

文章编号: 1001-0920(2012)02-0295-04

矿浆管道输送流速仿人智能多模态控制研究

何成¹, 王耀南¹, 邹伟生^{1,2}, 成晓明²

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082; 2. 长沙矿冶研究院 工程技术公司, 长沙 410012)

摘要: 针对矿浆管道输送流速控制的大时滞、建模困难等问题, 提出分段变增量的仿人智能多模态控制新算法. 将完整矿浆批量输送实际过程划分成多段特征模态, 采用不同的控制增量算法以推理确定控制模态. 基于新研制的多泵站管道输送平台, 给出了系统结构框图与算法模块设计, 采用两种矿浆管道批量输送流速运行方式, 实现了满意的实时控制, 验证了控制系统结构与算法的可行性和有效性.

关键词: 矿浆管道输送; 多泵站输送平台; 输送流速; 仿人智能控制

中图分类号: TP29

文献标识码: A

Research on humanoid intelligent multi-modality control of flow velocity in mineral slurry pipeline transportation

HE Cheng¹, WANG Yao-nan¹, ZOU Wei-sheng^{1,2}, CHENG Xiao-ming²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hu'nan University, Changsha 410082, China; 2. Engineering Technology Company, Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy, Changsha 410012, China. Correspondent: HE Cheng, E-mail: hechenghecheng@hotmail.com)

Abstract: For the characteristics of flow velocity control of mineral slurry pipeline, such as large delay, difficulty in modeling and etc., a humanoid intelligent multi-modality control algorithm of segmental variable increment is presented. The whole practical process of mineral slurry delivery can be divided into multi-stage characteristic modes, and different control increment algorithm can be adopted, so that the control mode can be decided. Based on the new developed pipeline delivery platform of multi-pump station, the control block diagram and algorithm module design of delivery flow velocity are given. By adopting the mode of two types of flow velocity operating method, the real-time control performances are satisfied. The results show the feasibility and effectiveness of control structure and algorithm.

Key words: mineral slurry pipeline transportation; multi-pump transportation platform; flow velocity; humanoid intelligent control

1 引言

矿浆管道输送是指用水力输送单一或者多品种大宗颗粒状矿的浆体管道输送. 目前我国已建成与投运了尖山、昆钢大红山等数条铁精矿浆体长距离输送管线^[1-2]. 据文献 [2] 介绍, 中外合作建成的大红山铁精矿运输某管段每年的磨损约为 0.41 mm, 如果输送每批矿浆时都不能有效地控制加速流的产生, 则预计使用 30 年的管道将在 8 年后就面临报废的危险. 为了已建或者待建的矿浆管道安全、经济运行, 实现管道输送流速的稳定控制是迫切要研究解决的问题. 国内外专家针对控泥船泥浆管道输送流速的自动控制研究已取得了大量的成果^[3]. 但目前尚未见到针对长距

离管道矿浆输送流速控制算法的研究文献.

本文针对矿浆输送流速控制对象的特点, 应用推广周其鉴等人提出的仿人智能控制理论^[4], 提出分段变增量的仿人智能多模态协调控制新算法. 基于新建的多泵站管道输送平台, 给出输送流速控制系统结构, 讨论了算法的设计与实现, 给出了采用批量输送方式的输送流速运行结果.

2 矿浆输送系统流速控制分析

2.1 矿浆输送系统与流速控制要求

矿浆输送系统的核心泵站是由泵及其相连的电动机、管道、阀门、调速装置组成的水力机械装置. 存在着由流体与机器运动惯性, 引起变频器调频控制输

收稿日期: 2010-09-11; 修回日期: 2010-12-20.

基金项目: 十一五国家支撑计划项目(2006BAB02A12).

作者简介: 何成(1978—), 男, 博士生, 从事智能控制、模式识别等研究; 王耀南(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、复杂工业综合自动化等研究.

送流速的纯滞后、大惯性。输送浓度、颗粒等都将引起流速调节的非线性^[5]。矿浆输送流速控制系统与泥浆管道输送流速控制系统有许多相似点^[3]，是一个非线性的参数时变多输入强耦合的传递延迟系统，要从机理上建立其数学模型相当困难，而且长距离管道矿浆输送常采取水浆交替的批量输送方式或间断运行方式，其多泵站串联、输送工艺复杂、地势起伏大、流速要求更严格。流速过慢会发生淤积，流速过高会造成不经济的磨阻损失和管壁磨损。目前国内外对管道输送临界流速有多种定义和计算公式^[5-6]，文献^[5]认为矿浆输送流速 v 比临界流速 v_c 大 1 英尺为宜，即

$$v \geq v_c + 0.3048. \quad (1)$$

2.2 仿人智能控制 (HSIC) 决策的映射关系与推广

管道输送流速控制对象约束条件复杂、大时滞、非线性、强干扰，采用传统 PID 算法难以稳定控制。鉴于此，针对矿浆输送流速控制研究需要建造了多泵站管道输送平台，并且进行了大量的矿浆输送流速控制实验，采用了仿人智能控制 (HSIC) 与决策的二次映射结构模型^[4]。模型可视为如

$$IC = \langle \Phi, \psi, \Omega \rangle, \psi = \langle R, U, F \rangle \quad (2)$$

所示的具有定性与定量结合的二次映射关系的信息处理与决策过程；由 2 个 3 重序元关系予以描述；设智能控制过程为 IC。式 (2) 中： Φ 为特征模型集， Ω 为推理规则集， φ 为控制模态集合， R 为误差信号 E 和特征记忆量集合 A 的合记， U 为控制输出， F 为某种定量或定性映射关系集合。下面介绍推广应用其结构内涵，基于平台开发的智能控制系统结构与算法。

3 输送流速控制系统组成与控制过程结构

3.1 多泵站管道输送平台的管网与设备组成

该输送平台采用多处大 U 型起伏输送管线，管道直径 $\varnothing = 50 \text{ mm}$ ，总长 400 m。其管网与动力、仪表的分布示意图如图 1 所示。平台可视为短距离的复杂地形的矿浆管道输送系统，开发了以 S7-315PLC+工控机为核心的输送监控系统。

3.2 输送流速运行方案

模拟工业批量输送采用两种不同启动连接的运行方式：1) 1 号泵站和 2 号泵站间接串联启动输送 (图 1 中阀 5 和阀 3 打开，阀 4 关闭)，简称运行方式 1。2) 1 号泵站和 2 号泵站直接串联启动输送 (图 1 中阀 4 打开，阀 5 和阀 3 关闭)，简称运行方式 2。

3.3 管道输送流速控制系统结构

基于平台的输送流速控制系统结构如图 2 所示。该控制系统对两台泵的控制采用了解耦方案，构成了独立的两组控制器。其输出 u_1 和 u_2 分别控制 1 号和 2

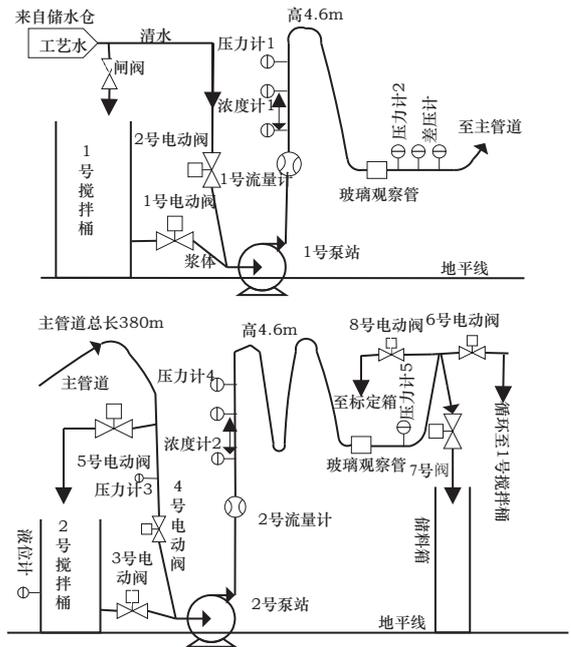


图 1 输出平台管网与动力、仪表的分布示意图

号泵机组变频器 (M440) 的频率，改变电机速度从而控制输送流速。从两个电磁流量计得到体积流量 Q_1 和 Q_2 ，经过信号处理和特征量提取模块的融合处理与修正成为 1 号和 2 号泵的流速反馈 1 和反馈 2。

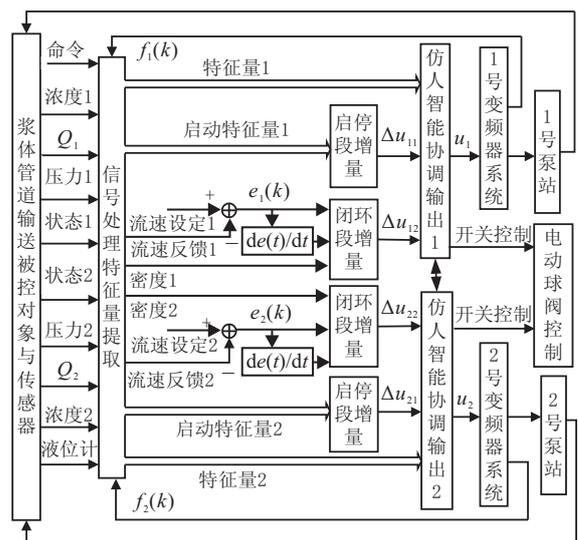


图 2 管道输送流速控制系统结构框图

该控制系统结构实现了两种运行方式两台泵的输送流速控制，采用分层递阶结构实现，它分为 4 个仿人智能控制过程，具体描述如下：

$$IC_i = \langle \Phi_i, \psi_i, \Omega_i \rangle, i = 1, 2, 3, 4. \quad (3)$$

式中 (IC_1, IC_2) 和 (IC_3, IC_4) 分别对应运行方式 1 或者方式 2 的 1 号、2 号泵智能控制过程。

采用仿人智能高阶产生式系统来实现控制目标。信号处理和特征量提取模块的输出如图 2 所需各种特征量，同时也是控制管理的最高层，根据命令与规

则推理确定 IC_i 的选择. 控制器由3个模块构成, 其中仿人智能协调模块为每一个 IC_i 组织协调层, 启停段与闭环段增量模块根据选择 IC_i 按各种算式计算增量, 为运算低层.

4 仿人智能多模态控制器设计

本文以 $IC_2 = \langle \Phi_2, \psi_2, \Omega_2 \rangle$ 的运行方式2号泵仿人智能控制过程为例介绍控制器的设计与实现.

4.1 特征模型集

特征基元描述的是系统不同阈值的特征区间与不同阶段的特征.

1) 2号泵特征模型对应特征基元集

$$Q_2 = \{q_1, q_2, \dots, q_{12}\}. \quad (4)$$

式中:

$q_1 : 0 < f_2 < f_{启动}, f_2$ 为2号泵实际运行频率, $f_{启动}$ 为2号泵启动完成的预设频率;

$q_2 : f_2 \geq f_{启动}$, 只要条件满足一次后即设闭环标志;

$q_3 : \rho_s \leq 1150/(\text{kg}/\text{m}^3)$, 输送清水, ρ_s 为密度;

$q_4 : \rho_s \geq 1900/(\text{kg}/\text{m}^3)$, 输送浆体;

$q_5 : 1200 \leq \rho_s \leq 1900/(\text{kg}/\text{m}^3)$, 水浆切换段;

$q_6 : e(k)\Delta e(k) < 0$, 向着偏差减小的方向变化;

$q_7 : e(k)\Delta e(k) > 0$, 误差趋向增加;

q_8 为打开进浆阀时段;

q_9 为关闭进浆阀时段;

q_{10} 为发停止1号泵时刻;

q_{11} 为发停止2号泵时刻;

q_{11} 为2号泵出口压力值正常.

2) 2号泵对应特征模型集为

$$\Phi_2 = \{\phi_{21}, \phi_{22}, \phi_{23}, \phi_{24}, \phi_{25}, \phi_{26}, \phi_{27}, \phi_{28}\}. \quad (5)$$

式中: ϕ_{2j} 说明了一种特征模型状态, 由各种特征基元 q_j 组合描述, 即

$$\phi_{21} \Rightarrow q_1 \bigcap q_{12},$$

$$\phi_{22} \Rightarrow q_2 \bigcap q_3 \bigcap q_{12},$$

$$\phi_{23} \Rightarrow q_2 \bigcap q_4 \bigcap q_7 \bigcap q_{12},$$

$$\phi_{24} \Rightarrow q_2 \bigcap q_4 \bigcap q_6 \bigcap q_{12},$$

$$\phi_{25} \Rightarrow q_2 \bigcap q_5 \bigcap q_8 \bigcap q_{12},$$

$$\phi_{26} \Rightarrow q_2 \bigcap q_5 \bigcap q_9 \bigcap q_{12},$$

$$\phi_{27} \Rightarrow q_{10}, \phi_{28} \Rightarrow q_{11}.$$

以上按启停段、流速闭环段(分为水浆切换段、清水与浆体运行段, ϕ_{23} 表示误差趋向增加, ϕ_{24} 表示向着偏差减小的方向变化)来划分8种特征模型状态(本文不讨论出口压力太大时特征模型状态与处理).

4.2 启停段增量计算

针对系统的输送流速是一个带死区大惯性的环节, 启动时没有采用流速闭环控制或者线性增加频率方式控制, 启动时增量计算

$$\Delta u_2(k)_{启动} = \Delta u_{2预设启动} - K_P P_2(K). \quad (6)$$

式中: $\Delta u_{2预设启动}$ 根据专家经验设定计算出初始增量; $P_2(K)$ 为泵实时出口压力, K_P 为前馈修正系数(在线根据规则可调整), $\Delta u_2(k)_{启动}$ 随压力升高而减少. 或者在线根据规则推理还可令 $\Delta u_2(k)_{启动} = 0$, 使泵非线性或者阶梯式增加转速, 达到启动段结束后流速不超调. 停泵时类似计算出 $\Delta u_2(k)_{停止}$.

4.3 闭环段增量计算

1) 非线性变参数的限增量带死区PID, 其增量 $\Delta u(k)_{pid}$ 的算式可表达如下:

$$\Delta u(k)_{pid} =$$

$$K_p \Delta e(k) + K_i e(k) + K_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)]. \quad (7)$$

式中: K_i 随误差绝对值增大而减小, K_p 随绝对值误差增大而增大. 文献[7]离线生成修改参数表, 在线根据规则判断推理得到, 从而形成根据偏差来自适应改变比例与积分系数.

2) 根据密度变化量的前馈补偿增量, 即

$$\Delta u_2(k)_{密度补偿} =$$

$$\text{sgn}(\rho_s(k-1) - \rho_s(k)) k_c |(\rho_s(k) - \rho_s(k-1))|. \quad (8)$$

式中: $\rho_s(k)$ 和 $\rho_s(k-1)$ 分别为当前的或者前一时刻的流体密度; k_c 为补偿系数, 该增量引入的目的是抵消浆体密度变化时由于电机负荷变化而引起的流速变化.

4.4 仿人智能协调输出

仿人智能协调输出模块为组织协调层, 完成算法集成与选择.

1) 2号泵对应的控制模态集

$$\psi_2 = \{\psi_{21}, \psi_{22}, \psi_{23}, \psi_{24}, \psi_{25}, \psi_{26}, \psi_{27}, \psi_{28}\}. \quad (9)$$

式中 ψ_{2j} 下标2代表对应2号泵, 表达如下:

$$\psi_{21} : u_2(k) = u_2(k-1) + \Delta u_2(k)_{启动};$$

$$\psi_{22} : u_2(k) = u_2(k-1) + \frac{\Delta u_2(k)_{pid} + \Delta u_2(k-1)_{pid}}{2};$$

$$\psi_{23} : u_2(k) = u_2(k-1) + \Delta u_2(k)_{pid};$$

$$\psi_{24} : u_2(k) = u_2(k-1) + \Delta u_2(k)_{pd};$$

$$\psi_{25} : u_2(k) = u_2(k-1) + \Delta u_2(k)_{pid} + \Delta u_2(k)_{密度补偿};$$

$$\psi_{26} : u_2(k) = u_2(k-1) + \Delta u_2(k)_{pid} + \Delta u_2(k)_{预补偿};$$

$$\psi_{27} : u_2(k) = u_2(k-1) + \Delta u_2(k)_{停止};$$

$$\psi_{28} : u_2(k) = u_2(k-1).$$

其中: $u_2(k)$ 为控制器当前输出量; $u_2(k-1)$ 为前一时

刻输出量. $\Delta u_2(k)$ 预补偿 为对1号泵停止之前采用根据专家经验的频率预补偿控制量. 其他增量的计算见式(6)~(8), Δu_{pd} 即为取消积分项的PID变参数的限增量. 由于增量算式不同, 综合构成了8种控制模式, 具有非线性、变结构、自学习的特点, 减少了推理规则集的数量.

2) 启发和直觉推理规则集 Ω_2 . Ω_2 实质是一个控制模式选择器, 采用正向的推理方法, 用产生式规则形式 “If ... Then ...” 予以描述, 具体构成如下:

$$\Omega_2 = \{w_{21}, w_{22}, w_{23}, w_{24}, w_{25}, w_{26}, w_{27}, w_{28}\}. \quad (10)$$

式中

$$w_{21} : \phi_{21} \Rightarrow \psi_{21}, w_{22} : \phi_{22} \Rightarrow \psi_{22},$$

$$w_{23} : \phi_{23} \Rightarrow \psi_{23}, w_{24} : \phi_{24} \Rightarrow \psi_{24},$$

$$w_{25} : \phi_{25} \cup \phi_{26} \Rightarrow \psi_{25}, w_{26} : \phi_{27} \Rightarrow \psi_{26},$$

$$w_{27} : \phi_{28} \Rightarrow \psi_{27},$$

$$w_{28} : \text{If 不满足所有特征模型 and 出口压力正常,}$$

$$\text{Then } \Rightarrow \psi_{28}.$$

w_{24} 表示: If ϕ_{24} (即当输送浆体闭环控制时处于动态过程向着偏差减小的方向变化时), Then $\psi_{24} : u_2(k) = u_2(k-1) + \Delta u_2(k)_{pd}$ (采用取消积分的增量 Δu_{pd}). 由于常规PID控制中的积分作用缺乏智能性, 采用这种策略对限制流速超调非常有效.

5 实验结果

基于多泵站管道输送平台, 开展了大量的两种运行方式的批量输送实验(铁精矿沙). 图3和图4是采取本文提出的控制结构与算法的实时曲线. 图中有6条曲线: 曲线1和曲线2对应1号、2号泵电机实际频

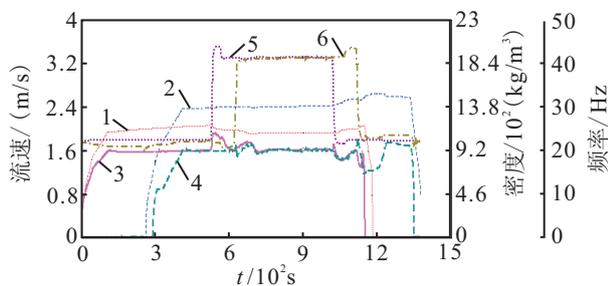


图3 运行方式1矿浆输送实时曲线图

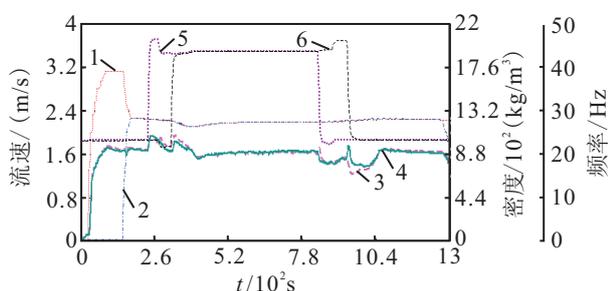


图4 运行方式2矿浆输送实时曲线图

率; 曲线3和曲线4对应1号、2号泵输送流速; 曲线5和曲线6对应1号、2号泵密度. 由图3和图4可看出, 在短短的十几分钟完成各种阀门、泵切换的批量输送过程: 开始1号泵、2号泵清水启动; 然后水浆切换进行浆体输送(图中中间平稳段); 继续浆水切换. 图3曲线对应的试验还完成了1号泵、2号泵先后停车, 显示出能够克服1号泵停车扰动影响, 输送流速能够回调到给定的流速. 整个过程中两条输送流速曲线稳定在给定值1.6/(m/s)的工艺允许波动范围内, 也不会因为多处大U型起伏输送管线产生输送加速流; 同时对工况与水浆切换表现出较强的适应性和鲁棒性.

6 结论

本文提出了基于分段变增量的多模态仿人智能输送流速控制算法. 该算法采用开闭环相结合的多种控制策略计算增量, 综合成多模态控制模式. 基于新研制的多泵站管道输送平台, 建立了仿人智能矿浆输送流速控制系统结构. 在此基础上, 给出了从特征辨识到多模态控制全量输出的推理过程. 实验结果验证了所开发的仿人智能输送流速控制结构与算法的有效性, 能够克服矿浆管道输送流速控制中大时滞、强干扰等难点, 实现了批量输送流速全过程的在线稳定控制. 其无需精确数学模型, 易于编程实现, 在长距离矿浆管道输送实际工程中具有良好的应用前景.

参考文献(References)

- [1] 邹伟生, 袁海燕, 罗绍卓. 长距离管道输送发展现状及在矿山的应用前景[J]. 金属材料与冶金工程, 2009, 37(1): 57-60.
(Zou W S, Yuan H Y, Luo S Z. The status of long distance pipeline transportation on technology and its application prospect in mine[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2009, 37(1): 57-60.)
- [2] 普光跃, 安建, 王健, 等. 长距离、高扬程固体物料输送管道压力分段控制系统的设计[J]. 工矿自动化, 2010, 362: 65-67.
(Pu G Y, An J, Wang J, et al. Design of pressure segment control system of solid materials transportation pipeline of long-distance and high-lift[J]. Industry and Mine Automation, 2010, 362: 65-67.)
- [3] 闭治跃, 王庆丰, 唐建中. 挖泥船泥浆管道输送流速的自适应预估控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(3): 309-312.
(Bi Z Y, Wang Q F, Tang J Z. Self-adaptive predictive control of slurry transportation-rate in the dredging pipeline[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(3): 309-312.)