

# 汽车空调风门控制算法研究

屈睿子

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年12月27日; 录用日期: 2025年1月20日; 发布日期: 2025年1月29日

## 摘要

针对汽车空调风门控制系统在位置控制中动态响应慢和稳态精度低的缺点, 提出了一种模型预测控制算法MPC (Model predictive control)和非奇异终端滑膜相结合的单独的风门控制器。首先利用运动学几何关系建立独立汽车空调风门的数学模型; 其次, 基于非奇异终端滑膜设计控制器, 用于跟踪风门数学模型计算得到的期望开度; 最后, 采用MPC并基于非奇异终端滑膜控制器, 使风门对期望开度进行跟踪, 并在约束条件的情况下通过风门复合控制器求解出最优控制量, 从而驱动风门实现位置的渐进跟踪。通过仿真验证了所提控制策略的有效性, 该复合控制方案只需获得被控对象相对阶的模型信息, 可在模型存在不确定性和不定外部扰动的环境下具有较好的鲁棒性和快速性。实验结果表明, 与通过风门运动学模型进行PID控制策略相比, 该复合控制方案具有良好的自适应性和优越性。

## 关键词

预测控制, 非奇异终端滑膜控制, 汽车空调, 协同优化

# Research on Control Algorithm of Automobile Air Conditioning Damper

Ruizi Qu

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 27<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jan. 20<sup>th</sup>, 2025; published: Jan. 29<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Due to the slow dynamic response and low steady-state accuracy of automotive air conditioning damper control system in position control, a Model predictive control (MPC) algorithm combined with a non-singular terminal synovial membrane for a single damper controller was presented. Firstly, the mathematical model of independent automobile air conditioning damper is established by using kinematic geometric relation. Secondly, the controller is designed based on the non-singular

terminal synovial membrane to track the desired opening calculated by the mathematical model of the damper. Finally, MPC and non-singular terminal synoptic controller are used to track the desired opening of the damper, and the optimal control quantity is solved by the damper compound controller under constrained conditions, so as to drive the damper to achieve progressive position tracking. The compound control scheme only needs to know the model information of the relative order, can have good servo performance and robustness in the presence of uncertainties and uncertain disturbances in the model. The experimental results show that compared with PID control strategy based on throttle kinematics model, the compound control scheme has good adaptability and superiority.

## Keywords

Predictive Control, Non-Singular Terminal Synovial Control, Vehicle Air Conditioner, Collaborative Optimization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

当前汽车产业飞速发展,汽车空调系统作为衡量汽车舒适性的指标之一,同时随着汽车电子电器架构的不断升级,智能驾驶域控制器成为未来汽车智能化的发展趋势,而独立的风门控制器,更有利于整车进行热管理[1]-[5]。汽车空调风门主要由电机驱动器、连杆机构以及一系列可旋转或滑动的风门叶片组成,风门开度决定了汽车空调的控制精度和空调系统的鲁棒性[6]。针对空调风门控制,国内外已经有很多控制方法得到应用,如PID控制、模糊控制、PLC控制和MPC用于快速响应[7]-[9]。

空调风门电机的控制工作一般通过PID、滑膜控制等智能化控制来实现,在设定合理的数学模型后寻找最优控制参数[10]。选择一种复杂度不高且精度较高的控制方法是非常关键的,既要保持模型的精度,又要减少不必要的控制参数来使成本最小化。目前,大多数学者都是集中在空调风门主控制器的研究上,这些算法的设计并没有将单独的风门电机作为出发点。例如,杨萍萍等人[11]基于模糊PID控制算法设计了汽车空调控制器,进行了定量分析;管继富等人[12]对空调系统的数学模型进行分析,提升了能量效率和温度性能,从而改进能耗需求,提高了模型精度;龙晓明[13]对空调热交换系统的固有特性做了分析,提取有效参数制定了风门最合理的控制算法,提高了舒适性需求。现有的研究中对风门的控制方案多为车内的温度控制,他们都没有对每个风门进行单独的控制设计。传统空调箱采用凸轮连杆式结构实现不同风口风门的耦合以调节出风口温度,这样做的好处是节约成本,不过并不能精准控制每一个风口的开度,控制精度不高。所以,有必要采用多个电机来分别控制不同风门,这样既可以简化机械的布置又可以提升控制精度,实现无极调温。PID-MPC串级控制能在未来一段时间内使预测的系统输出和期望值之间的平方误差最小,同时实现自适应的过程[14],目前广泛运用于车辆路径跟踪[15]和工业控制[16]中。在实际应用中这种方法缺少灵活性,只能在有限的区域内进行,需要定期进行步骤测试,会导致系统抗扰能力不足[17][18]。

因此,本文首先研究了风门电机的系统模型,以此作为控制精度和稳定性的模型基础。其次将非特异性终端滑膜作为内环,以输入扰动模型的MPC作为外环的复合控制器,内环非特异性滑膜控制器使风门旋转稳定快速达到期望温度;外环MPC得到最优风门开度输入到ECU。该复合控制器的显著优点能是能及时跟踪系统变化,且仅需掌握被控对象相对阶信息就能抑制主要干扰。同时与MPC-PID控制器相

比, 在控制过程中系统进入滑动模态的过程中不会受到系统内部参数摄动和外部扰动的影响, 能在实现良好跟踪性能并与模型适配时有更好的鲁棒性。最后, 基于 Simulink 仿真平台对其与传统 PID 进行控制性能分析, 进而保证控制精度的同时获得更好的动态特性。

## 2. 风门系统模型

单个空调风门的结构如图 1 所示, 由直流电机、位置传感器和风门电机控制器(Valve Motor Controller, VMC)组成。其被控对象是一个直流电机, 电机前端装有减速器, 风门减速轮与位置传感器相连。乘坐人按下需要的温度后, ECU 根据乘坐人期望的温度计算风量并换算为风门开度, 控制器计算出所需的 PWM 信号输送给驱动, 驱动风门电机旋转, 从而带动风门开合, 同时位置传感器将风门位置信号传送回 ECU 完成回馈, 这样就构成了完整的闭环控制系统。

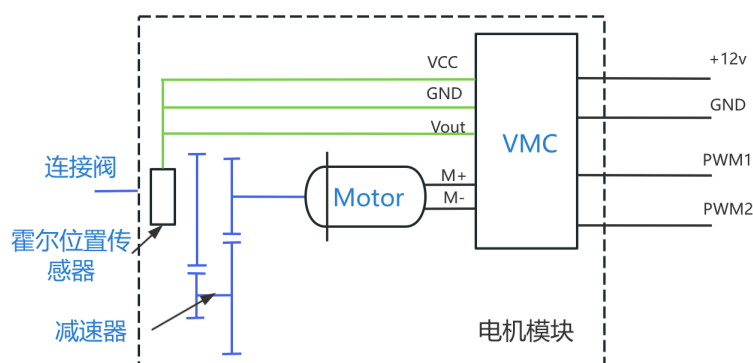


Figure 1. Motor module

图 1. 电机模块

### 2.1. 模型描述

风门控制器数学模型分为电气部分和机械部分。电气部分将直流电机等效为电阻和电感, 则输入电压  $e_a$  为:

$$e_a = i_a R + L \frac{di_a}{dt} + e_b \approx i_a R + e_b \quad (1)$$

其中驱动信号实际上为 ECU 产生的 PWM 波, 有:

$$e_a = V_{asb} \frac{u}{per} \quad (2)$$

反电动势  $e_b$  为:

$$e_b = k_b \frac{d\theta_m}{dt} \quad (3)$$

对于电机产生的扭矩, 根据电磁感应定律有:

$$T_m = k_t i_a \quad (4)$$

再以风门轴为参考点, 得机械平衡方程为:

$$J_e = \frac{d^2\theta}{dt^2} = M_e \quad (5)$$

上面各式中,  $e_a$  为输入电压;  $i_a$  为电枢电流;  $R$  为电枢等效电阻;  $L$  为电枢等效电感;  $V_{asb}$  为汽车蓄电池电压;  $per$  为 PWM 波形精度;  $e_b$  为直流电机反电动势;  $k_b$  为反电动势系数;  $\theta_m$  为电机旋转角度;  $T_m$  为电机输出转矩;  $k_t$  为电机转矩系数;  $J_e$  为风门的等效转动惯量;  $\theta$  为风门旋转角度;  $M_e$  为风门等效转矩。

设减速齿轮满足理想传动比  $\eta$ , 则有:

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \eta \times \frac{d\theta}{dt} \tag{6}$$

对于  $M_e$ , 根据功率守恒定律得:

$$M_e = \left( T_m - b_m \frac{d\theta_m}{dt} \right) \left( \frac{d\theta_m}{dt} / \frac{d\theta}{dt} \right) + (T_a - T_f) \approx T_m \eta + T_a - T_f \tag{7}$$

式中:  $b_m$  为电机粘性摩擦系数;  $T_m$  为气流作用在风门上的力矩;  $T_f$  为风门的总摩擦力矩。

其中,  $T_a$  与风门两侧压差、风门开度、温度等因素有关, 其估算比较复杂, 对系统影响较小, 本文建立汽车风门控制系统模型时将其忽略, 将其视为有界的外部扰动。

空调风门在转动中产生的摩擦力主要是粘性摩擦和库伦摩擦。因此总摩擦力矩可表示为:

$$T_f = k_d \frac{d\theta}{dt} + k_s \operatorname{sgn} \left( \frac{d\theta}{dt} \right) \tag{8}$$

式中:  $k_d$  为粘性摩擦系数;  $k_s$  为库伦摩擦系数。

将上述公式带入(5)得:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{k_t \eta}{J_e} \left( \frac{\frac{V_{asb}}{per} u - k_b \eta \frac{d\theta}{dt}}{R} \right) - \frac{1}{J_e} \left[ k_d \frac{d\theta}{dt} + k_s \operatorname{sgn} \left( \frac{d\theta}{dt} \right) \right] + d \tag{9}$$

2.2. 模型参数

仿真实验所选用的风门和复合控制器的主要参数如表 1 所示。

Table 1. Parameters of Damper model  
表 1. 风门模型参数

| 参数     | 数值                       | 参数        | 数值           |
|--------|--------------------------|-----------|--------------|
| $k_b$  | 0.01 V/(rad/s)           | $per$     | 10,000       |
| $k_t$  | 0.03 N·m/A               | $R$       | 4.5 $\Omega$ |
| $J_e$  | 0.0015 kg·m <sup>2</sup> | $V_{asb}$ | 12 V         |
| $\eta$ | 21.15                    |           |              |

3. 控制器设计

控制器结构如图 2 所示, 分为内环外环两部分: 内环滑膜控制通过高控制快速抑制扰动, 外环 MPC 预测良好的动态性能优化内环。风门的信号得出角度信号, 角度信号的提取通过 NLTD [19]来实现。

在本节中提出了基于 MPC 的非奇异终端滑膜的控制方法来实现汽车空调风门的优化控制, 提出的控制方法不仅能够实现优化控制性能, 还能提高系统的鲁棒性。

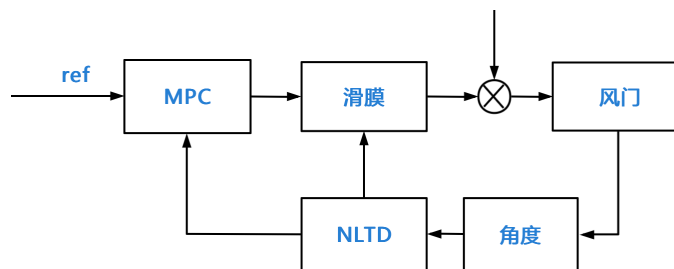


Figure 2. Control system diagram  
图 2. 控制系统示意图

### 3.1. 内环滑膜

风门电机驱动系统的控制模型为二阶微分方程。定义状态变量  $x_1 = \theta$ ,  $x_2 = d\theta/dt$ , 其状态空间方程表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + bu + d \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $f(x) = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}$ ,  $a_{11} = 0$ ,  $a_{12} = -\left(\frac{k_t k_b \eta^2}{J_e R} + \frac{k_d}{J_e}\right)$ ,  $a_{13} = -\frac{k_s}{J_e} \text{sgn}(x_2)$ ,  $b = \frac{k_t \eta}{J_e R} \frac{V_{asb}}{\text{per}}$ ,  $d$  为有界扰动且  $|d| \leq D$ 。

假设  $x_{1d}$  为风门的参考开度,  $x_{1d}$  连续可微, 且存在二阶导数。引入误差变量  $e_1 = x_1 - x_{1d}$ ,  $e_2 = \dot{e}_1 = x_2 - \dot{x}_{1d}$ 。

非奇异终端滑膜以其动态响应快, 稳态跟踪精度高等优点, 得到了广泛应用。但在实际使用时, 在某个特定区域, 控制输入会出现无穷大的情况, 称为奇异现象。有一些方法可以解决奇异现象, 但大多都是间接方法。为使系统在整个滑膜过程中都有动态且不出现奇异性问题, 并保持系统在整个过程中都有较强的鲁棒性, 选择构建非奇异终端滑膜面作为汽车空调风门控制器的滑膜面, 从滑膜面的设计上防止奇异现象出现:

$$s = e_1 + \frac{1}{\alpha} |e_1|^{g/h} \text{sgn}(e_1) + \frac{1}{\beta} |e_2|^{p/q} \text{sgn}(e_2) \quad (11)$$

式中,  $\alpha \in R^+$ ,  $\beta \in R^+$ ,  $g, h, p, q$  为正奇数, 且满足  $1 < p/q < 2$ ,  $g/h < p/q$ ,  $\text{sgn}$  为符号函数。

为了提高风门控制系统的动态鲁棒性, 选取运动时间较短, 控制较为优秀的如下趋近律:

$$\dot{s} = [-\varphi s - \gamma |s|^{m/n} \text{sgn}(s)] |e_2|^{p/q-1} \quad (12)$$

式中,  $\lambda = m/n$ ,  $\varphi \in R^+$ ,  $\gamma \in R^+$ ,  $m, n$  为正奇数, 且满足  $0 < \lambda < 1$ 。

结合式(10), (11)和(12)可得非奇异滑膜控制器表达式为:

$$u = -\frac{\beta q}{pb} \left\{ \left[ \varphi s + \gamma |s|^{m/n} \text{sgn}(s) \right] + |e_2|^{2-p/q} \text{sgn}(e_2) \left( 1 + \frac{g}{\alpha h} |e_1|^{g/h-1} \right) \right\} - \frac{1}{b} f(x) + \frac{\ddot{x}_{1d}}{b} \quad (13)$$

因  $p, q$  满足  $1 < p/q < 2$ , 即  $2 - p/q > 0$ ,  $g/h > p/q > 1$  故式(13)中的状态变量的指数都大于零, 因此不存在奇异问题。

为证明控制系统的收敛性, 根据李亚普诺夫第二稳定性理论, 构建归一化 Lyapunov 函数  $V = \frac{1}{2} s^2$ , 式中  $V \geq 0$ , 当且仅当  $s = 0$  时  $V = 0$ 。

对式(11)求导:

$$\dot{s} = e_2 + \frac{g}{\alpha h} |e_1|^{g/h-1} e_2 + \frac{p}{\beta q} |e_2|^{p/q-1} \dot{e}_2 \quad (14)$$

对  $V = \frac{1}{2} s^2$  求导并将式(13), (14)代入得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} = s \left( e_2 + \frac{g}{\alpha h} |e_1|^{g/h-1} e_2 + \frac{p}{\beta q} |e_2|^{p/q-1} \dot{e}_2 \right) \\ &= -|e_2|^{p/q-1} \left( \varphi s^2 + \gamma |s|^{m/n+1} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

上式中, 当  $e_2 \neq 0$  时, 因  $p/q > 1$ ,  $\varphi > 0$ ,  $\gamma > 0$ ,  $m/n > 0$  有  $\dot{V} < 0$ 。当且仅当  $e_2 = 0$  时,  $\dot{V} = 0$ 。

根据李亚普诺夫第二稳定性理论:

若存在一个具有连续偏导数的函数  $V(t)$ , 满足以下条件:

- 1)  $V(t)$  是正定的;
- 2)  $\dot{V}(t)$  是负定的。

因此, 控制律满足 Lyapunov 稳定性, 即滑膜变量  $s$  可以在有效时间内收敛到零点。且根据冯勇[20]等得到当滑膜变量  $s$  收敛到零点后, 误差  $e$  和误差变化率  $\dot{e}$  也会在有效时间内收敛到零点。

### 3.2. 外环 MPC

模型预测控制 MPC [21] [22] 可以预测在控制过程中系统未来的动态行为, 并在给定的约束条件内滚动求解出最优控制参数的同时实施当前控制; 在滚动求解中, 根据监测的实时信息, 修正未来的预测控制。可总结为预测模型、滚动优化和反馈校正三部分。MPC 结构原理如图 3 所示。

#### 3.2.1. 预测模型

基于旋转角度的风门模型如式(9), 状态空间方程可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = A_0 x + B_0 u + w \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{式中, } A_0 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\left(\frac{k_t k_b \eta^2}{J_e R} + \frac{k_d}{J_e}\right) \end{pmatrix}, B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_t \eta}{J_e R} \frac{V_{asb}}{per} \end{bmatrix}, w = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{k_s}{J_e} \text{sgn}(x_2) \end{bmatrix}, C = [1 \ 0]。$$

对于 MPC 控制器, 通过求解满足目标函数以及各种约束的优化问题, 在预测时域内求解最优控制序列, 并将该控制序列的第一个元素作为受控对象的实际控制量, 重复上述的求解过程, 实现对被控对象的持续控制。为了将模型(公式 2)应用于 MPC 控制器的设计中, 需要对式(16)进行离散化处理。

本文采用零阶保持器对数学模型离散化得到:

$$\begin{cases} x(k+1) = \phi x(k) + \Gamma u(k) + d(k) \\ y(k) = x(k) \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $\phi = e^{AT}$ ,  $\Gamma = \int_0^T e^{A(T-t)} dt$ ,  $x(k)$  为系统状态变量;  $u(k)$  为系统输入变量;  $y(k)$  为系统输出变量。

$d(k)$  用以表示模型失配和外部扰动, 设计输入无偏模型时, 无需知道其真实特性, 只假设其是有界的即可。

由于空调风门工作中受气流冲击, 采用增广模型消除扰动对预测输出的影响, 增强预测系统的鲁棒性, 当控制周期  $T$  很小时, 风门阀片时刻存在气流冲击, 将不可测的扰动  $d(k)$  视作是常值项更符合工程

实际。引入状态增量  $\Delta x(k) = x(k) - x(k-1)$  和额外状态变量  $y_k$ ，利用差分增广矩阵可将式(11)扩展为如下的增广模型：

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta x(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi & O \\ C\phi & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma \\ C\Gamma \end{bmatrix} \Delta u(k) \\ y(k) = [O \quad I] \begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (18)$$

式中， $I$ ， $O$  分别为单位矩阵和零矩阵； $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ 。通过增广变换，可以消除模型中可以视为常值的输入扰动。令：

$$\phi_a = \begin{bmatrix} \phi & O \\ C\phi & I \end{bmatrix}, \quad \Gamma_a = \begin{bmatrix} \Gamma \\ C\Gamma \end{bmatrix}, \quad C = [O \quad I]。$$

在预测时域  $N_p$ ，控制时域  $N_c$  下，自  $k$  时刻起，系统预测模型逐步迭代得到的预测输入  $x(k)$  输出变量  $Y(k)$  与状态变量  $\Delta U(k)$  表达式为：

$$Y(k) = Wx(k) + Z\Delta U(k) \quad (19)$$

式中：

$$Y(k) = \begin{bmatrix} y(k+1|k) \\ y(k+2|k) \\ \vdots \\ y(k+N_p|k) \end{bmatrix}, \quad x(k) = \begin{bmatrix} x(k+1|k) \\ x(k+2|k) \\ \vdots \\ x(k+N_p|k) \end{bmatrix}, \quad \Delta U(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_c-1) \end{bmatrix},$$

$$W = \begin{bmatrix} C_a \phi_a \\ C_a \phi_a^2 \\ \vdots \\ C_a \phi_a^{N_p} \end{bmatrix}, \quad Z = \begin{bmatrix} C_a \Gamma_a & 0 & \cdots & 0 \\ C_a \phi_a \Gamma_a & C_a \Gamma_a & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_a \phi_a^{N_p-1} \Gamma_a & C_a \phi_a^{N_p-2} \Gamma_a & \cdots & C_a \phi_a^{N_p-N_c} \Gamma_a \end{bmatrix}。$$

### 3.2.2. 滚动优化

利用 MPC 来预测风门在多个周期内的角速度，并计算出所预设的代价函数值得到最优控制序列，选取最优控制序列的第一个元素  $\Delta U(k)$  作用于控制系统，从而可以实现滚动优化。

在  $k$  时刻的控制序列  $\Delta U(k)$ ，要使得预测输出序列  $Y(k)$  尽可能接近参考序列  $Y_r(k)$ ，并使控制量处在平稳状态，则有如下的二次规划问题：

$$\begin{aligned} \min_{\Delta U} J(k) &= [Y_r(k) - Y(k)]^T Q [Y_r(k) - Y(k)] + \Delta U(k)^T R \Delta U(k) + \rho \varepsilon^2 \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} U_{\min} \leq U(k) \leq U_{\max} \\ \Delta U_{\min} \leq \Delta U(k) \leq \Delta U_{\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (20)$$

式中， $Q$ 、 $R$  为权重矩阵； $\rho$  为松弛因子权重系数， $\varepsilon$  为松弛因子。

结合工程实际，为减少计算量，舍去无关项后，整理得到新的二次规划问题：

$$\min_{\Delta U} J(k) = \begin{bmatrix} \Delta U^T & \varepsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi^T Q \phi & 0 \\ 0 & \rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U \\ \varepsilon \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2E^T Q \phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U \\ \varepsilon \end{bmatrix} \quad (21)$$



$$\text{设 } z = [\Delta U^T \quad \varepsilon]^T, H = \begin{bmatrix} 2(\phi^T Q \phi + R) & 0 \\ 0 & 2\rho \end{bmatrix}, f = [2E^T Q \phi \quad 0]^T. \text{ 将其转化为可解的不等式向量形式:}$$

$$A_1 \chi \leq b \quad (22)$$

$$\text{式中, } A_1 = \begin{bmatrix} K & 0 \\ -K & 0 \end{bmatrix}, \chi = \begin{bmatrix} \Delta U \\ 0 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} U_{\max} - U_k \\ -U_{\min} + U_k \end{bmatrix}, U_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{N_c \times 1} \otimes u(k-1), K = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{N_c \times N_c} \otimes I_2.$$

则优化问题可以写成:

$$\begin{aligned} \min_z J(k) &= \frac{1}{2} Z^T H Z + f^T Z \\ \text{s.t. } &\begin{cases} A_1 \chi \leq b \\ \Delta U_{\min} \leq \Delta U(k) \leq \Delta U_{\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (23)$$

根据预测模型建立并处理评价函数,调用 MATLAB 中的 QP 问题求解函数 quadprog, 得到最优控制序列:

$$U = [u(k) \quad u(k+1) \quad \cdots \quad u(k+N_c-1)]$$

仅选取序列  $U$  的第一个控制量  $u(k)$  用于控制风门系统, 其余量全部舍去。

#### 4. 仿真实验

为验证文中提出的控制方法对风门控制性能的改善,在 MATLAB/SIMULINK 环境下进行仿真实验。为更好观测风门控制系统的稳定性和稳态响应速度,对风门进行复合控制器正弦波位置跟踪仿真。由于控制器分为内环和外环两部分,先调整内环滑膜控制与期望模型相匹配,然后再正定外环 MPC 参数。设定内环滑膜控制参数为  $g=7$ ,  $h=3$ ,  $m=1$ ,  $n=3$ 。

控制器性能对比仿真结果如图 4~7 所示。图 4 说明风门使用 MPC-PID 控制算法位置跟踪相对滞后,图 5 使用非奇异终端滑膜控制和 MPC 复合控制策略后,风门迅速进入稳定状态,相比 MPC-PID 可以更快的跟踪控制器输出的期望位置,减少系统扰动。

图 6 为系统的相图轨迹。可见,当风门系统处于滑膜面上时,采用非奇异终端滑膜控制可消除系统中的奇异现象。根据图 7 可知,在仿真时间 6 秒左右整体的控制系统开始趋于稳定,风门开度跟踪结果好,且跟踪误差趋近于 0。

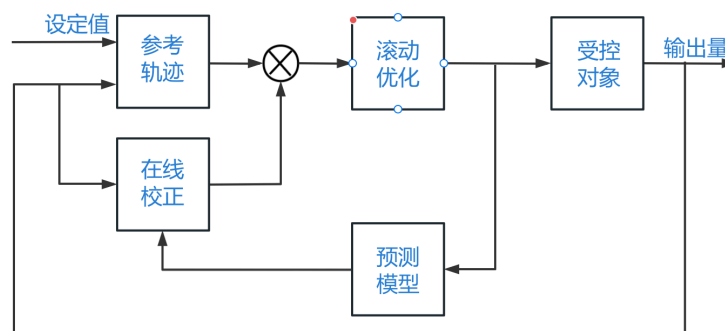
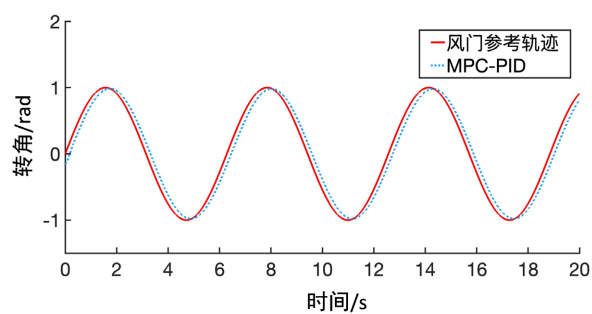


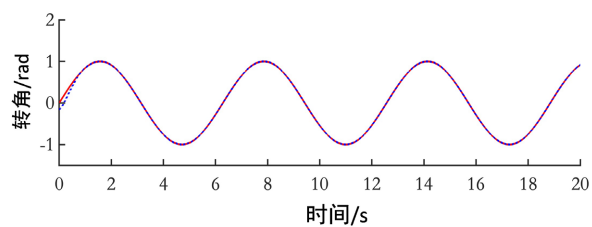
Figure 3. MPC structure diagram  
图 3. MPC 结构示意图





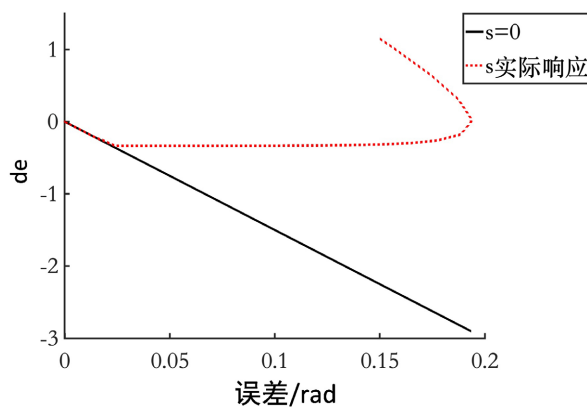
**Figure 4.** Sinusoidal position tracking curve based on MPC-PID

**图 4.** 基于 MPC-PID 的正弦波位置跟踪曲线



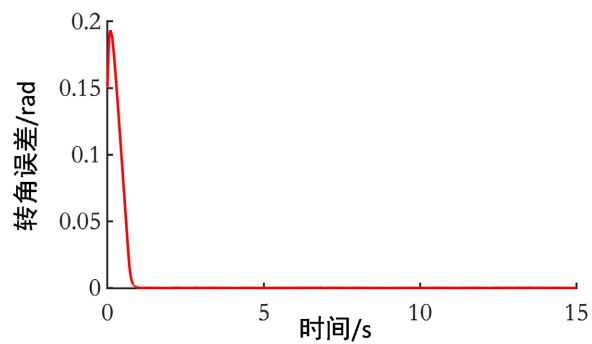
**Figure 5.** Sinusoidal position tracking curve based on MPC-synovial control

**图 5.** 基于 MPC-滑膜控制的正弦波位置跟踪曲线



**Figure 6.** Phase diagram trajectory of the system

**图 6.** 系统的相图轨迹



**Figure 7.** Angle tracking error

**图 7.** 转角跟踪误差

## 5. 结论

本文针对汽车风门控制问题进行了研究, 设计了基于 MPC 模型预测的非奇异终端快速滑膜的单独控制器。对这一控制方法进行了仿真对比分析。由仿真图得出, 采用 MPC 与非奇异性快速终端滑膜控制可以使汽车风门控制敏感性更高, 并且相较于 MPC-PID 控制方法可以提高风门在控制上的性能, 减小控制误差和抖动。

结合预测模型算法和滑膜控制算法, 有效提升了风门控制的稳定性和快速响应的特性, 结合了 MPC 实时优化的优点也克服了奇异性的出现, 提升了系统的鲁棒性和稳定性。另一方面, 该控制策略应用于汽车单独的空调风门控制是可行的, 对提高车辆空调控制效果具有借鉴意义。

## 参考文献

- [1] 李志伟. 汽车空调控制系统的现状和发展趋势[J]. 时代汽车, 2019(5): 170-171.
- [2] 孙小霞. 新能源汽车电动空调控制系统及其实现与研究[J]. 黑龙江科学, 2018, 9(18): 150-151.
- [3] 吴志佳, 程谭送, 李生智, 鄢雨. 智能驾驶域控制器的发展趋势[J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2023(7): 1-4.
- [4] 马浩然, 李佳辉, 毕崑. 新能源汽车热管理研究综述[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(8): 1-9.
- [5] 王文涛, 贾志成. 基于模糊控制的汽车空调风门控制的研究[J]. 汽车零部件, 2011(11): 65-67.
- [6] 鲍磊. 基于 PID 控制的新能源汽车空调控制系统设计分析[J]. 时代汽车, 2021(13): 117-118.
- [7] Hou, L.M. and Xing, X. (2011) Automotive Air Conditioning System Fuzzy Control Algorithm. *Advanced Materials Research*, **181**, 787-791. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.181-182.787>
- [8] 韩敬贤, 高悦. 一种基于 PLC 的汽车空调循环智能控制系统的研究[J]. 时代汽车, 2018(8): 123-124.
- [9] 方祥建, 王建平. 基于模糊 PID 模型预测的电动汽车空调控制研究[J]. 安徽工程大学学报, 2022, 37(2): 34-42.
- [10] Xie, Y., Yang, P., Qian, Y., Zhang, Y., Li, K. and Zhou, Y. (2022) A Two-Layered Eco-Cooling Control Strategy for Electric Car Air Conditioning Systems with Integration of Dynamic Programming and Fuzzy Pid. *Applied Thermal Engineering*, **211**, Article ID: 118488. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118488>
- [11] 杨萍萍, 马亮. 基于模糊 PID 的汽车空调控制器设计[J]. 自动化仪表, 2021, 42(9): 39-44.
- [12] 管继富, 赵宇枫, 詹远, 曹立. 电动汽车空调系统随机模型预测控制算法研究[J]. 北京理工大学学报自然版, 2021, 41(5): 480-486.
- [13] 龙晓明. 汽车空调温度风门控制方法研究[J]. 汽车电器, 2020(8): 51-55, 58.
- [14] 奚培锋, 胡桐月, 徐得天. 基于 MPC-PID 协同优化控制方法的策略研究与展望[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(6): 94-95+98.
- [15] 周义棚, 杨威. 基于 MPC 和 PID 的无人驾驶车辆路径跟踪控制[J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61(9): 78-81+116.
- [16] 王志甄, 邹志云. 电热水浴装置的 MPC-PID 串级控制研究[J]. 石油化工自动化, 2018, 54(3): 36-40.
- [17] Olaizola, I., Quartulli, M., Unzueta, E., Goicolea, J. and Flórez, J. (2022) Refinery 4.0, a Review of the Main Challenges of the Industry 4.0 Paradigm in Oil & Gas Downstream. *Sensors*, **22**, Article No. 9164. <https://doi.org/10.3390/s22239164>
- [18] Muske, K.R. and Badgwell, T.A. (2002) Disturbance Modeling for Offset-Free Linear Model Predictive Control. *Journal of Process Control*, **12**, 617-632. [https://doi.org/10.1016/s0959-1524\(01\)00051-8](https://doi.org/10.1016/s0959-1524(01)00051-8)
- [19] Han, J. (2009) From PID to Active Disturbance Rejection Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **56**, 900-906. <https://doi.org/10.1109/tie.2008.2011621>
- [20] 冯勇, 余星火. 非奇异终端滑模控制系统的设计方法[J]. 控制与决策, 2002, 17(2): 194-198.
- [21] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 1-30.
- [22] Qin, S.J. and Badgwell, T.A. (2003) A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology. *Control Engineering Practice*, **11**, 733-764. [https://doi.org/10.1016/s0967-0661\(02\)00186-7](https://doi.org/10.1016/s0967-0661(02)00186-7)