钢板仓气化管压力前馈－反馈复合控制

针对大型钢板仓气化管压力的控制要求，采用前馈－反馈复合控制方案，通过前馈控制回路抑制罗茨风机送风流量波动的干扰，并通过反馈控制回路克服其他扰动对被控压力的影响，前馈－反馈的复合控制作用有效保证了钢板仓气化管压力的稳定，为使仓内物料正常均化提供了前提条件，从而保证顺畅出料，提高出仓率。

王　蕊／唐山学院机电工程系

王　蕊／教授

关键词／Keywords
钢板仓·
压力·
前馈－反馈复合控制·
动态前馈·

0　引言

由于大型钢板仓的储量特别巨大，所以库底部的粉料物在上部粉料物的巨大压力下，堆积密度相对加大，当大到一定的极限时，粉料就会结块成型，导致出料难，出仓率难以保证。为了解决这一问题，采用机械与气动相结合的复合技术，然后再通过均化区的均化后出料。均化罗茨风机的风通过管道进入仓体内，进入到仓体内的气化管（流化棒）通过气化管孔出来的气体使仓内的物料均化，然后输送到均化室，均化室下面就是出料口[1]。为使出料流畅，出仓率高，保证物料即使长期储存仍能正常出料，要求气化管内压力稳定在某一数值上。由于系统存在罗茨风机送风流量波动的干扰，采用单纯的反馈控制很难达到控制要求，因此，提出一种前馈－反馈复合控制策略，有效解决了气化管压力波动大的问题[2]。

1　控制系统的构成

1.1　控制系统结构

根据被控变量和操纵变量的选择原则，确定气化管压力为被控变量，气化管空气流量为操纵变量；经分析，罗茨风机送风流量的波动是影响气化管压力的主要干扰因素，因此前馈信号确定为罗茨风机送风流量。基于此，可构建钢板仓均化出料气化管压力控制系统结构。气化管前馈－反馈控制系统流程如图1所示，其相应的方框图如图2所示。

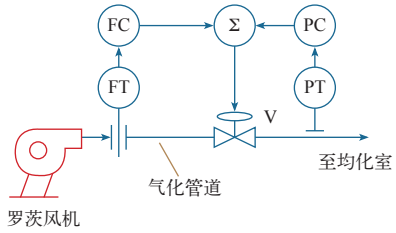

图1　气化管前馈－反馈控制系统流程

PT—压力检测变送器　PC—压力控制器
FT—流量检测变送器　FC—流量控制器　V—调节阀

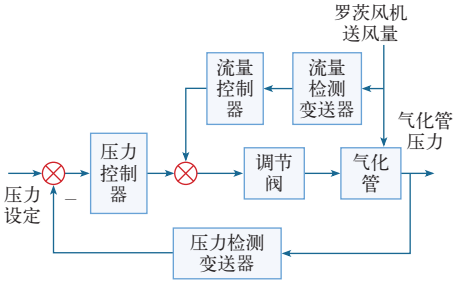

图2　气化管前馈－反馈控制系统方框图

控制系统控制设备包括压力控制器（反馈控制器）、流量控制器（前馈控制器）、压力检测变送器、流量检测变送器以及调节阀。

1.2　控制系统结构分析

复合控制系统由一个反馈控制回路和一个前馈控制回路组成。由复合控制系统的特征方程式可知，前馈控制器不

唐山市科技计划项目（15110209a）。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

影响系统的稳定性，稳定性完全由反馈控制回路来确定，因此，可以先暂不考虑前馈控制器的作用，单独设计反馈控制系统，使系统满足一定的稳定要求和过渡过程品质要求，然后再根据不变性原理设计前馈控制器，即可单独分别构建反馈和前馈两个控制回路[3]。

2 反馈控制回路的实施

2.1 反馈回路控制仪表选型

调节阀选用亿米托克自控阀门D971X－16P，它是一种电动对夹式蝶阀阀门，具有体积小、轻便、性能可靠、配套简单和流通能力大等特点，广泛应用于食品、环保、轻工、石油、造纸和化工等行业的工业自动控制系统中。

压力检测变送器选用JCJ800F智能型压力变送器，它可将压力变化转化为线性的电流或电压信号；采用HART通信，具有通信和自诊断功能，用户利用手持终端或现场总线系统远距离传输、读取、显示和输入变送器的全部工作信息和附加信息。

反馈控制器选用XMT626系列智能调节仪，该调节仪采用智能控制理论和传统PID控制相结合的方式，具备高准确度的自整定功能，使控制过程具有响应快、超调小和稳态准确度高等优点，对常规PID难以控制的大滞后对象有明显的控制效果；输出接口采用模块化设计，功能配置方便灵活，新增多种故障控制策略，使过程控制更加安全；具有报警继电器上电抑制功能，可消除仪表在上电时继电器的扰动；具有自动与手动之间无扰动切换功能；具有PID上电缓起动功能；显示方式采用双排满四位LED数码管显示。

2.2 反馈控制器控制规律和正反作用的确定

广义过程控制通道时间常数较小，负荷变化不大，但控制要求压力稳定在某一值上，为消除系统余差，应引入积分控制规律，而无须引入微分控制规律。因此，反馈控制器控制规律选择PI控制规律。

确定控制器作用方向的依据是使控制系统构成具有被控变量负反馈的闭环系统，即四个环节放大倍数的乘积应为负值。被控对象作用方向为正；调节阀为电动调节阀，作用方向为正；而检测变送器作用方向总是正。因此，为保证回路构成负反馈，反馈控制器的作用方向应为负，即反馈控制器选择负作用方式。

3 前馈控制回路的实施

3.1 前馈控制回路流量检测仪表选型

流量检测变送器选用KVZ智能孔板流量计，由测量流量的差压发生装置配合各种差压计或差压变送器组成。安装无须引压管，可直接接差压变送器和压力变送器。采用进口单晶硅智能差压传感器，具有高准确度和完善的自诊断功能，其量程可自编程调整[4]。

3.2 前馈控制器的设计

3.2.1 前馈控制器的模型

前馈控制器的传递函数$G_B(s)$决定于对象干扰通道和控制通道的特性，即干扰通道传递函数$G_F(s)$和控制通道传递函数$G_O(s)$，考虑到$G_F(s)$和$G_O(s)$的准确值很难得到，即使能够得到也很难实现，为了设计、运行和维护的便利，前馈控制器常规实施模式有三种：①静态前馈控制器；②一阶超前－滞后动态前馈控制器；③具有纯滞后的超前－滞后动态前馈控制器。静态前馈控制器实施方便，但不能克服动态偏差，适用于过程干扰通道和控制通道时间常数相差不大的场合，为达到动态补偿效果，又考虑实际中的可行性，这里采用目前广泛应用的一阶超前－滞后动态前馈补偿模式，便于与常规仪表配套。

控制通道的特性为

$$G_O(s)=\frac{K_1}{T_1s+1}e^{-\tau_1 s} \tag{1}$$

干扰通道的特性为

$$G_F(s)=\frac{K_2}{T_2s+1}e^{-\tau_2 s} \tag{2}$$

则前馈控制器的形式为

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$G_B(s)=-\frac{G_F(s)}{G_O(s)}=-\frac{\frac{K_2}{T_2s+1}e^{-\tau_2 s}}{\frac{K_1}{T_1s+1}e^{-\tau_1 s}}=-K_B\frac{T_1s+1}{T_2s+1}e^{-\tau_B s} \quad (3)$$

控制通道和干扰通道的纯滞后相差不大，即

$$\tau_B \approx 0 \quad (4)$$

可得到一阶超前－滞后动态前馈控制器的模型为

$$G_B(s)=-K_B\frac{T_1s+1}{T_2s+1} \quad (5)$$

式中，K_B为静态前馈放大系数；T_1为超前环节（微分环节）时间常数；T_2为惯性环节（积分环节）时间常数。

3.2.2　前馈控制器模型的实现

超前－滞后动态前馈控制器在定型的DDZ－Ⅲ仪表、组装仪表及微型控制机中都有相应的硬件模块，在DCS中也有相应的控制算法。本项目中采用比值器、加法器和一阶惯性环节来实施，成本低，构成简单易行。超前－滞后动态前馈控制器实施方案方框图如图3所示。图3中，$K=T_1/T_2-1$。

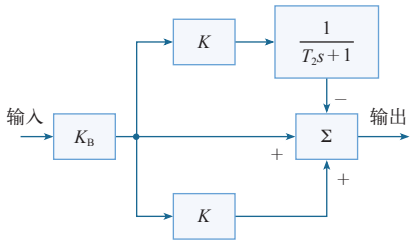

图3　超前－滞后动态前馈控制器实施方框图

3.2.3　前馈控制器参数的确定

对前馈控制模型参数进行在线整定，前馈控制器模型具有三个参数，即静态前馈放大系数K_B、超前环节时间常数T_1和惯性环节时间常数T_2。

（1）K_B的确定

采用反馈运行状态整定K_B，即使系统处于反馈运行状态，待系统运行稳定后，得到罗茨风机流量检测变送器的输出I_{do}和反馈控制器的输出稳定值I_{co}；对系统施加一干扰Δd，被控量气化管压力重新回到设定值后，得到罗茨风机流量检测变送器的输出I_d和反馈控制器的输出I_c。

$$K_B=\frac{I_c-I_{co}}{I_d-I_{do}}=\frac{\Delta I_c}{\Delta I_d} \quad (6)$$

（2）T_1、T_2的确定

当T_1、T_2分别接近或等于对象控制通道和干扰通道的时间参数时，过程的控制质量最佳，补偿合适。先根据经验或定性分析，再通过在线运行曲线来判断并确定T_1、T_2值，即“看曲线，调参数”。开始使系统处于欠补偿状态，逐步强化前馈作用，即增大T_1或减小T_2，直到出现过补偿的趋势，再略减弱前馈作用，便可获得合适的控制过程[5]。

4　控制效果

针对所构建的前馈－反馈控制系统，采用实验仿真运行，对罗茨风机送风流量施加5%的干扰，得到运行曲线如图4所示，超调量为7.5%，较单回路控制降低了5%，过渡时间大大缩短，控制质量明显提高。

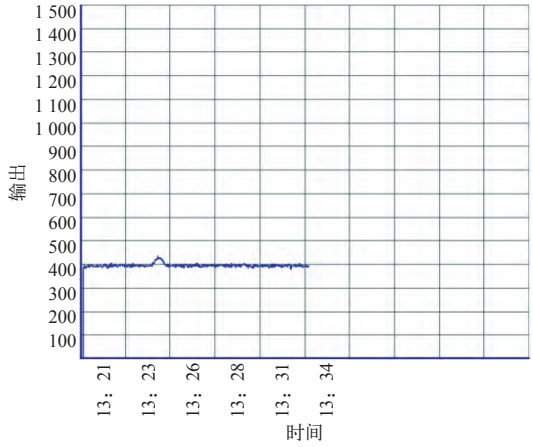

图4 气化管压力前馈－反馈运行效果图

5　结束语

钢板仓气化管压力采用前馈－反馈复合控制策略，当罗茨风机送风流量发生变化时，前馈控制器及时发出控制指令，补偿罗茨风机流量变化对气化管压力的影响，前馈控制器采用超前－滞后动态模型，大大减小了动态偏差，起到了及时抑制大干扰的作用；同时，对于未引入前馈的其他干扰，由反馈控制器来克服。前馈作用加反馈

(下转第29页)

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

报，2014，29 (5)：160-166.
[2] KiamHeongAng，Gregory Chong，et al．PID control system analysis，design，and technology [J]．IEEE Transactions on Control Systems Technology，2005，13 (4)：559-564.
[3] Liu Yong，Zhu Ziqiang，David Howe．Direct torque control of brushless DC drives with reduced torque ripple [J]．IEEE Transactions Ind.-Applicat.，2005，41 (2)：599-608.
[4] Omatu S，Iwasa T，Yoshioka M．Skill-based PID control by using neural networks [C]．IEEE International Conference，1998.
[5] 李书舟，容慧．单神经元自适应PID算法在无刷直流电机控制系统上的应用研究 [J]．自动化与仪器仪表，2014，147 (4)：44-46.
[6] 李红亮，王加祥，曹闹昌，等．无刷直流电机调速智能优化控制 [J]．计算机仿真，2015，32 (10)：426-429.
[7] 王晓远，傅涛．基于模糊RBF神经网络的无刷直流电机控制 [J]．微电机，2015，48 (11)：33-36.
[8] 程声烽，程小华．神经网络在无刷直流电机控制系统中的应用 [J]．电机与控制应用，2014，41 (4)：12-15.
[9] 王霞，朱景伟．基于模糊PI控制的无刷直流电机调速系统 [J]．电气传动，2014，44 (1)：63-67.
[10] 付子义，邢阳．无刷直流电机的变论域模糊自适应控制 [J]．计算机仿真，2015，32 (5)：336-339.
[11] 郭伟，郁雯雯，夏友亮，等．无刷直流电机转速控制策略仿真研究 [J]．计算机仿真，2015，32 (9)：372-375.
[12] 刘慧博，王静，吴彦合．无刷直流电机模糊自适应PID控制研究与仿真 [J]．控制工程，2014，21 (4)：583-587.
[13] 张奎，雷勇．无刷直流电机智能PID控制系统建模与仿真 [J]．测控技术，2015，34 (4)：81-84.
[14] 姜卫东，胡杨，黄辉，等．采用坐标变换的无刷直流电机换相过程分析及减小换相转矩脉动的方法 [J]．中国电机工程学报，2015，35 (24)：6527-6533.
[15] 胡包钢，应浩．模糊PID控制技术研究发展回顾及其面临的若干重要问题 [J]．自动化学报，2001，27 (4)：567-581.
[16] 揭贵生，马伟明．考虑换相时无刷直流电机脉宽调制方法研究 [J]．电工技术学报，2005，20 (9)：66-71.

（收稿日期：2016－09－13）EA

(上接第23页)

作用优势互补，使气化管压力稳定在工艺要求的范围内，性能指标得到改善，提高了控制质量，获得了比较理想的控制效果，具有重要的实用价值。

参考文献

[1] 鲁选民，张煜行，王永芳，等．酒厂稻壳储存用钢板仓出料形式及仓底结构设计 [J]．粮食与饲料工业，2015 (10)：5-6.
[2] 刘柱金．我国大型煤粉灰钢板仓储存工艺与输送技术的应用 [J]．粉煤灰，2013 (2)：4-5.
[3] 王蕊．造纸生产中压缩机防喘振软保护控制系统 [J]．中国造纸，2015，34 (10)：61-63.
[4] 史冬琳，门洪，李峰，等．基于PCS 7的过程控制实验设计 [J]．自动化与仪表，2015 (7)：45-48.
[5] 王蕊．间歇式化学反应器分程控制系统的实现 [J]．现代化工，2014，34 (7)：157-158，160.

（收稿日期：2016－06－14）EA

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net