

2020 年度湖南省科学技术进步奖拟提名公示项目

一、项目名称：超紧凑型大兆瓦级风电主齿轮箱设计制造技术及其推广应用

二、申报单位：湖南南方宇航高精传动有限公司、湘潭大学

三、提名单位意见

目前，国内优质风资源越来越匮乏，风电市场逐步向大兆瓦，功率密集型方向发展，且在新的陆上风电标杆电价调整方案出台后，低风速区域风电场的投资价值问题凸显。因此，现有风电市场对大兆瓦、高效率、小体积、低重量的风电机组的需求日益迫切，而风电齿轮箱传动系统中许多关键传动技术被国外长期垄断，我国风电传动发展领域的传动设备不得不依赖进口。

该项目组运用理论分析、模拟与试验研究相结合的方法，经过多年的研究，成功研制了超紧凑型大兆瓦级风电主齿轮箱，取得了以下关键技术突破：（一）无主轴传动链技术；（二）风电主齿轮箱关键零部件高效加工技术；（三）变截面柔性销轴行星均载设计技术；（四）大尺寸迷宫密封技术。本项目开展以来相关成果出版专著 1 部，授权发明专利 13 项，授权实用新型专利 5 项，实审发明专利 4 项，在国内外公开发表学术论文 35 篇，登记软件著作权 4 项，已形成了具有自主知识产权的成套技术，相关技术成果于 2018 年通过专家技术鉴定。该项目成果超紧凑型大兆瓦级风电主齿轮箱市场占有率达到 60% 以上，累计有 700 余台该型齿轮箱交付客户使用，其中有 500 余台已在风场完成吊装并发电，近三年累计交付 571 台，实现销售收入 10 亿元。2020 年在受疫情影响的情况下，客户年订单量仍已超过 1300 台，截止到 2020 年 4 月底已完成销售收入 3 亿元，预计整年能交付 1000 台，实现销售收入 18 亿元。

综上，该项目总体技术独特，成果创新突出，在超紧凑型大兆瓦级风电主齿轮箱的结构设计和关键零部件高效加工等方面取得了重大的技术突破，打破了风电传动行业相关关键技术国外垄断的局面，产生了很好的经济效益，在提高风电主齿轮箱技术装备研发制造水平和环境保护方面做出了重大贡献。

同意提名湖南省科学技术进步一等奖。

四、项目简介

国内风电市场经过近几年的发展,已经逐步向大兆瓦、功率密集型方向发展。针对超低风速、山地区域特有的气候、风况、地形条件等自然环境特征,要在现有风电场投资经济模型下实现风电场的预期收益,必须使用大兆瓦、高效率、小体积、低重量的风电机组,因此开展超紧凑型大兆瓦级主齿轮箱的研制具有重要的科技、环保与现实意义。然而风电齿轮箱传动系统中许多关键传动技术和高效加工技术被国外长期垄断,导致我国风电传动领域的关键设备不得不依赖进口,也制约着我国在工程机械、燃气轮机、轨道交通等领域传动系统的发展。

针对风电产品市场发展需求,本项目运用理论分析、模拟与试验研究相结合的方法,经过多年的研究,成功研制了新一代超紧凑型大兆瓦级风电主齿轮箱,开展了设计、制造、工艺、试验等技术研究,形成了成套技术规范,重点突破无主轴传动链超紧凑结构设计、关键零部件高效加工技术、柔性销均载设计制造与装配技术、大尺寸迷宫密封等技术。与传统风电齿轮相比,本项目研制的风电齿轮箱具有传动结构新颖、集成度高、功率密度高、轴向尺寸小、重量轻、传动效率高等特点,填补了国内空白。主要技术创新和突破如下:

(一) 无主轴传动链技术

针对风电市场对于超紧凑型主齿轮箱的迫切需求,提出了新型无主轴传动链结构,取消风电传动链结构中用于传动的主轴结构,将轮毂直接与输入行星架相连,行星架支撑在一个大锥角的圆锥滚子轴承上,该轴承作为主轴轴承,承受风轮产生的所有载荷,发电机与齿轮箱集成为一体。应用这种结构方式的 3MW 主齿轮箱总重量仅 26.9 吨,相比同级别双馈机型重量轻 10%左右,传动效率超过 98.5%,比双馈机型高 1%以上,实现了低速重载工况下的高效传动和高可靠性。

(二) 关键零部件高效加工技术

风电系统主齿轮箱中主要关键零部件有轴类零件、齿轮类零件及箱体类零件等,这些关键零部件对于表面精度和表面形貌状态的要求很高。传统切削加工中存在加工温度过高、磨削力过大等问题,使得工件表层极易产生烧伤、裂纹和热变形等现象,严重影响材料的加工表面质量。针对上述问题,本项目开发了预应力车削技术来控制工件加工表层的残余应力状态,提高疲劳强度;研发了自冷却加工车削技术和加压内冷却磨削技术,强化加工过程中的换热、降低加工温度,提高工件表面精度和刀具及砂轮的使用寿命。

（三）变截面柔性销轴行星均载设计

本项目提出了提出变截面柔性销轴新型结构，柔性销的设计是采用将行星齿轮安装在一个柔性的行星销轴上来达到行星齿轮之间载荷的均匀分配。与一般的刚性销轴不同的是，每个柔性销随着自身传递载荷的大小在圆周方向独立地平移，并且通过销轴及销轴套的组合变形保证行星轮轴线与齿圈和太阳轮轴线平行，使行星齿轮之间载荷的实现自适应调整，达到均载的效果。该技术解决了多行星轮传动结构均载的问题，均载系数达 1.06，保证了柔性销轴在受力过程中利用其平移变形的特性，实现多行星轮受载均匀和运行平稳。

（四）大尺寸迷宫密封技术

传统的风电齿轮箱采用迷宫密封技术，其密封直径不大于 1000mm，设计技术成熟，但是对于超紧凑型大兆瓦级风电齿轮箱，采用大锥角双列圆锥滚子轴承后，密封直径达到 2000mm 以上，这就给迷宫密封件的设计、加工与装配带来了难度。本技术创新设计了三道特殊结构的迷宫密封，攻克了大直径迷宫密封设计与制造技术，保证了在恶劣环境下风电齿轮箱的可靠密封。

本项目开展以来相关成果出版专著 1 部，授权发明专利 13 项，授权实用新型专利 5 项，实审发明专利 4 项，在国内外公开发表学术论文 35 篇，登记软件著作权 4 项，已形成了具有自主知识产权的成套技术，相关技术成果与 2018 年通过专家技术鉴定。本项目成果超紧凑型大兆瓦级风电主齿轮箱市场占有率达到 60%以上，累计有 700 余台该型齿轮箱交付客户使用，其中有 500 余台已在风场完成吊装并发电，近三年累计交付 571 台，实现销售收入 10 亿元。2020 年在受疫情影响的情况下，客户年订单量仍已超过 1300 台，截止到 2020 年 4 月底已完成销售收入 3 亿元，预计整年能交付 1000 台，实现销售收入 18 亿元。

五、客观评价

1、技术成果获得国家权威部门的鉴定

取得了中国航空发动机集团组织国防科学技术成果鉴定，鉴定意见如下：独创设计了无主轴传动结构，研制了超紧凑型风电主齿轮箱，实现了低速重载工况下的高效传动，运行平稳、可靠性高；提出变截面柔性销轴新型结构，解决了多行星轮传动均载的难题，均载系数达到 1.06，保证了柔性销轴在受力过程中变形协调，实现多行星轮均匀受载；创新设计了三道迷宫密封，攻克了大直径迷宫密

封设计与制造技术，保证了在恶劣环境下可靠密封；本项目技术复杂、难度大，拥有自主知识产权，总体技术达到国际先进水平；该项目完全自主可控，产品已经实现批量化生产应用，具有显著的经济和社会效益。

2、技术成果通过权威机构认证

本项目研制的超紧凑型风电主齿轮箱分别通过了德国船级社的 DNV GL 认证证书和北京鉴衡认证，并获得了型式认证证书。其中，超紧凑型 3MW 齿轮箱在已获得的 DNV GL 基于 IEC 标准型认证基础上，根据国标要求对其展开严格的设计评估、制造能力评估及型式试验报告审核等认证流程，最终又通过了鉴衡认证，这表明本项目研制的超紧凑型机型能完全符合 IEC 标准及中国国家标准。

3、性能检测

本项目产品在湖南南方宇航高精传动有限公司的背靠背功率封闭型式传动试验台进行试验。型式试验结果显示，风电主齿轮箱各项性能指标均满足试验技术要求，拆解检查，齿轮箱各零部件正常，齿轮啮合痕迹符合设计要求。试验结果表明，风电主齿轮箱满足明阳风电“风力发电机组齿轮箱技术规范”规定的技术要求，该型风电主增速箱通过了出厂试验验证。

4、用户评价

本项目研制生产的超紧凑型大兆瓦级主齿轮箱至 2016 年 1 月起已经在明阳智慧能源集团股份有限公司正式应用，累计有 700 余台该型齿轮箱交付客户使用，其中有 500 余台已在风场完成吊装并发电。该公司评价“通过风场试运行与传动机型对比，该机型发电效率高、机组吊装方便，创造了较为可观的经济效益”。

六、推广应用情况

当前，省委、省政府已将新型制造业列为我省十四个重点发展产业，因此，本项目将是落实省委、省政府的重大举措，在项目开发上将以自主化设计为主，吸收、学习国外先进技术，进行再创新设计。项目采用“产-学-研”的研发方式，充分利用国内先进技术力量和资源，与广东明阳风电产业集团有限公司进行技术合作、自主设计、自主采购，将带动湖南省传动产业链上的机械制造、金属材料、自动控制等 20 多种产业的发展。本项目开发成果的技术延伸可以迅速覆盖轨道交通与工程机械等装备制造业所需的传动系统部件与总成，将为湖南省的新能源风电装备制造业提供极具竞争力的零部件，改变目前受国际零部件制造企业的局

面，从技术、成本、服务等方面提升湖南省装备制造业的市场竞争力。

该项目充分运用公司在航空传动的先进设计、分析、制造、试验技术和经验，开发无主轴传动技术、关键零部件高效加工技术、柔性销行星均载技术、柔性销制造技术等航空传动关键技术、大齿轮迷宫密封技术等，研制出高可靠性、长寿命的 3MW、5MW、7MW 级风电齿轮增速箱传动系统，并以此为技术基础，为未来发展更大机型提供了技术支撑，打破了国外对国内的技术壁垒，实现了风电产业的跨越式发展和产业化的目标，促进了我国风电新能源产业的可持续发展。

该项目使公司成为中国紧凑型风电齿轮箱领军者，引领国内风电产业的发展方向。项目成果超紧凑型大兆瓦级风电主齿轮箱市场占有率达到 60%以上，累计有 700 余台该型齿轮箱交付客户使用，其中有 500 余台已在风场完成吊装并发电，近三年累计交付 571 台，实现销售收入 10 亿元。2020 年在受疫情影响的情况下，客户年订单量仍已超过 1300 台，截止到 2020 年 4 月底已完成销售收入 3 亿元，预计整年能交付 1000 台，实现销售收入 18 亿元。

主要应用单位及推广用户情况

单位名称	应用的技术	应用情况	应用的起止时间	应用单位联系人/电话
明阳智慧能源集团股份公司	超紧凑型主齿轮箱	通过风场试运行与传动机型对比，该机型发电效率高、机组吊装方便，创造了较为可观的经济效益	2016 年 1 月-至今	曹先生 /18689366725

七、主要知识产权和标准规范等目录

知识产权（标准）类别	知识产权（标准）具体名称	国家（地区）	授权号（标准编号）	授权（标准发布）日期	证书编号（标准批准发布部门）	权利人（标准起草单位）	发明人（标准起草人）	发明专利（标准）有效状态
发明专利	一种内冷却磨削砂轮	中国	ZL201410197728.8	2016-11-30	证书号第 2302765 号	湘潭大学	彭锐涛、唐恒、唐新姿、谭援强、周专	有效专利

发明专利	一种柔性销轴的处理方法	中国	ZL201611100988.4	2018-05-11	证书号第2921797号	湖南南方宇航高精传动有限公司	郑学斌、刘子娟、尚鹏举、朱美玲	有效专利
专著	风电技术（英汉双语）	中国			中国版本图书馆CIP 数字核字（2017）第199148号	湘潭大学	唐新姿、彭锐涛	其他有效的知识产权
发明专利	一种轴承孔内侧端面的加工方法	中国	ZL201710089217.8	2018-06-19	证书号第2966408号	湖南南方宇航高精传动有限公司	刘矗、朱美玲	有效专利
发明专利	一种内螺纹攻丝方法	中国	ZL201410283052.4	2016-07-20	证书号第2225818号	湖南南方宇航高精传动有限公司	叶丽红、朱美玲、李石顺、李洲	有效专利
发明专利	一种自冷却切削刀具	中国	ZL201410197727.3	2017-07-14	证书号第2551803号	湘潭大学	彭锐涛、唐恒、唐新姿、谭援强、周专	有效专利
发明专利	一种轴承游隙测量装置	中国	ZL201410136639.2	2016-06-29	证书号第2125044号	湖南南方宇航高精传动有限公司	邹俊伟、郭业华、黄俊琼	有效专利
发明专利	一种行星减速机的密封结构	中国	ZL201510907749.9	2017-10-20	证书号第2662429号	湖南南方宇航高精传动有限公司	王会斌、胡云波、姚伍军	有效专利
软件著作权	预应力车削数据库	中国	2016SR3180	2015-05-01	软著登字第	湘潭大学	湘潭大学	其他有效的知

十、主要完成人合作关系说明

项目十二位主要完成人长期从事风电主齿轮箱技术研究，通过产学研结合，突破了无主轴传动链技术、风电主齿轮箱关键零部件高效加工技术、变截面柔性销轴行星均载设计技术、大尺寸迷宫密封技术等相关关键技术，研发了超紧凑型大兆瓦级风电主齿轮箱。项目完成人长期紧密合作，现将合作关系说明如下：

李金库、彭锐涛、唐新姿、罗岳、李洲合作开展了高速重载高精度传动齿轮箱加工工艺的科研攻关；

李金库、彭锐涛、唐新姿、曹科名、曾雨田、罗岳、胡云波、肖竞元、李洲、朱美玲、黄俊琼、刘矗为主要研制人员，共同研发的“SCD3.0MW 风电齿轮箱的研制”项目成功通过中国航空发动机集团有限公司成果鉴定，鉴定结论为：总体技术达到了国际先进水平；

彭锐涛、曹科名联合申报了湖南省战略性新兴产业科技攻关项目“100%低地板传动齿轮箱研制”项目(2014GK1029)；

彭锐涛、胡云波共同申报了“GTF 发动机风扇驱动齿轮箱工艺研究”项目；

彭锐涛、唐新姿共同授权了发明专利“一种内冷却磨削砂轮”(ZL201410197728.8)、“一种自冷却切削刀具”(ZL201410197727.3)、“一种轴类零件的预应力车削装置”(ZL201210068123.X)；

彭锐涛、唐新姿是专著《风电技术》的共同编撰人；

彭锐涛、唐新姿、胡云波共同发表了论文“Performance of a pressurized internal-cooling slotted grinding wheel system”、“Design and performance of an internal-cooling turning tool with micro-channel structures”；

彭锐涛、唐新姿、罗岳共同开展了预应力切削方法、内冷却磨削方法和自冷却切削方法研究，成功应用于风电齿轮箱关键零部件加工，改善了轴类零件、齿轮类零件和箱体类零件的表面质量并提高了疲劳寿命，推动了风电齿轮箱关键零部件高效加工技术的发展；

彭锐涛、胡云波共同申报了湖南省自然科学(株洲)联合基金项目“航空构件定向内冷式高效加工技术的基础研究”(2018JJ4082)；

彭锐涛和湖南南方宇航高精传动有限公司共同完成了湖南省自然科学(株洲)联合基金项目“航空发动机高温合金零件高效预应力切削关键技术研究”(13JJ8007)；

曾雨田、李金库、肖竞元、朱美玲共同发表了论文“风电齿轮箱行星轮副侧隙偏差原因分析”；

朱美玲、李洲共同授权了发明专利“一种内螺纹攻丝方法”(ZL201410283052.4)；

刘矗、朱美玲共同授权了发明专利“一种轴承孔内侧端面的加工方法”(ZL201710089217.8)。

彭锐涛、唐新姿的国家自然科学基金“航空高温合金薄型零件高压内冷却形性协同磨削研究”(51975504)、“镍基高温合金高效抗疲劳磨削加工工艺及机理

研究”(51475404)、“镍基高温合金高效预应力切削工艺的优化研究”(51005194)、
“考虑启动与失速特性的混合翼型小型风电叶片多目标气动优化”(51305377)的
相关研究成果在湖南南方宇航高精传动有限公司得到应用。