

基于热模锻压力机曲轴锻造自动化生产线的时序设计与优化

张南, 刘庆生, 曾琦, 刘波, 曾子豪, 李朝昆

(北京机电研究所有限公司, 北京 100083)

摘要: 为了提高锻造自动化生产线的设计合理性及生产效率, 在设计阶段对生产时序进行合理优化十分重要。以某企业热模锻压力机曲轴锻造自动化生产线的设计为例, 在对生产线的主机设备、目标产品、机器人配置等整体规划的基础上, 对该生产线生产时序进行初步设计, 找出了限制提升生产节拍的瓶颈节点, 并进一步通过时序拆分、时序分析与整合优化的方法, 实现了该生产线某典型曲轴产品的动作规划, 使生产节拍由 43 s 提升至 20 s, 保证了生产线的高效率生产。专业软件的仿真结果证明, 在满足生产线功能要求的基础上, 设备无干涉、机器人运行平稳, 优化后的时序更为合理、高效。

关键词: 锻造; 自动化生产线; 机器人; 时序; 节拍

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.01.020

中图分类号: TG316 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 01-0140-06

Time sequence design and optimization on automatic production line for crankshaft forging based on hot die forging press

Zhang Nan, Liu Qingsheng, Zeng Qi, Liu Bo, Zeng Zihao, Li Chaokun

(Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve the design rationality and production efficiency of forging automatic production line, it is very important to optimize the production time sequence in the design stage. For the design on the automatic production line for crankshaft forging of hot die forging press in an enterprise, based on the overall planning of main engine, target products and robot configuration for the production line, the production time sequence of production line was preliminarily designed, and the bottleneck nodes that limited the improvement of the production beat were found. Then, the action planning of a typical crankshaft product in the production line was realized by the methods of time sequence splitting, time sequence analysis and integration optimization, and the production beat was reduced from 43 s to 20 s, which ensured the high efficiency production of the production line. Professional software simulation results show that on the basis of meeting the functional requirements for the production line, the equipment has no interference, the robot runs smoothly, and the optimized time sequence is more reasonable and efficient.

Key words: forging; automatic production line; robot; time sequence; beat

近年来, 汽车行业快速发展, 我国汽车市场已经成为全球最大的单体汽车市场, 年销量分别占世界汽车产销量的 26.44% 和 26.62%^[1], 这促使了汽车零部件需求的增长, 锻造汽车零部件的需求越来越明显。在这种环境下, 先进的生产设备与节拍是提高企业经济效益与竞争力的关键。生产时序作为生产线生产所遵循的逻辑顺序, 对生产节拍有直接的影响, 因此, 时序设计是生产线规划设计的重要一步。

1 生产线规划设计

生产线规划设计是根据生产线的产品、技术要求、工艺流程等对生产线中的主辅机设备型号、布局位置、生产线时序节拍等进行的整体规划设计^[2-4]。本文以某企业热模锻压力机曲轴锻造自动化生产线的设计为例, 主要产品为乘用车曲轴, 锻造主机为 63000 kN 热模锻压力机。

热模锻压力机是锻造生产线中主要的锻件成形设备, 主要用于模锻曲轴类和转向节等产品的制造^[5-8], 生产线选用 63000 kN 热模锻压力机作为生产制造系统中的主设备, 能够实现多工位同时锻打。同时, 在压力机周围配备了 5 台工业机器人作为物

收稿日期: 2021-11-02; 修订日期: 2021-12-16

基金项目: 工业强基工程 (TC180A3Y1/18)

作者简介: 张南 (1995-), 男, 硕士研究生

E-mail: zh_nan95@outlook.com

通信作者: 刘庆生 (1979-), 男, 硕士, 研究员

E-mail: 13701091564@163.com

料转运的执行机构，机器人的配备是实现生产线自动化的基础，其具有较高的柔性，可以兼顾多种产品的生产。

生产线的目标产品为平面三缸、四缸的曲轴产品，质量在 10~30 kg 之间，年产量为 65 万件左右。根据设备参数与工艺方案，在主机区域，某曲轴产品分为 4 个工步，分别为预锻、终锻、精锻和切边。

图 1 为生产线主机工作单元的初步布局规划图。其中，R1 机器人负责从中频加热炉中取出加热后的圆棒料，并将其放至预锻工位；R2 机器人负责从预锻工位将预锻后的工件转移至终锻工位，并兼顾从终锻工位将终锻后的工件转移至精锻工位；R3 机器人负责从精锻工位将精锻后的工件转移至切边工位；R4 机器人负责从切边工位将切边后的曲轴转移至后续设备，以及从切边工位将曲轴飞边转移至传输带；R11 机器人负责对主机各个工位进行喷雾润滑。生产线由总控西门子安全型 PLC 进行控制，其与中频炉、主机及 5 台机器人通过 Profinet 进行通讯。

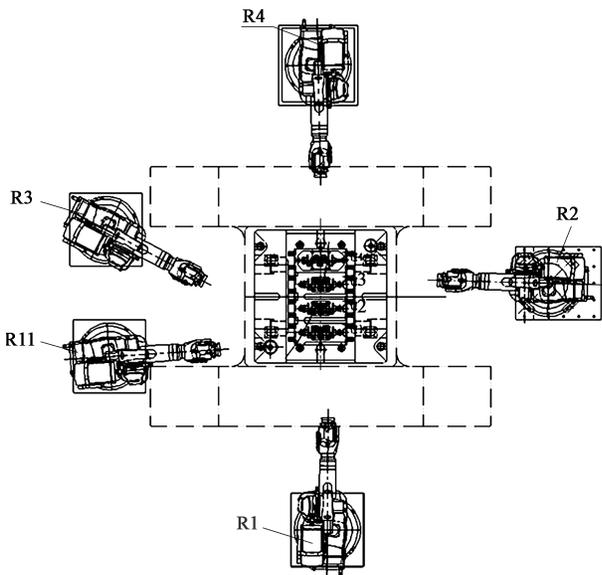


图 1 生产线主机工作单元布局规划图

Fig. 1 Layout plan diagram of main engine working unit in production line

2 时序设计与优化分析

2.1 生产线时序设计

生产线时序是指生产线中最小加工单元工作的时间和相对顺序。在生产线初期规划中，生产线时序按照单个锻件的工艺顺序进行设计。在本文研究的生产线中，棒料经中频炉加热后，由 R1 机器人夹取并将其送至 63000 kN 热模锻压力机，依次经过预锻、终锻、精锻和切边工位，锻打完成，在 R4

机器人从压力机中取出工件后，完成 1 次时序循环。利用 KUKA Sim Pro 仿真软件对生产线各个工步所需动作进行仿真，得出的生产节拍如表 1 所示。

表 1 生产线工步节拍

Table 1 Station beat of production line

编号 <i>n</i>	工步内容	所需时间/s
1	R1 机器人将工件从中频炉转移至预锻工位	10.0
2	R1 机器人复位	3.0
3	R2 机器人将工件从预锻工位转移至终锻工位	4.0
4	R2 机器人将工件从终锻工位转移至精锻工位	4.0
5	R2 机器人复位	3.0
6	R3 机器人将工件从精锻工位转移至切边工位	5.0
7	R3 机器人复位	3.0
8	R4 机器人将工件及飞边从切边工位取出	5.0
9	R4 机器人将工件转移至后续设备并复位	15.0
10	R11 机器人对各工位进行喷雾润滑	9.0
11	R11 机器人复位	2.0
12	63000 kN 热模锻压力机锻打及顶出	1.5

按照表 1 所述的工步内容与所需时间绘制的时序图见图 2。

根据图 2 所示的时序，计算生产线中各设备的节拍如下：

$$T_{press} = T_1 + T_3 + T_4 + T_6 + T_8 + T_{10} + 4 \times T_{12} \quad (1)$$

$$T_{R1} = T_1 + T_2 \quad (2)$$

$$T_{R2} = T_3 + T_4 + T_5 \quad (3)$$

$$T_{R3} = T_6 + T_7 \quad (4)$$

$$T_{R4} = T_8 + T_9 \quad (5)$$

$$T_{R11} = T_{10} + T_{11} \quad (6)$$

式中： T_n 为机器人执行表 1 中编号为 n 的工序的时间， $n=1, 2, \dots, 12$ ； T_{press} 为热模锻压力机区域所需的工作时间； T_{R1} 为 R1 机器人的运行时间； T_{R2} 为 R2 机器人的运行时间； T_{R3} 为 R3 机器人的运行时间； T_{R4} 为 R4 机器人的运行时间； T_{R11} 为 R11 机器人的运行时间。

节拍时间是指某一生产线、设备、工序或步骤完成其预设规定任务所需要的时间^[9-11]。本文中生产线的总节拍 T 为：

$$T = MAX(T_{press}, T_{R1}, T_{R2}, T_{R3}, T_{R4}, T_{R11}) \quad (7)$$

将表 1 中的节拍代入式 (7) 得： $T=MAX(T_{press}=43, T_{R1}=13, T_{R2}=11, T_{R3}=8, T_{R4}=20, T_{R11}=11)=43$ s。

通过节拍计算可知，主机区域的工作时间为生产线的瓶颈，在此时序条件下，整条生产线的节拍控制在 43 s。

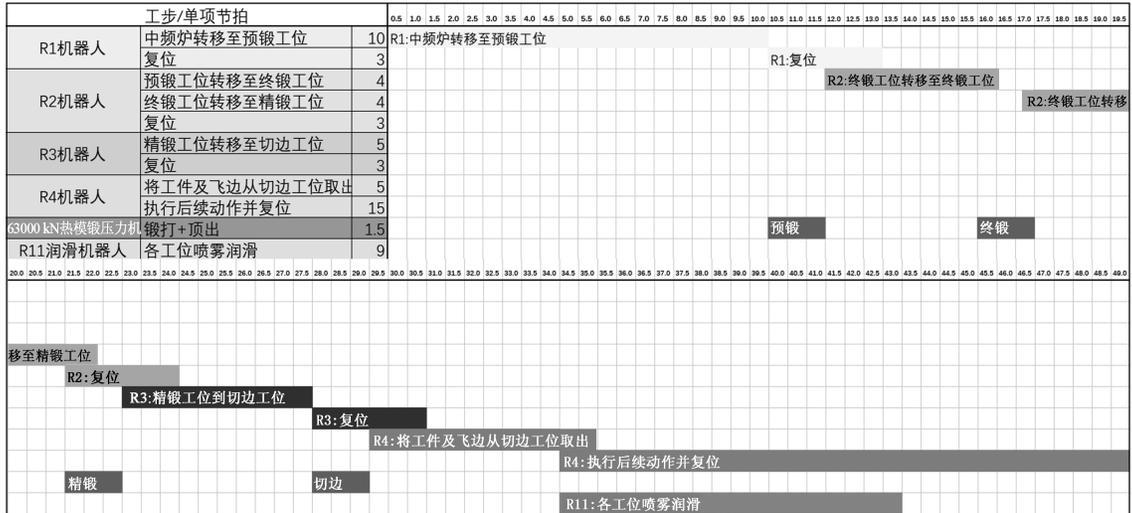


图 2 生产线主机工作单元时序图

Fig. 2 Time sequence diagram of main engine working unit in production line

2.2 生产线时序分析与优化

在图 2 所示的生产时序中发现, T_{press} 远大于 T_{R1} 、 T_{R2} 、 T_{R3} 、 T_{R4} 和 T_{R11} , 即产品在主机的工作耗时最长, 应当着重优化主机部分的时序。通过对主机打击力等工艺参数进行计算与评估, 将机器人在主机内部的工作步骤继续分解是时序优化的基础。

2.2.1 时序拆分

通过分析主机内部的工作时间 T_{press} 可知, T_{press} 由 6 部分组成, 分别为 R1、R2、R3、R4、R5 和 R11 机器人在主机中操作的时间以及主机自身锻打和顶出的时间。

将工步内容细化, 将表 1 中的内容进行合理分解, 以主机内部为界限, 分为主机内部和主机外部。如表 1 中编号 1 的工步内容“R1 机器人将工件从中频炉转移至预锻工位”可以分解为“R1 机器人将工件从中频炉出料位移至侧窗口等待位”与“R1 机器人将工件从等待位放至预锻工位并退出干涉区”两部分, 将所有机器人操作的工步内容分解后, 经过软件仿真, 得出表 2。

2.2.2 时序优化

时序优化是对各工步内容进行合并与组合, 增加不同工步之间的工作重合率。从理论上讲, 当工位 $M(M=1, 2, 3, 4)$ 的第 i 件工件被转移后, 在设备再次打击之前, 第 $(i+1)$ 件工件应当被放入工位 M 中, 其节拍可以实现最短。但受压机吨位与物料转移条件的制约, 其实现起来较困难。通过评估, 优化后的时序如下: 设第 N 件曲轴经第 m 次打击之后在精锻工位精锻完成, 由 R3 机器人将曲轴

表 2 优化后生产线工步节拍

Table 2 Station beat of optimized production line

编号 n	工步内容	所需时间/s
1	R1 机器人将工件从中频炉出料位移至侧窗口等待位	5.0
2	R1 机器人将工件从等待位放至预锻工位并退出干涉区	5.0
3	R1 机器人复位	3.0
4	R2 机器人将工件从预锻工位放至终锻工位并退出干涉区	4.0
5	R2 机器人将工件从终锻工位放至精锻工位并退出干涉区	4.0
6	R2 机器人复位	3.0
7	R3 机器人将工件从精锻工位放至切边工位并退出干涉区	5.0
8	R3 机器人复位	3.0
9	R4 机器人将工件从切边工位取出并退出干涉区	5.0
10	R4 机器人执行后续动作并复位	15.0
11	R11 机器人冷却润滑预锻工位	3.0
12	R11 机器人冷却润滑终锻工位	3.0
13	R11 机器人冷却润滑精锻工位	3.0
14	63000 kN 热模锻压力机锻打及顶出	1.5

由精锻工位转移至切边工位, R1 机器人将第 $(N+1)$ 件曲轴棒料放至预锻工位, 与此同时, R11 机器人对终锻进行冷却润滑; 在设备进行 $(m+1)$ 次打击之后, R4 机器人将第 N 件曲轴及飞边转移至

后续工位，R2 机器人将第 (N+1) 件曲轴由预锻工位转移至终锻工位，同时，R11 机器人对精锻工位进行冷却润滑；在设备进行第 (m+2) 次打击之后，R2 机器人将第 (N+1) 件曲轴由终锻工位转移

至精锻工位，同时，R11 机器人对预锻工位进行冷却润滑；在设备进行第 (m+3) 次打击之后，重复最初的工步进行循环。

优化后的时序图如图 3 所示。



图 3 生产线主机工作单元优化时序图

Fig. 3 Optimized time sequence diagram of main engine working unit in production line

不同工序在同一时间较高的重叠度会显著地提升生产线的效率、减少节拍。由图 3 可以看出，改进后的时序将 R11 机器人拆解为对预锻、终锻和精锻 3 个工位进行独立穿插式润滑，将不同工步的润滑任务分别插入到 R1、R2、R3 和 R4 机器人的工作过程中。在对预锻位进行润滑的同时，R2 机器人将终锻位工件移至精锻工位，该过程提升了 3 s；在对终锻工位进行润滑的同时，R3 机器人将棒料由精锻工位送至切边工位，该过程提升了 3 s；在对精锻工位进行润滑的同时，R4 机器人将曲轴与飞边从切边工位取出送至后续工步，该过程提升了 3 s。同时，在 R1 机器人将加热完毕的棒料送至预锻工位时，R3 机器人将棒料由精锻工位送至切边工位，提升了 5 s；在 R2 机器人将棒料由预锻工位送至终锻工位时，R4 机器人将曲轴与飞边从切边工位取出并将其送至后续工步，提升了 4 s。采用这种优化的时序模式，预锻和切边同时进行，减少了主机一次锻打时间，节拍提升了 1.5 s。

可以看出，经优化后，限制生产线效率的设备由主机区域变为 R4 机器人。通过时序优化后，将机器人动作分解，使得上下工件更为连贯，主机内部不会出现空档期，同时曲轴锻打出锻件速度由原先的 4 锤 1 件变为 3 锤 1 件，提升了节拍。

优化后生产线总节拍 T' 为：

$$T' = \text{MAX}(T'_{\text{press}}, T'_{R1}, T'_{R2}, T'_{R3}, T'_{R4}, T'_{R11}) \quad (8)$$

式中： T'_{press} 、 T'_{R1} 、 T'_{R2} 、 T'_{R3} 、 T'_{R4} 和 T'_{R11} 分别为优化后各设备或区域的运行时间。

将表 2 中节拍代入式 (8) 中，可得： $T' = \text{MAX}(T'_{\text{press}} = 17.5, T'_{R1} = 13, T'_{R2} = 11, T'_{R3} = 8, T'_{R4} = 20, T'_{R11} = 9) = 20 \text{ s}$ 。

3 仿真实验

KUKA Sim Pro 是 KUKA 公司推出的仿真软件，通过在虚拟环境中采用图形方式编程，能够灵活、真实地模拟实际生产任务中的各种动作^[12-13]。本文

利用该软件对上述优化后的时序进行验证。

通过按照文中规划的时序对生产线进行仿真,进行机器人的连续轨迹验证及节拍验证,检查了机器人及其工装在当前的时序下是否能在规定时间内实现规定动作、机器人轨迹是否存在限位、是否会出现干涉与碰撞等问题。图 4 为生产线中某机器人

的离线编程界面,根据任务要求规划机器人运行过渡点与逻辑。得益于仿真空间中各个设备、工装、工步件的外形与位置数据的准确性,离线编程与现场示教的环境基本相同,真实地预测了未来生产线的现场情况,很大程度上保证了仿真结果的准确性。

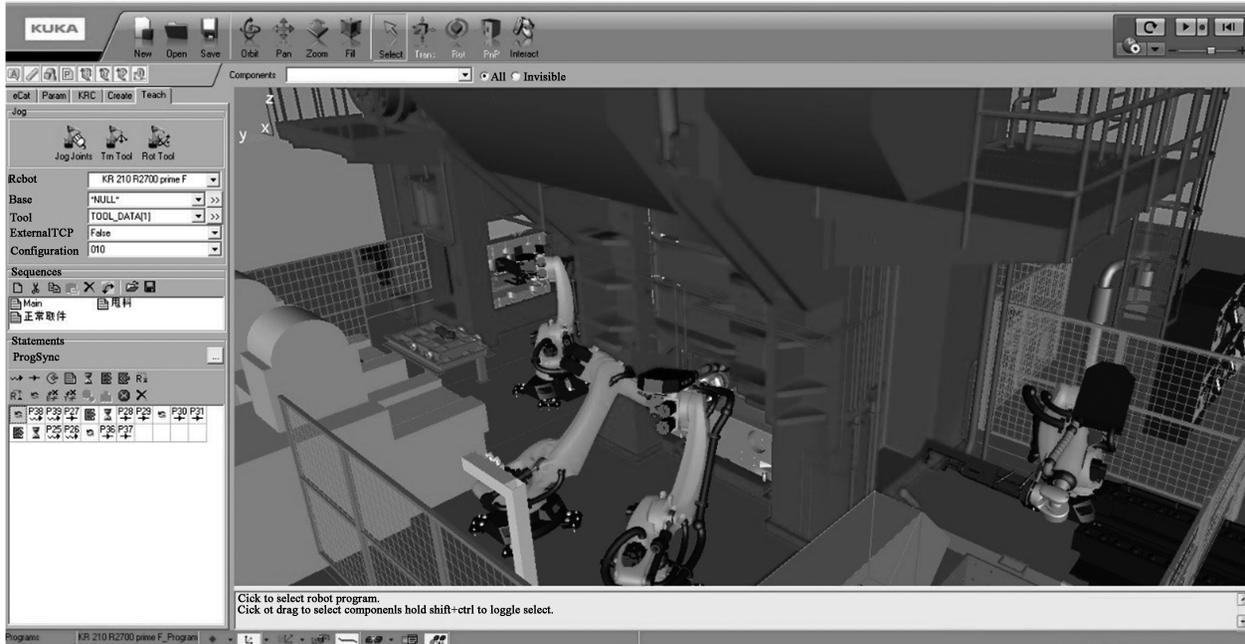


图 4 热模锻曲轴锻造生产线机器人离线编程界面

Fig. 4 Robot offline programming interface for crankshaft forging production line in hot die forging

经过软件验证,改进后的时序满足理论上的需求,设备未发生重叠与碰撞问题,机器人运行平稳、节拍符合规划要求。

4 结语

本文介绍了某企业热模锻压力机曲轴锻造自动化生产线的基本情况,给出了设计阶段初期设计的生产线常规时序节拍方案并进行了详细分析,通过利用生产线中各设备的任务内容重组与合并、增加不同工步间工作重合率的方法,将生产线循环周期由 4 锤 1 件变为 3 锤 1 件,使得生产节拍从规划初期常规设计时的每件 43 s 提升到 20 s,得到优化后的方案并通过仿真验证。优化后的时序方案提升了生产线的工作效率与设备使用率,满足了客户需求,锻造节拍达到了国内同级别生产线的先进水平,为其他生产线的时序优化提供了参考,具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 中国公路学报编辑部. 中国汽车工程学术综述·2017 [J]. 中国公路学报, 2017, 30 (6): 1-3.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. A summary of academic research on Chinese automotive engineering · 2017 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30 (6): 1-3.
- [2] 孙连胜, 宁汝新, 王新永. 虚拟制造中生产线可视化设计 [J]. 北京理工大学学报, 2002, 22 (1): 32-35.
Sun L S, Ning R X, Wang X Y. Visual design of production line in virtual manufacturing [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2002, 22 (1): 32-35.
- [3] 张南, 刘庆生, 曾琦, 等. 基于产品系列型谱的锻造自动化生产制造系统设计方法 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (12): 130-135.
Zhang N, Liu Q S, Zeng Q, et al. Design method of forging automated manufacturing system based on product series profile [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (12): 130-135.
- [4] 贺小毛, 崔磊, 翟月雯, 等. 自动化锻造生产线实时数据采集和分析系统 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (2): 14-18.

- He X M, Cui L, Zhai Y W, et al. Real-time data acquisition and analysis system of automated forging production line [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (2): 14-18.
- [5] 万胜狄, 王运赣, 沈元彬, 等. 锻造机械化与自动化 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
Wan S D, Wang Y G, Shen Y B, et al. Forging Mechanization and Automation [M]. Beijing: China Machine Press, 1983.
- [6] 陈华奎, 付为国, 顾潇宇, 等. 基于 PLC 的多工位热模锻自动上料系统设计 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (10): 25-30.
Chen H K, Fu W G, Gu X Y, et al. Design of automatic feeding system for multi-position hot die forging based on PLC [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (10): 25-30.
- [7] 潘成海, 曾琦, 董旭刚, 等. 汽车转向节精锻工艺设计与锻造主机选型 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (8): 26-31.
Pan C H, Zeng Q, Dong X G, et al. Precision forging process design of automobile steering knuckle and forging main engine selection [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (8): 26-31.
- [8] 李忠民, 卢喜, 刘雨耕. 热模锻压力机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
Li Z M, Lu X, Liu Y G. Hot Die Forging Press [M]. Beijing: China Machine Press, 1990.
- [9] 时文亮. TR 公司轿车曲轴生产线节拍优化研究 [D]. 济南: 山东大学, 2014.
Shi W L. Research on Beat Optimization of TR Company Car Crankshaft Production Line [D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [10] 邵晋. 变速器装配线的节拍提升及其平衡改善研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
Shao J. Study on Upgrading the Beat of Transmission's Assembly Lines and Improvement of the Balance [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [11] 李智. 混合品种装配线平衡与排序优化技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2013.
Li Z. Balancing and Sequencing Optimization of Mixed-model Assembly Lines [D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [12] 郭安庆. 基于机器人的柴油机气缸盖堆焊技术开发 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2010.
Guo A Q. Development of Building Up Technology for Diesel Engine Cylinder Head Based on Robot [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2010.
- [13] 胡斯楞. 铝合金空间焊缝的机器人焊接离线编程及焊接工艺 [D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2018.
Hu S L. Robot Welding Off-line Programming and Welding Process of Aluminum Alloy Space Welds [D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2018.

欢迎订阅《锻压技术》杂志 (月刊)

国内外公开发行人, 全国各地邮局均可订阅, 逾期未订上者可与编辑部联系邮购

《锻压技术》杂志 1958 年创刊, 中国机械工业联合会主管、北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会主办。本刊是全国锻压行业会刊, 全国中文核心期刊, 被国内外多个著名检索系统收录。突出技术内容, 注重技术和信息相结合, 全面反映锻压行业的技术进步和发展趋势。

主要栏目: 综述、锻造、板料成形、管材成形、特种成形、装备与成套技术、模具、摩擦与润滑、加热与热处理、测试技术、节能技术、材料与成形性能、理论与实验研究、计算机应用、技术交流、标准化、行业信息等。

读者对象: 大专院校的师生, 金属塑性成形(锻压)领域的科研、设计、生产部门的工程技术人员以及中等以上文化程度的工人等。

本刊为月刊, 每月 25 日出版, 大 16 开本, 232 页。统一刊号: CN11-1942/TG。邮发代号: 2-322。

(一) 购买期刊: ● 每册定价: 25.00 元; ● 年定价: 300.00 元。

(二) 购买合订本: ● 1991-2011 年合订本(每本包含全年 1-6 期杂志): 110 元/本;

● 2012-2013 年合订本(每本包含全年 1-6 期杂志): 140 元/本;

● 2014-2018 年合订本(上册)(包含上半年 1-6 期杂志)、2014-2018 年合订本(下册)(包含下半年 7-12 期杂志): 180 元/本。

直接通过编辑部订阅者, 请与杂志发行部负责人林玉彤联系。并按编辑部地址汇款, 款到后我们会定期寄给您刊物。

邮局汇款信息:

地址: 北京市海淀区学清路 18 号北京机电研究所有限公司 709 室

邮编: 100083

收款人: 《锻压技术》编辑部

附言处: 请注明“订阅《锻压技术》”

联系人: 林玉彤 电话: 010-62920652-801

E-mail: fst_linyutong@163.com

《锻压技术》编辑部