

装备与成套技术

阀控负载敏感系统流量前馈 PID 控制及压降仿真分析

牛瑞利¹, 邱 益², 王 博³

(1. 郑州工业应用技术学院 机电工程学院, 河南 郑州 451100; 2. 郑州大学 机械与动力工程学院, 河南 郑州 451001;
3. 河南中原重型锻压有限公司, 河南 郑州 451100)

摘要: 为了提高阀控负载敏感系统的控制精度, 采用伺服电机与变量泵构建泵源, 实现对液压泵转速与流量的同步调节, 提升系统的稳定性。在给出负载敏感系统数学模型和位置环控制方法的基础上, 对负载敏感系统特性进行分析。利用 AMESim 建立了以转速调节方式实现的负载敏感系统仿真模型, 验证了控制方法的准确性。研究表明: 在泵控子系统内设置流量前馈后, 能够有效地降低节流口的压降波动性。在存在流量前馈的条件下, 系统的跟踪误差降低, 可见设置流量前馈后能够降低节流口的压差波动, 使系统达到更高的位置跟踪精度。系统节流口压降达到了与压力指令相近的状态, 总体表现为节流口压降增大后, 位置误差减小。随着压差指令的下降, 系统获得了更高的能效。

关键词: 液压系统; 阀控; 负载敏感系统; 流量前馈; 压降分析

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.04.027

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 04-0195-05

Flow feedforward PID control and pressure drop simulation analysis of valve-controlled load sensing system

Niu Ruili¹, Qiu Yi², Wang Bo³

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou Institute of Industrial Application Technology, Zhengzhou 451100, China;
2. Department of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 451001, China;
3. Henan Zhongyuan Heavy Forging & Stamping Co., Ltd., Zhengzhou 451100, China)

Abstract: In order to improve the control accuracy of valve-controlled load sensitive system, the servo motor and variable pump were used to build the pump source to realize the synchronous adjustment of rotating speed and flow of hydraulic pump, and the stability of system was improved, and based on the mathematical model of load sensitive system and the control method of position loop, the characteristics of load sensitive system were analyzed. Then, by adjusting rotating speed method, the simulation model of load sensitive system was established by AMESim, and the accuracy of the control method was verified. The results show that the pressure drop fluctuation can be reduced effectively by setting the flow feedforward in the pump control subsystem. Under the condition of flow feedforward, the tracking error of the system is reduced. It can be seen that the setting of flow feedforward can reduce the pressure difference fluctuation at the throttle orifice and make the system achieve higher position tracking accuracy. The pressure drop at the throttle orifice of the system reaches a state close to the pressure instruction. As a whole, the position error decreases with the increasing of pressure drop at the throttle orifice. Thus, as the pressure difference instruction decreases, the system gains higher energy efficiency.

Key words: hydraulic system; valve control; load sensitive system; flow feedforward; pressure drop analysis

阀控系统通过控制调节阀开口来实现流量调节, 最终完成执行器运动状态的调控功能, 被广泛应用于液压机等领域^[1-3]。但采用上述控制方式时, 小负载工况下泵源的输出功率远超过负载实际运行需

要达到的功率, 由此引起明显的节流与溢流损失现象^[4-5]。目前, 大部分学者主要利用负载敏感技术来消除泵源与负载之间的不匹配问题^[6-7]。其中, 负载敏感技术的泵源流量可以根据实际需求进行调节, 同时根据负载压力探测数据控制泵源运行状态, 确保输出功率实时匹配负载的功率需求, 以显著降低系统节流损失、减少发热量并增加系统寿命^[8]。以上控制技术目前已被广泛应用于加压工程等机械领域。

机液负载敏感系统压力反馈较慢, 从而引起反

收稿日期: 2021-07-27; 修订日期: 2021-10-19

基金项目: 河南省重点研发与推广科技攻关项目 (192102210224)

作者简介: 牛瑞利 (1981-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: csllong@163.com

馈信息产生明显的滞后性，导致系统运行状态发生波动变化^[9-10]。有学者开发了一种电液负载敏感系统，此系统不同于机液负载敏感系统，以压力传感器代替梭阀^[11-12]。还有学者 Lovrec D 等^[13]设计了一种不需使用压力反馈回路的电液流量匹配负载敏感系统，根据调节阀开口度的大小获得执行器的流量参数，综合运用电机转速与泵排量来计算电控泵控制信号，由此实现电控泵与节流阀的高效控制。国内学者刘伟^[14]选择挖掘机作为测试平台，达到更稳定的系统状态。流量匹配是一种开环控制方法，液压系统包含了许多不确定的参数，会引起流量过匹配与欠匹配的情况，出现流量过匹配时会引起压力冲击并造成能量损失，而当流量欠匹配时则减小速度控制精度。徐兵等^[15]开发了一种采用旁路压力补偿方式进行控制的电液流量匹配系统，设置了旁路压力补偿的功能，在泵供应流量超过执行器的流量时，多余的流量通过旁路补偿回路回到油箱。

本文分析了负载敏感系统的实现方式，并给出了数学模型以及控制方法。利用 AMESim 建立了以转速调节方式实现的负载敏感系统仿真模型，验证了控制方法的准确性。

1 负载敏感系统

1.1 负载敏感系统实现方式

负载敏感系统具备较强的功率适应能力，该系统可以把负载需要的功率传感至泵源，实现对泵源工作状态的调节，为系统提供合适的负载液压功率，降低系统的能量损耗^[16]。负载敏感系统布局如图 1 所示。其中， P_1 、 P_2 为液压缸两腔压力； Δp 为节流口压降； x_v 为节流阀阀芯的位移； p_s 和 p_r 分别为

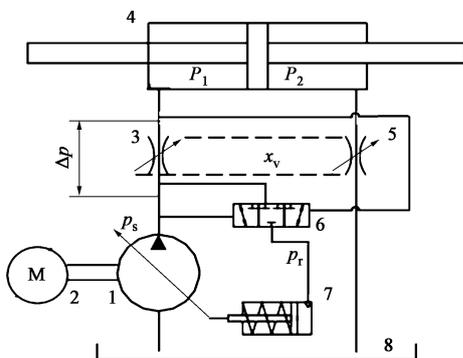


图 1 负载敏感系统布局

- 1. 定量泵 2. 伺服电机 3. 节流阀 1 4. 液压缸 5. 节流阀 2
- 6. 换向阀 7. 平衡阀 8. 油箱

Fig. 1 Layout of load sensing system

泵输出压力与回油压力；M 为伺服电机。

本方案采用伺服电机与变量泵构建泵源，能够实现液压泵转速与流量的同步调节，由此实现泵源输出流量的精确控制，使系统获得更灵活的适应性，同时形成了 2 个控制自由度，显著提升了系统的稳定性。但同时也需注意到，双自由度会导致系统结构复杂度的提高，并增加了整体成本。

1.2 数学模型分析

图 2 给出了设计得到的负载敏感系统控制框图。其中， Q_1 和 Q_2 分别为节流阀 1 和 2 的输出流量； p_1 和 p_2 分别为节流阀 1 和 2 的压力； u_1 和 u_2 分别为节流阀 1 和 2 的增益比例； Q_{in} 为流入液压缸的流量； u_p 为伺服电机的控制信号； D_p 和 V_p 分别为定量泵的排量和容积； m 为负载质量； x_p 为活塞位置； A_p 为液压缸有效作用面积； B 为黏性阻尼系数； V_1 和 V_2 分别为为液压缸两腔及连接管道的容积； F_L 为负载信号。节流阀流量与泵源输出压力形成了相互耦合，对泵输出的流量控制泵源压力进行调节时，节流阀流量发生改变，从而对泵源输出压力控制过程造成干扰。通过调节阀芯位移的方式来控制液压缸运动时，不同泵输出压力下节流阀流量存在较大差异。

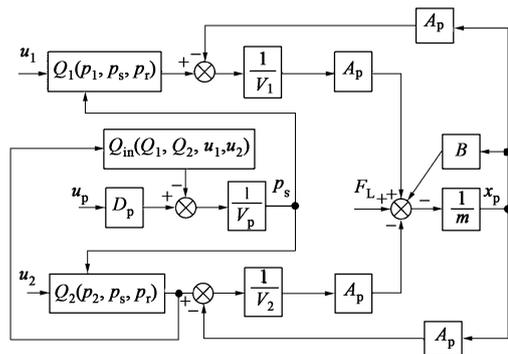


图 2 负载敏感系统控制方框图

Fig. 2 Block diagram of load sensing system control

1.3 控制方法

运用转速调节方式的负载敏感系统设置专门的控制回路来单独调节泵转速与节流阀的阀芯位移，从而完成泵出口压力与活塞位置的伺服控制。

图 3 显示了阀控子系统的控制框结构，其中， x_d 为位置指令信号， u_v 为节流阀的输入信号。

采用对节流阀进行阀芯位移调节的方式使节流阀流量发生变化，由此完成液压缸位置的伺服控制功能。式 (1) 为节流阀控制信号表达式：

$$u_v = k_p e_x(t) + k_i \int_{t_0}^{t_1} e_x(t) + k_d \frac{de_x(t)}{dt} \quad (1)$$

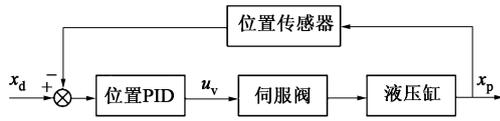


图 3 位置环控制框图

Fig. 3 Block diagram of position loop control

式中： e_x 为负载实际位置与期望位置之间的差值； k_p 、 k_d 、 k_i 依次对应 PID 比例项、微分项、积分项增益； t 为控制信号时间变量； t_0 为控制信号初始时间； t_1 为控制信号终止时间。

2 负载敏感系统特性分析

为简化阀控对称缸系统压力分析过程，给出以下假设条件：

- (1) 不考虑泵源输出过程发生的压力波动，泵源始终输出一个恒定的压力值；
- (2) 压缩与泄漏的流量均很小，可以忽略；
- (3) 系统以零压力进行回油。

根据以上假设条件计算 2 个节流口压降，表达式为：

$$\begin{cases} \Delta p = \frac{p_s + (P_2 - P_1)}{2} & x_v \leq 0 \\ \Delta p = \frac{p_s - (P_2 - P_1)}{2} & x_v > 0 \end{cases} \quad (2)$$

通过分析式 (2) 可以发现，控制阀控系统的泵源压力保持一个恒定值，执行器两腔压力取决于油源压力与负载压力的共同影响。在阀控对称缸系统 2 个节流口处形成了同样的压降，均跟负载压力、油源压力和活塞运动方向存在关联。

根据以上分析可知，阀控系统的泵源一直保持恒定的输出压力，处于阻抗工况下时，当活塞运动过程的阻力增大后，进油腔达到了更大的压力，而出油腔的压力降低，从而与外负载力之间建立平衡状态，同时减小了节流口压降液压系统对负载做的功，泵源压力分别用于满足负载压力和克服 2 个节流口阻力发生的损耗。系统进入超越工况时，协助活塞运动的作用力增大，进油腔压力降低，同时出油腔的压力升高，由此实现与外负载力的平衡，此时节流压降也增大。此时负载开始对液压系统做功，泵源输出压力与负载压力均用于克服节流口阻力。通过上述分析可知，阀控系统无论处于低负载阻抗工况还是超越工况下均发生了明显的压力损失。

3 仿真分析

图 4 给出了本文建立的阀控系统仿真模型。阀控系统模型以定量泵与溢流阀共同组成恒压泵源，设定溢流压力为 6 MPa，其他各项参数均跟负载敏感系统一致。

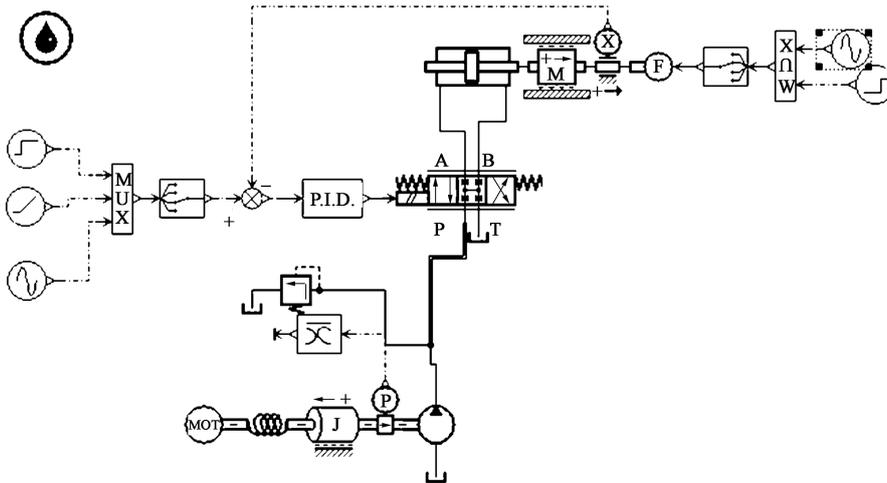


图 4 阀控系统 AMESim 仿真模型

Fig. 4 AMESim simulation model of valve-controlled system

3.1 流量前馈 PID 控制器仿真分析

为了验证流量前馈 PID 控制模式的有效性，以 (0.05sin2t) 正弦信号作为位置指令，控制压差指令

为 2 MPa。通过仿真测试得到图 5~图 6 所示结果。

图 5 为在有流量前馈和无流量前馈条件下的节流口压降曲线。根据图 5 可知：在无流量前馈的条

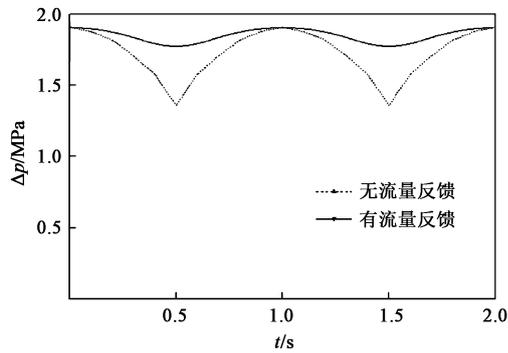


图 5 节流口压降

Fig. 5 Pressure drops at throttle orifice

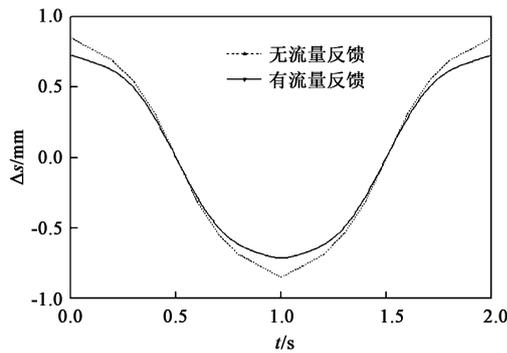


图 6 位置跟踪误差

Fig. 6 Position tracking errors

件下, 节流口压降介于 1.4~2.0 MPa; 设置流量前馈后, 节流口压降保持在 2.0 MPa 的稳定状态。仿真测试表明, 在泵控子系统内设置流量前馈后能够有效地降低节流口压降的波动性。

图 6 为位置跟踪误差曲线。图 6 显示, 不管是否设置流量前馈, 系统均可以有效跟踪位移指令。无流量前馈的情况下, 系统位置跟踪误差 Δs 介于 $-0.85 \sim 0.85$ mm 之间; 存在流量前馈的条件下, 系统跟踪误差介于 $-0.73 \sim 0.73$ mm 之间。由此可见, 设置流量前馈后能够降低节流口压降波动, 使系统达到更高的位置跟踪精度。

3.2 节流口压降对系统影响的仿真分析

为了研究节流口压降引起的负载敏感系统变化, 将位置指令表示为 $(0.05\sin 2t)$ 的正弦信号, 控制压差指令依次为 1.0、1.5 和 2.0 MPa。通过仿真测试得到图 7~图 9 所示结果。

图 7 为不同压差指令下节流口压降结果。根据图 7 可知, 系统节流口压降达到了与压力指令相近的状态。

图 8 为不同压差指令下位置跟踪误差结果。根据图 8 可知, 不同压差指令下位置跟踪误差存在较大的

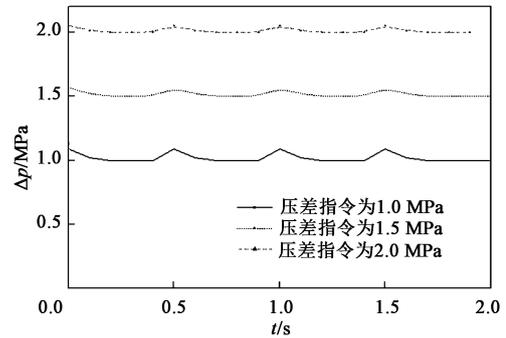


图 7 不同压差下的节流口压降

Fig. 7 Pressure drops at throttle orifice under different pressure differences

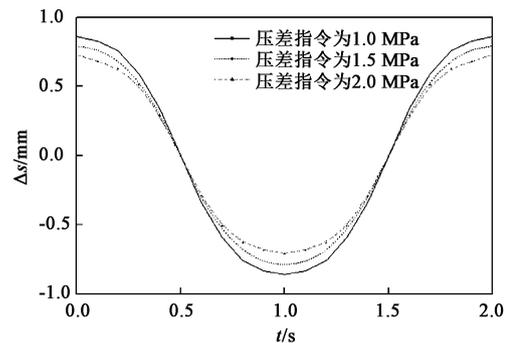


图 8 不同压差下的位置跟踪误差

Fig. 8 Position tracking errors under different pressure differences

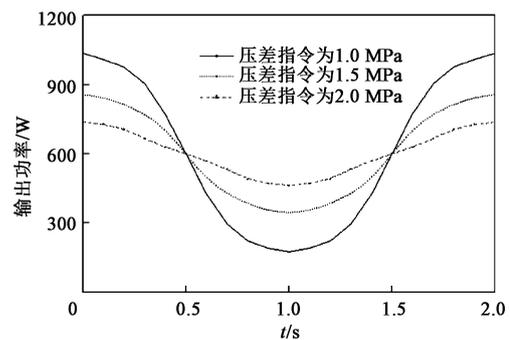


图 9 不同压差下的电机输出功率

Fig. 9 Motor output powers under different pressure differences

差异, 其中, 1.0 MPa 下的跟踪误差为 -0.518 mm 的波动, 1.5 MPa 下的跟踪误差为 -0.525 mm 的波动, 2.0 MPa 下的跟踪误差为 -0.32 mm 的波动。总体表现为节流口压降增大后, 位置跟踪误差减小。

图 9 为不同压差指令下电机输出功率结果。图 9 显示, 电机可以根据实际需求为系统提供合适的功率, 其中, 压差指令为 1.0 MPa 时输出功率在 741 W 波动, 1.5 MPa 时在 852 W 波动, 2.0 MPa 时在 1039 W 波动。随着压差指令的下降, 系统获得了更高的能效。

4 结论

(1) 在泵控子系统内设置流量前馈后能够有效降低节流口压降的波动性。存在流量前馈的条件下, 系统位置跟踪误差降低, 可见设置流量前馈后能够降低节流口压降波动, 使系统达到更高的位置跟踪精度。

(2) 系统节流口压降达到了与压差指令相近的状态。总体表现为节流口压降增大后, 位置跟踪误差减小。随着压差指令的下降, 系统获得了更高的能效。

参考文献:

- [1] 汪小芳, 张军, 迪茹侠. 基于 AMESim 的负载敏感液压系统防冲击特性的研究 [J]. 液压与气动, 2018, (11): 55-60.
Wang X F, Zhang J, Di R X. Research on impact resistance characteristics of load sensitive hydraulic system based on AMESim [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2018, (11): 55-60.
- [2] 娄天祥, 丁海港, 董娇, 等. 煤矿液压绞车电液比例闭环驱动系统设计与仿真分析 [J]. 液压与气动, 2019, (6): 63-68.
Lou T X, Ding H G, Dong J, et al. Design and simulation analysis of electro-hydraulic proportional closed loop drive system for coal mine hydraulic winch [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019, (6): 63-68.
- [3] 闫小春, 李立青, 张强. 基于 Simulink 的建筑孔板液压成形机双蓄能器泵控冲压系统仿真分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (6): 155-159.
Yan X C, Li L Q, Zhang Q. Simulation analysis on double accumulators pump-controlled stamping system in hydroforming machine for building orifice plate based on Simulink [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (6): 155-159.
- [4] Mikhail P, Qiang L. Multimode active control of friction, dynamic ratchets and actuators [J]. Physical Mesomechanics, 2018, 21 (1): 24-31.
- [5] 胡知倬, 谢志江, 李坤, 等. 基于扰动观测器的液压冗余直驱平台同步控制 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021, (1): 118-121.
Hu Z Q, Xie Z J, Li K, et al. Synchronous control of hydraulic redundant direct drive platform based on disturbance observer [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021, (1): 118-121.
- [6] 钱占松. 三通阀控单作用缸在电液位置伺服系统的应用研究 [J]. 液压与气动, 2020, (6): 127-134.
Qian Z S. Application research of three-way valve controlled single-acting cylinder in electro-hydraulic position servo system [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, (6): 127-134.
- [7] 石家庆, 张建新, 张震. 阀控缸液压系统变负载工况速度稳定性研究 [J]. 液压与气动, 2020, (4): 153-159.
- [8] Shi J Q, Zhang J X, Zhang Z. Study on velocity stability of valve controlled cylinder hydraulic system under variable load [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, (4): 153-159.
- [9] Chen G R, Wang J Z, Wang S K, et al. The separate meter in separate meter out control system using dual servo valves based on indirect adaptive robust dynamic surface control [J]. Journal of Systems Science & Complexity, 2019, 32 (2): 557-576.
- [10] 董致新, 黄伟男, 葛磊, 等. 泵阀复合进出口独立控制液压挖掘机特性研究 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (12): 173-180.
Dong Z X, Huang W N, Ge L, et al. Study on characteristics of hydraulic excavator with combined pump valve inlet and inlet [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (12): 173-180.
- [11] 李昭, 谷立臣, 马玉. 变转速液压力源的负载流量前馈-反馈复合补偿控制 [J]. 中国机械工程, 2016, 27 (6): 805-809.
Li Z, Gu L C, Ma Y. China mechanical engineering load feed-forward feedback composite compensation control for hydraulic power source with variable speed [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27 (6): 805-809.
- [12] 许玲玲, 延皓. 阀控缸系统有限时间滑模控制 [J]. 液压与气动, 2019, (6): 94-100.
Xu L L, Yan H. Finite time sliding mode control for valve controlled cylinder system [J]. Hydraulic & Pneumatics, 2019, (6): 94-100.
- [13] 王鑫涛, 杜星. 基于负载匹配的阀控液压缸匹配特性研究 [J]. 液压与气动, 2019, (5): 117-121.
Wang X T, Du X. Research on matching characteristics of valve controlled hydraulic cylinder based on load matching [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019, (5): 117-121.
- [14] Lovrec D, Kastrevc M, Ulaga S. Electro-hydraulic load sensing with a speed-controlled hydraulic supply system on forming-machines [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 41 (11-12): 1066-1075.
- [15] 刘伟. 挖掘机电液流量匹配控制系统特性研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
Liu W. Research on Characteristics of Hydraulic Flow Matching Control System for Mining Machinery [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [16] 徐兵, 丁孺琦, 张军辉. 基于泵阀联合控制的负载口独立系统试验研究 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2015, 49 (1): 93-101.
Xu B, Ding R Q, Zhang J H. Experimental study of load port independent system based on joint control of pump and valve [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2015, 49 (1): 93-101.
- [17] 周蓉, 韩文杰, 谭文. 线性自抗扰控制的适用性及整定 [J]. 控制理论与应用, 2018, 35 (11): 1654-1662.
Zhou R, Han W J, Tan W. Applicability and tuning of linear active disturbance rejection control [J]. Control Theory and Application, 2018, 35 (11): 1654-1662.