[PCR实验室]

基于博图PID控制的PCR实验室通风系统设计

文/孟静静[1] 纪树广[2] 王立新[1] 冯 毅[1]
1. 长春汽车工业高等专科学校电气工程学院；2. 一汽解放汽车有限公司技术发展部

对于检测病毒感染疾病的PCR实验室来说，通风系统在实验室设计环节至关重要。为了避免交叉感染要求PCR实验室采用负压差设计，保证各个试验区域的压力梯度。通过可编程序控制器S71200基于博图软件PID控制对通风量进行智能调节，实现控制简单、灵活多变且适用不同场景的通风系统，经过实际验证控制效果良好。

PCR实验室又称基因扩增实验室，是用来检测病毒感染性疾病的专用特殊实验室。PCR 技术目前广泛用于各个领域，在病毒领域，核酸检测是目前可靠的筛查和确认手段，使用很普遍，但核酸检测过程很容易受污染，整个操作需要在严格的实验环境中，才能保证数据结果的准确性。PCR实验室的通风系统对负压提出严格要求。目前应用的技术大多是采用文丘里阀的变风量通风控制。通过文丘里阀的控制可形成稳定的压差风量，控制实验室压差稳定。然而文丘里阀价格昂贵，控制过程中需要根据现场情况做出精确的调节，对技术人员要求较为苛刻，调试过程时间长而且复杂。该通风系统针对负压方面的要求进行了全新的设计，通过西门子PLC中的PID功能实现对PCR实验室通风量、室内压差、风速等参数的控制，保证实验室的运行标准及实验人员的安全。通过PLC内部的PID计算，做到适时进行参数运算及调节，及时调整室内压差及通风量的范围以达到实验室规定的要求。只要将参数整定好，系统稳定运行后，就可实现灵活控制室内压差，并在室内压差或通风量发生变化时快速做出反应，最大限度地保证实验室环境不受影响。

系统参数设计

通风系统利用博图软件中的“PID_3Step”工艺对象实现通风量的控制，完成对实验室内通风量的智能调节。当室内负荷或参数要求发生改变时，系统可自动调节通风量，保证室内压差满足要求。系统还可以根据不同房间的使用要求，独立控制同一通风系统中的各房间压差及通风量，实现各局部区域的独立控制。系统能智能调节参数，灵活匹配不同环境需求，优化控制系统，达到预期效果。因PCR实验室设有缓冲间、有压力梯度要求以及要防止气溶胶扩散到室外等，故按照加强型医学BSL-2实验室设计规范，即室内洁净度等级为8级（十万级）， 室内最小换气次数≥10次/h。

1. 风量计算

通常采用缝隙法计算房间维持一定压差时所需要的排风量或送风量。缝隙法计算公式为

$$\Delta P=\frac{\rho}{2}\left(\frac{V}{3\,600\,A\mu}\right) \tag{1}$$

式中，ΔP为压差，Pa ；ρ为标准大气压下的空气密度，取1.2 kg/m³；V为风量，m³/h ；A为根据缝隙宽度计算的泄漏面积，m² ；μ为常数，可取0.72。

由风量守恒可知

$$V_{送风} - \Delta V = V_{排风} \quad (2)$$

式中，ΔV为压差渗透风量：当房间维持正压时，该值为正值；当房间维持负压时，该值为负值。

根据具体情况计算每个房间的通风量、整个系统的总体通风量及每个时间段的通风次数，作为PLC的参数。

室内送、排风系统为上送下回，排风口底部距室内地面高度为100 mm。送风口不能设置在有气溶胶产生地点的上方附近以及生物安全柜操作面。根据实验室具体要求的最小换气次数确定各个房间的送风量，区域压差通过各房间的送、排风的差值实现，为维持房间的风量平衡，风量差值通过维护结构的缝隙补足，这部分风量为渗透风量。系统通过编程实现各个房间的通风量及换气次数的要求，并通过PID调节开门次数增减等情况对整体要求及压差的影响。同时系统通过变频器实现对风机的控制，可根据实际情况决定风机运行的速度，在保证通风量及室内压差满足要求的基础上，极大地降低能耗，提高整个系统的效率，达到节能环保的效果。

2. 压差控制

区域之间的压差通过对室内的送风量、排风量的比例调节来控制。通过控制风量使负压区各区域之间形成一定的压力梯度，确保气流由清洁区流向污染区，实现空气隔离效果，确保工作人员安全。清洁区为正压差，污染区为负压差，压力梯度依次为清洁区、半污染区和污染区。系统可根据实验室具体的负压要求进行设计，压差传感器可实时检测室内压差情况，及时掌握室内压差状态。如果压差发生变化，通过系统的PID控制可以实时调节房间压差，使其保持在允许范围之内。如压差超出许可范围，则会在系统触摸屏中及时报警提醒工作人员，以保障实验室环境的安全性。同时可以根据不同环境对压差的不同要求，根据不同情况在不同房间设置不同的压差参数，实现不同压差参数控制。

3. PID在系统中的应用

PID调节器是一种线性调节器，它将给定值$r(t)$与实际输出值$c(t)$的偏差的比例(P)、积分(I)、微分(D)通过线性组合构成控制量，对控制对象进行控制。比例环节成比例地反映控制系统的偏差信号$e(t)$，偏差一旦产生，调节器立即产生控制作用以减小偏差。积分环节主要用于消除静差，提高系统的无差度。积分作用的强弱取决于积分时间常数T_I，T_I越大，积分作用越弱，反之则越强。微分环节反映偏差信号的变化趋势（变化速率），并能在偏差信号的值变得太大之前，在系统中引入一个有效的早期修正信号，从而加快系统的动作速度，减小调节时间。

PID调节器的微分方程为

$$u(t) = K_p\left[e(t) + \frac{1}{T_I}\int_0^t e(t)\mathrm{d}t + T_D\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}\right] \quad (3)$$

式中，$e(t) = r(t) - c(t)$。

PID调节器的传输函数为

$$D(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p\left[1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right] \quad (4)$$

通风量PID控制系统原理图如图1所示。

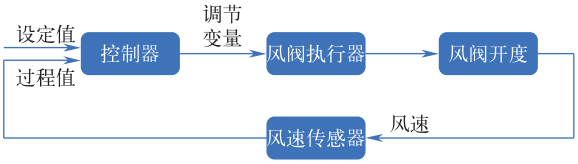

图1　通风量PID控制系统原理图

传感器测量风速、压差并将检测值传送给控制器。控制器将当前值与设定值进行比较，修正被控量（风速、压差）与输入量（传感器测量值）之间的偏差，计算风阀开度控制的输出值（调节变量）。如果 PID 控制器的设置正确，则会尽快达到设定值，然后使其保持为常数值。输出值更改后，过程值仅随时间延迟而变化。控制器必须针对此响应进行补偿。

系统设计

1. 硬件设计

系统硬件设计主要包括PLC选型与电路设计、电动机选型、驱动器接线方式选择及其他设备的接线设计。主要元件的硬件选型目录见表1。

表1　硬件选型目录

序号	名称	型号	数量	备注
1	PLC CPU	S7-1214C	1	
2	信号模块	西门子SM1221	1	
3	信号模块	西门子SM1222	1	
4	信号模块	西门子SM1232	1	
5	触摸屏	TP700	1	
6	变频器	西门子MM420	1	

上位机采用西门子触摸屏实时监控各参数及运行情况，通过人机接口（HMI）在线实时监控当前室内压差、风速、风阀开度、变频器的频率和通风量等参数值，根据实验室的实际情况更改当前参数值（如压差、通风量、变频器频率等），保证PCR实验室内部参数满足要求。通过计算机实现对PLC的程序编写和在线调试，设定参数完成后，在博图软件中在线进行PID参数整定，得到适应系统的最优PID参数。

下位机采用西门子S7-1200 PLC为核心控制器，对上位机发送的控制参数值进行计算处理，利用压差、通风量、换气次数在PLC内部通过PID智能控制进风、排风的风阀开度位置，用频率控制风机的转速来调节风机的输出风量。

控制系统的IO地址接线图如图2所示。

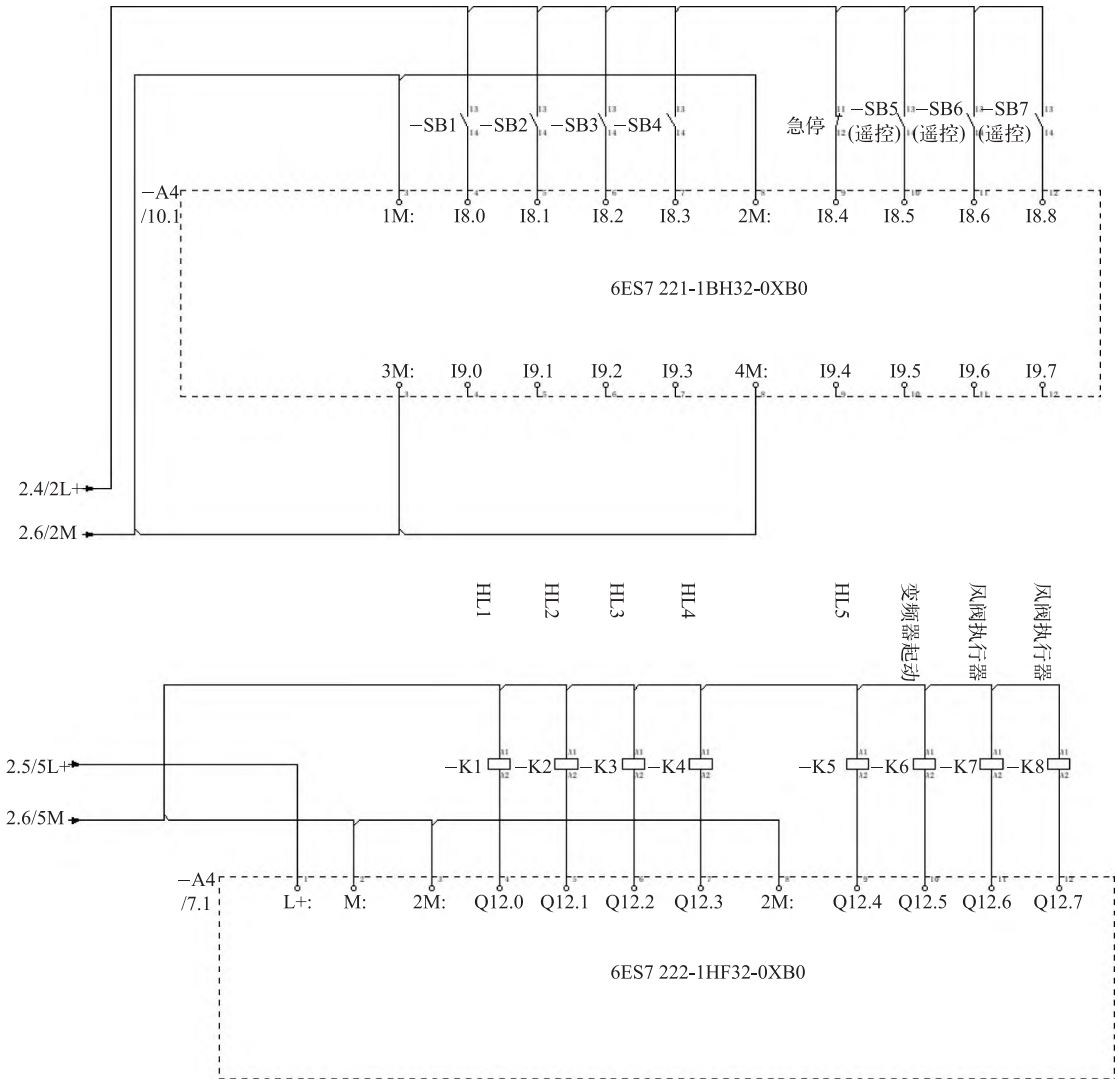

图2　IO地址接线图

2. 软件设计

（1）系统流程图设计

上位机端软件是在Windows操作系统下，使用TIA Protal软件进行程序编写。在软件中完成项目创建、系统通信设置，在程序中完成控制面板、远程无线面板控制以及触摸屏控制。PLC控制过程流程图如图3所示。

系统中稳定运行的PID参数需要在现场根据具体情况进行数据整定，PLC内部根据实际情况进行自整定，整定过程在工艺对象中完成，通过现场连接PLC读取当前参数并进行数据运算，具体流程图如图4所示。

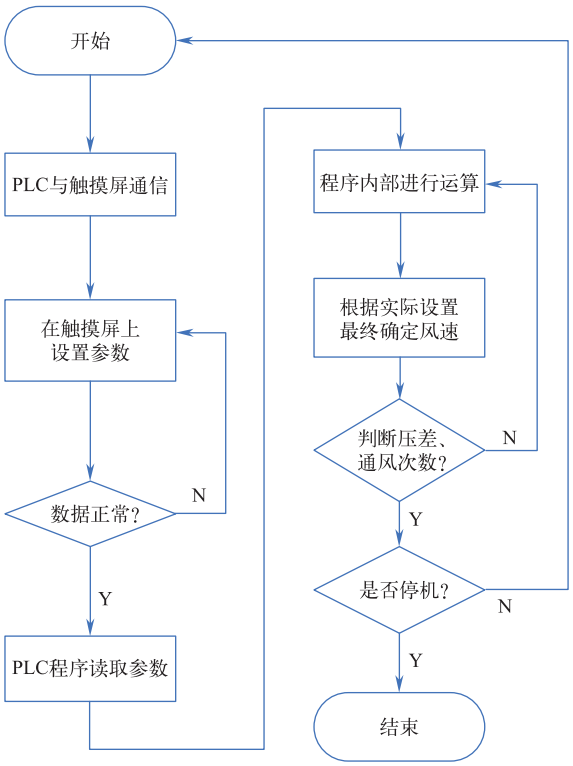

图3　PLC控制过程流程图

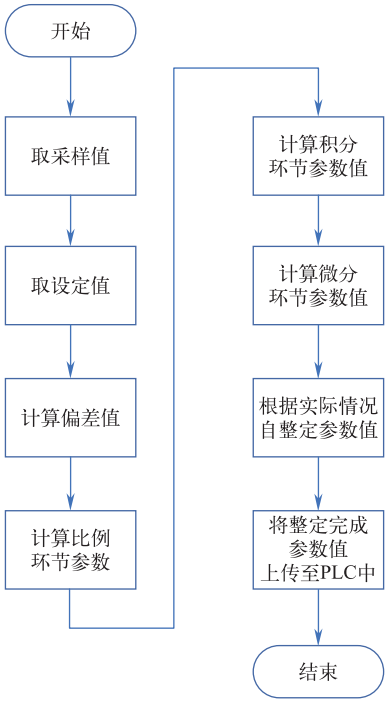

图4　PID运算流程图

（2）程序设计及参数整定

软件内部实现PID控制过程为：在“循环中断OB”，创建“PID_3Step”工艺对象，并对新创建的工艺对象进行与系统匹配的参数设置。完成参数设置后对PID_3Step进行组态，在系统中将控制器类型设置为“速度”，单位为“m/s”，Mode为“自动模式”，在Input/Output参数设置中，将Output设置为Output_PER(模拟量)，将Feedback设置为Feedback_PER。

在过程值设置中，将实际参数写入过程值限定与过程值标定中；在执行器设置中，将实际参数（如电动机转换时间值等）写入执行器内。

在主程序中编写PID程序，并定义相应变量，在输入输出及反馈位置写入与之对应的变量，在工艺对象中对PID_3Step的调试进行系统自整定，等待整定完成后将自整定出的参数上传至组态中并保存。

（3）上位机触摸屏设计

系统采用西门子触摸屏实现了上位监控功能，在触摸屏上可以根据实际情况对实验室所需的风量及压差进行设置，检测当前通风量及压差是否满足需求，可直接通过上位机观测到当前的数据运行情况，也可根据实际情况进行通风量及压差的参数修改。

整个系统使用西门子PLC1200系列实现对各个房间的通风量及压差控制，通过PID实现了系统的自适应调节控制，通过触摸屏实现现场数据的监测以及参数的设置，通过屏幕实现数据报警，实时检查当前数据是否满足设置要求。通过以太网实现不同设备之间的互联互通，整个系统持续稳定运行。

结束语

该系统采用可编程序逻辑控制器PID实现了系统的参数运算及实时控制，通过以太网组建局域网络实现设备互通，实现医学检验实验室的通风量及不同房间内压差的控制。鉴于医学检验的特殊性，系统中采用了多种设备起动方式，如触摸屏起动、控制面板起动以及远程遥控起动等，最大可能避免人员与设备的接触，尽量做到不接触以免发生交叉感染。通过西门子触摸屏进行上位机监控及修改参数，同时可以通过上位机报警出现的异常情况。系统经实际测试效果良好，运行稳定，可以在现有基础上灵活调整，以运用于多种场合的控制。EA

（收稿日期：2022-12-07）