

文章编号: 0258-1825(2020)05-0866-08

低温风洞自抗扰控制研究

刘为杰*, 何帆, 杨国超

(中国空气动力研究与发展中心 高速空气动力研究所, 绵阳 621000)

摘要: 低温风洞总温、总压和马赫数三者之间具有强耦合, 流场容易受到干扰, 并且流场的精确数学模型难以获得, 这些给高性能的流场控制器的设计带来了困难。自抗扰控制具有不依赖被控对象精确模型、抗干扰能力强、算法简单便于工程应用等优点。为此, 本文基于自抗扰控制原理设计了低温风洞流场控制策略。采用自抗扰控制, 将总温、总压和马赫数三个通道之间的耦合、流场建模误差、系统的参数摄动和外界干扰等视为总干扰, 通过扩张状态观测器将总干扰估算出来并进行前馈补偿, 一方面实现总温、总压和马赫数的解耦控制, 另一方面提高流场的抗干扰能力。研究以 NASA 0.3 m TCT 风洞为对象, 在 Matlab/Simulink 平台上搭建该风洞流场自抗扰控制模型, 并进行了仿真分析。结果表明: 自抗扰控制能够很好地实现总温、总压和马赫数的解耦控制, 在系统参数具有较大摄动的情况下仍然能够保持良好的控制性能, 表现出了良好的抗干扰能力。

关键词: 低温风洞; 流场; 自抗扰控制(ADRC); 解耦

中图分类号: V211.74

文献标识码: A

doi: 10.7638/kqdlxxb-2018.0160

Active disturbance rejection control for cryogenic wind tunnels

LIU Weijie*, HE Fan, YANG Guochao

(High Speed Aerodynamics Institute of China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: It is strong coupling between the total temperature, Mach number and stagnation pressure in cryogenic wind tunnel. Moreover, the flow field is susceptible to external interference and its accurate mathematical model is difficult to be obtained. Thus it is difficult to design a high performance flow field controller for the cryogenic wind tunnel. The active disturbance rejection control (ADRC) has some advantages, such as not relying on the accurate mathematical model, strong anti-interference ability, simple algorithm for engineering applications and so on. So a flow control strategy for the cryogenic wind tunnel is designed based on the ADRC theory. According to the principle of the ADRC, all the coupling between the total temperature, total pressure and Mach number, the modelling errors, the parameter perturbation of the flow field, and the external disturbance etc, can be regarded as total disturbance. The total disturbance is estimated by a extended state observer (ESO) and compensated by a feed-forward control. On the one hand, the decoupling control of the total temperature, total pressure and Mach number is realized; on the other hand, the anti-interference ability of the flow field is improved. Taking NASA 0.3m TCT wind tunnel as the research object, the flow field ADRC control model was built on Matlab/Simulink platform for simulation analysis. The results show that the ADRC can achieve good decoupling control of the total temperature, total pressure and Mach number, maintain good control performance under the condition of large perturbation of system parameters, and show good anti-interference ability.

Keywords: cryogenic wind tunnels; flow field; active disturbance rejection control (ADRC); decoupling

收稿日期: 2018-09-10; 修订日期: 2018-11-17

作者简介: 刘为杰* (1989-), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 风洞控制系统设计. E-mail: 15000160275@163.com

引用格式: 刘为杰, 何帆, 杨国超. 低温风洞自抗扰控制研究[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(5): 866-873.

doi: 10.7638/kqdlxxb-2018.0160 LIU W J, HE F, YANG G C. Active disturbance rejection control for cryogenic wind tunnels [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2020, 38(5): 866-873.

0 引言

雷诺数的变化主要影响边界层分离、旋涡流动、激波/边界层干扰、激波/旋涡干扰等黏性起支配作用的流动。风洞试验的雷诺数模拟不足,将会使上述流动现象发生变化,与真实飞行存在差异。目前风洞试验中实现高雷诺数的方法主要有降低总温、增加总压、采用重气体或者增大模型尺寸等方法,其中降低总温(即低温风洞)是最有前途的一种方法^[1]。

因为低温风洞控制过程的复杂性,从低温风洞建设早期至今,国内外学者对其控制系统的设计进行了大量的研究。关于 NASA 的 TCT、NTF 这两座风洞,早期的文献表明其采用的是非线性增益调度 PI 控制^[2-5]。欧洲的 ETW 风洞采用的是一种具有自学习能力的控制算法^[6],并且取得了良好的控制效果,但是文献^[6]并未给出算法的详细信息。近年来,上述这些风洞都不同程度地对其控制系统进行了改进,但是现有的已出版的资料并未披露过多的细节。传统的 PI 控制已经难以满足对低温风洞控制系统日益增高的性能要求,而现代控制理论以及智能控制由于其算法的复杂性,目前能够成功应用到低温风洞控制系统中的还很少^[7]。

本文以 NASA TCT 风洞为研究对象,基于自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)原理设计了一种多变量控制系统实现该风洞温度、总压和马赫数的控制。ADRC 中的扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)能够将温度、总压和马赫数三个通道之间的耦合、系统的外部扰动以及系统内部参数的摄动视为总扰动估算出来,补偿到误差反馈控制中,从而实现温度、总压和马赫数的解耦控制,并且兼具良好的抗干扰能力。

1 自抗扰控制原理

ADRC 是韩京清研究员基于 PID 控制技术并吸取现代控制理论成就,提出的一种不依赖被控对象精确模型的新型控制技术^[8]。为了减少整定参数,便于工程应用,高志强教授提出了线性 ADRC^[9]。目前 ADRC 在许多工程领域获得了良好的控制效果^[10-15]。下面简要介绍 ADRC 原理。

考虑一个 n 阶非线性、参数不确定系统：
$$y^{(n)}(t) = f(y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}, w, u) + bu(t) \quad (1)$$
式中, $f(\ast)$ 表示内部扰动和外部扰动综合特性, b 为对象参数。为了获得系统扰动的估计值 $\hat{f}(\ast)$, 使用 ESO:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{Z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{Z}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{L}(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{Z}(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{L}$ 为观测器待定系数矩阵,

$$\begin{aligned} \mathbf{Z} &= [z_1 \quad z_2 \quad \cdots \quad z_{n+1}]^T, \\ \mathbf{B} &= [0 \quad \cdots \quad 0 \quad b \quad 0]^T, \\ \mathbf{C} &= [1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0], \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \\ \vdots & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

当 ESO 的系数矩阵 $\mathbf{L}$ 取值恰当时, $z_{n+1} = f(\ast) \approx \hat{f}(\ast)$, 此时令系统输入为:

$$u = (u_0 - \hat{f}(\ast))/b_0 \quad (4)$$

式中, b_0 为 b 的估计值。将式(4)带入式(1), 则原系统可转化如下的串联积分形式:

$$y^{(n)} = f(\ast) - \hat{f}(\ast) + u_0 \approx u_0 \quad (5)$$

上述系统可用如下简单的控制器律进行控制, 即:

$$u_0 = k_1(y_d - z_1) - k_2z_2 - \cdots - k_nz_n \quad (6)$$

式中, y_d 为系统输出期望值, $[k_1, k_2, \dots, k_n]$ 为控制器的系数矩阵。文献^[7]采用带宽的概念对 $\mathbf{L}$ 和 $[k_1, k_2, \dots, k_n]$ 进行整定, 令 ESO 的带宽为 ω_o , 控制器的带宽为 ω_c , 则:

$$\mathbf{L} = [C_{n+1}^1\omega_o, C_{n+1}^2\omega_o^2, \dots, C_{n+1}^{n+1}\omega_o^{n+1}]^T \quad (7)$$

$$[k_1, k_2, \dots, k_n] = [C_n^n\omega_c^n, C_n^{n-1}\omega_c^{n-1}, \dots, C_n^1\omega_c]^T \quad (8)$$

因此, ADRC 需要整定的参数有三个: b_0 、 ω_o 和 ω_c 。ADRC 的结构十分简单, 当系统阶数 n 为 1 时, 其结构示意图如图 1 所示。

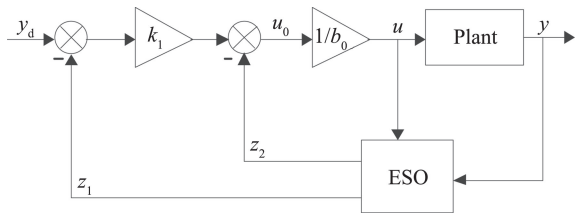


图1 ADRC 结构示意图
Fig.1 The structure of ADRC

2 TCT 风洞流场模型

TCT 是一座连续式跨声速低温风洞, 试验段尺寸为 $0.33\text{ m} \times 0.33\text{ m}$, 马赫数范围 $0.2 \sim 1.35$, 雷诺数范围: $3.28 \times 10^6 \sim 4 \times 10^8/\text{m}$, 总压范围: $1 \sim 6\text{ atm}$

(1 atm=101 325 Pa),温度范围:78~320 K。风洞洞体由铝合金材料构成,洞体外部覆盖绝热材料以隔绝风洞与环境之间的热交换。该风洞以氮气为介质,氮气气流由风机驱动。风机对氮气做功以及氮气与洞壁之间的摩擦会产生热量。该风洞采用向洞内喷射液氮的方式降低氮气的温度,但是这种冷却方式会导致洞体内氮气质量的增加,为了维持风洞压力,又需要将部分温度较高的氮气排出。

$$\begin{bmatrix} T \\ M \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_L(\alpha+\beta)}{\theta} \frac{1+t_ms}{s(1+t_gs)} e^{-\tau_ls} & \frac{K_F(\alpha+\beta)}{K_m\theta(1+0.2M^2)^3} \frac{1+t_ms}{s(1+t_gs)} e^{-\tau_fs} & \frac{K_gp\alpha}{\sqrt{T}\theta} \frac{1+t_ms}{s(1+t_gs)} e^{-\tau_gs} \\ 0 & \frac{1}{K_m\sqrt{T}} \frac{e^{-\tau_as}}{1+t_ps} & 0 \\ K_Lp\left(\frac{1}{W_g}\frac{1}{s} + \frac{\alpha+\beta}{T\theta} \frac{1+t_ms}{s(1+t_gs)} e^{-\tau_ls}\right) & \frac{Mp}{K_m\sqrt{T}}\left(\frac{b+}{\sqrt{T}\theta(1+0.2M^2)^3} \frac{1+t_ms}{s(1+t_gs)} e^{-\tau_fs}\right) & -\frac{K_gp^2}{\sqrt{T}}\left(\frac{1}{W_g}\frac{1}{s} + \frac{\alpha}{T\theta} \frac{1+t_ms}{s(1+t_gs)} e^{-\tau_ls}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_L \\ N \\ A_g \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, T 为风洞温度,K; M 为试验段马赫数; p 为总压, atm; A_L 为液氮调节阀开度,0~100%; N 为压缩机转速,r/min; A_g 为氮气排气阀开度,0~100%;

在设计该风洞流场控制系统时存在四个困难:1)精确的流场模型难以获得;2)系统参数随着风洞工况变化而变化,参数波动范围大;3)系统存在强烈的耦合;4)系统存在大时滞。

文献[3]采用机理建模法得到了 TCT 风洞流场的集中参数模型,其温度、马赫数和总压与液氮注入阀开度、压缩机转速和氮气排气阀开度的关系见式(9):

s 为 Laplace算子,式(9)中其余参数见表 1。
该风洞结构示意图见图 2。

表 1 流场模型参数表
Table 1 The parameters of flow field model

参数	描述	数值或计算公式	单位
α	氮气制冷系数	$\alpha=0.3T-0.08p$	kJ/kg
β	液氮制冷系数	$\beta=-(121+2p+66/T-391p/T+1.04T)$	kJ/kg
K_L	液氮最大注入流量	$K_L=3.47(p_{LN}-p)^{0.5}$,其中 p_{LN} 为液氮源压力,约为 6 atm。	kg/s
K_g	氮气排气阀增益	$K_g=\begin{cases} 21.8, & 1<p<1.5 \\ 21.8[2-(1.5/p)^{1.7}], & p\geqslant 1.5 \end{cases}$	
K_m		$K_m=597(1-0.3M)p^{-0.035}$	
K_F	风机增益	$K_F=\frac{6965}{\eta}A^*c_pb\frac{\gamma-1}{\gamma}$,其中, η :风机效率,约 0.8; A^* :试验段面积 0.1239 m ² ; c_p :定压比热,约 1.04 kJ/(kg·K); b :0.197(1-7pM/T); γ :比热比,约 1.4。	
W_g	洞体内氮气质量	$W_g=338.9pV(1+250p/T^2)/T$	kg
θ	风洞热质量	$\theta=W_gc_v+W_tc_m$,其中, c_v :定容比热,约 0.743 kJ/(kg·K); W_t :风洞洞体材料质量,3200 kg; c_m :洞体材料比热,(5.5T-0.008T ²)/1000,kJ/(kg·K)。	kJ/K
t_m	洞体金属时间常数	$t_m=0.28T^{1.2}p^{-0.7}M^{-0.7}$	s
t_g	氮气时间常数	$t_g=W_gc_vt_m/\theta$	s
t_p	风机转速时间常数	$t_p\approx 1$	s
t_c	风洞时间常数	$t_c=[0.0486V/(A^*MT^{0.5})](1+250p/T^2)(1+0.2M^2)^3$	s
τ_L	液氮分子传递时间	$\tau_L=0.8t_c$	s
τ_g	氮气传递时间	$\tau_g=0.1t_c$	s
τ_F	风机热量传递时间	$\tau_F=0.6t_c$	s
τ_a	风机叶片到轴承的声波时差	$\tau_a\approx 0$	s

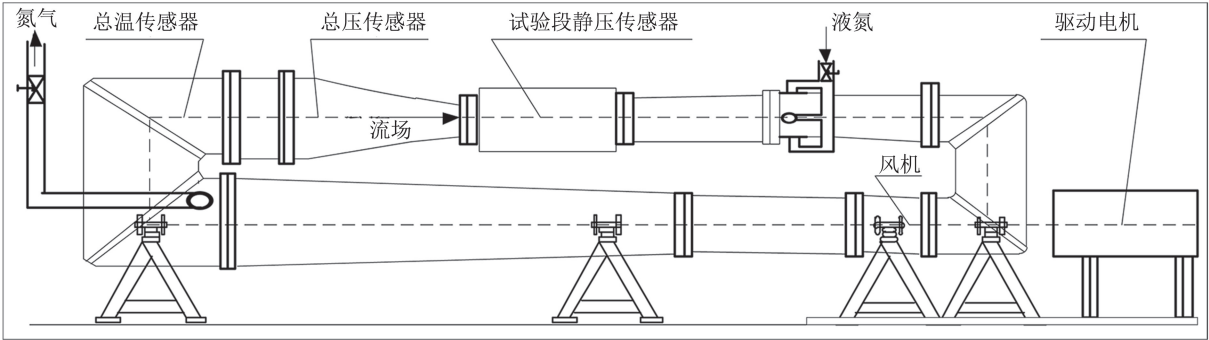


图 2 0.3 m TCT 风洞结构示意图
Fig.2 The structure of 0.3 m TCT wind tunnel

3 流场 ADRC 控制系统设计

考虑三输入三输出系统：

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = f_1(*) + b_{11}u_1 + b_{12}u_2 + b_{13}u_3 \\ \dot{y}_2 = f_2(*) + b_{21}u_1 + b_{22}u_2 + b_{23}u_3 \\ \dot{y}_3 = f_3(*) + b_{31}u_1 + b_{32}u_2 + b_{33}u_3 \end{cases} \quad (10)$$

将 $u_2、u_3$ 对 y_1 的影响看成扰动， y_2 和 y_3 类似。则该系统可改写为：

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = f'_1(*) + b_{11}u_1 \\ \dot{y}_2 = f'_2(*) + b_{22}u_2 \\ \dot{y}_3 = f'_3(*) + b_{33}u_3 \end{cases} \quad (11)$$

式中， $f'_1(*) = f_1(*) + b_{12}u_2 + b_{13}u_3$ ， $f'_2(*)$ 和 $f'_3(*)$ 类似。设计三个分散的 ADRC 控制器，将各自通道的扰动估计出来，然后分别在各自通道采用状态反馈进行控制，即可将三输入三输出系统解耦成三个单输入单输出系统。因此式(9)中，若不考虑耦合通道，并且忽略总压通道中系数较小项 $\alpha/(T\theta)$ ，则流场系统可简化为式(12)：

$$\begin{bmatrix} T \\ M \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_L(\alpha + \beta)}{\theta} \frac{1 + t_ms}{s(1 + t_gs)} e^{-\tau_{\theta}s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{K_m\sqrt{T}} \frac{e^{-\tau_{\theta}s}}{1 + t_ps} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-K_gp^2}{\sqrt{T}W_g} \frac{1}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_L \\ N \\ A_g \end{bmatrix} \quad (12)$$

若忽略时滞环节，温度传递函数的阶数为 2，可采用 2 阶 ADRC 控制器，马赫数和总压传递函数的阶数均为 1，因此可采用 1 阶 ADRC 控制器。现以马赫数自抗扰控制的设计为例，对控制器的设计过程进行简要的说明。式(12)中，忽略时滞环节，并且将马赫数和转速之间的关系改用微分方程来表示，则有：

$$\dot{M} = -\frac{M}{t_p} + \frac{N}{t_p K_m \sqrt{T}} \quad (13)$$

式中，将 $-M/t_p$ 也归结为扰动项，与式(1)类比可知， $b = \frac{1}{t_p K_m \sqrt{T}}$ ，然后即可根据第 1 小节所述方法来设计控制器。可以看出，在设计 ADRC 时，只需要知道被控对象少量的信息：系统的相对阶数、系统的参数 b ，而系统内部的详细信息不是必需的。值得注意的是，如果事先知道被控对象的部分模型，也可对其加以利用，采用模型辅助的 ADRC，以降低 ESO 的

带宽和提高控制性能。模型辅助 ADRC 不在本文的讨论范围之内，具体可见文献[16]。ADRC 的三个控制参数，一般采用工程方法进行整定^[17-18]。而对于大时滞系统，如果对系统的动态性能要求不高，可以适当增大 b_0 和降低控制器的带宽，通过降低系统的动态性能来提高稳定性；对于动态性能要求较高的系统，可采用 Smith 预估器^[19]和改进的 ADRC^[20]。0.3 m TCT 风洞是一种连续式风洞，对于系统的动态性能的要求要低于暂冲式风洞，因此本文采用增大 b_0 和降低控制器的带宽的方法来克服风洞流场的大时滞带来的不利影响。整个 TCT 风洞流场自抗扰控制系统结构框图见图 3，控制器参数见表 2。

图 3 中温度控制器与总压、马赫数控制器略有不同，主要是温度控制通道串联了一阶惯性环节 $1/(1 + 0.8t_ms)$ ，其原因是温度通道含有一个零点 $-1/t_m$ ，在 TCT 风洞的运行工况范围内， t_m 取值 50~

500,该零点较小,十分接近虚轴,严重影响温度的动态性能,为了改善温度的动态性能,给温度通道串联一个惯性环节。此外,温度传感器的响应时间较长,这里用 $1/(1+s)$ 来模拟温度传感器的动态特性,压力传感器的响应时间相对来说很短,可以忽略不计。TCT 风洞流场控制系统中有三个执行机构,即液氮注入阀、氮气排出阀以及风机转速调节系统。为了更真实地模拟流场系统,这里考虑执行机构的动态特性:风机转速调节系统的动态特性用二阶环节 $1/(0.2s^2+0.56s+1)$ 来表示,而阀门的开度变化率限定为 $5\%/s$ 。

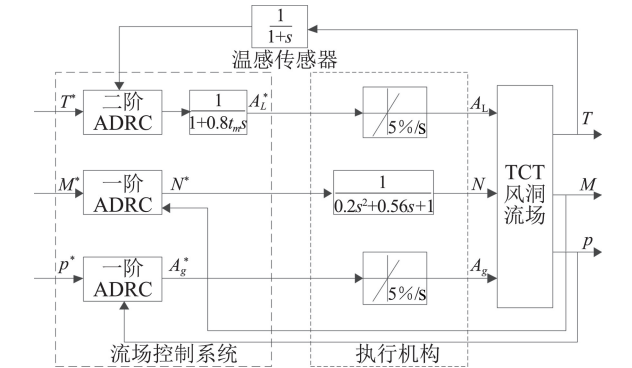


图 3 流场自抗扰控制框图

Fig.3 The structure of ADRC controller for flow field

表 2 中,三个 ADRC 控制器的参数 b_0 并非常数,与式(12)中传递函数系数有关,因此本文所设计的 ADRC 控制器是一种变增益控制器。在 TCT 风洞运行工况范围内,各系数取值范围: $K_L(\alpha+\beta)/\theta$: $-1.07\sim-0.36$, $1/(K_m T^{0.5})$: $1.03\times 10^{-4}\sim 2.83\times 10^{-4}$, $K_g p^2/(T^{0.5}W_g)$: $-0.73\sim-0.04$ 。增益的变化范围较大,也是控制系统设计的一个难点,这就要求在不同运行工况下赋予控制器相应的参数。而 ADRC 控制器具有十分优越的鲁棒性,即使在系统增益估算误差较大的情况下仍然能保证良好的控制性能,这一点将通过仿真分析证明。

表 2 ADRC 控制器参数

Table 2 The parameters of ADRC controller

控制器	b_0	ω_o	ω_c
温度	$K_L(\alpha+\beta)/\theta$	2	0.3
马赫数	$1/(K_m T^{0.5})$	2	0.5
总压	$K_g p^2/(T^{0.5}W_g)$	2	0.3

4 仿真分析

在 Matlab/Simulink 平台按照式(9)和表 1 搭建 TCT 风洞流场仿真模型,按照图 3 和表 2 搭建流场控制系统,对本文提出的流场控制方法进行仿真分析。

4.1 风洞降温仿真

风洞氮气介质初始温度为 300 K,将风机稳定在较低的转速 1200 r/min,降温过程中风洞总压维持在 1.5 atm。为了避免温度冲击,液氮注入阀门最大开度限定为 12.5%。整个降温过程中温度、马赫数和总压曲线见图 4。氮气温度从 300 K 降至 100 K 所需时间约为 30 min,期间马赫数从 0.12 上升至 0.22,总压保持在 1.5 atm 左右。

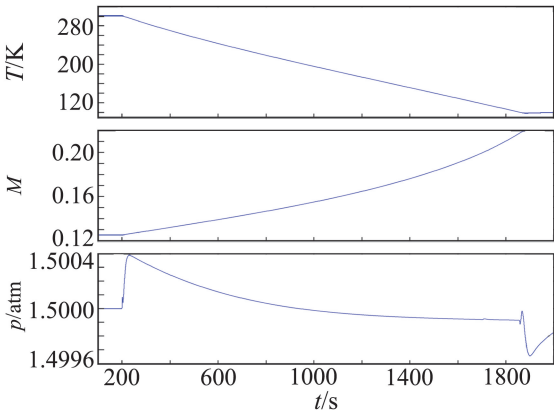


图 4 风洞降温过程流场曲线图

Fig.4 Flow field curves of cooling process

4.2 流场动态响应仿真

工况 1:风洞初始条件为 $T=270\text{ K}$, $M=0.7$, $p=2\text{ atm}$ 。 $t=100\text{ s}$ 时,温度设定值降低 10 K,风洞温度从 270 K 下降至 260 K 大概需要 30 s。 $t=200\text{ s}$ 时,温度设定值增加 10 K,风洞升温所需时间约 50 s。风洞升温速度主要由风机转速决定的:在低马赫数时,风洞升温较慢;高马赫数时,风洞升温较快。温度变化过程中,在自抗扰控制器的作用下马赫数和总压的波动都很小。 $t=400\text{ s}$ 时,总压设定值增加 0.5 atm; $t=500\text{ s}$ 时总压设定值减小 0.5 atm。设定值变化时,总压稳定时间大概为 20 s。 $t=600\text{ s}$ 时,马赫数设定值增大 0.1; $t=700\text{ s}$ 时,马赫数设定值减小 0.2。马赫数稳定时间约为 20 s。工况 1 下的仿真曲线见图 5。

工况 2:风洞初始条件为 $T=90\text{ K}$, $M=0.8$, $p=3\text{ atm}$,执行类似的操作,流场曲线见图 6。工况 2 流场响应曲线与工况 1 相似。

从仿真结果可以看出 ADRC 流场控制系统的稳态精度和响应速度都能满足风洞试验的需求。

4.3 参数摄动仿真

表 2 中 ADRC 控制器的参数 b_0 对流场模型依赖程度较大,因此 b_0 对控制系统的鲁棒性影响较大。将三个 ADRC 控制器的参数 b_0 分别在标称值基础上增加 50%和降低 50%,组合成 8 种情形,采用工况 2

的条件进行仿真,结果见图 7。可以看出 b_0 的摄动对温度控制系统的动态响应速度和超调量有轻微的

影响,而总压和马赫数控制系统则表现出十分优越的鲁棒性。

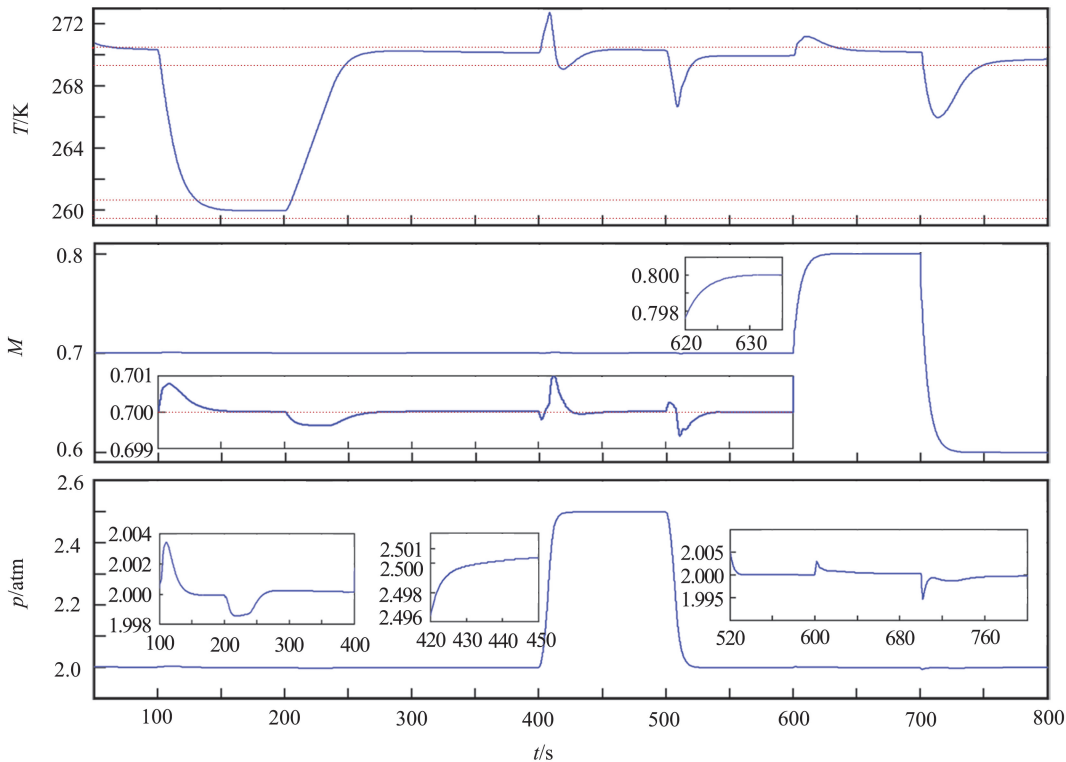


图 5 工况 1 流场动态响应曲线
Fig.5 Dynamic response curves of flow field under condition 1

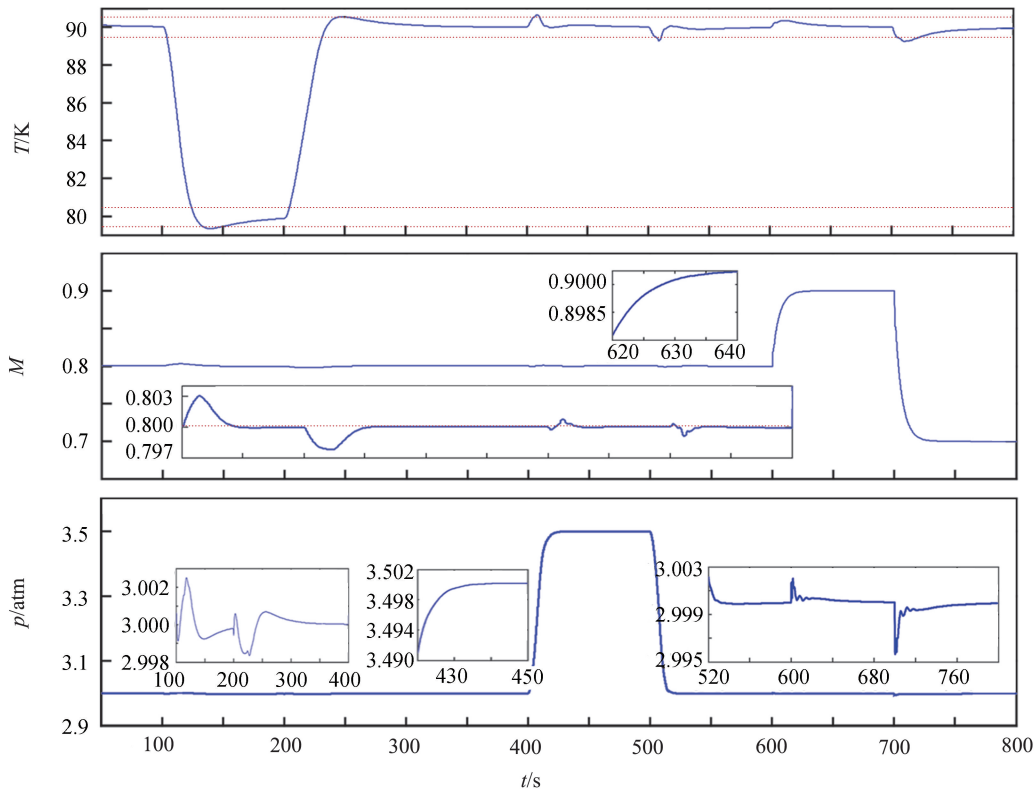


图 6 工况 2 流场动态响应曲线
Fig.6 Dynamic response curves of flow field under condition 2

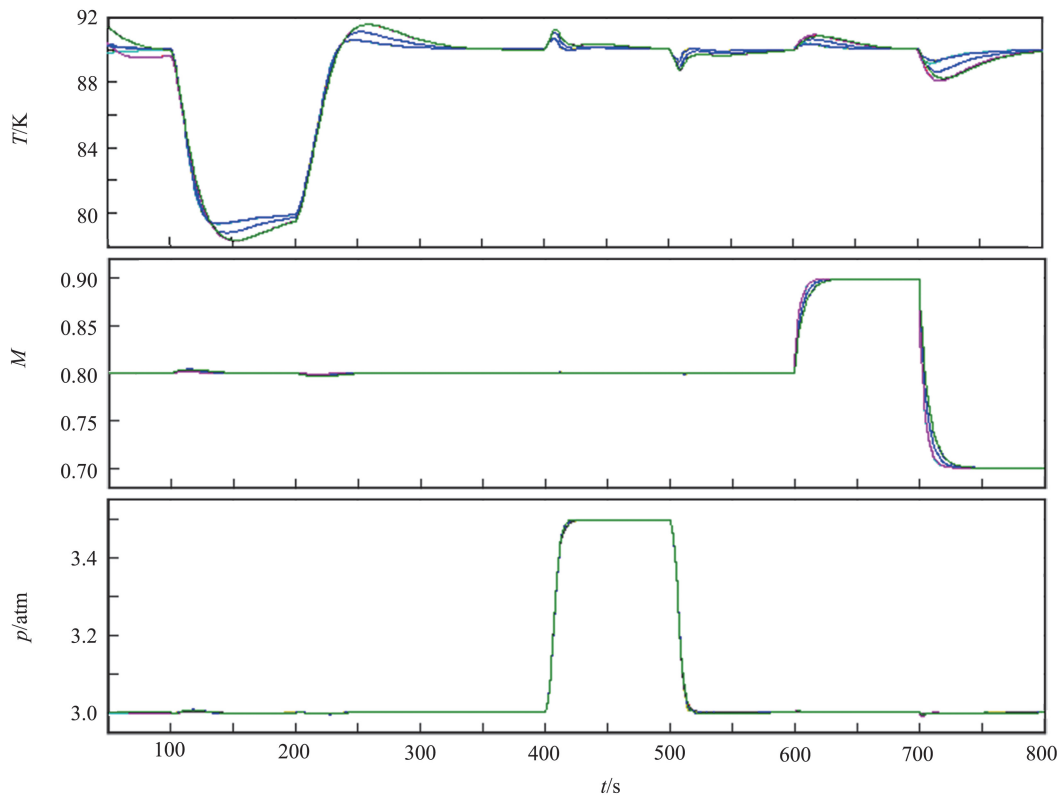


图 7 参数扰动情况下流场曲线

Fig.7 Flow field curves under parameter perturbation

由于低温风洞运行包络较宽,本文无法对所有的运行工况进行仿真,因而只选取了降温过程、工况 1 和工况 2 这三种典型的工况进行了仿真分析。尤其是工况 2,在总温较低的情况下,流场之间的耦合更强,滞后时间更大,充分体现出低温风洞流场的复杂性。从仿真结果来看,采用 ADRC 对低温风洞进行控制能够取得良好的控制效果。

ADRC 所表现出的良好的控制性能,如不依赖被控对象的精确模型、较强的解耦能力和鲁棒性,本质上都可以归结于其抗干扰能力。ADRC 将低温风洞流场的建模误差、流场的耦合、系统参数扰动等都视为扰动,只要扰动或者其变化率是有界的,则都可使用 ESO 进行估算,然后通过前馈补偿将扰动消除掉。而对于流场大时滞问题,则通过调节控制器的参数,适当削弱动态性能来提高系统的稳定性。

5 结 论

本文以 0.3 m TCT 风洞研究对象,基于自抗扰控制原理设计了该风洞的流场控制系统。通过仿真分析可以得到以下结论:

1) 采用自抗扰控制无需额外设计解耦器,通过 ESO 将总温、总压和马赫数三个耦合以及其他扰动估计出来并进行前馈补偿,即可实现低温风洞流场三

个变量的解耦控制;

2) 自抗扰控制具有良好的鲁棒性和抗扰能力,能够适应低温风洞这种难以精确建模的、复杂的控制对象;

3) 自抗扰控制算法简单,需要调试的参数较少,便于工程应用。

本文仅完成了低温风洞自抗扰控制仿真研究工作,若将 ADRC 应用于实际风洞流场控制系统中还需要注意以下几个方面:

1) 时滞对 ADRC 性能的影响相对较大,如果通过调节参数仍无法达到令人满意的控制效果则需要采用其他措施来削弱时滞带来的不利影响^[19-20];

2) 工程应用上,与 PID 类似,ADRC 的参数也可通过调试进行整定,但是为了降低调试周期和提高控制性能,需要先期对流场进行辨识、建立数学模型^[21],尤其是获取系统的相对阶次以及参数 b 是十分必要的;

3) ADRC 的设计原则相对灵活,针对不同的控制对象需要进行适当调整,如对于信号噪声较大的场合,可考虑对部分已知的对象模型加以利用,在保持控制性能不变的情况下降低 ESO 带宽,减少噪声的放大。总之,目前 ADRC 还未应用到低温风洞控制系统中,因此还需要在引导风洞中开展进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] 廖达雄, 黄知龙, 陈振华, 等. 大型低温高雷诺数风洞及其关键技术综述[J]. 实验流体力学, 2014, 28(2): 1-6, 20.
LIAO D X, HUANG Z L, CHEN Z H, et al. Review on large-scale cryogenic wind tunnel and key technologies[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2014, 28(2): 1-6, 20. (in Chinese)
- [2] THIBODEAUX J J, BALAKRISHNA S. Automatic control of a 0.3 m cryogenic test facility[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 1981, 4(4): 428-432.
doi: 10.2514/3.56095
- [3] BALAKRISHNA S, GOGLIA G L. Automatic control of a liquid nitrogen cooled, closed-circuit, cryogenic pressure tunnel; NASA-CR-162636[R]. United States: NASA, 1980.
- [4] BALAKRISHNA S, GOGLIA G L. Synthesis of a control model for a liquid nitrogen cooled, closed circuit, cryogenic nitrogen wind tunnel and its validation; NASA-CR-162508[R]. United States: NASA, 1979.
- [5] BALAKRISHNA S, KILGORE W, THIBODEAUX J. Control of large cryogenic tunnels[C]//28th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Nashville, TN, Reston, Virginia; AIAA, 1992.
doi: 10.2514/6.1992-3930
- [6] GOBERT J. ETW control system: Design and first results [C]//25th Plasmadynamics and Lasers Conference, Colorado Springs, CO, Reston, Virginia; AIAA, 1994.
doi: 10.2514/6.1994-2514
- [7] ZHU R S, YIN G F, TANG G S, et al. Temperature trajectory control of cryogenic wind tunnel with robust L1 adaptive control [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2018, 40(13): 3675-3689.
doi: 10.1177/0142331217728569
- [8] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.
doi: 10.1109/TIE.2008.2011621
- [9] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003, Denver, CO, USA. IEEE, 2003: 4989-4996.
doi: 10.1109/ACC.2003.1242516
- [10] 程赞, 陈增强, 孙明玮, 等. 多变量逆解耦自抗扰控制及其在精馏塔过程中的应用[J]. 自动化学报, 2017, 43(6): 1080-1088.
CHENG Y, CHEN Z Q, SUN M W, et al. Multivariable inverted decoupling active disturbance rejection control and its application to a distillation column process[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(6): 1080-1088. (in Chinese)
- [11] 薛洪武, 吴爱国, 董娜. 制冷系统自抗扰解耦控制[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(9): 85-90.
- XUE H W, WU A G, DONG N. Active disturbance rejection decoupling control for refrigeration systems[J]. Journal of Xian Jiaotong University, 2016, 50(9): 85-90. (in Chinese)
- [12] ZHAO C Z. Capability of ADRC for minimum-phase plants with unknown orders and uncertain relative degrees [C]//Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, Beijing, China. IEEE, 2010: 6121-6126.
- [13] ZHAO C Z, LI D H. Control design for the SISO system with the unknown order and the unknown relative degree[J]. ISA Transactions, 2014, 53(4): 858-872.
doi: 10.1016/j.isatra.2013.10.001
- [14] ZHAO S, GAO Z Q. Active disturbance rejection control for non-minimum phase systems [C]//Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, Beijing, China. IEEE, 2010: 6066-6070.
- [15] TAN W, FU C F. Analysis of active disturbance rejection control for processes with time delay [C]//2015 American Control Conference (ACC), Chicago, IL, USA. IEEE, 2015: 3962-3967.
doi: 10.1109/ACC.2015.7171948
- [16] DONG L, EDWARDS J. Active disturbance rejection control for an electrostatically actuated MEMS device[J]. International Journal of Intelligent Control and Systems, 2011, 16(3): 160-169.
- [17] 袁东, 马晓军, 曾庆含, 等. 二阶系统线性自抗扰控制器频带特性与参数配置研究[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1630-1640.
YUAN D, MA X J, ZENG Q H, et al. Research on frequency-band characteristics and parameters configuration of linear active disturbance rejection control for second-order systems [J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(12): 1630-1640. (in Chinese)
- [18] 张黎豪, 张文安. 磁悬浮球系统的线性自抗扰控制与参数整定 [J]. 系统科学与数学, 2017, 37(8): 1741-1756.
ZHANG J H, ZHANG W A. Linear active disturbance rejection control to magnetic levitation ball system and parameters tuning [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2017, 37(8): 1741-1756. (in Chinese)
- [19] ZHENG Q L, GAO Z Q. Predictive active disturbance rejection control for processes with delay [C]//32nd Chinese Control Conference, 2013: 4108-4113.
- [20] ZHAO S, GAO Z Q. Modified active disturbance rejection control for time-delay systems[J]. ISA Transactions, 2014, 53(4): 882-888.
doi: 10.1016/j.isatra.2013.09.013
- [21] 梁青, 王传榜, 潘金文, 等. 线性自抗扰控制参数 b_0 辨识及参数整定规律[J]. 控制与决策, 2015, 30(9): 1691-1695.
LIANG Q, WANG C B, PAN J W, et al. Parameter identification of b_0 and parameter tuning law in linear active disturbance rejection control[J]. Control and Decision, 2015, 30(9): 1691-1695. (in Chinese)