

## 摘要

永磁同步直线电机具有结构简单、质量轻、效率高的特点，广泛应用于交通运输、精密加工、信息与自动化系统控制等领域。随着智能制造业对加工速度和精度要求的提高，如何设计控制策略保证永磁同步直线电机具有良好的暂态性能，完成精准定位目标，逐渐成为电机控制领域的热点问题。然而，永磁同步直线电机控制过程中存在负载推力变化以及外部不确定干扰难以建立其精准的数学模型，模型不确定性和外界扰动会极大的影响系统的控制效果和稳定性。复合非线性反馈控制策略的优势在于能够有效的改善系统的暂态性能，但是难以解决外界扰动对系统的影响。滑模控制由于结构简单，鲁棒性好的特点常常与其他控制策略相结合应用于永磁同步直线电机系统。随着计算机技术在工业生产领域的普及和发展，实际的工程大多在离散时间系统下进行。因此，基于复合非线性反馈控制与滑模控制理论，设计离散控制策略保证永磁同步直线电机在模型不确定与扰动下保持良好的暂态性能和定位精度，具有重要的理论研究意义和应用价值。主要工作如下：

针对永磁同步直线电机系统控制过程中容易受到参数摄动和外部干扰的影响，基于永磁同步直线电机结构和工作原理建立不确定离散时间数学模型，提出一种离散时间系统下的基于复合非线性反馈的滑模变结构控制策略。该控制器由复合非线性反馈控制和滑模控制组成，复合非线性反馈控制通过调整闭环系统的阻尼比，使系统具有良好的瞬态性能，滑模变结构控制器采用积分形式的滑模面，基于趋近律进行设计，用于消除整个控制过程中较小有界扰动对系统的影响。通过仿真实验对比验证离散复合非线性反馈积分滑模控制器能够在基本无超调的情况下拥有较好的瞬态性能，同时面对不确定内外部干扰具有一定的鲁棒性。

针对永磁同步直线电机系统执行器饱和及复杂内外部扰动的问题，在执行器饱和的条件下设计干扰观测器补偿的离散复合非线性反馈滑模控制器。设计的干扰观测器用以补偿直线电机位置伺服系统控制过程中存在负载推力扰动、摩擦阻力扰动等突变性扰动以及齿槽转矩、通量谐波等因素引起的周期性干扰，这些干扰往往是复杂难以测量的。基于干扰观测器的积分滑模控制器能够针对复杂内外部扰动有效的进行补偿，从而增强系统在内外部扰动下的鲁棒性，进一步提高了永磁同步直线电机的位置

控制精度。通过仿真实验对比验证了执行器饱和条件下设计的干扰观测器补偿的离散复合非线性反馈滑模控制器具有较好的瞬态性能和定位精度，在较复杂干扰下鲁棒性更强。

针对离散时间系统下永磁同步直线电机控制过程中存在的抖振现象，在执行器饱和和下设计改进了离散复合非线性反馈自适应滑模控制器，自适应积分滑模控制器采用自适应趋近律进行设计，控制器相关参数能够进行自适应调节，因此其切换带宽度不是固定值，能随着内外部扰动的变化而振荡衰减。自适应积分滑模控制器的设计能够减少控制过程中的抖振，有效保证控制器输出的稳定性。通过仿真实验对比验证离散复合非线性反馈自适应滑模控制器拥有较好的瞬态性能和跟踪精度，同时能够有效减小控制过程中存在的抖振现象，保证了控制器输出的稳定性，从而进一步优化永磁同步直线电机控制效果。

**关键词：**永磁同步直线电机，离散系统，复合非线性反馈控制，积分滑模控制，鲁棒性

## 符号及英文缩写清单

符号	中文名称	单位
$U_a, U_b, U_c$	三相绕组相电压	V
$i_a, i_b, i_c$	三相绕组相电流	A
$U_\alpha, U_\beta$	两相 $\alpha, \beta$ 轴电压分量	V
$i_\alpha, i_\beta$	两相 $\alpha, \beta$ 轴电流分量	A
$U_d, U_q$	两相 $d, q$ 轴电压分量	V
$i_d, i_q$	两相 $d, q$ 轴电流分量	A
$L_d, L_q$	$d, q$ 轴自感系数	mH
$F_e$	电磁推力	N
$\psi_f$	永磁体磁链	Wb
$\tau$	电机极对距	m
$M$	转子及负载质量	Kg
$B_v$	粘滞摩擦系数	N·s/m
$K_f$	电磁推力系数	N/A

英文缩写	英文全称	中文全称
DCNF	Discrete composite nonlinear feedback control	离散复合非线性反馈控制
DCNF-ISM	Discrete composite nonlinear feedback -integral sliding mode control	离散复合非线性反馈积分滑模控制
DCNF-ISMO	Composite nonlinear feedback based-integral sliding model control with disturbance observer	干扰观测器补偿的离散复合非线性反馈滑模控制
DCNF-AISMO	Discrete composite nonlinear feedback adaptive sliding mode control with disturbance observer	干扰观测器补偿的离散复合非线性反馈自适应滑模控制

# 目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
符号及英文缩写清单.....	VII
第1章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 永磁同步直线电机控制策略研究现状.....	2
1.2.2 复合非线性反馈控制策略研究现状.....	4
1.3 论文研究内容和结构安排.....	6
第2章 理论基础.....	9
2.1 引言.....	9
2.2 离散复合非线性反馈控制理论基础.....	9
2.3 滑模变结构控制理论基础.....	10
2.3.1 滑模变结构控制基本概念.....	11
2.3.2 离散滑模变结构控制基本原理.....	13
2.3.3 离散滑模变结构控制器设计.....	14
2.3.4 离散滑模变结构控制器抖振分析.....	15
2.4 李雅普诺夫稳定性定理.....	17
2.5 本章小结.....	18
第3章 离散复合非线性反馈积分滑模控制.....	19
3.1 引言.....	19
3.2 永磁同步直线电机数学模型.....	19
3.2.1 永磁同步直线电机基本结构及工作原理.....	19
3.2.2 永磁同步直线电机矢量控制及状态空间模型.....	21
3.2.3 永磁同步直线电机系统扰动分析.....	24
3.3 离散复合非线性反馈积分滑模控制器设计.....	25
3.3.1 离散复合非线性反馈控制设计.....	25
3.3.2 离散积分滑模控制器设计.....	27
3.4 离散复合非线性反馈积分滑模控制器稳定性分析.....	27
3.5 仿真实验与分析.....	31
3.6 本章小结.....	35
第4章 干扰观测器补偿的离散复合非线性反馈滑模控制.....	37
4.1 引言.....	37
4.2 干扰观测器补偿的离散复合非线性反馈滑模控制器设计.....	37
4.2.1 执行器饱和的离散复合非线性反馈控制器设计.....	38
4.2.2 基于干扰观测器的离散积分滑模控制器设计.....	39
4.3 干扰观测器补偿的离散复合非线性反馈滑模控制器稳定性分析.....	41
4.4 仿真实验与分析.....	45
4.5 本章小结.....	49

第 5 章 离散复合非线性反馈自适应滑模控制 .....	51
5.1 引言 .....	51
5.2 控制器输出抖振分析 .....	51
5.3 执行器饱和的离散复合非线性反馈自适应滑模控制器设计 .....	52
5.3.1 执行器饱和的离散复合非线性反馈控制器设计 .....	52
5.3.2 基于自适应趋近律的离散积分滑模控制器设计 .....	53
5.4 离散复合非线性反馈自适应滑模控制器稳定性分析 .....	55
5.5 仿真实验与分析 .....	57
5.6 本章小结 .....	62
第 6 章 总结与展望 .....	63
6.1 总结 .....	63
6.2 展望 .....	63
参考文献 .....	65
致 谢 .....	71
攻读学位期间发表的学术论文目录 .....	73

## 第1章 绪论

### 1.1 研究背景与意义

近几年，国家为了发展高端制造业，振兴装备制造业，出台了许多政策和配套措施<sup>[1]</sup>。伴随着自动控制、信息技术的飞速发展，精密数控机床、机械臂等工业设备在精密雕刻、机械加工等领域得到了广泛的应用<sup>[2]</sup>。电机作为装备制造业中最主要的伺服驱动设备，在工业生产中起到极为关键的作用。在传统的工业制造中，通常使用旋转电机来实现直线运动，例如传统的数控机床通常由旋转电机利用齿轮、皮带和联轴器等一些中间转换机构，驱动刀具完成往复直线运动<sup>[3]</sup>。显然这些中间转换机构在运行过程中会出现摩擦和机械损耗，降低能量传递效率，严重情况下甚至会影响到伺服控制系统稳定性。

随着工业制造业的不断发展，旋转电机难以满足工业制造对生产效率和加工精度的要求<sup>[4]</sup>。自1840年惠斯登(Whetstone)提出直线电机的概念<sup>[5]</sup>，学者们就开始对直线电机开展设计研究。与旋转电机相比，由于直线电机减少了中间机械传动机构，结构较为简单，同时其直接依靠电磁推力产生直线运动，因此其机械损耗较小，提高了能量传输的效率，因此被逐渐应用于工业制造领域。二十世纪五十年代中期，伴随着材料技术和控制技术取得了突破，新型控制器件的出现推动了直线电机的发展。英国的莱斯韦特(Laithwaite)教授作为现代直线电动机发展的先驱者<sup>[6]</sup>，所开展的基础研究使得直线电机研发进入新的阶段。

二十世纪八十年代，随着稀土永磁体材料加工工艺的逐渐发展，永磁材料性价比的不断提高。永磁同步直线电机在实际工作中发热少、励磁损耗小、生产效率高的优势凸显，被广泛应用于多个领域。例如，在物流运输领域中自动分拣系统输送线，取代了绝大部分通过旋转电机采用链传动或连杆传动的方式<sup>[7]</sup>。交通运输领域中采用直线电机作为驱动力的磁悬浮列车，运行速度快几乎无噪声振动<sup>[8]</sup>。信息技术领域，日本松下公司在磁盘装置上也采用了直线伺服电动机，有效地缩短了存取时间，提高了工作效率<sup>[9]</sup>。工业制造领域采用直线电机替代传统机床的驱动装置依赖丝杆驱动机床，减少了传动机构，提高了加工精度<sup>[10]</sup>。伴随着智能制造业的发展，计算机控制策略的发展和应用，原有模拟控制系统逐渐转变为数字控制系统，永磁同步直线电机在各个领域

都展现了极大的灵活性与应用前景，特别是随着高端制造业的发展，精密、高速机床进给系统的需要，有效体现了直线电机的显著性能，为了满足高加工效率和精度对计算机数控加工技术的挑战<sup>[11]</sup>，开发了具有高精度和高速响应能力的线性进给伺服系统，广泛应用于高性能永磁同步直线电机系统。采用计算机数字控制系统的永磁同步直线电机在精密雕刻<sup>[12]</sup>、工业机器人<sup>[13]</sup>和 XY 平台<sup>[14]</sup>都应用广泛，使得工业生产的加工精度越来越高。随着直线电机制造技术的发展，永磁同步直线电机未来的应用前景将更为广阔。

然而，永磁同步直线电机虽然减少了中间机械传动机构带来的干扰，但由于其未知的负载变化和摩擦干扰等许多非线性因素的存在，仍是非线性多变量复杂系统，因此建立准确的永磁同步直线电机数学模型是比较困难的。此外，永磁同步直线电机直接在电磁推力的作用下做往复直线运动，在电机实际控制过程中存在外部的随机扰动。与旋转电机不同，这些扰动不经任何中间传动机构直接作用到永磁同步直线电机的动子上，影响永磁同步直线电机的控制性能，严重影响到直线电机系统的响应速度以及电机位置跟踪精度。

因此，设计先进的控制策略提升永磁同步直线电机控制性能已经成为直线电机领域研究的热点问题。本课题针对永磁同步直线电机系统控制过程存在的内外部扰动影响控制性能问题展开研究，设计合适的离散控制策略来减小控制过程中的不确定因素对系统的影响，改善直线电机位置伺服系统的暂态性能和定位精度等控制性能，具有良好的理论研究意义和应用价值。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 永磁同步直线电机控制策略研究现状

直线电机由于缺少中间传动机构，一些非线性扰动能够直接对电机驱动产生影响，从而严重影响直线电机控制的精度和效果。因此，为了实现响应速度快、精度高的控制目标，需要选择合适的控制策略针对永磁同步直线电机不确定系统进行控制器设计，使得直线电机不仅具有较好的瞬态响应能力，还能够在内外部干扰下具有较好的鲁棒性。随着计算机技术的飞速发展，许多智能控制策略得以应用于工业生产，诸多学者已对永磁同步直线电机的控制策略进行了大量的研究。目前的控制策略一是沿用和改进已有成熟的传统控制技术，二是采用适用于永磁同步直线电机的现代控制和智能控制策略，下面对永磁同步直线电机部分控制策略进行简单介绍。

直接推力控制是旋转电机直接转矩控制思想在直线电机驱动中的延伸<sup>[15]</sup>，根据检测到的定子电压电流推算出磁链幅值、牵引力从而根据其给定参考值的差值选择合适的电压矢量，实现对牵引力的直接控制。但永磁同步直线电机的电感较低，极距也比较短，因此直接推力控制会产生一定的纹波，导致控制过程中会产生一定的超调及稳态误差<sup>[16]</sup>。PID 控制作为现代工业生产中最经典、应用最广的控制策略，也被广泛应用于直线电机的位置和速度控制<sup>[17-19]</sup>。但在工业生产控制中，被控对象的非线性、控制环境时刻变化等因素，传统 PID 控制难以得到期望的控制效果。

随着制造业的发展，永磁同步直线电机对控制精度和响应速度都有着更高的要求，自适应控制、滑模变结构控制、模糊控制、神经网络等先进控制算法被用于提高永磁同步直线电机系统的控制性能。模型参考自适应控制的优势在于不需要建立精确的控制对象数学模型，能够根据系统参数变化及外部实时扰动来修正自身特性<sup>[20]</sup>，自适应控制能够有效克服直线电机缓慢变化的外部扰动，具有较高的容错能力<sup>[21]</sup>，其关键问题如何设计调整合理的自适应参数，能够保证系统稳定性的同时使误差信号趋于零。滑模控制作为一类变结构控制，滑动模块的设计与控制对象的参数及扰动无关<sup>[22]</sup>，这就使得滑模变结构控制具有无需在线辨识和设计、响应快速、对参数变化及扰动不敏感的优点，因而经常用于永磁同步直线电机系统控制<sup>[23-27]</sup>，克服系统参数摄动和外界干扰的影响，提高永磁同步直线电机系统的稳定性和抗干扰性。

在永磁同步直线电机控制领域，模糊控制不依赖于被控对象的数学模型，可运用模糊逻辑推理，并借助于计算机来实现控制<sup>[28-29]</sup>。神经网络控制算法通过对各个神经元之间的关系进行数学建模获得神经网络的数学模型表达式，因此能够有效逼近非线性控制系统，所以将神经网络控制策略应用到电机控制领域，具有很强的信息综合能力，在计算速度能够保证的情况下，可以解决任意的复杂的控制问题<sup>[30-31]</sup>，但受限于计算形式过于复杂，目前的应用大多停留在仿真阶段，难以应用于实际的电机控制领域。

永磁同步直线电机是一个非线性，易受扰动影响的复杂系统，因此在实际应用时，各类算法都有自己优势的同时还存在一些问题，难以在存在复杂扰动的场合采用单一的控制算法满足响应迅速，控制精准的控制要求。许多专家学者将智能控制与传统控制算法相结合，以期达到满意的控制效果。文献[32]提出了一种迭代学习方法和积分滑模控制相结合的控制策略，抑制参数不确定性和未知扰动。文献[33]考虑模型预



测转矩控制中代价函数不易设计, 结合模糊控制理论, 设计新型模糊调节权重系数的代价函数, 有效减小了转矩控制中的稳态误差。文献[34]把自适应模糊控制和滑模变结构控制相结合实现直线电机的控制, 通过自适应律调整滑模变结构控制相关参数, 进而减小抖振。文献[35]采用超螺旋算法和非奇异终端滑模控制结合实现对位置的精准跟踪, 有效抑制控制中扰动的同时减小了滑模控制的抖振现象, 能够同时保留多种控制算法的优势, 从而达到理想的控制效果。

然而, 在上述控制策略的设计中, 通常没有考虑执行器饱和问题。永磁同步直线电机在实际应用时是一个执行器饱和的系统, 如果不考虑执行器饱和的问题, 可能会使接收到的控制信号与期望信号出现偏差, 从而影响系统的性能, 严重时还会造成系统失稳。因此, 针对离散时间系统下执行器饱和情况进行控制算法的设计是十分有意义的。复合非线性反馈(Composite nonlinear feedback, CNF)控制策略的优势在于可让执行器饱和的系统无超调的快速跟踪控制输入, 提高系统的暂态性能。

### 1.2.2 复合非线性反馈控制策略研究现状

复合非线性反馈控制由线性反馈控制和非线性反馈控制组成。线性反馈部分的设计使闭环系统具有较小的阻尼比从而使系统快速跟踪参考信号, 当输出信号接近设定目标时, 非线性部分通过增加非线性部分的阻尼系数来增加闭环系统的阻尼比, 从而降低由线性部分引起的超调量。因此能够闭环控制系统在保证快速响应的同时, 又能够不产生较大的超调量。

1998年, 林宗利教授首次提出了复合非线性反馈控制(CNF), 用于优化执行器饱和和系统的瞬态性能<sup>[36]</sup>。CNF算法由线性控制律和非线性控制律两部分组成, 其中线性控制律保证闭环系统具有较小的阻尼比从而使系统能够实现快速响应, 非线性控制律的作用是当输出信号接近外部参考信号时, 增加闭环系统的阻尼比从而减小超调量。Turner等将CNF技术拓展到高阶和多输入系统<sup>[37]</sup>, 用于改善高阶多输入系统的暂态性能。Chen等针对一类多输入多输出的线性系统, 设计CNF控制策略并将其应用于硬盘驱动器伺服系统<sup>[38]</sup>。Lan等针对具有执行器饱和的非线性复合系统设计CNF控制策略<sup>[39]</sup>, 结果表明该算法能够有效改善闭环系统的瞬态响应。Venkataramanan等针对离散时间系统设计一种复合非线性反馈控制策略, 结果表明复合非线性反馈技术具有改善离散时间系统瞬态性能的优势<sup>[40]</sup>。文献[41-42]分别针对线性多变量离散时间系统的跟踪控制问题, 提出了一种离散复合非线性反馈控制律, 用于改善系统的瞬态性能。近

些年来, CNF 技术被广泛应用于永磁同步电机控制<sup>[43-44]</sup>、机器人控制<sup>[45-46]</sup>、无人机控制<sup>[47]</sup>、自动驾驶<sup>[48]</sup>等控制系统中。

复合非线性反馈控制虽然能够在执行器饱和的情况下使系统具有较好的瞬态响应能力, 但面对系统参数的不确定性以及可能存在的外部干扰不具有较好的鲁棒性, 因此需要针对性的改善。针对存在的常值扰动, 文献[49]通过在 CNF 控制律中引入积分环节, 以此来消除外部扰动。文献[50]通过设置状态观测器和扰动观测器来估计扰动值, 即能够消除干扰, 又能弥补了积分环节鲁棒性不强的缺陷, 来抑制恒定扰动, 提高系统的鲁棒性。文献[51]针对具有执行器饱和以及外部干扰的离散时间系统, 提出了一种增强型复合非线性反馈控制技术来抑制恒定扰动的影响。上述复合非线性反馈控制设计时有赖于建立被控对象精准的数学模型来抑制恒定扰动, 但在实际工业生产中, 被控对象往往伴随着不确定的参数摄动和内外部干扰, 因此增强不确定系统的鲁棒性是十分有必要的。

滑模控制作为一种变结构控制能够有效消除不等的参数摄动、外部干扰和非线性等不利因素的影响, 将复合非线性反馈和滑模控制结合能够针对性改善系统的动态性能以及提高系统的鲁棒性。Bandyopadhyay 等人首先将滑模控制与复合非线性反馈控制器结合, 滑模变结构控制器的加入使系统能够有效应对时变干扰<sup>[52]</sup>。文献[53]提出了一种复合非线性反馈和积分滑动面结合的非线性控制器, 以改善其瞬态性能, 将其推广至不确定多输入多输出(MIMO)线性系统。文献[54]针对具有时间滞后和外部扰动的不确定 MIMO 线性系统, 将积分滑模和复合非线性反馈方法相结合。文献[55]针对离散时间系统的鲁棒性问题, 设计了基于线性滑模控制器与复合非线性反馈相结合, 有效的抑制了外部干扰, 改善了不确定离散时间系统的鲁棒性。滑模变结构控制受限于系统结构, 因此会出现一定的抖振现象, 文献[56]采用趋近律设计的积分终端滑模结合复合非线性反馈技术来消除控制过程中的稳态误差和抖振现象。文献[57]设计了一种结合快速到达律的自适应积分滑模控制器来应对有界的不确定性和扰动, 快速到达律用来实现滑模的有限时间收敛。采用自适应调谐方法来减少控制过程中的抖振处理。

复合非线性反馈控制保证系统的瞬态性能, 减小稳态误差, 滑模变结构控制的针对扰动具有不变性, 能够有效增强系统的鲁棒性。随着研究的深入, 复合非线性反馈滑模控制已经应用于永磁同步电机<sup>[58]</sup>, 车辆路径跟踪<sup>[59]</sup>, 静电显微镜<sup>[60]</sup>等领域。

然而, 以上复合非线性反馈滑模控制器的设计大都集中在连续时间系统形式下。

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/807016030045010005>