

# 托辊生产线中基于FANUC的数据采集与群控方法研究

王浩然, 王海\*

沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2025年10月29日; 录用日期: 2025年12月4日; 发布日期: 2025年12月12日

## 摘要

针对生产线中大量CNC设备彼此同步协同, 数据下发上传等问题, 采用低端可靠的CNC系统完成要求, 文章提出基于FANUC数控机床的全自动化托辊生产线解决方案。通过FOCAS通信功能与计算机网络技术, 构建控制与数据采集系统, 实现多台数控机床的实时连接、数据交互及参数动态控制, 结合宏变量与参数化编程技术, 突破传统刚性生产局限, 实现柔性化加工。系统可实时监控设备状态、采集生产数据, 并通过上下层数据交互对接工厂管理系统。为托辊生产线的数字化、智能化转型提供了国产化技术路径, 对同类制造业自动化改造具有参考价值。

## 关键词

托辊生产线, FANUC数控机床, FOCAS通信, 柔性化生产, 多通道

# Research on Data Acquisition and Group Control Method Based on FANUC in Idler Production Line

Haoran Wang, Hai Wang\*

School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

Received: October 29, 2025; accepted: December 4, 2025; published: December 12, 2025

## Abstract

In response to the issues of synchronous collaboration among a large number of CNC equipment in the production line, as well as data downloading and uploading, a solution for a fully automated

\*通讯作者。

文章引用: 王浩然, 王海. 托辊生产线中基于 FANUC 的数据采集与群控方法研究[J]. 软件工程与应用, 2025, 14(6): 1194-1208. DOI: 10.12677/sea.2025.146106

idler production line based on FANUC CNC machine tools is proposed, which adopts low-end and reliable CNC systems. Through the FOCAS communication function and computer network technology, a control and data acquisition system is constructed to achieve real-time connection, data interaction, and dynamic parameter control of multiple CNC machine tools. Combined with macro variable and parametric programming technologies, it breaks through the limitations of traditional rigid production and realizes flexible machining. The system can monitor equipment status in real time, collect production data, and connect with the factory management system through upper-lower layer data interaction. This provides a domestic technological path for the digital and intelligent transformation of idler production lines, offering reference value for automation transformations in similar manufacturing industries.

## Keywords

Idler Production Line, FANUC CNC Machine Tool, FOCAS Communication, Flexible Production, Multi-Channel

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国制造业正加速从自动化、数字化向智能化转型,实现上层管理系统与底层生产设备的深度融合是关键。托辊在带式输送机中占据重要地位,市场需求庞大,但国内托辊生产多依赖人工或半自动化,存在效率低、成本高、质量不稳定等问题;国外生产线虽智能化程度高,但设备引进及维修成本高昂,研发出符合我国国情的自主全自动化托辊生产线具有一定的现实意义。

当前托辊生产线粗放式生产弊端凸显:质量控制方面,产品一致性差、次品率高;成本管理上,原材料浪费严重、能耗高且设备维护成本居高不下;生产效率层面,工艺流程不合理、调度混乱;人员管理存在员工技能不足、积极性低的问题;环境保护上,废弃物处理不当易造成污染。

随着制造业数字化转型,主流数控系统开放通信接口。FANUC 0i-TF CNC 数控系统专为车床设计,具有高可靠性、高精度、通用性强等优势。在全球托辊生产技术中,欧美虽以全自动化体系领先(如日本 NC 公司托辊径向跳动 $\leq 0.5$  mm、寿命 50000 小时,德国 DBT 等借模块化设计保障质量),但存在设备成本高、维修依赖原厂等问题,而机械工程师张明华实践发现,FANUC 0i-TF 作为低档 CNC,凭借高可靠性、高精度和通用性,通过优化托辊加工工艺(如轴体车削时间从 20 分钟缩至 12 分钟,圆度误差控制在 0.02 mm 内),以经济实用方式实现柔性加工,既降低维护成本又提升生产效率,为国内企业提供了可行方案。本文围绕该系统构建托辊生产线,运用 FOCAS 通信功能实现多机床数据交互,结合计算机网络技术研发控制与数据采集系统,为中小企业数字化生产筑牢技术根基,能用经济成本,让中小企业以较低设备投入、维护成本,借助 FOCAS 通信与自研系统,实现托辊柔性加工,突破国外技术设备高价限制;简化多机床协同与数据管理,贴合中小企业技术能力;适配多规格托辊生产,助力中小企业灵活响应订单,增强市场竞争力,逐步积累数字化转型经验。

## 2. 国内外研究现状

### 2.1. CNC 数据采集技术研究现状

CNC 数据采集是实现机床数字化管控的核心基础,其技术发展围绕“接口标准化”与“采集实时性”

展开。国外方面, FANUC 推出的 FOCAS 协议、Siemens 的 S7 协议已成为数控系统开放接口的行业标杆, 支持机床参数、运行状态等全维度数据的高速传输[1]。德国西门子开发的 Sinumerik Integrate 系统, 通过 OPC UA 协议实现了数控系统与 MES 的无缝对接, 数据采集延迟控制在 10 ms 以内[2]; 日本三菱电机的 MELSEC iQ-R 系列 PLC, 可通过专用接口直接读取 CNC 内部变量, 支撑柔性生产的参数动态调整[3]。

国内研究多聚焦于基于开放接口的二次开发与国产化适配。王建军等[4]基于 FOCAS 协议开发了数控机床数据采集系统, 实现了主轴转速、切削参数等数据的实时采集, 但在多机床并行采集的稳定性方面仍有提升空间; 李刚等[5]提出了一种基于 OPC UA 与 MQTT 协议的异构设备互联方案, 解决了不同品牌数控系统的数据融合问题, 但针对 FANUC 低端系统(如 Oi-TF)的优化不足, 部署成本较高。总体来看, 现有研究虽已实现数据采集的基本功能, 但针对中小企业低成本需求、适配托辊多规格生产的专用采集方案较少。

## 2.2. 柔性制造系统研究现状

柔性制造系统是应对多品种、小批量生产的核心技术, 其研究重点集中在参数化编程、工序协同与换型优化。国外方面, 欧美企业通过模块化设计构建柔性生产线, 德国 DBT 公司的托辊生产线可通过调整机械结构与程序参数, 适配 3 种以上规格产品的快速切换[6]; 日本 NC 公司采用宏变量驱动的参数化编程技术, 将托辊换型时间缩短至 10 分钟以内[7]。此外, 数字孪生技术的融合应用成为新趋势, 美国 GE 公司通过构建机床数字孪生模型, 实现了加工参数的离线优化与在线自适应调整[8]。

国内研究多围绕特定行业的柔性化改造展开。张宏等针对轴类零件加工, 开发了基于宏程序的柔性化编程系统, 通过变量赋值实现不同规格零件的加工, 但未涉及多机床协同与数据闭环; 刘军等设计了中小型企业柔性制造单元, 采用 PLC 与上位机协同控制, 但在参数下发的精准性与实时性方面有待提升。[9]目前, 国内柔性制造系统的研究多聚焦于高端装备领域, 针对托辊等通用机械产品、基于经济型 CNC 系统的柔性化方案研究较为匮乏。

## 2.3. 数字孪生在制造业中的应用现状

数字孪生技术通过构建物理实体与虚拟模型的实时映射, 为生产过程优化提供了新路径。国外方面, 西门子在其数字化工厂中应用数字孪生技术, 实现了生产线的虚拟调试与全生命周期管理, 设备利用率提升 20%以上; 法国达索系统的 3DEXPERIENCE 平台, 可通过数字孪生模型模拟托辊加工过程中的应力应变分布, 优化切削参数以减少工件变形[10]。

国内数字孪生技术的应用仍处于起步阶段。李明等构建了数控机床数字孪生模型, 实现了运行状态的实时监控与故障预警, 但未涉及加工工艺的动态优化; 赵亮等针对带式输送机托辊, 开发了数字孪生仿真系统, 用于设计阶段的性能验证, 但未与实际生产过程深度融合[11]。总体而言, 数字孪生技术在制造业中的应用已展现出巨大潜力, 但在托辊生产线的工程化落地、与经济型 CNC 系统的结合方面仍存在技术缺口[12]。

## 2.4. 本文研究定位与独特贡献

### 2.4.1. 研究定位

本文立足中小企业托辊生产的实际需求, 以经济型 FANUC Oi-TF 数控系统为硬件基础, 围绕“低成本、高适配、易部署”的核心目标, 研发控制与数据采集系统, 实现托辊生产线的数字化与柔性化改造, 填补现有研究在经济型 CNC 系统柔性化应用、托辊专用生产管控方案方面的空白。

### 2.4.2. 独特贡献

提出了“FOCAS 协议 + 宏变量 + PMC”的一体化技术方案, 实现了经济型 CNC 系统的深度开发,

避免了高额设备引进成本, 适配中小企业的经济承受能力。该方案通过 FOCAS 协议实现多机床数据交互与参数下发, 借助宏变量驱动的参数化编程适配多规格托辊加工, 利用 PMC 实现辅助动作的逻辑控制, 形成了完整的技术闭环。

开发了针对托辊生产的柔性化管控模块, 通过上位机与 CNC 的协同, 将加工参数(轴长、管径等)与生产指令绑定, 实现了参数下发、程序自适应调整、生产进度监控的全流程自动化, 换型时间缩短 60% 以上, 解决了托辊多规格订单响应慢的行业痛点。

构建了“数据采集 - 实时监控 - 异常预警”的闭环管理体系, 通过 FOCAS 协议实时采集机床运行数据与加工参数, 结合 MES 系统实现生产过程的数字化管控, 为中小企业积累数字化转型经验, 提供了可复制、可推广的技术方案。

本文的研究不仅能解决托辊生产效率低、质量不稳定的问题, 其技术方案对同类通用机械产品的自动化改造也具有重要的借鉴意义。

3. 控制与数据采集系统需求及方案

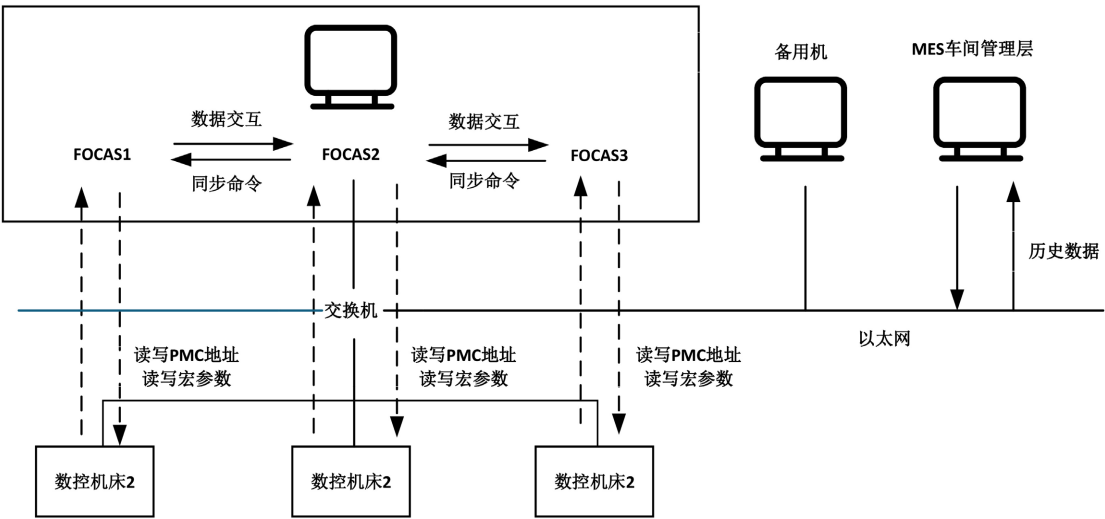
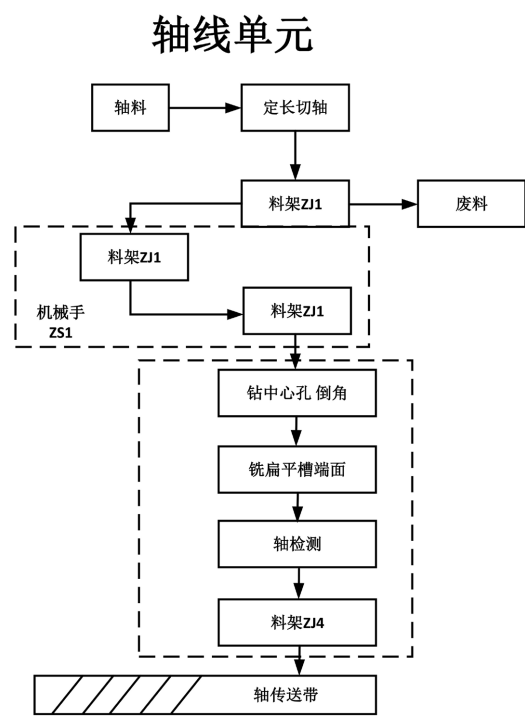


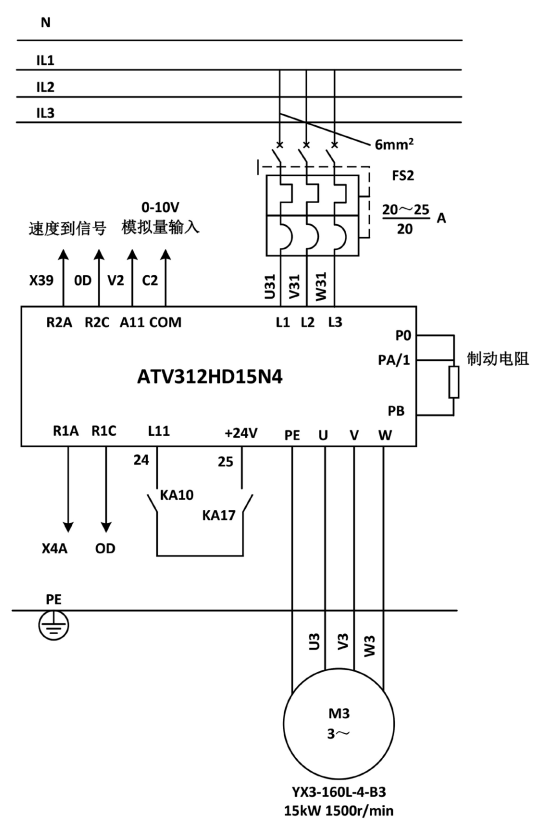
Figure 1. Structure of CNC machine tool production line with control and data acquisition system in idler production  
图 1. 控制与数据采集系统在托辊生产中的数控机床生产线结构

图 1 呈现数控加工车间的工业数据交互与设备管控架构。上位机依托 FOCAS (FANUC Open CNC API Specification, 发那科开放式数控系统应用程序接口规范)协议族, 即 FOCAS1、FOCAS2、FOCAS3, 经工业以太网交换机, 与数控机床 1、2、3 构建下行数据链路, 可发送同步控制指令, 并对机床的 PMC (Programmable Machine Controller, 可编程机床控制器)地址、宏参数执行读写操作, 实现数控系统参数化调控。同时, 上位机配置冗余备用机, 车间管理层 MES (Manufacturing Execution System, 制造执行系统)借助以太网, 通过历史数据采集接口, 获取机床全生命周期运行数据, 达成多台数控机床的集中式管控与生产数据整合分析, 为车间数字化生产管理提供底层数据支撑。

如图 2 所示, 在轴线单元的生产流程里, 首先对辅料进行定长切割操作。切割后的物料会被送到料架 ZJ1, 此过程中产生的废料会被分离出去。接着, 物料从料架 ZJ1 转移到料架 ZJ2, 机械抓手 ZS1 会参与到物料在料架 ZJ2 和料架 ZJ3 之间的转运工作。之后, 物料进入后续的加工环节, 先是进行钻中心孔、倒角, 再铣扁并平端面, 完成这些加工后会对轴进行检测。检测完毕的物料被送到料架 ZJ4, 最后通过轴传送带将成品输送出去。



**Figure 2.** Production example of axis unit  
**图 2.** 轴线单元生产实例



**Figure 3.** Partial electrical diagram of FANUC CNC machine tool  
**图 3.** FANUC 数控机床部分电气图

如图 3 所示，在托辊生产中，可充分借鉴轴线单元生产流程与 FANUC 数控机床变频调速系统。就生产流程而言，托辊辊体加工所用的钢管可作为“轴料”进行定长切割，得到辊体毛坯，切割废料按流程处理，后续毛坯经类似料架转运，借助机械抓手提升效率，加工环节里钻中心孔、倒角等操作能为辊体打造轴承安装孔位与表面，铣扁平槽端面可加工特定安装结构，轴检测保障辊体质量，最后合格辊体经传送带送往下一工序。从电气系统来看，托辊加工设备的电机控制可运用 FANUC 数控机床变频调速系统的原理，通过速度给定信号精准调节电机转速，满足不同加工工艺对速度的需求；同时，利用系统的转矩控制与制动管理功能，确保设备在启动、停止及负载变化时稳定运行，像在托辊装配环节，能让机械臂精准定位，提升装配精度，也能在托辊压装轴承时精确控制压力，保障压装质量。

4. 控制与数据采集系统主要功能模块开发

4.1. 控制与数据采集系统与各数控机床连接

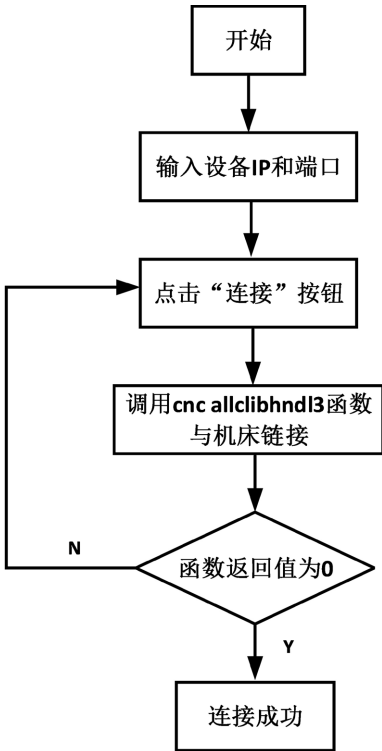


Figure 4. Connection schematic diagram of control and data acquisition system with CNC machine tool  
图 4. 控制与数采系统与数控机床的连接原理图

如图 4、图 5，FOCAS 库提供的 `cnc_allclibhndl3()` 函数支持通过不同 IP 地址连接多台机床，每次成功连接会返回唯一的句柄(Handle)，借此可对不同机床进行独立操作，同时库内还提供了 `cnc_rdparam()` (读取 CNC 参数)、`cnc_rdstatus()` (读取机床状态)、`pmc_rdpmcrrng()` (读取 PMC 信号)等多种数据采集函数。其实时性主要取决于三方面因素：一是机床 CNC 系统处理能力，例如 0 系列系统响应约 100 ms，而 30 i 系列可达 10 ms 级的高效响应；二是网络延迟，在局域网环境下通常可控制在 1 ms 以内；三是应用程序的轮询频率，建议设置大于 100 ms 的轮询间隔以避免阻塞。在系统应用规模上，对于小规模场景(≤10 台机床)，单台 PC 方案即可满足需求；而在中大规模系统中，为保证性能，建议每台 PC 负责 5~10 台机床的连接与数据交互。





Figure 5. Connection interface between control and data acquisition system and CNC machine tool  
图 5. 控制与数采系统与数控机床的连接界面

## 4.2. FANUC 数控系统 IODBPMC 的介绍

在 FANUC 系统中, IODBPMC (Input/Output Data Base for PMC)是专门用于存储 PMC (Programmable Machine Controller)输入输出信号、内部继电器、定时器、计数器等数据的内存区域。它主要负责实现 CNC (Computer Numerical Control)系统与机床侧设备之间的信号传输, 并存储 PMC 程序运行过程中的中间数据和状态信息。IODBPMC 包含多种数据类型, 例如输入信号(X)、输出信号(Y)、内部继电器(R)、定时器(T)、计数器(C)和数据表(D)等。

通过 FANUC FOCAS API 提供的库函数, 例如 `cnc_rdpmcrng`、`cnc_wrpmcrng` 和 `cnc_rdpmcdata`, 可以访问 IODBPMC 中的数据。每个信号都有一个特定的地址, 例如输入信号地址范围为 X0.0~X255.7, 输出信号地址范围为 Y0.0~Y255.7。在访问这些数据时, 需要注意地址的规则、系统的权限设置以及错误处理机制。

IODBPMC 的常见应用场景包括机床状态监控、远程控制、自动化生产以及数据采集等。例如, 通过读取输入信号(X)可以了解急停按钮或限位开关的状态; 通过写入输出信号(Y)可以控制电磁阀等执行器的动作。

以下为定义结构体的代码:

```
Focas1.IODBPMC0 pmcdata1 = new Focas1.IODBPMC0();
pmcdata1.type_a = 2;
pmcdata1.type_d = 0;
pmcdata1.datano_s = 0;
pmcdata1.datano_e = 0;
ushort Length = (ushort)(8 + (pmcdata1.datano_e - pmcdata1.datano_s + 1));
pmcdata1.cdata = new byte[Length];
for (int i = 0; i < Length - 8; i++)
{pmcdata1.cdata[i] = Convert.ToByte(i + 1);}
```

4.3. 机床 I/O 地址的读写

FOCAS (Fanuc Open CNC Application System)作为 FANUC 数控系统的开放接口，在托辊生产中兼具状态监控与参数调控双重价值。如图 6 所示，通过读取 R814.2 等地址，可实时获取数控机床的运行状态(如运行、暂停、报警等)，同时收集生产数量、加工时间、设备利用率等数据，经统计分析能定位生产瓶颈——例如某机床利用率低时，可通过调整生产计划优化任务分配。而其“更改地址”功能则可动态修改托辊加工相关参数，还能通过触发信号实现多台机床的协同作业，助力生产流程的柔性化调控与效率提升。操作人员借助 FOCAS 的地址读写功能，既能及时发现设备异常、避免生产中断，又能为生产管理提供数据支撑，推动托辊生产向智能化、精细化方向发展。

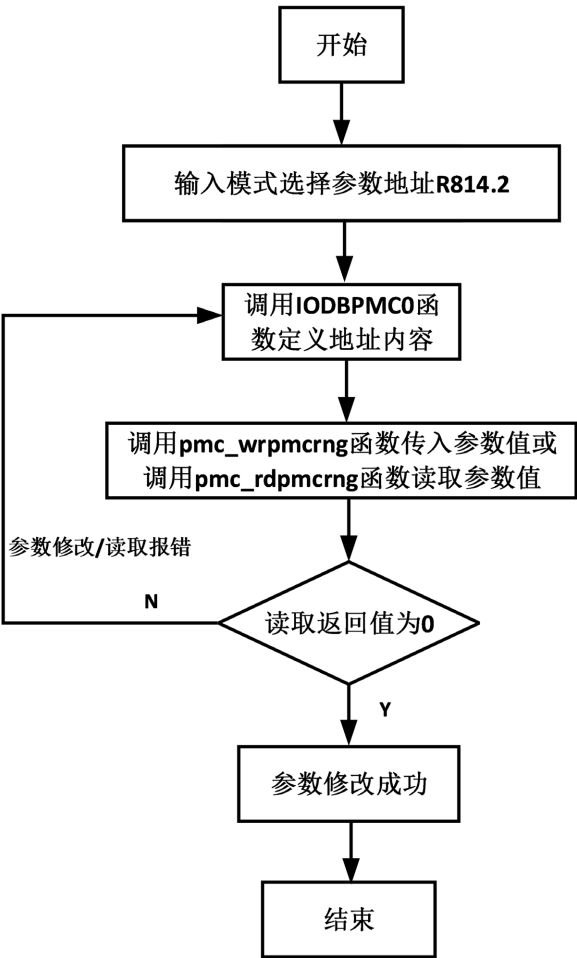


Figure 6. FOCAS reading address schematic diagram  
图 6. FOCAS 读取地址原理图

4.4. 整线监控

除了可以对多台数控机床进行参数读写外，控制与数据采集系统还可以显示整条生产线所有数控机床的状态，实时获取车间内数控设备的运行状态。

如图 7 所示，该系统可以实时读取生产线中各个机床的坐标，主轴，刀偏等数据，便于监控各台机床的运行状态。





Figure 7. Entire line monitoring  
图 7. 整线监控

### 5. 控制系统柔性化功能的实现

在 FANUC 数控系统 NC 端有许多过程可以通过使用变量的形式，使得程序的编译变得更加简单与灵活，也可以通过变量赋予的方式，实现一道加工程序用于不同加工场合的行为。通过变量之间的计算及程序的跳转，就可以使得编程人员极为快速地建立新的文档并用于不同生产加工场，能够极大减少加工需要的时间。本章通过对柔性化加工功能进行多方面的研究，在 FANUC 数控机床上实现该功能，整个柔性化功能可分为上位机端参数的下发与接收、机床通过 FOCAS 与 CNC 实现数据的接收进而控制内装 PLC，并将其运用于切管参数化以及切管宏程序等功能，并根据机床 M 代码的逻辑对其进行了解码操作，整个控制系统柔性化功能逻辑如图 8 所示：

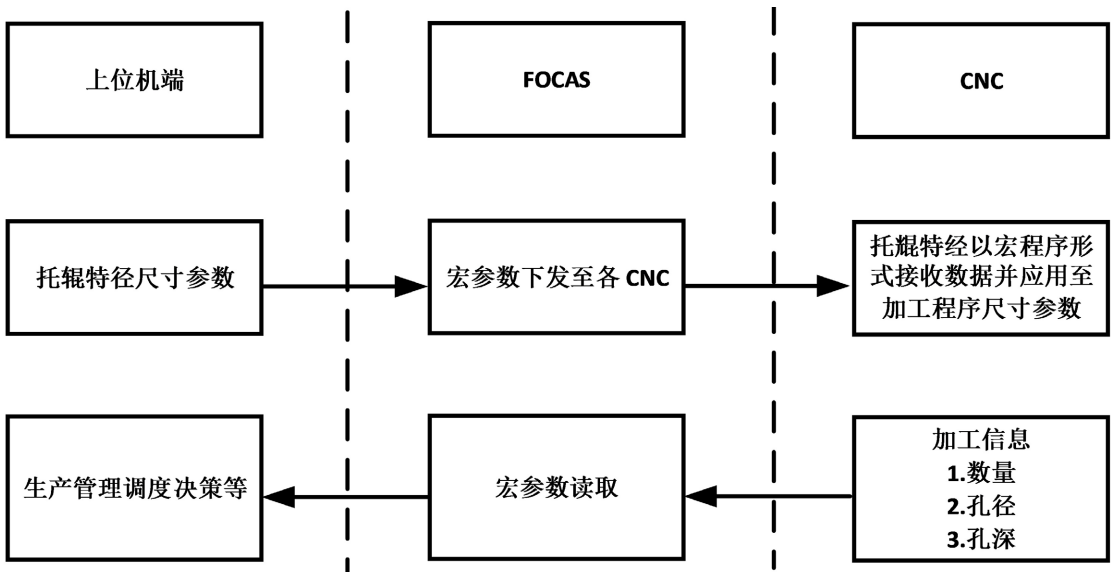


Figure 8. Flexible function logic diagram  
图 8. 柔性化功能逻辑图

5.1. 参数的采集与下发

见图 8，在托辊生产的控制与数据采集系统中，对数控机床参数的精准管理是保障生产效率与产品质量的关键。每台参与托辊生产的数控机床，其宏参数、刀具参数等的读取、修改和写入操作都至关重要。以 FANUC CNC 数控系统为例，其中的宏变量分为局部变量、公共变量和系统变量，这些变量在托辊生产过程中发挥着不同作用。

在托辊生产线上，FOCAS 规定的局部变量虽然仅能读取，但通过对它的监测，能够实时获取机床运行过程中的特定状态信息，比如某一加工阶段的瞬时转速等数据，为分析机床运行状况和优化加工工艺提供参考依据。而公共变量和部分系统变量，因其可读可写的特性，在托辊生产中具有更为广泛的应用场景。

当进行托辊的切削加工时，可通过修改公共变量来调整刀具的进给速度和切削深度等参数。例如，在加工不同材质的托辊时，根据材料的硬度和特性，灵活更改公共变量，使刀具以最适宜的参数运行，既能保证加工精度，又能提高刀具的使用寿命。对于系统变量，可利用其控制托辊生产过程中的一些关键功能。比如，在托辊的自动上下料环节，通过写入特定的系统变量值，实现机床与自动化上下料设备的精准协同，提高生产的自动化程度和效率。

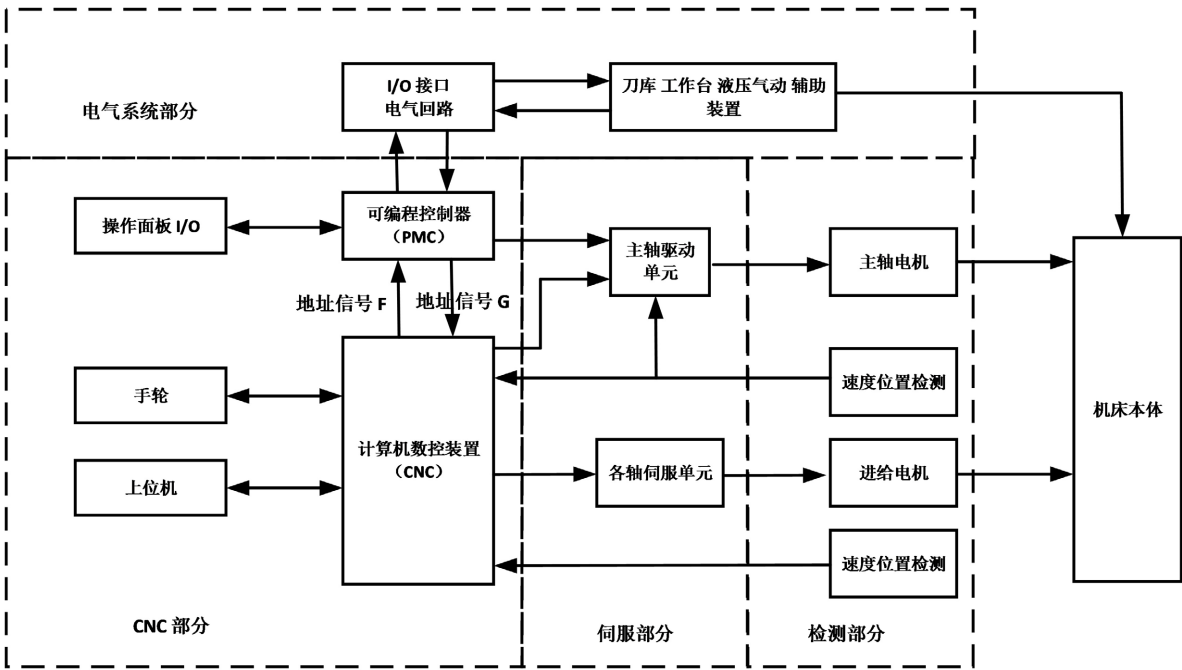


Figure 9. Signal transmission relationship between CNC and PMC  
图 9. CNC 与 PMC 信号传递关系

宏变量参与到托辊生产机床的众多功能中，极大地增强了生产的灵活性和可操作性。通过合理更改宏变量，不仅能够实现托辊生产中诸如尺寸精度调整、加工路径优化等多种功能，还能快速响应不同的生产需求。当需要生产不同规格的托辊时，只需对相应的宏变量进行设置，无需对机床硬件进行大规模改动，就能高效地完成生产任务，显著降低了生产成本，提升了托辊生产企业的市场竞争力。

PMC 信号与系统变量的映射

PMC→宏程序信号(只读)

#1000-#1015 对应 PMC 中 G54.0-G55.7

宏程序→PMC(可读/可写)

#1100-#1115 对应 PMC 中 F54.0-F55.7

见图 9, 系统可对多台 FANUC 数控机床同时在线读取宏变量, 通过宏变量数值可以在线监控各台机床的运行状态。

系统也可对多台 FANUC 数控机床同时在线更改宏变量, 通过改变宏变量数值可以在线实时控制各台机床的运行状态, 并实现所需要的相关功能。

在更改宏变量的代码 `ret = Focas1.cnc_wrmacro(h, number, 10, value, dec);` 中, `value` 的值是更改数值的整数部分, `dec` 的值与小数以及指数有关, 这样可以对宏变量不光进行整数更改, 还可以进行小数的改写, 便于更好地更改机床参数。

### 5.2. 柔性参数化功能的参数读取和下发

柔性加工技术是指在计算机系统的控制下, 利用自动化设备和相关技术, 对不同类型和规格的工件进行灵活加工的一系列技术的总称。它融合了数控技术、计算机技术、自动化控制技术、传感器技术等多种先进技术, 以实现生产过程的自动化、柔性化和智能化。柔性加工技术具备高柔性、自动化程度高、生产效率高、产品质量稳定、集成化程度高等特性。



Figure 10. Flexible machining interface  
图 10. 柔性化加工界面

公司托辊订单类型多样, 产品规格繁杂, 同一型号托辊也存在尺寸差异。若采用固定加工程序与手

动调整机床参数的方式, 会严重制约生产效率。而智能化生产要求采用参数化编程, 只需在上位机系统界面读取和更改与加工有关的宏变量, 系统就能自动完成机床调整与托辊加工, 大幅提升生产效率与灵活性。

在柔性加工界面, 见图 10, 可通过输入或调用产品参数, 将托辊数据下发至对应生产工艺单元, 实现机床自动化调整, 同时支持新参数标号保存以便复用, 也可以通过读取宏参数来了解托辊加工时的各个参数。生产特定型号托辊时, 需将加工参数发送至各单元 CNC。参数主要涵盖三方面: 托辊零件结构参数(轴长、管径等)、刀具型号与数量、产品加工数量。

参数设置完成后, 在各单元通讯正常的情况下, 上位机将数据传输至 FOCAS。FOCAS 根据各单元任务分配参数至对应 CNC, CNC 依参数加工零件并计数, 通过读取计数宏参数, 到达加工数量要求后, 加工完成。

由于宏参数公共变量在 NC 中可一直保存, 参数下发可应用于生产线的 M 代码加工中, 以下为应用到 M 代码中的实例。

O1000 (托辊生产程序);

参数校验

IF [#500 LE 0] GOTO 9999 (轴长度必须大于 0)

IF [#501 LE 0] GOTO 9999 (轴直径必须大于 0)

IF [#502 LE 0] GOTO 9999 (刀具直径必须大于 0)

IF [#503 LT 0] GOTO 9999 (工具端面距槽边尺寸不能为负)

初始化

N10 G90 G54 G17 G40 G49 G80

N20 M03 S1000

N30 G00 X0 Y0

N40 G00 Z50.0

; 车削外圆

N50 G00 X [#501+5.0] Z2.0

N60 G01 Z0 F0.2

N70 X [#501]

N80 G01 Z-[#500-#503] F0.15

N90 G00 X [#501+10.0] Z50.0;

切槽加工

N100 G00 X [#501+5.0] Z-[#500-#503]

N110 G01 X [#501-5.0] F0.05

N120 G01 Z-[#500] F0.1

N130 G00 X [#501+5.0] Z50.0;

切断加工

N140 G00 X [#501+5.0] Z-[#500+5.0]

N150 G01 X0 F0.03

N160 G00 X50.0 Z100.0;

程序结束

N170 M05

N180 M30;  
错误处理  
N9999 M01 (程序暂停, 检查参数)

## 6. 两台 FANUC 数控机床同步协同

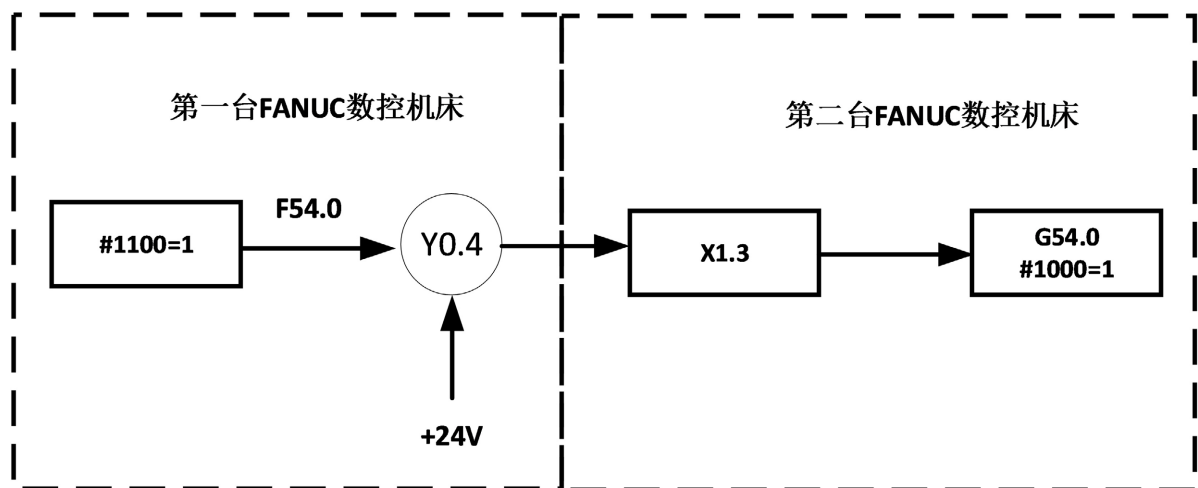
FANUC 数控机床可通过联网软件实现集中数据管理与程序分发, 实时监控生产进度以减少停机时间, 见图 11, 两台机床并行执行粗加工与精加工等不同工序, 拆分复杂工件多工序任务避免单机空转, 同时利用多轴联动技术让高精度机床负责关键工序、通用机床完成辅助工序, 通过数据交互修正误差, 还能依托数控系统多轴多通道控制独立响应不同订单, 快速切换小批量生产及工艺变更, 生产数据实时同步至中央系统为智能调度提供依据, 其中两台机床可通过硬接线或 FOCAS 实现信号的交互协同, 即一台机床等待另一台完成信号后联动工作, 是构建柔性制造系统的基础, 推动制造业智能化转型。

以下为两台机床的 M 代码:

第一台机床

O2031;  
T0101 (外圆粗车刀);  
M03 S500 (主轴正转);  
W20.0F10.0(Z 轴正向粗车);  
U10.0F10.0(X 轴正向粗车);  
W-20.0F10.0(纵向进给粗加工);  
U-10.0F10.0(返回起始位置);  
#1100 = 1 (通过宏变量对应地址传输信号);  
N10 G01 U10.0 F100.0 (X 轴正向粗车);  
N20 W-20.0 F100.0 (Z 轴负向粗车);  
W-20.0 F100.0 (纵向进给粗加工);  
U-10.0 F100.0 (返回起始位置);  
#1100 = 0 (清除协作标志);  
M30 (程序结束并重置);  
第二台机床

O2032;  
#500 = #1000 (信号宏变量初始化);  
WHILE [#500EQ#1000] DO1;(等待机床 1 准备就绪)  
N10G04X0.1;  
END1;  
T0202 (外圆精车刀);  
M03S500 (主轴正转);  
W20.0F10.0 (Z 轴正向精车);  
U10.0F10.0 (X 轴正向精车);  
W-20.0F10.0 (纵向进给精加工);  
U-10.0F10.0 (返回起始位置);  
M30;



**Figure 11.** Synchronous collaboration signal transmission schematic diagram of two machine tools  
**图 11.** 两台机床同步协同信号传输原理图

7. 结论

本文针对国内托辊生产线自动化程度低、依赖人工及国外技术垄断等问题，基于 FANUC 数控机床构建全自动化托辊生产线，通过 FOCAS 通信功能与计算机网络技术研发控制与数据采集系统，实现了管理系统与多台数控机床的实时连接、数据采集、参数控制及整线监控，利用参数化编程和宏变量技术实现柔性化生产，解决了传统生产线设备孤立运行、刚性控制及换型效率低等问题，为托辊生产线数字化、智能化转型奠定技术基础，其技术方案对同类制造业自动化改造具有借鉴意义，未来可进一步集成智能算法与物联网技术深化应用。

8. 未来展望

8.1. 智能调度算法的集成与优化

当前系统已实现两台机床的基础协同，未来可引入改进遗传算法优化生产调度，进一步提升生产线整体效率。算法设计思路如下。

优化目标：以最小化生产周期、最大化设备利用率、均衡负载为核心目标，兼顾托辊订单的优先级与交货期要求。

参数编码：采用二维染色体编码，第一维表示订单加工顺序，第二维表示工序分配(如哪台机床执行粗加工、哪台执行精加工)。

算法优化：引入自适应交叉变异算子，避免算法早熟收敛，提升全局搜索能力；结合生产线实时数据(如设备故障、订单变更)动态调整调度方案，实现动态优化。

通过该算法的集成，可实现多台机床、多订单、多工序的智能调度，进一步降低生产周期与成本，提升订单响应速度。

8.2. 数字孪生技术的深度融合

未来可构建托辊生产线数字孪生模型，实现物理实体与虚拟模型的实时映射。

基于 Unity 或 Python 的 VTK 库构建机床、工件、输送线的三维虚拟模型，通过 FOCAS 协议获取物理设备的实时运行数据(如主轴转速、刀具位置、加工进度)，实现虚拟模型的同步运动与状态更新。

利用数字孪生模型进行离线仿真与工艺优化，在虚拟环境中模拟不同加工参数、调度方案的执行效



果, 提前预判潜在问题(如设备碰撞、参数超差), 减少现场调试时间与物料浪费。

集成机器学习算法, 通过数字孪生模型积累的历史数据, 预测刀具寿命、设备故障概率, 实现预防性维护; 基于加工质量数据优化切削参数, 持续提升托辊加工精度与产品一致性。

### 8.3. 跨平台互联与智能化升级

未来可进一步拓展系统的兼容性与智能化水平。

引入 OPC UA 协议, 实现与不同品牌数控系统、工业机器人、检测设备的跨平台互联, 构建更全面的柔性制造系统。

集成机器视觉技术, 在托辊加工过程中实现实时质量检测(如卡槽尺寸、表面缺陷), 与控制系统形成闭环, 自动调整加工参数, 减少次品率。

开发移动端监控与控制界面, 方便管理人员实时查看生产进度、处理异常报警, 提升管理的灵活性与便捷性。

本文提出的技术方案为托辊生产线的数字化转型提供了可行路径, 未来通过智能算法、数字孪生等技术的深度融合, 有望实现生产线的全面智能化, 为中小企业的高质量发展提供更强有力的技术支撑。

### 参考文献

- [1] 徐建高. FANUC 系统数控铣床(加工中心)编程与操作实用教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [2] 张爱红. 工业机器人操作与编程技术(FANUC) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [3] 胡协忠, 朱勤惠. 数控车工(FANUC 系统) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [4] 魏彦波, 姚春玲. 数控车削编程与加工: FANUC 系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2024.
- [5] 朱明松. 数控车削编程与加工(FANUC 系统) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [6] 高恒星. Fanuc 系统数控铣/加工中心加工工艺与技能训练[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009.
- [7] 卢亚平. FANUC 工业机器人编程操作[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2022.
- [8] 孙勇. 零件数控车床加工: FANUC 系统[M]. 北京: 知识产权出版社, 2015.
- [9] 张炎, 张玲玲. FANUC 工业机器人基础操作与编程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- [10] 于万成. 数控铣削(加工中心)加工技术与综合实训: FANUC 系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [11] 胡金华, 孟庆波, 程文峰. FANUC 工业机器人系统集成与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [12] 黄力, 徐忠想, 康亚鹏. 工业机器人工作站维护与保养[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.