

自适应模糊 PID 控制器的电气设备温度控制研究

石礁^{1†}, 顾泽明¹, 郭凯²

(1. 国网嵊泗县供电公司, 浙江 舟山 316000; 2. 嵊泗电气安装有限公司, 浙江 舟山 316000)

摘 要:温度控制可以避免由于电气设备温度过高而出现故障, 为了提高电气设备的温度控制精度, 研究了一种自适应模糊 PID 控制器的电气设备温度控制方法。在自适应模糊算法的基础上, 优化 PID 控制器的结构, 根据自适应模糊处理的原理, 建立自适应模糊 PID 控制器输入与输出的关系, 以电气设备的温变和均方差作为优化目标, 完成自适应模糊 PID 控制器的参数优化。根据电气设备运行环境中的平均温度, 构建电气设备温度的连续时间动态模型, 采用优化后的自适应模糊 PID 控制器参数, 获取电气设备温度控制的输出, 最小化电气设备温度控制的目标函数, 实现电气设备的温度控制。实验结果表明, 该方法能够将温度控制精度提高到 93% 以上, 其对电气设备具有较好的降温效果和控温效果, 具备了可行性。

关键词:温度控制; 电气设备; 模糊算法; PID 控制器; 参数优化; 自适应控制; 连续时间动态模型
中图分类号:TH39 **文献标识码:**A

Research on Temperature Control of Electrical Equipment with Adaptive Fuzzy PID Controller

SHI Jiao^{1†}, GU Zeming¹, GUO Kai²

(1. State Grid Shengsi Power Supply Company, Zhoushan, Zhejiang 316000, China;
2. Shengsi Electrical Installation Co., Ltd., Zhoushan, Zhejiang 316000, China)

Abstract: Temperature control can avoid failure due to high temperature of electrical equipment. In order to improve the accuracy of temperature control of electrical equipment, an adaptive fuzzy PID controller temperature control method of electrical equipment is studied. On the basis of adaptive fuzzy algorithm, the structure of PID controller is optimized. According to the principle of adaptive fuzzy processing, the relationship between the input and output of adaptive fuzzy PID controller is established. The temperature change and mean square error of electrical equipment are taken as the optimization objective to complete the parameter optimization of adaptive fuzzy PID controller. According to the average temperature in the operating environment of electrical equipment, the continuous time dynamic model of electrical equipment temperature was established. The optimized adaptive fuzzy PID controller parameters were adopted to obtain the output of electrical equipment temperature control, minimize the objective function of electrical equipment temperature control, and realize the temperature control of electrical equipment. The experimental results show that the method can increase the temperature control accuracy to more than 93%, and it has good cooling effect and temperature control effect on electrical equipment, which is feasible.

Key words: temperature control; electrical equipment; fuzzy algorithm; PID controller; parameter optimization; adaptive control; continuous time dynamic model

在经济一体化和国家经济高速发展的背景下,我国新的经济增长点培育离不开电力工业的大力扶持。在智慧思想和高技术的影响下,智能化变电所的建设已逐步与实际生活接轨,以适应我国电力工业发展的需要^[1-2]。为使微电脑式电气设备的工作环境达到最佳,减少外界环境对电气设备的破坏和影响,电气设备必须安装在设备总成柜内,而总控室通常安装在环境条件比较苛刻、变动较大的户外环境下,因而其内部的温度不稳定,给电气设备的安全带来了潜在的风险^[3]。为了防止高温造成电气设备故障,在高温天气下高效地散热电气设备,从而达到控制电气设备总成柜内总体温度的目的。

徐留明等人^[4]介绍了一种利用自适应的模糊方法来实现电气设备的温度调节。采用遗传算法,有效地改善了模糊控制器的定标系数、比例因子和从属函数。通过调整模糊控制器的参数,使各参数间的相似性发生相应的改变,从而使 PID 控制器能够调整和控制温度。通过电气设备的温控试验,发现在 6 个月中,各元件柜体的温度都在正常范围内,可以有效地减少电气设备的工作环境温度,在同类的控制算法中也显示出很好的温控性能。仲楠等人^[5]研究了一种基于 DSP 的电气设备运行状态远程监控系统,该系统以 DSP 为核心,改善系统抗干扰性,结合摄像机压缩数字图像,设计电气设备远程监控系统控制电路实现同步控制,并且引入傅里叶变换算法,结合蝶形运算,分析电气设备测量点温度和较热温度的相对温差,判断电气设备运行状态,实现电气设备温度监控。实验表明,该算法在识别精度、稳定性等方面都取得了良好的效果。

该方法在自适应模糊算法的基础上,优化 PID 控制器的结构,根据自适应模糊处理的原理,建立自适应模糊 PID 控制器输入与输出的关系,并且确定了以优化目标,优化控制器参数,结合了环境中的平均温度,构建了电气设备温度的连续时间动态模型,获取电气设备温度控制的输出,同时最小化温度控制的目标函数,实现电气设备温度控制,以期解决温度控制不准确的情况。

1 电气设备温度控制方法设计

1.1 优化自适应模糊 PID 控制器参数

在自适应模糊 PID 控制器中, P 、 I 、 D 分别表示比例控制、积分控制和微分控制。PID 控制器

的工作原理是通过优化参数 λ_P 、 λ_I 和 λ_D ,并且通过线性组合的方法^[6],将存在偏差的三个单元合并为一个控制量,通过控制量控制电气设备温度。

利用自适应模糊算法优化设计 PID 控制器的结构,强化 PID 控制器对电气设备温度的控制效果。自适应模糊 PID 控制器结构如图 1 所示。

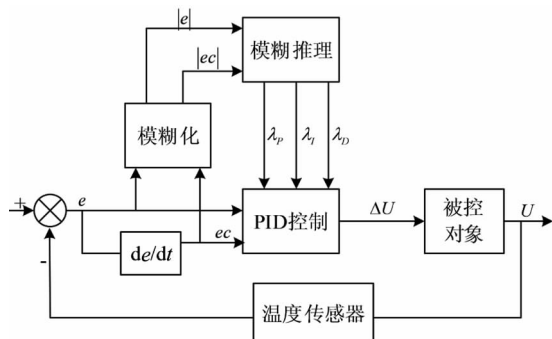


图 1 自适应模糊 PID 控制器结构

图 1 中通过对 PID 控制器进行自适应模糊处理,实现 PID 控制器的最优设计,保证了电气设备温度控制效果与期望目标一致。根据自适应模糊处理的原理^[7],建立自适应模糊 PID 控制器的输入与输出关系,如公式(1)所示:

$$\Omega_j = f(\alpha_e, \alpha_{\alpha}, \alpha_u, \mu_j, \varepsilon_j) \quad (1)$$

式中: $f(\cdot)$ 为电气设备温度调节的功能函数; α_e 为一个定量因素; α_{α} 为比例因子; α_u 为可以调节的因子; μ_j 为电气设备 j 时间内的温度设置与真实数值之间的差异值, $^{\circ}\text{C}$; ε_j 为电气设备 j 时间内的温度设置与真实数值之间的改变速率, $\%$ 。

为了减小电气设备温度在自适应模糊控制中的偏差,以电气设备的温度偏度作为自适应模糊 PID 控制器参数的优化目标^[8],表示为:

$$\kappa_j = \frac{1}{\xi} \sum_{j=1}^{\xi} |S_{pre,j} - T^*| \quad (2)$$

式中: ξ 为常数; $S_{pre,j}$ 为电气设备温度在 j 时刻的输出值, $^{\circ}\text{C}$; T^* 为电气设备温度控制的标准值, $^{\circ}\text{C}$ 。

在自适应模糊 PID 控制器处于稳定状态时,利用波动频率衡量电气设备温度的波动性。为了降低电力系统正常运行时电气设备温度的波动频率,以电气设备温度变化的均方差作为自适应模糊 PID 控制器参数的优化目标,表示为:

$$\vartheta_j = \frac{1}{\xi-1} \sum_{j=1}^{\xi-1} (|S_{pre,j+1} - T| - |S_{pre,j} - T^*|) \quad (3)$$

式中: $S_{pre,j+1}$ 为电气设备温度在 $j+1$ 时刻的输出值, $^{\circ}\text{C}$ 。

当电气设备温度出现明显的波动时,改进的自适应模糊 PID 控制参数。需要快速控制电气设备温度恢复至标准温度范围,使其处于稳定状态^[9]。假设电气设备温度调节时间就是优化目标 $P = t_{s,j}$, 基于此,建立自适应模糊 PID 控制器参数优化模型:

$$J(\alpha_e, \alpha_{ec}, \alpha_u) = \min [\kappa_j, \vartheta_j, P]^T \quad (4)$$

$$s. t. \begin{cases} \Omega_j = f_1(\alpha_e, \alpha_{ec}, \alpha_u, \mu_j, \epsilon_j) \\ S_{pre,j} = f_2(\Omega_j) \end{cases} \quad (5)$$

式中, P 为优化目标, s 。通过自适应模糊 PID 控制器参数,为温度控制奠定基础。

1.2 电气设备温度控制的实现

以最优的自适应模糊 PID 控制器参数为依据,在电气设备的温控中,需要考虑电气设备在工作时的温变和积温对设备的作用。因此,通过对积温的分析,计算出电气设备的平均温度,即:

$$T_{aver} = Q^{-1} \int_{t-Q}^{t'} T_i(t') dt \quad (6)$$

式中: Q 为电气设备的运行时间, s ; $T_i(t')$ 为电气设备运行时间为 Q 时的温度, $^{\circ}C$ 。

为了准确控制电气设备的温度,先采集电气设备运行过程中的实时温度,根据电气设备运行的特点^[10],构建电气设备温度的连续时间动态模型,表示为:

$$y(t) = \beta a(t) + \gamma b(t) + c(t) \quad (7)$$

式中: β 和 γ 为电气设备温度信号受到干扰的频率, kHz ; $a(t)$ 为电气设备温度的状态向量, $^{\circ}C$; $b(t)$ 为电气设备温度的自适应模糊 PID 控制器输出向量, $^{\circ}C$; $c(t)$ 为温度信号噪声向量, $^{\circ}C$ 。

在电气设备运行的 Q 时间内,采集其温度数据,将电气设备温度采集的时间序列定义为 Q_i , 在探测电气设备的温度触发状态的时候,如果触发状态与温度获取情况不一致,则将目前的取样数据传送给其他的节点,此时触发序列为 Q_i 。为了稳定自适应模糊 PID 控制器中电气设备温度的输入状态,将采集电气设备温度的触发条件设置为:

$$|g(t)| \leq \psi |a(t)| \quad (8)$$

式中: ψ 为触发电气设备温度采集条件的阈值系数; $g(t)$ 为电气设备温度采集的误差向量, $^{\circ}C$ 。

触发电气设备温度采集条件后,采集电气设备的温度数据。在该过程中,温度传感器采集电气设备温度数据时,会受到多方面因素的影响,因此需要结合滤波算法^[11],处理采集的电气设备温度数据,确保电气设备温度数据的准确性,从而确保温度控制效果,则滤波处理结果表示为:

$$q(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p(t) \quad (9)$$

式中: $q(t)$ 为电气设备温度数据经过 t 次处理的滤波输出, $^{\circ}C$; $p(t)$ 为第 t 次滤波处理的输入值, $^{\circ}C$; N 为电气设备温度数据的样本个数,个。

根据电气设备温度数据的滤波处理结果,调整自适应模糊 PID 控制器参数,即:

$$\lambda_P = \lambda'_P + \{e, ec\}_P = \lambda'_P + \Delta\lambda_P \quad (10)$$

$$\lambda_I = \lambda'_I + \{e, ec\}_I = \lambda'_I + \Delta\lambda_I \quad (11)$$

$$\lambda_D = \lambda'_D + \{e, ec\}_D = \lambda'_D + \Delta\lambda_D \quad (12)$$

式中: λ'_P 为参数 λ_P 的初始值, $^{\circ}C$; λ'_I 为参数 λ_I 的初始值, $^{\circ}C$; λ'_D 为参数 λ_D 的初始值, $^{\circ}C$; $\Delta\lambda_P$ 为初始参数 λ'_P 的调节参量, $^{\circ}C$; $\Delta\lambda_I$ 为初始参数 λ'_I 的调节参量, $^{\circ}C$; $\Delta\lambda_D$ 为初始参数 λ'_D 的调节参量, $^{\circ}C$ 。

通过参数调整,获取控制器的输出,即:

$$x(t) = \lambda_P g(t) + \lambda_I \sum_i g + \lambda_D [g(t) - g(t-1)] \quad (13)$$

在控制电气设备温度的过程中,需要将电气设备上部区域、中部区域和下部区域的温度控制在标准温度区间内,也就是确保下式的目标函数值最小,即:

$$\min J(t) \triangleq \frac{1}{\partial_s} |a^* - a(t)| \quad (14)$$

式中: ∂_s 为电气设备温度采集中传感器的节点数量,个; a^* 为电气设备上部区域、中部区域和下部区域的温度设定值, $^{\circ}C$; $|\cdot|$ 表示欧式函数。

假设控制器的 λ_{PI} 随着输出的变化而变化^[12],则电气设备的温度控制过程可以描述为:

$$X(t) = \lambda_{PI} \left\{ \Delta g(t) + \frac{\lambda_I}{\lambda_P} g(t) T_s + \frac{\lambda_D}{\lambda_P} \frac{\Delta g(t)}{T_s} \right\} \quad (15)$$

式中: $\Delta g(t)$ 为电气设备温度控制的误差差值, $^{\circ}C$; T_s 为电气设备的温度控制时间, s 。

将公式(15)中的 $X(t)$ 代入公式(14)中,使电气设备温度控制的目标函数达到最小值,实现电气设备温度的有效控制。

2 实验分析

2.1 降温效果对比

为了验证文中方法在电气设备温度控制中的应用效果,在实验室中进行一次实验。以电气设备组件柜为研究对象,测试温度控制效果。

实验过程中,通过人为升温的方式,在实验室中设定一个较高的环境温度,以改善电气设备组件柜的运行环境温度,实验测试时间为两周,第一周作为高温采集阶段,第二周作为降温处理阶段。获

取第一周的温度数据,电气设备组件柜前 7 天的温度如图 2 所示。

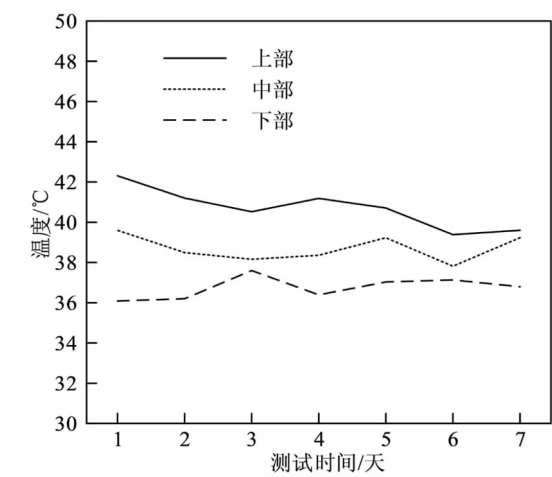


图 2 电气设备组件柜前 7 天的温度

从图 2 可以看出,在 first 周测试中,电气设备组件柜的温度一直处于较高区间内,对于上部区域而言,温度范围为 39.4~42.3℃,中部区域的温度范围为 37.9~39.6℃,下部区域的温度范围为 36.1~37.6℃。由此可见,电气设备组件柜的上部区域温度和中部区域温度明显偏高,虽然底部的温度比其他两个区域低,但是仍然处于略高的状态。

根据电气设备组件柜前 7 天的温度状态,采用文中方法调节与控制电气设备组件柜的温度,电气设备组件柜后 7 天的温度如图 3 所示。

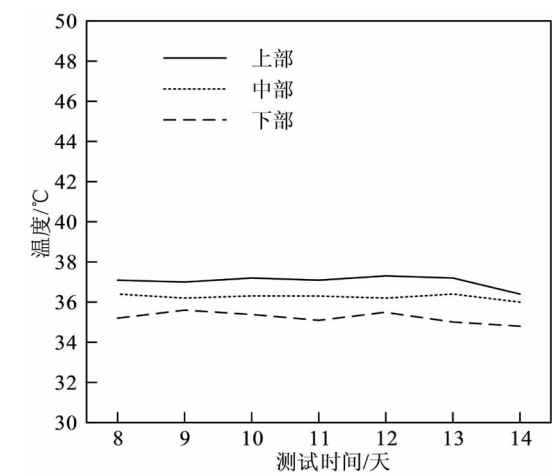


图 3 电气设备组件柜后 7 天的温度

从图 3 可知,电气设备组件柜的温度经过文中方法地调节与控制之后,上部区域、中部区域和底部区域的温度没有出现较大波动,温度可以保持稳定。对于上部区域而言,电气设备组件柜在连续 7 天内的温度范围为 36.4~37.3℃,中部区域和下部区域的温度范围分别为 36.0~36.4℃和 34.8~

35.6℃。由此可见,文中方法可以降低电气设备各个区域的温度,确保电气设备运行的稳定性。

2.2 控温效果

假设电气设备组件柜的原始温度为 39.6℃,早上 8 点开始测试,下午 5 点结束,采用文中方法控制电气设备的温度,控制目标是将电气设备组件柜的上部温度、中部温度和下部温度分别控制在 37℃、36℃和 35℃附近,电气设备温度控制效果如图 4 所示。

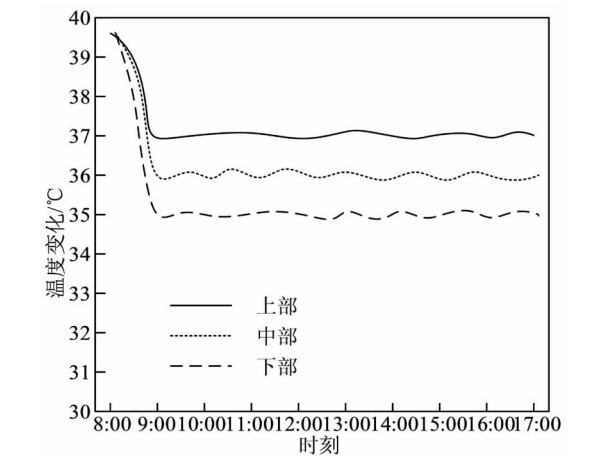


图 4 电气设备温度控制效果

图 4 的结果显示,采用文中方法控制电气设备组件柜的温度后,在 1 小时内就可以将电气设备组件柜各个区域的温度控制在合理范围内,在其余的测试时间内,电气设备组件柜上部区域、中部区域和下部区域的温度一直在 37℃、36℃和 35℃附近波动,而且波动的幅度也比较小,说明文中方法具有明显的温度控制效果。

2.3 对比分析

为了突出文中方法的优越性,引入基于自适应模糊算法的控制方法和基于红外成像技术的控制方法作对比,在某一变电站选择 10 台电气设备为实验对象,控制其温度,测试了电气设备的温度控制精度。电气设备的温度控制精度如图 5 所示。

从图 5 可知,与基于自适应模糊算法的控制方法和基于红外成像技术的控制方法相比,文中方法在电气设备温度控制中的精度更高,可以达到 93%以上,而对比方法的控制精度最高值仅为 78%和 75%。对比三种方法的控制精度数值可知,本文方法的控制精度提高了 15%和 18%,说明文中方法能够通过提高电气设备温度控制精度,确保电气设备在安全的环境下运行。

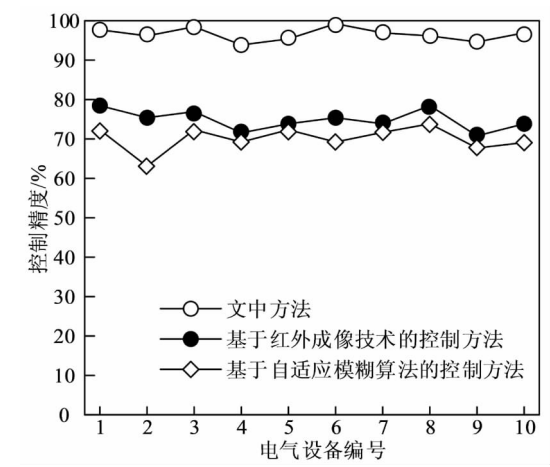


图 5 电气设备的温度控制精度

3 结 论

为了提高电气设备温度控制效果,提出了一种基于自适应模糊 PID 控制器的电气设备温度控制方法。该方法引入了自适应模糊算法,结合 PID 控制,设计了温度控制器,并且进行了优化,实现了温度高精度控制。同时,经过试验测试发现,该方法能够有效降低电气设备的温度,具有更好的温度控制效果和精度。但是本文的研究还存在很多不足,在今后的研究中,希望可以引入高温报警装置,当电气设备的温度过高时,立即发出警报,及时控制温度,以保证电气设备的温度稳定。

(上接第 7 页)

参考文献

[1] WIRASINGHA S G, EMADI A. Classification and review of control strategies for plug-In hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(1): 111-122.

[2] SUH B, CHANG Y H, HAN S B, et al. Simulation of a powertrain system for the diesel hybrid electric bus[J]. International Journal of Automotive Technology, 2012, 13(5): 701-711.

[3] DING J, LI L, PENG H, et al. A rule-based cooperative merging strategy for connected and automated vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(8): 3436-3446.

[4] SCHOUTEN N J, SALMAN M A, KHEIR N A. Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 460-468.

[5] TIE S F, TAN C W. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles[J]. Renewable and

参考文献

[1] 张国志,施森鑫,魏力. 带谐波补偿的 T 型三电平并网逆变器控制研究[J]. 自动化仪表, 2022, 43(1): 29-32, 37.

[2] 李凯,宋景博,张金凤,等. 变电站电气设备主接线故障在线诊断方法研究[J]. 自动化仪表, 2021, 42(8): 68-72.

[3] 周俊海,赵盼盼,刘孝亮,等. 氢气瓶疲劳检测实验舱温度控制系统设计[J]. 低温工程, 2022(2): 37-41.

[4] 徐留明,吴金文,于磊磊. 基于自适应模糊算法的电气设备温度控制技术[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2021, 33(1): 74-78.

[5] 仲楠,崔凤新. 基于 DSP 的电气设备运行状态远程监控系统设计[J]. 现代电子技术, 2022, 45(24): 113-117.

[6] 王超,孙文旭,马晓静,等. 基于模糊控制的 HVPE 生长设备温度控制系统[J]. 工程设计学报, 2020, 27(6): 765-770.

[7] 胡春龙. 基于模糊自适应的三电平 SVG 控制方法研究[J]. 自动化仪表, 2022, 43(12): 71-75.

[8] 汪涛,黄崇莉,于洋,等. 桥式起重机模糊自适应 PID 防摆控制研究[J]. 自动化与仪表, 2022, 37(1): 30-35.

[9] 王海波,王峥,周娴姊,等. 基于脉冲转换温度传感方法的电力设备温度监测系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 180-187.

[10] 李中望,余云飞,徐婉婷. 基于状态反馈的锻造加热炉温度控制方法[J]. 锻压技术, 2021, 46(7): 124-129.

[11] 官辉,郭鹏昌,肖磊全. 核电厂设备冷却水系统温度控制方式改造与实践[J]. 电子技术应用, 2021(S1): 206-210.

[12] 王英永. 一种用于电气设备状态监测的新式 FBG 传感器[J]. 激光与红外, 2022, 52(1): 51-56.

Sustainable Energy Reviews, 2013, 20(4): 82-102.

[6] 秦大同,杨官龙,刘永刚,等. 插电式混合动力汽车能耗优化控制策略的研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(12): 1366-1370.

[7] 任崇岭,刘慧军. 基于动态规划插电式并联混合动力汽车能量管理控制策略的研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(09): 1157-1164.

[8] LIU T, ZOU Y, LIU D, et al. Reinforcement learning of adaptive energy management with transition probability for a hybrid electric tracked vehicle[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(12): 7837-7846.

[9] GUO H, DU S, ZHAO F, et al. Intelligent energy management for plug-in hybrid electric bus with limited state space[J]. Processes, 2019, 7(10): 672.

[10] 张昊,范钦源,王巍,等. 基于强化学习的多燃烧模式混合动力能量管理策略[J]. 汽车工程, 2021, 43(05): 683-691.

[11] QI X, LUO Y, WU G, et al. Deep reinforcement learning-based vehicle energy efficiency autonomous learning system[J]. 2017 IEEE intelligent vehicles symposium (IV). California: IEEE, 2017.