综述

锤上模锻智能化发展现状及其关键技术

夏 云[1,2]，汪爱明[1]，叶 洋[3]，刘振宇[1]，李祥龙[1]，赵启奔[1]，郭仲尧[1]
（1. 中国矿业大学（北京） 机械与电气工程学院，北京 100083；2. 中国矿业大学（北京） 人工智能学院，北京 100083；
3. 煤炭科学技术研究院有限公司检测中心，北京 100013）

摘要：锤上模锻是制造煤矿机械的常见方法，智能化锤上模锻旨在实现无人锻造，解决传统锤上模锻招工难和成本高的问题。首先，以综采工作面刮板输送机的刮板等零件锤上模锻制造为例，介绍了传统锤上模锻生产线的一般工艺，在统计铸造、焊接、锻造等热加工技术智能化相关研究文献的基础上，指出模锻仍是智能热加工的薄弱环节，不能满足发展智能制造的要求；然后，详细分析了智能化模锻以及锤上模锻的现状，指出视觉识别定位、工业机械手末端执行器和工业机械手视觉控制是实现锤上模锻智能化的关键技术，并介绍了这 3 类技术的研究现状；最后，归纳了智能锤上模锻的研究难点，分析了研究煤矿机械智能化锤上模锻的理论意义与工程价值。

关键词：智能化锤上模锻；工业机械手；视觉定位；视觉控制；末端执行器
DOI：10.13330/j.issn.1000-3940.2024.04.001
中图分类号：T-19 **文献标志码：A** **文章编号：1000-3940（2024）04-0001-14**

Development status and its key technologies on intelligentization in hammer die forging

Xia Yun[1,2], Wang Aiming[1], Ye Yang[3], Liu Zhenyu[1], Li Xianglong[1], Zhao Qiben[1], Guo Zhongyao[1]
(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
2. School of Artificial Intelligence, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
3. Testing Center of CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Hammer die forging is a common method to make coal mining machinery, and the objective of intelligent hammer die forging is to realize unmanned forging and solve the problems of difficult recruitment and high cost of traditional hammer die forging. Therefore, for the hammer die forging manufacturing of scraper and other components for the scraper conveyor on fully mechanized face, the general process of the traditional hammer die forging production line was introduced, and based on a comprehensive review of research literature focused on the intelligentization of hot processing technologies including casting, welding, forging and so on, it was pointed out that the die forging was still the weak link of intelligent hot processing and could not meet the requirements of developing intelligent manufacturing. Furthermore, a detailed analysis of the status on intelligent die forging and hammer die forging was conducted, it was pointed out that the visual identification and positioning, end effector of industrial manipulator and visual control of industrial manipulator were key technologies for realizing the intelligentization in hammer die forging, and the research status of these three technologies was introduced. Finally, the research difficulties of intelligent hammer die forging were summarized, and the theoretical significance and engineering value of intelligent hammer die forging for coal mining machinery were analyzed.

Key words: intelligent hammer die forging; industrial manipulator; visual positioning; visual control; end effector

智能制造是制造业发展大趋势。《中国制造 2025》的战略任务与重点中指出："推进制造过程智能化。在重点领域试点建设智能工厂/数字化车间，加快工业机器人等技术和装备在生产过程中的应用"、"紧扣关键工序智能化、关键岗位机器人替代"[1-2]。

锤上模锻在国民经济中占有极其重要的地位[3]，作为一种常用制造方法广泛应用于机械装备制造业。锤上模锻目前主要通过人工操作模锻锤实

收稿日期：2023-12-07；**修订日期：**2024-02-28
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52374167）
作者简介：夏 云（1979-），女，硕士，工程师
E-mail：xiayun@cumtb.edu.cn
通信作者：汪爱明（1982-），男，博士，副教授
E-mail：1666252993@qq.com

现。然而，锤上模锻生产工作环境恶劣且劳动强度大。生产线温度高（始锻温度高达 1200 ℃，终锻温度为 800 ℃左右）、噪声大（约为 120 dB），锻工由于长时间接触高分贝噪声，听力会显著下降，甚至耳聋，工龄越长，听力越差，并能引起多种疾病；早在 1765 年就有关于锻工噪声性耳聋的报导[4]。生产过程中工人和锻件的距离近，体感温度高，体能消耗大，一般是多名工人间隔一定时间轮流操作设备，进而导致用工成本高。鉴于上述原因，锻造流水线正面临招工难和成本高两大难题。应用工业机械手替代人工实现智能化锤上模锻，可以把工人从艰苦的生产线中解放出来，提高生产效率，降低生产成本，符合智能制造发展的大趋势，意义重大。

1 国内外研究现状

1.1 传统锤上模锻生产线现状

锤上模锻工艺一般包括：棒料剪切、电炉上料与加热、锻压、切边、整形和码垛；生产线由剪切机、电炉、模锻锤、切边机和整形机等组成，在棒料剪切、电炉上料与加热工序实现了自动化，但锻压、切边、整形和码垛工序仍要人工参与（图 1）。下面以某厂家进口德国 LASCO 公司的全液压电液模锻锤为核心的 125 kJ 模锻生产线锻造刮板（图 2）为例，介绍锤上模锻锻压、切边、整形及码放工序现场作业情况。具体情况如下。

图 1 刮板输送机锤上模锻生产线现场

（a）锻压 （b）切边 （c）整形

Fig. 1 Site of hammer die forging production line for scraper conveyor

（a）Forging （b）Trimming （c）Shaping

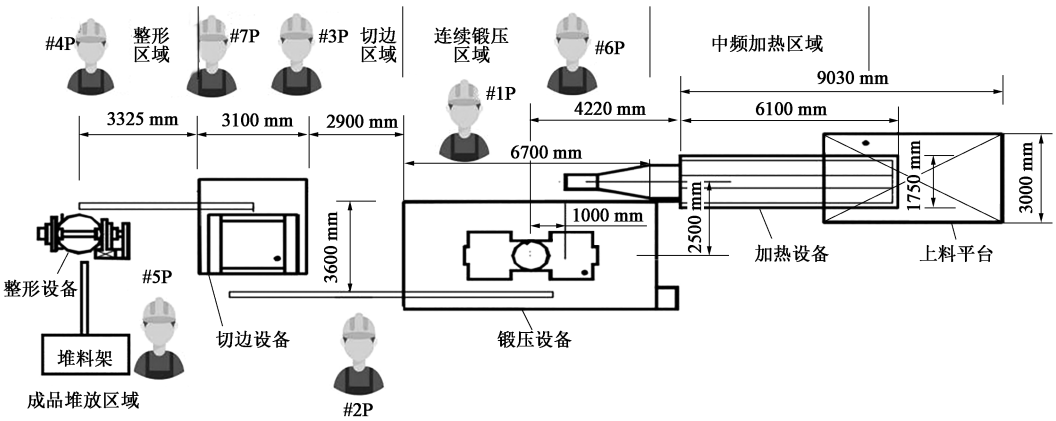

图 2 某刮板输送机厂锻造车间 125 kJ 锤上模锻生产线

Fig. 2 125 kJ hammer die forging production line in forging workshop for a scraper conveyor plant

（1）锻压

加热后的整个棒料呈亮红色（1200 ℃左右），锻压工#1P 根据棒料颜色判断加热是否合格。将加热温度偏低的棒料放进废料箱；温度合格的棒料则由工人用夹钳夹入锻压模膛内，启动锻压机，连续拍打数次（锻件不同，拍打次数不同，每次拍打的能量不同）。每次拍打时锻件可能出现移位现象，此时人工夹持复位。在高温棒料放到模具上之前，需要在上下模上喷石墨乳，延长模具寿命；第 1 次和第 2 次锻压之后，需要向锻件上撒木屑，起到脱

模、防止表面氧化脱碳和去除氧化皮的作用。该工位的劳动强度特别大。

（2）切边

锻压成形后，转运工#2P 利用专用工装及时地将带飞边的高温锻件转移至切边机上。切边工#3P 启动切边机，切下的边料由切边工#3P 夹至飞边箱，留下的锻件由整形工#4P 夹持至整形机上。

（3）整形及码放

整形工#4P 启动整形机对锻件进行最终整形，得到成品件，码放工#5P 夹持成品件至堆料架进行冷却。

现场工人面临高强度劳动、高温环境、高分贝噪声 3 大主要因素的危害，工人近距离接触锻件，体感温度高，体能消耗大。因此，在锻压工位，2 名工人（锻压工#1P 和锻压工#6P）约 10 min 轮换一次，切边和整形工位共 3 人轮换，这加大了用工成本。此外，锻工听力普遍较差。因此，亟需实现智能无人化锤上模锻。

1.2　智能模锻和模锻机器人研究现状

如图 3～图 5 所示，针对焊接、铸造、锻造和模锻加工，分别以机器人、智能作为关键词，在知网、Engineering Village 和 Web of Science 平台检索，发现：焊接机器人和智能焊接的文献特别多，累计达 7059 篇；铸造机器人和智能铸造的文献次之，累计达 529 篇；锻造机器人和智能锻造的文献更少，仅有 218 篇；模锻机器人和智能模锻仅有 61 篇，其中，2015 年至今的文献有 33 篇，超过以往 35 年的总和（2015 年以前的文献共 28 篇）。这表明：中国制造 2025 国家战略的提出促进了模锻机器人化和智能化的研究，但模锻仍是智能热加工的薄弱环节，不能满足发展智能制造的要求。

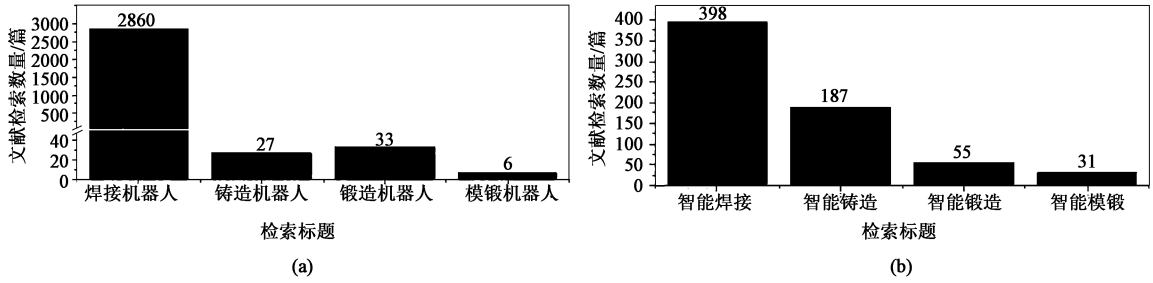

图 3　知网平台文献检索结果

（a）以机器人作为检索标题　（b）以智能作为检索标题

Fig. 3　Results of literature retrieval on CNKI platform

（a）Search title of robot　（b）Search title of intelligence

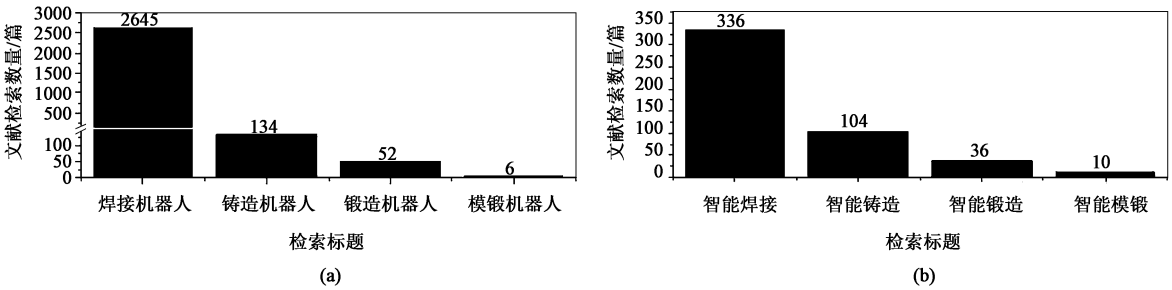

图 4　Engineering Village 平台文献检索结果

（a）以机器人作为检索标题　（b）以智能作为检索标题

Fig. 4　Results of literature retrieval on Engineering Village platform

（b）Search title of robot　（b）Search title of intelligence

在国外，1982 年，瑞典针对曲轴和前车轴的模锻，将工业机器人用于运输工序，以微型计算机为总控，实现了模锻生产线运输自动化[5]。Bakhshi-Jooybari M 等[6-7]研究了基于知识的锻模智能设计系统，将新零件与成品进行比较，利用经验规则确定模锻工艺，缩短了制造周期。Aziz E S 等[8]研究了基于知识的直齿圆柱齿轮精锻模具优化设计方法，对锻造过程中所有阶段进行精确描述，从而得到每个锻造阶段所需的锻造载荷和能量，降低了锻造能耗。Padhy S K 等[9]针对加强肋和腹板类锻件，提出了一种计算形状复杂度因子的方法，设计了可以确定不同锻件公差的专家系统。为了确定汽车活塞

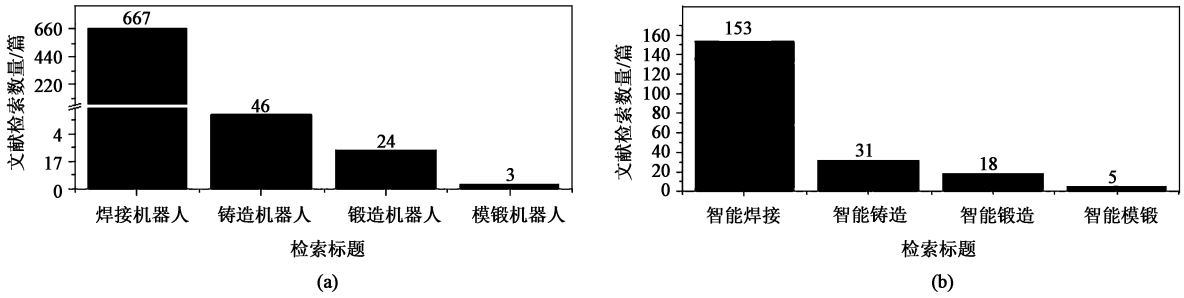

图 5 Web of Science 平台文献检索结果

（a）以机器人作为检索标题 （b）以智能作为检索标题

Fig. 5 Results of literature retrieval on Web of Science platform

（b）Search title of robot （b）Search title of intelligence

模锻所需的最终锻造载荷、最大等效应变速率和模锻工艺参数，Srivastava S 等[10]利用有限元对不同工艺参数进行了仿真研究，利用仿真得到的数据，研究了基于神经网络的智能分析模型。此外，Bae H Y 等[11]研究了锻件形状视觉识别技术。

在国内，2003 年，中国机械总院集团北京机电研究所有限公司[12]引进德国 EUMUCO 公司的热模锻压力机及其机器人，实现了锻造过程的机械化和自动化。2018 年，浙江丰诚智能科技有限公司[13]研发了工业机器人热成形模锻智能装备，实现了机器人换人；该装备以 3 台 6 轴工业机器手和电动螺旋压力机为核心，实现了上料、加热、预锻、喷墨、切边、飞边清理等工序的自动化。扬力集团股份有限公司[14]研发了热模锻生产线物料在线检测及筛选装置，实现了棒料缺陷检测、坯料重量检测与分选、始锻温度检测、终锻温度记录、加热温度偏低毛坯的剔除等功能；研发了自动润滑冷却模具的装置[15]，延长了模具寿命；研发了智能生产管理系统，实现了生产过程的可视化与管控[16]；研发了全自动换模系统，实现了机器换人；集成上述技术，形成了高效精密热模锻智能化柔性生产线，并获得 2020 年度江苏省科学技术奖三等奖。此外，Yi D 等[17]研发了航空锻件模锻生产线智能管控系统；Ji Y L 等[18]提出了由系统管理、能源管理、基础信息管理、生产调度组成的模锻生产线管理系统。针对凸轮模锻关键工序的温度及成形力等参数的控制问题，冯若愚等[19]和陈庆华等[20]设计了基于模糊 PID 的自动控制系统。针对模锻件生产信息在高温条件下动态监控的难题，郭强等[21-22]研究了基于软指针标签的模锻件信息动态追踪系统。此外，学者还针对模锻过程中的机械手末端执行器[23-24]、设备故障诊断[25-27]、工艺优化[28-29]、锻件计算机辅助设计[30]、设备智能控制[19,31]等进行了研究。

综上可知，目前国内外的智能模锻研究主要集中在机器人化模锻（工业机械手替代人工）、模锻工艺优化、锻件计算机辅助设计、相关工艺专用设备的自动控制及智能故障诊断方面；但相关研究仅针对以曲柄压力机、螺旋压力机为核心的生产线。曲柄压力机输出静压力，螺旋压力机输出较小的冲击力，其配套的模具拔模斜度较锤上模锻的小，此类设备不会发生锻件移位问题，锻件反而会粘到模膛内，需配置顶出装置将其顶出。

不同于上述具有静压力或较小冲击力的模锻，锤上模锻冲击力大。以锤上模锻为研究对象，吴国庆等[32-33]研究了模锻锤智能控制方法，并与企业合作研制了智能模锻锤[34-38]；研发了毛坯和模具温度监控系统，保证锻件在始锻和终锻温度之间进行锻造以及模具在最佳温度范围内工作；开发了专家系统，根据锻件材料、尺寸和变形，确定最佳打击能量、次数、次序和频率；研究了在线监测与智能控制系统，实现了对打击参数的优化调整；采用操作机械手，实现了自动取料、换模膛和下料。但是，对于锻件移位和复位问题仍然需要人工判断与处理。

2 锤上模锻智能化关键技术

2.1 视觉识别定位技术

工业机械手需要机器视觉技术，方可模仿人类的智能，赋予工业机械手智能行为[39]，完成锻件移位的判断和位姿感知，实现智能锤上模锻。

目前，工业中常见的是通过识别二维图像引导机械手抓取平面目标[40-42]；相机需垂直于物体所在平面拍摄，常用 Blob 区域识别定位算法，如形心法、最小外接矩形法、最小外接圆法等。为了对空

间目标进行定位，提出了单目视觉识别物体三维坐标的方法；利用已知的点特征和直线特征在图像上的投影关系计算物体位姿[43-45]；该方法适用于规则目标，且相机光轴与工件所在平面需呈锐角。为了更准确地获得复杂环境下目标物体的三维信息，提出了双目立体视觉定位技术[46-47]。立体匹配效果决定定位准确性，学者们对 SURF（Speeded-up Robust Features）[48]、SIFT（Scale Invariant Feature Transform）[49]两种传统图像特征点检测与匹配算法进行了改进，经立体匹配和三维重构后得到工件形心的三维坐标。

利用视觉技术，针对锻件的相关研究主要集中在尺寸测量方面。为解决人工接触式检测大型自由锻锻件尺寸存在的误差大、周期长等问题，神户钢铁公司的 Okanoto A 等[50]从双目相机获得的同时刻不同角度图片中提取图像特征点像素坐标，研究了基于双目视觉测量模型的特征点空间坐标计算方法，从而获得锻件尺寸。吴瑞敏[51]将彩色图像分解为 RGB 空间的三通道图像，采用级联中值滤波与梯度算子相结合的方法对各通道图像进行边缘检测，利用 Harris 算子提取图像特征点，提出了基于特征点的渐进式立体匹配方法，对锻件表面进行三维重建，获得了大型锻件的几何尺寸。针对长轴类大锻件双目视觉尺寸测量，李哲林[52]设计了摄像机上下布置的测量系统，提出了基于亚像素插值方法的边缘提取算法，以锻件截面线的灰度分布曲线上局部极大值作为特征点建立稀疏特征矩阵，通过欧式距离对两幅图像对应扫描线上的稀疏特征点进行匹配，研究了基于双目视觉的锻件三维重构，分析得到锻件尺寸。类似地，刘斌[53]针对大型锻件尺寸测量，围绕双摄像机空间配置及参数现场标定、图像去噪、立体匹配及三维重建等问题进行了研究。为了解决双目视觉系统匹配的多义性问题，并减少错误匹配，裴善强[54]设计了基于四目相机的大型长轴类自由锻锻件尺寸检测系统。此外，视觉技术也用于具有复杂特征的锻件的几何参数测量，如农机犁体锻件曲面检测[55]。

由上可知，以高温锻件为对象的研究主要集中在大型自由锻锻件的尺寸测量，未见锻件的定位研究，尤其是锤上模锻锻件。Wang A M 等[56]设计了由水平相机和竖直相机组成的视觉系统，通过水平布置的相机判断锻件移位；若移位，则利用推杠将移位锻件推至水平平台，通过竖直布置的相机获得此时的锻件图像，分析后得到锻件中心。本质上，该方法属于单目平面定位，虽然定位较准确，但系统复杂、操作繁琐、耗时较长，难以满足生产节拍要求。为此，徐琪彪[57]研究了锤上模锻锻件位姿双目识别方法，但误差较大，约为 17.6 mm。

智能锤上模锻的高温锻件位姿识别面临的难点为：

（1）锤上模锻现场振动强，导致相机抖动，影响拍摄的图像质量；与常温物体图像相比，锻件温度高，图像噪声多，高温锻件产生的辐射光和高温氧化皮会对图像处理效果造成严重影响，影响定位。

（2）为增加流动阻力，使金属充满模镗，并容纳多余金属，同时减轻上下模的直接撞击，模膛设有飞边槽（图 6），因此，锻压过程中的锻件存在不对称飞边（图 7）；刮板锻件不存在特征点（大部分锻件均难以找到可用特征，高温时即使存在特征点，也无法准确识别定位），这会导致锻件本体定位误差（不对称飞边与锻件本体被识别为一个区域），如图 8 所示。因此，在工业机械手复位锻件时，锻件本体中心与模膛中心难以准确对齐，导致复位失败，下一步锻打必然产生废品。

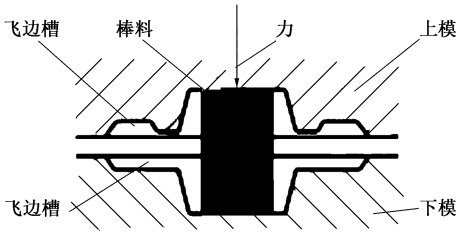

图 6　锤上模锻系统示意图

Fig. 6　Schematic diagram of hammer die forging system

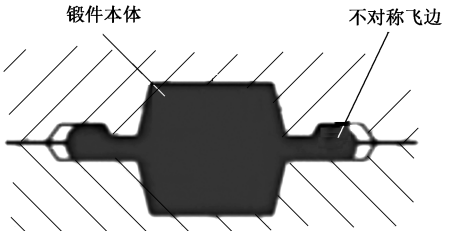

图 7　具有不对称飞边的锻件示意图

Fig. 7　Schematic diagram of forgings with asymmetric flash

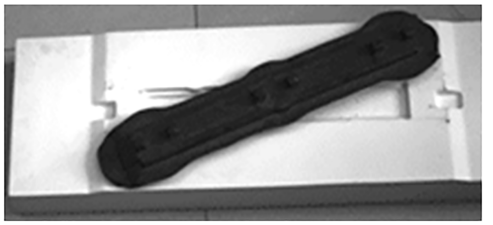

图 8　常温下具有不对称飞边的刮板锻件

Fig. 8　Scraper forgings with asymmetric flash at room temperature

2.2 机械手末端执行器

工业机械手末端执行器至关重要，直接与目标物接触，夹持或松开物体。20 世纪 70 年代，国外开始对机器人末端夹持器进行研究。1974 年，日本研制出了第 1 个具有多自由度的 Okada 三指灵巧手爪[58]（图 9a），但刚度差，抓力小。20 世纪 80 年代，一些著名的机械手爪相继问世，如：Utah/MIT 机械手爪[59]（能像人手一样操作与抓持目标）、Stanford/JPL 多指手爪[60]（比 Okada 手爪的夹持力大）、SRMS 机械手爪[61]（辅助宇航员进行舱外活动，承担空间站装配任务）、Belgrade/USC 多指手爪[62]（图 9b）。进入 90 年代，研究取得突破，如：UB-Ⅱ三指手爪[63]（图 9c，与人类手掌尺寸相近）、DIST 四指手爪[64]（由 17 根连杆组成，16 个自由度）、LMS 多指手爪[65]、NASA 五指手爪[66]（图 9d）。21 世纪以来，更多手爪被研制出来了，如智能化 DLR-Ⅱ多指手爪[67]（图 9e）、Tuatk/arlsruhe 多指手爪[68]（1 个自由度，全手所有关节联动）、Laval 多指手爪[69]（图 9f，双电机驱动，抓取精准可靠）、二指 Delft 手爪[70]（平行四边形机构，液压驱动，可适应夹持目标）、Shadow 五指手爪[71]（精度高且抓取灵活）、医用欠驱动五指手爪[72]（15 个

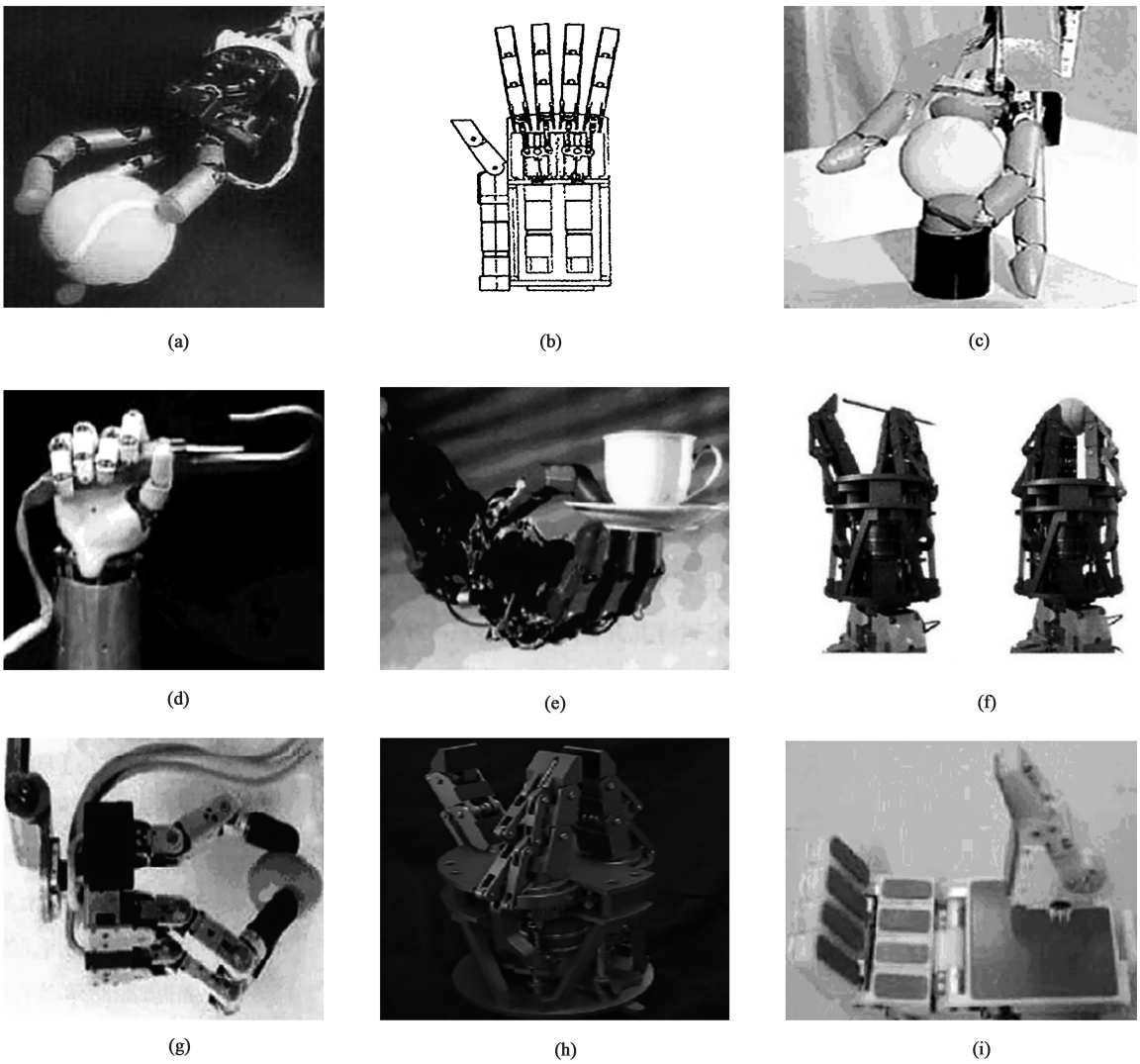

图 9 机器人末端夹持器

（a）Okada 三指灵巧手爪 （b）Belgrade/USC 多指手爪 （c）UB-Ⅱ三指手爪 （d）NASA 五指手爪 （e）DLR-Ⅱ多指手爪 （f）Laval 多指手爪 （g）BH-3 多指手爪 （h）TH-1 三指欠驱动手爪 （i）SARAH 自适应机械手爪

Fig. 9 Robot end clampers

（a）Okada three-finger flexible paw （b）Belgrade/USC multi-finger paw （c）UB-II three-finger paw （d）NASA five-finger paw （e）DLR-II multi-finger paw （f）Laval multi-finger paw （g）BH-3 multi-finger paw （h）TH-1 three-finger underactuated paw （i）SARAH self-adaptive mechanical paw

自由度，最大夹持力达 50 N）。近些年，德国雄克公司研发了可夹持多种生活物品并进行分类的五指机械手爪[73]，意大利研制出一种钳口式机械手爪，能模仿人手捏取物品的特点[74]。在国内，20 世纪 80 年代末，张启先院士研发了 BH 系列的多指手爪[75]（图 9g），填补了当时在多指手爪方面的国内空白。20 世纪 90 年代，相关研究快速发展，进入 21 世纪，硕果累累：北京航空航天大学机器人研究所研制出 BH-4 三指手爪[76]；清华大学研制出抓取力自适应的 TH-1 三指欠驱动手爪[77]（图 9h）；中国科学院研制出一种由 4 个电机驱动、可实现多种抓取任务的类 SARAH 自适应机械手爪[78]（图 9i）；为提高 TH-1 手爪的抓取效率和抓取质量，清华大学研制出 TH-2 手爪[79]。近些年，浙江大学研制出用于果蔬采摘、抓力可变的欠驱动三指手爪[80]以及具有自锁功能的、由曲柄滑块与 RRR 杆组构成的抓手[81]；江南大学针对炉窑热处理生产线，设计了具有 4 个自由度的直角搬运机器人手爪[82]，实现了抓取、码放等功能；为实现微装配环境下的微操作，浙江大学研制了微型压电夹持器[83]，针对该夹持器夹取时出现的目标脱落、损坏等问题，又设计了具有力传感的微夹持器[84]。

在模锻领域，为配合转向节热模锻压力机自动化改造，杜利斌等[23]设计了如图 10 所示的机器人末端夹持器，通过夹取转向节两个斜侧面实现抓取，采用预兜飞边方式防止工件二次掉落。为解决高温对夹具和动力源的影响，选用热作模具钢作为夹具材料，并在夹具上设置隔热材料。谢子锋等[24]设计了以六轴机械手和相关工序专机为核心的热模锻连杆自动化生产系统，针对辊锻、锻造和冲校工序中不同形状毛坯的抓取问题，分别设计了如图 11～图 13 所示的夹持机构，主要由液压缸、连杆机构和前后夹爪（或上下夹爪或左右夹爪）组成。

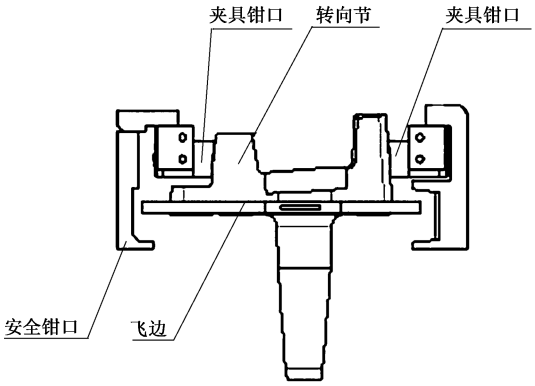

图 10　转向节夹具抓取结构

Fig. 10　Grabbing structure of steering knuckle fixture

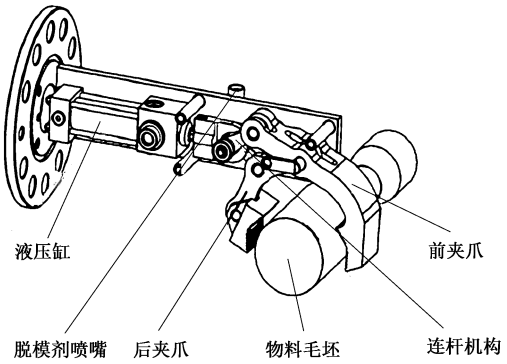

图 11　辊锻工序的连杆传动的夹持机构

Fig. 11　Clamping mechanism of connecting rod transmission in roll forging process

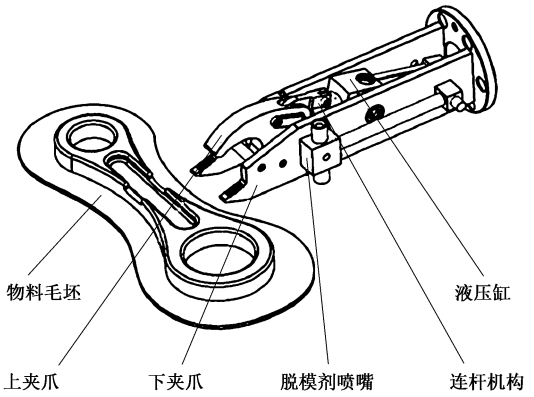

图 12　锻造工序的连杆传动的夹持机构

Fig. 12　Clamping mechanism of connecting rod transmission in forging process

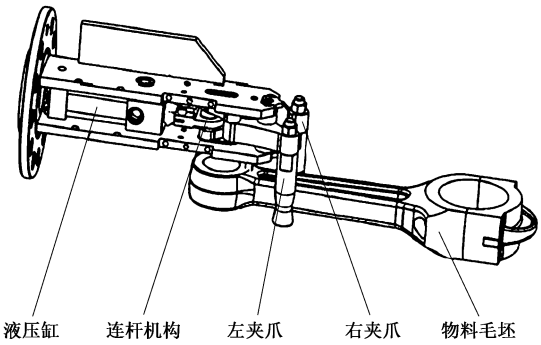

图 13　冲校工序的连杆传动的夹持机构

Fig. 13　Clamping mechanism of connecting rod transmission in punching and shaping process

锤上模锻刮板锻件夹持的难点在于高温锻件本体怕夹伤。如图 1 所示，在现场，工人利用夹钳夹取锻件飞边，复位锻件；或如图 14 所示，夹持飞边将锻件从模膛里取出，然后通过 U 形叉子（由链条吊装在横梁上）托着工件两侧飞边，将锻件转移至

(a) (b) (c)

图 14 锤上模锻车间工人使用 U 形叉子转移高温锻件现场图

(a) 切边 (b) 中间转移 (c) 锻压

Fig. 14 Scene drawings of high temperature forgings transfered by U-shaped forks by workers in hammer die forging workshop

(a) Trimming (b) Intermediate transfer (c) Forging and stamping

相邻工位。

2.3 机械手视觉控制技术

最初，将视觉用于控制机械手是为了解决定位精度不准的问题[85]，采用的是先动再看（look-then-move）的开环控制[86-87]，视觉只一次性地提供机械手末端期望位姿，称为传统机械手视觉开环控制方式；控制精度受机械手、摄像机等模型精度的影响，每个环节均可能导致较大的控制偏差。为此，Hill J[88]提出了边动变看（look-and-move）控制方式，研究了具有视觉反馈的机械手闭环控制系统，期望机械手自主完成复杂精细的任务，称为机械手视觉伺服控制。

工业机械手视觉伺服控制技术依据反馈信号可分为：基于位置的视觉伺服和基于图像的视觉伺服。如图 15 所示，基于位置的视觉伺服控制技术利用目标实际空间位姿与期望值的相对误差驱动机械手。

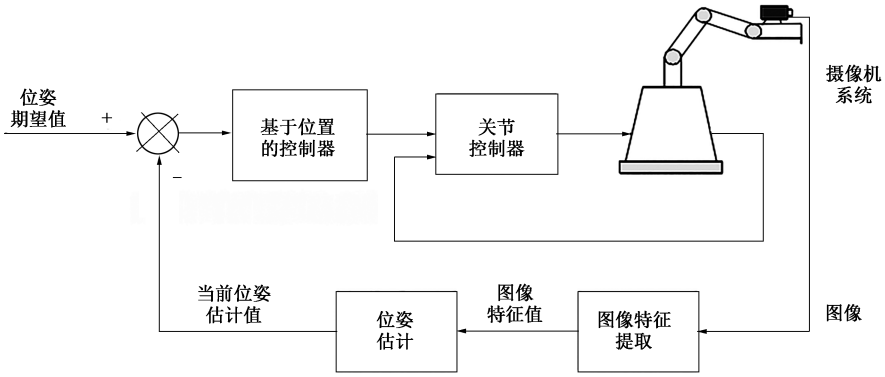

图 15 基于位置的视觉伺服控制示意图

Fig. 15 Schematic diagram of position-based visual servo control

基于位置的视觉伺服控制技术对定位精度要求极高，对标定误差敏感，严重依赖于视觉系统与机器手精度。如图 16 所示，基于图像的视觉伺服控制技术无需估计目标位姿，基于目标当前图像特征向量和理想图像特征向量的差值计算机器人关节角控制量，驱动机械手到达期望位姿。Chaumette F 等[89-90]采用图像特征空间显示轨迹规划方法开展了基于图像的机械手视觉伺服控制研究。Espiau B 等[91-92]为了减少机械手关节限制以及运动学奇异性对系统的影响，结合任务函数法对基于图像的机械手视觉伺服控制进行了研究。

当前，国内对于机械手视觉伺服控制技术的研究处于发展阶段。在基于位置的伺服控制方面，陶辉[93]基于模糊 PID 控制策略设计了基于位置的机械手单目视觉伺服控制系统。蔡伟东[94]提出了基于目标二次成像的虚假解排除方法，计算机械手的位姿，研究了基于位置的机械手视觉伺服控制。曹家军[95]采用 eye-to-hand 视觉系统，研究了基于位置的视觉

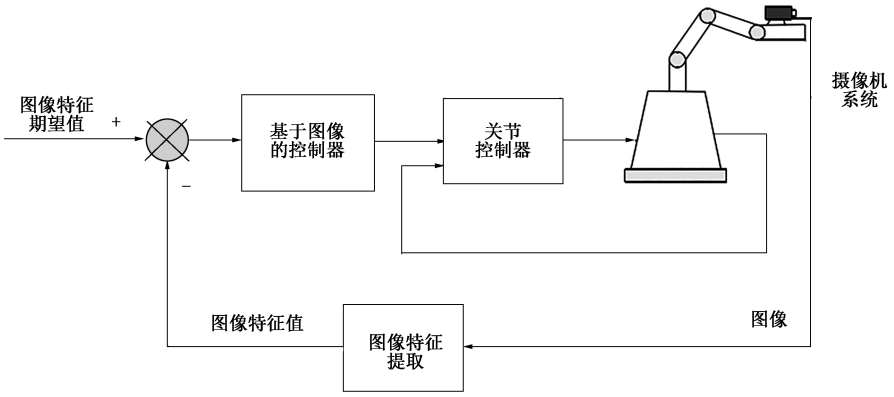

图 16　基于图像的视觉伺服控制示意图

Fig. 16　Schematic diagram of image-based visual servo control

伺服控制技术，将五次多项式插值法、遗传算法与非线性规划算法相结合，提出了机械手轨迹规划方法。在基于图像的伺服控制方面，为了解决目标脱离视野范围、机械手与障碍物相碰撞等问题，彭叶予光等[96]提出了三维随机搜索树算法；王勇[97]提出了基于图像的笛卡尔空间轨迹跟踪、基于相机参数自适应估计的轨迹跟踪、随机目标位姿下的模糊自适应轨迹跟踪、基于视觉速度观测器的双目轨迹跟踪 4 种方法，研究了双机械手的视觉伺服控制。然而，相机内外参数标定精度直接影响视觉伺服控制的精度，为此，提出了无标定视觉伺服控制技术[98-100]。在其他方面，学者们提出将粒子群算法[101]、人工神经网络[102-105]、遗传算法[105]、自适应动态规划[106]、动力学模型[107]等与视觉伺服控制相结合的思路，以期达到工业现场应用的目的。

锻件位姿识别误差不可避免，机械手末端执行器根据识别位姿虽然可以抓取移位锻件，但也必然产生抓取误差。因此，采用传统视觉开环控制方式，机械手无法使锻件本体中心与模膛中心对准，导致复位失败；必须研究机械手视觉伺服控制技术，使机械手边动边看，实现移位锻件准确复位。

3　结语

综上可知，虽然利用工业机械手，结合传感器和计算机等技术，初步实现了具有静压力或较小冲击力特点的模锻智能化，如曲柄压力机上模锻、螺旋压力机上模锻等；但是对于具有大冲击力特点的锤上模锻，目前仍然采用人工作业，亟需实现智能锤上模锻，将工人从艰苦的生产线中解放出来。

锤上模锻与已有研究不同之处为：每一次锻打均可能发生锻件跳槽移位现象，锻件位姿识别与复位执行要参与到锻打过程。目前该问题仅能通过人工识别并夹持锻件复位来解决；其他工艺如上料、加热、切边、飞边清理等易实现智能化。采用机器视觉和工业机械手是解决该难题的有效手段，但存在如下难点：

（1）锤上模锻现场振动强，造成相机抖动，影响拍摄图像的质量；高温锻件图像的噪声多，锻件无特征点、存在非对称飞边，导致锻件本体较难准确定位；

（2）高温时锻件强度大幅度降低，锻件本体怕夹伤，导致抓取难；

（3）锻件与模膛大小一致，识别定位误差、机械手抓取误差等导致较难将移位锻件成功复位至模膛内。

锻件移位及复位是锤上模锻普遍存在的现象，制约着智能锤上模锻的实现。针对上述难点，基于视觉技术和工业机械手，研究的锤上模锻刮板位姿识别、末端执行器和工业机械手视觉伺服控制方法，具有较强的普适性，不仅适用于煤矿机械制造业其他锤上模锻件的智能制造，还可以推广至汽车、冶金、造船和航空航天等其他行业的锤上模锻生产线。

智能锤上模锻需研究图像增强、图像复原、图像去噪、视觉识别定位等理论，解决准确定位的难题；研究新型末端执行器，解决锻件难抓取的问题；研究工业机械手视觉伺服控制方法，解决移位锻件难复位的问题。研究得到的高温锻件夹持器有望促进工业机械手末端执行器结构与设计方法的创新，研究得到的图像抖动和模糊去除算法、高温锻件图像的预处理算法、非对称飞边锻件位姿视觉识别算

法，以及工业机械手视觉伺服控制算法将推动视觉感知与控制理论进一步发展与应用。

参考文献：

[1] 国务院. 中国制造2025［J］. 国务院，2015，(5)：1-17.
State Council. Made in China 2025［J］. State Council，2015，(5)：1-17.

[2] 周济. 智能制造——“中国制造2025”的主攻方向［J］. 中国机械工程，2015，26（17）：2273-2284.
Zhou J. Intelligent manufacturing-The main direction of “Made in China 2025”［J］. China Mechanical Engineering，2015，26（17）：2273-2284.

[3] 路辉. 基于统一数据库平台的复杂热模锻工艺和模具智能设计支持系统［D］. 上海：上海交通大学，2008.
Lu H. Intelligent Design Support System for Complex Hot Forging Processes and Dies Based on Unified Database Platform［D］. Shanghai：Shanghai Jiao Tong University，2008.

[4] 朱乃燔. 锻压生产中的噪声及其控制［J］. 噪声与振动控制，1983，(6)：13-18.
Zhu N F. Noise and its control in forging production［J］. Noise and Vibration Control，1983，(6)：13-18.

[5] 黄正武. 有工业机器人的模锻生产自动线［J］. 重型机械，1983，(11)：65.
Huang Z W. Automatic production line for forging with industrial robots［J］. Heavy Machinery，1983，(11)：65.

[6] Bakhshi-Jooybari M，Pillinger I，Dean T A，et al. Application of product and process comparison criteria in an intelligent knowledge-based system for forging die design［A］. Proceedings of the 1996 Engineering Systems Design and Analysis Conference［C］. Montpellier，1996.

[7] Bakhshi-Jooybari M，Pillinger I，Dean T A，et al. Development of product and process comparison criteria for an intelligent knowledge-based system for forging die design［J］. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers，Part B：Journal of Engineering Manufacture，1996，210（6）：565-578.

[8] Aziz E S，Chassapis C. Development of process optimization for an intelligent knowledge-based system for spur gear precision forging die design［A］. International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference［C］. Utah：The Association for the Advance of Artificial Intelligence，2004.

[9] Padhy S K，Sharan R，Dwivedi S N，et al. Forging Die Design with Artificial Intelligence［M］. Berlin：Springer，1991.

[10] Srivastava S，Srivastava K，Sharma R S，et al. Modelling of hot closed die forging of an automotive piston with ANN for intelligent manufacturing［J］. NISCAIR Online Periodicals Repository，2004，63（12）：997-1005.

[11] Bae H Y，Kim H J，Paeng J I，et al. A study on shape recognition technology of die casting and forging parts based on robot vision for inspection process automation in limit environment［J］. Journal of the Korean Society of Industry Convergence，2018，21（6）：369-378.

[12] 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司. 辊锻机器人，热模锻压力机机器人［Z］. 北京，2003-01-01.
Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co.，Ltd. CAM. Roll forging robot，hot forging press robot［Z］. Beijing，2003-01-01.

[13] 信东辉. 工业机器人热成型模锻智能装备与数字化车间［Z］. 浙江，2018-08-21.
Xin D H. Intelligent equipment and digital workshop for industrial robot hot forming forging［Z］. Zhejiang，2018-08-21.

[14] 张军. 热模锻生产线物料在线智能检测及筛选装置开发［J］. 锻压装备与制造技术，2020，55（3）：52-56.
Zhang J. Development of online intelligent detection and screening device for materials in hot forging production line［J］. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology，2020，55（3）：52-56.

[15] 张军. 热模锻生产线自动润滑冷却装置研发［J］. 锻压装备与制造技术，2020，55（4）：34-37.
Zhang J. Research and development of the automatic lubricating and cooling device for a hot die forging production line［J］. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology，2020，55（4）：34-37.

[16] 张军. 热模锻生产线智能生产管理系统研发［J］. 锻造与冲压，2020，(13)：59-62.
Zhang J. R&D of intelligent production management system for hot closed-die forging production line［J］. Forging & Metalforming，2020，(13)：59-62.

[17] Yi D，Li D W，Cheng Q，et al. Design of intelligent conveying system for die forging production line［A］. 3rd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing（WCMEIM）［C］. Shanghai：IEEE，2020.

[18] Ji Y L，Sun S W，Liu Z F，et al. Design and development of management and control system for intelligent die forging production line［A］. 3rd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing（WCMEIM）［C］. Shanghai：IEEE，2020.

[19] 冯若愚，陈桂华. 基于PLC的凸轮模锻智能控制系统设计研究［J］. 内燃机与配件，2021，(9)：121-122.
Feng R Y，Chen G H. Research on intelligent control system design of cam forging based on PLC［J］. Internal Combustion Engine & Parts，2021，(9)：121-122.

[20] 陈庆华，李艳梅，陈英俊，等. 基于PLC的凸轮模锻智能控制系统设计［J］. 热加工工艺，2020，49（1）：99-102.
Chen Q H，Li Y M，Chen Y J，et al. Design of intelligent control system for cam die forging based on PLC［J］. Hot Working Technology，2020，49（1）：99-102.

[21] 郭强，崔静静，肖永祥. 面向模锻智能生产的动态监控系统研究［A］. 2020中国航空工业技术装备工程协会年会论文集［C］. 西安，2020.
Guo Q，Cui J J，Xiao Y X. Research on dynamic monitoring system for intelligent forging production［A］. Proceedings of the 2020 Annual Conference of the China Aviation Industry Technical Equip-

ment Engineering Association [C]. Xi'an, 2020.

[22] 崔静静，郭强，巫远波. 模锻智能制造过程数据实时采集技术 [A]. 2020 中国航空工业技术装备工程协会年会论文集 [C]. 西安，2020.
Cui J J, Guo Q, Wu Y B. Real-time data acquisition technology for intelligent forging manufacturing process [A]. Proceedings of the 2020 Annual Conference of the China Aviation Industry Technical Equipment Engineering Association [C]. Xi'an, 2020.

[23] 杜利斌，邵明新. 转向节热模锻中机器人夹具设计要点分析 [J]. 科技创新导报，2019，16 (3)：95，97.
Du L B, Shao M X. Analysis of key points in design of robot fixture for steering knuckle hot forging [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019, 16 (3): 95, 97.

[24] 谢子锋，陈荣标，张传龙，等. 基于工业机器人的热模锻连杆锻造自动化生产系统研究 [J]. 现代制造技术与装备，2020，(4)：184-187.
Xie Z F, Chen R B, Zhang C L, et al. Research on automatic production system of hot die forging connecting rod based on industrial robot [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2020, (4): 184-187.

[25] 李猛. 热模锻压力机的远程监控与智能诊断系统研究 [D]. 南京：南京理工大学，2018.
Li M. Research on Remote Monitoring and Intelligent Diagnosis System of Hot Forging Press [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.

[26] Cao C P, Li M, Li Y, et al. Intelligent fault diagnosis of hot die forging press based on binary decision diagram and fault tree analysis [J]. Procedia Manufacturing, 2018, 15: 459-466.

[27] Yang H C, Zheng C H, Chen Y Z, et al. Intelligent diagnosis of forging die based on deep learning [A]. 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) [C]. Munich: IEEE, 2018.

[28] 钱俊裕，张海燕，韩汉荣，等. 基于人工智能的模锻工艺优化平台开发 [J]. 宁波工程学院学报，2014，26 (4)：23-27.
Qian J Y, Zhang H Y, Han H R, et al. Development of a forging optimization platform based on artificial intelligence [J]. Journal of Ningbo University of Technology, 2014, 26 (4): 23-27.

[29] 姜思宇. 钛合金模锻工艺分析及工艺智能决策 [D]. 北京：北京工业大学，2020.
Jiang S Y. Analysis of Titanium Alloy Forging Process and Intelligent Process Decision Making [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020.

[30] 孔祥伟，王丹，杨树林，等. 航空发动机模锻叶片计算机辅助智能设计平台开发 [Z]. 沈阳，2012-12-01.
Kong X W, Wang D, Yang S L, et al. Development of computer-aided intelligent design platform for aerospace engine forging blades [Z]. Shenyang, 2012-12-01.

[31] 焦键. 模锻过程结合机理与数据的智能控制方法探析——评《高端锻压制造装备及其智能化》[J]. 锻压技术，2021，46 (6)：237.
Jiao J. Analysis of intelligent control methods combining mechanism and data in forging process: Review of "High-end Forging Manufacturing Equipment and Its Intelligence" [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (6): 237.

[32] 吴国庆，周井玲，沈世德，等. CZK-16 智能全液压模锻锤 [Z]. 南通，2007-01-01.
Wu G Q, Zhou J L, Shen S D, et al. CZK-16 intelligent full hydraulic forging hammer [Z]. Nantong, 2007-01-01.

[33] 吴国庆，周井玲，任雨松，等. 模锻锤的智能控制方法及其根据该方法生产的智能模锻锤 [Z]. 南通，2004-09-08.
Wu G Q, Zhou J L, Ren Y S, et al. Intelligent control method of forging hammer and intelligent forging hammer produced according to this method [Z]. Nantong, 2004-09-08.

[34] 智能全液压模锻锤 [J]. 技术与市场，2009，16 (4)：101.
Intelligent full hydraulic forging hammer [J]. Technology and Market, 2009, 16 (4): 101.

[35] 南通大学. CZK-16 kJ 智能全液压模锻锤 [Z]. 南通，2008-01-01.
Nantong University. CZK-16 kJ intelligent full hydraulic forging hammer [Z]. Nantong, 2008-01-01.

[36] 南通大学. 模锻锤的智能控制 [Z]. 南通，2008-01-01.
Nantong University. Intelligent control of forging hammer [Z]. Nantong, 2008-01-01.

[37] 江苏百协精锻机床有限公司. CHK-31.5 kJ 智能全液压模锻锤 [Z]. 南通，2009-01-01.
Jiangsu Baixie Precision Forging Machinery Co., Ltd.. CHK-31.5 kJ intelligent full hydraulic forging hammer [Z]. Nantong, 2009-01-01.

[38] 江苏百协精锻机床有限公司. GHK-16 kJ 智能全液压模锻锤 [Z]. 南通，2009-01-01.
Jiangsu Baixie Precision Forging Machinery Co., Ltd.. GHK-16 kJ intelligent full hydraulic forging hammer [Z]. Nantong, 2009-01-01.

[39] Richard Szeliski. Computer Vision Algorithms and Applications [M]. German: Springer, 2012.

[40] 卢冠男. 基于机器视觉的工业机器人抓取系统的研究 [D]. 合肥：合肥工业大学，2017.
Lu G N. Research on Industrial Robot Gripping System Based on Machine Vision [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.

[41] Carsten Steger, Markus Ulrich, Christian Wiedemann. Machine Vision Algorithms and Applications [M]. German: Wiley-VCH, 2008.

[42] 朱戈. 基于机器视觉的冲压自动化技术研究 [D]. 杭州：中国计量大学，2016.
Zhu G. Research on Stamping Automation Technology Based on Machine Vision [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2016.

[43] Tsai R Y, Huang T S. The perspective view of three points [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1984, 6 (6): 13-27.

[44] 党希超. 基于视觉导向的机械手抓取定位技术研究 [D]. 广州：华南理工大学，2013.

Dang X C. Research on Visual-guided Robotic Hand Grasping and Positioning Technology [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.

[45] 朱正伟. 基于单目视觉的目标位姿识别与机器人抓取引导 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
Zhu Z W. Target Pose Recognition and Robotic Grasping Guidance Based on Monocular Vision [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.

[46] 许贺作. 基于双目立体视觉的柔性装卸机器人工件定位方法研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2018.
Xu H Z. Research on Workpiece Positioning Method of Flexible Handling Robot Based on Binocular Stereo Vision [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2018.

[47] 杜县委. 基于双目视觉的工件识别与机械手的定位抓取系统研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
Du X W. Research on Workpiece Recognition and Robotic Hand Positioning and Grasping System Based on Binocular Vision [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020.

[48] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-up robust features (SURF) [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110 (3): 346-359.

[49] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60 (2): 91-110.

[50] Okamoto A, Wasa Y, Kagawa Y. Development of shape measurement system for hot large forgings [J]. Research and Development Kobe Steel Engineering Reports, 2007, 57 (3): 29-33.

[51] 吴瑞敏. 大尺寸高温锻件双目视觉测量技术 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
Wu R M. Binocular Vision Measurement Technology for Large-sized High-temperature Forgings [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.

[52] 李哲林. 基于CCD的长轴类高温大锻件三维尺寸测量的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
Li Z L. Research on Three-dimensional Dimensional Measurement of Long Shaft-like High-temperature Large Forgings Based on CCD [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.

[53] 刘斌. 基于双目立体视觉的大锻件尺寸在位测量关键技术研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010.
Liu B. Research on Key Technologies for In-situ Measurement of Large Forging Dimensions Based on Binocular Stereo Vision [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2010.

[54] 裴善强. 大型锻件多目视觉测量识别系统研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
Pei S Q. Research on Multi-camera Vision Measurement and Recognition System for Large Forgings [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2020.

[55] 邢作常. 基于计算机视觉的典型热态农机锻件几何参数测量研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
Xing Z C. Research on Geometric Parameter Measurement of Typical Hot-state Agricultural Machinery Forgings Based on Computer Vision [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.

[56] Wang A M, Zhu Y K, Xu Q B, et al. Study on the recognition of malposition and location of high-temperature forgings in robotised die forging process based on machine vision [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21 (4): 4839-4854.

[57] 徐琪彪. 模锻刮板机器视觉位置识别方法研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2021.
Xu Q B. Research on Machine Vision Position Recognition Method for Forging Scraper [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2021.

[58] Okada T. Computer control of multijointed finger system for precise object-handling [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1982, 12 (3): 289-299.

[59] Jacobsen S C, Wood J E, Knutti D F, et al. The UTAH/MIT dexterous hand: Work in progress [J]. The International Journal of Robotics Research, 1984, 3 (4): 21-50.

[60] Salisbury K S, Vassura G. Kinematics and force analysis of articulated mechanical hands [J]. Journal of Mechanism Transmissions and Actuation in Design, 1983, (105): 35-41.

[61] Skaar S B, Ruoff C F. Teleoperation and robotics in space [J]. Progress in Astronautics & Aeronautics, 2015.

[62] Bekey G A, Tomovic R, Zeljkovic I. Dextrous Robot Hands [M]. New York: Springs, 1990.

[63] Melchiorri C, Vassura G. Mechanical and control features of the university of bologna hand Version 2 [A]. Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on IEEE [C]. Raleigh, NC: IEEE, 1992.

[64] Caffaz A, Cannata G. The design and development of the DIST-hand dextrous gripper [A]. Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Leuven: IEEE, 1998.

[65] Gazeau J P, Zeghloul S, Arsicualt M, et al. The LMS hand: Force and position controls in the aim of fine manipulation of objects [A]. IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. South Korea: IEEE, 2001.

[66] Lovchik C S, Diftler M A. A dexterous robot hand for space [A]. Proceedings of 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Detroit, MI: IEEE, 1999.

[67] Butterfass J, Grebenstein M, Liu H, et al. DLR-Hand II: Next generation of a dextrous robot hand [A]. Proceedings of 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Seoul: IEEE, 2001.

[68] Fukaya N, Toyama S, Asfour T, et al. Design of the TUAT/Karlsruhe humanoid hand [A]. International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000) [C]. Takamatsu: IEEE, 2000.

[69] Thieiry L, Birglen L, Gosselin C M. Underactuation in robotic grasping hands [J]. Machine Intelligence and Robotic Control, 2002, 4 (3): 1-11.

[70] Nuttall A J G, Klein Breteler A J. Compliance effects in a parallel jaw gripper [J]. Mechanism and Machine Theory, 2003, 38: 1509-1522.

[71] Tuffield P, Elias H. The shadow robot mimics humanActions [J]. Industrial Robot: An International Journal, 2003, 30 (1): 56-60.

[72] Kamikawa Y, Maeno T. Underactuated five-finger prosthetic hand inspired by grasping force distribution of humans [A]. RSJ International Conference on Intelligent Robots and System [C]. Nice: IEEE, 2008.

[73] Steffen W R, Christoper P, Georg H, et al. Experimental evaluation of the schunk 5-finger gripping hand for grasping tasks [A]. International Conference on Robotics and Biomimetics [C]. Bali: IEEE, 2015.

[74] Chen F, Carbonari L, Canali C, et al. Design of a novel dexterous robotic gripper for in-hand twisting and positioning within assembly automation [J]. Assembly Automation, 2015, 35 (3): 259-268.

[75] 王国庆，李大寨，钱锡康，等. 新型三指灵巧机械手的研究 [J]. 机械工程学报，1997，33 (3)：71-75.
Wang G Q, Li D Z, Qian X K, et al. Developing of a new dexterous three-fingered hand [J]. Journal of Mechanical Engineering, 1997, 33 (3): 71-75.

[76] 罗建国，何茂艳，薛钟霄，等. 灵巧手研究现状及挑战 [J]. 机械设计，2009，26 (10)：4-8.
Luo J G, He M Y, Xue Z X, et al. Current situation and challenges on the study of dexterous hand [J]. Mechanical Design, 2009, 26 (10): 4-8.

[77] Zhang W Z, Chen Q, Sun Z G, et al. Under-actuated passive adaptive grasp hum-anoid robot hand with control of grasping force [A]. IEEE Conf. on Robotics and Automation [C]. Taipei: IEEE, 2003.

[78] Liu Y, Mei T, Liang B, et al. Multisensory gripper and local autonomy of extrave hicular mobile robot [A]. International Conference on Robotics and Automation [C]. New Orleans, LA: IEEE, 2004.

[79] 张文增，陈强，孙振国，等. 高欠驱动的拟人机器人多指手 [J]. 清华大学学报：自然科学版，2004，44 (5)：597-600.
Zhang W Z, Chen Q, Sun Z G, et al. Super under-actuated humanoid robot multi-fingered hand [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44 (5): 597-600.

[80] 林龙贤. 果蔬采摘欠驱动机械爪研究 [D]. 杭州：浙江大学，2013.
Lin L X. Research on Under-actuated Mechanical Claw for Fruit and Vegetable Harvesting [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[81] 何雪军，王进，陆国栋，等. 自锁式茶梗夹持器设计 [J]. 农业机械学报，2014，45 (4)：157-162.
He X J, Wang J, Lu G D, et al. Design of self-locking gripper for tea stalks [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45 (4): 157-162.

[82] 郝凯强，平雪良，李巍. 基于 Pro/E 和 Workbench 的炉窑直角搬运机器人结构设计与分析 [J]. 机械传动，2014，38 (7)：100-103.
Hao K Q, Ping X L, Li W. Structural design and analysis of cartesian transfer robot used in furnace based on Pro/E and Workbench [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014, 38 (7): 100-103.

[83] 杨依领，傅雷，田埂，等. 集成位置/力传感器的桥式压电微夹持器 [J]. 机器人，2015，(6)：655-662.
Yang Y L, Fu L, Tian G, et al. A bridge-type piezoelectric microgripper with integrated position/force sensors [J]. Robot, 2015, (6): 655-662.

[84] 胡俊峰，蔡建阳，郑昌虎. 一种具有力传感的微夹持器设计与标定 [J]. 电子测量与仪器学报，2016，(3)：407-415.
Hu J F, Cai J Y, Zheng C H. Design and calibration of a microgripper with force sensing [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, (3): 407-415.

[85] Shirai Y, Inoue H. Guiding a robot by visual feedback in assembling tasks [J]. PatternRecognition, 1973, 5 (2): 99-106.

[86] Weiss L E, Sanderson A C, Neuman C P. Dynamic sensor-based control of robotswith visual feedback [J]. IEEE Journal on Robotics & Automation, 1987, 7 (5): 404-417.

[87] Harrell R C, Slaughter D C, Adsit P D. A fruit-tracking system for roboticharvesting [J]. Machine Vision and Applications, 1989, 2 (2): 69-80.

[88] Hill J. Real time control of a robot with a mobile camera [A]. Proc. 9th Int. Symp. on Industrial Robots [C]. Washington, DC: the Society of Manufacturing Engineers, 1979.

[89] Chaumette F. Potential Problems of Stability and Convergence in Image-based and Position-based Visual Servoing [M]. London: Springer London, 2007.

[90] Chaumette F, Malis E. 2 1/2 D visual servoing: A possible solution to improve image-based and position-based visual servoings [A]. International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings [C]. San Francisco, CA: IEEE, 2000.

[91] Espiau B. Effect of camera calibration errors on visual servoing in robotics [A]. The 3rd International Symposium [C]. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005.

[92] Espiau B, Chaumette F, Rives P. A new approach to visual servoing in robotics [J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 1992, 8 (3): 313-326.

[93] 陶辉. 单目视觉伺服模块化机械臂控制系统研究 [D]. 武汉：武汉科技大学，2011.
Tao H. Research on Modular Robotic Arm Control System with Monocular Vision Servo [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2011.

[94] 蔡伟东. 机械臂视觉伺服控制方法研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2016.
Cai W D. Research on Servo Control Method of Robotic Arm Vision [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[95] 曹家军. 基于视觉伺服的机械臂智能控制系统设计 [D]. 大连：大连理工大学，2021.
Cao J J. Design of Intelligent Control System for Robotic Arm Based on Visual Servo [D]. Dalian: Dalian University of Tech-

nology, 2021.

[96] 彭叶予光，张志鹏. 基于随机搜索树法的机械臂视觉伺服研究［J］. 制造业自动化，2022，44（1）：156-159.
Peng Y Y G, Zhang Z P. Manipulator visual servo based on random search tree method［J］. Manufacturing Automation, 2022, 44（1）：156-159.

[97] 王勇. 面向双机械臂系统的视觉伺服控制研究［D］. 广州：广东工业大学，2017.
Wang Y. Research on Visual Servo Control for Dual Robotic Arm System［D］. Guangzhou：Guangdong University of Technology, 2017.

[98] 顾金麟. 超冗余机械臂无标定视觉伺服技术研究［D］. 长春：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，2022.
Gu J L. Research on Uncalibrated Visual Servo Technology for Hyper-Redundant Robotic Arms［D］. Changchun：Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022.

[99] 李小龙. 基于改进 Q-Learning 的机械臂无标定视觉伺服控制系统研究［D］. 重庆：重庆大学，2021.
Li X L. Research on Uncalibrated Visual Servo Control System of Robotic Arm Based on Improved Q-Learning［D］. Chongqing：Chongqing University, 2021.

[100] 程亮玮. 工业机械臂的无标定视觉伺服系统研究［D］. 绵阳：西南科技大学，2021.
Cheng L W. Research on Uncalibrated Visual Servo System of Industrial Robotic Arm［D］. Mianyang：Southwest University of Science and Technology, 2021.

[101] 王琥. 基于 6-DOF 工业机械臂双目视觉伺服控制系统研究［D］. 南宁：广西大学，2016.
Wang H. Research on Dual Vision Servo Control System Based on 6-DOF Industrial Robotic Arm［D］. Nanning：Guangxi University, 2016.

[102] 季江飞. 基于神经网络的机械臂视觉伺服控制研究［D］. 杭州：浙江理工大学，2022.
Ji J F. Research on Visual Servo Control of Robotic Arm Based on Neural Network［D］. Hangzhou：Zhejiang Sci-Tech University, 2022.

[103] 余晓兰，万云，陈靖照. 基于改进 BP 神经网络的食品分拣机器人视觉伺服控制方法［J］. 食品与机械，2021，37（8）：126-131，135.
Yu X L, Wan Y, Chen J Z. Visual servo control method of food sorting robot based on improved BP neural network［J］. Food & Machinery, 2021, 37（8）：126-131, 135.

[104] 赵航，岳晓峰，方博，等. 基于 PSO-GA-BP 神经网络的视觉伺服控制系统［J］. 吉林大学学报：信息科学版，2020，38（2）：172-178.
Zhao H, Yue X F, Fang B, et al. Visual servo control system based on PSO-GA-BP neural network［J］. Journal of Jilin University：Information Science Edition, 2020, 38（2）：172-178.

[105] 岳晓峰，阳建峰，马国元，等. 基于遗传优化 RBF 神经网络的机器人无标定视觉伺服控制［J］. 计算机与数字工程，2020，48（11）：2617-2621.
Yue X F, Yang J F, Ma G Y, et al. Robotic uncalibrated visual servo control based on genetic optimization RBF neural network［J］. Computer & Digital Engineering, 2020, 48（11）：2617-2621.

[106] 罗彪，欧阳志华，易昕宁，等. 基于自适应动态规划的移动机器人视觉伺服跟踪控制［J］. 自动化学报，2023，48（2）：1-11.
Luo B, Ouyang Z H, Yi X N, et al. Visual servo tracking control of mobile robot based on adaptive dynamic programming［J］. Acta Automatica Sinica, 2023, 48（2）：1-11.

[107] 姜易木. 基于机器人动力学模型的视觉伺服控制研究［D］. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2021.
Jiang Y M. Research on Visual Servo Control Based on Robot Dynamic Model［D］. Harbin：Harbin Institute of Technology, 2021.

关于中国机械工程学会塑性工程分会发展会员的通知

中国机械工程学会塑性工程（锻压）分会成立于 1963 年，是全国性的锻压科学技术工作者的学术性社会团体，是依法登记的法人社团。经本会理事会研究决定：凡承认本会章程并符合条件者，可申请为本会会员。

会员的权利与义务：1. 颁发个人/团体会员证书及铜牌，铜牌由秘书处统一制作并颁发，可申请定制；2. 参加本学会组织的年会会议费可享受适当优惠；3. 优先参加本会组织举办的国内外有关学术活动和其他活动；4. 优先获得本会的有关学术资料，免费获赠全年学会会刊《锻压技术》杂志；5. 在学会网站主页进行企业宣传、logo 链接；6. 享有本会的选举权、被选举权和表决权；7. 接受本会委托，进行论证、评议、咨询等工作；8. 享有入会、退会的自由。

申请手续：提交入会申请表。申请个人会员，需填写《个人会员入会申请表》，同时提交“个人身份证复印件”、“一寸免冠照片两张”。申请团体会员，需填写《团体会员入会申请表》，同时提交“法人登记证书复印件”。材料均需一式一份寄至学会秘书处，并以电子邮件方式将表格发送至我会邮箱；也可登陆学会网站，进行在线注册。经审批通过后，将及时通知申请单位或个人。会员缴纳会费后正式登记，由学会秘书处颁发会员证书。

地　址：北京市海淀区学清路 18 号 713 室塑性工程分会　　**联系人：**李佳盈、秦思晓、周　林、金　红

电　话：010-62912592　**传　真：**010-62912592　**邮　箱：**duanya@cmes.org　**网　址：**http://www.cstp-cmes.org.cn

中国机械工程学会塑性工程分会