DOI: 10.3901/JME.2019.01.160

机械加工工艺单元多分辨率实体动态 能效获取方法^{*}

朱 硕^{1,2} 张 华^{1,2} 江志刚^{1,2}

(1. 武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室 武汉 430081;

2. 武汉科技大学机械传动与制造工程湖北省重点实验室 武汉 430081)

摘要: 机械加工工艺单元是机械加工过程的基本构成单元和活动的主体。为适应机械加工过程能量精细化管理的要求,通过分析机械加工工艺单元设备层、制造单元层的能量消耗动态特性,建立面向不同层级的能效指标体系。基于多分辨率实体(Multiple resolution entity, MRE)的思想,采用离散事件系统规范(Discrete event system specification, DEVS)的层次化建模方法,构建机械加工工艺单元 MRE 动态能效模型,获取工艺单元运行过程中能量利用率、能量消耗与有效产出(加工利润、合格品数量、材料去除量)等动态信息。结合 Eclipse 平台下的 CD++ 插件对实际案例进行仿真分析,验证该方法的有效性。

关键词: 工艺单元; 多分辨率实体; 动态能效; 离散事件系统规范

中图分类号: TG501

An Acquisition Method of Dynamic Energy Efficiency for Multi-resolution Entity of Mechanical Processing Unit

ZHU Shuo^{1,2} ZHANG Hua^{1,2} JIANG Zhigang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology,

Wuhan University of Science and Technology, Ministry of Education, Wuhan 430081;

2. Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering,

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract: Mechanical processing unit is the basic constitution and the main activity subject of machining process. In order to meet the requirement of meticulous energy management, through the dynamic characteristic analysis of energy consumption on the manufacturing unit level and machinery level of mechanical processing units, the comprehensive energy efficiency index system is proposed. Based on the MRE (multiple resolution entity) theory, the dynamic energy efficiency models of mechanical processing unit MRE is established by adopted the hierarchical ladder modeling method of DEVS (discrete event system specification). So the dynamic information on energy utilization, energy consumption and effective output (processing profits, conforming quantity, and material removal amount) is obtained. The comprehensive energy efficiency models are simulated by using CD++ plug-in under Eclipse to analyze a specific case, and the validity of the method is verified.

Key words: processing unit; multiple resolution entity; dynamic energy efficiency; discrete event system specification

0 前言

机械加工过程是机械制造业中一项重要的生产活动,在制造业节能减排中具有举足轻重的地位^[1]。世界自然基金会发布的《气候变化解决方案—WWF2050 展望》中称,目前我国机械工业单位产

品综合能源利用效率仅为 33% 左右,相当于发达国家 20 年前水平^[2-3]。因此存在很大的节能潜力。机械加工工艺单元作为加工活动的主体,具有分层特性,动态分析其能量消耗过程、能量利用率及有效产出,对于实现制造企业能效精细化管理具有重要的意义。

近年来,机械加工过程能效建模仿真方法在加工工艺的规划、设计及优化等方面已占据不可替代的地位^[4],采用建模与仿真方法对机械加工过程能耗情况仿真、预测和评估,同时考虑系统加工过程

^{*} 国家自然科学基金(51275365)、国家高技术研究发展计划(863 计划, 2014AA041504)和武汉科技大学校基金(2015X2049)资助项目。20180209 收到初稿,20180601 收到修改稿

中的不确定因素,可以为制造过程不同阶段的全面能效提升提供分析依据。目前,该方法正在国内外相关研究中迅速兴起,且主要集中在对设备单元、加工过程的能效建模和仿真两个方面。

在对单台设备能量有效利用情况的建模与仿真研究上,AVRAM 等^[5]通过分析机床在不同使用阶段的可变及恒定能量流,提出了一种针对机床系统使用过程能源消耗的评价的方法。BI 等^[6]基于对对象机床运动学及动力学行为的分析,建立了加工参数与能量消耗的关联分析模型,通过优化加工参数提高机床的能量利用率。谢东等^[7]研究了切削加工中切削参数与设备能耗的关系,通过 BP 神经网络算法对切削能耗进行预测,在此基础上结合遗传算法获得最优的加工参数。上述研究中所构建的静态能耗计算模型及通过人工神经网络算法的能耗预测模型,难以反映能耗随设备运行过程的动态变化情况;在加工设备动态能效模型构建方面的研究相对较少。何彦^[8]等通过对数控机床能量组成及其动态变化的分析,采用面向对象着色赋时 Petri 网方法对数控机床能量源进行了动态建模与仿真分析。该方法很好的考虑了加工过程的随机性与动态性,但分析实际加工过程中机床不同运行状态下能耗实时变化的能力不足。HU 等^[9]所建立的机床能效在线监控方法,能够直观反映机床的能效实时变化情况,具有很高的工程应用价值,但由于没有关联加工过程中机床的运行机制,因而难以直接反映加工过程与能耗的关系。

在从系统角度研究机械加工过程方面。HIBINO 等^[10]对加工设备的运行过程及能量消耗进行形式化建模,并采用 Witness 平台构建了制造过程仿真模型。HE 等^[11]通过对加工任务为导向的机械加工过程能量消耗动态特性的分析,采用事件图的方法构建了加工工艺过程能耗模型。文静等^[12]结合车间实际能耗情况给出了车间层能效的定义,建立了车间层能效模型并在 SimEvents 环境中实现了对模型的仿真。马福民等^[13-15]针对制造企业的能源利用效率,采用模糊扩展 Petri 网的方法对制造过程开展了能效动态建模与仿真研究。李育锋^[16]针对机械加工车间能耗过程复杂的特点,采用基于着色赋时面向对象 Petri 网从时间维和空间维对机械加工车间能量流进行建模与仿真。上述建模与仿真方法均没有很好地考虑制造系统的层级特性,因此所构建模型很难反映制造系统各层级之间的信息与数据交互,进而无法有效针对不同层级的能效目标进行分析与决策。

建模与仿真方法作为支撑离散制造系统分析和

决策的关键技术,在机械加工过程的能效提升方面发挥着重要作用。但不同层次的能效管理需要不同粒度的能效模型,以适应能量精细化管理要求^[4],多分辨率实体建模作为层次化建模的方法之一,能够作为研究复杂离散制造系统的重要技术手段,主要应用于控制工程和军事等领域^[17-18]。多分辨率实体的基本思想是建立一个能使高分辨率模型和低分辨率模型同时运行的实体,在该实体内,两种不同分辨率的模型同时运行,通过内在地维持不同分辨率层次上多个相关属性并发作用的一致性,实现实体的运行过程^[19-20]。在多分辨率实体建模过程中,维持高分辨率模型与低分辨率模型的动态一致性,是制约多分辨率实体建模的主要问题,同时由于缺乏实现多分辨率实体运行的二次开发工具,使得目前多分辨率实体建模技术在实际应用特别是离散制造系统建模过程中并没用很好的推广。

另外,传统加工过程的能效定义多将能量利用效率作为唯一指标,无法满足不同对象层次不同能效管理目标下结合各有效产出对加工过程进行全面的能效分析。基于此,本文围绕机械加工过程的基本构成及主要活动模块-机械加工工艺单元,针对机械加工工艺单元的分层特性及不同层次的能效管理目标,构建工艺单元能效指标体系。基于对工艺单元运行特征及其综合能效指标分析,借鉴多分辨率实体(Multiple resolution entity, MRE)的思想并采用离散事件系统规范(Discrete event system specification, DEVS)^[21]分层建模技术,对机械加工工艺单元进行建模,结合 Eclipse 平台下的 CD++插件对模型进行仿真,获取工艺单元各层级能效指标的动态信息。

1 机械加工工艺单元运行特征及能效指标体系

机械加工工艺单元是零件生产的复杂载体,通过对机械加工工艺单元运行特征系统性的分析,是研究工艺单元能耗特性的有效途径。加工工艺单元运行特征如图 1 所示。机械加工过程由一个或若干个顺序排列的加工工艺单元组成,通过各类工艺过程的相互协作完成对零件的加工。加工工艺单元所涉及的多设备、人以及资源能源等构成了具有一定功能的统一整体,按照组织结构可以划分为制造单元层与设备层。其中,制造单元层采用所属工艺单元的某一特定工艺,完成对零件一道或多道工序的加工,主要由缓冲区(临时库存)以及多台功能相似

的加工设备构成。进一步可将制造单元层分解为设备层,设备层由单台加工设备构成,执行制造单元层分配到该设备的加工任务,加工设备的运行过程结合零件的生产流程可以分为加工准备阶段(设备

待机运行)、加工阶段(设备空载运行与负载运行)、产品检验阶段(设备待机运行)。设备层在加工运行过程中是能耗活动的主体,而工艺单元能耗特性表现为对设备层能耗动态信息的集成。

图1 机械加工工艺单元运行框架模型

基于机械加工工艺单元的层级特性以及企业能效精细化管理的要求,为全面反映工艺单元各层级的能效表现,结合机械加工过程能量利用率及比能效率的定义:能量效率可以描述为机械加工过程有效能量与输入总能量的百分比,即能量利用率;另外还可以用输入机械加工系统的总能量与有效产出的比值来衡量一个机械加工系统的能量效率,即比能效率^[22]。建立了针对各层级不同的能效管理目标的能效指标体系,机械加工工艺单元各层级能效指标的分类、定义、说明等如表1所示。

制造单元层通过生产计划、成本与时间核算、资源能源控制等对零部件组织生产,其能效指标包括能量利用率、价值比能效、质量比能效。其中,制造单元层能量利用率主要用来衡量工艺单元的整体能量利用水平,及分析其能效提升空间。制造单元层价值比能效可以作为从经济、能耗的角度实现对工艺单元生产要素(设备成组、人员编制、库存控制等)提供优化控制的依据。制造单元层质量比能效

则可设计质量相对稳定且能耗较低的机械加工工艺单元;设备层执行各个生产操作,聚焦于生产过程的设备,实时反映生产设备的运行情况,其能效指标具有设备特性。设备层能量利用率除了用于分析设备在运行过程中的能量消耗情况,也可比较工艺单元内不同设备加工同种零件时的能效状况。设备层价值比能效可用作综合比较不同设备加工同种零件时,以经济效益及节能为目标的设备优选等问题。设备层质量比能效则可用于衡量不同设备的加工精度及稳定性,为进一步优化设备的加工工艺参数等提供依据。设备层材料去除比能效则主要用于比较加工不同材料时设备的能耗情况,可用于加工设备、刀具优选等。

与现有大多数研究中单一的能效指标相比,该指标体系更好地反映了加工单元不同层级不同方面的能效利用水平,下文将结合动态建模与仿真技术,围绕加工工艺单元各能效指标的量化及动态获取进行研究。

表 1 机械加工工艺单元各层级能效指标体系

加工工艺单元	能效指标	指标定义	指标说明
制造单元层	能量利用率	有效能耗/总能耗(%)	各加工设备切削时段能耗的总和(负载能耗)与各设备总能耗比值; 描述工艺单元的能量利用效率的动态变化
	价值比效率	总能耗/产品利润(kW·h/元)	各加工设备总能耗与加工获利的比值; 描述工艺单元总能耗随产品获利的动态变化
	质量比效率	总能耗/合格品数量(kW·h/件)	各加工设备总能耗与合格产品数量的比值; 描述工艺单元总能耗随合格产品数量的动态变化
设备层	能量利用率	有效能耗/总能耗(%)	单台加工设备切削时段能耗的总和(负载能耗)与设备总能耗比值; 描述该设备的能量利用效率的动态变化
	价值比效率	总能耗/产品利润(kW·h/元)	单台设备总能耗与设备加工过程获利的比值; 描述单台设备能耗随产品获利的动态变化
	质量比效率	总能耗/合格品数量(kW·h/件)	单台设备总能耗与该设备加工合格零件数量的比值; 描述合格产品数量与设备总能耗的动态关系
	材料去除比效率	总能耗/材料去除量(kW·h/kg)	单台设备总能耗与加工合格零件时切屑量的比值; 描述材料去除量与该设备总能耗的动态关系

2 机械加工工艺单元 MRE 动态能效模型

多分辨率实体(MRE)^[23]是由 Reynolds 等面向多分辨率建模技术,提出的一种在不同分辨率或抽象层次上针对同一对象维持其多层级模型一致性的建模思想。模型的分辨率定义为通过模型描述现实对象的详细程度或精确度。对机械加工工艺单元而言,从不同层级和不同角度对其进行描述,即为工艺单元多分辨率建模。基于 MRE 的思想,可以将机械加工工艺单元作为一个多分辨率实体进行模型设计,其中制造单元层作为低分辨率实体(Low resolution entity, LRE)与缓冲区及多台设备进行交互,而在加工过程中设备层所包含的设备运行、人员、工件、辅助资源及能源等构成了高分辨率模型与高分辨率实体(High resolution entity, HRE)单加工设备进行交互。如图 2 所示为机械加工工艺单元 MRE 模型,通过模型构建可以实现低分辨率和高分辨率两个级别上单独被感知,同时 MRE 在任何情况下都可以实现这两个级别上的各项属性的一致性。

图 2 机械加工工艺单元 MRE 模型

在实际应用中,需要针对具体对象设计其 MRE 模型,并与相应的仿真建模技术相关联。因此,本文利用离散事件系统规范(DEVS)的层次化建模方法形式化表达机械加工工艺单元 MRE 模型,在保证各层级模型一致性的基础上,构建多分辨率层次的动态集成模型,并将其转换为仿真模型进行应用验证。通过 DEVS 原子模型(Atomic DEVS)与耦合模型(Coupled DEVS)的定义,分别构建了加工工艺单元制造单元层低分辨率实体能效模型与设备层高分辨率实体能效模型。

2.1 制造单元层 LRE 的 DEVS 能效耦合模型构建

制造单元层 DEVS 耦合模型由封装在其内部的缓冲区原子模型及各设备原子模型组成,该耦合模型主要用于形式化表达加工工艺单元低分辨实体的组件构成,及各组件在信息流控制下的物流流、能源流运行过程。图 3 为单台设备情况下制造单元层 DEVS 耦合模型结构示意图。

图 3 制造单元层 DEVS 耦合模型结构示意图(单台设备)

结合图 3 及经典 DEVS 耦合模型的通用定义构建制造单元层耦合模型“Manufacturing cell”，该模型可以描述为一个七元组集合结构，如式(1)所示

$$\text{Manufacturing cell} = \langle X, Y, M, EIC, EOC, IC, Select \rangle \quad (1)$$

$$X = \{S1batch, Snbatch, Electric\ energy, Ancillary\ resource\}$$

$$Y = \{Refuse, S1q, Snq, Uq, Tc, Tec, Eu, Vsee, Qsee\}$$

$$M = \{Buffer, Machine\}$$

式中， X 为外部事件输入接口及其数值的集合。由于制造单元在实际加工运行过程中通常执行零件的多道工序的加工，且不同工序输入制造单元的待加工零件可能不同，因此“ $S1batch$ ” $\in N^+$ ，“ $Snbatch$ ” $\in N^+$ 分别代表输入制造单元的第“ $S1$ ”和“ Sn ”道工序的待加工零件量。“ $Electric\ energy$ ” $\in R$ ，“ $Ancillary\ resource$ ” $\in R$ 分别表示输入制造单元的电能及辅助资源能源量； Y 为外部输出接口及其数值的集合，“ $Refuse$ ” $=\{0,1\}$ 指“ $Buffer$ ”接收到“ $S1$ ”或“ Sn ”道工序一定批量的已加工零件后生成零件批量请求信息，当缓冲区库存达到上限时，输出“0”，代表此时拒绝向外部接收零件，当有输出请求信息到达，但缓冲区无库存且无外部零件输入时，输出“1”表示零件输出请求失败。“ $S1q$ ”，“ Snq ”，“ Uq ”分别代表输出制造单元的第“ $S1$ ”道工序合格品数量、第“ Sn ”道工序合格品数量、及不合格品总量。“ Tc ”，“ Tec ”分别表示加工完成后输出制造单元的总加工成本及总电能消耗。“ Eu ”，“ $Vsee$ ”，“ $Qsee$ ”分别为制造单元能量利用率、价值比能效率与质量比能效率。 M 为成员集合，表示制造单元层实际所包含的原子模型； EIC ：外部输入与“ $Manufacturing\ cell$ ”模型中原子模型的相互关联(输入接口之间的连接)，如图 3 所示； EOC ：外部输出与“ $Manufacturing\ cell$ ”模型中原子模型的耦合关系(输出接口之间的连接)，如图 3 所示； IC ：“ $Manufacturing\ cell$ ”模型中原子模型之间的耦合关系(原子模型接口之间的连接)，如图 3 所示； $Select$ ：选择函数，当存在多个状态同时发生变化时，用于确定转态发生的先后顺序。

2.2 设备层 HRE 的 DEVS 能效原子模型构建

设备层 HRE 的 DEVS 原子模型分别描述缓冲区及加工设备中的设备运行、人员、工件、辅助资源及能源的运行机制，即机械加工中物质能量的具体转换过程。结合图 3 所示缓冲区原子模型的结构对其逻辑行为进行描述，如式(2)所示

$$\text{Buffer} = \langle X, Y, S, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, ta \rangle \quad (2)$$

$$X = \{s1batch, snbatch, request1, requestn\}$$

$$Y = \{batch1, batchn, refuse\}$$

$$S = \{state, phase, eliment, amount, time\}$$

$$“state” = \{waite, receive, queue, send\}$$

式中， X 为模型输入接口及数值集合，“ $s1batch$ ”，“ $snbatch$ ”与“ $Manufacturing\ cell$ ”中的“ $S1batch$ ”，“ $Snbatch$ ”的定义一致。“ $request1$ ”、“ $requestn$ ” $=\{yes\}$ 表示输入“ $Machine$ ”中的零件批量加工完成后，反馈给“ $Buffer$ ”输入接口的批量输出请求信息； Y 为模型输出接口及数值集合，“ $batch1$ ”、“ $batchn$ ”分别指由“ $Buffer$ ”分配到“ $Machine$ ”中“ $S1$ ”和“ Sn ”工序的批量。而“ $refuse$ ”的定义与“ $Manufacturing\ cell$ ”中的“ $Refuse$ ”定义一致； S 为模型的系统状态集合，定义了模型中等待加工批量，接收加工批量，加工批量排队，向“ $Machine$ ”发送待加工零件批量四个模型状态。

“ $phase$ ” $=\{S1, Sn\}$ 代表此时模型所对应的工序。“ $eliment$ ” $\in N^+$ ，系统变量的状态，表示接收的加工批量，用于记录待加工零件的批序列。“ $amount$ ” $\in N^+$ ，系统变量的状态，表示接收待加工零件的总件数。“ $time$ ” $\in R$ 即 $ta(s)$ ，表示模型对应状态“ $state$ ”的持续时间； δ_{int} ：系统状态内部转换功能，表示系统内部状态之间的转换逻辑及运行过程，在无外部事件产生时，模型只受内部变量的影响； δ_{ext} ：系统状态的外部转换功能，表示当有外部事件达到时，系统的状态转换逻辑及运行过程； λ ：模型的输出函数，系统状态发生转移时产生相应的输出信息； ta ：为时间推进函数， $ta(s)$ 指系统当前状态的持续时间，当受到外部事件影响且状态发生变化时，持续终止。 $ta(s) \in [0, \infty]$ ，特别地， $ta(s) = 0$ 的状态为瞬时状态， $ta(s) = \infty$ 的状态称为静止的； δ_{int} 、 δ_{ext} 、 λ 、 ta 的转移变换过程如图 4 所示描述。

设备层 HRE 的加工设备 DEVS 原子模型是加工工艺单元综合能效动态模型构建的关键，基于经典 DEVS 模型的定义，其同样可以描述为一个七元组集合结构，如式(3)所示

$$\text{Machine} = \langle X, Y, S, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, ta \rangle \quad (3)$$

“ $Machine$ ”中七元组集合的定义与“ $Buffer$ ”模型相同，其中

$$X = \{ee, s1batch, snbatch, ar\}$$

$$Y = \{s1q, snq, uq, tc, tec, eu, vsee, qsee, mrsee, bc, le, qamnt\}$$

$$S = \{state, phase, mode, type, amount, namount, tc, bc, le, tec, eu, vsee, qsee, mr, mrsee, time\}$$

“state” = {waite, receive, queue, work, test}

式中, “ar”, “ee” ∈ $\mathbf{R}$ 分别表示输入“Machine”的辅助资源能源与电能。“s1batch”, “snbatch”与“Buffer”模型中的定义一致; “s1q”, “snq”, “uq”分别代表“Machine”中加工完成后输出的工序“S1”的合格零件数量, 工序“Sn”的不合格零件数

量, 以及当前工序下不合格零件数量。“tc”、“tec”、“eu”、“vsee”、“qsee”、“mrsee”、“bc”、“le”、“qmant”表示输出“Machine”的总成本、总电能消耗量、能量利用率、价值比能效率、质量比能效率、材料去除比能效率、纯利润、负载加工电能消耗量、合格品总量。

图4 “Buffer”原子模型运行机制

定义了“Machine”模型中等待生产任务, 接收加工批量, 加工批量排队, 加工运行, 质量检测四个模型状态。“phase” = {S1, Sn} 代表此时模型所对应的工序。“mode” = {busy, free} 用来反映加工设备此时的活动状态。“type” = {qualified, unqualified}, 表示加工完成后的零件经过检验后为合格品或不合格品。“amount”、“namount”、“qamount” ∈ $\mathbf{N}^+$ 为系统变量的状态, 分别指“Machine”中当前批次加工零件的总数量, 不合格品数量及合格品数量。“tc”、“bc”、“le”、“tec”、“eu”、“vsee”、“qsee”、“mrsee” ∈ $\mathbf{R}$ 此时表示系统变量状态, 定义与输出接口一致。另外“mr”表示材料去除量。“time” ∈ $\mathbf{R}$ 即 $ta(s)$, 表示“Machine”对应状态“state”的持续时间;

δ_{int} 、 δ_{ext} 、 λ 、 ta 的定义与“Buffer”模型相同, 其转移变换过程, 以及系统变量的量化, 如图5所示描述。

图中, 系统在“waite”状态下, 各系统变量均为0, 当零件处于检验状态时, 对该零件的加工过程各变量进行统计, 并向输出接口输出相应的值, 其中“test1”、“test2”分别表示零件的检验结果为合格状态与不合格状态。“test1”中“S1//Sn”表

示此时系统处于加工工序S1或Sn阶段(当前实际执行的工序, 不同工序阶段运行机制相同)。

“b1//bn”表示通过工序“S1”或“Sn”加工后零件的收益; “m1//mn”指通过工序“S1”或“Sn”去除材料所产生的废屑量; “test2”中“m”表示当前零件报废品的质量。零件的加工成本TC, 电能消耗量TEC及有效能耗 w_{load} 的量化公式如下所示

$$TC = ct \times c_0 + hoc \times c_1 + cf \times c_2 + tec \times c_3 + dc + lc \quad (1)$$

$$TEC = \int_0^{t_0^{standby}} p^s dt + \int_0^{t_1^{load}} p^u dt + \int_0^{t_2^{idle}} p^a dt + \int_0^{t_3^{next}} p^s dt \quad (2)$$

$$w_{load} = \int_0^{t_1^{load}} p^u dt \quad (3)$$

式(1)~(3)中, “ct”、“hoc”、“cf”、“dc”、“lc”分别代表输入“Machine”中刀具等加工工具的消耗量、液压油等润滑油液消耗量、切削液等冷却油液消耗量、设备折旧成本、人工成本; “ c_0 ”、“ c_1 ”、“ c_2 ”、“ c_3 ”则分别表示刀具等加工工具的单位成本、液压油等润滑油液的单位成本、切削液等冷却油液

的单位成本、电能的单位成本。“ $t_0^{standby}$ ”、“ t_1^{load} ”、“ t_2^{idle} ”、“ t_3^{test} ”分别为加工准备阶段设备待机运行时间、设备负载运行时间、设备空载运行时间、产品

检验阶段待机运行时间;“ p^s ”、“ p^u ”、“ p^a ”则分别对应加工过程中待机运行功率、负载加工功率、空载加工功率。

图 5 “Machine”原子模型运行机制

3 案例分析

3.1 问题描述

某机床制造企业生产一批磨床尾架主轴,该零件材料为 GC_r15,材料密度为 7.81 g/cm³,毛坯尺寸 $\phi 65 \times 373$ cm,成品尺寸 $\phi 60 \times 368$ cm,该工厂一个工作日为 8 h,工业用电单位成本为 0.79 元/kW·h。该型主轴零件主要由车削加工工艺单元、热处理加工工艺单元、铣削加工工艺单元以及磨削加工工艺单元等组成。以其中能量消耗较大的磨削加工工艺单元为例对其综合能效进行动态仿真分析,该工艺单元通过三台不同型号的磨床并行加工。通过现场实际测量结合企业相关历史资料与数据,获得了磨削加工工艺单元的工艺内容及相关工艺数据如表 2 所示。其中,利用高精度功率分析仪 WT1800 测得了三台磨床加工过程中不同阶段的平均功率及对应的时间;平均人工成本、设备折旧成本及收益折算数据由企业会计部门依据相关标准计算后提供;成品合格率则根据企业质检部门提供的零件质检记

录,统计分析后获得;各设备加工产生的切屑量,通过收集称重获得;砂轮、磨削液及液压油的消耗量则根据实际的用量与平均更换周期折算获得。

3.2 磨削加工工艺单元 MRE 动态能效模型的仿真设计

采用 Eclipse 集成开发环境下的 CD++插件^[24]对磨削加工工艺单元 MRE 的能效动态模型进行仿真设计。其中磨削工艺单元制造单元层 LRE 的仿真模型如图 6 所示。

图 6 中外部输入集合与外部输出集合与所构建的“Manufacturing cell”耦合模型中定义一致,表示在主轴加工过程中输入与输出该制造单元层的总资源、总能源、总零件批量及能效等具体数据及信息。由于磨削加工工艺单元执行两个主轴磨削加工工序,“Manufacturing cell”中的“Sn”工序在图 6 中对应工序“S2”即磨锥孔,且因为两个工序之间连续加工,工序“S1”加工完成后输出的合格零件批量“slq”作为工序“S2”的输入批量。各接口的具体连接方式如图 6 所示设计。进一步对设备层 HRE 的仿真模型进行设计,如图 7 所示。

表 2 尾架主轴磨削加工工艺单元工艺内容及相关工艺实验测量数据

工序号	1 精磨外圆			2 磨锥孔		
加工设备	M13328X1500	C-600CNC	MA1420/500	M13328X1500	C-600CNC	MA1420/500
设备及人员组成(台*人)	1	1	1	1	1	1
待机运行平均功率/kW	0.08	0.09	0.08	0.08	0.09	0.08
平均空载功率/kW	4.2	4.95	4.48	4.06	4.65	4.28
平均负载功率/kW	4.85	5.6	5.2	4.68	5.21	4.92
平均准备时间/s	250	240	250	250	240	250
平均空载时间/s	10	13	10	14	16	12
平均负载时间/s	65	57	60	80	70	75
平均质量检验时间/s	18	18	18	18	18	18
成品收益折算/元	51.6	51.6	51.6	54.4	54.4	54.4
平均单位人工成本/(元/s)	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
平均单位设备折旧成本/(元/s)	0.0006	0.0007	0.0007	0.0006	0.0007	0.0007
材料去除量/kg	0.017	0.019	0.019	0.010	0.008	0.009
成品合格率(%)	95	98	98	98	98	98
砂轮单位平均消耗量/(件/s)	5.02×10^{-7}	4.3×10^{-7}	5.02×10^{-7}	6.12×10^{-7}	5.02×10^{-7}	5.02×10^{-7}
砂轮单位成本/(元/件)	180	180	180	180	180	180
磨削液单位平均消耗量/(L/s)	1.25×10^{-3}	1×10^{-3}	0.73×10^{-3}	1.25×10^{-3}	1.25×10^{-3}	0.73×10^{-3}
磨削液单位成本/(元/L)	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25
液压油单位平均消耗量/(L/s)	1.93×10^{-6}	2.31×10^{-6}	2.31×10^{-6}	1.93×10^{-6}	2.31×10^{-6}	2.31×10^{-6}
液压油单位成本/(元/L)	18	18	18	18	18	18

图 6 磨削工艺单元制造单元层 LRE 仿真模型示意图

图 7 磨削工艺单元设备层 HRE 仿真模型示意图

为适应不同层级的能效管理目标,磨削工艺单元设备层 HRE 仿真模型需要进一步对各台加工机床的综合能效等以及缓冲区的相关信息等进行“高分辨率”分析。图 7 中三台加工设备及缓冲区的各接口及运行逻辑与“Buffer”及“Machine”原子模型的描述一致。此外,由于该磨削工艺单元设备层 HRE 包含多台加工设备,因而需要通过图 7 中“eu”、“vsee”、“qsee”、“tec”、“uq”、“tc”、“slq”、“s2q”等原子模型对三台设备的信息及数据处理后方能最终形成整个工艺单元加工过程的输出,其运行机制及功能较为简单,在此不再赘述。设备层各接口则依据该磨削加工工艺单元的工艺流程进行连接。

3.3 磨削加工工艺单元 MRE 能效仿真分析

基于所设计的磨削加工工艺单元 MRE 能效仿真模型,开发了相应的仿真程序对该工艺单元各层级的动态能效进行分析。当企业从 00:00:00:000 时刻开始每间隔 1 小时共四批次分别下达待加工工件“Workpiece”7 件、5 件、5 件、4 件的磨削加工任务时,得到尾架主轴磨削加工工艺单元制造单元层的能效仿真运行结果如图 8 所示。

```

00:16:54:000 slq 7
00:16:54:000 refuse 1
00:16:54:000 tc 19.4347
00:16:54:000 uq 0
00:16:54:000 tec 0.752683
00:16:54:000 eu 0.813718
00:16:54:000 vsee 0.00220234
00:16:54:000 qsee 0.107526
00:34:39:000 s2q 7
00:34:39:000 refuse 1
00:34:39:000 tc 40.1648
00:34:39:000 uq 0
00:34:39:000 tec 1.6303
00:34:39:000 eu 0.816159
00:34:39:000 vsee 0.00227197
00:34:39:000 qsee 0.11645
01:16:54:000 slq 4
01:16:54:000 refuse 1
01:16:54:000 tc 53.6598
01:16:54:000 uq 1
01:16:54:000 tec 2.1648
01:16:54:000 eu 0.776124
01:16:54:000 vsee 0.00237766
01:16:54:000 qsee 0.120267
01:28:44:000 s2q 4
01:28:44:000 refuse 1
01:28:44:000 tc 65.3522
01:28:44:000 uq 0
01:28:44:000 tec 2.66516
01:28:44:000 eu 0.784366
01:28:44:000 vsee 0.00236508
01:28:44:000 qsee 0.121143
02:16:54:000 slq 4
02:16:54:000 refuse 1
02:16:54:000 tc 78.8472
02:16:54:000 uq 1
02:16:54:000 tec 3.19966
02:16:54:000 eu 0.762591
02:16:54:000 vsee 0.00242435
02:16:54:000 qsee 0.123064
02:28:44:000 s2q 4
02:28:44:000 refuse 1
02:28:44:000 tc 90.5397
02:28:44:000 uq 0
02:28:44:000 tec 3.70001
02:28:44:000 eu 0.770358
02:28:44:000 vsee 0.00240858
02:28:44:000 qsee 0.123334
03:11:16:000 slq 3
03:11:16:000 refuse 1
03:11:16:000 tc 101.516
03:11:16:000 uq 1
03:11:16:000 tec 4.12907
03:11:16:000 eu 0.75398
03:11:16:000 vsee 0.00245778
03:11:16:000 qsee 0.125123
03:17:18:000 s2q 3
03:17:18:000 refuse 1
03:17:18:000 tc 110.554
03:17:18:000 uq 0
03:17:18:000 tec 4.50633
03:17:18:000 eu 0.759163
03:17:18:000 vsee 0.00244988
03:17:18:000 qsee 0.125176

```

图 8 磨削加工工艺单元制造单元层仿真结果截图

结合生产任务,制造单元层仿真结果代表了磨削加工单元的总运行情况。如图 8 所示,该磨削加工单元在开始加工后 16 min 54 s 完成第一批次尾架主轴的精磨外圆加工,生产合格零件 7 件,此时,总加工成本(不含毛坯成本)约为 19.43 元,总电能消耗约 0.75 kW·h,能量利用率约为 81.37%,价值比能效率约 0.002 2 kW·h/元,质量比能效率约 0.11 kW·h/件。第一批次零件加工完成后,由于暂无新的零件批次输入,转而对第一道工序已加工零

件进行第二道工序加工,在 34 min 39 s 时完成第一批次尾架主轴的磨锥孔加工工序,生产合格零件 7 件,总加工成本累计约为 40.16 元,总电能消耗累计约 1.63 kW·h,此时,能量利用率约为 81.61%,价值比能效率约为 0.002 3 kW·h/元,质量比能效率约 0.12 kW·h/件,加工完成后,此时该磨削工艺单元中设备停机,并在 01:00:00:000 接收第二批次 5 件主轴的磨削加工任务,01:16:54:000 第一道工序精磨外圆完成,输出合格零件 4 件,不合格零件 1 件,总成本累计约为 53.66 元,总电能消耗累计约为 2.16 kW·h,当前,能量利用率约为 77.61%,价值比能效率约为 0.002 4 kW·h/元,质量比能效率约 0.12 kW·h/件,与第一批次零件加工情况相似,由于无新批次零件加工任务到达,该工艺单元转而进行第二道工序的加工,如此交替运行。在 03:17:18:000 完成所有批次的零件加工,该磨削加工工艺单元通过两道工序的加工总计生产合格零件 18 件,不合格零件 3 件,总成本累计约为 110.55 元,总电能消耗累计约为 4.51 kW·h,此时,能量利用率约为 75.92%,价值比能效率约为 0.002 4 kW·h/元,质量比能效率约 0.13 kW·h/件。此外,能效构成元素的仿真结果如有效能耗,加工利润、生产合格品数量,均可分别结合其定义,根据图 8 中“eu”、“vsee”、“qsee”与“tec”的仿真结果计算获得。

进一步对磨削工艺单元设备层 HRE 进行仿真,与制造单元层仿真结果类似,以 M13328X1500 磨床的运行情况为例,其生产合格品、不合格品及能效等数据如图 9 所示。另外,三台设备的能耗与制造单元层总能耗的仿真数据如表 3 所示。

案例中,图 8、9 验证了该能效模型可以获得加工过程中工艺单元不同层级的动态能效等信息。另外,通过表 3 所示的不同层级的能耗数据一方面反映了该方法能够很好地保证各多分辨率实体模型的一致性,可以适应企业能效精细化管理的要求;另一方面,利用能耗量化公式(2)及表 2 中给出的实验测量数据计算后得到的结果与表 3 中各阶段的能耗仿真结果相同;此外,其他输出端口的仿真结果均与由表 2 中给出的试验测量数据通过相应的量化公式计算的结果一致,说明了该模型与仿真过程的可靠性与准确性。由于案例分析中所采用的工艺数据(表 2)为多次试验后得到的实际平均值,各仿真结果反映的是该尾架主轴实际磨削加工过程中的实际平均水平,因此能够为长期加工工艺单元能效评估提供 what-if 分析依据。

图 9 磨削加工工艺单元设备层(M13328X1500 磨床)的实时仿真结果截图

表 3 设备层能耗与制造单元层总能耗仿真数据

类别	加工过程各阶段能耗/(kW·h)							
磨削工艺单元	0.752 68	1.630 3	2.164 8	2.665 16	3.199 66	3.700 01	4.129 07	4.506 33
M13328X1500 磨床	0.210 38	0.461 87	0.567 06	0.692 81	0.798	0.923 74	1.028 94	1.154 68
C-600CNC 磨床	0.225 98	0.482 83	0.595 82	0.724 24	0.837 23	0.965 66	1.078 65	1.207 07
MA1420/500 磨床	0.316 32	0.685 6	1.001 92	1.248 11	1.564 42	1.810 61	2.021 49	2.144 58

等的动态变化情况。

4 结论

- (1) 机械加工过程可以描述为由一个或若干个顺序排列的加工工艺单元组成的有机整体，依据加工工艺单元的运行特征构建了各层级包含能量利用率、材料去除率比能效率、价值比能效率及质量比能效率的能效指标体系。
- (2) 基于 MRE 的思想对机械加工工艺单元的层级结构及行为特征进行了分析，并结合 DEVS 分层递阶建模方法构建了机械加工工艺单元制造单元层及设备层的动态能效模型。
- (3) 在 Eclipse 平台下对所构建的能效动态模型进行了仿真设计与分析。并通过对实际案例的仿真验证了该模型能够有效的反映工艺单元各层级能效

参 考 文 献

[1] SHAO G, KIBIRA D, LYONS K. A virtual machining model for sustainability analysis [C]//Proceedings of the ASME 2010 international design engineering technical conferences & computers and information in engineering conference. 15-18 August 2014, Montreal.

[2] WW 全球能源课题组. 气候变化解决方案-WWF2050 展望[R]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.

WW Global Energy Group. The solution to climate change - WWF2050 outlook[R]. Beijing : China Environmental Science Press, 2007.

[3] 刘献礼, 陈涛. 机械制造中的低碳制造理论与技术[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(1): 1-8.

LIU Xianli, CHENG Tao. Low carbon manufacturing

- theory and technology of mechanical manufacturing [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2011, 16(1): 1-8.
- [4] 王峻峰, 李世其, 刘继红. 能量有效的离散制造系统研究综述[J]. 机械工程学报, 2013, 49(11): 89-97.
WANG Junfeng, LI Shiqi, LIU Jihong. A Survey on Energy Efficient Discrete Manufacturing System[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(11): 89-97.
- [5] AVRAM O I, XIROUCHAKIS P. Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system[J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(6): 699-711.
- [6] BI Z M, WANG L. Optimization of machining processes from the perspective of energy consumption: A case study[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2012, 31(4): 420-428.
- [7] 谢东, 陈国荣, 施金良, 等. 基于 BP 神经网络数控机床切削能耗的研究[J]. 机床与液压, 2012, 40(1): 54-57.
XIE Dong, CHEN Guorong, SHI Jinliang, et al. Research on CNC machine tool cutting energy consumption based on BP neural network[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(1): 54-57.
- [8] 何彦, 林申龙, 王禹林, 等. 数控机床多能量源的动态能耗建模与仿真方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(11): 123-132.
HE Yan, LIN Shenlong, WANG Yulin, et al. Method for modeling the dynamic energy characteristics of multi-energy sources in CNC machine tool[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(11): 123-132.
- [9] HU S, LIU F, HE Y, et al. An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 27(6): 133-140.
- [10] HIBINO H, SAKUMA T, YAMAGUCHI AM. Evaluation system for energy consumption and productivity in manufacturing system simulation[J]. International Journal of Automation Technology, 2012, 6(3): 279-288.
- [11] HE Y, LIU B, ZHANG X, et al. A modeling method of task-oriented energy consumption for machining manufacturing system[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 23(1): 167-174.
- [12] 文静. 车间层能效建模与优化方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
WENG Jing. Modeling and optimization of energy efficiency in workshop[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [13] 马福民, 王坚. 面向企业能源消耗过程的模糊 Petri 网模型研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(9): 1679-1685.
MA Fumin, WANG Jian. Fuzzy Petri nets model oriented to enterprise energy consumption process[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(9): 1679-1685.
- [14] 马福民, 王坚. 支持企业能效评估的能源消耗过程仿真方法[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(12): 2361-2368.
MA Fumin, WANG Jian. Enterprise energy consumption process simulation method for energy efficiency evaluation[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(12): 2361-2368.
- [15] 张悦, 王坚. 企业生产与能耗过程模型及其仿真连续 Petri 网方法[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(12): 2714-2722.
ZHANG Yue, WANG Jian. Model and simulation of enterprises production and energy consumption process based on continuous Petri net [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(12): 2714-2722.
- [16] 李育锋. 机械加工车间多能耗特征建模及任务节能优化配置方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
LI Yufeng. Hybrid energy modeling and energy-aware optimization method in machining workshops[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [17] 郑丽钰. 基于 DEVS 的石化多层次物流模型建模和仿真研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
ZHENG Liyu. Study on molding and simulation of petrochemical multi-level material flow based on DEVS[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [18] 王国霞. 复杂系统的多分辨率建模与模型的聚合方法及其应用[D]. 北京: 北京工业大学, 2003.
WANG Guoxia. Multi-resolution modeling (MRM) and aggregation in complex systems and its application[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2003.
- [19] 杨慧杰, 谷雨. 基于多分辨实体的交互一致性控制方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2016, 11(1): 94-97.
YANG Huijie, GU Yu. Research on interactional consistency control based on multi-resolution entity[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2016, 11(1): 94-97.
- [20] 赵小松, 李国辉. 一种基于并行存储的多分辨率建模方法[J]. 计算机科学, 2012, 39(5): 151-155.
ZHAO Xiaosong, LI Guohui. Multi-resolution modeling based on parallel storage[J]. Computer Science, 2012, 39(5): 151-155.
- [21] WANG J F, LI S Q, LIU J H. A multi-granularity model for energy consumption simulation and control of discrete manufacturing system[M]// The 19th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Berlin Heidelberg: Springer, 2013: 1055-1064.
- [22] 王秋莲, 刘飞, 奚道云. 机械加工过程能效评价标准的

内容框架和评价方法[J]. 机械工业标准化与质量, 2014(10): 23-27.

WANG Qiulian, LIU Fei, XI Daoyun. The content framework of evaluation criteria and evaluation method on energy efficiency of machining process[J]. Machinery Industry Standardization & Quality, 2014(10): 23-27.

- [23] REYNOLDS P F, NATRAJAN J, SRINIVASAN S. et al. Consistency maintenance in multiresolution simulations[J]. ACM Transactions on Modeling & Computer Simulation, 1998, 7(3): 368-392.

- [24] WAINER G. CD++: A toolkit to develop DEVS models [J]. Software-Practice and Experience, 2002, 32(13): 1-46.

作者简介：朱硕，男，1989 年出生，博士。主要研究方向为绿色制造、再制造、制造信息化。

E-mail: tczswilly@163.com

张华（通信作者），女，1964 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为绿色制造、再制造、制造信息化。

E-mail: zhanghua403@163.com

江志刚，男，1978 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为绿色制造、再制造。

E-mail: jzg100@163.com