

江苏省制造业智改数转网联 金属切削机床行业实施指南

江苏省工业和信息化厅
二〇二五年

目 录

一、背景与现状	1
(一) 指南范围	1
(二) 行业概述	3
(三) 行业智能化改造数字化转型现状	9
二、目标与框架	13
(一) 总体目标	13
(二) 系统构架	14
三、基础能力	17
(一) 网络、标识等基础设施能力建设	17
(二) 数据采集能力建设	20
(三) 信息系统能力建设	22
(四) 工业信息安全能力建设	24
(五) 大模型能力建设	27
四、环节与场景	31
(一) 工厂建设环节	32
(二) 产品设计环节	37
(三) 工艺设计环节	46
(四) 计划调度环节	50
(五) 生产作业环节	58

(六) 质量管控环节	71
(七) 设备管理环节	78
(八) 仓储物流环节	89
(九) 安全管控环节	96
(十) 能碳管理环节	102
(十一) 环保管理环节	107
(十二) 营销与售后环节	109
(十三) 供应链管理环节	117
(十四) 信息基础设施环节	126
(十五) 多环节模式创新环节	134
五、路径与方法	159
(一) 实施路径	159
(二) 实施方法	196
(三) 新一代信息技术	204
(四) 相关政策及标准	209
六、愿景与展望	230
附件 1	232
附件 2	244
附件 3	288
附件 4	322
附件 5	333
附件 6	334

一、背景与现状

（一）指南范围

根据《2025年政府工作报告》的部署，“推动高端化智能化绿色化转型，加快发展先进制造业，壮大战略性新兴产业，推动现代服务业同先进制造业、现代农业深度融合，构建优质高效的服务业新体系”。工业母机作为先进制造业的重要组成部分，是实现制造业智能化、高端化转型的关键支撑。

国家明确提出了推动制造业高质量发展的战略目标，强调要加快数字化、网络化、智能化转型，全面提升制造业的竞争力。这一战略导向在《“十四五”智能制造发展规划》中得到了具体体现，规划要求全国上下共同努力，推动制造业向智能化、高端化迈进。江苏省作为制造业大省，积极响应国家号召，深入贯彻执行《制造业数字化转型行动方案》及《江苏省深化制造业智能化改造数字化转型网络化联接三年行动计划（2025—2027年）》，旨在通过智能化改造和数字化转型，全面提升省内制造业的整体水平。

金属切削机床行业作为工业母机的重要组成部分，其特殊性在于对加工精度和研发设计的高要求。加工精度常常需要精确到微米甚至纳米级别，这对机床的制造和装配提出了极高的要求。同时，在研发设计方面，金属切削机

床行业需要深入考量复杂的加工工艺，设计出最优化的切削路径和参数组合，这不仅需要深厚扎实的专业知识储备，还必须借助先进的数字化设计工具。在制造业数字化转型浪潮中，金属切削机床行业的智能化改造具有战略意义。根据工信部《智能制造发展规划（2021-2025年）》及最新的政府工作报告指引，2025全年，全国规模以上工业企业关键工序数控化率将超过70%，经营管理数字化普及率力争突破80%，数字化研发设计工具普及率接近90%。这一宏伟蓝图不仅为金属切削机床行业指明了发展方向，也提出了更为迫切的转型需求。

为实现上述目标，江苏省金属切削机床行业需聚焦六大重点任务：智能工厂梯度建设、中小企业数字化转型、数字基础设施升级、人工智能赋能应用、工业网络和数据安全保障以及发展环境优化提升。这些任务的实施将有效推动数字技术在工厂建设、研发设计、生产作业、经营管理等关键环节的普及应用，促进工业互联网创新发展，加速人工智能赋能，实现生产要素的广泛联接。在具体实施过程中，智能制成熟度模型（GB/T 39116-2020）将作为企业自我评估与持续改进的重要参考工具，帮助企业明确自身所处的转型阶段，制定切实可行的升级策略。本指南编制将着眼于金属切削的核心环节，包括产品设计、生产制造、运营管理、基础支撑等，并结合江苏省制造业的实

际需求，旨在通过智能化改造和数字化转型，提升企业的核心竞争力，助力产业的“高质量”发展。同时，江苏省将积极打造一批具有江苏特色的智能工厂，推动规上工业企业全面完成智能化改造，中小企业全面实施数字化转型，为“1650”产业体系建设提供有力支撑。

基于此，江苏省制造业“智改数转网联”金属切削机床行业实施指南是在国家制造业高质量发展的大背景下，结合江苏省制造业实际需求而制定的。通过实施本指南，将有效提升金属切削机床行业的智能化水平和数字化能力，推动行业向更高质量、更高效率、更高附加值的方向发展。

（二）行业概述

金属切削机床作为工业母机产业链中的重要组成部分，在江苏省制造业发展中占据着举足轻重的地位。江苏省是我国高档数控金属切削机床产业的重要高地，机床产业实力雄厚，龙头企业引领作用显著，产业集群效应明显。根据不完全统计，截止 2024 年，江苏省已累计培育工业母机领域专精特新“小巨人”企业 70 余家。规模以上工业母机企业实现营业收入超 1000 亿元；在金属切削机床产量方面，2024 年江苏省金属切削机床的全年产量达 7.50 万台，而同年全国金属切削机床产量为 69.5 万台，江苏省年产量约占全国总产量的 10.8%，于全国各省市产量排名中位居第四。省内如纽威数控等龙头企业经营质态良好。这些企

业通过持续增加研发投入，不断促使产品技术含量得以提升，进而增强自身在市场中的竞争力，在推动产业升级与技术创新方面发挥着重要的示范引领作用。

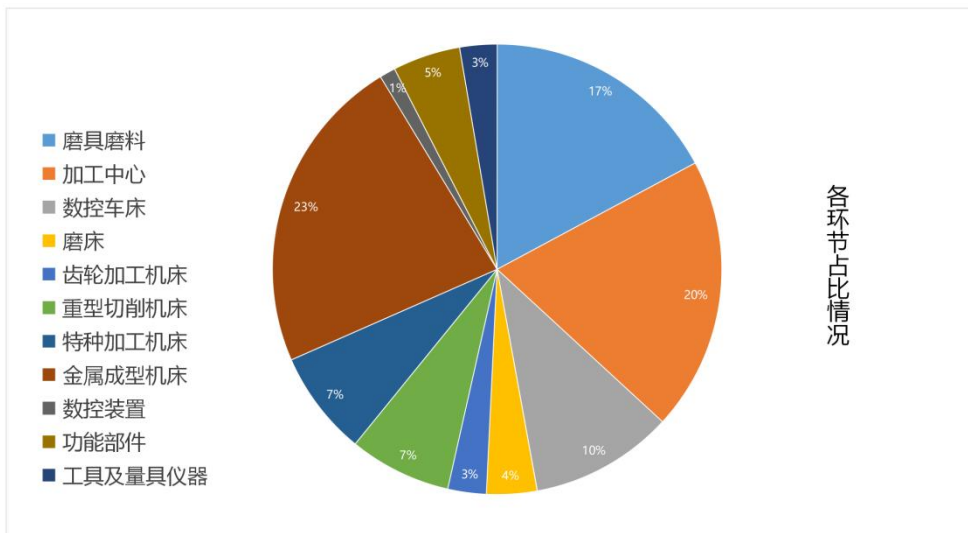


图 1 金属切削机床及其配套工具销售占比情况¹

1.行业特点

高精度加工要求。与多数离散行业不同，金属切削机床对加工精度有极高的要求。在汽车发动机缸体、航空航天零部件等制造中，金属切削机床需将加工精度稳定控制在微米甚至纳米级。例如，航空发动机叶片的制造，其复杂的曲面形状和严苛的材料性能要求，使得机床必须具备极高的精度保持性和运动控制精度。这不仅需要高精度的数控系统、精密的传动部件，还依赖于先进的刀具技术和热稳定性设计，远高于普通离散制造业产品的精度标准。

¹ 数据来源：中国机床工具工业协会

工艺复杂性。金属切削机床行业涉及的加工工艺极为复杂。针对不同材质（如铝合金、钛合金、高强度合金钢等）、不同形状（如回转体、箱体、异形件等）的工件，需要设计出极为精细且个性化的切削工艺方案。以模具制造为例，模具型腔的复杂形状决定了切削路径的多样性，需要综合考虑刀具的选择、切削参数（切削速度、进给量、切削深度）的优化，以及加工过程中的冷却润滑方式等。这种工艺复杂性要求企业具备深厚的专业知识和丰富的实践经验，相比其他离散行业，对技术人才和研发能力的依赖程度更高。

设备与零部件的高关联性。金属切削机床是由众多关键零部件协同工作的复杂系统。从数控系统、主轴单元、进给系统，到刀库、工作台等，每个零部件的性能和质量都直接影响机床整体性能。例如，高精度的主轴单元决定了机床的转速和回转精度，而高性能的数控系统则负责精确控制机床的运动轨迹。任何一个零部件出现故障或性能波动，都可能导致机床加工精度下降、稳定性变差，甚至无法正常工作。这与其他离散行业产品各部件相对独立的特点有很大区别，意味着在生产制造、维护保养过程中，需要更高水平的系统集成能力和质量管控能力。

2.面临的挑战

高端技术瓶颈。江苏省金属切削机床企业虽在关键零

部件研发有所进步，但在高端领域仍受技术制约。机床稳定性与精度保持性和国际先进水平存在一定差距，高档数控系统、高性能传感器等核心技术依赖进口。这使得国产机床在长时间、高负荷运转时，难以维持稳定高精度加工，严重限制了产品向高端化迈进，削弱了企业在国际高端市场的竞争力。

中低端产品同质化严重。当前市场竞争激烈，金属切削机床行业中低端产品同质化问题突出。一些企业扎堆中低端市场，产品功能、性能趋同，依靠价格战争夺份额，极大压缩了利润空间。多数企业缺乏核心技术与品牌优势，难以实现差异化竞争，提升产品附加值。

应链韧性不足与风险凸显。金属切削机床行业供应链结构复杂、链条冗长，涉及从原材料供应商、零部件制造商，到整机装配企业以及经销商等多个环节。在当前全球化背景下，国内外经济形势复杂多变，这使得该行业供应链面临显著的韧性不足与风险问题。一是原材料价格频繁波动，如钢材、稀有金属价格大幅上涨，增加企业成本，影响成本控制、盈利能力与生产经营稳定性；二是国际政治局势和贸易摩擦，加剧机床关键功能部件等供应中断风险。供应中断会使整机装配企业停工，影响生产进度，损害企业信誉、错失市场机会，还会在供应链上下游传导，削弱行业应对市场变化能力，凸显供应链的脆弱性。

3.行业发展趋势

技术持续迭代。在全球制造业竞争日益激烈的当下，江苏省金属切削机床行业积极顺应技术发展潮流，坚定地朝着高速化、高精化、复合化、智能化的方向迈进。随着电主轴技术的成熟，加工中心的主轴最高转速持续提升，实现了更高效的切削速度；同时，先进的传感器技术和智能算法深度融入机床设备。传感器能够实时采集机床运行的各类数据，如温度、振动、位移等，智能算法则对这些数据进行分析处理，从而实现对机床的自主控制和实时监控。这不仅能及时发现潜在的故障隐患，提前进行预警和处理，还能根据加工情况自动调整参数，确保加工精度始终保持在较高水平，有效提升了产品质量。

机床关键功能部件的研发与整机测试方面不断突破。如南京工艺装备在滚动功能部件核心技术上持续攻坚，其制造的滚珠丝杠副与滚动导轨副作为数控机床关键功能部件，精度与性能大幅提升，目前已能批量生产微米级定位精度产品，能够为高速、高精的中高档数控机床进行大批量配套；在传统的机床测试中，对于精度保持性的测试往往需要耗费大量的时间和资源，而且难以快速准确地评估机床在长期运行中的性能变化，常州智能制造龙城实验室成功研发了全国首套载重 20 吨的“整机精度保持性加速测试平台”，它能够模拟机床在各种复杂工况下的长时间运

行，对机床进行精度保持性的加速测试，为提升机床精度和可靠性提供了重要技术支撑。

产业集群化发展。产业集群效应在江苏省金属切削机床行业愈发明显。南京六合数控机床产业园、常州新北江苏省工业刀具特色产业基地等，通过科学合理的产业链布局，整合上下游资源，实现了企业间的协同发展。在这些产业园区内，原材料供应、零部件制造、整机装配以及售后服务等环节紧密配合，形成了完整的产业链条。以常州新北的产业基地为例，刀具制造企业与机床整机企业紧密合作，根据机床的性能特点和加工需求，研发生产适配的刀具，提高了加工效率和质量。同时，纽威数控、南京工艺等大型机床企业充分发挥龙头引领作用，凭借强大的技术创新能力和广泛的市场拓展能力，不断提升自身实力。它们不仅为中小企业提供技术支持和经验借鉴，还带动了整个产业链的发展，促进了产业结构的优化升级。

政策支持持续强化。为推动数控机床产业“高质量发展”，各级政府给予了金属切削机床产业发展提供了全方位的政策支持。《江苏省工业母机产业三年行动计划》等一系列政策文件相继出台，明确了未来几年的发展目标和技术路线图，为行业发展指明了方向。同时，政府设立专项基金，对企业的关键技术研发、创新项目给予资金支持，减轻企业研发负担。在税收方面，实施税收优惠政策，降

低企业的运营成本，提高企业的盈利能力和创新积极性。这些政策措施为企业的技术创新提供了坚实保障，营造了良好的发展环境。

市场前景向好。未来几年，江苏省金属切削机床行业将迎来多重发展机遇。国家对老旧设备更新换代的支持政策，将释放大量的市场需求，推动行业迎来新一轮的需求爆发高峰。同时，随着数字化转型和智能化升级的加速推进，金属切削机床在智能制造领域的应用场景不断拓展，为企业带来了更多的市场机遇。

（三）行业智能化改造数字化转型现状

金属切削机床素有制造业“母机”之称，作为“制造机器的机器”，它是现代化产业体系的核心枢纽与制高点。江苏省作为我国制造业的重要基地，其金属切削机床行业正处于从传统制造向智能制造转型的关键时期，积极推进智能化改造和数字化转型。在此进程中，行业内企业逐渐明晰信息化建设的重要意义，开始引入先进的信息管理系统，像 ERP（企业资源计划管理系统）、MES（制造执行系统）等，以此优化生产流程，提升效率。同时，借助物联网技术，实现了设备间的互联互通，为高效生产管理与设备维护创造了条件。然而，诸多挑战也随之而来，一些因素制约着行业的“高质量”发展。经综合调研分析，我省金属切削机床行业存在的主要问题如下：

1.关键核心工艺技术研创积累不足，数字化、标准化不足。行业铸锻、机加、检测、特种工艺等核心技术与工艺普遍引进消化吸收于国外标准、技术和装备，且很多是国外上代的落后技术，一些核心技术、关键工艺、特种工艺国内尚未完全掌握，加之国内材料和体系、标准管控等的差距、差异，也导致执行工艺的差异，客观上也有国际先进工艺适应不了国内制造的情形，从而导致全链制造水平仍与国际先进有代际差距。同时，长期机床主机自主正向研发积累的不足，造成技术迭代优化周期长，基础数据库、工艺库匮乏，进而使得数字化、标准化推进难度很大。

2.关键核心装备、关键部件、软件、工具国外依赖性强，数字化智能化应用程度不高，有受限受卡风险。高端精密磨床、激光打孔、表面强化、真空热处理、焊接等生产加工装备，高灵敏、高分辨、高可靠无损检测、三坐标测量等检测检验装备，光栅尺、编码器、电主轴、滚珠丝杠等关键部件，产品设计、工艺设计、仿真模拟、数值分析等研发设计类软件及高端控制系统绝大部分依赖进口，不仅存在本土适用性弱、购置维护成本高、技术服务差等问题，而且由于企业自身技术能力等原因，高端装备及软件的数字化、智能化功能使用不足，设备产能和性能挖潜不够，单台设备价值创造与国外存在较大差距。此外，随着国外局势变化，装备、关键部件、软件等都存在很大的受限受

卡风险。

3.行业上下游客观协同不足，单件小批、定制化需求大量存在，企业数字化经营管理难度大。我省金属切削机床行业受上游原材料供应和下游客户使用场景广泛等制约，上下游数据难以获取、数据堵点多，较难形成设计、研发、制造、生产、交付、维护的数字化闭环管理。同时，由于我国机床产业也存在着客户设计更改频繁、单件小批生产频繁、原材料质量不稳定等客观情况，使得企业面临柔性化制造、插单生产、投入产出比低，资源实时调配难等诸多经营管理的高阶难点。

我省金属切削机床企业诸多、发展阶段各异，面临的发展诉求和现实困难不尽相同，同时由于机床产业涉及国防、安全等特殊性和企业间技术、管理、经验分享客观困难，造成智能化改造数字化转型的诉求、进展和推广较难步调一致。综合调研分析，我省金属切削机床企业大致分为以下三个层次：

1.大型生产制造头部企业情况。包括体系内国企、上市企业、大型民营企业、部分专精特新企业，这类企业在研发设计、生产制造、生产管理、经营管理等方面已经相当成熟，各环节数字化、信息化已经有相当基础，但在整体智能化工厂建设上还有待进一步加强，特别是在跨部门的信息集成和全流程的数字化管理方面仍需努力。

2.中型规模以上生产制造企业。主要包括主机零部件配套单类或有限品类零件，有一定规模的中小型企业，这类企业已经具备了部分生产技术能力和经验，有相对稳定的客户订单，处于快速成长期，它们通常具备一定的技术和资金基础，能够开展部分环节的自动化升级或引进先进的加工中心，在个别或部分环节已经开展数字化智能化技术应用，但是，由于缺乏全面的战略规划和技术积累，这些企业在推进全面的数字化转型时遇到了瓶颈。例如，如何将现有的分散系统整合起来形成一个有机的整体，以及怎样有效地利用大数据分析来指导生产和决策成为亟待解决的问题。

3.小型生产制造企业。主要包括初进行业的小微民营企业，主要针对单个单类零件开展技术研发或试制的小批量生产配套，这类企业处于初创期，尚缺乏完整的生产制造能力，客户订单不稳定，急需推出可以生存的单个单类产品，受限于规模较小、资源有限等因素，它们往往只能选择性地投资一些基础性的硬件设施，而在软件应用和服务方面投入较少。这导致了即使拥有现代化的机床设备，也无法充分发挥其效能。此外，由于人才短缺和技术支持不足，很多小型企业在面对复杂的数字化解决方案时感到力不从心。

二、目标与框架

（一）总体目标

深入贯彻《“十四五”智能制造发展规划》《江苏省深化制造业智能化改造数字化转型网络化联接三年行动计划（2025-2027年）》等政策要求，以“智改数转网联”为主攻方向，锚定制造业高质量发展首要任务，聚焦新一代信息技术与先进制造技术深度融合，全面落实江苏制造强省和网络强省建设部署。通过智能制造和工业互联网创新应用，推动金属切削机床行业实现绿色智能生产、设施互联互通、数字设计运营、数据开放共享、产业互促互融、系统安全可控。坚持企业主导、实施龙头牵引、构建产业生态，充分发挥国家智能制造试点示范的引领效应，培育一批示范引领作用强劲、综合效益显著的智能化改造数字化转型示范试点企业。通过智能化的制造手段、数字化的控制技术、数据驱动的研发和管理模式，帮助金属切削机床企业实现产品质量变革、运营效率变革、执行动力变革，在关键制造节点实现智能化改造，在产品全价值链实现数字化升级，进而推动金属切削机床全产业链实现“研发全流程、生产全过程、产品全周期、管理全方位、安全全覆盖”，打造全国金属切削机床行业智能化改造数字化转型的新标杆，促进全省智能制造水平和供应链现代化水平的稳步提升。

（二）系统构架

金属切削机床作为装备制造业的重要组成部分，广泛应用于机械制造、汽车、航空航天、电子信息、能源、医疗等多个领域。其产品的相关科学问题跨越动力学、摩擦学、热力学、耐久性以及耦合效应等多个学科领域，而机床的设计和分析模型则是一个涉及多空间尺度、多时间维度的复杂问题。机床的制造过程包含精密加工、装配和调试等多个环节，对精度和产品一致性有着极高的要求。

鉴于产品研发和生产制造的复杂性，机床制造领域迫切需要数字化和智能化的技术支持。随着金属切削机床技术的快速发展，国际标准（如 ISO）和国内标准（如 GB/T）已发布了一系列相关标准，这些标准涵盖了机床的性能、安全性、寿命评估等方面。然而，现有的标准体系在关键材料、精密加工、测试验证、可靠性保持等关键环节上仍存在不足，无法完全满足行业的高质量发展需求。

针对机床产品研发和制造的复杂性，以及行业标准的具体要求，参考《国家智能制造标准体系建设指南（2021）》、《国家智能制造标准体系建设指南（2024 版）（征求意见稿）》的指导思想，指南编制团队设计了机床行业智能化改造和数字化转型系统架构。该实施指南的系统架构包含了智能制造标准体系的基本组成单元，涵盖基础共性、关键技术、业务环节，贯穿了机床的设计、研发、

制造、应用和服务全产品生命周期价值链。其旨在引导机床企业在基础共性技术、关键环节智能化改造、数字化管理和仿真、全域大数据等多个关键领域进行持续的技术升级和创新。

此外，系统架构通过工业互联网的建设和信息化系统的集成应用，助力机床企业积累宝贵的运营管理大数据。构建机床数字化工厂，利用数据分析为管理决策提供支持，进而提升机床行业的核心竞争力。通过规范化金属切削机床的生产流程、标准化生产数据，有效利用信息技术和资源，控制生产节奏，优化原材料采购和供应链管理，减少能源消耗，降低制造成本和时间，从而增强企业在国际市场上的竞争力。

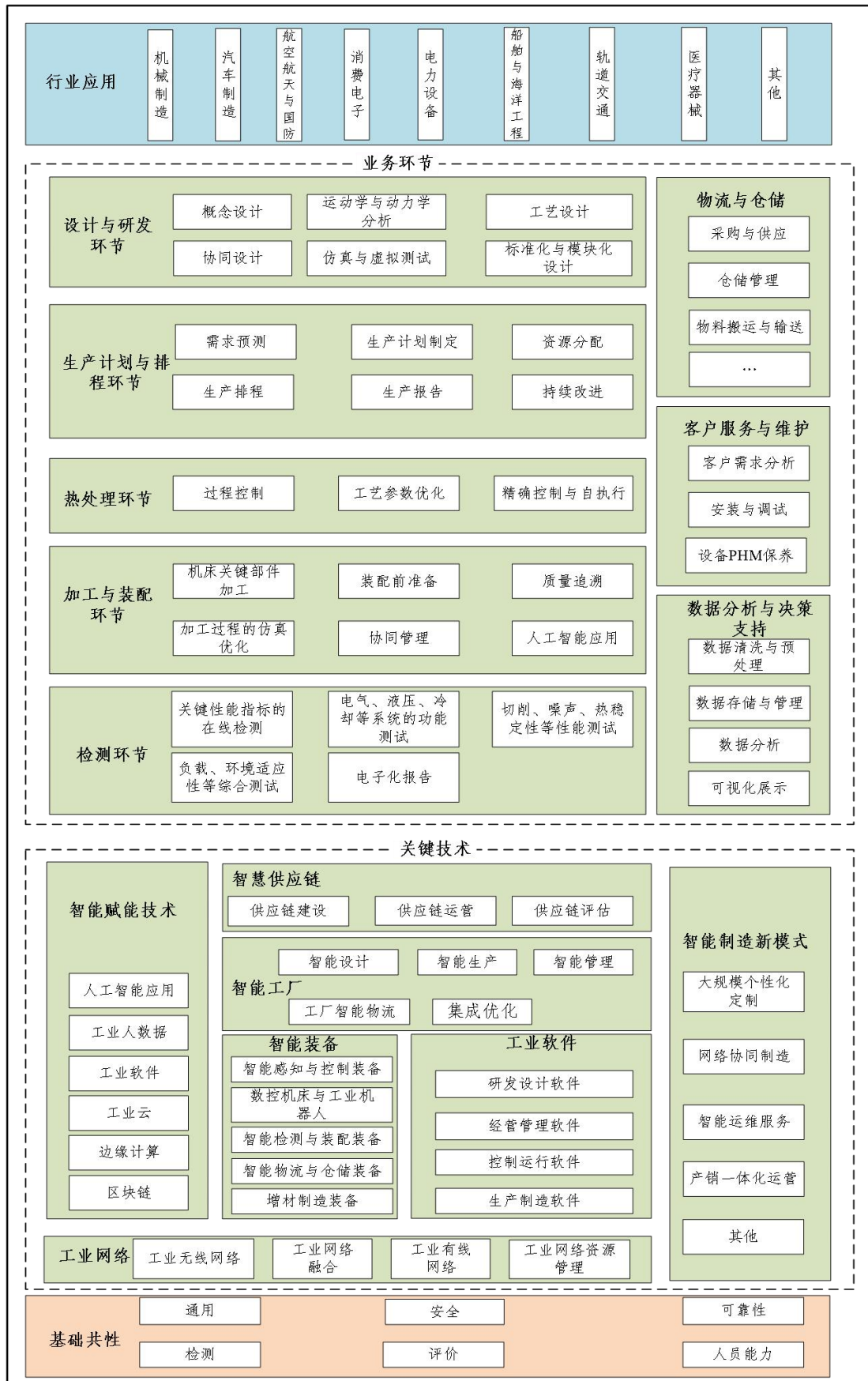


图2 系统架构

三、基础能力

在制造业加速数字化变革的浪潮下，金属切削机床行业的“智改数转网联”转型成为提升竞争力、实现可持续发展的关键路径。其基础能力建设涵盖多个关键领域。网络与标识基础设施为信息流通筑牢根基，保障数据高速、安全传输，实现设备与产品全生命周期管理；数据采集能力建设使设备数据“活”起来，为智能决策提供支撑；信息系统能力建设整合企业资源，优化生产管理流程；工业信息安全能力建设则守护企业数字资产，确保转型平稳推进。而大模型能力建设作为新兴力量，将重塑行业创新模式，解锁更多发展潜能。这些基础能力相互关联、协同发力，共同推动金属切削机床行业迈向智能化、数字化、网络化的新高度。

（一）网络、标识等基础设施能力建设

1.企业内外网建设

宽带网络部署。金属切削机床企业应依据自身规模与业务复杂程度确定宽带网络带宽。对于大型企业，拥有众多部门、大量办公人员及复杂生产管理系统，如ERP、CRM等多系统并行，建议接入千兆甚至万兆光纤网络，确保数据高速稳定传输。通过专业网络测试工具定期检测网络延迟、丢包率等指标，及时发现并解决网络拥堵问题。

现场总线与工业以太网应用。在生产现场，根据机床设备类型与布局选择合适现场总线技术。对于传感器、执行器密集且对成本敏感的区域，可采用 **PROFIBUS** 或 **CAN** 总线连接。例如，在机床主轴温度、压力监测及刀具进给控制等环节，使用 **CAN** 总线将大量传感器与控制器相连，其布线简单、成本低且可靠性高，能实时稳定传输设备运行数据。对于机床设备间高速通信及与上层管理系统的交互，则依托工业以太网。企业需构建工业以太网交换网络，确保网络拓扑结构合理，具备冗余备份链路，防止单点故障。如采用星形拓扑结构，核心交换机与汇聚交换机、接入交换机分层连接，通过链路聚合技术提升网络带宽与可靠性，保障机床设备通信的连续性与数据传输的准确性，实现生产过程精准控制与协同作业。

新技术应用推进。大型厂区或对网络稳定性要求极高的企业应积极引入工业无源光纤网络（**PON**）。如在占地面积广阔的机床制造园区，**PON** 网络可利用其高带宽、长距离传输和强抗干扰能力，为分布于不同车间、仓库的机床设备提供可靠连接。从核心机房铺设光纤至各区域分光器，再通过分光器连接至机床设备，实现高效数据传输。对于车间内移动设备及不便布线区域，部署工业 **WiFi** 网络。合理规划 **AP**（无线接入点）位置与信道，通过无线信号强度测试工具优化覆盖范围与信号质量，确保设备在移动过

程中网络连接稳定。同时，密切关注 5G 网络在工业领域的应用发展，在对实时性要求极高的场景，如远程高精度机床操作与实时故障诊断，与通信运营商合作试点 5G 专网建设。利用 5G 低延迟、高可靠性和大规模连接优势，实现设备远程控制指令的毫秒级响应，提升生产效率与管理效能。

2.标识解析体系建设与应用

加快推动工业互联网标识解析二级节点（机床行业）建设，进一步整合省内机床企业资源。企业在接入二级节点时，需依据统一编码规则为机床、零部件及产品生成唯一标识。利用条码、二维码、RFID 等技术为设备与产品赋予标识载体。在机床生产环节，将 RFID 标签嵌入机床关键部件，记录部件生产批次、工艺参数、供应商等信息；在产品包装上印制二维码，便于物流配送与销售环节的信息追溯。通过标识解析系统，企业可实现机床设备远程全生命周期管理。在设备运行过程中，远程监控系统借助标识解析获取设备实时运行数据，如通过解析机床标识查询其历史维修记录、运行时长、关键部件更换情况等，为设备维护保养与性能优化提供数据支撑。在产品质量追溯方面，当市场反馈产品质量问题时，企业依据产品标识快速回溯生产、检测、物流等全流程数据，精准定位问题根源，提升产品质量管控水平，增强市场信誉度与客户满意度，促进产业链上下游协同发展。

（二）数据采集能力建设

1. “哑设备”改造

企业需全面梳理内部老旧或“哑设备”清单，根据设备类型、运行工况与数据采集需求确定传感器选型与安装方案。对于机床主轴，安装高精度温度传感器与振动传感器，监测运行温度与振动频率，预防过热与机械故障；在电机部位安装电流、电压传感器，监控电机运行状态。传感器安装位置应经过严格测试与优化，确保采集数据准确可靠。如通过有限元分析与实际运行测试，确定主轴温度传感器安装在轴承附近散热关键区域，能精确反映主轴温度变化。采用无线或有线传输方式将传感器数据接入企业数据采集系统，对于有线传输，合理规划布线路径，避免干扰生产作业；无线传输则需保障信号稳定，设置可靠加密通信协议，防止数据传输过程中泄露与篡改。改造完成后，利用模拟故障测试与实际运行监测相结合的方式验证数据采集效果，确保“哑设备”成功转化为智能设备，为生产过程监控与设备维护提供有效数据支持。

2. 智能设备联网

可编程逻辑控制器（PLC）应用。企业在机床设备控制中充分发挥 PLC 功能，依据机床控制工艺要求编写精确控制程序，实现对坐标轴位置、主轴转速、刀具进给量等参数的精准控制与实时采集。在网络通信方面，将 PLC 接

入工业以太网或现场总线网络，配置正确的 IP 地址、子网掩码与通信协议参数，确保与上位机管理系统稳定通信。如在某机床生产线上，PLC 通过工业以太网将采集数据以 Modbus TCP 协议传输至车间管理系统，系统实时分析处理数据，实现生产过程可视化监控与远程控制指令下发，提升生产自动化与智能化水平。

工控机运用。根据机床加工复杂程度与数据处理需求选型工控机，确保其具备足够的运算能力与丰富接口。在软件配置上，安装专业工业软件，如机床加工质量检测与分析软件、生产过程模拟软件等。工控机通过以太网、USB、串口等接口连接机床设备、传感器与其他辅助设备，采集多源数据并进行实时处理分析。例如，在高精度零部件加工过程中，工控机利用采集的机床运行数据与加工尺寸测量数据，通过内置算法进行加工质量在线评估与补偿控制，及时调整刀具路径与加工参数，保障产品加工精度符合标准，有效降低废品率，提高生产效率与产品质量稳定性。

采集模块实施。针对机床设备各类传感器与复杂接口，企业选用适配的采集模块。采集模块需支持多种信号类型转换，如将模拟温度、压力信号转换为数字信号，将不同品牌、型号传感器的通信协议转换为统一标准协议（如 OPC UA）。在安装与配置过程中，严格按照设备电气规范操作，设置正确的信号采集范围、采样频率与数据传输参

数。如在振动信号采集场景，采集模块将机床振动传感器输出的微弱模拟信号放大、滤波后转换为数字信号，通过以太网传输至数据处理中心，利用故障诊断软件分析振动频谱特征，提前预警设备潜在故障，为设备预防性维护提供依据，降低设备突发故障停机时间与维修成本。

（三）信息系统能力建设

1. 信息化生产管理系统建设与应用

企业资源规划管理系统（ERP）实施。江苏省金属切削机床企业在 ERP 系统选型时，结合自身业务流程特点与管理需求，选择功能模块完备、行业适配性强的产品。在实施过程中，全面梳理企业财务管理、供应链管理、人力资源管理等业务流程，进行标准化与优化。如在生产计划模块，依据销售订单与市场预测，利用 ERP 系统的物料需求计划（MRP）功能，精确计算原材料、零部件需求数量与时间，结合库存信息生成采购计划，优化采购流程，降低库存积压与资金占用。通过系统集成企业财务模块，实现成本核算自动化，实时监控生产成本变动，为企业成本控制与定价决策提供准确数据支持，提升企业整体运营管理效率与经济效益。

制造执行系统（MES）部署。MES 系统实施紧密围绕机床生产过程精细化管理需求展开。企业通过在生产现场设备（如机床、自动化生产线等）上安装数据采集终端，

实时采集设备运行状态、生产进度、质量检测数据等关键信息，并上传至 MES 系统。MES 系统利用这些数据构建生产过程数字模型，实现生产订单实时跟踪与智能调度。

分布式控制系统（DCS）应用（针对流程型企业）。
流程型金属切削加工企业在 DCS 系统建设中，依据生产工艺对温度、压力、流量等物理量的控制要求，设计合理的控制策略与回路。在系统架构上，采用分散控制、集中管理模式，将控制单元分布于生产现场各设备附近，通过高速通信网络连接至中央控制室操作站。例如在金属热处理加工流程中，DCS 系统利用温度传感器采集炉内温度数据，经控制器运算后精准控制加热功率与时间，确保热处理工艺参数稳定。同时，DCS 系统具备完善报警与联锁功能，当工艺参数异常时及时发出警报并采取安全保护措施，保障生产过程安全稳定运行，提高生产自动化水平与产品一致性。

2.云化工业软件和工业互联网平台应用

机床企业应积极探索云化工业软件应用，根据产品研发、生产管理、设备维护等业务需求，选择合适的云服务提供商与软件应用。在产品研发设计环节，通过租用云化 CAD、CAE 等软件，企业无需购置昂贵硬件设备与软件授权，降低信息化建设成本。利用云平台强大计算资源，快速完成复杂产品设计与仿真分析，缩短产品研发周期。

在工业互联网平台应用方面，企业接入平台后，充分利用平台提供的丰富工业应用与服务生态。通过平台接入设备管理应用，实现机床设备远程监控、故障预警与智能维护；利用数据分析服务挖掘生产数据价值，如分析机床加工工艺参数与产品质量关系，优化加工工艺。对于中小企业，借助平台标准化解决方案与服务，快速提升信息化水平。

（四）工业信息安全能力建设

1.设备安全保障

企业应建立完善的设备维护巡检制度，制定详细的设备巡检清单与维护计划，定期对机床设备硬件进行全面检查，包括电气系统、机械部件、控制系统等。对于关键设备，实施冗余设计。如在机床控制系统电源供应上采用双电源备份系统，当主电源故障时自动切换至备用电源，确保设备持续运行；在关键控制部件，如主轴驱动控制器、PLC 冗余模块配置，提高设备容错能力。在设备物理访问控制方面，安装先进门禁系统，采用刷卡、指纹识别、面部识别等多因素认证方式，限制非授权人员进入设备操作区域；在设备周边设置高清监控摄像头，实现 24 小时监控，记录设备运行与人员操作情况，防止设备遭受非法物理访问与破坏，保障设备硬件安全稳定运行。

2.控制安全强化

选用具备高安全等级的工业控制系统，如符合 IEC 62443 等国际安全标准的产品。定期利用专业安全漏洞扫描工具对控制系统软件进行检测，及时发现并下载安装官方安全补丁修复漏洞。在控制指令传输过程中，采用 SSL/TLS 等加密协议对指令进行加密处理，防止指令在网络传输过程中被窃取、篡改。结合数字证书技术，为授权用户与设备颁发数字证书，在远程控制机床设备时，通过证书验证确保控制指令发送方身份合法有效，只有经认证授权用户才能向机床设备发送控制指令，保障机床设备控制系统安全，防止非法入侵与恶意攻击导致设备失控。

3.网络安全防护

企业在网络边界部署防火墙、入侵检测系统（IDS）、入侵防御系统（IPS）等安全设备，合理配置安全策略。防火墙依据企业内外网访问规则，阻止外部非法 IP 地址访问企业内部网络资源，同时限制内部网络敏感区域访问权限；IDS 实时监测网络流量，利用特征库与行为分析技术检测入侵行为，IPS 则在检测到攻击时主动采取阻断措施。在企业内外网通信中，广泛应用虚拟专用网络（VPN）技术，配置 VPN 网关设备，建立安全隧道，对传输数据进行加密，确保数据在公共网络传输过程中的保密性与完整性。对于车间无线网络，设置高强度 WPA3 加密密码，定期更新密

码，隐藏无线网络 SSID，防止无线网络被非法破解与接入，保障企业网络数据传输安全。

4.平台安全提升

工业互联网平台运营方建立严格用户认证授权体系，采用多因素身份认证方式，如密码、短信验证码、动态令牌等组合认证，确保用户身份真实性。依据用户角色、组织架构与业务需求，精细划分平台资源访问权限，如管理员拥有系统配置与用户管理权限，企业普通用户仅能访问自身设备数据与应用服务。在数据存储方面，运用 AES、RSA 等加密算法对平台存储的企业关键数据进行加密处理，防止数据泄露风险。平台构建强大抗攻击架构，采用 DDoS 流量清洗服务、Web 应用防火墙等技术手段，实时监测与抵御分布式拒绝服务攻击（DDoS）、SQL 注入攻击、XSS 攻击等网络威胁，保障平台稳定可靠运行，为企业数字化转型提供安全支撑。

5.应用安全加固

企业在应用系统开发过程中，遵循安全编程规范，如输入数据验证、输出数据过滤、避免硬编码密码等原则。定期聘请专业安全机构对应用系统代码进行安全审计，利用静态代码分析工具与人工审查相结合的方式，查找并修复潜在安全漏洞，如缓冲区溢出漏洞、权限提升漏洞等。在应用系统登录界面，采用复杂验证码机制防止暴力破解

登录，同时推行多因素认证，如结合用户密码与手机令牌登录，增强用户账号安全性。定期对应用系统进行安全评估，依据最新安全威胁情报与行业安全标准升级系统，更新安全补丁，确保应用系统能够抵御不断变化的网络攻击与安全风险，保障企业业务正常开展。

（五）大模型能力建设

1.数据管理与整合能力

金属切削机床企业需构建全方位的数据采集体系，覆盖产品全生命周期。在设计研发阶段，收集设计图纸、仿真数据、材料特性等信息，为优化设计提供依据。生产制造过程中，借助传感器网络实时采集机床运行状态数据，如温度、振动、功率、加工精度等，以及生产流程数据，包括工序执行时间、物料流转信息等，以监控生产过程。对于市场销售环节，收集客户需求、产品反馈等数据，以便企业更好地了解市场需求。

针对采集到的海量多源异构数据，企业要建立高效的数据清洗机制。运用数据清洗算法，去除重复、错误、缺失的数据，确保数据的准确性与完整性。同时，采用数据标注工具，结合人工标注与半监督学习技术，对机床故障数据、加工工艺数据等进行标注，为大模型训练提供高质量的数据样本。此外，利用数据集成技术，整合不同系统、不同格式的数据，构建统一的数据标准，为后续数据挖掘

与大模型应用奠定基础。

2.大模型选型与适配能力

企业应依据自身业务需求与技术实力，科学选择合适的大模型。对于专注于机床故障诊断与预测性维护的企业，可选择在工业设备故障诊断领域具有成熟应用经验的大模型，如基于深度学习的故障诊断大模型。在选择过程中，充分评估模型的性能指标，包括准确率、召回率、F1 值等，同时考虑模型的可解释性，以便技术人员理解模型的决策逻辑，更好地应用于实际生产。

为使大模型与企业业务深度适配，需进行模型微调与优化。利用企业自身积累的特定领域数据，对预训练大模型进行微调，使其能够准确识别和处理金属切削机床行业的特有数据模式与问题。例如，针对某类特定型号机床的故障特征，对通用故障诊断大模型进行微调，提高模型对该型号机床故障诊断的准确性。此外，通过调整模型参数、优化模型结构等方式，进一步提升模型在企业实际业务场景中的运行效率与性能表现。

3.应用场景开发能力

在产品设计与研发场景中，大模型可用于创新设计辅助。通过对大量历史设计数据与市场需求数据的学习，大模型能够为设计师提供创意灵感与设计方案建议。例如，根据客户对机床加工精度、效率、功能等方面的需求，大

模型生成多种概念设计方案，并通过仿真分析对方案进行初步评估，帮助设计师快速筛选出可行性较高的设计方向，缩短产品研发周期。

在生产制造过程中，大模型可应用于加工工艺优化。基于实时采集的机床运行数据与加工工艺数据，大模型利用强化学习算法，动态调整加工参数，如切削速度、进给量、切削深度等，以实现加工效率与产品质量的最优平衡。同时，通过对生产过程数据的实时分析，大模型能够提前预测潜在的生产故障与质量问题，及时发出预警并提供解决方案，保障生产过程的连续性与稳定性。

在售后服务场景中，大模型助力远程故障诊断与智能运维。通过对机床远程监控数据的分析，大模型能够快速准确地诊断故障原因，并提供详细的维修建议。同时，利用大模型预测机床部件的剩余使用寿命，提前安排维护计划，降低设备停机风险，提高客户满意度。

4.人才与技术协作能力

企业要培养和引进既懂金属切削机床专业知识，又具备人工智能、大模型技术能力的复合型人才。通过内部培训课程，提升现有技术人员对大模型原理、应用开发流程的理解与掌握程度。同时，积极从高校、科研机构引进相关专业人才，充实企业的技术研发团队。

加强与外部科研机构、高校的技术协作，建立产学研

合作机制。与高校联合开展大模型在金属切削机床行业应用的前沿研究项目，共同攻克技术难题。例如，与科研机构合作研发适用于机床复杂工况的新型大模型算法，提高模型的适应性与性能。此外，参与行业技术交流活动，分享企业在大模型应用方面的实践经验，学习借鉴其他企业的先进技术与应用案例，不断提升企业在大模型技术领域的竞争力。

5.安全与隐私保护能力

在大模型应用过程中，企业要高度重视数据安全与隐私保护。建立严格的数据访问权限管理机制，根据员工的岗位职责与业务需求，合理分配数据访问权限，确保敏感数据仅被授权人员访问。采用数据加密技术，对传输与存储过程中的数据进行加密处理，防止数据被窃取或篡改。

对于大模型本身，要加强模型安全防护。定期对模型进行安全审计，检测模型是否存在安全漏洞与恶意攻击风险。利用模型水印技术，防止模型被非法复制与盗用。同时，制定完善的数据安全与隐私保护应急预案，在发生数据泄露等安全事件时，能够迅速采取措施进行应对，降低损失与影响。

四、环节与场景

金属切削机床行业生产运营呈现小批量、多品种、离散型特征，制造环节多工序、长流程，设计侧重精密与工艺优化，生产制造和运行管理至关重要。智能化改造与数字化转型核心在于构建数字化架构与应用智能装备。

企业需依自身状况和目标制定顶层规划，分阶段推进建设。参照《智能制造典型场景参考指引（2024年版）》（工信厅联通装函〔2024〕361号）、《智能制造系统架构》（GB/T 40647-2021）、《智能制造能力成熟度模型》（GB/T 39116-2020）等国标，制定3年近期、5年中期、10年远景规划，明确各阶段实施方向与内容，涵盖车间仿真、数字化设计等多方面，并规划建设计划与投资。突破关键技术与工艺瓶颈，确定任务各层面规划及实施路径。

指南针对行业15个关键环节、40个典型场景分类论述，结合行业特点及专家评审指导意见，确定产品设计、工艺设计、质量管控、计划调度、生产作业、仓储物流、设备管理、安全管控、环保管理、供应链管理等11个环节为本行业核心环节；产品数字化研发设计、虚拟验证与中试、工艺数字化设计、可制造性设计、质量追溯与分析改进、产品智能运维、生产计划优化、工艺动态优化、先进过程控制、智能仓储、精准配送、设备智能运维、安全一体化

管控、危险作业自动化、污染在线管控、供应链计划协同优化等 17 个场景为本行业核心场景。

金属切削机床行业智能化改造数字化转型的环节及场景具体包括：

（一）工厂建设环节

1.存在问题

建筑信息模型（BIM）是工厂数字化设计与交付的核心技术之一，但在金属切削机床行业中，BIM 技术的普及度仍然较低。许多机床企业仍依赖传统的 CAD 图纸进行工厂规划和设计，导致设计效率低下，且难以实现信息的共享和协同；当前市场上的工厂数字化设计与交付平台往往功能单一，无法满足金属切削机床行业的多元化需求。企业在进行工厂设计时，需要频繁切换不同的软件和工具，导致设计效率低下，且难以实现信息的集成和共享；许多工厂数字化设计与交付平台界面复杂、操作繁琐，对于非专业技术人员来说使用难度较大；部分企业对数字孪生技术的概念、原理及应用价值认知不足，缺乏将其应用于工厂建设和运营优化的积极性和主动性；当前市场上的工厂数字化设计与交付平台往往功能单一，无法满足金属切削机床行业的多元化需求。企业在进行工厂设计时，需要频繁切换不同的软件和工具，导致设计效率低下，难以实现信息的集成和共享；数字孪生工厂的建设涉及多个系统的集

成，包括设备管理系统、生产管理系统、物流系统等。然而，由于各系统之间的数据格式、通信协议等存在差异，系统集成难度较大，难以实现物理世界和虚拟空间的实时映射和交互。

2.可改造场景

场景 1：工厂数字化设计与交付场景

针对机床设计、布局及生产流程中的痛点，可搭建专门的数字化设计与交付平台。该平台应用建筑信息模型（BIM）技术，对机床的三维结构进行精细化建模，实现设计方案的直观展示和优化调整。同时，利用物流和动线仿真技术，模拟机床在产线中的物流路径，优化物料搬运流程，减少生产中的瓶颈和浪费。

通过生产系统建模技术，对机床的加工过程进行数字化模拟，分析生产效率、能耗等关键指标，为机床的选型和配置提供科学依据。上述技术的综合应用，不仅缩短了机床的设计和建设周期，还提高了工厂布局的合理性和生产效率，实现了金属切削机床的数字化、网络化和智能化改造。

场景 2：数字孪生工厂运营优化场景

通过建模仿真技术，为金属切削机床构建高精度的数字孪生模型，实现机床物理状态与虚拟空间的实时映射。异构模型融合技术则确保了机床模型与其他设备、产线、

车间模型的无缝集成，打破了信息孤岛，实现了工厂运营数据的全面集成和管控。

数字孪生系统能够实时监测机床的运行状态，预测故障发生，提前进行维护，减少停机时间。同时，通过对机床加工过程的虚拟仿真，优化加工参数，提高加工效率和质量。这种实时的数据交互和分析，为工厂运营提供了科学依据，实现了运营持续优化，提升了金属切削机床在工厂中的整体效能。

3. 解决方案建议

解决方案 1：工厂数字化设计与交付

某企业基于 BIM 技术，提升设计效率与协同能力。首先加强企业内部 BIM 技术培训与普及，即组织定期的 BIM 技术培训课程，邀请行业专家分享 BIM 在工厂设计中的应用案例和最佳实践，提高企业员工对 BIM 技术的认识和掌握程度；建立 BIM 技术交流平台，鼓励企业间的经验分享与合作，促进 BIM 技术在金属切削机床行业的广泛应用。

联合行业协会和龙头企业，共同制定金属切削机床行业 BIM 技术标准与规范，确保 BIM 模型的一致性和可互操作性。推动 BIM 模型与现有 CAD 图纸的无缝对接，实现传统设计数据向 BIM 模型的平滑过渡。

将 BIM 与 ERP/MES 系统集成，通过 API 接口或中间件技术，实现 BIM 模型与企业现有的 ERP（企业资源计划）

和 MES（制造执行系统）系统的集成，确保设计数据与生产数据的实时同步和共享。

构建多功能集成的工厂数字化设计与交付平台。设计平台时采用模块化架构，将工厂规划、工艺布局、产线设计、物流规划等功能模块化为独立的服务组件，企业可以根据实际需求灵活选择和组合。平台应具备良好的可扩展性，支持未来新增功能的快速集成和部署，以满足金属切削机床行业不断变化的需求。

考虑到数据集成与共享机制，建立统一的数据标准和格式，确保平台内各模块之间的数据能够无缝交换和共享。引入数据治理机制，对平台内的数据进行清洗、整合和标准化处理，提高数据的质量和可用性。

面向流程自动化与智能化，利用 workflow 引擎和人工智能技术，实现工厂设计流程的自动化和智能化管理。例如，自动检查设计方案的合理性、优化设备布局和物流路径等。

优化用户界面，提高平台易用性。采用扁平化设计风格和直观的图标布局，减少用户的学习成本。提供详细的操作指南和在线帮助文档，方便用户在使用过程中随时查阅；允许用户根据自己的使用习惯和工作需求，对平台界面进行个性化定制和配置。提供丰富的界面主题和配色方

案，满足不同用户的视觉偏好；集成交互式学习模块，通过模拟操作、案例分析等方式，帮助用户快速掌握平台的使用技巧和功能。

解决方案 2：数字孪生工厂运营优化

提升数字孪生技术认知与培训。如组织行业专家、学者及成功案例分享会，向金属切削机床行业的企业管理层和技术人员普及数字孪生技术的概念、原理、应用价值，增强其对技术的理解和认同；构建数字孪生技术的体验中心或演示平台，通过直观的展示和互动体验，让企业直观地感受到数字孪生在提升生产效率、降低运营成本、优化产品设计等方面的实际效果。

构建多功能集成的数字化设计与交付平台。面向平台整合与升级，推动现有数字化设计与交付平台的整合与升级，增加对金属切削机床行业特定需求的支持，如刀具路径优化、工艺仿真、设备布局规划等功能，减少切换不同软件的需求。

开展模块化与可扩展性设计，平台应采用模块化设计，允许根据实际需求选择并添加所需的功能模块，同时保持平台的可扩展性，以便未来能够轻松集成新的技术和功能，采用云原生和微服务架构构建平台，提高系统的灵活性、可扩展性和可维护性，支持远程协作和移动办公，适

应现代制造业的发展趋势。

促进系统集成与数据交互。建立统一数据标准与接口规范，推动行业内外合作，制定统一的数据标准和接口规范，确保不同系统之间的数据能够无缝对接和交换，降低系统集成难度；开发专用的中间件和 API 服务，作为不同系统之间的桥梁，实现数据的实时传输和转换，同时提供数据清洗、格式转换等功能，确保数据的准确性和一致性；应用异构模型融合技术，将来自不同系统、不同格式的模型进行统一管理和融合，形成完整的数字孪生模型，支持跨系统的协同仿真和优化。

此外，利用云平台强大的数据处理能力和物联网技术，实现设备、产线、车间乃至整个工厂的实时监控和数据采集，为数字孪生提供丰富的数据源，支持物理世界与虚拟空间的实时映射和交互。

（二）产品设计环节

1.存在问题

机床的变形、应力等关键性能指标在产品设计阶段未能得到量化体现，影响了机床的整体性能和稳定性；现有设计流程繁琐，导致实现最优设计方案的时间较长；设计迭代速度慢，难以满足快速变化的市场需求和工况要求；机床制造工艺复杂，传统工艺设计高度依赖经验，难以快

速适应新产品的开发需求；切削过程中一些潜在的工艺问题和风险难以在设计阶段被发现和解决。

2.可改造场景

场景 1：产品数字化研发设计场景

积极探索数字化设计仿真工具，引入先进的 CAD（计算机辅助设计）软件，用于机床的结构设计和装配模拟，提高设计效率和准确性。应用 CAE（计算机辅助工程）工具进行性能仿真分析，如应力分析、热分析、动态特性分析等，以预测机床在实际工作中的表现。使用 CFD（计算流体动力学）软件模拟切削液的流动和冷却效果，优化切削过程中的热管理。

多学科联合建模，集成机械、电气、控制、液压等多学科的知识和技术，进行联合建模和仿真，确保机床各系统的协调性和整体性能。应用多学科优化算法，在设计阶段就考虑各系统之间的相互影响，找到最优的设计方案。

场景 2：虚拟实验与中试场景

多物理场仿真技术能够模拟金属切削机床在加工过程中涉及的多个物理场，如力场、热场、变形场等，从而全面预测机床的性能和行为。通过多物理场仿真，可以在虚拟环境中对机床的切削过程、装配过程、运动学特性等进行模拟，提前发现潜在的问题和风险，减少实际试制和调试的时间和成本。

可靠性分析技术用于评估金属切削机床在规定条件和时间内完成规定功能的能力。通过可靠性分析，可以预测机床的故障模式和故障率，为优化设计和改进工艺提供指导。

虚实融合的试验验证环境结合了虚拟实验和物理实验的优点，能够在虚拟环境中进行大部分试验验证工作，同时保留必要的物理实验进行验证和校准。通过虚实融合的试验验证环境，可以在虚拟环境中对机床的性能进行初步验证，然后在物理实验中进行进一步的校准和优化。

3. 解决方案建议

解决方案 1：产品数字化研发设计

为实现对机床性能的准确评估，快速有效地进行机床结构设计，利用高级计算机辅助设计软件建立机床虚拟样机模型，将机床三维模型导入有限元分析软件中，利用 ANSYS 有限元软件对机床产品的静态、动态以及热态性能进行分析，并借助优化算法进行结构优化，建立系列化的性能控制指标并进行性能校核。

某企业首先建立高精度的机床三维参数化有限元模型，真实模拟机床各主要部件的物理属性、边界条件、部件之间的连接、工作载荷等。

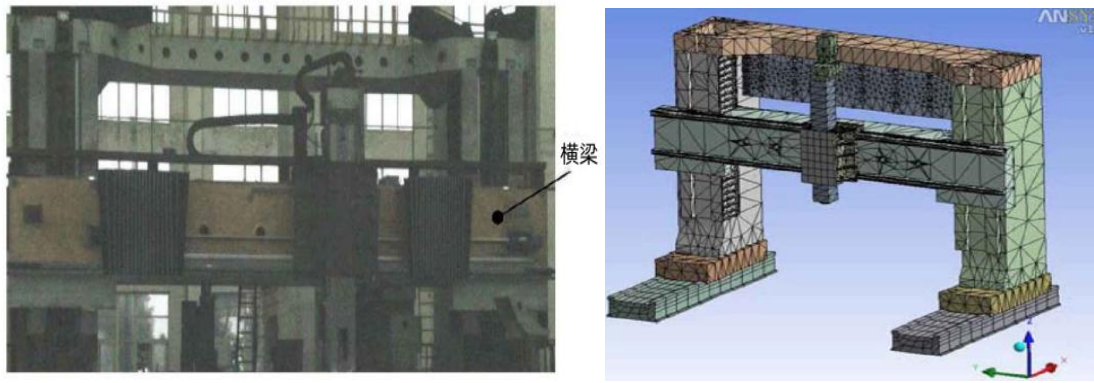


图 3 机床结构数字化仿真设计

对机床静态和动态工作状态下的变形和应力分布进行有限元分析，包括装配、切削、快移等工况，识别影响刚度的关键因素，分析数据，为结构优化提供依据。

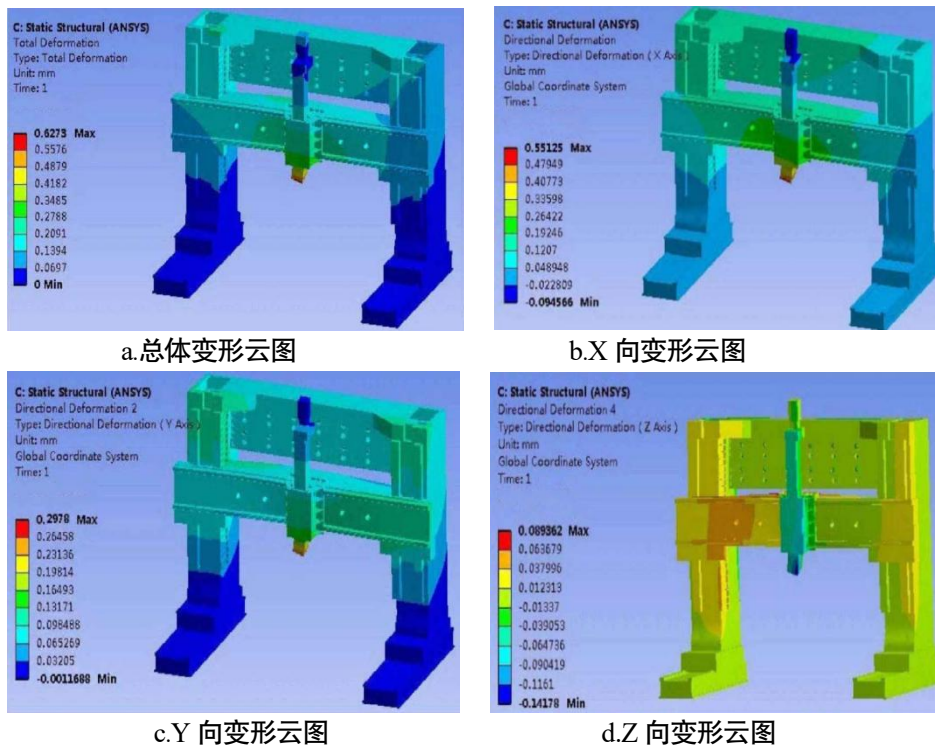


图 4 机床横梁主体结构仿真分析

借助有限元分析软件的拓扑优化与参数优化等优化算法，快速实现结构最优化设计，流程包括：建立关键工况分析模型—建立拓扑优化分析工况—构造评价指标—明确

优化约束条件—拓扑优化—参数优化—性能校验—迭代优化。在龙门加工中心结构设计中，综合考虑结构的静态与动态变形与应力，构造评价结构综合性能的加权性能参数，实现大件结构的刚度与精度的数字化设计。通过优化设计，该企业设计的龙门加工中心的大件结构刚重比提高15%以上，显著降低成本，提高了机床性能。

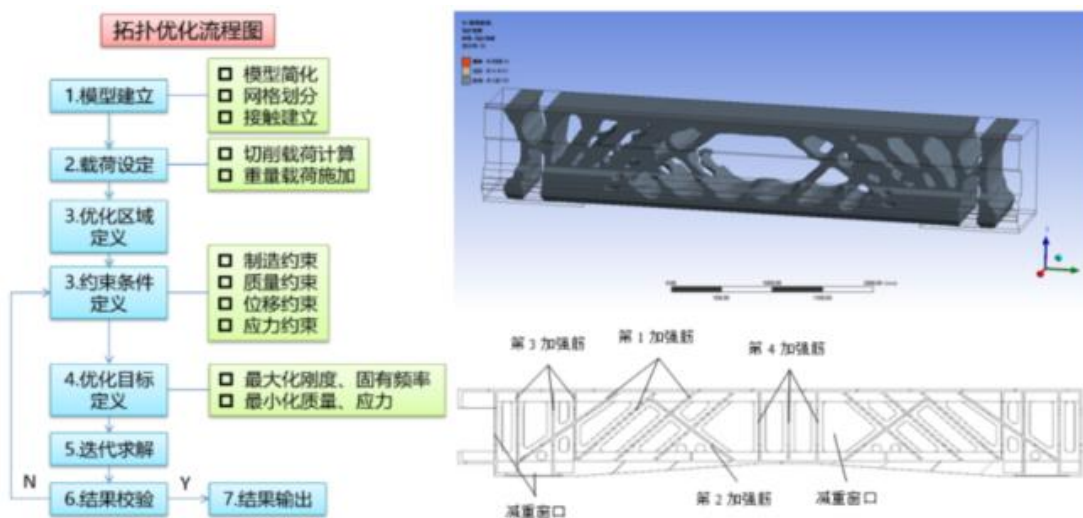


图 5 机床结构拓扑优化示意图

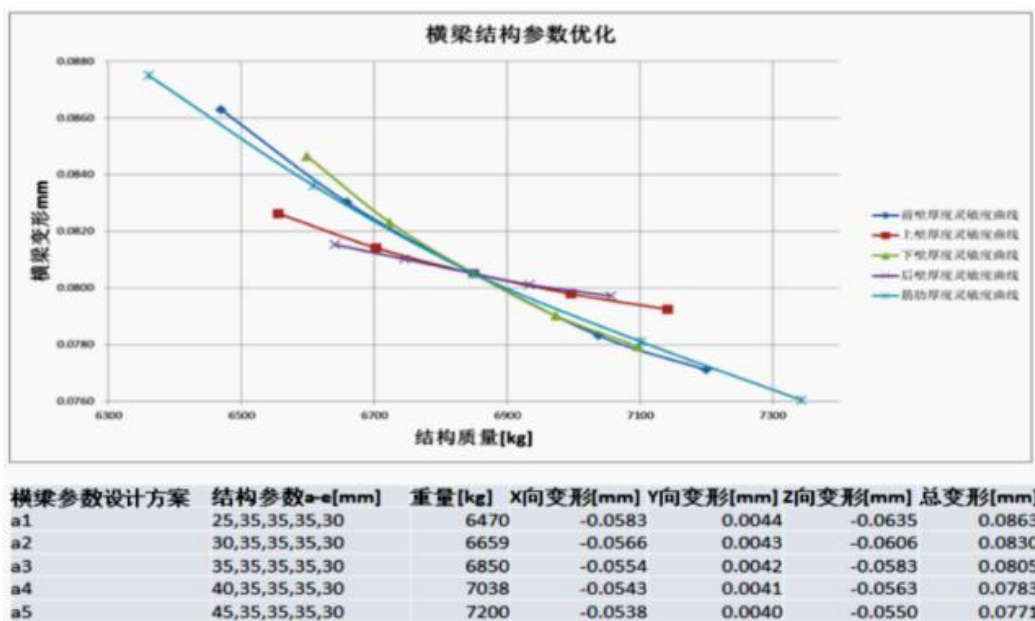


图 6 机床结构参数优化示意图

解决方案 2：虚拟实验与中试

数控机床数字孪生智能场景感知方法：包括数据的预处理、特征提取、特征选择等算法，以及场景感知数据和特征的存储方法。为了实现机床场景感知的智能化存储与识别，研究基于卷积神经网络（CNN）场景数据特征自动识别。基于 Hadoop 的存储、分析和运算平台以及基于 MapReduce 算法的数据预处理、特征提取、特征选择后，场景感知部分将海量、时变复杂的机床场景数据分析挖掘，得到一系列的特征及特征的重要性排序，然后提供给数字孪生模型和数字孪生数据驱动算法。

基于机床数字孪生模型的构建。研究数控机床数字孪生中多领域模型如机械模型、电气模型、液压模型等的构建和耦合方法；采用深度学习方法构建机床各部件的数字孪生模型。例如，在机床数字孪生几何模型建模方面，通过建立面向真实感、高保真的机床可视化模型，保证数字孪生模型与物理机床从几何尺寸、材质属性、颜色、形状等保持高度一致具有视觉上的“孪生”，同时也能真实反映物理机床的装配关系、原点、从属关系等，具有结构上的“孪生”。本项目主要从图形渲染场景搭建、机床三维模型绘制和部件运动关系构建三方面进行数控机床建模。一方面为了提高计算机图形处理和仿真的效率，在建模时需要三

维模型进行轻量化处理，保留关键部件，如机床外壳、机床床身、各个运动轴、刀具、工件等，简化与仿真无关的部件，如刀具库、照明系统、数控面板、液压装置排屑系统、冷却系统等；另一方面，为全面描述物理机床属性参数，输入机床结构类型、数控系统、坐标零点、各轴运动行程等参数，并将上述参数绑定到机床对应拓扑结构和三维模型上。之后，将上述模型和参数信息存入数据库。

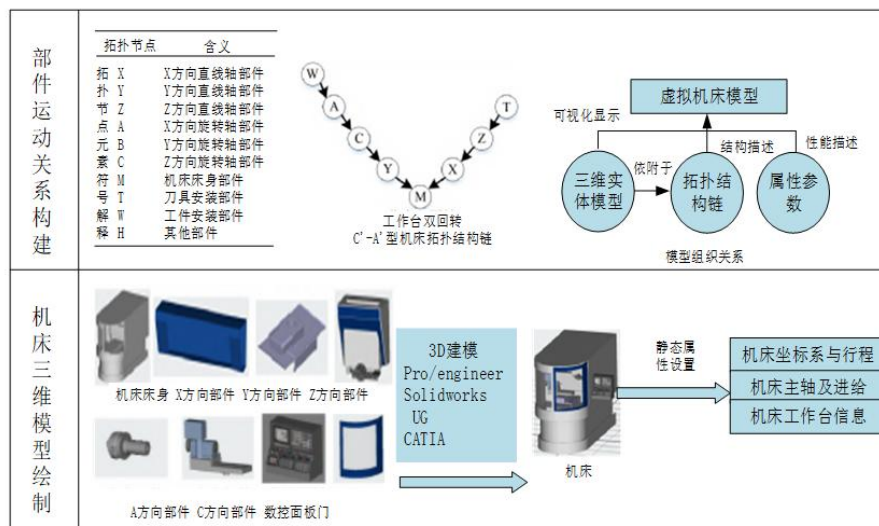


图 7 机床几何模型建模过程

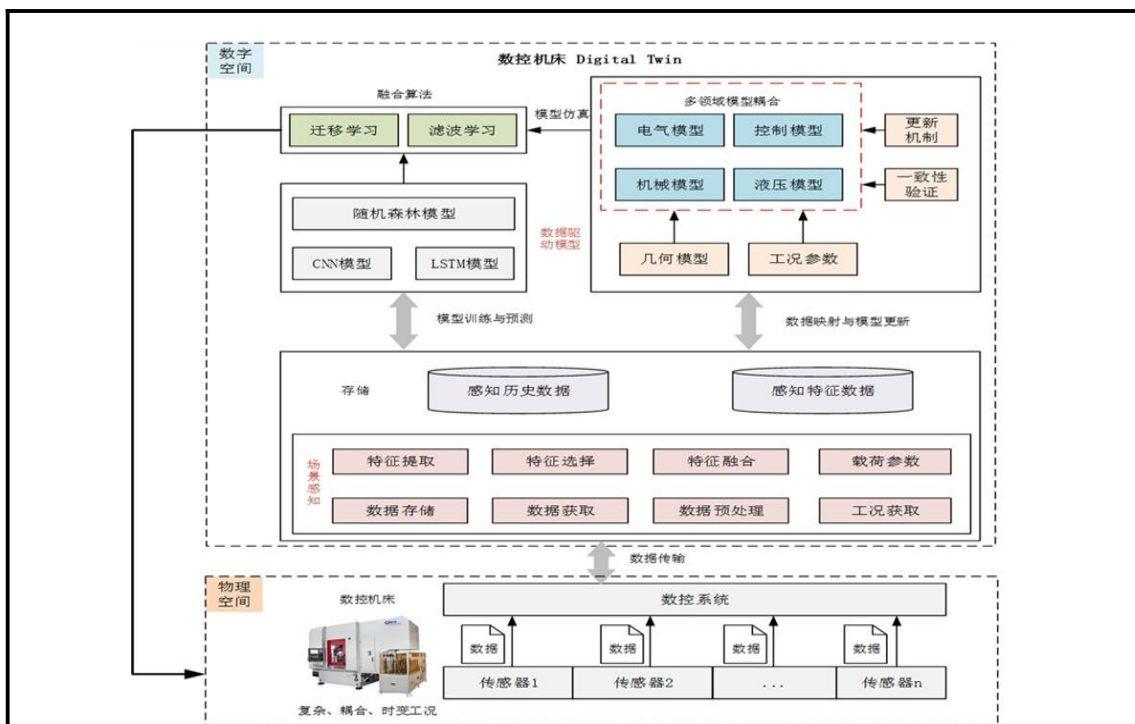


图 8 基于机床数字孪生虚实验证仿真平台搭建

实验与调试根据实时采集数据。验证数字孪生模型的一致性和准确性、可靠性。机床运行过程中，依据工况参数设定机床数字孪生模型的材料参数和工况参数并保持一致，然后进行模型的多领域集成仿真。通过采集的实验数据与数字孪生仿真结果数据的对比，可以确定所建立的数字孪生模型的精度是否符合要求。根据具体应用场景设定具体的误差阈值（如 5%），基于工况提取算法，按机床工况载荷的不同领域分为：机械工况、电气工况、控制工况、液压工况、热力学工况等。然后将机床的工况模型通过虚实映射服务器和客户端进行通信，实现数字孪生模型中多领域工况的实时更新。模型更新结果反馈给工况分析人员，实现工况提取算法的优化。

利用数控机床的工况条件映射进行多物理场仿真，计算出机床系统内部状态，作为虚拟传感信号。将数字孪生物理退化模型转化为系统状态空间模型，利用仿真得到的系统内部值进行理论分析，计算系统状态。然后采用融合算法模型驱动和数据驱动结果进行结合，利用数据驱动得到的观测结果来修正模型仿真结果，获得更加精准的预测结果。为了防止仿真结果和实际相差很大，需要通过传感数据的分析挖掘和预测的引入来进行模型驱动结果的反馈和修正。通过融合方法，将数据驱动的 RUL 预测作为系统的观测值，对模型驱动的理论经验推导的结果进行修正。

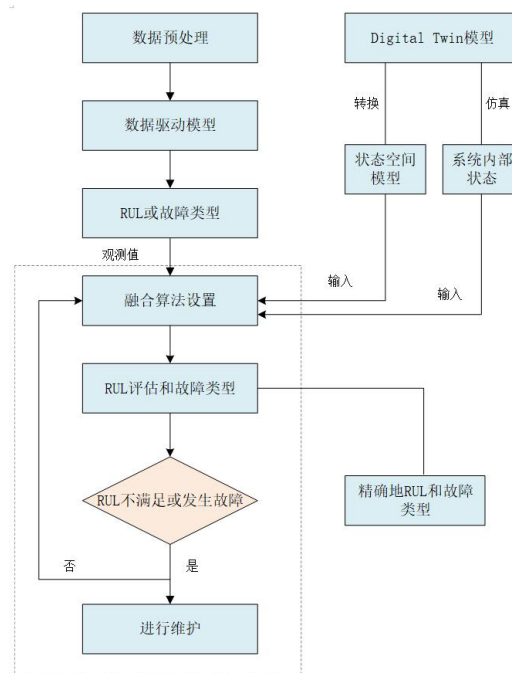


图 9 基于数字孪生机床模型和数据融合算法调试

(三) 工艺设计环节

1. 存在问题

机床制造工艺复杂，传统工艺设计依赖经验，难以快速适应新产品；切削过程中一些潜在的工艺问题和风险难以发现。部分企业未能充分考虑自身的制造能力，导致设计出的产品在实际制造过程中难以实现或成本过高；部分企业在工艺设计完成后，缺乏对产品和工艺设计的可加工性、可装配性和可维护性进行全面评估的机制。

2. 可改造场景

场景 1：工艺数字化设计场景

针对设计效率低、验证成本高等问题，引入工艺设计仿真工具，如切削仿真软件、有限元分析工具，模拟切削过程，提供准确数据支持，加速方案评估，降低成本。建立工艺知识库，汇聚切削参数、刀具选用规则等，为设计师提供快速决策依据，提升设计效率和准确性。

开发行业工艺包，针对机床行业或零件提供标准化设计方案，减少重复劳动，促进设计标准化。通过工艺机理建模，揭示切削过程内在规律，优化切削参数和刀具选用。利用流程模拟技术，对产线设计进行模拟优化，提高生产效率和资源利用率。

为实现这些技术的综合应用，建立数字化工艺设计平

台，提供用户友好界面，支持仿真分析、知识库应用、产线设计模拟等。平台还实现数字化管理与协同，提高设计效率和质量。

场景 2：可制造性设计场景

针对产品试制周期长、加工装配效率低等问题，打通产品研发、工艺设计、生产作业等环节数据，建立统一的数据平台，实现信息共享与协同。基于产品物理特征与制造能力关联分析，利用仿真软件和数据分析工具，对产品和工艺设计的可加工性、可装配性和可维护性进行全面评价。

引入智能制造系统，通过数字化手段对加工装配过程进行模拟和优化，提前发现潜在问题并改进。应用机器学习、大数据等技术，挖掘分析生产过程中的数据，建立工艺参数与产品质量的关联模型，不断优化工艺流程，提升产品质量和生产效率。

3. 解决方案建议

解决方案 1：工艺数字化设计

某机床企业采用先进的 CAD 软件，对金属切削机床的零部件进行三维建模。通过精确的三维模型，设计人员可以直观地了解产品的结构、尺寸和装配关系，从而进行更精确的设计和优化。

利用 VERICUT 等 CAM 编程软件进行工艺仿真。通过模拟切削过程，分析切削力、切削温度、刀具磨损等关键

强化制造能力分析与匹配。企业需要构建一个详尽的制造能力数据库，该数据库应涵盖现有设备的技术参数、加工范围、精度能力、生产效率、维护历史等关键信息。通过数字化手段，如物联网（IoT）技术，实时收集并更新设备状态数据，确保数据的准确性和时效性；在工艺设计初期，企业引入基于大数据和人工智能的匹配分析工具，将产品设计需求与制造能力数据库进行智能比对。通过算法预测设计方案的可行性，识别潜在的生产瓶颈和成本超支风险，提前调整设计方案，确保设计与制造能力的高度契合。

构建全面的可制造性评估体系。即建立一套完整的可制造性评估指标体系，包括但不限于可加工性（如材料切削性、加工效率）、可装配性（如装配顺序合理性、装配精度）、可维护性（如故障易诊断性、维修便捷性）等维度。每个维度下设定具体、量化的评估标准；并实施多阶段评估。在设计草案阶段，采用快速评估工具进行初步筛查，识别明显的设计问题。利用仿真软件（如 CAE、CFD）进行更深入的模拟分析，验证设计的物理性能、应力分布等。在小批量试生产前，组织跨部门团队进行综合评审，包括生产、质量、成本控制等部门，确保设计全面符合制造要求。

加强数据集成与智能化应用。利用云计算、大数据平台等技术，实现产品研发、工艺设计、生产作业等环节数据无缝集成和共享。确保设计团队能够即时获取生产反馈，快速迭代优化设计；在工艺设计中融入机器学习、遗传算法等智能优化技术，自动探索最优工艺参数组合，如切削速度、进给量、刀具选择，提高加工效率和降低成本。

（四）计划调度环节

1.存在问题

客户对数控机床的需求往往具有不确定性和变动性，这使得企业难以准确预测未来的订单需求；金属切削机床的生产过程通常涉及多个工序和工艺步骤，每个工序都有其独特的设备和技术要求，导致生产过程难以协调和控制，从而延长了交付周期；部分机床企业在制定生产计划时缺乏科学的规划和预测方法，往往依靠经验判断，导致生产计划与实际需求脱节；企业往往积累了大量的生产数据，但由于缺乏有效的数据分析和利用手段，这些数据无法为生产计划优化提供有力支持；部分机床企业在生产过程中存在设备闲置现象，导致设备利用率低下；部分机床企业尚未建立完善的智能排产调度系统，仍依赖传统的手工排产方式，导致排产效率低下且易出错；部分机床企业在建立排产模型时，未能充分考虑各种约束条件和目标函数，

导致模型不精准，无法为实际生产提供有效指导。

2.可改造场景

场景 1：生产计划优化场景

针对销售订单预测不准、生产计划制定复杂及交付周期长等问题，构建集成化的生产计划系统。该系统深度打通了采购、生产和仓储物流等各个环节的管控系统，实现了数据信息的实时共享与同步。

应用多目标多约束求解技术，对订单需求、产能限制、材料供应等多重因素进行综合考虑，优化生产计划安排。同时，利用产能动态规划技术，根据实时生产数据和市场需求变化，动态调整生产计划，确保生产的高效与灵活。上述技术的应用，显著缩短了订单交付周期，提高了生产计划的准确性和执行效率。

场景 2：智能排产调度场景

针对资源利用率低、交付不及时等挑战，建设智能排产调度系统。该系统应用了多约束排产建模技术，综合考虑机床设备、操作人员、物料供应等多重约束条件，为生产作业建立精确的排产模型。

同时，系统采用多目标排产寻优算法，在多个生产目标（如生产周期、资源利用率、交付及时率等）之间进行权衡和优化，确保在复杂多变的生产环境中找到最优的排产方案。

通过上述系统，实现了多目标、多扰动情况下的排产优化与资源动态调度，能够显著缩短了产品生产周期，提高了资源利用效率。

3. 解决方案建议

解决方案 1：生产计划优化

建立精准的订单需求预测体系。企业可通过构建或引入先进的数据分析平台，整合历史销售数据、市场趋势信息、客户行为分析、宏观经济指标等多源数据，运用机器学习算法（如时间序列分析、神经网络模型）进行需求预测，提高预测的准确性；建立与客户的紧密沟通机制，定期收集客户反馈和市场调研信息，及时调整预测模型，快速响应市场变化。同时采用滚动预测法，根据最新数据不断更新预测结果，同时设置不同情景下的预测方案，以增强预测的灵活性和抗风险能力。

建立多维联动的 ERP 系统。对生产流程进行全面梳理，识别并消除浪费环节，优化工序布局，减少等待时间和运输成本，提高生产效率。通过 ERP 系统，开发销售订单管理、生产管理、生产计划、采购管理、仓库管理、财务管理等功能模块，通过 ERP 系统实现产品、订单、物料的全生产周期的管理。

订单类型	创建日期	输入人	工艺路线组	销售订单	SO 项目	订单	物料编号	物料描述	订单数量	交货数量	MRP控制清	系统状态	基本开
PP01	2023.08.28	NW011	50045137	42592	10	100072089	20369411	立式车削中心_VNL80VT-051-11A	1	0	713	REL POHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2023.08.28
PP01	2023.09.08	NW011	50044367	10000633	441	100072603	20369965	数控卧式车床_#L5045C-701-1M 无水箱	1	0	713	REL POHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.02.29
PP01	2024.02.29	NW011	50044560	44091	10	100079904	20372112	数控卧式车床_#L201E-175E-1M 渣压覆架	1	0	713	REL POHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.02.29
PP01	2024.02.29	NW011	50044560	44091	10	100079905		数控卧式车床_#L201E-175E-1M 渣压覆架	1	0	713	REL POHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.02.29
PP01	2024.02.29	NW011	50045160	42737	10	100072166	20372272	数控立式车床_V#L805K-056-1M	1	0	713	REL POHF PRC CSER GMPS MANC RESA SETC	2024.02.29
PP01	2024.02.29	NW011	50044787	43996	20	100079876	20375886	数控卧式车床_#L635SC-292E-1M	1	0	713	REL POHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.02.29
PP01	2024.02.29	NW011	50044787	43996	20	100079878		数控卧式车床_#L635SC-292E-1M	1	0	713	REL POHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.02.29
PP01	2023.09.08	NW011	50044922	10000424	592	100072624	20377237	数控卧式车床_#L634SC-300-1M 无水箱	1	0	713	REL POHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.02.29
PP05	2023.09.22	NW011	50045485	10000715	30	650001604	20380617	数控卧式车床_#L634Z-051-1M	1	0	713	REL POHF PRC GMPS MANC SETC	2023.09.22
PP05	2023.09.22	NW011	50045486	10000715	40	650001606	20380618	数控卧式车床_#L635Z-051-1M	1	0	713	REL POHF PRC GMPS MANC SETC	2023.09.22
PP01	2023.11.01	NW011	50045271	10000424	585	100074691	20380963	数控卧式车床_#L635E-052-1M 无水箱	1	1	713	REL POHF DLV PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.02.29
PP01	2023.11.16	NW011	50046090	43117	10	100075354	20383630	数控立式车床_V#L1005FK-062-2G	1	0	713	REL POHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2023.11.16
PP01	2023.11.27	NW011	50046195	43376	10	100075792	20390145	数控卧式车床_#L10050H-052E-1M	1	0	713	REL POHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.02.29
PP01	2023.11.30	NW011	50046249	43523	10	100075950	20393607	卧式车削中心_#L635T-070E-1K	1	0	713	REL POHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.02.29
PP01	2024.01.11	NW011	50046768	43789	10	100077877	20400988	数控卧式车床_#L251HP-154-2C 渣压覆架	1	1	713	REL POHF DLV PRC CSER GMPS MANC RESA*	2024.01.11
PP01	2024.01.11	NW011	50046769	43789	20	100077878	20400990	数控卧式车床_#L251HP-155-2C 渣压覆架	1	0	713	REL POHF PRC CSER GMPS MANC RESA SETC	2024.01.11
PP01	2024.02.26	NW011	50046692	10000745	20	100079744	20400994	数控卧式车床_#L5045C-704E-1M	1	0	713	REL CHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.02.26
PP01	2024.02.26	NW011	50046692	10000745	20	100079745		数控卧式车床_#L5045C-704E-1M	1	0	713	REL CHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.02.26
PP01	2024.02.26	NW011	50046692	10000745	20	100079746		数控卧式车床_#L5045C-704E-1M	1	0	713	REL CHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.02.26
PP01	2024.02.26	NW011	50046692	10000745	20	100079747		数控卧式车床_#L5045C-704E-1M	1	0	713	REL CHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.02.26
PP01	2024.02.26	NW011	50046693	10000745	10	100079740	20400995	数控卧式车床_#L5025C-702E-1M	1	0	713	REL CHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.02.26
PP01	2024.02.26	NW011	50046693	10000745	10	100079741		数控卧式车床_#L5025C-702E-1M	1	0	713	REL CHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.02.26
PP01	2024.02.26	NW011	50046693	10000745	10	100079742		数控卧式车床_#L5025C-702E-1M	1	0	713	REL CHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.02.26
PP01	2024.02.29	NW011	50046736	44092	20	100079908	20401348	数控卧式车床_#L251HP-118E-1M	1	0	713	REL POHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.02.29
PP01	2024.02.29	NW011	50046736	44092	30	100079909		数控卧式车床_#L251HP-118E-1M	1	0	713	REL POHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.02.29
PP01	2024.01.26	NW011	50046932	43851	10	100078731	20403251	立式车削中心_#L636T-063E-1K	1	1	713	REL POHF DLV PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.01.26
PP01	2024.02.01	NW011	50047003	43887	10	100078993	20404599	数控立式车床_V#L1100H-062E-2C	1	0	713	REL POHF PRC CSER GMPS MANC RESA SETC	2024.02.01
PP01	2024.02.28	NW011	50047268	44065	10	100079825	20408295	数控卧式车床_#L251HA-240-1M 无覆架	1	1	713	REL POHF PRC CSER GMPS MANC RESA*	2024.02.28
PP01	2024.02.28	NW011	50047268	44065	10	100079826		数控卧式车床_#L251HA-240-1M 无覆架	1	0	713	REL POHF PRC CSER GMPS MANC RESA SETC	2024.02.28
PP01	2024.02.28	NW011	50047268	44065	10	100079827		数控卧式车床_#L251HA-240-1M 无覆架	1	0	713	REL POHF PRC CSER GMPS MANC RESA SETC	2024.02.28
PP01	2024.02.28	NW011	50047268	44065	10	100079828		数控卧式车床_#L251HA-240-1M 无覆架	1	0	713	REL POHF PRC CSER GMPS MANC RESA SETC	2024.02.28
PP01	2024.02.28	NW011	50047269	44065	20	100079829	20408296	数控卧式车床_#L251HA-241-1M 无覆架	1	0	713	REL POHF PRC CSER GMPS MANC RESA SETC	2024.02.28
PP01	2024.02.28	NW011	50047269	44065	20	100079832		数控卧式车床_#L251HA-241-1M 无覆架	1	0	713	REL POHF PRC CSER GMPS MANC RESA SETC	2024.02.28
PP01	2024.03.06	NW011	50047374	44096	10	100080111	20409504	数控卧式车床_#L636SC-123E-1M	1	0	713	REL POHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.03.06
PP01	2024.03.06	NW011	50047374	44096	10	100080113		数控卧式车床_#L636SC-123E-1M	1	0	713	REL POHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.03.06
PP01	2024.03.06	NW011	50047370	44093	30	100080079	20409639	数控卧式车床_#L4025A-090E-1M	1	0	713	REL POHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.03.06
PP01	2024.03.09	NW011	50047423	44105	10	100080346	20409665	数控立式车床_#L405-071E-1M	1	0	713	REL POHF PRC CSER GMPS MANC RESA SETC	2024.03.09
PP01	2024.03.06	NW011	50047368	44130	20	100080091	20409688	数控卧式车床_#L5045C-713-2C	1	1	713	REL POHF DLV PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.03.06
PP01	2024.03.11	NW011	50047447	44178	10	100080344	20410820	数控卧式车床_#L5045C-714-1M	1	1	713	REL POHF DLV PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.03.11
PP01	2024.03.25	NW011	50047680	44292	10	100081201	20413789	数控卧式车床_#L5045C-715E-1M	1	0	713	REL POHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.03.25
PP01	2024.03.25	NW011	50047680	44292	30	100081203		数控卧式车床_#L5045C-715E-1M	1	0	713	REL POHF PRC GMPS MANC RESA SETC	2024.03.25

图 12 ERP 系统根据订单信息制定生产计划

销售接单后通过销售订单管理模块将销售订单录入 ERP 系统，ERP 系统根据销售订单交期、数量、物料 BOM 等信息自动计算物料到货时间，为供应商交货提供指导，提升供应链协同性；同时借助 APS 系统基于订单交期、产品数量、工厂产能、物料库存、物料到货计划等因素自动计算生成生产计划，打通 MES 制造执行系统，实时采集相关生产数据上传 ERP 系统，ERP 系统将数据同步给 APS，APS 系统再根据生产影响因素自动调整生产计划，通过系统将生产计划下达给 MES 制造执行系统。

采购申请的列表显示														
物料	短文本	数量	PG#	交货日期	物料组	工厂	库位	申请者	订货	采购申请	F 采购申请数	需求日期	批准日期	A 采购订单
20085364	起吊FB小机身,NWMQ91-80-89 125x160,0Cr18Ni9	5	J01	20240624	1030	1701	101	标准件	0	53152815	1	2024.03.22	2024.06.14	
20101149	锁紧螺母,YINSH R M110x2-备注	8		20240624	1030	1701	101	标准件	0	53202649	1	2024.03.23	2024.06.07	
20077483	OR形密封圈,GB/T3452.1 345x5.3,NBR	3		20240628	1030	1701	101	标准件	0	53205138	1	2024.03.23	2024.06.18	
20004971	螺母,JB/ZQ4444 M36x1.5,35	6		20240628	1030	1701	101	标准件	0	53207186	1	2024.03.23	2024.06.18	
20018559	垫圈,GB/T22795 M8x80-ZM	8		20240624	1030	1701	101	标准件	0	53246340	1	2024.03.26	2024.06.14	
20018559	垫圈,GB/T22795 M8x80-ZM	12		20240719	1030	1701	101	标准件	0	53246341	1	2024.03.26	2024.07.09	
20412891	螺母,GB/T70.1 M20x200,12.9	8		20240719	1030	1701	101	标准件	0	53247132	1	2024.03.26	2024.06.19	
20003266	螺母,GB/T70.1 M14x70,12.9	42		20240719	1030	1701	101	标准件	0	53247339	1	2024.03.26	2024.07.09	
20016928	OR形密封圈,GB/T3452.1 33.5x3.55,NBR	3		20240628	1030	1701	101	标准件	0	53272531	1	2024.03.28	2024.06.18	
20337319	螺母,GB/T70.1 M24x180,12.9	4		20240719	1041	1701	101	标准件	0	53273915	1	2024.03.28	2024.06.19	
20045060	螺母,GB/T37 M30x240,8.8	8		20240705	1030	1701	101	标准件	0	53274395	1	2024.03.28	2024.06.25	
20078504	螺母,GB/T5783 M30X130,10.9	20		20240723	1030	1701	101	标准件	0	53286093	1	2024.03.29	2024.06.21	
20073480	起吊HM前底座,NWMQ91-80-83 125x160,0Cr18Ni9	5		20240617	1030	1701	101	标准件	0	53333363	1	2024.04.02	2024.06.07	
20073481	起吊HM后底座,NWMQ91-80-84 125x160,0Cr18Ni9	5		20240617	1030	1701	101	标准件	0	53333364	1	2024.04.02	2024.06.07	
20004157	销,GB/T118 8x45,35	10		20240628	1030	1701	101	标准件	0	53337377	1	2024.04.02	2024.06.18	
20004157	销,GB/T118 8x45,35	29		20240719	1030	1701	101	标准件	0	53337378	1	2024.04.02	2024.07.09	
20034515	螺母,GB/T70.3 M6x30,12.9	90		20240628	1030	1701	101	标准件	0	53339133	1	2024.04.02	2024.06.18	
20110553	垫圈,GB/T894 85,65Mn	3		20240628	1030	1701	101	标准件	0	53339466	1	2024.04.02	2024.06.18	
20076761	螺母,GB/T70.1 M20x160,12.9	65		20240628	1030	1701	101	标准件	0	53340399	1	2024.04.02	2024.06.18	
20012173	OR形密封圈,GB/T3452.1 180x5.3,NBR	1		20240524	1030	1701	101	标准件	0	53346280	1	2024.04.02	2024.05.14	
20012173	OR形密封圈,GB/T3452.1 180x5.3,NBR	2		20240628	1030	1701	101	标准件	0	53346281	1	2024.04.02	2024.06.18	
20206693	OR形密封圈,GB/T3452.1 400x5.3,NBR	1		20240628	1030	1701	101	标准件	0	53346463	1	2024.04.02	2024.05.29	
20009350	铆钉,GB/T12615 3.2x7,铝	4,000		20240418	1030	1701	101	标准件	0	53354676	1	2024.04.03	2024.04.08	
20022027	OR形密封圈,GB/T3452.1 200x5.3,NBR	1		20240628	1030	1701	101	标准件	0	53354752	1	2024.04.03	2024.06.18	
20070225	锁紧螺母,YINSH F M56x1.5-备注	3		20240617	1034	1701	101	标准件	0	53355189	1	2024.04.03	2024.05.31	
20080555	OR形密封圈,GB/T3452.1 239x5.3,NBR	2		20240628	1030	1701	101	标准件	0	53355261	1	2024.04.03	2024.06.18	
20080560	OR形密封圈,GB/T3452.1 335x5.3,NBR	1		20240524	1030	1701	101	标准件	0	53355262	1	2024.04.03	2024.05.14	
20080560	OR形密封圈,GB/T3452.1 335x5.3,NBR	3		20240628	1030	1701	101	标准件	0	53355263	1	2024.04.03	2024.06.18	
20084568	垫圈,SKF 37.69x3.53 NBR70,45	5		20240628	1030	1701	101	标准件	0	53356411	1	2024.04.03	2024.06.13	
20001304	螺母,GB/T6170 M16,10	8		20240613	1030	1701	101	标准件	0	53356739	1	2024.04.03	2024.06.03	M
20001304	螺母,GB/T6170 M16,10	8		20240613	1030	1701	101	标准件	0	53356740	1	2024.04.03	2024.06.03	M
20000630	螺母,GB/T6170 M6,10	4,000		20240418	1030	1701	101	标准件	0	53356877	1	2024.04.03	2024.04.08	
20143897	中心架夹爪,NWMQ91-70-39E 16x40,PC	20		20240514	1030	1701	101	标准件	0	53372211	1	2024.04.04	2024.04.12	
20146768	珩磨VNL25G,NWMQ91-100-73 125x125,PC	5		20240523	1030	1701	101	标准件	0	53372217	1	2024.04.04	2024.05.13	
20053876	螺母,GB/T899 M36x120,10.9	12		20240523	1030	1701	101	标准件	0	53374334	1	2024.04.04	2024.05.13	
20069314	垫圈,GB/T22795 M10-55,125x160,0Cr18Ni9	1		20240624	1030	1701	101	标准件	0	53374382	1	2024.04.04	2024.06.07	
20290914	管调管,GB/T11527 10x1 盘管	16		20240529	1031	1701	101	标准件	0	53375806	1	2024.04.04	2024.04.29	
20048534	螺母,GB/T899 M20x180,10.9	4		20240418	1030	1701	101	标准件	0	53379116	1	2024.04.04	2024.04.08	
20060504	锁紧螺母,YINSH R M130x2-备注	5		20240423	1034	1701	101	标准件	0	53379238	1	2024.04.04	2024.04.08	
20062328	螺母,GB/T5782 M24x240,10.9	4		20240418	1030	1701	101	标准件	0	53380570	1	2024.04.04	2024.04.08	
20003715	螺母,GB/T810 M24x1.5,45	5		20240502	1030	1701	101	标准件	0	53381235	1	2024.04.04	2024.04.22	
20003718	螺母,GB/T70.1 M20x110,12.9	12		20240425	1030	1701	101	标准件	0	53382677	1	2024.04.06	2024.04.15	
20000035	垫圈,GB/T93 12.65Mn	9,000		20240418	1030	1701	101	标准件	0	53385359	1	2024.04.06	2024.04.08	
20114079	起吊PB立柱,NWMQ91-80-99 125x160,PC	10		20240530	1030	1701	101	标准件	0	53385887	1	2024.04.07	2024.05.20	

图 13 ERP 系统根据物流 BOM 生成物料采购单

科学制定与动态调整生产计划。基于市场需求预测和生产能力评估，动态调整产能配置，确保生产能力与市场需求相匹配，减少过剩或不足的情况，实现产能动态规划；引入智能决策支持系统，利用大数据分析和人工智能技术，开发智能决策支持系统，辅助管理层进行生产计划的制定与调整，确保计划的科学性和可行性；建立应急响应机制，针对生产过程中的突发事件（如设备故障、物料短缺），建立快速响应机制，及时调整生产计划，最小化对生产进度的影响。

加强数据分析与利用。建立数据仓库与 BI 系统，构建数据仓库，集成生产、销售、财务等多维度数据，通过商业智能（BI）工具进行深度分析，发现生产过程中的瓶颈和改进空间。基于数据的决策，将数据分析结果作为生产计划调整、资源配置、产品改进等决策的重要依据；定期对数据分析模型进行验证和优化，确保模型能够准确反映生产实际情况，为生产计划优化提供持续的支持。

解决方案 2：智能排产调度

某企业通过将 APS 高级排产系统对接 ERP 系统，将生产计划导入 APS 高级排产系统，通过 APS 高级排产系统评估销售订单预计完成时间，为销售接单提供数据支撑，APS 高级排产系统依据订单交期、产品数量、物料供应计划、工艺流程、设备状况、产能等约束条件自动生成生产排程，通过模拟排产及时发现生产瓶颈以便调整优化设备资源，同时由 ERP 系统根据销售订单交期计算物料精准到货时间，为供应商交货提供指导，提升供应链协同性；然后通过 MES 系统下达生产任务到各车间智能设备终端，设备终端通过扫码器扫码接收生产任务指令；生产完工后通过终端扫码实时反馈计划完成情况。

订单代码	【订单外部区分】	【销售订单号】	【销售订单号】	【销售订单号】	【物料描述】	订单数量	交货期	开始时间	结束时间	【机械部派产状态】	【机械部派产开工时间】	【机械部派产完工时间】	【总成本部派产开工时间】	【总成本部派产完工时间】
1446	田	100077566	生产订单	43750	10X	20390740	卧式加工中心, 规格3TD-122E-1	1	2024/04/27	2024/04/08	2024/05/12	齐料	2024/04/10	2024/04/30
1447	田	100078662	生产订单	43754	10X	20401349	卧式加工中心, 规格3TD-127E-1	1	2024/04/27	2024/04/08	2024/07/11	未齐料	2024/04/10	2024/04/15
1448	田	100078663	生产订单	43754	20X	20401349	卧式加工中心, 规格3TD-127E-1	1	2024/04/27	2024/04/18	2024/07/30	未齐料	2024/04/18	2024/04/19
1449	田	100079932	生产订单	44127	10X	20315129	数控卧式车床, 规格35SC-299-1	1	2024/04/27	2024/04/08	2024/08/26	未齐料	2024/04/08	2024/08/20
1450	田	100080033	生产订单	44016	10X	20406790	立式加工中心, VM1150S-499E-1	1	2024/04/27	2024/04/09	2024/04/26	齐料	2024/04/09	2024/04/22
1451	田	100080080	生产订单	44125	10X	20409659	数控卧式车床, 规格2518A-242-1	1	2024/04/27	2024/04/09	2024/08/24	齐料	2024/04/09	2024/08/23
1452	田	100080086	生产订单	44125	10X	20409659	数控卧式车床, 规格2518A-242-1	1	2024/04/27	2024/04/09	2024/08/27	齐料	2024/04/09	2024/08/16
1453	田	100080087	生产订单	44125	10X	20409659	数控卧式车床, 规格2518A-242-1	1	2024/04/27	2024/04/09	2024/08/30	齐料	2024/04/09	2024/05/16
1454	田	100080088	生产订单	44125	10X	20409659	数控卧式车床, 规格2518A-242-1	1	2024/04/27	2024/04/09	2024/09/01	未齐料	2024/04/09	2024/05/16
1455	田	100080089	生产订单	44125	10X	20409659	数控卧式车床, 规格2518A-242-1	1	2024/04/27	2024/04/09	2024/09/03	未齐料	2024/04/09	2024/05/16
1456	田	100080090	生产订单	44125	10X	20409659	数控卧式车床, 规格2518A-242-1	1	2024/04/27	2024/04/09	2024/09/05	未齐料	2024/04/09	2024/05/16
1457	田	100080242	生产订单	44111	10X	20409506	龙门加工中心, PM13308C-062E	1	2024/04/27	2024/04/12	2024/10/09	未齐料	2024/04/09	2024/05/16
1459	田	100080889	生产订单	44155	10X	20409823	立式加工中心, VM1260B-090-1	1	2024/04/27	2024/04/20	2024/07/04	未齐料	2024/04/30	2024/06/03
1459	田	100080962	生产订单	10000633	860X	20393719	龙门加工中心, PM2030P-102-	1	2024/04/27	2024/04/12	2024/07/18	未齐料	2024/04/13	2024/04/12
1460	田	100081245	生产订单	44273	10X	20413538	龙门加工中心, PM401208SC-07	1	2024/04/27	2024/04/12	2024/09/25	未齐料	2024/04/12	2024/05/14
1461	田	600024660	生产订单	44405	10X	20311961	立式加工中心, VM1050S-352-1	1	2024/04/27	2024/05/30	2024/05/30			
1462	田	600024661	生产订单	44405	10X	20311961	立式加工中心, VM1050S-352-1	1	2024/04/27	2024/05/30	2024/05/30			

图 14APS 高级排产系统自动生成生产计划排程

派工单编号	物料编号	物料名称	车间	产线	班次	排产数量	生产日期	生产订单编号	车间计划编号	合格数量	不合格数量	状态	排序号	操作时间
PG20230531003	DV031-02-03a	刹车盘副零件a	外协车间	规格T233产线	外协-白班	3	2025-01-23			1	1	生产中	2	2025-01-22 01:00:00
PG20230413002	DV031-02-02	刹车盘副零件	生产车间	数控车CAK5085产线	生产-白班	5	2025-01-17	DD20230411001	JH20230411001	0	0	已中止	1	2025-01-22 01:00:00
PG20230608001	DV031-02-03a	刹车盘副零件a	外协车间	规格T233产线	外协-白班	3	2025-01-19	DD20230531001	JH20230531002	1	1	生产中	1	2025-01-22 01:00:00
PG20230411008	DV030-02-01-15	刹车盘	生产车间	精磨产线	白班	3	2025-01-22	DD20230411002	JH20230411009	1	1	生产中	1	2025-01-22 01:00:00
PG20241129001	DV031-02-04	刹车盘半轴零件1	生产车间	数控车CAK5085产线	生产-晚班	10	2025-01-17	DD20241129001	JH20241129006	0	0	生产中	1	2025-01-22 01:00:00
PG20230411005	DV031-02-05	刹车盘半轴零件2	生产车间	立式车床V30M产线	白班	6	2025-01-22	DD20230411002	JH20230411005	6	0	已中止	1	2025-01-22 01:00:00
PG20230412007	DV031-02-04	刹车盘半轴零件1	生产车间	数控车T360产线	白班	3	2025-01-22	DD20230412001	JH20230412003	0	0	已锁定	2	2025-01-22 01:00:00
PG20240131001	DV030-02-01-15	刹车盘	生产车间	精磨产线	生产-白班	2	2025-01-21	DD20230412002	JH20230719007	0	0	已撤回	2	2025-01-22 01:00:00
PG20230531001	DV031-02-02a	刹车盘副零件a	生产车间	数控车CAK5085产线	生产-白班	3	2025-01-21	DD20230531001	JH20230531001	2	0	生产中	3	2025-01-22 01:00:00
PG20240304002	DV031-02-05	刹车盘半轴零件2	生产车间	数控车CAK5085产线	生产-白班	30	2025-01-18	DD20230613001	JH20230613006	0	0	未锁定	2	2025-01-22 01:00:00
PG20230413004	DV031-02-02	刹车盘副零件	生产车间	数控车CAK5085产线	生产-白班	5	2025-01-21	DD20230412001	JH20230412001	0	0	已锁定	2	2025-01-22 01:00:00
PG20230414002	DV031-02-08	刹车盘副零件	外协车间	线切割产线	外协-白班	6	2025-01-22	DD20230411002	JH20230411008	3	0	生产中	1	2025-01-22 01:00:00
PG20240304001	DV031-02-04	刹车盘半轴零件1	生产车间	数控车CAK5085产线	生产-白班	12	2025-01-18	DD20230613001	JH20230613007	0	0	未锁定	1	2025-01-22 01:00:00

图 15 系统派发下达生产任务

提升设备利用率。引入物联网（IoT）技术，对机床设备进行实时监控，收集运行数据，如开机时间、故障率、维护历史等，以便及时发现设备闲置或低效运行的情况；进一步优化生产布局与工艺流程，重新评估并优化生产车间的布局，确保物流顺畅，减少物料搬运和等待时间。采用精益生产理念，对工艺流程进行梳理和重组，消除浪费环节，提高生产效率；利用智能排产调度系统，根据实时生产需求和设备状态，动态调整生产计划和资源分配，确

保设备得到充分利用，实现资源动态调度。

建立完善的智能排产调度系统。选择适合金属切削机床企业的智能排产调度系统，确保系统具备多约束排产建模、多目标排产寻优等功能。与企业现有的 ERP、MES 等系统进行集成，实现数据共享和流程协同，提高排产调度的准确性和效率；根据企业的实际需求和业务流程，对智能排产调度系统进行定制化开发，确保系统能够贴合企业的生产实际。开发用户友好的界面和交互功能，降低操作难度，提高系统使用效率。

构建精准的排产模型。在建立排产模型时，应全面考虑生产过程中的各种约束条件，如设备能力、工艺要求、人员配置、物料供应等。利用多约束排产建模技术，将这些约束条件纳入模型中，确保排产计划的可行性和准确性；根据企业的生产目标和业务需求，确定排产优化的目标函数，如最小化生产周期、最大化设备利用率、最小化生产成本等。采用混合整数规划（**Mixed Integer Programming, MIP**），在排产问题中同时考虑连续变量和离散变量。利用资源约束理论（**Resource-Constrained Project Scheduling Problem, RCPSP**）在有限资源约束下优化项目计划。同时，考虑到模型验证与迭代，对建立的排产模型进行验证和测试，确保模型能够准确反映生产实际情况。根据实际生产

数据和反馈，对模型进行迭代和优化，不断提高模型的精准度和可靠性。

强化数据驱动决策。利用智能排产调度系统和其他信息系统，收集生产过程中的各类数据，如生产进度、设备状态、物料库存等。对这些数据进行深入分析和挖掘，发现生产过程中的瓶颈和问题，为优化排产调度提供数据支持；利用甘特图（Gantt Chart）可视化展示生产进度和任务安排，使管理人员能够直观地了解生产情况和排产效果。通过数据可视化，及时发现生产中的异常和趋势，为决策提供依据。

（五）生产作业环节

1. 存在问题

在面向智能制造快速加工需求，“多品种小批量”，定制化需求等，现有金属切削机床加工产线缺乏足够的柔性，以适应不同规格产品的快速切换；生产过程缺乏实时监控和动态优化，导致效率不高和资源浪费；智能协同作业水平低，限制了生产自动化和智能化的发展；部分机床企业虽然引入了精益管理理念，但在实际执行过程中缺乏有效的监督和考核机制，导致精益管理流于形式，未能充分发挥其应有的作用；部分机床企业在数智技术应用方面仍处于初级阶段，如仅使用简单的 ERP 或 MES 系统进行生产管

理，未能充分发挥大数据、云计算、人工智能等数智技术的优势；零件加工制造精度提升要求；零件加工质量一致性；部分机床企业技术水平相对落后，难以满足市场对高精度、高效率金属切削机床的需求；由于机床性能、刀具磨损、工件材料等因素的变化，导致工艺参数波动大，影响加工精度和稳定性；传统的控制方式难以实现对复杂工艺过程的精准控制，导致产品质量不稳定；在人机协同作业中，任务分配和协调是关键。部分机床企业在实际操作中，由于缺乏对人机协同作业流程的深入理解，导致任务分配不合理，人机之间的协同作业效率低下；人机之间的有效沟通是实现高效协同作业的基础。然而，部分机床企业在人机协同作业中，缺乏有效的沟通机制。例如，机器人可能无法准确理解人类的指令，或者人类无法及时获取机器人的状态信息，导致协同作业效率低下。

2.可改造场景

场景 1：产线柔性配置场景

针对个性化需求响应慢、产线换线时间长的问题，部署智能金属切削机床及系统。机床集成了先进的传感器、控制器和执行器，能够实时感知加工状态，并根据订单、工件材质、库存变化等动态信息，快速调整加工参数和工艺流程。

通过应用产线模块化重构技术，金属切削机床可以像

积木一样灵活组合，快速适应不同产品的加工需求。同时，柔性物流运输系统的引入，实现了工件在产线上的自动流转和精准配送，进一步提高了产线的效率和灵活性。这些技术的综合应用，使得金属切削机床在产线柔性配置场景中能够快速响应市场需求，实现按需配置和高效生产。

场景 2：数智精益管理场景

针对资源利用率不高、管理效率低等问题，将六西格玛、6S 等精益方法与大数据、云计算、人工智能等数智技术深度融合，对金属切削机床进行了全面的数字化、网络化和智能化改造。

通过安装传感器和物联网设备，实时采集机床的运行数据，如加工效率、故障率、能耗等，为精益管理提供准确的数据基础。利用大数据分析技术，对采集到的数据进行深入挖掘，发现管理中的瓶颈和问题，为决策提供支持。同时，应用人工智能算法，对机床的运行状态进行预测和优化，提高资源利用率和管理效率。

场景 3：工艺动态优化场景

针对工艺/设备参数动态调优难的问题，建设智能产线和工艺在线优化系统。该系统融合了设备机理与数据混合建模技术，能够精准捕捉机床运行过程中的动态特性。

通过多设备联合寻优技术，系统能够实时分析加工过程中的各种数据，如切削力、温度、振动等，对工艺过程

和设备参数进行在线优化。这不仅提高了加工效率，还显著提升了产品质量的一致性。

此外，系统还应具备自我学习和适应能力，能够根据历史数据和实时反馈，不断优化调整模型，确保工艺参数始终保持在最优状态，为金属切削加工行业带来了显著的效益提升。

场景 4：先进过程控制场景

针对复杂工艺过程参数波动大、控制效果差的问题，引入先进过程控制系统，并结合实时优化技术，对金属切削过程进行精准控制。

通过应用模型预测控制技术，系统能够预测未来工艺参数的变化趋势，并提前进行调整，确保加工过程的稳定性。同时，多目标寻优技术被用来在多个工艺参数之间找到最佳平衡点，以优化加工效率和产品质量。

上述技术的综合应用，实现了金属切削机床工艺流程的精准、实时和闭环控制优化，有效稳定了产品质量，提高产出率，为金属加工行业带来了显著的效益。

场景 5：人机协同作业场景

针对传统生产方式协同效率低、作业安全风险高的问题，部署工业机器人与金属切削机床构成人机协同作业单元。

通过智能交互技术，机器人能够准确理解操作人员的指令，实现与机床的高效配合。自主规划技术使机器人能

够根据加工任务自动规划路径，提高作业效率。同时，风险感知和安全防护技术的应用，确保了人机协同作业过程中的安全。

上述技术的综合应用，实现了金属切削机床在加工、装配等过程中与人的高效协同，提升了生产效率，降低了安全风险。

3.解决方案建议

解决方案 1：产线柔性配置

对现有产线开展模块化设计。将机床产线划分为若干功能模块，如加工模块、检测模块、物流模块等。每个模块具有独立的功能和接口，便于快速调整和按需配置。

引入快速换模技术，实现机床模具的快速更换和调整，提高生产线的适应性和灵活性。

引入智能调度系统，根据市场需求和客户订单的变化，调整机床产线的配置和生产计划，实现生产过程的智能调度。

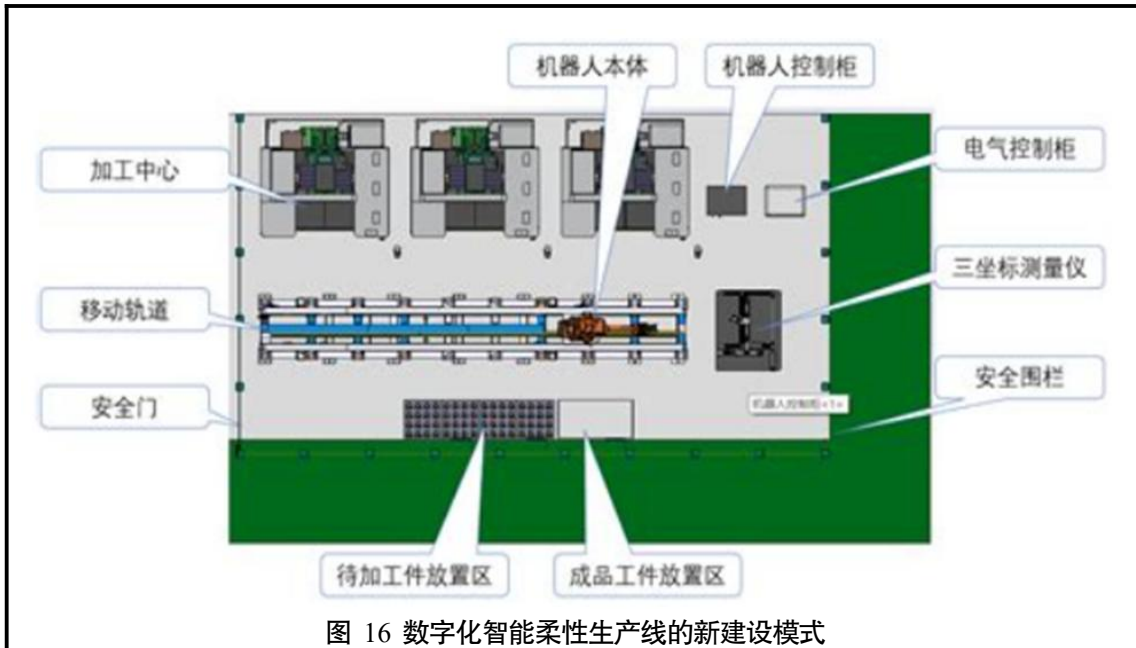


图 16 数字化智能柔性生产线的新建设模式

解决方案 2：数智精益管理

深化精益管理，建立有效监督与考核机制。企业需要构建一套完整的精益管理体系，明确精益管理的目标、原则、方法和流程。这包括制定精益管理手册，明确各部门和岗位的精益管理职责，以及设立精益管理推进小组，负责精益管理的整体规划、实施和监督；根据精益管理的目标，设立一系列关键绩效指标，如设备利用率、生产效率、产品质量合格率、成本降低率等。这些指标应具体、可量化、可追踪，并与企业的整体战略目标相契合；建立定期审核与考核机制，对各部门和岗位的精益管理实施情况进行评估。通过内部审计、外部审核、员工自评等多种方式，确保精益管理的有效执行。同时，将考核结果与员工的绩效挂钩，激励员工积极参与精益管理；同时，强化持续改进文化，鼓励员工提出改进建议，对有价值的建议

给予奖励。建立持续改进的激励机制，让员工参与到精益管理的持续改进中来，形成全员参与、持续改进的文化氛围。

升级数智技术，充分发挥其优势。整合现有系统，构建数智平台，即对现有的 ERP、MES 等系统进行整合和优化，构建统一的数智平台。通过数据集成和流程协同，实现生产现场、成本质量、供应链等各环节的信息共享和协同管理；利用大数据技术，对生产过程中的海量数据进行收集、存储和分析。通过数据挖掘和机器学习，发现生产过程中的瓶颈和问题，为优化生产提供数据支持。同时，引入人工智能技术，如智能排产、智能调度、智能诊断等，提高生产管理的智能化水平；利用物联网（IoT）技术，对生产设备、物料、人员等进行实时监控。通过传感器、RFID 等技术手段，实时采集生产现场的数据，并在数智平台上进行展示和分析。这样，管理人员可以及时了解生产情况，对异常情况进行及时处理；结合精益管理的理念，对生产作业流程进行优化。通过价值流分析、工序优化、标准化作业等方法，消除浪费、提高效率。同时，利用数智技术对优化后的流程进行固化和推广，确保流程的持续改进和有效执行。

加强人员培训与文化塑造。对员工进行数智技术和精益

管理的培训，提高员工的技能水平和意识。培训内容包括数智技术的基本操作、精益管理的基本理念和方法以及如何将两者结合应用于实际工作中；通过宣传、培训、激励等方式，塑造企业的数智精益文化。让员工认识到数智技术和精益管理对企业发展的重要性，并积极参与其中。同时，建立奖励机制，对在数智精益管理中表现突出的员工进行表彰和奖励。

解决方案 3：工艺动态优化

建立机床状态数据、刀具状态、加工参数与切削力、零件加工质量之间的关系模型，针对数控机床系统动态特性，分析影响零件质量的动态特性和加工参数的关系。根据切削理论，对于不同的加工方式，建立机床加工参数与切削力的关系模型。常用的切削力模型中包含反映刀具的几何结构以及刀具和工件的材料组合对切削力的影响的切削力系数。考虑数控加工系统动态非线性及加工过程影响因素复杂多变的特点，运用深度学习方法，基于采集的刀具切削力相关数据确定切削力系数的数值。

基于刀具变形的关系模型、刀具磨损的预测模型、时变误差的预测模型的输出结果，根据采集的机床状态数据和加工参数以及零件表面质量数据，建立机床状态数据、刀具状态、加工参数与切削力、零件加工质量之间的关系模

型。通过该模型可以在加工之前对加工参数进行优化，提供刀具目标切削力的预测值，为机床的自适应控制提供关键支撑。

提出机床自适应控制策略。应用深度学习方法，建立主轴电机电流和切削力的关联性模型，通过实时监测和提取主轴电机电流而间接获得切削力，通过在线模糊自适应算法动态调整进给速度，以电流作为反馈量来控制切削力，实现恒功率切削，在保证机床稳定性的同时发挥机床最大功效，提高机床的加工效率。控制系统的结构中其控制部分包括两个核心模块，即模糊控制与进给倍率的预测。这样既发挥了模糊控制的智能，又考虑了主轴电机电流或切削力与进给的关系，有效地提高了系统的稳定性和可靠性。

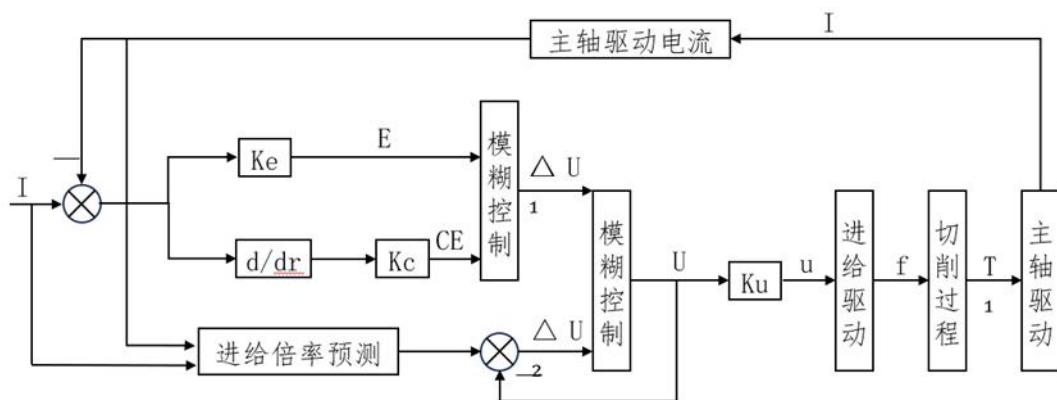


图 17 加工参数在线模糊自适应优化策略结构图

自适应控制模块将根据预测的零件加工误差，修正 NC 程序，对预测的零件加工误差进行补偿，实现零件加工精度的提升。

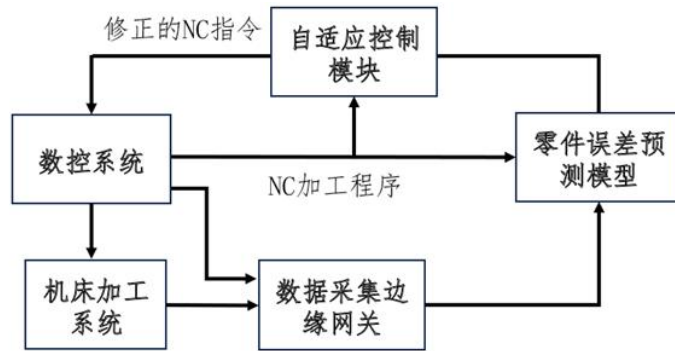


图 18 基于加工误差预测模型的误差补偿自适应控制策略

当检测到机床健康状态存在异常时及时提示用户进行检修，并给出健康指标与预测剩余寿命。当检测到机床即将发生严重故障时，向机床数控系统发布停机指令，避免由于机床严重故障而产生的重大损失。综合误差补偿和故障预测的控制策略。

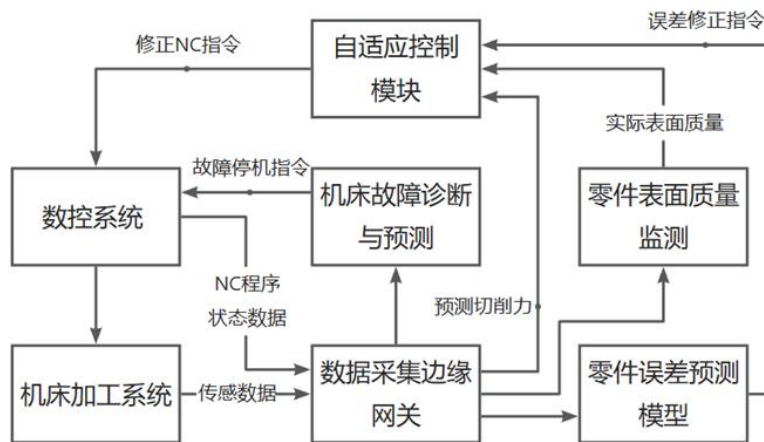


图 19 基于状态监测和零件表面加工质量预警的控制策略

开展数控系统与自适应控制策略的集成技术。数据采集边缘网关通过串行接口、网络接口等方式向 CNC 控制器发送指令。这种方式不受 NC 程序开放程度的限制，只需要做好不同机床通信协议的适配即可，从而实现适用于多数控系统的自适应控制模块。

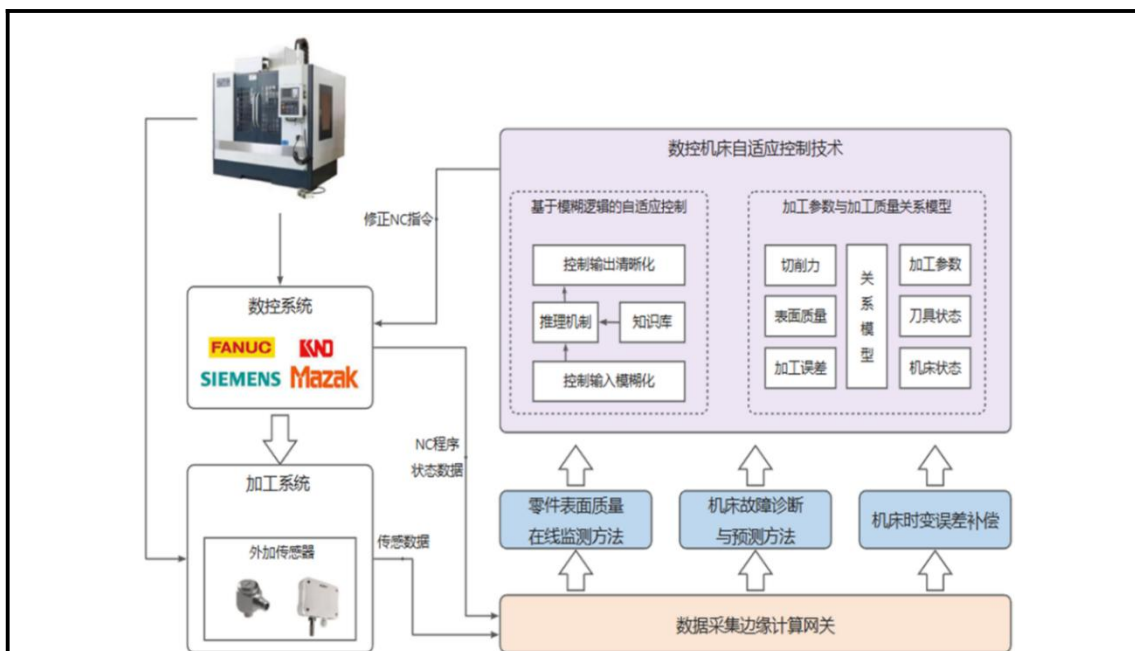


图 20 机床加工误差补偿的自适应控制解决方案

解决方案 4：先进过程控制

强化技术升级与创新能力提升。应用国内外先进的金属切削技术和设备，如高精度数控机床、智能刀具系统、高效冷却润滑技术等，以提升加工精度和效率。加强与高校、科研机构的合作，共同研发新技术、新工艺，推动技术创新和产业升级。同时，组建专业的研发团队，专注于机床技术、控制算法、工艺优化等方面的研究，并鼓励团队成员参加行业交流、技术培训，不断提升团队的技术水平和创新能力。

先进过程控制系统的应用。建立数据程序传输（DNC）系统，所有数控机床通过网线连接到同一台服务器上组成局域网，由 DNC 系统软件统一管理。通过 DNC 软件客户端，可以远程实时传输程序至各机床、同时可以上半成品

图纸、工艺过程卡片、工序卡片和一些生产类加工文件，供生产人员查阅和使用。

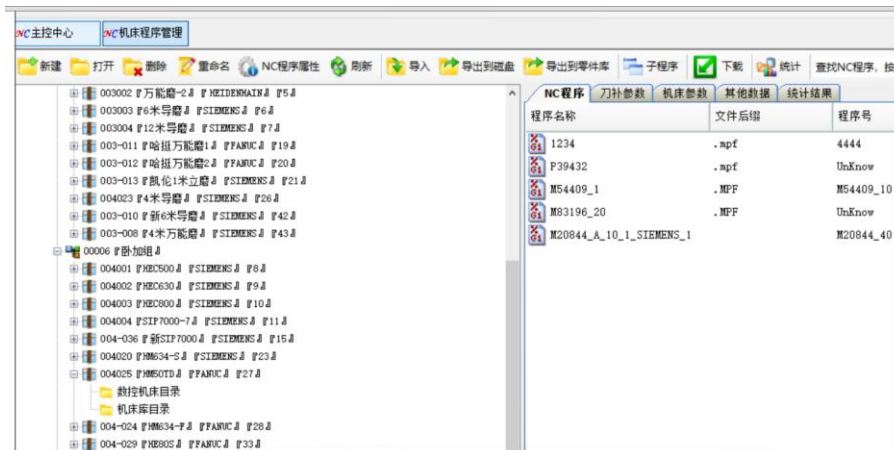


图 21 数据机床远程实时传输程序

基于机床的动态模型和实时数据，建立模型预测控制系统（MPC）。通过 MPC 算法预测未来工艺参数的变化趋势，并提前调整控制策略，以实现工艺过程的精准控制。

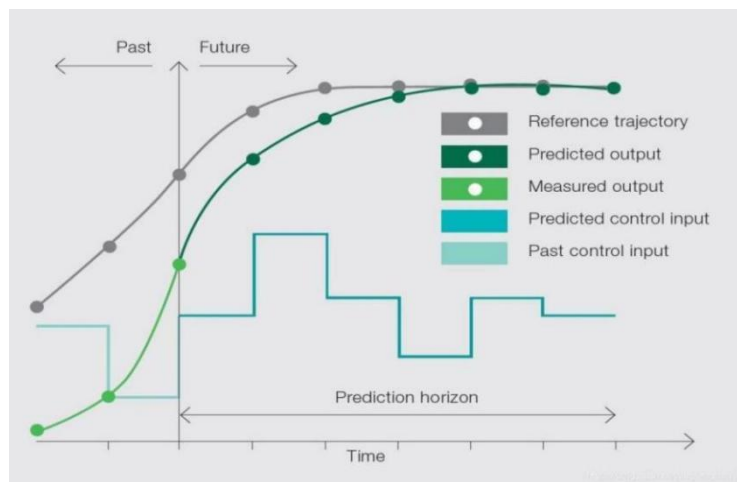


图 22 MPC 预测模型控制

结合产品质量、生产效率、能耗等多个目标，建立多目标优化模型。利用智能优化算法（如遗传算法、粒子群算法等）求解最优工艺参数组合，实现多目标寻优。

基于一体化精度控制技术，通过 PLC 控制程序通过坐标运动控制、加工进给控制和动作顺序控制，实现对数控机床的精确操作。这些控制确保机床在 X、Y、Z 轴上的精确定位和运动，优化加工过程。

工艺参数波动控制。在机床关键部位安装高精度智能传感器，实时监测刀具磨损、工件材料变化、切削力等关键参数。通过数据分析技术，及时发现并预警工艺参数的异常波动，为控制策略的调整提供依据。同时，开发自适应控制算法，根据实时监测到的工艺参数变化，自动调整切削速度、进给量等控制参数。通过不断学习和优化，使控制系统能够更好地适应不同工况下的加工需求。

传统控制方式的改造与升级。对传统机床进行数字化和智能化改造，加装数控系统、智能传感器和执行器等。通过改造，实现机床的精准控制和远程监控，提升加工精度和效率；对现有控制算法进行优化和改进，如引入 PID 控制、模糊控制、神经网络控制等先进算法。通过算法优化，提高控制系统的响应速度和稳定性，减少工艺参数的波动。

解决方案 5：人机协同作业

某机床企业通过合理设计布局机器人加工站，利用传感器实时监测人与机器的位置、姿态、力度等信息，确保机

器人在协作过程中能够根据人类的行为做出适当反应，避免碰撞和伤害。

利用自动定位技术实现工件自动定位，利用数控加工中心加工程序自动控制加工。

通过物联网技术实时收集和传输机器人与生产系统的数据，借助云计算平台进行数据分析和优化。

采用智能安全防护技术，建立安全机制，设置动态安全边界、速度和力矩限值，当检测到可能发生碰撞的情况时，机器人能够立即减速、停止或改变运动轨迹，确保人机协作过程的安全性。机器人工作站设计布局图：

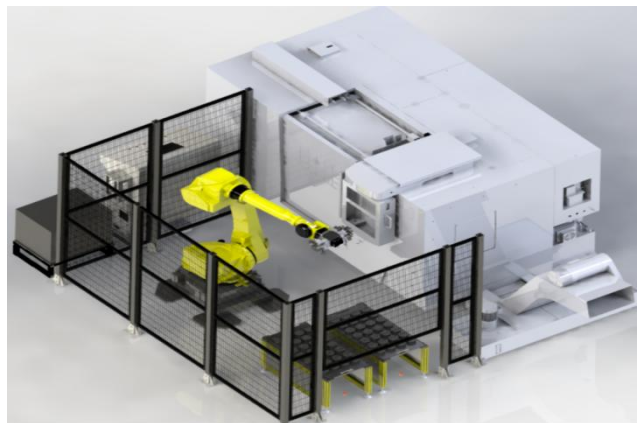


图 23 机器人工作站布局图

（六）质量管控环节

1. 存在问题

以往工件无法实现在线测量，需要将加工工件拆卸，进行评估，费时费力；传统测量方法无法实时、准确监测的问题；以往的检验过程数据采集手段为纸质档记录卡，

手段单一，且易脏污，容易丢失问题；数据采集无法实时跟踪，产品质量问题难以追溯处理、信息不透明、不及时问题。

2.可改造场景

场景 1：在线智能检测场景

针对传统人工检测存在的效率低、一致性差等问题，可以构建专门的机床在线智能检测系统。该系统融合了物性成分分析、机器视觉检测等先进技术，对金属切削过程中的产品质量进行实时监测。

通过机器视觉技术，系统能够精准捕捉切削过程中的产品表面缺陷、尺寸偏差等关键信息。同时，结合物性成分分析技术，对切削后的金属材质进行快速准确的成分检测，确保产品质量符合标准。

场景 2：质量追溯与分析改进场景

构建全面的质量管理系统。该系统应用条码、二维码、RFID 等技术，对机床的原料、设计、生产、使用等全生命周期的质量数据进行精准标识和高效采集。通过 5G 技术的快速传输能力，实现数据的实时同步和共享，确保质量信息的准确性和完整性。

同时，系统还可集成标识解析和区块链技术，确保质量数据的可追溯性和不可篡改性。通过对这些数据的深度分析，我们能够快速定位质量问题源头，进行精准追溯，

并为质量优化提供数据支持。

3. 解决方案建议

解决方案 1：在线智能检测

某机床企业在已有数控机床的基础上，配置无线电或蓝牙测头，配置收集、计算分析的软件，根据不同的加工零件匹配不同类型的探针（球头探针以及 L 形、星形，平底柱形等异形探针）。

通过软件多种安全策略保证测量路径无干涉，并与机床双向同步刀具列表，此外，实现对机床主轴热伸长进行校正。

在线测量系统的软件可以根据数模中拾取特征自动提取，根据参数自动规划测量路径，也可以进行测量直线、平面、圆、椭圆、球、圆柱、圆锥、圆环等 2D/3D 特征。

显示误差曲线图，能够直观了解误差的数值大小、变化趋势以及判断测量结果是否处于公差带内，显示误差云图，通过颜色的变化，能够直观了解误差的分布。

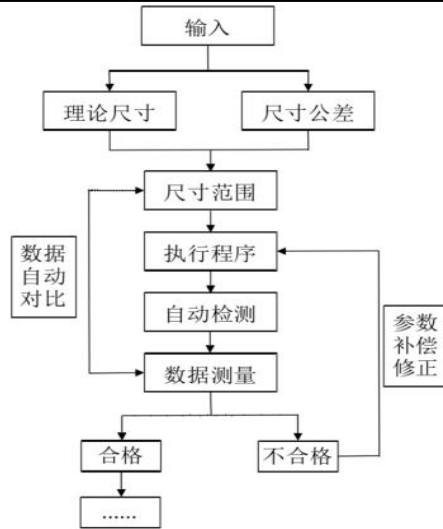


图 24 加工零部件在机测量

解决方案 2：质量追溯与分析改进

建立 QMS 质量管理体系。质量追溯系统通过集成多种数据采集技术，如 RFID、条码设备、数控设备等，实现对生产过程中的海量数据进行实时、准确、全面地采集。这些数据用于生成质量分析报表，如合格率、不良率等，帮助企业优化生产流程，降低不良率。

设备在线检测数据自动采集上传 QMS 系统。车间建立专门的试验中心对产品进行质量检测，试验中心配备了三坐标测量机、数据采集分析仪等各型完备的智能检测装置，对数控机床整机及主要功能部件的功能、性能、寿命、刚度、精度、形变、振动、动平衡、高低温热性能、可靠性和一致性等进行全方位检测。所有检测数据自动采集实时上传质检平台系统，通过质检管理平台系统进行统计分析，根据系统预设的标准值进行自动分析比对生成各

种分析报告和性能评估报告。

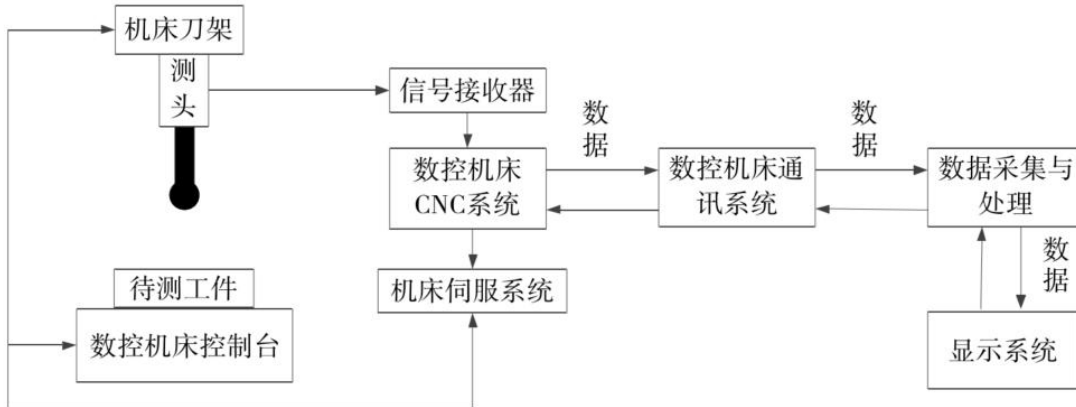


图 25 机床加工现场的检测数据在线上传 QMS 系统内

QMS 系统对采集的产品质量检测数据进行分类统计；生成质量统计报表及相应报告，通过 QMS 系统可以查询产品历史检测数据。



图 26 加工部件产品质量分析

基于大数据和机器学习的质量追溯，实现产品质量信息的快速精准追溯。通过对上述加工过程中采集的数据进行大数据分析和机器学习，可以确保高加工质量和生产力。

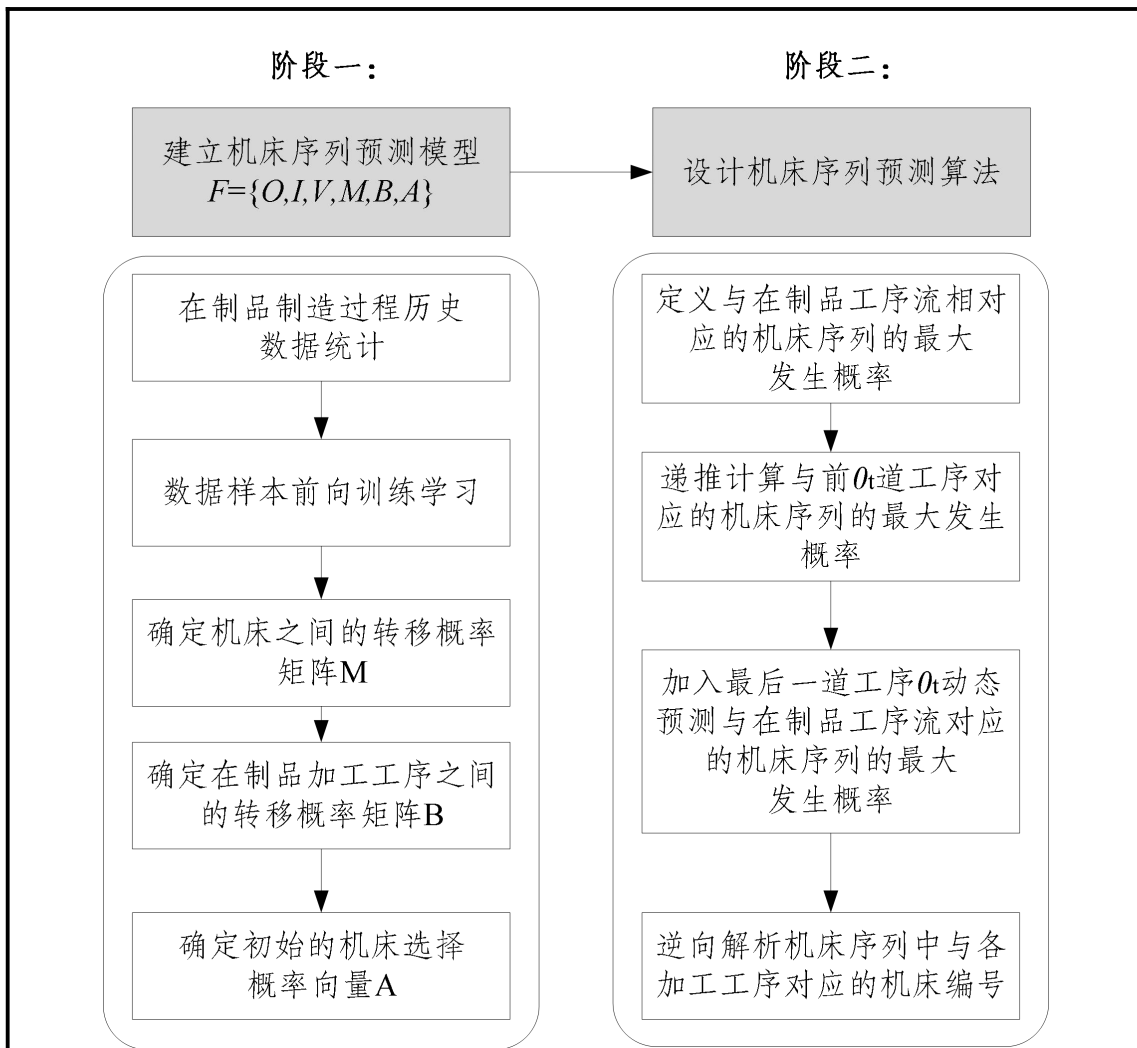


图 27 一种基于在制品工序流的机床序列编排动态预测方法与流程

以车床装配为例，通过改进的 QMS 系统，可精准地追溯到数控卧式车床各个装配质量控制环节的精度数据。例如零件来料检验记录，部装、总装装配过程精度数据记录以及检验精度数据记录。当有一项项目检验不合格时，则此机床在当前检验项目工序会停止流转，只有此项检验合格之后才能流转到下一道工序，进行下一个工序检验。此外，还可以通过 QMS 系统来追溯机床功能部件的零件编号、品牌、生产日期、操作人员、中英文合格证等信息记

录，实现实物与信息的一致性和共享性，实现生产装配、检验过程透明化，实时掌握生产现场动态，实现产品质量信息全程可追溯。

同时，机床企业在实施 QMS（质量管理系统）与 MES（制造执行系统）等系统结合时，还需要注意以下几个方面：

无缝集成与数据互通。QMS 系统应采用开放式架构，能够与主流 MES 系统无缝对接，确保生产过程中的质量数据实时传输，实现双向数据流。这种集成方式可以提高生产效率和数据准确性。

实时监控与预警机制。通过强大的实时监控功能，跟踪生产过程中的质量指标，并利用智能预警机制及时发出警报，让质量管理人员能够提前采取干预措施。

智能分析与持续改进。QMS 系统作为分析引擎，深度分析 MES 传来的海量数据，挖掘潜在问题和改进机会，帮助管理者洞察质量趋势并进行持续改进。

全程追溯与快速定位。实现从原材料到成品全过程质量追溯，每个产品有唯一身份标识，记录所有质量相关数据，以便快速定位和处理质量问题。

流程自动化与效率提升。将质量管理流程数字化和自动化，减少人为错误，提高工作效率。

灵活配置与适应性。提供强大的配置功能，根据企业需求个性化设置，适应移动互联网时代，支持移动应用使用。

数据共享与系统集成。MES 系统可以为 QMS 系统提供实时生产数据，包括生产进度、设备状态和质量检测结果。QMS 系统利用这些数据来分析质量趋势和改进生产过程。

自动化关键质量流程。通过 MES+QMS 解决方案实现质量提高和成本降低的自动化，包括变更控制管理、纠正措施/预防措施和审核管理。

供应商管理与质量监控。评估外部资源如供应商，以确保每个阶段的质量。监控准时交货、缺陷率、产品成本等，并与供应商合作进行产品设计，建立自动质量 KPI 监控。

(七) 设备管理环节

1. 存在问题

机床种类多样，不同品牌、型号的机床数据接口和通信协议不统一，导致数据采集难度大；数据格式多样，缺乏统一的数据标准和规范，导致数据整合和管理困难；缺乏专业的数据分析模型和算法，难以对机床的运行状态进行准确评估；异常检测机制不完善，无法及时发现机床运

行中的异常情况；设备维护往往依赖于人工经验，缺乏数据驱动的决策支持；设备故障诊断和预测能力不足，导致意外停机频发。

2.可改造场景

场景 1：设备运行监控场景

为解决设备数据全面采集难、统一管理难的问题，部署专门的设备运行监控系统。该系统集成了智能传感技术，能够实时、准确地采集机床运行过程中的各种数据，如振动、温度、转速等。

同时，借助 5G 技术的高速传输特性，确保采集到的数据能够迅速上传至监控中心，实现数据的实时分析和处理。此外，系统还采用了多模态数据融合技术，将来自不同传感器的数据进行整合和分析，以更全面地了解机床的运行状态。

通过上述技术的应用，能够实现了设备数据的实时采集、状态分析和异常报警，及时发现并处理潜在故障，有效提高了金属切削机床的运行效率和可靠性。

场景 2：设备智能运维场景

为应对设备运维成本高、非计划停机频次高等挑战，我们部署了智能传感与控制设备，这些设备能够实时监测机床的各项运行参数。

同时，建立设备运维管理平台，该平台集成设备故障

知识图谱、故障机理分析、预测性维护等先进技术。通过故障知识图谱，可以快速定位故障原因；故障机理分析能够深入了解故障发生的本质；通过预测性维护技术能够提前预警潜在故障，实现设备的主动维护。

3. 解决方案建议

解决方案 1：设备运行监控

构建一个高度灵活且可扩展的数控机床的工业大数据平台，该平台支持多种通信协议（如 OPC UA、Modbus、MQTT 等）和数据接口，以适应不同品牌、型号机床的数据传输需求。通过部署智能传感器、适配器及边缘智能网关，可实现对机床运行参数的全面、实时采集。此外，平台应内置数据格式转换模块，将采集到的原始数据统一转换为标准格式，为后续的数据整合与分析奠定基础。

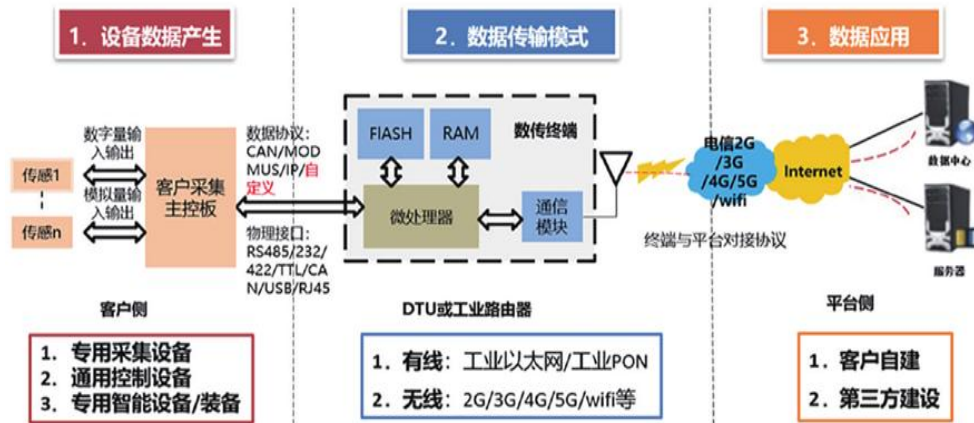


图 28 工业数据采集过程示意图

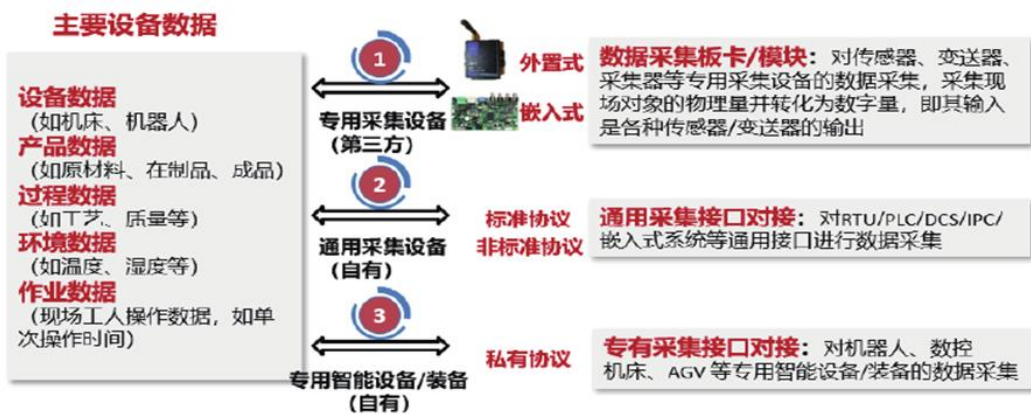


图 29 工业数据采集主要类型

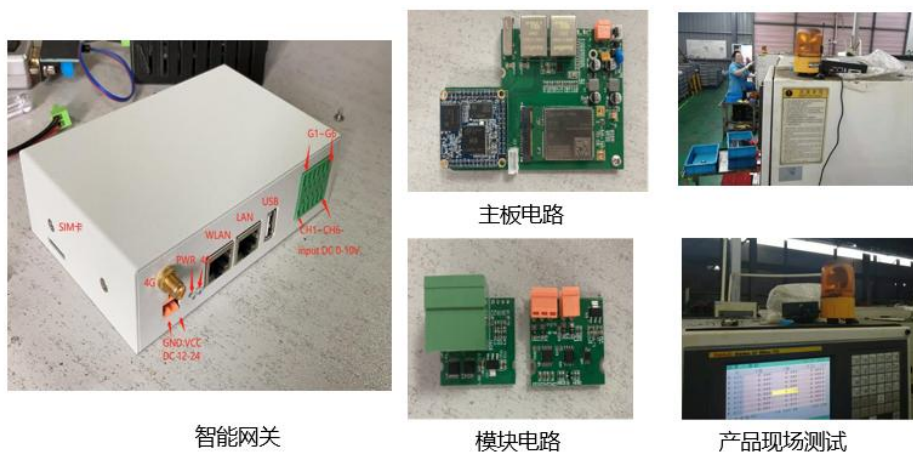


图 30 智能网关对终端机床现场加工数据采集

基于改进的深度卷积神经网络的多通道数据特征自学习模型，通过多维度的特征提取与融合，深度挖掘多通道数据中针对机床故障异常等关键特征数据，涵盖数据采集、存储、处理、分析等各个环节。利用元数据管理技术，对数据的来源、格式、含义等进行详细描述，确保数据的准确性和可追溯性。同时，建立集中式的数据仓库或数据湖，实现数据的统一存储和管理，打破数据孤岛，促进数据在不同系统间的流动与共享。

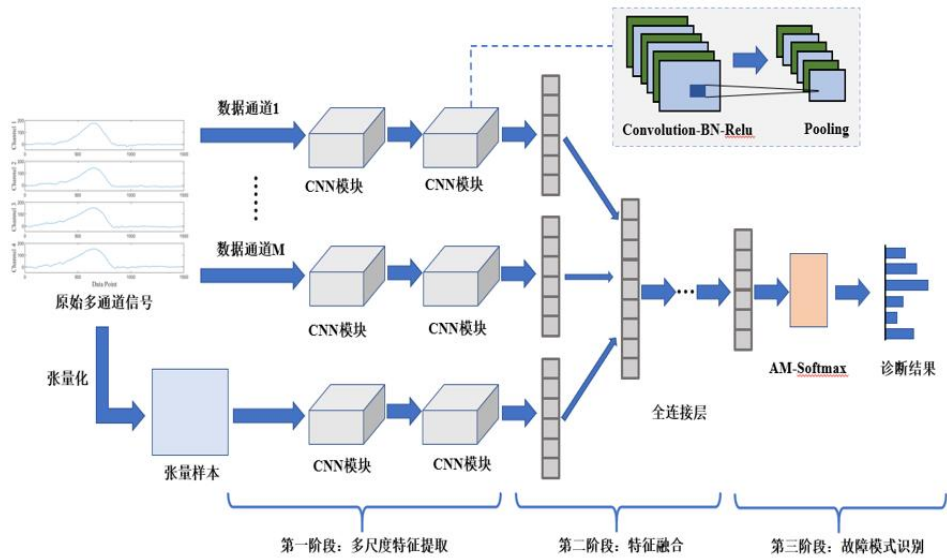


图 31 机床多通道特征融合的深度学习模型架构

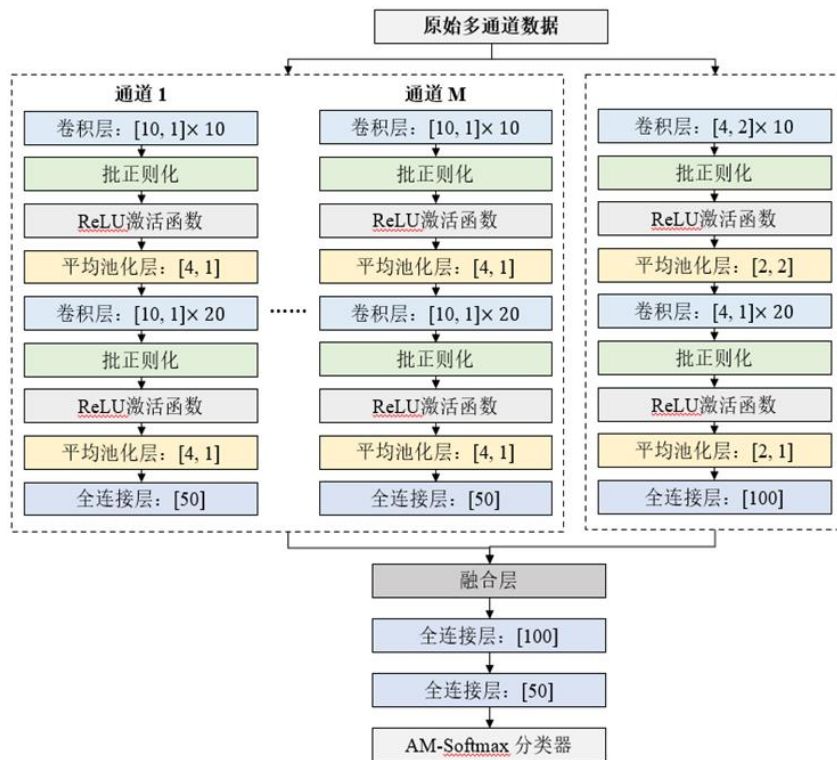


图 32 模型结构及数据参数设置情况

结合机器学习、深度学习等人工智能技术，开发针对金属切削机床运行状态的智能分析模型。例如下面的基于机床故障诊断的多通道数据分析模型，应能够基于历史数据和实时数据，识别机床的正常运行模式与异常模式，实现

对机床健康状态的精准评估。通过持续训练和优化模型，提高其预测准确性和鲁棒性。此外，还可以利用算法对机床的运行效率、能耗等进行优化分析，为生产调度和节能降耗提供决策支持。

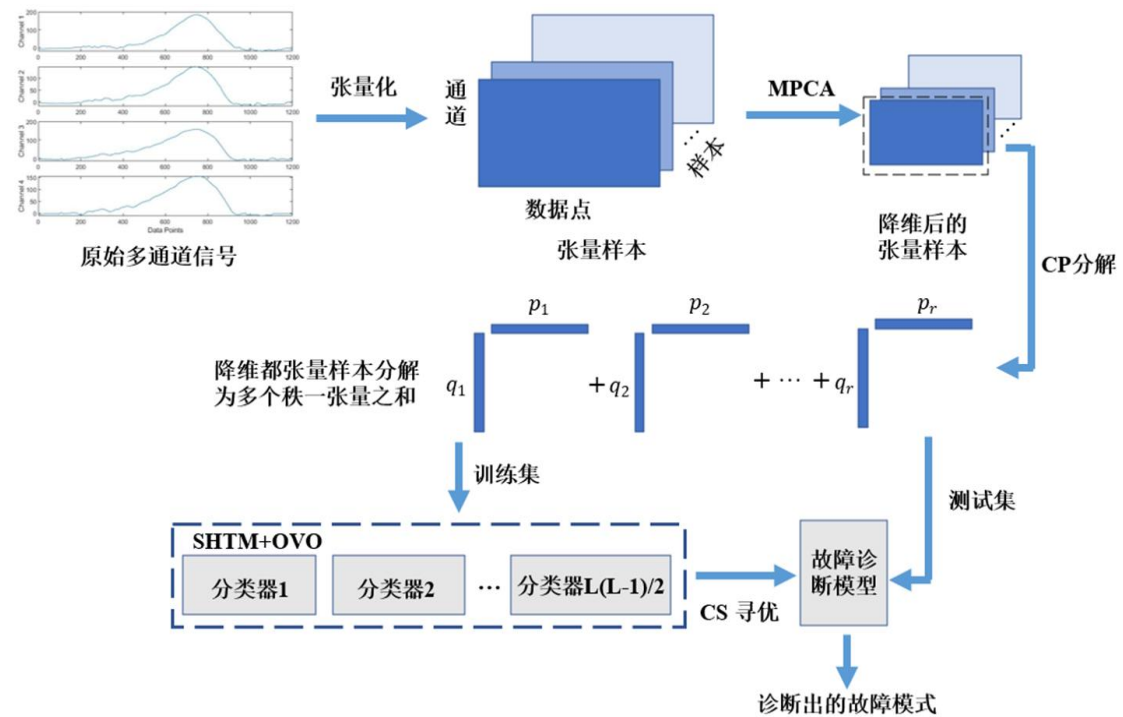


图 33 基于故障诊断的机床多通道数据分析模型

建立一套完善的异常检测体系，结合统计过程控制（SPC）、基于规则的方法、无监督学习等多种技术，实现对机床运行状态的实时监测和异常识别。一旦检测到异常情况，系统应立即触发报警，并通过短信、邮件、APP推送等多种方式，及时将报警信息发送给相关人员。系统提供详细的异常分析报告，包括异常发生的时间、地点、原因及可能的解决方案，帮助维修人员快速定位问题并采取措施。

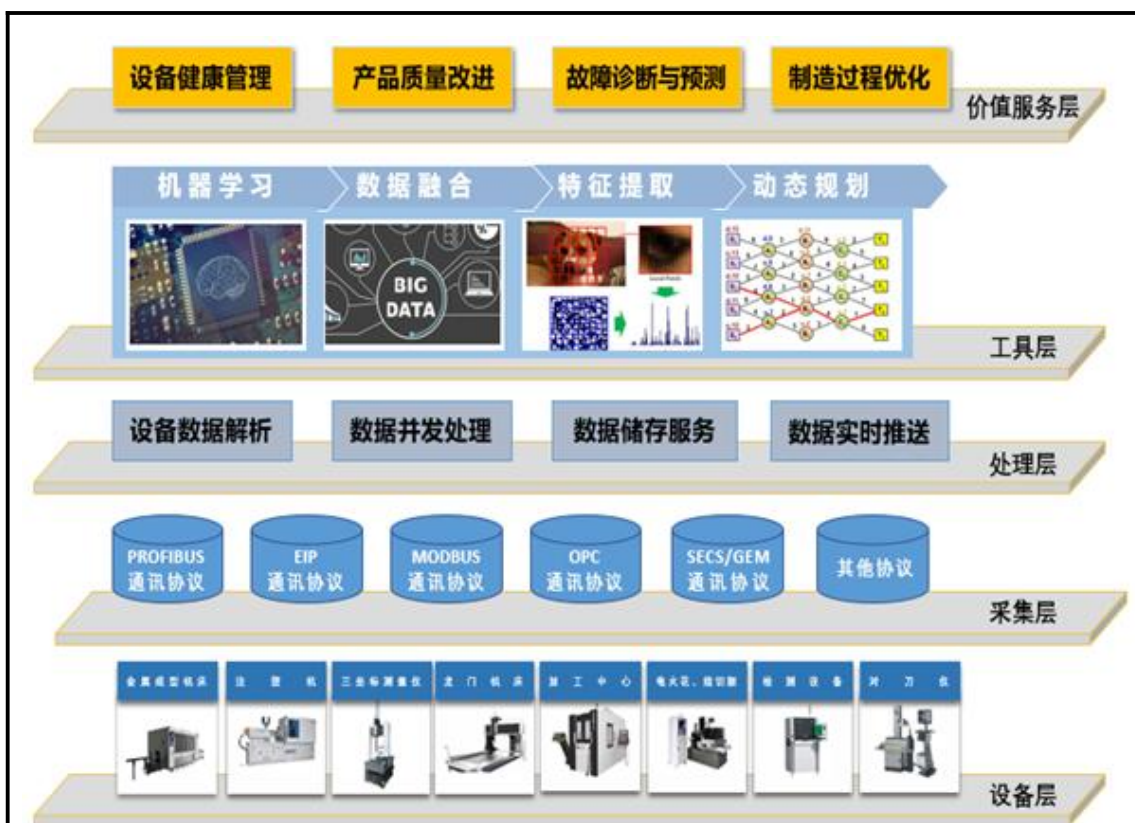


图 34 数控机床数据采集与设备运行监控平台整体架构

解决方案 2：设备智能运维

某机床企业针对整机开展故障分类、诊断模型研究，基于数控机床加工现场多模态数据（如振动、电流、声学信号等）和非结构化文本数据的信息融合方法，设计自学习深度强化学习算法，探索多源信息驱动下机床故障诊断自决策。

例如，针对机床状态监测中振动信号的特征及预测需求，本项目选择了基于深度学习中的 LSTM 模型（Long Short Term Memory（长短时记忆网络））进行仿真，结合过去所有预测数据对未来一段时间的特征值进行预测。它能够捕获输入序列中内在的关联信息，并且能够选择性

地保留一些重要的信息数据。结果显示其在多数情况下的预测结果与实际测量数据的走势还是基本相同的。

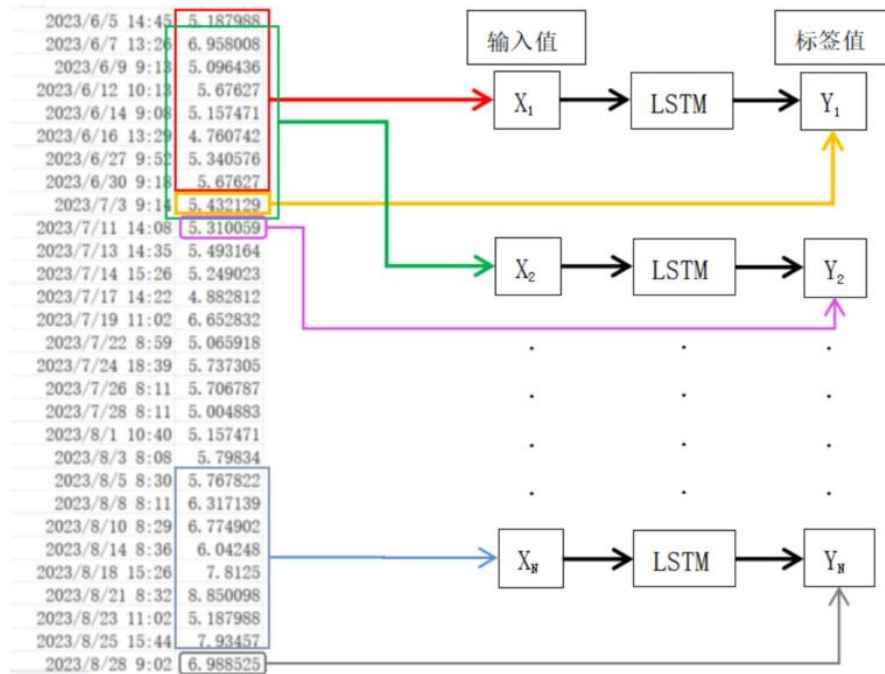


图 35 基于 LSTM 模型的机床振动故障诊断的算法验证

为了实现机床等设备运行状态的量化评估，开展机床及成套装备综合健康指数的构建，提取了传统机床等制造设备加工中不易观察但对设备运行状态至关重要的关键影响因素，并将这些因素进行数据融合，通过对影响因素进行权重分配，机床健康指标的分析结果以量化数值的形式进行显示输出，可以让操作人员直观地观察设备的当前运行情况。这种方法降低了对操作者技能的要求，提高了设备运行状况的综合分析能力，实现了对设备健康状态的有效监测与评估。

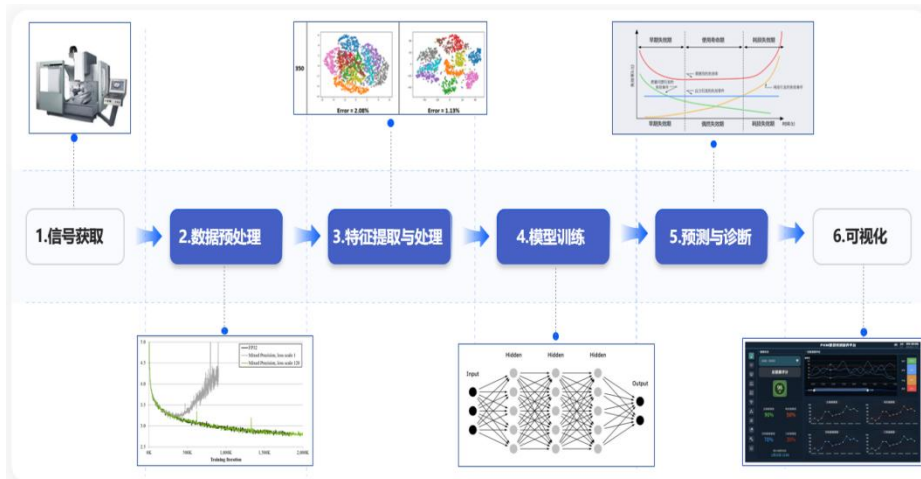


图 36 机床健康指数构建

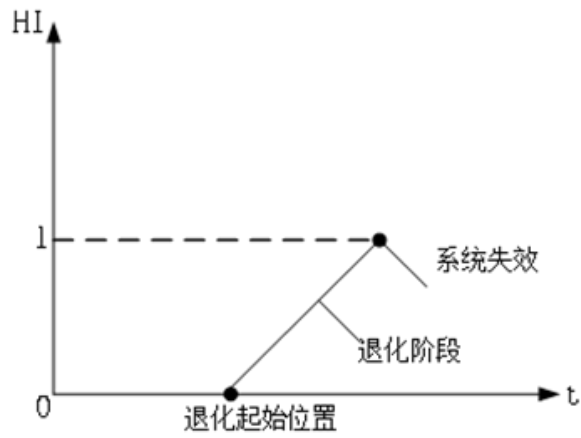


图 37 机床健康因子变化过程