

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5099

轻量化 ADI 迈向应用领域

闫启栋^{1,2}, 龚旭东³, 龚文邦^{1,4}, 刘金城¹

(1. 中国铸造协会 ADI 委员会, 北京 100048; 2. 禹州市恒利来新材料股份有限公司, 河南 禹州 452500; 3. 昆山市昌坚铸造有限公司, 江苏 昆山 215124; 4. 武汉纺织大学 机械工程与自动化学院, 湖北 武汉 430200)

摘要:世界正在经历能源和技术的深刻变革, 各国也在开发新的可持续能源和技术。可再生能源包括风能、太阳能、生物能源及核能等技术。此外, 新兴技术领域包括新能源汽车、机器人和人工智能设备等。可再生能源产业和新技术的实施需要开发和采用新的设备和组件, 等温淬火球墨铸铁(ADI)以其独特的微观结构和优异的性能而闻名。通过使用 ADI, 可以设计出轻量化创新的铸件, 不仅可以减轻质量, 还可以节约能源和减少排放。更重要的是, 这些铸件提高了新能源设备和新兴技术装置的效率和可靠性。本文综述了轻量化创新 ADI 铸件在我国太阳能光伏、风力发电、工业机器人和新能源汽车等领域的应用、发展和未来前景。

关键词: 可再生能源; 减排; 轻量化; ADI; 应用新领域

中图分类号: TG143.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)06-0582-08

Lightweight ADI Expands into New Application Areas

YAN Qidong^{1,2}, GONG Xudong³, GONG Wenbang^{1,4}, LIU Jincheng¹

(1. ADI Committee, China Foundry Association, Beijing 100048, China; 2. Yuzhou Henglilai Advanced Materials Co., Ltd., Yuzhou 452500, China; 3. Changjian Foundry Industry, Kunshan 215124, China; 4. School of Mechanical Engineering & Automation, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China)

Abstract: The world is undergoing profound changes in energy and technology. Countries are vigorously developing new sustainable energy sources and technologies. Renewable energy sources encompass various technologies, such as wind turbines, solar energy, nuclear energy and bioenergy. Additionally, emerging technology fields include new energy vehicles, robots, and artificial intelligence devices, among others. The renewable energy industry and the implementation of new technologies necessitate the development and adoption of new equipment and components. Austempered ductile iron (ADI) is renowned for its unique microstructure and superior properties. By utilizing ADI, lightweight and innovative castings can be designed to not only reduce weight but also save energy and decrease emissions. More importantly, these castings enhance the efficiency and reliability of new energy equipment and emerging technology installations. This paper describes the development, applications, and future prospects of lightweight and innovative ADI castings within sectors such as solar photovoltaic, wind power generation, industry robots, and trucks in China.

Key words: renewable energy; emission reduction; lightweight; ADI; new application areas

近年来, 尽管全球能源危机带来的一些直接压力有所缓解, 但能源市场、地缘政治和全球经济仍不稳定。在这种复杂背景下, 以太阳能光伏和电动汽车为首的新型清洁能源经济的出现为未来发展带来了希望。自 2020 年以来, 全球清洁能源投资持续增长, 尤其是 2023 年, 随着太阳能和风电场数量的持续快速增长, 全球 30% 的电力首次来自清洁能源^[1]。2024 年, 清洁能源发展的速度依然强劲, 全球

可再生能源发电量同比增长 10%, 是 2023 年 5% 增长率的 2 倍。全球发电中的清洁能源预计有望在 2025~2027 年打破新的纪录。低排放源—可再生能源和核能, 预计到 2027 年将满足全球所有需求增长, 太阳能光伏发电也将成为仅次于水电的世界第二大低排放发电来源。到 2025 年, 可再生能源的总量将超过燃煤发电, 煤炭份额将在过去 100 年中首次降至 33% 以下^[2]。图 1 给出了 2014~2027 年间全球不

收稿日期: 2025-06-12

作者简介: 闫启栋, 1972 年生。主要从事铸造工艺、铸造材料研发、生产和应用方面的工作。Email: yanqidong163@163.com

通信作者: 刘金城, 1946 年生。中国铸造协会 ADI 委员会顾问。主要从事金属凝固、凝固过程数学模型、铸造合金的科研方面的工作。Email: liujincheng64@tsinghua.org.cn

引用格式: 闫启栋, 龚旭东, 龚文邦, 刘金城. 轻量化 ADI 迈向应用领域[J]. 铸造技术, 2025, 46(6): 582-589.

YAN Q D, GONG X D, GONG W B, LIU J C. Lightweight ADI expands into new application areas[J]. Foundry Technology, 2025, 46(6): 582-589.

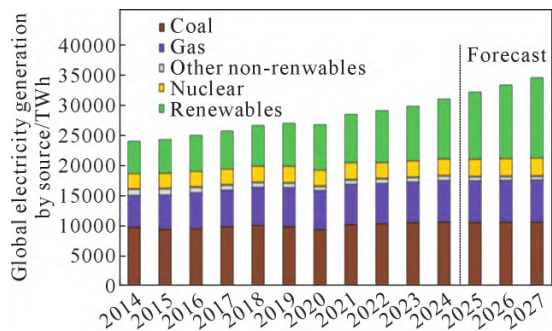


图1 2014~2027年间全球不同能源的发电量,其中其他非可持续能源包括油、废物及其他非可持续资源^[2]

Fig.1 Global electricity generation by source between 2014 and 2027. Other non-renewables include oil, waste and other nonrenewable sources^[2]

同能源的发电量。

2024年,全球光伏发电容量从2023年的1.6 TW上升到2.2 TW以上,增加了600多GW的新光伏系统^[3]。这标志着光伏部署的又一个创纪录的一年。尽管制造业产能持续过剩,组件价格下跌给整个价值链带来了压力。光伏首次提供了全球10%以上的电力需求消耗^[3]。GWEC市场情报预计,到2025年,新增装机容量将超过此前的纪录,达到138 GW。根据现行政策,预计今年和未来5年将新增982 GW的产能。这相当于到2030年每年新增164 GW的装机容量。从2024年的历史最高装机容量水平开始,2025~2030年的预计复合年增长率为8.8%^[4]。

2024年,我国太阳能光伏发电量大幅增长46%,远高于前5年(2019~2023年)的平均年增长率27%^[2]。在政策推动下,2024年我国年度新增装机容量再度攀升至357.3 GW(该数据高于此前国家能源局公布的277.57 GW),约占全球新增装机容量的60%,截至2024年底,中国光伏装机规模已占据全球近半数,成为全球光伏市场发展的核心驱动力^[3]。2024年,中国新并网风电容量接近80 GW,超过了2023年创下的安装记录,累计装机容量超过520 GW,占全球风电总装机容量的近50%。到2024年底,风电和太阳能光伏发电装机容量达到1400 GW,在中国历史上首次超过火电装机容量。2024年,风力发电量也大幅增长,增长了12%。风力发电占我国总发电量的1/10,使其成为仅次于火力发电和水电的第三大电力来源。2024年,清洁能源部门(包括可再生能源、核能、电网、储能、电动汽车和铁路)贡献了中国10%的生产总值,已成为经济增长的首要驱动力^[4]。图2给出了2019~2027年我国发电量按年同比变化。

作为可再生能源开发和制造业的全球领导者,我国将清洁能源作为其经济增长的首要驱动力。据统计,我国2024年的发电量为94181亿千瓦时,同

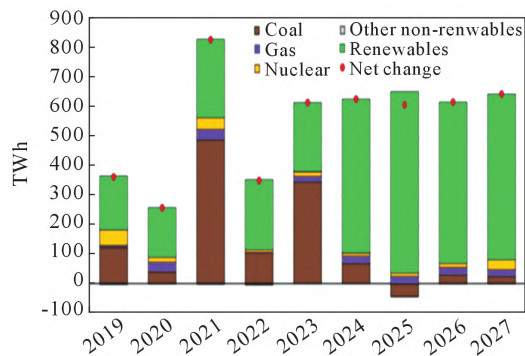


图2 2019~2027年中国发电量按年同比变化,其中其他非可持续能源包括油、废物及其他非可持续资源,2025~2027年为预测值^[2]

Fig.2 Year-over-year changes in electricity generation in China between 2019 and 2027. Among them, the other non-renewables include oil, waste and other nonrenewable sources, and the data for 2025~2027 are forecast values^[2]

比增长4.6%,其中,火力发电占比67.36%,水力发电占13.53%,风力发电占比9.94%;核能风电4.72%,光伏发电为4.45%^[5]。要实现2030年达到二氧化碳排放达到峰值和2060年前实现碳中和(到2060年非化石能源占能源消费总量80%以上)的目标。清洁能源发电尤其是光伏发电和风电仍需快速发展。新能源技术领域需要创新的设备和组件,凭借其独特的微观结构和优异的性能,轻量化创新(austempered ductile iron, ADI)零件可以帮助这些行业的发展。

在铸铁家族中,等温淬火球墨铸铁具有独特的微观结构和优异的机械性能优化组合。ADI的主要微观结构是奥铁体,是极细针状铁素体和稳定的高碳奥氏体的混合物。ADI中有2种类型的奥氏体:①非平行针状结构之间较粗和等轴的奥氏体块,主要存在于最后凝固区域;②针状结构中单个铁素体片之间的奥氏体薄膜。这种独特的微观结构赋予ADI优异的静态和动态性能,以及良好的低温冲击韧性^[6-9]。近几十年来,汽车行业一直在从严重依赖铸铁件向铝铸件过渡,这一趋势在随后几年仍持续存在。然而,与铝相比,铸铁,特别是ADI,表现出最低的单位屈服强度(无论循环次数多少,都不会发生失效的应力)和疲劳极限相对质量。更重要的是,当循环次数超过 10^7 次时,ADI的比应力(应力/密度)优于铝合金。

ADI的高强度质量比和高刚度使其能够在超过3 mm的截面中以相等的质量替代铝或镁等材料。此外,与钢、铝和镁相比,其低能耗和可回收性使其具有卓越的可持续性^[6-9]。考虑到其纳米晶粒尺寸、独特的微观结构、优异的机械性能和良好的可铸造性(这使得成本效益高、批量生产近净形状的部件成为可能),以及可100%回收的事实,将ADI描述为高

科技、纳米级和环保材料并不过分。ADI 具有进一步增强潜力,其生产和应用范围有望扩大,这得益于其与替代材料相比具有的低成本优势。

以下部分论述了轻量化创新的 ADI 在太阳能光伏、太阳能热和风能、智能机器人和新能源汽车等领域的发展和应用及其发展前景。

1 轻量化创新 ADI 在太阳能光伏跟踪系统中的应用

太阳能跟踪系统全天监测太阳的轨迹,自动调整太阳能电池板方向,优化了阳光照射面板的角度,同时考虑了方位角和仰角,从而提高了能源生产^[10-14]。太阳能跟踪系统已经使用了几十年,已知最早的设备可以追溯到 20 世纪 70 年代。早期的系统主要用于大型太阳能发电厂和研究设施,目前已广泛应用于普通太阳能光伏发电^[10]。太阳跟踪系统主要有 3 种类型:固定轴、单轴和双轴系统。固定轴系统是最简单、最便宜的,但效率有限,因为其固定在某个角度而没有任何运动。单轴跟踪系统跟踪太阳从东到西的运动,显著提高了能量产量。相比之下,双轴跟踪系统可以跟踪太阳的东西轨迹和季节变化,确保尽可能高的能源产量。与固定倾斜系统相比,双轴跟踪系统可以将能源产量提高 40%^[10],或 45%^[11],50%^[12]甚至 56%^[13]。随着世界向可再生能源主导地位过渡,增强的跟踪机制、人工智能驱动的优化和混合控制策略将最大限度地提高太阳能发电量(高达 74%)和确保在可持续能源方面发挥至关重要的作用^[14]。智能跟踪系统,在阴天条件下可以获得高达 7.83% 的额外能量。反向追踪(backtracking)、高纬度条件和阴天的自适应跟踪策略,正在农业光伏领域应用,其中太阳能跟踪不仅可以增强能量捕获,还可以改善遮阳控制、作物生产力和雨水分配。人工智能驱动优化太阳能跟踪技术实现更大的太阳能发电在总发电量的比例和支持全球可持续发展目标方

面发挥重要作用^[14]。

实施太阳能跟踪系统可能会导致更高的初始安装费用,但增加能源生产带来的长期效益可以抵消这些成本。随着技术的进步和相关成本的下降,跟踪系统的采用正变得越来越普遍。我国早在 2014 年就开始研究用于太阳能光伏跟踪系统的 ADI 零件,当年有国外客户向江苏省昆山市某铸造厂订购跟踪器减速器部件,订购的零件是锻钢组件。减速齿轮由 50Mn 钢锻件加工而成,蜗杆由 42CrMo 钢锻件制成,然后经过淬火和回火处理,表面硬度超过 550 HV。加工后,使用紧固螺栓将齿轮和蜗杆组装成单个蜗轮部件。铸造厂的技术团队提出,ADI 铸件可能是更适合这种部件的材料,不仅可以降低成本,还可以完全满足功能要求。经过研究,原始的钢组件被转化为单个铸件。图 3 为原始钢结构设计和重新设计的单个铸件。通过严格控制球墨铸铁铸件质量、精密预加工、等温淬火处理和最终加工,获得了 ADI 蜗杆部件的理想质量。经过性能测试和安装实验,证实了 ADI 是一种非常适合涡轮轴的材料,可降低约 30% 的成本,大规模生产始于 2015 年。随后的优化将太阳能光伏减速齿轮的最薄壁厚减少到 8 mm。然而由于 ADI 具有优异的耐磨性,其使用寿命仍可达到设计的 30 年。

目前,我国有 6 家以上铸造厂生产用于太阳能光伏跟踪系统的 ADI 铸件,有 30 多个品种,质量 5~50 kg,壁厚 8~35 mm。图 4 给出了用于太阳能光伏跟踪器减速器 3 种不同型号的 ADI 齿轮。根据中国铸造协会 ADI 委员会不完全统计,2023 年生产了约 10 500 t 用于太阳能光伏电力跟踪系统的 ADI 铸件^[15],主要牌号为 QTD1400-2 和 QTD1050-7。

目前,包括 Nextracker 在内的部分国外十大太阳能光伏跟踪器制造商都采用了 ADI 零件。同样,包括苏州 Arctech Solar 在内的部分国内十大太阳能光伏跟踪器生产商也采用了 ADI 零件。据了解,在

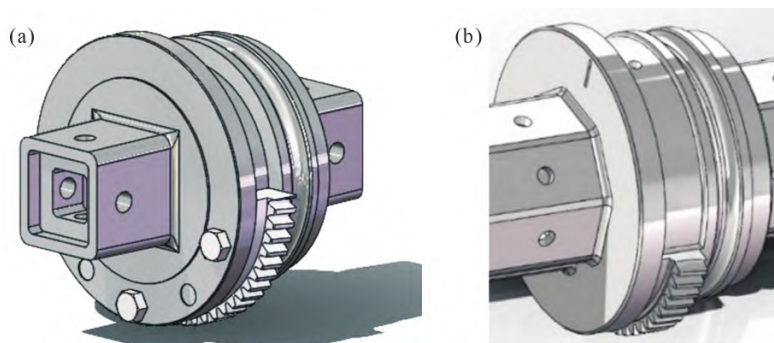


图 3 ADI 铸件设计:(a) 钢制履带蜗轮的原始设计;(b) 重新设计的单件 ADI 铸件(江苏昌坚铸造厂提供)

Fig.3 Design for ADI castings: (a) original design of steel fabrication tracking worm gear; (b) redesigned single ADI casting (provided by Changjian Foundry)



图 4 加工好的用于太阳能光伏跟踪器减速器 3 种不同型号的 ADI 齿轮(江苏昌坚铸造厂提供):(a) 型号 1;(b) 型号 2;(c) 型号 3

Fig.4 3 Different types of machined ADI gears used in reducer for solar PV trackers (Changjian Foundry): (a) Type 1; (b) Type 2; (c) Type 3

美国,2021 年 90%的新太阳能光伏装置都配备了跟踪器,累计总数达到 80%。未来 30 年,太阳能市场的复合年增长率预计将达到 8%。

除了太阳能光伏发电,还有一种将太阳辐射能转化为电能的技术,即太阳能热发电。太阳能热发电通过热能转换的中间过程实现。首先,太阳辐射能通过聚焦系统集中到一个小区域,然后加热并循环工作介质(如水或其他合适的流体)以产生蒸汽。这种蒸汽在涡轮机内转化为机械能,为发电机发电提供动力。太阳能热发电系统也有一个跟踪系统,当太阳在天空中的位置发生变化时,该系统可以全天将阳光聚焦在接收器上。太阳能热发电跟踪系统可能需要比太阳能光伏更高的精度。一些中国铸造厂为太阳能热发电跟踪系统提供了 ADI 组件,可用于太阳能光伏和太阳能热发电。图 7 给出了可用于这 2 个系统的 ADI 零件的实例。与在太阳能光伏系统中的使用相比,ADI 铸件在太阳能热跟踪系统中的采用率要低得多。然而,随着设计师越来越意识到 ADI 铸件提供的好处,预计其在太阳能热发电领域的应用将快速增长。随着光伏发电装置的增加量远远超过其他国家,太阳能热发电装置也在迅速增加,我国对太阳能光伏和太阳能热发电跟踪器的需求很高。太阳能光伏和太阳能热发电跟踪器及 ADI

铸件具有较巨大的市场潜力。我国太阳能热发电起步较晚,目前在世界上只占相对较小的比例。然而,由于政府支持的增加,近年来发展迅速。

2 轻量化创新 ADI 在风力发电机中的应用

研究表明,ADI 独特的性能是风力涡轮机传动中用行星架的合适材料^[16-17]。ADI 行星架的优化设计可以减轻 17%的质量^[17],并且仍然符合所需的性能标准。ADI 行星架在风力涡轮机齿轮箱中的质量为 7 t,已经在欧洲部分企业采用。图 5 给出了在英国伯明翰 ADI Treatments 正进行奥氏体化处理的 ADI (随后将进行等温处理)行星架和在我国湖北十堰 ADI 商业热处理厂的 ADI 行星架^[18]。虽然说 ADI 材质是风力涡轮机传动中使用的行星架的合适材料,当前我国风电涡轮机的行星架主要采用球铁 700-2。关于行星架材质仍然需要有关行业共同进行深入研究。

根据中国铸造协会 ADI 委员会的不完全统计,2023 年共生产了 604 t 用于风力发电厂的 ADI 铸件^[15]。由此可见,ADI 铸件的应用非常少,需要进一步研究和推广扩大应用。

在全球清洁能源需求的推动下,近年来风力涡轮

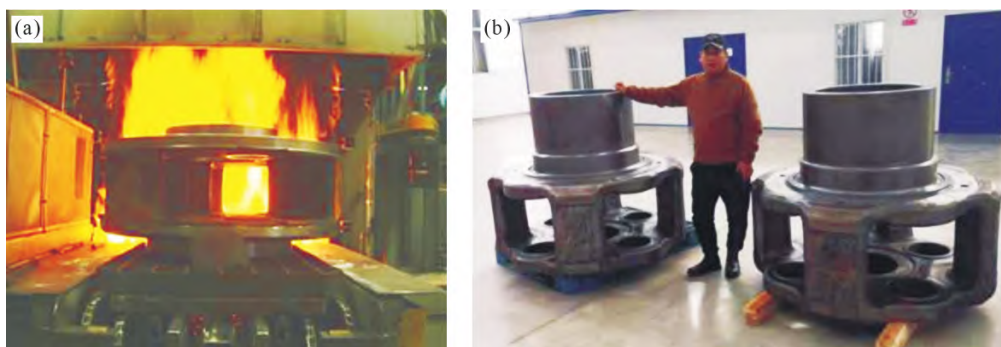


图 5 ADI 行星架:(a) 英国伯明翰 ADI 处理中进行奥氏体化处理的 ADI 行星架;(b) 湖北 ADI 材料技术有限公司热处理的 ADI 行星架

Fig.5 ADI planetary carrier: (a) ADI planetary carrier undergoing austenitization treatment at ADI treatments in Birmingham, UK; (b) ADI planetary carrier heat treated by Hubei ADI Material Tech Co., Ltd., Hubei Province, China

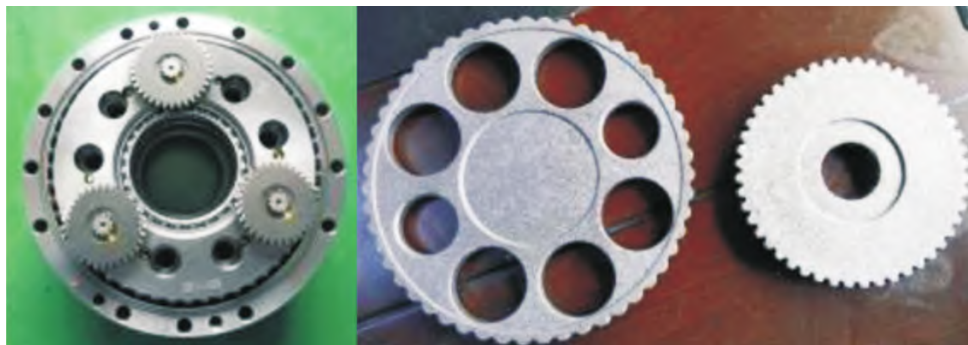


图 6 工业机器人中的 RV 减速器 ADI 齿轮^[22]
Fig.6 RV reducer gears in industrial robots^[22]



图 7 工业机器人中应用的部分典型 ADI 谐波齿轮(陕西同心连铸管科技有限公司提供)
Fig.7 Some of typical ADI harmonic gears used in industrial robots (Courtesy Shaanxi Tongxin Continuous Cast Tube Tech.)

轮机的功率一直在增加,维斯塔斯海上风力涡轮机的最大功率达到 15 MW。有报道称,西门子歌美飒计划在未来几年生产 21 MW 的型号^[19]。2024 年 6 月 26 日,我国自主研发的“18 MW 半直驱海上风电机组”在广东省汕头市风电临海试验基地顺利并网发电,再次刷新已并网风电机组单机容量最大的世界纪录。这台机组的部件级国产化率达到了 100%,平均每年发电量可达 7 200 万千瓦时,可满足约 4 万户家庭一年的用电量^[20]。随着风力涡轮机功率增加,由于设计的改进和材料使用的优化,齿轮箱的尺寸和质量实际上已经减小,齿轮箱的质量随着扭矩密度的增加而减小,对材料性能的要求也越来越高。除了常规的抗拉强度、伸长率和冲击韧性外,疲劳极限通常是越来越重要的因素。Moventas Gears 认为,考虑使用 ADI-2(EN GJS-900-8)和 ADI-3(EN-GJS-1050-6)作为变速箱齿轮材料是一种可行的选择^[21]。

3 工业机器人中的轻量化创新 ADI 齿轮

近年来,人工智能浪潮席卷全球,将成为第 IV 次工业革命的主要特征。自 2020 年以来,我国的工业机器人库存大约翻了一番,到 2024 年达到 200 万台^[2]。许多人工智能应用需要机械设备来执行动作和完成智能任务,这推动了工业机器人市场的快速发展。

工业机器人的操作主要由 3 个部分控制:伺服电机、减速器和控制器。机器人减速器的齿轮速度转换器用于将电机的旋转降低到所需的水平并获得更大的扭矩。目前,常见的机器人减速器主要分为 2 类:①RV 减速器,安装在工业机器人手臂和肩膀等高负载位置;②谐波减速器,放置在前臂、手腕和手掌等低负载位置。

郑州机械研究所采用了一种可行且优化的精密铸造工艺,生产出内部密度高、无收缩或气孔等缺陷的高质量球墨铸铁坯,确保了齿轮毛坯的尺寸精度和稳定性,达到 CT7 级,并开发了一种可以精确控制等温淬火温度的等温淬火盐浴炉,确保了产品的高质量和一致性。工业机器人中的齿轮、RV 减速器和 ADI 齿轮的位置及所生产的 RV 减速器 ADI 齿轮如图 6 所示^[22]。RV 减速器 ADI 齿轮的生产试制在安装试验中取得了良好的效果,实现了稳定生产的目标。西安理工大学与陕西同心连铸公司合作多年,对机器人谐波 ADI 齿轮进行了研究。机器人谐波 ADI 齿轮的实验室实验和安装试验表明,其具有极低的噪音和优异的耐磨性。据了解,这类齿轮已经在机器人中应用了 6 年多,并且在继续使用,受到用户的欢迎,图 7 为西安理工大学与陕西同心连铸公司研制和生产的部分典型谐波 ADI 齿轮。

ADI 具有足够的强度、优异的耐磨性和低噪音特性。此外,ADI 齿轮与钢制齿轮相比至少轻 9%。

ADI 齿轮在工业机器人中的应用需要进一步探索,随着机器人在各个制造行业的应用不断扩大,ADI 齿轮展现出广阔的增长前景。

4 轻量化创新 ADI 零件在电动卡车和新能源公交车中的应用

数据显示,虽然重卡仅占我国汽车保有量的 2.2%,但其氮氧化物(NO_x)和颗粒物排放量(PM)分别占汽车总排放的 85% 和 65%^[23]。

电动化是实现重卡脱碳目标最可行的一种手段,也是我国实现“双碳”目标的重要突破口。随着新型电动卡车逐渐占领市场,越来越多的司机选择这种新兴的汽车运输方式。这是由于行驶里程长(高达 300 km)的优点,对于经常从事短途运输的司机来说已经足够了。此外,与传统的内燃机驱动卡车相比,更高的功率、更快的加速和行驶速度使采矿运输更高效,运营成本更低、寿命更长,并可以实现更低的运输成本。科尔尼认为,截至 2030 年,我国市场的电动重卡将实现 18% 的渗透率,并在大多数运营场景下实现对于燃油车的显著经济优势^[23]。

减重是新能源汽车增加续航里程的重要途径。减轻质量可以有效提高整车的操控性和动力性,增强车辆的加速性能,缩短制动距离。在我国,领先的

汽车制造商和零部件供应商将汽车零部件(包括卡车零部件)的轻量化视为提高车辆功能和竞争力的关键指标。图 8 显示了东风某款电动卡车的原始悬架部件,质量为 119.74 kg,改为重新设计的轻量化 ADI 部件,质量仅为 69.75 kg,重量减轻了近 50 公斤,节省了 42%。图 9 为吉林省博铤机械制造有限责任公司为长春一汽某新能源卡车生产的 ADI1050-6 前支架-辅助钢板弹簧(右)ADI1050-6 后平衡悬架板簧左支座(中桥左侧),ADI 零件的优越性能满足了新能源卡车的要求。

电动公交车具有零排放、低噪音、高效能等优势,是推动城市交通绿色发展的重要力量。全球各国都在扩大电动公交车市场规模。我国新能源公交车行业正从“规模扩张”向“高质量发展”转型,政策补贴和技术创新是关键因素。新能源公交车是指采用新型动力系统,完全或主要依靠新型能源驱动的公交车。这些新型能源包括电力、氢燃料等,具有环保、节能、高效等优点,是城市公共交通的重要组成部分。近年来,新能源公交车市场规模持续增长。2024 年,全国公交车保有量接近 60 万辆,新能源公交车的占比进一步提高,电动化渗透率超过 90%^[24]。如同电动重卡,电动公交车零部件的轻量化也是提高车辆功能和竞争力的关键指标。通过减轻车辆质

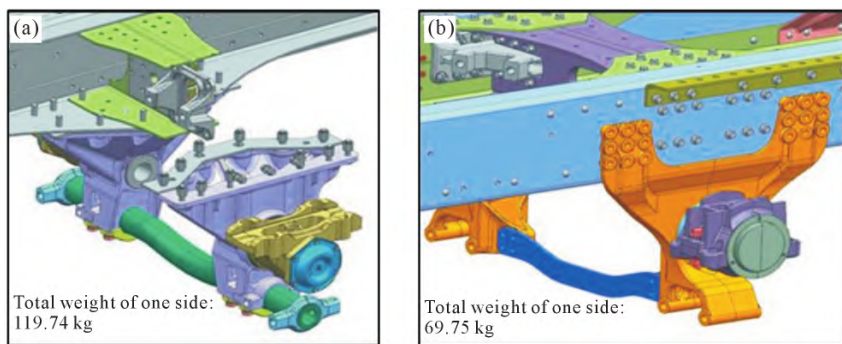


图 8 某东风车型电动卡车:(a) 原始悬架部件;(b) 重设计后的轻量化 ADI 部件(江苏汤森提供)
Fig.8 A certain Dongfeng model electric truck: (a) original suspension component; (b) redesigned lightweight ADI component (provided by Jiangsu Townsun)

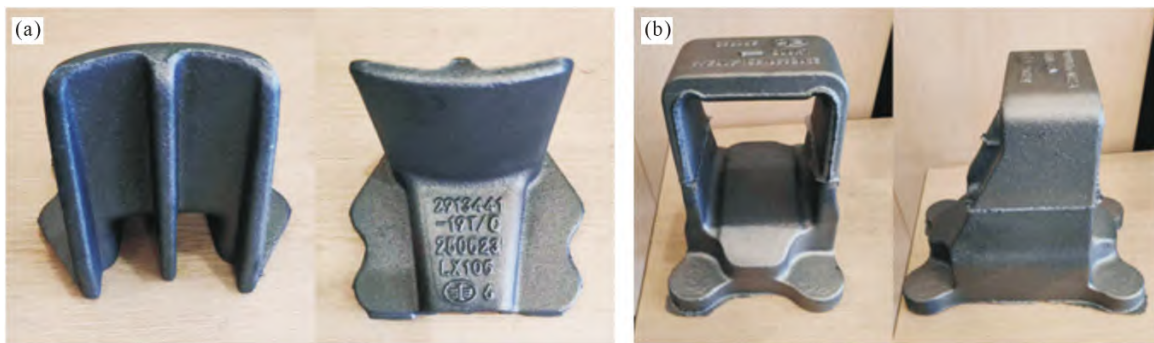


图 9 ADI1050-6 满足长春一汽某新能源卡车的要求:(a) 前支架-辅助钢板弹簧;(b) 后平衡悬架板簧左支座-中桥左侧(吉林省博铤机械制造有限公司提供)
Fig.9 ADI1050-6 for a type of new energy truck for Chuangchun FAW: (a) front bracket-auxiliary steel plate spring; (b) rear balance suspension plate spring left support-left side of the middle axle (provided by Jilin Boqiang)

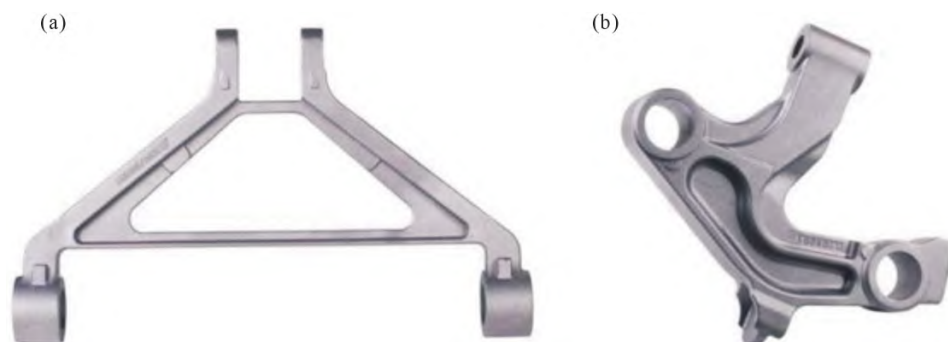


图 10 新能源客车上的 ADI 零件:(a) 独立悬挂上、下控制臂,用于独立悬挂部件,实现驱动模块和车架的连接;(b) 载支座,用于客车驱动模块上、下臂和转向机构的支撑与连接(河南 ADI 公司提供)

Fig.10 ADI parts in new energy buses: (a) independent suspension upper and lower control arms, used as independent suspension components to connect the drive module and frame; (b) bearing bracket, used for supporting and connecting the upper and lower arms and steering mechanism drive module. (provided by Henan ADI)

量,电动公交车可以提高能源效率,扩大行驶里程,提高整体性能。图 10 为河南 ADI 公司为某种型号新能源公交车生产的 ADI 控制臂和承载支座,与原来的零件相比,ADI 零件减轻了质量,降低了成本。

根据中国铸造协会 ADI 委员会的不完全统计,2023 年,电动卡车和内燃机驱动的卡车用于道路运输的 ADI 铸件总质量约为 19 960 t。与我国近几年重型卡车、中型和轻型卡车销售水平和新能源公交车渗透率相比,ADI 铸件的使用量仍然很小,需要进一步扩大应用。预计随着 ADI 制造技术在我国不断改进,设计工程师们将进一步扩大 ADI 的设计和使用范围,用于越来越多的汽车结构件。

5 结论

(1)全球新清洁能源产业持续快速发展,太阳能光伏、太阳能热发电和风能是增长最快的可再生能源。

(2)由于 ADI 独特的微观结构和优异的性能,轻量化创新的 ADI 零部件已经应用于太阳能光伏、太阳能热发电和风力发电行业。这些有助于可再生能源产业的发展,并具有巨大的增长潜力。

(3)轻量化创新的 ADI 零部件已经应用于机器人和新能源汽车等新技术行业,具有广阔的应用前景。

致谢:感谢西安理工大学、海安万力铸造有限公司、陕西同心连续铸管技术有限公司、湖北 ADI 材料技术有限公司,江苏鸿翔机械制造有限公司,江苏汤臣汽车零部件有限公司,河南 ADI 铸造有限公司,郑州机械研究所在本文的准备过程中提供的信息。

参考文献:

- [1] O'MALLEY I. More and faster: Electricity from clean sources reaches 30% of global total[EB/OL]. [2024-05-09]. <https://apnews.com/>

article/renewable-energy-climate-solar-wind-fossil-fuels-2718fce-0ed37232dc25dbf46ff87955.

- [2] IEA : IEA electricity-2025 [R/OL] [2025-6-27]. <https://www.iea.org/reports/electricity-2025>
- [3] IEA. Snapshot of Global PV Markets 2025[R/OL]. [2025-04-17]. <https://iea-pvps.org/snapshot-reports>
- [4] GWEC's Global Wind Report 2025: Record growth, emerging markets, and the path to 2030 renewable energy goals [R/OL]. [2025-06-23]. <https://www.gwec.net/reports/globalwindreport>
- [5] NODO. 中国 2024 年总的发电量是多少? 人均多少? [EB/OL]. [2025-02-20]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/25187286613>
- [6] KEOUGH J R. Austempered ductile iron (ADI) - A green alternative [EB/OL]. [2011-09-17]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:112234635>
- [7] LIU J C. Unique microstructure and excellent mechanical properties of ADI[J]. China Foundry, 2006, 3(4): 253-257.
- [8] STEFANESCU D M. The Meritocratic ascendance of cast iron: From magic to virtual cast iron[J]. International Journal of Metal-casting, 2019, 13(4): 726-752.
- [9] 龚文邦,刘金城,向纲玉,等.温淬火球墨铸铁(ADI)-理论,生产及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2020.
- [10] TABIBI A. Solar tracking systems: Maximizing energy production [EB/OL]. [2024-01-30]. <https://green.org/2024/01/30/solar-tracking-systems-maximizing-energy-production>.
- [11] BAILEY E. Types of solar tracking system: A comprehensive guide to optimal energy harvesting[EB/OL]. [2023-08-28]. <https://solvoltaics.com/types-of-solar-tracking-system>.
- [12] BAOUCHÉ F Z, ABDEREZZAK B, LADMI A, ARBAOUI K, SUCIU G, MIHALTAN T C, RABOACA M S, HUDISTEANU S V, TURCANU F E. Design and simulation of a solar tracking system for PV[J]. Applied Sciences, 2022, 12(19): 1219682.
- [13] SEME S, ŠTUMBERGER B, HADŽISELIMOVIĆ M, SREĐENŠEK K. Solar photovoltaic tracking systems for electricity generation: A review[J]. Energies, 2020, 13(16): 4224.
- [14] SADEGHI R, PARENTI M, MEMME S, FOSSA M, MORCHIO S. A review and comparative analysis of solar tracking systems[J]. Energies, 2025, 18(10): 2553.
- [15] YAN Q D, GONG W B, LIU J C. The Current Status, Problems and Prospects of ADI in China: A Review[A]. The 75th World

- Foundry Congress[C]. Deyang: WFO, 2024.
- [16] LOHMILLER J, HOFFMEISTER J, HERMES J, ANSORG M, DHONAU H. Development and investigation of austempered ductile iron (ADI) for thick-walled gear components[J]. Engineering Research, 2017, 81: 253-263.
- [17] WEBER F, BROECKMANN C, ZÜCH V, JACOBS G, ZIMMERMANN J, SCHRÖDER K U, BAM I Y, JAKUMEIT J, BODENBURG M, WEIß[J]. Multi-domain optimization of cast iron components in wind turbines. Engineering Research, 2023, 87: 39-50.
- [18] YAN Q D, GONG D X, GONG W B, LIU J C. Lightweight innovation ADIs help development of renewable energy and new technology industries in China[J]. China Foundry, 2024, 21(5): 507-515.
- [19] 科普中国. 我国自主研发的风电机组, 再次刷新单机容量最大的世界纪录[EB/OL]. [2024-07-21]. https://www.thepaper.cn/news-Detail_forward_28147127
- [20] PROCTOR D. Siemens Gamesa reportedly developing 21-MW offshore wind turbine[EB/OL]. <https://www.powermag.com/siemens-gamesa-reportedly-developing-21-mw-offshore-wind-turbine/>, June 11, 2024.
- [21] PAAKKINEN P, SOIVIO K, UUSITALO K. Thick walled ADI castings to boost torque density of wind turbine gearboxes[EB/OL]. 2018. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:199395627>.
- [22] 卫东海, 李克锐, 李桐, 李增利, 陈昭. 机器人减速器用等温淬火球墨铸铁齿轮的研制[A]. 2019 中国铸协等温淬火铸件分会年会[C]. 威海: 中国铸协等温淬火铸件分会, 2019.
- [23] 科尔尼. 重卡: 电动化的新力量—中国电动重卡产业发展白皮书[R/OL]. [2022-05-17]. <https://www.kearney.com/documents/>
- [24] 中国产业研究院. 2025-2030 年新能源公交车产业深度调研及未来发展现状趋势预测报告[R/OL]. [2025-03-25]. <https://www.chinairn.com/userfiles/20250325/20250325155511786.PDF>.
- (责任编辑: 李亚敏)