

焊装车间生产节拍平衡的系统化策略

金托伦

上海奥特博格汽车工程有限公司

摘要: 本文深入研究汽车焊装车间生产节拍平衡问题,阐述了生产节拍平衡的概念及影响因素,通过分析成功因素与问题案例,提出优化生产节拍平衡的技术和管理优化策略。未来研究可从不同类型生产线方法、智能化解决方案、新材料影响、建立动态评估模型和加强国际合作等方面展开。

关键词: 汽车焊装车间;生产节拍平衡;技术优化;管理优化

1 研究背景

业内关于汽车焊装车间生产节拍平衡的研究已经取得了一定的成果。研究人员通过对生产线节拍的分析,提出了多种优化方法,如优化机器人轨迹、优化设备参数、优化设备动作时序和优化工艺等。这些方法在一定程度上提高了焊装生产线的生产效率,实现了降本增效。然而,现有的研究还存在一些不足之处。例如,对于不同类型的汽车焊装生产线,其生产节拍平衡的方法可能存在差异,对于自动化程度较高的焊装车间,如何更好地实现生产节拍平衡还需要进一步研究。因此,深入研究汽车自动化生产线焊装车间生产节拍平衡问题具有重要的现实意义。

2 研究目的

对于焊装车间来说,创新的生产节拍平衡方法可以从多个方面入手。一方面,可以进一步优化机器人轨迹。通过精确的编程和调整,使机器人在焊接过程中更加高效地移动,减少不必要的动作和时间浪费。另一方面,优化设备参数也是关键。提高设备的运行速度和精度,确保焊接质量的同时,缩短每个工序的时间。例如,调整焊接电流、电压等参数,提高焊点质量和焊接速度。

此外,优化设备动作时序可以减少动作浪费。合理安排设备的起动、停止和运行顺序,避免不必要的等待时间。同时,对设备进行改进,提高其可靠性和稳定性,减少故障发生的概率,从而保证生产的连续性。

在工艺方面,不断优化工艺可以提高工艺加工速度。采用先进的焊接技术和工艺,如激光焊接、搅拌摩擦焊接等,提高焊接质量和效率。同时,对生产流

程进行优化,减少工序之间的等待时间,提高整个生产线的协同性。

通过以上创新方法的探索和应用,可以更好地实现汽车焊装车间的生产节拍平衡,提高生产效率,为汽车企业在激烈的市场竞争中赢得优势。

3 理论基础

3.1 生产节拍平衡的概念

汽车焊装车间生产节拍平衡指的是对焊装生产线各个环节的时间进行合理分配和调整,使得各个工序的作业时间尽可能相近,以实现生产线的高效、稳定运行。在汽车焊装车间,生产节拍平衡具有至关重要的意义,它能够确保生产线的各个工位协同工作,避免出现瓶颈工位,提高设备和人员的利用率,从而提升整个车间的生产效率和产品质量。

3.1.1 节拍平衡与生产效率

在某汽车焊装生产线中,通过对焊点周期、夹具切换周期、工件补焊周期、等待周期和抬枪时间等进行细致分析和优化调整,实现了生产节拍的平衡。在优化前,由于各个环节的时间分配不合理,导致生产效率低下,每天只能生产一定数量的汽车车身。经过优化后,生产节拍更加合理,各个工序之间的衔接更加紧密,生产效率大幅提高。据统计,该生产线在实现生产节拍平衡后,生产效率提高了15%。这充分说明了生产节拍平衡对提高生产效率的关键作用。

3.1.2 节拍平衡的衡量指标

衡量生产节拍平衡的主要指标包括生产节拍、工位作业时间差异以及设备利用率等。生产节拍是指完成一个产品所需的时间,通常以秒为单位。工位作业时间差

异是指各个工位完成作业所需时间的差异程度，差异越小，说明生产节拍越平衡。设备利用率是指设备在生产过程中的实际使用时间与可使用时间的比值，生产节拍平衡可以提高设备利用率，减少设备闲置时间。

生产节拍的计算方法通常是先确定年产量，然后根据实际生产要发生的辅助时间推算出生产线的节拍。例如，假定某车型的年产量预定为 30 万辆，一般主机厂每天 2 班生产，每班工作时间为 $8 \times 60 \text{ min}$ ，休息时间 30 min，电极修磨时间 15 min，设备使用率 85%。这样每天有效生产时间总共是 $[8 \times 60 - (30 + 15)] \times 85\% \times 2 = 739.5 \text{ min/天}$ ，进而得出日产量为 $300000 \div 12 \div 21 = 1190 \text{ 台/天}$ ，则生产节拍是 $739.5 \times 60 \div 1190 = 37 \text{ s/台}$ 。

工位作业时间差异可以通过计算各个工位作业时间的标准差来衡量。标准差越小，说明工位作业时间差异越小，生产节拍越平衡。设备利用率可以通过设备实际使用时间除以可使用时间来计算。生产节拍平衡可以通过优化各个环节的时间分配，提高设备利用率，从而提高整个车间的生产效率。

3.2 影响生产节拍平衡的因素

3.2.1 焊点周期的影响

焊点周期是汽车焊装生产线最关键的参数之一，对生产节拍平衡有着重要影响。焊点周期主要包括焊接时间、加压时间、预热时间、冷却时间及焊点之间移动时间等。如果焊点周期过长，会直接导致整个焊装生产线的节拍延长，影响生产效率。例如，当焊接时间过长时，可能是由于焊接设备参数设置不合理，或者焊接工艺不够先进。据统计，在一些汽车焊装生产线中，焊接时间占焊点周期的比例可达 50%。如果能通过优化焊接设备参数，如提高焊接电流、缩短主焊接时间，可有效缩短焊接时间，从而缩短焊点周期。此外，夹紧时间也会影响焊点周期。如果夹紧速度过慢，会导致焊点周期延长。通过采用先进的夹紧装置，提高夹紧速度，可以缩短焊点周期，进而促进生产节拍平衡。

3.2.2 夹具切换周期的影响

夹具切换周期对生产节拍平衡起着至关重要的作用。焊装生产线需要多种夹具来完成不同车型或者同车型不同配置零件的生产，不同的夹具适用于不同的工件，因此需要不停地更换。夹具切换周期包含了释放前一夹具、更换夹具和调整夹具的时间。如果夹具切换周期较长，将导致无法及时完成换夹工作，从而降低生产效率，破坏生产节拍平衡。例如，在某汽车焊装生产线中，夹具切换周期较长，使得整个生产线

的节拍延长了 80 s。为了缩短夹具切换周期，可以采用高柔性夹具快速切换方式，如双 BASE 夹具和 BASE 旋转工作台。双 BASE 夹具结构简单、拼装环节少且刚性好，易于满足车型切换、产品更新换代与自动化加工的需要。BASE 旋转工作台可以实现多车型同一工位生产，显著节省生产线的布线面积，缩短夹具更换调试时间，提高生产节拍平衡。

4 汽车焊装车间生产节拍平衡的案例分析

4.1 成功案例分析

以某汽车企业焊装车间为例，该车间通过一系列创新措施成功优化了生产节拍平衡，大幅提高了生产效率。

4.1.1 优化焊点周期的策略

该企业在优化焊点周期方面采取了多项具体措施。首先，对焊接设备参数进行了精细调整。通过大量的实验和数据分析，确定了最佳的焊接电流和时间组合。例如，将焊接电流从原来的 8000 A 提高到 10000 A，同时将焊接时间从 600 ms 缩短到 300 ms。这样的调整使得焊接时间缩短了约 50%。其次，引入了先进的激光焊接技术。激光焊接具有焊接速度快、焊缝质量高的优点。据统计，采用激光焊接后，焊点的焊接时间比传统焊接方式缩短了 30%。此外，该企业还对夹紧装置进行了升级，采用了高速夹紧机构，将夹紧时间从原来的 4 s 缩短到 2 s。通过这些措施的综合应用，该企业成功地优化了焊点周期，提高了生产效率。

4.1.2 合理调整夹具切换周期

为了实现夹具切换周期的合理调整，该企业采用了高柔性夹具快速切换方式。一方面，引入了双 BASE 夹具。这种夹具结构简单，拼装环节少且刚性好，易于满足车型切换、产品更新换代与自动化加工的需要。通过使用双 BASE 夹具，该企业在夹具切换过程中减少了释放前一夹具和更换夹具的时间。例如，原来的夹具切换时间为 50 s，采用双 BASE 夹具后，切换时间缩短到了 10 s。另一方面，该企业还采用了 BASE 旋转工作台。这种工作台可以实现多车型同一工位生产，显著节省了生产线的布线面积，同时也缩短了夹具更换调试时间。通过合理调整夹具切换周期，该企业有效地提高了生产节拍平衡，提升了整个焊装车间的生产效率。

4.2 问题案例分析

某焊装车间在生产过程中曾出现生产节拍不平衡

的情况，这给企业的生产效率和产品质量带来了诸多不良影响。

4.2.1 焊点质量问题导致的影响

焊点质量问题是影响生产节拍平衡的重要因素之一。当焊点质量出现问题时，往往会导致生产节拍的延长和不平衡。例如，如果焊点存在虚焊、漏焊等情况，在后续的检测环节中就会被发现，需要进行补焊。据统计，在该焊装车间中，因焊点质量问题导致的补焊情况占总生产数量的5%。补焊过程不仅增加了工件补焊周期，还可能影响其他工序的正常进行。一般情况下，补焊一个焊点的时间可能是正常焊接时间的10倍。这使得整个焊装生产线的节拍增加，生产效率降低。此外，焊点质量问题还可能导致产品质量不稳定，增加废品率，进一步影响生产节拍平衡。

4.2.2 夹具切换不当的后果

夹具切换不当也会带来严重的生产节拍不平衡问题。如果夹具切换过程中操作不规范，或者夹具设计不合理，就会延长夹具切换周期。例如，在某焊装车间中，由于夹具的释放、更换和调整过程中出现问题，导致夹具切换周期延长了300s。夹具切换周期较长时，将导致无法及时完成换夹工作，从而降低生产效率。同时，频繁的夹具切换不当还可能增加机器人碰撞风险，人为切换失误导致设备损坏，影响节拍的稳定性。如果机器人在夹具切换过程中出现故障，维修时间也会进一步延长生产节拍。此外，夹具切换不当还可能导致工件定位不准确，影响焊接质量，从而引发更多的质量问题，进一步破坏生产节拍平衡。

5 提升汽车焊装车间生产节拍平衡的策略

5.1 技术优化策略

5.1.1 优化机器人轨迹

优化机器人轨迹是提升汽车焊装车间生产节拍平衡的重要技术手段之一。通过精确的编程和调整，可以使机器人在焊接过程中更加高效地移动，减少不必要的动作和时间浪费。

如图1所示，机器人沿最快的轨道将TCP引至目标点。一般情况下最快的轨道并不是最短的轨道，也就是说并非直线（如图2所示）。因为机器人轴需进行回转运动，所以曲线轨道比直线轨道进行更快。无法事先知道精确的运动过程。

LIN/L：如图2所示，机器人沿一条直线以定义的速度将TCP引至目标点。

在没有密集干涉的情况下，尽量使用PTP/J点属性来示教轨迹点。

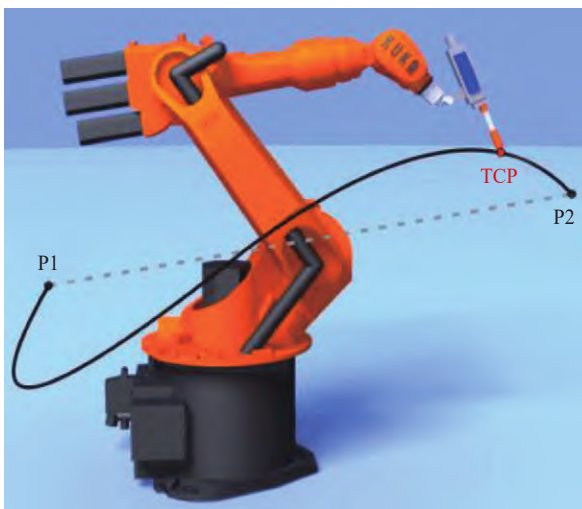


图1 沿最快轨道

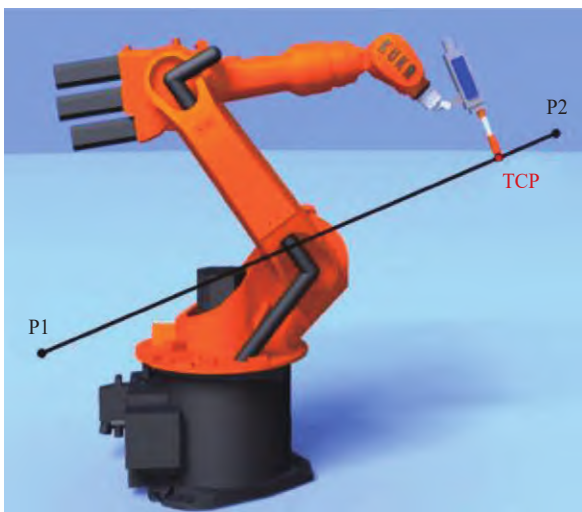


图2 沿直线轨道

逼近值设置最大值，机器人会在不减速的情况下逼近目标位置后向下一个目标位置运动，所以，调试时，在不干涉的情况下，尽量增大逼近值以达到提升节拍的目，还减少了电机和减速机的加速和减速，减少受力，提升使用寿命。

综上，优化机器人轨迹可以适当减少轨迹点，但要以保证机器人运动为前提；减少旋转，减少工具的旋转角度，避免短距离的运动轨迹的工具旋转（提前运动），分配好各轴的运动角度；减少停顿，大多数运动类的步骤中使用最大逼近值机器人的流畅性有提升；避免奇异点，机器人在即将跨越奇异点的时候，机器人会进行适当降速以防止机器人报错。同样地，在工件抓取的过程中，应尽量避免机器人运动到奇异点附近，

防止因奇异点导致的报错停止或慢速运行。

例如某案例中，根据汽车焊装车间的实际布局和生产需求，利用先进的机器人编程软件对机器人的运动路径进行优化，通过减少机器人的转弯次数、缩短移动距离等方式，提高机器人的运行速度。据相关数据显示，在一些汽车焊装车间中，经过优化机器人轨迹后，机器人的运行效率提高了 20% 以上。

此外，还可以采用多机器人协同作业的方式，进一步提高生产效率。通过合理分配任务，使多个机器人在不同的工位上同时进行焊接作业，减少等待时间。例如，在汽车车身的焊接过程中，可以将车身分多个区域，每个区域由多个机器人负责焊接，这样可以大大缩短焊接时间，提高生产节拍平衡。图 3 所示为某汽车厂生产流程规划。

5.1.2 提升设备参数

提升设备参数对生产节拍平衡至关重要。首先，可以提高设备的运行速度。例如，对于焊接设备，可以通过调整焊接电流、时间等参数，提高焊接速度。据统计，在某汽车焊装车间中，将焊接电流提高 30%，焊接速度可以提高 10% 左右。同时，还可以优化设备的控制系统，提高设备的响应速度，减少设备的启动和停止时间。

其次，提升设备的精度也可以提高生产节拍平衡。例如，对于夹具设备，可以通过提高夹具的定位精度，

减少工件的调整时间。在一些汽车焊装车间中，采用高精度的夹具后，工件的定位时间缩短了 10% 以上。此外，还应对设备进行定期维护和保养，确保设备的性能稳定，减少设备故障的发生概率。设备故障会导致生产中断，严重影响生产节拍平衡。通过定期维护和保养，可以延长设备的使用寿命，提高设备的可靠性，从而保证生产的连续性。

5.1.3 优化机器人和 PLC 控制时序

通过工艺规划的 Cycle_time，如图 4 所示，对现场实际节拍视频进行分解，对超出的部分制定优化方案。在项目调试阶段，根据设备的开动率，对开动率较低的机器人增加焊点，使其分担节拍较长工位的工作，平衡节拍；在生产线输送、搬运零件的时候，机器人进入冲锋位，重叠等待时间，提升工作效率；或者在机器人焊接完成后提前允许夹具打开，重叠夹具打开时间，进一步提升工位节拍等。

5.2 管理优化策略

5.2.1 优化生产计划

合理的生产计划对生产节拍平衡起着关键作用。一个科学合理的生产计划能够确保各个工序之间的衔接紧密，避免出现生产停滞或过度积压的情况。例如，根据市场需求和企业的生产能力，精确安排每天、每周、每月的生产任务，使生产线始终保持在一个稳定的运行状态。通过对生产数据的分析和预测，合理调整生产计划，以应对市场变化和突发情况。据统计，在某汽车焊装车间中，优化生产计划后，生产节拍的稳定性提高了 10%。

在制定生产计划时，要充分考虑到焊点周期、夹具切换周期等因素，合理安排不同车型的生产顺序，尽量减少夹具切换的次数和时间，同时还要预留一定的弹性时间，以应对设备故障、人员缺勤等意外情况。通过优化生产计划，可以提高设备和人员的利用率，降低生产成本，实现生产节拍的平衡。

5.2.2 加强人员培训

人员培训对实现生产节拍平衡具有重要意义。高素质的员工队伍能够更好地适应生产需求，提高工作效率和质量。首先，要对员工进行技术培训，使他们熟练掌握焊接技术、设备操作等技能。例如，定期组织机修人员对设备维修操作的培训，在设备出现故障后可以迅速找到问题点，快速恢复生产线；培训生产上件、物料转运工人，也可以大幅提升产线节拍，减少设备停机等待。据统计，经过专业培训的员工，生产

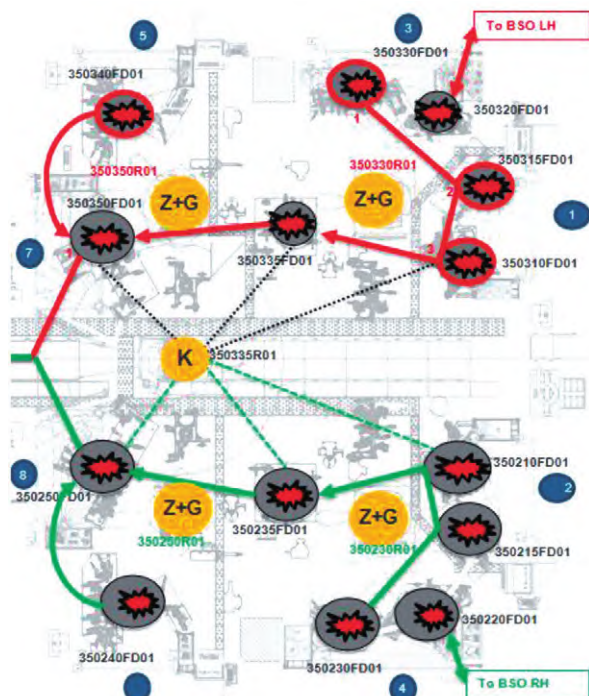


图 3 某汽车厂生产流程规划

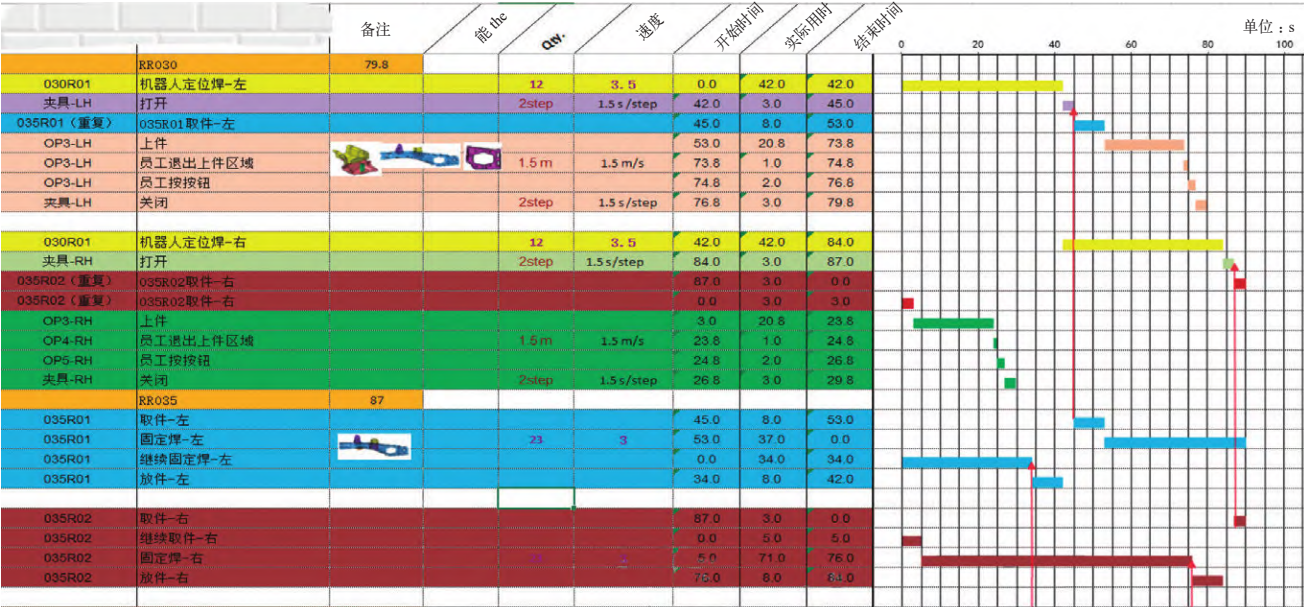


图 4 工艺规划的 Cycle_time

节拍可以提高 20% 以上。

其次，要加强员工的安全意识和质量意识培训，确保员工在生产过程中严格遵守操作规程，保证生产安全和产品质量。安全事故和质量问题会严重影响生产节拍平衡，因此，提高员工的安全意识和质量意识是实现生产节拍平衡的重要保障。

此外，还要培养员工的团队合作精神和解决问题的能力。在生产过程中，员工之间的协作和沟通非常重要。通过团队合作，可以及时发现和解决生产中的问题，提高生产效率。例如，当出现设备故障时，员工能够迅速响应，共同协作进行维修，减少生产中断的时间。通过加强人员培训，可以提高员工的综合素质，为实现生产节拍平衡奠定坚实的基础。

6 结语

本文深入研究了汽车焊装车间生产节拍平衡问题，得出以下结论：

(1) 生产节拍平衡在汽车焊装车间至关重要，它能确保生产线各个工位协同工作，提高设备和人员利用率，提升生产效率和产品质量。通过对焊点周期、夹具切换周期、工件补焊周期和等待周期，以及抬枪时间等进行优化调整，可实现生产节拍平衡。

(2) 影响生产节拍平衡的因素众多，其中焊点周期和夹具切换周期的影响尤为显著。通过优化焊接设备参数、引入先进焊接技术、升级夹紧装置以及采用高柔性夹具快速切换方式等措施，可以有效缩短焊点

周期和夹具切换周期，促进生产节拍平衡。

(3) 案例分析表明，成功的汽车企业焊装车间通过优化焊点周期和合理调整夹具切换周期等创新措施，实现了生产节拍平衡，大幅提高了生产效率。而问题案例则凸显了焊点质量问题和夹具切换不当对生产节拍平衡的严重影响。

(4) 提升汽车焊装车间生产节拍平衡的策略包括技术优化和管理优化。技术优化方面，优化机器人轨迹和提升设备参数可以提高生产效率；管理优化方面，优化生产计划和加强人员培训能够确保生产线稳定运行，提高员工素质，为实现生产节拍平衡奠定基础。

总之，汽车焊装车间生产节拍平衡是一个复杂的系统工程，需要综合考虑技术和管理等多方面因素。通过不断探索和创新，采取有效的优化措施，可以实现生产节拍平衡，提高汽车生产效率，为汽车企业在激烈的市场竞争中赢得优势。

未来关于焊装车间生产节拍平衡的研究，可以自动化程度等方面展开。

(1) 深入研究自动化程度更高的生产线：随着科技的不断进步，汽车焊装车间的自动化程度将越来越高。未来的研究可以聚焦于如何更好地适应高度自动化的生产线，探索更加高效的生产节拍平衡方法。例如，研究如何实现多机器人的智能协同作业，通过人工智能算法自动优化机器人的轨迹和任务分配，提高生产效率。据相关数据显示，目前一些先进的汽车焊装车间已经开始尝试引入人工智能技术，预计在未来几年

内，这一技术将得到更广泛的应用，有望将生产效率提高 20% 以上。

(2) 拓展新材料应用对生产节拍的影响研究：汽车制造行业不断引入新材料，这些新材料的焊接特性和加工要求可能与传统材料不同。未来的研究可以深入探讨新材料在焊装车间的应用对生产节拍平衡的影响。例如，研究新型高强度钢材、铝合金等材料的焊接工艺和夹具设计，以适应新材料的特性，提高焊接质量和生产效率。同时，还可以研究如何优化生产流程，以更好地处理新材料带来的挑战，如焊接难度增加、加工时间延长等问题。

(3) 建立生产节拍平衡的动态评估模型：目前的生产节拍平衡研究大多是基于静态的生产条件和参数进行的。然而，在实际生产过程中，生产条件和需求可能会不断变化。未来的研究可以建立生产节拍平衡的动态评估模型，实时监测和评估生产线的运行状态，及时调整生产计划和优化策略，以确保生产节拍始终保持在最佳状态。例如，可以利用传感器技术和数据分析算法，实时采集生产线的运行数据，如机器人运行速度、设备故障情况、工件加工时间等，通过对这些数据的分析，及时发现生产节拍不平衡的问题，并采取相应的措施进行调整。

(4) 加强生产线设计规划：汽车生产线目前都做到了数字孪生全场景化，通过虚拟仿真软件提前进行物料仿真，计算生产线瓶颈工位，预留更多缓存，精确评估自动化工位机器人节拍和人工工位生产节拍，做到规划阶段节拍误差在 3 s 以内，才能实现设备进场调试后的节拍完美平衡，提高生产效率。

(5) 加强国际合作与交流：汽车制造是一个全球性的产业，不同国家和地区的汽车焊装车间在生产节拍平衡方面可能面临不同的挑战和机遇。未来的研究可以加强国际合作与交流，分享各国在汽车焊装车间生产节拍平衡方面的经验和技术。通过国际合作，可以引进先进的技术和管理经验，提高我国汽车焊装车间的生产效率和竞争力。同时，也可以将我国在该领域的研究成果推向国际市场，为全球汽车制造行业的发展做出贡献。

参考文献

- [1] KUKA Roboter GmbH. KUKA 机器人编程手册 (P2KSS8Roboterprogrammierung2V1zh 版) [S]. 2011-12-20.
- [2] 王承欣, 宋凯. 工业机器人应用与编程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [3] 张根保, 付兴林, 朱瑜庆, 等. 汽车制造企业精益生产系统模型 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 93-100.
- [4] 刘树华, 鲁建厦, 王家尧. 精益生产 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [5] 王洪光. 实用焊接工艺手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [6] 陈裕川. 焊接结构制造工艺实用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [7] 陈荣秋, 马士华. 生产运作管理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [8] 秦志刚, 张洪亮. 汽车焊装生产线节拍分析及优化 [J]. 汽车工艺与材料, 2021(8): 57-60.