

团体标准
《工业机器人激光加工协同控制通用代码规范》
编制说明

2025年5月9日

《工业机器人激光加工协同控制通用代码规范》编制说明

一、标准制定的必要性

在我国全面推进新型工业化建设的战略框架下，智能制造作为“制造强国”战略的核心实施路径，正加速驱动产业基础高级化与产业链现代化。激光加工技术凭借其“非接触、高精度、高能量密度”优势在汽车、航空航天、电子、医疗器械、新材料等领域获得广泛应用，已完成从辅助工艺装备到战略性基础制造平台的转型升级。行业数据显示（《中国激光产业发展报告2024》），我国激光产业规模持续攀升，2023年达2435亿元，2024年突破2650亿元，其中激光加工高端装备制造环节贡献率达38.7%，凸显其产业链核心地位。

工业机器人协同激光加工装备是通过将多轴联动的空间轨迹控制、激光器工艺参数控制与加工头行为控制进行耦合，实现激光焊接、切割、打标、清洗、熔覆等任务的高柔性执行，大幅提升复杂工件的加工效率与精度。尤其是在柔性制造与定制化需求不断上升的背景下，工业机器人激光加工协同加工设备逐渐成为主流。然而，当前市场上核心部件如工业机器人、激光器、加工头等多由不同厂家独立研发生产，存在控制逻辑不统一、通信接口标准不兼容、运动控制指令语义不一致等问题。企业在系统集成过程中面临高度定制化开发、调试周期长、后期维护难度大等难题。据激光加工行业协会调研，超过50%的应用企业在部署协同驱控系统时需要投入大量资源开发适配层与中间协议，严重制约了系统的推广效率和成本效益。这种“接口孤岛化”现象，本质上反映出当前尚缺乏统一的、具有行业普适性的协同控制代码标准。因此，亟需构建一套覆盖激光加工协同任务全流程的通用控制语言体系，作为实现设备模块解耦、协作行为融合与工艺逻辑抽象的基础性规范，为行业提供统一的控制代码接口，推动设备互联互通与软件生态兼容。

代码层级的协同控制能力构建，是制造控制系统体系演进的关键一环。早期数控系统通过G代码实现了对机床运动的基本控制，自20世纪50年代起，已有包括RS-274

(EIA)、ISO 6983、DIN 66025等在内的国际标准确立了基础的语法规则。我国也发布了GB/T 8129-1997《工业自动化系统 机床数值控制 词汇》、GB/T 29824-2013《工业机器人 用户编程指令》以及GB/T 38267-2019《机床数控系统 编程代码》等一系列标准，支撑了传统数控设备的功能扩展。

然而，上述标准主要面向单一控制对象而非多模块协同控制场景。激光加工系统涉及激光器出光状态调控、光斑运动轨迹调度、路径参数嵌套等多维变量控制，对代码结构、语义绑定与时序执行机制提出了更高要求，传统G代码结构与控制逻辑难以满足此类场景下的复合性需求。国际上尚无统一标准对工业机器人与激光器、加工头等模块之间的协同控制代码进行系统定义。各厂商多采用私有协议或封装函数进行路径与工艺参数的传递，不仅阻碍了跨平台协作与标准化建模，也对工业软件的生态兼容性构成挑战。由此可见，建立面向工业机器人激光协同加工任务的通用代码标准，是填补行业标准缺失、实现智能制造底层代码体系自主可控的战略所需。

《工业机器人激光加工协同控制通用代码规范》的制定，聚焦于建立一套以“统一编码结构、标准参数格式、规范控制逻辑”为核心的控制代码系统。通过统一指令体系，实现对机器人多轴轨迹、激光器功率/频率/脉宽、加工头光斑行为等关键变量的统一控制接口设计，保障激光加工过程的精准协同与实时响应，构建“控制-执行-感知”一体化的协同机制。标准规范支持多设备、多品牌、多场景的兼容适配，为系统集成商、设备制造商和用户企业构建开放、通用的软硬件接口，极大降低开发成本和维护复杂度，提升系统移植与复用能力。通过提升加工系统控制效率与通用性，可显著降低重复开发与资源浪费，促进产业链上下游协同升级，加快智能制造从“技术突破”迈向“规模化落地”。

综上所述，《工业机器人激光加工协同控制通用代码规范》的制定是支撑激光加工行业高质量发展的基础性工程，也是我国制造业标准体系自主构建、补链强链的重要实践。其必要性不仅体现在当前技术与市场的迫切需求，更是产业发展范式转型中的“控制语言革命”核心组成部分。故申请立项。

二、标准编制原则及依据

1、按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》要求进行编写。

2、参照相关法律、法规和规定，在编制过程中着重考虑了科学性、适用性和可操作性。

三、项目背景及工作情况

（一）任务来源

根据《中国高技术产业发展促进会标准化工作委员会团体标准管理办法》的有关规定，经中国高技术产业发展促进会标准化工作委员会及相关专家技术审核，批准《工业机器人激光加工协同控制通用代码规范》团体标准制定计划，项目计划编号为CHI2025003。本标准由浙江摩克激光智能装备有限公司提出，中国高技术产业发展促进会归口。

根据计划要求，本标准完成时限为6个月。

（二）标准起草单位

本标准的主要起草单位是浙江摩克激光智能装备有限公司，负责标准文档起草及相关文件的编制等。温州大学、奔腾激光（浙江）股份有限公司、中国民用航空飞行学院、深圳技术大学、温州大学激光与光电智能制造研究院、武汉飞成光电科技有限公司、亘弘（北京）光电科技有限公司等单位参与起草，负责标准中重要技术点的研究和建设，并参与标准内容的讨论。

（三）标准研制过程及相关工作计划

1、前期准备工作

项目立项前，标准编制小组查阅、研读相关国内外文献，梳理主流激光加工机器人系统指令结构，积累了丰富的经验，并多次与相关行业人员进行调研、交流，广泛征求标准制定方面的意见和建议。

2、标准起草过程

2025年4月28日，由中国高技术产业发展促进会标准化工作委员会向国家标准委全国标准服务平台提交立项，立项编号为：CHI2025003，并向全社会公示了15日。

2025年4月30日，浙江摩克激光智能装备有限公司和温州大学组织了标准启动会暨第一次起草会议，谈论了标准各章节相关内容，确定了分工和编制工作的各项任务完成时间节点。

2025年5月10日，组织了第二次起草会议，确定标准内容的草案。

2025年5月15日，将标准草案提交中国高技术产业发展促进会标准化工作委员会，通过审核。

3、征求意见情况

2025年7月13日，报送了国家标准平台，并向全社会公开征求意见30日。

（四）标准依托的主要试验（或验证）情况分析

1、实验环境与系统布置：

1) 场地配置与任务建模

选取具备多轴机器人与激光器、振镜加工头、冷却辅助系统等完整构成的工业激光协同加工单元作为验证平台。现场配置典型测试工件（如大型复杂曲面样品、不规则焊接件等），以真实加工任务对标准中的程序段执行与逻辑控制进行建模，确保试验对象具备多轴轨迹复杂度、激光功率调节跨度以及工艺参数耦合度等代表性。

2) 设备调试与接口配置：

在试验准备阶段，对协同系统内各关键模块进行接口协议统一配置，确保标准通用代码可直接调用机器人驱动控制接口、激光器触发/功率配置接口、加工头振镜控制协议等。通过标准语法结构模拟复杂加工路径与多模态指令集，评估程序解析与执行逻辑的准确性。

3) 安全与容错机制部署：

试验系统设置多级安全机制，包括激光状态互锁、运动范围限位、异常状态中断处理等。标准中嵌套使用逻辑型结构化指令（如IF、GOTO）模拟工况异常判定与程序跳转流程，验证代码系统的鲁棒性与可恢复性

2、协同控制流程验证

1) 指令执行一致性评估：

依托“L+功能代码+参数段”的语法结构，调用典型功能型指令（如L01、L02控制机器人轨迹；L10、M12控制激光功率/频率）执行加工过程。通过三维轨迹记录仪与激光功

率探头实时采集机器人运动与激光输出状态，量化对比程序指令执行路径与实际物理行为之间的匹配度，验证控制代码的执行一致性与参数传输有效。

2) 逻辑控制稳定性验证：

使用结构化流程指令（FOR、WHILE、IF等）实现重复扫描、条件判断、路径跳转等典型控制逻辑。试验通过高频采样方式分析程序执行过程中的堆栈结构状态变化与跳转边界正确性，验证逻辑语义的完整性与嵌套逻辑的可闭合性，确保标准在复杂路径任务中的流程控制安全。

3) 同步控制能力验证：

稳定性验证：将机器人多轴插补、激光功率切换与加工头路径振镜调节进行协同调度，通过程序中并列调用不同功能型指令，实现时间域上的协同动作同步。利用多通道示波器分析设备响应信号之间的时序关系，判断标准所定义的“协同机制”在系统架构中的实际表现能力。

3、多工艺任务综合测试

工艺任务均通过独立的“L000X”编号程序文件调用，运行过程中采集执行日志与状态反馈，最终生成加工结果数据包用于溯源分析与模型修正。

1) 激光焊接任务：

测试功率控制、扫描速度指令与机器人位姿切换的同步执行能力。

2) 激光打标任务：

测试加工头控制指令（L20系列）与图形路径叠加逻辑。

3) 激光清洗任务：

测试动态参数修改与实时程序段切换功能。

4、数据采集与分析

1) 数据整合与映射：

采集的机器人轨迹点云、激光输出参数、程序执行日志等数据由统一处理平台整合归一化建模。每条指令执行结果均绑定唯一行号与执行时间戳，实现从代码结构到设备行为的“多维度映射”。

2) 指标评估体系构建:

依据“控制精度、路径误差、延迟时间、逻辑一致性、协同响应时间”等五大维度建立评估模型。通过对比标准指令执行路径与实际加工路径偏差，构建误差分布图与动态响应曲线，验证标准代码结构的可预期性与优化性。

3) 反馈优化机制:

试验过程中发现的代码语法冲突、逻辑歧义、路径重复与设备响应不一致等问题，均在标准制定过程中迭代修正。标准最终版本实现了语义约束、结构闭合、指令去冗、流程封装等技术性提升，显著提升了应用通用性与工业工程友好度。

5、实际应用效果

标准在试点企业（激光设备集成商、机器人系统商）部署后，获得了如下反馈:

- 1) 控制逻辑清晰、结构易解析，程序开发效率提升约40%；
- 2) 激光加工路径控制精度平均提升15%，加工一致性提升显著；
- 3) 支持跨设备（不同厂商激光器及机器人）代码迁移，大幅降低系统集成适配成本；
- 4) 在某智能装备企业部署中，系统调试周期缩短3周以上，设备上线率提升22%。

四、试验验证的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效益、社会效益和生态效益

1、主要试验或验证的分析

(1) 技术性能验证:

机器人控制与激光协同精度评估：试验通过调用标准指令实现机器人与激光器的协同作业任务，在多轴联动激光焊接与高速扫描打标过程中，通过激光功率波形采样与机器人位姿追踪系统，验证通用代码在复杂路径控制、速度调节与工艺参数耦合下的执行一致性。

加工头与辅助模块多指令兼容测试：对加工头控制指令、冷却系统控制指令等功能段指令进行组合调用测试，模拟典型工业场景下的并发操作及设备状态切换，确保各模块间指令识别无冲突、资源调度无阻塞。

逻辑控制流程的完整性与容错性验证：使用嵌套循环、跳转指令组合构建复杂流程，通过运行日志与调试断点追踪，验证逻辑结构的正确闭合性、分支逻辑的执行可控性与异常指令处理的系统容错机制，确保标准支持高复杂度任务流程建模。

(2) 应用安全与异常管控机制测试：

为满足工业级安全控制要求，标准试验同步建立设备状态监控与指令执行保护机制。测试表明，标准逻辑型指令支持在设定阈值条件触发下的路径中断、功率限制及冷却控制逻辑调度，有效防止激光输出误触发、路径越限等安全风险场景发生。

2、预期的经济效果

降低集成与开发成本：标准统一了机器人、激光器、加工头等异构模块间的控制语言接口，避免不同设备之间因通信协议差异产生的重复适配开发，缩短工程集成周期约25%到40%，直接降低项目初期工程开发成本。

提高设备运行效率与利用率：标准通过支持模态/非模态指令结构、动态参数切换及程序复用，提升设备在多批次、小批量灵活生产场景下的切换响应效率。统计显示，经标准部署的激光加工生产线，其平均停机调试时间减少30%以上，单位时间产出显著提升。

延长设备寿命与优化维护成本：逻辑型结构中的自诊断与流程控制机制支持关键设备状态的动态调节与容错处理，有效避免因指令冲突或流程失控带来的设备损伤，降低设备磨损率，提升运维计划性与可预测性，长期可节省维保支出10%到15%。

3、真实性验证

现场工艺级验证：标准在若干激光装备制造企业（如奔腾激光、摩克激光）及研究机构实际工艺产线上部署，涵盖激光切割、焊接、打标、熔覆等多工艺场景，均获得正向验证反馈。

持续反馈与版本优化机制：持续收集数据并进行分析，根据反馈进行优化和调整，确保方案的持续改进和完善。

用户反馈采集与场景回归测试：收集操作人员、管理人员等用户的反馈意见，了解实际效果，作为后续改进的依据。

五、标准制定的基本原则

标准编制过程中，遵循了以下基本原则：

- 1) 标准需要具有行业特点，分析方法与实践操作要积极参照采用国家标准和行业标 准。
- 2) 标准能够体现出产品的具有关键共性的技术要素。
- 3) 标准能够为产品的开发、改进指出明确的方向。
- 4) 标准需要具有科学性、先进性和可操作性。
- 5) 要能够结合行业实际情况和产品特点。
- 6) 与相关标准法规协调一致。
- 7) 促进行业健康发展与技术进步。

六、标准主要内容

本文件规定了工业机器人激光加工协同控制通用代码的术语定义、功能结构、语法规范、执行机制及代码应用结构等。

本文件适用于工业机器人协同驱控激光加工系统中涉及的通用控制代码体系的设计、应用与实施。

七、与有关法律法规和强制性标准的关系

遵守和符合相关法律法规和强制性标准要求。以下标准规范供本标准编制过程中参考和引用。

GB/T 38267-2019《机床数控系统 编程代码》

GB/T 29824-2013《工业机器人 用户编程指令》

GB/T 39134-2020《机床工业机器人数控系统 编程语言》

JB/T 11989-2014《机床数控系统术语与定义》

八、重大意见分歧的处理依据和结果

本标准在制定过程中没有出现重大意见分歧

九、后续贯彻措施

本标准可作为撰写工业机器人激光加工协同控制通用代码的推荐标准。

待本标准发布后实施前，将面向标准的各相关方开展标准宣贯工作。

建议该标准自发布之日起24个月内开始实施。

标准编制小组

2025年5月