

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.03.001

# 基于表面粗糙度的缸体打磨控制专家系统研究\*

顾寄南, 潘 甜

(江苏大学 制造业信息化研究中心, 江苏 镇江 212000)

**摘要:**针对当前铸件后处理打磨过程中高污染、低效率和传统人工打磨出现的低质量、高成本等问题,对打磨过程各环节进行了研究,并对打磨过程进行了总结与优化。结合专家知识和操作经验,从机器人打磨过程中的表面粗糙度出发,设计和开发了应用于缸体表面打磨控制的专家系统;采用 BP 神经网络模型对打磨结果进行了预测,着重论述了打磨控制方法的改进,实现了加工参数的优化;在打磨专家系统实现过程中,对专家系统主要功能作了充分分析和详细设计,使用 Java 编程语言实现了系统功能,采用 MySQL 数据库进行了数据存储。研究表明:该系统可有效降低打磨过程中的表面粗糙度,提高表面质量;这对减轻工人劳动强度、提高打磨效率、降低环境污染、节约生产成本有着十分重要的意义。

**关键词:**缸体打磨;专家系统;BP 神经网络

**中图分类号:**TH161+.14;TP273

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2018)03-0219-05

## Expert system for cylinder grinding control based on surface roughness

GU Ji-nan, PAN Tian

(Mechanical Information Engineering Research Center, Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China)

**Abstract:** Aiming at the problems such as high quality, low efficiency and low quality and high cost of the traditional casting process, the grinding process was studied and the grinding process was summarized and optimized. Based on the expert knowledge and operating experience, the expert system for the grinding control of the cylinder surface was designed and developed from the surface roughness during the robot grinding process. The BP neural network model was used to predict the grinding results, and the improvement of the grinding control method was discussed, and the optimization of the machining parameters was realized. In the process of grinding expert system, the main function of the system was fully analyzed and designed in detail, using the Java programming language to achieve system function, using MySQL database for data storage. The results indicate that the system can effectively reduce the surface roughness during grinding and improve the surface quality. This is to reduce the labor intensity, improve the efficiency of grinding, reduce environmental pollution, saving production costs have a very important significance.

**Key words:** cylinder grinding ;expert system ; BP neural network

## 0 引 言

当前,制造业信息化快速发展,我国铸件后处理打磨技术和装备还处于比较落后的水平,面对低效率、高

污染、高能耗等问题,传统铸件后处理打磨技术亟待转型。国外铸造公司如意大利 MAUS 公司、德国格林策巴赫机械公司和其他铸件后处理自动化公司与国内公司合作研发的集柔性和智能化为一体的机器人自动打磨单元生产线,实现了制造业的自动生产和绿色生

收稿日期:2017-06-15

基金项目:江苏省科技成果转化专项资金资助项目(BA2015026)

作者简介:顾寄南(1964-),男,江苏镇江人,博士,教授,博士生导师,主要从事复杂产品建模与创新设计理论,智能机器人机构设计、视觉控制及分析仿真技术,机械 CAD/CAE 及计算机图形学方面的研究。E-mail:gjnan@ujs.edu.cn

产<sup>[1]</sup>。专家系统作为人工智能的一个重要分支应用于缸体打磨是计算机技术与传统铸造业的完美结合<sup>[2]</sup>。

由于国内对专家系统研究相对较晚,技术基础薄弱,国外对专家系统相关技术的保护和限制,使得本研究具有工程实际意义。本研究从专家系统的基本原理出发,基于目前计算机和机械制造业领域强大的技术支撑,开发应用于缸体表面打磨控制的专家系统。该系统具有强大数据处理功能和友好界面,能够依据质量检测特征数据,自动调整生产加工工艺参数,优化加工工艺,实现降低表面粗糙度、提高铸件质量与加工效率等功能。

并且笔者计划实施进一步的网络化开发,通过网络实现远程打磨控制。

## 1 专家系统与打磨控制

专家系统兴起于 20 世纪 60 年代初,快速发展成一门新兴应用学科,作为人工智能学科的一个重要分支,专家系统随着计算机技术的发展而日趋成熟。

传统的人工打磨生产方式滞后,生产质量不高,生产效率低下,工人通过目测缸体表面实际情况思考得出方案进行指导加工。机器人打磨通过图像检测得到缸体表面的实际情况,经过计算机系统分析后,系统设定最优的打磨方式和合理的参数组合,进而得到整个缸体打磨方案。

经研究发现,传统的打磨机器人控制系统要同时考虑机械手臂和砂轮运转两个子系统,使系统具有很强的时变性和强耦合性,多输入多输出的非线性系统使加工参数很难控制,从而给机器人打磨控制带来困难。实际验证表明,利用专家系统控制打磨过程,正好可以解决这一问题。通过建立基于 BP 神经网络预测模型,作为专家系统的核心算法,结合 BP 神经算法的非线性表达能力,把分析所得的打磨方法向下位机的控制器发送控制信息,找到最合适的参数组合并指导工作机的工作参数与工作方式,从而保证了打磨顺利有效地进行。

专家系统一般由知识库、推理机、人机交互界面和知识获取机制等方面组成。该系统可以按照该领域的专家经验和知识制定规则,其内部包括大量的具有专家水平的领域知识和经验,推理机模拟人类专家的决策过程,运用人类专家解决问题的知识和方法进行推理和判断,针对影响机器人打磨过程的主要加工参数提供必要的优化和控制,从而自动地调整生产加工工艺参数,优

化加工工艺,提高了铸件的表面质量与加工效率<sup>[3-4]</sup>。

专家系统结构如图 1 所示。

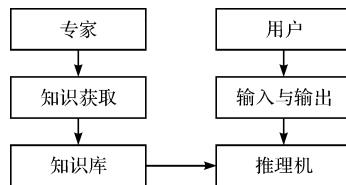


图 1 专家系统结构图

基于机器人打磨关键技术的研究,运用正交试验的方法发现,影响工件表面质量和机器人打磨效率的主要加工参数包括砂轮状态、进给速度、工具转速和打磨次数等。在砂轮准备好之后,开始打磨的第一段里,影响打磨的每个参数都在变化,通过对工艺参数进行实时合理地控制,可以有效提高打磨后的表面质量。当选定合适的磨具后,通过研究各种切割打磨系统,打磨压强  $P_a$ 、进给速度  $V_f$  和打磨次数  $n$  都是影响打磨后表面粗糙度  $Ra$  的主要因素。

通过对加工参数进行实时合理的控制,可以有效提高打磨后的表面质量,从而实现打磨的智能化<sup>[5]</sup>。

## 2 专家系统总体设计

本研究旨在运用专家系统建立智能化铸件后处理打磨数字化、信息化集成平台,具有优化打磨工艺参数、降低缸体打磨后表面粗糙度的功能。系统模块体系包括用户登录模块、预测优化模块、数据库模块等。此外,系统还具备知识库维护子模块,方便用户对知识库进行不断补充和完善。

专家系统通过网络训练建立基于 BP 神经网络的表面粗糙度预测模型,BP 神经网络是基于误差方向传播的多层前馈网络,是一种监督学习算法,能够解决非线性连续函数的多层前馈神经网络权重调整问题,典型的 BP 神经网络采用梯度下降算法。专家系统中该模型由输入层、隐层和输出层组成,输入的是打磨压强  $P_a$ 、进给速度  $V_f$ 、打磨次数  $n$  和原始表面粗糙度  $Ra$ ,输出的是打磨后缸体的表面粗糙度预测值<sup>[6-9]</sup>。数据计算选择均方误差作为误差控制函数,样本训练的误差为样本误差平方和的平均值,计算公式如下:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{n} \quad (1)$$

式中: $y_i$ —打磨后预测表面粗糙度值; $y'_i$ —实际表面粗糙度;下标  $i$ —第  $i$  个训练样本; $n$ —训练样本容量。

建模过程如图2所示。

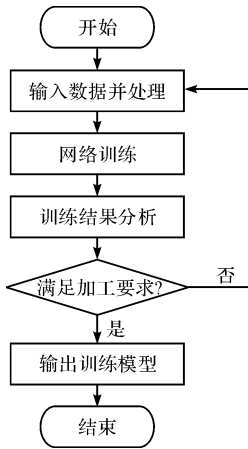


图2 建模流程图

传统的机器人打磨控制系统中参数呈非线性变化组合,无法准确指导加工过程。

通过改进打磨控制方法可以保证加工参数和方式的优化。知识库中存储着领域专家的知识经验,工人通过人机交互界面键入原始表面粗糙度和打磨加工参数,系统推理得到打磨后表面粗糙度实际值,并与网络模型得到的预测值进行比较,如果误差过大,则系统显示继续优化的提醒,此时继续改变打磨压强  $P_a$ 、进给速度  $V_s$  和打磨次数  $n$ ,重新打磨,然后把打磨后的表面粗糙度重新键入搜索栏中,重新搜索,以此往复,直到误差小于2%为止,最后将优化后的打磨压力、进给速度和打磨次数呈现在打磨参数优化查询界面上,从而指导工人顺利有效地进行打磨。

### 3 知识库设计

专家系统构造的关键在于知识库、推理机的设计和知识获取机制。推理结果的优劣很大程度上取决于知识库的好坏。

#### 3.1 知识的表示形式

知识的表示是设计专家系统的关键,该系统知识库主要是缸体表面打磨控制相关知识。笔者通过研究发现,影响打磨后表面粗糙度  $Ra$  的主要因素是进给速度  $V_s$ 、打磨压强  $P_a$  和打磨次数  $n$ 。知识库采用 MySQL 数据库进行存储,知识库中的数据表适合产生式规则表示法,因此该系统采用产生式规则形式表示知识,产生式规则表示知识的形式为:

If E Then C。

其中:E - 规则前提条件;C - 条件引出的结论。

通过正交试验对数据进行分析,其中一条完整的规则为:

If  $Ra1 = 3.105 \mu\text{m}$ ; and  $P_a = 5.5 \text{ kPa}$ ; and  $V_s = 180 \text{ mm/min}$ ; and  $n = 8$ ; Then  $Ra2 = 0.741 \mu\text{m}$ 。

其中: $Ra1, Ra2$  - 打磨前、后的表面粗糙度值。

#### 3.2 知识获取机制

知识获取是专家系统开发过程的关键技术之一,知识获取机制将从知识库中提炼的知识转化为计算机程序,且能为专家系统的推理机制所应用。本文知识获取方式为知识工程师通过大量实验向系统注入打磨领域的专家知识,如影响打磨效果各加工工艺参数和不同参数组合控制下的表面粗糙度值,并以规则表的形式存储在知识库中。此外,它还能根据实践结果总结发现原知识库中错误的规则并加以修改,从而使知识库保持不断更新的状态,使专家系统可以解决更多更复杂的问题。

#### 3.3 知识库建立

知识库中的知识来源于工厂生产数据和实验结果,本研究经过大量实验和两组验证实验,获得了多组来源于打磨领域专家的加工参数和表面粗糙度的知识表示,将不同的加工参数,对应不同的表面粗糙度值以独立文件形式建立文件文本区,并将其整理成规则表存入知识库中。

本研究以缸体内表面打磨为例,部分规则如表1所示。

表1 知识规则表

序号	打磨压强/kPa	进给速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	打磨次数	原表面粗糙度/ $\mu\text{m}$	打磨后表面粗糙度/ $\mu\text{m}$
1	2.5	180	4	2.482	2.052
2	2.5	30	6	2.482	1.975
3	3.7	180	4	1.455	1.185
4	3.7	180	10	2.968	1.157
5	5.5	180	5	3.105	1.961
6	5.5	180	8	3.105	0.741
7	5.5	180	4	0.983	0.569
8	5.5	180	12	3.105	0.625
9	13.3	30	6	2.584	1.258
10	13.3	30	4	1.422	0.731
11	15.7	180	12	3.104	1.142
12	15.7	180	8	1.336	0.877
13	15.7	180	6	1.127	1.031
14	25.9	150	4	1.422	0.961
15	25.9	30	5	1.422	0.606
16	25.9	30	5	1.459	0.623
17	25.9	30	4	1.459	0.821
18	30.5	30	5	1.459	0.707
19	30.5	30	4	1.512	0.967
20	30.5	30	5	1.573	0.875

### 4 推理机的设计

推理机设计是根据一定的规则从存在的实践中推理出新的事实的思维过程。推理机作为专家系统的核心,主要在求解问题的过程中适时地决定知识的选择和调用。在缸体表面打磨专家系统中,推理以知识库中存储的知识为前提,是一种基于知识的推理,知识库和推理机构成了专家系统的核心部分。

知识库是以规则表的形式存储在数据库中,使用 SQL 语言可以有效检索出符合要求的结果集。这种基于 SQL 语言的推理方式可以发挥知识库本身的优点,通过普通的检索语句就可以实现推理。

该系统采用正向推理机制,产生式规则的推理机制是搜索和匹配的过程。工人通过人机交互界面输入原始表面粗糙度和打磨工艺参数,如果检索到相匹配的规则前件,则匹配成功,输出规则的结论部分;否则作为新规则加入到知识库中,以备下次推理时调用。

建立了知识库之后,推理机根据知识库中经验数据,模拟专家指导打磨的思路,推理出打磨后表面粗糙度实际值,结合预测模型得到的打磨后表面粗糙度预测值,分析误差大小,从而改变工作参数和工作方式,并把优化策略呈现出来。

推理流程如图 3 所示。

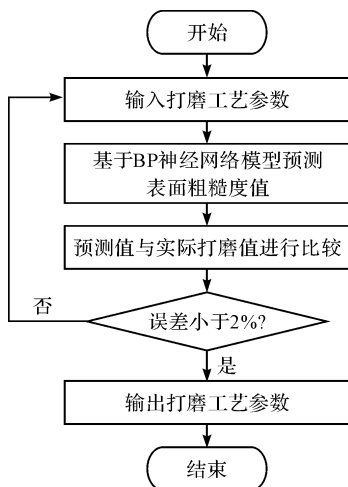


图 3 推理流程图

应用于一般的机器人打磨控制系统,是机器人打磨控制方法的革新。

本研究应用计算机领域的相关技术开发专家系统,采用菜单及下拉菜单组件,结合对话框、状态栏提示,具有良好的人机交互界面。该系统使用面向对象的 JAVA 语言进行开发,具有较好的健壮性和移植性<sup>[10-12]</sup>。开发使用的工具包括 MyEclips 编辑器和 MySQL 数据库。数据库设计采用第二范式,用投影分解把关系模式分解成多个关系模式,降低数据冗余度,解决可能存在的数据库插入、删除等问题。

应用于缸体表面打磨控制的专家系统是目前国内较为先进的一种系统,并与实际生产紧密结合。专家系统的实现不光有计算机技术领域的支撑,其优化功能的实现同时满足了一般工厂的生产加工要求。功能界面主要包括用户登录界面、规则增加或修改界面、打磨参数优化管理界面、用户留言界面等。其中,打磨参数优化管理界面是系统的核心功能,也是向控制器输送信号的关键步骤,从而指导工作机改变加工参数和加工方式,准确完成企业的生产加工要求。

以下是缸体表面打磨控制专家系统中实现打磨优化和知识维护功能的关键步骤。对知识库中具体的规则进行修改或增加,从而使知识库得到不断补充和完善。

规则增加或修改界面如图 4 所示。

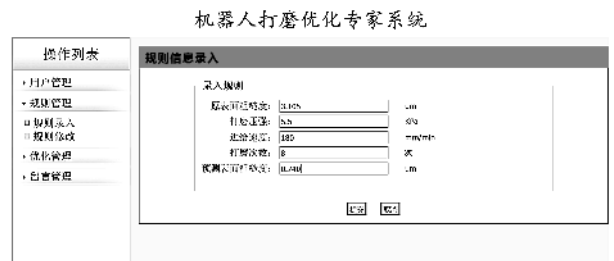


图 4 规则增加或修改界面

推理机将推理得到的实际值与神经网络模型预测值进行比较,直到预测值与实际值的误差范围小于 2% 为止,进而推理出合适的打磨参数和打磨方法,显示在优化查询界面上。

预测结果显示如图 5 所示。

本研究使用 GlassFish 服务器完成了缸体表面打磨优化专家系统网络应用的部署,最终程序运行平稳,指导工作机控制打磨过程方便快捷且准确无误,再次

### 5 专家系统的实现

本研究将 BP 神经网络建模技术融于专家系统并



图5 预测结果显示

证明了建立神经网络预测模型方法的有效性。在日后的研发中,可以通过改进规则的添加方法,使之更为简洁明了、方便操作。

## 6 结束语

基于 BP 神经网络预测模型建立的缸体表面打磨控制专家系统,利用数据推理和误差分析得到最合适的加工参数组合,通过打磨控制技术方法的革新准确快捷地完成了工艺参数的优化,达到降低表面粗糙度、提高生产质量的生产目的,有效避免了传统打磨中太过依赖工人经验进行实时控制的繁琐,这对日后研究如何降低打磨过程中材料的去除率、优化打磨轨迹有着十分重要的指导意义。

将先进的计算机技术应用到传统的铸件后处理打磨过程中是未来铸造行业发展的必然趋势,人工智能和专家系统技术也将越来越广泛地应用于铸造行业。

### 参考文献 (References):

- [1] 李玉青,吴殿杰. 铸件后处理磨削工艺装备的应用现状[J]. 铸造设备与工艺,2014(2):21-23.
- [2] 张煜东,吴乐南,王水花. 专家系统发展综述[J]. 计算机工程与应用,2010,46(19):43-47.

- [3] RAO S S, NAHM A, SHI Z, et al. Artificial intelligence and expert systems applications in new product development a survey[J]. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 1999, 10(3):231-244.
- [4] 徐 姣. 基于机器人自动打磨系统的设计与实现[J]. 产业与科技论坛,2017,16(4):89-90.
- [5] 陈 进. 打磨机器人的运动轨迹控制策略研究[D]. 武汉:湖北工业大学电气与工程学院,2015.
- [6] 朱 英. 改进的 BP 神经网络预测模型及其应用[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2012,36(6):1252-1255.
- [7] 张家敏,许德章. 基于蚁群 BP 神经网络算法的六维力传感器解耦研究[J]. 轻工机械,2016,34(1):1-4.
- [8] PRABHU S, UMA M, VINAYAGAM B K. Surface roughness prediction using Taguchi-fuzzy logic-neural network analysis for CNT nanofluids based grinding process[J]. **Neural Computing and Applications**, 2015, 26(1):41-55.
- [9] LI L, WANG D, PAN Cai-xia, et al. Soil surface roughness measuring method based on neural network and decision tree[J]. **Nongye Gongcheng Xuebao/transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2015, 31(14):132-138.
- [10] 刘瑞强. 专家系统的 Java 实现[J]. 黑龙江科技信息, 2012(12):96-96.
- [11] CUN Xian-e. An application study on the rule-based java expert system shell—jess[J]. **Microcomputer Information**, 2010(5):224-225, 194.
- [12] BASHEER A, SAPUAN S M, ZAINUDIN E S, et al. Java based expert system for selection of natural fibre composite materials Basheer[J]. **Journal of Food Agriculture & Environment**, 2013, 11(3):5448-5459.

[编辑:张 豪]

### 本文引用格式:

顾寄南,潘 甜. 基于表面粗糙度的缸体打磨控制专家系统研究[J]. 机电工程,2018,35(3):219-223.

GU Ji-nan, PAN Tian. Expert system for cylinder grinding control based on surface roughness[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2018, 35(3):219-223.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>