

面向离散制造的混杂数控自治系统设计

钱 峰*, 王德伦, 杜广宇

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 研究离散制造中混杂数控生产线的智能化控制问题, 引入智能感知、智能决策与智能执行等智能制造技术, 构建生产线数控设备的联网协同机制, 实现类似流程制造中自动化生产及无人值守的自治控制. 基于信息物理融合系统(cyber physical systems, CPS)设计混杂数控自治系统(autonomous system for hybrid NC, ASHNC), 提出具体架构与分层模型. 采用WPF技术开发原型系统, 并且在多个知名企业所构建的数控生产线中得到应用. 实际效果验证了系统的可行性.

关键词: 离散制造; 混杂数控; 智能控制系统; 信息物理融合系统

中图分类号: TP302.1

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201405006

0 引言

数控生产线是工业现代化的重要标志, 是企业实施大规模定制、提升市场竞争力的重要手段. 在离散制造型企业, 数控生产线多数以相对独立的制造单元或者制造区域形式存在, 一般包含加工设备、物流设备、仓储设备、检验设备, 以及其他辅助设备等, 是企业相对投入较大、运营维护成本较高的生产资源之一. 充分挖掘数控生产线的潜力是企业降低成本、提高竞争力的重要课题.

目前数控生产线的相关研究主要集中在生产线的过程仿真及过程监控方面. 仿真优化方面的研究主要基于虚拟现实技术对生产线进行仿真建模, 并依据 TOC 理论进行瓶颈识别和工艺动作优化, 在提高效率方面收到了较好的效果^[1-6]. 过程监控方面的研究主要基于 PLC 或者工业组态软件, 利用传感器与生产线关键设备连接, 以实现远程监控, 为自动化远程控制提供基础^[7-8].

但是, 上述研究由于前期准备周期长、编程工作量大、人机交互多, 一般多用于批量化生产的流程型制造企业. 以多品种、小批量生产为特点的离散型制造企业, 由于数控设备类型多样, 产品、工序、节拍灵活多变, 数控生产线在硬件、操作系统、接口、信息等方面均呈现出混杂特性. 这些混杂特

性造成面向离散制造企业的数控生产线研究问题更为复杂, 难以实现自治管理. 本文借鉴智能制造研究中的信息物理融合系统(cyber physical systems, CPS)技术^[9-13], 研究并设计混杂数控自治系统(autonomous system for hybrid NC, ASHNC), 综合运用传感器、异构网络通信及智能计算等技术, 将离散制造企业的混杂数控生产线升级改造为 CPS 智能机器人系统, 以在离散制造企业实现混杂数控生产线的实时控制、错误预防及自我改善.

1 ASHNC 定位

单元化、智能化、集成化是未来制造系统的发展趋势. ASHNC 的定位是满足某段加工过程要求的具有智能感知、智能执行和智能决策能力的生产制造单元, 其总体功能如图 1 所示.

从图 1 可见, ASHNC 呈现出可独立完成指定任务的机器人特征, 它根据生产计划的要求接收原料, 通过物流系统将其转移并加工为成品, 自动反馈生产状态给相关系统(如 MES、ERP、QA/QC 等), 并对于生产过程中的随机问题进行自动诊断和自我改善. 在设计 ASHNC 时, 需要考虑以下几个方面.

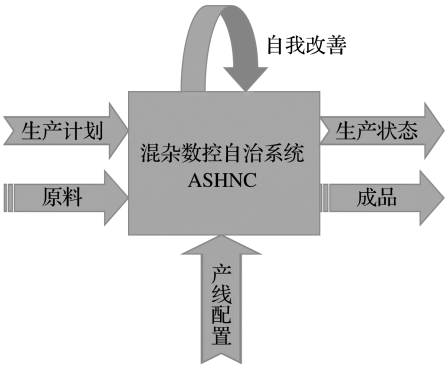


图 1 ASHNC 总体功能

Fig. 1 The overview function of the ASHNC

- (1)集成性:可以实现各类数控设备采集信号的异构信息集成。
- (2)实时性:对于数控设备的响应与控制需要满足毫秒级速度,要求提供分布式的嵌入式实时控制机制。
- (3)通用性:可以兼容多种商用机床数控系统、传感器等,同时提供统一、标准的语义操作环

- 境。
- (4)扩展性:ASHNC 本身可以作为另一个 ASHNC 的构成单元,具备自身结构描述的元数据。
 - (5)开放性:外部数据接口需要基于开放的数据交换格式,以 XML 语言进行描述,支持 Excel 格式。
 - (6)安全性:提供数据容错校验机制、数据备份恢复机制、数据分级授权访问机制等数据安全措施。
 - (7)可管理性:提供远程网络管理、系统配置管理,以及自动升级等能力。

2 ASHNC 结构

本文设计的生产线智能监控系统的体系结构如图 2 所示。

ASHNC 采用分层结构设计,主要包含以下几个层次。

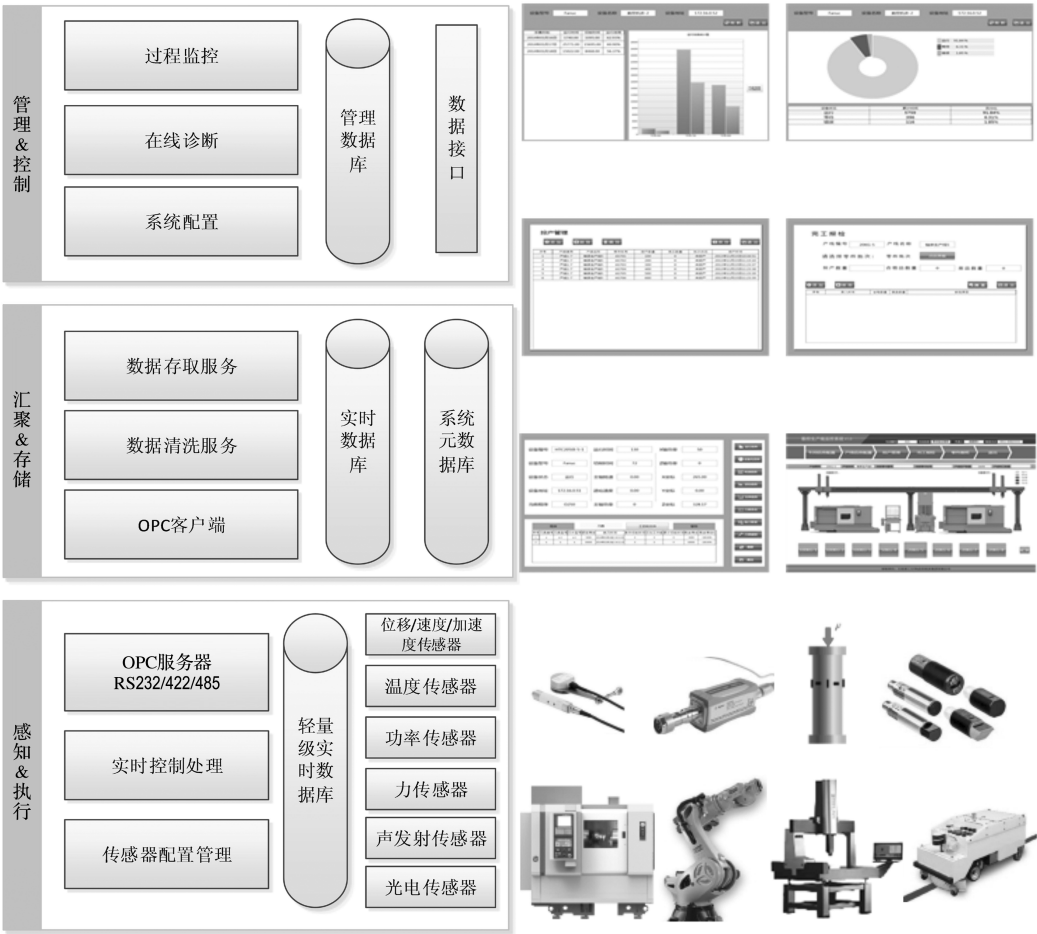


图 2 ASHNC 结构

Fig. 2 The architecture of ASHNC

2.1 感知 & 执行层

本层次主要负责数控设备,传感器信号的采集、存储和传递,同时根据预定策略,对数控设备进行实时控制.主要包括传感器配置管理模块、实时控制处理模块、OPC 服务器模块等.

(1)传感器配置管理模块

传感器技术是实现智能感知的基础,本文从实际成本和集成性角度考虑,在传感器的选择方面优先使用数控设备的内置传感器.对于数控设备未提供内置传感器的情况,再自行采购配置.

(2)实时控制处理模块

本模块负责对数控设备进行实时控制,例如刀具破损停机、碰撞停机、远程上传/下载数控程序等.由于不同设备的编程方式不尽相同,此处也使用花蕊石模式进行管理.

(3)OPC 服务器模块

ASHNC 所管理的硬件设备厂家各异、数控系统多种多样,接口以及总线技术也不尽相同.为了避免这些技术细节变化影响上层管理系统的稳定性,本文基于工厂模式,开发针对不同设备的数据采集工厂类服务,将不同的总线技术转换为工业以太网,将不同的数控系统接口转换为标准语义模型向上传输.

2.2 汇聚 & 存储层

本层主要负责数据的网络传输、数据清洗和数据存取功能,为上层管理提供实时、准确、可靠的数据支持.本层次包含远程数据采集模块、数据清洗服务模块,以及数据存取服务模块等.

(1)远程数据采集模块

数据采集服务模块已经将不同的设备统一为标准的语义模型和网络通信协议,故本模块为通用模块,不需要针对不同的数控设备进行单独开发.本模块主要有两个功能:

a. 注册、管理数据采集服务模块,即通过注册、管理数据采集服务模块(包括网络 IP、数控系

统、OPC 服务器类识别符、扫描频率等信息),实现数控生产线的配置元数据管理,以达到动态调整数控生产线设备的目的.

b. 数据采集服务模块数据读取守护者进程,即建立系统守护进程,按照约定的扫描频率进行自动读取,并提供给数据清洗服务模块.

(2)数据清洗服务模块

本模块接收远程数据采集模块读取的数据,并针对数据进行可靠性校验.由于数控生产线所处的是工业环境,可能造成以太网传输的不可靠性或者信号突变,为了避免这些噪声影响上层管理的判断,本处对于数据进行了降噪处理.

(3)数据存取服务模块

生产线实时监控采集到的信号数据量是巨大的,以某企业生产线为例,其拥有 23 台数控机床和 14 个桁架机械手,其采集信号的数据量统计如表 1 所示.

表 1 原始采集信号的数据量测算
Tab. 1 Estimation of quantity of the original signal acquisition

设备类型	信号数	设备数量	测试频率	总数目/(条·a ⁻¹)
数控机床	23	19	1	13 592 448 000
机械手	14	13	5	28 304 640 000

1 a 产生的记录数为 410×10^8 行,按照每行 0.1 KB 估算,则有 4 TB 左右数据,已经进入大数据范畴.因此如何兼顾数据容量和读写性能,是数据存取服务需要解决的重点问题.

虽然 Hadoop 等工具在大数据存储和分析方面成效斐然,但同时也造成了系统体系结构的复杂性.本文根据信号采集数据的时效性特点,建立实时信号采集时间窗口,对于超出时间窗口的数据,进行二次计算采样,以减少系统整体数据量,如图 3 所示.

引入上述措施后,系统的数据量如表 2 所示.

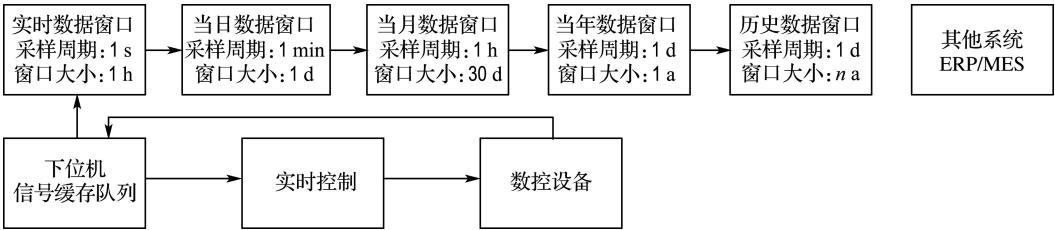


图 3 实时信号采集时间窗口

Fig. 3 Time window for real-time signal acquisition

表 2 采用实时窗口后的采集信号的数据量测算
Tab. 2 Estimation of the quantity of signal acquisition
by using real-time data

时间窗口	设备类型	信号数	设备数量	测试频率	总数目/ (条·a ⁻¹)
实时窗口	数控机床	23	19	1	1 573 200
	机械手	14	13	5	3 276 000
当日窗口	数控机床	23	19	1	629 280
	机械手	14	13	5	1 310 400
当月窗口	数控机床	23	19	1	13 110
	机械手	14	13	5	27 300
当年窗口	数控机床	23	19	1	157 320
	机械手	14	13	5	327 600

1 a 数据量为 700×10^4 条,是原有数据量的 0.02%左右.同时,通过时间窗口,将不同数据查询进行了逻辑分区,有效改善了数据读写性能.

2.3 管理 & 控制层

(1)系统配置模块

本模块为整体系统提供良好的管理功能,包括以下几个方面.

a. 生产线设备配置管理:组织管理生产线配置的元数据信息(如设备编号、加工能力、数控版本、IP 地址、端口、通信协议等).

b. 生产线快速换产管理:按照产线、产品组织生产线配置文件,包括工艺卡片、数控程序、零件图纸等信息.通过实际加工的产品信息检索对应的数控生产线配置,传送至当前配置资源包目录,并通知感知 & 执行层进行数控程序等配置文件上传.

c. 权限控制与用户管理:提供基于角色的权限配置管理功能.

d. 数据库备份恢复管理:考虑到工控环境的未知性,提供数据库备份与恢复管理等灾难恢复机制.

e. 系统版本检测及升级:考虑到未来工控环境的分布式特点以及使用者的知识结构问题,需要建立完善的版本检测及升级功能.本文采用基于 3G 的 web 远程更新机制,进行系统的实时更新升级.

(2)在线诊断模块

本模块通过采集的数据建立设备故障诊断模型以及刀具破损监控模型,提高设备利用率,减少

因设备故障和刀具破损等异常因素造成的产线停机时间.

a. 设备状态监控:基于设备状态数据的时间序列信息,分析变化趋势,并根据已有的阈值范围,识别刀具破损情况,并进行主动预警.

b. 刀具破损预警:基于功率和声发射信号的时间序列数据,分析时域、频域变化规律,并根据已有的阈值范围,识别刀具破损情况,并进行主动预警.

(3)过程监控模块

本模块提供生产计划导入、完工质量报检,以及加工过程仿真等功能.

a. 生产计划导入:基于文件格式导入 MES 等管理软件的生产计划,并提供手工录入生产计划的功能.

b. 完工质量报检:基于采集的加工数量,结合质量检验设备的检验结果,实现完工质量报检功能.由于离散制造的灵活性,本处其他质量处理信息采用人机交互式完成.

c. 报表数据导出:基于文件格式导出生产线状态信息,包括生产计划执行情况、设备运行情况、刀具破损情况、质量检验数据等相关信息.

d. 加工过程仿真:针对实际加工状态,通过计算机动画进行加工仿真.

3 应用案例

根据本文设计的系统结构,作者基于 WPF 技术(Windows presentation foundation)开发的 ASHNC 原型系统及智能控制设备已经成为中国沈阳某知名机床制造企业数控产品线的预装群控系统,目前已经应用到该企业对外销售的 19 条生产线中.

3.1 ASHNC 案例

本文用中国徐州某知名客户采用的数控生产线为例介绍 ASHNC 原型系统,该系统共 8 条产线,配置有自动原料仓和成品仓,以桁架机械手为主进行物流输送.需要管理的数控设备如表 3 所示.

图 4 为 ASHNC 的网络拓扑结构,图 5 为智能控制终端的现场图片,图 6 为系统的主界面.

表 3 产线设定管理的数控设备及网络配置

Tab.3 CNC production line equipment configuration management and network configuration

产线名称	VLAN 号	VLAN 名称	IP 网段	产线名称	VLAN 号	VLAN 名称	IP 网段
产线 1 100 kg-1	VLAN1	机床 1	172.16.0.11	产线 5 20 kg-5	VLAN1	机床 1	172.16.0.51
	VLAN2	机床 2	172.16.0.12		VLAN2	机床 2	172.16.0.52
	VLAN3	机床 3	172.16.0.13		VLAN3	机械手 1	172.16.0.53
	VLAN4	机械手	172.16.0.14		VLAN4	机械手 2	172.16.0.54
产线 2 100 kg-2	VLAN1	机床 1	172.16.0.21	产线 6 20 kg-6	VLAN1	机床 1	172.16.0.61
	VLAN2	机床 2	172.16.0.22		VLAN2	机床 2	172.16.0.62
	VLAN3	机床 3	172.16.0.23		VLAN3	机械手 1	172.16.0.63
	VLAN4	机械手	172.16.0.24		VLAN4	机械手 2	172.16.0.64
产线 3 100 kg-3	VLAN1	机床 1	172.16.0.31	产线 7 20 kg-7	VLAN1	机床 1	172.16.0.71
	VLAN2	机床 2	172.16.0.32		VLAN2	机床 2	172.16.0.72
	VLAN3	机床 3	172.16.0.33		VLAN3	机械手 1	172.16.0.73
	VLAN4	机械手	172.16.0.34		VLAN4	机械手 2	172.16.0.74
产线 4 50 kg-4	VLAN1	机床 1	172.16.0.41	产线 8 20 kg-8	VLAN1	机床 1	172.16.0.81
	VLAN2	机床 2	172.16.0.42		VLAN2	机床 2	172.16.0.82
	VLAN3	机械手 1	172.16.0.43		VLAN3	机械手 1	172.16.0.83
	VLAN4	机械手 2	172.16.0.44		VLAN4	机械手 2	172.16.0.84

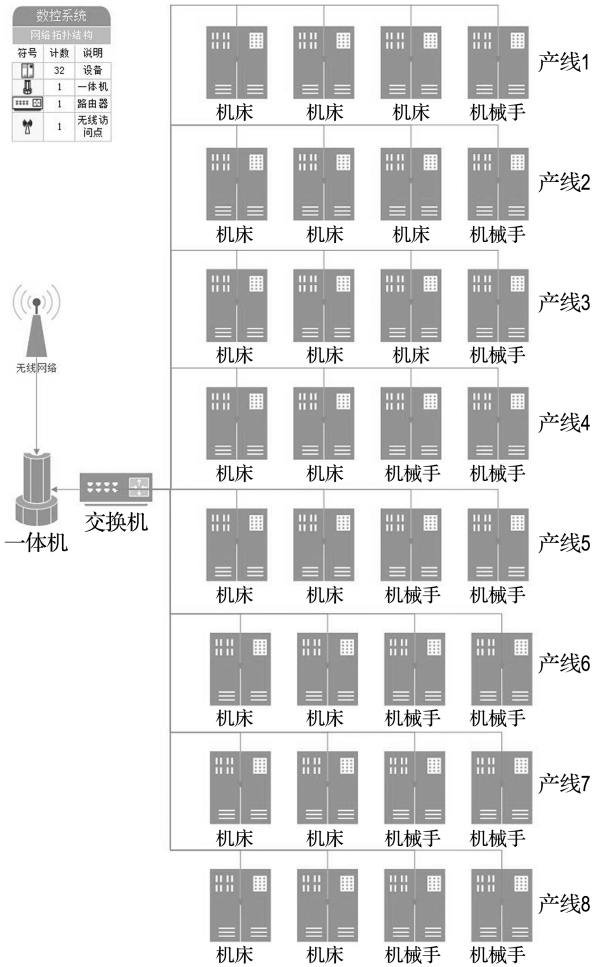


图 4 ASHNC 网络拓扑结构

Fig. 4 Network topology structure of ASHNC

3.2 产线配置部分

图 7(a)为产线配置信息,可以动态地添加、

删除设备,调整设备网络地址、数控系统等信息。

图 7(b)为每台设备具体配置,包括工序图纸、数控程序、工艺文件等。

图 7(c)为刀具配置信息,包括刀具编号、参数、额定寿命、单件切削时间等信息。

图 7(d)为产线配置的目录存放示意,可以存储产线的多套配置,当更换产品的时候,可以自动切换配置,并通知底层设备自动获取对应的数控程序,以实现快速换产。



图 5 ASHNC 终端设备现场图片

Fig. 5 Live pictures of ASHNC terminal equipment

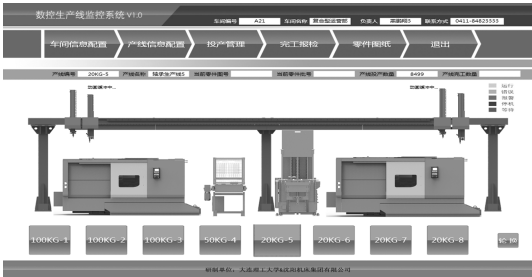


图 6 ASHNC 主界面

Fig. 6 Main interface of ASHNC

3.3 系统监控及反馈部分

系统根据功率以及声发射信号计算刀具工作的受力情况,并计算刀具寿命,如图 8 所示。

系统可以实时监控数控设备的状态信息,如图 9 所示。

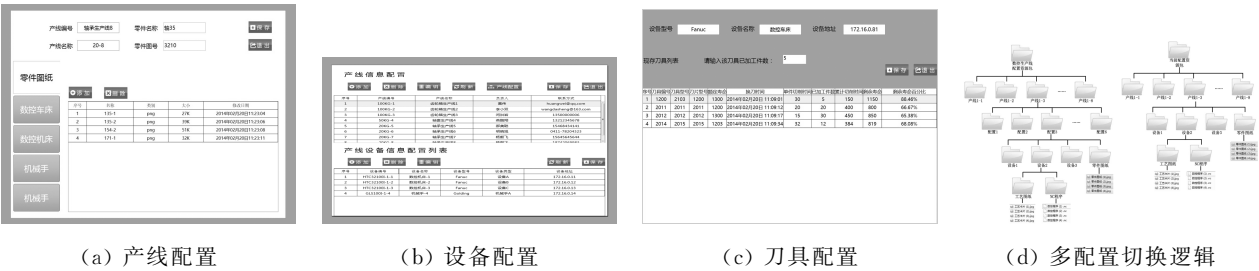


图 7 ASHNC 产线配置界面范例

Fig. 7 Examples of production line configuration of ASHNC interface

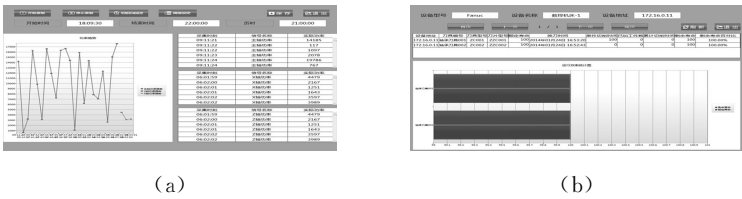


图 8 ASHNC 刀具管理相关界面范例

Fig. 8 Examples of tool management of ASHNC interface

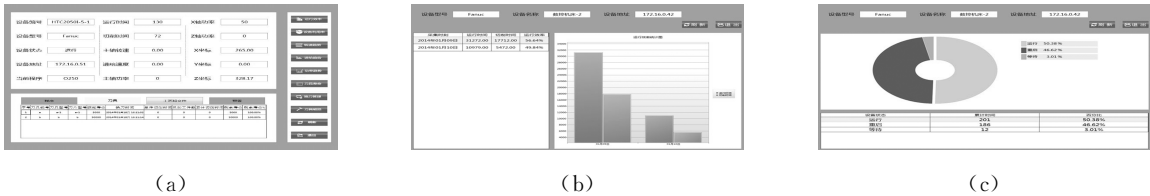


图 9 ASHNC 设备实时状态及运行效率相关界面范例

Fig. 9 Examples of real-time device status and operating efficiency of ASHNC interface

4 结 语

离散制造系统属于非线性动力学系统,其建模和调度管理问题一直是学术界研究的重点和难题.本文基于 CPS 将数控生产线的各构成部分通过传感监控网络进行连接,通过信息集成将数控生产线升级为智能机器人系统,为离散制造的实时、智能控制提供了一个新的解决思路。

遵循上述思路,本文设计了 ASHNC,提出分层架构模型,并研制了原型系统.该原型系统在国内多家知名企业获得了实际应用,其可行性获得了初步的验证。

下一步,作者将进一步细化各层具体功能,在智能化控制领域继续开展深入研究,以获得更为通用、智能的工业级实时控制系统,将数控生产线升级为可扩展智能制造单元,为后续智能制造的

实现夯实基础。

参考文献：

[1] 宁汝新,刘检华,唐承统. 数字化制造中的建模和仿真技术[J]. 机械工程学报, 2006, 42(7):132-137.
NING Ru-xin, LIU Jian-hua, TANG Cheng-tong. Modeling and simulation technology in digital manufacturing [J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2006, 42(7):132-137. (in Chinese)

[2] 李晓雪. 基于 Flexsim 的生产线建模与仿真[J]. 机械工程师, 2007(6):90-91.
LI Xiao-xue. Modeling and simulation of production line based on Flexsim [J]. **Mechanical Engineer**, 2007(6):90-91. (in Chinese)

[3] 杨银,路春光,李志弘. 基于 Petri 网的装配生产过程建模与仿真分析[J]. 机械工程师, 2008(11): 88-90.

- YANG Yin, LU Chun-guang, LI Zhi-hong. Assembly process modeling and simulation analysis based on Petri net [J]. **Mechanical Engineer**, 2008(11):88-90. (in Chinese)
- [4] 晁永生, 刘海江. 白车身焊接机器人加工路径优化和仿真[J]. 中国机械工程, 2010, **21**(4):442-445.
CHAO Yong-sheng, LIU Hai-jiang. Welding robot path optimization and simulation for body in white [J]. **China Mechanical Engineering**, 2010, **21**(4):442-445. (in Chinese)
- [5] 王福鑫, 向 号. 基于 Flexsim 软件的生产线仿真优化[J]. 机械工程师, 2010(11):88-89.
WANG Fu-xin, XIANG Hao. Simulation and optimization of the production line based on Flexsim software [J]. **Mechanical Engineer**, 2010(11):88-89. (in Chinese)
- [6] 张远春, 范秀敏, 驹田邦久. 基于仿真优化的多种类型 AGV 数量配置优化方法[J]. 中国机械工程, 2011, **22**(14):1680-1685.
ZHANG Yuan-chun, FAN Xiu-min, Kunihisa Komada. Multi-types AGVs quantity configuration optimization based on simulation optimization [J]. **China Mechanical Engineering**, 2011, **22**(14):1680-1685. (in Chinese)
- [7] 王时龙, 张宝情, 刘 飞, 等. 基于智能代理的装配生产线在线质量监控系统[J]. 机械工程学报, 2003, **39**(6):145-150.
WANG Shi-long, ZHANG Bao-qing, LIU Fei, *et al.* Assembly line online quality monitoring system based on intelligent agent [J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2003, **39**(6):145-150. (in Chinese)
- Chinese)
- [8] 刘 志, 蒋增强, 葛茂根, 等. 面向装配的现场数据采集和过程监控研究[J]. 机械工程师, 2009(4):52-54.
LIU Zhi, JIANG Zeng-qiang, GE Mao-gen, *et al.* Research on pipeline on-line data collecting and process monitoring in assembly process [J]. **Mechanical Engineer**, 2009(4):52-54. (in Chinese)
- [9] 王中杰, 谢璐璐. 信息物理融合系统研究综述[J]. 自动化学报, 2011, **37**(10):1157-1166.
WANG Zhong-jie, XIE Lu-lu. Cyber-physical systems: A survey [J]. **Acta Automatica Sinica**, 2011, **37**(10):1157-1166. (in Chinese)
- [10] Baheti R, Gill H. **Cyber-physical Systems. The Impact of Control Technology** [M]. Washington D C: IEEE, 2011:161-166.
- [11] CPS Steering Group. Cyber-physical systems executive summary [EB/OL]. [2011-06-04]. <http://precise.seas.upenn.edu/events/iccps11/doc/CPS-Executive-Summary.pdf>
- [12] Lin J, Sedigh S, Miller A. A general framework for quantitative modeling of dependability in cyber-physical systems: a proposal for doctoral research [C] // **Proceedings of the 33rd Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference**. Seattle: IEEE, 2009:668-671.
- [13] Gamma E, Helm R, Johnson R, *et al.* **Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software** [M]. Reading: Addison-Wesley Professional, 1995.

Design of autonomous system for hybrid NC of discrete manufacturing

QIAN Feng*, WANG De-lun, DU Guang-yu

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The intelligent control for hybrid NC production line in discrete manufacturing is studied. IntelliSense, smart decision-making and implementation of intelligent technologies are introduced, a networked-collaborative mechanism for hybrid NC production line is built, and a kind of autonomous control of unmanned production is implemented. Based on cyber physical systems, an autonomous system for hybrid NC is designed, a specific structure and a hierarchical model are proposed. A prototype system is developed using WPF technology. By the application of this research in some well-known enterprises, feasibility of the system has been well verified through practical effects.

Key words: discrete manufacturing; hybrid NC; intelligent control system; cyber physical systems (CPS)