

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.01.007

大数据驱动的绿色智能制造模式及实现技术

王 婷^{1,2}, 廖 斌¹, 杨承诚¹

(1. 贵州大学 管理学院, 贵阳 550025; 2. 贵州省互联网+协同智能制造重点实验室, 贵阳 550025)

摘要:为实现生产制造过程智能化与绿色制造的有效整合,在运用系统工程理论分析智能制造和绿色制造协同互补性的基础上,提出一种大数据驱动的绿色智能制造新模式。以产品生命周期为主线,从数据驱动的产品绿色定制化研发、基于数字孪生的主动资源配置调度、面向服务的先验维护策略、考虑资源循环的产品回收及再制造流程 4 个方面阐明了新模式的具体实现思路。最后,结合业务流程再造思想及物元可拓法探讨了传统制造模式向文中所提新模式转型的实施方案与关键技术,并以一个应用案例,验证了该运行模式的可行性与有效性。

关键词:绿色制造;数据驱动;制造模式;服务框架;实施方案设计

中图分类号:TP278

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2020)01-064-10

Research on big-data-driven green intelligent manufacturing mode and the implementation design

WANG Ting^{1,2}, LIAO Bin¹, YANG Chengcheng¹

(1. School of Management, Guizhou University, Guiyang 550025, P. R. China; 2. Key Laboratory of Internet + Collaborative Intelligent Manufacturing in Guizhou Province, Guiyang 550025, P. R. China)

Abstract: In order to realize the effective integration of manufacturing process intelligence and green manufacturing, based on the analysis of intelligent manufacturing and green manufacturing synergy complementarity by system engineering theory, a new mode of green intelligent manufacturing driven by big data is proposed. With the product life cycle as the main line, the specific implementation of the new mode is expounded from the aspects of data-driven product green customized research and development, digital resource-based active resource allocation scheduling, service-oriented prior maintenance strategy, product recycling and remanufacturing process considering resource recycling. Finally, combined with the ideas of the business process reengineering and the matter-element extension method, the implementation plan and key technologies concerning the transition from traditional manufacturing mode to the new mode proposed in this paper are discussed. The feasibility and effectiveness of the operation mode are verified by an application case.

Keywords: green manufacturing; data-driven; manufacturing model; service framework; implementation design

收稿日期:2019-05-17

基金项目:贵州省哲学社会科学规划联合基金(18GZLH03);贵州省国内一流学科建设项目(GNYL[2017]005);贵州大学文科重大项目(GDZT201702)。

Supported by Guizhou Province Philosophy and Social Science Planning Joint Fund (18GZLH03), the Construction Project of 2017 First-class Discipline in Guizhou Province: (GNYL[2017]005), Major Project Fund for Social Science & Humanities of Guizhou University(GDZT201702).

作者简介:王婷(1974—),女,博士,教授,主要从事工业工程与系统工程研究,(E-mail) wting74@163.com。

当前以智能制造为核心的工业革命新浪潮正在席卷全球。随着《中国制造2025》发布,智能制造被列为推动新一代新兴技术与制造技术融合发展的主攻方向^[1]。然而,长期以“高投入、高消耗、高污染、低质量、低效益、低产出”和“先污染,后治理”为特征的中国工业发展模式所带来的资源浪费、环境恶化、结构失衡等矛盾和问题也正在日益凸显^[2]。在发展智能制造的同时,全面推行绿色制造,既是《中国制造2025》的题中之义又是我国制造业相应可持续发展战略的必然选择。因此,有必要在车间制造实施智能化升级的过程中,兼顾资源节约与生态环境保护工作,加速绿色制造与智能制造的有机融合努力构建高效、清洁、低碳、循环的绿色制造体系。

智能制造和绿色制造是当代制造业的两大主要发展方向。尽管两者均服务于生产制造过程,但智能制造和绿色制造所持制造理念和侧重点有所不同。智能制造模式重点关注如何利用制造过程的信息流和数据流赋予制造系统智慧,进而提高生产效率、降低运营成本^[3]。而绿色制造重点关注的是如何规划制造过程中的物质流和能量流的走向来提升制造系统的资源利用率和绿色生产效率,进而协调企业的经济效益与社会效益^[4-5]。目前,国内外针对智能制造和绿色制造的研究主要从两种制造模式的侧重点出发,就各自的制造环境^[6-7]、实施思路^[8-11]、关键技术^[12-14]等内容进行探讨。较少有研究考虑到智能制造与绿色制造的协同发展问题,尤其在有效整合两大重要制造模式,设计兼顾绿色和智能的新型制造模式方面的研究尚未见报告。

文中首先运用系统工程视角分析了绿色制造和智能制造的协同交互性,并提出一种大数据驱动的绿色智能制造新模式。详细阐明该模式设计思路及要素构架,以拓展后的产品生命周期为主线,分析了具体实现思路及实施方案层次模型;最后,基于业务流程再造理念,利用物元模型法设计了传统制造模型向文中所提模型转型升级的实施方案,并以一个应用案例,验证了该模式的可行性。

1 大数据驱动的绿色智能制造模式

在实际生产中,智能制造和绿色制造存在协同性和互补性,运用系统工程思想对这一现象的解释如下:从系统目标协同性来看,智能制造和绿色制造是隶属于生产制造系统的2个子系统。虽然各子系统的初始目标不同,但上级生产制造系统总目标一旦确定,2个子系统会调整各自的目标并朝着整体最优的方向协调演化。从系统功能互补性来看,首先,绿色制造生产过程中产生的物质流和能量流可丰富智能制造系统信息流和数据流来源,进而提高智能制造子系统数据处理与自动学习能力;而智能制造子系统所提供的信息流和数据流可为绿色制造子系统调整和规划物质流和能量流提供指导意见;其次,智能制造子系统所带来的智慧化有利于绿色制造子系统合理规划利用资源,绿色制造子系统所坚持的低碳化是智能制造子系统降低成本、提高效率的必要条件。基于以上分析,文中尝试以大数据技术为基础整合现有绿色制造和智能制造模式优势,提出一种兼顾制造系统智能和绿色的新型绿色智能制造模式,该模式的主要思想是综合考虑智能制造和绿色制造的目标,通过建立制造过程智能化和绿色化并行工程与融合工程,进而实现提高生产效率和实现清洁生产的双重目标。在智能化方面,通过大数据集成技术构建泛在互联、协同优化的数据驱动型智能制造决策终端,赋予制造系统自组织、自调节、自运营生产智能的新功能;在绿色化方面,将低碳环保作为智能决策终端的关键决策依据,同时对产品全生命周期进行延展,借助大数据技术及智能决策终端对产品的研发、生产、维护、回收等制造过程进行物质流和能量流的动态规划,形成可再生的绿色动态闭环流程,进而实现制造过程绿色生产效率最大化。

基于以上构想,设计了大数据驱动的绿色智能制造服务体系构架,如图1所示。该体系构架主要由技术支撑、数据收集、数据处理、数据分析、应用服务、数据存储、数据交互与获取7部分构成。

1) 技术支撑模块:通过智能感知、RFID等先进技术对数据处理、数据分析模块提供相关技术和可行性方案,是连接真实世界和数据世界的物理要素。

2) 数据收集模块:负责对产品研发、订单、维护、销售等各个环节的数据进行采集、转换和储存。

3) 数据处理模块:负责提供数据处理和分析相关技术,为复杂、多维、多噪声的数据进行降噪、降维和数据可视化处理,为数据分析层提供有效数据。

4) 大数据分析模块:负责对数据处理模块提供的有效数据进行数据挖掘和数据分析,提供决策方案与数据分析报告,具体而言,可以提供销售客户和订单客户的特征刻画、生成运作系统内部智能运行情况等。

5)应用服务模块:作为整个服务体系的应用层和目标层,负责整合服务体系的技术及决策信息,进而实现产品设计绿色化、生成调度主动化、质量预测预先化、生产回收清洁化等目标。

6)数据交互模块:通过 API 接口与同行业工业以太网对接,可为各企业提供“数据共享池”,同时也将本企业的数据决策方案及数据资源分享给其他企业,进而为先验维护、产品质量预测等技术提供了数据支持。

7)数据储存模块:本模块为物理支撑模块,负责存储制造系统中的所有数据信息、过程信息及决策信息。

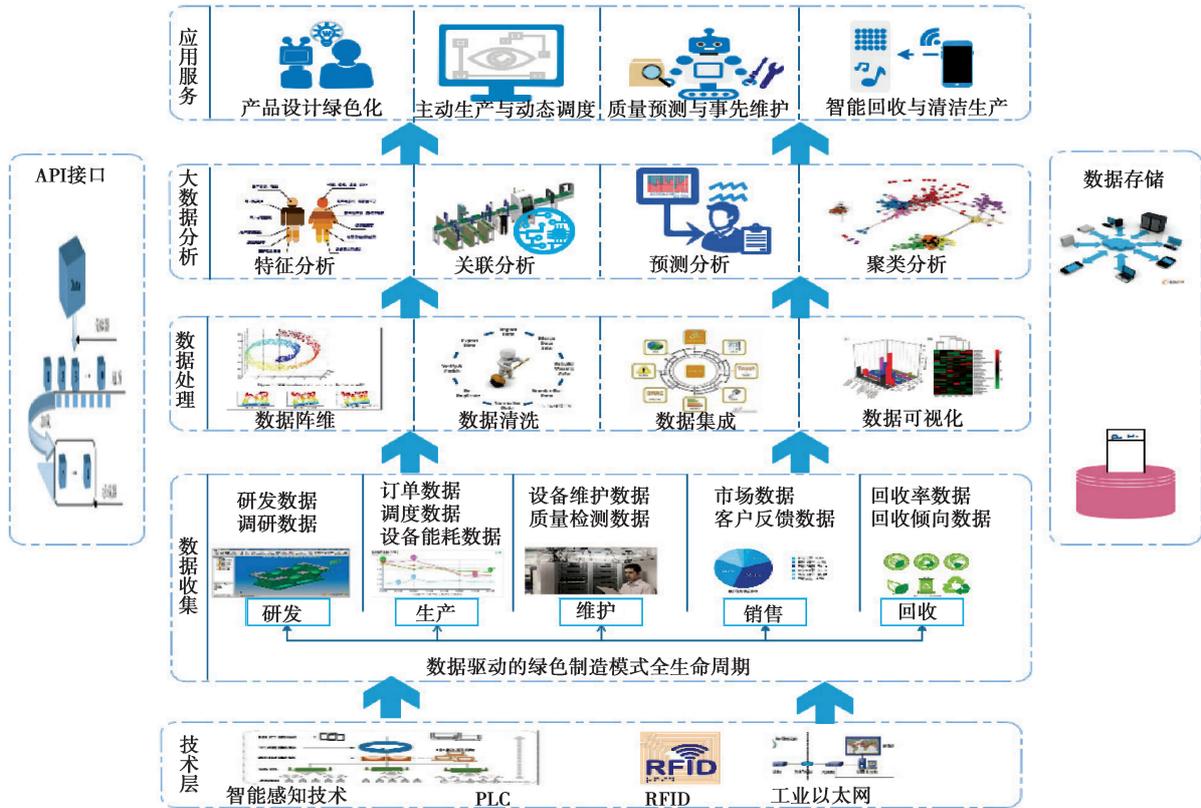


图 1 大数据驱动的绿色智能制造服务体系构架

Fig. 1 Big data-driven green intelligent manufacturing service system architecture

2 大数据驱动的绿色智能制造实现思路

依据所提出的体系框架,以产品全生命周期为主线,对新模式所涉及的 4 个关键技术的实现框架和实现思路进行详细阐述。

2.1 数据驱动的产品绿色定制化研发

在产品的设计方面,充分考虑产品全生命周期的绿色性能和市场需求,利用工业以太网外源数据及本企业市场、销售的内源数据对本企业客户需求全景图进行刻画,识别目标客户特征和需求目标,由此形成智能决策数据指导产品功能的设计与概念模型的建立;然后,以绿色低碳为目标,进行产品工艺、材料、包装、回收的全生命周期的设计,得到多种组合方案,应用粗糙集-云模型的综合评价方法进行最优方案的遴选,从而得到最优产品设计组合;最后,基于客户偏好矩阵求解最优方案,从设计阶段解决产品的滞销问题和回收问题,如图 2 所示。

2.2 整体最优化目标下的动态生产调度与主动资源配置

生产订单的随机性和设备闲置成本是现今智能制造与绿色制造所共同面临的关键问题。在大数据驱动的绿色智能制造模式中,生产系统被分割为存在资源博弈关系的主动生产子系统和动态调度子系统,生产调度决策问题变为以整体系统利益最大化为目标的子系统资源配置问题。在设备空闲且无订单时,制造系统以设备资源监控器和智能决策终端为技术支撑,基于历史订单数据和销售数据对相关参数进行参数学习和

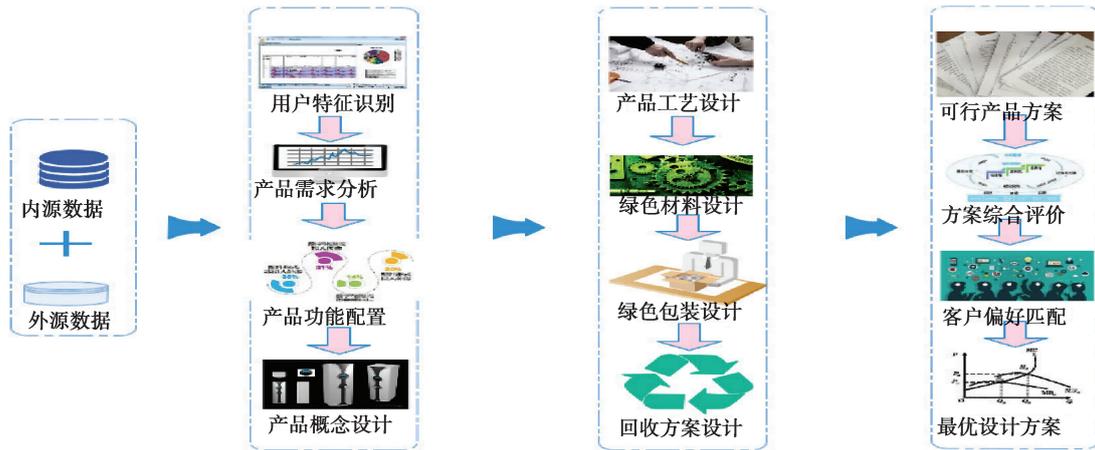


图 2 数据驱动的产品绿色定制化设计实现思路

Fig. 2 Data-driven product green customized design implementation ideas

训练,利用贝叶斯网络推理方法预测订单趋势、资源配置趋势和加工能耗趋势;利用云计算优化算法对车间调度中的生产要素进行数学模型异构搭建,调度闲置设备并制定主动生产决策方案,变被动生产模式为主动生产,减少设备限制带来的损耗。当生产过程中出现紧急订单时,智能决策终端将对订单价值进行估计,并向设备检测器调用设备使用数据,估算制造系统的整体设备服务、设备停靠和紧急调用损益能力,并集成调配生产设备,生成实时调度方案,如图 3 所示。

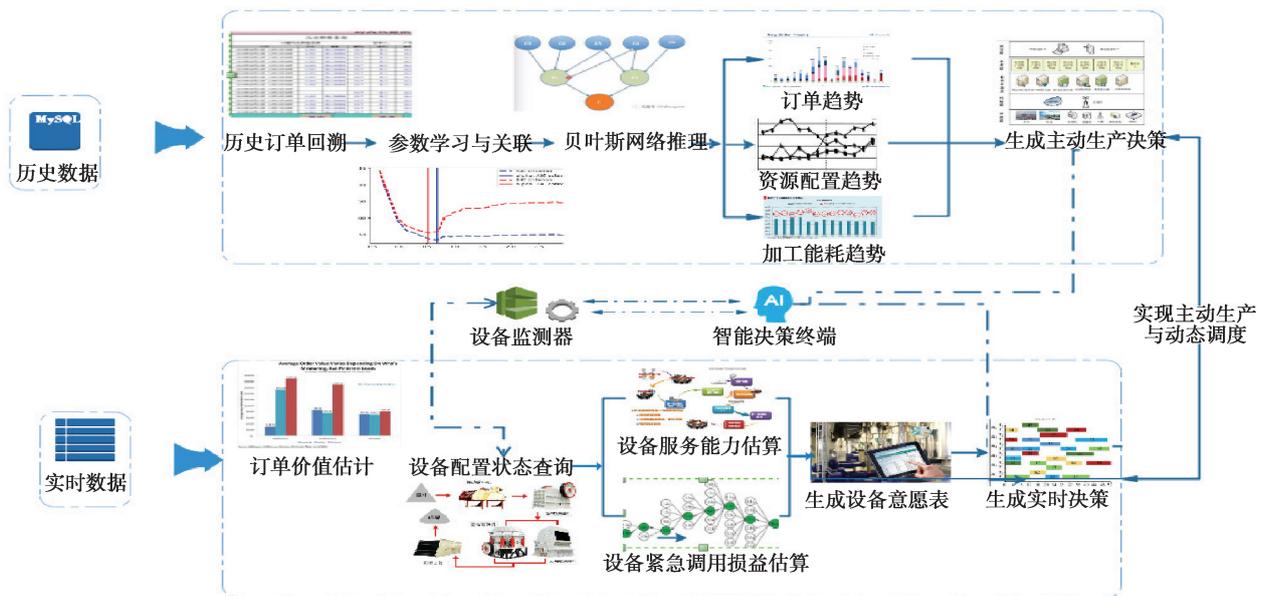


图 3 整体最优化目标下的动态生产调度与主动资源配置实现思路

Fig. 3 Dynamic production scheduling and active resource configuration ideas under the overall optimization goal

2.3 面向服务的质量预测与先验维护策略

面向服务的质量预测与先验维护体系是制造系统智能化与绿色化的产物。文中所提模式将质量问题与设备维护问题进行联合归因、联合处理,具体做法如下:首先,集成制造系统中的质量监测及设备维护历史数据;然后,对质量诊断数据与设备故障数据进行匹配和关联性分析,建立产品质量与设备故障的联动维护决策模型;最后,根据产品质量诊断规则链和设备先验维护策略,从产品质量缺陷因素溯源来识别设备存在的潜在异常并通过先验维护降低设备突发故障带来的损失风险,如图 4 所示。

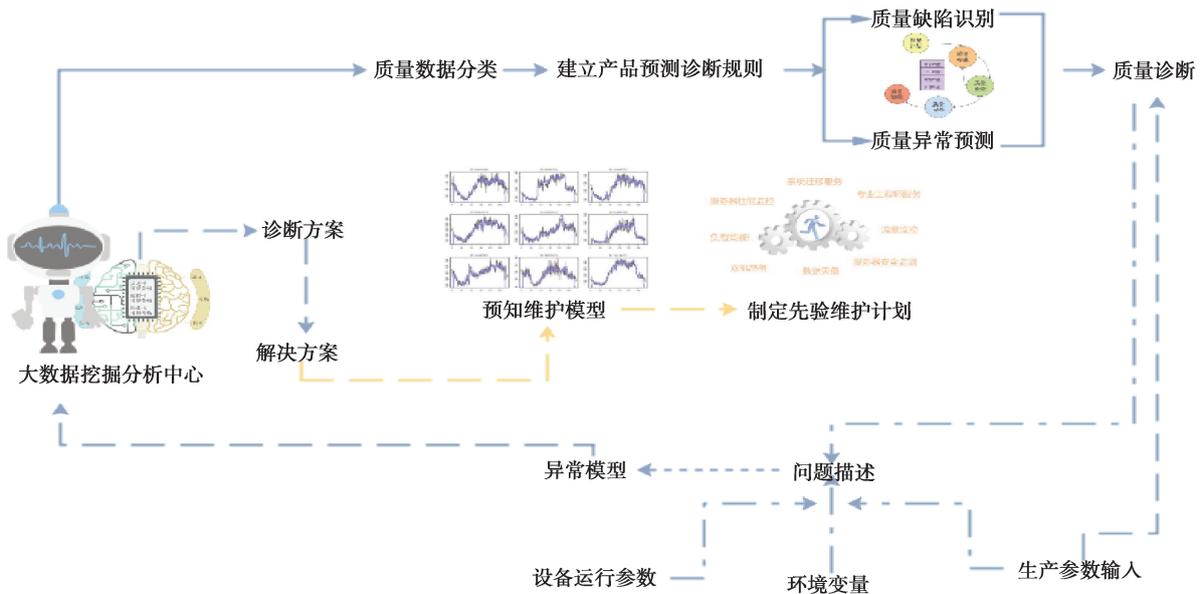


图 4 面向服务的质量预测与先验维护策略实现思路

Fig. 4 Service-oriented quality prediction and a priori maintenance strategy implementation ideas

2.4 考虑资源循环的产品回收及再制造流程

在新模式中,传统制造模式的价值链被延展到产品回收与再利用环节,依托图像识别等技术,以系统价值链资源循环利用率最大化为目标,提出考虑资源循环的绿色闭环回收和清洁生产体系,如图 5 所示。首先,以产品设计拟定的绿色原材料数据为依据,利用 BP 神经网络进行参数训练和规则生成,建立图像识别模型和资源再生处理环节;生产加工中的残次品、报废品及消费者废弃产品物在回收之后通过图像识别进行评价分类,再处理中心根据评价结果进行分类处理,剩余价值较高的生产资源输入绿色加工环节,重新加工、进入市场。有效避免资源的浪费,也降低了生产过程的能耗与成本。



图 5 考虑资源循环的产品回收及再制造流程实现思路

Fig. 5 Implementation of the product recycling and remanufacturing process considering resource recycling

3 基于物元可拓法的新模式实施技术

全新制造模式的引入、实施和运作是属于企业长期部署战略,涉及面广、过程复杂且投入成本较大,属于长期艰巨的系统工程问题。鉴于当前部分企业已有相对成熟的制造模式,重新设计并应用新的制造模式必

然造成大量资源的浪费。为此,基于业务流程再造理念,利用物元模型法设计了传统制造模式向大数据驱动的绿色智能制造模式转型升级工作的关键技术及流程思路,并通过案例验证了其的可行性。

3.1 关键技术说明

3.1.1 制造企业大数据驱动的绿色智能制造模式实施规划

实施方案设计是企业运用新制造模式的基础,其任务是确定企业实施新模式的具体内容、方法和措施。由上文的设计框架及实现思路可知,文中所提模式的实施方案具体可分为:组织结构设计、大数据处理系统、绿色产品定制研发系统、加工过程控制与资源分配系统、质量预测与设备维护系统、回收再制造系统。其中,每个一级方案又可进一步分解为二级方案,最终形成实施方案层次模型,如图 6 所示。该模型是制造企业实施大数据驱动的智能制造模式时的一般化参考模型,各企业在实际应用过程中需根据实际情况增减各层次子方案。

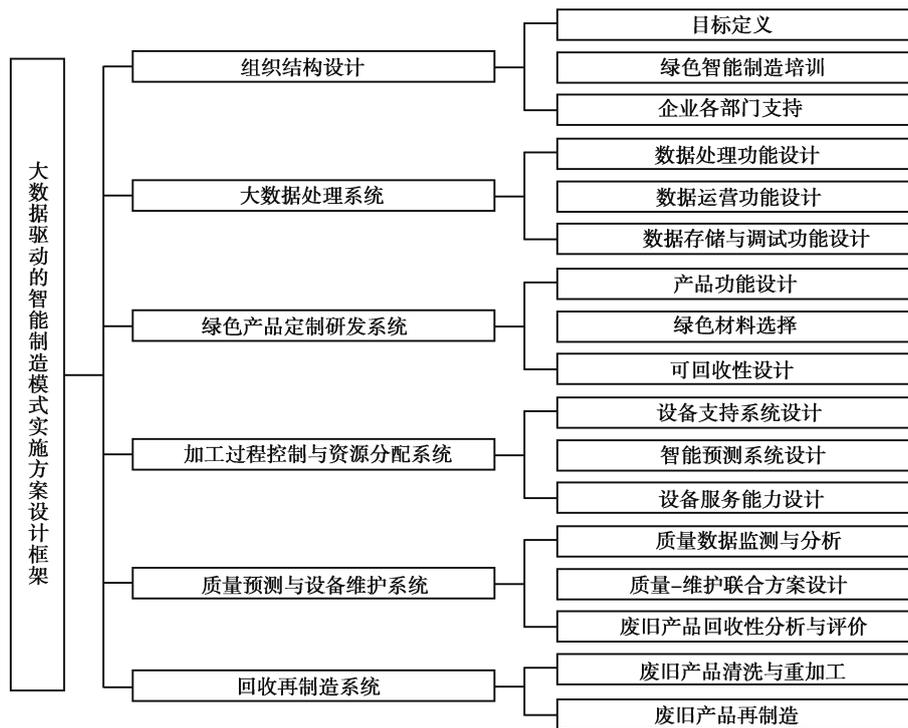


图 6 大数据驱动的绿色制造模式实施方案的层次模型

Fig. 6 Hierarchical model of a big data driven green manufacturing model implementation

3.1.2 物元模型

物元模型方法是一种数据分析方法论^[15],它用关联函数分析决策对象各子系统间的矛盾性,用物元变换化矛盾问题为相容问题,开拓出有关的决策策略集和关联策略集,从而为管理者提供辅助决策的功能。模块物元模型表示了企业实际实施新制造模式的内容和结构,通过计算期望物元和实际物元之间的关联来实现方案的智能自决策。应用物元模型可将图 6 中的各个模块进行模块化定义,可以建立绿色智能制造模式物元模型,其中,将每个二级方案用物元模块表示,并将其所隶属于的一级模块用模块族表示为

$$\text{模块物元模型: } E = (M, c, v), \tag{1}$$

$$\text{模块族物元模型: } \omega = (MF, C, V), \tag{2}$$

其中, M 表示模块的名称; c 表示模块的特征名; v 表示特征相应的量值。 MF 为模块族的名称; C, V 分别表示隶属于该模块族的所有模块的共有特征的集合及量值集合。

物元化后的大数据驱动绿色制造模式实施过程模型可以表示为

$$\omega = (MF, C, V) = \left\{ \begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} \text{组织结构设计} \\ T \cdot v_{11} \\ Q \cdot v_{21} \\ F \cdot v_{31} \\ R \cdot v_{41} \\ E \cdot v_{51} \end{array} \right], \left[\begin{array}{l} \text{大数据处理系统} \\ T \cdot v_{12} \\ Q \cdot v_{22} \\ F \cdot v_{32} \\ R \cdot v_{42} \\ E \cdot v_{52} \end{array} \right], \\ \left[\begin{array}{l} \text{绿色产品定制研发系统} \\ T \cdot v_{13} \\ Q \cdot v_{23} \\ F \cdot v_{33} \\ R \cdot v_{43} \\ E \cdot v_{53} \end{array} \right], \left[\begin{array}{l} \text{加工过程控制与} \\ \text{资源分配系统} \\ T \cdot v_{14} \\ Q \cdot v_{24} \\ F \cdot v_{34} \\ R \cdot v_{44} \\ E \cdot v_{54} \end{array} \right], \\ \left[\begin{array}{l} \text{质量预测与设备} \\ \text{维护系统} \\ T \cdot v_{15} \\ Q \cdot v_{25} \\ F \cdot v_{35} \\ R \cdot v_{45} \\ E \cdot v_{55} \end{array} \right], \left[\begin{array}{l} \text{回收再制造系统} \\ T \cdot v_{16} \\ Q \cdot v_{26} \\ F \cdot v_{36} \\ R \cdot v_{46} \\ E \cdot v_{56} \end{array} \right], \end{array} \right. \quad (3)$$

其中: T 表示时间; Q 表示质量; F 表示成本; R 表示资源消耗; E 表示环境影响, 同理可得二级方案的物元模型。

3.2 实施方案流程设计

结合物元模型, 设计了大数据驱动的绿色智能制造模式的一般化实施方案流程如下:

步骤 1: 企业需求表达。

根据企业的现状、需求及同行特征量水平及模块结构, 建立期望大数据驱动的绿色智能制造模式实施方案的物元 EE , 并确定各个物元特征的量值 $\{v_1^l, v_2^l, \dots, v_n^l\}$ 及其对应的权重 $\{cw_1^l, cw_2^l, \dots, cw_n^l\}$ 。根据大数据驱动的绿色制造模式实施方案的层次模型, 确定其所属模块族下一层次的子模块族 $\omega = \{MF_1, MF_2, \dots, MF_m\}$, 子模块族 ω 的特征模型 $C = \{c_1^k, c_2^k, \dots, c_j^k\}$ 及特征隶属度 $(cw_1^k, cw_2^k, \dots, cw_j^k)$ 。

步骤 2: 基于距的模块物元相似匹配。

方案实施的相似度求解过程本质上是计算期望物元特征值与现实物元特征值之间的差, 然而, 期望物元多以区间形式存在, 现实物元以具体数值形式存在。通过建立基于距的物元关联函数, 将期望物元模块和现实物元模块进行相似度匹配分析, 便可获取现实物元模块与期望物元的匹配度。因此, 首先要引入距的概念, 设 g 为实域 $(-\infty, +\infty)$ 上的任意一点, $G = [a, b]$ 为实域上的任意区间, 则点 g 与区间 G 的距 $\rho(g, G)$ 为

$$\rho(g, G) = \left| g - \frac{a+b}{2} \right| - \left(\frac{b-a}{2} \right). \quad (4)$$

在此基础上, 可得到第 x 个现实模块关于第 i 个物元特征 v_{ix}^k 与期望模块第 $I = [v_{ia}^k, v_{ib}^k]$ 的接近度为

$$\rho(i, I) = I(v_{ix}^k - \frac{v_{ia}^k + v_{ib}^k}{2}) - (\frac{v_{ib}^k - v_{ia}^k}{2}), \text{ 其中, } x = 1, 2, 3, \dots, 6; i = 1, 2, 3, \dots, j. \quad (5)$$

根据式(5), 可建立基于距的物元关联函数为

$$K = \begin{cases} R_{ix}^k = \rho(v_{ix}^k, i^k) / \max_{1 \leq x \leq 6} \rho(v_{ix}^k, i^k), & \text{当 } \rho(v_{ix}^k, i^k) > 0; \\ R_{ix}^k = 0, & \text{当 } \rho(v_{ix}^k, i^k) = 0; \\ R_{ix}^k = \rho(v_{ix}^k, i^k) / \max_{1 \leq x \leq 6} |\rho(v_{ix}^k, i^k)|, & \text{当 } \rho(v_{ix}^k, i^k) < 0. \end{cases} \quad (6)$$

当 $R_{ix}^k > 0$ 时,现实物元特征与期望物元特征为负相关;当 $R_{ix}^k = 0$ 时,现实物元特征与期望物元特征为临界相关;当 $R_{ix}^k < 0$ 时,现实物元特征与期望物元特征为正相关。

最后,通过加权法计算现实物元与期望物元的关联度为

$$R_x^k = \sum_{i=1}^j c\omega_i^k R_{ix}^k. \quad (7)$$

若 $R_x^k > 0$,说明现实物元和期望物元不相符,但具备转化为标准对象的条件, $\min R_x^k$ 即为与期望物元最相似的现实物元;若 $R_x^k < 0$,表示待评对象 P 符合期望物元的匹配需求, $\max R_x^k$ 为与期望物元最相似的现实物元;若 $R_x^k = 0$ 则需重复步骤 1,重新对企业需求和现实物元模块进行解析建模。

3.3 案例分析

为阐明文中所提出的绿色智能制造模式实施方案设计的具体实现过程,选取贵州省 ZY 重工企业为研究对象,采用提出的绿色产品定制研发系统对其主要产品(液压挖掘机)的传统生产设计研发系统进行模式升级。

根据上文实施步骤,结合公司需求和实际情况建立绿色定制研发系统的现实方案物元为

$$\left[\begin{array}{l} \text{期望方案} \\ T \cdot \text{减少 } 20\% \sim 25\% \\ Q \cdot \text{提高 } 20\% \sim 25\% \\ F \cdot \text{减少 } 10\% \sim 15\% \\ R \cdot \text{减少 } 15\% \sim 20\% \\ E \cdot \text{减少 } 25\% \sim 30\% \end{array} \right].$$

通过模块分解,结合行业特征量水平,建立绿色产品定制研发系统子期望模块物元为

$$\left[\begin{array}{l} \text{产品市场需求度:高} \\ \text{材料选择:环境友好型} \\ \text{拖拉机重量/t: } [8, 30] \\ \text{生产能耗/kW: } [150, 180] \\ \text{废弃物排放:很少} \\ \text{有无可回收性设计:有} \end{array} \right].$$

再根据专家经验分配 6 个物元特征对应的权值,分别为 $\{0.15, 0.15, 0.10, 0.20, 0.20, 0.20\}$ 。

根据 ZY 公司绿色产品定制研发系统期望物元模型,基于知识共享与知识再造理念,利用爬虫技术对该公司产品历史设计数据及 5 家同类型挖掘机制造企业的产品设计技术进行挖掘,得到 3 个满足约束条件的产品设计实例,括号内表示定性指标的模糊评分值。

$$\left[\begin{array}{l} \text{JY210E} \\ \text{产品市场需求度:一般}(0.5) \\ \text{材料选择:钢板为主}(0.7) \\ \text{拖拉机重量/t: } 10.5 \\ \text{生产能耗/kW: } 168 \\ \text{废弃物排放:较少}(0.6) \\ \text{有无可回收性设计:有}(0.8) \end{array} \right], \left[\begin{array}{l} \text{JYL615} \\ \text{产品市场需求度:高}(0.8) \\ \text{材料选择:铸钢为主}(0.5) \\ \text{拖拉机重量/t: } 16 \\ \text{生产能耗/kW: } 173 \\ \text{废弃物排放:很少}(0.8) \\ \text{可回收性设计:有}(0.8) \end{array} \right], \left[\begin{array}{l} \text{GJW111} \\ \text{产品市场需求度:一般}(0.5) \\ \text{材料选择:钢板焊件}(0.9) \\ \text{拖拉机重量/t: } 14 \\ \text{生产能耗/kW: } 179 \\ \text{废弃物排放:很少}(0.8) \\ \text{可回收性设计:少量}(0.5) \end{array} \right]$$

根据公式 (5) (6) (7),可以计算得到期望物元与 3 种现实物元的加权关联度序列为 $[-0.276 4, -0.334 5, -0.099 4]$,根据评判规则,可知 $\min R_x^k = -0.334 51$ 是加权关联度最小的现实物元,即型号 JYL615 是期望设计最佳匹配方案。将该型号产品参数导入 ZY 企业的产品定制研发系统后,系统通

过数据分析对产品功能解构,并根据现有资源和制造系统整体目标对产品功能进行再设计,在 ZY 重工企业的绿色偏好型决策目标的作用下,将 JYL615 的材料替换为钢板焊接,进而提高其材质的环保程度。

限于篇幅,案例只探讨了文中提出的数据驱动的产品绿色定制化研发模式及其对应的绿色定制研发系统的方案设计与实施过程,其余模式的方案设计亦可通过文中提出的物元模型方法实现。

4 结束语

为响应“中国制造 2025”绿色和智能融合的要求,在运用系统工程理论分析智能制造与绿色制造的关联性与互补性的基础上,以产品生命周期为主线,提出了大数据驱动的绿色智能制造服务体系和实现思路,包括:数据驱动的产品绿色定制化研发、基于多源数据的主动生产与动态资源调度、面向服务的质量预测与先验维护、考虑资源循环的绿色闭环回收和清洁生产。此外,为避免重新设计并应用新的制造模式造成的资源浪费。文中基于业务流程再造理念,利用物元模型法设计了传统制造模式向大数据驱动的绿色智能制造模式转型升级工作的关键技术及流程思路,并通过案例验证了可行性,为传统制造模式向新模式转型升级提供了思路。作为一项探索性研究,仅以绿色制造和智能制造的融合方法及实现思路。今后还可对网格制造模式、云雾制造模式、社会制造模式等的智能化于绿色化融合方案进行研究。

参考文献:

- [1] 陈丽娟. 我国智能制造产业发展模式探究: 基于工业 4.0 时代[J]. 技术经济与管理研究, 2018(3): 109-113.
CHEN Lijuan. Research on the development model of china's intelligent manufacturing industry: based on the 4 era of industry[J]. Journal of Technical Economics & Management, 2018(3): 109-113.(in Chinese)
- [2] 伏琳. 智能制造新模式下“中国制造”面临的机遇和挑战[J]. 机床与液压, 2016, 44(9): 161-164, 89.
FU Lin. Opportunities and challenges facing Chinese manufacturing under new model of intelligent manufacturing[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(9): 161-164, 89.(in Chinese)
- [3] 杨兴锐, 王宗军. 基于智能制造的开放式创新模式: 以沈阳机床为例[J]. 技术经济, 2016, 35(10): 41-47.
YANG Xingrui, WANG Zongjun. Open innovation model based intelligent manufacturing: case study of Shenyang machine tool[J]. Technology Economics, 2016, 35(10): 41-47.(in Chinese)
- [4] Schuh G, Brandenburg U, Liu Y. Evaluation of demand response actions in production logistics[J]. Procedia CIRP, 2015, 29: 173-178.
- [5] Plitsos S, Repoussis P P, Mourtos I, et al. Energy-aware decision support for production scheduling[J]. Decision Support Systems, 2017, 93: 88-97.
- [6] 赵红武, 史亚斌, 赵勇, 等. 开关设备数字化车间的纵横一体运行数据流模型设计[J]. 工业技术经济, 2019, 38(4): 77-86.
ZHAO Hongwu, SHI Yabin, ZHAO Yong, et al. Vertical and horizontal operation data-flow model of digital workshop for switchgear industry[J]. Industrial Technology & Economy, 2019, 38(4): 77-86.(in Chinese)
- [7] 汤奕华, 王朝民, 许国荣, 等. 台湾创新推动整合清洁生产与绿色建筑之绿色工厂标章制度[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(6): 777-784, 842.
TANG Yihua, WANG Chaoming, XU Guorong, et al. Taiwan green factory label system: creative integration of cleaner production and green building[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(6): 777-784, 842.(in Chinese)
- [8] 张映锋, 郭振刚, 钱成, 等. 基于过程感知的底层制造资源智能化建模及其自适应协同优化方法研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 1-10.
ZHANG Yingfeng, GUO Zhengang, QIAN Cheng, et al. Investigation on process-aware based intelligent modeling of bottom layer manufacturing resources and self-adaptive collaborative optimization methodology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(16): 1-10.(in Chinese)
- [9] 邬江波, 王俊佳, 石宇强, 等. 基于自适应时间窗的设备剩余寿命实时预测研究[J]. 机械设计与制造, 2019(9): 185-189.
WU Jiangbo, WANG Junjia, SHI Yuqiang, et al. Research on the real-time prediction of remaining useful life of equipment based on adaptive time window[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(9): 185-189.(in Chinese)
- [10] 尹瑞雪, 曹华军, 李洪丞. 基于函数化描述的机械制造工艺碳排放特性及其应用[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20

(9): 2127-2133.

YIN Ruixue, CAO Huajun, LI Hongcheng. Carbon emission characteristics of mechanical manufacturing process based on functional description and its application [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20 (9): 2127-2133.(in Chinese)

[11] Schultz C, Braun S, Braunreuther S, et al. Integration of load management into an energy-oriented production control [J]. Procedia Manufacturing, 2017, 8: 144-151.

[12] 何彦, 刘飞, 曹华军, 等. 面向绿色制造的机械加工系统任务优化调度模型[J]. 机械工程学报, 2007, 43(4): 27-33.

HE Yan, LIU Fei, CAO Huajun, et al. Job scheduling model of machining system for green manufacturing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(4): 27-33.(in Chinese)

[13] 刘建康, 郝尚华, 王树华, 等. 数据驱动的数控加工生产线实时监控与优化控制技术框架[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(8): 1875-1884.

LIU Jiankang, HAO Shanghua, WANG Shuhua, et al. Data driven technical framework of real-time monitoring and control optimization for CNC machining production line[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(8): 1875-1884.(in Chinese)

[14] 吴秀丽, 孙阳君. 机器多转速的柔性作业车间绿色调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(4): 862-875.

WU Xiuli, SUN Yangjun. Flexible job shop green scheduling problem with multi-speed machine[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(4): 862-875.(in Chinese)

[15] 张先起, 梁川. 基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1057-1061.

ZHANG Xianqi, LIANG Chuan. Application of fuzzy matter-element model based on coefficients of entropy in comprehensive evaluation of water quality[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1057-1061.(in Chinese)

(编辑 陈移峰)