

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.01.020

恒压供水变频控制低碳技术及应用

卢祥江, 武宇龙

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对当前变频恒压供水压力不稳定、能耗过大、滞后时间过长等问题, 将无模型控制方式运用到恒压变频供水系统中, 同时在分析供水特性的基础上, 对具体的供水设备进行分析和改进。实践表明, 改进之后的供水系统实现了供水压力稳定, 节能效果明显, 反应执行速度快捷, 长期运行稳定可靠。

关键词: 恒压供水; 节能; 水泵; 变频调速

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)01-0098-06

The Low Carbon Technology for Frequency Constant Pressure Water Supply Control and Application

Lu Xiangjiang, Wu Yulong

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the problems of instability, excessive energy consumption and long time lag of current variable frequency constant pressure water supply, the model free control method was applied to the constant pressure water supply system, and on the basis of research of water supply characteristics, the specific water supply equipment was analyzed and improved. The practice showed that the improved water supply system realized stable pressure water supply, obvious effect of energy-saving, fast response speed and long-term stable and reliable operation.

Keywords: constant pressure water supply; energy-saving; water pump; frequency speed regulation

0 引言

恒压供水是目前高楼供水的主要手段, 近年来随着电力电子技术的发展, 采用变频器以及相应的控制电路组成的节能供水系统, 已得到了广泛推广和应用。由于泵类电机具有负载转矩与转速的平方成正比, 轴功率与转速的立方成正比的特点, 因此, 采用闭环控制, 根据用水量的大小来控制电机的转速, 可以使整个供水系统处于节能运行的状态。理论和实践表明, 在低流量区, 对整个供水系统采用变频调速控制比采用阀门控制可节约30%~50%电能。因此, 在供水系统中采用变频调速控制技术取

代阀门控制能获得更好的经济效益和社会效益, 这对于缓解我国电力紧张的状态具有重要意义。目前, 有些企业缺乏对恒压供水方式的深入研究, 从而使不同企业生产的恒压供水设备的节能效果差别很大。根据多年来收集的数据显示, 在不利的供水环境下, 好的供水设备比不好的供水设备有近40%的能量消耗差别。在国家倡导节能减排的精神下, 对恒压供水的问题有必要进行一些理论上的研究, 寻找一种高效节能的设计方案。利用先进的自动化技术、控制技术以及通讯技术, 设计高性能、高节能, 同时能适应不同情况的低碳节能恒压供水系统已成为了必然的发展趋势^[1]。

收稿日期: 2013-11-13

作者简介: 卢祥江(1988-), 男, 湖南吉首人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为机电控制技术,

E-mail: lu_xiangjiang@163.com

城市供水工程在水资源的开发利用过程中, 水资源从水源地通过重力或泵站输送至水处理厂, 经过泵站将饮用水输送到用户, 并通过水泵保持水压稳定。在此过程中, 水泵成为了城市供水系统中主要的耗能设备, 而城市供水系统碳足迹的来源可归结为相关的能源消耗, 如电耗以及外加的碳源消耗, 也就是说水泵的使用将成为城市供水系统碳足迹的主要来源^[2]。

1 供水系统执行部件的基本特性

供水系统主要由控制部件和执行部件两部分组成, 通过研究供水系统执行部件的基本特征, 有助于更好地设计低碳节能型供水系统, 从而为改善相关供水性能作准备。通过对水泵工作点确定曲线的分析, 可以了解供水系统主要执行部件——水泵的工作特征, 如图1所示。

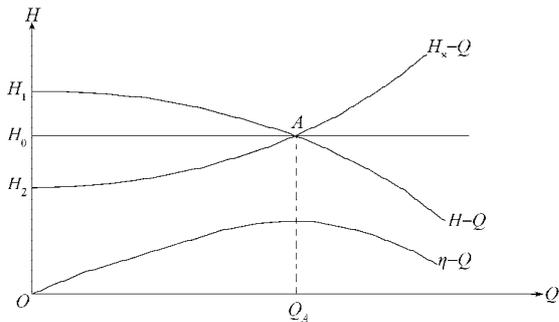


图1 水泵工作点的确定

Fig. 1 Determination of Pump operating point

水泵工作点(工况点)是指水泵在确定的管路中, 在实际运行过程中所具有的扬程、流量以及相应的效率、功率等参数。图1中, 水泵性能曲线($H-Q$ 曲线)和管路性能曲线(H_x-Q 曲线), 两者之间的交点 A 就是水泵的工作点。工作点 A 是水泵运行的理想工作点, 实际运行时水泵的工作点并非总是固定在 A 点。在阀门开度和水泵转速都不变的情况下, 用户的用水状况决定流量 Q 的大小, 所以 $H-Q$ 曲线所反映的是扬程 H 与用水量 Q 之间的关系。随着流量 Q 的增大, 水泵的扬程 H 将变小; 随着用户用水量的变大, 水泵的扬程也将减小, 即不改变其它因素的情况下, 水泵能够压水的高度将减小。 H_x-Q 曲线反映了水泵的机械能用来克服系统的水位、压力差以及液体在供水管道中流动阻力的变化规律。由图1可知, 在同一阀门开度下, 扬程 H 越大, 其流量 Q 也越大。从水泵的效率曲线 $\eta-Q$ 可知, 在 A 点处水泵的效率最大。

对水泵的运行特性曲线进行分析, 如图2所示。当用阀门控制时, 若用水高峰期水泵工作在 E 点, 其

流量为 Q_1 , 扬程为 H_2 。当用水量从 Q_1 减小到 Q_2 时, 则需要关小阀门, 这时阀门的摩擦阻力变大, 阻力曲线从 β_3 移到 β_1 , 而水泵性能曲线不变; 扬程则从 H_2 上升到 H_1 , 运行的工况点从 E 点移到 F 点, 此时水泵输出功率用矩形 OQ_2FH_1 表示, 其值为

$$P_F = \frac{rH_1Q_2}{102\eta}$$

式中: r 为输出介质单位体积质量;

η 为水泵的效率;

H_1 和 Q_2 分别为水泵在工况点 F 处的扬程和流量。

当用调速控制时, 用水量从 Q_1 降至 Q_2 时, 其水泵的转速由 n_1 变至 n_2 , 图2中的水泵性能曲线 $H-Q$ 明显变化; 而阻力曲线的终值 H_2 不变, 从而阻力曲线从 β_3 移到 β_2 , 因此水泵输出功率可用矩形 OQ_2DH_2 表示, 其值为

$$P_D = \frac{rH_2Q_2}{102\eta}$$

式中 H_2 和 Q_2 分别为水泵在工况点 D 处的扬程和流量。

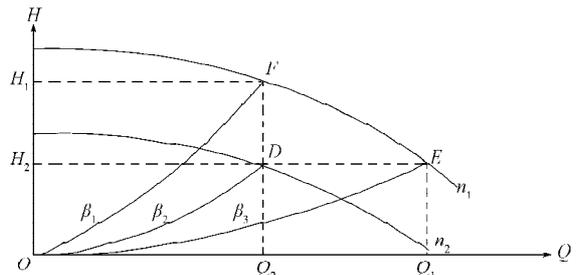


图2 水泵运行特征曲线

Fig. 2 The pump running characteristic curve

从图2中可以得出, 当由阀门控制改为调速控制后, 其节能效果显著, 其节能量为

$$\Delta P = P_F - P_D = \frac{rH_1Q_2}{102\eta} - \frac{rH_2Q_2}{102\eta} = \frac{r(H_1 - H_2)Q_2}{102\eta}$$

在系统正常运行时, 不仅要保证水泵工作在正常工作点附近, 而且要保证水泵工作点附近的相关参数处于良好的数值范围内, 这样才能充分地发挥水泵的工作效率。在变频调速恒压供水系统的整个运行过程中, 水泵工况点的变化如图3所示。

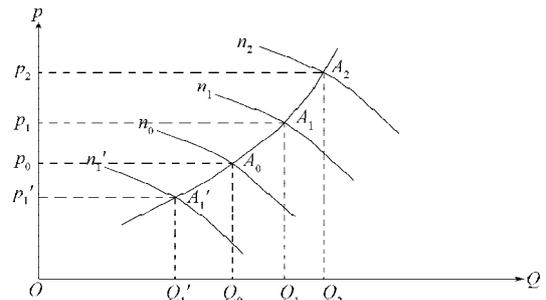


图3 水泵工况点的变化

Fig. 3 Pump operating point changes

由图3可知,在不同的水泵转速曲线 n 和不同流量 Q 作用下,对应着不同的水泵工况点,如图3中的 A_1', A_0, A_1, A_2 等工况点。假设水泵的起始工况点处于 A_0 处,此时水泵出水压力值为 p_0 ,供给的流量值为 Q_0 。当用户的用水量减到 Q_1' 时,在水泵转速 n_0 不变的情况下,从图可知水泵的出水压力必升高,此时可通过调节水泵转速使之运行在 n_1' 的状态下,即出现 A_1' 工况点的情况。同理,当用户的用水量增大到 Q_1 或 Q_2 时,同样可调节水泵的转速,使之处于 A_1 或 A_2 的工况状态下。

由图3还可知,适当调节水泵的转速 n 可使水泵处于不同的工况点下,但由于出水压力的不稳定必然导致供水管网中压力过大或过小的现象,这不利于实际的操作。从图2中可知,可以通过不同的阻力曲线来确定不同的水泵工况点。综合图2和图3可知,为维持供水管网中水压稳定在一个恒定的压力值附近,如图3中 p_0 值附近,可以通过适当调节水泵转速 n 就可满足不同的流量需求,使水泵处于不同的工况点下运行。变频调速的最终目的,就是通过调节水泵转速来促使供水管网内的水压力值维持在一个恒定的范围内,而不会随着用水量的变化而变化^[3]。

2 供水系统控制模型的基本特性

水泵由初始状态向管网进行恒压供水,供水管网从初始压力开始启动水泵运行,至管网压力达到稳定要求时经历2个过程:

- 1) 水泵将水送到管网中,这个阶段管网压力基本保持初始压力,这是一个纯滞后的过程;
- 2) 水泵将水充满整个管网,压力随之逐渐增加直到稳定,这是一个大时间常数的惯性过程。

参考大惯性环节特点,供水系统的模型可以近似为

$$G(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-\tau s},$$

式中: T_1 为供水系统的惯性时间常数;

k_1 为供水系统的增益;

τ 为供水系统的时滞常数。

变频器和电机可近似等效为时间常数为 T_2 的一阶惯性环节,系统中其他控制和检测环节,如继电器控制转换,压力转换等时间常数和滞后时间与原供水系统执行机构的时间常数和滞后时间常数相比,可忽略不计,均可等效为比例环节^[4]。

因此,供水系统的数学模型可等效为带纯滞后的2个惯性环节串联,并用

$$G(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-\tau s}$$

表示。

在以上系统中,惯性时间常数 T_1 由供水系统的用户规模决定,一般用户的数量越大,也就是供水系统所需的水流量值越大,系统的惯性时间常数也越大。系统的滞后时间由供水系统的最不利点决定,即由最不利点距离用户的距离和供水系统的平均流速决定。当水泵选定后,交流电机的机电时间常数就可以确定。由于供水系统的规模以及用户用水的不规律,导致供水系统模型的参数难以准确确定,并具有参数易变的特点。参考国内外应用研究的结果^[5],将供水系统的近似模型选定为

$$G(s) = \frac{0.8}{(50s + 1)(12s + 1)} e^{-24s}。$$

在恒压供水的闭环控制系统中,至今仍有90%左右的控制回路采用PID控制方案。但是,由于供水系统的非线性以及参数时变的特点,使得当用水量变化较大时,系统的运行状态变化范围也较大,并且固定参数的PID控制无法适应这种变化,控制品质变差,甚至造成系统不稳定和能量额外损失。

3 控制器的设计

通过以上分析可知,在供水过程中,一定要对用水工况有“预见性”,这样才能合理安排工作水泵的输出大小,同时在供水最不利的情况下,控制器能根据关键参数如:最大停机压力,最小开机压力,稳压压力,压力变化趋势,集中用水时间,市政管网进水压力等一系列动态参数,合理调整控制器参数,不断优化节能效果。这样的要求,运用传统的控制方法很难实现。

通过对系统建模分析,发现在供水应用中,随着用水量的增加,出水压力就会减少,以此为关键参数,引入无模型自适应控制(model free adaptive control, MFAC),利用管网压力作为主要输入参数,以用水量和变频器的上下限数据作为系统限制参数,被控系统可以通过下列的单输入单输出非线性离散时间方程来描述:

$$y(k+1) = f(y(k), \dots, y(k-n_y), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n_u)) \quad (1)$$

式中: $u(k)$ 和 $y(k)$ 分别表示被控系统在时刻 k 的系统输入量与输出量;

n_u 和 n_y 分别表示系统未知的输入及输出阶数;
 f 表示未知的非线性函数^[6]。

假设1 非线性系统(1)的输入量和输出量是可观测且是可控制的。具体可描述为, 对于某一个系统有界的期望的输出信号 $y^*(k+1)$, 存在有界的可行的控制输入信号 $u^*(k)$, 使得该系统在这个控制输入信号的作用下, 其系统的输出量等于系统的期望输出量。

假设2 系统(1)控制输入信号 $u(k), u(k-1), \dots, u(k-L+1)$ 都存在连续的偏导数。

假设3 系统(1)满足广义利普希茨(Lipschitz)条件。具体描述为, 对任意的常数 k 和 $\Delta u(k) \neq 0$, 满足关系

$$|\Delta y(k+1)| \leq b |\Delta u(k)|, \quad (2)$$

式中: b 是常数;

$\Delta y(k+1)$ 和 $\Delta u(k)$ 分别表示系统在2个连续时间点下的输出量和输入量的变化值, 即

$$\Delta y(k+1) = y(k+1) - y(k),$$

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)。$$

定理1 非线性系统(1)如果同时满足以上3个假设, 则当 $\Delta u(k) \neq 0$ 时, 存在一个伪偏导数(pseudo-partial-derivative, PPD) $\phi(k)$, 且

$$\Delta y(k+1) = \phi(k) \Delta u(k), \quad (3)$$

式中 $\phi(k)$ 满足 $|\phi(k)| \leq b$, 其中 b 为常数。

为使非线性系统(1)合理地转化为动态线性化方程式(3), 需对控制系统输入量的变化量 $\Delta u(k)$ 加以限制。同时, 由于整个自适应控制系统工作在动态闭环环境下, 因此在整个算法过程中保证 $\Delta u(k) \neq 0$ 的同时, 可加入一些可调参数用来限制 $\Delta u(k)$ 的变化, 使整个系统的控制处于合理的范围内。为此, 引入控制输入准则函数

$$J(u(k)) = |y^*(k+1) - y(k+1)|^2 + \lambda |u(k) - u(k-1)|^2, \quad (4)$$

式中 λ 为权重系数。

式(4)中引入了 $\lambda |u(k) - u(k-1)|^2$ 惩罚项, 既限制了输入量变化范围, 又克服了系统稳态跟踪误差。

将式(3)代入式(4), 同时对输入量 $u(k)$ 两边求导并令其为零, 可得

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho_k \phi(k)}{\lambda + |\phi(k)|^2} (y^*(k+1) - y(k)), \quad (5)$$

式中 $\rho_k \in (0, 2)$ 为步长序列。

权重因子 λ 的作用是限制系统输入变化量 $\Delta u(k)$ 的变化, 保证动态线性系统(3)对非线性系统(1)拥有一个合理的替代范围, 其间接地限制了伪偏导数的变化范围, 同时可避免式(5)中分母为零的情

况。 λ 是一个非常重要的可调参数, 其取值可能很大, 取值的大小能够改变系统的动态特性^[6-9]。

4 执行部件设计

执行部件主要包括加压水泵与管网结构以及相关阀等。在设计中通过优化控制器, 使系统执行更加稳定, 从而具备了节能运行模式, 同时通过对执行部件的优化设计, 强化了系统工作效率, 增强了节能效果。

采用叠压变频泵替换传统的管道加压泵, 这样可以充分利用市政管网的压力, 差多少补多少, 可有效减少能源消耗。叠压变频泵的性能曲线与普通变频泵的性能曲线的区别在于增加了城市管网的余压线, 使原来的定压线随城市余压的波动上下移动, 因此它没有固定的定压线, 而只有对应于城市最低最高余压的水泵扬程。叠压变频泵的工作点就在此区间内运行, 并保持恒定的系统压力, 如图4所示。

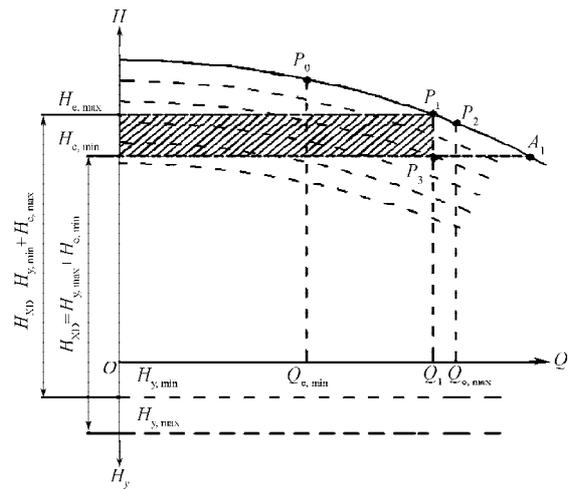


图4 变频泵工作区间

Fig. 4 Variable frequency pump working range

图4中, 向上的纵坐标表示叠压泵提供的扬程值 H , 向下的纵坐标表示城市管网中能提供的扬程值 H_y 。当城市管网中压力较大时, 能够达到最大的扬程为 $H_{y,max}$, 此时水泵所需提供的扬程就为 $H_{e,min}$; 当城市管网中压力较小时, 能够达到最小的扬程为 $H_{y,min}$, 此时水泵所需提供的扬程就为 $H_{e,max}$ 。因此, 叠压泵将根据城市管网中的压力值, 即其所提供扬程值, 再施加一个合理转速, 使其满足最终的扬程数值为 H_{XD} , 这样有效利用了城市管网中的压力, 满足了系统节能的需求^[10-11]。

结合控制器的设计, 在城市管网余压波动较大时, 首先要看水泵扬程工作点是否在水泵的高效段内, 如不在高效段内, 系统应及时切换其他功率的

叠压泵,使得余压的波动幅度可控,并始终处在高效区。多泵组合工作时,配置的台数应根据水泵流量总和满足系统最大流量为准则。

通过改变传统的直角连接方式来进行管道的结构设计。因为流体流入管道后会对管道壁产生附加作用力,使管道壁面发生变形,特别是对于管道直角弯曲段,这种附加作用更严重;同时,由于管道的弹性作用,管道壁面又会反过来影响管内流体,两者之间存在耦合关系。弯管内的能量损失主要发生在弯管内侧壁附近,在 90° 截面区域损失尤为严重,静压分布从 0° 到 90° 截面始终是外侧高于内侧。湍动能的分布表明,进口段湍动能小,在第一个拐弯处湍动能加大,在第二汇流处湍动能持续增加,弯管内侧壁的湍动能一般比外侧壁大。在弯曲管道的转角和汇流处,流体的流速较其他各点高;在流速梯度大的位置,湍动能也大。重新设计的管道拐角呈 120° ,有效降低了结构性能耗损失,以及水在流动过程中经过弯管而产生的紊流导致的能耗损失。图5为传统的弯管,图6为改进之后的弯管。在考虑系统更加节能且不影响正常工作的情况下,在多泵并行供水的汇流管设计时,应尽可能采用图6所示的弯管结构。



图5 传统弯管

Fig. 5 The traditional pipe

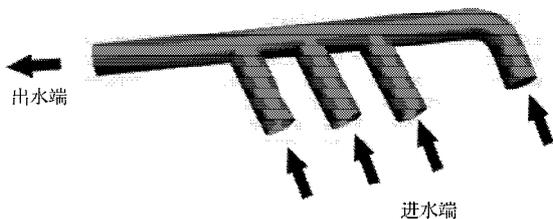


图6 改进后弯管

Fig. 6 The improved elbow

为保证系统的节能性,特别是针对小额用水的状态,在此引入高位密封充气罐和出水端压力罐。高位密封充气罐一般安装在供水点的最高点,这对于高层少量用水时,节能效果明显。压力罐一般安装在系统出水端,对于小额用水有一定的补充作用,主要用来稳流和消除水锤现象。当系统在加压输出时,水压缩压力罐内空气,部分水进入容器;当系统停

止运行后,如果有小额的用水,压力罐就通过释放压力补充用水,而不需要启动系统,从而达到节能的目的。对于用水量变化很大的用水用户,一般采取大小泵组合的结构方式进行供水;对于供水管网比较大或耗损较高的管网用水用户,一般引入辅泵的工作方式;对于其他附加工作要求,如含有备用水箱的用水用户,配备消毒设备的用水用户,都可以通过修改控制器的工作流进行定制开发。事实证明定制开发比传统开发的供水节能效果更好。

5 低碳节能分析

本文改进的供水系统采用全自动变频恒压按需调整的节能技术,通过本地控制器的流程化控制,对参与执行的泵组进行分配,在泵组的执行过程中,通过排列算法得到所有执行泵的组合,将每一种组合作为一种状态。对于状态之间的切换,需考虑一些条件,如:当前变频泵已处于工频运行状态下,然而出水压力值仍低于最低允许压力,输出压力的增长率小于 0.01 MPa/s ,系统将延时 5 s 后切换;输出压力的增长率小于 0.03 MPa/s ,系统延时 15 s 后切换;输出压力的增长率小于 0.1 MPa/s ,系统延时 2 min 后切换。其它状态转移的延时时间由系统运算决定,且要求加入的泵是目前休息时间最长的泵,然后由变频器变频拖动。减泵的条件是当前变频泵已处于最低转速运行状态下,同时水压在允许范围内,如果水压成上升趋势,系统将工作时间最长的泵停止;如果水压有下降趋势,且趋势明显,则延长减泵时间,如果趋势不明显则减少减泵时间。所有变换泵组合的前提条件是,保证水压稳定,波动少,尽量维持系统工作在节能状态。

湖南省株洲市某小区因老系统损坏,重新安装设计供水系统后,节能效果明显,以前每月耗电 $3\ 300$ 度,现在为 $1\ 980$ 度。整个系统有 3 台不同型号的叠压泵进行供水输送,用水高峰时 3 台泵可同时运行,在非用水高峰时采用上述的节能运行方式。通过实际应用对比表明,本系统设计的水泵使用周期明显延长,在节能降耗和装置的平稳性上也取得了明显的效果,经济效益明显。

实现城市低碳节能的主要措施有:加强相关管理,提高能源利用效率,减少能源浪费;使用低碳节能产品设备,通过选用节能(或低碳)认证水泵、风机电机等设备,减少城市供水总能耗;发挥政府的职能作用,综合运用经济政策及相关法律法规促进城市节能低碳化的实现;增强员工低碳理念,引

导公众参与低碳创新活动,实现全方位城市节能低碳化。

6 结语

通过长期的供水数据分析,所设计出来的新型节能供水系统满足了当前供水行业技术革新的需求,新系统已经在现实生活中得到了运用,它具有结构简单、工作可靠,动态参数可调等优势,基于MFAC和远程通讯的基础,实现了自主控制与远程控制的和谐统一,提高了系统的可靠性和可维护性。系统在满足人们用水需求的同时,在很大程度上减少了能耗,在倡导节能环保的今天,该技术成果拥有广阔的推广空间。

参考文献:

- [1] 刘宜,方桂笋,李晨晨,等.基于PLC的泵站供水控制系统的设计[J].排灌机械,2007,25(6):17-20.
Liu Yi, Fang Guisun, Li Chenchen, et al. Design of Water Supply Control System Based on PLC[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2007, 25(6): 17-20.
- [2] 汤燕燕,张雅君.城市节水“碳足迹”的探讨[J].环境保护与循环经济,2010(10):73-75.
Tang Yanyan, Zhang Yajun. Discussion on Urban Water-Saving “Carbon Footprint”[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2010(10): 73-75.
- [3] 韩安荣.通用变频器及其应用[M].北京:机械工业出版社,2003:5-12.
Han Anrong. General Frequency Converter and Application [M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 5-12.
- [4] 初乃茂.变频恒压供水系统的研究与应用[D].大连:大连理工大学,2007.
Chu Naimao. Research and Application of Frequency Constant Pressure Water-Supply System[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [5] 郑美容.恒压供水系统中智能控制方式的应用研究[D].重庆:重庆大学,2009.
Zheng Meirong. The Intelligent Control Policy Applied Research on Water Supply System[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [6] 曹荣敏,侯中生.pH值中和反应过程的无模型学习自适应控制[J].计算机工程与应用,2006,42(28):191-194.
Cao Rongmin, Hou Zhongsheng. Model-Free Learning Adaptive Control of a pH Neutralisation Process[J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(28): 191-194.
- [7] Tan K K, Lee T H, Huang S N, et al. Adaptive Predictive Control of a Class of SISO Nonlinear Systems[J]. Dynamics and Control, 2001, 11(2): 151-174.
- [8] 李建平,黄宜山,刘东南.Lorenz系统的自适应反同步控制及其应用[J].湖南工业大学学报,2011,25(1):93-97.
Li Jianping, Huang Yishan, Liu Dongnan. Adaptive Anti-Synchronization Control of Lorenz Chaotic System and Its Application[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2011, 25(1): 93-97.
- [9] 赵士军.基于无模型自适应控制的温度控制实验平台设计与实现[D].北京:北京交通大学,2010.
Zhao Shijun. The Design and Implementation of Temperature Control Experiment Platform Based on Model-Free Adaptive Control[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [10] Coulbeck B, Ulanicki B, Rance J P, et al. Pressure Control of a Moscow Water Supply System Using Expert System Technology[J]. Measurement and Control, 1996, 18(4): 193-201.
- [11] Man K F, Yung W K, Chow T W S. Adaptive Control Strategy of a Water Supply System[C]//Third International Conference on Software Engineering for Real Time Systems. Cirencester: [s.n.], 1991: 125-128.

(责任编辑:邓光辉)