

弹簧件冲压工业化生产研究

时晓钊, 卢一玮, 黄觉安, 李 建, 张文剑, 唐钊艇*

四川航天川南火工技术有限公司, 四川 泸州

收稿日期: 2026年2月2日; 录用日期: 2026年3月11日; 发布日期: 2026年3月19日

摘 要

弹簧件是典型的薄壁火工品零件, 采用传统机加单工序冲压分工序加工完成, 该种生产模式生产周期长、生产成本低, 逐渐与商业航天的发展方向不符。本文结合弹簧件的设计要求对弹簧件采用连续冲压工业化生产方式进行研究, 结合仿真分析结果判断弹簧件加工的可行性, 设计连续模具并制定冲压工业化生产工艺。研究表明: 弹簧件可以采用连续模的方式进行生产, 各项检测结果满足设计图样要求, 可显著降低生产成本, 同时大幅度提升生产效率。

关键词

弹簧件, 冲压, 工业化, 低成本

Research on Industrialized Stamping Production of Spring Components

Xiaozhao Shi, Yiwei Lu, Jue'an Huang, Jian Li, Wenjian Zhang, Zhaoting Tang*

Sichuan Aerospace Chuannan Pyrotechnic Technology Co., Ltd., Luzhou Sichuan

Received: February 2, 2026; accepted: March 11, 2026; published: March 19, 2026

Abstract

Spring components are typical thin-walled pyrotechnic parts, which are traditionally manufactured by separate processes of machining and single-operation stamping. This production mode is characterized by long production cycles and high manufacturing costs, and is gradually inconsistent with the development trend of commercial aerospace. In this paper, combined with the design requirements of spring components, a study on the industrialized production of spring components using progressive stamping is carried out. The feasibility of spring component processing is evaluated based on simulation analysis results, and progressive dies are designed while the stamping industrialized

*通讯作者。

production process is formulated. The research results indicate that spring components can be produced by means of progressive dies, with all inspection results meeting the requirements of design drawings, which can significantly reduce production costs and greatly improve production efficiency simultaneously.

Keywords

Spring Components, Stamping, Industrialization, Low-Cost

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

航天火工品是航天飞行器完成分离、解锁等关键动作的核心装置，一直追求的是高可靠性与一致性，机加生产模式延续着单工序间断式生产模式。该种生产模式适用于“多品种、小批量”类零件的生产[1]-[3]，能够保证各工序零件尺寸的控制，但逐渐与商业航天[4][5]的“大批量、低成本、高效率”的发展方向不符。弹簧件是典型的薄壁火工品零件，零件结构如图1所示，采用薄壁弹簧钢钢板加工而成，弹簧钢具有高弹性极限与屈服强度，在高硬度条件下工作性能最佳。而弹簧件形状较为复杂，传统制造工艺需要采用热处理、线切割、钳、冲压、整形等工序完成，导致该类零件管理成本较高、生产周期较长、加工效率较低。连续模冲压是近几年较成熟的冲压工业化生产模式，能极大降低生产成本、缩短生产周期，广泛应用于生活工具[6]、汽车[7]、电子电器等制造领域[8]，但在航天火工品零件生产中应用甚少。本文将结合火工品生产特点，探索连续模冲压在弹簧件生产中的可行性分析和技术应用方案。



Figure 1. Structural drawing of spring component

图1. 弹簧件结构图

2. 冲压工业化生产研究内容确定

弹簧件传统单工序机加工艺路线如图2所示，全工序生产需要完成18个工序，主要分为以下四个主要内容：① 将多块原材料叠放，通过压板将材料压紧，从而提高生产效率，再将材料通过热处理退火处

理, 便于后续冲压整形; ② 将原材料通过焊接固定为一个整体, 通过线切割、镗铣等工序完成内外形的加工, 加工后零件拆分为单件; ③ 通过冲压对单件零件进行整形, 调整好支耳的高度, 再经过热处理提高到零件要求的硬度值; ④ 钳工对热处理后的支耳进行整形, 将回弹的高度调整到图样要求尺寸, 再经喷砂、镀覆完成零件加工。



Figure 2. Traditional single-operation machining process route for spring components
图 2. 弹簧件传统单工序机加工工艺路线

通过上述弹簧件机加工艺流程分析可知, 弹簧件加工一共要经过两次热处理, 零件在热处理工序和机加工序反复转运, 提高了零件转运碰伤风险的同时, 也增加了转运零件的生产成本; 零件在精加工到位后还需进行热处理使零件达到规定硬度, 该过程可能导致零件局部变形而产生废品[9], 增加了质量控制风险。所以, 精密冲压研究主要内容是将 1~16 序合并成 1 个序, 极大地提高加工效率的同时, 降低生产成本和质量风险, 即采用精密冲压技术后, 弹簧件机加工序如图 3 所示。



Figure 3. Process flow chart for industrialized stamping of spring components
图 3. 弹簧件冲压工业化工艺流程图

3. 可行性分析

3.1. 原材料元素及热处理硬度分析



Figure 4. Physical image of precision stamping coil stock
图 4. 精密冲压卷料实物图

本文研究的弹簧件对于原材料牌号标准、零件尺寸以及热处理硬度都有明确要求, 具体要求如下: 材料标准为 65Mn GB 3279-89 (弹簧钢热轧薄钢板), 它是一种常见的弹簧钢(锰钢), 抗拉强度一般为 800 MPa~1000 MPa (取决于热处理状态), 可冲压性能较好, 对于冲压模具要求不高; 弹簧件零件主要由平面结构和弯曲的支耳结构组成, 其硬度要求为 HRC 40~47。为了控制零件在热处理过程中发生变形的风险, 本研究直接采用高硬度 65Mn 材料进行精密连续冲压, 进一步缩短零件生产工步, 最大限度降低成本、提高加工效率。

精密冲压采用的是连续冲压的生产模式，设备在不停歇的状态下连续产出所需零件，该方式适用于大批量、高精度零件的高效制造，但对模具设计、材料控制和维护水平要求较高。区别于单工位生产采用板料，连续模要求供料的方式为卷料，生产所需原材料如图 4 所示。

为了验证卷料对于零件原材料元素含量的符合性，采用碳硫分析仪和固定式金属光谱分析仪对卷料取样进行分析，依据厂内金属材料元素复验技术规范，分析结果如下表 1 所示，满足 65Mn 入厂复检要求。用洛氏硬度计对卷料取样检测硬度，实测值为 HRC 41~HRC 43，符合零件设计要求。

Table 1. Elemental analysis results of high-hardness coil stock

表 1. 高硬度卷料元素分析结果

检测项目	规范要求范围	实测值	检测结论
C 含量	0.62%~0.70%	0.65%	合格
Si 含量	0.17%~0.37%	0.21%	合格
Mn 含量	0.90%~1.20%	0.98%	合格
P 含量	≤0.035%	0.022%	合格
S 含量	≤0.03%	0.003%	合格

3.2. 冲压工业化仿真分析

区别于传统单工位冲压模具，冲压工业化所使用模具为成组模具，针对本文所研究弹簧件模具成本一般 20~30 万。为了确定弹簧件冲压的工艺性及开模的有效性，需借助仿真软件对弹簧件冲压成型过程进行模拟分析。本研究主要采用 AUTOFORM 仿真软件[10][11]对弹簧件成形过程中零件的变形、弯曲、断裂情况进行了仿真，模拟了其成形的全过程，可以有效评估材料在成形、弯曲等作用下是否发生破裂及暗裂、变薄量、回弹量。

如下图 5 所示，弹簧件在高硬度材料成型状态下进行极限仿真分析，用于预先判断原材料在成型过程中各部分开裂情况，零件在冲压、折弯过程中未出现开裂或起皱等缺陷，零件进行高硬度卷料精密冲压仿真结果证明高硬度冲压方案可行。

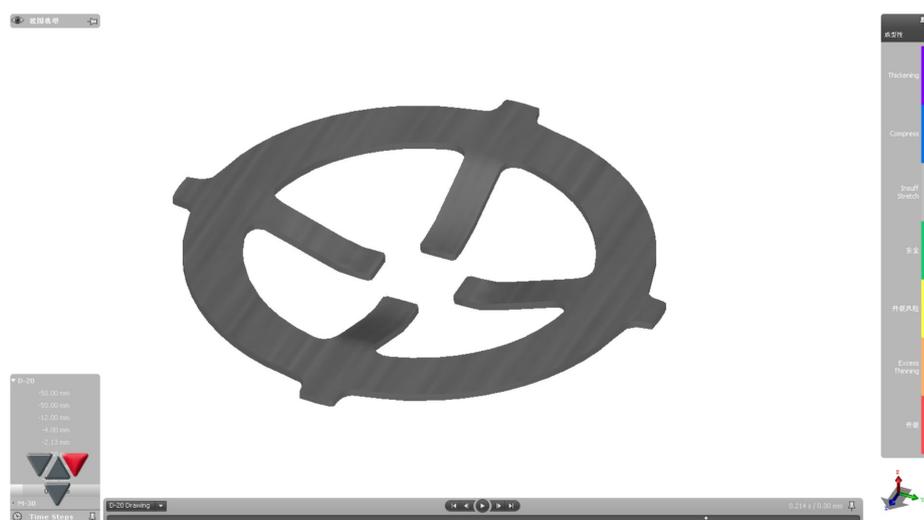


Figure 5. Simulation analysis results of stamping forming limit for spring components

图 5. 弹簧件冲压成型极限仿真分析结果

对弹簧件在成型过程材料变薄率进行仿真模拟分析，用于判断零件在成型过程中材料厚度的变化情况，分析结果如图 6 所示，零件在冲压过程中各部分厚度最大变化范围在-1.104‰~0.022‰范围，远远小于零件厚度制造公差，可以忽略不计。

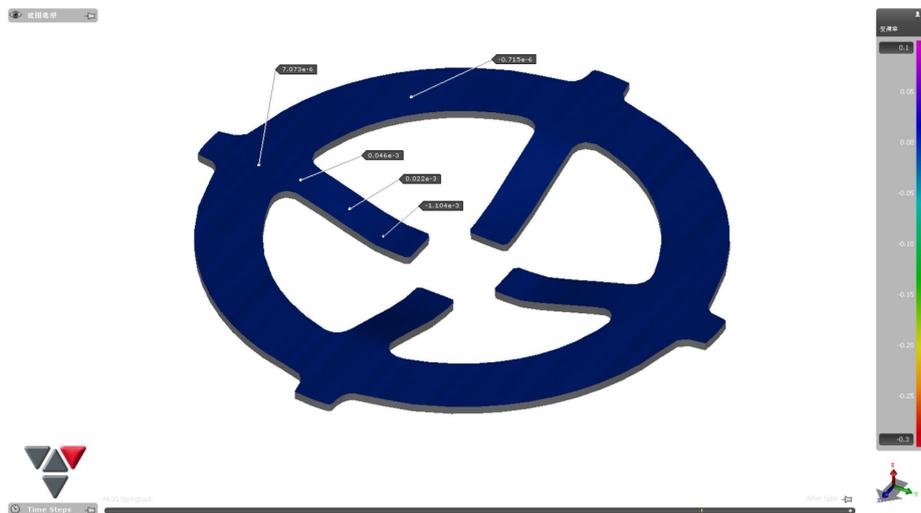


Figure 6. Simulation analysis results of stamping thinning rate for spring components
图 6. 弹簧件冲压变薄率仿真分析结果

精密冲压成型后零件会发生一定回弹，本研究对弹簧件在成型过程回弹情况进行仿真模拟分析，如图 7 所示，从模拟结果可以看出：零件折弯后有-0.105 mm~0.328 mm 的回弹量，在实际生产过程中需要针对性地在模具上做出相应调整。

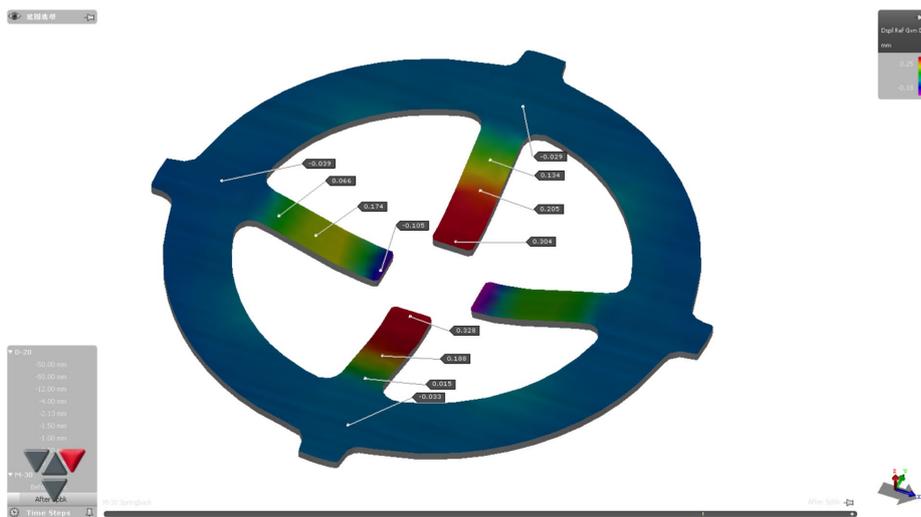


Figure 7. Simulation analysis results of springback in stamping of spring components
图 7. 弹簧件冲压回弹仿真分析结果

综上所述，本研究通过对弹簧件在高硬度材料成型状态下进行模拟分析，由分析结果可知弹簧件在成型过程中未出现开裂，材料厚度基本无变化，精密冲压方案可行。但分析过程中发现部分位置会发生回弹，实际加工过程要注意对回弹点进行参数调整。

4. 工艺流程及模具的确定

弹簧件高硬度精密工业化冲压按照加工精度由粗到细原则,先进行大尺寸、低精度尺寸的加工,再逐步完成小尺寸、高精度加工,主要工序内容由冲孔、切边、压毛边、整形、落料组成,冲压工艺如图8所示。先进行内形的冲孔,接着完成内型切断、去棱边毛刺及折弯,再到外形的材料去除,最后完成落料。

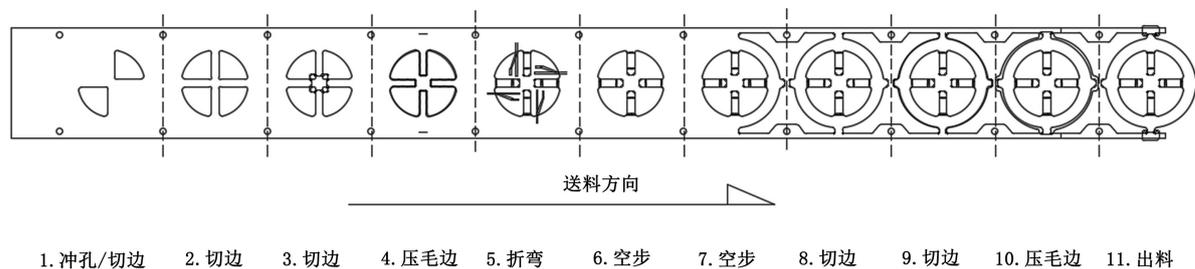


Figure 8. Process sheet for precision stamping of spring components

图8. 弹簧件精密冲压工序卡片

精密连续冲压模具的设计需综合考量工艺规划、排样设计、模具结构设计等方面,以确保高效、稳定生产,冲压模具设计图如图9、图10所示。区别于传统冲压单工位加工模具只需对折弯处进行整形,精密冲压模式是组合模具,模具除了要完成弯折整形,还需冲孔及切边,最后完成零件落料,这样才能保证零件能连续加工出来。传统冲压模具一般仅需零件尺寸大小的模具,而精密冲压模具尺寸相对较大,本文研究弹簧件精密冲压模具长度可达910 mm。

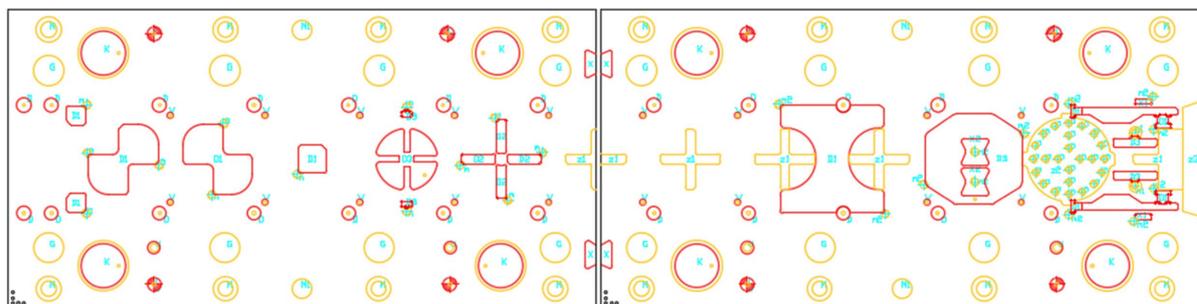


Figure 9. Design drawing of the lower die for precision stamping of spring components

图9. 弹簧件精密冲压模具下模设计图

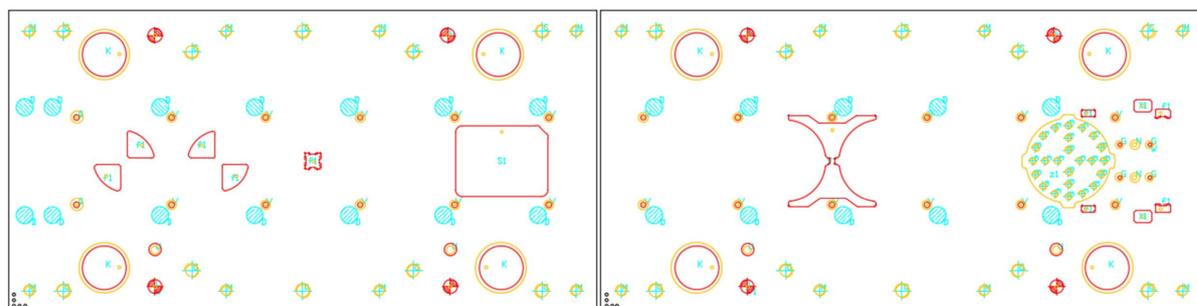


Figure 10. Design drawing of the upper die for precision stamping of spring components

图10. 弹簧件精密冲压模具上模设计图

5. 小批量验证

原材料通过卷料机完成上料，再经过冲压机进行连续冲压。冲压成组模的生产组装模具是零件加工的前提，根据弹簧件仿真模拟分析结果制定了精密冲压工艺路线并完成了模具设计，组合模具实物图如图 11 所示。



Figure 11. Physical image of precision stamping die for spring components
图 11. 弹簧件精密冲压模具实物图

本研究采用 200 T 冲压设备进行弹簧件的小批量生产验证，共计投产 200 件，经返厂检测各尺寸和零件外观均满足图样要求。取 40 件样本对重要尺寸实测记录用于对过程能力进行统计分析，判断检测结果如下表 2 所示，所有尺寸的 CP 值均大于 1.33，CPK 值均大于 1.0，整体过程能力处于良好至充足水平。

Table 2. Summary table of machining quality for small-batch verification of spring components
表 2. 弹簧件小批量验证加工质量汇总表

序号	尺寸	数量	CP 值	CPK 值	一次交检合格率
1	$\phi 66 (-0.06, -0.18)$	40	1.67	1.11	100%
2	$\phi 60 (0, -1)$	40	3.27	2.09	100%
3	$\phi 44 (+1, 0)$	40	2.53	1.82	100%
4	5 ± 0.2 (支耳宽度)	40	2.38	1.31	100%
5	5 ± 0.2 (支耳高度)	40	1.81	1.50	100%

对冲压后的弹簧件进行喷砂和镀覆工序，如图 12 所示。经外观检测，全批产品经镀覆后表面无碰伤、腐蚀和氧化皮，满足外观检测要求。用弯曲法对镀覆后弹簧件进行镀层结合力检测，将镀覆后零件弯折断裂后镀层无脱落，满足检测要求。



Figure 12. Physical image of spring components after plating and coating adhesion test diagram
图 12. 弹簧件镀覆后实物图及镀层结合力检测图

为进一步确定新旧工艺方法生产的弹簧件内部组织差异情况，分别在精密工业化冲压后弹簧件和传统工艺生产的弹簧件上取样，进行 500 倍金相，如下图 13 所示。从金相图可知，两种方式加工的产品组织一致，均为回火屈氏体 + 粒状碳化物。

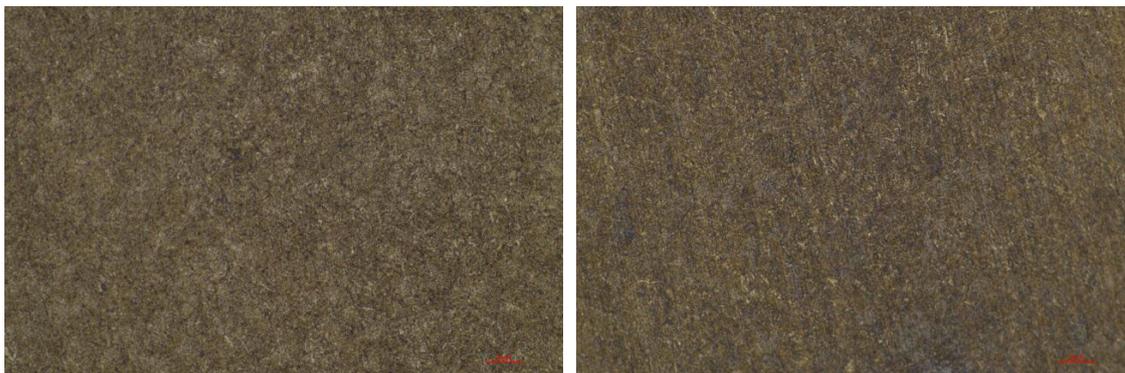


Figure 13. Metallographic comparison of spring components produced by new and traditional processes (Left: Precision industrial stamping; Right: Traditional process)

图 13. 弹簧件新旧工艺方法金相对比图(左边为精密工业化冲压，右侧为传统工艺方法)

经小批量试制验证，采用精密冲压工艺进行工业化生产，其生产效率可达 1500 件/小时；相较之下，传统单工序冲压加工完成同等 1500 件产量的周期约为 1 个月，精密冲压工艺的生产效率提升幅度达 71,900%。然而，精密冲压工业化应用需以零件具备一定生产批量为前提条件：单套模具的使用寿命通常为 20 万件，模具制造成本高达数十万元级别，仅当生产规模达到大批量(万件以上)水平时，方可通过产量分摊实现单件模具成本的有效摊薄，进而充分发挥该工艺的技术经济优势[12]。

6. 结论

本文通过对弹簧件仿真验证了高硬度工业化冲压方案的可行性，开展了工业化冲压工艺路线制定，完成了从模具设计到零件加工的全流程。经小批量试验验证，其材料硬度、机加尺寸和镀覆质量均满足设计要求。经金相分析，新旧两种工艺方法并无差异。本文研究的各项工艺指标均达到预期要求，能够促进工厂更好适应形势变化带来的生产任务激增，对缩短零件交付周期、降低加工成本有积极意义。

参考文献

- [1] 李文刚, 谢凝. 多品种、小批量生产模式优化的探讨与分析[J]. 科学技术创新, 2019(33): 194-195.
- [2] 王小凯. 多品种、小批量制造计划的精准管理策略研究[J]. 现代商业研究, 2025(13): 139-141.
- [3] 李雯, 张琳. 小批量多品种生产计划探讨[J]. 低碳世界, 2021, 11(3): 264-265.
- [4] 张超, 时千舒, 孟斌斌, 程泉, 赵军, 吴伟韬. 超越创新悖论: 低成本推动商业航天高质量发展的实践与思考[J]. 中国科学院院刊, 2025, 40(11): 1902-1913.
- [5] 张宁, 康丽艳, 王坤. 我国商业航天产业发展的思考与建议[J]. 中国航天, 2024(6): 27-32.
- [6] 陈永兴. 开瓶器的冲压连续模设计[J]. 模具技术, 2019(5): 7-9, 53.
- [7] 孙妮霞, 李祺. 基于传统连续模冲压的自动化线工艺设计[J]. 锻造与冲压, 2018(2): 27-30.
- [8] 骆仕斌, 李爱娜. 电视悬挂支架模内攻牙多工位连续模设计[J]. 机电工程技术, 2019, 48(8): 168-171.
- [9] 沈亚秋, 关海瑛, 李建坤, 高逸雯. 65Mn 钢弹性挡圈制件热处理工艺改进[J]. 金属加工(热加工), 2024(5): 83-89.
- [10] 刘庆东, 夏琴香. 某汽车结构件多工位连续冲压传送模设计[J]. 锻压技术, 2016, 41(10): 126-131.

- [11] 张本松, 黄昭明. 基于 CAE 技术的拉伸模具设计与制造[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2017, 31(1): 43-45.
- [12] 魏晓春, 顾小峰, 顾海峰, 李益华. 定钳弹簧片多工位连续模结构优化与疲劳寿命预测研究[J]. 今日自动化, 2025(6): 77-79.