

基于扩张状态观测器的发动机 转速双闭环自适应控制系统设计

徐亦卿, 陆海澎

(常州工业职业技术学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 为较好控制发动机设备的实时转速水平, 使其在不同压力水平下均能保持稳定转速, 呈现理想化工作状态, 设计基于扩张状态观测器的发动机转速双闭环自适应控制系统; 根据双闭环电路的集成形式, 连接发动机控制器与自适应传感器, 利用隔离驱动芯片, 更改观测器驱动管的作用频率周期, 完成自适应控制系统的硬件执行环境搭建; 在此基础上, 深入分析扩张状态观测器的内部结构, 以微分跟踪器作为切入点, 选取关键的 ESO 参数, 再借助扰动补偿向量, 完成对扩张状态观测器的频域参数配置, 联合相关硬件应用设备, 实现基于扩张状态观测器的发动机转速双闭环自适应控制系统设计; 实验结果表明, 在扩张状态观测器作用下, 发动机元件在不同压力水平下的实时转速水平均能得到有效控制, 在 1.3 Mpa 的压力环境下外接飞轮转速的变化形式也与理想转速值变化趋势保持一致, 可使发动机设备保持较长时间的稳定工作状态。

关键词: 扩张状态观测器; 双闭环控制; 自适应控制; 驱动芯片; 微分跟踪器; ESO 参数;

Design of Engine Speed Double Closed-loop Adaptive Control System Based on Extended State Observer

XU Yiqing, LU Haipeng

(Changzhou Vocational Institute of Light Industry, Changzhou 213164, China)

Abstract: In order to better control the real-time speed level of the engine equipment, so that it can maintain a stable speed under the different pressure levels and present an ideal working state, a dual closed-loop adaptive control system for engine speed based on the expanded state observer is designed. According to the integrated form of the double closed-loop circuit, the engine controller and the adaptive sensor are connected, and the isolated driver chip is used to change the action frequency period of the observer driver tube to complete the hardware execution environment construction of the adaptive control system. On this basis, the internal structure of the extended state observer is deeply analyzed, the differential tracker is used as the entry point, the key parameters of the ESO are selected, and the frequency domain parameter configuration of the extended state observer is completed with the help of the disturbance compensation vector, and the related hardware of the application equipment is combined. The application equipment realizes the design of the double closed-loop adaptive control system of the engine speed based on the extended state observer. The experimental results show that under the action of the expansion state observer, the real-time speed levels of the engine components can be effectively controlled under different pressure levels, and the change form of the external flywheel speed also keeps consistent with the change trend of the ideal speed value under the pressure environment of 1.3 Mpa, which can keep the engine equipment in a stable working state for a long time.

Keywords: extended state observer; double closed-loop control; adaptive control; driver chip; differential tracker; ESO parameters

0 引言

在发动机双闭环控制回路中, 内环体系内的所有电压数值均相等, 而当内环电压出现突然的升高或降低时, 与之对应的外环体系就会表现出一个标准电压差, 这也是导致电信号驱动行为难以保持完全统一状态的主要原因。在实际应用过程中, 外环体系的存在就相当于一个标准参照物, 只能对内环电信号表现行为提供一定的反馈, 并不能对其具体数值水平进行标注与修改^[1-3]。扩张状态观测器是

一种特殊的自抗扰控制器元件, 可以根据系统外部输入变量与输出变量的实测值结果, 判断系统主机所具备的动态运行能力, 也叫状态重构器设备。简单来说, 这种观测器元件的应用实质就是一个符合系统执行标准的模型结构, 且由于连接能力的可协调性, 所有状态变量都是由管控主机直接输出的。大多数扩张状态观测器都采取闭环连接的运行方式, 不但能够克服开环状态观测器的各项应用弊端, 也可以将主机元件完全解放出来, 使其在维持系统动力供应条件的同时, 具备独立处理干扰性问题的能力。通常情

收稿日期: 2021-12-22; 修回日期: 2022-02-21。

作者简介: 徐亦卿(1994-), 女, 江苏常州人, 硕士研究生, 助教, 主要从事软件工程、大数据、Web 开发方向的研究。

引用格式: 徐亦卿, 陆海澎. 基于扩张状态观测器的发动机转速双闭环自适应控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(7): 123-

况下,正是由于扩张状态观测器的存在,各类复杂待控对象才能按需接入动力系统的既定模块单元之中,不但解决了控制对象过于依赖动力主机的问题,也将闭环网络完全解放出来,使其能够自发处理输入变量与输出变量之间的动力限制问题。

为对发动机元件的转速水平进行控制,传统非谐波傅里叶变换测量系统以 PIC18F4525 单片机元件作为核心控制器,在弹簧电磁驱动气门结构等多个执行器设备的作用下,判断当前时刻进气压力对发动机转速水平的影响强度,再根据傅里叶原则,对所得计算值结果进行判断与处理^[4]。然而随着进气压力水平的改变,该系统对于发动机设备实时转速水平的控制与约束能力并不能完全达到实际应用标准。

为解决上述问题,应用扩张状态观测器设计了一种新型的发动机转速双闭环自适应控制系统。硬件执行环境由双闭环集成电路、发动机控制器、自适应传感器、隔离驱动芯片、观测器驱动管五部分组成,双闭环集成电路由动力源分路、集成分路、观测信号放大分路三部分组成,能够将发动机的速度等级维持在一个比较稳定的数值状态,使得发动机转速水平长时间保持相对稳定的数值状态,将外部压力对发动机运转能力的影响降到最低。软件部分以扩展状态观测器内部的微分跟踪器为出发点,选择了关键 ESO 参数,利用干扰补偿矢量,对扩展状态观测器进行频域参数配置,结合硬件实现基于扩展状态观测器的双闭环自适应调速系统设计。

1 自适应控制系统硬件设计

发动机转速双闭环自适应控制系统的硬件执行环境由双闭环集成电路、发动机控制器、自适应传感器、隔离驱动芯片、观测器驱动管五部分共同组成,自适应控制系统硬件整体结构示意图如图 1 所示。

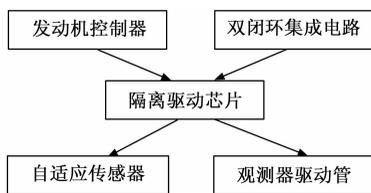


图 1 自适应控制系统硬件结构

具体设计方法如下。

1.1 双闭环集成电路

发动机转速自适应控制系统的双闭环集成电路由动力源分路、集成分路、观测信号放大分路三部分共同组成。其中,动力源分路与外部接入电源直接相连,可在为发动机元件提供输入动力支持的同时,更改调控电阻已接入部分的阻值水平,且由于 UPE 主板元件的存在,电动机元件能够准确记录发动机结构转速的实时数值水平,一方面可以调节设备结构与外部气动压力之间的适配关系,另一方面也可做到对输入电量的最大化节约。集成分路中包含多个调控电阻,在实际应用过程中,这些设备结构元件始终

保持串行连接关系^[5-6]。与其他接入子回路不同,集成分路负责监控双闭环集成电路的主控应用结构,需要在准确显示传输电流数值的同时,调节气动电压对 UPE 主板的作用强度,从而使得发动机转速水平长时间保持相对稳定的数值状态。观测信号放大分路以电信号放大器作为核心应用元件,能够借助变阻器设备,缓解 TG 主机所面临的电量负载压力,从而最大化减轻外部压力对发动机运转能力的影响。双闭环集成电路结构图如图 2 所示。

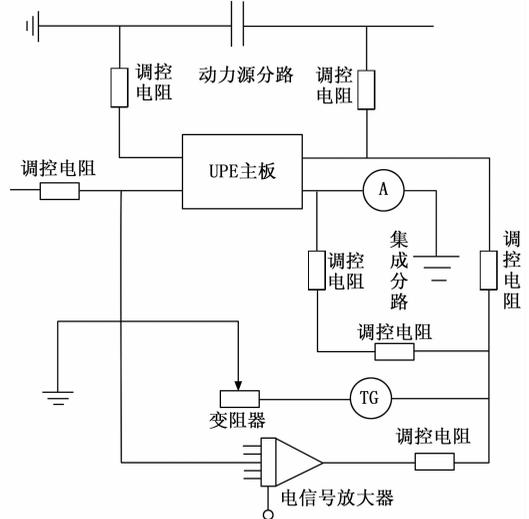


图 2 双闭环集成电路结构图

为使双闭环集成电路的运行能力保持稳定,所有接入电阻的阻值水平都可以在 $500 \sim 750 \Omega$ 之间来回变化。

1.2 发动机控制器

发动机控制器是整个自适应控制系统的核心器件,连接双闭环集成电路与下级传感器设备,是以扩张状态观测器为逻辑中心的应用型调试结构^[7]。本文采用发动机控制器型号为 DSE7320,其基准电压为 5.0 V ,最佳点火提前角在上止点前 10 度左右,包含 AMF+ATS+通讯+扩展+PLC 逻辑功能。整个控制器结构中包含多个连接引脚,其具体连接及作用能力如下。

1) RAO 引脚:与发动机振荡器结构相连,可通过调节转速频率的方式,更改双闭环集成电路内的电信号传输流量,从而使得发动机元件所承担的传输电压与电流长期保持稳定状态;

2) RE3 与 REF 引脚:分别与自适应传感器和观测器驱动管结构相连,能够记录隔离驱动芯片内的压力作用情况,并将这些信息数据反馈至自适应控制主机中;

3) IN 与 OUT 引脚:IN 引脚负责接入双闭环集成电路中的传输电量,OUT 引脚负责将这些电量再次分配至下级连接元件;

4) VSS 与 VDD 引脚:VSS 引脚具备较强的外设信号控制能力,可记录气动压力的实时作用水平,VDD 引脚只能感知发动机控制器内的动力负载情况,在实际作用过程中,始终与 VSS 引脚保持定向连接关系^[8];

5) RC1、RC2、RC3、RC4 引脚: 这些引脚只能保持同步接入关系, 也只有在扩张状态观测器连入发动机设备的情况下, 才能开启既定连接行为;

6) PGD、PGM、PGO 引脚: 负责记录扩张状态观测器的执行状态, 并可根据发动机的实时转速水平, 向自适应控制主机反馈关键的数据信息参量。

在发动机转速自适应控制系统中, 控制器设备始终受到双闭环集成电路直属调度, 这也是系统内传输电子量能够得到较好节约的主要原因。

1.3 自适应传感器

自适应传感器以 SPI 单片机作为核心搭建元件, 可联合扩张状态观测器, 对发动机设备的实时转速水平进行调节, 由于 PIC18F 结构的存在, 底层信号控制单元始终保持较强的感应灵活性, 既能较好跟踪驱动芯片内电量信号的传输与消耗行为, 也可以将已生成的感应电流暂存于放大器元件之中, 为后续双闭环回路的形成提供电量支持^[9-10]。通常情况下, 自适应传感器总是与发动机控制器保持相同的连接行为, 对于传输电子的促进性作用能力也完全相同。在双闭环集成电路的作用下, SPI 单片机首先将转速控制信号传输至附属单片机结构中, 当 PIC18F 结构感知到控制主机的调度需求后, 附属单片机同时释放所有已存储的控制信号参量, 从而使得传感器内部的电信号保持绝对稳定的存在状态, 为隔离驱动芯片的接入提供保障^[11-12]。自适应传感器示意图如图 3 所示。

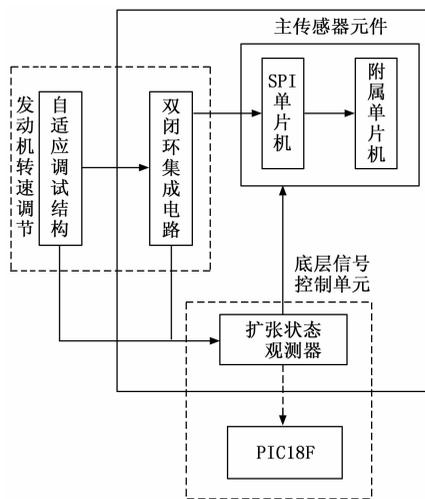


图3 自适应传感器示意图

分析图 3 所示的自适应传感器结构可知, 主传感器元件只能对底层信号控制单元传输调节信号, 而对于发动机转速调节结构发出的运行指令不能进行任何的加工与处理。

1.4 隔离驱动芯片

在发动机转速双闭环自适应控制系统中, 隔离驱动芯片负责将扩张状态观测器与控制器、传感器元件分离开来, 使得双闭环集成电路能够对其进行分别供电, 从而最大化保证发动机旋转运动空间的独立性与完整性。作为隔离驱动芯片的核心应用结构, MC33152 板件同时调配压力感知

主板、转速感知主板与压感电阻, 从功能性角度来看, 该结构的运行能力直接决定了发动机设备的实时转速水平, 属于一种可控性连接元件^[13]。压感电阻接入部分的阻值水平决定了隔离驱动芯片的作用能力, 通常情况下, 随着发动机转速水平的改变, 电阻元件的接入电阻数值也会发生变化, 单体上满足前者转速越快、后者阻值越大的规律。适配调试主板的连接等级较高, 可更改压力感知主板与转速感知主板间的限制约束能力, 但在实际应用过程中, 其具体作用能力也是由驱动芯片内的 MC33152 板件决定的。

在实际应用过程中, 隔离驱动芯片对于发动机转速的控制能力越强, MC33152 板件对于传输电量信号的单位调度频率也就越快。

1.5 观测器驱动管

观测器驱动管负责对隔离驱动芯片进行调试, 作为扩张状态观测器的下级附属结构, 可管控发动机的实时转速水平, 从而实现双闭环控制回路的按需协调^[14]。主弹簧集中分布在主气门结构上部, 负责对衔接铁棒的连接紧密度进行调试, 一方面能够避免发动机转动速度过快的情况出现, 另一方面也可将主气门结构固定在既定连接位置处。主气门外同时套接两个铁芯与两个线圈, 在发动机保持转动状态的情况下, 由于两者之间存在一定的转速差, 所以衔接铁棒的连接位置总是来回变动, 这也是扩张状态观测器作用能力并不能保持完全稳定状态的主要原因^[15]。具体结构如图 4 所示。

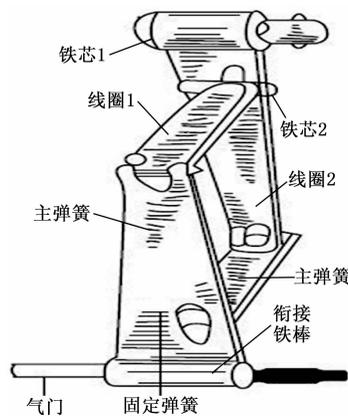


图4 观测器驱动管示意图

固定弹簧存在于主弹簧下部, 仅负责调节气门结构的连接紧密程度, 不对发动机转速起到直接影响。

2 扩张状态观测器的频域参数配置

2.1 扩张状态观测器结构分析

扩张状态观测器主控元件放置于底部支撑框架之上, 在传输通路保持非闭合状态的情况下, 扩张片元件的横截面积持续增大, 直至观测器结构可以显示出主控元件所捕获到的所有发动机转动影像。在实际观测过程中, 边框结构始终保持绝对稳定的连接状态, 随着扩张片结构的不断运动, 传输通路的存在状态也在不断改变, 此时为使观测

器的连接行为趋于稳定，应控制结构体在竖直方向上的运动幅度，一方面使得扩张状态观测器能够准确监视发动机的实时转速水平，另一方面也可以辅助双闭环集成电路对自适应电感信号进行按需捕获与处理^[16]。一般情况下，扩张状态观测器底部支架及外部边框所处位置不会随发动机转速的改变而发生变化。

2.2 微分跟踪器

微分跟踪器能够监管扩张状态观测器的连接行为，能够根据自适应前馈模型，分析当前情况下发动机元件的实时转速水平，并可将在获取信息反馈至发动机控制器结构中，以便于系统双闭环集成电路的直接调取与利用^[17]。

设 ω_0 表示自适应电控信号的原始输出参量， χ 表示发动机元件的转速参量， ΔT 表示单位转动周期，联立上述物理量，可将微分跟踪器对于扩张状态观测器的约束性行为为标准表示为：

$$A = \omega_0 + \frac{(I - \epsilon \bar{P})^2}{\chi} \quad (1)$$

式中， I 表示扩张片的振幅标准值， ϵ 表示双闭环集成电路中的电信号振荡系数， \bar{P} 表示电量信号的感应特征值。

根据微分跟踪器约束原则，核心控制主机可确定扩张状态观测器的实时行为状态，并可以此为基础，完成对发动机转速水平的按需调节。

2.3 ESO 参数选取

在发动机转速双闭环自适应控制系统中，ESO 参数能够决定扩张状态观测器中电感信号的最大输出量，若默认自适应传输行为的存在，则可认为 ESO 参数取值结果越大，扩张状态观测器中电感信号的单位输出量越大^[18-19]。在选取控制指标时，ESO 参数的取值受到双闭环集成电路波动系数、观测信号数值标量两项物理指标的直接影响。对于发动机转速双闭环自适应控制系统而言，集成电路波动系数可表示为 ξ ，作为一项矢量指标，该参量的数值水平不会随着系统运行时间的延长而出现变化。观测信号数值标量可表示为 α ，在考虑微分跟踪器约束原则的前提下，该项指标的取值结果始终处于 $(1, e)$ 的物理区间之内。在上述物理量的支持下，联立公式 (1)，可将 ESO 参数选取条件定义为：

$$E = \int_r^{+\infty} \frac{|\mu \sqrt{\xi Y^2 - d}|^2}{\alpha A} \quad (2)$$

其中： r 表示自适应取值标度， μ 表示发动机运动过程中的转速判别系数， Y 表示满足双闭环集成电路提取原则的电量获取系数， \tilde{d} 表示扩张状态观测器对于发动机元件的全局感知系数。规定在选取 ESO 参数时，需参考发动机元件的实时转速水平，一般来说，转动速率越快，与之相对应的 ESO 参数取值结果也就越大。

2.4 扰动补偿向量

扰动补偿向量是具有约束性的系数指标，可在已知 ESO 参数选取结果的基础上，将发动机转速水平限制在既定数值区间之内，一方面满足双闭环集成电路对于电子量的消耗需求，另一方面也可以实现对发动机元件实时转速

水平的控制与调节^[20-22]。所谓扰动补偿可以理解作为一种动态平衡状态，对于发动机元件来说，随着其应用时间的延长，其运行所需的感应信号量也会不断增大，在此情况下，由转动所引起的电感变化也不可能始终保持相对稳定的存在状态，这也是导致发动机转速会时刻发生改变的主要原因^[23-25]。设 β 表示扩张状态观测器的设置参数， x_1 、 x_2 、 \dots 、 x_n 表示 n 个不同的随机转速值， \bar{g}_{\max} 表示最大电量传输情况下的感应信号输出均值，联立公式 (2)，可将扰动补偿向量计算结果表示为：

$$H = \frac{E}{\beta^2} \frac{[x_1 + x_2 + \dots + x_n]^2}{\sqrt{n \times (g)}} \quad (3)$$

在发动机转速双闭环自适应控制系统中，扰动补偿向量计算值越大，表示扩张状态观测器当前所处工作状态越稳定，因此为实现对发动机转速的准确监控，应尽可能避免 ESO 参数取值结果对扰动补偿向量的影响，使其计算实值不断趋近理想化最大值。

3 实例分析

以图 5 所示发动机元件作为实验对象，同时打开进气口、进气门与排气口，使发动机设备进入正常工作状态，在确保链条进入匀速转动状态后，将曲轴与测速装置相连，不断调节火花塞的打火频率，使得发动机转速与外接飞轮转速保持一致。

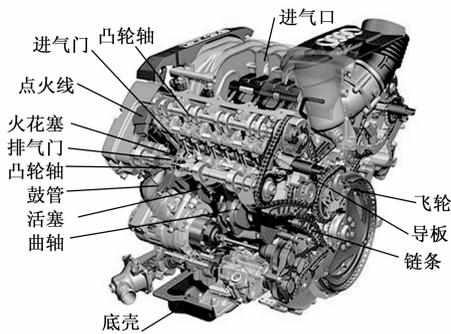


图 5 实验用发动机设备

在实验过程中，由于火花塞存在打火行为，所以直接计数发动机转速存在一定的危险性，而外接飞轮转速始终与发动机转速相等，故而可用前者代替后者。

首先，应用基于扩张状态观测器的作用程序对计数器装置进行控制，将所得转速值作为实验组变量；其次，应用基于非谐波傅里叶变换的作用程序对计数器装置进行控制，将所得转速值作为对照组变量；然后，控制进气口打开程度，人为制造不同的气动压力环境；最后，分析实验组、对照组发动机转速在不同压力环境下的数值水平，将其与理想数值对比。实验随机参数为 0.5 MPa、0.8 MPa、1.3 MPa 三种不同的压力环境，3、6、9、12、15、18 s 的取样时间，实验中所用参数为飞轮转速及气动压力取值。

图 6 记录了外接飞轮转速在 3 种不同压力环境下的具体数值情况。

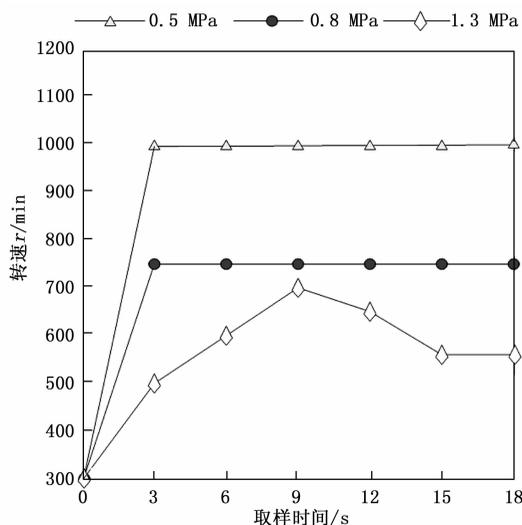


图 6 外接飞轮转速的理想数值

分析图 6 可知, 在 0.5 MPa 的压力环境, 外接飞轮转速始终保持绝对稳定的数值存在状态, 外接飞轮转速理想数值为 1000 r/min,; 在 0.8 MPa 的压力环境, 外接飞轮转速理想数值为 750 r/min, 能保持绝对稳定的数值存在状态, 但相较于 0.5 MPa 的压力环境, 其均值水平下降了 250 r/min; 在 1.3 MPa 的压力环境, 外接飞轮转速理想数值呈现出先上升、再下降、最后趋于稳定的数值变化趋势, 其最大取值结果达到 700 r/min, 最小为 500 r/min, 与 0.8 MPa 压力环境下的平均值相比, 下降了 50 r/min, 除“0”取样节点外, 其全局最小值为 553 r/min, 与其全局最大值相比, 下降了 147 r/min。

表 1 记录了实验组、对照组外接飞轮转速在 0.5 MPa、0.8 MPa、1.3 MPa 三种不同压力环境下的数值变化情况。

表 1 外接飞轮转速的实验数值

实验组飞轮转速/(r/min)			
取样时间/s	启动压力取值		
	0.5 MPa	0.8 MPa	1.3 MPa
3	978	743	496
6	985	741	593
9	985	740	689
12	987	742	642
15	986	742	575
18	988	742	574
对照组飞轮转速/(r/min) * *			
取样时间/s	启动压力取值		
	0.5 MPa	0.8 MPa	1.3 MPa
3	904	711	425
6	951	723	608
9	1018	748	734
12	1126	765	759
15	1003	780	800
18	967	796	642

分析实验组飞轮转速水平可知, 在 0.5 MPa 的压力环

境, 除第 3 s 的取样节点外, 外接飞轮转速始终保持相对稳定的数值变化状态, 其最大值与理想均值相比, 下降了 12 r/min; 在 0.8 MPa 的压力环境, 外接飞轮转速数值经过短时间的波动状态后, 开始趋于完全稳定的形式, 其稳定数值与理想均值相比, 下降了 8 r/min; 在 1.3 MPa 的压力环境, 外接飞轮转速的变化形式也与理想转速值变化趋势保持一致, 其最大值结果始终没有超过理想转速的最大值。

分析对照组飞轮转速水平可知, 在 0.5 MPa 的压力环境, 外接飞轮转速值呈现先上升、再下降的变化趋势, 且其最大值达到了 1 126 r/min, 超过了理想转速值; 在 0.8 MPa 的压力环境, 外接飞轮转速呈现持续上升的变化形式, 至实验结束, 其最大值达到了 796 r/min, 也超过了理想转速值; 在 1.3 MPa 的压力环境, 外接飞轮转速值经过持续上升状态后, 开始大幅下降, 其最大值达到了 800 r/min, 超过了理想转速值。

综上所述:

1) 应用实验组系统, 外接飞轮转速在 3 种不同压力环境下的数值水平始终低于理想转速值, 且其数值变化趋势始终与理想转速曲线一致;

2) 应用对照组系统, 外接飞轮转速在 3 种不同压力环境下的数值水平均不能与理想转速曲线保持一致, 且其数值变化规律极不稳定;

3) 实验组系统能够较好控制外接飞轮转速, 使其在不同压力水平下均呈现出理想化的工作状态, 即应用基于扩张状态观测器的双闭环自适应控制系统, 更有利于调节发动机转速水平, 使其长时间保持相对稳定的工作状态。

4 结束语

在扩张状态观测器的作用下, 发动机转速控制系统从双闭环集成电路入手, 构造完整的硬件应用环境, 借助发动机控制器、自适应传感器等设备结构, 在选取 ESO 参数的同时, 对扰动补偿向量指标进行准确计算。与非谐波傅里叶变换测量系统相比, 扩张状态观测器作用下的控制系统, 能够保证发动机转速始终维持在合理的低水平状态, 对于促进发动机元件的稳定工作, 具有较强的促进性影响作用。

参考文献:

[1] 熊文羽, 王树林, 叶 杰, 等. 增程器用天然气发动机转速双闭环自适应控制 [J]. 控制与决策, 2020, 35 (7): 1623-1630.
 [2] 李晓理, 王 康, 于秀明, 等. 基于 CPS 框架的微粉生产过程多模型自适应控制 [J]. 自动化学报, 2019, 45 (7): 1354-1365.
 [3] 郭政波, 房剑锋, 刘振刚. 无人机用涡喷发动机转速不跟随油门故障分析 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2020, 33 (1): 31-35, 46.
 [4] 王鸿鹏, 段发阶, 蒋佳佳, 等. 基于非谐波傅里叶变换的发动机转速测量系统 [J]. 电力电子技术, 2020, 54 (4): 57-60.

- [5] 郭 栋, 蹇剑策, 赵振峰, 等. 航空活塞二冲程发动机的可变排气阀换气过程 [J]. 航空动力学报, 2020, 35 (3): 471-481.
- [6] 姜春英, 李清野, 崔 峰, 等. 一种新型航空发动机气动打磨仪数值模拟与试验研究 [J]. 机床与液压, 2019, 47 (22): 41-46.
- [7] 张开明, 史宏俊, 郭 涛. 采用滑模自适应控制的永磁同步风力发电系统最大功率控制 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31 (7): 143-150.
- [8] 王 伟, 陈义成, 朱闪闪, 等. 基于功率控制的涡扇发动机控制系统设计 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (3): 1230-1237.
- [9] 王忠想, 付晓东, 王 丹, 等. 双层喷油器锥角对双燃料发动机性能的影响 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2020, 50 (3): 842-849.
- [10] 蔡富裕, 郭文勇, 赵 闯, 等. 基于参数在线辨识的电流源型变流器状态监测及自适应控制 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43 (18): 67-74, 119.
- [11] 宋国杰, 李国进, 杨 浩, 等. 基于李雅普诺夫函数的微电网下并网逆变器的自适应控制 [J]. 高电压技术, 2020, 46 (12): 4455-4463.
- [12] 安 蓓, 李淑娟, 郝 政, 等. 硬脆材料切割过程中基于线速度的切割力自适应控制 [J]. 兵工学报, 2019, 40 (2): 412-419.
- [13] 王树波, 任雪梅, 李斯琪, 等. 基于预设性能转台伺服系统的参数估计和自适应控制 [J]. 北京理工大学学报, 2019, 39 (2): 193-197.
- [14] 熊 璐, 付志强, 柏满飞, 等. 一种考虑加速度需求的车速自适应控制方法 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53 (1): 62-69.
- [15] 毛瑜昊, 董文瀚, 朱家海, 等. 基于参数空间寻优的超低空空
- (上接第 122 页)
- [14] LI J, NIU Y. Full-Vehicle Dynamic Weighing Instrument Based on $\mu C/OS-III$ [J]. Instrument Technique and Sensor, 2015 (7): 28-31.
- [15] CHEN D, HONG Y, ZHENG W, et al. The Design and Realization of Networking Intelligent Proportioning Weighing System [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2015 (4): 569-574.
- [16] 范韶辰. 电阻应变式称重传感器标准变化对产品的影响分析 [J]. 衡器, 2013, 41 (11): 18-21.
- [17] 龚兰芳, 梁文楨. 物联网环境下的车辆监控信息平台设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (12): 158-161.
- [18] SMYLA J. Vehicle in Motion Weighing Based on Vibration Data Collected from Sensor Network [C] //Computer Networks: 26th International Conference, CN 2019, Kamień Ślaski, Poland, June 25 - 27, 2019, Proceedings. Springer, 2019, 1039: 208.
- [19] 胡超然, 徐 枫, 陈永胜. 常用数字滤波算法及其在应用 [J]. 科技风, 2017 (13): 13.
- [20] GAJDA J, SROKA R, STENCEL M, et al. Design and accuracy assessment of the multi-sensor weigh-in-motion system 投 L_1 自适应控制器参数优化 [J]. 控制理论与应用, 2019, 36 (2): 327-336.
- [16] 王 健, 蓝益鹏. 基于 Lyapunov 稳定性理论的电励磁直线同步电机自适应控制 [J]. 电机与控制应用, 2020, 47 (5): 7-17.
- [17] 查雯婷, 栗疆堡, 于志超, 等. 非理想条件下 DC-DC Buck 开关变换器的自适应控制 [J]. 控制工程, 2020, 27 (S1): 19-24.
- [18] 李洪梅, 高 媛, 陈向坚. 基于二型模糊神经网络的不确定混沌系统鲁棒性自适应控制 [J]. 南京理工大学学报, 2019, 43 (4): 432-438.
- [19] 张 旭, 金晓宏, 陶登阳, 等. 被动式电液加载系统的变刚度自适应控制 [J]. 武汉科技大学学报, 2019, 42 (2): 141-149.
- [20] 唐斌文, 李 昂, 郑连清. 基于滞环区间自适应控制的 MMC 环流抑制方法 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41 (2): 146-151.
- [21] 折 越. 基于双模控制的直流量矩发动机控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (3): 123-127.
- [22] 陈 旺, 肖克平, 叶 振, 等. 基于状态机的自动变速控制器仿真研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (10): 101-104, 110.
- [23] 张建航, 周章文, 吴培根, 等. 发动机低压压气机导流叶片数字式电子控制器设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2021 (10): 60-64.
- [24] 吕毓坤, 常军涛, 于达仁. 基于多人多出平衡流形展开模型的涡扇发动机反馈线性化滑模控制 [J]. 推进技术, 2021, 42 (8): 1681-1689
- [25] 孙 宇, 束长健, 曾 洁. 柴油发动机电子调速控制系统的设计 [J]. 大连交通大学学报, 2021, 42 (3): 105-110.
- [C] //2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings. IEEE, 2015: 1036-1041.
- [21] ŽNIDARIČ A, TURK G, ZUPAN E. Determination of strain correction factors for bridge weigh-in-motion systems [J]. Engineering Structures, 2015, 102: 387-394.
- [22] 周 勇. 改进遗传算法的 RBF 神经网络控制研究 [J]. 科技与创新, 2022 (2): 11-13, 21.
- [23] 李 瑞, 张悟移. 基于 RBF 神经网络的物流业能源需求预测 [J]. 资源科学, 2016, 38 (3): 450-460.
- [24] SONG S Y, ZHANG B H, MA Y. The RBF neural network based on kalman filter algorithm and dual radial transfer function [J]. Advanced Materials Research, 2014, 971-973: 1816-1819.
- [25] NGUYEN Q V, CHAN W L. Development and flight performance of a biologically-inspired tailless flapping-wing micro air vehicle with wing stroke plane modulation [J]. Bioinspiration & biomimetics, 2018, 14 (1): 016015.
- [26] 李惠敏. 车载动态称重系统的研究与设计 [D]. 太原: 太原理工大学, 2016.