

基于ESO的高空台发动机进气压力控制研究进展

张松¹, 白克强^{*2}, 但志宏¹, 钱秋朦¹, 刘磊²

1. 中国航发四川燃气涡轮研究院高空模拟技术重点实验室, 绵阳 621703

2. 西南科技大学信息工程学院, 绵阳 621010

摘要 高空台航空发动机进气压力控制是保障发动机高空模拟试验有效性及可靠性的关键, 而基于扩张状态观测器(extended etate observer, ESO)的进气压力控制方法研究, 目的是改进控制品质, 抑制未知干扰的影响, 实现进气压力的快速稳定控制。通过梳理高空台发动机进气压力控制技术的发展现状, 阐述了基于ESO的控制方法研究进展及相关问题, 并就目前ESO的参数整定及改进设计进行分类总结, 提出了基于扩张状态观测器的高空台发动机进气压力控制的未来发展策略和研究方向。

关键词 扩张状态观测器; 进气压力控制; 航空发动机高空模拟

高空台是模拟航空发动机地面工作环境及获取航空发动机高空性能/特性的大型试验设备, 是自主开发先进航空发动机不可缺少的重要平台。航空发动机在高空台进行推力瞬变、遭遇起动、加减速等过渡态考核试验时, 状态变化经常十分剧烈, 发动机中的空气流量可在1~2 s内发生80%~100%的变化, 进气压力控制系统也会受到大幅值阶跃信号的干扰, 这些状态变化会导致进气压力控制系统的调节品质变差, 从而使发动机的进气压力

模拟精度受到影响^[1]。航空发动机进气压力的模拟精度是发动机高空模拟试验中必须考核的一项重要指标, 其自动控制水平的优劣直接关系到高空模拟试验的有效性^[2]。针对进气压力模拟精度受到的影响, 可通过改善进气压力控制系统的调节品质来弥补^[3]。

发动机进气压力控制系统不同于一般简单控制系统, 该控制系统的非线性干扰因素较多, 并且控制系统的特性模型难以准确建立, 给控制器设计

收稿日期: 2019-07-06; 修回日期: 2020-05-16

基金项目: 装备预研教育部联合基金(6141A02033616); 中国航发自主创新专项基金(SHYS-2019-0004); 西南科技大学博士研究基金(17zx7157)

作者简介: 张松, 研究员, 研究方向为航空发动机高空模拟技术, 电子信箱: zs3365475@sohu.com; 白克强(通信作者), 副教授, 研究方向为控制理论与控制工程、机器人、计算机应用技术及数学建模, 电子信箱: baikeqiang@swust.edu.cn

引用格式: 张松, 白克强, 但志宏, 等. 基于ESO的高空台发动机进气压力控制研究进展[J]. 科技导报, 2021, 39(11): 109-117; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.11.012

带来了极大的挑战^[4]。针对传统控制方法难以有效提升进气压力控制品质的问题,基于扩张状态观测器的控制策略由于不依赖于系统的精确模型,且结构简单、易于实现,为发动机过渡态试验中进气压力控制系统提升压力模拟精度带来了良好的机遇。扩张状态观测器(ESO)是韩京清研究员于1995年从“控制好过程”的思想出发提出的一种扰动观测器,其核心思想是把系统的未建模动态与不确定未知扰动信息均归结为对系统的总扰动,利用扩张状态观测器对总扰动进行整体辨识并结合恰当的控制量予以补偿,具有鲁棒性及抗扰动能力强等优势,已在机器人控制、卫星姿态控制及制导控制等领域对于受扰动的不确定非线性系统起到良好的控制效果^[5]。本文从高空模拟试验的角度,综述基于扩张状态观测器的航空发动机进气压力控制技术的研究进展和发展趋势。

1 进气压力控制技术研究现状

随着中国航空发动机及燃气轮机重大专项的实施,对航空动力装置开展了大量深层次的战略规划与论证工作,在高空台环境模拟领域开展的工作主要集中在过渡态试验控制方面。高空台发动机进气压力控制系统是航空发动机高空模拟试验台的一个重要组成部分,它为高空台的飞行环境模拟试验舱提供压力稳定的进气条件。由于高空台的试验具有飞行包线范围广、工况变化大等特点,使得进气压力控制系统的工作范围广,进气压力的控制是通过大型液压伺服系统调节流量实现的,而调节阀的流量变化剧烈,因此在整个工作范围内确保进气控制系统压力的精确控制难度较大^[6]。基于此,国内外学者针对进气压力控制技术开展了大量研究。

张松等^[7]设计了一种以发动机空气流量变化率为前馈输入扰动变量的前馈控制器,半物理仿真结果表明,该方法实现了控制系统的稳定、快速、高效三者之间的统一,但是存在速度不均匀及控制精度较差等问题。赵涌等^[8]在上述研究的基础上,提出一种PID(proportional-integral-derivative)反馈+气

流前馈补偿控制策略,构成了一个压力复合控制系统,试验结果表明,所设计的复合控制系统能够达到速度均匀、精度高的目的,但该复合系统鲁棒性差及抗扰能力弱。基于此,朱美印等^[9]针对高空台进气控制系统的压力在整个工作范围内的精确控制问题,提出一种基于进气系统压力的PI(proportional-integral)增益调度控制器设计方法实现了高空台进气控制系统的压力在整个工作范围内的精确控制,并在半物理仿真上进一步验证了所提出设计方法的有效性,稳态误差不大于0.1%。Weisser等^[10]针对控制系统进行了硬件在回路仿真,开展了发动机过渡态进气压力前馈控制技术半物理仿真实验研究,大幅提高了控制系统过渡态调节性能。随着智能控制的不断发展,大量研究人员针对高空台进气系统的智能控制开展了研究工作。赵涌等^[11]提出一种基于人工智能模糊PID参数在线自整定的仿真飞行控制系统,解决了航空发动机高空模拟试验动态特性差、鲁棒性差的问题,实现了控制系统的可靠性与稳定裕度的统一。乔彦平等^[12]针对高空模拟试验台进/排气系统的控制效果的优劣问题,提出一种基于遗传算法的进/排气压力自动控制方法,该方法通过遗传算法优化PID控制参数,最终得到了系统良好的控制效果。周家林等^[13]针对高空模拟试验中需对抽气压力进行自动调节达到精确控制进气道出口流量,提出模糊自适应PID控制器的策略,该控制器具有控制精度高、鲁棒性强及调节时间短的特点,对抽气压力实现自动调节。

为提升进气控制系统精度,国内外在高空台上开展了大量试验。美国AEDC(arnold engineering development center)通过开展设备建模、控制仿真以及先进控制技术的研究,保证了发动机过渡态性能/特性评定的环境模拟需求。俄罗斯高空台通过开展设备设计以及自适应控制等先进控制的研究,有效地保证了航空发动机过渡态试验的环境模拟控制品质。德国斯图加特高空台设计开发了进气压力复合控制技术,改善了过渡态试验中的控制品质。中国高空台通过前馈+反馈的经典模式,一定程度上改善了发动机过渡态试验进气系统的抗扰

能力。

从上述研究发现,在高空台开展过渡态试验中,被控对象的各种非线性未知动态及外部干扰是影响发动机进气压力控制品质的关键。目前发动机进气系统过渡态主要采用前馈+反馈的复合控制方式,需预先获取系统所受扰动和动态信息的先验知识。同时不同型号发动机的过渡态特性存在显著差异,无法建立通用扰动源模型,致使控制方法只能完成过渡态控制的局部优化,无法较好地满足发动机过渡态试验进气模拟任务要求。因此,需选取合理的控制算法,对高空台进气系统调压控制,保证试验点 H (高度)、 Ma (飞行马赫数)状态调节精度,达到更好的航空发动机高空模拟精度。扩张状态观测器是一种基于现代控制理论的思想,该方法无需过多依赖系统自身及扰动源的模型,而是采用一扩张状态对系统存在的不确定未知扰动(内扰及外扰)进行预估,并通过特殊反馈机制对所预估扰动实时补偿,从而形成一种具有自主性的“主动”抗扰方法。鉴于该方法可有效抑制各种非线性未知动态及外部干扰对进气压力控制品质的影响,因此在高空台过渡态试验进气压力控制中有着广泛的应用价值,同样该方法也是现代控制理论在高空台工程应用的首次探索和创新。

2 基于ESO的控制技术进展

作为观测器的一类,扩张状态观测器是在传统观测器的设计基础上优化改进而得到的。传统观测器是一类根据系统的外部变量(输入变量及输出变量)的实测值得出状态变量估计值的动态系统,对观测器主要从三方面进行考察,分别是被控对象的假设动态数学模型、被控对象的输入输出信息以及观测器的实现方程^[4]。多年来,出现了两种面向观测器的设计方法,一种是基于数学对象模型的状态估计,另一种是基于输入输出数据的扰动估计。

近年来,基于数学对象模型的状态估计的观测器设计的复杂性在不断增长。最初研究者发现,如果把更准确的信息(确定性、微分、多项式、有界、随机描述为特征的噪声及干扰信息)纳入观测器,就

能得到更好的估计,许多改进的观测器都是针对精确的对象模型信息提出的。最早使用的观测器是从对象模型或输出信号中获取信息,此类观测器对于只有输出信息的普通模型很有用,观测器的结构简单,在有扰动及观测噪声的情况下会导致观测精度下降和观测状态产生延迟,后来研究者针对这一问题提出基于输入的观测器,避免了输出信号扰动和观测噪声的影响。基于输入的观测器需要被控对象的精确数学模型,而且系统的初始状态必须是已知的,而通过这些基础信息已经可以使系统的输出由输入唯一确定。因此,为了达到更好的观测效果,必须要建立精确的对象模型。

Luenberger^[5]提出龙伯格观测器,该观测器为如今使用的大多数观测器提供了基本结构,他们之间的区别主要在于观测器的增益参数选择不同。随着观测器应用的深入,研究者认识到不能完全依赖对象的数学模型,这引出了为实际干扰开发的第二类观测器。这类观测器的一个显著特点是具有非线性及不确定性,其主要功能是观测噪声,基本思想是估计出系统的扰动,然后用控制系统进行补偿,实现消除干扰的目的。

韩京清^[6]发现未知输入观测器总体结构较为复杂,在实际应用中受到一定限制。为此,设计了结构相对简单的扩张状态观测器,将系统的内部扰动与外界干扰统一成一类干扰来处理,通过特殊的反馈机制观测被扩张的总扰动信号。经过半个多世纪的不断研究及发展,观测器已经成为控制理论和实践的重要组成部分。随着对控制研究的不断深入,研究人员发现得到被控对象的精确模型比较困难,对状态观测器的改进相对容易,因此对观测器的研究逐渐增多。由于扩张状态观测器的出现,现在已经可以对不精确的对象模型实现较好的自抗扰控制效果。对于连续ESO的离散化实现,常采用欧拉近似法。针对线性ESO韩京清^[7]提出了多种离散方法,较采用欧拉近似法在性能方面有较大的提高。

自抗扰控制中ESO的作用尤为重要,所以吸引了大量研究人员对其进行分析改进。为了使扩张状态观测器具有优良的观测精度,大量研究人员对

ESO 展开研究。目前, ESO 研究主要分为两个方面, 即 ESO 参数整定和 ESO 设计改进。

2.1 扩张状态观测器的参数整定

基于扩张状态观测器的控制系统在早期的研究中需要整定的参数较多, 例如对于一个二阶的被控对象, 所设计的 ESO 是一个三阶非线性的, 一般情况下已经包含了 6 个可调参数。采用这种方法去控制更高阶的对象, 那么设计的 ESO 将涉及到更多的可调参数, 参数设定是否合理会直接影响系统的控制效果。

针对扩张状态观测器的参数整定问题, 研究者提出了许多算法。一方面针对时域分析方法, 王坤等^[18]、韩京清^[19]、李述清等^[20]均采用了目前比较好的智能控制方法, 例如神经网络参数整定、参数序列与非波纳奇数列的结合法以及受控系统时间尺度法。Zhu 等^[21]应用遗传算法对 ESO 的参数进行优化, 该方法运用被控对象的时间尺度信息, 通过优化参数整定后的 ESO 观测精度, 实现 ESO 参数寻优。王坤等^[22]提出基于改进型粒子群算法的 ESO 设计方法, 该方法引入速度因素来防止优化陷入局部最优, 最后通过计算及仿真实验分析, 验证了所提方法的正确性及鲁棒性, 对解决自抗扰控制器中其他模块的待定参数整定问题, 提供了一定的解决思路。周德召等^[23]针对非线性动态系统的 ESO 参数整定问题, 应用 BP(back propagation) 神经网络建立模型, 通过模型仿真得出该参数整定模型较传统的参数整定模型具有动态性能好、精度高等优点。Li 等^[24]研究了非线性 ESO 参数优化的李雅普诺夫函数法, 该方法应用在二阶 ESO 参数整定中, 在较短的时间内可以达到较好的观测效果。另一方面针对频域分析方法, Gao^[25]提出一种基于带宽概念的参数整定方法, 将控制系统从初始非线性简化为线性, 从而大大降低了控制器的参数, 给出了实际应用中获得优化带宽的方法和步骤。王海强等^[26]提出三阶 ESO 的非 3w 法及 3w 法(其中 3w 表示 3 个极点重合), 分别对应低频段及中高频段, 采用非线性函数连接组合两者, 通过调节唯一的 1 个参数来确定两者的边界。袁东等^[27]通过闭环传递函数及频带特性曲线, 对扩张状态观测器的估计能力

进行详细的分析, 并对自抗扰控制器的稳定性给出证明, 对控制参数提出了工程配置的方法。武雷等^[28]提出一种参数的自动调整算法, 在开环不稳定系统及工业机电驱动器单元上进行控制实验仿真, 结果证明了该算法的有效性。陈松林等^[29]针对三阶非线性 ESO 扰动优化问题, 提出一种最小的参数配置方法, 该方法受系统状态变化影响小, 保证了扰动观测的带宽; 2018 年, 在此研究的基础上, 提出一种具有观测带宽及噪声抑制的双重参数整定方法, 仿真结果表明, 该方法能更好地抑制噪声^[30]。2019 年, 马星河等^[31]为了提高矩阵变换器在输出侧的电压质量, 从提升控制器性能的角度出发, 在控制闭环系统中运用人工蜂群算法优化自抗扰参数, 避免了人工参数整定的麻烦, 并极大提高了系统的准确度。周涛^[32]运用差分进化算法优化控制器带宽并观测带宽 2 个参数, 实现了对线性自抗扰控制器的参数自整定。

从上述文献对比可知, 目前 ESO 参数整定的方法可划分为带宽法/极点配置法、人工智能方法及经验法, 其中人工智能优化算法的优化函数一定要设计合理, 才能避免陷入局部最优。针对 ESO 的参数整定与优化仍在不断丰富及发展之中, 主要研究目标是实现好的控制效果和简单易用。

2.2 扩张状态观测器的设计改进

对于控制系统的扰动补偿的有效性取决于 ESO 的观测精度。在工程应用中, 难以直接测量的变量, 通常需要设计观测器进行观测, 然后根据观测到的变量使用数学推导计算出其他变量的值, 但这种方法对 ESO 的观测精度要求较高。为了使得控制系统达到更高、更稳定的状态, 在最初韩京清研究员提出的 ESO 基础上, 吸引大量研究人员对其进行了分析改进。

针对输出信息带有噪声干扰的问题, Lin 等^[33]及康忠健等^[34]分别提出了一种新的扩张状态观测器形式和基于扩张状态观测器的变结构控制方法, 设计的控制器具有有限幅特性, 并对非线性系统可以进行线性化。类似地, 王璐等^[35]提出基于扩张状态观测器估计的反演控制算法, 设计了使跟踪误差一致且最终有界的控制器, 并在飞行器上验证了其效

果。Tian^[36]提出的降阶观测器,减少了相位滞后,且使参数更容易整定。针对有量测噪声的非线性不确定系统和时变外扰无法保证观测误差有界的问题,为了保证观测误差有界以及控制增益不为常数的情况,黄国勇等^[37]和胡婵娟^[38]均采用滑模控制策略,使观测误差在有限时间收敛为零。而王军晓等^[39]将降阶型扩张状态观测器与滑模控制相结合,有效改善了控制系统的跟踪性能。Guo等^[40]提出修改型扩张状态观测器,利用系统已知的信息通过计算和构造重新整合出待估计的1个状态,从理论上严格证明了观测器的收敛性。陈志翔等^[41]在修改型扩张状态观测器^[40]的基础上,提出基于最小二乘法的修改型扩张状态观测器设计方法,针对观测器的假设条件,增加了部分内容,观测器的性能得到了提升。Xue等^[42]和Pu等^[43]均基于ESO提出自适应扩张状态观测器,用于处理传感器及设备中的不确定性,对ESO的增益进行自动及时调整,以减少状态估计误差和对测量噪声的总干扰。在此基础上,2017年,Xue等^[44]提出基于预测观测器的自抗扰控制方法,对系统的总干扰进行了估计和补偿。Xiong等^[45]给出一种有限时间收敛的ESO,该算法通过非线性项和切换项反馈输出估计误差,与传统扩张状态观测器相比,改进设计的扩张状态观测器不会将所有未知的不确定性的二阶系统看作零来处理,这种设计更加适合要求精度高的控制系统,该扩张状态观测器的有效性通过仿真实验得到了证明。为了实时估计及补偿系统总扰动,Li等^[46]把ESO与滑模控制各自优点进行结合,设计一种控制器来解决功率变换器的失配干扰问题,并对控制器稳定性进行了严格的实验分析,结果表明该控制方法比传统的滑模控制具有更好的控制性能。Sun等^[47]针对非最小相位系统,提出一种前馈与自抗扰相结合的改进自抗扰控制器,通过理论分析证实了闭环系统的稳定性、稳态特性和鲁棒性。Sanz等^[48]研究了输入延迟系统的输出稳定和干扰抑制问题,通过引入合适的变换将不匹配的扰动转化为等效的输入扰动,将扩张状态观测器与预测观测器结构相结合,得到状态和扰动的未来估计,并通过数值算例证明了该策略的有效性。Pawar等^[49]基于线性

自抗扰控制系统,提出一种改进的双输入双输出系统降阶扩张状态观测器,该方法的有效性通过多变量水箱控制实验得到了验证。为了提高线性扩张状态观测器的观测精度,加快线性扩张状态观测器的收敛速度,孙佃升等^[50]基于偏差控制的基本原理,提出一种改进的自抗扰控制系统线性扩张状态观测器。Gonzalez等^[51]针对输入和输出通道存在不匹配干扰和时变延迟的系统,提出一种基于时延增益调度的预测反馈控制方案,该控制策略将预测反馈控制与适当设计的增益调度ESO相结合,与其他类似技术不同的是,该控制方案能够通过增益调度策略抵消时滞的变化,同时主动补偿由于被控输出中的不匹配干扰而产生的稳态误差,实验表明该控制器具有较好鲁棒性。Pukdeboon等^[52]将非奇异滑模控制与扩张状态观测器相结合,对刚性航天器姿态跟踪控制问题进行了研究,该控制方法的有效性通过数值仿真得到了验证。Madonski等^[53]设计了一种基于1自由度误差的自抗扰控制器的设计方法,这样的设计使得标准的ADRC算法能够以一种紧凑的、几乎即插即用的形式实现,这种形式通常出现在工业控制配置中。Prasad等^[54]将广义扩张状态观测器(GESO)与非线性滑模控制相结合研究多区域电力系统的频率偏差问题,在研究中,GESO不仅用于状态估计及干扰估计,而且用于系统的干扰抑制。陈志翔等^[55]通过对扩张状态观测器的研究发现,线性与非线性扩张状态观测器在不同频率信号下的观测精度各有优势,并据此提出一种线性/非线性切换型扩张状态观测器,实现了观测器的互补。万慧等^[56]通过判断观测误差的不同,动态选择线性或非线性扩张状态观测器,并成功将该线性/非线性切换型扩张状态观测器应用在四旋翼飞行控制中。

通过上述研究可以看出,改进的ESO相对于传统方式越来越适用于实际系统。目前ESO的改进设计主要有5种,分别是串联型扩张状态观测器、自适应扩张状态观测器、修改型扩张状态观测器、结合型扩张状态观测器和切换型扩张状态观测器。在不同的被控对象中合理选择扩张状态观测器,可以使观测精度达到最佳,进一步提升控制系统的自

抗扰能力。

2.3 扩张状态观测器在控制领域的应用

通过扩张状态观测器的应用,非线性系统的抗干扰能力得到了提升。目前已经广泛应用于卫星姿态控制、制导控制、惯导系统对准、机器人控制等领域且社会效益和经济效益也得到了显著的提高。

为了实现航天器姿态控制的内、外部干扰的观测和补偿,吴忠等^[57]通过传感器和陀螺仪等量测手段来采集数据信息,设计出基于扩张状态观测器的复合测量方法,对航空器姿态状态进行校正估计;宋斌等^[58]为了实现挠性航天器的高精度位姿指向控制,提出了基于三阶扩张观测器的航天器高精度位姿控制算法,该算法可以对系统姿态角速度和总扰动进行观测,抑制扰动并且实现线性化动态补偿。在机器人应用方面,李奇^[59]针对机械臂复杂系统本身存在的内部模型不确定性,以及在气动单关节机械臂受到外部环境扰动的问题,提出用自抗扰控制方法处理气动单关节机械臂的控制问题。仿真实验验证了该方法定位控制的有效性。王素珍等^[60]针对带有延时、大惯性换热器温度控制问题,设计基于扩张状态观测器动态面控制器,通过ESO获取系统不可测状态实时估计系统动态,采用动态面控制律,实现对温度的精确快速跟踪。陈志翔等^[61]为了解决直线电机伺服系统跟踪速度与峰化现象之间的矛盾,设计一种基于非线性扩张状态观测器的PD(proportional-derivative)控制器,通过与两种基于LESO(linear extended state observer)的PD控制器对比,验证了所设计的基于NLESO(non-linear extended state observer)的PD控制器的可行性。Ramírez-Neria等^[62]提出一种基于平整度的非线性惯性轮摆不稳定平衡点线性自抗扰控制方法,该方法利用欠驱动系统的平整度特性所提供的叶栅结构,设计了一种广义比例积分型高增益级联扩张状态观测器。刘俊杰等^[63]将自抗扰控制技术应用于推力矢量飞机的大仰角机动控制中,通过设计3个低阶自抗扰控制器实现对3个通道的独立控制,解除了通道之间强耦合性对控制的影响。杨淑英等^[64]针对永磁同步电机中的电流解耦控制问题,运用扩张状态观测器对系统状态值实时估计,动态

消除观测干扰,轻松解决了耦合效应问题。王献策等^[65]将燃气舵片控制系统中的耦合和干扰项扩张为新的状态量,运用高阶扩张状态观测器改善了控制系统的响应和稳定性能。

在实际应用中,传统的PID控制方法对控制系统的控制效果较差,主要原因是控制系统大都在实际中是一个非线性、大时滞、多变量的系统,而扩张状态观测器可以将该系统近似线性化,实现更好的控制效果。因此,基于扩张状态观测器的自抗扰控制系统得到了广泛研究与应用。

3 ESO 应用于高空台研究展望

航空发动机进行高空模拟试验中,进气压力在过渡态时控制难度较大,采用传统的PID控制方式不能很好地实现快速和稳定的统一,往往都会出现控制超调过度的情况,极大地影响了航空发动机在高空台模拟试验的真实性。根据扩张状态观测器实时估计过程干扰及实时补偿干扰的特点,许多研究者针对扩张状态观测器及其改进形式进行了研究及工程应用,不管是对扩张状态观测器自身的改进,还是将其他控制方法与扩张状态观测器相结合的方式,在控制精度及系统稳定性方面都取得了较好的结果。特别地,在扩张状态观测器的前级将噪声抑制算法加入进来,可以得到更加准确的估计,从而实现更合理的干扰补偿。因此,针对目前航空发动机进气压力控制技术存在的问题,将扩张状态观测器应用于高空台进气压力控制,无疑是推动高空台进气压力控制系统创新发展的新思路和重要方法。

通过分析扩张状态观测器的研究成果认为,实现基于ESO的高空台航空发动机进气压力控制,需要进行以下几方面的深入研究。

1) 参数的提前整定在扩张状态观测器的使用上尤为重要,减少参数整定的流程会很大程度提高控制算法的有效性。而传统的粒子群优化算法的初始值是随机设定的,使每次达到最终优化结果的速度有很大区别,并且不能有效地解决组合优化的参数问题。针对该问题,结合粒子群优化算法的优

势,拟先对初始值进行判断,去除误差极大的粒子影响,并且为优化的参数设置一定的权重,进而在优化过程中实现相应的组合优化效果。

2) 实时调整扩张状态观测器增益参数。不同增益参数的观测器得到的观测数据精度是截然不同的,因此需要对不同增益参数进行实时调整,以适应不同的外界或内部的干扰,进而更加精确地估计出干扰状态。进气压力控制系统中压力实际值与状态估计值之间的误差是设置增益参数的重要因素,所以可根据这一点出发实时调整增益参数,以提升扩张状态观测器的观测性能。

3) 针对进气压力控制系统容易受到噪声干扰的问题,为了减少测量噪声的影响,可在跟踪微分器与扩张状态观测器的环节中结合滤波算法降低信号颤振现象,以提升观测精度。

4 结论

扩张状态观测器的应用使航空发动机高空模拟试验进气压力控制系统的调节品质得到大幅提高,从而使航空发动机获得更加精确的模拟水平,有效地改善了发动机在快速过渡态试验时的抗扰能力和动态调节特性,消除了传统控制方法偏差时间较长、动态响应较慢的问题。基于扩张状态观测器的自抗扰控制技术已经应用于部分实际系统,但推广应用仍需进一步加强,尤其是针对高空台进气压力系统、航空飞行模拟控制系统等各类实际工程,通过理论研究、模拟仿真、半物理仿真等完成自抗扰控制算法的硬件产品化,是未来亟待研究的关键技术。

参考文献(References)

- [1] 但志宏, 侯敏杰, 石小江, 等. 大流量航空发动机高空模拟进气压力智能与复合控制技术[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2011, 24(2):13-16.
- [2] 侯敏杰. SB101 高空模拟试车台非等流量试验方法研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1995 (2): 18-20.
- [3] 侯敏杰. 调压系统变参数PID控制研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1995 (2): 44-47.
- [4] 裴希同, 张松, 但志宏, 等. 高空台飞行环境模拟系统数字建模与仿真研究[J]. 推进技术, 2019, 40 (5):190-198.
- [5] 李杰, 齐晓慧, 万慧, 等. 自抗扰控制: 研究成果总结与展望[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(3): 281-295.
- [6] 裴希同, 朱美印, 张松, 等. 一种特种阀流量特性计算的公式迭代方法[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2016, 29 (5): 35-39.
- [7] 张松, 郭迎清, 侯敏杰, 等. 复合控制技术在高空台进排气调压系统中的技术研究[J]. 测控技术, 2009, 28(11): 29-33.
- [8] 赵涌, 侯敏杰, 黄振南, 等. 航空发动机高空模拟试验进气压力复合控制研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2010, 23 (1): 37-41.
- [9] 朱美印, 王曦, 但志宏, 等. 高空台进气控制系统压力PI增益调度控制研究[J]. 推进技术, 2018, 40(4): 902-910.
- [10] Weisser M, Bolk S, Staudacher S. Hard-in-the-Loop-Simulation of a feed forward multivariable controller for the altitude test facility at the university of stuttgart[C]// Proceedings of 2013 Aircraft Propulsion Systems Conference. Berlin: Aerospace Industry Association, 2013: 1-6.
- [11] 赵涌, 侯敏杰, 黄振南, 等. 航空发动机高空模拟试验飞行高度模糊PID控制系统[J]. 机电工程, 2010, 27 (1): 68-71.
- [12] 乔彦平, 黄单. 基于遗传算法的高空台进排气控制仿真研究[J]. 测控技术, 2012, 31 (6): 83-86.
- [13] 周家林, 敖永平, 侯俊林. 基于模糊自适应PID控制器的自动调压技术[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2017, (3): 53-56.
- [14] Radke A, Gao Z. A survey of state and disturbance observers for practitioners[C]//Proceedings of the 2006 American Control Conference Minneapolis. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 14-16.
- [15] Luenberger D. Observers for multivariable systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 11 (2): 190-197.
- [16] Han J Q. The "Extended State Observer" of a class of uncertain systems[J]. Control & Decision, 1995, 10(1): 85-88.
- [17] 韩京清. 自抗扰控制技术: 估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京, 国防工业出版社, 2008.
- [18] 王坤, 蔡远利. 基于神经网络的非线性扩张状态观测器[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(8): 1099-1102.
- [19] 韩京清. 扩张状态观测器参数与非波纳奇数列[J]. 控制工程, 2008, 15(增刊1): 1-3.
- [20] 李述清, 张胜修, 刘毅男, 等. 根据系统时间尺度整定自抗扰控制器参数[J]. 控制理论与应用, 2012, 29 (1):

- 125-129.
- [21] Zhu L L, Yu X N, Liu L, et al. Application and the parameter setting of ADRC based on genetic arithmetic[J]. *Electronics Instrumentation Customer*, 2005, 4(12): 64-66.
- [22] 王坤, 张立广, 王琪. 基于改进型粒子群算法的扩张状态观测器[J]. *国外电子测量技术*, 2017, 36(8): 66-70.
- [23] 周德召, 刘晓东, 李佳庆, 等. 基于在线学习的机载光电系统扩张状态观测器参数整定研究[J]. *电光与控制*, 2019, 26(8): 43-47.
- [24] Li T Y, Zhu J H, Liu Z M, et al. Speed observation of asynchronous motor based on improved ESO[J]. *Journal of Harbin University of Science & Technology*, 2012, 35: 120-123.
- [25] Gao Z Q. Scaling and parameterizing a controller: 8041436[P]. 2011-10-18.
- [26] 王海强, 黄海. 扩张状态观测器的性能与应用[J]. *控制与决策*, 2013, 28 (7): 1078-1082.
- [27] 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.
- [28] 武雷, 保宏, 杜敬利, 等. 一种自抗扰控制器参数的学习算法[J]. *自动化学报*, 2014, 40(3): 556-560.
- [29] 陈松林, 赵海香. 三阶扩张状态观测器的优化参数配置方法[J]. *控制与决策*, 2014(10): 1851-1855.
- [30] 陈松林, 王鑫, 何宗儒. 一种兼顾带宽拓展和噪声抑制的ESO参数整定方法[J]. *控制与决策*, 2018, 33(10): 1908-1914.
- [31] 马星河, 张振东, 许丹, 等. 基于蜂群算法的矩阵变换器ADRC参数优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2019 (17): 61-68.
- [32] 周涛. 基于差分进化算法的线性自抗扰控制参数优化[J/OL]. *航空兵器*, 2020. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1228.TJ.20200219.0959.002.html>.
- [33] Lin F, Sun H, Zheng Q, et al. Novel extended state observer for uncertain system with measurement noise[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(6): 995-998.
- [34] 康忠健, 孟繁玉. 基于扩张状态观测器的SVC非线性变结构控制[J]. *继电器*, 2007, 35(22): 10-13.
- [35] 王璐, 苏剑波. 基于干扰抑制控制的飞行器姿态跟踪[J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(12): 1609-1616.
- [36] Tian G. Reduced-order extended state observer and frequency response analysis[J]. 2007, 35(22): 10-13.
- [37] 黄国勇, 姜长生, 王玉惠, 等. 新型有限时间收敛滑模扩张状态观测器研究[J]. *信息与控制*, 2008, 37(1): 63-67.
- [38] 胡娟娟. 自抗扰控制在直接转矩控制系统中的应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [39] 王军晓, 戎佳艺, 俞立. 直流降压变换器的降阶扩张状态观测器与滑模控制设计与实现[J]. *控制理论与应用*, 2019, 36(9): 1486-1492.
- [40] Guo B Z, Zhao Z L. On the convergence of an extended state observer for nonlinear systems with uncertainty[J]. *Systems & Control Letters*, 2011, 60(6): 420-430.
- [41] 陈志翔, 高钦和. 修改型扩张状态观测器: 分析与实现[J]. *控制理论与应用*, 2018, 35(8): 152-159.
- [42] Xue W, Bai W, Yang S, et al. ADRC with adaptive extended state observer and its application to air-fuel ratio control in gasoline engines[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(9): 5847-5857.
- [43] Pu Z, Yuan R, Yi J, et al. A class of adaptive extended state observers for nonlinear disturbed systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(9): 5858-5869.
- [44] Xue W, Liu P, Chen S, et al. On extended state predictor observer based active disturbance rejection control for uncertain systems with sensor delay[C]//*Proceedings of 2016 International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 1267-1271.
- [45] Xiong S, Wang W, Liu X, et al. A novel extended state observer[J]. *Isa Transactions*, 2015, 58: 309-317.
- [46] Li S, Yang J, Wu B, et al. Finite-time disturbance observer based non-singular terminal sliding-mode control for pulse width modulation based DC-DC buck converters with mismatched load disturbances[J]. *Iet Power Electronics*, 2016, 9(9): 1995-2002.
- [47] Sun L, Li D, Gao Z, et al. Combined feedforward and model-assisted active disturbance rejection control for non-minimum phase system[J]. *Isa Transactions*, 2016, 64: 24-33.
- [48] Sanz R, Garcia P, Fridman E, et al. Rejection of mismatched disturbances for systems with input delay via a predictive extended state observer[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2018, 28(6): 2457-2467.
- [49] Pawar S N, Chile R H, Patre B M. Modified reduced order observer based linear active disturbance rejection control for TITO systems[J]. *Isa Transactions*, 2017, 71: 480-494.
- [50] 孙佃升, 章跃进. 线性扩张状态观测器的改进及观测精度分析[J]. *国防科技大学学报*, 2017, 39 (6): 111-

- 117.
- [51] Gonzalez A, Balaguer V, Garcia P, et al. Gain-scheduled predictive extended state observer for time-varying delays systems with mismatched disturbances[J]. *Isa Transactions*, 2019, 84: 206–213.
- [52] Pukdeboon C. Extended state observer-based third-order sliding mode finite-time attitude tracking controller for rigid spacecraft[J]. *Science China Information Sciences*, 2019, 62(1): 12206.
- [53] Madonski R, Shao S, Zhang H, et al. General error-based active disturbance rejection control for swift industrial implementations[J]. *Control Engineering Practice*, 2019, 84: 218–229.
- [54] Prasad S, Purwar S, Kishor N. Load frequency regulation using observer based non-linear sliding mode control[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, 104: 178–193.
- [55] 陈志翔, 高钦和. 线性/非线性切换扩张状态观测器[J]. *控制理论与应用*, 2019, 36(6): 902–908.
- [56] 万慧, 齐晓慧, 李杰. 基于SADRC的四旋翼姿态控制及稳定性分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2020, 46(334): 83–92.
- [57] 吴忠, 赵建辉. 空间站姿态控制/动量管理系统设计与仿真[J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(1): 154–157.
- [58] 宋斌, 颜根廷, 李波, 等. 基于自抗扰技术的挠性航天器高精度指向控制[J]. *上海航天*, 2014, 31(2): 1–7.
- [59] 李奇. 气动单关节机械臂自抗扰定位及跟踪控制研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- [60] 王素珍, 刘庆龙, 孙国法. 基于扩张状态观测器的换热器动态面控制[J]. *化工学报*, 2018, 69(12): 5139–5145.
- [61] 陈志翔, 高钦和, 谭立龙. 基于非线性扩张状态观测器的直线电机PD控制[J]. *国防科技大学学报*, 2018(6): 151–156.
- [62] Ramfrez-Neria M, Sira-Ramírez H, Garrido-Moctezuma R, et al. Active disturbance rejection control of the inertia wheel pendulum through a tangent linearization approach[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2019, 17(1): 18–28.
- [63] 刘俊杰, 陈增强, 孙明玮, 等. 自抗扰控制在推力矢量飞机大迎角机动中的应用[J]. *工程科学学报*, 2019(9): 1187–1193.
- [64] 杨淑英, 王玉柱, 符焕, 等. 基于扩张状态观测器的PMSM电流解耦控制[J/OL]. *电机与控制学报*, 2020. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1408.TM.20200117.14-16.008.html>.
- [65] 王献策, 陈雄, 葛中杰, 等. 基于扩张状态观测器的燃气舵舵机位置控制[J/OL]. *推进技术*, 2010, 41(10): 2341–2347.

Research status of engine air intake pressure control based on ESO

ZHANG Song¹, BAI Keqiang^{2*}, DAN Zhihong¹, QIAN Qiumeng¹, LIU Lei²

1. Key Laboratory of High Altitude Simulation Technology, Sichuan Gas Turbine Establishment of Aero Engine Corporation of China, Mianyang 621703, China

2. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

Abstract Intake pressure control of high altitude platform is the key to ensure the effectiveness and reliability of high altitude simulation test. The design of intake pressure control method based on extended state observer (ESO) can effectively improve the control quality of intake pressure in high altitude platform simulation test, restrain the influence of unknown disturbance, and realize fast and stable control of intake pressure. In this paper, the development status of the intake pressure control system of high altitude platform is summarized, and the existing problems in research are pointed out. The research progress of the control technology based on ESO is systematically described. Parameter tuning methods and improved design methods of ESO are classified. The development strategy and research direction of ESO intake pressure control of high altitude platform are proposed.

Keywords extended state observer; air intake pressure control; aeroengine high altitude simulation ●



(责任编辑 韩星明)