup>。谭文等为进一步优化线性自抗扰的参数整定困难问题,将 LADRC 控制器转化为内模结构,并将 LADRC 的带宽转化为内模控制器中的滤波器常数,优化了 LADRC 控制器参数整定规律,在仿真中验证了该方法能使自抗扰控制的调参变得更加简洁<sup>[46]</sup>。郑安荣等为了解决非线性自抗扰控制中可能由于干扰过大而引起的超调问题,设计了一种改进自抗扰控制器,通过自抗扰控制与带权因子结合,成功解决其上述所说的问题<sup>[47]</sup>;为了解决自抗扰控制在磁悬浮球系统中参数整定繁

琐问题,康新宇等通过自适应权重粒子群算法对自抗扰控制器参数进行优化,通过仿真证明改进粒子群算法优化后的磁悬浮球系统有着很好的抗扰动和适应性能<sup>[48]</sup>。

#### (8)其他控制方法

文献[49]为了进一步提高磁悬浮系统的鲁棒性,通过采用 Riccati 方法对控制器进行数值求解,进而设计了一种动态状态反馈控制器。极大地提升了系统的鲁棒性。文献[50]针对磁悬浮系统建模误差问题,采用广义预测控制对磁悬浮球系统进行动态优化控制,降低了系统对数学模型依赖程度,且提高了控制器的跟踪性能。蓝益鹏等人针对磁悬浮系统中不确定扰动对于控制性能的影响,通过解 Riccati 不等式的正定解,设计了一种  $H_\infty$  鲁棒控制器,仿真验证了该方法有着更好的控制性能<sup>[51]</sup>。Afshar K K 等针对磁悬浮系统的不稳定特性,设计了一种反馈线性化控制器,使用线性二次调节器(LQR)方法来确定该控制器的增益,通过实验对比,证明该控制器在抑制干扰及不稳定性方面有效<sup>[52]</sup>。

### 1.3 论文研究的主要内容

本文总结了磁悬浮球系统近几年的控制算法,分析了磁浮球系统的结构和工作原理。磁悬浮技术随着广大学者的研究,在系统的非线性、鲁棒性以及系统的跟踪特性方面的研究已经趋于成熟,但在多源不确定扰动时系统的抗干扰性能、跟踪性能方面以及电压过大而引起的噪声抑制方面研究有所欠缺。因此,本文为提高系统的抗干扰及抑制噪声的能力,设计了一种改进的线性自抗扰控制器,并通过 MATLAB 进行仿真研究。论文研究的主要内容如下:

(1)以磁悬浮球系统为研究对象,根据磁悬浮球系统的工作原理建立数学模型,并对数学模型进行分析,根据磁悬浮球系统数学模型进行自抗扰控制器的设计。

(2)首先在分析线性自抗扰控制中扩张状态观测器收敛性基础上,引入已知部分模型信息,构建模型辅助线性扩张状态观测器,并进行扰动估计/控制性能对比分析。

(3)针对含高频测量噪声的多源不确定性扰动抑制问题,为进一步降低综合扰动估计误差上限,在研究内容(2)基础上,根据多源扰动频率特性引入多层 ESO,提出了一种基于扰动频率复合分层的级联扩张状态观测器(CESO)的磁悬浮球系统线性自抗扰控制方法。有效降低了不确定扰动估计误差,进一步提升系统的控制性能,且具备不依赖系统精确数学模型、结构简单、易于实现和抗扰能力强的优点。

(4)为进一步提升系统控制性能,在研究内容(3)基础上,充分利用分数阶 PID 控制在速度跟踪、抗负荷干扰和鲁棒性等方面比较优势,在自抗扰控制框架下,采用分数阶 PD 控制律代替常规 PD 状态反馈律进一步提升了系统控制性能。

(5)针对本文所提出改进自抗扰控制方法，分析其优势与不足之处，并进一步探讨现有方法的改进方案，为今后的研究提供帮助。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/516100030143010202>