

研究简报

工业生产的产品质量模型和 质量控制模型及其应用¹⁾

万百五

(西安交通大学系统工程研究所 西安 710049)

(E-mail: wanbw@mail.xjtu.edu.cn)

关键词 工业加工生产线, 工业过程, 产品质量模型, 产品质量控制模型

中图分类号 TP321

PRODUCT QUALITY MODEL AND QUALITY CONTROL MODEL FOR INDUSTRIES AND THEIR APPLICATIONS

WAN Bai-Wu

(Systems Engineering Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

(E-mail: wanbw@mail.xjtu.edu.cn)

Key words Production line, industrial process, quality model, quality control model

1 引言

基于20世纪90年代以来出现的数据挖掘技术,本文作者领导的课题组在控制学科的范畴内,推广和提出工业生产的产品质量模型.其中决定产品质量的变量习惯上被称为操作变量.它们应该是质量模型(如基于神经网络)的关键输入变量,而关键输出变量是产品各质量指标.此外,还有影响质量的可测扰动变量也应该是(神经网络)输入变量.本文以上海某钢铁公司大型多辊热连轧机板材生产线和甘肃某冶炼厂镍闪速炉为典型对象,在现场科技、操作人员合作下选取神经网络作为模型,经过输入变量和质量指标的现场工程数据对进行训练,得出工业生产的产品稳态质量模型.

对于实际操作生产线和控制工业过程而言,质量模型有时显得不怎么方便.因而课题组提出和开发了产品逆质量模型和动、稳态质量控制模型,将分述在以下各节.

2 工业加工生产线的产品质量控制

2.1 产品的质量模型

以多辊热连轧机板材生产线为例,它由板坯加热炉、粗轧机、精轧机、卷曲机和精整机组

1) 国家“863”高技术研究发展计划项目(863-51-945-011)资助. 初稿曾在第19届(2000年)中国控制会议上宣读

收稿日期 2001-01-09 收修改稿日期 2001-07-28

成. 根据理论分析和实际操作经验, 经过模型抽象和变量大量筛选, 应用数据挖掘技术将整个生产线抽象为一个 32 个关键输入变量和 3 个关键输出变量(质量指标)的非线性函数关系. 这 32 个关键输入变量中包括 23 个化学元素变量和 9 个其它类型变量, 如加热炉出口温度、板材厚度等; 3 个质量指标是板材的金属物理性能, 如断裂延伸率、抗拉强度及屈服比. 从现场收集到的、浩如瀚海的大量数据中, 选取 8600 对进行训练和校验由 $32 \times 40 \times 20 \times 1$ 诸层组成的 BP 神经网络, 建成针对 1 个质量指标的板材质量模型.

针对 BP 神经网络输入变量是高维的特点, 本课题组提出和试验了三种学习算法: 大惯性各权重独立训练的分散学习算法^[1]、BP 神经网络两阶段混合学习算法^[2]和逐步扩大样本学习算法^[3]. 多辊热连轧生产线板材 BP 神经网络质量模型, 采用大惯性各权重独立分散训练学习算法, 目前能做到的校验精度是, 对整个数据子集而言, 符合均方误差 $err < 0.05$ 的数据与整个数据的比近似为 85%. 其它两种算法的校验精度也差不多, 而两阶段混合学习算法则略高. 上述精度是以断裂延伸率为质量指标.

本课题组又提出采用基于公式的模糊神经网络为多辊热连轧机建立板材质量模型, 用聚类法将每个关键输入变量的数据聚成若干互不相交的类. 这就是每个关键输入变量的论域划分. 本课题组将 9026 个数据分成五种不同划分情况, 进行建模并校验, 结果以 32 维输入变量/1 维输出变量的该模糊神经网络子质量模型的精度可以基本达到厂方要求. 以达到同一精度而言, 建立模糊神经网络质量模型较建立 BP 神经网络质量模型所需时间为短. 基于公式的模糊神经网络的质量模型, 其校验精度是为 72%.

产品稳态质量模型, 可用于工艺规程设计和产品设计的研究, 能对一些非标准产品设计与生产起到指导作用.

此外, 文献[4~6]提出基于矩形函数系隶属函数的模糊神经网络, 这种模糊神经网络可以自动生成规则. 它不仅具有不必求导数、运算简便、学习速度快、可避免局部极小等优点, 还适合于高维问题建模. 对于大型多辊热连轧产品质量模型其校验精度是为 89.5%^[6], 而且可以从它十分方便地获得其逆质量模型(见 2.2 节).

产品质量模型的建立是基于数据. 实际上为了缩短训练时间及加快收敛性, 无论哪种神经网络质量模型都经过分解成单个质量指标为输出的子质量模型, 然后进行训练和测试. 这是大型质量建模问题的分解.

2.2 产品的逆质量模型

为了方便使用, 本课题组提出基于 BP 神经网络的板材逆质量模型, 即将上述关键输入、关键输出数据颠倒使用, 进行训练和校验, 可得到产品稳态逆质量模型. 由产品质量指标的要求变动求出操作变量的应有变动, 用于指导对工业生产的操作和控制, 也可用来对工业生产的产品设计和调整或设计工艺操作. 但扰动变量也作为神经网络的输出变量, 这使得模型的实用价值受到限制. 实践证明, 在给出的输入、输出变量数据和扰动变量数据的小范围内逆质量模型是可能存在的. 但这里还有一些严格的理论问题需要研究, 如逆质量模型的存在性和唯一性及其条件. 对于多辊热连轧机板材生产线, 本课题组对关键输入、关键输出数据集经过验证一一对应性, 通过基于 BP 神经网络大惯性各权重独立训练的分散学习算法, 得出以 3 维质量指标为关键输入、32 维关键输出的 $3 \times 40 \times 20 \times 32$ BP 神经网络板材逆质量模型. 其建模精度达到 83%. 而 1 或 2 维质量指标为关键输入、32 维关键输出的 BP 神经网络逆质量模型则并不存在.

利用基于矩形函数系隶属函数的模糊神经网络的产品稳态逆质量模型,对于处理诸如多辊热连轧机板材生产线这样一类问题提供新的有效工具.

2.3 产品的质量控制模型

上述板材逆质量模型 32 维关键输出变量中,事实上并不是每个变量都应由质量指标来决定的,例如板材厚度.因此,更合理的做法是,以多辊热连轧机板材生产线为例,原先为一个 32 维输入/3 维输出的板材质量模型,今可构造出一个以 3 个质量指标加上 20 个化学元素变量再加上 9 个其它类型变量为输入(32 维),以 3 个贵金属为输出的 $32 \times 40 \times 20 \times 3$ BP 神经网络板材逆质量模型.可用来根据质量指标确定贵金属成份,并将连轧工艺参数的影响考虑进来.经过基于 BP 神经网络大惯性各权重独立训练的学习算法,这种逆质量模型已成功建立,其建模精度达到 84.5%.它也可被分解成三个 32 维输入/1 维输出的 $32 \times 40 \times 20 \times 1$ BP 神经网络板材逆子质量模型.这类逆质量模型的存在性和唯一性条件都能满足.由于这并不是质量模型真正意义上的逆质量模型,故适宜称为稳态质量控制模型.从中可直接得到满足全部质量指标的部分操作(输入)变量^[3],如上例的贵金属成份.

2.4 应用板材质量模型进行质量控制以及新产品、新工艺设计的补充

由于影响多辊热连轧机板材质量的因素特别多(至少 64 个),进行工业生产线的产品工艺设计,就得考虑至少另外 32 个影响板材质量的因素.因此在这种情况下重要的往往不是像对工业过程优化控制那样要找到一个工作点,而是要找到能使质量指标满足要求的输入变量的一个集合.再根据生产经验及其它至少 32 个影响板材质量的因素,从中选择一组到几组的输入变量,作进一步的现场试验.由于工业生产线的稳态质量模型已经分解,这就要利用多个 BP 神经网络子质量模型来综合得出能使质量指标满足要求的输入变量的一个集合.这就是这种大型质量模型综合问题的协调,还需作进一步研究.通常的协调做法是,根据每个质量指标求出输入变量的一个集合,然后取它们的交集^[3].

在基于 BP 神经网络的产品稳态质量模型上怎样调试输入变量,能够使输出变量值(产品质量指标)发生希望的变化,也是一个重要问题.课题组用相关分析来研究数据集中输入变量与输出变量的关系.对 BP 神经网络每个输出变量都可以找到一些输入变量与其正相关以及一些输入变量与其负相关.并可以计算每一输入变量对输出变量的影响.研究表明,为了使输出变量达到所期望的值,应该调试一组输入变量^[3].

有时用户对产品某质量指标的要求,越高越好.这就要求找出 BP 神经网络质量模型一组输入变量的值(生产方案),它能使质量模型的单维质量指标输出达到极值.本课题组称之为基于神经网络产品质量模型输出的优化问题.文献[7,8]给出质量模型输出的优化方法以及在多辊热连轧机板材质量控制中的应用.必须指出:各种质量模型只有在它经过运行数据训练的附近范围内,能给出有参考价值的结果,并且对加工生产线产品都采用各类稳(静)态模型.

3 工业过程产品质量控制

3.1 产品的稳态质量模型

工业过程传统上是在负荷(处理量)不变的稳态工况下连续生产.由于工业过程往往是非线性的,产品稳态质量模型依赖于特定负荷.今以冶炼厂镍闪速炉为例,在负荷精矿量不

变的稳态工况下,确定关键输入变量为:氧单耗、熔剂量、重油量及空气单耗,确定扰动变量为烟尘量及精矿成份和颗粒度;取质量指标冰镍品位、冰镍温度及渣中铁硅比为关键输出变量^[9,10].选取三个 $5 \times 5 \times 5 \times 1$ BP 神经网络经过输入变量和质量指标的数据对进行训练,得出镍闪速炉的三个稳态子质量模型.此外,还选取一个 $5 \times 5 \times 5 \times 1$ BP 神经网络经过输入变量和冰镍产量的数据对进行训练,得出镍闪速炉的在线稳态产量模型.扰动变量只取烟尘量,精矿成份等暂未作为输入变量.为了缩短训练时间、加快收敛性和提高精度,采用(分解)三个 $5 \times 5 \times 5 \times 1$ BP 神经网络来替代一个 $5 \times 5 \times 5 \times 3$ BP 神经网络.基于上述冰镍质量模型和产量模型,可对镍闪速炉实施稳态优化控制.本课题组以能耗为目标函数,以质量和产量(通过相应的神经网络)为约束,采用 SUMT 算法进行优化控制(能耗最小),并进行在线质量控制^[10,11].这比大工业过程现用的、不以质量为约束的稳态优化控制,显著要好.产品质量模型的某个质量指标也可以在工业过程稳态优化时作为目标函数,取其上限或下限(“卡边”),而产量、能耗和其它质量指标作为约束.也可以在工业过程多目标稳态优化时将产量和能耗两者同时作为目标函数,而质量模型作为约束^[11].

3.2 产品的模糊稳、动态质量模型

像镍闪速炉这样的工业过程,输入、输出变量数不是很多,操作工积累了一定的操作经验(知识).这时,可根据模糊逻辑控制方法将输入和质量变量模糊化,形成对产品各质量指标的模糊控制规则,称为基于模糊规则的产品稳态质量模型.本课题组又开发了基于模糊神经网络的产品稳态质量模型^[11].文献[11]还提出了产品的模糊自适应稳态质量模型,将上述两者加权综合起来,效果较好.

有时大惯性工业过程,不在稳态而在动态下运行.操作工在一个班内要调整负荷(处理量)数次.这样就要采用产品动态质量模型.它包括质量变量、操作变量现时和过去的信息.本课题组采用人工智能方法,根据操作工和现场技术人员在实践中积累的丰富操作经验和理性知识,建立规则,规则有 If..., Then...形式.这是一个产品动态质量模型.动态质量模型既利用数据又利用操作经验,并基于 Takagi-Sugeno-Kang 提出的模糊模型建模方法(以下简称 TSK 模糊模型),可以建立产品的动态模糊质量模型,也可建立产品 TSK 稳态模糊质量模型.本课题组为闪速炉建立产品动态模糊质量模型.它表示为一组规则,前件为模糊变量.后件为以精确变量表达的方程式,式中的后件参数由模糊辨识方法获得.经过产品动态模糊质量模型的现场离线试验,镍质量有明显改善,质量指标平稳,效果较好^[12].产品 TSK 模糊稳态质量模型和它的逆模型也通过了现场试验.

3.3 产品模糊稳、动态质量控制模型

在 TSK 模糊模型结构辨识的基础上,课题组为大惯性工业过程——镍闪速炉建立产品的稳态模糊质量控制模型,经过现场离线试验,有的质量指标控制效果较好,有的很好^[9,12].实践表明:对于未处于长期稳态运行的大惯性工业过程,以动态质量控制模型为好.在闪速炉生产现场经过产品模糊动态质量控制模型 2 个月离线指导炉操作工的操作,证实了模糊动态质量控制模型能够实现有效的控制^[14].对于工业过程也可以开发基于精确变量动态神经网络的产品动态质量控制模型.

3.4 产品质量控制器的设计

工业过程各操作变量都有各自的局部控制器.但为了质量控制还需要设计一个质量控制器,来调节它们的设定值.文献[11,13]的两种质量控制器设计中将期望的质量指标作

为闪速炉质量控制器的给定值,能确保质量指标在较狭窄的范围内.而质量控制器中产品动态模糊质量模型或逆质量模型的输出可用作各局部控制器的设定值,即各类产品质量模型是质量控制器中的构成成分.

4 结语

产品质量控制所应用的模型可分为两类:质量模型与质量控制模型.产品质量模型的输出变量是质量指标,而产品质量控制模型的输出变量是操作变量应取的值.这两类模型可以是稳态的,也可以是动态的;可以基于精确性研究方法,也可以基于模糊研究方法.产品质量模型的输入变量可分为操作变量和扰动变量两类.操作变量因设计问题的性质(工艺或产品)而变动.寻找一种更合适的神经网络及其算法,以提高基于现场数据的产品高维质量模型或质量控制模型的精度,是继续研究的重要任务.最近本课题组研制了高维小波神经网络,校验命中率已超过 87%,有望进一步提高.

产品逆质量模型的存在性和唯一性及其条件,是需继续研究的理论课题.实际上它的存在性就是反函数的存在性和输入、扰动数据集和输出数据集中点的一一对应性.往往产品质量控制模型使用更方便.质量模型一般是离线应用的.逆质量模型、质量控制模型、动态质量控制模型都可以在线应用的.实践表明,上述各种模型要与质量控制回路和质量控制器的设计相结合,形成多种产品质量控制结构^[11].

通过建立产品质量模型或质量控制模型为工业生产线和复杂工业过程的产品质量提高、工艺规程设计和产品设计开辟了广阔的前景.可以真正将期望的产品质量指标作为复杂工业过程优化时的约束或质量控制器的设定值.基于各类神经网络的产品质量建模与控制问题的分解和协调,是继续研究的重要方向.

基于这些产品质量模型、质量控制模型的工业过程离线、在线质量控制回路、“卡边”控制和质量控制器,最优控制和鲁棒控制的实际现场应用(实现),是重要实用研究方向,有很大的经济价值.

本文的研究成果可以推广应用于各种金属的冷、热连轧机生产线、造纸生产线,CIMS加工生产线等,各类工业过程以及推广应用于其它非工业领域,如环境科学中长河流水的质量模型及其控制等.

应用数据挖掘技术,研究、开发工业生产的产品质量模型和质量控制模型,符合当前利用信息技术改进和改造传统产业、传统工艺的大方向,值得大力提倡和推广.

致谢 本文是作者和冯祖仁教授,史维祥教授及课题组博士研究生万维汉、邢进生、李换琴,硕士研究生贾磊以及有关工厂现场操作工和技术人员的集体成果,由作者加以归纳、综述和总结.有关工厂还给予资助,特此致谢.

参 考 文 献

- 1 贾 磊,万百五,冯祖仁.以高维输入神经网络作为生产线产品质量模型.控制与决策,2000,15(5):569~572
- 2 邢进生,万百五.两阶段混合算法在轧钢数据建模中的应用.西安交通大学学报,2000,34(12):105~107
- 3 邢进生.KDD及其在大型多辊热连轧机产品质量控制中的应用[博士学位论文].西安:西安交通大学,2000
- 4 邢进生,万百五.基于矩形函数系的模糊神经网络及其应用.西安交通大学学报,2000,34(6):67~70
- 5 邢进生,安 凯,万百五.模糊神经网络的记忆.西安交通大学学报,2001,35(2):171~174

- 6 邢进生,万百五.基于模糊神经网络的大型多辊热连轧产品质量模型.信息与控制,2001,30(4):381~384
- 7 邢进生,万百五.神经网络输出两阶段优化及其应用.自动化学报,2002,28(5):845~847
- 8 邢进生,万百五.神经网络输出优化及其在热连轧产品质量控制中的应用.西安交通大学学报,2001,35(2):435~437
- 9 Wan Wei-Han, Bai-Wu Wan, Yong-Fa Yuan, Jin-Yi Yang. Neural network modeling and steady-state optimizing control for nickel flash furnace in smelting plant. In: Preprint of 14th World Congress of IFAC, Beijing; Pergamon Imprint of Elsevier Science, U. K., 1999, N: 415~420
- 10 万维汉,万百五,杨金义.闪速炉的神经网络冰镍质量模型与稳态优化控制研究.自动化学报,1999,25(6):800~804
- 11 万维汉.复杂工业过程的质量控制研究及其应用[博士学位论文].西安:西安交通大学,2001
- 12 万维汉,史维祥,杨金义,袁永发.镍闪速熔炼过程的模糊建模.冶金自动化,2000,34(2):9~12
- 13 万维汉,万百五,史维祥,杨金义.闪速熔炼过程的模糊动态质量模型与控制.西安交通大学学报,2000,34(3):54~59
- 14 万维汉,万百五,史维祥,杨金义.镍闪速炉的仿人模糊质量控制模型.见:第三届全国智能控制与自动化大会论文集,合肥:中国科学技术大学出版社,2000,3:1662~1666

万百五 简介见本刊第 25 卷第 1 期.

2003 年中国智能自动化会议 CIAC 2003 征文通知

2003 年 12 月 15—17 日 香港中文大学

主办单位: 中国自动化学会智能自动化专业委员会

承办单位: 香港中文大学

协办单位: 中国人工智能学会

IEEE 控制系统,机器人与自动化香港联合分会

IEEE 控制系统学会北京分会
香港城市大学,香港理工大学

会议主席团:

名誉主席:路甬祥 李衍达 马颂德 主席:张 钹
副主席:涂序彦 于景元 戴冠中 王 珏 孙增圻 吴启迪 徐文立 梁天培 徐扬生
秘书长:孙增圻 杜继宏

会议组织委员会:

主 席:徐扬生 副 主 席:孟庆虎

征文内容:

- | | | | | |
|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| • 智能控制及自动化 | • 人工智能及应用 | • 人工神经网络 | • 模糊控制与系统 | • 进化计算及应用 |
| • 智能机器人技术 | • 计算智能及软计算 | • 智能传感器及应用 | • 智能制造系统 | • 离散事件系统 |
| • 混合系统及应用 | • 多智能体系统 | • 混沌、分形与小波 | • 信息处理 | • 智能管理与决策 |
| • 智能设计与制造 | • 智能建模与仿真 | • 故障诊断 | • 通信网络技术 | • 智能交通系统 |
| • 人机交互技术 | • 数据挖掘 | • 虚拟现实技术 | • 多媒体技术 | • 计算机视觉 |
| • 模式识别 | • 图像处理技术 | • 其它相关领域 | | |

论文要求:

篇幅不超过 A4 纸 6 页.加附 200 字作者简介

优秀论文评奖:

- “鍾士模奖”优秀论文二篇(第一作者 35 岁以下)
- “常迥奖”优秀论文 1 篇(第一作者 35 岁以下)
- “IEEE 控制系统学会北京分会奖”优秀论文 1 篇(第一作者 45 岁以下)
- * 参加优秀论文评奖者,投稿时注明第一作者出生年月

优秀论文专刊: 论文中的优秀者将在以下杂志出专刊:

- Asian Journal of control
- Journal of Advanced Computational Intelligence

关键日期:

- 2003 年 6 月 15 日前投送符合清稿要求的全文两份或 WORD 电子稿.格式要求请见网页.
- 2003 年 8 月 15 日前发出录用通知.

会议联系人:

国内:钱宗华,北京清华大学计算机系 100084
010-62788939(O);010-62784458(H) hqzh@s1000e.cs.tsinghua.edu.cn.
海外:孟庆虎, ciac2003@acae.cuhk.edu.hk.

<http://zncaa.gongkong.com>.