

浙江省科技进步奖提名公示

一、成果名称：

精密永磁伺服电机设计与控制关键技术及其应用

二、提名单位及提名意见

提名单位	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	通讯地址	宁波市镇海区中官西路 1219 号	邮政编码	315201
联系人	王晶	办公电话	0574-86685172	移动电话	15757456069
电子邮箱	wangjing@nimte.ac.cn	传真			
提名意见	<p>该成果属于机械电子工程领域。成果在国家自然科学基金、国家科技支撑计划等项目支持下，经过产学研联合攻关，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控制开展了创新性研究，解决了伺服电机齿槽效应导致力矩脉动大、电机工作温度过高导致控制精度低、大规模制造中加工精度和一致性保持、低阻尼系统急停制动易振动等难题，研制出了“脉动小、工温低、装配精、定位准”的永磁伺服电机产品。经同行专家鉴定，该成果创新性强，具有自主知识产权，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。成果技术已获发明专利授权 26 项，实用新型专利 21 项，撰写专著 1 部，发表论文 67 篇，制定浙江制造标准 1 项，获“2015 年中国专利优秀奖”、2018 年中国产学研合作创新成果一等奖。该成果产品在海天塑机、新誉集团、维嘉数控等多家企业的精密注塑机、数控机床、半导体加工设备 etc 装备中应用，主要性能指标达到或超过国际同类产品，替代了进口，近三年实现销售收入 24.94 亿元，利税 5.45 亿元，取得了显著的经济和社会效益。该成果打破了美德日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。</p> <p>提名该成果为省科技进步奖一等奖</p>				

三、成果简介：

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。本成果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。发明了基于双伺服电机的全电动注塑机并行注射控制系统，提高了系统响应和控制精度。

成果获授权发明专利 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，“该项目成果创新性强，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”。成果产品在海天塑机、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 24.94 亿元，利税 5.45 亿元，取得了显著的经济和社会效益。该成果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。

四、第三方评价：

1、科学技术成果鉴定（JXK 鉴字[2016]第 008 号）

中国机械工程学会组织包括顾国彪院士、谭建荣院士在内的专家对“精密永磁伺服电机设计与控制关键技术”项目成果进行了会议鉴定，鉴定委员会认为，项目成果创新性强，整体技术达到国际先进水平，其中永磁同步伺服电机的转矩/推力脉动抑制技术达到了国际领先水平。

2、国家科技支撑计划项目（编号：2014BAF10B00）验收专家意见

国家科技部在宁波组织包括刘强、黄永友教授在内的专家召开了国家科技支撑计划“宁波市数控一代机械产品创新应用示范工程”项目验收会。专家组一致认为：项目开展了高性能永磁电机优化设计、高速高精度运动控制等关键技术研究；完成了塑料注塑成型、毛衫自动缝合以及冲床机械等 3 个行业、10 余家企业的应用示范，成批量推广了本项目研发的伺服电机、驱动器、数控系统及数控化装备，取得了明显的经济和社会效益。

3、科技查新报告（2019-072）

经中国科学院武汉科技查新咨询检索中心国际查新，项目发明的一种风冷却的电机

组合壳体，与现有风冷电机相比，相同负载下，绕组温升降低 34%，相同温升时，负载可提高 16%-22%，**可有效提高电机转矩密度**；利用平板型直线电机的法向吸力进行磁悬浮与直线驱动的一体化设计，设计了在门重大于 800kg、有效行程大于 4m 条件下实现 1.8m/s 以上的高速磁悬浮直驱门机，**在国内外未见类似报道。**

4、检测报告（WM16-0889）

经上海电器设备检测所有限公司检测，样机：齿槽效应为 0.16%，单位体积功率 1.036MW/m³，转矩脉动为 0.47%，响应频率为 442Hz，**其中电动效率满足 GB30253-2013 中能效 1 级要求。**

5、检测报告（1913300241/ 1913300242）

经国家电器安全质量监督检验中心（浙江）检测，样机齿槽力正向 186.99N，反向 180.74N；电机反电势常数非线性度为 0.33%；力常数大于 169N/A，非线性度 0.62%（正向）/0.59%（反向）；额定推力 5590N，峰值推力 14113N，**技术指标达到或超过同型号西门子电机 1FN3600。**

6、检测报告（JXP20160357）

经宁波市产品质量监督检验研究院检测，样机注射终止位置重复定位精度为 0.006mm，注射速度控制精度为 0.08mm/s，压力控制为 0.9bar，机器能耗为 0.4kWh/kg。

7、用户意见

经舟山市震宇塑料机械有限公司等反馈，项目 HS 系列电机在其注塑机中，表现出**低惯量、高过载能力、加减速快、重复定位精度高**等特点；经维嘉数控科技（苏州）有限公司反馈，项目直线电机已经替代美国 kollmorgen 和德国 Bobolowski 同类产品在其全线性数控 PCB 加工设备中使用；新誉轨道交通科技有限公司将项目直线电机 XT-155-5220 与机床联合调试，参照德国 VDI 3441 标准进行精度测试，**重复定位精度为：10.038um。**

五、直接经济效益、推广应用情况和社会效益

1. 完成单位应用情况和直接经济效益（单位：万元）（其中经济效益数据以最终审计结果为准）

单位名称	新增应用量(km)			新增销售收入(单位:万元)			新增税收(单位:万元)			新增利润(单位:万元)		
	2016年	2017年	2018年	2016年	2017年	2018年	2016年	2017年	2018年	2016年	2017年	2018年
宁波安信数控技术有限公司	4083	5988	5108	43423.41	48101.54	60108.88	4228.56	3274.43	6064.54	8288.26	8485.71	12194.04
宁波长飞亚塑料机械制造有限公司	391	722	926	15967.45	28911.51	37630.55	878.56	878.39	1734.25	2204.54	1696.09	3973.03
宁波弘讯科技股份有限公司	1904	3208	3792	2973.21	4620.52	4627.62	79.93	76.39	117.16	20.28	55.41	92.84
宁波亿文特自动化科技有限公司	560	1096	3389	433.52	824.83	1732.73	29.53	63.91	121.47	0	0	33.59
合计	6938	11014	13215	62797.59	82458.4	104099.78	5216.58	4293.12	8037.42	10513.08	10237.21	16293.5
	31167			249355.77			17547.12			37043.79		

2. 推广应用情况和经济效益

应用单位名称	起止时间	单位联系人、电话	新增应用量			新增销售收入(万元)			新增税收(万元)			新增利润(万元)		
			2016年	2017年	2018年	2016年	2017年	2018年	2016年	2017年	2018年	2016年	2017年	2018年
合计:														

3. 社会效益和间接经济效益

1. 本成果近三年销售项目产品 3 万余台（套），新增销售收入近 25 亿元，新增利税 5.45 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. 成果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、成果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、高精度、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、成果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、成果建立了一支主要由研究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研究团队，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。

六、知识产权证明目录（不超过 10 项）

知识产权类别	知识产权具体名称	国家 (地区)	授权号	授权日期	权利人	发明人（培育人）
发明专利	一种永磁同步直线电机	中国	ZL201010290883.6	2012.11.28	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	廖有用;张杰;黄彬彬;杨炯
发明专利	低推力脉动的永磁直线电机	中国	ZL201510163666.3	2017.06.20	宁波亿文特自动化科技有限公司	廖有用;俞岳平;韩旭奎;陈俊峰
发明专利	一种磁浮式门机装置	中国	ZL201210245637.8	2015.05.20	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	黄彬彬;廖有用;张驰;张杰;周杰;陆彤;舒鑫东
发明专利	一种风冷却的电机组合壳体	中国	ZL201410135369.3	2016.09.14	宁波安信数控技术有限公司	吴华江;褚先章;陈平华;黄立波;任志胜;陈卓杰;蒋勤;陈旭凯
发明专利	一种永磁电机的转子铁芯结构	中国	ZL 201410411611.5	2017.01.04	宁波安信数控技术有限公司	褚先章;王必生;陈平华;林井福;宋立斌;张波;李爽;鲁刚刚
发明专利	旋转电机的转速和位移测量系统	中国	ZL201210536692.2	2017.03.08	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	张驰;乔海;廖有用;舒鑫东;周杰;刘强
发明专利	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	中国	ZL201510451333.0	2017.06.16	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	赵飞;廖有用;陈进华;舒鑫东;张驰;杨桂林;石强;

发明专利	一种电动注塑机的 双电机并行注射控 制方法	中国	ZL201310558117.7	2016.08.17	宁波长飞亚塑 料机械制造有 限公司	傅南红;朱宁迪;朱 淦
------	-----------------------------	----	------------------	------------	-------------------------	----------------

七、代表性论文专著目录（不超过 10 项）

作者	论文专著名称/刊物	年卷期 页码	发表时间 (年、月)	SCI 他 引次数	他引 总次数
闫阿儒，张驰	新型稀土永磁材料与永磁电机/ 科学出版社	2014 年，科 学出版社	2014.10	0	29
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	2014 年 9 卷 1-3 页	2015.05..09	0	0
合 计:				0	29

八、主要完成人员情况:

排名	姓名	职称、职务	现从事专业	工作单位	二级单位	完成单位	对本项目技术创造性贡献
1	张驰	研究员	机械电子工程	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	先进制造技术研究所	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	本人是国家科技支撑计划(2014BAF10B00)、国家自然科学基金青年基金(51207158)、宁波市创新团队(2012B82005)的项目负责人,在主要科技创新点1、2、3、4的主要贡献为:参与发明专利一种直驱式外转子回转驱动装置,排名3;旋转电机的转速和位移测量系统,排名1;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,排名5;一种磁浮式门机装置,排名3。参与论著:新型稀土永磁材料与永磁电机,排名2。发表与项目相关论文专著10篇,在项目投入的工作量占本人工作总量的70%。
2	杨桂林	研究员	机械电子工程	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	先进制造技术研究所	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	本人在主要科技创新点4的主要贡献为:参与发明专利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,排名6;以第2完成人身份参与了宁波市创新团队:精密驱动控制技术创新团队(编号:2012B82005)项目研制(甬科验字[2015]第00-94号),以第3完成人身份参与了宁波市科技计划重大项目“全电动伺服系统关键技术研发及产业化”项目研制(甬科验字[2017]第00-69号),合作发表3篇与项目相关SCI论文,在本项目投入的工作量占本人工作总量的40%。
3	陈进华	高级工程师	电机设计	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	先进制造技术研究所	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	本人在主要科技创新点1、2、3、4的主要贡献为:参与专著:新型稀土永磁材料与永磁电机,排名6;参与发明专利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,排名3;Bread-Loaf型磁钢的永磁电机气隙磁场计算与参数分析,排名2;高速电主轴永磁电动机参数化设计及有限元分析,排名1。作为编委参

							与了著作：新型稀土永磁材料与永磁电机的编写，在本项目投入的工作量占本人工作总量的 60%。
4	廖有用	研究员	电机设计	宁波亿文特自动化科技有限公司		宁波亿文特自动化科技有限公司	本人在主要科技创新点 1、2、3、4 的主要贡献为：参与发明专利一种永磁同步直线电机，排名 1；低推力脉动的永磁直线电机，排名 1；一种直驱式外转子回转驱动装置，排名 2；旋转电机的转速和位移测量系统，排名 3；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，排名 2；一种磁浮式门机装置，排名 2。参与论文：高速电主轴永磁电动机参数化设计及有限元分析，排名 2。在本项目投入的工作量占本人工作总量的 50%。
5	傅南红	高级工程师	机械制造及其自动化	宁波长飞亚塑料机械制造有限公司		宁波长飞亚塑料机械制造有限公司	本人在主要科技创新点 4 的主要贡献为：参与发明专利一种电动注塑机的双电机并行注射控制方法，排名 1；以第 2 完成人身份参与了国家科技计划“宁波市数控一代机械产品创新应用示范工程”项目（编号：2014BAF10B00），在本项目投入的工作量占本人工作总量的 40%。
6	吴华江	工程师	电机设计	宁波安信数控技术有限公司		宁波弘讯科技股份有限公司	本人在主要科技创新点 2 的主要贡献为：参与发明专利一种风冷却的电机组合壳体，排名 1；开发了旋转伺服电机的涨套工艺实现了定子内孔涨紧定位和一次装夹，提高了制造精度和一致性。在项目投入的工作量占本人工作总量的 80%。
7	孙凌财	工程师	工业控制系统	宁波弘讯科技股份有限公司	软体部	宁波弘讯科技股份有限公司	本人在主要科技创新点 2 的主要贡献为：参与发明专利一种注塑系统以及一种注塑机，排名 1；以第 2 完成人身份参与了宁波市产业技术创新及成果产业化重大项目“全电式伺服系统关键技术研究及产业化”项目（编号：2013B10043）研制（甬科验字[2017]第 00-69 号），在本项目投入的工作量占本人工作总量的 80%。

8	张杰	高级工程师	机械电子工程	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	先进制造技术研究所	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	本人在主要科技创新点 1、2 的主要贡献为：参与发明专利一种永磁同步直线电机，排名 2；一种直驱式外转子回转驱动装置，排名 4；一种磁浮式门机装置，排名 4；一种内燃永磁直线发电装置，排名 3。参与论文：高速电主轴永磁电动机参数化设计及有限元分析，排名 4。在本项目投入的工作量占本人工作总量的 50%。
9	黄彬彬	高级工程师	机电一体化	深圳红冠机电科技有限公司	研发部	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	本人在主要科技创新点 1、2 的主要贡献为：参与发明专利一种永磁同步直线电机，排名 3；一种直驱式外转子回转驱动装置，排名 1；一种磁浮式门机装置，排名 1；一种内燃永磁直线发电装置，排名 1。在本项目投入的工作量占本人工作总量的 40%。
10	赵飞	研究员	机械电子工程	西安交通大学	机械工程学院	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	本人在主要科技创新点 3 的主要贡献为：参与发明专利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，排名 1。参与论文：Online machining error estimation method of numerical control gear grinding machine tool based on data analysis of internal sensors，排名 1；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，排名 2。在本项目投入的工作量占本人工作总量的 40%。
11	李荣	工程师	电机驱动与控制	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	先进制造技术研究所	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	本人在主要科技创新点 3 的主要贡献为：参与论文直线电动机伺服系统精确自动建模方法研究，排名 6；参与了国家科技计划“宁波市数控一代机械产品创新应用示范工程”项目（编号：2014BAF10B00）；宁波市创新团队：精密驱动控制技术创新团队（编号：2012B82005）项目（甬科验字[2015]第 00-94 号）；国家自然科学基金青年科学基金“永磁直线电机微纳米级运动高速启停振动控制研究”项目（编号：51207158）。在项目投入的工作量占本人工作总量的 80%。

12	舒鑫东	高级工程师	电机驱动与控制	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	先进制造技术研究所	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	本人在主要科技创新点 2、3 的主要贡献为：参与发明专利旋转电机的转速和位移测量系统，排名 4；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，排名 4；一种磁浮式门机装置，排名 7；在项目投入的工作量占本人工作总量的 50%。
13	林井福	工程师	电机设计	宁波安信数控技术有限公司	电机部	宁波安信数控技术有限公司	本人在主要科技创新点 2 的主要贡献为：发明了一种永磁电机的转子铁芯结构，排名 4。在项目投入的工作量占本人工作总量的 50%。

九、完成人合作关系说明

本人为本成果的总体负责人和第一完成人，来自第一完成单位中国科学院宁波材料技术与工程研究所。该项目始于 2012 年 3 月 26 日，止于 2016 年 12 月 31 日，通过国家科技支撑计划：宁波市数控一代机械产品创新应用示范工程（编号：2014BAF10B00）；国家自然科学基金青年基金：永磁直线电机微纳米级运动高速启停振动控制研究（编号：51207158）；宁波市创新团队：精密驱动控制技术创新团队（编号：2012B82005）；宁波市产业技术创新及成果产业化重大项目：全电式伺服系统关键技术研发及产业化（编号：2013B10043）合作，由中国科学院宁波材料技术工程研究所张驰、杨桂林、陈进华、张杰、黄彬彬、赵飞、李荣、舒鑫东（共 8 人）；宁波安信数控技术有限公司吴华江、林井福（共 2 人）；宁波长飞亚塑料机械制造有限公司傅南红（共 1 人）；波弘讯科技股份有限公司孙凌财（共 1 人）；宁波亿文特自动化科技有限公司廖有用（共 1 人）参与完成。

（1）本人作为课题负责人主持了国家科技计划“宁波市数控一代机械产品创新应用示范工程”项目（编号：2014BAF10B00），宁波长飞亚塑料机械制造有限公司傅南红（第 5 完成人），中国科学院宁波材料技术与工程研究所赵飞（第 10 完成人）、廖有用（第 4 完成人）、陈进华（第 3 完成人）、黄彬彬（第 9 完成人）、张杰（第 8 完成人）、舒鑫东（第 12 完成人）、李荣（第 11 完成人）参与了项目。该项目于 2017 年 6 月 9 日，通过了科技部高新技术发展及产业化司验收。宁波安信数控技术有限公司与中国科学院宁波材料技术与工程研究所张驰（第 1 完成人）团队联合组建了“高性能伺服电机系统工程技术中心”，并作为产业化合作单位与中国科学宁波材料技术与工程研究所、海天塑机集团有限公司于 2014 年 3 月 21 日签署了“注塑机用高性能永磁同步电机及其伺服控制系统研发及产业”联合技术开发协议，宁波安信数控技术有限公司吴华江（第 6 完成人）、林井福（第 13 完成人）作为电机设计与制造工艺技术负责人参与了项目合作。本人与廖有用（第 4 完成人）、舒鑫东（第 12 完成人）共同发明了旋转电机的转速和位移测量系统（ZL201210536692.2）；赵飞（第 10 完成人）与廖有用（第 4 完成人）、陈进华（第 3 完成人）、舒鑫东（第 12 完成人）、张驰（第 1 完成人）、杨桂林（第 2 完成人）共同发明了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（ZL201510451333.0）。

（2）本人作为项目负责人主持了国家自然科学基金青年科学基金“永磁直线电机微纳米级运动高速启停振动控制研究”项目（编号：51207158），中国科学院宁波材料技术与工程研究所廖有用（第 4 完成人）、舒鑫东（第 12 完成人）、李荣（第 11 完成人）参与了项目研究工作。

（3）本人作为团队带头人主持了宁波市科技计划项目科技创新团队“精密驱动控制技术创新团队”项目（编号：2012B82005），中国科学院宁波材料技术与工程研究所杨桂林（第 2 完成人）博士作为旗舰型研究员引入团队作为项目第 2 完成人参与项目研究工作，廖有用（第 4 完成人）、陈进华（第 3 完成人）、张杰（第 8 完成人）、赵飞（第 10 完成人）、黄彬彬（第 9 完成人）、舒鑫东（第 12 完成人）、李荣（第 11 完成人）参与了项目研究工作。该项目于 2015 年 12 月 18 日通过宁波市科技局验收。宁波亿文特自动化科技有限公司廖有用（第 4 完成人）与中国科学院宁波材料技术与工程研究所张驰（第 1 完成人）团队于 2014 年 6 月 11 日签署了直驱电机技术开发协议，开展了直驱电机系统的研究与产业化合作。黄彬彬（第 9 完成人）与廖有用（第 4 完成人）、张驰（第 1 完成人）、张杰（第 8 完成人）、舒鑫东（第 12 完成人）共同发明了一种磁浮式门机装置（ZL201210245637.8）；

（4）中国科学院宁波材料技术与工程研究所作为协作单位参与了由宁波弘讯科技

股份有限公司承担的宁波市产业技术创新及成果产业化重大项目“全电式伺服系统关键技术研究及产业化”项目（编号：2013B10043），并签署了“全电式伺服系统关键技术研究及产业化”联合技术开发协议（签署时间：2013年3月18日，合作从项目立项开始算起直至项目结题），宁波弘讯科技股份有限公司孙凌财（第7完成人），中国科学院宁波材料技术与工程研究所杨桂林（第2完成人）、廖有用（第4完成人）、张驰（第1完成人）、赵飞（第10完成人）参与了项目研究工作。该项目于2017年11月17日通过宁波市科技局验收。

（5）廖有用（第4完成人）作为中国科学院宁波材料技术与工程研究所张驰（第1完成人）团队客聘研究员与张杰（第8完成人）、黄彬彬（第9完成人）共同发明了一种永磁同步直线电机（ZL201010290883.6）；张驰（第1完成人）作为主编、廖有用（第4完成人）、陈进华（第3完成人）作为编委、张杰（第8完成人）、黄彬彬（第9完成人）、赵飞（第10完成人）、李荣（第11完成人）作为参编人员共同出版了“新型稀土永磁材料与永磁电机”学术专著。陈进华（第3完成人）、廖有用（第4完成人）、张驰（第1完成人）共同发表了“论文 Bread-Loaf 型磁钢的永磁电机气隙磁场计算与参数分析。”

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果	证明材料编号	备注
1	共同专利	廖有用(4)、张杰(8人)、黄彬彬(9)	2010-2012	一种永磁同步直线电机	ZL201010290883.6	
2	共同专利	张驰(1)、廖有用(4)、舒鑫东(12)	2012-2017	旋转电机的转速和位移测量系统	ZL201210536692.2	
3	共同专利	赵飞(10)与廖有用(4)、陈进华(3)、舒鑫东(12)、张驰(1)、杨桂林(2人)	2015-2017	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	ZL201510451333.0	
4	共同专利	黄彬彬(9)、廖有用(4)、张驰(1)、张杰(8)、舒鑫东(12)	201-2015	一种磁浮式门机装置	ZL201210245637.8	
5	共同著者	张驰(1)、廖有用(4人)、陈进华(3)、张杰(8)、黄彬彬(9)、赵飞(10)、李荣(11)	2010-2014	新型稀土永磁材料与永磁电机	ISBN 978-7-03-042104-3	
6	共同著者	陈进华(3)、廖有用(4)、张驰(1)	2015-2017	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45卷 22-27	
7	共同立项	傅南红(5)、赵飞(10)、廖有用(4)、陈进华(3)、黄彬彬(9)、张杰(8)、	2014-2016	宁波市数控一代机械产品创新应用示范工程	2014BAF10B00	

		舒鑫东 (12)、李荣 (11)				
8	共同立项	张驰 (1)、廖有用 (4)、舒鑫东 (12)、李荣 (11)	2013-2015	永磁直线电机微纳米级运动高速启停振动控制研究	51207158	
9	共同立项	张驰 (1)、杨桂林 (2)、廖有用 (4)、陈进华 (3)、张杰 (8)、赵飞 (10)、黄彬彬 (9)、舒鑫东 (12)、李荣 (11)	2013-2015	精密驱动控制技术创新团队	2012B82005	
10	共同立项	孙凌财 (7)、杨桂林 (2)、廖有用 (4)、张驰 (1)、赵飞 (10)	2013-2016	全电式伺服系统关键技术研究及产业化	2013B10043	

十、主要完成单位情况:

排名	单位名称	对本项目科技创新和推广应用支撑作用情况
1	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	本单位作为本项目第一完成单位承担了国家自然科学基金青年基金：永磁直线电机微纳米级运动高速启停振动控制研究（编号：51207158）；宁波市新团队：精密驱动控制技术创新团队（编号：2012B82005）项目；国家科技支撑计划：宁波市数控一代机械产品创新应用示范工程（编号：2014BAF10B00），参与了宁波市产业技术创新及成果产业化重大项目：全电式伺服系统关键技术研发及产业化（编号：2013B10043）项目，完成了精密永磁伺服电机与控制关键技术及其应用；本项目共授权发明专利 16 项，其他知识产权 12 项，与宁波安信数控技术有限公司等公司产学研合作，近三年项目已实现直接经济效益近 25 亿元，新增利税近 5.5 亿元，经济效益和社会效益显著。

2	宁波安信数控技术有限公司	<p>本单位与中国科学院宁波材料技术与工程研究所组建了“高性能永磁同步电机及其伺服控制系统工程技术中心”，开展了电机制造工艺技术与项目技术产业化研究；发明了一种风冷却的电机组合壳体以及一种永磁电机的转子铁芯结构，开发了旋转伺服电机的涨套工艺实现了定子内孔涨紧定位和一次装夹，提高了制造精度和一致性。形成 18、25、30 三大系列高响应高精度高速中大型伺服电机产品，功率范围覆盖 7.5kW-110kW，额定转速范围覆盖 1000rpm-3000rpm，转矩 10-1000Nm，应用于伺服节能注塑机和全电动注塑机的预塑化、开合模、注射、顶出、模厚调节等注塑机各大机构。近三年，已销售该系列产品 1.6 万余台，销售收入 15 亿余元(不含税)，净利润近 3 亿元。</p>
3	宁波长飞亚塑料机械制造有限公司	<p>本单位参与了国家科技计划“宁波市数控一代机械产品创新应用示范工程”项目，采用项目交流永磁伺服电机执行机构高性能动态响应系统、超高速动态响应运行机构、超高速动态响应控制系统，开发高度数控化的全电动塑料注射成型装备。发明了一种电动注塑机的双电机并行注射控制方法以及一种注塑机的喷嘴接触力控制系统，将伺服电机、驱动器及数控系统等数控化核心部件在注塑机上进行集成应用并推广示范，向全国相关行业进行推广，提高我国机械装备数控化水平，促进产业升级，近三年，项目 ZE 系列塑料注射成型机实现销售收入近 8.3 亿元，新增利税 1.2 亿元。</p>
4	宁波弘讯科技股份有限公司	<p>本单位承担了宁波市产业技术创新及成果产业化重大项目“全电式伺服系统关键技术研究及产业化”项目（编号：2013B10043），并与中国科学院宁波材料技术与工程研究所签署了“全电式伺服系统关键技术研究及产业化”联合技术开发协议，共同完成了采用带独立电源模块的伺服驱动和高速高精度运动控制技术研究，使得系统具备快速响应的精密转速控制与定位控制功能，同时实现系统高精度和同步控制；采用基于 profinet 总线的集散式控制系统，保证了系统控制算法的执行速度，提高了整个系统的精度。近三年，项目伺服控制系统与注塑机控制器共销售 8904 套，新增销售收入 12221.35 万元，</p>

		新增利税 450 多万元。
5	宁波亿文特自动化科技有限公司	<p>本单位作为项目参与单位，与中科院宁波材料所进行了直驱电机技术研发合作，发明了低推力脉动的永磁直线电机及一种无铁芯的直线电机，项目直驱电机及高速高精运动平台作为高端自动化装备的先进驱动解决方案，应用于高端数控加工机床、集成电路制造、高端智能检测设备、高速机器人、物流设备、纺织设备等领域，近三年，应用本项目技术生产的直线电机、力矩电机和运动平台，共销售 5045 台，主要应用于高精度 PCB 钻孔机、激光切割机等产品，项目直线电机已经替代美国 kollmorgen 和德国 Bobolowski 同类产品，在维嘉数控全线性数控 PCB 加工设备中使用，X/Y/Z 轴重复定位精度在 3um 以下，表现出高精度高效率、低能耗的显著优势，为我公司创造了显著的经济效益。</p>