DOI: 10.3901/JME.2013.11.089

能量有效的离散制造系统研究综述

王峻峰¹ 李世其¹ 刘继红²

(1. 华中科技大学机械科学与工程学院 武汉 430074;

2. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100083)

摘要: 离散制造系统是生产机械产品及其零件的重要依托,其能源消耗数量是产品碳足迹的重要组成部分。能量有效的制造旨在从制造系统的能量资源输入到制造过程实施的全过程中,更加有效地降低二氧化碳排放、提高能量利用效率。通过分析离散制造系统的组成及其生产制造过程的能耗特点,以制造设备、制造工艺及制造系统为对象,详细综述了制造能耗数据测量与建模、制造能耗仿真与预测、面向能耗的生产调度及其优化方法等方面的研究现状,给出了离散制造系统实施能量有效制造的研究层次及其主要研究趋势。

关键词: 离散制造系统 能量消耗 能量有效的制造

中图分类号: TP391

A Survey on Energy Efficient Discrete Manufacturing System

WANG Junfeng¹ LI Shiqi¹ LIU Jihong²

(1. School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074;

2. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100083)

Abstract: Discrete manufacturing system is the important producing support of mechanical products and its parts. The energy consumption of discrete manufacturing system is the indiscernible composition of the product carbon footprint. Aiming to decrease the emitting intensity of carbon dioxide and increase the energy utilizing efficiency, energy efficient manufacturing can be referred to use energy resources efficiently and effectively from its input to the whole manufacturing process. The composition of discrete manufacturing system and its energy consumption characters in production process are analyzed. Taking the manufacturing equipments, manufacturing process and manufacturing system as the object, the current research on energy consumption measurement and modeling, energy consumption simulation and forecasting, energy efficient production scheduling and its optimization for discrete manufacturing system are reviewed in detail. A hierarchical research structure is proposed for energy efficient manufacturing and its main trends are presented.

Key words: Discrete manufacturing system Energy consumption Energy efficient manufacturing

0 前言

我国目前已是世界上最大的碳排放国之一,在国际上面临着巨大的减排压力。2009年哥本哈根全球气候大会前夕,我国政府承诺到2020年单位国内生产总值的碳排放强度比2005年下降40%~45%。全球的制造业是温室气体排放和能量消耗的大户,消耗了约33%的总能量,直接或间接的CO₂排放比例占到38%^[1],成为节能减排的重要行业。

制造业的节能减排目标因企业性质的不同而

不同。众所周知,流程/过程制造业的能耗量大(超过了总量的50%),占企业的生产成本比重高,是制造业节能减排的首要对象^[2]。然而,数量巨大的离散制造业(如航空航天、汽车、电子器件、装备制造等)的总体能耗及其排放同样不能忽视^[3-5]。

如作为离散加工制造系统主要组成的机床,我国的保有量世界第一,约700多万台^[4]。若每台机床额定功率平均为5~10 kW算,我国机床装备总的额定功率为3 500~7 000万kW,相当于三峡电站总装机容量2 250万kW的1.5~3.0倍。大量调查统计也表明:机床能量平均利用率低下,平均低于30%;在丰田公司的大规模生产模式下,机床总

能耗的 85.2%用在了非加工操作的生产环节上。麻省理工学院的研究中有一组数据可以直观形象地说明一台机床的能耗总量及其带来的环境排放^[6]:一台配置有相应辅助装置的机床,如果主轴功率为 22 kW,两班工作制运行,其中切削时间占 57%,以美国国家电网的效率数据测算,该机床运行一年的耗电产生的环境排放量,与耗油量为 20.7 mpg、每年行驶 1.2 万英里的 SUV 汽车比较,其 CO₂ 的排放量相当于 61 辆 SUV 汽车的排放量。

可见,节能生产制造的原理、方法和技术研究对离散制造系统同样具有重要的意义与价值。同时,能源数量减少引起的价格上涨、消费者对低能耗产品的渴求、国内外相关绿色法规的相继实施等因素都对离散制造系统的高效节能生产提出了要求。

1 能量有效制造的提出

1.1 离散制造系统能耗特点分析

典型的离散制造系统的基本构成要素可以分为生产环境、生产设备、生产对象、操作者四个部分。制造系统在生产过程中消耗的能量可以分为直接能量和间接能量^[7],其中直接能量是制造产品的各种过程(如铸造、加工、喷漆和检查等)消耗的能量,间接能量是为维护车间内的生产环境需要消耗的能量(如照明、供暖和通风等)。目前制造领域的节能研究以降低直接能量消耗为主^[7]。直接能量的消耗是由系统中不同要素和参数形成的,本文中把对离散制造系统总体能耗产生影响的基本要素称为耗能要素,用于反映离散制造系统能耗产生的原因,同时也体现了系统能耗与工作过程及生产设备间的关系,对明确离散制造系统节能研究对象具有指导作用。耗能要素根据其表现形式进一步分为直接消耗能量间接消耗能量的耗能要素。

(1) 从生产设备角度分析,设计出结构、原理和技术上更节能的制造设备属于机械产品全生命周期(设计-制造-使用-回收)长远的节能源头控制措施^[8-9],机械设备运动单元的基本能耗特征是由其自身的结构和物理、运动属性决定的^[4],如每个运动部件的结构设计、运动控制方式等,因此,机械设备的运动结构单元形成了直接耗能要素。

(2) 从生产对象角度分析,相同的机床设备,不同的零件材料、刀具类型、加工参数将形成不同的加工力/力矩,影响加工设备运动单元的负载^[10],从而需要消耗不同的能量。因此,零件的工艺特征形成了制造系统的一种间接耗能要素。

(3) 从生产系统角度分析,在生产设备、生产

工艺参数确定条件下,不同的生产排程将影响制造系统的能耗^[11];即使相同的生产排程,是否对生产过程中处于空闲的设备进行启停机调度也将影响整个系统的能耗^[12]。因此,生产排程和机器启停控制策略也形成了离散制造系统的间接耗能要素。

无论是直接耗能的机械设备还是间接耗能的生产工艺和排程,都是研究离散制造系统节能生产的重要对象,企业的信息系统(特别是能源管理系统^[13-14])急需这些能耗要素的节能方法来支持碳排放与能源效率的决策以及对生产制造过程进行有效的节能调度。为实现经济和社会的可持续发展,在兼顾生产制造系统产量、质量和产品交付时间等传统因素的同时,必须考虑产品制造全过程的能量消耗来综合分析制造系统的性能,实施能量有效的制造。

1.2 能量有效制造的概念

能量有效制造(Energy efficient manufacturing)或者低碳制造(Low carbon manufacturing)可以理解^[15-17]:考虑从制造系统的资源输入到制造过程的实施全过程中,更加有效地降低 CO₂ 排放、提高能量利用效率。从概念上看,低碳制造属于绿色制造这个大范畴^[8],但研究方向和内容更侧重于关注制造系统的能量消耗效率(主要包括电、水、煤、气等能量类型的消耗)问题^[18]。

近年来,欧盟、日本、北美等地区和国家相继启动了提高制造业能量效率的计划并进行相关机理和技术的研究^[19]。2009 年 10 月,美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)召集的研讨会指出^[20]:为实现能量有效制造,必须在相关术语/标准的一致性、建模方法、抽象层次、数据获得和支持工具等方面进行科学、深入和系统的研究。2009 年,智能制造系统国际组织(Intelligent Manufacturing System, IMS)在规划和预测 IMS2020 制造系统的发展时,将“能量有效制造”列为 5 大关键研究领域之一^[16]。

为实施能量有效制造,必须从制造系统及其设备能耗数据的获取、生产制造过程能耗建模、评估与优化、调度方法等方面入手。为此,本文从制造设备及系统的能耗数据测量/获取/建模、机器设备及系统的能耗仿真与预测、面向能耗的制造系统优化调度与节能实时控制方法三个方面来综述国内外的研究现状。

2 能耗数据测量与建模

实现低碳制造必须首先理解加工机床等机械

设备工作时的能量消耗过程, 获取它们的能量消耗数据, 并采用合适的方式进行建模和表达。

2.1 加工过程的能耗测量

对工业企业生产现场的能量消耗状况进行定期评估是美国能源部联合 26 所美国著名高校(如密执安大学、佐治亚理工学院等)成立的“工业评估中心”的主要任务^[21], 其收集和统计的生产过程能耗数据包括工业企业的电动机数量、额定功率以及总运行时间。

机床作为离散制造系统的基本组成单元, 其加工过程的能耗数据是重要的基础数据之一。美国加州大学伯克利分校的 DORNFELD 等^[22] 建立了一个基于规则引擎和复杂事件处理技术(Complex event processing, CEP)的加工制造系统能耗监控框架, 认为目前正形成标准的加工设备互联网协议 MTConnect 将为能耗数据获取提供标准化支持, 但没有给出具体的实现措施。德国斯图加特大学的 VERL 等^[23] 分析了加工制造系统中产生能量控制循环的信息流, 利用分布式、层次化结构描述了一个车间通信和控制架构, 建立了组件级、设备级、系统级的能耗监控和控制体系, 但还没有更具体深入的实施。

在美国国家自然科学基金的支持下, 麻省理工学院的 GUTOWSKI 等^[24-26] 在加工机器的能耗分析方面做了很多代表性工作。他们分析了机械加工过程中的环境影响和资源消耗的各种因素和状况, 提出了一种对机械加工过程环境负荷进行测定的方法; 测量了 10 种典型制造技术的 36 个过程(加工、磨削、喷射铸模、先进加工、微电子加工等)的能量消耗, 给出了一个图表形式的能量消耗比例图。图 1 显示了一种典型的 6 kW 加工中心工作时的能量消耗组成^[24], 从中可以看出加工制造过程的能量消耗不是一个静态的常量, 而是随着机器不同的工作状态而动态变化的。另外, 自动化程度越高的加工机器, 消耗的基本能量越大。

以变频调速数控机床为对象, 在机床工步间空载运行过程转速和时间已知条件下, 许弟建、施金良设计了一个机床功率的测试系统^[27], 应用于 CK6136 型数控机床工作过程的功率测量, 得到了空载启动、运行和停止过程的有功功率变化图, 这些结果能够为设计节能机床提供参考。

2.2 加工过程的能耗建模

美国加州大学伯克利分校的 SHENG 等^[28] 建立了一个表面精磨削加工过程的集成模型, 用于评估不同加工表面和工艺参数下的磨削过程能量消耗; 罗马尼亚的 DRAGANESCU 等^[10] 利用试验数据和

图1 加工过程能量消耗分解图

响应面方法建立了一种基于切屑力、切削深度、速度和材料切除率等加工参数的电量消耗模型, 以一台立式磨削机床加工铝合金为例说明了加工参数对电量消耗的非线性影响。为计算零件加工过程中需要最小能耗, 英国曼彻斯特大学的 MATIVENGA 等^[29] 提出了过程窗口的概念, 把进刀深度、进给率和速度组成的区域作为搜索空间, 在考虑刀具寿命的前提下搜索低能耗的加工参数组合, 试图找到某个加工工艺的最小能耗。

日本的 NARITA 等^[30] 提出采用加工机床的电能消耗、切屑工具状态、冷却液数量、润滑油数量和金属切屑量等参数的计算模型, 用于评价机器加工过程中等价于 CO₂ 排放的环境影响。日本森精机公司(Mori Seiki Co., Ltd)的 MORI 等^[31] 在一台立式加工中心上进行常规铣削、端铣削和面铣削三种加工方式, 采用铣削速度、进给率、径向铣削深度和轴向铣削深度四个参数进行组合, 每种方式都采用不同的加工材料、刀具直径和硬度, 通过正交试验法测试获知, 随着材料去除率的变化, 铣削过程消耗的电量比值在 5%~333% 间变化, 说明了参数优化对能耗具有显著的影响。

重庆大学的刘飞等^[4] 认为: 机械加工系统的电量消耗包括机床的空载能耗、机床的切削能耗和机床的附加能耗三个部分。其中, 机床空载能耗主要体现了机床能耗特性差别, 而切削能耗和附加能耗主要取决于加工条件(如夹具、刀具和工艺参数等)和材料去除量, 因此, 可以考虑用空载能耗代替总能量损耗作为能耗分析数据用于能量的计算^[32]。从 GUTOWSKI 等^[24] 给出的能耗曲线上的能耗比例

看,如果用空载能耗代替工作能耗用于性能分析,得出的总能耗值将低于实际能耗值,进行中长期生产仿真时难免会造成较大的误差。

机器设备及其工作过程的能耗测量、获取和建模研究为实施节能制造所需要的基础能耗数据打下了良好的基础。能耗的数学和热力学模型在计算制造过程理论最小的能量消耗和详细描述能量转换过程方面具有指导意义,能够为未来设计节能型制造设备提供理论指导^[26]。但加工参数/热力学能耗模型中大量参数的事先未知性、设备能耗过程的高度非线性特点以及离散制造系统在生产过程中的随机性、动态性,单纯数学模型的方法很难对制造系统及其设备的能耗过程进行准确建模。

3 能耗仿真预测与评估

离散制造系统建模仿真在制造系统的规划、设计和运作等方面已占据不可替代的地位。但是,现有的制造系统建模、分析、仿真与调度是以产量和工位的时间效率为目标,以生产时间和人力/设备资源数量为约束来衡量系统的优劣,没有考虑制造系统的能量消耗问题。将复杂系统建模与仿真方法可以用于生产制造过程能耗情况的仿真、预测和评估,同时考虑系统工作过程中的随机性要素,从而获得保护能耗量的系统性能指标,能够为长期/短期制造系统的低碳运行和优化提供“what-if”分析工具,目前该方法的研究正在国内外迅速兴起^[33-35]。

3.1 单机器设备的能耗仿真

NIST 的 SHAO 等^[36]讨论了在虚拟环境中建立一个数控加工仿真模型进行加工过程环境评价的方法,包含了机器的能量消耗和排放因素,利用转速、切屑深度等加工参数来计算能耗量,目前该研究还处于框架阶段。

德国斯图加特大学的 DIETMAIR 等^[37]提出了一种基于仿真对制造过程的能量消耗进行建模的方法,事先给定一个随时间变化的加工操作过程状态变化图,图2是一个机床在不同加工操作状态下的变化图^[37],不同状态对应的操作时间和能量需求不同,从而对零件加工过程的能量需求进行仿真分析;该研究没有考虑机器的维护状态。

为了估算新产品制造过程中的能耗,哈尔滨工业大学的宫运启等^[38]提出了基于知识的能耗预测方法,应用本体技术描述能耗的计算和管理,建立了能耗知识语义模型;采用加工时单位体积金属去除量的能耗经验公式,建立了一个神经网络能耗预测模型,预测结果可以为工艺方案评价、调度等活动提供支持。重庆科技学院的谢东等^[39]分析了切削

图2 机床加工操作状态与能量需求变化图

过程中的切削速度、进给速度、切削深度等切削参数对数控机床能耗的影响,基于BP神经网络建立数控机床能耗与切削参数的模型,进行不同参数下机床能耗的推理,并采用遗传算法对切削参数进行优化。

3.2 制造系统的能耗仿真

英国拉夫堡大学的 RAHIMIFARD 等^[7]提出了产品的嵌入能量概念,用简单的数学公式描述了铸造、喷漆和检验过程的理论能耗,把能量数据加入到一个 ARENA 建立的仿真模型中,通过简单的累加统计计算制造系统的能耗。德国布伦瑞克工业大学的 HERRMANN 等^[40]从生产过程和机器、生产系统、技术支持服务三个方面分析了提高制造能量效率的途径,提出过程链仿真的概念并建立了一个仿真架构,利用生产设备的额定功率并考虑生产批量来模拟和预测过程链的能量消耗。由芬兰和瑞典政府资助的项目开发了一个集成的仿真环境^[41],利用离散事件仿真技术评估新设计的生产系统,评价因素涵盖了能量消耗、自动化程度、人因等方面。

美国马里兰大学的 MUROYAMA 等^[42]把离散事件仿真和全生命周期评估方法结合对制造系统的资源和过程进行分析,采用 AUTOMOD 建立了系统产量、能耗、材料利用率的综合评价仿真模型。日本加工工业协会研究院的 HIBINO 等^[43]分析了系统产量和能耗仿真的需求,采用统一建模语言 UML 描述设备的状态转移和能耗,将设备布局和能耗存入 EXCEL 文件,利用 WITNESS 软件建立制造系统仿真模型,仿真结果包含了系统的产量、单位产品能耗、每天/月的能耗统计等信息。

重庆大学的 HE 等^[44]利用事件图建立了面向任务的加工能耗仿真模型,用于评估零件的不同加工次序对能耗的影响,该方法只能用于工艺规划阶段的能耗评估。

现有商业化的离散事件仿真软件(如 QUEST、FLEXSIM、ARENA、PROMODEL)目前都不具备对制造系统的能耗进行建模和仿真的能力,2010 版

的 SIMUL8^[45]支持制造系统的碳足迹评价, 2010 版的 WITNESS POWER^[46]支持制造系统的能耗统计, 通过对一个机器工作时使用不同类型的电、水、煤等能量资源进行定义, 在仿真过程中累积各种能量资源的消耗数量。这两种软件需要用户自己估计工艺过程的能耗数据, 其输出统计结果仅是某个生产计划的能耗量, 不能提供针对该制造系统的节能措施。

建模仿真作为离散制造系统的重要决策支持技术, 将在制造系统的能耗仿真评估预测方面发挥重要作用。但不同层次的生产能耗管理需要不同粒度的能耗仿真模型^[47], 以适应能量精细化管理要求, 如何将能耗因素融入离散事件建模过程, 建立规范化、形式化的离散制造系统多粒度能耗模型是制造系统能耗仿真评估的基础。

4 考虑能耗的优化调度与控制

在现有生产制造设备不能更换(即无法升级为节能型设备)的条件下, 对制造系统的批量及其加工排程进行优化^[48-49], 能够从工艺层和系统层生成节能生产的计划方案; 或者在生产过程中通过改变机器的工作能耗状态对系统能耗进行总体控制, 实现实时的节能生产。

4.1 能量感知的调度与优化

多目标优化是制造系统调度中常用的方法, 通常的调度优化目标是交货时间和流程时间。加工过程中, 处于空闲状态的机器仍然要消耗约 75% 的总能量^[24], 因此, 把能耗量作为其中一个优化目标, 可以通过多目标调度优化算法减少机器的空闲时间或者选择能耗小的加工机器进行零件加工, 有望实现能量感知的调度^[50]。

针对单机器生产调度问题, MOUZON 等^[51-52]提出了 9 个加工调度规则, 通过关闭和重启空闲状态机器的方式降低能耗, 利用多目标数学编程方法来实现调度规则下的能量消耗和完工时间的优化, 从而决定加工批次的产品排序。施金良等^[53]根据数控机床主传动系统功率方程, 在数控机床加工时, 通过对加工工序的工步间实施空载运行的措施, 提出了停机节能的理论决策模型, 该模型不能应用于制造系统层的节能调度控制。

普渡大学的 FANG 等^[54]以峰顶电耗负荷、总电量消耗和加工周期为目标, 采用多目标-混合整数编程方法, 对由两台机器组成的加工系统进行了分析, 指出优化方法应用于考虑能耗因素的离散、动态、非线性系统调度问题时具有高度的复杂性, 仅适合

于小规模问题。对一个批次的加工任务, 何彦等^[11]以能量消耗最小化和加工完成时间最小化两个目标为例, 采用禁忌搜索算法进行加工顺序的优化, 为简化能耗计算, 采用空载功率代替输入功率进行调度分析。以混合流水车间为对象, 国防科技大学的 LIU 等^[55]和中国科技大学的 DU 等^[56]分别考虑交付时间、加工周期和能耗量的组合目标, 建立了基因优化或偏好矢量蚁群系统来寻找能耗优化加工排序的 Pareto 解集。

生产排程优化的节能方法是一种能耗管理的事先措施, 优化方法有较高的计算复杂度, 只适用于较小规模的系统; 另外, 优化方法忽略了生产过程中的动态随机因素(如机器故障和零件批次的不同到达模式等), 降低了其对实际生产现场的节能调度应用价值。

4.2 实时生产制造过程的节能控制

生产系统中, 因为生产过程的不稳定性造成了很多非瓶颈机器存在较多的空闲时间, 可以通过实时控制策略改变机器的工作状态, 在空闲时把机器关掉或者使之转入低能耗空闲状态, 达到减少系统总能耗的目的。

对一个确定型闭环流水作业车间, MASHAEI 等^[12]给出了一个系统中对各个机器不工作时进行关机-开机策略来减少系统能耗, 说明了该问题是一个混合整数非线性最小问题, 通过 2 个贪婪启发式规则求出了一个近似解, 并利用仿真方法说明了关机策略的节能效果。汽车喷涂车间中, 不同工位喷涂设备的开机时刻直接影响了车间的能耗和产量, CHEN 等^[57]建立了有限容量伯努利串行生产线模型, 利用贪婪搜索获得优化的设备开机时刻, 试验表明, 优化后的喷涂车间能耗能够降低 5%。CHANG 等^[58]证明, 在不影响制造系统中最慢机器的正常生产(即该机器被饥饿或者阻塞)情况下, 随机事件不会对系统产量产生影响, 由此在假定加工时间确定条件下, 利用近似方法计算停机节能的时间长度。SUN 等^[59]利用近似解析方法, 在每个机器加工时间都相同的同步流水作业加工车间中, 建立了一个由机器故障形成的累积时间模型, 把该时间累积作为机器停机节能的时间段, 但只讨论了运行周期内可能存在的节能运行时间长度, 没有说明节能运行应该在何时实施。

生产制造过程节能控制研究侧重于对制造系统的实时状态进行分析, 根据生产过程中的变化调整机器设备的工作状态(能耗状态)达到节能目的, 研究成果有望改变当前制造执行系统不具备能量管理和控制能力的现状^[60], 使之能够根据系统的实时生

产状态/信息做出节能生产调度决策。

5 结论

面向全球可持续发展需求,制造设备和系统的能量消耗和能量效率的研究正在国内外受到广泛重视,“勿以善小而不为”,虽然单个离散制造业和系统的能量消耗占企业的成本并不高,但持续改善的需求、能源价格的提高及绿色法规将成为离散制造业实施能量有效制造的动力和压力。结合国内外研究现状,为实施能量有效的制造,本文认为应该逐步开展的工作如下。

(1) 建立相对完善的能量有效制造研究体系,围绕离散制造系统中的制造设备、制造对象、制造流程,从设备层、工艺层、系统层三个层面开展节能设备、节能工艺、节能生产机理和方法的研究,形成设备领域、工艺领域、生产领域的能量有效制造关键技术基础。

(2) 生产制造过程基础能耗数据的缺失是离散制造系统能耗管理的短板,建立离散制造系统及设备工作能耗数据的统一实时监控、获取与集成分析机制,是解决能量有效制造基础数据来源的关键。

(3) 加工制造过程的能耗建模是一个高度非线性问题,影响因素众多,结合数学建模和智能推理建模方法(如神经网络)的优势来研究制造过程能耗建模是实现加工工艺能耗预测的关键。

(4) 考虑能耗指标的多目标优化生产调度增大了调度问题的时间复杂度,离散事件系统建模与仿真方法在能耗预测、评估与管理方面日益得到重视,基于仿真的制造系统能耗优化调度方法是充分发挥调度和仿真特点的有效技术途径。

(5) 以制造系统整体为依托,通过感知系统状态,研究生产制造过程中机器设备工作能耗状态的实时节能控制,使机器设备从高度动态变化的生产过程中发现节能时机,是实现未来下一代物联制造系统智能化主动节能生产的重要研究方向。

参 考 文 献

- [1] TAYLOR P. Worldwide trends in energy use and efficiency, key insights from IEA indicator analysis [R]. Paris: International Energy Agency (IEA), 2008.
- [2] THOLLANDER P, KARLSSON M, SDERSTRM M, et al. Reducing industrial energy costs through energy-efficiency measures in a liberalized European electricity market: Case study of a Swedish iron foundry [J]. Applied Energy, 2005, 81(2): 115-126.

- [3] 江志刚, 张华, 傅成, 等. 生产过程资源环境属性综合评价支持系统[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(7): 1323-1328.
JIANG Zhigang, ZHANG Hua, FU Cheng, et al. Comprehensive assessment system for resource and environmental attribution in production process[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2009, 15(7): 1323-1328.
- [4] 刘飞, 徐宗俊, 但斌. 机械加工系统能量特性及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
LIU Fei, XU Zongjun, DAN Bin. Mechanical machining system energy characteristics and its application[M]. Beijing: China Machine Press, 1995.
- [5] ROHDIN P, THOLLANDER P. Barriers to and driving forces for energy efficiency in the non-energy intensive manufacturing industry in Sweden[J]. Energy, 2006, 31(12): 1836-1844.
- [6] MIT. Environmentally Benign Manufacturing [EB/OL]. [2009-10-08]. <http://www.web.mit.edu/ebm/index.html>.
- [7] RAHIMIFARD S, SEOWA Y, CHILDS T. Minimizing embodied product energy to support energy efficient manufacturing[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 25-28.
- [8] 刘飞, 李聪波, 曹华军, 等. 基于产品生命周期主线的绿色制造技术内涵及技术体系框架[J]. 机械工程学报, 2009, 45(12): 115-120.
LIU Fei, LI Congbo, CAO Huajun, et al. Green manufacturing technology connotation and system framework based on product life cycle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(12): 115-120.
- [9] 戚赟徽, 王淑旺, 刘光复, 等. 面向能量优化的产品结构要素组合设计[J]. 机械工程学报, 2008, 44(1): 161-167.
QI Yunhui, WANG Shuwang, LIU Guangfu, et al. Product structure element clustering design for energy optimization[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(1): 161-167.
- [10] DRAGANESCU F, GHEORGHE M, DOICIN C. Models of machine tool efficiency and specific consumed energy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 141(1): 9-15.
- [11] HE Y, LIU F. Methods for integrating energy consumption and environmental impact considerations into the production operation of machining processes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(4), 428-435.

- [12] MASHAEI M, LENNARTSON B. Energy reduction in a pallet-constrained flow shop through on-off control of idle machines[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013, 10(1): 45-56.
- [13] BUNSE K, VODICKA M. Managing energy efficiency in manufacturing processes – implementing energy performance in production information technology systems[J]. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2010, 328: 260-268.
- [14] 周珂, 吕民, 王刚, 等. 离散制造业能源模型及约束关系研究[J], 计算机工程与应用, 2009, 45(8): 23-27.
ZHOU Ke, LÜ Min, WANG Gang, et al. Study on energy models and constraint relations in discrete manufactures [J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(8): 23-27.
- [15] TRIDECH S, CHENG K. Low carbon manufacturing: Characterization, theoretical models and implementation [J]. International Journal of Manufacturing Research, 2011, 6(2): 110-121.
- [16] Intelligent Manufacturing System. Supporting global research for 2020 manufacturing vision [EB/OL]. [2010-2-10]. <http://www.ims2020.net>.
- [17] 郑力, 江平宇, 乔立红, 等. 制造系统研究的挑战和前沿[J]. 机械工程学报, 2010, 46(21): 124-136.
ZHENG Li, JIANG Pingyu, QIAO Lihong, et al. Challenges and frontiers of manufacturing systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(21): 124-136.
- [18] VODICKA M, SCHNEIDER O, BUNSE K. Energy efficiency as driver for competitiveness in future manufacturing: A consolidated literature review and options for future research [C]// The 20th Annual Conference of the Production and Operations Management Society, May 1-4, 2009, Orlando, Florida, 1-8.
- [19] PARK C W, KWON K S, KIM W B, et al. Energy consumption reduction technology in manufacturing: A selective review of policies, standards, and research[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2009, 10(5): 151-173.
- [20] RACHURI S, RAM D, NARAYANAN A, et al. NIST workshop on sustainable manufacturing: Metrics, standards, and infrastructure [C]// NIST Workshop Sustainable Manufacturing, October 13-15, Gaithersburg, Maryland, 2009.
- [21] University of Massachusetts. Industrial assessment centers [EB/OL]. [2010-04-02]. <http://www.ceere.org/iac/>.
- [22] VIJAYARAGHAVANA A, DORNFELD D. Automated energy monitoring of machine tools[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 21-24.
- [23] VERL A, WESTKÄMPER E, ABELE E. Architecture for multilevel monitoring and control of energy consumption [C]// The 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, May 2nd - 4th, 2011, Braunschweig, Germany, 2011: 347-352.
- [24] DAHMUS J, GUTOWSKI T. An environmental analysis of machining [C]// Proceedings of the 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo (IMECE2004), Anaheim, California, USA, 2004: 1-10.
- [25] GUTOWSKI T, DAHMUS J, THIRIEZ A. Electrical energy requirements for manufacturing processes[C]// Proceedings of 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, May 31st - June 2nd, Leuven. 2006: 1-5.
- [26] GUTOWSKI T, BRANHAM M, DAHMUS J, et al. Thermodynamic analysis of resources used in manufacturing processes[J]. Environ. Sciences and Technology, 2009, 43(5): 1584-1590.
- [27] 许弟建, 施金良. 机床功率测试系统设计与节能方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010(3): 47-51.
XU Dijian, SHI Jinliang. The design of active power test system and energy saving method of NC machine tool[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2010(3): 47-51.
- [28] BAUER D J, THURWACHTER S, SHENG P S. Integration of environmental factors in surface planning: Part 1 - mass and energy modeling[J]. Transactions of NAMRI/SME, 1998, 26: 171-176.
- [29] MATIVENGA P T, RAJEMI M F, Calculation of optimum cutting parameters based on minimum energy footprint [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 149-152.
- [30] NARITA H, KAWAMURA H, NORIHISA T, et al. Development of prediction system for environmental burden for machine tool operation[J]. JSME International Journal, 2006, 49(4): 1188-1195.
- [31] MORI M, FUJISHIMA M, INAMASU Y, et al. A study on energy efficiency improvement for machine tools[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 145-148.
- [32] 曹华军, 刘飞, 阎春平, 等. 制造过程环境影响评价

- 方法及其应用[J]. 机械工程学报, 2005, 41(6): 163-167.
- CAO Huajun, LIU Fei, YAN Chunping, et al. Environmental impact evaluation method of manufacturing process and its case[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(6): 163-167.
- [33] HERRMANN C, THIEDE S, KARA S, et al. Energy oriented simulation of manufacturing systems: Concept and application[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 45-48.
- [34] LIND S, KRASSI B, JOHANSSON B. SIMTER: A production simulation tool for joint assessment of ergonomics, level of automation and environmental impacts [C]// Proceedings of FAIM 2008, June 30-July 2, Skövde, Sweden. 2008: 1025-1031.
- [35] WOHLGEMUTH V, PAGE B, KREUTZER W. Combining discrete event simulation and material flow analysis in a component-based approach to industrial environmental protection[J]. Environmental Modeling & Software, 2006, 21(11): 1607-1617.
- [36] SHAO G, KIBIRA D, LYONS K. A virtual machining model for sustainability analysis [C]// Proceedings of ASME 2010 International Design Engineering Technical Conference & Computers and Information in Engineering Conference, DETC2010-28743, August 15-18, 2010, Montreal, Quebec, Canada.
- [37] DIETMAIR A, VERL A. A generic energy consumption model for decision making and energy efficiency optimization in manufacturing[J]. International Journal of Sustainable Engineering, 2009, 2(2): 123-133.
- [38] 宫运启, 吕民, 王刚, 等. 基于知识的产品制造过程能耗的计算与预测[J]. 华南理工大学学报, 2009, 37(2): 14-19.
- GONG Yunqi, LÜ Min, WANG Gang, et al. Knowledge-based calculation and prediction of energy consumption in product manufacturing process[J]. Journal of South China University of Technology, 2009, 37(2): 14-19.
- [39] 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.
- [40] HERRMANN C, THIEDE S. Process chain simulation to foster energy efficiency in manufacturing[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2009, 1(4): 221-229.
- [41] SOLDING P, THOLLANDER P, MOORE P. Improved energy-efficient production using discrete event simulation[J]. Journal of Simulation, 2009, 3: 191-201.
- [42] MUROYAMA A, MANI M, LYONS K, et al. Simulation and analysis for sustainability in manufacturing processes [C]// Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2011, August 28-31, 2011, Washington, DC, USA.
- [43] HIBINO H, SAKUMA T, YAMAGUCHI M. Evaluation system for energy consumption and productivity in manufacturing system simulation[J]. International Journal of Automation Technology, 2012, 6(3): 279-288.
- [44] 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.
- [45] SIMUL8. Carbon emissions [EB/OL]. [2010-10-01]. <http://www.simul8.com>.
- [46] WITNESS. Power with ease release 2 [EB/OL]. [2010-11-02]. <http://www.lanner.com>.
- [47] WANG J, LI S, LIU J. A multi-granularity model for energy consumption simulation and control of discrete manufacturing system [C]// 2012 IEEE 19th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, October 27-29, 2012, Changsha, China. 2012: 1614-1618.
- [48] 王小兵, 汪永超, 黄娟娟, 等. 面向绿色制造的工艺种类选择及参数优化[J]. 机械设计与制造, 2011(10): 191-194.
- WANG Xiaobing, WANG Yongchao, HUANG Juanjuan, et al. Process category selection and parameter optimization for green manufacturing[J]. Machine Design and Manufacture, 2011(10): 191-194.
- [49] 曹华军, 陶绪财, 刘飞. 基于批量分割及交货期约束的机床节能型优化调度方法及应用[J]. 机械科学与技术, 2010, 19(6): 744-748.
- CAO Huajun, TAO Xucai, LIU Fei. An energy saving scheduling model for machine tools and its application [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 19(6): 744-748.
- [50] BRUZZONE A G, ANGHINOLFI D, PAOLUCCI M. Energy-aware scheduling for improving manufacturing process sustainability: A mathematical model for flexible flow shops[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology,

- 2012, 61(1): 459-462.
- [51] MOUZON G, YILDIRIM M B. A framework to minimize total energy consumption and total tardiness on a single machine[J]. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2008, 1 (2): 105-116.
- [52] MOUZON G, YILDIRIM M B, TWOMEY J. Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment[J]. *International Journal of Production Research*, 2007, 45(18): 4247-4271.
- [53] 施金良, 刘飞, 许弟建, 等. 数控机床空载运行时节能决策模型及实用方法[J]. *中国机械工程*, 2009, 20(11): 1344-1346.
- SHI Jinliang, LIU Fei, XU Dijian, et al. Decision model and practical method of energy saving in NC machine tool [J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 2009, 20(11): 1344-1346.
- [54] FANG K, UHAN N, ZHAO F, et al. A new shop scheduling approach in support of sustainable manufacturing [C]//The 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, May 2nd - 4th, 2011, Braunschweig, Germany. 2011: 305-310.
- [55] LIU X, ZOU F, ZHANG X. Mathematical model and genetic optimization for hybrid flow shop scheduling problem based on energy consumption [C]// The 2008 IEEE CCDC, July 2-4, Yantai, China. 2008: 1002-1007.
- [56] DU B, CHEN H, HUANG G Q, et al. Preference vector ant colony system for minimizing make-span and energy consumption in a hybrid flow shop[M]. Berlin: Springer, 2011.
- [57] CHEN G, ZHANG L, ARINEZ J, et al. Energy-efficient production systems through schedule-based operation[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2013, 10(1): 27-37.
- [58] CHANG Q, XIAO G X, LI L, et al. Energy management in manufacturing systems[C]// The 2011 ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC2011-50098, June 13-17, Corvallis, Oregon, USA, 2011.
- [59] SUN Z, LI L. Opportunity Estimation for Real Time Energy Control of Sustainable Manufacturing Systems [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2013, 10(1): 38-44.
- [60] NEUGEBAUER R, PUTZ M, SCHLEGEL A, et al. Energy-sensitive production control in mixed model manufacturing processes [C]// The 19th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, May 23 - 25, 2012, Berkeley, USA. 2012: 399-404.
-
- 作者简介: 王峻峰(通信作者), 男, 1970 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为系统建模与仿真、数字化装配、绿色制造。
E-mail: wangjf@mail.hust.edu.cn
- 李世其, 男, 1965 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为数字化制造、复杂系统仿真、计算机辅助分析。
E-mail: sqli@mail.hust.edu.cn
- 刘继红, 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为数字化设计制造、现代设计理论方法、制造业信息化。
E-mail: ryukeiko@163.com