

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.020

刀具磨损检测技术发展态势分析——以专利为视角

陈立兵¹,曾德锋¹,钱伟²

(1. 国家知识产权局专利局专利审查协作广东中心,广东 广州 510555;

2. 仲恺农业工程学院,广东 广州 510230)

摘要:刀具磨损状态的有效检测,可以充分利用其使用寿命并保证工件的加工精度。基于 IncoPat 数据库对刀具磨损检测技术相关专利进行检索,并从专利概况、地域分布、技术主题、创新主体、专利价值度以及研究现状进行了多维度分析。结果表明:中国、日本、德国、韩国和美国是刀具磨损检测技术的主要来源国和目标市场国;日本在该技术领域的专利布局时间早于中国,且专利价值度较高;中国在该技术领域的专利数量最多,但总体专利价值度不高;申请量全球排名前十位的申请人中,国内均为高校,国外均为日本企业,体现了中国和日本在该技术领域活跃度较高。刀具磨损是逐渐进展的过程,开发能够检测刀具状态并适时提示更换刀具的系统是自动化的最大挑战之一。基于对刀具磨损检测技术的专利分析,以期为我国刀具磨损检测技术的研发提供参考。

关键词:刀具;磨损;检测;直接法;间接法;专利分析

中图分类号:TG71 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)01-0104-12

Development Trend Analysis of Tool Wear Detection Technology from Patent Perspective

CHEN Libing¹, ZENG Defeng¹, QIAN Wei²

(1. Patent Examination Cooperation Guangdong Center of the Patent Office, CNIPA, Guangzhou 510555, China;

2. Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510230, China)

Abstract: Effective detection of tool wear status can fully utilize tool lifespan and ensure machining accuracy of workpieces. Based on IncoPat patent search database, patents related to tool wear detection technology were retrieved and analyzed from multiple dimensions, including patent overview, geographical distribution, technology topics, innovation entities, patent value index, and research status. The results indicate that China, Japan, Germany, Republic of Korea, and the United States are the primary source countries and target markets for tool wear detection technology. Japan initiated patent layouts earlier than China in this field and holds patents with higher value. China has the largest number of patents in this domain, but the overall patent value remains relatively low. Among the top ten global applicants, domestic entities in China are all universities, while foreign applicants are Japanese enterprises, reflecting the high activity levels of both China and Japan in this field. Tool wear is a gradual process, and developing systems capable of detecting tool conditions and replacing tools at appropriate times remains one of the greatest challenges in automation. Through patent analysis of tool wear detection technology, this study aims to provide references for China's research and development in this field.

Keywords: tool; wear; detection; direct method; indirect method; patent analysis

0 引言

刀具磨损到一定限度就不应再继续使用,否则将直接影响工件的加工精度和效率。根据刀具磨损发生位置的不同,其磨损形式可以分为边界磨损、前刀面磨损和后刀面磨损^[1-2]。图1为刀具磨损过程曲线。使用刀具时,应在急剧磨损阶段之前及时更换^[3-5]。刀具磨损的检测方法主要

分为两类:1)直接测量法;2)间接测量法。直接测量法是在非切削时间内使用光学显微镜或图像传感器直接测量刀具的磨损量;间接测量法则是在切削时测量与刀具有光的物理量,如切削力、振动与噪声、已加工表面的粗糙度、切削稳定性等,通过上述物理量的变化来判断刀具的磨损状况^[6-10]。通过对刀具磨损状态的智能检测,不仅可以提高生产效益以及保障操作人员的人身安

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2023B0202060001)

第一作者简介:陈立兵(1985—),男,四川遂宁人,高级知识产权师,硕士,研究方向为发明专利实质审查,lbcs509@163.com。

通信作者简介:曾德锋(1980—),男,湖北荆州人,副研究员,硕士,研究方向为知识产权,zengdef@126.com。

全,同时也对实现智能化制造业的发展具有重要意义。

专利文献作为技术信息最有效的载体,其包含了 90% 以上的研究成果,研发者通过对专利文献的相关信息分析,可以了解技术的发展状况并为今后的研发提供借鉴^[11]。基于此,本研究拟通过对刀具磨损检测技术的相关专利进行全面分析,以期把握该技术的研究方向、研究热点和未来的发展方向。

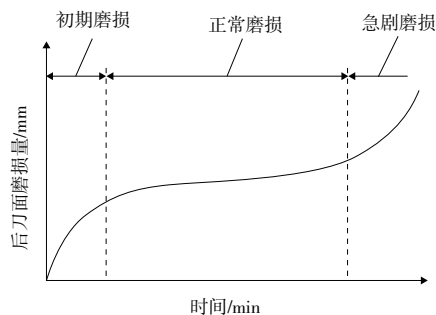


图1 刀具磨损过程曲线

1 数据范围和研究方法

以 IncoPat 作为检索数据库,关键词采用“刀具、磨损、检测、测量、监测”,分类号采用 B23Q17 (涉及机床上的指示或测量装置)。为保证检索结果的全面和准确,关键词进行了英文扩展。检索式如下:((刀具 OR TOOL+) AND (磨损 OR WEAR+) AND (检测 OR 测量 OR 监测 OR DETECT+ OR MEASUR+ OR MONITOR+))/BI AND B23Q17/IPC,检索时间为 2025 年 4 月 23 日,获得 2 605 条检索结果,将同族进行合并,并对明显不相关文献进行剔除,共获得有效专利 1 567 件,完成上述专利的数据整理和标引。本研究通过对专利概况、地域分布、技术主题、创新主体、专利价值度进行多维度的分析,同时以时间为轴线,对主要创新主体的专利、被引用最多的专利、权利要求数量大于 20 项的专利以及维持时间在七年以上的专利进行重点梳理,以探析刀具磨损检测技术的发展态势。

2 专利概况

2.1 专利申请趋势

图 2 所示为刀具磨损检测技术的专利申请趋势。刀具磨损检测技术的全球专利申请趋势可分为三个阶段:初步发展期(1961 年—1979 年);稳

步发展期(1980 年—2009 年)和快速发展期(2010 年—至今)。在初步发展期,专利申请量较少,主要是国外申请人进行专利布局,且专利申请主要以物理量监测为主,基于振动信号、切削力、温度、声发射等进行刀具磨损的检测。在稳步发展期,专利申请量有了一定增加并保持在平稳水平,国内申请人也逐步开始了该技术领域的专利布局;随着计算机的普及,推动了自动化检测方法的进步,使得专利申请量有了一定增加;此外,刀具磨损检测方法还引入了机器视觉、显微技术以及多传感器的信号融合技术,提高了检测精度。在快速发展期,专利申请量呈现出逐年递增的趋势,且在 2023 年达到了峰值;并且已进入了智能化和大数据时代,人工智能、物联网和工业 4.0 推动了检测技术的飞跃,国内外申请人为了提高产品竞争力,占据市场主导地位,纷纷加大了该技术的研发和专利申请;刀具磨损检测技术主要包括利用支持向量机等算法从多源数据中提取磨损特征的机器学习检测法,利用卷积神经网络处理刀具图像以实现磨损分类和预测的深度学习检测法,利用集成传感器、云平台等实现实时监测和远程控制的工业物联网检测法,以及通过构建刀具磨损虚拟模型并结合实时数据预测刀具寿命的数字孪生检测法,使得刀具磨损检测技术呈现出精度高、速度快、自适应性强等特点。

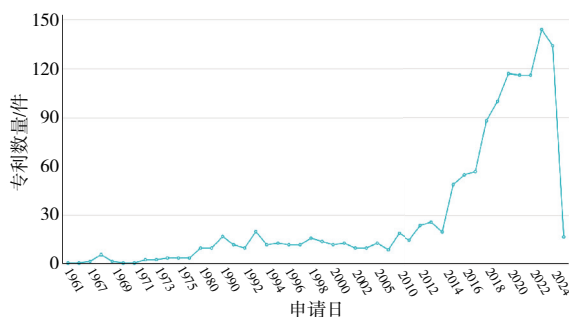


图2 专利申请趋势

2.2 技术生命周期

图 3 所示为刀具磨损检测技术的生命周期。1976 年—1980 年为其导入期,申请人数量以及专利数量均较少,技术发展较为缓慢。1981 年—2010 年为该技术的第一成长期,申请人数量和专利数量均有了一定量的增加,且随着国内申请人对知识产权保护意识的加强,也使得该阶段专利申请数量有了一定提高。2011 年—至今为该技术的第二成长期,人工智能以及物联网的发展促

进了检测技术的提高,也使得国内外申请人加大了对刀具磨损检测技术的研发,同时基于产品加工精度的要求的不断提高,也需要对刀具磨损检测技术作出改进;从专利数量看,此阶段呈现出了快速增长的趋势,由此也体现出国内外申请人在该技术领域研发的较高活跃度。

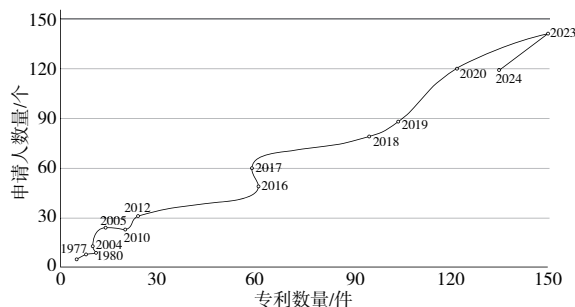


图3 技术生命周期

3 地域分布

3.1 技术全球分布

图4所示为刀具磨损检测技术的全球分布情况。中国、日本、德国、韩国和美国是此技术的主要的来源国和专利布局地。其中,德国和美国于1960年左右开始该技术的专利布局;日本和韩国分别于1970年和1980年左右开始该技术的专利布局;中国则主要于1990年后开始该技术的专利布局。可见,国外在此技术上的专利布局时间较早于中国。原因在于:一方面是德国、美国较早地建立了完善的知识产权保护体系,鼓励企业通过专利保护核心技术;另一方面由于德国、美国具有较为成熟的制造业体系,尤其是汽车、机械制造领域对高精度刀具的需求推动了此技术的研发,国外企业出于全球竞争的策略,通过专利布局抢占市场高地。中国虽然在此技术领域的专利布局时间较晚,但其专利数量已经遥遥领先于其他国家,此一方面体现了中国对知识产权保护意识的加强;另一方面也体现出了中国庞大市场需求的吸引力。作为全球制造业中心,中国对加工效率和质量要求不断提升,这也促使国内申请人加大技术创新力度,以增强产品的市场竞争力。

3.2 技术中国省市分布

图5所示为刀具磨损检测技术在中国排名前十的省市分布情况。江苏的专利数量远远高于其他省市。一方面是由于江苏的刀具研发、生产以及应用的全产业链布局较为完善;另一方面是江

苏将高端装备制造和智能制造作为重点发展方向,通过税收优惠、研发补贴等措施激励企业创新。此外,广东和浙江在刀具磨损检测技术领域的专利数量也较多,体现了两省在该技术上具有一定优势。其中,广东对“专精特新”企业的研发补贴和税收优惠提高了企业自主创新的积极性,浙江则通过高校与企业联合研发,推动了刀具磨损检测技术的进步。

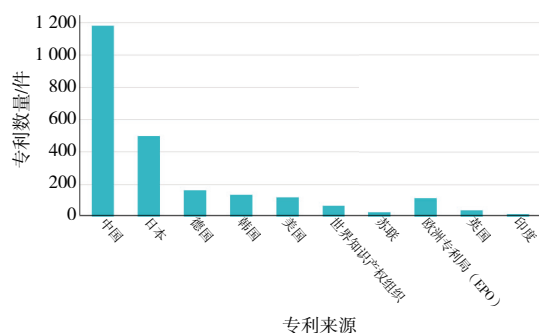


图4 技术全球分布

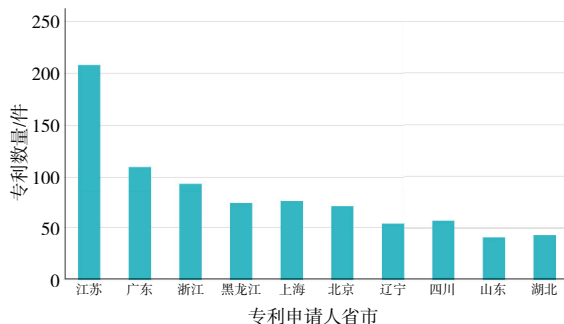


图5 技术中国省市分布

3.3 中国专利申请人国别

中国专利申请人的国别如图6所示。中国的专利数量远远高于他国,这体现了中国对知识产权保护的重视,也表明中国在刀具磨损检测技术上有了较快进步。德国和日本在中国进行了一定数量的刀具磨损检测技术专利申请,这体现了德国和日本在该技术上具有较强的技术研发实力,希望通过专利对其核心技术进行保护,同时占领中国市场高地。此外,也表明中国市场对其具有较高吸引力,希望通过专利布局强化在中国的市场地位,对接中国制造业的升级与高端设备需求,以期提高中国市场占有率,巩固其技术主导权。另外,韩国也在中国进行了少量布局,由此可见,韩国也看到了中国市场的广阔前景,期望能够在中国通过专利保护其技术优势,确保其在技术上

的领先地位能够同时将其转变为经济利益。

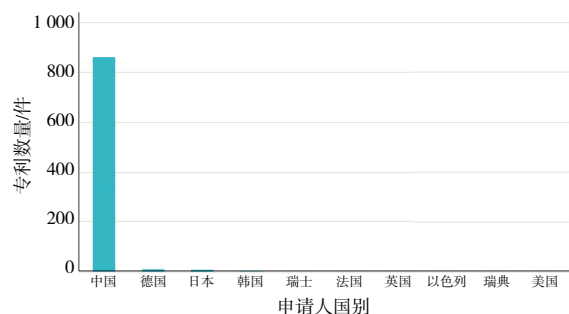


图6 中国专利申请人国别

4 技术主题分析

4.1 技术构成分析

图7所示为刀具磨损检测技术在各个技术分支上的情况。刀具磨损检测技术分布于:机床的零件、部件或附件(B23Q),监视或测量装置(G05B),车削或镗削(B23B),借助于测量材料的化学或物理性质来测试或分析材料(G01N),长度、厚度、角度、面积等的计量(G01B),基于特定计算模型的计算机系统(G06N),铣削(B23C),电数字数据处理(G06F),磨床以及磨具磨损表面的修理或调节(B24B)以及刨削、插削、剪切、拉削、锯、锉削、刮削(B23D)。由此可见,刀具磨损检测技术主要集中在机床和检测领域,通过对刀具磨损状态的检测,提高机床的加工质量与效率。

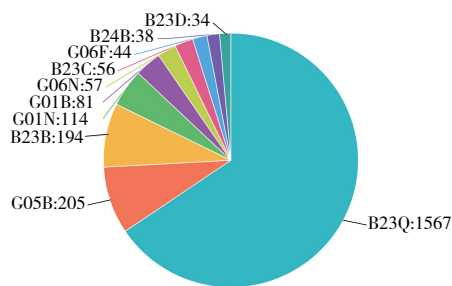


图7 技术构成

4.2 国民经济构成

图8所示为刀具磨损检测技术的国民经济构成情况。其包括:仪器仪表制造业(C40),印刷业和记录媒介复制业(C23),金属制造业(C33),专用设备制造业(C35),通用设备制造业(C34),计算机、通信和其他电子设备制造业(C39),金属制品、机械和设备修理业(C43),互联网和相关服务(I64)软件和信息技术服务业(I65),机动车、电子

产品和日用产品修理业(081)。可见,刀具磨损检测技术主要集中在制造业。而随着智能制造的推进,刀具磨损检测技术还将进一步向跨行业渗透和技术融合发展,而其覆盖的广度以及创新的速度也将直接反应出制造业的智能化水平。

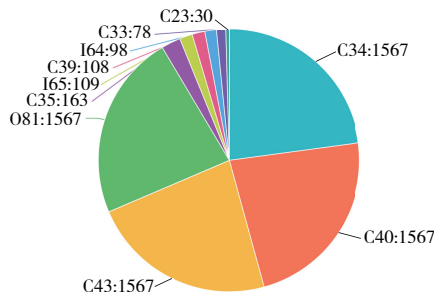


图8 国民经济构成

5 创新主体分析

5.1 全球申请人排名

图9所示为刀具磨损检测技术专利申请量全球排名前十的申请人。哈尔滨理工大学在此技术领域内的专利申请量最多。一方面是由于该高校具有切削加工技术的研发团队,其经过四十余年的发展,具有一定的技术传承;另一方面,该高校加强了与多家企业的深度合作,如与中国航发哈尔滨东安发动机有限公司、深圳市鑫泉精磨技术有限公司合作,加快了技术转化,同时也通过企业反馈优化研发方向,形成了需求—研发—应用的闭环。上述两方面的原因使得该高校在刀具磨损检测技术上具有一定的技术优势,推动了专利的产出。全球排名前十位的其余申请人分别为株式会社日立制作所(HITACHI Ltd)、华中科技大学、欧姆龙株式会社(OMRON TATEISI ELECTRONICS Co.)、重庆大学、京瓷株式会社(KYOCERA Corp.)、南京航空航天大学、发那科株式会社(FANUC Ltd.)、北京航空航天大学和西安交通大学。申请量全球排名前十位的申请人中,国外申请人均为日本企业,表明日本在此技术领域具有较强的研发实力,且进行了较多的专利布局;而国内申请人均为高校,表明我国高校在该技术领域较为活跃,这一方面与国家政策有关,要求高校提高专利转化效益,另一方面由于高校承担大量国家级科研项目,也要求高校以专利形式产出成果。相比之下,我国企业研发更加注重聚焦于短期市场回报,使得其专利布局密度较低。

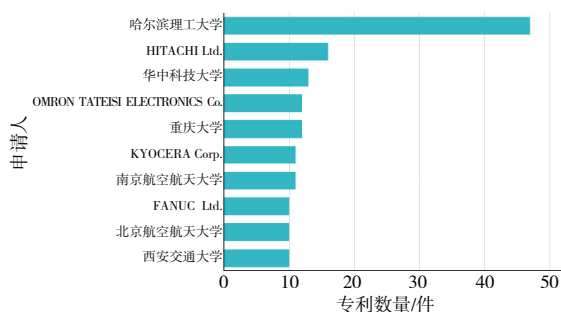


图9 全球申请人排名

5.2 国外申请人排名

图10所示为申请量排名前十位的国外申请人。其中,株式会社日立制作所(HITACHI Ltd.)的专利申请量最多,体现出较强的技术优势以及创新能力。国外排名前十位的其余申请人分别为欧姆龙株式会社(OMRON TATEISI ELECTRONICS Co.),京瓷株式会社(KYOCERA Corp.),发那科株式会社(FANUC Ltd.),大隈株式会社(OKUMA MACHINERY WORKS Ltd.),弗里特-库鲁波股份公司(KRUPP GMBH),三菱电机株式会社(MITSUBISHI ELECTRIC Corp.),日本国通商产业省工业技术院(AGENCY IND SCIENCE TECHN),日立金属株式会社(HITACHI METALS Ltd.)和三菱重工业株式会社(MITSUBISHI HEAVY IND Ltd.)。国外申请人中,仅有一家德国企业(KRUPP GMBH),其余九家均为日本企业。由此也表明:日本在该技术领域具有很强的研发实力,是刀具磨损检测技术的重要技术来源国。

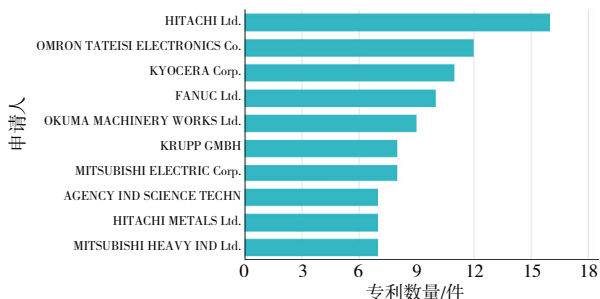


图10 国外申请人排名

5.3 中国专利申请人类型

图11所示为刀具磨损检测技术专利申请人的类型。学校和企业申请量持平。由此可见,刀具磨损检测技术不仅有基础研究,更有商业运用,且高校的基础研究,也进一步促进了刀具磨损检

测技术的商业运用,体现了产学研协同创新和技术转化。

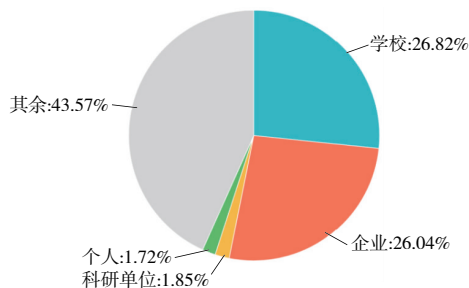


图11 申请人的类型

5.4 发明人分析

图12所示为专利申请量排名前十位的发明人。包括:哈尔滨理工大学的刘献礼、岳彩旭和吴雪峰,温州大学激光与光电智能制造研究院的周余庆,重庆大学的曹华军,中国科学院合肥物质科学研究所的朱鲲鹏,河北工业大学的李超,北京理工大学的王西彬以及三菱综合材料株式会社(MITSUBISHI MATERIALS Corp.)的 Ozeki Hiroo。上述发明人在刀具磨损检测技术领域申请了较多专利,是该技术领域的核心人才,特别是哈尔滨理工大学的刘献礼、岳彩旭,其专注于刀具设计与磨损检测技术的研发,取得了较多的研究成果。此外,结合前述全球申请人排名可知,上述发明人所在的单位、企业或高校也是该领域的重要创新主体。

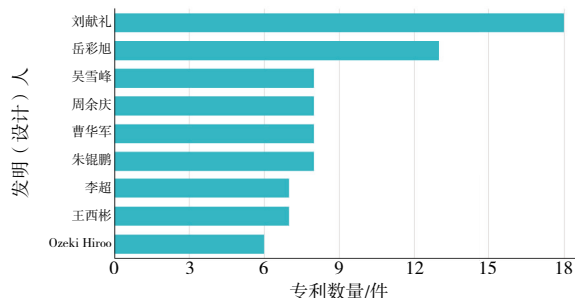


图12 发明人排名

6 专利价值度分析

6.1 专利技术先进性分析

图13所示为全球排名前十位申请人的专利技术先进性。图中气泡大小代表专利数量的多少;数字1~10代表专利技术的先进性,数字越大,表明技术越先进。日本发那科株式会社在该刀具磨损检测领域的技术最为先进,其先进性达

到数字 10 的专利数量最多。此外,日本的京瓷株式会社和株式会社日立制作所也有部分专利的先进性达到数字 10。由此表明:上述企业在该技术领域内具有一定的领先优势,且专利价值度相较于国内更高。国内申请人中,哈尔滨理工大学多数专利的技术先进性仅在数字 5 以下,而技术先进性达到数字 8 以上的专利数量仅有 15 件;其余国内申请人虽也有技术先进性达到数字 9 的专利,但数量较少。由此可见,我国专利数量虽然较多,但整体技术价值度偏低。我国高校应加强与企业对接,提升专利质量与转化效率。

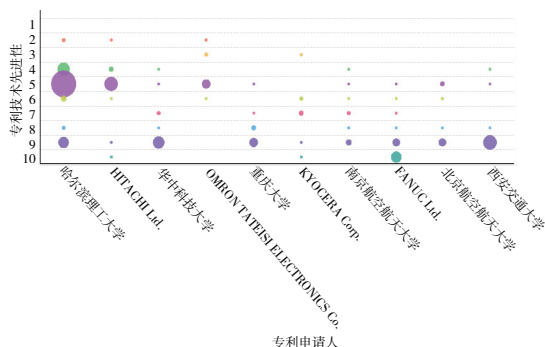


图 13 技术先进性

6.2 中国专利维持时间分析

图 14 所示为中国专利维持的时间。专利维持时间越长,通常可以说明其重要性和经济效益越大,市场价值越高。维持 3~4 年的专利数量有 8.85%,占比最高;而维持 10 年以上的专利仅有 2.42%,且维持在 15 年以上的专利仅占 0.26%。由此表明,我国大多数专利并未带来经济效益,导致申请人较早地放弃了其专利权,以减少专利维护费,也从侧面反映出我国在该技术领域的专利价值度不高。

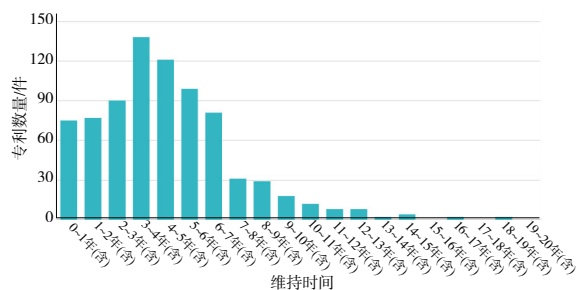


图 14 中国专利维持时间

6.3 权利要求数量分析

图 15 所示为不同权利要求专利的数量分布情况,权利要求的数量宏观上表明专利保护的范

围。权利要求数量越多,保护范围越多,一定意义上专利的质量更高。基于检索结果可知,权利要求项数多于 10 件的,国内专利仅有 15 件,其余均为国外专利。国内专利权利要求项数为 6~10 件的占比 67.01%,并且 2 项以下权利要求的专利占比达到了 22.8%。由此也反映出国外申请人较为重视权利要求保护范围,其体现出的专利价值度也相对较高,而我国在专利数量上虽然具有一定的优势,但权利要求保护范围较窄,其专利撰写质量有待进一步提高。

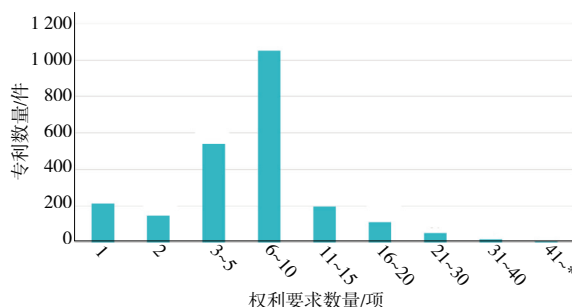


图 15 权利要求数量分布

6.4 首权字数分析

图 16 所示为不同首权字数专利的数量分布情况。首权的字数表明专利采用的必要技术特征描述的详尽程度。通常字数越多,权利要求保护范围越小,其技术越容易被规避。首权字数在 400 以上专利的比例达 42.36%;100 字以下的比例仅为 15%左右,且授权专利基本也是国外申请。由此可见,刀具磨损检测技术专利的稳定性较高,但总体保护范围较窄,不利于技术的保护,市场价值并不高。

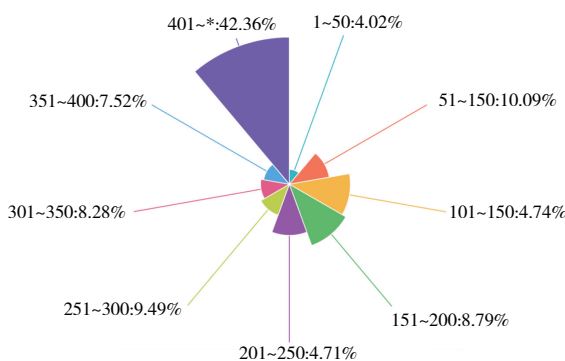


图 16 首权字数分布

7 刀具磨损检测技术研究现状

为更好地探析刀具磨损检测技术的发展态

势,以时间为轴线对相关重要专利进行梳理。基于检索结果可知,国外于1960年左右开始刀具磨损检测技术的专利布局,而国内则是在1990年左右才开始该技术的专利布局。美国通用电气公司是较早进行刀具磨损检测技术研发的企业。为了实现刀具的自动更换,美国通用电气公司^[12]于1968年提出了一种自动检测刀具磨损的方法,基于磨损的切削刃不能产生高频振动信号,采用振动传感器感测由切削动作产生的声振动,并将振动信号分离成高频分量信号和低频分量信号,获得高频分量信号和低频分量信号的比值,当该比值超过切削工具磨损量的预定值时,则输出刀具更换指示。

1980年—2009年期间,国内外申请人对于刀具磨损检测主要以物理量监测为主,且随着计算机的普及,在检测技术中引入了机器视觉、多传感器等手段。

为了防止刀具发生严重的故障,美国西屋电器公司于1981年提出了一种工具磨损监视方法^[13],将施加到切削工具上净功率时间函数的2阶导数用于检测工具的磨损程度,以瞬时确定工具的磨损状态。由于从声波传感器得到的信号中包含较多噪声,导致刀具折断检测的可靠性极低。为了提高工具折断检测的可靠性,欧姆龙株式会社于1984年提出了一种刀具折损检测装置^[14],通过分析声发射信号的概率密度函数,以排除切屑形态的干扰,进而稳定检测刀具的磨损状态。欧姆龙株式会社于1985年提出了一种工具磨损检测装置^[15],通过在切削刃后刀面设置特定宽带的涂层,当切削过程中该涂层接近剥离状态时会产生声发射信号,此时通过最大密度检测手段捕捉能量密度急剧增加来判断工具磨损,具有较高检测精度。弗里特-库鲁波股份公司于1986年提出了一种切削刃磨损极限或断裂的检测方法^[16],在形成切削刃的切削材料中嵌入两个绝缘导电路径,将每条绝缘路径连接至电源,使得一条导电路径构成闭合电路的一部分,另一条导电路径构成开路的一部分。如果闭合电路中的导电路径中断或者开路中的导电路径闭合,则认为刀具达到磨损极限,输出信号以中断加工过程,该方法可以实现刀具磨损极限的可靠检测。

已知磨损区域的面积是用于量化工具磨损更相关的参数,但还没有用于精确测量不规则磨损区域面积的方法。通用汽车有限责任公司于1987年提出了一种基于机器视觉的工具磨损测

量方法^[17],通过以特定角度向切割工具投射光线,使磨损区域与未磨损区域表面形成对比,获取并存储切割工具表面的数字编码图像,基于对比度分割图像的磨损区域,并测量分割的磨损区域尺寸,可适用于不规则磨损区域的精确测量。基于声发射检测刀具磨损存在因噪声干扰导致的精确度不够,住友电气工业株式会社于1989年提出了一种通过测量刀具与工件之间的接触电阻来检测刀具磨损的方法^[18],可以用简单的装置稳定且精确地测量刀具的磨损。基于刀具振动来检测刀具磨损状态存在可靠性不高,通用电气公司于1989年提出了刀具磨损检测方法^[19],通过感应工具振动生产包含直流功率和交流功率的振动信号,基于直流功率和交流功率分别生成第一信号和第二信号,比较第一信号和第二信号以判断刀具状态,可以可靠地检测各种类型的刀具磨损。

通过主轴驱动电机的消耗电流进行刀具磨损检测,由于滚动轴承在电机的驱动电流检测值产生杂讯,使得刀具变动信号小的磨损无法检测。为了对刀具磨损进行充分检测,东芝机械株式会社于1997年提出了一种刀具磨损检测方法^[20],使用空气静压轴承支撑刀具的主轴来降低噪声,并检测主轴驱动电机的消耗功率,将该消耗功率与基准消耗功率比较进而确定刀具的磨损状态,该方法可以检测微小波动的消耗功率,进而能够可靠地进行刀具磨损检测。传统铣刀磨损检测需要暂停加工,广岛大学于2002年提出了一种非接触磨损检测系统^[21],在可转位刀片上设置由导电膜构成的传感器、调谐电容器和高频线圈组成共振回路,当将共振回路中的高频线圈配置于高频振荡接近开关的振荡线圈附近时,刀片磨损将导致传感器断线,振荡电路将产生振荡信号,根据振荡信号即可判断刀具的磨损状态无需暂停加工,提高了效率。

基于在连续加工期间以时间序列检测的负载波形数据和基准波形数据相互比较进行工具磨损检测,需要存储大量的基准波形数据,且由于切削条件的改变,难以预先设定用于判断工具断裂的适当阈值。发那科株式会社于2003年提出了一种工具破损检测或预测装置^[22],由切削负荷检测装置获得切削时间(T)、切削负载波形的面积(S)以及切削负载下降的斜率的最大值(G)中的至少一个作为当前加工周期中的负载状态值,基于在前一加工周期中获得的 T 、 S 、 G 值更新并获得移动变量阈值,并且将移动变量阈值和在当前加工

周期中获得的负载状态值比较以确定刀具的异常状况。由于作为标准存储的阈值数据量小,只需要小的存储容量,且采用了更新的移动变量阈值,就能够准确地检测或预测工具破损。南京航空航天大学^[23] 2009年提出了一种刀具磨损测量方法,将形状复制引入刀具磨损测量中,无需停机即可获得刀具磨损量。大隈株式会社于2010年提出了一种刀具磨损检测的方法^[24],在非加工状态下以第一旋转速度旋转工具检测振动并基于振动最大值计算阈值;以第一旋转速度进行加工,将加工中检测的振动与阈值比较,获取超过阈值且振动最大的频率作为第一频率;以不同于第一旋转速度的第二旋转速度进行加工,将加工中检测的振动与阈值比较,获取超过阈值且振动最大的频率作为第二频率;比较第一频率与第二频率,若两者一致或差值在预设范围内,则判定工具已磨损;该方法不需要通过测试加工预先取得刀具磨损的基准值,且能够适应各种加工条件,通用性也优异。

2010年之后,检测技术进入了智能化和大数据时代。该阶段国内外申请人开始了向基于支持向量机等算法的机器学习、基于卷积神经网络的深度学习、基于集成传感器的工业物联网、数字孪生等方向的深入研究,使得刀具磨损检测技术呈现出了更高精度、更高自适应性。

针对现有刀具磨损监测方法不能准确地监测出刀具具体的磨损量,天津大学^[25]于2011年提出了一种基于协整建模的刀具磨损监测方法,通过建立刀具磨损量与提取的力信号特征之间的协整关系模型,利用切削力信号的各个特征时间序列对刀具的磨损量做出预测。天津大学^[26]于2012年提出了一种基于条件随机场(conditional random field, CRF)模型的刀具磨损监测方法,通过建立刀具磨损状态与提取的声发射信号特征之间的CRF模型,对刀具不同磨损阶段的磨损状态进行了准确识别,进而达到利用声发射信号预测刀具不同磨损状态的目的。针对采用单独的信号电流监测及声发射信号监测存在可靠性低的问题,沈阳利笙电子科技有限公司^[27]于2013年提出了一种刀具磨损检测装置,采用多传感器对电流信号和声发射信号进行多信号采集,可实时对刀具磨损状态进行检测。华中科技大学^[28]于2014年提出了一种陶瓷刀具沟槽磨损预测的方法,其在模型建立时考虑了被加工表面的硬化层深度,从而更加接近真实的加工状况,提高了沟槽

磨损预测的准确性。哈尔滨理工大学^[29]于2015年提出了一种预测刀具剩余使用寿命的方法,采用数据处理电路将刀具磨钝之前的每次切削时间和刀面磨损量拟合成曲线,然后将测量的刀具磨损量与曲线进行对比,得到该刀具的剩余使用寿命。

采用刀具主轴电机的供电功率判断刀具磨损状态,由于需要将阈值设置为较宽范围,无法高精度地检测出刀具异常的发生。日立金属株式会社于2015年提出了一种刀具故障检测方法^[30],通过对刀具主轴电机的功率值进行采样生成功率值数据,基于功率值数据生成功率方差数据,并计算前后两个周期功率方差数据的比值,如果该比值超过阈值 m 次,则判断功率值发生了异常,此方法可以精确地确定和检测刀具故障。对于加工少量零件时难以选取基准切削负荷,韩国生产技术研究院于2016年提出了一种刀具磨损监测方法^[31],通过刀具进给速度对刀具切削负荷进行修正得到基准切削负荷,将刀具加工工件时的实际切削负荷与基准切削负荷对比以判断刀具是否磨损,可提高监测精度。测量微铣刀的磨损状态需要停止切削过程,存在繁琐且耗时的问题。亚利桑那州立大学董事会于2016年提出了一种用于实时监测微铣刀磨损的方法^[32],基于初始切屑生成率与当前切屑生成率计算微铣刀的磨损状态,能够在不停止切削过程的情况下监测微米级刀具磨损。华中科技大学^[33]于2016年提出了一种刀具磨损监测方法,利用压缩感知方法和关键点理论提取刀具磨损的关键特征,可实现刀具磨损的实时在线预测。

为了能够使用低成本的传感器准确判定切削刀具的磨损状态,发那科株式会社于2017年提出一种刀具使用寿命确定装置^[34],其不是检测加工实际工件过程中刀具所受负载,而是通过与加工测试工件时维持固定加工条件的负载进行对比,从而提高磨损状态判断的准确性,且负载传感器设置在相对轻量化的测试工件侧而非刀具侧,因此可以使用动态范围小的低成本负载传感器实现磨损状态的精确检测。基于刀具主轴电机的功率判断刀具异常时,由于材料种类、刀具质量等加工条件的影响使得功率波动范围大,难以准确设定基准波形。温州大学激光与光电智能制造研究院^[35]于2017年提出了一种刀具磨损量预测方法,使用功率传感器采集机床功率信号,基于稀疏贝叶斯学习方法建立刀具磨损量预测模型,预测

结果准确。华中科技大学^[36]于2017年提出了一种基于深度学习的刀具磨损监测方法,通过采集机床中刀具主轴电机的三相电流信号,对信号处理、训练后输出 M 个特征向量,基于特征向量间获得 K 值拟合曲线,通过该 K 值拟合曲线实现刀具磨损的监测,可适用于不同加工条件下的各种刀具的磨损状态。

通过分析旋转刀具振动频谱的频率成分而实时检测刀具的磨损,其在刀具不连续加工中效果良好,但在钻头等连续加工中存在检测可靠性不足。现代威亚株式会社于2018年提出了一种刀具状态的检测方法^[37],基于采样加工获得的摩擦频带设定为正常频带,通过比较加工中产生的摩擦的频带幅值是否超出正常频带实时检测刀具磨损,能够提升生产效率并改善加工质量。当多台工具机使用同一种刀具产品加工时,若要对每个工具机逐一判断其刀具的磨损需要花费大量时间。杨浩青等^[38]于2018年提出了一种刀具磨损监测与预测方法,其引入刀具网实预测(tool cyber-physical prediction, TCPP)机制来同时监控与预测多台工具机同一种刀具的磨损情况,从而提高了检测效率。现有刀具磨损状态预测主要依赖于多域特征的提取和分析实现,存在处理过程繁琐、效率较低的问题。北京航空航天大学^[39]于2018年提出了一种刀具磨损状态检测方法,通过卷积神经网络构建刀具磨损状态预测模型,并获取在目标刀具的切割过程中采集的传感数据序列,进而利用刀具磨损状态预测模型和传感数据序列预测目标刀具的磨损状态,具有效率高和准确性好的特点。韩国生产技术研究院2019年提出了一种基于学习的刀具磨损率预测方法^[40],从监测数据中提取包括与切削力相关的切削数据的数据集,将工具的磨损程度数据添加到数据集中并进行标准化数据格式转换,通过随机选择的软件对标准化数据建模,可以实现实时预测刀具的磨损。北京航空航天大学^[41]于2019年提出了一种数控机床刀具监控系统,其引入了数字孪生技术对刀具的切削过程进行实时仿真分析,可有效提高刀具磨损量的监测精度。

基于刀具加工次数的磨损状态预测,当加工对象的变更等而使刀具磨损的进展速度发生变化时,预测结果将会不可靠。株式会社日立制作所于2019年提出了一种工具磨损诊断装置^[42],将每个刀具的磨损度演变曲线、最新磨损度值以及磨损度阈值与刀具三维模型关联,并在显示装置

上同步呈现,使得操作人员可以直观掌握刀具磨损动态与剩余寿命,实现精准换刀决策。株式会社电装于2020年提出一种基于工具加工点的温度进行工具磨损量预测的方法^[43],测量刀尖附近第一测点的温度,计算第一测点与更靠近刀尖的第二测点之间的温度梯度,基于第一测点的温度及温度梯度,推算出第二测点的温度,以第二测点的温度作为参数,通过热传导分析推测加工点温度,根据推测的加工点温度,利用计算公式预测热扩散导致的工具磨损量,进而提高了刀具磨损预测精度。弗雷萨股份公司于2020公开了一种用于确定工具磨损状态的方法^[44],通过处理工具表面的至少一个光学图像的图像数据以检测磨损区域,并确定磨损区域的表面范围和空间范围,根据所确定范围对工具的磨损状态进行分类,该方法可以自动且可靠地检测工具的磨损状态。

采用激光器测量工具轮廓以预测刀具的磨损状态存在精度不高的问题,宝马股份公司于2020年提出了一种刀具磨损状态的检测方法^[45],将压电传感器设于刀具上,在加工过程中持续采集由压电传感器输出的电信号,将采集的电信号与预定阈值进行比较,进而确定工具的磨损状态,其可以精确地检测一个或多个切削刃的磨损。舍弗勒技术有限两合公司于2021年提出了一种用于监测工具磨损的方法^[46],将当前磨损标记的几何计算值与预先提供的自由面加工过程中形成的最大允许磨损标记进行对比,可在适当时机提示更换工具。通过传感器数据预测工具磨损的机器学习模型,大多数是基于具有均匀时间间隔的时序数据进行训练,而实际中传感器采集的数据因测量周期不规律、网络环境问题导致部分数据丢失,难以直接应用于学习模型。釜山国立大学产学研协力团于2021年提出了一种基于人工智能的数控机床刀具磨损预测方法^[47],通过数据存储、数据分割、数据清洗、重采样、归一化处理等步骤生成标准化数据集,将标准化数据集输入预训练的学习模型,进而预测磨损状态,能够提高磨损预测精度。西安交通大学^[48]于2021年提出了一种刀具磨损状态监测方法,将机制模型与数据驱动方法用于监测刀具的磨损状态,可适用于不同加工条件下刀具的监测。

现有技术通过视觉和图像处理应用机器学习算法测量刀具磨损长度,过度聚焦于特定刀具类型,且受测量装置周围环境的影响,导致预测的可靠性低于预期。韩国生产技术研究院于2022年

提出了一种刀具磨损测量方法^[49],通过从刀具拍摄图像中提取磨损区域图像,旋转不同角度获取各方向磨损长度,选择最小磨损长度作为测量结果,通过监测装置实时显示磨损的长度,可以准确监测刀具的磨损的情况。南京航空航天大学^[50]于2022年提出了一种铣削加工刀具磨损监测方法,采用门控循环单元(gated recurrent unit, GRU)神经网络构建刀具磨损监测模型,监测模型融入注意力优化机制,增加模型的全局性,提升了刀具磨损的预测效果。成都飞机工业(集团)有限责任公司^[51]于2022年提出了一种铣刀刀面磨损量测量方法,其根据铣刀使用前后相应位置的轮廓曲线获取铣刀的磨损量,实施简单,且结果可靠。

为了充分利用刀具的使用寿命,避免机器故障,肯纳金属公司于2022年提出了一种监测刀具磨损的方法^[52],采用分体式、模块化和无线式的磨损检测系统实时监测和预测刀具磨损,准确度高,使用性广。而约翰内斯·海德汉博士有限公司于2023年提出了一种对铁磁刀具进行无接触磨损监测的装置^[53],包括传感器和至少一个磁场发生器,将铁磁刀具与装置相对接近,将偏置磁场耦合到铁磁刀具中,在至少一个方向上测量由铁磁刀具调制的磁场磁通量密度,校正并输出测量信号以确定刀具的几何形状,通过该方法可以可靠地和无接触地检查铁磁刀具的破损和/或磨损,实现刀具寿命的充分利用。

8 结语

基于对刀具磨损检测技术的相关专利分析可以发现其存在如下特点。

1)从申请数量看。中国、日本、德国、韩国和美国申请量较大,是主要的技术来源国和专利布局地。德国和美国于1960年左右开始该技术的专利布局,日本于1970年左右开始该技术的专利布局,而中国于1990年左右才开始该技术的专利布局。中国在该技术上的专利布局虽晚于国外,但其申请量已远超其他国家,体现了中国申请人对知识产权的逐渐重视以及在该技术上的研发更加趋于活跃。日本的申请量仅次于中国,也表明日本在技术领域具有较强优势。

2)从创新主体看。国内申请人以高校为主,其中哈尔滨理工大学的申请量最多,具有较强的研发实力;国外申请人中,株式会社日立制作所申请量最大,且具有较强的研发实力。全球申请量

排名前十位的申请人中,国内申请人占六成,表明中国已成为该技术的主要专利布局地;国外申请人中,欧姆龙株式会社、京瓷株式会社和发那科株式会社进行了较多专利申请,且均为日本企业,表明日本在该领域具有较高活跃度,并具有一定的技术领先优势。

3)从专利先进性看。日本的发那科株式会社在该领域的技术最为先进,其专利价值度较高;而中国虽然具有较高的专利数量,但先进性不足,且多数专利维持时间较短,市场价值偏低。由此也体现了日本在刀具磨损检测技术上的研发处于领先地位,具有较高的市场占有率。

刀具磨损检测技术已经发展到智能感知阶段,也反映了制造业从机械化向数字化的转向。而随着AI技术、物联网以及新材料的突破,刀具磨损检测技术也将更加趋于实时化、精准化和智能化。结合多维度数据提高检测鲁棒性、加速磨损模型训练以及开发嵌入式微传感器实现刀具内部直接监测将是未来刀具检测技术发展的方向。为了提高我国刀具磨损检测技术水平,建议国内研发者未来需要关注以下几个方面。

1)关注国外刀具磨损检测技术。基于专利检索发现,国外在刀具磨损检测技术上具有一定技术优势。因此,对于有效期内的专利,应注意侵权风险;对于已失效的专利,可结合研发需求合理使用。

2)关注底层传感器技术的研发。基于专利数据发现,我国刀具磨损检测技术的专利申请多数集中在如视觉检测算法优化的应用层改进,而关于底层传感器的技术较少。国内申请人应积极开发嵌入式传感器,补强底层技术。

3)关注数字孪生以及预测性维护技术。国内申请人可加强研究构建多物理场耦合的数字孪生模型,提升刀具磨损预测的精度。

4)提升专利撰写质量,构建防御性专利池。国内专利申请存在权利要求保护范围过窄、维权困难的问题。申请人应提高专利撰写质量,合理确定保护范围。专利布局时应注意横向扩展和纵向整合,形成技术护城河。

5)加强高校与企业的合作。结合专利数据可知,我国高校在刀具磨损检测技术的研发上具有较强的优势,国内企业可加强与高校的合作,通过资金与技术的整合,共同提高我国刀具磨损检测技术的提升与发展。

参考文献:

- [1] 孟凡智. 机械加工先进工艺窍门图示例解实用手册[M]. 长春:吉林电子出版社,2015.
- [2] 黄豪. 基于振动和切削力信号的刀具磨损状态监测方法研究[D]. 重庆:重庆邮电大学,2022.
- [3] 董江磊,代月帮,雍建华,等. 刀具磨损状态识别与智能监测方法综述[J]. 风机技术,2019,61(6):67-73.
- [4] 辛宇,张士军. 基于机器视觉的刀具磨损状态检测[J]. 自动化应用,2024(16):207-211.
- [5] 孔冬冬. 基于特征融合的刀具磨损监测技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2018.
- [6] 陈笑颖,许鹏. 基于长短记忆网络的刀具磨损监测方法研究[J]. 机械制造与自动化,2023,52(3):106-111.
- [7] 李哲,贾佳,张文英,等. 盾构机刀具磨损检测专利技术现状[J]. 中国科技信息,2024(21):51-54.
- [8] 邓晓鹏,胡小锋. 基于机器视觉的车铣刀具磨损检测方法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2022(10):105-108,114.
- [9] 袁军,刘丽冰,张艳蕊,等. 刀具磨损状况的检测方法研究综述[J]. 现代制造工程,2021(3):152-160.
- [10] 王海泉,郭修远,李辉,等. 刀具磨损检测技术综述[J]. 自动化技术与应用,2024,43(7):1-6.
- [11] 徐笑阳,劳新斌,周琴. 专利视角下航空航天用SiC基陶瓷材料全球技术发展态势及热点分析[J]. 中国陶瓷,2022,58(6):9-16.
- [12] Gen Electric. Sonic worn cutting tool detector; USA, US3548648[P].1970-12-22.
- [13] Westinghouse Electric Corp. Tool wear and tool failure monitor system; USA, US4442494[P].1984-04-10.
- [14] Omron Tateisi Electronics Co. Tool folding detection device; JPN, JP05007140B[P].1993-01-28.
- [15] Omron Tateisi Electronics Co. Tool wear detection device; JPN, JP05061068B[P].1993-09-03.
- [16] MAYER K. Method and device for detecting a wear limit or break in the cutting edge of a tool; USA, US4744241[P]. 1988-05-17.
- [17] Gen Motors Corp. Tool wear measurement by machine vision; USA, US4845763A[P].1989-07-04.
- [18] Sumitomo Electric Industries. Method of detecting wear of cutting tool by ascertaining a tool workpiece contact resistance; USA, US5030920[P]. 1991-07-09.
- [19] Gen Motors Corp. Apparatus and method for tool break and wear detection; USA, US4942387[P]. 1990-07-17.
- [20] Toshiba Machine Co. Machine tool with worn-detection function for tool; USA, US5921726[P]. 1999-07-13.
- [21] Univ Hiroshima. Non-contact wear detection system. JPN, JP2004074393A[P].2004-03-11.
- [22] Fanuc Ltd. Apparatus for detecting or predicting tool breakage; USA, US20040068394A1[P].2004-04-08.
- [23] 南京航空航天大学.基于形状复制的数控铣削加工刀具磨损测量方法: 中国, CN101590614B[P]. 2011-08-31.
- [24] Okuma Machinery Works Ltd. Tool wear detection method and machine tool; JPN, JP5543890B2[P]. 2014-07-09.
- [25] 天津大学.基于协整建模的刀具磨损监测方法: 中国, CN102152172B[P].2012-08-15.
- [26] 天津大学.基于条件随机场模型的刀具磨损状态监测方法: 中国, CN102689230B[P].2014-04-09.
- [27] 沈阳利笙电子科技有限公司.多传感器刀具磨损检测装置: 中国, CN203542239U[P].2014-04-16.
- [28] 华中科技大学.一种陶瓷刀具沟槽磨损预测的方法: 中国, CN104476326B[P].2017-03-08.
- [29] 哈尔滨理工大学.便携式刀具磨损测量仪及采用该测量仪预测刀具剩余使用寿命的方法: 中国, CN105014481B[P].2017-05-24.
- [30] Hitachi Metals Ltd. Method and device for detecting tool abnormality in machine tools; USA, US4456960[P]. 1984-06-26.
- [31] Korea Institute of Industrial Technology. Tool breakage and wear monitoring method; KR: KR1020180024093A[P]. 2018-03-08.
- [32] Arizona Board of Regents on Behalf of Arizona State University. Systems and methods for real-time monitoring of micromilling tool wear; USA, US10005167[P]. 2018-06-26.
- [33] 华中科技大学.一种基于数据的铣削刀具磨损监测方法: 中国, CN106514434B[P].2018-04-24.
- [34] Fanuc Ltd. Tool life determination; JPN, JP6649348B2[P].2020-02-19.
- [35] 温州大学激光与光电智能制造研究院.基于功率检测的铣床加工过程刀具磨损量预测方法: 中国, CN107363645B[P].2019-03-01.
- [36] 华中科技大学.一种基于深度学习的数控机床刀具磨损监测方法: 中国, CN107877262B[P].2019-06-11.
- [37] Hyundai Wia Corporation. Method for detecting tool status of machine tools; KR: KR1020200043731A[P]. 2020-04-28.
- [38] 杨浩青,郑芳田. 刀具磨耗监测与预测方法: 中国, CN108620949B[P]. 2020-05-22.
- [39] 北京航空航天大学.基于卷积神经网络的刀具磨损状态检测方法、装置及设备: 中国, CN109048492B[P]. 2020-04-21.
- [40] Korea Inst Ind Tech. Wear rate prediction method of tool based on learning; KR: KR1020210070438A[P]. 2021-06-15.
- [41] 北京航空航天大学.一种数字孪生驱动的数控机床

- 刀具监控系统: 中国, CN110900307B [P]. 2020-12-15.
- [42] Hitachi Ltd. Machine tool wear diagnostic device: JPN, JP2021053772A [P]. 2021-04-08.
- [43] Denso Corp. Tool wear amount prediction method and tool wear amount prediction system: JPN, JP2021130159A [P]. 2021-09-09.
- [44] Fraisa Sa. Method for determining tool wear state: EP, EP3881968A1 [P]. 2021-09-22.
- [45] Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft. Cutting tool for machining with wear detection: DE, DE102020102757A1 [P]. 2021-08-05.
- [46] Schaeffler Technologies Ag & Co. Kg. Production plant and methods for monitoring wear on tools: DE, DE102021132475A1 [P]. 2023-06-15.
- [47] Pusan National University Industry - University Cooperation Foundation; Method for predicting tool wear of computer numerical control machine tool based on artificial intelligence: KP, KR1020230063751A [P]. 2023-05-09.
- [48] 西安交通大学. 机理-数据融合驱动的变工况刀具磨损状态监测方法: 中国, CN114102260B [P]. 2022-12-09.
- [49] Korea Inst Ind Tech. A tool wear measuring system and control method thereof: KP, KR1020240061884A [P]. 2024-05-08.
- [50] 南京航空航天大学. 一种基于小波降噪和注意力机制融合 GRU 网络的铣削加工刀具磨损监测方法: 中国, CN114619292B [P]. 2022-12-20.
- [51] 成都飞机工业(集团)有限责任公司. 一种铣刀刀面磨损量测量方法: 中国, CN115741234B [P]. 2024-09-10.
- [52] Kennametal Inc. A system and method for monitoring and predicting wear of a cutting tool in real time: USA, US20240066653A1 [P]. 2024-02-29.
- [53] Heidenhain GmbH. Device and method for non-contact fracture and/or wear monitoring: DE, DE102023207162A1 [P]. 2025-01-30.

收稿日期: 2025-06-09

(上接第 103 页)

- [2] 张永帅, 苏倩辉, 刘洪河, 等. 伺服压力机的技术应用及发展趋势[J]. 锻造与冲压, 2019(16): 54-56.
- [3] 赵旭哲, 赵升吨, 张超, 等. 螺旋压力机高效高性能新技术研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2025, 60(1): 37-45.
- [4] 杨立昭. 增距式抽油机非圆齿轮曲柄滑块换向机构设计研究[D]. 荆州: 长江大学, 2024.
- [5] 龙金星, 邓建春, 苗学刚. 卵形齿轮传动高速精密压力机运动学研究[J]. 锻压技术, 2012, 37(3): 80-84.
- [6] 于大坚, 邹义杰, 王彬, 等. 基于非圆齿轮传动的精密压力机驱动机构设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010(12): 13-17.
- [7] 刘永平, 廖福林. 基于样条拟合的非圆齿轮节曲线误差检测[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(12): 48-51.
- [8] 叶友东, 范武胜. 椭圆齿轮传动特性及动态受力分析研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2024, 44(5): 47-53.
- [9] 夏链, 张义恒, 韩江. 基于时变啮合力的非圆齿轮传动动态磨损研究[J]. 机械传动, 2023, 47(6): 1-7.
- [10] 伍松, 张向军, 付学中, 等. 非圆齿轮传动研究现状及发展趋势[J]. 机械传动, 2023, 47(11): 168-175.
- [11] 黄军. 多连杆机械式压力机动力学分析[J]. 办公自动化, 2024, 29(20): 41-43.
- [12] 戚义鹏, 孙志坤, 沈扬, 等. 伺服压力机六连杆机构设计探究[J]. 锻压装备与制造技术, 2024, 59(6): 14-17.
- [13] 杨泽宇. 非圆齿轮系-多连杆组合式植苗机构设计与试验[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.
- [14] 袁全, 程慧杰, 张传锦, 等. 1600 kN 伺服曲柄压力机驱动控制系统设计与应用[J]. 锻压技术, 2025, 50(1): 193-200.
- [15] 黄志东. 非圆齿轮冲压机构优化设计与分析[J]. 制造业自动化, 2022, 44(11): 85-97.
- [16] 马敏海, 吕涛. 伺服机械压力机主传动机构多目标优化设计研究[J]. 机械设计与研究, 2024, 40(4): 111-116.
- [17] 王亚洲, 陈柏昕, 马晓文. 电火花线切割加工非圆齿轮表面完整性研究[J]. 机械设计与制造工程, 2025, 54(3): 37-42.
- [18] 刘永平, 员贝贝, 魏永峭, 等. 基于包络特征的非圆齿轮数字化设计与齿形优化研究[J]. 机械传动, 2022, 46(8): 55-60.
- [19] 杨志勇, 张德强, 李煜. 基于 MATLAB 与 SOLIDWORKS 的不同凸轮曲线凸轮机构运动特性分析[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2022, 42(3): 11-13.
- [20] 陈云, 韦俊, 余宽, 等. 压力机主电机安装方式[J]. 锻压装备与制造技术, 2024, 59(6): 54-57.

收稿日期: 2023-12-25