

中文摘要

随着科技发展和工业自动化的推进,自动化生产工艺对设备的要求越来越高,传统的气缸、液压缸不断暴露各种问题,已经不能满足智能化大时代的需求,伺服电缸便由此诞生并开始迅速发展。伺服电缸是模块化的产品,具有结构紧凑、互换性好、控制精度高以及响应速度快的优点。但是伴随着伺服电缸在众多领域中被广泛使用,对其位置控制提出了更高的精度要求。因此本文以折返式伺服电缸为研究对象,对伺服电缸的位置控制策略进行优化研究,具体工作如下:

(1) 伺服电缸选型架构。本文首先对伺服电缸的基本结构、分类及其工作原理进行简单介绍,然后采用现在已有的滚珠丝杆及伺服电机选型计算流程为基础,以 TBI 滚珠丝杆及汇川 MS1 伺服电机为例,对伺服电缸的主要机构选型计算进行系统研究。

(2) 建立伺服电缸系统位置控制数学模型,采用粒子群算法求解获取系统特性。通过对永磁同步电机数学模型进行分析,建立伺服电缸系统位置控制的数学模型,采用粒子群算法对伺服电缸数学建模时无法获取的参数进行系统辨识,通过对系统的结构和数学模型进行分析,了解系统的特性,为后续伺服电缸控制策略的优化研究建立基础。

(3) 优化伺服电缸位置控制策略。本文通过鲸鱼算法对 PID 控制器的参数进行自整定,从而获得更佳的 PID 参数。由于伺服电缸对位置控制具有极高的精度要求,因此需要对鲸鱼算法进行进一步的改进,并通过在 Simulink 搭建模型进行仿真对该控制策略进行检验。仿真结果显示使用改进鲸鱼算法整定的 PID 参数,0.35s 即可达到稳态值,比未改进的鲸鱼算法到达稳态值所用时间缩短 56%,稳态误差降低 44%。

(4) 控制策略有效性试验验证。建立伺服电缸位置控制试验平台,进行伺服电缸的定位精度试验和位置响应试验,对本文所研究的控制策略进行检验。定位精度试验结果证明使用改进鲸鱼算法整定 PID 参数的伺服电缸定位精度相比伺服电缸本身定位精度提高了 17.5%。位置响应试验结果证明相比于传统鲸鱼算法整定的 PID 参数,使用本文所研究改进鲸鱼算法整定的 PID 参数的阶跃响应曲线上上升时间降低 50%,稳态误差降低 42%,频率响应曲线误差幅值降低 31%。

关键词: 伺服电缸; 伺服电机; 位置控制; 位置响应

ABSTRACT

With the development of science and technology and industrial automation, automated production processes on the equipment requirements are increasingly high, the traditional cylinder, hydraulic cylinders continue to expose a variety of problems, has not been able to meet the needs of the intelligent era, servo electric cylinder was born and began to develop rapidly. Servo-electric cylinders are modular products with the advantages of compact structure, good interchangeability, high control accuracy as well as fast response time. However, with the widespread use of servo-electric cylinders in many fields, higher accuracy is required for their position control. Therefore, this paper takes the foldback servo-electric cylinder as the research object and optimizes the position control strategy of servo-electric cylinder as follows.

(1) Servo-electric cylinder selection architecture. This paper firstly introduces the basic structure, classification and working principle of servo electric cylinder, then adopts the existing ball screw and servo motor selection and calculation process as the basis, and takes TBI ball screw and Huichuan MS1 servo motor as an example to systematically study the main mechanism selection and calculation of servo electric cylinder.

(2) Establish the mathematical model of servo-electric cylinder system position control and obtain the system characteristics by particle swarm algorithm solution. By analyzing the mathematical model of the permanent magnet synchronous motor, the mathematical model of the position control of the servo-electric cylinder system is established, and the particle swarm algorithm is used to identify the system for the parameters that cannot be obtained during the mathematical modeling of the servo-electric cylinder. By analyzing the structure and mathematical model of the system, the characteristics of the system are understood, and the foundation for the subsequent study of the optimization of the control strategy of the servo-electric cylinder is established.

(3) Optimize the servo-electric cylinder position control strategy. In this

paper, the parameters of the PID controller are self-tuned by the whale optimization algorithm to obtain better PID parameters. Since the servo-electric cylinder requires very high accuracy for position control, further improvement of the whale algorithm is needed and the control strategy is tested by building a model in Simulink for simulation. The simulation results show that the PID parameters adjusted by the improved whale algorithm can reach the steady-state value in 0.35s, which is 56% shorter than that of the unimproved whale algorithm, and the steady-state error is 44% lower.

(4) Experimental verification of the effectiveness of the control strategy. The servo-electric cylinder position control test platform is established to conduct the positioning accuracy test and position response test of the servo-electric cylinder to test the control strategy studied in this paper. The positioning accuracy test results proved that the positioning accuracy of the servo-cylinder using the improved whale algorithm to adjust the PID parameters improved by 17.5% compared to the positioning accuracy of the servo-cylinder itself. The position response test results demonstrate that the step response curve rise time is reduced by 50%, the steady-state error is reduced by 42%, and the frequency response curve error amplitude is reduced by 31% for the PID parameters calibrated with the improved whale algorithm studied in this paper compared to the PID parameters calibrated with the traditional whale algorithm.

Key words : Servo electric cylinder; Servo motor; Position control; Position response

目 录

中 文 摘 要	I
ABSTRACT	III
第一章 绪 论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	1
1.2 电动缸的发展与应用	1
1.3 国内外研究现状	2
1.3.1 国外研究现状	2
1.3.2 国内研究现状	3
1.3.3 电动缸位置控制研究现状	4
1.4 课题主要内容及论文框架	5
1.4.1 主要研究内容	5
1.4.2 论文框架	5
第二章 伺服电缸选型架构	7
2.1 引言	7
2.2 电动缸基本结构与工作原理	7
2.2.1 伺服电缸基本结构	7
2.2.2 伺服电缸的分类	7
2.2.3 伺服电缸工作原理	8
2.3 伺服电缸主要机构选型	8
2.3.1 滚珠丝杆选型	9
2.3.2 伺服电机选型	12
2.4 本章小结	16
第三章 伺服电缸系统建模	17
3.1 引言	17
3.2 伺服电机的数学模型	17
3.2.1 伺服电机分类	17
3.2.2 不同坐标系下永磁同步电机数学模型	18
3.2.3 永磁同步电机的矢量控制	21

3.3 伺服电缸位置控制数学模型	22
3.3.1 伺服电缸伺服系统位置环数学模型	22
3.3.2 伺服电缸缸机械传动部分数学模型	23
3.4 伺服电缸数学模型参数辨识	24
3.4.1 系统辨识原理	24
3.4.2 系统辨识结果	26
3.5 本章小结	27
第四章 伺服电缸控制系统优化及仿真	29
4.1 引言	29
4.2 PID 控制	29
4.2.1PID 控制器原理	29
4.2.2PID 控制器局限性及其发展方向	30
4.3 伺服电缸位置控制器设计	30
4.3.1 鲸鱼算法基本原理	31
4.3.2 鲸鱼算法的改进	34
4.4 伺服电缸控制系统仿真及分析	37
4.4.1 改进鲸鱼算法的 PID 控制器设计	37
4.4.2 适应度函数选取	38
4.4.3 仿真结果及分析	39
4.5 本章小结	42
第五章 伺服电缸位置控制试验	43
5.1 引言	43
5.2 试验平台搭建	43
5.3 试验验证	44
5.3.1 定位精度试验	44
5.3.2 位置响应试验	46
5.4 本章小结	52
第六章 总结和展望	53
6.1 结论	53
6.2 展望	54
参 考 文 献	55

第一章 绪 论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

随着科技发展和工业自动化的推进，自动化生产工艺对设备的要求越来越高^[1]。传统的气缸、液压缸不断暴露各种问题，已经不能满足智能化大时代的需求，伺服电缸便由此诞生并开始迅速发展^[2]。伺服电缸是电动执行机构的代表，主要由伺服电机，滚珠丝杆，减速器以及缸体组成，通过滚珠丝杆和丝杆螺母把伺服电机的旋转运动转换为直线运动^[3]。伺服电缸的性能与气缸和液压缸相似，但工作原理和能量转换方式不同，伺服电缸通过机械机构把电能转换为机械能，不受气体和液体压缩性的影响，且无需额外的辅助装置，减少了设备安装空间及设备维护时间^[4]。

伺服电缸是模块化的产品，采用伺服电机与丝杆的一体化设计^[5]。因此其具有结构紧凑、互换性好的优点^[6]。相比于气缸和液压缸，伺服电缸对环境温度要求低，能够在温度复杂多变的环境中使用^[7]。伺服电缸通过伺服驱动器来实现对位置、速度和转矩的精密控制，不需要气体和液体等中间媒介，具有良好的控制性能^[8]。气缸和液压缸在运行时噪音大，存在气体和液体泄漏，对环境会造成污染^[9]。伺服电缸在使用时运行平稳零污染，可靠性更高，替代气缸和液压缸在工程中使用已是必然趋势^[10]。

1.1.2 研究意义

我国伺服电缸起步较晚，许多先进的伺服电缸技术被国外限制，距离能够自主研发属于自己品牌的电动缸产品还有很长的路要走^[11]。在研发伺服电缸时，许多工程师依靠经验或类比法来进行选型计算，且其考虑的因素各不相同，很大程度上影响了伺服电缸的性能。此外控制策略的优劣对伺服电缸的定位精度和性能的影响也较大，因此对伺服电缸主要机构的选型计算进行系统研究，以及建立伺服电缸数学模型对伺服电缸的控制策略进行优化研究是非常必要的。

1.2 电动缸的发展与应用

电动缸的应用领域十分广泛。在军事工业方面，如雷达支撑架、发射平台升降机构、导弹起竖架、舱门开启缸、火炮俯仰驱动装置、车体电动调平机构、导弹外壳翻转机构、扫雷机器臂履带调节机构、抓弹机构、方舱扩展机构等特种设备。在医疗器械行业，如按摩椅和理疗康复床等^[12]。在娱乐行业，如机器人胳膊及骨节和下图所示动感座椅等^[13]。在汽车制造业，如压装机，测试设备等^[14]。在实验设备方面，如模拟平台和试验台等^[15]。

在工业制造生产行业，如工业自动化生产线、食品设备，陶瓷机械，电焊焊接机械设备，升降平台等可以替代液压缸、气压缸的工作场合，是液压、气动设备的升级产品^[16]。



图 1.1 导弹发射车

Fig.1.1 Missile launcher



图 1.2 动感座椅

Fig.1.2 Dynamic seats

1.3 国内外研究现状

1.3.1 伺服电缸国外产品研究现状

在国外，伺服电缸发展前景良好，被广泛应用在许多领域中。从 1978 年的 Davies 首次提出使用闭环系统来进行高精度控制的电动执行器开始，电动缸便得到许多研究者的重视，被视为工业自动化发展的重要基础^[17]。

目前国外许多公司和机构对伺服电缸都有很深入的研究，掌握伺服电缸的前沿技术，如美国的 Danaher 公司的直接驱动技术降低了机械系统复杂性，Parker 公司拥有无需丝杆的直驱技术，EXLAR 将伺服电缸构件高度集成在伺服电缸的缸体内，大大减少了伺服电缸的体积，其产品如下图所示^[18]。Moog 公司使用壁厚控制系统来提高伺服电缸缸体的耐冲击性和强度。日本的 Cosmic 公司致力于大型设备的使用。丹麦 Linak 公司的

伺服电缸使用集成式控制器，耐清洗，广泛应用于护理领域。德国 Bosch 公司采用由活塞杆上的方形轴颈和缸体内的相应导向组成的集成防转机构，以及在调试工作中保护机械系统免受损坏的集成终端缓冲，且具有高水平的能源效率，Festo 公司采用抗扭矩活塞杆，具有极高的抗扭性。瑞典 SKF 公司的致动技术可以满足伺服电缸对高载荷、高转速且连续运转要求严苛的工业应用需求^[19]。



图 1.3 EXLAR 公司伺服电缸

Fig.1.3 EXLAR servo electric cylinder

1.3.2 伺服电缸国内产品研究现状

国内伺服电缸是从仿制苏联的产品开始发展的，相比外国伺服电缸技术较为落后^[20]。随着近些年来我国科学技术的发展，国内不少公司和院校十分重视对伺服电缸技术的研究，如上海冀望、重庆海通、江苏南合公司、北京力姆泰克、南京思展等^[21]。图 1.4 所示为北京力姆泰克公司伺服电缸。



图 1.4 北京力姆泰克公司伺服电缸

Fig.1.4 Beijing Lim-Tec servo electric cylinder

上海冀望学习美国和日本的技术及经验，运用国外先进的模块化设计理念，成功开发 SEA800 系列伺服电缸，具备响应快、低速运行状态下稳定性良好及寿命长等特点。重庆海通 ELA80X 系列伺服电动缸，有折返、直线、垂直 3 种形式，具有结构紧凑、低

惯量、高性能、高可靠性、高响应等优点^[22]。江苏南合公司 HDL 型电动推杆采用高强度铝合金材料,具有体积小、重量轻、推力大和外形美观等特点,采用磁感应式行程开关,反应灵敏。北京力姆泰克采用进口研磨级滚珠丝杠,高效率不自锁,增加光栅尺实现闭环伺服控制,控制精度达 $0.01mm$ 。南京思展公司采用多点定位,具备推压功能、限位信号输出,运动时高精度、超平滑、低振动、低噪音,将伺服驱动、位置控制和缸体集成在一起,使得它更加精简,适用于各种小空间和恶劣环境,使用寿命长^[23]。

1.3.3 伺服电缸位置控制研究现状

随着伺服电缸在诸多领域的广泛应用,提高伺服电缸在实际应用中的位置控制精度具有重要意义。因此,国内外许多学者对伺服电缸的高精度位置控制方法进行了大量的研究。

张爱龙等使用前馈 PID 控制方式来提高伺服电缸的响应速度及精度,并通过基于 cIRO 系统的算法控制伺服电缸运动轨迹^[24]。徐永利等在基于伺服电缸控制的机械臂重力平衡系统中使用力/位混合控制策略,并通过模糊 PID 方法整定参数来提高重力平衡系统的精度和响应速度^[25]。段学超等采用自适应交互算法实时整定 PID 参数来调整射电天文望远镜控制量,并用带前馈的 PID 伺服滤波器提高控制精度^[26]。史成城等在基于 LabWindows/CVI 的伺服电缸仿真软件中,采用遗传算法整定 PID 参数的控制策略对伺服电缸位置控制进行仿真^[27]。郑国昆等为了解决电动缸位置控制过程中产生抖震现象,提出基于趋近率的滑膜变结构控制与干扰控制器相结合的复合控制策略^[28]。黄杰等为了解决伺服电缸载荷系统在条件极端变化情况下的扰动及稳定性问题,提出基于微分控制器的自抗干扰控制策略^[29]。吴静等为实现伺服电缸的力位精准控制,采用分时控制的集中力加载系统控制策略^[30]。秦幸妮等为提高舰炮高低系统的稳定性和控制精度,采用自抗干扰控制技术的 PID 控制策略^[31]。山显雷等针对伺服电缸非线性摩擦提出基于 LuGre 摩擦模型和 PID 控制算法的摩擦补偿控制器,并采用遗传算法辨识摩擦参数^[32]。胡鑫等为解决引起伺服电缸系统快速性与精度匹配问题的非线性速比,采用变系数误差平方根与带前馈的 PID 控制结合的分段式控制^[33]。

Geng, Z 提出了一种模糊自适应比例积分微分 (PID) 控制系统,利用偏差信号的输入模糊推理模块,可以实时改变 PID 控制器的参数,使系统具有良好的稳定性和鲁棒性^[34]。Hao, D 针对伺服电缸控制精度和计算效率之间存在的矛盾这一问题,提出一种变域自适应模糊控制的建立方案,能够有效地处理电动缸系统的位移控制,并且具有较高的精度和较强的鲁棒性^[35]。Chen G 等采用闭环 PID 控制与串联校正策略来提高转向试验台系统的稳定性与精度^[36]。Zeng C 等将智能分区的二级前馈 PID 控制算法用于伺服

电缸的系统控制中，并用线性补偿整定参数来提高控制精度和稳定性^[37]。Li M 等为了解决伺服电缸频繁正反转引起的相位延迟和幅值误差，提出在模糊 PID 控制中引入超前补偿控制的复合控制策略^[38]。Liu Y 针对在导弹发射装置中所应用的大型电缸系统中，由于载荷扰动、参数变化、空转和摩擦等许多非线性因素的存在导致很难实现理想的定位响应的问题，提出了一种基于优化定位原理的分段控制策略，将位置插值法和带死区修正增量 PID 的组合应用，显著提高了大型电动缸动态响应、稳态精度和抗干扰性能^[39]。Wang T 为实现航天飞机实现发射过程的稳定和安全，研究了一种多台伺服电机并联的大功率电动缸，并提出水平位置重载启动控制策略^[40]。Peng H 为了在伺服运动的情况下补偿电动缸的非线性扰动，使用主动抗扰控制来进行连续和精确的转换，跟踪微分器用于安排过渡过程以避免过冲，建立了扩展状态观测器来估计不可测量的内部扰动、参数不确定性和外部不确定性，并设计了非线性状态误差反馈，使误差反馈的组合更加合理^[41]。Jiang S 为了实现多自由度运动模拟器高精度的跟踪性能，提出了一种具有集聚力-位置控制框架的新型多级伺服电动缸，设计了融合滑模鲁棒观测器的力-位置复合主动柔顺控制器^[42]。

但随着伺服电缸的广泛使用，其产品类型虽多但成本过高无法满足用户需求，此外对其位置控制也提出了更高的精度要求，当前的控制策略已难以满足，因此本文针对这些问题开展了相关研究。

1.4 课题主要内容及论文框架

1.4.1 主要研究内容

本文以折返式伺服电缸为研究对象，进行伺服电缸主要机构的选型，建立伺服电缸数学模型，并对伺服电缸在伺服系统位置模式下的位置控制进行研究，之后对所使用的控制策略进行仿真和试验验证，论文框架具体安排如下。

1.4.2 论文框架

第一章 绪论

对论文的研究背景和意义进行阐述，对伺服电缸的发展与应用及国内外研究现状进行了简述和概括。

第二章 伺服电缸选型架构

对伺服电缸的基本结构及工作原理进行了简述，随后对伺服电缸的主要机构的选型计算进行了系统研究。

第三章 伺服电缸系统建模

首先对永磁同步电机进行了简述，建立永磁同步电机位置控制数学模型并对其分析，

然后通过伺服电缸机械机构之间的关系建立伺服电缸机械传动数学模型，结合永磁同步电机位置控制数学模型和伺服电机机械传动数学模型推导伺服电缸位置控制数学模型。

第四章 伺服电缸控制系统优化及仿真

对伺服电缸位置控制策略及鲸鱼算法进行阐述说明，使用鲸鱼算法整定 PID 参数的 PID 控制器进行伺服电缸的位置控制，为了进一步加快鲸鱼算法的迭代速度以及避免陷入局部最优等问题，对鲸鱼算法进行了改进并通过 Simulink 仿真对该算法进行了验证。

第五章 伺服电缸位置控制试验

进行试验验证。搭建试验平台，首先进行定位精度试验，在空载及负载条件下，检验伺服电缸所采用控制策略对于设定的不同位置的误差，然后在空载及负载条件下，进行鲸鱼算法优化的 PID 参数对伺服电缸位置控制性能验证的位置响应试验，最后对试验结果进行分析。

第六章 结论和展望

第二章 伺服电缸选型架构

2.1 引言

伺服电缸在众多领域中被广泛使用，因此选择合适的伺服电缸不仅可以提高工作效率，而且可以降低使用成本。本章首先对伺服电缸的基本结构、分类及其工作原理进行简单介绍，然后采用现在已有的滚珠丝杆及伺服电机选型计算流程为基础，以TBI滚珠丝杆及汇川MS1伺服电机为例，对伺服电缸的主要机构滚珠丝杆以及伺服电机的选型计算进行系统研究。

2.2 电动缸基本结构与工作原理

2.2.1 伺服电缸基本结构

伺服电缸的结构比较简单，它主要由驱动机构、减速装置、传动机构和缸体四大部分组成。伺服电缸的驱动电机类型有直流电机、交流电机、步进电机、伺服电机等种。伺服电缸的减速装置一般情况下由齿轮减速、蜗轮蜗杆、行星齿轮、谐波减速等构成。伺服电缸的传动机构主要有梯形丝杆、滚珠丝杆、滚柱丝杆、滑动导轨等。图2.1为伺服电缸结构图。

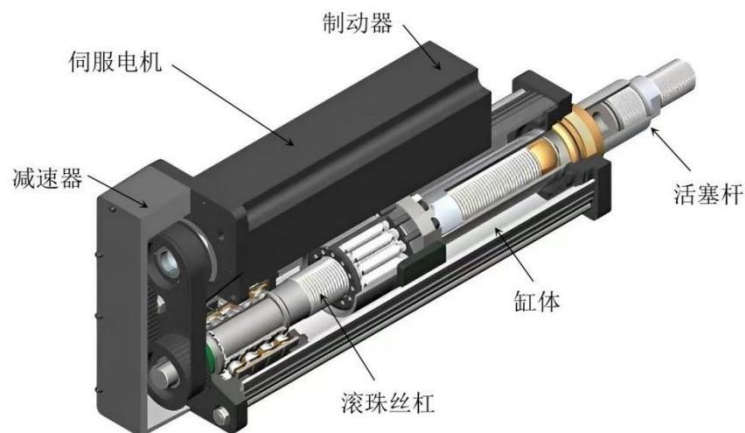


图 2.1 伺服电缸结构图

Fig.2.1 Servo electric cylinder structure diagram

2.2.2 伺服电缸的分类

伺服电动缸可以按照不同的特征进行分类，包括运动方式（折返式与直线导轨式）、是否为智能（智能型与非智能型）、驱使其工作使用的伺服电机类型（如普通直流电动机、异步电机、直流无刷电机、步进电机、永磁同步电机、磁阻电动机等）、伺服电机与滚珠丝杆的安装方式（如直线安装型、平行安装型或垂直安装型）、滚珠丝杆导程的

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/525121113223011244>