

链条装配过程工艺改进实践

林 群

杭州持正科技股份有限公司 浙江 杭州 310000

【摘要】：针对链条装配线节拍受限、节距误差累积及合格率波动问题，本文以 G01 线为对象，运用价值流与正交试验方法对工序、夹具及参数进行系统改进。通过合并销片压装与外链板压装、前置质量检测、V 型槽弹簧自定心夹具及 6 MPa-10 mm/s-28°C 最优参数组合，将工序由 5 道减至 4 道，节拍由 15 s/件降至 12 s/件，合格率由 92% 升至 98%，节距偏差超标率由 5% 降至 0.8%，C_{pk} 达 1.35。改进释放了 20% 产能，为链条混流制造提供可复用工艺窗口。

【关键词】：链条装配；节距偏差；工序重组；自定心夹具；正交优化

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.046

引言

高速重载工况对链条节距一致性提出亚毫米级要求，而传统装配线仍依赖简单压装治具定位与多工位离散作业，误差在搬运等待中被逐级放大。G01 线近三年合格率徘徊于 92%，节拍锁定 15 s/件，成为产能扩张瓶颈。虽有局部自动化改造，但夹具磨损与参数耦合效应未获系统解决，导致节距超差与返修率居高不下。本文以价值流分析揭示非增值时间占比高达 18%，定位误差源集中于销轴定位与重复夹持环节，亟需从工艺逻辑、工装结构及过程参数三方面协同突破，构建面向多规格混流的稳定装配窗口，为链条高端化提供数据驱动的工艺范式。

1 链条装配过程现状与问题分析

在当前链条产品的装配单元中，工序组织呈现出内链节组件预装、销片压装、外链板压装铆接与定位与预拉伸的顺序，关键工作是把销轴压入外链板孔，把销轴和外链板在专用治具或夹具上定位并完成压装，外链板依靠定位销进行集合式定位，见图 1。结合总装车间 G01 线连续 3 日的现场调研与数据采集，观察发现销片压装治具定位销轴时出现平均误差±0.2 mm，该误差把节距误差带入后续压装并在铆接环节固化，装配后节距偏差出现超限风险。需重点关注的是工序衔接的等待时间，内链节和销片压装完成后搬运等待与串接，整线装配节拍维持在 15 s/件，产出效率受到限制。同时，部分专用工装夹具发生长期磨损，定位基准面和定位销间隙扩大，导致定位精度不足并把尺寸波动传递至成品检验，当前装配合格率为 92%。由此可见，定位方式、节拍组织以及夹具状态共同构成影响装配质量与效率的核心约束。

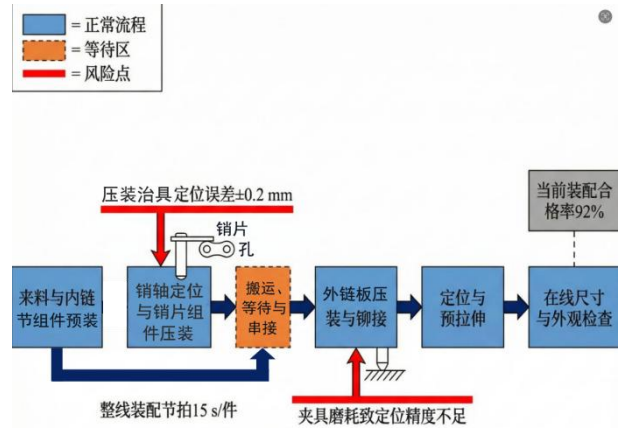


图1 现有链条装配工艺流程图

图 1 现有链条装配工艺流程图

2 链条装配工艺改进措施

2.1 装配工序优化设计

总装车间 G01 线在节拍组织与尺寸传递方面暴露出的等待与误差累积问题，本文运用价值流分析方法，对物流与信息流中的增值与非增值活动进行全链条梳理与时耗标定，识别出销片压装后的等待搬运、质量检测后置以及销片压装与外链板压装间重复夹持的三类浪费。围绕瓶颈环节，提出把销片压装与外链板压装重组为一道复合工序，在同一工位完成销轴引导定位与外链板就位，并且依靠共用定位基准与一体化夹紧机构，把重复取放与工装切换时间压缩至单次循环内。工序顺序方面，把质量检测前置至关键工序之后，在销片压装与外链板压装上游设置过程质量关卡，即开展几何尺寸与节距一致性快速检测，检测项目聚焦销轴入孔同轴度、外链板孔距一致性以及铆接前自由节距，检测方式选用快速量规并与设备循环同步，使不合格件被即时分流至返修通道。为降低前置检测对节拍的扰动，检测节拍与设备循环进行节拍耦合，设置 2 件在制缓冲并配置并行检测位，使放行逻辑保持连续。对应的工位布局把合并后的复合工位靠近压装设备布置，搬运路径被缩短，

信息流层面在MES中重设在制品判定与放行逻辑，形成前置判定闭环；作业方法把操作单元标准化为左右手并行动作，压装、定位与上板采用双手互锁启动，减少无效等待与非必要动作。经由该重组，工序数量由5道缩减为4道，转换动作被削减，预期可把工序转换时间降低约2s/件，为后续夹具改进与参数优化留出节拍冗余，并把缺陷扩散的风险控制在关键工序之前。

2.2 专用工装夹具改进设计

鉴于G01线在销轴定位误差与夹具磨损方面的暴露问题，本研究把销轴压装治具重构为具备自动定位功能的结构单元。核心构型选用V型槽与弹簧顶紧机构组合，把销轴在两向进行自定心约束并形成稳定导向。V型槽开口角控制在90°，工作面硬度HRC58-62，配合可微调止挡与浮动导向套，对直径公差进行包容。顶紧弹簧预载设定为20-30N，行程2-3mm，使销轴在轻推入位后获得持续贴靠，定位精度可控制在±0.05mm水平。为抑制磨损传递误差，V型块与导向套采用可更换嵌件式结构，基准面借助0.01mm垫片进行现场标定，并把装夹启停与设备互锁，减少误操作带来的偏移。从外链板压装节拍与重复夹持的现实情境来看，快速夹紧装置被设计为偏心凸轮加过中心连杆的自锁机构，并把外链板孔系与内链基准销形成一体化约束。夹爪对称布置，闭合力200-300N，能够在一次握持动作中完成就位与夹紧，且定位基准与压装工位共用，避免在制件二次取放。为提高适配性，夹紧模块采用快换接口与限位楔块，便于在不同节距规格间进行快速切换，同时设置防反向件的防错销与机械挡块，把装入方向与孔距一致性在装夹阶段加以约束，由此把定位误差对装配质量的影响降至较低水平。

2.3 装配参数正交优化

鉴于G01线在夹具自定心与工位合并后形成的稳定过程窗口，本研究把节距偏差作为单一响应指标，围绕装配压力、压装速度、环境温度三项可控因素开展三因素三水平的正交设计。结合销轴与外链板孔的过盈配合机理，压力影响塑性变形与轴向残余应力的积累，速度影响摩擦热与润滑膜承载能力，温度通过改变材料弹性模量与配合过盈的有效值对节距一致性产生间接作用。由此把压力设置在4MPa、6MPa、8MPa，速度设置在6mm/s、10mm/s、14mm/s，温度设置在20°C、28°C、35°C，并选用L9方案实施组合随机化，试验在复合工位条件下完成，节距在铆接前后以快速量规进行双点测量，响应取各组合样件绝对偏差的平均值。为降低测量系统对响应的干扰，量具重复性与再现性在试验前完成评定，并把操作者差异与批次波动纳入区组控制，以减少非控制因素对因素效应的干扰。

$$R_j = \max(K_{ij}) - \min(K_{ij})$$

其中， R_j 表示因素j的极差， K_{ij} 为因素j在第i个水平下响应均值的和，i为水平序号，j为因素序号。

从极差分析的决策逻辑出发，把各因素在不同水平上的响应均值进行比较，可得到因素影响程度的排序与推荐水平。结合装配过程对配合稳定域的需求，因素影响程度呈现压力大于速度大于温度的趋势，最优参数组合确定为压力6MPa、速度10mm/s、温度28°C。该组合在夹具导向误差得到抑制的前提下，把销轴成形与配合面弹性回复之间的平衡关系锁定在稳定区间，使尺寸传递在关键工序内收敛，并把节距偏差控制在±0.1mm的工艺目标范围。为便于在G01线持续运行条件下进行过程约束，工艺文件把压力允许波动带设定为±0.3MPa，把速度允许波动带设定为±1mm/s，把环境温度控制带设定为±2°C，同时把设备闭环控制参数与MES放行逻辑进行联动更新，形成参数设定、过程监控与异常分流相互耦合的管控闭环，从而在不增加节拍负担的条件下提高节距一致性的可重复性与可移植性。

3 改进效果评估与验证

3.1 关键指标对比分析

鉴于G01线在工序重组、夹具自定心与前置过程质量关卡全面落地后的过程窗口趋于稳定，本节把装配节拍、产品合格率与节距偏差超标率作为衡量对象展开对比分析。以连续生产1000件的现场记录作为数据基础，统计口径覆盖压装至铆接的完整工序链，并把缺陷分流纳入过程判定闭环，见表1。从节拍层面来看，合并后的复合工位把重复夹持与搬运等待压缩到设备单循环内，加之标准化双手互锁动作把非必要动作去除，整线节拍由15s每件降至12s每件，效率提升20%，产线在制占用与在制缓冲由此下降，流动更为顺畅。质量指标方面，前置检测把销轴入孔同轴度与孔距一致性的异常在关键工序上游即被拦截，再叠加V型槽与浮动导向的自定心定位把人为预定位误差收敛，产品合格率由92%提升至98%，批内不稳定因素显著收敛。尺寸一致性角度观察，节距偏差超标率由5%降至0.8%，主要缘由于压装压力与速度的参数窗口被锁定在成形稳定区间，同时可更换嵌件减缓了磨损向基准传递的影响。由此推导，产线瓶颈由装配段逐步转移至下游检验与包装，节拍冗余被有效释放，质量风险在源头被削弱，这一对比结果为后续的工艺稳定性验证提供了可追溯的基线。

表1 改进前后链条装配关键指标对比表

指标	改进前	改进后	变化
装配节拍 s/件	15	12	效率提升 20%
产品合格率%	92	98	提升 6 个百分点
节距偏差超标率%	5	0.8	降低 4.2 个百分点

3.2 工艺稳定性验证

足 G01 线复合工位与自定心夹具形成的稳定窗口,本节把节距一致性确立为关键特性指标,运用过程能力指数方法来开展长期受控性判定。考虑到能力评估对数据质量的敏感性,样本来源限定为压装至铆接的完整工序链,依靠前量具重复性与再现性评定的结论对测量误差进行校核,采集序列按 I-MR 的理性分组原则处理,借助异常值甄别把外来干扰从能力计算中剥离,从而让能力结论建立在稳定波动的统计基础之上。

$$C_{pk} = \min \left[\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right]$$

其中, C_{pk} 表示过程能力指数,用来衡量过程相对规格区间的居中性与离散水平; USL 为上规格限, LSL 为下规格限; μ 为过程均值; σ 为过程标准差,取稳定期内的总体估计; \min 表示在两端能力值中取较小者。

把该模型用于节距指标的长期数据后,得到 C_{pk} 为 1.35, 相对 1.33 的通行判定阈值保留出一定余量,由此可见过程中心

位置与离散度协同受控并契合格带要求。进一步把连续生产 5000 件的缺陷判定结果纳入同一判据框架,不良品率稳定在 0.5% 以内,波动幅度与前置压力速度温度的允许带相互印证,表明参数设定与过程响应之间保持一致映射关系。综合上述证据,可以把装配段潜在漂移约束在可管理范围,形成可复用的能力基线,并为后续跨节距规格的快速切换与 MES 放行逻辑联动提供稳定的统计支持。

4 结语

实践表明,装配质量与效率的同步提升并非依赖单点自动化,而是工序逻辑、工装基准与参数窗口的闭环耦合。G01 线通过消除重复搬运、建立自定心基准及锁定压力速度温度带,将误差抑制在成形瞬间,使潜在漂移转化为可控变量。 C_{pk} 1.35 与 0.5% 不良率验证了新工艺窗口的长期稳健性,为后续跨节距切换、MES 自适应放行奠定了统计基础。未来工作将引入在线视觉补偿与数字孪生预测,进一步压缩换型时间,实现从“稳定工艺”到“敏捷工艺”的跃迁。

参考文献:

- [1] 林珊.基于 DMAIC 方法的装配线平衡改进研究[J].现代制造工程,2023,(04):13-20.
- [2] 徐宗璐,范俊,尤锦焯.装配设计工艺软件界面的设计与优化[J].兵工自动化,2024,43(10):14-16.
- [3] 陈燕,渠志刚,李卫士,张军,万晨,啜燕军,陶俊瞳.某车载半自动炮输弹机卡滞分析与解决[J].兵工自动化,2025,44(11):15-19.
- [4] 孙克安.茵赛龙门加工中心 Z 轴拖链结构改进[J].金属加工(冷加工),2025,(12):81-82+88.
- [5] 陈健.基于 ESPRIT 和 MAZAK E670H 车铣复合加工转子轴工艺方法[J].橡塑技术与装备,2025,51(12):29-37.