

自动控制系统中感性器件干扰成因及抑制措施的研究

Interference Caused by Inductive Devices in Automatic Control System

张 波 黄 静 (浙江理工大学信息电子学院,浙江 杭州 310018)

摘要

自动控制系统中继电器、接触器、电磁阀等感性器件在接通和断开时,会产生很大的浪涌电压。这会导致严重的电磁干扰和瞬间噪声干扰,对控制系统造成很大危害。对感性器件造成干扰的成因做了详细分析,并提出了干扰抑制的基本措施。经实践证明:这些措施对抑制感性器件干扰效果非常明显。

关键词:控制系统,感性器件,浪涌电压,干扰抑制

Abstract

When inductive devices such as relays, contactors and electromagnetic valves in automatic control system turn on and turn off, it will cause surging voltage. This voltage will result in serious electromagnetic interference and transit noise interference which is bad for the control system. In this paper, it analyses the reasons for interference caused by inductive devices in details, and it gives effective solutions to interference suppression. Practice proves that these measures have positive effect.

Keywords: control system, inductive devices, surging voltage, interference suppression

在机电一体化的自动控制系统设计过程中,不可避免地使用到许多的感性器件。这些器件不仅会产生电磁干扰,而且会造成触点间的电火花或电弧干扰(也称为瞬变噪声干扰)。这种干扰不仅会影响控制系统的正常工作,而且会对电源造成污染使电网受到冲击。

近期在水质综合毒性在线自动分析控制系统的设计研究中,使用了电磁阀和继电器等感性元器件。初步设计中对感性器件抗干扰的设计考虑不足,出现了许多问题:系统程序经常跑飞,控制器死机;器件出现误操作,系统无法正常工作。本文主要针对该系统设计过程中出现的问题进行分析,从而得出自动控制系统设计中抑制感性器件和设备干扰的基本措施。

1 干扰成因分析

系统的关键执行单元是数据采集部分,执行器件主要是步进电机和电磁阀。这两种器件皆为感性负载,是引入干扰的主要器件。设计中系统要求步进电机扭矩比较小,成熟的驱动电路具有良好的抗干扰能力。所以电磁阀控制部分是本系统最大的干扰来源。

为实现测试液剂的精确添加,系统设计中采用了精密的电磁阀作为流量电磁开关。鉴于以往设计中经常遇到电压不足导致电磁阀不能完全打开的情况,系统选用交流 220V 供电电磁阀以满足对其完全开闭控制的要求。电磁阀的开闭控制则采用了性价比合理的继电器作为关键控制器件。控制电磁阀的驱动电路框图如图 1。

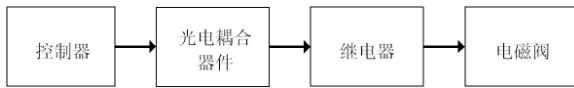


图 1 电磁阀驱动电路框图

由图 1 可以看出,系统引入了两种感性器件:继电器和电磁阀。系统测试运行未接入电磁阀时,运行正常。当接入电磁阀时,系统出现程序跑飞,死机等现象。这就证实了:电磁阀是本系统最主要的干扰源。本文将针对电磁阀开闭时产生干扰的情况进行详细的分析。

电磁阀开启和断开时,其内部线圈中电流会发生突变。由电

磁感应定律可知,电路中会形成一个很大的反向感应电动势,这个感应电动势便是系统产生干扰的根源所在。感性线圈可以等效成理想电感和电阻的串联,线圈本身又具有分布电容。把电源电压在某时刻的瞬时值用直流电源来等效。电磁阀断开前后的等效电路如图 2。

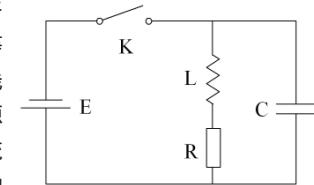


图 2 电磁阀断开时等效电路

开关 K 闭合电路处于稳态时电容电压为 E ,流过电感的电流为 $I=E/R$ 。当开关断开后电磁阀侧电路构成 RLC 二阶串联网络。电容电压 U_C 将按照二阶网络的规律变化。由基尔霍夫定律可得:

$$U_C + U_L + U_R = 0$$

由 $U_L = L \frac{di}{dt}$, $U_R = R_i$, $i = C \frac{du_c}{dt}$, 可得二阶齐次微分方程:

$$LC \frac{d^2 U_C}{dt^2} + RC \frac{dU_C}{dt} + U_C = 0$$

其特征方程为: $LCs^2 + RCs + 1 = 0$

由此解得特征根为:

$$s_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

特征解的情况可分为三种情况:

1) $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, s_1, s_2 为两个不相等的实根。此时电路处于过阻尼振荡状态。

2) $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, s_1, s_2 为两个相等的实根。电路处于临界阻尼振荡状态。

3) $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, s_1, s_2 为两个共轭虚根。电路处于欠阻尼振荡状态。

由物理知识和电路分析知识可知,当 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 电路处于欠阻尼振荡状态时, u_c 会出现最大值。经计算得:

$$U_c(t) = A e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi)$$

其中, $\alpha = \frac{R}{2L}$, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ 。A 的值与 0 时刻初始值 $i_L(0)$, U_c 有关。

开关断开后, $U_c(0)$ 为 0 时, $i_L(0)$ 将达到最大值 $\sqrt{21}$ 。此种情况下, 电感中储能最大。负载侧电压最高, 往往可以达到数千伏, 故干扰最严重, 以此为初始条件可以求得负载侧电压为:

$$U_c(t) = -\frac{\sqrt{21}}{\sqrt{\frac{1}{LC} - (\frac{R}{2L})^2} C} e^{-\frac{R}{2L} t} \cos \sqrt{\left[\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L} \right)^2 \right]} t$$

以上分析可知, 使用开关来控制电磁阀的开闭时会产生频率高、幅值大的感应电压(它被称为“浪涌电压”)。这个电压往往超过了开关触点间隙最小击穿电压(一般为 320V), 出现电弧击穿现象。这时开关断开并不是一次性完成的, 而是一个反复的开、闭串过程, 这就会造成接点间电火花或电弧干扰(也称瞬变噪声干扰)。这个过程会导致产生含有丰富高频谐波的干扰信号。

系统设计中, 为了使用方便选用了比较常用的交流 220V 电磁阀作为执行器件。电磁阀的开闭控制器件选用了性价比较高 5V 直流继电器。继电器的内部结构以及与电磁阀的接口如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 交流电磁阀直接挂接在 220V 的交流供电线上, 控制电磁阀开闭的是继电器。继电器控制端的电感线圈作为电磁铁而存在, 系统通过控制线圈的通断电来控制衔铁动作, 从而实现对被控制端触点开闭的控制。虽然继电器的控制端和被控制端实现了电气隔离, 但是继电器的开闭是通过机械动作实现的。这就难以避免的出现电弧击穿现象, 击穿过程中的电弧、电火花会导致强烈的电磁干扰, 它会通过电感耦合的方式进入控制端, 致使控制端受到一定程度的干扰。

另外, 继电器本身也是一种感性器件, 所以控制系统为了避免这些感性器件引入干扰, 通常采用光电耦合的方式来进行隔离。一般来说采用光电隔离技术可以避免一般感性器件应用所导致的干扰问题。常用的接口电路如图 4 所示。图中 U2 是光电耦合器件, 本系统采用的是光耦 4N25。电路中二极管 D1 作为续流管, 能很大程度上抑制继电器产生的浪涌电压从而降低干扰强度。尽管如此, 如果控制系统的电源和地线不做特殊的设计, 继电器的干扰作用依然存在, 干扰信号会通过地线串入控制系统, 使得系统电源不稳定。

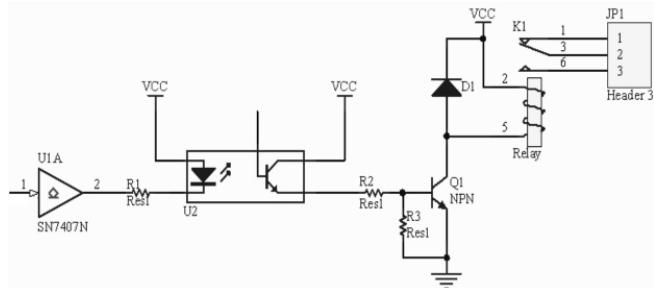


图 4 控制器与继电器的接口电路

2 干扰抑制措施

为了彻底解决感性器件导致的干扰问题, 使控制系统正常工作。设计方案经过了多次改进。本处主要针对系统设计中采用的抑制措施进行介绍。

(1) 采用 RC 吸收回路进行干扰抑制

第二部分理论分析告诉我们, 含感性器件的电路开闭过程中产生的感应电动势大小与等效电路中的电阻和电容值有关, 所以可以通过引入 RC 网络的方式来对干扰进行抑制。RC 吸收回路是抑制感性负载干扰的一种可靠的解决方案。这种方法价格低廉, 选择合适的参数可以得到良好的干扰抑制效果, 并且对交直流电源都适用。

采用 RC 吸收回路时需要对电阻、电容的参数做合理的选择。在直流回路中, 电容的参数值为 0.01~2μF, 线圈电感越大, 则 C 也越大; R 的参数值为几十到几百欧姆。交流回路中, C 的参数值为 0.4~1μF(2μF), 电容的耐压值 $V_c \geq \sqrt{2} \mu$; R 值为几十到几千欧, 电阻的额定功率为 2W。一般情况下, R、C 的值选择 100Ω 和 0.1μF 即可, 当触点容量比较大时可以选择 470Ω 和 0.47μF。经实验验证感性负载的 RC 网络配置参数如表 1 所示:

表 1 220V 交流电路中常用感性负载的 RC 网络参数配置

负载规格	-220V	-127V	~220V	~127V	~220V	~220V
继电器	JZ7	CJO-10	CJO-10	CJO-20	CJO-20	MJF1-3
电阻 (kΩ/W)	5.6/2.0	3.3/0.5	5.6/2.0	1.6/1.0	1.8/2.0	0.62/2.0
电容 (μF/V)	0.39/400	0.4/250	0.4/400	0.76/250	1.0/400	1.0/400

还应注意的是 RC 吸收回路需要被直接并联在电感线圈的两端, 而不能直接接在电子控制装置上, 主要原因是连接线过长时, 导线的分布参数会影响 RC 吸收回路的作用。本系统使用的电磁阀其线圈电感不是很大, 故 RC 吸收回路的电阻和电容参数值选用常用值 100Ω 和 0.47μF 即可。实际操作中将电阻和电容连接好后, 直接接在靠近电磁阀的两根电源线上即可。

(2) 电源及地线的设计

为防止感性负载引入的干扰串入电源, 设计中继电器供电电源和控制器电源应严格分开, 继电器采用独立供电方式。另外, 由于干扰也会通过地线自耦合串入控制系统, 因此线路板布局和布线时, 继电器的地线要和其它器件的地线严格分隔开来。图 5 是控制器线路板上电源和地线的连接示意框图。由图可以看出控制器和其他接口电路共用电源 B 和数字地 GNDB。继电器部分则使用独立的电源 A, 地线也是独立的地 GNDA。数字地和模拟地通过 0 电阻实现单点接地。这样可以很好的防止继电器干扰污染控制器电源或者通过地线串入控制系统。

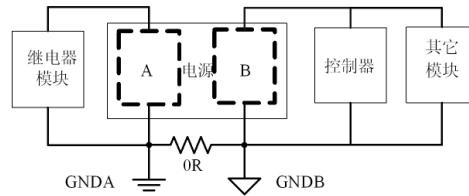


图 5 线路板电源和地线的设计示意图

(3) 电磁干扰的屏蔽设计

本系统存在多个控制器, 主控制器和辅助控制器之间通过串行通信实现协调工作。为了实现控制器间的正常通信和系统的正常工作, 也为了使系统本身产生的电磁干扰不污染外界环境, 设计中必须考虑电磁干扰的屏蔽处理。

(下转第 50 页)

TCP/IP 协议和 IEEE802.3 标准。系统硬件结构图如图 3 所示。

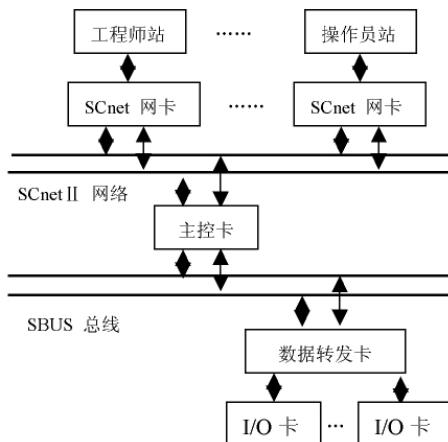


图 3 DCS 系统硬件结构图

3 软件设计

模糊控制算法采用 SCX 语言编写。软件主程序流程如图 4 所示。由离线计算出的模糊控制查询表在 C 语言的环境下直接写入,然后以误差 e 和偏差变化率 ec 的量化值 E 和 EC 为控制增量变量的下标查表,得出 U 。通过反模糊化处理,即可得到控制量 u 。

系统运行前,首先对系统参数进行设置,然后计算偏差 $e(n)$ 与偏差变化率 $ec(n)$,选择合适的非线性量化因子进行模糊化处理,得到模糊化值 $E(n)$ 和 $EC(n)$;据此查询模糊控制查询表,得到模糊输出 U ,与比例因子运算后即可得到控制量 u ,即可控制现场设备。

由于非线性量化因子计算较为复杂,模糊化环节的实现,可以采用分段线性的方法。根据系统控制精度要求,将非线性量化因子量化分为 n 段,每小段采用与之相对应的线

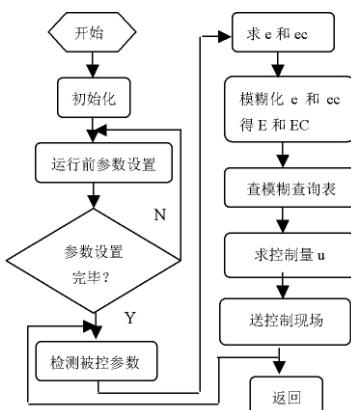


图 4 主程序流程图

(上接第 48 页)

金属屏蔽体的屏蔽效能是由反射损耗和吸收损耗而得到的。对于电场的屏蔽,屏蔽体必须接地;对于磁场的屏蔽,屏蔽体则不必接地。

系统控制器间通信信号采用屏蔽电缆进行传输。屏蔽电缆的屏蔽效能,主要不是因反射和吸收衰减而引起的,而是由屏蔽层接地所产生。所以屏蔽电缆的屏蔽层一定要接地才能起到屏蔽作用。屏蔽电缆的屏蔽效能与所用的材料、屏蔽层的编织密度和线缆的弯曲程度等因素有关系。系统设计中采用屏蔽层编织密度比较高的单芯细缆。这种屏蔽电缆的优点是,电缆弯曲时不会对屏蔽效果有太大影响,而且线缆比较细适合狭小空间接线、走线。非常适合本系统布线困难的特点。

线路板被装配在性价比比较高的金属围框中,由此实现电磁屏蔽。围框的金属层比较厚,足以实现对强磁场的屏蔽。围框两个侧面打细孔作为走线孔,整个围框通过导线与大地连接,从而实现良好的接地。

性量化因子进行模糊化。各段次序及所对应的量化因子以表格的形式写入。假设各段次序号为:从 0 到 e_{max} 依次为 1, 2, ..., $n/2$, 从 0 到 $-e_{max}$ 依次为 -1, -2, ..., $-n/2$ 。

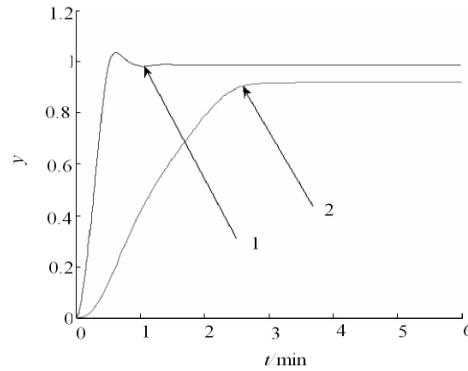


图 5 系统响应曲线

4 实验与结论

AE2000 实验装置中换热器温度控制系统是高校教学过程中常用的实验系统,该系统具有大惯性、大滞后的特点。将非线性量化因子模糊控制技术用于换热器温度控制系统,非线性量化因子参数分别取 $a_e=11.15, a_{ec}=3.3$, 可得系统的阶跃响应曲线,如图 5 中曲线 1 所示,曲线 2 为系统 PID 控制的阶跃响应曲线。实验表明,非线性量化因子模糊控制算法在 DCS 上的实现切实可行,并且能有效地减小系统的稳态误差,提高响应速度。

参考文献

- [1] 王峰,周运,森雷平.基于 DCS 的换热器性能实时在线监测预报系统 [J].工业控制计算机,2008,21(5)
- [2] 王惠芳,刘朝英,宋雪玲,等.基于遗传算法的模糊控制器参数优化 [J].河北科技大学学报,2007,28(4):15-20
- [3] WANG Hui-fang, LIU Chao-ying, SONG Xue-ling, et al. Parameters Self-adaptive Fuzzy Controller Based on Genetic Algorithm, 2007 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Service, 2007, 2: 952-956
- [4] Liu Chaoying, Youichi Hirashima, Akira Inoue. An Adaptive Fuzzy Controller With CMAC-Based Scaling Factors, 15Th, 2002 IFAC

[收稿日期:2009.9.2]

3 结束语

自动控制系统设计中常用到感性负载器件和设备,对于这些器件的抗干扰设计是个难点。文中针对近期设计水质综合毒性在线自动分析控制系统中出现的干扰问题(主要由感性器件电磁阀和继电器引起,现象为:经常性的程序跑飞、死机和显示器花屏等)做了深刻的理论分析,并提出了一套行之有效的抑制措施。对调整后的系统进行反复测试,结果表明:系统本身运转正常,稳定性良好;系统对周围环境的电磁干扰影响极小;对交流 220V 电网的污染也控制到了要求范围内。

参考文献

- [1] 张松春,竺子芳,等.电子控制设备抗干扰技术及其应用 [M].北京:机械工业出版社,1995
- [2] 胡翔骏.电路分析 [M].2 版.北京:高等教育出版社,2007
- [3] 刘先晓.微机控制系统中电磁阀和继电器干扰的抑制措施 [J].上海电力学院学报,2003(9)
- [4] 常越,苏红娟.继电器应用中的抗干扰问题 [J].低压电器,2002(4)

[收稿日期:2009.9.30]