



## (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105278510 B

(45)授权公告日 2017.12.29

(21)申请号 201510776737.7

(22)申请日 2015.11.12

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105278510 A

(43)申请公布日 2016.01.27

(73)专利权人 东北大学

地址 110819 辽宁省沈阳市和平区文化路3号巷11号

(72)发明人 范家璐 刘锐 姜艺 柴天佑

(74)专利代理机构 沈阳东大知识产权代理有限公司 21109

代理人 胡晓男

(51)Int.Cl.

G05B 19/418(2006.01)

(56)对比文件

CN 101694583 A,2010.04.14,

CN 102314186 A,2012.01.11,

CN 103941701 A,2014.07.23,

EP 2468412 A1,2012.06.27,

CN 104166405 A,2014.11.26,

范家璐.“一类工业过程运行反馈优化控制方法”.《自动化学报》.2015,第41卷(第10期),第1754-1761页.

范家璐.“无线网络环境下工业过程运行反馈控制方法”.《第26届中国过程控制会议(CPCC2015)论文集》.2015,第430页.

高明坤.“双容水箱控制系统的研究”.《中国优秀硕士论文全文数据库信息科技辑》.2015,第I140-485页.

审查员 叶双清

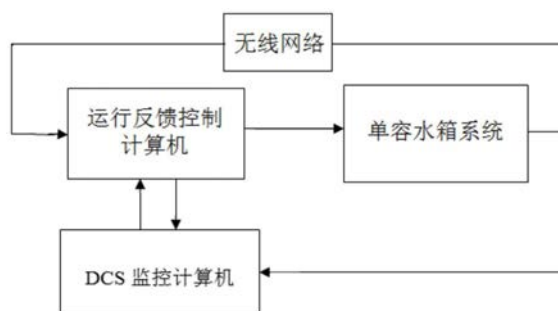
权利要求书2页 说明书8页 附图4页

### (54)发明名称

一种基于无线通信的单容水箱运行控制系统及方法

### (57)摘要

本发明提供一种基于无线通信的单容水箱运行控制系统及方法,系统包括单容水箱系统、运行反馈控制计算机和DCS监控计算机;所述单容水箱系统包括压力传感器、液位传感器、流量传感器、温度传感器、水泵、蓄水池、处理器;处理器的输出端与运行反馈控制计算机的输入端建立无线连接,处理器的输出端与DCS监控计算机采用以太网进行通信,运行反馈控制计算机的输出端分别连接水泵、比例阀门;本发明在每个运行层采样周期动态调整液位设定值,使单容水箱运行指标的实际值能够跟踪目标值,保证系统的随机稳定性,能够在无线传输过程中存在丢包与噪声的情况下使单容水箱运行指标的实际值能够跟踪其目标值,控制器对水箱外部干扰具有一定的抑制作用。



1. 一种基于无线通信的单容水箱运行控制系统,包括单容水箱系统、运行反馈控制计算机和DCS监控计算机;

所述单容水箱系统包括压力传感器、液位传感器、流量传感器、温度传感器、水泵、蓄水池、处理器;

水泵安装在蓄水池底部,蓄水池通过管路连至单容水箱,蓄水池与单容水箱之间的管路上安装有流量传感器,流量传感器至单容水箱之间的管路上安装有比例阀门,单容水箱还安装有温度传感器、液位传感器、压力传感器,流量传感器、液位传感器的输出端分别与处理器的输入端连接,处理器的输出端与运行反馈控制计算机的输入端建立无线连接,处理器的输出端与DCS监控计算机采用以太网进行通信,运行反馈控制计算机的输出端分别连接水泵、比例阀门;

所述DCS监控计算机:以曲线的形式显示单容水箱压力检测值、流量检测值、温度检测值、单容水箱液位检测值及运行指标实际值并保存,实现对单容水箱运行状态的远程实时监控;其特征在于,所述运行反馈控制计算机,设置有:

运行层设定值反馈控制器:给定初始的单容水箱运行指标设定值,在运行层每一采样时刻将单容水箱运行指标设定值与单容水箱运行指标实际值之差作为当前控制周期运行层设定值反馈控制器的输入,采用Lyapunov函数方法设计设定值反馈控制器,计算出当前时刻满足运行指标的液位设定值的动态补偿量  $\Delta y^*(k) = F e_f(k)$  其中,  $F$  为待设计反馈控制律,  $e_f(k)$  为无线网环境下运行指标实际值与运行指标设定值的误差;将该动态补偿量与上一采样周期的单容水箱液位设定值相加作为当前控制周期单容水箱的液位设定值输出  $y^*(k+1) = y^*(k) + \Delta y^*(k)$ ,输出的单容水箱液位设定值送入回路控制层过程控制器;所述运行指标为描述单容水箱液位控制效率指标,由单容水箱系统控制过程的输入输出关系得到;

回路控制层过程控制器:根据给定的单容水箱运行指标设定值得到单容水箱液位设定值,采用PI过程控制器调节单容水箱的水泵电压PWM占空比从而改变单容水箱入水流量,输出无静差的液位设定值,使得单容水箱液位检测值跟踪单容水箱液位设定值,单容水箱液位设定值经零阶保持器处理后得到连续信号再进入回路控制层;利用单容水箱内液位检测值与单容水箱液位设定值之差进行单容水箱液位反馈控制;将单容水箱运行指标实际值无线传输到运行层进行运行层设定值反馈控制;考虑无线网噪声和丢包对运行指标传输的影响,运行指标经无线网传输后处理模型描述如下:

$$r_f(k) = \Omega(r(k), r_f(k-1))$$

其中,  $r(k)$  为回路控制层采样得到的运行指标实际值信号,  $r_f(k)$  为经过无线网传输后输入运行层的运行指标实际值信号;

针对网络丢包问题,用符合伯努利二项分布的随机变量来对随机丢包现象建模,经处理后得到优化后的运行指标处理模型:

$$r_f(k) = \delta(k) r(k) + (1 - \delta(k)) r_f(k-1)$$

其中,  $\delta(k)$  为第  $k$  步采样的随机变量,服从0-1分布;  $\delta(k) = 0$  代表网络丢包,设丢包的概率为  $\bar{\delta}$  ( $0 < \bar{\delta} < 1$ ),那么以下式子成立:

$$\begin{cases} P\{\delta(k) = 1\} = E\{\delta(k)\} = \bar{\delta} \\ P\{\delta(k) = 0\} = 1 - \bar{\delta} \end{cases}$$

无线网络信息传输中的差错主要是由冲击噪声引发的突发差错;将传输差错表示为在原信号上施加乘性噪声:

$$r_f(k) = (1 + \rho(k)) r(k)$$

$\rho(k)$  为第  $k$  步采样的随机变量,服从几何分布,代表当前噪声幅值,其中  $\rho(k) \sim U(-\rho_m, \rho_m)$ ,  $\rho_m$  为  $\rho(k)$  的幅值,  $1 > \rho_m > 0$  则  $E\{\rho(k)\} = 0$ ,  $E\{\rho^2(k)\} = \rho_m^2 / 3 = \theta$ ;

综合无线网噪声和丢包对运行指标传输的影响,得运行指标实际值经无线网传输后处理模型如下:

$$r_f(k) = \delta(k) (1 + \rho(k)) r(k) + (1 - \delta(k)) r_f(k-1)。$$

2. 采用权利要求1所述的基于无线通信的单容水箱运行控制系统的单容水箱运行控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1:实时获取单容水箱压力检测值、流量检测值、温度检测值及单容水箱内液位检测值,并传输至处理器;

步骤2:处理器通过以太网将单容水箱压力检测值、流量检测值、温度检测值、单容水箱液位检测值及运行指标实际值发送至DCS监控计算机;

步骤3:DCS监控计算机以曲线的形式显示单容水箱压力检测值、流量检测值、温度检测值及单容水箱液位检测值并保存,实现对单容水箱运行状态的远程实时监控;

步骤4:处理器将单容水箱运行指标实际值无线传输至运行反馈控制计算机;

步骤5:进行运行层设定值反馈控制:根据单容水箱运行指标设定值与单容水箱运行指标实际值之差,计算出当前时刻满足运行指标的液位设定值的动态补偿量,将该动态补偿量与上一采样周期的单容水箱液位设定值相加作为当前控制周期单容水箱的液位设定值输出,输出的单容水箱液位设定值送入回路控制层进行回路控制层过程控制;

步骤6:进行回路控制层过程控制;

步骤6.1:根据得到的单容水箱液位设定值,采用PI过程控制器调节单容水箱的水泵电压PWM占空比从而改变单容水箱入水流量,使得单容水箱液位检测值跟踪单容水箱液位设定值;

步骤6.2:利用单容水箱内液位检测值与单容水箱液位设定值之差进行单容水箱液位反馈控制;

步骤6.3:将单容水箱运行指标实际值无线传输到运行层进行运行层设定值反馈控制,执行步骤5。

3. 根据权利要求2所述的单容水箱运行控制方法,其特征在于,所述步骤6.3所述将单容水箱运行指标实际值无线传输到运行层时,对原单容水箱运行指标实际值的无线网噪声和丢包处理后作为当前时刻单容水箱运行指标实际值,无线传输到运行层进行运行层设定值反馈控制。

4. 根据权利要求2所述的单容水箱运行控制方法,其特征在于,所述单容水箱液位设定值是经零阶保持器处理后的连续信号。

## 一种基于无线通信的单容水箱运行控制系统及方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于工业过程控制领域,具体涉及一种基于无线通信的单容水箱运行控制系统及方法。

### 背景技术

[0002] 近年来,在人们生活以及工业生产等诸多领域经常涉及到液位和流量的控制问题,有关液位控制的形式及方法也越来越多,技术性能也越发先进,自动化程度也有较大地提高。但就以各类型水罐、水池的液位控制来说,许多项目没有达到自动化的程度,有的在设计上虽然设置有较为精密仪表和其它电气设备,但是没有达到充分的开发和合理的配置,自动化程序较低,有许多电气及仪表装置,在系统中只起到了液位显示及报警功能,其液位控制全凭生产运行人员根据系统工艺流程,人为地手动或电动操作水罐或水池的进出口阀门来实现液位控制,使其液位保持在正常的生产状态范围内。由于受各工艺流程生的影响,液位的变化和稳定性也受到较大影响,为此生产运行人员在工作中要时时监测液位的变化,而不得有半点疏忽,这样就较大地增加了生产运行人员的劳动强度。特别是在动态的状态下,采用合适的方法对液位进行检测、控制,能收到很好的效果。

[0003] 工业过程运行控制由运行层设定值控制和回路控制层过程控制两层结构组成。传统的运行控制方法采用人工设定回路控制层设定值的方法进行开环控制,但是人工控制不能及时准确的随工况调整设定值,难以将水箱液位控制在目标值范围内,甚至造成水箱系统故障。现有的水箱液位运行控制中,回路控制层过程控制输入与输出信息传输采用设备网,运行层设定控制的信息传输采用工业以太网。然而,由于水箱系统设备通常处于运动状态或者工作在恶劣的环境下,难以采用有线网络传输水箱相关参数,因此不能实现水箱液位闭环控制。物联网等新兴技术的发展,使运行指标可以通过工业无线网络反馈至控制系统,从而对无法或不易部署有线网络的水箱控制过程实现运行反馈控制。然而无线网传输存在丢包与噪声问题,会导致系统控制性能下降,甚至不稳定。设备网、以太网和无线传感器网络共存的水箱运行闭环控制对现有的反馈控制方法提出了挑战。

### 发明内容

[0004] 针对现有技术存在的问题,本发明提供一种基于无线通信的单容水箱运行控制系统及方法。

[0005] 本发明的技术方案如下:

[0006] 一种基于无线通信的单容水箱运行控制系统,包括单容水箱系统、运行反馈控制计算机和DCS监控计算机;

[0007] 所述单容水箱系统包括压力传感器、液位传感器、流量传感器、温度传感器、水泵、蓄水池、处理器;

[0008] 水泵安装在蓄水池底部,蓄水池通过管路连至单容水箱,蓄水池与单容水箱之间的管路上安装有流量传感器,流量传感器至单容水箱之间的管路上安装有比例阀门,单容

水箱还安装有温度传感器、液位传感器、压力传感器、流量传感器、液位传感器的输出端分别与处理器的输入端连接,处理器的输出端与运行反馈控制计算机的输入端建立无线连接,处理器的输出端与DCS监控计算机采用以太网进行通信,运行反馈控制计算机的输出端分别连接水泵、比例阀门;

[0009] 所述DCS监控计算机:以曲线的形式显示单容水箱压力检测值、流量检测值、温度检测值、单容水箱液位检测值及运行指标实际值并保存,实现对单容水箱运行状态的远程实时监控。

[0010] 所述运行反馈控制计算机,设置有:

[0011] 运行层设定值反馈控制器:给定初始的单容水箱运行指标设定值,在运行层每一采样时刻将单容水箱运行指标设定值与单容水箱运行指标实际值之差作为当前控制周期运行层设定值反馈控制器的输入,计算出当前时刻满足运行指标的液位设定值的动态补偿量,将该动态补偿量与上一采样周期的单容水箱液位设定值相加作为当前控制周期单容水箱的液位设定值输出,输出的单容水箱液位设定值送入回路控制层过程控制器;所述运行指标为描述单容水箱液位控制效率指标,由单容水箱系统控制过程的输入输出关系得到;

[0012] 回路控制层过程控制器:采用PI过程控制器调节单容水箱的水泵电压PWM占空比从而改变单容水箱入水流量,输出无静差的液位设定值,使得单容水箱液位检测值跟踪单容水箱液位设定值,利用单容水箱内液位检测值与单容水箱液位设定值之差进行单容水箱液位反馈控制。

[0013] 采用所述的基于无线通信的单容水箱运行控制系统的单容水箱运行控制方法,包括以下步骤:

[0014] 步骤1:实时获取单容水箱压力检测值、流量检测值、温度检测值及单容水箱内液位检测值,并传输至处理器;

[0015] 步骤2:处理器通过以太网将单容水箱压力检测值、流量检测值、温度检测值、单容水箱液位检测值及运行指标实际值发送至DCS监控计算机;

[0016] 步骤3:DCS监控计算机以曲线的形式显示单容水箱压力检测值、流量检测值、温度检测值及单容水箱液位检测值并保存,实现对单容水箱运行状态的远程实时监控;

[0017] 步骤4:处理器将单容水箱运行指标实际值无线传输至运行反馈控制计算机;

[0018] 步骤5:进行运行层设定值反馈控制:根据单容水箱运行指标设定值与单容水箱运行指标实际值之差,计算出当前时刻满足运行指标的液位设定值的动态补偿量,将该动态补偿量与上一采样周期的单容水箱液位设定值相加作为当前控制周期单容水箱的液位设定值输出,输出的单容水箱液位设定值送入回路控制层进行回路控制层过程控制;

[0019] 步骤6:进行回路控制层过程控制;

[0020] 步骤6.1:根据得到的单容水箱液位设定值,采用PI过程控制器调节单容水箱的水泵电压PWM占空比从而改变单容水箱入水流量,使得单容水箱液位检测值跟踪单容水箱液位设定值;

[0021] 步骤6.2:利用单容水箱内液位检测值与单容水箱液位设定值之差进行单容水箱液位反馈控制;

[0022] 步骤6.3:将单容水箱运行指标实际值无线传输到运行层进行运行层设定值反馈控制,执行步骤5。

[0023] 所述步骤6.3所述将单容水箱运行指标实际值无线传输到运行层时,对原单容水箱运行指标实际值的无线网噪声和丢包处理后作为当前时刻单容水箱运行指标实际值,无线传输到运行层进行运行层设定值反馈控制。

[0024] 所述单容水箱液位设定值是经零阶保持器处理后的连续信号。

[0025] 有益效果:

[0026] 本发明提供一种基于无线通信的单容水箱运行控制系统及方法,系统包括单容水箱系统、运行反馈控制计算机和DCS监控计算机;所述单容水箱系统包括压力传感器、液位传感器、流量传感器、温度传感器、水泵、蓄水池、处理器;处理器的输出端与运行反馈控制计算机的输入端建立无线连接,处理器的输出端与DCS监控计算机采用以太网进行通信,运行反馈控制计算机的输出端分别连接水泵、比例阀门;本发明在每个运行层采样周期动态调整液位设定值,使单容水箱运行指标的实际值能够跟踪目标值,保证系统的随机稳定性,能够在无线传输过程中存在丢包与噪声的情况下使单容水箱运行指标实际值能够跟踪其目标值,控制器对水箱外部干扰具有一定的抑制作用。

## 附图说明

[0027] 图1是本发明具体实施方式无线网络环境下单容水箱运行控制的过程;

[0028] 图2是本发明具体实施方式无线网络环境下单容水箱运行控制结构;

[0029] 图3是本发明具体实施方式基于无线通信的单容水箱运行控制系统结构框图;

[0030] 图4是本发明具体实施方式单容水箱运行控制策略;

[0031] 图5是本发明具体实施方式单容水箱运行控制方法流程图。

[0032] 图6是本发明具体实施方式单容水箱液位控制过程原理图;

[0033] 图7是本发明具体实施方式单容水箱过程PI控制器的结构;

[0034] 图8是本发明具体实施方式无线网络环境下水箱液位控制跟踪曲线;

[0035] 图9是本发明具体实施方式无线网络环境下运行指标跟踪曲线。

## 具体实施方式

[0036] 下面结合附图对本发明的具体实施方式做详细说明。

[0037] 单容水箱运行控制分为五个过程,如图1所示,包括设定反馈控制、过程控制、被控对象、运行过程、无线网传输。单容水箱运行控制由三层控制结构组成,分别是回路控制层、运行层、无线网传输层,如图2所示。在本实施方式中,回路控制层包括跟踪控制器、被控对象和运行过程。跟踪控制器由过程PI控制器构成,被控对象是单容水箱,通过对单容水箱液位的实时控制,从而实现一定的运行指标。运行层由设定值反馈控制器构成,设定值反馈控制器在每一运行层采样时刻根据运行指标实际值与运行指标设定值的误差计算单容水箱液位设定值补偿量,与上一采样周期液位设定值相加而计算出当前控制周期的液位设定值,作为设定值反馈控制器的输出。无线网传输层用于在无线网络不确定传输环境下传输运行指标。回路控制层控制采用过程PI控制器,利用MATLAB和Simulink软件环境将其封装成软件形式,控制参数的求取算法以m文件的形式给出,并通过电缆、I/O板卡以标准4~20mA的工业信号控制PWM调压水泵,通过控制水流的快慢以及开闭,实现对水箱液位的控制。将单容水箱系统的输出,也就是水箱液位实际值结合过程控制的输入以满足单容水箱

系统的运行指标,通过无线网络反馈至运行层设定值反馈控制器的输入端。期间考虑到网络丢包和网络噪声,应用相应的无线网传输处理函数以动态补偿。设定值反馈控制器将程序封装成软件形式读取单容水箱运行指标反馈值与目标值的差值,设定值反馈控制器的输出经过零阶保持器以提高频率作为回路控制层的输入。DCS监控计算机通过以太网与运行反馈控制计算机和单容水箱系统连接,以曲线图形形式实时显示当前单容水箱的压力、液位、流量及温度等相关信息,并与安全设定值相比较以监测单容水箱运行的稳定情况,并能够保存和读取各种变量的数据,可以实现实时的对水箱的压力、液位、流量及温度等相关信息的远程控制。

[0038] 本实施方式的基于无线通信的单容水箱运行控制系统,如图3所示,包括单容水箱系统、运行反馈控制计算机和DCS监控计算机;

[0039] 所述单容水箱系统包括压力传感器、液位传感器、流量传感器、温度传感器、水泵、蓄水池、处理器;

[0040] 水泵安装在蓄水池底部,蓄水池通过管路连至单容水箱,蓄水池与单容水箱之间的管路上安装有流量传感器,流量传感器至单容水箱之间的管路上安装有比例阀门,单容水箱还安装有温度传感器、液位传感器、压力传感器,流量传感器、液位传感器的输出端分别与处理器的输入端连接,处理器的输出端与运行反馈控制计算机的输入端建立无线连接,处理器的输出端与DCS监控计算机采用以太网进行通信,运行反馈控制计算机的输出端分别连接水泵、比例阀门;

[0041] 所述DCS监控计算机:以曲线的形式显示单容水箱压力检测值、流量检测值、温度检测值、单容水箱液位检测值及运行指标实际值并保存,实现对单容水箱运行状态的远程实时监控。

[0042] 运行反馈控制计算机,设置有:

[0043] 运行层设定值反馈控制器:给定初始的单容水箱运行指标设定值,在运行层每一采样时刻将单容水箱运行指标设定值与单容水箱运行指标实际值之差作为当前控制周期运行层设定值反馈控制器的输入,计算出当前时刻满足运行指标的液位设定值的动态补偿量,将该动态补偿量与上一采样周期的单容水箱液位设定值相加作为当前控制周期单容水箱的液位设定值输出,输出的单容水箱液位设定值送入回路控制层过程控制器;所述运行指标为描述单容水箱液位控制效率指标,由单容水箱系统控制过程的输入输出关系得到;

[0044] 回路控制层过程控制器:采用PI过程控制器调节单容水箱的水泵电压PWM占空比从而改变单容水箱入水流量,输出无静差的液位设定值,使得单容水箱液位检测值跟踪单容水箱液位设定值,利用单容水箱内液位检测值与单容水箱液位设定值之差进行单容水箱液位反馈控制。单容水箱运行控制策略如图4所示。

[0045] 基于无线通信的单容水箱运行控制方法,如图5所示,包括如下步骤:

[0046] 步骤1:实时获取单容水箱压力检测值、流量检测值、温度检测值及单容水箱内液位检测值,并传输至处理器;

[0047] 步骤2:处理器通过以太网将单容水箱压力检测值、流量检测值、温度检测值、单容水箱液位检测值及运行指标实际值发送至DCS监控计算机;

[0048] 步骤3:DCS监控计算机以曲线的形式显示单容水箱压力检测值、流量检测值、温度检测值及单容水箱液位检测值并保存,实现对单容水箱运行状态的远程实时监控;

[0049] 步骤4:处理器将单容水箱运行指标实际值无线传输至运行反馈控制计算机;

[0050] 步骤5:进行运行层设定值反馈控制:根据单容水箱运行指标设定值与单容水箱运行指标实际值之差,计算出当前时刻满足运行指标的液位设定值的动态补偿量,将该动态补偿量与上一采样周期的单容水箱液位设定值相加作为当前控制周期单容水箱的液位设定值输出,输出的单容水箱液位设定值送入回路控制层进行回路控制层过程控制,执行步骤6。

[0051] 设计运行层设定值反馈控制:设定值反馈控制器在每一次运行层采样时刻k时刻根据单容水箱运行指标设定值与单容水箱运行指标实际值之差,采用Lyapunov函数方法设计,计算出当前时刻满足运行指标的液位设定值的动态补偿量:

$$[0052] \quad \Delta y^*(k) = F e_f(k)$$

[0053] 其中,F为待设计反馈控制律, $e_f(k) = r^* - r_f(k)$ 为无线网环境下运行指标实际值与运行指标设定值的误差;

[0054] 采用Lyapunov函数方法设计F,构造如下运行层状态空间方程:

$$\chi(k+1) = \tilde{A}\chi(k) + \tilde{B}r^* \text{ 其中, 状态向量 } x(k) = [n^T(k), y^{*T}(k), r_f(k-1)]^T, \text{ 维数为 } (n_\eta + n_y + n_r) \times 1 = (n_x + 2n_y + n_r) \times 1 = n_x \times 1, \tilde{A} = \begin{bmatrix} A_o & B_o & 0 \\ -\delta(k)(1+\rho(k))FC_o & I - \delta(k)(1+\rho(k))FD_o & (\delta(k)-1)F \\ \delta(k)(1+\rho(k))C_o & \delta(k)(1+\rho(k))D_o & 1-\delta(k) \end{bmatrix}, \text{ 维数为 } n_x \times n_x, \tilde{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ F \\ 0 \end{bmatrix}, \text{ 维数为 } n_x \times n_r.$$

[0055] 选取Lyapunov函数  $\bar{V}(k) = \chi^T(k)\bar{P}\chi(k)$ , 其中  $\bar{P}$  为对称正定矩阵,

$$[0056] \quad \text{即 } \bar{P} = \begin{bmatrix} \bar{P}_1 & \bar{P}_2 & \bar{P}_3 \\ \bar{P}_2^T & \bar{P}_4 & \bar{P}_5 \\ \bar{P}_3^T & \bar{P}_5^T & \bar{P}_6 \end{bmatrix} > 0,$$

[0057]  $\bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3, \bar{P}_4, \bar{P}_5, \bar{P}_6$  的维数分别为  $n_\eta \times n_\eta, n_\eta \times n_y, n_\eta \times n_r, n_y \times n_y, n_y \times n_r, n_r \times n_r$ , 则有

$$\begin{aligned} [0058] \quad E\{\Delta \bar{V}(k)\} &= E\{\bar{V}(k+1) - \bar{V}(k)\} \\ &= E\{[\tilde{A}\chi(k)]^T \bar{P} [\tilde{A}\chi(k)] - \chi^T(k) \bar{P} \chi(k)\} \\ &= \chi^T(k) [\bar{\Phi} - \bar{P}] \chi(k) \end{aligned}$$

[0059] 其中,  $\bar{\Phi} = E\{\tilde{A}^T \bar{P} \tilde{A}\}$  定义衰减率  $\gamma \geq 0$ , 假设存在  $\bar{P}$  和 F 使不等式  $E\{\Delta \bar{V}(k)\} < -\gamma E\{\bar{V}(k)\}$

成立, 应用随机分析的方法有  $E\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \|\chi(k)\|_2\right\} < \chi^T(0) S \chi(0)$

[0060] 其中,  $S = (\lambda_{\min}(\bar{P})\gamma)^{-1} \bar{P}$ , 显然 S 是正定的。所以系统稳定条件可以等价于  $E\{\Delta \bar{V}(k)\} < -\gamma E\{\bar{V}(k)\}$  且  $\bar{P}$  是对称正定矩阵, 即可转化为



$$[0061] \quad \begin{bmatrix} -[\bar{\delta}(1+\theta)]^{-1} \bar{P}_4 & YC_o & YD_o & 0 & 0 \\ * & \Pi_{11} & \Pi_{12} & \Pi_{13} & 0 \\ * & * & \Pi_{22} & \Pi_{23} & 0 \\ * & * & * & \Pi_{33} & Y^T \\ * & * & * & * & -(1-\bar{\delta})^{-1} \bar{P}_4 \end{bmatrix} < 0$$

$$[0062] \quad \begin{bmatrix} \bar{P}_1 & G_2 \bar{P}_4 & \bar{P}_3 \\ * & \bar{P}_4 & \bar{P}_4 G_1^T \\ * & * & \bar{P}_6 \end{bmatrix} > 0$$

[0063] 其中,

$$[0064] \quad \begin{aligned} \Pi_{11} = & A_o^T \bar{P}_1 A_o - \bar{\delta} C_o^T Y^T G_2^T A_o + \bar{\delta} C_o^T \bar{P}_3^T A_o - \bar{\delta} A_o^T G_2 Y C_o - \bar{\delta} (1+\theta) C_o^T G_1 Y C_o \\ & + \bar{\delta} A_o^T \bar{P}_3 C_o - \bar{\delta} (1+\theta) C_o^T Y^T G_1^T C_o + \bar{\delta} (1+\theta) C_o^T \bar{P}_6 C_o - (1-\gamma) \bar{P}_1 \end{aligned}$$

$$[0065] \quad \begin{aligned} \Pi_{12} = & A_o^T \bar{P}_1 B_o - \bar{\delta} C_o^T Y^T G_2^T B_o + \bar{\delta} C_o^T \bar{P}_3^T B_o + A_o^T G_2 \bar{P}_4 - \bar{\delta} C_o^T Y^T + \bar{\delta} C_o^T G_1 \bar{P}_4 \\ & - \bar{\delta} A_o^T G_2 Y D_o - \bar{\delta} (1+\theta) C_o^T G_1 Y D_o + \bar{\delta} A_o^T \bar{P}_3 D_o - \bar{\delta} (1+\theta) C_o^T Y^T G_1^T D_o \quad \Pi_{13} = \Phi_3 - (1-\gamma) \bar{P}_3 \\ & + \bar{\delta} (1+\theta) C_o^T \bar{P}_6 D_o - (1-\gamma) G_2 \bar{P}_4 \end{aligned}$$

$$[0066] \quad \begin{aligned} \Pi_{22} = & B_o^T \bar{P}_1 B_o + \bar{P}_2^T B_o - \bar{\delta} D_o^T Y^T G_2^T B_o + \bar{\delta} D_o^T \bar{P}_3^T B_o + B_o^T G_2 \bar{P}_4 + \bar{P}_4 - \bar{\delta} D_o^T Y^T \\ & + \bar{\delta} D_o^T G_1 \bar{P}_4 - \bar{\delta} B_o^T G_2 Y D_o - \bar{\delta} Y D_o - \bar{\delta} (1+\theta) D_o^T G_1 Y D_o + \bar{\delta} B_o^T \bar{P}_3 D_o + \bar{\delta} \bar{P}_4 G_1^T D_o \\ & - \bar{\delta} (1+\theta) D_o^T Y^T G_1^T D_o + \bar{\delta} (1+\theta) D_o^T \bar{P}_6 D_o - (1-\gamma) \bar{P}_4 \end{aligned}$$

$$[0067] \quad \Pi_{23} = \Phi_6 - (1-\gamma) \bar{P}_4 G_1^T$$

$$[0068] \quad \Pi_{33} = -(1-\bar{\delta}) G_1 Y - (1-\bar{\delta}) Y^T G_1^T + (1-\bar{\delta}) \bar{P}_6 - (1-\gamma) \bar{P}_6$$

[0069] 求解可得  $\bar{P}_4$  和  $Y$ , 从而设定值反馈控制器参数  $F = \bar{P}_4^{-1} Y$ ,  $\bar{P}$  和  $F$  使不等式  $E\{\Delta \bar{V}(k)\} < -\gamma E\{\bar{V}(k)\}$  成立;

[0070] 将动态补偿量与上一采样时刻的单容水箱液位设定值相加作为当前控制周期单容水箱的液位设定值输出:  $y^*(k+1) = y^*(k) + \Delta y^*(k)$ , 输出的单容水箱液位设定值送入回路控制层进行回路控制层过程控制。

[0071] 步骤6: 进行回路控制层过程控制;

[0072] 步骤6.1: 根据给定的单容水箱运行指标设定值得到单容水箱液位设定值, 采用PI过程控制器调节单容水箱的水泵电压PWM占空比从而改变单容水箱入水流量, 使得单容水箱液位检测值跟踪单容水箱液位设定值;

[0073] 单容水箱液位设定值经零阶保持器处理后得到连续信号再进入回路控制层。

[0074] 建立用来描述单容水箱运行过程的离散状态空间方程, 水箱液位控制过程原理如图6所示, 将单容水箱的压力值作为该方程的状态变量, PWM占空比和单容水箱入水流量作为该方程的输入变量, 水箱液位作为该方程的输出变量;

[0075] 离散状态空间方程:

$$[0076] \quad x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k)$$

$$[0077] \quad y(k) = C_d x(k)$$

[0078] 其中, 状态变量  $x(k)$  是单容水箱的压力值; 输入变量  $u(k)$  是PWM占空比和水箱的入

水流量,即回路控制的输入控制量;输出变量 $y(k)$ 是水箱液位实际值,即回路控制的控制输出量; $A_d$ 是系统矩阵、 $B_d$ 是控制矩阵、 $C_d$ 是输出矩阵, $k$ 为单容水箱运行过程的各个时刻。

[0079] 根据给定的单容水箱运行指标设定值得到单容水箱液位设定值,过程控制器需使被控回路输出无静差的液位跟踪设定值,采用工业现场常见的PI控制器作为回路控制层的过程控制器,结构如图7所示:

$$[0080] \quad u(k) = K_p e(k) + K_i E(k)$$

[0081] 其中, $K_p$ 与 $K_i$ 分别是PI控制器的比例系数和积分系数, $e(k)$ 表示在每个采样时刻过程控制的输出与液位设定值的误差 $e(k) = y^*(k) - y(k)$ ,  $E(k) = \sum_{i=0}^{k-1} e(i)$ 是系统输出误差达到

采样时刻 $k$ 时的总和。图8所示是无线网络环境下水箱液位控制跟踪曲线。

[0082] 建立运行指标方程来描述单容水箱水流量输入与水流量消耗关系: $r(k) = My(k) + Nu(k)$

[0083] 其中, $M$ 为水流量输入系数矩阵, $N$ 为水流量消耗系数矩阵, $u(k)$ 为过程控制的输入, $y(k)$ 为过程控制的输出,此方程表征单容水箱运行指标与水箱过程控制的输入、输出之间运行过程的关系,无线网络环境下运行指标跟踪曲线如图9所示。

[0084] 步骤6.2:利用单容水箱内液位检测值与单容水箱液位设定值之差进行单容水箱液位反馈控制;

[0085] 步骤6.3:将单容水箱运行指标实际值无线传输到运行层进行运行层设定值反馈控制,执行步骤5;

[0086] 考虑无线网噪声和丢包对运行指标传输的影响,运行指标经无线网传输后处理模型描述如下:

$$[0087] \quad r_f(k) = \Omega(r(k), r_f(k-1))$$

[0088] 其中, $r(k)$ 为回路控制层采样得到的运行指标实际值信号, $r_f(k)$ 为经过无线网传输后输入运行层的运行指标实际值信号;

[0089] 针对网络丢包问题,用符合伯努利二项分布的随机变量来对随机丢包现象建模,经处理后得到优化后的运行指标处理模型:

$$[0090] \quad r_f(k) = \delta(k) r(k) + (1-\delta(k)) r_f(k-1)$$

[0091] 其中, $\delta(k)$ 为第 $k$ 步采样的随机变量,服从0-1分布; $\delta(k)=0$ 代表网络丢包,设丢包的概率为 $\bar{\delta}$  ( $0 < \bar{\delta} < 1$ ),那么以下式子成立:

$$[0092] \quad \begin{cases} P\{\delta(k)=1\} = E\{\delta(k)\} = \bar{\delta} \\ P\{\delta(k)=0\} = 1 - \bar{\delta} \end{cases}$$

[0093] 无线网络信息传输中的差错主要是由冲击噪声引发的突发差错。将传输差错表示为在原信号上施加乘性噪声:

$$[0094] \quad r_f(k) = (1+\rho(k)) r(k)$$

[0095]  $\rho(k)$ 为第 $k$ 步采样的随机变量,服从几何分布,代表当前噪声幅值,其中 $\rho(k) \sim U(-\rho_m, \rho_m)$ ,  $\rho_m$ 为 $\rho(k)$ 的幅值,  $1 > \rho_m > 0$  则  $E\{\rho(k)\} = 0$ ,  $E\{\rho^2(k)\} = \rho_m^2 / 3 = \theta$ 。

[0096] 综合无线网噪声和丢包对运行指标传输的影响,可得运行指标实际值经无线网传

输后处理模型如下：

[0097] 
$$r_f(k) = \delta(k) (1 + \rho(k)) r(k) + (1 - \delta(k)) r_f(k-1)。$$

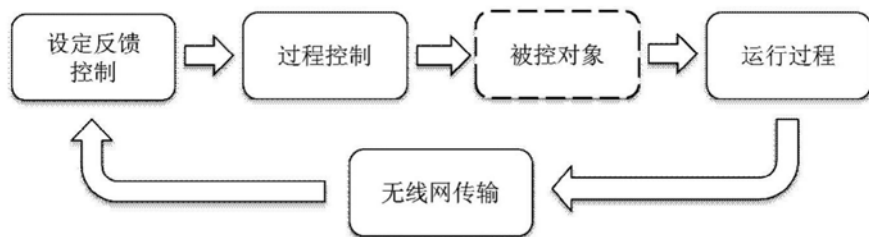


图1

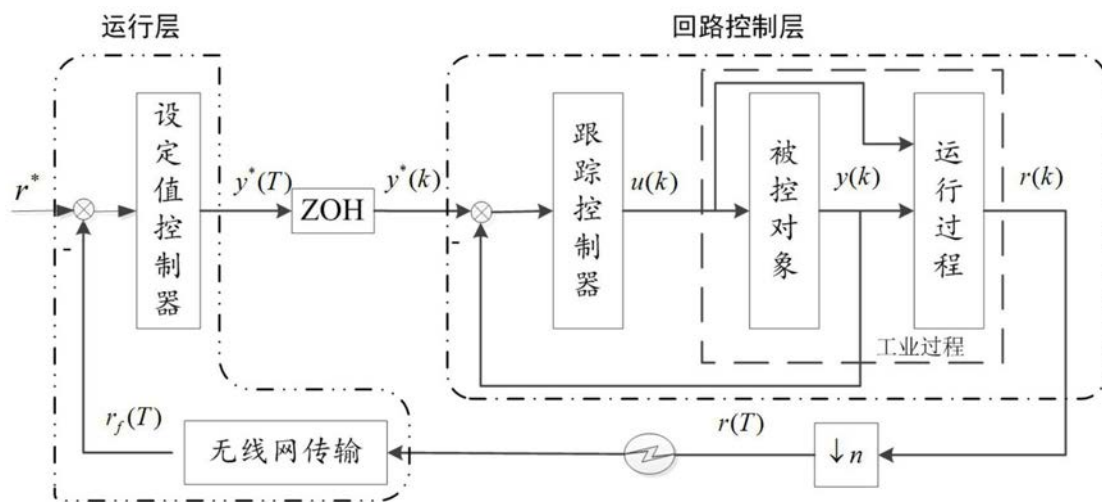


图2

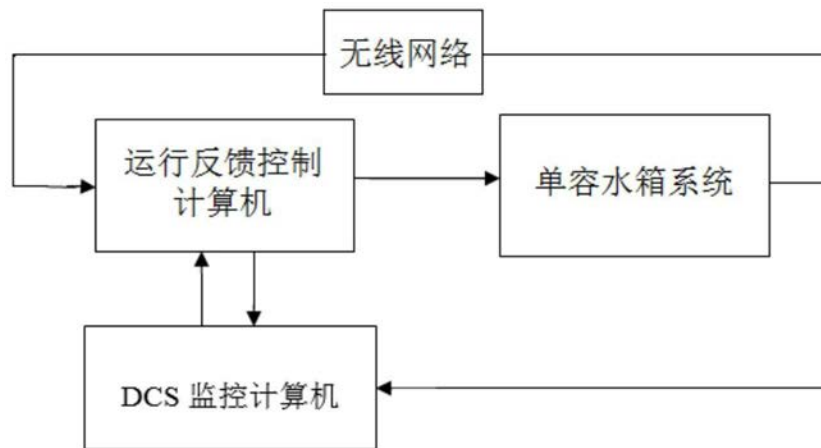


图3

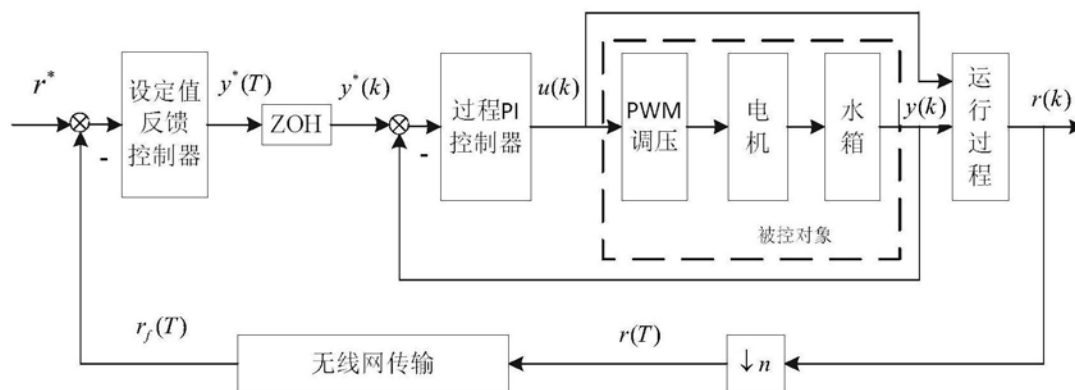


图4

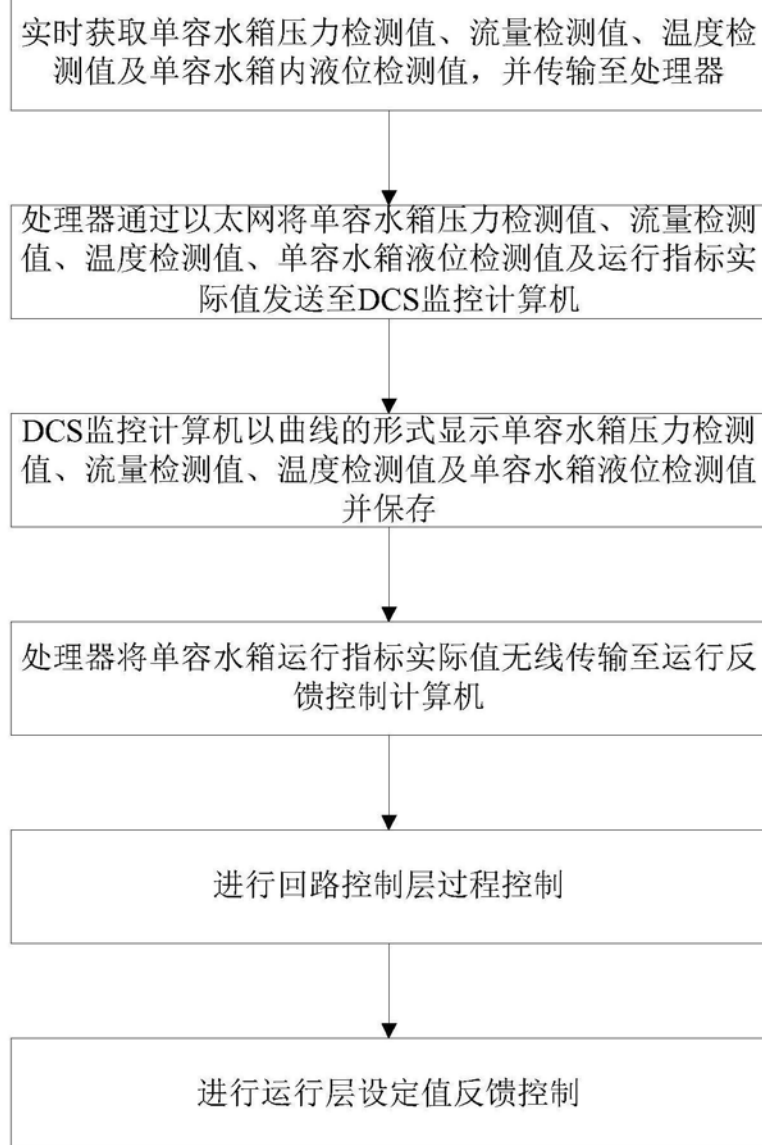


图5

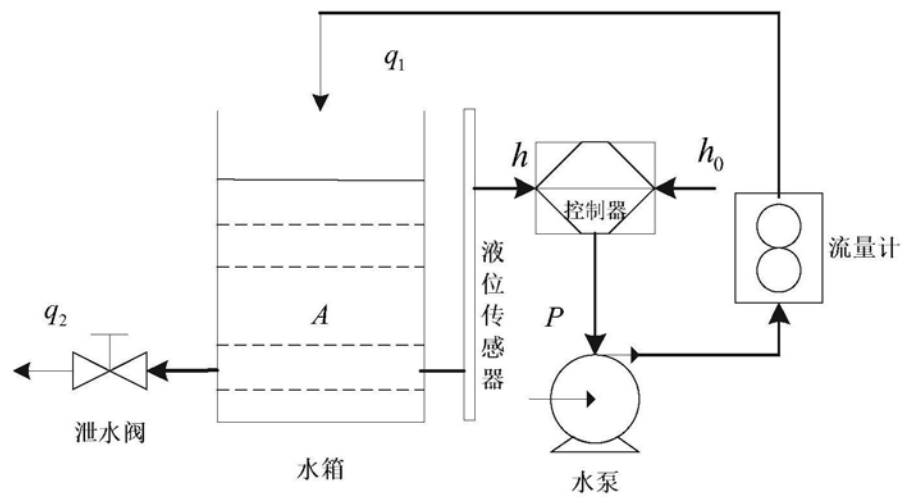


图6

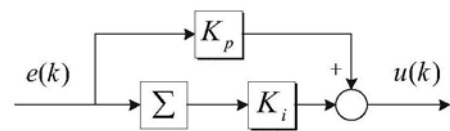


图7

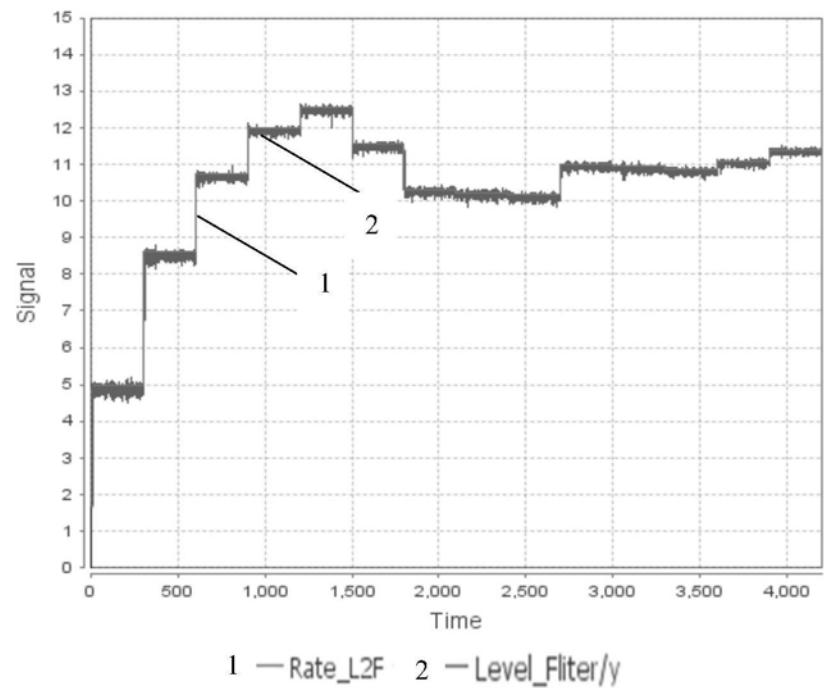


图8

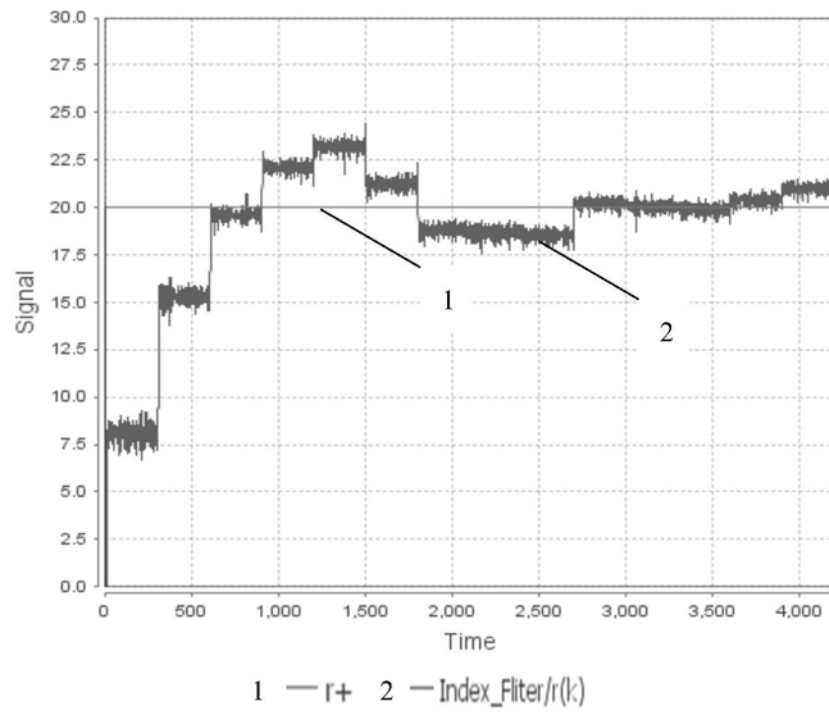


图9