

# 宁波市科技进步奖项目公示

**项目名称：**精密永磁伺服电机设计与控制关键技术及其应用

**完成单位：**中国科学院宁波材料技术与工程研究所，宁波菲仕技术股份有限公司，宁波安信数控技术有限公司，宁波菲仕运动控制技术有限公司，宁波弘讯科技股份有限公司，宁波亿文特自动化科技有限公司

**完成人员：**张驰，杨桂林，张杰，陈进华，廖有用，吴华江，薛翠鹤，孙凌财，黄彬彬，李荣，舒鑫东，乔海，韩军

## 一、项目简介：

本项目属于自动化技术领域。

精密永磁伺服电机及其控制器是数控机床、精密注塑机等高端制造装备的关键核心部件，是高端制造装备实现精密运动的重要保证，但由于精度要求苛刻，设计制造难度大，长期被国外垄断。本项目在国家自然科学基金、科技支撑计划等项目支持下，针对精密永磁伺服电机的电磁和结构设计、散热系统、制造工艺及高速高精度运动控制开展了创新性研究。通过产学研联合攻关，研制出“脉动小、工温低、装配精、定位准”的永磁伺服电机产品，主要创新成果包括：

(1) 针对伺服电机齿槽效应导致力矩脉动大的难题，提出了基于磁导调制和磁通调形的精密永磁伺服电机设计方法。通过面包型磁极、马鞍形靠肩定位齿、左右附加齿倒角等创新设计技术，提高了气隙磁密波形的正弦化程度，显著减小了齿槽效应，转矩波动降低到 0.47%（国外 1%）。

(2) 针对电机工作温度升高导致控制精度下降的问题，创新设计了双层双回路集成冷却，散热筋、通风槽和挡风板的一体式风冷组合机壳，降低了电机工作温度，相比传统散热技术，相同负载下绕组温度降低 34%，相同温升下输出功率提高 22%。

(3) 针对批量制造中加工精度和一致性难于保持的问题，通过创新永磁体阵列的平面整体充磁技术，显著提高了直线电机初级磁性能的一致性；通过独创的涨套工艺，实现了定子内孔涨紧定位和一次装夹，保证了装配精度和一致性。

(4) 针对低阻尼电机系统频繁启停易引起振动，导致调停时间长、定位精度低的难题，发明了分段式前馈控制和基于电磁变阻尼的振动抑制方法，创新了基于位置域的推力波动补偿技术，提高了定位精度。

项目获授权发明专利 26 项，实用新型 21 项，发表论文 67 篇，撰写专著 1 部，制定浙江制造标准 1 项，相关成果获 2018 年中国产学研合作创新成果一等奖、核心专利获 2015 年中国专利优秀奖。

经同行专家鉴定，“该项目创新性强，整体技术达到国际先进水平，其中永磁伺服电机的转矩/推力脉动抑制技术达到了国际领先水平”。项目产品在海天塑机、新誉集团、维嘉数控等多家企业应用，主要性能指标达到或超过国际同类产品，替代了进口，近三年销售

收入 21.74 亿元，利税 5.65 亿元，取得了显著的经济和社会效益。该项目打破了发达国家的技术垄断，促进了我国永磁伺服电机行业的技术进步，为高端制造装备关键核心部件的国产化奠定了基础。

## 二、主要技术创新点：

**创新点 1：基于磁导调制和磁通调形的精密永磁伺服电机设计方法，属电机与电器学科，电机领域。（知识产权 1、3、4、5，专著 1，论文 2、3、4）**

针对伺服电机齿槽效应导致力矩脉动大的难题，提出了基于磁导调制和磁通调形的精密永磁伺服电机设计方法。通过面包型磁极、马鞍形靠肩定位齿、左右附加齿倒角等创新设计技术，提高了气隙磁密波形的正弦化程度，显著减小了齿槽效应，转矩波动降低到 0.47%（国外 1%）。

**创新点 2：提升精度稳定性的散热系统，属电机与电器学科，电机领域。（知识产权 2、6，专著 1）**

针对电机工作温度升高导致控制精度下降的问题，创新设计了双层双回路集成冷却，散热筋、通风槽和挡风板的一体式风冷组合机壳，降低了电机工作温度，相比传统散热技术，相同负载下绕组温度降低 34%，相同温升下输出功率提高 22%。

**创新点 3：提升精度一致性的电机制造工艺，属机械工程学科，机械领域。（知识产权 7、8，专著 1）**

针对批量制造中加工精度和一致性难于保持的问题，通过创新永磁体阵列的平面整体充磁技术，显著提高了直线电机初级磁性能的一致性；通过独创的涨套工艺，实现了定子内孔涨紧定位和一次装夹，保证了装配精度和一致性。通过上述工艺，解决了大规模制造中加工精度和一致性保持的难题。

**创新点 4：高速高精度运动控制技术，属机械电子工程学科，机械领域（知识产权 9、10，论文 5、6、7、8、9、10）**

针对低阻尼电机系统频繁启停易引起振动，导致调停时间长、定位精度低的难题，提出了复杂运动系统自动模态辨识与精确动力学建模方法和基于分段式前馈控制的振动控制方法，在加减速段使用基于运动轨迹命令的模糊逻辑前馈控制，减小了系统动态误差与超调欠调；在匀速和运动停止时使用自适应前馈控制，抑制残余振动、提高了控制精度。提出了基于位置域的推力波动补偿技术，推力波动降低 53%。发明了具有 4 层涡流板的大阻尼系数主动涡流阻尼器和将速度信号反馈于线圈电流的电磁阻尼器，提出了滑模变结构主动阻尼控制方法，在制动阶段使用变阻尼控制，调整时间减少 62%，最大误差幅值减小 51%，使用该技术的基于柔性支撑的永磁音圈电机重复定位精度在 20 纳米以内。

针对大直径电机位置传感器的高成本问题，发明了使用普通光栅尺或磁栅尺就能精确测量速度和位移的低成本双读头测量系统，实现了超大直径角位置的准确低成本测量，控制精度达到±2 角秒。

### 三、经济（社会）效益

#### 1. 直接经济效益

（单位：万元）

年份	新增销售	新增利润	新增税收
2017	63208.28	4184.614	12374.55
2018	78169.34	6268.524	13675.66
2019	76118.89	5567.721	14463.27
累计	217496.51	16020.859	40513.48

#### 2. 社会效益

1.项目近三年销售项目产品 111 万余台（套），新增销售收入近 22 亿元，新增利税 5.65 亿元。为社会提供了大量的工作岗位，同时提高了工人的劳动收入，经济效益明显。

2.项目产品通过国家科技支撑计划项目“宁波市数控一代机械产品创新应用示范工程”进行示范应用，

2015-2017 年实现产值近 56 亿元，其中海天塑机集团有限公司实现产值 49.6 亿元，宁波长飞亚塑料机械制造有限公司实现产值 6 亿元。

3、项目产品的推广促进了永磁伺服电机上下游产业的发展，为上游稀土永磁材料的开发与应用提供了广阔的市场，为下游高端智能制造装备的升级奠定了基础。本项目产品将推动注塑机朝着高效节能、高速、高精密、环保等方向发展，相比传统的液压注塑机，伺服节能注塑机节能率达 20%-80%，性能指标在国内外都处于领先水平，替代了国外相关技术产品，完成了现有制造设备的升级换代。

4、项目研制的永磁直线电机已应用于国产数控机床、半导体装备，用户评价该产品可以替代科尔摩根等国外知名品牌产品。在国家重点研发计划“长行程精密运动平台”项目支持下，永磁直线电机还将用于基因测序仪等精密检测设备，打破国外垄断，推动我国精密制造行业科技进步。

5、项目建立了一支主要由科研院研究员与企业技术中心的技术人员组成的精密永磁伺服电机及其控制技术团队，针对企业产品研发、生产过程中出现的技术问题开展攻关，促进了企业研发创新与技术进步。

#### 四. 推广应用情况

应用单位名称	应用的起始时间	应用单位联系人/电话	推广应用的量(情况)	产值(万元)	利税(万元)

## 五、代表性论文论著及作者

作者	论文专著名称/刊物	年卷页码 (X年 X卷 X页)
闫阿儒, 张驰	新型稀土永磁材料与永磁电机	2014年, 科学出版社
艾增强, 陈进华, 廖有用, 张驰, 杜建科	Bread-Loaf 型磁钢的永磁电机气隙磁场计算与参数分析/微特电机	2017年第45卷第12期 20-27页
Z Li, J Chen*, C Zhang, L Liu	Cogging Torque Reduction in External-rotor Permanent Magnet Torque Motor Based on Different Shape of Magnet/8th IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems & Robotics, Automation and Mechatronics	2017年 304-309页
王斐然, 廖有用, 陈进华, 张驰, 罗均	Halbach 阵列永磁同步直线电机边端力最小化研究/微特电机,	2017年第45卷第4期 20-27页
柳瑞, 张驰*, 沈林勇, 赵飞, 董良, 李荣	直线电动机伺服系统精自动建模方法研究/微特电机	2016年第44卷第4期 9-12页
张彦龙, 赵飞, 张驰*, 杜文华	基于位置域频率和相位辨识的永磁直线电机推力波动抑制技术研究/组合机床与自动化加工技术	2016年第3期 86-89页
Y Hu, F Zhao, P Li, J Chen, L Dong, C Zhang	A Novel Hybrid Excitation Eddy Current Damper for Vibration Suppression/ IEEE International Conference on Information and Automation	2017年 642-647页
Z Cao, C Zhang, Q Liu, H Lian, G Yang, S Chen	Positive Velocity Feedback Control of Flexure-based Actuator for Vibration Suppression/8th IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems & Robotics, Automation and Mechatronics	2017年 365-369页
R Li, H Qiao, C Zhang*, W Qu, Y Liao	High Precision Control System Design and Implementation of Outer-rotor Permanent Magnet Motor with Dual Magnetic Sensors/ Applied Mechanics and Materials	2014年 494-495卷 1462-1467页
R Liu, C Zhang*, L Shen, F Zhao	Parameters Identification and Adaptive Feedforward Control of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor/11th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies	2016年 1898-1903页

## 六、主要知识产权及发明人：

授权项目名称	知识产权类别	国别	授权号	发明人
低推力脉动的永磁直线电机	发明专利	中国	ZL201510163666.3	廖有用;俞岳平;韩旭奎;陈俊峰
一种永磁同步直线电机	发明专利	中国	ZL2010102908836	廖有用, 张杰, 黄彬彬, 杨炯
一种磁浮式门机装置	发明专利	中国	ZL2012102456378	黄彬彬, 廖有用, 张驰, 张杰, 周杰, 陆彤, 舒鑫东
一种直驱式外转子回转驱动装置	发明专利	中国	ZL2012102392889	黄彬彬, 廖有用, 张驰, 张杰, 陆彤
一种永磁电机的转子铁芯结构	发明专利	中国	ZL201410411611.5	褚先章; 王必生; 陈平华; 林井福; 宋立斌; 张波; 李爽; 鲁刚刚
一种风冷却的电机组合壳体	发明专利	中国	ZL2014101353693	吴华江, 褚先章, 陈平华, 黄立波, 任志胜, 陈卓杰, 蒋勤, 陈旭凯
一种电机定转子的装配工装	发明专利	中国	ZL201310754933.5	周丹, 阿力, 薛翠鹤, 徐杰
永磁电机内转子装配方法	发明专利	中国	ZL201210292434.4	吴乾军; 韩军; 董瑜堂
旋转电机的转速和位移测量系统	发明专利	中国	ZL2012105366922	张驰, 乔海, 廖有用, 舒鑫东, 周杰, 刘强
主动涡流阻尼装置及包含该主动涡流阻尼装置的进给系统	发明专利	中国	ZL2015104513330	赵飞, 廖有用, 陈进华, 舒鑫东, 张驰, 杨桂林, 石强

## 七、完成人情况

排名	姓名	性别	出生年月	技术职称	工作单位
1	张驰	男	1978-07	研究员	中国科学院宁波材料技术与工程研究所
2	杨桂林	男	1965-06	研究员	中国科学院宁波材料技术与工程研究所
3	张杰	男	1981-12	高级工程师	中国科学院宁波材料技术与工程研究所
4	陈进华	男	1985-10	高级工程师	中国科学院宁波材料技术与工程研究所
5	廖有用	男	1964-02	研究员	宁波亿文特自动化科技有限公司
6	吴华江	男	1979-01	工程师	宁波安信数控技术有限公司
7	薛翠鹤	女	1983-01	工程师	宁波菲仕运动控制技术有限公司
8	孙凌财	男	1981-03	工程师	宁波弘讯科技股份有限公司
9	黄彬彬	男	1982-05	高级工程师	深圳红冠机电科技有限公司
10	李荣	男	1987-12	工程师	中国科学院宁波材料技术与工程研究所
11	舒鑫东	男	1982-12	高级工程师	中国科学院宁波材料技术与工程研究所
12	乔海	男	1988-03	工程师	中国科学院宁波材料技术与工程研究所
13	韩军	男	1985-03	工程师	宁波菲仕技术股份有限公司