1. 研究背景及意义

【空气压缩机的功能】

空气压缩机是一种把空气进行压缩，将低压气体变为高压气体，然后输送给其他设备的机械装置。针对各种工业生产设备而言，其目的是为气动设备、气力输送设备、高温检测设备及清扫设备提供一定压力、流量、湿度和温度的气源。它是空气分离系统的“心脏”部分，也是分离设备接受原料空气的前置装置。

【空气压缩机的能耗大】

空压机已经普遍应用于矿山、化工、制冷、机械、交通运输、国防科技等重要行业，也逐渐发展成为各行业动力源头，成为各企业设备中的核心装置之一。由生命周期评价理论分析，空压机的整体运行成本由初始采购成本、维护保养成本和能源运行成本组成，在这当中初始采购成本仅占 10%左右，而能源消耗成本却高达 75%。在大多数生产企业中，生产压缩空气的能源消耗大约占全部电力消耗的 10%-30%。空气压缩机的比功率和气流量等的参数设置均会影响其运行效率，而另一个重要的能源消耗是空气压缩机的转子和机械轴承的摩擦带来的能量流失、机械零部件消耗以及润滑材料的损耗。

【传统空气压缩机采用机械轴承存在不平衡振动等诸多问题，导致能耗增加且性能下降】

目前的空气压缩机大部分采用机械轴承，此类轴承系统存在以下问题：一、高速转子和机械轴承之间需要设计良好的油路进行润滑和冷却；二、由于机械轴承的最大应力限制，空气压缩机的转速无法达到理想的高速或超高速水平；三、电机转子的质量分布不平衡引起振动力，加剧噪声同时加速机械轴承磨损。机械轴承存在的以上弊端降低了空气压缩机的性能，增加了空气压缩机的结构复杂度，同时增加了系统的功耗以及维护和运行成本。

【空气压缩机采用磁悬浮轴承主动控制不平衡振动力，降低能耗并提升性能】

磁悬浮轴承是利用磁场力使定子与转子之间无接触的一种新型轴承。相比于传统机械轴承，磁悬浮轴承具有以下优良特性：一、无接触、无需润滑以及无磨损的特性使得轴承损耗大幅降低，且更适合恶劣工况；二、磁轴承支承的转子工作转速仅受限制于转子的材料，从而可以达到较高水平；三、通过应用不同的控制律即可获得不同的轴承的动力学性能，达到动态调整轴承的承受负载能力的目的。

按照轴承力的来源，电磁轴承可以分为三类：被动式磁轴承（PMB：Permanent Magnetic Bearing）、主动式磁轴承（AMB：Active Magnetic Bearing）、混合式磁轴承（HMB：Hybrid Magnetic Bearing）。被动式磁轴承的轴承力仅来源于永久磁铁，由于其固有阻尼极低，所以被动式磁轴承的工业应用范围较小；主动式磁轴承包含铜线圈或其他主动控制单元，可根据控制目标的变化实时调节电磁力的大小，同时由于电磁铁的磁场力可控，磁场力的动态特性方便调节，所以主动式磁轴承的应用范围较广；混合式磁轴承又称作永磁偏置磁轴承，其磁场力由永磁体产生的偏置磁场和受控的电流共同作用产生。混合式磁轴承的开关功放的功率更小，损耗更低，这使得混合式磁轴承布局紧凑、效率更高。

实际工作状况下， 磁悬浮轴承支承的空气压缩机转子在额定转速范围内高速旋转，转子不平衡带来的振动大幅增加了系统的功耗、降低了系统的稳定性，并且带来的噪声污染问题。因此，研究如何抑制磁悬浮轴承振动具有重要意义。

1. 不平衡振动控制技术的发展及研究现状

【不平衡振动的来源】

理想情况下，转子位于平衡位置绕几何轴旋转，控制绕组电流无周期分量，转子不受到周期性波动的磁场力作用。而实际系统中，电流中往往含有周期分量，导致磁轴承对转子施加周期性磁场力，进而使基座受到同频反作用力，产生振动力。此振动力来源来自转子质量不平衡、传感器偏差和磁极偏差。转子质量不平衡是指由于机械加工的工艺限制，转子的几何轴和惯性轴不重合，由此是的旋转轴介于几何轴和惯性轴之间，引起与转速同频的振动力；传感器偏差是指被传感器检测的转子表面为非理想圆形，且检测面材料不均匀会在测量得到的位移信号中引入同频或者倍频信息，引起同频或倍频振动力；磁极偏差是指径向磁极对称中心与转子旋转中心不重合，该因素影响较小，通常可忽略不计。

【不平衡振动的控制目标】

磁轴承的不平衡控制目标有三类。第一类是实现零电流控制：控制线圈电流为交流分量为零，则系统可以实现最低电力功耗，但是残余的位移刚度仍会引起部分残余的不平衡振动力；第二类是实现零力控制：控制磁轴承电磁力的交流分量为零，此状态下可以实现最低振动力为零，但是此时线圈电流交流分量幅值不为零；第三类是零位移控制：控制转子的旋转轴与几何轴重合，达到高回转精度的要求，但是会加剧振动力。

第一类和第二类控制目标适用于动力传动领域，如鼓风机或压缩机，此类应用场合往往对转子的回转精度要求不高，而要求整机功耗或振动力越小越好；第三类控制目标适用于机械加工领域，如机床加工电主轴，此类应用场合要求转子具有非常高的回转精度，以满足高精度加工需求。

磁悬浮空气压缩机转速高、功耗大，控制目的是降低功耗以及降低振动，因此本文的不平衡振动的控制目标是第一类或第二类。

【不平衡振动的控制策略】

针对磁悬浮轴承不平衡振动电流或不平衡振动力抑制，近三十年国内外已经有了大量的研究。

* + Shafai B, Beale S, LaRocca P, et al. Magnetic bearing control systems and adaptive forced balancing[J]. IEEE Control Systems, 1994, 14(2): 4-13.提出AFB（adaptive forcing balancing）控制策略来抑制不平衡振动力，该控制策略不需要获得系统动态模型，可以实现大转速范围稳定；
  + R., H., et al., Unbalance compensation using generalized notch filters in the multivariable feedback of magnetic bearings. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1996. 4(5): p. 580-586.提出了通用陷波器方法来抑制不平衡振动力，他在通用陷波器中添加的传递矩阵T可以有效调节闭环系统稳定性能，使系统在大转速范围内保持稳定。
  + 张德魁, 江伟. 磁悬浮轴承系统不平衡振动控制的方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2000, 40(10): 28-31.采用一种LMS自适应控制方法来抑制了不平衡振动力。
  + 黄晓蔚与唐钟麟, 电磁轴承系统实现自动平衡的一种新方法. 机械工程学报, 2001(07): 第96-99+112页.将转子偏心对传感器造成的位移误差干扰信号等效为功率放大器前级的输入电压信号，通过开环方式在功率放大器前级输入一定幅值的相位的补偿信号，即可抑制线圈同频电流。
  + 牟鸿, 主动磁轴承不平衡补偿的研究, 2003, 南京航空航天大学. 第 66页.利用旋转参考坐标系的方法，辨识得到转子惯性轴位置，可以使得转子旋转轴逼近惯性轴，实现抑制不平衡振动力。
  + ChangshengZhu, A Uniform Control Method for Imbalance Compensation and Automation Balancing in Active Magnetic Bearing-Rotor Systems. 2012.通过在线计算提取点信号的傅里叶系数以及调整信号提取点和注入点的位置，实现零力和零位移两种控制目标的切换。

以上方法均是对同频振动电流或者同频振动力进行的控制，事实上，由于传感器检测面的不规则，振动电流或者振动力中往往含有丰富的谐波成分。针对谐波振动电流或者谐振动波力的控制，多谐振控制器和重复控制器是常见的两种有效的控制策略。多谐振控制器在分布式发电D. N. Zmood, D. G. Holmes, and G. H. Bode, “Frequency-domain analysisof three-phase linear current regulators,” IEEE Trans. Ind. Appl.,vol. 37, no. 2, pp. 601–610, Mar./Apr. 2001.、光伏M. Castilla, J. Miret, J. Matas, L. Garcia de Vicuna, and J. M. Guerrero,“Control design guidelines for single-phase grid-connected photovoltaic inverters with damped resonant harmonics compensators,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 11, pp. 4492–4501, Nov. 2009.、逆变器S. Y. Park, C. L. Chen, J. S. Lai, and S. R. Moon, “Admittance compensation in current loop control for a grid-tie LCL fuel cell inverter,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 23, no. 4, pp. 1716–1723, Jul. 2008. 中应用广泛，它的原理是在每个谐波频率处设置一个谐振控制器，将多个谐振控制器并联即可得到一个可以抑制谐波的多谐振控制器。多谐振控制器相当于在每个频率处设置一个窄带陷波器，可以有效抑制信号中的各次谐波。然而并联式结构使其计算量大，实时运算负载大，在数字控制器中可能带来计算时间超出控制系统允许的计算时间要求。与多谐振控制器类似，重复控制器也是一种基于内模原理发展而来的谐波抑制策略。重复控制器发展、应用于伺服系统和电力系统中，用于跟踪周期扰动信号和消除谐波失真High Accuracy Control of a Proton Synchrotron Magnet Power Supply，1981/Synthesis of repetitive control systems and its application，1985/Digital repetitive controlled three-phase PWM rectifier，2003。针对闭环系统稳定性问题，小信号增益理论和重构谱方法相继被提出用于分析包含重复控制器闭环系统的稳定性Stability of repetitive control systems，1985/Repetitive control system: a new type servo system for periodic exogenous signals，1988/Analysis and synthesis of discrete-time repetitive controllers，1989/Analysis and Design of Repetitive Control Systems using the Regeneration Spectrum，1990，该稳定性分析理论为重复控制器的参数设计提供了理论依据。在重复控制器的拓扑研究上，Design of a plug-in type repetitive controller for periodic inputs，2002提出了插入式重复控制器，并基于灵敏度函数的形状和重构谱的形状设计重复控制器的参数，比传统重复控制器相比更易实现系统稳定。Odd-harmonic digital repetitive control of a single-phase current active filter，2004提出奇数次重复控制器，可以只抑制信号中的奇数次谐波，适用于奇数次谐波丰富的场合。Dual-mode structure digital repetitive control，2007提出双模重复控制器，该控制策略下， 奇数次和偶数次谐波的控制回路增益可以分别调节，加快了扰动信号的抑制速度。General parallel structure digital repetitive control，2013提出并联式重复控制器，将谐波分组，不同组的增益可以分别调节，增加了控制的灵活性。与电力系统不同，磁悬浮轴承是一个开环不稳定结构，并且扰动信号的频率随转速实时变化，因此电力系统中重复控制器结构及参数并不完全适用于磁悬浮轴承的应用场合。

关于磁悬浮轴承上应用的重复控制器，Model development and harmonic current reduction in active magnetic bearing systems with rotor imbalance and sensor runout，2013提出使用重复控制器抑制质量不平衡和传感器误差引起的谐波电流，Field Balancing and Harmonic Vibration Suppression in Rigid AMB-Rotor Systems with Rotor Imbalances and Sensor Runout，2015使用重复控制器消除谐波振动力，重复控制在磁悬浮高速转子振动抑制中的应用，2015使用重复控制器提高转子回转精度，Elimination of Harmonic Force and Torque in Active Magnetic Bearing Systems with Repetitive Control and Notch Filters，2017使用重复控制器加陷波器消除谐波振动力。上述磁悬浮轴承中重复控制器的应用均取得一定的抑制效果，但是以上研究中重复控制器的参数设计并不深入，仍存有性能提升空间；另一方面，目前的研究均是基于连续系统模型，不能准确拟合实际系统部署在数字控制器上的离散控制算法，由此带来控制参数设计不匹配等问题。

1. 本文研究内容及安排

磁悬浮空气压缩机是制造业发展的重要设备之一，磁悬浮轴承支承的空气压缩机转子在额定转速范围内高速旋转，转子不平衡带来的振动大幅增加了系统的功耗、降低了系统的稳定性，并且带来的噪声污染问题。针对转子不平衡问题，本文深入研究重复控制器的原理、参数设计、稳定性分析，消除谐波振动力，减弱噪音，降低功耗，提升磁悬浮空气压缩机系统稳定性。

本文安排如下：

第一章，绪论。介绍空气压缩机节能的需求，以及磁悬浮空气压缩机的研究意义。

第二章，磁轴承及其支承转子模型。推导磁轴承悬浮力模型以及不平衡振动力模型，进行仿真和实验验证。

第三章，重复控制器。推导重复控制器的原理、以及几种拓扑结构。

第四章，提出改进的重复控制器（加入旋转坐标变换）抑制谐波电流。分析重复控制器中的低通滤波器带来的不利影响，并提出使用旋转坐标法来提升重复控制器性能。最后进行旋转坐标法提升重复控制器性能的仿真和实验。

第五章，使用改进的重复控制器（加入旋转坐标变换）+陷波器抑制振动力。分析残余振动力来源，简要分析陷波器原理，进行使用改进的重复控制器（加入旋转坐标变换）+陷波器抑制振动力的仿真和实验。

第六章，总结。