

基于模糊 PID 的 UEGO 传感器 控制方法研究

刘杰, 黄云志

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 合肥 230009)

摘要: 宽域废气氧传感器具有较宽的空燃比测量范围, 广泛地应用于稀燃发动机空燃比控制系统; UEGO 传感器需要配套控制器才能正常工作, 通过控制传感器的温度和泵电流, 实现空燃比的测量; 然而, UEGO 传感器温度具有非线性, 泵电流参数存在摄动, 给其控制带来了困难; 为了缩短冷启动时间, 采用斜坡加热与模糊 PI 相结合的分段温度控制策略, 以克服温度的非线性和冷启动的加热限制; 采用基于 OE 模型的系统辨识法, 建立不同工况下的泵电流模型, 据此采用模糊 PID 的控制方法提高泵电流的控制精度与响应速度, 克服泵电流参数不确定性的影响, 从而提高传感器的动态性能; 在空气环境和混合气配气平台上进行实验, 结果表明: UEGO 传感器冷启动时间少于 20 s, 温度控制精度较高, 泵电流调节时间为 191 ms, 动态响应速度快、抗干扰能力强。

关键词: UEGO 传感器; 控制器; 模糊控制; PID 控制

Research on Control Method of UEGO Sensor Based on Fuzzy PID

Liu Jie, Huang Yunzhi

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Universal Exhaust Gas Oxygen (UEGO) sensor has a wide range of air-fuel ratio measurement, is widely used in air-fuel ratio control system of the lean burn engine. The UEGO sensor should work with the controller. The air-fuel ratio can be measured by controlling temperature and pump current. However, the temperature of the UEGO sensor is nonlinear and the pump current parameter is perturbed, which bring difficulties to the control. In order to shorten the start-up time, segmented temperature control strategy combining slope heating with fuzzy PI is adopted to overcome the temperature non-linearity and the heating limitation during the start-up. OE model based system identification method is used for establishing the pump current model under different operating conditions, and the fuzzy PID control method is used to improve the control accuracy and response speed of the pump current, so as to overcome the influence of the uncertainty of the pump current parameters and thus improve the dynamic performance of the sensor. The results show that the start-up time of UEGO sensor is less than 20 s, and the temperature control precision is high. The pump current regulation time is 191 ms, and the dynamic response is fast with strong anti-interference ability.

Keywords: UEGO sensor; controller; fuzzy control; PID control

0 引言

宽域废气氧 (universal exhaust gas oxygen, UEGO) 传感器相比于传统的 EGO 传感器测量范围更宽、精度更高, 能够为 ECU 提供更加准确的空燃比信号, 保持发动机气缸混合气在理论空燃比附近, 以减少汽车尾气排放, 适应日趋严格的排放法规的要求。UEGO 传感器在一定的工作温度下才能正常工作, 通过控制泵电流实现空燃比的测量。因此, 温度和泵电流控制是 UEGO 控制器设计的关键之处。UEGO 传感器的温度模块呈现非线性、泵电流模块在不同工况下模型参数存在差异。

随着 UEGO 传感器的广泛使用, 国内外研究人员对 UEGO 控制器展开了研究, 但对控制方法研究不够深入。文献 [1-2] 采用模拟 PID 控制泵电流, 但参数不易调整, 控制

效果不理想; 文献 [3-4] 提出工作温度附近采用数字 PID 控制方法, 未指出参数整定方法; 文献 [5] 采用反馈控制方法对温度进行控制, 未给出具体的实施细节。文献 [6] 选用专用集成芯片 CJ125, 用于泵电流控制、泵电压放大和温度信号采集, 未对温度进行闭环控制; 文献 [7] 提出利用 PID 控制算法对温度进行控制, 采用 Z-N 法对参数进行整定, 但超调量大、调节时间长; 文献 [8] 提出了分段加热的控制方法, 缩短了冷启动时间, 未给出参数整定方法及结果, 采用 CJ125 对泵电流进行控制, 未对其控制方法进行研究; 本课题组设计了 UEGO 控制器, 采用内模法、 H_{∞} 回路成形法对泵电流 PID 进行参数整定, 克服了被控对象的不确定性, 但调节时间较长、动态性能仍有待提高, 采用分段加热的温度控制方法, 缩短了温度控制的时间, 但未考虑冷启动加热限制^[9-11]。

本文将模糊 PID 引入 UEGO 控制系统, 利用模糊控制器对 PID 参数进行在线自整定, 解决单一参数 PID 对被控对象数学模型严格依赖的问题, 提升了动态性能。对于温度控制模块, 分析了被控对象特性, 为了克服被控对象的非线性和冷启动时的加热限制, 采用斜坡加热与模糊 PI 相结合的分段

收稿日期: 2017-04-13; 修回日期: 2017-05-08。

作者简介: 刘杰 (1991-), 男, 安徽长丰人, 硕士研究生, 主要从事 DSP 应用技术方向的研究。

黄云志 (1976-), 女, 安徽凤台人, 博士研究生, 教授, 主要从事自动检测与信号处理方向的研究。

控制策略,并设计了模糊控制规则。对于泵电流控制模块,在混合气配气平台上进行开环实验,建立不同工况下被控对象的参数不确定模型,采用模糊 PID 控制算法,并设计了模糊控制规则。

1 温度控制方法

UEGO 传感器冷启动时,发动机空燃比控制系统依靠前馈控制,控制效果较差,造成排污量较大,故要求冷启动时间越短越好,且温度控制精度越高,传感器性能越优。UEGO 控制系统通过测量氧浓差电池内阻值得到温度偏差,输入到温度控制器中,调节 PWM 占空比大小,从而改变加热器的功率,减少温度偏差。控制算法对于 UEGO 传感器温度控制的好坏,起到至关重要的作用。

UEGO 传感器温度控制主要受以下三方面因素影响:1) 初始加热时,由于传感器温度较低氧浓差电池内阻值较大,过大的加热电压及电压增加速度,会损坏传感器的内部结构,限制了传感器冷启动的加热功率。2) 氧浓差电池内阻与温度呈现非线性关系,且随着温度的升高内阻逐渐减小。3) 因 UEGO 传感器安装于排气管中,废气温度波动较大,对传感器温度产生较大干扰。

针对上述分析,为了使温度控制具有良好的性能,采用斜坡加热与模糊 PI 相结合的分段控制策略。温度控制器结构如图 1 所示,其控制规律为

$$\begin{cases} \text{斜坡加热控制} & e < \epsilon \\ \text{模糊 PI 控制} & e \geq \epsilon \end{cases} \quad (1)$$

当内阻偏差 $e < \epsilon$ 时,为尽快消除大偏差,同时满足传感器冷启动要求,使用斜坡加热控制;当内阻偏差 $e \geq \epsilon$ 时,为提高控制精度,增强抗干扰能力,使用模糊 PI 控制。

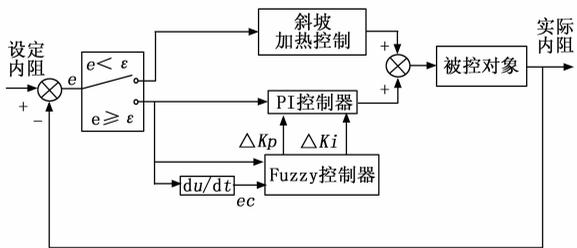


图 1 温度控制器结构框图

温度控制系统中的模糊控制器是为了建立 PI 控制的两个参数 K_p, K_i 与内阻偏差 e 和偏差变化率 ec 间的关系。该模糊控制器采用了两输入两输出的形式。在系统运行时,根据对 e 和 ec 的检测,在线对 PI 控制器的参数进行修改。

根据实际系统测试,温度模糊 PI 控制器的输入变量偏差 E 和偏差变化率 EC 模糊集合上论域均为 $\{-6, -3, 0, 3, 6\}$, 输出变量比例系数增量 ΔK_p 和积分系数增量 ΔK_i 模糊集合上论域均为 $\{-10, -5, 0, 5, 10\}$; 输入变量 E, EC 和输出变量 $\Delta K_p, \Delta K_i$ 的模糊子集均取 $\{NB, NS, ZO, PS, PB\}$, 分别表示 $\{\text{负大, 负小, 零, 正小, 正大}\}$, 均采用三角形隶属度函数。

模糊 PI 控制器的设计关键之处在于确定输入量与输出量之间的模糊关系,即模糊规则的建立。根据参数整定经验和

表 1 ΔK_p 模糊规则表

ΔK_p		EC				
		NB	NS	ZO	PS	PB
E	NB	PB	PB	PS	PS	ZO
	NS	PB	PS	PS	ZO	NS
	ZO	PB	PS	ZO	NS	NS
	PS	PS	ZO	NS	NB	NB
	PB	ZO	NS	NS	NB	NB

表 2 ΔK_i 模糊规则表

ΔK_i		EC				
		NB	NS	ZO	PS	PB
E	NB	NB	NB	NS	NS	ZO
	NS	NB	PS	PS	PS	PS
	ZO	NS	NS	ZO	PS	PS
	PS	NS	PS	PS	PS	NS
	PB	ZO	NS	NS	NS	NB

温度模块的实际调试结果,控制规则可描述为以下三点:1) 若 E 为负值,说明温度低于工作温度点,应增大 K_p 使温度尽快达到目标值,同时适当减小 K_i ,以避免积分饱和导致大的超调产生;2) 若 E 为正值,说明温度高于工作温度点,出现超调,应减小 K_p, K_i ;3) 若 E 为零,说明温度在工作温度点附近,为保证温度控制器具有良好的稳态性能,适当增加 K_p, K_i 。基于上述原则,本文设计的温度模糊 PI 控制器的 $\Delta K_p, \Delta K_i$ 的模糊规则如表 1、表 2 所示。采用 Mamdani 法进行模糊推理,使用加权平均法进行清晰化操作。

2 泵电流控制方法

泵电流控制需要具有良好的动态性能,以保证 UEGO 控制器可以快速准确地响应空燃比变化。通过对氧浓差电势的测量,控制所施加的泵电压大小,改变流过泵电池上的泵电流,以维持氧浓差电势稳定在 450 mV 附近,此时所测泵电流值可以准确的反映废气中空燃比信息。

2.1 被控对象模型建立

为了建立泵电流模块的数学模型,在混合气配气平台上进行开环实验,采用基于 OE 模型的系统辨识法对被控对象模型进行辨识。在建模时,当氧浓差电势 V_{nernst} 位于 450 ± 100 mV 范围内,使用所设计的上位机监控软件阶跃改变所施加的泵电压大小,并记录下泵电压和氧浓差电势数据,以泵电压、氧浓差电势分别作为 OE 模型的输入信号和输出信号。在混合气配气平台上,通过对各种气体的配比得到不同 λ 值的混合气,以便获得不同工况下的被控对象数学模型。

进行了五组开环建模实验,选择的过量空气系数 λ 为 0.78、0.90、1.0、1.4 和 2.0,所建立的被控对象的数学模型如式 (2) ~ (6) 所示:

$$G(s) = \frac{1.922}{0.243s + 1} e^{-0.01s} \quad (2)$$

$$G(s) = \frac{1.942}{0.218s + 1} e^{-0.01s} \quad (3)$$

$$G(s) = \frac{1.956}{0.166s + 1} e^{-0.01s} \quad (4)$$

$$G(s) = \frac{1.979}{0.155s + 1} e^{-0.01s} \quad (5)$$

$$G(s) = \frac{1.986}{0.152s + 1} e^{-0.01s} \quad (6)$$

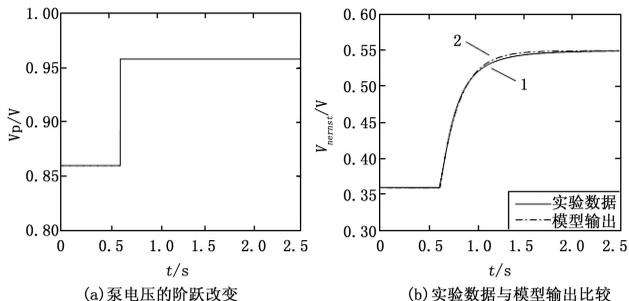


图 2 泵电流模块实验建模

开环建模实验以 $\lambda = 0.90$ 为例, 手动调节泵电压值, 使氧浓差电势维持在 350 mV 左右, 此时泵电压为 0.86 V。将泵电压从 0.86 V 阶跃改变为 0.96 V, 如图 2 (a) 所示, 氧浓差电势响应曲线如图 2 (b) 中的曲线 1 所示。以泵电压值 (图 2 (a) 的数据) 为输入信号, 以氧浓差电势值 (图 2 (b) 中曲线 1 的数据) 为输出信号, 建立式 (3) 所示的数学模型。实验数据和模型输出比较如图 2 (b) 所示, 两者之间的均方根误差为 0.0021, 建模精度较高。

2.2 泵电流控制算法

由建模结果可知, 在不同工况下泵电流的模型参数存在明显的摄动。为保证泵电流控制器具有良好的动态性能, 本文选用模糊 PID 控制器对泵电流进行控制。

泵电流模糊 PID 控制器是一个两输入三输出的系统, 以氧浓差电势 V_{nerms} 偏差 e 和偏差变化率 ec 作为输入, 以 PID 控制器参数 K_P, K_i, K_d 的增量 $\Delta K_P, \Delta K_i, \Delta K_d$ 作为输出, 对应的语言变量分别为 $E, EC, \Delta K_P, \Delta K_i$ 和 ΔK_D 。为了提高泵电流控制动态性能, 将变量 $E, EC, \Delta K_P, \Delta K_i$ 和 ΔK_D 均划分为 7 个模糊集合: NB (负大), NM (负中), NS (负小), ZO (零), PS (正小), PM (正中), PB (正大)。 E 和 EC 模糊集合上论域均为 $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$, $\Delta K_P, \Delta K_i$ 和 ΔK_D 模糊集合上论域均为 $\{-10, -6.667, -3.333, 0, 3.333, 6.667, 10\}$ 。

因 V_{nerms} 初始值与 UEGO 传感器所处的工况有关, 当处于稀燃工况时, V_{nerms} 初始值小于 450 mV; 当处于富燃工况时, V_{nerms} 初始值大于 450 mV, 故在设计控制规则时, 需要综合考虑各种工况。根据参数整定经验和泵电流模块的实际调试结果, 控制规则可描述为以下三点: 1) 若 E 较大时, 说明 V_{nerms} 偏离目标值 450 mV 较远, 应增大 K_P 尽快缩小偏差, 适当减小 K_i (通常取 0) 避免超调产生, 减小 K_D 防止稳定性下降; 2) 若 E 和 EC 中等大小时, 说明 V_{nerms} 离 450 mV 稍近, 应取偏小的 K_P 防止超调, 适当增加 K_i, K_D 取偏小值; 3) 若 E 较小时, 说明 V_{nerms} 在 450 mV 附近, 适当增加 K_P, K_i , 保证系统具有良好的稳态性能, 为避免在 450 mV 附近产生振荡, EC 较大时, K_D 取较小值。基于上述原则, 本文设计的泵电流模糊 PID 控制器的 $\Delta K_P, \Delta K_i$ 和 ΔK_D 的模糊规则如表 3~表 5 所示。

表 3 ΔK_P 模糊规则表

ΔK_P		EC						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	PB						
	NM	PB	PB	PB	PS	PS	PS	ZO
	NS	PB	PS	PS	ZO	NS	NS	NB
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
	PS	NB	NS	NS	ZO	PS	PS	PB
	PM	ZO	PS	PS	PS	PB	PB	PB
	PB							

表 4 ΔK_i 模糊规则表

ΔK_i		EC						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	ZO						
	NM	ZO	ZO	PS	PS	PS	PS	ZO
	NS	PM	PM	PM	ZO	PS	ZO	ZO
	ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	PS	ZO	ZO	PS	PS	PM	PM	PM
	PM	ZO	PS	PS	PS	PS	ZO	ZO
	PB	ZO						

表 5 ΔK_D 模糊规则表

ΔK_D		EC						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	NB	NB	NM	NM	NM	ZO	ZO
	NM	PB	PS	PS	PS	PS	NS	PB
	NS	ZO	ZO	PS	PS	ZO	ZO	ZO
	ZO	ZO	NS	NS	ZO	NS	NS	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	PS	PS	ZO	ZO
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

3 系统实验

3.1 温度控制实验

为检测所设计的斜坡加热与模糊 PI 相结合的分段控制器性能, 进行了相关的温度控制实验。在常温 (28 °C) 环境下, 启动温度控制, 得到温度控制的实际效果如图 3 所示 (UEGO 传感器工作温度为 780 °C, 对应内阻值为 300 Ω)。

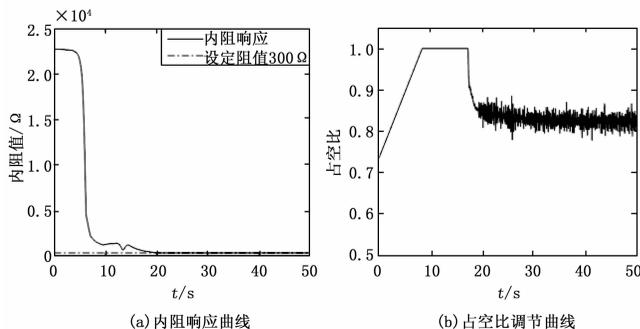


图 3 温度控制效果图

由内阻响应曲线可知, 在常温下传感器冷启动时间少于

20 s, 启动时间较短, 稳态误差小于 1 Ω, 温度控制性能良好, 满足系统要求。

3.2 泵电流控制实验

为了检验所设计的泵电流模糊 PID 控制器的性能, 在空气环境中进行闭环实验, 分别采用内模法、H∞回路成形法和模糊控制法整定 PID 控制器参数, 得到氧浓差电势的响应曲线如图 4 所示。

由图 4 可知, 内模法下的调节时间为 1 197 ms; H∞回路成形法下的调节时间为 799 ms; 模糊控制法下的调节时间为 191 ms。采用模糊 PID 控制器时调节时间较短, 稳态误差小于 0.05 mV, 且超调量较小。

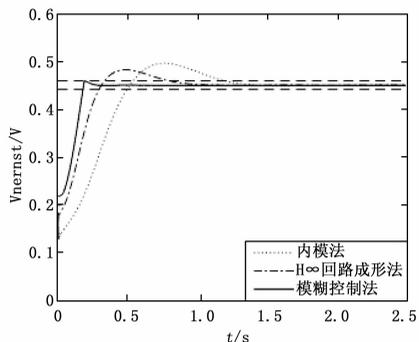


图 4 空气环境下泵电流控制闭环实验

3.3 动态实验

为了实现对 UEGO 控制器动态性能检测, 在混合气配气平台上进行了动态实验, 该平台所使用的混合气是已混合好的标准浓度的 O₂+N₂ 气体, 平台总流量为 10 SLM, 实验装置框图如图 5 所示。

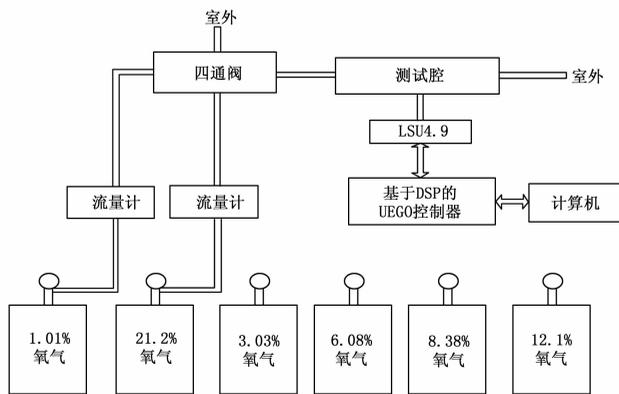


图 5 实验装置框图

动态实验的具体步骤: 1) 首先, 选择两种氧浓度相差较大的标准气体, 将其连接到四通阀的两路通道中。2) 调节气体钢瓶上减压阀的开度, 使流量达到 10 SLM, 手动控制四通阀的阀门手柄让低氧含量的气体进入测试腔。3) 启动 UEGO 控制器, 并利用所设计的上位机监控软件记录氧含量值。当测得的氧含量值稳定后, 快速调节阀门手柄让高氧含量的气体进入测试腔中, 完成一次上升过程的动态实验。4) 待测得的氧含量值稳定后, 再次调节阀门手柄让低氧含量的气体进

入测试腔中, 完成了一次下降过程的动态实验。5) 为了更好地说明所设计的泵电流控制算法性能, 分别使用内模法、H∞回路成形法和模糊控制法对泵电流 PID 控制器参数进行整定, 重复进行上述实验。

仅以氧浓度在 1.01% 和 21.2% 之间变化的动态实验为例。由图 6 可知, 内模法下的 V_{nernst} 最小值为 437.3 mV, 最大值为 459.1 mV; H∞回路成形法下的 V_{nernst} 最小值为 445.4 mV, 最大值为 454.6 mV; 模糊控制法下的 V_{nernst} 最小值为 449.9 mV, 最大值为 450.1 mV。由图 7 可知, 内模法下的上升过程响应时间(动态变化值的 10%~90% 对应的时间差)为 6.22 s, 下降过程响应时间为 6.67 s; H∞回路成形法下的上升过程响应时间为 5.47 s, 下降过程响应时间为 6.32 s; 模糊控制法下的上升过程响应时间为 2.56 s, 下降过程响应时间为 4.32 s。

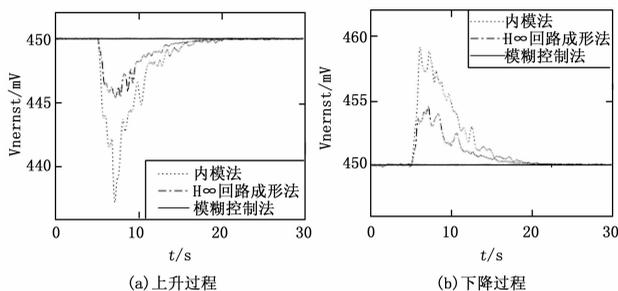


图 6 动态实验过程中泵电流控制响应曲线

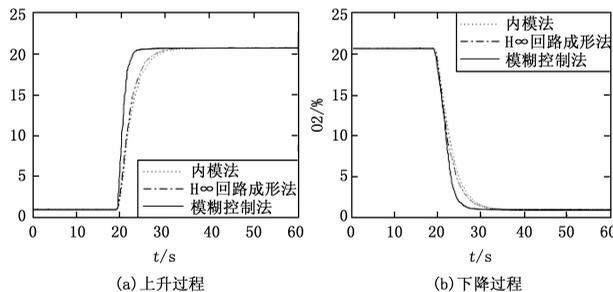


图 7 不同泵电流控制方法下 UEGO 控制器输出值

由上述实验结果可知, 当混合气的氧浓度突然变化后, UEGO 控制器可以快速响应, 且使用模糊 PID 控制算法的响应速度更快, 抗干扰能力更强。

4 结论

本文基于模糊 PID 研究了 UEGO 传感器的温度和泵电流控制方法。针对温度模块的非线性和冷启动要求, 采用斜坡加热与模糊 PI 相结合的分段控制策略, 缩短冷启动时间, 提高温度控制精度。基于 OE 模型的系统辨识法建立了不同工况下泵电流模块的数学模型, 针对模型参数存在摄动, 采用模糊 PID 控制算法, 保证泵电流控制具有良好的动态性能。在空气环境和混合气配气平台上进行了实验, 结果表明: 传感器冷启动时间小于 20 s, 稳态误差小于 1 Ω, 泵电流模块采用模糊 PID 时, 调节时间较短, UEGO 控制器动态响应速度较快、抗干扰能力更强。

参考文献:

[1] Luca P, Marco S. Control method for an oxygen linear sensor [P]. E. P. Patent 0973030A1, 2000. 1. 19.

[2] Luca P, Marco S. Control device for a linear oxygen sensor [P]. E. P. Patent 1001261A1, 2000. 5. 17.

[3] Aoki K. Controller of exhaust gas sensor [P]. U. S. Patent 20060047468A1, 2006. 3. 2.

[4] Bevot C, Schnaibel E, Wagner J. Method for operating a heatable exhaust gas probe [P]. U. S. Patent 008286470B2, 2012. 10. 16.

[5] Kawaguchi S, Hibino Y, Ichida R. Oxygen sensor controlling apparatus, oxygen sensor controlling method and computer readable recording medium [P]. U. S. Patent 20140013819A1, 2014. 1. 16.

[6] 孙伟, 唐 岚, 甘海云. 宽域氧传感器接口控制单元开发 [J]. 西华大学学报 (自然科学版), 2007, (04): 24-25.

[7] 卢继飞. 发动机空燃比测量仪的研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2014.

[8] 周树艳, 陆召振, 张 雷. 宽域氧传感器加热方法及其控制电路 [P]. 中国: 105159359A. 2015-12-16.

[9] 陈佳臻. 宽带废气氧传感器控制器研制 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.

[10] 张媛媛, 徐科军, 黄云志, 等. 基于鲁棒 PID 算法的 UEGO 控制器的设计与实验 [J]. 振动与冲击, 2011, (03): 139-144.

[11] 闵 兵. 宽域废气氧传感器控制方法及系统研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.

(上接第 53 页)

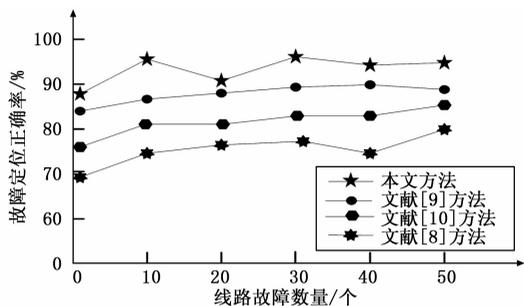


图 1 不同方法线路故障定位正确率对比

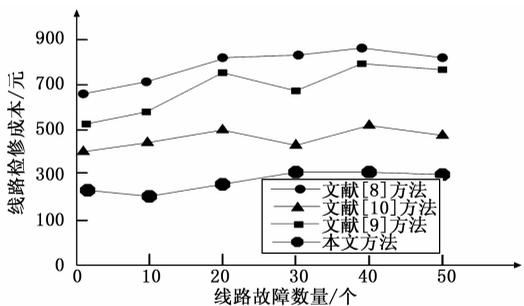


图 2 不同方法输电线路检修所耗成本对比

由图 2 可知, 文献 [8] 方法在检修的过程中, 假设某个器件已经损坏, 用同型号的器件进行替换, 假设不是该器件损坏造成的线路产生故障, 需要一直进行替换, 查找, 导致检修成本直线上升。文献 [9] 方法将馈电支路上的某支线路拆除之后, 如果输电线路恢复了正常, 证明故障出现在该支路上, 假设线路还没有恢复正常, 那么排除该支路产生故障的可能, 继续进行排查, 这样的检修方式会耗费大量的人力和物力。文献 [10] 方法理论大于实践, 成本与其他文献方法相比相对较少。本文所提方法对线路故障进行分类检修, 减低了检修所用成本。下图是不同方法线路检修时间 (s) 对比。

观察图 3 可知, 本文所提方法利用对高压交流输电线路故障的分类, 线路故障的准确定位, 故障的高效修复, 并设有最少时间段数的目标控制函数, 使本文所提方法具有很高的利用价值和通用性, 时间成本较低, 可扩展性也比较高, 进一步证明了本文所提方法是切实可行的。

实验证明, 所提方法可以实时准确地对高压交流输电线路进行检修, 可以为未来的线路检修领域提供借鉴。

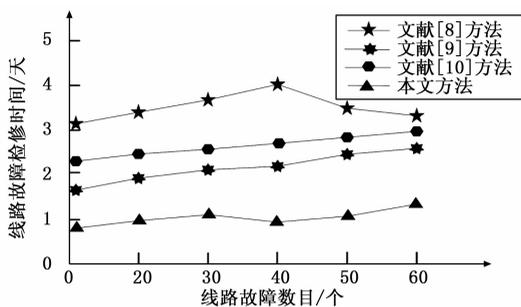


图 3 不同方法线路检修时间对比

4 结束语

采用当前方法对高压交流输电线路进行检修时, 存在预见性低、盲目性高、容易导致其他设备隐患陆续发生的问题。提出一种基于层次分析的高压交流输电线路检修方法。通过实验证明, 所提方法可以迅速可靠地对高压交流输电线路进行检修, 是该领域发展的风向标。

参考文献:

[1] 黄 娟. FSK202-3 型 X 线机故障检修一则 [J]. 临床放射学杂志, 2016, 35 (5): 814-814.

[2] 高韶坤, 艾建军. 数控机床主轴速度误差过大报警故障检修 [J]. 机床与液压, 2016, 44 (20): 174-176.

[3] 易 毅, 廖俊龙, 陈 彬, 等. 配电网电缆故障成本风险评估模型法研究 [J]. 计算机仿真, 2016, 33 (12): 128-131.

[4] 吴姝雯, 张化昭, 赵 淳, 等. 110kV 双回输电线路复合材料杆塔防雷优化设计研究 [J]. 科技通报, 2015, 31 (10): 258-261.

[5] 邓荣军, 王 斌, 熊 典, 等. 基于遗传算法的输电线路无人机巡检路径规划 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (4): 1299-1301.

[6] 杨东东, 马红光, 徐东辉. ITD 与 DLE 相结合的模拟电路故障诊断 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15 (12): 70-74.

[7] 谢永超. 基于 AT89S51 单片机机车故障显示屏测试仪的设计与实现 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (13): 157-160.

[8] 王 峰, 雷红才, 彭 详, 等. 基于不停电检测的架空输电线路状态检修优化 [J]. 中国电力, 2016, 49 (10): 84-89.

[9] 巩 宇. 基于设备故障概率分布的抽水蓄能机组检修策略优化计算模型研究 [J]. 水力发电, 2016, 42 (7): 83-86.

[10] 彭 湃, 程汉湘, 陈杏灿, 等. 基于有限元的超高压输电线路电场的数值分析与测量 [J]. 电测与仪表, 2016, 53 (3): 56-61.