

基于观测器的发动机转矩跟踪模型预测控制

康铭鑫, 李长平, 刘腾飞

引用本文:

康铭鑫, 李长平, 刘腾飞. 基于观测器的发动机转矩跟踪模型预测控制[J]. *控制与决策*, 2020, 35(4): 791–798.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0879>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

拒绝服务攻击下领导-跟随多智能体系统的均方一致性研究

Mean square consensus for leader-following multi-agent systems under denial-of-service attacks

控制与决策. 2019, 34(11): 2317–2322 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0588>

含未标定摄像机参数的非完整移动机器人的自适应动力学跟踪控制

Adaptive dynamics tracking control for nonholonomic mobile robots with uncalibrated camera parameters

控制与决策. 2019, 34(10): 2164–2170 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0191>

基于无源性的全方位移动机器人自抗扰控制

Passivity-based active disturbance rejection control of an omni-directional mobile robot

控制与决策. 2018, 33(6): 1081–1086 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0114>

基于扩张状态观测器的动态抗饱和补偿器设计方法

Dynamic anti-windup compensator design based on ESOs

控制与决策. 2018, 33(11): 2087–2093 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0766>

随机时滞系统的神经网络输出反馈动态面控制

Output-feedback neural DSC control for stochastic nonlinear time-delay systems

控制与决策. 2017, 32(8): 1377–1385 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0758>

级联式滑模观测器的永磁同步电机鲁棒滑模控制

Robust sliding mode control of PMSM based on cascaded sliding mode observers

控制与决策. 2016, 31(11): 2071–2076 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1314>

迭代扩张状态观测器及其在迭代学习控制中的应用

Iterative extended state observer and its application in iterative learning control

控制与决策. 2015(3): 473–478 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1765>

无刷双馈电机自抗扰控制方法

Active disturbance rejection control strategy for brushless doubly-fed machine

控制与决策. 2015, 30(12): 2293–2297 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1625>

基于观测器的发动机转矩跟踪模型预测控制

康铭鑫[†], 李长平, 刘腾飞

(东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 110004)

摘要: 针对如何实现发动机转矩快速精准地跟踪期望转矩的问题, 提出一种基于观测器的模型预测控制策略. 首先, 利用均值模型对汽油发动机的进气歧管压力动态、转矩和转速动态进行建模, 考虑到发动机真实转矩不可测的情况, 采用 Lyapunov 稳定性理论和可测转速信号设计观测器对进气歧管压力进行在线估计, 进而获得发动机的实时估计转矩; 然后, 利用基于观测器的模型预测控制算法设计转矩跟踪控制器, 通过 C/GMRES 数值优化算法在线求解滚动时域优化问题, 实现转矩的实时跟踪控制; 最后, 利用汽油发动机实验台进行实验验证以表明所提出算法的有效性.

关键词: 转矩控制; 模型预测控制; 观测器设计; 优化控制; 汽车发动机

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Observer based model predictive torque tracking control for gasoline engines

KANG Ming-xin[†], LI Chang-ping, LIU Teng-fei

(State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: This paper proposes an observer based model predictive control for the torque tracking problem of automotive engines. The mean-value model involving the intake manifold pressure dynamics, torque production and rotational dynamics are built for characterizing the engine dynamic behaviors. Regarding the real torque is unmeasurable, an observer is designed based on Lyapunov stability analysis and the measured speed signal to online estimate the intake manifold pressure, and then the engine torque is calculated based on the estimated manifold pressure and the engine speed. The torque tracking controller is designed with the model predictive control scheme and the receding horizon optimization problem is solved by means of the numerical computation algorithm of C/GMRES. Finally, the experiment is performed on the full-scale gasoline engine test bench, and the results show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: torque control; model predictive control; observer design; optimal control; automotive engine

0 引言

汽车发动机结构复杂、控制变量众多, 是典型的非线性复杂被控对象. 由于发动机系统涉及多个子控制回路, 为协调各子控制回路, 确保发动机动力快速稳定输出, 基于扭矩的控制策略成为当前发动机的基本控制方式^[1]. 在该策略下, 让发动机实际输出转矩快速精准地跟踪期望转矩是其关键问题之一. 传统的转矩控制方法是以“离线标定, 在线查表”的前馈控制方法为主, 这种控制方法虽然算法简单、计算量低, 但是需要大量的标定工作, 且由于发动机工作条件复杂多变、零部件磨损老化等原因导致不可避免地存在标定误差, 不能保证扭矩的精确控制. 随着电控技术的发展以及车载控制器计算能力的提高,

许多先进的控制算法开始尝试应用到扭矩跟踪控制上. 例如, 文献[2]提出了一种基于 Takagi-Sugeno(TS)模型的联合控制算法, 即应用模糊控制和鲁棒控制实现发动机转矩的跟踪控制. 文献[3]利用发动机均值模型设计前馈控制器, 同时引入 PID 反馈控制完成了扭矩跟踪控制. 然而, 由于发动机本身的强非线性、参数时变性以及控制量带有一定的物理约束, 使得发动机的扭矩控制仍具有挑战性.

近年来, 为解决发动机控制系统中的复杂问题, 提高开发效率, 减少开发成本, 基于模型的控制算法设计(model-based development, MBD)得到了广泛关注^[4]. 在这一背景下, 模型预测控制(model predictive control, MPC)由于其设计方法简单, 具备性能优化

收稿日期: 2019-06-19; 修回日期: 2019-09-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61803079, 61890924).

[†]通讯作者. E-mail: kangmx@mail.neu.edu.cn.

能力且能够处理带约束的多变量控制问题等多方面优势,在汽车发动机控制中显示出巨大的应用潜力^[5-6]. MPC算法的核心包括预测模型、滚动优化和反馈校正3个部分,即将当前时刻的采样作为初值,利用系统的动态模型预测未来有限时域区间内的系统运动轨迹,同时优化求解在该时域区间内使得给定性能指标最优的控制量序列,将最优控制序列的首个控制值作用到系统控制中. 在下一控制采样时刻,重复进行上述优化过程,从而实现系统的滚动时域优化控制^[7]. 由于MPC需要在线求解有限时域区间内的泛函优化问题,导致其计算量巨大,难以应用到快动态控制系统,限制了其在发动机控制中的广泛应用. 近年来一些文献试图将MPC方法应用到发动机控制中. Murilo等^[8]将非线性模型预测应用到柴油机气路系统控制,通过仿真验证了控制算法的实时性与有效性. Herceg等^[9]将非线性模型预测控制应用于柴油机的废气再循环控制中,达到节能减排的目的.

以上文献均采用仿真分析的手段对MPC的控制效果进行研究,而面向发动机的实验研究相对较少. 文献[10]将模型线性化,构建模型预测控制器对发动机的怠速进行实验验证研究,线性化后直接利用二次规划(QP)方法完成实时优化控制,但这种方法只能在简单的怠速工况下奏效. 文献[11]提出了一种基于非线性MPC的扭矩控制方法,采用数值优化求解算法-连续广义最小余差法(C/GMRES)实现发动机的扭矩跟踪控制并且完成实验验证,但该研究假设发动机的扭矩是可测量的,而大多数商用发动机由于成本原因不会安装此传感器,限制了该方法的进一步应用推广.

本文针对汽车发动机的强非线性特征和转矩状态不可测量的实际问题,提出了一种基于非线性MPC算法和状态观测器的转矩跟踪控制器设计方案. 首先以发动机的均值模型为基础对进气歧管压力和转矩进行建模,通过系统增维方式在控制器设计中引入转矩跟踪误差积分器,解决了由建模误差造成的控制精度降低的问题;然后,考虑到大多数量产汽车发动机无转矩传感器的情况,通过对转速动态建模以及李雅普诺夫稳定性分析方法设计转矩观测器,从而建立了基于观测器的转矩控制器设计架构,并采用数值优化算法-连续广义最小残差法(C/GMRES)^[12]实现在线优化求解;最后,在汽油发动机台架上进行实验验证,实验结果表明了所设计算法的有效性. 本文的研究结果为MPC算法在非线性和快时变动态系统的实际工程应用提供了有力参考,同时实验结果也表

明了基于观测器的控制器设计具有非常良好的应用前景.

1 系统模型

MPC是一种基于模型的控制方法,其控制效果很大程度上依赖于模型的准确性. 然而,由于发动机工作过程复杂,涉及热力学、流体力学和机械运动学等多学科知识^[13-14],很难建立精确的发动机动力学模型,为了避免建模的复杂性,本文采用均值模型描述从进气到转矩产生的动态过程. 均值模型是指在建模过程中忽略发动机缸与缸之间以及燃烧循环之间气体流量瞬态迁移,将进气歧管内气体的平均流量作为状态量进行建模^[15]. 根据均值建模原理,汽油发动机的模型归纳为3个部分:进气歧管动态模型、转矩生成模型和曲轴旋转动力学模型. 图1为汽油发动机的工作原理及主要动态过程.

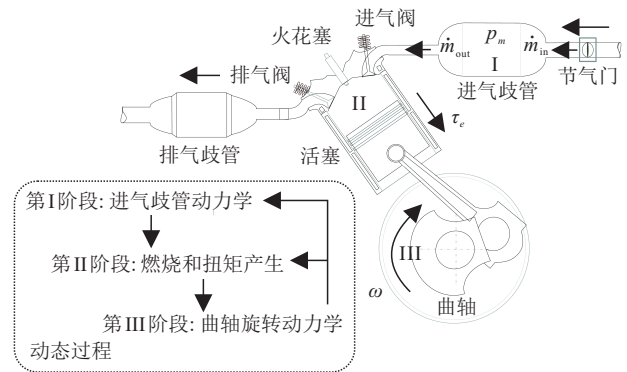


图1 汽油发动机系统动力学

在等温假设条件下,进气歧管的动态过程主要体现在歧管压力的动态变化. 根据理想气体方程可以推导出以下关系^[13-14,16]:

$$\dot{p}_m = \frac{RT_m}{V_m} (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}). \quad (1)$$

其中: p_m 为进气歧管压力; R 、 T_m 、 V_m 分别为理想气体常数、进气歧管内气体温度、进气歧管体积; \dot{m}_{in} 为通过节气门的空气质量流量; \dot{m}_{out} 为进入气缸内的空气质量流量. 假设进气歧管内的空气是不可压缩的,同时忽略了摩擦力和惯性效应,根据伯努利方程,通过节气门孔口进入歧管的空气质量流量可以描述如下:

$$\dot{m}_\epsilon = \frac{\pi c_d D^2}{4} \left(1 - \frac{\cos(\phi)}{\cos(\phi_0)}\right) \sqrt{2\rho(p_a - p_m)}. \quad (2)$$

其中: c_d 为流量系数; ρ 为空气流密度; p_a 为节气阀上游压力,可认为与大气压力相同; D 为节流阀的直径; ϕ_0 为节气阀的初始开度. 通过式(2)可以看出,通过孔口的空气质量流量具有较强的非线性特点,在本研究中,为了避免控制器设计的复杂性,将空气质量流量 \dot{m}_{in} 视为控制量.

此外,对于典型的四冲程汽油发动机,从歧管流出的空气质量流量 \dot{m}_{out} 实际上是由进气歧管压力和单个气缸入口压力的差值决定的.根据均值建模原理,忽略不同气缸之间进气瞬态特征,进入气缸的空气质量流量是与发动机转速和进气歧管压力有关的函数^[14],有

$$\dot{m}_{\text{out}} = \frac{\eta_v V_d}{4\pi R T_m} P_m \omega. \quad (3)$$

其中: V_d 为扫气容积; ω 为发动机转速,单位是弧度每秒; η_v 为容积效率,通常与发动机转速和进气歧管压力有关.为了简化模型,本文将容积效率认为是常数.

将式(3)代入(1),进气歧管的动力学模型可以表示为

$$\dot{p}_m = c_1 \dot{m}_{\text{in}} - c_2 \omega p_m. \quad (4)$$

其中: $c_1 = \frac{RT_m}{V_m}$, $c_2 = \frac{RT_m \eta_v V_d}{4\pi R V_m T_m} > 0$, c_1 、 c_2 可以通过实验标定和最小二乘辨识方法获得.为了推导扭矩模型,假设缸内油气混合物的质量比例满足理想空燃比以获得最佳的排放性能和燃烧效率,因此喷油量^[17]可以表示为

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_{\text{out}}}{\lambda}, \quad (5)$$

其中 λ 为理想空燃比常数.气缸内油气混合物适时点燃至充分燃烧,气体膨胀做功,产生的指示功率 p_i ^[14]可以表示为

$$p_i = H_l \eta_i \dot{m}_f. \quad (6)$$

其中: H_l 为燃料低热值, η_i 为指示效率.式(6)代表了发动机的平均指示功率,相应的平均指示转矩 τ_i 可进一步表示为

$$\tau_i = \frac{p_i}{\omega} = \frac{H_l \eta_i \eta_v V_d}{4\pi R T_m \gamma \lambda} p_m. \quad (7)$$

通过以上分析,发动机实际输出扭矩 τ_e 可表示为平均指示扭矩减去摩擦转矩,即

$$\tau_e = \frac{H_l \eta_i \eta_v V_d}{4\pi R T_m \gamma \lambda} p_m - \tau_f, \quad (8)$$

其中 τ_f 为摩擦转矩,取值受到发动机转速、温度等参数的影响.当发动机长时间稳定运行时温度变化基本稳定,认为摩擦转矩主要取决于发动机转速^[13,16].为简化描述,可将式(8)改写为

$$\tau_e = g_1(\omega) p_m - g_2(\omega). \quad (9)$$

参数 $g_1(\omega)$ 和 $g_2(\omega)$ 是与发动机转速相关的函数,可以通过实验标定获得.

发动机活塞做功产生的转矩推动曲轴旋转,转速动态可根据Newton定律获得,有

$$J \dot{\omega} = \tau_e - \tau_l. \quad (10)$$

其中: J 为发动机转动惯量系数, τ_l 为作用在曲轴上的负载转矩.

综上,发动机的工作过程可用动态模型(4)、(10)和静态转矩模型(9)描述.事实上,发动机的转矩动态比转速的动态时间响应要快得多,因此在设计转矩控制器时往往忽略转速的动态过程而将转速作为外部扰动.基于以上模型,本文设计了针对转矩跟踪问题的模型预测控制器.

2 控制器设计

2.1 MPC问题描述

本文的控制目标是通过调节节气门角度实现扭矩的快速跟踪,模型预测控制的性能指标可记为

$$J(\dot{m}_{\text{in}}) = \int_t^{t+T} [r_1 (\tau_e(t+\tau) - \tau_d(t+\tau))^2 + r_2 \dot{m}_{\text{in}}(t+\tau)^2] d\tau. \quad (11)$$

其中: $\tau \in [0, T]$, T 为预测区间; r_1 、 r_2 为权重系数; τ_d 为期望转矩.MPC的核心思想是在每一采样时刻 t ,对于任意给定的期望转矩 $\tau_d(t)$ 和瞬时状态采样 $p_m(t)$,求解出使得性能指标(11)最小的控制序列 $\dot{m}_{\text{in}}^*(t+\tau)$,同时系统的状态运行轨迹受制于系统的动态模型(4)和转矩方程(9)以及满足以下系统的物理约束边界:

$$\begin{cases} p_{\min} \leq p_m \leq p_{\max}, \\ \dot{m}_{\min} \leq \dot{m}_{\text{in}} \leq \dot{m}_{\max}. \end{cases} \quad (12)$$

需要注意,此处约束条件主要是对系统状态 p_m 和控制变量 \dot{m}_{in} 施加边界条件.对于自然吸气式发动机的进气系统,进气歧管压力不可能超出外界大气压力,并且要高于发动机全负荷运转时歧管压力的最小值;同样,进气空气流量亦要满足实际物理系统的上下边界.通过实时求解以上优化问题,可获得在 $[t, t+T]$ 内最优的系统控制轨迹.在实际控制过程中,仅将优化得到的控制序列的第1个元素作用到被控对象上,在下一控制采样时刻,执行同样的优化过程.

2.2 嵌入式积分控制器设计

模型精度是影响MPC控制性能的重要因素.由于发动机系统的复杂性,精确的模型参数难以获得,为了消除模型误差造成的控制精度降低,本文提出了一种改进的MPC转矩跟踪控制器,将转矩跟踪误差的积分嵌入到预测模型中,积分器的优点是可以实时预测动态跟踪误差进而修正控制偏差,具体设计方法如下.

定义进气质量流量 \dot{m}_{in} 由两部分组成,即

$$\dot{m}_{in} = kv(t) + u(t). \quad (13)$$

其中: $v(t) = \int_0^t (\tau_e - \tau_d) d\tau$, 表示转矩跟踪误差的积分, 用于消除跟踪误差; $u(t)$ 为辅助控制量, 用于快速地动态控制补偿. 由此, MPC 优化问题可以表述为: 在采样时刻 t , 对于任意给定期望转矩 $\tau_d(t)$ 和瞬时状态 $p_m(t)$, 优化求解控制输入轨迹 $u_t(\tau) = u(t + \tau)$, $\tau \in [0, T]$ 使得如下有限时域区间内的性能指标最小:

$$J(u) = \int_t^{t+T} [r_1(\tau_d(t+\tau) - \tau_e(t+\tau))^2 + r_2 u(t+\tau)^2] d\tau. \quad (14)$$

其中系统轨迹受制于如下动态方程:

$$\begin{cases} \dot{p}_m = c_1 \dot{m}_{in} - c_2 \omega p_m, \\ \dot{v} = g_1(\omega) p_m + g_2(\omega) - \tau_d \end{cases} \quad (15)$$

和转矩方程(9)以及约束条件

$$\begin{cases} p_{min} \leq p_m \leq p_{max}, \\ u_{min} \leq u \leq u_{max}. \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中, 需要对辅助控制变量 u 进行小范围内的限幅, 主要目的是为避免由式(13)获得最终的进气质量流量出现较大的波动, 进而影响控制性能.

根据 MPC 问题的描述, 在每一采样时刻 t , 可以获得最优控制输入 $u^*(t) = u_t(0)$, 进而最优的进气质量流量 \dot{m}_{in} 可由式(13)计算得到. 在实际的发动机系统中, 进气质量流量并不是直接可控变量, 需要通过式(2)所示的物理关系将其进一步转换为节气门开度, 最终实现发动机转矩的控制.

本研究中, MPC 在线优化将通过快速优化数值解法 C/GMRES 实现. 该算法基于 Pontryagin 极大值原理, 采用微分方程前向差分的近似连续求解算法 (Continuation) 与求解线性方程组的广义最小残差法 (GMRES) 相结合, 通过求解线性方程组代替求解 Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 微分方程得到近似最优解, 实现快速优化计算^[12,17]. 在实时控制系统中, 每个采样时刻将系统的状态量 $p_m(t)$ 采样给控制器, 利用 C/GMRES 算法求解上述优化问题, 获得 N 步离散控制序列 $\{u^*(0), u^*(1), \dots, u^*(N-1)\}$, 其中 N = 期望转矩 τ_d

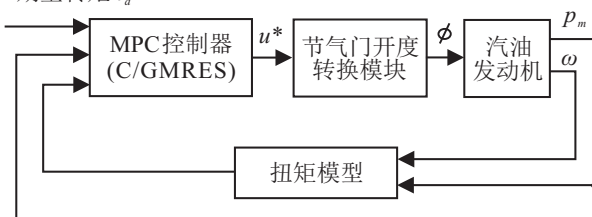


图2 MPC转矩跟踪控制方案结构

$T/\Delta T$, ΔT 为采样周期. 最后将优化序列的第1个元素值 $u^*(0)$ 应用到控制对象中, 控制结构如图2所示.

2.3 进气歧管压力观测器设计

在上述转矩跟踪控制器设计中, 进气歧管压力 p_m 被认为是可测的, 但在绝大多数量产的商用发动机中, 由于成本原因不会配备歧管压力传感器. 为应用所提出的控制方法, 本节将利用 Lyapunov 稳定性分析方法进一步设计进气歧管压力观测器.

考虑到发动机转速是可测量的, 定义 \hat{p}_m 、 $\hat{\omega}$ 为进气歧管压力估计值和转速估计值, 系统的动态模型可写成

$$\begin{cases} \dot{\hat{p}}_m = c_1 \dot{m}_{in} - c_2 \omega \hat{p}_m + \psi(\omega - \hat{\omega}), \\ \dot{\hat{\omega}} = \frac{1}{J} (g_1(\omega) \hat{p}_m + g_2(\omega) - \tau_l), \end{cases} \quad (17)$$

其中 $\psi(\omega - \hat{\omega})$ 为所设计的观测器. 为了推导上述系统观测器的形式, 定义 $\tilde{p}_m = p_m - \hat{p}_m$, $\tilde{\omega} = \omega - \hat{\omega}$, 系统的动态误差方程可以描述为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{p}}_m = -c_2 \omega \tilde{p}_m - \psi(\tilde{\omega}), \\ \dot{\tilde{\omega}} = \frac{1}{J} g_1(\omega) \tilde{p}_m. \end{cases} \quad (18)$$

根据以上误差动力学模型, 可以得出如下定理.

定理1 对于系统(18)以及任意给定的发动机转速, 若观测器 $\psi(\tilde{\omega})$ 选择如下形式:

$$\psi(\tilde{\omega}) = \frac{1}{r} g_1(\omega) \tilde{\omega}, \quad (19)$$

则系统的误差动态将满足李雅普诺夫稳定性, 其中 $r > 0$ 为调节增益. 即当 $t \rightarrow \infty$ 时, 误差 $\tilde{\omega} \rightarrow 0$, $\tilde{p}_m \rightarrow 0$.

证明 对于误差动态系统(18), 选择李雅普诺夫函数如下:

$$V = \frac{r}{2} \tilde{p}_m^2 + \frac{1}{2} J \tilde{\omega}^2. \quad (20)$$

根据系统(18)误差状态的运行轨迹, 有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= r \tilde{p}_m \dot{\tilde{p}}_m + J \tilde{\omega} \dot{\tilde{\omega}} = \\ &= r c_2 \omega \tilde{p}_m^2 - r \psi(\tilde{\omega}) \tilde{p}_m + g_1(\omega) \tilde{\omega} \tilde{p}_m. \end{aligned} \quad (21)$$

当 $\psi(\tilde{\omega})$ 满足式(19)时, 得出 $\dot{V} = -r c_2 \omega \tilde{p}_m^2 < 0$, 即系统(18)满足 Lyapunov 渐近稳定. \square

基于所提出观测器, MPC 转矩跟踪控制器的预测模型改写为

$$\begin{cases} \dot{\hat{p}} = c_1 \dot{m}_{in} - c_2 \omega \hat{p}, \\ \dot{\hat{v}} = g_1(\omega) \hat{p} + g_2(\omega) - \tau_d. \end{cases} \quad (22)$$

注意式(22)中模型参数 $g_1(\omega)$ 和 $g_2(\omega)$ 是准确已知的. 基于观测器的控制系统结构如图3所示.

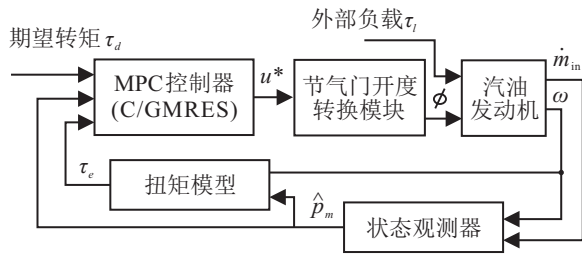


图3 基于观测器的MPC转矩跟踪控制

3 实验验证

3.1 实验平台

本文采用如图4所示的汽油发动机控制台架进行控制算法的实验验证。低惯量电力测功机与发动机输出轴相连接,用来模拟发动机的动态负载。

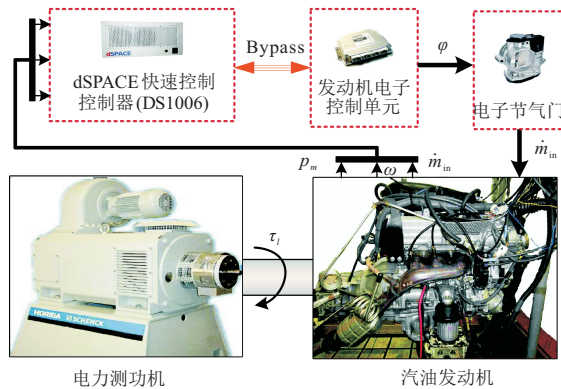


图4 汽油发动机实验平台结构

发动机采用丰田公司3.5升排量6缸汽油发动机。在该发动机中已配备了一些传感器,如进气质量流量传感器和转速编码器。本文为了测试观测器的性能进一步安装了进气歧管压力传感器。为实现对发动机的实时控制,采用dSPACE可编程快速原型控制器与发动机的电控单元(ECU)以共享内存的方式进行实时通讯控制,因此通过dSPACE可以实时监控发动机的运行状态和写入外部的控制指令。本文所提出的MPC优化算法可以通过自动代码生成技术在dSPACE中实时执行。

3.2 模型辨识和验证

发动机扭矩模型(9)可以通过稳态标定实验获得,实验数据和拟合结果如图5和图6所示。图5展示了发动机扭矩、转速和进气歧管压力之间的静态关系,可以看出在固定转速条件下,发动机转矩与进气歧管压力呈现式(9)所示的线性关系,模型参数 $g_1(\omega)$ 和 $g_2(\omega)$ 可以通过多项式拟合实现,即

$$g_1(\omega) = p_1\omega^3 + p_2\omega^2 + p_3\omega + p_4,$$

$$g_2(\omega) = q_1\omega^3 + q_2\omega^2 + q_3\omega + q_4.$$

本文利用递归最小二乘(recursive least square, RLS)估计算法和多项式曲线拟合技术辨识系统动

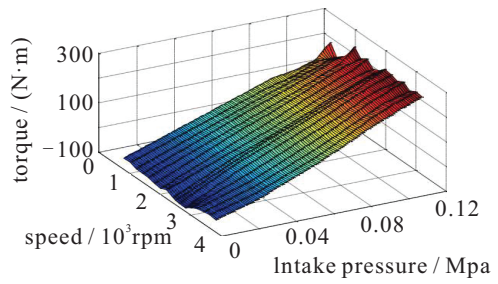


图5 发动机扭矩、转速与歧管压力关系

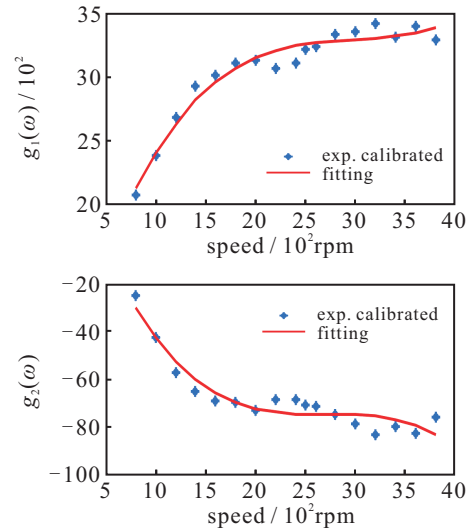


图6 转矩模型参数拟合结果

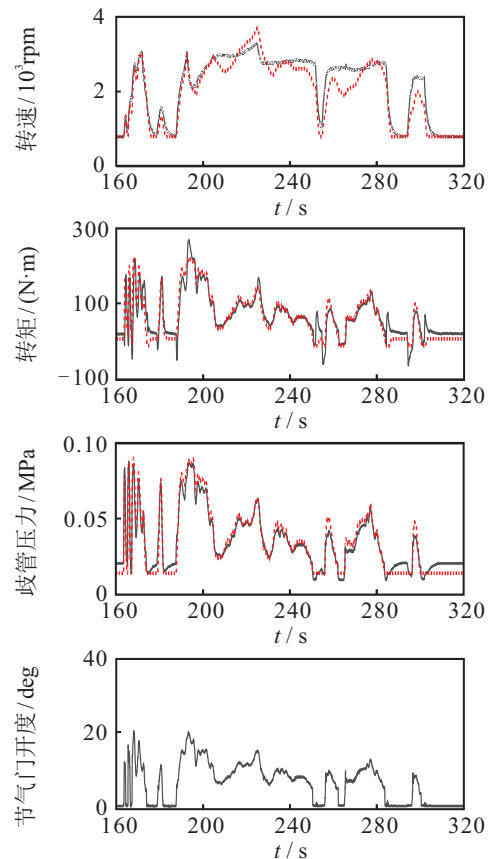


图7 发动机模型验证结果

态微分模型(4)和(10)的未知参数。图7为发动机在节气门瞬态运行过程中模型输出与实验测量数据的

对比验证结果,其中实线为测量值,虚线为模型.由图7可见,在随机改变节气门输入条件下,发动机转速、转矩以及歧管压力的模型均能较好地反映实际系统的运行趋势.采用拟合优度(R^2)来表征模型精度,即通过测量值和估计值偏差的方差与测量值本身方差的比值量化评估模型精度,有

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2},$$

拟合优度越接近1表明模型精度越高.本组模型验证数据中,发动机转矩的模型精度达到0.7842,具有较好的模型精度.考虑本文在控制器设计过程中已对模型误差作了算法补偿,因此该模型可以满足控制器设计要求.

3.3 扭矩跟踪控制实验结果

本文分别进行了进气歧管压力可测条件下的转矩跟踪控制实验和基于观测器的转矩跟踪控制实验.研究中,控制器的预测步长设定为与进气歧管的动态调整时间接近,即 $T = 0.15$ s,控制周期 ΔT 取0.01s,积分增益 k 取0.03,约束限制设定为 $u \in [-5, 5]$, $p_m \in [0.01, 0.1]$,单位MPa.

3.3.1 进气歧管压力可测条件下的实验验证

当进气歧管压力可测时,模型预测控制器按照式(14)~(16)的设计方法,控制系统结构如图2所示.为了验证模型预测控制器的转矩跟踪控制性能,采用传统PI控制器作进一步对比验证,PI控制器参数通过实验反复整定,最终选取效果较好的参数组合,比例系数和积分系数分别为 $k_p = 0.1$, $k_i = 0.08$.在实验过程中,利用电力测功机倒拖发动机维持1200rpm恒定转速,设定发动机期望转矩为任意给定的斜坡信号和阶跃信号,实际输出转矩跟踪效果如图8和图9所示,黑实线为 τ_d ,红实线为 $\tau_{e,MPC}$,黑虚线为 $\tau_{e,PI}$.由图8可见,在斜坡信号跟踪控制条件下,模型预测控制相比于PI控制有更小的稳态跟踪误差.例如,在[3, 13]s的斜坡上升控制区间,PI控制与MPC控制的转矩跟踪平均绝对误差分别为3.1442 N·m、2.1364 N·m;在[20, 25]s斜坡下降控制区间,PI控制与MPC控制的转矩跟踪平均绝对误差为3.9226 N·m、3.0729 N·m.在如图9所示的阶跃信号跟踪控制实验中,MPC控制器比传统PI控制器表现出更好的瞬态跟踪控制性能.例如,在瞬态阶跃控制过程,MPC控制在0.5s左右便能到达期望转矩值,且快速调整到期望转矩附近,其2%调整时间约为2s;PI控制器在选定的最佳整定参数下依然表现出欠阻尼特征,调整时间约为4s,瞬态控制性能明显差

于MPC控制.需要指出,由于发动机的非线性及运行工况复杂多变,在不同工况下PID参数需要标定且根

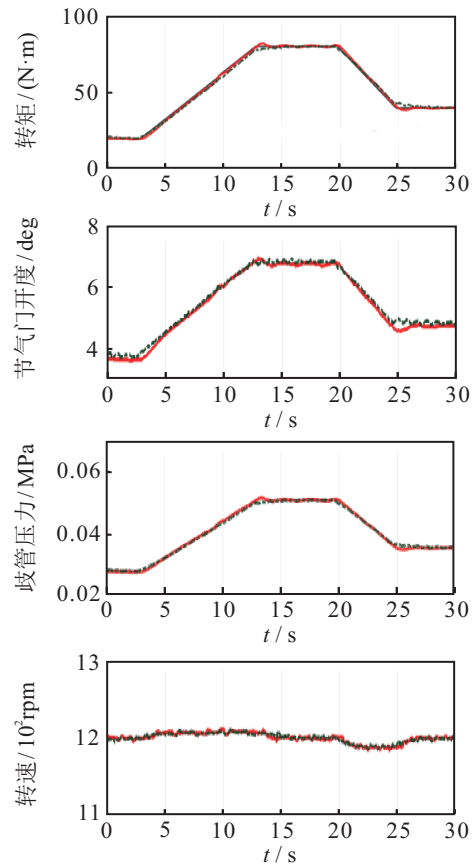


图8 歧管压力可测条件下的斜坡跟踪控制实验效果

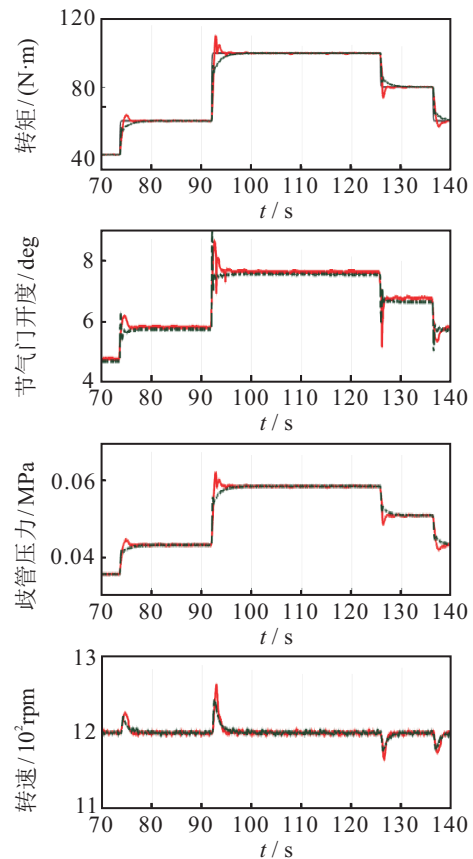


图9 歧管压力可测条件下的阶跃跟踪控制实验效果

据工况适时调整; MPC算法设计相对简单且具备优化能力, 无需考虑参数整定的问题, 相对于PID方法具有明显的优势。

3.3.2 进气歧管压力不可测时基于观测器的实验验证

当进气歧管压力不可测时, 采用基于观测器的控制器设计方法, 控制系统结构如图3所示. 实验过程中, 观测器调整参数选取 $r = 0.5$, 采用典型斜坡控制信号及阶跃控制信号验证控制器的性能, 实验结果如图10所示. 在图10斜坡跟踪控制实验中, 发动机的实际转矩能够跟踪指定的斜坡信号指令, 在 [3, 13] s 的斜坡上升区间, 转矩跟踪的平均绝对误差为 3.239 7 N·m; 在 [20, 25] s 斜坡下降过程中, 误差为 3.617 3 N·m. 图11所示的阶跃响应控制实验中, 控制器基本能够在 2s 内完成转矩的跟踪控制, 通过对图中观测器调整律 $\psi(\tilde{\omega})$ 以及误差系统状态的变化趋势分析, 尽管控制器在瞬态过程中出现抖动, 但随着时间推移, 系统误差逐渐收敛并进入稳定状态。

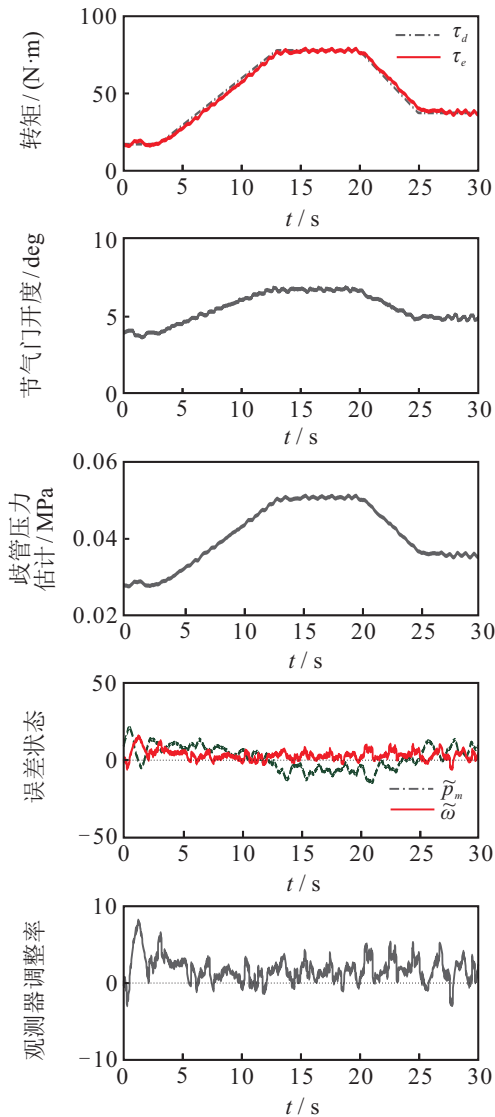


图10 基于观测器的斜坡跟踪控制实验效果

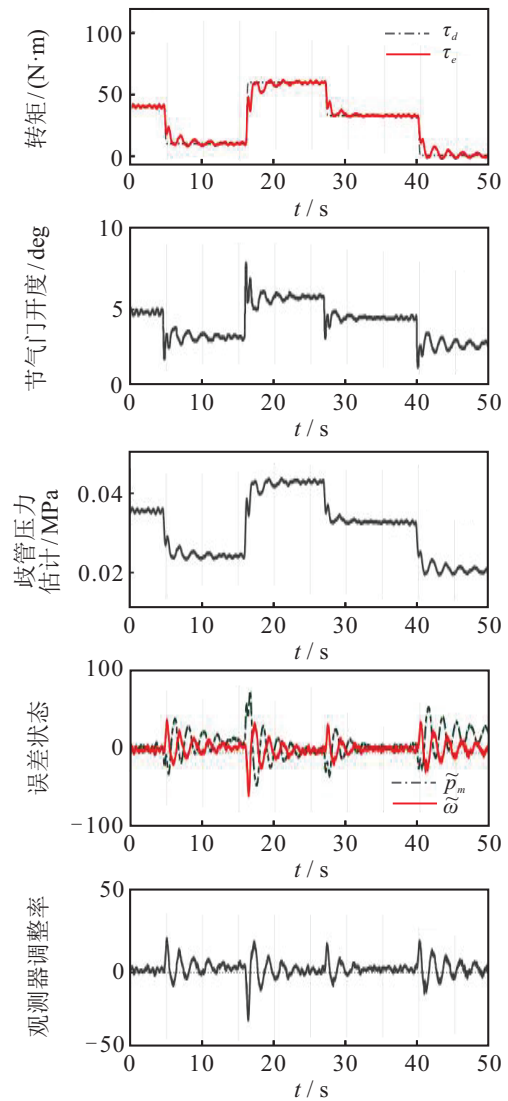


图11 基于观测器的阶跃跟踪控制实验效果

由以上实验结果可以进一步得到如下结论: 首先, 模型预测控制器能够有效应用于发动机转矩跟踪控制问题中, 尽管发动机的控制周期极短, 但是通过采用C/GMRES数值优化解法, 能够实现毫秒级的在线优化求解; 其次, 由于在模型预测控制器设计时引入嵌入式积分器设计, 即使存在建模误差, 控制器依然能够实现对任意指令的跟踪控制; 再次, 基于观测器的转矩跟踪控制器能够实现任意期望转矩的跟踪控制, 但是在瞬态控制过程中出现明显时间段波动, 从观测器调节律(19)看, 由于转速误差 $\tilde{\omega}$ 具有符号切换特性, 如果转速传感器存在测量噪声或者在瞬态过程中转速出现抖动, 则导致观测器调节律 $\psi(\tilde{\omega})$ 出现波动, 进而引起式(17)中进气歧管压力估计值的波动, 而发动机的实际转矩与进气歧管压力密切相关, 最终导致整个控制系统在瞬态过程中的抖动, 不过观测器调整律设计满足Lyapunov渐近稳定性条件, 因此当系统处于稳态时, 随时间推移, 系统会最终趋于稳定。

4 结论

本文针对汽油发动机的扭矩跟踪控制问题,提出了基于模型预测控制的扭矩跟踪控制器设计方法.采用均值模型对发动机的进气歧管压力动态、转速动态以及扭矩模型进行数学描述,并通过在模型预测控制器中嵌入扭矩跟踪误差的积分器的方式实现模型误差补偿.针对发动机进气歧管压力和转矩不能直接测量的问题,通过Lyapunov稳定性分析方法设计了扭矩观测器,最终采用数值优化求解算法——C/GMRES实现了模型预测控制器的在线优化求解并成功应用到台架实验中.实验结果表明,所设计的模型预测控制器能够满足发动机毫秒级的实时优化控制要求,即使扭矩不可测,通过应用观测器依然能够实现任意转矩指令的跟踪控制,且具有良好的瞬态控制性能.

参考文献(References)

- [1] Heintz N, Mews M, Stier G, et al. An approach to torque-based engine management systems[C]. SAE 2001 World Congress. New York: SAE, 2001: 8-18.
- [2] Khair D, Lauber J, Floquet T, et al. Robust Takagi-Sugeno fuzzy control of a spark ignition engine[J]. Control Engineering Practice, 2007, 15(12): 1446-1456.
- [3] Hong M, Ouyang M, Shen T, et al. Model-based PI feedback control of engine torque[C]. IEEE International Conference on Control and Automation. Xiamen: IEEE, 2010: 12-15.
- [4] Del R L, Allgöwer F, Glielmo L. Automotive model predictive control: Models, methods and applications[M]. Berlin: Springer-Heidelberg, 2010: 1-19, 107-109.
- [5] Hrovat D, Cairano S D, Tseng H E, et al. The development of model predictive control in automotive industry: A survey[C]. IEEE International Conference on Control Applications. Croatia: IEEE, 2013: 295-302.
- [6] Behrendt S, Dünow P, Lampe B P. An application of model predictive control to a gasoline engine[C]. The 18th International Conference on Process Control. Bratislava: Slovakia, 2011: 57-63.
- [7] 席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制——现状与挑战[J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 222-236.
(Xi Y G, Li D W, Lin S. Model predictive control — Status and challenges[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2013, 39(3): 222-236.)
- [8] Murilo A, Alamir M, Ortner P. Fast NMPC scheme for a diesel engine air path[C]. IEEE 2009 European Control Conference. London: IEEE, 2009: 1293-1298.
- [9] Herceg M, Raff T, Findeisen R, et al. Nonlinear model predictive control of a turbocharged diesel engine[C]. Conference on Computer Aided Control System Design. Munich: IEEE, 2006: 2766-2771.
- [10] Di Cairano S, Yanakiev D, Bemporad A, et al. Model predictive idle speed control: Design, analysis, and experimental evaluation[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 20(1): 84-97.
- [11] Shen T, Kang M, Gao J, et al. Challenges and solutions in automotive powertrain systems[J]. Journal of Control and Decision, 2018, 5(1): 61-93.
- [12] Ohtsuka T. A continuation/GMRES method for fast computation of nonlinear receding horizon control[J]. Automatica, 2004, 40(4): 563-574.
- [13] Heywood J B. Internal combustion engine fundamentals[M]. New York: McGraw-hill, 1988: 161-193.
- [14] Guzzella L, Onder C H. Introduction to modeling and control of internal combustion engine systems[M]. Berlin: Springer Heidelberg, 2010: 4-10, 30-63.
- [15] Grimaldi C N, Millo F. Internal combustion engine (ICE) fundamentals[J]. Handbook of Clean Energy Systems, 2015, 2: 907-938.
- [16] Hong M, Shen T, Ouyang M, et al. Torque observers design for spark ignition engines with different intake air measurement sensors[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(1): 229-237.
- [17] Kang M, Shen T. Nonlinear model predictive torque control for IC engines[C]. Proceedings of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation. Shenyang: IEEE, 2014: 804-809.

作者简介

康铭鑫(1985—),男,副教授,博士,从事非线性系统优化控制、汽车动力系统控制等研究, E-mail: kangmx@mail.neu.edu.cn;

李长平(1992—),女,硕士生,从事复杂系统建模与控制的研究, E-mail: championli@163.com;

刘腾飞(1985—),男,教授,博士生导师,从事复杂动态网络多回路小增益理论、分布式非线性控制等研究, E-mail: tengfei.liu@live.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)