



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111403779 A

(43)申请公布日 2020.07.10

(21)申请号 202010174799.1

(22)申请日 2020.03.13

(71)申请人 太原理工大学

地址 030024 山西省太原市迎泽西大街79号

(72)发明人 赵震 王铁 李蒙 王戎 蔡龙 乔天佑

(74)专利代理机构 太原科卫专利事务所(普通合伙) 14100

代理人 朱源

(51)Int.Cl.

H01M 8/04298(2016.01)

H01M 8/04694(2016.01)

H01M 8/04746(2016.01)

H01M 8/04029(2016.01)

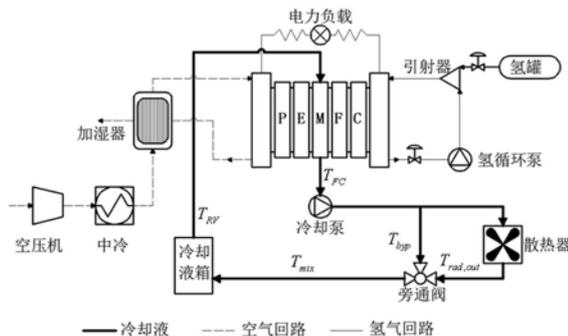
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

一种应用在燃料电池热管理系统中的模型参考自适应控制方法

(57)摘要

本发明涉及一种燃料电池汽车热管理系统中的模型参考自适应控制方法。燃料电池热管理系统的控制是保证燃料电池系统可靠运行的一个关键因素,由于热管理系统具有高度的非线性,模型参数存在不确定性,特别是存在外部温度和负载动态变化的情况下,系统温度控制容易出现跟踪滞后、超调量大等缺点。针对以上问题,本发明设计了一种模型参考自适应控制方法,通过调节冷却液质量流量和旁通阀开启系数,对电堆温度和循环冷却液入口温度进行控制。本发明的控制方法简洁高效,可方便地应用于各种功率等级的燃料电池系统中,实时有效的进行温度控制。



1. 一种应用在燃料电池热管理系统中的模型参考自适应控制方法,其特征在于:根据燃料电池热管理系统动态模型,完成被控对象多变量线性状态空间模型,在考虑外部温度和负载动态干扰的情况下,空间模型的参考自适应控制系统通过控制冷却液质量流量和旁通阀开启系数,对电堆温度和冷却液入口温度进行有效控制;

被控对象多变量线性状态空间模型为 $\dot{x} = Ax + B_u u + B_w w, y = Cx$,式中, $x = [T_{FC}, T_{RV}]$ 状态变量, $u = [m_{cl}, f]$ 输入变量, $w = [T_{amb}, I]$ 干扰, $y = [T_{FC}, T_{RV}]$ 为输出; T_{RV} 为冷却液箱温度, T_{FC} 为电堆的工作温度, m_{cl} 为冷却液质量流量; f 为旁通阀开启系数, T_{amb} 为环境温度, I 为电力负载电流; A, B_u, B_w 为矩阵;

被控对象多变量线性状态空间模型的参考自适应控制系统由参考模型、被控模型和自适应机构三部分组成;

其中被控模型为 $\dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p u(t)$,式中, A_p, B_p 为被控矩阵, $u(t)$ 为被控输入变量, $x_p(t)$ 为被控状态变量;

参考模型形式为: $\dot{x}_r(t) = A_r x_r(t) + B_r r(t)$,式中, A_r 和 B_r 为参考矩阵, $r(t)$ 为有界参考输入向量, $x_r(t)$ 为参考状态变量;

当被控对象参数 A_p 和 B_p 已知时,自适应机构控制律的形式如下:

$$u(t) = \tilde{k} \cdot x_p - r(t) = x_p \int_0^t e x_p \gamma dt - r(t), \text{ 由 } \tilde{k} = k - k^*, \text{ 可得 } \dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p [(k - k^*) x_p(t) - r(t)],$$

其中 k 是参数时变的增益矩阵, k^* 为 k 的最优值,是模型匹配时自适应机构的参数矩阵, $A_p - B_p k^* = A_r, B_p = B_r$;通过不断地调整自适应机构的参数矩阵 k^* ,以实现被控模型的被控状态变量跟踪参考模型的参考状态变量,当被控模型跟踪参考模型,使得广义误差 $e = x_r(t) - x_p(t)$ 最小,即被控模型被控状态变量 $x_p(t)$ 跟踪参考模型参考状态变量 $x_r(t)$;

当被控对象参数 A_p 和 B_p 未知时, k^* 的值无法进行精确计算,因此,按照自适应的要求,通过不断地调整自适应机构的 \tilde{k} ,使被控对象的动态特性与参考模型的动态特性相一致,即使 e 为0,动态跟踪误差满足下式: $\dot{e} = A_r e - \tilde{k} B_p x_p$ 。

2. 根据权利要求1所述的一种应用在燃料电池热管理系统中的模型参考自适应控制方法,其特征在于实现燃料电池热管理系统的多变量线性状态空间模型的建立过程为:

根据热平衡方程可知,电堆在单位时间内产热、散热与电堆温度的动态模型如下式:

$$\frac{dT_{FC}}{dt} = \frac{Q_{react} - Q_g - Q_{cool} - Q_{conv}}{C_{p,FC} m_{FC}}$$

式中, T_{FC} -电堆的工作温度; $C_{p,FC}$ -电堆比热容; m_{FC} -电堆质量; Q_{react} -电堆工作产热量; Q_g -反应气体带出的热量; Q_{cool} -冷却液带出的热量; Q_{conv} -电堆向环境热辐射散发的热量;冷却液箱温度的动态模型:

$$C_{p,RV} \cdot m_{RV} \frac{dT_{RV}}{dt} = C_{p,cl} \cdot m_{cl} (T_{mix} - T_{RV}) - k_{RV} (T_{RV} - T_{amb})$$

式中, T_{RV} -冷却液箱温度; T_{amb} -环境温度; $C_{p,RV}$ -冷却液箱比热容; m_{RV} -冷却液箱质量; $C_{p,cl}$ -冷却液比热容; m_{cl} -冷却液质量流量; k_{RV} -冷却液箱对流换热系数; f -旁通阀开启系数;

T_{mix} -冷却液箱入口温度;

旁通阀模型:

$$T_{\text{mix}} = f \cdot T_{\text{rad,out}} + (1-f) T_{\text{byp}}$$

冷却液箱入口温度 T_{mix} 可以表示为 T_{byp} -旁通温度, $T_{\text{rad,out}}$ -散热器出口温度和 f -旁通阀开启系数的函数;

电堆温度在平衡点附近是有效和稳定的,因此,通过泰勒展开的方法将动态模型非线性微分方程组转换成多变量线性状态空间模型: $\dot{x} = Ax + B_u u + B_w w, y = Cx$ 。

一种应用在燃料电池热管理系统中的模型参考自适应控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种燃料电池汽车热管理系统中的模型参考自适应控制方法,属于燃料电池汽车技术领域,具体为一种应用在燃料电池热管理系统中的模型参考自适应控制方法。

背景技术

[0002] 燃料电池是一种将化学能转化为电能的发电装置,在不使用化石燃料的情况下,以氢气为燃料、空气/氧气为氧化剂,能够连续稳定地输出电能,产生水和热。基于此,燃料电池作为一种替代产品得到了广泛的研究。当前在各类燃料电池中,质子交换膜燃料电池的应用和研究最多,其具有功率密度高、效率高、工作温度低和启动快等优点。

[0003] 为了确保燃料电池系统的系统性能,在使用的过程中必须有效的控制进气的质量流量、压力、湿度和电堆温度等条件。燃料电池系统工作时,电堆温度会对气体传输特性、膜的含水量、催化层的催化活性都会产生不同程度的影响,进而会影响电堆的输出特性以及工作寿命。因此,温度控制是保证燃料电池系统高效和可靠性的关键问题。

[0004] 燃料电池系统具有高度的非线性、时变性和强耦合性,模型参数存在不确定性等特点。当前研究者们提出的温度控制方法,对模型参数的精度要求很高,同时需要对较多复杂的非线性微分方程组进行求解,过程非常繁琐,不易实现有效的控制,特别是在有动态负载和环境温度变化的情况下,容易出现跟踪滞后、超调量大等缺点,不太能够满足于实际系统对控制性能的要求。

[0005] 本发明设计了一种应用于燃料电池汽车热管理系统中的模型参考自适应控制方法,通过调节冷却液质量流量和旁通阀开启系数来控制电堆温度和循环冷却液入口温度。这种控制方法能够保证具有非线性特性的燃料电池系统,在外部温度和负载动态变化的情况下也能够跟踪预先建立的参考模型的输出,增强系统的鲁棒性。本发明中的控制方法具有开发速度快、成本低、易于实现等优点,可以方便地应用于各种功率等级的燃料电池系统中,进行实时有效的温度控制。

发明内容

[0006] 本发明的目的是提出一种燃料电池热管理系统中的模型参考自适应控制方法,能够在外部温度和负载动态变化的情况下,对燃料电池系统的温度实现实时有效的控制,提高系统的鲁棒性。

[0007] 本发明采用以下方案实现:

[0008] 1.实现燃料电池热管理系统的多变量线性状态空间模型的建立。

[0009] 1.1燃料电池在工作时,产生的热量主要通过冷却液和与周围环境的热扩散来消除。根据热平衡方程可知,电堆在单位时间内产热、散热与电堆温度的关系如下式:

$$[0010] \quad \frac{dT_{FC}}{dt} = \frac{Q_{react} - Q_g - Q_{cool} - Q_{conv}}{C_{p,FC} m_{FC}}$$

[0011] 式中, T_{FC} -电堆的工作温度; $C_{p,FC}$ -电堆比热容; m_{FC} -电堆质量; Q_{react} -电堆工作产热量; Q_g -反应气体带出的热量; Q_{cool} -冷却液带出的热量; Q_{conv} -电堆向环境热辐射散发的热量。

[0012] 1.2冷却液箱温度的动态模型:

$$[0013] \quad C_{p,RV} \cdot m_{RV} \frac{dT_{RV}}{dt} = C_{p,cl} \cdot m_{cl} (T_{mix} - T_{RV}) - k_{RV} (T_{RV} - T_{amb})$$

[0014] 式中, T_{RV} -冷却液箱温度; T_{amb} -环境温度; $C_{p,RV}$ -冷却液箱比热容; m_{RV} -冷却液箱质量; $C_{p,cl}$ -冷却液比热容; m_{cl} -冷却液质量流量; k_{RV} -冷却液箱自然对流换热系数; f -旁通阀开启系数, T_{mix} -冷却液箱入口温度。

[0015] 1.3旁通阀模型

$$[0016] \quad T_{mix} = f \cdot T_{rad,out} + (1-f) T_{byp}$$

[0017] 冷却液箱入口温度 T_{mix} 可以表示为 T_{byp} -旁通温度, $T_{rad,out}$ -散热器出口温度和 f -旁通阀开启系数的函数。

[0018] 1.4多变量线性状态空间模型

[0019] 电堆温度在平衡点附近是有效和稳定的,通过泰勒展开的方法将复杂的非线性微分方程组,转换成线性形式,如下:

$$[0020] \quad \dot{x} = Ax + B_u u + B_w w$$

$$[0021] \quad y = Cx$$

[0022] 式中, $x = [T_{FC}, T_{RV}]$ 状态变量, $u = [m_{cl}, f]$ 输入变量, $w = [T_{amb}, I]$ 干扰, $y = [T_{FC}, T_{RV}]$ 为输出。

[0023] 2.多变量线性状态空间模型参考自适应控制系统由参考模型、被控模型和自适应机构三部分组成。被控模型和参考模型形式为:

$$[0024] \quad \dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p u(t)$$

[0025] 式中, A_p, B_p 为 2×2 矩阵, $u(t)$ 为 2×1 维输入向量。

$$[0026] \quad \dot{x}_r(t) = A_r x_r(t) + B_r r(t)$$

[0027] 式中, A_r 和 B_r 为 2×2 稳定矩阵, $r(t)$ 为 2×1 维有界参考输入向量。

[0028] 3.被控模型跟踪参考模型,使得广义误差 e 最小,即被控模型的被控状态变量 $x_p(t)$ 跟踪参考状态变量 $x_r(t)$, $e = x_r(t) - x_p(t)$ 。

[0029] 4.不断地通过自适应机构更新参数矩阵 k^* ,以迫使被控模型的被控状态变量跟踪参考状态变量。当被控对象参数 A_p 和 B_p 已知时,控制律的形式如下:

$$[0030] \quad u(t) = \tilde{k} \cdot x_p - r(t) = x_p \int_0^t e x_p \gamma dt - r(t)$$

$$[0031] \quad \text{由 } \tilde{k} = k - k^*, \text{ 可得 } \dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p [(k - k^*) x_p(t) - r(t)]$$

[0032] 其中 k 是参数时变的增益矩阵, k^* 为 k 的最优值,是模型匹配时控制器的参数矩阵。

[0033] $A_p - B_p k^* = A_r$

[0034] $B_p = B_r$

[0035] 当被控对象参数 A_p 和 B_p 未知时, k^* 的值无法进行精确计算。因此,按照自适应的要求,调整 \tilde{k} ,使被控对象的动态特性与参考模型的动态特性相一致,即使 e 为0。动态跟踪误差满足下式:

[0036] $\dot{e} = A_r e - \tilde{k} B_p x_p$

[0037] 5.分析整个MRAC系统的稳定性,选择一个Lyapunov函数,如下:

[0038] $V(e, \tilde{k}) = e^T P e + \tilde{k}^T \Gamma^{-1} \tilde{k}$

[0039] 其中, P 和 Γ^{-1} 均是正定矩阵,对于给定的任意一个对称正定矩阵 Q , P 满足方程: $A_r^T P + P A_r = -Q$ 。

[0040] 对上述Lyapunov函数求导,得: $\dot{V} = -e^T Q e - 2e^T P B_p \tilde{k} x_p + 2\dot{\tilde{k}}^T \Gamma^{-1} \tilde{k}$,为保证 $\dot{V} = -e^T Q e < 0$ 满足负定的要求,得到自适应变化率: $\dot{\tilde{k}} = \gamma e x_p$ 。

[0041] 综上,本发明的控制方法,在考虑环境温度与电流变化干扰的情况下,通过控制冷却液质量流量和旁通阀开启系数,来有效控制电堆温度和冷却液进口温度。能够提高控制系统的鲁棒性,通过不断地更新自适应机构控制增益,来实现被控模型的输出状态跟踪参考输出。

[0042] 与现有技术相比,本发明有以下有益效果:

[0043] 1.本发明的控制方法在设计时,对模型参数的精度要求不高,考虑外部温度和负载动态变化的影响,通过控制冷却液质量流量和旁通阀开启系数,对电堆温度和冷却液入口温度进行有效控制,增强了系统的鲁棒性,提高了系统的温度控制效果。

[0044] 2.本发明的控制方法,能够确保在外部温度和负载动态变化的情况下,通过不断地调整自适应机构的控制增益,使具有非线性特性的燃料电池热管理系统的输出响应紧跟参考模型的输出,避免了出现跟踪滞后、超调量大等问题。

附图说明

[0045] 图1为本发明实施例中燃料电池系统结构原理图。

[0046] 图2为本发明实施例中应用在燃料电池热管系统中的模型参考自适应控制方法原理图。

[0047] 图3为本发明实施例中,当电流密度变化时,反馈控制和自适应控制方法对温度控制的效果图。

具体实施方式

[0048] 下面结合附图对本发明做进一步说明。

[0049] 应该指出,以下详细说明都是示例性的,旨在对本申请提供进一步的说明,但附图中的实例不能够成为对本发明的任何限制。除非另有指明,本文使用的所有技术和科学术语具有与本申请所属技术领域的普通技术人员通常理解的含义。

[0050] 如图1所示,为发明实施例中燃料电池系统结构原理图,主要包括以下部件:PEMFC、电力负载、空压机、中冷、加湿器、冷却泵、旁通阀、散热器、冷却液箱、氢罐、引射器和氢循环泵等。

[0051] 根据热平衡方程可知,电堆在单位时间内产热、散热与电堆温度的关系如下式:

$$[0052] \quad \frac{dT_{FC}}{dt} = \frac{Q_{react} - Q_g - Q_{cool} - Q_{conv}}{C_{p,FC} m_{FC}}$$

[0053] 式中, T_{FC} -电堆温度; $C_{p,FC}$ -电堆比热容; m_{FC} -电堆质量; Q_{react} -电堆工作产热量; Q_g -反应气体带出的热量; Q_{cool} -冷却液带出的热量; Q_{conv} -电堆向环境热辐射散发的热量。

[0054] 冷却液箱温度的动态模型:

$$[0055] \quad C_{p,RV} \cdot m_{RV} \frac{dT_{RV}}{dt} = C_{p,cl} \cdot m_{cl} (T_{mix} - T_{RV}) - k_{RV} (T_{RV} - T_{amb})$$

[0056] 式中, T_{RV} -冷却液箱温度; T_{amb} -环境温度; $C_{p,RV}$ -冷却液箱比热容; m_{RV} -冷却液箱质量; $C_{p,cl}$ -冷却液比热容; m_{cl} -冷却液质量流量; k_{RV} -冷却液箱自然对流换热系数; f -旁通阀开启系数, T_{mix} -冷却剂箱入口温度。

[0057] 旁通阀的模型,如下式:

$$[0058] \quad T_{mix} = f \cdot T_{rad,out} + (1-f) T_{byp}$$

[0059] 式中,冷却剂箱入口温度 T_{mix} 可以表示为 T_{byp} -旁通温度, $T_{rad,out}$ -散热器出口温度和 f -旁通阀开启系数的函数。

[0060] 电堆温度在平衡点附近是有效和稳定的,通过泰勒展开的方法将复杂的非线性微分方程组,转换成线性形式,如下:

$$[0061] \quad \dot{x} = Ax + B_u u + B_w w$$

$$[0062] \quad y = Cx$$

[0063] 式中, $x = [T_{FC}, T_{RV}]$ 状态变量, $u = [m_{cl}, f]$ 输入变量, $w = [T_{amb}, I]$ 干扰, $y = [T_{FC}, T_{RV}]$ 为输出。

[0064] 在本发明的控制方法中,考虑环境温度与电流变化干扰的情况,通过控制冷却液质量流量(m_{cl})和旁通阀开启系数(f),来有效控制电堆温度(T_{FC})和冷却液入口温度(T_{RV})。

[0065] 被控模型和参考模型形式为:

$$[0066] \quad \dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p u(t)$$

[0067] 式中, A_p, B_p 为 2×2 矩阵, $u(t)$ 为 2×1 维输入向量。

$$[0068] \quad \dot{x}_r(t) = A_r x_r(t) + B_r r(t)$$

[0069] 式中, A_r 和 B_r 为 2×2 稳定矩阵, $r(t)$ 为 2×1 维有界参考输入向量。

[0070] 如图2所示为发明实施例中模型参考自适应控制方法的原理图,被控模型跟踪参考模型,使得广义误差 $e = x_r(t) - x_p(t)$ 最小,即被控模型 $x_p(t)$ 的状态跟踪参考状态变量 $x_r(t)$ 。通过不断调整自适应机构参数矩阵 k^* ,以使被控模型的输出状态跟踪参考输出。当被控对象参数 A_p 和 B_p 已知时,控制律的形式如下:

$$[0071] \quad u(t) = \tilde{k} \cdot x_p - r(t) = x_p \int_0^t e x_p \gamma dt - r(t)$$

[0072] 由 $\tilde{k} = k - k^*$, 可得 $\dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p [(k - k^*)x_p(t) - r(t)]$

[0073] 其中 k 是参数时变的增益矩阵, k^* 为 k 的最优值, 是模型匹配时控制器的参数矩阵。

[0074] $A_p - B_p k^* = A_r$

[0075] $B_p = B_r$

[0076] 当被控对象参数 A_p 和 B_p 未知时, k^* 的值无法进行精确计算。因此, 按照自适应的要求, 调整 \tilde{k} , 使被控对象的动态特性与参考模型的动态特性相一致, 即使 e 为 0。动态跟踪误差满足下式:

[0077] $\dot{e} = A_r e - \tilde{k} B_p x_p$

[0078] 对整个自适应控制系统的稳定性进行分析, 选择一个 Lyapunov 函数, 如下:

[0079] $V(e, \tilde{k}) = e^T P e + \tilde{k}^T \Gamma^{-1} \tilde{k}$

[0080] 其中, P 和 Γ^{-1} 均是正定矩阵, 对于给定的任意一个对称正定矩阵 Q , P 满足方程: $A_r^T P + P A_r = -Q$ 。

[0081] 对上述 Lyapunov 函数求导, 得: $\dot{V} = -e^T Q e - 2e^T P B_p \tilde{k} x_p + 2\dot{\tilde{k}}^T \Gamma^{-1} \tilde{k}$, 为保证 $\dot{V} = -e^T Q e < 0$ 满足负定的要求, 得到自适应变化率: $\dot{\tilde{k}} = \gamma e x_p$ 。

[0082] 图 3 为本发明实施例中电流密度变化时, 反馈控制和自适应控制对电堆温度和冷却液入口温度的控制效果图。仿真结果表明, 采用自适应控制方法较反馈控制方法好, 能够使燃料电池热管理系统在具有干扰的影响的情况下, 通过不断地更新自适应机构控制增益, 来实现被控模型的输出状态跟踪参考输出, 使系统有更好的瞬态响应特性。保证通过控制冷却液质量流量和旁通阀开启系数, 可以有效控制电堆温度和冷却液入口温度, 避免了温度控制系统容易出现跟踪滞后、超调量大等缺点。

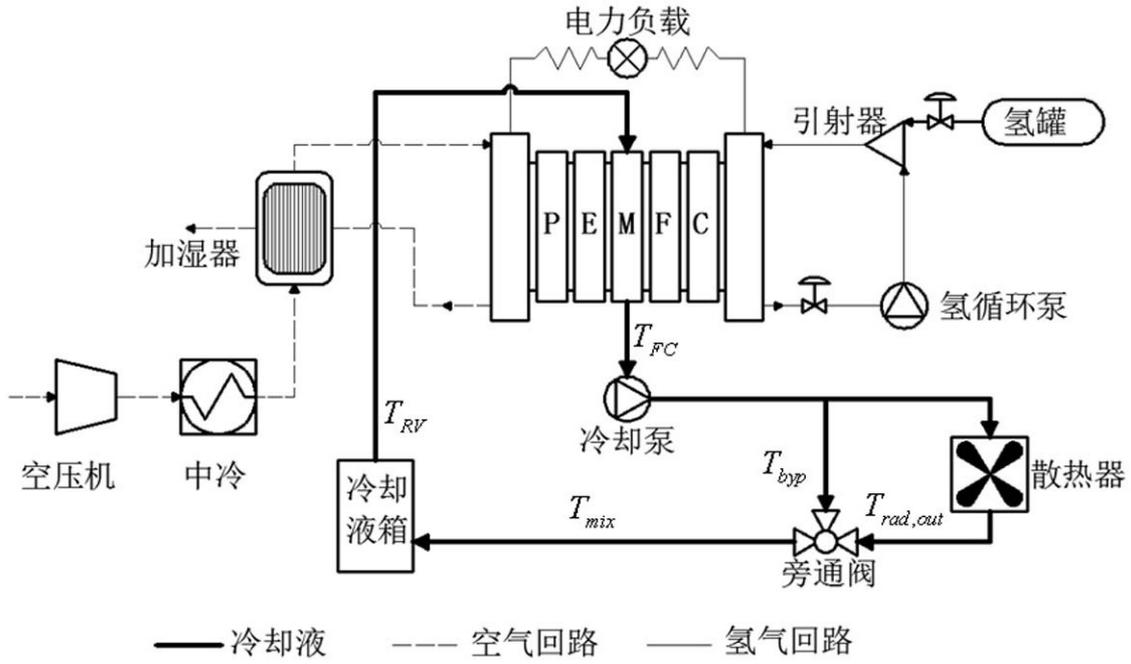


图1

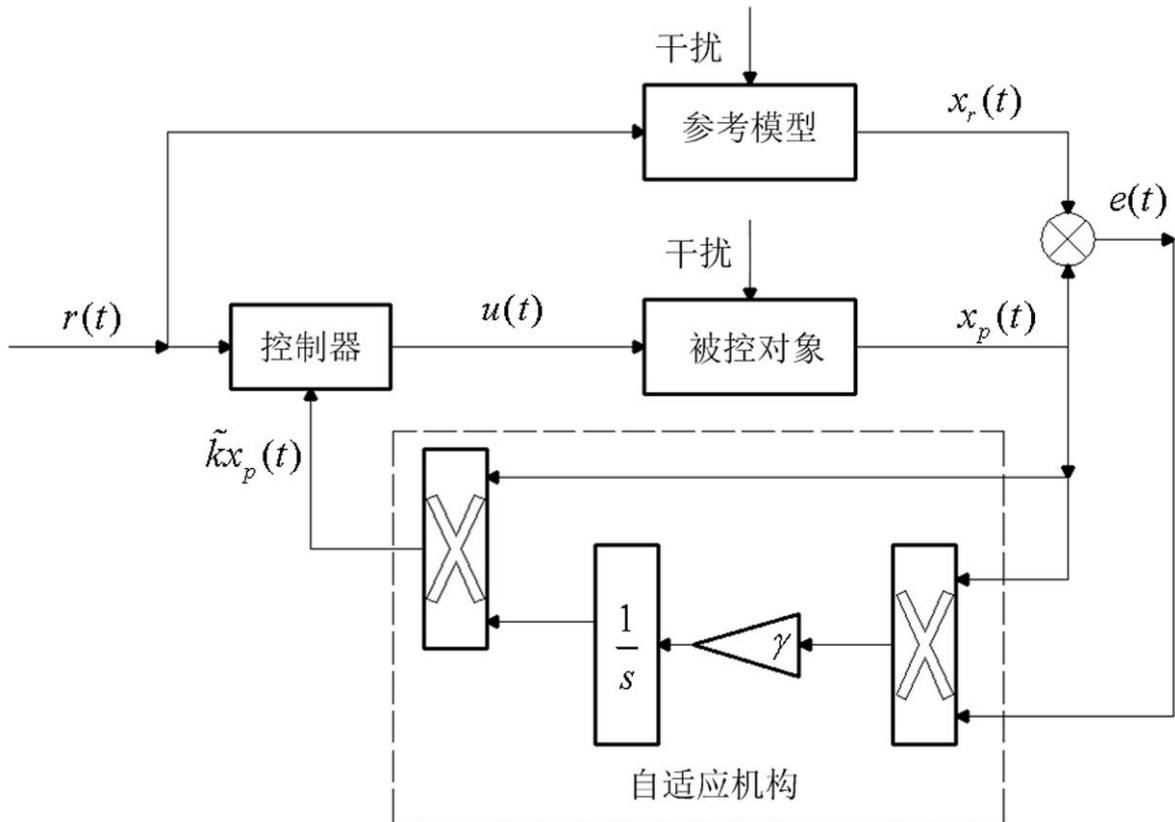


图2

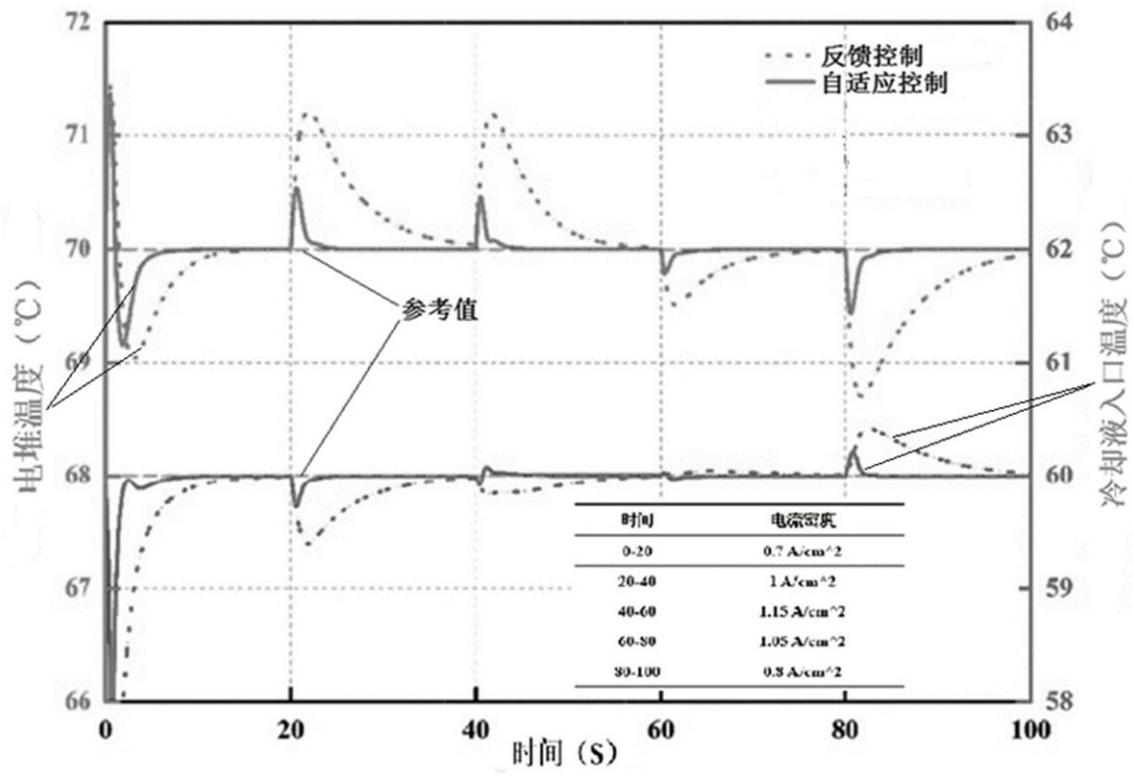


图3