

滚动功能部件发展现状、差距及重大专项研究进展

南京理工大学机械工程学院 冯虎田



冯虎田，1965年2月生，男，工学博士，南京理工大学机械工程学院教授，博导。国家科技重大专项“高档数控机床滚动功能部件共性技术研发”课题组组长，国家科技重大专项“高档数控机床与基础制造装备”总体组滚动功能部件责任专家，滚动功能部件技术研发与检测中心主任。中国机床工具工业协会滚动功能部件分会理事，江苏省系统工程学会可靠性专业委员会秘书长，2013年度全国机械工业先进工作者。获江苏省科技进步二等奖3项，南京市科技进步二等奖2项，国防科工委优秀软件奖2项，江苏省科技进步三等奖1项，国防科学技术三等奖1项，申请与授权发明专利、软件著作权等35件，专著2部，教材1部，发表相关研究论文100余篇。

行业发展现状

近十多年来我国滚动功能部件产业有较快发展，但与当今世界先进工业国家水平相比，依然差距明显，行业长期积累深层次矛盾日益凸显。目前，国产滚动功能部件的产品水平、可靠性、成本价格、交货期等与国外产品比较还存在着差

距，主要问题是产业基础薄弱，企业规模和实力、产品的功能、性能等与国际知名品牌企业的差距均很大。

与此对比，中国台湾上银、银泰集团成立仅仅十几年，但在当地政府和银行的支持下，发展迅猛，2012年产值分别达到150亿台币、

40亿台币，大于目前大陆滚动功能部件产值的总和。台湾地区的龙头企业生产规模大，信息化管理水平高，以大规模集约化制造的成本和速度，提供全方位满足用户个性化需要的众多系列产品；同时，在工艺上，装备数控化率高、生产效率高、产品质量稳定，并且拥有先进的检测仪器和产品性能试验设备，为批量生产的产品和新产品的研发提供品质保证，用检测数据和性能对比曲线取信用户。台湾同行本来的税赋就大大低于我们，ECFA正式实施，更增强了台湾地区滚动功能部件竞争力，给大陆正在蓬勃发展中的滚动功能部件行业带来巨大压力。

实际上，造成国内行业规模 and 成本处于劣势背后的真正原因是我们缺乏规模化生产关键基础技术研究，境外同行在关键零件精密加工工艺稳定性、在线自动化检测、零部件互换性、精密高效装配等基础性关键技术研究及其专业化设备研发应用方面已经远远走在我们前面，并以此形成了全新规模化生产模式。就目前滚动功能部件行业形势而言，国产滚动丝杠副及直线导轨副生产经营形势实在是不容乐观，THK、NSK、Rexroth等国际著名品牌为了更加贴近中国市场，加快交货周期，已相继计划或

已在国内设厂，他们打着进口品牌美誉度大举进攻国内市场。此外还有HIWIN、AMT、SKF、STAF、CPC等中国台湾品牌大规模专业化生产，对中国大陆市场造成很大冲击，还有中国台湾在青岛设厂，如TBI等品牌以极低价格的竞争，对国产品牌形成了极大压力；在这种环境下，除了各企业做好细化管理，降低成本，加大力度，提高产品水平等工作外，还是希望国家在未来的几年里能进一步加大对国产功能部件的支持力度。

主要技术差距

1. 综合性能稳定性、精度保持性差是用户反映的第一表征

数控机床对滚珠丝杠和直线导轨的要求主要侧重在定位精度、重复定位精度、系统综合刚度、对CNC指令的灵敏度及运动的平稳性等方面。通过国家科技重大专项对主机厂的调研，统计分析滚珠丝杠副“疲劳寿命”问题出现很少，反应最多的是精度保持性差，即稳定性差。最近4年通过国家科技重大专项的课题支持，南京工艺、汉江机床、山东博特、大连高金、广东凯特等骨干企业已对此有深刻认识，并结合重大专项采取针对性措施加以深层次的试验研究，目前精度保持性指标确定为3 000h，功能可靠性MTBF大于4 000h，此目标实现还需以时日。

重大专项实施至今，取得阶段性成果，具体可表述为：中档主机市场——精密、高速、重载滚珠丝杠副与直线导轨副各项性能指标可满足用户需求，可大批量替代进口，但大批量生产制造的一致性与质量稳定性上有一定差距。高端主

机市场——精密滚珠丝杠副与直线导轨副可批量应用，在精度保持性上有差距；高速滚珠丝杠副与直线导轨副可批量应用，在噪声、温升性能指标上有一定差距；重载滚珠丝杠副与直线导轨副，在动静载荷、寿命上可满足用户要求，可完全替代进口。

2. 摩擦力（矩）波动大、预紧力过早丧失，是技术研发的第一瓶颈

解决摩擦力（矩）波动大、预紧力过早丧失问题，用户满意度会大幅度提升。通过试验及用户反馈，预紧力过早丧失，使得原有的综合刚性下降，定位精度、反向间隙加大，使得用户失去信心。设计方面：应充分考虑产品不同工况使用条件下，主要设计参数对产品性能影响，如载荷大小、速度及加速度变化对接触区滚珠运动及受力影响，反向结构形式及主要结构参数、出入口联接型线等。加工制造方面：关键加工工艺保证主要几何精度及其稳定性，表面加工质量提高，控制产品质量。

3. 一致性制造的装备、工艺及管理水平低，是批量供货的第一要害

生产流程中的关键工序实现CNC化是实现一致化制造的必要条件，包括CNC车削中心、CNC丝杠磨床、CNC内螺纹磨削中心、CNC中频淬火设备等。大力开展满足尺寸稳定性、可靠性、易成形性和生产效率要求的新材料及热加工工艺及其装备开发，从冷热工艺入手严格控制产品内在质量。首先要严格控制原材料品质，其次要在冷热加工全过程实施“小变形无裂纹”工艺。引进并消化吸收“CNC精密旋

风硬铣削”、“CNC精密硬车削”技术，装备国产化使P3级以下实现以铣代磨、以车代磨，加强精密装配的规范化、精细化管理，使质量管理体系与可靠性保障体系有机结合。

4. 技术支持用户不够、集成应用研究不足，是需要补齐的第一功课

使用与安装方面集成应用研究不足。开发高速、高精度、高可靠性进给单元，将各滚动功能部件结合为一体，研究其相互之间的耦合特性技术、结构设计及应用实现技术。通过功能部件工作原理、机理、力学等基础研究，完善产品设计选型基础理论体系；通过功能部件优化设计、参数设计结合动态设计、可靠性设计等理论及方法，开发功能部件设计选型软件；制定功能部件应用安装规范及验收标准，通过试验台及产品现场验证试验，完善型谱，促进功能部件批量应用。

重大专项研究进展

国家从2009年开始启动了“国家科技重大专项项目（课题）攻关”活动以来，在这个行业重大技术攻关课题中投入了巨大资金扶持，体现了国家对加快这个行业发展，尽快缩短与国外先进同行产品技术差距的高度重视，是对滚动功能部件行业的激励和鞭策。重大专项实施，有效引导和聚集企业创造条件积极承担专项项目，参与重大专项课题攻关和研究，对带动行业定向发展产生积极意义。这一开创性工作自实施以来，在我国机床行业形成了共性技术、功能部件与整机之间研究成果交叉运用的产业技

术研发开放环境,作为高档数控机床配套的滚动功能部件研发也取得了一定进展,为与主机的全面配套奠定了基础。2009~2013年,南京工艺、汉江机床、山东博特、大连高金、广东凯特分别承担重大专项关于滚动功能部件的关键技术攻关、产品及产业化技术研发,沈阳机床、大连机床承担示范应用技术研发,南京理工大学负责共性技术研发,共设课题13项。目前除2009年立项4个课题完成课题验收外,其余课题目前处于研究进展当中。

1. 阶段性成果

通过国家重大专项支持,共性技术得到高度重视,取得一系列阶段性成果。

国家科技重大专项专项办、总体组高度重视共性技术研究的重要性,南京理工大学牵头联合南京工艺、汉江机床、山东博特、大连高金、广东凯特、北京机电院、国家机床质量监督检验中心等骨干企业联合攻关“滚动功能部件共性技术研发”。采取“产、学、研、用”相结合方式促进高档产品开发与推广应用。通过“研发—性能试验—试用—改进提高—完善定型”这样的过程逐步实现自主化。在滚动摩擦理论、力矩特性、动静刚度特性、高速和微动时的动态摩擦特性、滚动体在不同工况下的运动机理、振动与噪声、可靠性试验与评估技术、标准制定等多方面踏踏实实地做一些试验研究,重点解决行业内各企业存在的共性技术问题。南京理工大学共性技术研究内容主要体现在:

(1) 精度衰退、摩擦磨损机理和耐磨性设计方法。

(2) 结合使用条件的接触刚

度、轴系综合刚度分析、试验和高刚度设计。

(3) 抗疲劳耐磨损的材料优选。

(4) 关键功能部件制造工艺一致性 & 互换性。

(5) 预紧结构优化及预防预紧力丧失的方法。

(6) 高速高加速性能的结构优化设计。

(7) 基于减少热变形的冷却结构设计及措施。

(8) 高性能及高寿命的润滑方法。

(9) 滚珠丝杠副传动效率试验方法。

(10) 快速设计方法。

课题组联合多家龙头企业、主机企业,联合制定了13项国家及行业标准:《滚动功能部件可靠性术语和符号》,《滚动丝杠副可靠性试验规范》,《滚动丝杠副精度保持性试验规范》,《滚动丝杠副性能试验规范》,《滚动丝杠副额定动载荷及疲劳寿命试验规范》,《滚珠丝杠副摩擦力矩试验规范》,《滚珠丝杠副静刚度试验规范》,《滚动直线导轨副可靠性试验规范》,《滚动直线导轨副精度保持性试验规范》,《滚动直线导轨副性能试验规范》,《滚动直线导轨副额定动载荷及疲劳寿命试验规范》,《滚动直线导轨副静刚度试验规范》,《滚动直线导轨副摩擦力试验规范》。申请与获批31项发明及实用新型专利,出版专著《滚珠丝杠副综合性能测量方法与技术》、《滚珠丝杠副动力学与设计基础》。

南京理工大学在张家港设立精密滚动功能部件检试基地,试验区

面积2 000m²,自主研发、定制大批检测仪器及试验设备,共计23台套,试验区分为材料磨损及疲劳试验区、精度保持性试验区、综合性能与精度检测区、可靠性与寿命试验区、动静刚度试验区、型面误差检测区等6个区域。检试基地可对精密滚动功能部件进行型面误差与动态行程误差检测、综合性能检测、材料磨损及疲劳基础试验、动静刚度及额定静载荷试验与检测、精度保持性试验与检测、可靠性试验及检测、寿命及额定动载荷试验及检测、冷却润滑试验、摩擦力(矩)检测等,体系完善、配套齐全,是国内精密滚动功能部件试验、检测服务基地与平台。目前研究进展顺利,有望在多个方面取得共性技术成果,服务全行业,提升行业自主创新能力和体系建设,建立人才培养机制,实现共性技术辐射。研究批量生产的制造技术和装备,整体上提高产品的精度和性能,推动国产功能部件应用,尽快扭转中高档滚动功能部件长期依赖进口受制于人的局面。

2. 设计制造水平提高

通过国家重大专项实施以及对滚动功能部件行业龙头企业的支持和投入,使我国滚动功能部件企业的设计水平、试验条件、制造水平及能力等软硬件上有了较大提高。

通过国家重大专项实施以及对滚动功能部件行业和加工主机的支持和投入,使我国各滚动功能部件企业的设计水平、试验条件、制造水平及能力有了较大提高。

5个龙头企业,重视基础应用理论、基础制造技术、试验台的研制及产业化关键技术研究,重视产品的三维动态设计、优化设计、可靠

性设计,设计水平和硬件条件均有大幅度改善;相继建立产品研发的试验室或试验中心,试验硬件条件明显提升,每家均增加10台套以上的产品研发试验仪器及试验设备。如:汉江机床在建成汉江滚动功能部件性能实验室基础上,正在规划新的科研车间及试验中心。南京工艺在新厂区规划建设几千平方米的试验中心,在原有试验与检测设备基础上,新增配套多台试验设备与检测仪器。山东博特在原有3 000m²试验中心的试验设备基础上,新增多台试验与检测设备。大连高金自主研发多台丝杠与导轨的综合性能检测设备。广东凯特自主研发了“导轨磨床专用动态检测仪、滑块综合精度检测机、高速导轨寿命试验机、重型刚度试验机、导轨副综合运动精度检测机、导轨副动摩擦力检测机、导轨副振动噪声试验机”等导轨副试验、检测设备。5家企业,有望形成系列化配套齐全的试验检测设备,大大丰富检测与试验手段,为新产品研发创造良好的硬件基础条件。

另外,南京工艺、汉江机床、山东博特利用专项资金,每家均新增几十台数控加工设备,生产能力大幅度提升。如南京工艺将新增38台居国际或国内先进水平的滚动功能部件研发制造、检测与试验装备,建成具有先进水平的高速、重载、精密滚珠丝杠高效生产线和滚动导轨高效专业化生产线,促进高档滚动功能部件产业化。

在上述硬件条件建设的基础上,5个龙头企业重视产品研发的关键技术攻关,产学研用相结合,建立稳定的研发队伍,在知识产权、规范与标准、专有技术等多方面取

得了阶段性成果。

3. 在主机厂成批应用

通过国家重大专项实施,课题新产品在主机厂及高端市场得到成批应用,取得可喜成果,初显成效,相信随着课题研究向深度及广度扩展,坚信成果会更加喜人。

(1) 课题研制的大型、重型新产品替代进口,取得可喜成果。汉江机床GQ161.5×40重型滚珠丝杠副,该丝杠副用户要求额定动载203t,额定静载879t,垂直安装,应用于汽车制造行业的冲压机床。为满足用户使用及承载要求,该丝杠采用中径为161.5mm,导程40mm,钢球φ30mm,使用的钢球直径是目前国内之最。随着钢球的增大,淬硬层深度要求较深,给加工工艺及热处理工艺带来了较大难度。经过多次加工工艺及淬火试验,利用先进淬火设备,保证淬硬层深度,最终克服了在技术和加工设备方面困难,成功研制出该重型滚珠丝杠副。

汉江机床为2013年主机厂参展新产品配套滚动功能部件,如青海华鼎重型机床公司研发的DLC-25GA铁路专用机床、CKA8013B铁路专用机床、DLC-15G铁路专用机床,秦川机床研发的YK7230数控磨齿机,宝鸡机床研发的CK7620P数控车床,宁夏新瑞长城机床公司研发的LS12数控车床、LG63T全功能数控车床,重庆机床研发的Y3120数控滚齿机,重庆九原机械公司研发的V635立式数控铣床,重庆宏钢机床公司研发的CX63/40L数控车床,天津北闸口仪表机床厂研发的CK6150Z数控车床等。

此外,汉江机床还为成飞、西

飞的高端进口设备提供专项的替代新产品,与北京机电院、安阳鑫盛、中卫大河、天水机床等签订了项目合作协议,项目产品高速、重载、精密滚动功能部件将同时在这4家国内著名的主机厂家进行应用验证,形成应用示范。

(2) 课题研制的精密、高速新产品在主机高端市场得到成批应用。南京工艺与沈阳机床股份有限公司中捷立式加工中心事业部、齐重数控装备股份有限公司、齐齐哈尔二机床(集团)有限责任公司、南京二机齿轮机床有限公司签订了项目合作协议,项目产品高速、重载、精密滚动功能部件将同时在这4家国内著名的主机厂家进行应用验证,形成应用示范。

为沈阳机床承担国家科技重大专项课题《卧式精密加工中心》HMS125P提供7套滚珠丝杠副、6套滚动导轨副配套;为中捷机床国家科技重大专项课题《五轴联动加工中心》GMC1230U提供3套滚珠丝杠、6套滚动导轨副配套;为沈阳机床国家科技重大专项课题《高速龙门五轴加工中心》GMC2550u提供2套滚珠丝杠副、11套滚动导轨副配套;为四川长征机床国家科技重大专项课题《高速龙门五轴加工中心》GMC2500H/2X60A提供1套滚珠丝杠副、8套滚动导轨副配套。同时课题产品为主机厂配套如下:武汉重型机床TK6916AS落地镗床主轴箱Y轴定位系统,CH5116、CH5231、CKD5240数控立式车床,CK5235双柱重型数控立式车床;德州德隆(集团)机床有限责任公司ZXK2103A数控深孔钻床三坐标轴定位系统;齐二机床CK5225M数控双柱立式车床;无锡机床MK8450数

控轧辊磨床；桂林机床XK2320数控龙门铣床；无锡市飞象精密机床制造有限公司M11200宽砂轮无心磨；宜昌长机科技有限责任公司齿轮机床等。

截止目前，课题开发的新产品已为沈阳机床股份有限公司HTC40n型高速车削中心、VMC850e精密立式加工中心等机床提供9 620套产品配套，为齐重数控精密立车提供74套产品配套，为齐齐哈尔二机床(集团)有限责任公司的精密镗床等提供276套产品配套，为南京二机齿轮机床有限公司的齿轮机床提供210套产品配套，为四川普什宁江机床有限公司精密卧式加工中心、精密滚齿机提供1 001套产品配套，为青海一机数控机床有限责任公司精密卧式加工中心提供711套产品配套。

(3) 产品转型升级，在数控机床得到推广应用。山东博特完成高速精密滚珠丝杠副KD4016×2200、KD4020×2450，高速重载直线导轨副LZG45KL2F22、LZG55KL2F22和LZG65KL2F22的批量生产，精度测试指标基本达到任务书要求，各类新产品200余套，目前正根据已经完成的试验结果进一步完善制造工艺、提高加工和装配精度，加快产业化步伐，扩大新产品的实际应用。新产品在昆明机床、济南二机床、沈阳机床高档数控机床上推广使用，效果良好。大连高金开发的三维外循环滚珠丝杠副4016、5512，端侧循环滚珠丝杠副32~55，导程12mm、16mm、20mm高速重载滚珠丝杠副6316、8016，LR35滚柱直线导轨副，LR45、LR55、LR65、LR85滚柱直线导轨副，LRZ35及LRZ45自润滑滚柱直

线导轨副，大批量应用于大连机床的加工中心及数控车床中。

(4) 质量稳定性和可靠性满足中高档数控机床配套要求，可以替代同类进口产品。广东凯特在重大专项研究课题指引下，启动“重载、高速、高精滚柱直线导轨副的研制开发项目”，完成了滚柱直线导轨副LGR25、30、35、45、55、65、100等7大系列各种型号规格产品的研究开发，形成了年产50km的重载、高速、高精滚柱直线导轨副生产规模。

通过专项项目开展，所研发的滚柱直线导轨副成功地达到重大专项规定的各项技术指标，其中产品的运动精度可以批量达到国内最高级1级、国际标准P3级，最高速度达到90~120m/min，最高加速度1~2g。产品的质量稳定性和可靠性完全满足中高档数控机床的配套技术要求，可以全面替代同类进口产品。

(5) 可靠性明显提升，为军工、高铁行业提供大量配套。南京工艺为南京14所提供批量配套、为常州

南翔某飞机提供批量配套、为北京控制工程研究所提供批量配套、为我国某潜艇提供核反应堆阀门配套等等，可靠性明显提升，2009年至今未发生故障。

汉江机床开发用于高速铁路“转辙机滚珠丝杠副”，经过120万次无故障运行，其使用寿命超过国外同类产品，成为高铁项目替代进口首选，这是该公司继研发CNC10m超长丝杠磨床和CNC长行程旋风铣床并向市场推出10m超长大型滚珠丝杠之后，向“大、精、高”方向迈出了一大步。

山东博特在重载行星滚柱丝杠副方面取得突破，有效替代进口，目前在坦克、导弹发射架等军工方面得到了应用。通过专项实施对返向结构及曲线进一步优化，提高循环回路流畅性，产品柔顺性得到进一步提高，成功研制开发了多款微型丝杠产品，用于运-20、坦克瞄准系统等相关军工产品。MW

(收稿日期：20140103)

机械工业增加值增速逐季小幅提高

2013年1~11月机械工业与全国工业大体一致，实现了“缓慢回升、温和增长、平稳发展”。预计2013年机械工业经济运行速度高于2012年。其中：产销增速预计高于12%；利润增幅预计高于产销增幅；出口创汇额增幅预计在5%左右。展望2014年，行业有望继续保持平稳发展态势。

机械工业增加值增速逐季小幅提高。进入四季度，机械工业增加值增速已经连续3个月高于全国工业。1~11月机械工业增加值增速10.7%，高于全国工业1个百分点，11月当月13.9%，高于全国工业3.9个百分点。64种主要产品中近60%的产品产量增长，在国家统计局公布的64种机械工业主要产品中，1~11月产量实现同比增长的产品40种，占比为52.5%，产量同比下降的产品24种，占比为37.5%。1~10月主营业务收入与利润增幅比较看，主营业务收入增长13.04%，利润增长15.14%，1~10月利润增速比上年同期加快11.44个百分点，主营业务收入比上年同期加快3.71个百分点。