

泵节能调速控制系统的研究

胡 建, 赵雪松, 陈明新

(安徽工程大学 机械与汽车工程学院, 安徽 芜湖 241000)

摘 要:通过对泵节能调速控制系统的原理分析, 建立数学模型, 利用奈奎斯特稳定判据分析其稳定性, 判断系统的能观性和能控性, 利用极点配置改善系统的性能, 通过 simulink 进行仿真, 比较系统的性能. 利用 PLC 编程、Wincc flexible 与触摸屏结合对系统进行组态, 实现友好的人机界面控制. 结果表明: 泵节能调速控制系统稳定性良好, 具有能观性和能控性, 极点配置提高了系统的性能. 通过实验验证了泵节能调速控制系统能够得到精确的控制, 从而实现泵节能调速控制, 满足工业生产要求, 降低能源的消耗.

关键词: 稳定性; 能观性; 能控性; 极点配置; Wincc flexible; 触摸屏

中图分类号: TH3; TP273 文献标志码: A 文章编号: 1674-3326(2013)04-0289-05

Research on Energy-saving Pump Speed Regulation Control System

HU Jian, ZHAO Xue-song, CHEN Ming-xin

(College of Mechanical and Automotive Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: By analyzing principle of the energy-saving pump speed regulation control system, the mathematical model is established. The stability of the system is analyzed by Nyquist stability criterion, and the observability and controllability is judged. The pole assignment is used to improve the performance of the system. The performance is compared by Simulink simulation. By using PLC programming, Wincc flexible combined with touch screen on system configuration, the friendly HMI control is realizes. Results show the followings: The stability of the energy-saving pump speed regulation control system is good, it has good observability and controllability, and the performance of the system is improved by pole assignment. The energy-saving pump speed regulation control system can be precisely controlled is verified by experiment, thus energy-saving speed regulation control of the pump is realized to meet the requirements of industrial production and reduce energy consumption.

Key words: stability; observability; controllability; pole assignment; Wincc flexible; touch screen

0 引言

随着现代工业的不断发展, 对能源的需求不断增加, 能源的消耗也日益增大, 因此, 减少能源的消耗、保护环境已经是现代社会所倡导的主题. 泵在工业生产中应用十分广泛, 如何有效地降低泵的能源消耗量, 成为现代学者研究的重点, 本文结合具体的工业生产过程, 提出一种泵的节能调速控制系统. 根据泵节能调速控制系统的工作原理建立泵的数学模型; 对数学模型进行静态性能和动态性能分析, 采用极点配置的方法提高系统的性能; 通过 PLC^[1]编程, 运用 Wincc flexible 与触摸屏结合对泵节能调速控制系统进行组态, 实现友好的人机界面组合. 实验表明, 此控制系统的设计是可行的, 能够精确地实现泵节能调速控制.

1 控制系统数学模型的建立

1.1 泵节能调速控制系统原理

为了实现泵的节能调速, 降低对能源的消耗, 结合具体工业生产要求, 在脱硫除尘中通过控制泵的转速控制泵的流量, 达到脱硫除尘的目的. 泵的节能调速控制系原理图如图 1 所示.

收稿日期: 2013-05-19 修回日期: 2013-06-20

基金项目: 安徽省科技攻关资助项目(12010402105)

作者简介: 胡建(1987-), 男, 安徽亳州人. 硕士生, 研究方向: 数字化设计与制造技术. E-mail: 15855985858@163.com.

由图 1 可知, 输入信号与反馈信号比较, 得到误差 e_n , 误差 e_n 经过控制器处理, 由 D/A 转换器把数字信号转化为模拟信号, 通过改变变频器的频率来改变电机的转速, 电机转速的改变可以改变泵的转速, 进而改变泵的流量, 由流量传感器检测泵的流量, 经 A/D 转换器的转换, 形成闭环反馈控制, 精确控制泵的流量值, 从而减少不必要的流量的浪费, 节约能源。

1.2 节能调速控制系统数学模型的建立

为了研究泵的节能调速, 就要建立节能调速控制系统的数学模型, 由于精确数学模型的建立十分困难, 故采用简化的近似数学模型研究泵的节能调速控制^[2]。泵在工作时可分为两个过程, 即压力上升过程和恒压过程。压力上升过程等效为时间常数为 T_1 的惯性环节, 恒压过程等效为一个滞后环节。变频器和电机是时间常数为 T_2 的惯性环节。其他环节的时间常数均可忽略不计, 等效为一个比例环节。综上可得泵节能调速控制系统的数学模型为

$$G(s) = \frac{K \exp(-\tau s)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (1)$$

式中 K 是系统的增益常数, T_1 是惯性时间常数, T_2 是电机和变频器的时间常数, T 是滞后时间常数。经试验和相关知识可得系统的增益常数 $K=20$, 惯性时间常数 $T_1=32.8$, 电机和变频器的时间常数 $T_2=0.2$, 滞后时间常数 $\tau=1.5$ 。则泵的节能调速控制系统框图如图 2 所示。由图 2 可知, 泵的节能调速控制系统的数学模型为

$$G(s) = \frac{20 \exp(-1.5s)}{6.56s^2 + 33s + 1} \quad (2)$$

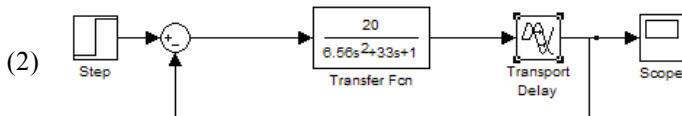


图 2 泵节能调速控制系统框图

Fig. 2 The block diagram of energy-saving pump speed regulation control system

2 节能调速控制系统的稳定性分析

可用奈魁斯特稳定判据、对数判据和李亚普诺夫方法等判定传递函数系统的稳定性。本文采用奈魁斯特稳定判据^[3]判定节能调速控制系统的稳定性。

奈魁斯特曲线逆时针包围点 $(-1, j0)$ 的圈数等于开环系统的极点数 P_R 是闭环系统稳定的充要条件, 一般而言开环系统稳定, 则 $P_R=0$, 即闭环系统稳定的充要条件是奈魁斯特曲线不包围点 $(-1, j0)$ 。利用 Matlab 编程对泵节能调速控制系统的稳定性进行分析, 开环系统的奈魁斯特曲线如图 3 所示, 开环系统的奈魁斯特曲线不包围点 $(-1, j0)$, 该系统特征方程不稳定根的个数为 0。由上述理论可知, 系统的开环系统和闭环系统均稳定。

3 节能调速控制系统的能控性和能观性分析

系统的能控性和能观性是控制系统中重要的概念。能控性是指控制系统的状态是否可以控制。能观性是指系统状态的变化是否能通过输出检测反映出来。系统的能观性是确定一个最优控制系统有无解的前提, 因此在设计一个最优控制系统之前一定要对系统的能观性和能控性进行判断。

3.1 节能调速控制系统的能控性分析

系统状态能控的判断依据是对于线性连续定常的系

统 $\dot{X} = AX + Bu$, 状态完全能控的充要条件是其能控性矩阵 $M = [B : AB : A^2B : \dots : A^{n-1}B]$ 满秩^[4],

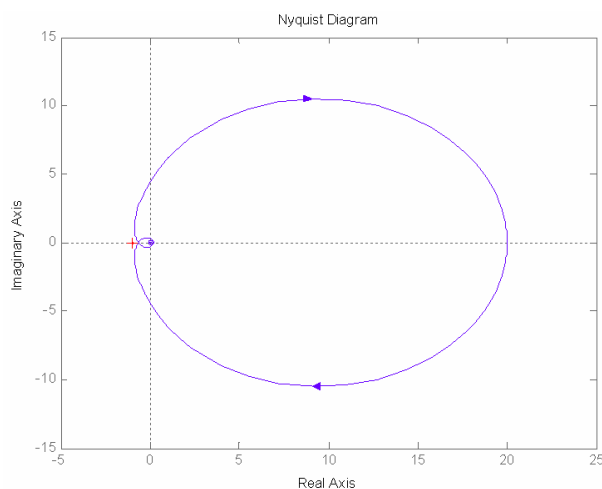


图 3 节能调速控制系统开环奈魁斯特曲线

Fig. 3 Open loop Nyquist curve of energy-saving speed regulation control system

即 $\text{rank } \mathbf{M} = n$.

由式(2)可求得此控制系统的状态方程的矩阵 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -5.0305 & -0.1524 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, 矩阵 $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$, 由此可求得矩阵 $\mathbf{M}$ 秩为 $\text{rank } \mathbf{M} = \text{rank} \begin{bmatrix} 1 & -5.0305 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = n = 2$, 能够满足状态能控性的判别依据, 因此泵节能调速控制系统具有能控性.

3.2 节能调速控制系统的能观性分析

线性连续定常系统的状态方程为 $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}u$, $\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}$ 状态完全能观的充要条件是矩阵 $\mathbf{N} = [\mathbf{C}^T : \mathbf{A}^T \mathbf{C}^T : \dots : (\mathbf{A}^T)^{n-1} \mathbf{C}^T]$ 满秩^[5], 即 $\text{rank } \mathbf{N} = n$.

由式(2)可求得此控制系统的状态方程的矩阵 $\mathbf{C} = [0 \quad 3.0488]$, 系统的能观性判别矩阵的秩 $\text{rank } \mathbf{N} = \text{rank} \begin{bmatrix} 0 & 3.0488 \\ 3.0488 & 0 \end{bmatrix} = n = 2$, 能够满足状态能观性的判别依据, 因此泵节能调速控制系统具有能观性.

4 节能调速控制系统的极点配置

在设计控制系统时通过改变控制系统的极点配置来改变控制系统的根的分布, 从而达到改善控制系统性能的目的. 控制系统的极点配置决定了控制系统的动态响应, 采用状态反馈可以使控制系统获得期望的极点^[6].

此控制系统极点配置的综合性能指标如下所示: 系统输出的超调量 $M \leq 5\%$, 峰值的时间 $t \leq 0.5$ s, 系统的频宽 $\omega \leq 10$ rad/s, 对阶跃信号而言系统的跟踪误差 $e=0$. 由极点配置的相关知识可知, 此控制系统的期望极点数 $n=2$, 主导极点决定了控制系统的性能指标. 此控制系统是二阶系统, 由其关系式可确定主导极点.

$$M = \exp[-\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}], \quad (3)$$

$$t = \pi/[\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}], \quad (4)$$

$$\omega = \omega_n \sqrt{1-2\zeta^2 + \sqrt{2-4\zeta^2 + 4\zeta^4}}. \quad (5)$$

式中 ζ 是系统阻尼比, ω_n 是系统的无阻尼固有频率.

由上可知, $M = \exp[-\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}] \leq 5\%$, 得 $\zeta \geq 0.707$, 故选 $\zeta = 0.707$, 即最佳阻尼比. $t = \pi/[\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}] \leq 0.5$ s, 由 $\zeta = 0.707$, 可得 $\omega_n \geq 9$ rad/s, 取 $\omega_n = 10$ rad/s, 根据公式 $s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$ 可确定主导极点为 $s_1 = -7.07 + j7.07$, $s_2 = -7.07 - j7.07$.

上述即为系统的期望极点. 根据期望极点可得系统的特征方程

$$f(s) = s^2 + 14.1s + 100. \quad (6)$$

因此极点配置之后的节能调速控制系统的数学模型为

$$G_2(s) = 20(s^2 + 14.1s + 100)^{-1} \exp(-1.5s). \quad (7)$$

计算状态反馈矩阵 $\mathbf{K}$, 由式(2)

可知此控制系统的特征方程为 $f(s) = s^2 + 5.03s + 0.15$, 则有 $a^1 = 5.03$, $a^2 = 0.15$. 由系统的期望极点构成的特征多项式为 $f^*(s) = s^2 + 14.1s + 100$, 则 $a^{*1} = 14.1$, $a^{*2} = 100$. 由此可得状态反馈矩阵 $\mathbf{K} = [a^{*2} - a^2 \quad a^{*1} - a^1] = [99.85 \quad 9.07]$.

为了验证极点配置之后系统的性能得到改善, 本文采用 simulink 对控制系统进行仿真. 图 4 是未加入任何优化、加入 PID 优化以及加入极点配置后带有 PID 优化的仿真模型图.

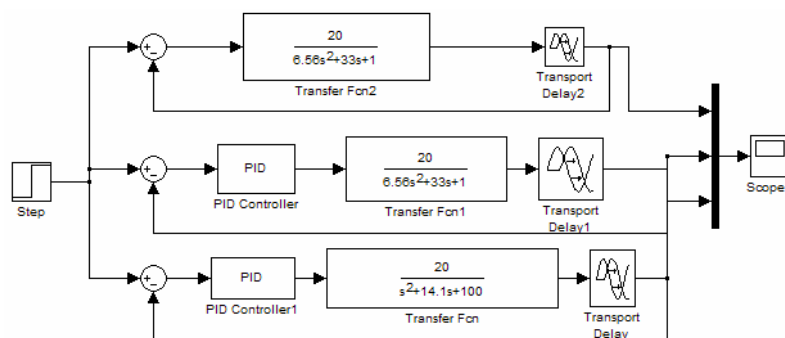


图 4 节能调速控制系统各种情况的仿真模型

Fig. 4 Simulation model of energy-saving speed regulation control system in all situations

由图 4 结合 matlab/simulink 对此控制系统进行仿真, 当输入信号是单位阶跃信号时, 系统的输出如图 5 所示. 由图 5 可知: 此控制系统在没有优化时, 系统在 39 s 达到稳定, 当系统稳定之后, 阶跃输出曲线没有和单位阶跃输入重合, 不能达到理想的输出信号, 此控制系统的性能不理想; 当加入 PID 控制后, 此控制系统稍有超调量, 同时系统在 15 s 达到稳定, 加入 PID 后使输出在 15 s 后与单位输入重合, 达到理想的输出信号, 从而使系统的性能得到一定的改善. 当加入极点配置后系统的超调量为 0, 系统在不到 8 s 时就达到稳定, 比单纯加入 PID 的效果更好, 由此可知, 极点配置使系统的性能得到很大提高.

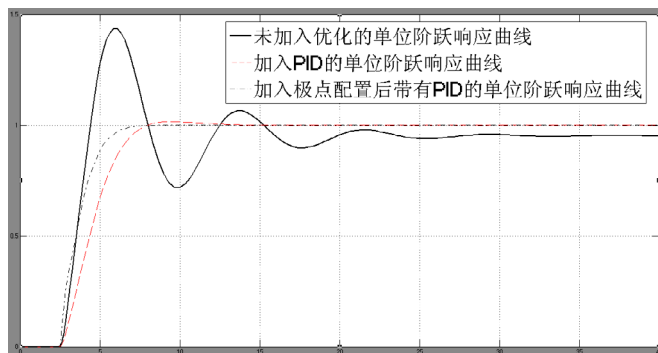


图 5 节能调速控制系统的单位阶跃响应图
Fig. 5 Unit step response diagram of energy-saving speed regulation control system

5 实验验证

上述对泵节能调速控制系统理论分析, 从理论上阐述了如何改善系统的性能. 结合工业生产的具体要求, 本文采用 s7-200 PLC 对泵节能调速控制系统进行编程, 利用 Wincc flexible 软件结合 Smart 700IE 触摸屏对 PLC 编写的程序进行自动控制.

5.1 Wincc flexible 软件编程

本文以泵节能调速控制系统为例, 利用 Wincc flexible 对此控制系统进行组态^[7], 连接设备选择 Smart 700IE, 定义相关的变量, 对此控制系统进行组态. 组态的主画面如图 6 所示. 由图 6 可知, 可以通过手动对流量上限和下限设定值以及变频器频率值进行设定, 以达到控制的目的. 按下启动按钮, 设定流量的上限和下限值, 系统便开始工作, 系统工作指示灯亮. 若流量值大于流量的上限设定值, 则流量上限报警指示灯亮; 若流量值小于流量下限设定值, 则流量下限报警指示灯亮. 从而及时调整系统的流量值, 减少不必要的资源浪费, 实现泵节能调速的控制.



图 6 组态画面
Fig. 6 Configuration screen

5.2 触摸屏控制的分析

上述只是对 Wincc flexible 组态进行研究, 要想实现工业自动化控制, 需把组态好的界面下载到工业触摸屏中^[8]. 本文选用的触摸屏是 Smart 700IE 触摸屏. Smart 700IE 是在工业中经常用到的触摸屏, 它具有能够方便地实现人机界面的操作, 实现对现场生产的自动化控制, 而且 Smart 700IE 具有体积小、性价比高等优点. 本文用的组态软件是 Smart 700IE 触摸屏和西门子 PLC 组成的工业控制系统. 在此控制系统中, Smart 700IE 触摸屏作为上位机主要实现两个功能: (1) 监视. 通过图形、曲线以及数据显示 PLC 的存储器数据和 PLC 的状态, 从而显示整个控制系统的控制状态. (2) 控制. 通过触摸屏修改 PLC 的内部数据和状态, 可达到现场控制的目的. 下位机是 PLC, 下位机不时地读取模拟量信号, 再把模拟量信号转化为数字量信号反馈给上位机. 上位机与下位机之间通过串口通信.

电缆连接, 传输数据. 触摸屏组态方法的连接通道有“使能以太网通道”和“使能串口通道”, 在此采用“使能串口通道”. 当给触摸屏上电后, 得到如图 7 所示的启动界面.

点击“Transfer”, 可以把 HMI 设备设置为传送模式; 点击“Start”, 则会启动 HMI 设备上的现有项目. 如果面板带有 Wincc Flexible, 在给触摸屏上电以后, 未做任何操作, 则会自动进入该项目, 若面板没有带 Wincc Flexible, 在给触摸屏上电以后, 未做任何操作, 则控制面板会跳转到

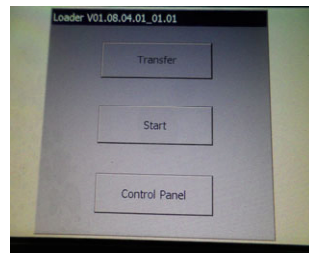


图 7 触摸屏启动界面图
Fig. 7 Start interface of touch screen

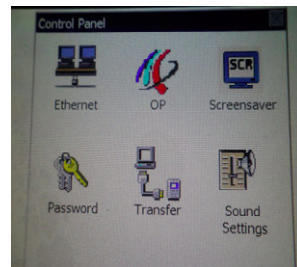


图 8 触摸屏控制面板界面
Fig. 8 Control panel interface of the touch screen

“Transfer”状态. 点击“Control Panel”打开控制面板, 在控制面板中可以进行多种操作设置. 以传送设置为例, 点击“Transfer”打开传送设置, 如图 8 所示. 选择“Channel1”通道, 点击“OK”按钮, 如图 9 所示, 即完成使能串口通道的连接.

只有完成上述的传送模式设置以后, 才可以下载项目到触摸屏中, 在此实验中选择 PPI RS485 通信电缆连接 PC 机与触摸屏, 即可完成对上位机的项目下载. 将 Wincc Flexible 编写好的程序下载到触摸屏中, 给 PLC、触摸屏和整个控制回路通电, 则此控制系统将正常运行. 首先进入操作说明界面如图 10 所示, 操作人员在操作系统之前必须认真阅读操作说明, 以避免不必要的操作失误.

点击“进入主界面”切换到安徽工程大学脱硫除尘实验界面, 如图 11 所示. 根据实验要求, 设定流量值的上限为 $4.0 \text{ m}^3/\text{h}$, 设定流量的下限设定值为 $3.9 \text{ m}^3/\text{h}$. 按下“启动按钮”. 当系统稳定后, 流量值显示为 $3.959 \text{ m}^3/\text{h}$, 与流量传感器测量的流量值相比较误差很小, 可以忽略不计. 由图 11 可知, 变频器频率值为 42 Hz , 变频器实际显示的频率值也是 42 Hz , 误差为 0. 这样可以精确地控制泵的流量, 进而很好地实现节能调速的目的.

按下“停止按钮”, 则系统会立即停止运行. 当系统出错时, 这样做可以及时地终止此控制系统. 点击“进入流量趋势图界面”切换到流量趋势图界面, 如图 12 所示. 由图 12 可知, 此控制系统的流量曲线波动很小, 流量维持在 $3.954 \text{ m}^3/\text{h}$ 附近, 在设定的流量上下限之间. 满足工业生产的要求, 通过流量趋势界面可以在线实时监视流量的变化, 从而更好地实现节能调速的目的.

6 结论

(1)通过理论分析建立泵节能调速的数学模型, 利用奈魁斯特稳定判据分析得出此系统是稳定的, 经分析可知此控制系统具有能观性和能控性, 采用极点配置改善控制系统的性能. 结果表明, 泵节能调速控制系统的性能得到很大提高.

(2)利用 Wincc flexible 和触摸屏结

合对泵节能调速控制系统进行组态, 实现友好的人机界面控制. 实验表明, 此组态系统能精确地控制泵的流量, 从而实现泵节能调速的控制满足工业生产的要求, 降低能源的消耗.

参考文献:

- [1] 蔡滨, 吴禄慎. 基于 PLC 双闭环控制供水系统的研究[J]. 计算机与现代化, 2010(2): 124-126.
- [2] 储彭黄. 砂浆泵阀系统设计与控制研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2012.
- [3] 孔祥东, 王益群. 控制工程基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 36-124.
- [4] 谢广明, 王龙, 叶庆凯. 一类混杂动态系统的能控性(II): 含单时滞的情形[J]. 应用数学和力学, 2003(9): 929-939.
- [5] 朱彦. 带分布型时滞的分数阶控制系统能观性的条件[J]. 五邑大学学报: 自然科学版, 2012(3): 23-27.
- [6] 李学园, 彭绍雄, 邹强, 等. 极点配置控制分析[J]. 火力与指挥控制, 2012(8): 177-183.
- [7] 刘升愿, 韩秋实, 李启光, 等. WinCC Flexible 在数控机床界面开发中的应用[J]. 精密制造与自动化, 2013(1): 52-56.
- [8] 薛凤利. S7_200SMART 在啤酒灌装机上的应用[J]. 可编程控制器与工厂自动化, 2013(1): 54-56.

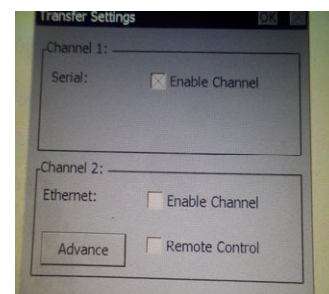


图 9 触摸屏传送设置界面
Fig. 9 Transfer settings interface of touch screen

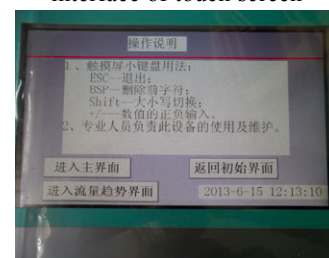


图 10 操作说明图
Fig. 10 Operation instructions

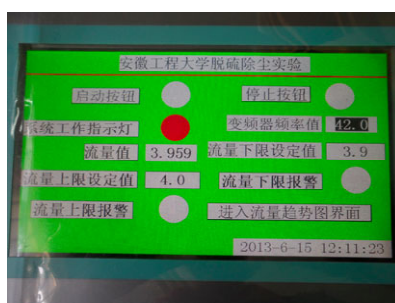


图 11 实验主界面
Fig. 11 Main interface of the experiment

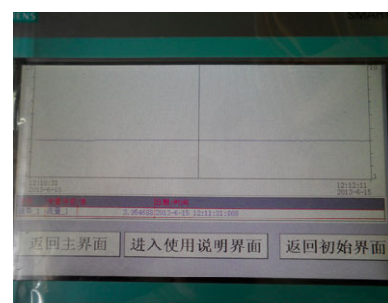


图 12 流量趋势界面图
Fig. 12 Interface diagram of flow trend

【责任编辑 黄艳芹】