

基于指令域电控数据分析的数控机床工作过程 CPS 建模及应用

陈吉红, 杨建中*, 周会成, 向华, 朱志红, 李叶松, 李振瀚, 许光达

摘要: 建立机器的信息物理系统 (CPS) 模型是智能制造的关键技术。本文指出了数控机床工作过程中数控系统内部的海量电控数据是构建数控机床工作过程 CPS 模型的大数据的主要来源; 提出了基于指令域电控数据分析方法, 利用被加工零件的 G 指令对数控加工的工作任务进行定量描述, 在指令域内建立数控机床的工作任务、制造资源和运行状态之间的实时、精准的映射关系, 以此为基础进一步构建数控机床工作过程的 CPS 模型; 利用这一模型, 进行了数控加工工艺参数优化、数控机床健康保障等智能化应用的案例研究。

关键词: 信息物理系统 (CPS), 大数据, 数控机床, 工作过程电控数据, 指令域, 智能化应用

1 引言

新一轮工业革命的核心技术是智能制造——制造业数字化、网络化和智能化。《中国制造 2025》、美国工业互联网、德国工业 4.0, 都把智能制造作为主攻方向, 使先进信息技术和制造技术深度融合, 以推进新一轮工业革命。虽然中、美、德各方的战略侧重点不同, 但关键技术均聚焦于信息物理系统 (cyber-physical system, CPS) [1]。

信息物理系统在感知的基础上, 融合计算、通信、网络与控制于一体, 是实现智能制造系统的基础。其体系构架通常由设备层、感知层、网络层、认知层和控制层组成。通过对物理空间 (physical space, PS) 中的机器、车间和工厂的信息感知、数据采集、传输、存储、挖掘

和分析, 在信息空间 (cyber space, CS) 中建立与物理机器之间相映射的数字化机器 (i-Machine), 或称之为物理机器在 CPS 认知层上的数字化模型 (或简称为机器的 CPS 模型)。

在 CPS 认知层上, 建立机器的 CPS 模型是机器实现智能制造的关键。利用该模型, 人们可以预测机器在预设的工作任务下所对应的工作表现, 进而建立信息、机器与人交融的环境, 从而确定智能控制策略, 实现物理世界与信息世界的相互协调、交互、动态控制, 最终实现智能制造。

数控机床是制造企业最基本、最重要的制造装备, 是制造企业中重要的物理资源。建立数控机床的 CPS 模型是实现智能制造的重要基础。由于数控机床是由机床、刀具、夹具、工件等制造资源和工作任务组成的复杂的动态系统, 如何建立数控机床的 CPS 模型将是一个巨大的挑战。

目前, 有些研究集中于基于数学和物理计算的 CPS 模型建模方法, 这是一种正向的理论建模方法。Jensen 等 [2] 提出了基于物理模型建立 CPS 系统的十个步骤, 并系统地描述、评估了 CPS 系统。Derler 等 [3] 对 CPS 模型内在的异构性、并发性和时间敏感性进行了分析, 提出采用混合系统建模和仿真、并发和异构建模、特定领域建模、功能和架构联合建模等方法构建 CPS 模型。吴义忠、陈立平 [4] 利用多领域统一建模语言 Modelica 建立多领域物理系统仿真优化系统平台, 实现多领域物理系统模型的表达、建模、求解和优化。由于数控机床、刀

National Numerical Control System Engineering Research Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

* Correspondence author. E-mail: yangjz@mail.hust.edu.cn

Received 22 June 2015; received in revised form 28 June 2015; accepted 30 June 2015

© The Author(s) 2015. Published by Engineering Sciences Press. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

英文原文: Engineering 2015, 1(2): 247–260

引用本文: Jihong Chen, Jianzhong Yang, Huicheng Zhou, Hua Xiang, Zhihong Zhu, Yesong Li, Chen-Han Lee, Guangda Xu. CPS Modeling of CNC Machine Tool Work Processes Using an Instruction-Domain Based Approach. *Engineering*, DOI 10.15302/J-ENG-2015054

具、夹具和工件等组成的工艺系统是一个机、电、液、热、材料和控制一体化的复杂动态系统，用数学物理方法难以完整、精确地描述数控机床的 CPS 模型，且理论模型中的大量参数，如机床的阻尼、刚度、材料特性等，因机床装配质量、加工工况等不同，具有较大的分散度。随着大数据技术的出现，将理论模型与大数据方法结合，将进一步提高数控机床 CPS 模型的完整性和准确性。

近年来，基于大数据的 CPS 建模方法的研究被广泛关注。早在 2006 年，美国先进制造技术协会 (AMT) 和美国国家标准研究院 (NIST) 提出了数控机床的数据采集和传输的通信标准 MTConnect[5]。Kao 等 [6] 提出通过 Watchdog Agent® 工具提供的服务建立信息空间并直接获取数据以建立预测与健康管理系统 (PHM) 技术。Wang [7] 提出了由分布式工艺规划系统、动态资源规划系统、实时过程监测系统和远程仪器控制系统等构建工厂的信息物理系统方案。Lee 等 [8, 9] 指出工业大数据的采集和分析是建立信息物理系统的关键，也是将来智能装备、智能制造的关键，同时提出了构建数控机床的信息物理系统的 5C 体系结构，利用无线射频 (RFID) 识别标签技术可收集机床状态数据，结合控制和检验数据，识别工艺加工过程和机床、部件性能退化过程。Wan 等 [10] 利用物联网和多传感器网络技术构建信息流通的 Machine-Machine (M2M) 系统，实现系统的智能决策和自动控制功能，从而将 M2M 系统升级为机器的信息物理系统。

在数控机床 CPS 模型的研究中，我们认为应重点关注以下三个关键点。

(1) 应以数控机床全生命周期中所产生的大数据为主，结合数学物理建模和方法，建立动态的数控机床 CPS 模型。数控机床的全生命周期包括开发、设计、制造、安装调试、使用、维护维修直到报废回收等多个阶段。特别是在数控机床全生命周期中最重要的使用阶段，用户利用机床、刀具、夹具和工件组成的工艺系统进行了大量的调试、试验、试切、加工、工艺试验等工作，产生了海量的信息和数据，如控制指令、跟随误差、加工功率等，这些信息和数据应得到有效的采集，并在信息空间中进行存储和挖掘。另外，在该机床的使用过程中，操作者逐步积累了使用经验和工艺知识，这些知识和经验也应在信息空间中有效地保存和利用。将这些大数据与理论模型相结合，将会进一步提高数控机床 CPS 模型的完整性和准确性。因此，应以在数控机床全生命周期中存储在信息空间中的信息、数据和知识等大数据为主，结合数学物理模型和方法，建立动态的、不断进化的数控机床 CPS 模型。

(2) 应以数控系统内部产生的电控数据为主，构建数控机床工作过程的 CPS 模型。数控系统由数控装置、伺服驱动、伺服电机等部件组成，是数控机床自动完成切削加工等工作任务的重要控制单元。对于数控机床的 CPS 模型，数控系统既是物理空间 (PS) 中的重要物理资源，又是信息空间 (CS) 中的重要信息资源。在数控机床的工作过程中，数控系统内部会产生大量由控制信号和反馈信号构成的原始电控数据，这些数据对机床的工作任务 (或称为工况条件) 和运行状态进行了实时、定量、精确的描述，具有非结构化和多维度的特点。相对于在机床上增设外部传感器获取数据的方法，从数控系统内部直接获取的电控数据更加基础、完整和可靠。因此，数控机床工作过程中的电控数据的获取可通过外部传感器和直接从数控系统内部获取等多种途径实现，并且数控系统内部电控数据应成为今后构建数控机床 CPS 模型所需大数据的主要来源。

(3) 应充分采集和利用描述数控机床工作任务的信息和数据。通常，数控机床按照操作者输入的加工程序在数控系统的控制下逐行执行加工程序中 G 指令 (G Code)，完成特定的工作任务，如完成某一发动机缸体零件的加工。目前的大部分研究通常是采集数控机床工作过程中的运行状态数据，如主轴电流、主轴振动等，在时域和频域对数据进行分析处理，进而试图建立数控机床工作过程的 CPS 模型。但由于实际加工过程中，所加工零件的形状和材料、所使用的加工程序、刀具、夹具、工艺等工作任务不同，基于时域所采集的运行状态数据不足以定量、唯一地描述数控机床实际所执行的复杂工作任务。这将无法建立工作任务数据与运行状态数据两者之间的映射关系，导致 CPS 模型的不完备、不确定，进而影响模型的实用性。例如，机床执行重载切削的工作任务或主轴发生故障时，主轴的电流均可能变大。在不了解机床实际执行的工作任务的情况下，单纯从主轴电流值变大，不能判断主轴的运行状态是否正常。

针对数控机床全生命周期中最重要的实际加工工作过程阶段，本文提出了一种基于指令域电控数据分析的数控机床工作过程的 CPS 模型的建模方法：将开放式数控系统内部产生的电控数据作为 CPS 模型中的大数据的主要来源，采集机床工作任务、制造资源和运行状态数据，通过指令域电控数据分析，完整地描述 CPS 模型中工作任务、制造资源与运行状态之间的映射关系，建立数控机床工作过程的 CPS 模型，进而实现数控加工工艺参数优化、机床及工艺系统的健康保障等智能化应用。

本文后续的研究内容如下：第 2 节详细介绍指令域

的概念、数控机床工作过程的 CPS 模型及其应用概述 ;第 3 节和第 4 节运用案例,分析了 CPS 模型在工艺参数优化、机床进给轴装配质量诊断和健康保障技术等智能化的运用;第 5 节对本文进行了总结。

2 指令域电控数据分析和数控机床工作过程 CPS 模型

本部分将从数控机床工作过程 CPS 模型的定义出发,对指令域、机床工作任务、制造资源、运行状态和数据采集方法分别进行介绍,进而提出基于指令域电控数据分析和数控机床工作过程 CPS 的建模方法,并概述了该模型的智能化应用。

2.1 数控机床工作过程 CPS 模型的定义

数控机床的制造资源 (记为 MR) 是指数控机床完成特定工作所需的外部条件,它既包含由机床、刀具、夹具、工件、材料等组成的工艺系统,又包含温度、振动等数控机床的外部工作环境因素。

数控机床的工作任务 (记为 WT) 是指数控机床所需要完成的工作内容。

在一定的制造资源 MR 条件下,数控机床完成特定的工作任务 WT 。在此工作过程中,数控机床工作质量、效率的优劣可用一些运行状态 (记为 Y) 的特征参数来表征。因此,在数控机床工作过程 CPS 模型中,模型的输入由两部分组成:工作任务 WT 和制造资源 MR 。模型的输出为机床执行工作任务所对应的运行状态 Y 。

数控机床工作过程的 CPS 模型定义为:与物理空间中的数控机床工作过程对应的,在信息空间中建立的工作任务 WT 、制造资源 MR 与运行状态 Y 之间的映射关系,记为

$$Y = f(WT, MR)$$

如图 1 所示,CPS 由设备层、感知层、网络层、认知层和控制层组成,形成人、产品、物理空间和信息空间的深度融合。在 CPS 中,感知层从设备层获取数据和信息,通过网络层传输给认知层。数控机床工作过程的 CPS 模型位于认知层中,对大数据进行分析处理,并将结果给控制层,从而实现对设备层的智能化反馈控制与优化。数控机床工作过程 CPS 模型是在特定制造资源 MR (包括主轴、丝杠、导轨、轴承、电机、刀具等工艺系统数据和环境温度等外部环境数据)下,采集工作任务数据 WT (包括 G 指令中的指令行号、指令段、刀具、主轴转速、进给速度、插补数据等工艺参数信息和控制信息)和运行状态数据 Y (包括主轴功率、扭矩、振动、进给轴轮廓误差等电控数据),并在信息空间的认知层中建立制造资源数据、工作任务数据与运行状态数据的映射关系 $Y = f(WT, MR)$,进而构成了与数控机床相映射的机床数字化动态模型 (i-Machine),或称之为数控机床工作过程的 CPS 模型。

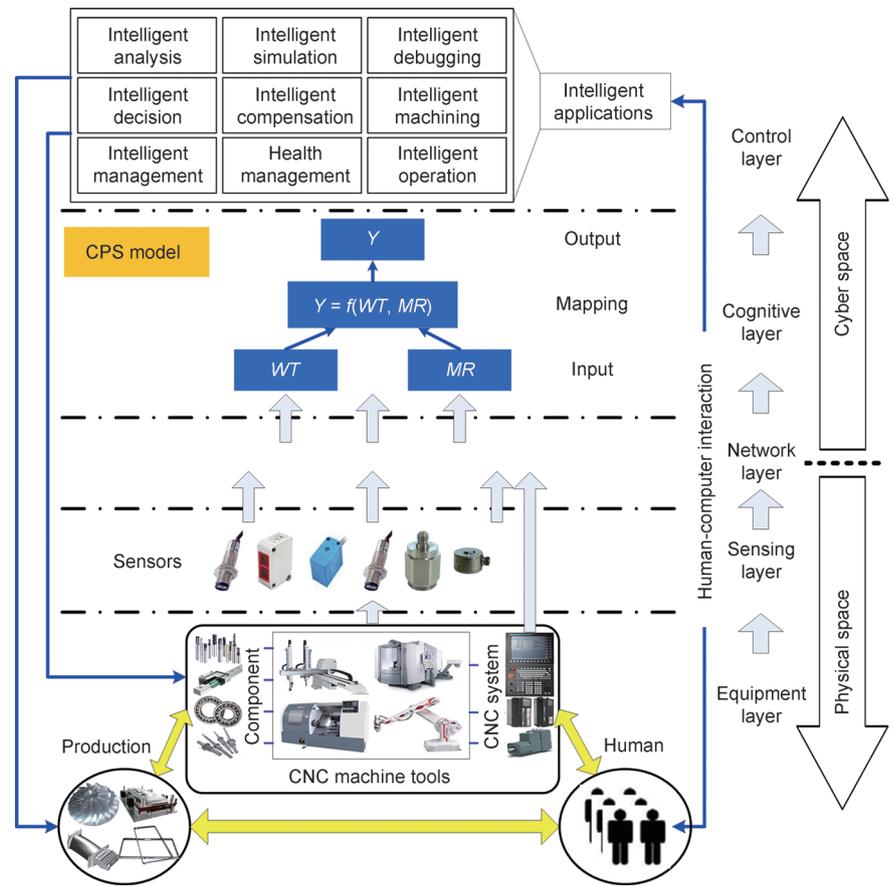


图 1. 数控机床 CPS 体系架构与 CPS 模型。

由于所需加工的零件千差万别,数控机床的工作任务也各不相同。数控机床的工作过程是由各种不同工作任务驱动的动态过程,并且机床工艺系统等制造资源是典型的机、电、液、控一体的复杂系统,这决定数控机床的 CPS 模型是复杂的动态模型,导致工作任务、制造资源与运行状态之间的映射关系 $Y = f(WT, MR)$ 很难用理论模型或数学公式来表达。

而在云计算、大数据的信息技术时代,海量数据的存储和管理变得非常简单。存储具有映射关系的工作任务、制造资源与运行状态的特征变量数据是一种行之有效的数控机床工作过程 CPS 建模方法。随着数控机床全寿命周

期的工作经历的积累,上述具有映射关系的特征变量数据将不断积累、丰富和更新,使得数控机床的CPS模型不断完善和进化。

2.2 数控机床工作任务 WT 的描述和指令域的概念

在数字信号分析领域,域提供了从不同角度描述、观察和分析信号的手段,如时域和频域等。机床运行状态数据 Y 的变化情况,如加工过程中某进给轴电流的变化,在时域中可以描述为随时间变化的关系曲线: $Y = f(t)$ 。即以自变量时间 t 为横轴,纵轴是进给轴电流的变化,如图2所示。在时域上,可以描述运行状态数据随时间的变化规律,但并没有描述在该时间段内机床正在执行何种工作任务。

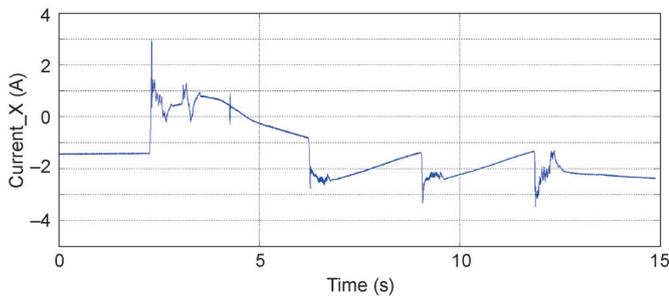


图2. 机床运行状态数据的时域波形图。

在计算机辅助设计/计算机辅助制造(CAD/CAM)软件系统中,编程人员根据被加工零件的形状特征和尺寸等技术要求进行加工工艺规划,并按照工艺要求,结合加工策略和加工工艺参数生成加工控制的指令集——数控加工G指令程序。加工不同的零件,采用不同的加工工艺,得到不同的G指令程序。

在制造资源 MR 一定的条件下,G指令程序及其所包含的加工指令,天然地描述了被加工零件的形状特征、尺寸和加工工艺以及加工策略等工作任务(WT)的数据和信息。G指令的行号表达了指令执行的顺序。顺序排列的G指令描述了工艺系统的运动轨迹和加工策略。刀具按照G指令运动,形成的包络面描述了零件的形状特征,如自由曲面、沟、槽和凸台等。G指令显式和隐式地描述了刀具形状和材料、工件材料、夹具、主轴转速、进给速度等加工工艺参数信息。此外,在G指令由刀位文件生成的后置处理中,也隐含地描述了数控机床的运动特性和数控系统的控制特性等信息。被加工零件的G指令程序构成了该零件进行数控加工的工作任务 WT 的定量描述。

特别要注意的是,数控系统按G指令程序中每条指

令的序列号 i (或称为行号) 依次解释和执行指令。由于指令的内容各不相同,每条指令的执行时间的长短也不相同。指令的执行时间赋予了对应指令序列号 i 的时间属性。

因此,根据指令序列 i 的顺序和时间属性,本文所提出的指令域的定义是:数控加工的G指令序列 i 和该指令序列在数控系统上顺序执行所对应的时间序列 t 的集合。

指令域既包含了指令执行的先后顺序,也包含时间的先后顺序。图3所示为图2中运行状态数据在指令域中的波形图。虽然两个波形图一致,但横坐标包含了指令序列 i 及其指令执行时间的信息。

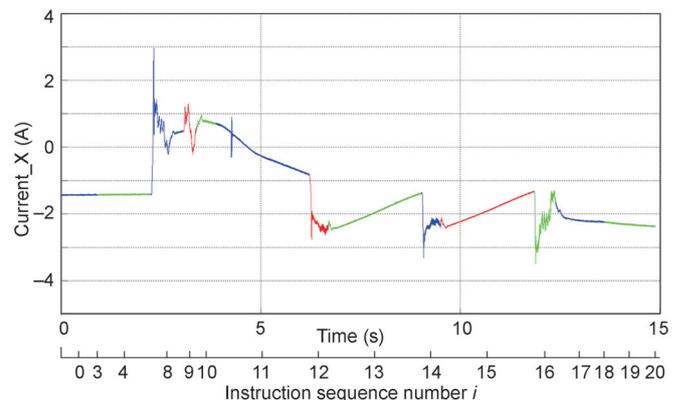


图3. 以指令域为横坐标的机床运行状态数据波形图。

在指令域内,把指令序列 i 和指令执行时间序列 t 作为自变量,分析某一特定的G指令程序,即可得到该G指令程序所描述的工作任务 WT , 记为 $WT = g(i(t), t)$ 。该G指令所包含的行号、指令段和刀具、主轴转速、进给速度等工艺参数信息,以及指令在数控系统上的执行时间的集合,构成了在指令域内对该特定工作任务 WT 的描述。

据此,数控机床工作过程的CPS模型 $Y = f(WT, MR)$, 在指令域内也可表达为

$$Y = f(g(i(t), t), MR)$$

在数控机床工作过程CPS模型的构建过程中,描述特定数控机床工作任务的变量 WT 可以从数控系统执行G指令时所产生的内部控制数据中直接提取。在指令域内,这些数据组成了一个描述工作任务的有序集合 $WT = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, n 为变量 WT 的采样数量。例如,三轴联动数控机床加工过程的工作任务变量为 $WT = \{p_x, p_y, p_z, T, S, F, M, \dots\}$, 其中 (p_x, p_y, p_z) 为指令位置, T 为刀具, S 为主轴转速, F 为进给速度, M 为辅助指令(如冷却液开/停等)。在数控机床的工作过程中,工作任务变量 WT 的数据随着采样周期发生变化,即 $WT^k = \{x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k\}$, k 表示第 k 个采样周期。

按照G指令、指令的顺序和对应的执行时间,在指

令域内对机床的工作任务变量 WT 进行采集，能够定量、唯一地描述数控机床特定的工作任务的信息，由此提高数控机床工作过程 CPS 模型的完备型和实用性。

2.3 数控机床的运行状态数据 Y

数控机床运行状态数据 Y 是零件数控加工的质量、精度和效率优劣直接或间接的定量描述。它既包含机床完成工作任务过程中数控系统内部反馈控制所获得的海量电控数据，如主轴功率、主轴电流、进给轴电流、循迹误差和材料切除率等，也包括通过外部传感器采集的物理和几何数据，如切削力、温度、振动、空间误差、热变形和零件表面粗糙度等。上述数据中，有些可以从数控系统内部直接采集或间接计算获得，如功率、电流、速度和加速度等。而有些数据则需要通过外接传感器或测量仪器实测获得，如温度、振动和粗糙度等。这些运行状态数据反映了机床的工作状态和零件的加工质量和效率的优劣。

在数控机床工作过程 CPS 模型的构建过程中，对数控机床运行状态的电数据、物理量和几何量集合 $\Phi = \{y_1, y_2, \dots, y_q\}$ 进行敏感性分析和特征提取分析后，从中确定与智能化功能(如加工质量和效率优化等)密切相关的运行状态特征变量集合 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ ， m 为特征数量，且 $m < q$ 。在指令域内，按与获取工作任务数据相同的采样周期进行采样，得到了运行状态特征变量的数据集合 $Y^k = \{y_1^k, y_2^k, \dots, y_m^k\}$ ， k 表示第 k 个采样周期。

2.4 基于指令域电控数据分析的数控机床工作过程 CPS 建模方法

为保证数控机床工作过程 CPS 模型中数据的多维度和完整性，获取的电控数据应同时包括机床运行工作任务数据和运行状态的特征数据。通

过保证这两种数据之间的一致性，实现 CPS 模型中工作任务与运行状态之间的映射关系。

鉴于数控机床及其工作过程的复杂性，通过已知的工作任务变量 WT 、制造资源变量 MR 和运行状态数据 Y 的集合，很难得到 WT 、 MR 与 Y 之间映射关系的数学函数。因此，本文提出指令域电控数据分析方法，针对特定的数控加工 G 指令执行过程，在指令域内按照相同的采样周期，对工作任务、制造资源和运行状态进行同步数据采集，如图 4 所示。在每个采样点处，记录对应指令行号 i 、工作任务数据 WT^k 、制造资源 MR^k 和运行状态 Y^k ，形成数据之间的映射。

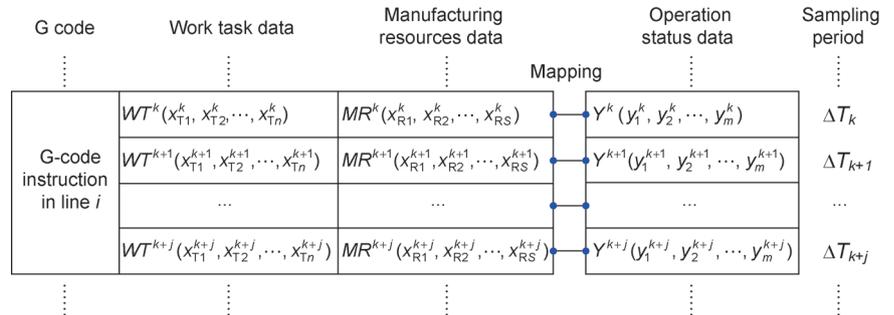


图 4. 机床工作任务数据、制造资源数据与运行状态数据的映射。

为了更直观表达上述映射关系，假设数控机床在完成工作任务 WT 的工作过程中，制造资源 MR 没有变化，数控机床工作过程的 CPS 模型则可简化为 $Y = f(WT)$ 。利用指令域电控数据分析方法在二维平面上建立坐标系，表达工作任务和运行状态数据之间的映射关系。在二维坐标系上，以包含执行时间信息的 G 指令序列号作为横坐标，以对应的机床运行状态数据(如电流、功率等)或数学处理后所提取的特征数据为纵坐标，形成数控机床工作过程 CPS 模型的指令域波形图。这与电学中显示电信号的示波器、医学中显示生物电信号的“心电图”非常相似，我们将在指令域上显示运行状态数据波形图的方法称为“指令域示波器”。

如图 5 所示为在数控车床上车削的包含三个台阶的零件。在加工该零件时，指令域中指令序列号和对应的粗加工 G 指令等工艺信息构成加工工作任务 WT ，采集的主轴电流为加工运行状态 Y 。利用指令域波形图，可以清晰地显示零件车削加工过程中的 WT 与 Y 的映射关系，如图 6 所示。

图 6 中，第 11、13 和 15 行的 G 指令分别对应车削三个不同高度的台阶，由于刀具的切削深度依次减小，对应的主轴电流也依次减小。而第 4 行指令

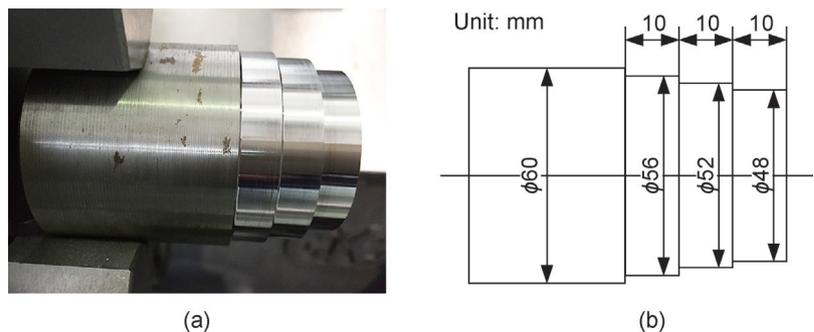


图 5. 台阶轴零件及其尺寸。(a) 实际零件；(b) 零件尺寸。

和第 19 行指令的大电流，分别是数控机床执行主轴启动和制动控制指令时产生的冲击电流。

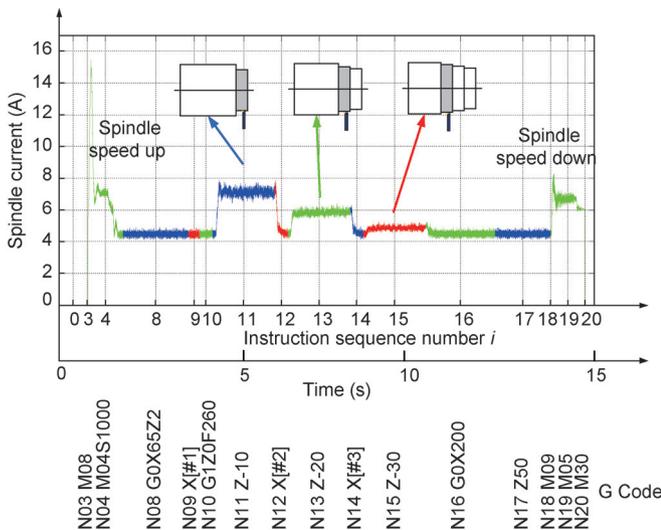


图 6. 在指令域中显示的数控加工主轴电流波形图。

2.5 基于指令域的机床运行状态数据采集方法

数控机床 CPS 模型中大数据的来源有两种。第一种方式利用数控机床外部传感器间接获取数据 [11]，如利用压电和应变片式传感器获取主轴的振动。该方法是以往研究中获取数据的主要方式，其缺点是需要机床预留传感器安装位置，增加了系统的复杂性和额外成本。此外，由于数控机床工作在复杂的电磁干扰、恶劣的工作环境中，新增外接传感器的信号稳定性和可靠性较差。第二种方式直接从数控系统内部获取 [12, 13]。数控系统在执行指令的实时控制过程中，内部会产生海量电控数据，包括控制数据 (如插补位置、进给速度、加速度、主轴转速、切削速度等) 和反馈数据 (如主轴功率、主轴电流、进给轴电流、位置跟随误差等)，如图 7 所示。这些数据包含了大量描述工作任务 *WT*、制造资源 *MR* 和运行状态 *Y* 的有效信息。数控系统内部电控数据具有标准化、可靠、不受外界 (污染、切屑、切削液、机械和电磁等) 干扰的特点，采集过程成本低、不会对加工过程产生干扰。

以往对 CPS 模型的研究中，直接从数控系统内部获取电控数据的方式往往被忽视。数控系统具有物理资源和信息资源的双重优势，并且从数控系统内部采集数据非常方便。在数控机床的工作过程中，系统内部所产生的大量由控制信号和电信号构成的原始数据具有详实、实时、定量、可靠的特点，这些非结构化和多维度的原始电控数据，应该成为今后构建数控机床 CPS 模型所需采集的大数据的主要来源，而其他外接传感器则作为数据采集的辅助手段。

2.6 数控机床工作过程 CPS 模型的智能化应用概述

数控机床工作过程的 CPS 模型中，有两个输入变量 (工作任务 *WT*、制造资源 *MR*) 和一个输出变量 (运行状态 *Y*)。在数控机床的工作过程中，实时采集输入与输出变量数据，在指令域内建立相互的映射关系并进行分析处理，即可从以下三个方面实现工作任务的智能优化、制造资源的健康保障和设计制造的优化。

2.6.1 工作任务的智能优化

假设数控机床在完成工作任务 *WT* 的过程中，制造资源 *MR* 保持不变 (记为 MR_0)，即机床工艺系统处于良好稳定状态，则数控机床工作过程 CPS 模型中映射关系简化为 $Y = f(WT) |_{MR_0}$ 。

通过指令域波形图，根据判断运行状态数据 *Y* 的异常和优劣，可以找到工作任务 *WT* 中相映射的指令序号和指令内容，进而优化调整指令中的工艺参数 (如进给速度 *F*、主轴转速 *S* 等)，实现智能优化。典型的应用有以下三个方面：

(1) 工艺参数的离线优化。在大批量的生产中，给定的工作任务 *WT* 中设置了初始工艺参数。当加工首件零件时，在指令域内采集反映加工质量的运行状态数据 *Y* (如跟随误差、电流等)。然后采用离线的方式，利用运行状态数据，调整工艺参数，得到优化的工艺参数，用于后续零件的加工。如在切削加工中，利用运行状态 *Y* 中主轴电流、主轴振动等特征参数的大小，可以找到相应的指令序列号和指令内容。通过调整指令中的进给速度 *F*、主轴转速 *S*，实现加工工艺参数的智能优化。

(2) 工艺参数的在线实时调整。给定工作任务 *WT* 和运行状态数据 *Y* 的约束条件，在加工过程中实时采集运行状态数据 *Y* (如电流、振动等)。当运行状态数据出现异常时，立刻根据约束条件实时调整工艺参数 (如主轴转速、进给速度等)，使运行状态数据 *Y* 处于正常的范围，实现工艺参数在线实时调整。例如，在加工中出现振动时，可以通过调整主轴转速或进给速度，实现振动抑制。在加工中根据主轴电流的大小，实时调整进给速度，使得切削负荷均衡，并提高加工效率，实现自适应加工。

(3) 构建自学习的切削加工工艺数据库。切削加工工艺数据库描述了加工工艺参数 (如工件材料、刀具材料与结构、切削用量、冷却状态、机床功率、机床刚度、工装等组成的变量空间) 与加工状态 (切削力、刀具磨损、断屑状态、切削振动、表面质量等组成的状态空间) 之间的映射关系。传统的建立切削加工数据库的方法需要进行大量、耗时、成本高昂的加工工艺试验。

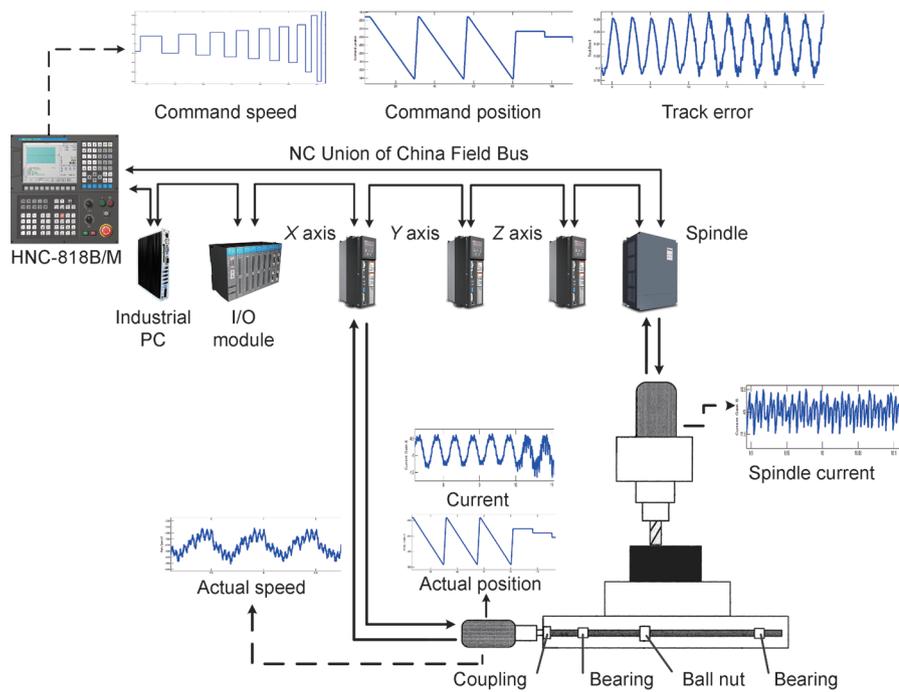


图 7. 数控机床可采集内部大数据。

切削加工工艺数据库的本质就是数控机床工作过程的 CPS 模型。在数控机床的全寿命周期中，不断产生海量的电控数据。这些数据可以用于提取反映工艺参数与运行状态数据 Y 对应关系的数据，形成自学习式切削加工工艺数据库。随着在数控机床使用的全寿命周期中的加工工艺数据不断积累，与该数控机床及其使用条件相对应的、具有个性化的切削加工工艺数据库将不断积累、丰富和进化。工艺数据库还可通过网络在数控设备之间分享和融合。利用切削加工工艺数据库中的数据和知识，可以实现动态预测、优化、调整和控制加工工艺参数。

2.6.2 制造资源的智能健康管理

如果数控机床被设定完成某一固定不变的工作任务 WT_0 ，则数控机床工作过程 CPS 模型中映射关系简化为 $Y = f(MR) |_{WT_0}$ 。

通过指令域波形图，根据判断运行状态数据 Y 的异常和优劣，或通过对比制造工艺系统不同历史时期执行同一工作任务 WT_0 的运行状态 Y 的差异，可以判断数控机床以及制造工艺系统的健康状态的变化，进而实现智能健康保障。典型的应用有以下两个方面。

(1) 制造资源工作质量的检查和诊断。为数控机床设置具有诊断机床工作质量功能的工作任务作为 WT_0 (如进给轴驱动工作台在全行程内按指定速度匀速移动)，在指令域内采集反映制造资源的工作质量的运行状态数据 Y (如进给轴伺服电机的电流)。如果发现运行状态数据 Y 出现异常波动，即可进行制造资源工作质量的检查和故障诊断 (如进给轴的装配质量检测 and 诊断、刀具磨损和破损等)。

(2) 基于历史运行状态的制造资源的健康状态检查和诊断。制造资源的健康状态检测与诊断的核心思想是通过分析比较全寿命周期不同阶段的工作过程的 CPS 模型的差异，检测和评价机床的健康状态的变化。

假设数控机床重复执行同一工作任务 WT_0 (如重复加工同一个零件，或在全寿命周期的不同阶段执行同一个用于诊断工作质量的程序)，理论上讲，在指令域内采集的相对应的运行状态数据 Y 应该是重复一致的。但如果出现运行状态数据 Y 不一致，则说明制造资源 (制造工艺系统) 的完好状态发生了变化，如刀具寿命预测，机床主轴、丝杆等功能部件出现了故障或机床精度出现了变化等。

在汽车零件等大批量数控加工时，数控机床重复完成同一零件加工的工作任务，其制程能力指数 (CPK) 是反映制造工艺系统稳定性的重要指标。通过基于指令域的电控数据分析，比较相同零件加工时的历史运行状态数据 Y 的变化，即可监控制造工艺系统的性能退化和健康状态，保证制造工艺系统的稳定性。

2.6.3 数控机床的优化设计与制造

本质上，数控机床工作过程 CPS 模型中包含的大数据是数控机床和工艺系统组成的多领域物理集成系统性能和功能的最终表现。因此，可以利用数控机床全寿命周期中的大数据，一方面实现理论模型的参数识别与优化，另一方面，追踪性能缺陷和监控机床工艺系统的质量及可靠性，实现机床设计的改进和完善。

本文所提出的基于指令域电控数据分析和 CPS 建模方法和原理同样也适用于其他各种以数字化控制为基础的自动化机器设备 (如机器人、电动汽车、生产线等) 的 CPS 建模。也可以利用第三方软件，如 Watchdog Agent® [6] 等，对指令域电控数据进行数据处理和特征提取，实现数控机床及功能部件的健康诊断 (health diagnose)、性能预测 (performance prediction) 等应用。另外，以数控机床工作过程 CPS 模型为基础，结合

开放式的数控系统、大数据和云计算，构建以智能化应用程序 (APPs) 为基础的开放式智能制造生态系统，具有广泛的应用前景。

本文后续部分将结合两个具体案例，说明数控机床工作过程 CPS 模型的智能化应用。未来，随着研究的深入，数控机床工作过程的 CPS 模型的应用领域将进一步扩展。

3 基于指令域电控数据分析的加工工艺参数优化技术的案例研究

当对零件进行初次数控加工时，可以获取相应的电控数据。通过在指令域内对电控数据进行分析，找到异常运行状态所对应的指令序列号，最终完成对指令的工艺参数的优化。本文结合以下两个实验，实现了粗加工阶段工艺参数优化。

3.1 实验一

本实验使用的制造资源 *MR* 为配有华中 HNC-818A/T 数控系统的 CK4055 斜床身车床 (图 8) 及表 1 所示的实验条件。

本实验的工作任务 *WT* 为车削如图 5 所示的三台阶的阶梯轴。采集切削过程中的主轴电流作为运行状态数据 *Y*。利用指令域电控数据分析方法建立其与工作任务数据间的映射关系，如图 9 所示。以三个阶梯轴加工时的主轴电流平均值作为优化目标，通过修改和优化切削进给速度 *F*，使得主轴负载均衡。

图 9 (a) 是优化前的主轴电流指令域波形图。有三个阶梯轴加工的加工工艺参数进给速度 $F = 260 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 是固定的 (图 10 左侧)，导致主轴电流大小不一致。

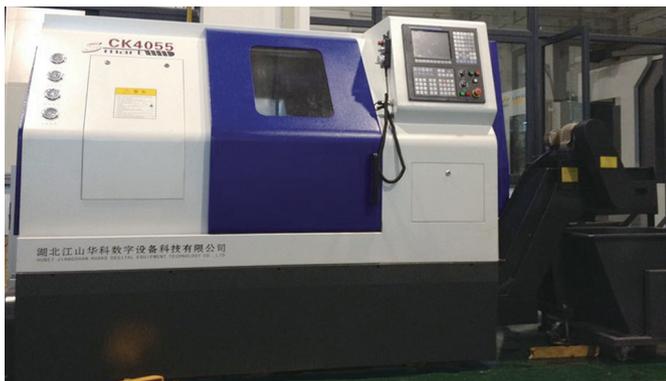


图 8. CK4055 车床。

表 1. 实验条件

Cutter insert type	Cutter bar type	Part material	Stock diameter	Pre-determined machining parameter	Sampling frequency
CNMG120408	MCLNL2525M12	Steel 45	φ60 mm	$F_0 = 260 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1} \times S = 1000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$	1 kHz

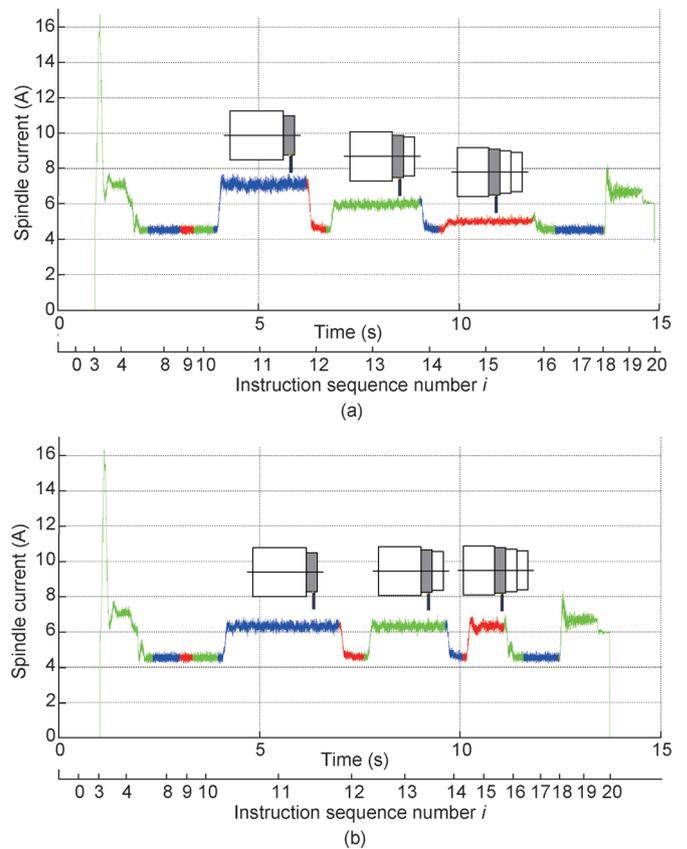


图 9. 三阶零件加工参数 (a) 优化前和 (b) 优化后的对比图。

通过优化 *F* 值，得到图 10 右侧所示的优化后的 *G* 指令程序，将三个阶梯轴的进给速度 *F* 分别调整为 $200 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $300 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $600 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ，采用优化后的 *G* 指令程序进行加工后，得到结果如图 9 (b) 所示的主轴电流指令域波形图。从图中可以看出，三个阶梯轴加工的主轴电流趋近均衡。

为了更进一步说明优化效果，对图 9 中的第 11、13 和 15 段对应电流进行统计分析，结果见表 2。

从表 2 可以看出：主轴最大电流从优化前的 7.1 A 降低到优化后的 6.3 A，主轴最小电流从优化前的 4.9 A 提高到优化后的 6.2 A，均衡了切削负载；加工时间从优化前的 14.8 s 减少到优化后的 13.7 s，提高了加工效率。

实验一描述了指令域电控数据分析方法在车削加工工艺参数优化中的应用，下面将通过实验二对实际加工手机壳的铣削加工工艺参数优化进行介绍。

3.2 实验二

本实验使用的制造资源 *MR* 为配有华中 HNC-818A 数控系统的 Z-540B 钻孔攻丝中心 (图 11(a)) 及表 3 所示

的实验条件。本实验的工作任务 WT 为完成手机机壳 (图 11 (b)) 粗铣加工。零件的加工路径及对应 G 指令程序如图 12 所示。

采集切削过程中的主轴电流作为运行状态 Y 。根据优化前实测的每条指令所对应的评价电流值大小,重新计算该指令优化后的进给速度。对于优化前平均电流值较大的指令,优化后降低该指令的进给速度,对于优化前平

Original G code	Optimized G code
N01 %123	N01 %123
N02 T0505	N02 T0505
N03 M08	N03 M08
N04 M04S1000	N04 M04S1000
N05 #1=48	N05 #1=48
N06 #2=52	N06 #2=52
N07 #3=56	N07 #3=56
N08 G0X65Z2	N08 G0X65Z2
N09 X[#1]	N09 X[#1]
N10 G1Z0F260	N10 G1Z0F260
N11 G1Z-10F260	N11 G1Z-10 F200
N12 X[#2]	N12 X[#2]
N13 G1Z-20F260	N13 G1Z-20 F300
N14 X[#3]	N14 X[#3]
N15 G1Z-30F260	N15 G1Z-30 F600
N16 G0X200	N16 G0X200
N17 Z50	N17 Z50
N18 M09	N18 M09
N19 M05	N19 M05
N20 M30	N20 M30

图 10. 优化前后 G 指令程序对比。

表 2. 优化分析

Optimization experiment	Maximum current (A)	Minimum current (A)	Machining time (s)
Before optimization	7.1	4.9	14.8
After optimization	6.3	6.2	13.7

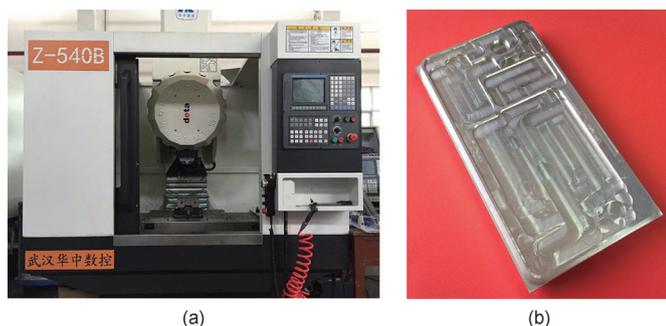


图 11. (a) Z-540B 钻孔攻丝中心; (b) 实际零件。

表 3. 实验条件

Cutter size	Part material	Stock size	Pre-determined machining parameter	Sampling frequency
$\phi 10$ mm	Aluminum alloy	120 × 50 mm	$F_0 = 5000$ mm·min ⁻¹ $S = 18\ 000$ r·min ⁻¹	1 kHz

均电流值较小的指令,优化后则提高该指令的进给速度。实验结果如图 13 所示。

图 13 (a) 中红线是优化前的主轴电流,蓝线是优化后的主轴电流,总体来看,与红色曲线相比,优化后的蓝色曲线的最大值降低,而最小值提高。将其中第 380~490 行局部放大得到图 13 (b) 的电流图,与之相对应的进给速度 F 见图 13 (c)。从图 13 (c) 可以看出,优化前的进给速度 (红线) 是恒定的 $F5000$;优化后,根据主轴电流的大小,对进给速度 (蓝线) 进行调整,比如图 13 中说明了 F 值的提升提高了加工中的电流,说明了 F 值的减小降低了加工中的电流。同样,为了更进一步说明优化效果,对图 13 (a) 中的波形进行统计学分析,得到的结果见表 4。从表 4 可以看出,主轴电流的最大值、峰值和方差由优化前的 3.57 A、2.49 A 和 0.0545 A 分别减小到了优化后的 3.23 A、1.62 A 和 0.0494 A,最小值

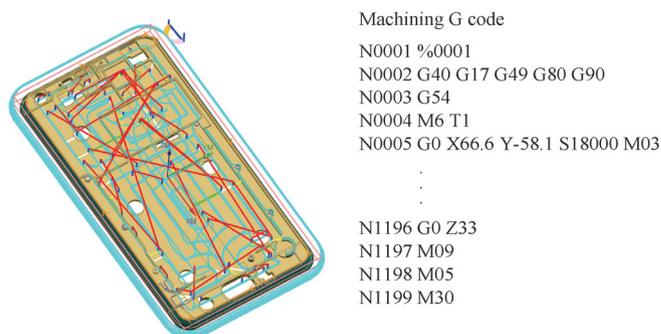


图 12. 零件的加工路径及 G 指令程序。

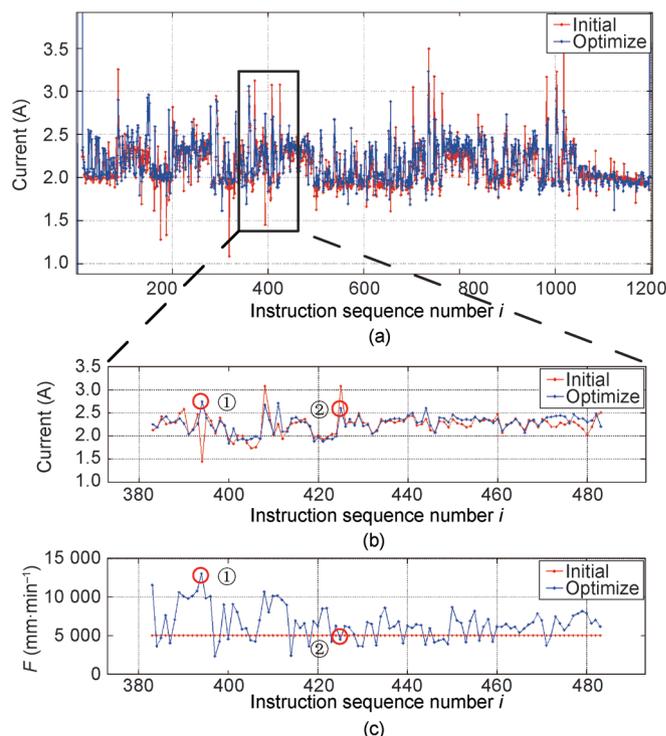


图 13. (a) 主轴电流指令域波形图; (b) 进给速度局部放大图; (c) 主轴电流局部放大图。

则由优化前的 1.08 A 增加到了优化后的 1.61 A，以上指标均可以反映刀具切削力负载均衡效果显著。尽管平均值没有发生较大的变化，但是加工时间由优化前的 210 s 减小到了优化后的 162 s，加工效率提升了 22.9%。

以上两个实验均采用基于指令域电控数据分析方法，通过运行状态数据 (主轴电流) 变化情况优化所对应指令程序里的进给速度，使得刀具的负载均衡性和加工效率得到了显著提高。

针对基于指令域电控数据分析的加工工艺参数优化技术，已经在第 2.6 节中进行了较为详细的叙述，主要应用包括调整进给速度 F 的恒切削力控制工艺参数优化和调整主轴转速 S 的颤振抑制工艺参数优化。针对不同的应用阶段和不同的实时性要求，恒切削力控制和机床颤振控制均可进一步采用在线和离线方式的粗加工和精加工工艺参数优化方法实现。另外，可以将数控加工全寿命周期的数据进行存储，建立形成自学习的切削加工工艺数据库。

4 基于指令域电控数据分析的机床健康保障技术的案例研究

采集数据机床运行既定任务的状态数据，并通过电控数据分析手段分析采集到的非正常数据，以诊断机床的故障。比较机床全寿命周期中不同时间节点的运行状态数据，可以得知机床的老化状态。本文通过机床装配质量诊断实验和机床健康保障实验说明上述方法。

4.1 基于指令域电控数据分析的机床装配质量诊断实验研究

本实验工作任务 WT 是 X 轴以恒定速度匀速直线运动，使用的制造资源 MR 为配有华中 HNC-818B/M 数控系统的 XHK715 立式加工中心 (图 14)，采集 X 轴负载电流作为运行状态数据 Y 。 X 轴 (图 15) 使用滚珠丝杠螺母副作为传动机构，丝杠通过波纹管联轴器与伺服电机相连，伺服电机选用了型号为 GK6081-6AC61-J20B 的永磁同步电机。其他相关参数见表 5。



图 14. 装配实验测试环境。

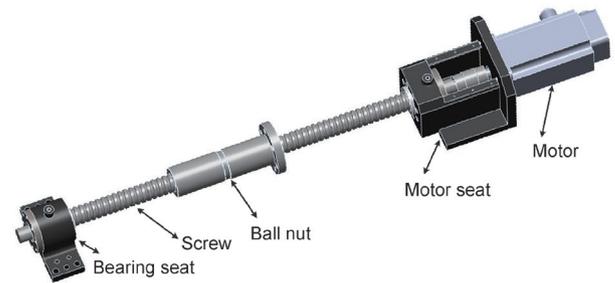


图 15. X 轴进给轴结构。

4.1.1 进给轴电流分析

在对装配质量进行具体分析之前，先对采集到的负载电流进行成分分析。图 16 中的电流是 X 轴在全行程范围内以 $1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的进给速度直线运行过程中采集的，本文还利用快速傅里叶变换 (FFT) 对电流进行了频域分析。

图 16 (a) 中， X 轴电流大小在全行程范围内是基本均匀一致的，说明机床进给轴的装配质量较好；图 16 (b) 中显示的高频电流波动属于电机本身波动属性；图 16 (c) 中 5 Hz ($3/r$) 是电机与极对数相关的波动，代表图 16 (b) 中的低频成分， 60 Hz ($36/r$) 是由于齿槽效应引起的电流波动，代表图 16 (b) 中的高频成分。经过分析， 5 Hz 是电机手工绕线所导致的磁场分布不均匀引起的， 60 Hz 是电机齿槽设计不合理所引起的。因此，利用指令域电控数据分析的方法不但能实现对机床装配质量的诊断，而且能实现对进给电机质量的诊断。

表 4. 优化效果分析

Optimization experiment	Maximum current (A)	Minimum current (A)	Peak-to-valley value (A)	Average value (A)	Variance value (A)	Time (s)	Effect-raising percentage (%)
Before optimization	3.57	1.08	2.49	2.12	0.0545	210	0
After optimization	3.23	1.61	1.62	2.15	0.0494	162	22.9

表 5. 实验参数

Pitch of lead screw	Travel range of X axis	Feedrate	Number of pole pair of motor	Number of tooth slot of motor	Sampling frequency
10 mm	800 mm	F1000	3	36	1 kHz

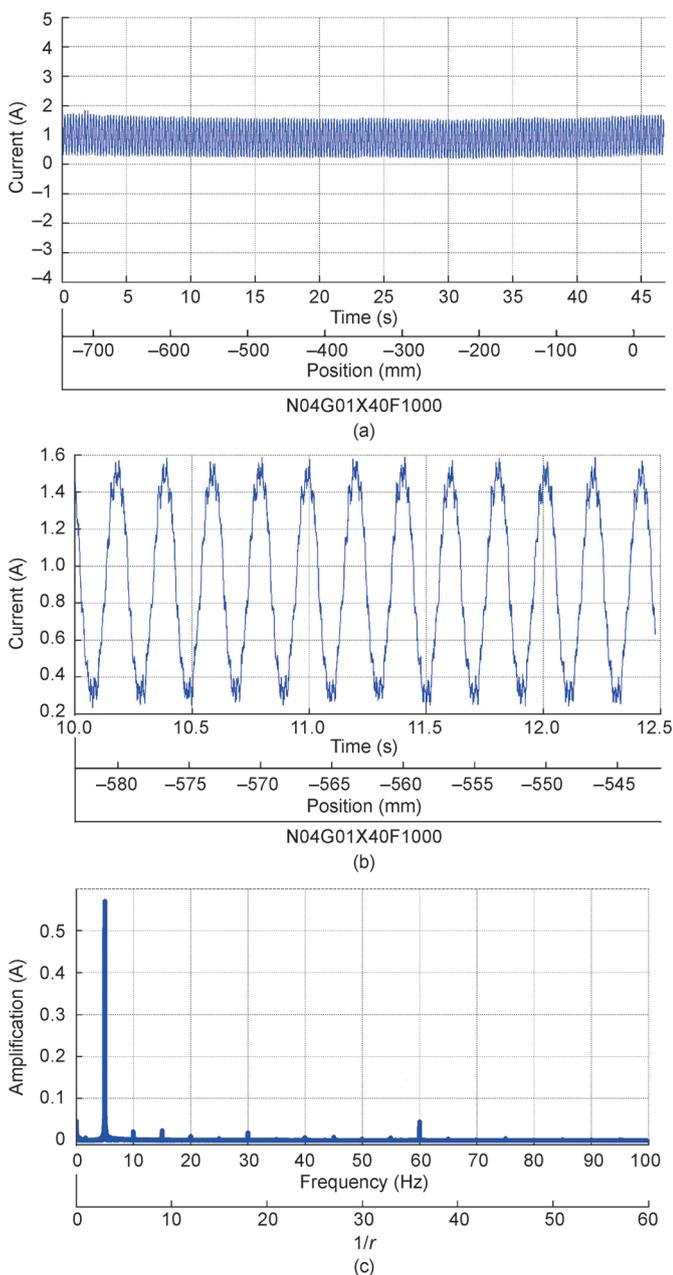


图 16. X 轴电流分析。(a) 原始电流时域图；(b) 局部放大图；(c) 全局幅值谱。

4.1.2 丝杠与导轨不平行条件下基于指令域电流分析比较

图 17 中红色电流是 X 轴在全行程范围内以 $1000 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的进给速度直线运行过程中采集到的电流滑动平均后的曲线，通过电流靠近最右端弯曲程度较大的特征，诊断为丝杠在该端的轴承座安装异常。轴承座安装的异常直接导致丝杠与导轨的不平行。随后通过多次调节该端的轴承座位置，使丝杠与导轨尽量平行，调节后的电流如图中的蓝色曲线所示，靠近最右端的电流值显著减小，两端呈现微小弯曲的特征。由此可知，红色电流代表的丝杠与导轨不平行装配质量问题与诊断的结果一致。

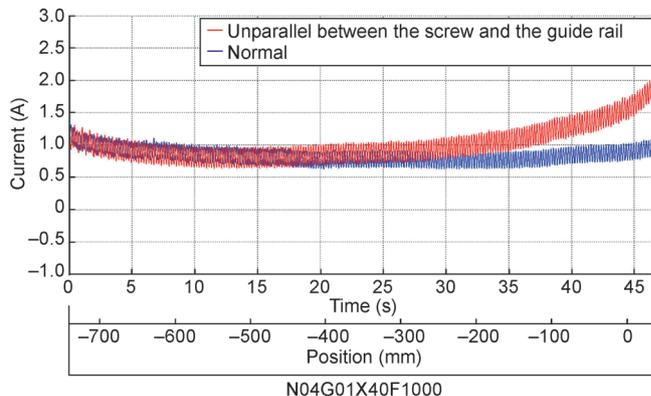


图 17. 正常条件下的电流和丝杠与导轨不平行的电流比较。

上述机床装配质量诊断实验充分利用指令域电控数据分析方法的特点，既能定量且唯一地指出实验的工作任务信息——指令顺序、运动轨迹、运行轴对象、运行位置、进给速度，同时又能通过对机床装配 CPS 模型的分析实现装配质量的诊断。

4.2 基于指令域电控数据分析的数控机床健康保障系统

健康保障系统面向数控机床及其关键功能部件的历史数据进行健康状态的监测。本实验工作任务 *WT* 是单轴恒速运行，制造资源 *MR* 沿用机床装配质量诊断的机床 (图 14)，采集负载电流作为运行状态数据 *Y*，比较前后半年的数据，分析进给轴系统的健康状态变化。

图 18 中红色曲线是 2015 年 4 月 29 日的 X 轴在全行程范围内以 $1000 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的进给速度直线运行过程中采集的电流滑动平均后的曲线，蓝色曲线是 2014 年 10 月 28 日的 X 轴在全行程范围内以 $1000 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的进给速度直线运行过程中采集的电流滑动平均后的曲线。在 2014 年 10 月 28 日到 2015 年 4 月 29 日之间，机床进行了大量的重载切削实验，最终反映为 X 进给轴健康状态的衰退：由最初的平直的蓝色曲线变化为两端弯曲的红色曲线，且电流的整体平均值变小。其中，电流整体平均值变小说明丝杠预紧力变小；而电流曲线两端弯曲说明丝杠与导轨不平行。基于以上健康衰退情况可以提出相应的维护策略，比如可以给出调节丝杠与导轨的平行度并且适当提高丝杠预紧力的维护策略，避免情况进一步恶化，从而达到健康保障的目的。

通过上述实验，基于指令域电控数据分析的机床健康状态 CPS 模型有效地应用于数控机床健康保障。针对基于指令域电控数据分析的健康保障系统的应用，已经在第 2.6 节中进行了较为详细的介绍，主要的应用包括基于当前运行状态的制造资源工作质量检查和诊断，比如进给轴装配质量诊断、主轴装配质量诊断；基于历史运行状态的制造

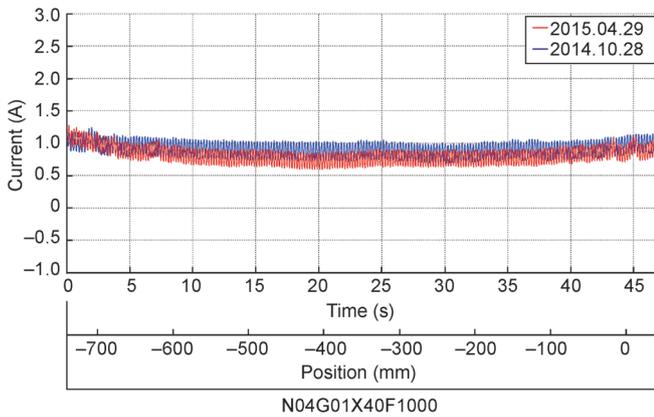


图 18. 机床运行健康状态的变化。

资源的健康状态检查和诊断，比如数控机床健康状态检查及诊断、机床工艺系统稳定性监测。

此外，通过获取数控机床全寿命周期的电子大数据，还可以建立一套数控机床健康保障的统一方法，形成数控机床基于指令域电控数据分析的健康保障标准，最终建成数控机床的定期深度体检和长期监控的健康保障体系。

5 结论

本文提出了一种基于指令域电控数据分析的数据机床工作过程 CPS 模型的构建方法，并对其智能化应用进行了案例研究。该方法具有以下特点。

(1) 数控机床工作过程的 CPS 模型建立了信息空间中的工作任务 WT 、制造资源 MR 与运行状态 Y 之间的映射关系： $Y = f(WT, MR)$ 。

(2) 鉴于数控机床及其工作过程的复杂性，很难得到 $Y = f(WT, MR)$ 函数的精确数学表达。通过存储具有映射关系的工作任务 WT 、制造资源 MR 与运行状态 Y 的特征变量数据的方式，表达上述映射关系是一种行之有效的数控机床工作过程 CPS 建模方法。随着数控机床全寿命周期中特征变量数据的不断积累和更新，结合了理论模型的动态进化的数控机床模型将与与时俱进。

(3) 数控机床 CPS 建模所需的数据可以通过新增外接传感器采集，也可直接从数控系统内部获取。数控系统既是物理空间中的重要物理资源，又是信息空间中的重要信息资源。数控系统内部产生的海量的电控数据对建立机床工作过程 CPS 模型具有重要价值，是 CPS 建模的主要数据来源。

(4) 被加工零件的 G 指令包含了被加工零件的形状特征、尺寸和加工工艺、加工策略等工作任务的大量数据和信息，可以定量描述该零件进行数控加工的工作任务 WT 。指令域是数控加工的 G 指令序列 i 和该指令序列在

数控系统上顺序执行所对应的时间序列 t 的集合。在指令域内，通过对工作任务 WT 、制造资源 MR 与运行状态 Y 的数据进行采集和分析，可以实时、精准地表达数控机床工作过程 CPS 模型中输入、输出变量之间的映射关系。

(5) 通过指令域电控数据分析，根据运行状态数据 Y 的异常和优劣，可以实现工作任务的智能优化、制造资源的智能健康保障、数控机床的优化设计与制造等智能化应用。未来还可以以该 CPS 模型为基础，构建以智能化应用程序为基础的开放式智能制造生态系统。

致谢

感谢国家科技重大专项课题“开放式高档数控系统、伺服装置和电机成套产品开发与综合验证”(2012ZX04001012)的资助。感谢数控工程中心各课题组对本文研究的贡献，特别感谢周浩、马驰飞、薛聪、丁国涛和应坤等人对本文研究工作的支持。感谢美国辛辛那提大学智能维护中心(IMS)李杰教授、晋文静博士对本文研究工作的帮助。

Compliance with ethics guidelines

Jihong Chen, Jianzhong Yang, Huicheng Zhou, Hua Xiang, Zhihong Zhu, Yesong Li, Chen-Han Lee, and Guangda Xu declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

1. H. Kagermann, et al. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group. 2013
2. J. C. Jensen, D. H. Chang, E. A. Lee. A model-based design methodology for cyber-physical systems. In: *Proceedings of the 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. New York: IEEE, 2011: 1666–1671
3. P. Derler, E. A. Lee, A. S. Vincentelli. Modeling cyber-physical systems. *Proc. IEEE*, 2012, 100(1): 13–28
4. Y. Wu, L. Chen. *Simulation Optimization Method for Multi-domain Physical Systems*. Beijing: Science Press, 2011 (in Chinese)
5. A. Vijayaraghavan, W. Sobel, A. Fox, D. Dornfeld, P. Warndorf. Improving machine tool interoperability using standardized interface protocols: MTConnect™. In: *Proceedings of 2008 International Symposium on Flexible Automation (ISFA)*. Atlanta, GA, USA, 2008: 23–26
6. A. Kao, J. Lee, R. Lapira, S. Yang, Y. Huang, N. Yen. iFactory cloud service platform based on IMS tools and Servo-lution. In: J. Lee, J. Ni, J. Sarangapani, J. Mathew, eds. *Engineering Asset Management 2011: Proceedings of the Sixth World Congress on Engineering Asset Management*. London: Springer, 2011: 699–709
7. L. H. Wang. Machine availability monitoring and machining process planning towards Cloud manufacturing. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 2013, 6(4): 263–273
8. J. Lee, B. Bagheri, H. A. Kao. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry

- 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 2015, 3: 18–23
9. J. Lee, E. Lapira, B. Bagheri, H. Kao. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manufacturing Letters*, 2013, 1(1): 38–41
10. J. Wan, M. Chen, F. Xia, L. Di, K. Zhou. From machine-to-machine communications towards cyber-physical systems. *Comput. Sci. Inf. Syst.*, 2013, 10(3): 1105–1128
11. J. Lee, F. Wu, W. Zhao, M. Ghaffari, L. Liao, D. Siegel. Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications. *Mech. Syst. Signal Pr.*, 2014, 42(1–2): 314–334
12. V. Plapper, M. Weck. Sensorless machine tool condition monitoring based on open NCs. In: *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*. New York: IEEE, 2001: 3104–3108
13. J. F. G. Oliveira, F. Ferraz Júnior, R. T. Coelho, E. J. Silva. Architecture for machining process and production monitoring based in open computer numerical control. *Proc. Inst. Mech. Eng., B J. Eng. Manuf.*, 2008, 222(12): 1605–1612