白车身三面体转台总拼柔性切换系统的应用研究

宋绍朋

（北京奔驰汽车有限公司，北京 100176）

摘要：为解决三面体转台总拼柔性切换系统调试中出现的*Z*向锁紧气缸卡滞、小车位置丢失及车身尺寸偏移问题，通过增设*Y*向预工作位并降低电机扭矩以消除精定位大框架夹具（Framer）内应力，解决气缸卡滞问题，并引入动态公差概念，按车型差异化设置伺服电机参数，有效避免位置丢失，同时优化车型排序策略，采用同车型小批次连续生产模式，有效降低总拼系统切换频次。实施后，系统日均停机时间从36.7 min降至1.6 min。结果表明，机械状态优化与生产序列调整相结合是解决复杂柔性总拼系统停机问题的有效途径。

关键词：白车身　总拼　柔性切换　大框架夹具　动态公差

中图分类号：U468.21　　**文献标志码：**B　　**DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250235

Research on Application of Trihedral Turntable Flexible Switching System for Body-in-White Assembly

Song Shaopeng

(Beijing Benz Automotive Co., Ltd., Beijing 100176)

Abstract: During the debugging of the trihedral turntable flexible switching system for BIW assembly, issues such as *Z*-axis clamping cylinder jamming, trolley position loss, and body dimensional deviation were identified. This paper proposes a systematic optimization approach. By introducing a *Y*-axis pre-positioning station and reducing motor torque, internal stresses within the frame are eliminated, thereby resolving cylinder jamming. The adoption of dynamic tolerance concepts and differential servo motor parameter settings for different vehicle models effectively prevents position loss. Additionally, optimizing the different vehicle sequencing strategy by implementing small-batch continuous production of identical models significantly reduces the switching frequency of the assembly system. Following implementation, the average daily downtime decreased from 36.7 min to 1.6 min. The research demonstrates that a combined approach of mechanical optimization and production sequence adjustment is an effective solution for mitigating downtime in complex flexible assembly systems.

Key words: Body in White(BIW), Assembly, Flexible Switching, Framer, Dynamic tolerance

1 前言

总拼工位是指将汽车白车身地板总成、左右侧围总成（部分产品分为侧围内板总成和侧围外板总成，采用两步总拼法完成总拼工艺）、顶盖总成焊接完成的工位[1]。主机厂常用的总拼模式主要有6种：

a. 地面滑移式GATE总拼，通过配置不同通道的GATE并配备转换小车实现多车型柔性切换；

b. 多面体（三面体或四面体）柔性总拼，通过水平面放置的多面体转台承接多种侧围定位框架和输送小车的调度实现柔性总拼；

作者简介：宋绍朋（1982—），男，硕士学位，高级工程师，研究方向为汽车制造、车身焊接与涂装设备及工艺规划。

参考文献引用格式：

宋绍朋. 白车身三面体转台总拼柔性切换系统的应用研究[J]. 汽车工艺与材料, 2026(5): 67-72.

SONG S P. Research on Application of Trihedral Turntable Flexible Switching System for Body-in-White Assembly[J]. Automobile Technology & Material, 2026(5): 67-72.

c. 机器人柔性总拼，机器人承担定位工作；

d. 内置式总拼，没有传统的侧围夹具框架，整个夹具从车身顶部落下，夹具夹头从车身内部夹紧[2-6]；

e. 滑移夹具库总拼，通过小型夹具库存储配合输送小车调用实现柔性总拼；

f. 转毂切换总拼，通过多个四面转毂（2个或4个）实现柔性总拼。

多面体转台精定位大框架夹具（Framer）总拼系统是梅赛德斯奔驰广泛采用的高精度柔性切换侧围总拼系统，应用于德国、匈牙利、南非、美国和中国等工厂。总拼工艺对定位焊接要求极高，用于保证焊接后的车身尺寸精度。部分学者对GATE总拼精度提升进行了研究和改进[7]，但还没有对多面体转台Framer总拼精度提升及停机控制的相关研究。针对三面体转台总拼柔性切换系统调试中出现的Z向锁紧气缸卡滞、小车位置丢失及车身尺寸偏移问题，本文以三面体转台为例展开应用研究。

2 三面体转台总拼系统应用研究

2车型柔性切换直线型Framer系统切换简单，停机极少、开动率高，但仅能兼容2种车型，柔性受限。随着市场对车型种类的要求日益增多，各主机厂对线体柔性的要求也相应提高。北京奔驰近年来主要投产的总拼系统为如图1所示5车型柔性切换的三面体转台Framer系统和如图2所示7车型柔性切换的四面体转台Framer系统。多面体转台的应用调试较直线型Framer系统复杂，过程中会遇到各种停机问题。

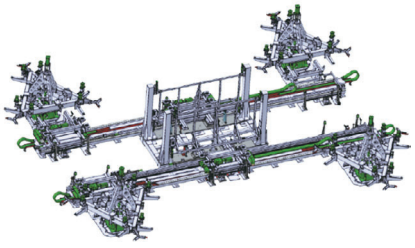


图1 三面转台Framer系统

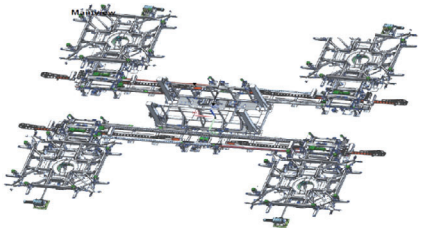


图2 四面转台Framer系统

三面体转台Framer系统结构组成如图3所示。包括4个三面体转台，X方向2条输送轨道，Y方向2条输送轨道，侧围精定位大框架夹具（每车型2个），4台输送小车（含固定Framer的4个Z向锁紧气缸），4个主定位立柱（Geo Box）。

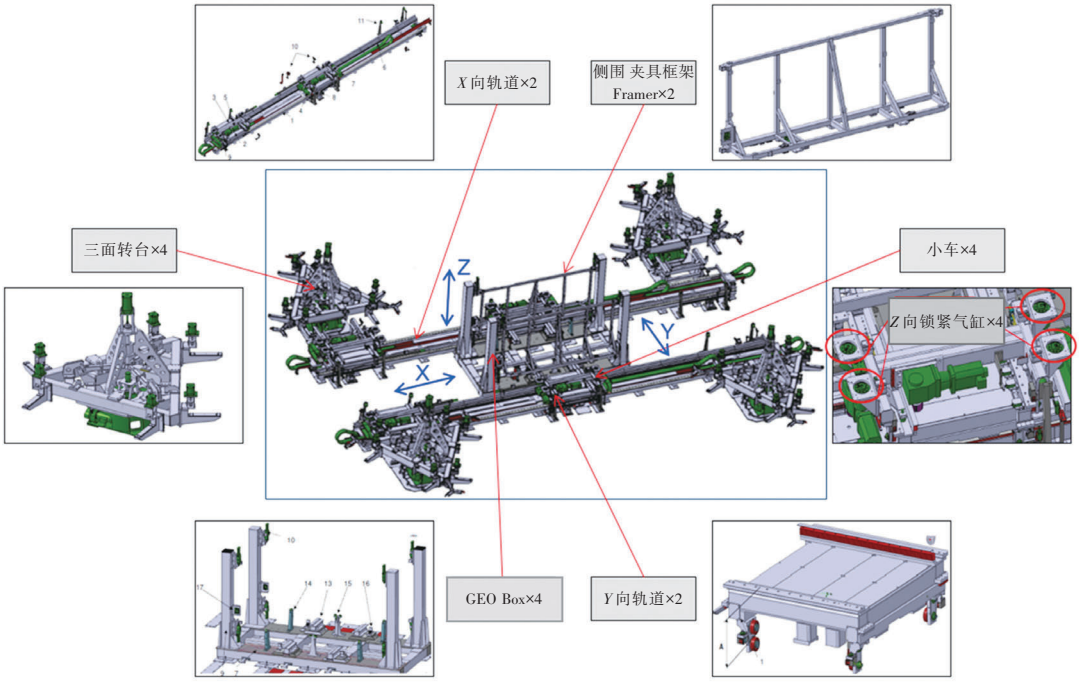


图3 三面转台系统结构

焊装车间在正常运行中面临的停机主要有设备故障、生产控制系统故障、生产组织不精益等方面，其中设备故障占比最大。经统计，某焊装车间2024年12月至2025年1月排名前5位的停机原因有：

a. Framer小车Z向锁紧气缸卡滞；

b. Framer小车X、Y向位置丢失；

c. MIG焊粘丝报警；

d. 车身侧围顶部Y向尺寸超差报警；

e. 电阻点焊焊枪水温超差报警。

如表1所示为具体停机时长统计。排名前5位的停机均为设备停机，其中排名第1位、第2位、第4位的均为Framer工位设备停机。排名第4位的Framer工位尺寸偏移停机和排名第3位的MIG焊粘丝停机时长相当。排名第5位的电阻点焊焊枪水温超差停机时长显著低于前4位。

表1　某焊装车间2024年12月～2025年1月停机统计

停机种类	停机总时长/min	生产日/天	日均停机时长/min
气缸卡滞	587	32	18.3
位置丢失	401	32	12.5
MIG焊粘丝	189	32	5.9
尺寸偏移	186	32	5.8
电阻点焊焊枪水温超差	87	32	2.7
Framer停机合计	1 174	32	36.7
总停机合计	1 450	32	45.2

据表1数据可知，2024年12月至2025年1月生产期间，排名前5位的问题日均停机总时长为45.2 min。其中由Framer工位引起的停机时长为36.7 min，占比81.2%。可见，Framer工位停机问题是车间停机的主要问题。因此，本文针对三面体转台Framer系统调试过程中遇到的3个主要停机问题展开系统性分析，即小车在指定位置脱离总拼夹具时Z向锁紧气缸卡滞问题、小车X、Y向位置丢失问题、车身侧围顶部位置Y向尺寸超差停机问题。如图4所示的三坐标数据展示了车身侧围顶部位置Y向尺寸超差情况，尤其是①、②、⑨和⑩4个位置波动较大。

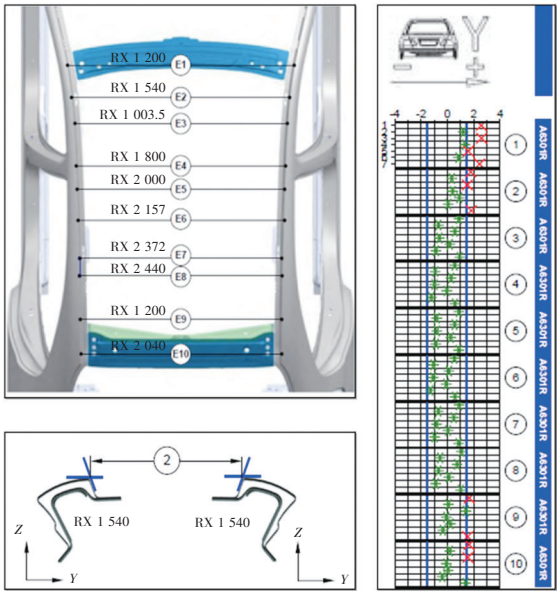


图4　某车型侧围上部Y向三坐标数据

2.1　小车位置

如图5所示，Framer系统在运行过程中，定义了小车经停的4个关键位置：位置①为转台位置；位置②为X向中间位，Y向传输位；位置③为手动操作过程安全位置，自动运行时不存在；位置④为工作位。

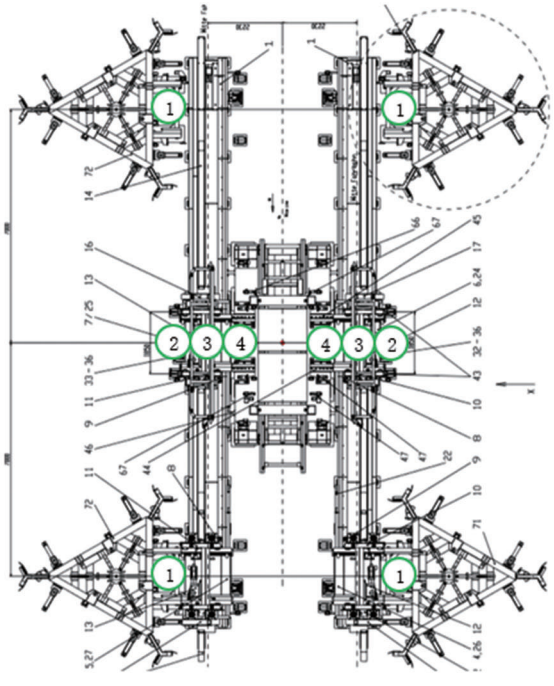


图5　总拼系统小车位置

2.2　PLC程序运行逻辑

侧围总拼系统在自动运行时，当小车在位置②时，安装在小车上的伺服电机驱动小车从位置②到达位置④，PLC得到电机信号后，控制Framer

两侧的定位立柱上安装的 4 个 Y 向气缸将 Framer 夹紧，机器人开始焊接，焊接结束后电机驱动小车回到位置②。

若下一循环需要切换车型，则当机器人开始当前循环的焊接时，小车需要与 Framer 脱开，另一小车到工作位④接 Framer，小车到转台位置①接另一车型 Framer。

生产控制系统将生产计划车型排序信息传递给 PLC，PLC 控制小车与 Framer 之间的相互切换与匹配。

2.3 Framer 受力分析

本文工位的定位基准设置在工位附近的一个厂房立柱的标准点上（该点也是整个车间的定位基准）。如图 3 所示，图中的 4 个主定位立柱（Geo-box）为该总拼工位的关键定位柱，其调试精度对保障白车身的尺寸至关重要。图 6 所示为主定位立柱定位工作原理。在所有调试开始前，先确定主定位立柱的零点和大框架定位单元的零点。当且仅当此 2 个主要定位单元归零后，方可开始后续的调试，以保障白车身的尺寸稳定性和调整可追溯性。

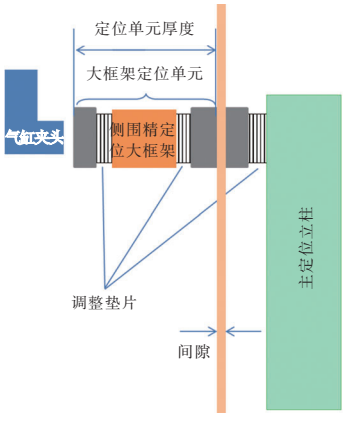
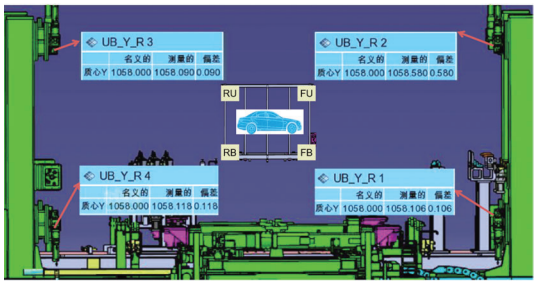


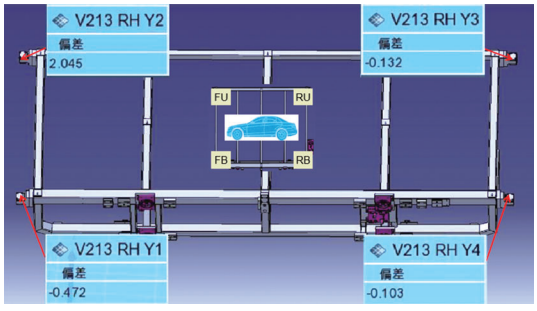
图 6 定位立柱工作原理

图 7 所示为调试开始前，根据便携式三坐标测量仪打点，通过调整图 6 所示位置的垫片对主定位立柱和侧围大框架定位单元归零调整过程中的尺寸记录截图。

接下来分析 Framer 在工作位时的受力情况。某品牌伺服电机（精度 0.001 mm）驱动小车及 Framer 到达工作位（位置④）时，电机发送信号到 PLC，PLC 控制定位立柱上的 Y 向夹紧气缸锁紧 Framer，此时 Framer 的受力如图 8 所示。



（a）主定位立柱



（b）侧围大框架定位单元

图 7 定位立柱及侧围大框架定位单元归零调整

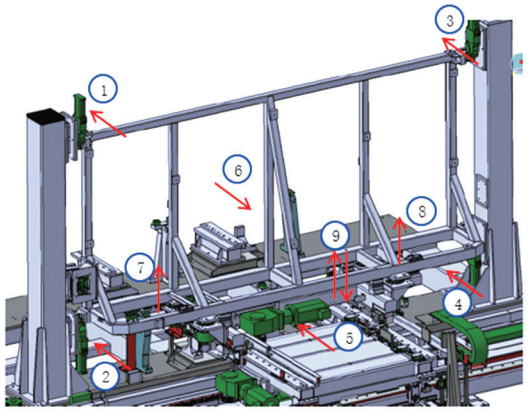


图 8 Framer 受力示意

为便于分析，建立 Framer 受力分析模型，如图 9 所示。其中 F_1、F_2、F_3、F_4 为定位立柱上 4 个气缸的 Y 向夹紧力，F_5 为 Framer 底部电机的 Y 向夹紧力，F_6 为车身对 Framer 的 Y 向反作用力，F_7、F_8 为底板夹具对 Framer 的 Z 向支撑力，F_9 为 Z 向锁紧气缸对 Framer 的 Z 向支撑力（也可能是拉力），G 为 Framer 自身重力。

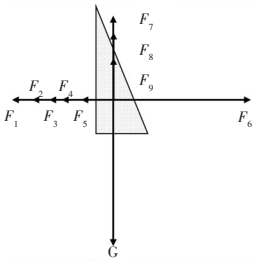


图 9 Framer 受力分析模型

以上各力的合力为零,保持Framer处于平衡状态。所有受力中,*Z*向锁紧气缸的受力对气缸本身的相互作用力最为敏感。图10所示为*Z*向锁紧气缸剖面结构。由图10易知,若Framer *Y*向受力不均,则会导致*Z*向锁紧气缸的锁紧销(精度±0.15 mm)与缸壁之间产生异常摩擦甚至卡滞停机,也可能导致锁紧气缸的位置传感器产生无信号报警停机。

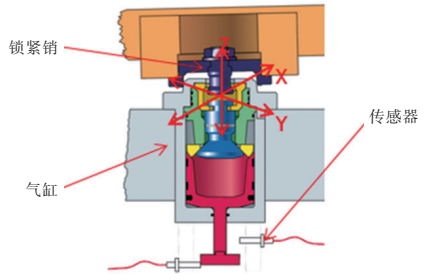


图10　*Z*向锁紧气缸剖面结构

2.4　伺服电机参数分析

伺服电机驱动小车在*X*向、*Y*向轨道上运行时,若位置①、位置②、位置④的位置理论值与公差设置不合理,则易造成小车位置丢失(PLC报错信息),引起系统停机。伺服电机在运行时,其他机械系统不稳定、岛内急停等因素也可能导致小车位置丢失,但这类问题发生的概率较低。

2.5　车型排序

多车型生产时,车型的排序对生产的稳定性有一定的影响。若排序合理则可以显著减少Framer切换,利于提升运行的稳定性。以X、V、W分别表示3种不同的车型,若车型生产序列为XXVXWVVXXXXWVVVVXXWX,则表示连续生产20台车需要切换10次Framer。车型切换次数越多,因卡滞或位置丢失造成的停机就会越多,并且车型切换需要额外的时间,虽然车型切换的时间损失考虑在设计节拍之内,但减少车型切换频次有利于提高输出。

虽彻底解决卡滞或位置丢失问题后,即便频繁切换也不应该带来停机,但减少车型切换频次有助于系统稳定运行。

3　措施分析

3.1　开发新程序消除应力

通过开发一套新程序可消除Framer内应力。为小车在*Y*向增加一个新的预工作位(将工作位定义为位置⑤,预工作位定义为位置④,其他位置不变)。

在Framer在*Y*向到达预工作位(位置④)后,使得电机扭矩降低到全扭矩的15%(约7.5 N·m),此时通过精定位立柱4个角的*Y*向锁紧气缸将Framer锁紧到位(位置⑤),电机抱闸激活,扭矩恢复到100%,可以保证*Z*向锁紧机构的锁紧销和气缸在接近自由状态情况下配合。经此优化,小车和框架脱离时不会出现卡滞问题,同时可以保证车身对Framer的反作用力受力均匀,左/右两侧同时对车身进行精确定位和夹紧,可有效避免车身*Y*向尺寸波动。

3.2　引入电机参数动态公差概念

根据实际运行情况,进行了大量的数据统计、测试及验证,提出动态公差的概念性方案,重新设置4个输送小车(1#~4#)的电机位置参数,可有效解决位置丢失的问题。小车从位置④向位置⑤移动的过程中,位置④的公差会逐渐动态释放,到位置⑤重新激活新的公差。不同的车型使用不同的位置参数及公差,如表2所示。

3.3　车型排序和比例控制

优化车型排序,将同种车型按照小批次排序的方式连续生产,避免频繁切换车型。若生产计划可以调整,则是最优解决方案。焊装车间的订单往往通过总装车间的订单倒推演算获得,排序系统上通常不支持更改订单。如系统不支持更改,则焊装车间内部在车型到达总拼工位之前可设置一定数量的储存区,通过内部排序,解决车型频繁切换的问题。白车身出焊装车间后会再次经过白车身立体库调序以保证进入涂装以及后续进入总装车间的排序准确性。

本方案在设计之初,根据物料仿真(Plant Simulation)结果,已经设置了30个位置的存储区(分成4个平行车道,车道两端通过横移机连接),但初始程序按照先进先出的逻辑执行,无分组排序功能,本次优化增加了车型分组排序控制。通过PLC对不同的车型进行车型分型,然后按照一定的数量,小批量进入总拼工位,减少切换频次。经优化后,3种车型进入总拼工位的序列为

表2 不同车型的电机参数设置(编码器值)

输送小车	车型	位置⑤		位置④	
		设置值	公差	设置值	公差
1#	X	10 349 000	±10 000	10 327 000	±3 000
	V	10 344 000	±10 000	10 322 000	±3 000
	W	10 345 000	±10 000	10 323 000	±3 000
2#	X	10 377 000	±10 000	10 355 000	±3 000
	V	10 376 000	±10 000	10 354 000	±3 000
	W	10 377 000	±10 000	10 355 000	±3 000
3#	X	10 401 000	±10 000	10 379 000	±3 000
	V	10 395 000	±10 000	10 373 000	±3 000
	W	10 397 000	±10 000	10 375 000	±3 000
4#	X	10 306 000	±10 000	10 284 000	±3 000
	V	10 305 000	±10 000	10 283 000	±3 000
	W	10 306 000	±10 000	10 284 000	±3 000

XXXXXXXXXXVVVVVVVVWWW,即X∶V∶W=10∶7∶3,连续生产20台车仅需切换2次Framer。

4 实施效果

以上措施实施后,日均停机时间显著缩短,其中生产日均按照单班8 h排产。由表1可知,措施实施前,2024年12月至2025年1月由Framer工位带来的设备日均停机时长为36.7 min。措施实施后,2025年3月和4月的Framer工位停机统计数据如表3所示,日均停机时长由原来的36.7 min缩短至1.6 min,效果显著。

表3 措施实施后2个月的停机统计

停机种类	停机总时长/min	生产日/天	日均停机时长/min
气缸卡滞	0	42	0
位置丢失	66	42	1.6
尺寸偏移	0	42	0
合计	66	42	1.6

5 结论

a. 三面体转台和四面体转台侧围总拼柔性切换系统结构复杂,调试不当易引起气缸卡滞、输送小车位置丢失、车身尺寸偏移等停机问题。调试开始前需确保主定位立柱和侧围大框架定位单元归零。

b. 通过设定输送小车的预工作位,使Framer合拼时输送小车处于近似自由状态可解决*Z*向锁紧气缸的锁紧销卡滞问题。引入电机参数动态公差概念,合理设置不同车型状态下输送小车的电机参数可解决小车位置丢失问题。优化车型排序,按照同车型小批量生产的模式可大量降低Framer的切换频次,有助于提高系统的开动率。

参考文献:

[1] 黄海. 白车身焊装线柔性定位单元的设计与应用[J]. 装备制造技术, 2015(3): 81-83.

[2] 董豪, 王亚旭, 付景海, 等. 三种白车身总拼倒库系统的设计与对比[J]. 机械工程师, 2014(8): 215-216.

[3] 傅莉. 柔性化在汽车焊装生产线的应用[J]. 科技广场, 2013(10): 94-97.

[4] 刘慧, 张宇, 蒋蓓. 柔性化总拼技术在轿车焊装线上的应用[J]. 现代零部件, 2012(7): 84-87.

[5] 刘大顺, 邵珊珊. 白车身柔性总拼技术研究及在焊装生产线中的应用[J]. 时代汽车, 2019(16): 110-112.

[6] 石海波, 黄海, 陈龙, 等. 白车身焊装柔性总拼工装平台的设计与研究[J]. 装备制造技术, 2020(11): 25-28.

[7] 郑学忠, 郭峰, 任立芳, 等. 白车身侧围总拼精度提升方案的创新与应用[J]. 汽车制造业, 2024(3): 46-49.