



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107942653 A

(43)申请公布日 2018.04.20

(21)申请号 201711031013.5

(22)申请日 2017.10.30

(71)申请人 南京航空航天大学

地址 210000 江苏省南京市白下区御道街29号

(72)发明人 肖玲斐 丁润泽 陈玉升 叶志锋 金霞 申斌

(74)专利代理机构 南京瑞弘专利商标事务所 (普通合伙) 32249

代理人 张婷婷

(51)Int.Cl.

G05B 13/04(2006.01)

G05B 17/02(2006.01)

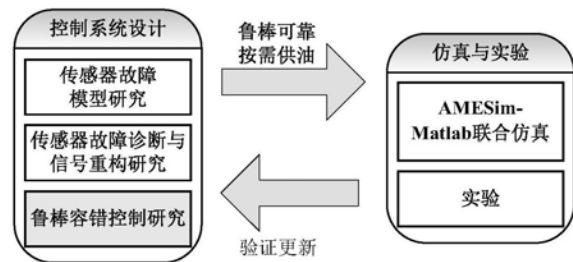
权利要求书3页 说明书13页 附图4页

(54)发明名称

航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错方法

(57)摘要

本发明公开了一种航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错方法,由转速指令调节部分和转速控制部分组成,转速指令调节部分主要基于发动机燃油需求指令、燃油流量非线性稳态模型和电动燃油泵的输出燃油流量,它为控制系统提供合适的全流量范围内适用的电动燃油泵转速指令;转速控制部分主要作用是实现实际转速与转速指令的误差尽可能小,在考虑不确定性和传感器故障的情况下,基于电动燃油泵自适应组合非线性动态模型,根据滑模理论,通过综合设计滑模故障估计器和滑模转速控制器,保证电动燃油泵转速响应快速且准确地达到期望转速,进而实现电动燃油泵对航空发动机安全可靠、快速精准地按需供油。



1. 一种航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错方法,其特征在于:包括以下步骤:

1) 传感器故障模型研究

分析航空电动燃油泵流量控制系统中,传感器对应的传感器故障的典型特征、产生来源和形成机理,对故障模式进行分类,建立传感器故障模型;

2) 传感器故障诊断与信号重构研究

针对电动燃油泵流量控制系统中的传感器可能发生的单一故障和多故障并发问题,基于滑模观测器设计理论,提出有效的传感器故障诊断策略与信号重构方法,准确排查故障传感器,及时给予信号重构;

3) 鲁棒容错控制研究

考虑航空发动机在不同工作状态下对电动燃油泵流量的不同要求,针对电动燃油泵当发动机在全飞行包线内运行时所面临的包括燃油压力变化、燃油温度变化、燃油泵容积效率变化在内的不确定性问题,研究电动燃油泵燃油流量鲁棒容错控制策略,基于滑模理论,提出鲁棒容错控制器设计方法;

4) AMESim-Matlab联合仿真

在AMESim-Matlab联合电动燃油泵流量控制系统仿真平台上验证鲁棒容错控制方法和闭环控制系统设计方法的有效性和可行性,仿真结果为实验验证提供参考;

5) 实验验证

在仿真研究的基础上,在航空电动燃油泵实验平台上,验证所提的鲁棒容错控制方法和闭环控制系统设计方法的实际有效性和可行性。

2. 根据权利要求1所述的航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错方法,其特征在于:所述传感器包括流量传感器、转速传感器、温度传感器和压力传感器,对应的传感器的输出信号包括燃油流量、转速、温度、压力。

3. 根据权利要求1所述的航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错方法,其特征在于:步骤2)中针对传感器单一故障下的故障诊断问题的具体方法为:

2a-1) 判定发生故障:设立故障诊断模块,将传感器输出值 y 与滑模观测器的输出值 y_{smo} 相减得出残差值 $e_f = y - y_{smo}$,若 t_1 时刻残差值 e_f 超过设定的阈值 D_1 ,则认为传感器发生了故障;

2a-2) 判断故障类型:在 $e_f > D_1$ 后再设定 t_2 和 t_3 两个时刻获取残差值,计算故障的变化率 p ,如果满足 $p_1 \leq 10^{-3}$ 、 $p_2 \leq 10^{-3}$,则判定系统发生突变故障,否则判定系统发生渐变故障;其中,变化率 p 的计算方法为:

在 t_1 时刻 $e_{f_1} > D_1$ 系统判定故障发生后 $t_2 = t_1 + 1$ (s)时刻,即系统判定故障发生后1s取样,此时残差值设定为 e_{f_2} , t_2 时刻的变化率为 $(e_{f_2} - e_{f_1})/t = p_1$;在 $t_3 = t_1 + 2$ (s)时刻,即系统判定故障发生后2s再次取样,此时残差值设定为 e_{f_3} ,之后在 t_3 时刻计算 $(e_{f_3} - e_{f_2})/t = p_2$,其中, t 是采样时间。

4. 根据权利要求1所述的航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错方法,其特征在于:步骤2)中针对传感器多故障并发情况下的故障诊断问题的具体方法为:

当有 m 个传感器输出参数,对应地设计 m 个滑模观测器,每一个观测器都利用除该观测

器对应的传感器外其余传感器的观测输出,即对于 m 个观测器来说,每一个都只利用 $m-1$ 个观测输出量,如第 i 个滑模观测器,其输入 y^i 的信息构成为除第 i 个传感器外其余 $m-1$ 个传感器的可测输出偏离量,这样如果第 i 个传感器产生故障,那么第 i 个滑模观测器由于没有使用故障传感器的观测信息,因此它的估计结果是正确的;

而其他的滑模观测器都使用了故障传感器的输出信号,因此估计结果都偏离了实际情况,应用此法判断出传感器的故障。

5. 根据权利要求1所述的航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错方法,其特征在于:步骤2)中针对传感器信号重构问题的具体方法为:当检测到传感器故障时,利用无故障的信号和模型输出值,构成滑模观测器,去估计有故障的信号,并替换故障传感器测量值,完成信号重构。

6. 根据权利要求1所述的航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错方法,其特征在于:步骤3)的具体方法为:

3-1) 研究电动燃油泵全流量范围内燃油流量控制策略:全流量范围内电动燃油泵流量控制策略由转速指令调节部分和转速控制部分组成;

3-2) 研究电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错控制方法:开展不确定性和传感器故障影响下的电动燃油泵燃油流量鲁棒容错控制设计。

7. 根据权利要求6所述的航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错方法,其特征在于:步骤3-1)中转速指令调节部分具体为:

根据发动机燃油需求指令 W_{fb}^0 ,反馈当前电动燃油泵的输出燃油流量 W_{fb} ,利用 W_{fb}^0 和燃油流量误差 ΔW_{fb} ,针对大流量要求和小流量要求的不同特点,设计对应的燃油泵转速指令调节器,生成转速增量指令 Δn ;

基于电动燃油泵燃油流量非线性稳态模型 $W_{fb_s} = f(x)$,求得相应的逆模型 $n = f^{-1}(W_{fb_s}, \bar{x})$,其中 n 为实际转速, x 为系统的状态量,由包括泵的转速、压差、燃油压力、燃油温度在内的参数组成, \bar{x} 是由 x 中除泵的转速以外的剩余参数组成,即 $x = [n, \bar{x}]$;利用该逆模型获得在当前电动燃油泵的剩余参数 \bar{x} 和燃油需求指令 W_{fb}^0 下对应的需求转速 n_a ;

通过转速增量指令 Δn 对需求转速 n_a 进行调节,获得全流量范围内电动燃油泵转速指令 n^0 。

8. 根据权利要求6所述的航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错方法,其特征在于:步骤3-1)中转速控制部分具体为:

在不考虑不确定性和传感器故障的情况下,设计转速控制部分使实际转速 n 与转速指令 n^0 的误差在2%以内;

基于电动燃油泵自适应组合非线性动态模型,以包括转速误差和压差、压力、温度在内的参数为输入,构造对应的转速控制器,削弱直至避免电机惯性的影响,输出对应的控制信号,经功率变换器转换成相应功率的电流和电压,传递给电机用于电机转速控制,实现燃油泵按设定的期望转速运行,控制燃油流量 W_{fb} 。

9. 根据权利要求8所述的航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错方法,其特征在于:所述的基于电动燃油泵自适应组合非线性动态模型的建立方法为:以燃油泵转速和进出口压差为参数,分别建立大、小流量要求下的电动燃油泵流量控制非线性稳态模

型;以燃油泵流量动态特性和电机转速动态特性为参考,分别建立大、小流量要求下的电动燃油泵流量控制线性动态模型;根据发动机不同工况下燃油需求指令,设计模型自适应组合策略,对非线性稳态模型和线性动态模型进行组合,构成自适应组合模型,最终建立全流量范围内适用的兼顾稳态精度和动态精度要求的电动燃油泵流量控制系统非线性动态模型。

10.根据权利要求6所述的航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错方法,其特征在于:步骤3-2)按照以下研究步骤开展不确定性和传感器故障影响下的电动燃油泵燃油流量鲁棒容错控制设计:

3-2-1)根据传感器故障诊断结论,当传感器发生故障时,采用重构信号参与系统的反馈控制;

3-2-2)基于具有强鲁棒性的滑模观测器设计方法,构造传感器故障估计器,得到的故障估计值作为鲁棒容错控制器的一部分;

3-2-3)在步骤3-1)流量控制系统设计方法的基础上,根据滑模控制理论,综合利用燃油泵转速指令信号、重构的状态信号、故障估计信号,基于电动燃油泵自适应组合非线性动态模型,构造具有强鲁棒容错能力的滑模转速控制器;

3-2-4)根据Lyapunov稳定性理论,分析不确定性和传感器故障影响下的电动燃油泵燃油流量闭环控制系统的鲁棒稳定性,给出系统鲁棒稳定的充分条件。

航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错方法

技术领域

[0001] 本发明属于控制系统容技术领域,具体涉及一种航空电动燃油泵鲁棒容错控制方法,尤其是一种航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错方法。

背景技术

[0002] 多电发动机已是航空发动机的一个重要发展方向,电动燃油泵以其结构简单、可变流量等特点,成为多电发动机的关键部件之一,电动燃油泵燃油流量控制系统对实现给发动机按需供油发挥着重要作用。

[0003] 航空发动机燃油调节范围很宽,稳态和动态控制性能要求高,在设计电动燃油泵流量控制系统时,需要保证燃油流量在发动机各个流量需求下,都具有规定的稳态精度和动态精度。然而,电动燃油泵要实现在全流量范围内对燃油流量进行快速且精确的控制,保证其对发动机按需供油并不容易。针对航空发动机工作在慢车、中间、最大等工况时,设计的流量控制规律,当航空发动机工作在慢车以下、起动工况时,可能完全不适用,这是因为发动机在慢车以下、起动工况时,电动燃油泵需要提供小流量的燃油供给,而此时燃油的流量-压力特性与大流量时的流量-压力特性不同,电动燃油泵的泄漏问题以及电动燃油泵中电机的惯性问题,也将极大地影响电动燃油泵燃油流量控制的精度和响应速度,燃油流量控制性能很难满足发动机的要求。因此,电动燃油泵流量控制系统要实现在全流量范围内快速且精确的控制,是一项颇具挑战的工作。

[0004] 另外,高可靠的发动机需要电动燃油泵提供高可靠的供油,电动燃油泵必须对可能发生的故障具有满意的容错能力,以保证供油的安全可靠性。电动燃油泵中的典型故障主要来自电机和控制系统硬件,使用容错电机可以有效实现电动燃油泵对电机故障具有很好的容错性能,针对控制系统硬件故障除了采用硬件备份之外,一个低成本的常用方法就是设计合适的容错控制算法。由于航空动力装置常常工作在高温、高压、强振动的环境中,其中的传感器是故障常发的元件之一。电动燃油泵作为航空动力装置中的典型部件也处在相同的工作环境中,它的传感器因而也是故障易发元件。因此,在燃油泵燃油控制系统设计过程中,有必要保证电动燃油泵对传感器故障具有良好的容错能力。

[0005] 除此之外,当发动机在全飞行包线内运行时,电动燃油泵不可避免面临燃油压力变化、燃油温度变化、燃油泵容积效率变化等不确定性问题。所以,电动燃油泵燃油流量鲁棒控制也是不能忽视的问题之一。

[0006] 以上论述表明,电动燃油泵燃油流量的精确快速、安全可靠控制,对于实现高性能航空发动机有着重要的理论意义和工程应用价值,必须设计具有良好稳态和动态性能,具备鲁棒与容错能力的电动燃油泵流量控制系统,从而快速准确地为发动机按需供油。

[0007] 航空电动燃油泵当发动机在全飞行包线内运行时不可避免面临燃油压力变化、燃油温度变化、燃油泵容积效率变化等不确定性的影响,因此设计具有强鲁棒性的燃油流量控制系统十分必要。

[0008] 目前,国内外众多学者针对复杂系统的鲁棒控制问题开展了广泛的研究,而具有

强鲁棒性的滑模控制方法已在航空、航天、电力、化工等诸多领域获得了理论和应用成果，这些成果可以为电动燃油泵的鲁棒燃油流量控制提供有力借鉴。

[0009] 针对双转子燃气涡轮的线性模型，文^[1]设计了降阶滑模控制器。基于一类切换系统输入输出模型，文^[2]采用滑模控制方法，设计了反馈控制器，并用于降压直流变换器的实验中。对于具有匹配干扰的离散时间线性系统，文^[3]设计了基于观测器的滑模控制器。在假设系统不确定性范数有界且上界已知的情况下，文^[4]针对线性多室肺系统，设计了一种用于控制肺容积和肺通气量的滑模控制系统。文^[5]通过滑模控制研究了不确定线性系统的全局精确跟踪问题。文^[6]研究了带有切换增益的二阶滑模反馈控制，气动执行器的实验验证了所提方法的有效性。文^[7]基于跟踪误差观测器，针对单输入单输出系统，设计了滑模控制器。通过设计级联观测器，文^[8]考虑了一类三角非线性系统的滑模控制问题。

[0010] 根据上述文献可以发现，滑模控制是一类备受关注的强鲁棒控制方法，基于滑模理论的航空电动燃油泵燃油流量鲁棒控制系统设计，是非常值得尝试的研究。

[0011] 另外，一方面，航空电动燃油泵有很高的安全性和可靠性要求，其燃油流量、转速、温度、压力等数据通过传感器获得，当传感器故障时会输出错误参数不仅影响燃油流量的控制品质，而且极有可能对航空发动机造成迅速而巨大的不利，因此很有必要研究对传感器故障具有容错能力的燃油流量控制系统。另一方面，随着社会的快速发展与进步，控制系统的复杂度越来越大，发生故障的可能性也越来越高。容错控制为减少灾难性事故发生、减少社会经济损失、保障人民生命安全等，提供了一条可选途径。近年来，伴随着计算机技术和各种先进控制算法的快速发展，许多新方法和新技术被引入到容错控制研究中，其中包括基于滑模理论的容错控制。这些新的方法和技术对航空电动燃油泵燃油流量容错控制系统的设计与分析具有很好的参考价值。

[0012] 文^[9]针对一类存在传感器故障的随机系统，通过增广滑模观测器方法，设计了容错控制器。文^[10]为感应电机设计了含传感器故障检测的二阶滑模解耦电流控制器。文^[11]提出了一种非线性不确定系统故障/噪声重构与容错控制的广义滑模方法。文^[12]针对航空发动机结合自适应诊断，设计了传感器故障情况下的滑模容错控制器。文^[13]采用delta算子方法研究了不确定系统的滑模容错控制。文^[14]针对带有传感器故障的马尔可夫跳变系统，设计了基于滑模观测器的容错控制方法。

[0013] 可见，基于滑模理论的容错控制研究已经受到大量的关注并获得了不少研究成果，其中不乏针对传感器故障的容错控制方法。因此，在航空电动燃油泵流量控制系统中开展滑模容错控制研究，将不仅能够较好地推动滑模容错控制理论的应用研究，而且对电动燃油泵系统容错问题的理论与方法研究也很有促进。

[0014] 综上所述，随着对航空发动机及其燃油流量供给控制系统性能要求的日益提高，高性能的航空电动燃油泵流量控制系统对推动航空发动机的发展将发挥重大作用。本发明正是在这一背景下，提出航空电动燃油泵流量控制系统鲁棒容错新方法。

[0015] [1]Janardhanan Sivaramakrishnan,Rajesh Tiwari,Controller design of twin spool gas turbine using reduced output feedback sliding mode control, IETE Journal of Research,58 (5) ,367-375,2012.

[0016] [2]Hebertt Sira-Ramirez,Alberto Luviano-Juarez,John Cortes-Romero, Robust input-output sliding mode control of the buck converter,Control

Engineering Practice,21,671-678,2013.

[0017] [3]Jinhui Zhang,Gang Feng,Yuanqing Xia,Design of estimator-based sliding-mode output-feedback controllers for discrete-time systems,IEEE Transactions on Industrial Electronics,61(5),2014.

[0018] [4]Saing Paul Hou,Nader Meskin,Wassim M.Haddad,Output feedback sliding mode control for a linear multi-compartment lung mechanics system,International Journal of Control,87(10),2044-2055,2014.

[0019] [5]Eduardo V.L.Nunes,Alessandro J.Peixoto,Tiago Roux Oliveira,Liu Hsu,Global exact tracking for uncertain MIMO linear systems by output feedback sliding mode control,Journal of the Franklin Institute,351,2015-2032,2014.

[0020] [6]Antonio Estrada,Franck Plestan,Second order sliding mode output feedback control with switching gains---Application to the control of a pneumatic actuator,Journal of the Franklin Institute,351,2335-2355,2014.

[0021] [7]Lingfei Xiao,Yue Zhu,Sliding mode output feedback control based on tracking error observer with disturbance estimator,ISA Transactions,53,1061-1072,2014.

[0022] [8]Camila Lobo Coutinho,Tiago Roux Oliveira,Jose Paulo V.S.Cunha,Output-feedback sliding-mode control via cascade observers for global stabilisation of a class of nonlinear systems with output time delay,International Journal of Control,87(11),2327-2337,2014.

[0023] [9]Hongyi Li,Huijun Gao,Peng Shi,Xudong Zhao,Fault-tolerant control of Markovian jump stochastic systems via the augmented sliding mode observer approach,Automatica,50,1825-1834,2014.

[0024] [10]Suneel Kumar Kommuri,Jagat Jyoti Rath,Kalyana Chakravarthy Veluvolu,Michael Defoort,Yeng Chai Soh,Decoupled current control and sensor fault detection with second-order sliding mode for induction motor,IET Control Theory&Applications,9(4):608-617,2015.

[0025] [11]Yong-Duan Song,Ying Lu,Zhong-Xue Gan,Descriptor sliding mode approach for fault/noise reconstruction and fault-tolerant control of nonlinear uncertain systems,Information Sciences,367:194-208,2016.

[0026] [12]Lingfei Xiao,Yanbin Du,Jixiang Hu,Bin Jiang.Sliding mode fault tolerant control with adaptive diagnosis for aircraft engines,International Journal of Turbo&Jet-Engines.Published Online:2016-05-31.

[0027] [13]Gao,Y.,Wu,L.,Shi,P.,Li,H.Sliding mode fault-tolerant control of uncertain system:A delta operator approach.International Journal of Robust and Nonlinear Control,Article in Press,2017.

[0028] [14]Shen Yin,Hongyan Yang,Okyay Kaynak,sliding mode observer-based FTC for markovian jump systems with actuator and sensor faults,IEEE

Transactions on Automatic Control, Article in Press, 2017.

发明内容

[0029] 发明目的:为了克服现有技术中存在的不足,本发明提供一种航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错方法,针对航空电动燃油泵的不确定性和传感器故障问题,利用滑模观测器和滑模控制器设计理论,提出基于燃油泵转速指令调节的燃油流量鲁棒容错控制新策略,保证电动燃油泵鲁棒可靠、快速精准地为航空发动机按需供油。

[0030] 技术方案:为实现上述目的,本发明以由航空外啮合齿轮泵为工作机和以永磁容错电机为动力机通过直驱方式连接而成的航空电动燃油泵为研究对象,提出对传感器故障具有鲁棒容错能力的控制策略和方法,采用的技术方案为:

[0031] 一种航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错方法,包括以下步骤:

[0032] 1) 传感器故障模型研究

[0033] 分析航空电动燃油泵流量控制系统中,传感器对应的传感器故障的典型特征、产生来源和形成机理,对故障模式进行分类,建立传感器故障模型;

[0034] 2) 传感器故障诊断与信号重构研究

[0035] 针对电动燃油泵流量控制系统中的传感器可能发生的单一故障和多故障并发问题,基于滑模观测器设计理论,提出有效的传感器故障诊断策略与信号重构方法,准确排查故障传感器,及时给予信号重构;

[0036] 3) 鲁棒容错控制研究

[0037] 考虑航空发动机在不同工作状态下对电动燃油泵流量的不同要求,针对电动燃油泵当发动机在全飞行包线内运行时所面临的包括燃油压力变化、燃油温度变化、燃油泵容积效率变化在内的不确定性问题,研究电动燃油泵燃油流量鲁棒容错控制策略,基于滑模理论,提出鲁棒容错控制器设计方法;

[0038] 4) AMESim-Matlab联合仿真

[0039] 在AMESim-Matlab联合电动燃油泵流量控制系统仿真平台上验证鲁棒容错控制方法和闭环控制系统设计方法的有效性和可行性,仿真结果为实验验证提供参考;

[0040] 5) 实验验证

[0041] 在仿真研究的基础上,在航空电动燃油泵实验平台上,验证所提的鲁棒容错控制方法和闭环控制系统设计方法的实际有效性和可行性。

[0042] 进一步的,所述传感器包括流量传感器、转速传感器、温度传感器和压力传感器,对应的传感器的输出信号包括燃油流量、转速、温度、压力。

[0043] 进一步的,步骤2)中针对传感器单一故障下的故障诊断问题的具体方法为:

[0044] 2a-1) 判定发生故障:设立故障诊断模块,将传感器输出值 y 与滑模观测器的输出值 y_{smo} 相减得出残差值 $e_f = y - y_{smo}$,若 t_1 时刻残差值 e_f 超过设定的阈值 D_1 ,则认为传感器发生了故障;

[0045] 2a-2) 判断故障类型:在 $e_{f1} > D_1$ 后再设定 t_2 和 t_3 两个时刻获取残差值,计算故障的变化率 p ,如果满足 $p_1 \leq 10^{-3}$ 、 $p_2 \leq 10^{-3}$,则判定系统发生突变故障,否则判定系统发生渐变故障;其中,变化率 p 的计算方法为:

[0046] 在 t_1 时刻 $e_{f1} > D_1$ 系统判定故障发生后 $t_2 = t_1 + 1$ (s) 时刻,即系统判定故障发生后1s

取样,此时残差值设定为 e_{f_2} , t_2 时刻的变化率为 $(e_{f_2} - e_{f_1})/t = p_1$;在 $t_3 = t_1 + 2$ (s)时刻,即系统判定故障发生后2s再次取样,此时残差值设为 e_{f_3} ,之后在 t_3 时刻计算 $(e_{f_3} - e_{f_2})/t = p_2$,其中, t 是采样时间。

[0047] 进一步的,步骤2)中针对传感器多故障并发情况下的故障诊断问题的具体方法为:

[0048] 当有 m 个传感器输出参数,对应地设计 m 个滑模观测器,每一个观测器都利用除该观测器对应的传感器外其余传感器的观测输出,即对于 m 个观测器来说,每一个都只利用 $m-1$ 个观测输出量,如第 i 个滑模观测器,其输入 y^i 的信息构成为除第 i 个传感器外其余 $m-1$ 个传感器的可测输出偏离量,这样如果第 i 个传感器产生故障,那么第 i 个滑模观测器由于没有使用故障传感器的观测信息,因此它的估计结果是正确的;

[0049] 而其他的滑模观测器都使用了故障传感器的输出信号,因此估计结果都偏离了实际情况,应用此法判断出传感器的故障。

[0050] 进一步的,步骤2)中针对传感器信号重构问题的具体方法为:当检测到传感器故障时,利用无故障的信号和模型输出值,构成滑模观测器,去估计有故障的信号,并替换故障传感器测量值,完成信号重构。

[0051] 进一步的,步骤3)的具体方法为:

[0052] 3-1)研究电动燃油泵全流量范围内燃油流量控制策略:全流量范围内电动燃油泵流量控制策略由转速指令调节部分和转速控制部分组成;

[0053] 3-2)研究电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错控制方法:开展不确定性和传感器故障影响下的电动燃油泵燃油流量鲁棒容错控制设计。

[0054] 进一步的,步骤3-1)中转速指令调节部分具体为:

[0055] 根据发动机燃油需求指令 W_{fb}^0 ,反馈当前电动燃油泵的输出燃油流量 W_{fb} ,利用 W_{fb}^0 和燃油流量误差 ΔW_{fb} ,针对大流量要求和小流量要求的不同特点,设计对应的燃油泵转速指令调节器,生成转速增量指令 Δn ;

[0056] 基于电动燃油泵燃油流量非线性稳态模型 $W_{fb} = f(x)$,求得相应的逆模型 $n = f^{-1}(W_{fb}, \bar{x})$,其中 n 为实际转速, x 为系统的状态量,由包括泵的转速、压差、燃油压力、燃油温度在内的参数组成, \bar{x} 是由 x 中除泵的转速以外的剩余参数组成,即 $x = [n, \bar{x}]$;利用该逆模型获得在当前电动燃油泵的剩余参数 \bar{x} 和燃油需求指令 W_{fb}^0 下对应的需求转速 n_a ;

[0057] 通过转速增量指令 Δn 对需求转速 n_a 进行调节,获得全流量范围内电动燃油泵转速指令 n^0 。

[0058] 进一步的,步骤3-1)中转速控制部分具体为:

[0059] 在不考虑不确定性和传感器故障的情况下,设计转速控制部分使实际转速 n 与转速指令 n^0 的误差在2%以内;

[0060] 基于电动燃油泵自适应组合非线性动态模型,以包括转速误差和压差、压力、温度在内的参数为输入,构造对应的转速控制器,削弱直至避免电机惯性的影响,输出对应的控制信号,经功率变换器转换成相应功率的电流和电压,传递给电机用于电机转速控制,实现燃油泵按设定的期望转速运行,控制燃油流量 W_{fb} 。

[0061] 进一步的,步骤3-2)按照以下研究步骤开展不确定性和传感器故障影响下的电动燃油泵燃油流量鲁棒容错控制设计:

[0062] 3-2-1)根据传感器故障诊断结论,当传感器发生故障时,采用重构信号参与系统的反馈控制;

[0063] 3-2-2)基于具有强鲁棒性的滑模观测器设计方法,构造传感器故障估计器,得到的故障估计值作为鲁棒容错控制器的一部分;

[0064] 3-2-3)在步骤3-1)流量控制系统设计方法的基础上,根据滑模控制理论,综合利用燃油泵转速指令信号、重构的状态信号、故障估计信号,基于电动燃油泵自适应组合非线性动态模型,构造具有强鲁棒容错能力的滑模转速控制器;

[0065] 3-2-4)根据Lyapunov稳定性理论,分析不确定性和传感器故障影响下的电动燃油泵燃油流量闭环控制系统的鲁棒稳定性,给出系统鲁棒稳定的充分条件。

[0066] 有益效果:本发明提供的航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错方法,与现有技术相比,具有以下优势:

[0067] 航空发动机燃油调节范围很宽,稳态和动态控制性能要求高,电动燃油泵要实现安全可靠地按需供油并不容易。针对航空发动机在全工况下对电动燃油泵流量的不同要求,并考虑发动机在全飞行包线内运行时电动燃油泵面临的不确定性问题,同时为了保证在传感器故障情况下电动燃油泵燃油控制系统的具备良好的容错性能,本发明提出基于燃油泵转速指令调节的燃油流量鲁棒容错控制新策略。该控制策略由两部分组成,第一部分是转速指令调节部分,第二部分是转速控制部分。转速指令调节部分主要基于发动机燃油需求指令、燃油流量非线性稳态模型和电动燃油泵的输出燃油流量,它为控制系统提供合适的全流量范围内适用的电动燃油泵转速指令。转速控制部分主要作用是实现实际转速与转速指令的误差尽可能小,在考虑不确定性和传感器故障的情况下,基于电动燃油泵自适应组合非线性动态模型,根据滑模理论,通过综合设计滑模故障估计器和滑模转速控制器,保证电动燃油泵转速响应快速且准确地达到期望转速,进而实现电动燃油泵对航空发动机安全可靠、快速精准地按需供油。该针对航空电动燃油泵流量特性与控制需求而提出的鲁棒容错控制策略,是本发明的重要创新之处。

[0068] 本发明提出对传感器故障具有容错能力的鲁棒控制方法,获得能够满足航空发动机高性能按需供油要求的电动燃油泵流量控制系统设计方法,对航空电动燃油泵控制系统建模与综合具有直接的指导作用,亦可为其他机电液一体化系统的分析与控制提供有利参考。

附图说明

[0069] 图1为航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错方法研究方案示意图;

[0070] 图2为航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错方法实施方式示意图;

[0071] 图3为全流量范围内航空电动燃油泵流量控制系统结构图;

[0072] 图4为航空电动燃油泵燃油流量鲁棒容错控制系统设计原理图;

[0073] 图5为航空电动燃油泵流量控制系统基本原理图;

[0074] 图6为航空电动燃油泵AMESim和Matlab部分仿真图;

[0075] 图7为实施例仿真和实验结果示意图。

具体实施方式

[0076] 本发明以由航空外啮合齿轮泵为工作机和以永磁容错电机为动力机通过直驱方式连接而成的航空电动燃油泵为研究对象,提出对传感器故障具有鲁棒容错能力的控制策略和方法,如图1所示,具体方案如下:

[0077] 1) 传感器故障模型研究

[0078] 分析航空电动燃油泵流量控制系统中,流量传感器、转速传感器、温度传感器和压力传感器,其传感器故障的典型特征、产生来源和形成机理,对故障模式进行分类,建立传感器故障模型。

[0079] 2) 传感器故障诊断与信号重构研究

[0080] 针对电动燃油泵流量控制系统中的流量传感器、转速传感器、压力传感器和温度传感器可能发生的单一故障和多故障并发问题,基于滑模观测器设计理论,提出有效的传感器故障诊断策略与信号重构方法,准确排查故障传感器,及时给予信号重构。

[0081] 3) 鲁棒容错控制研究

[0082] 考虑航空发动机在起动过程、加速/减速过程、慢车状态、中间状态、最大状态等工作状态下对电动燃油泵流量的不同要求,针对电动燃油泵当发动机在全飞行包线内运行时所面临的燃油压力变化、燃油温度变化、燃油泵容积效率变化等不确定性问题,同时为了保证电动燃油泵在传感器故障情况下具备良好的可靠性,研究电动燃油泵燃油流量鲁棒容错控制策略,基于滑模理论,提出鲁棒容错控制器设计方法,实现电动燃油泵对发动机快速而精确地按需供油。

[0083] 4) AMESim-Matlab联合仿真研究

[0084] 在AMESim-Matlab联合电动燃油泵流量控制系统仿真平台上,验证鲁棒容错控制方法和闭环控制系统设计方法的有效性和可行性,仿真结果为实验系统设计和实验验证提供参考。

[0085] 5) 实验研究

[0086] 在仿真研究的基础上,在航空电动燃油泵实验平台上,验证本发明所提的鲁棒容错控制方法和闭环控制系统设计方法的实际有效性和可行性。

[0087] 下面结合附图和实施例对本发明作更进一步的说明。

[0088] 实施例

[0089] 根据下述实施例,可以更好的理解本发明。然而,本领域的技术人员容易理解,实施例所描述的具体的物料配比、工艺条件及其结果仅用于说明本发明,而不应当也不会限制权利要求书中所详细描述的本发明。

[0090] 本发明以由航空外啮合齿轮泵为工作机、以永磁容错电机为动力机、泵与电机通过直驱方式连接而成的电动燃油泵为具体研究对象,采取如图2所示的实施方式。

[0091] 具体说明如下:

[0092] (1) 航空电动燃油泵流量控制系统基本原理分析

[0093] 本专利涉及的航空电动燃油泵流量控制系统主要由电动燃油泵控制器、功率变换器、电机、燃油泵、转速传感器、流量传感器、压力传感器和温度传感器及其他相关液压元件组成。电动燃油泵流量控制系统基本原理如图5所示。其中,功率变换器是一个功率伺服模

快,用于将控制器输出的电信号,变成相应功率的电流和电压,传递给电机;永磁容错电机和航空外啮合齿轮燃油泵构成本专利研究的电动燃油泵。

[0094] 飞行过程中,电动燃油泵接收飞行员的指令(油门位置)信息和外界条件信息(飞行高度、飞行马赫数等),按一定规律将一定流量和压力的燃油供应给发动机燃烧室,用以保持或改变发动机工作状态。首先,航空发动机控制系统根据发动机当前工作参数,如排气温度、压气机出口压力、飞行高度、飞行马赫数等,计算发动机所需燃油量,然后输出控制命令给电动燃油泵控制器。之后,电动燃油泵控制器采集流量传感器、压力传感器和温度传感器的反馈信息计算出燃油泵输出的实际流量,经过比较计算,输出控制信号用于电机转速控制,从而使燃油泵按设定的转速运行。随后,燃油泵供出的燃油流经喷嘴等必要的液压元件后,输送到发动机燃烧室。

[0095] 本专利基于以上基础,开展后续的电动燃油泵流量控制系统设计。

[0096] (2) 航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障模型研究

[0097] 航空电动燃油泵的燃油流量、转速、温度、压力等数据通过传感器获得,当传感器故障时会输出错误参数从而影响燃油流量的控制品质,因此有必要对传感器输出信号进行检测与分析,对传感器故障给予诊断并获得重构信号,这首先需要建立合适的传感器故障模型。

[0098] 本发明通过分析航空电动燃油泵流量控制系统中,当流量传感器、转速传感器、温度传感器和压力传感器出现没有信号、信号突变、信号渐变等故障时,各自故障的典型特征、产生来源和形成机理,对故障模式进行分类,采用合适的数学函数给予表达,进而建立满足实际要求的传感器故障模型。

[0099] 本实施例所建立的故障模型如下,但是本发明不限于这样的模型。

[0100] (1) 传感器没有信号

[0101] 传感器没有信号是指传感器在工作过程中发生测量值为零的情况,因此,传感器没有信号时的故障模型可以表示为:

$$[0102] \quad y=0$$

[0103] 其中, y 为故障传感器输出。

[0104] (2) 传感器信号突变故障

[0105] 传感器信号突变故障是指传感器在工作过程中发生测量值突变的情况,因此,传感器偏置故障模型可以表示为:

$$[0106] \quad y=y_0+\Delta$$

[0107] 式中, Δ 为偏置常数, y_0 为正常传感器输出, y 为故障传感器输出;当 $\Delta=0$ 时,表示传感器正常工作。

[0108] (3) 传感器信号渐变故障

[0109] 传感器信号渐变故障是指传感器在工作过程中发生测量值恒增益漂移情况,因此,传感器漂移故障模型可以描述为:

$$[0110] \quad y=y_0+k \cdot (t-t_0)$$

[0111] 式中, k 为漂移系数, t_0 为故障发生的时间;当 $k=0$ 时,表示传感器工作正常。

[0112] (3) 航空电动燃油泵流量控制系统传感器故障诊断与信号重构研究

[0113] 针对电动燃油泵传感器单一故障和多故障并发问题,基于滑模观测器设计理论,

开展发明的相关工作。

[0114] 1) 针对传感器单一故障下的故障诊断问题,采用如下步骤:

[0115] 设立故障诊断模块,将传感器输出值 y 与滑模观测器的输出值 y_{smo} 相减得出残差值 $e_f = y - y_{smo}$ 。如果在 t_1 时刻残差值 e_f 超过了设定的阈值 D_1 ,可认为传感器发生了故障,但此时还不能判定故障类型。为了判断故障类型,我们需要在 $e_{f_1} > D_1$ 后再设定 t_2 和 t_3 两个时刻获取残差值,用来计算故障的变化率 T_f 。在 t_1 时刻 $e_{f_1} > D_1$ 系统判定故障发生后 $t_2 = t_1 + 1$ (s)时刻,即系统判定故障发生后1s取样,此时残差值设定为 e_{f_2} , t_2 时刻的计算 $(e_{f_2} - e_{f_1})/t = p_1$;在 $t_3 = t_1 + 2$ (s)时刻,即系统判定故障发生后2s再次取样,此时残差值设为 e_{f_3} ,之后在 t_3 时刻计算 $(e_{f_3} - e_{f_2})/t = p_2$,如果 $p_1 \approx p_2 \approx 0$,可设置为 $p_1 \leq 10^{-3}$ 、 $p_2 \leq 10^{-3}$,则判定系统发生突变故障,否则,如果 $p_1 \approx p_2 \neq 0$,则判定系统发生渐变故障。

[0116] 通过这样的逻辑过程,不仅可以判断出转速传感器故障与否,还能够判断发生故障的类型。在判定故障后,为了提高诊断准确率,可以减小采样时间间隔,通过多次采样,以确定更为合适的故障变化率 T_f 。

[0117] 2) 针对传感器多故障并发情况下的故障诊断问题,采用如下方法:

[0118] 当有 p 个传感器输出参数,对应地设计 p 个滑模观测器,每一个观测器都利用除该观测器对应的传感器外其余无故障传感器的观测输出,即对于 p 个观测器来说,每一个都只利用剩余无故障观测输出量,如第 i 个滑模观测器,其输入 y^i 的信息构成为除第 i 个传感器外其余剩余无故障传感器的可测输出偏离量,这样如果第 i 个传感器产生故障,那么第 i 个滑模观测器由于没有使用故障传感器的观测信息,因此它的估计结果是正确的。而其他的滑模观测器都使用了故障传感器的输出信号,因此估计结果都偏离了实际情况,应用此法判断出传感器的故障。

[0119] 3) 针对传感器信号重构问题,采用如下方法:

[0120] 本发明中主要考虑电动燃油泵流量控制系统中的流量传感器、转速传感器、温度传感器和压力传感器的故障重构问题。当检测到传感器故障时,利用无故障的信号和模型输出值,构成滑模观测器,去估计有故障的信号,并替换故障传感器测量值,完成信号重构。

[0121] 当具有传感器故障的航空电动燃油泵用如下模型表示时

$$[0122] \quad \dot{x} = f(x) + g(x)u + Q\xi(t, x, u)$$

$$[0123] \quad y = h(x) + Nf_0(t)$$

[0124] 其中, $x \in R^n$ 为电动燃油泵系统的 n 维状态变量, $u \in R^m$ 为电动燃油泵系统的 m 维控制变量, $y \in R^p$ 为系统的 p 维传感器可测输出; $f(\cdot)$ 为 n 维已知非线性函数, $g(\cdot)$ 为 $n \times m$ 维已知非线性函数, $h(\cdot)$ 为 p 维已知非线性函数, $\xi(t, x, u)$ 为1维系统不确定因素或非线性项, $f_0(t)$ 为 r 维传感器故障向量且 $\|f_0(t)\| \leq \alpha(t)$, $N \in R^{p \times r}$, $Q \in R^{n \times 1}$ 为系统已知矩阵。

[0125] 利用不含有传感器故障信息的测量信号 \bar{y} ,即 \bar{y} 为除去传感器故障信号所剩余的 y 中的测量值,构造如下形式的滑模观测器:

$$[0126] \quad \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}) + g(\hat{x})u - G_1 e_y + G_n v$$

[0127] 式中, $e_y = \bar{h}(\hat{x}) - \bar{y}$ 为输出估计误差, $\bar{h}(\hat{x})$ 为除去传感器故障信号所剩余的 $h(\hat{x})$ 中的函数, $G_1 \in R^{n \times (p-r)}$ 和 $G_n \in R^{n \times (p-r)}$ 为用户可设计矩阵。

[0128] 非连续向量 v 定义为:

$$[0129] \quad v = -\rho \frac{e_y}{\|e_y\|}, (e_y \neq 0)$$

[0130] 式中, ρ 为一个正标量函数。

[0131] (4) 航空电动燃油泵流量控制系统鲁棒容错控制研究

[0132] 因为航空发动机在起动过程、慢车状态、中间状态、最大状态等工作状态下对电动燃油泵流量有不同要求,而且当发动机在全飞行包线内运行时,电动燃油泵面临燃油压力变化、燃油温度变化、燃油泵容积效率变化等不确定性问题,此外高可靠的发动机需要电动燃油泵提供高可靠的供油,在传感器故障情况下电动燃油泵燃油控制系统必须具备良好的容错性能,所以本发明的电动燃油泵鲁棒容错控制研究具有重要意义,因此也是本发明又一重点内容,按照如下步骤开展工作:

[0133] 首先,研究电动燃油泵全流量范围内燃油流量控制策略。

[0134] 航空发动机飞行包线宽广、飞行工况复杂,这需要燃油泵提供很宽的燃油调节范围,同时满足很高的稳态和动态控制性能要求。电动燃油泵中的电机一般具有较大的惯性,这无疑会影响到燃油泵控制的响应速度,尤其当发动机工作在慢车以下、起动、加速/减速过程等过渡态工况时,电动燃油泵需要提供小流量或非常快速的燃油供给时,电动燃油泵流量控制的品质将受到极大的挑战。

[0135] 通常,电动燃油泵的流量控制可以由电机转速的精确控制来实现。然而,因为电动燃油泵是一类复杂的非线性系统,小流量要求下的电机转速与燃油流量的对应关系尤其繁杂,甚至与大流量要求下的对应关系迥然不同,此外电机惯性也会影响电动燃油泵燃油流量控制动态品质,所以考虑到电机转速与燃油流量对应关系的强复杂性,为了实现在全流量范围内电动燃油泵流量控制系统都具有良好的控制性能,本发明提出如图3所示的基于燃油泵转速指令调节的燃油流量控制新策略。

[0136] 根据图3可以看出,本发明所提全流量范围内电动燃油泵流量控制策略由两部分组成,第一部分是转速指令调节部分,第二部分是转速控制部分。

[0137] 1) 转速指令调节部分

[0138] 根据发动机燃油需求指令 W_{fb}^0 , 反馈当前电动燃油泵的输出燃油流量 W_{fb} , 利用 W_{fb}^0 和燃油流量误差 ΔW_{fb} , 针对大流量要求和小流量要求的不同特点, 设计合适的燃油泵转速指令调节器, 生成转速增量指令 Δn 。

[0139] 基于电动燃油泵燃油流量非线性稳态模型 $W_{fb_s} = f(x)$, 对于任意的非线性稳态模型均适用, 可求得相应的逆模型 $n = f^{-1}(W_{fb_s}, \bar{x})$, 其中 x 由泵的转速、压差、燃油压力、燃油温度等参数组成, \bar{x} 是由 x 中除泵的转速以外的剩余参数组成, 即 $x = [n, \bar{x}]$ 。利用该逆模型, 我们可以获得在当前电动燃油泵的实际温度、压力、压差等参数和燃油需求指令 W_{fb}^0 下对应的需求转速 n_a 。

[0140] 通过转速增量指令 Δn 对需求转速 n_a 进行调节, 最终可以获得全流量范围内电动燃油泵转速指令 n^0 。

[0141] 2) 转速控制部分

[0142] 在不考虑不确定性和传感器故障的情况下, 转速控制部分的主要作用是实现实际

转速 n 与转速指令 n^0 的误差尽可能小,优选的,可设置在2%以内,保证电动燃油泵转速响应快速且准确地达到期望转速。

[0143] 对于转速控制部分的设计,我们将基于电动燃油泵自适应组合非线性动态模型,以转速误差和压差、压力、温度等为输入,构造合适的转速控制器,削弱直至避免电机惯性的影响,输出恰当的控制信号,经功率变换器转换成相应功率的电流和电压,之后传递给电机用于电机转速控制,进而实现燃油泵按设定的期望转速运行,最终达到精确且快速控制燃油流量 W_{fb} 的目的。其中,电动燃油泵自适应组合非线性动态模型的建模方法为:以燃油泵转速和进出口压差为参数,建立电动燃油泵流量控制非线性稳态模型;以燃油泵流量动态特性和电机转速动态特性为参考,建立电动燃油泵流量控制线性动态模型;根据发动机不同工况下燃油需求指令,设计模型自适应组合策略,对非线性稳态模型和线性动态模型进行组合,构成自适应组合模型,最终建立全流量范围内适用的兼顾稳态精度和动态精度要求的电动燃油泵流量控制系统非线性动态模型。

[0144] 具体包括以下步骤:

[0145] 2-1) 机理分析:根据航空电动燃油泵流量控制机理,分析航空发动机运行在不同工况、不同高度、不同马赫数、不同温度等情况下,燃油压力、燃油泄漏、燃油温升等对电动燃油泵燃油流量的影响,获得全流量范围内航空电动燃油泵流量特性。

[0146] 2-2) 组合建模:分别针对电动燃油泵大流量要求和小流量要求下的燃油流量特性,选取燃油流量的影响参数进行模型建立,具体为:

[0147] 2-2-1) 针对发动机慢车以上工况,分析大流量要求下的燃油流量特性,建立大流量要求下的电动燃油泵流量控制系统非线性稳态模型和线性动态模型:基于对电动燃油泵流量控制系统的机理分析,根据电动燃油泵在大流量要求下的燃油流量特性,参考齿轮泵理论流量和实际流量典型计算公式,以燃油泵转速和进出口压差为关键参数,进口压力和燃油温度为辅助参数,进而获得电动燃油泵流量控制稳态非线性模型;根据燃油泵流量动态特性和电机转速动态特性,在电动燃油泵的额定工作转速附近,通过线性化处理,建立电动燃油泵流量控制线性动态模型。齿轮泵理论流量和实际流量典型计算公式如下:

[0148] 齿轮泵的供油量可以通过瞬时流量的积分来求,在没有损失的理想情况下,齿轮泵的供油流量公式为

$$[0149] \quad Q_T = 2\pi Bn \left(Rc^2 - r^2 - \frac{kt_0^2}{12} \right)$$

[0150] 其中 Q_T 为理论供油流量, B 为齿宽, n 为转速, Re 为齿顶圆半径, r 为节圆半径, t_0 为基节长度, $k=4-6c+3c^2$, $c=\frac{f}{t_0}$, $t_0=2\pi\frac{r_0}{z}$, z 为齿数, f 为实际啮合线长, r_0 为基圆半径。

[0151] 实际应用中,齿轮泵会存在容积损失,导致实际供油量总是小于理论供油量,通常以容积效率 η_v 来衡量容积损失:

$$[0152] \quad \eta_v = \frac{Q}{Q_T}$$

[0153] 其中 Q 为实际供油流量。

[0154] 根据燃油泵流量动态特性和电机转速动态特性,在电动燃油泵的额定工作转速附近,通过线性化处理,建立电动燃油泵流量控制线性动态模型;

[0155] 2-2-2) 针对发动机慢车以下工况,分析小流量要求下的燃油流量特性,建立小流量要求下的电动燃油泵流量控制系统非线性稳态模型和线性动态模型:以燃油泵转速、进出口压差、进口压力和燃油温度为参数,并考虑燃油泄漏对容积效率的影响,采用与大流量要求下的非线性模型不同的非线性多项式函数对电动燃油泵的燃油稳态特性进行描述;

[0156] 在电动燃油泵线性动态模型建立过程中,考虑电机惯性对电动燃油泵动态响应的影响,采用三阶或以上更精准的动态模型来反映电动燃油泵的燃油动态特性,最终获得电动燃油泵流量控制稳态非线性模型;

[0157] 2-2-3) 建立全流量范围内适用的电动燃油泵自适应组合非线性动态模型:该组合模型是电动燃油泵流量控制系统的非线性动态模型,它由三部分组成:非线性稳态模型、自适应动态增益和线性动态模型。在非线性稳态模型的基础上,通过构造自适应动态增益,并用于调整线性动态模型的部分参数,最终获得兼顾稳态精度和动态精度的面向燃油流量控制系统分析与综合研究的电动燃油泵自适应组合非线性动态模型;

[0158] 在全流量范围内,根据发动机不同工况下的燃油需求指令 W_{fb}^0 ,构造自适应策略,自主选定大流量或小流量要求下对应的非线性稳态模型和线性动态模型。

[0159] 所述自适应动态增益 K 由两部分构成,即 $K = K_0(x_s) + K_1(W_{fb}^0)$ 。第一部分 $K_0(x_s)$ 可基于电动燃油泵非线性稳态模型,利用数值微分算法获得:

$$[0160] \quad K_0(x_s) = \left. \frac{\partial W_{fb_s}}{\partial x_s} \right|_{x_s=x} = \frac{W_{fb_s}(x + \delta x) - W_{fb_s}(x)}{\delta x}$$

[0161] 其中,模型的输入量 x 由包括泵的转速、进出口压差、燃油压力、燃油温度在内的参数组成, x_s 为稳态输入值, W_{fb_s} 为稳态燃油流量值, δx 为一个极小的输入增量值; $K_1(W_{fb}^0)$ 是根据燃油需求指令 W_{fb}^0 而设计的动态增益自适应补偿项,用于使得动态增益在对电动燃油泵线性稳态模型进行调整时,更加符合大流量需求和小流量需求下的不同流量特性,从而获得兼顾稳态精度和动态精度的在全流量范围内适用的电动燃油泵自适应组合非线性动态模型。

[0162] 2-3) 模型检验与修正:基于航空电动燃油泵 AMESim-Matlab 联合仿真平台和实验平台,对组合模型参数进行修正。

[0163] 然后,研究电动燃油泵流量控制系统传感器故障鲁棒容错控制方法。

[0164] 当航空发动机位于慢车、中间、最大以及起动、加速/减速等不同工作状态,处在不同飞行高度、飞行马赫数、环境温度等情况下时,电动燃油泵不可避免面临燃油压力、温度等不确定性的影响。同时,一旦电动燃油泵的传感器故障,极有可能对发动机造成迅速而巨大的不利。因此,为了保证发动机的飞行安全和性能,电动燃油泵流量控制系统必须具有良好的鲁棒性和可靠性,需要在存在不确定性和传感器故障的情况下,仍然可以为发动机快速且精准地按需供油。

[0165] 结合图4所示的控制系统设计原理图,本发明按照以下研究步骤开展不确定性和传感器故障影响下的电动燃油泵燃油流量鲁棒容错控制设计。

[0166] 1) 根据传感器故障诊断结论,当传感器发生故障时,采用重构信号参与系统的反馈控制。

[0167] 2) 基于具有强鲁棒性的滑模观测器设计方法,构造传感器故障估计器,故障估计值作为鲁棒容错控制器的一部分。

[0168] 3) 在图3所示流量控制系统设计方法的基础上,根据滑模控制理论,综合利用燃油泵转速指令信号、重构的状态信号、故障估计信号,基于电动燃油泵自适应组合非线性动态模型,构造具有强鲁棒容错能力的滑模转速控制器,保证电动燃油泵燃油流量闭环控制系统在不确定性和传感器故障情况下能够为发动机安全可靠、快速精准地按需供油。

[0169] 4) 根据Lyapunov稳定性理论,分析不确定性和传感器故障影响下的电动燃油泵燃油流量闭环控制系统的鲁棒稳定性,给出系统鲁棒稳定的充分条件。

[0170] (5) 航空电动燃油泵流量控制系统AMESim-Matlab联合仿真

[0171] 根据航空电动燃油泵的结构特点和功能需求,在AMESim-Matlab联合电动燃油泵流量控制系统仿真平台上,验证鲁棒容错控制方法和闭环控制系统的有效性、可行性,获得的仿真结果为实验验证研究提供参考。如图6(a)、(b)所示。

[0172] (6) 航空电动燃油泵流量控制系统实验验证

[0173] 在仿真研究的基础上,通过分析发动机飞行状态、电动燃油泵运行环境、传感器故障特点等,在航空电动燃油泵实验平台上,验证本发明所提的鲁棒容错控制方法和闭环控制系统的实际有效性和可行性。

[0174] 实施例结果说明

[0175] 对航空电动燃油泵控制系统进行仿真和实验验证,主要验证系统对典型正负斜坡信号、阶跃信号的跟随能力。仿真和实验结果需要获得如图7所示结果,验证结果呈现燃油流量超调小、震荡小、跟踪精度高,能够快速跟踪给定燃油流量指令。

[0176] 以上所述仅是本发明的优选实施方式,应当指出:对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明原理的前提下,还可以做出若干改进和润饰,这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

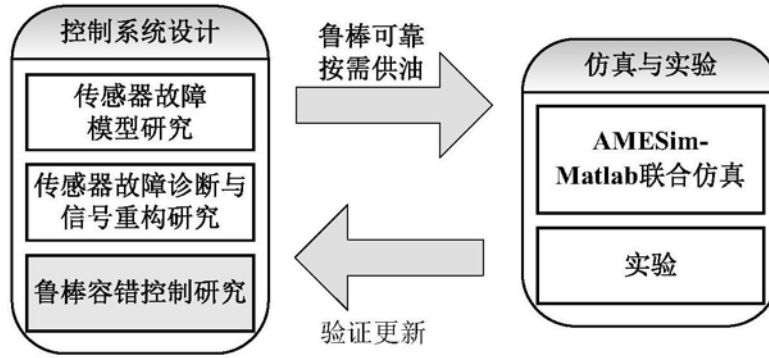


图1

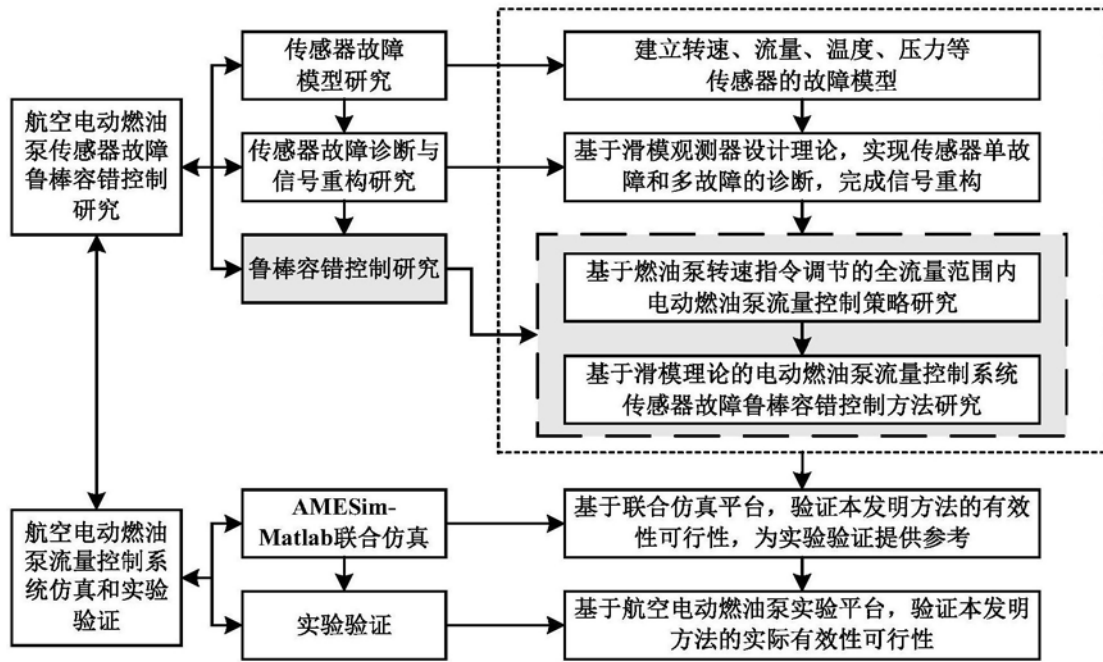


图2

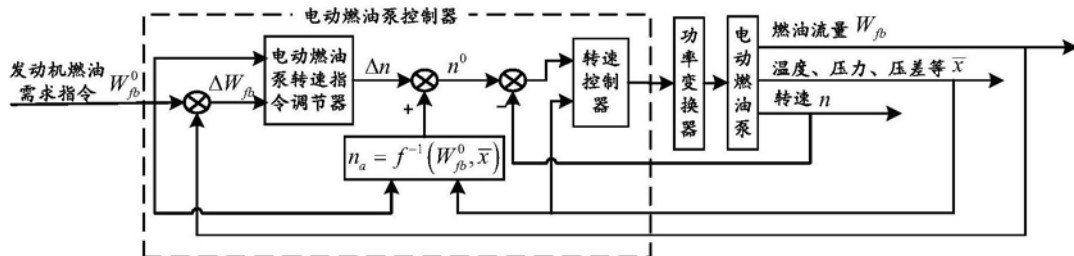


图3

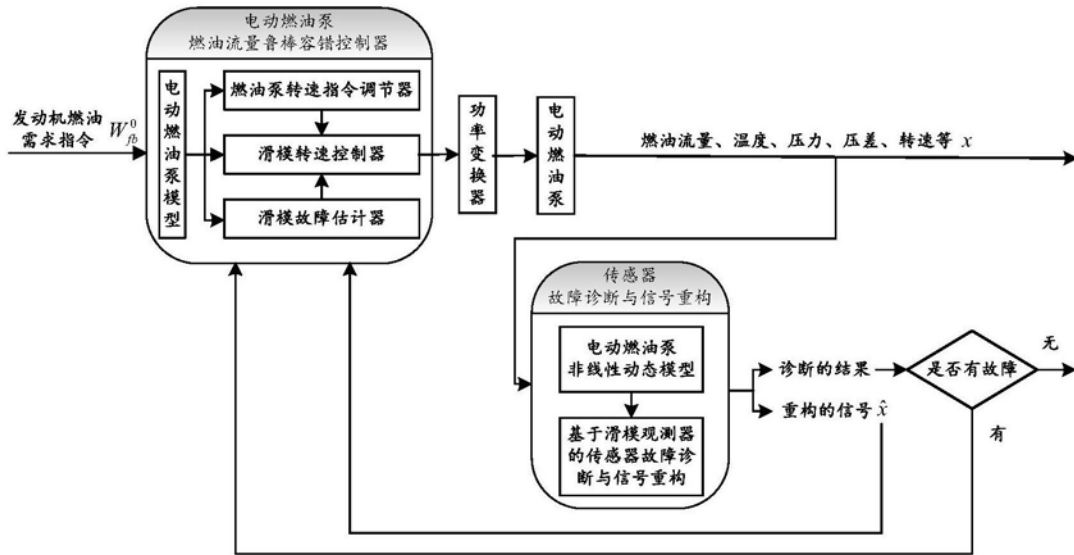


图4

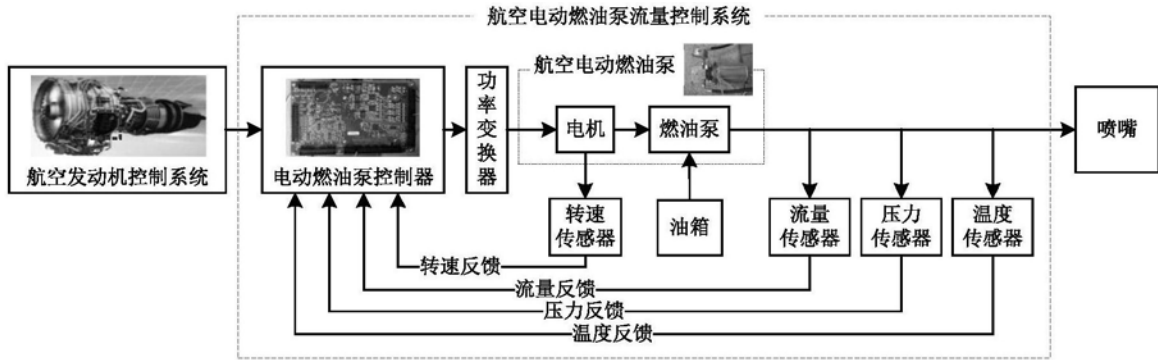
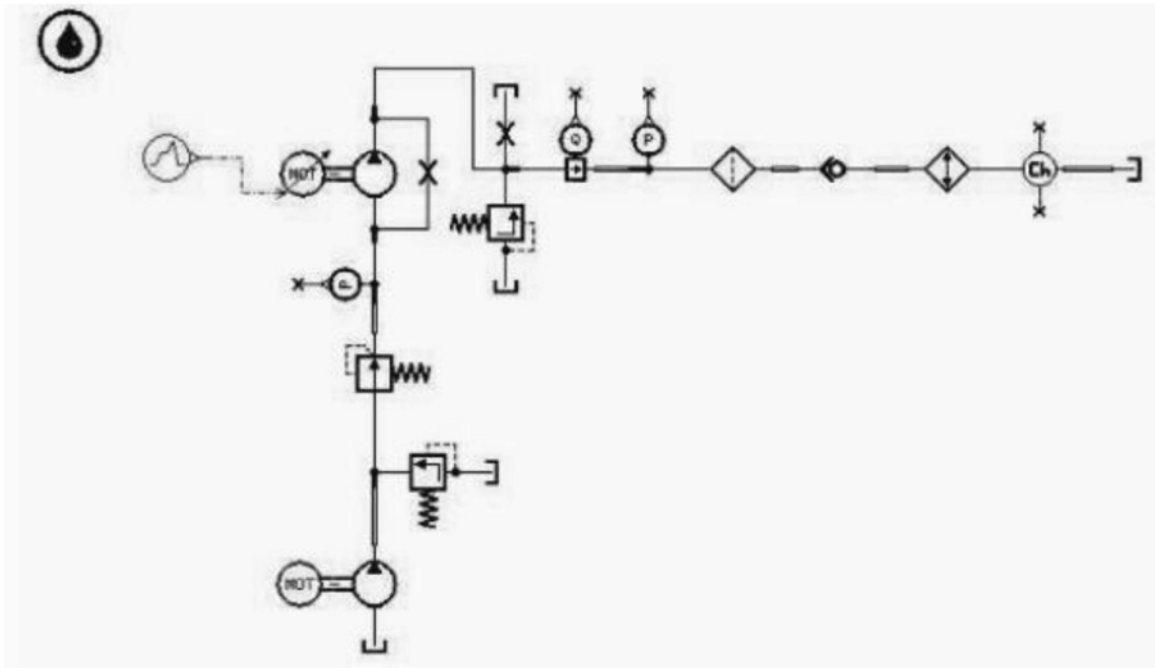
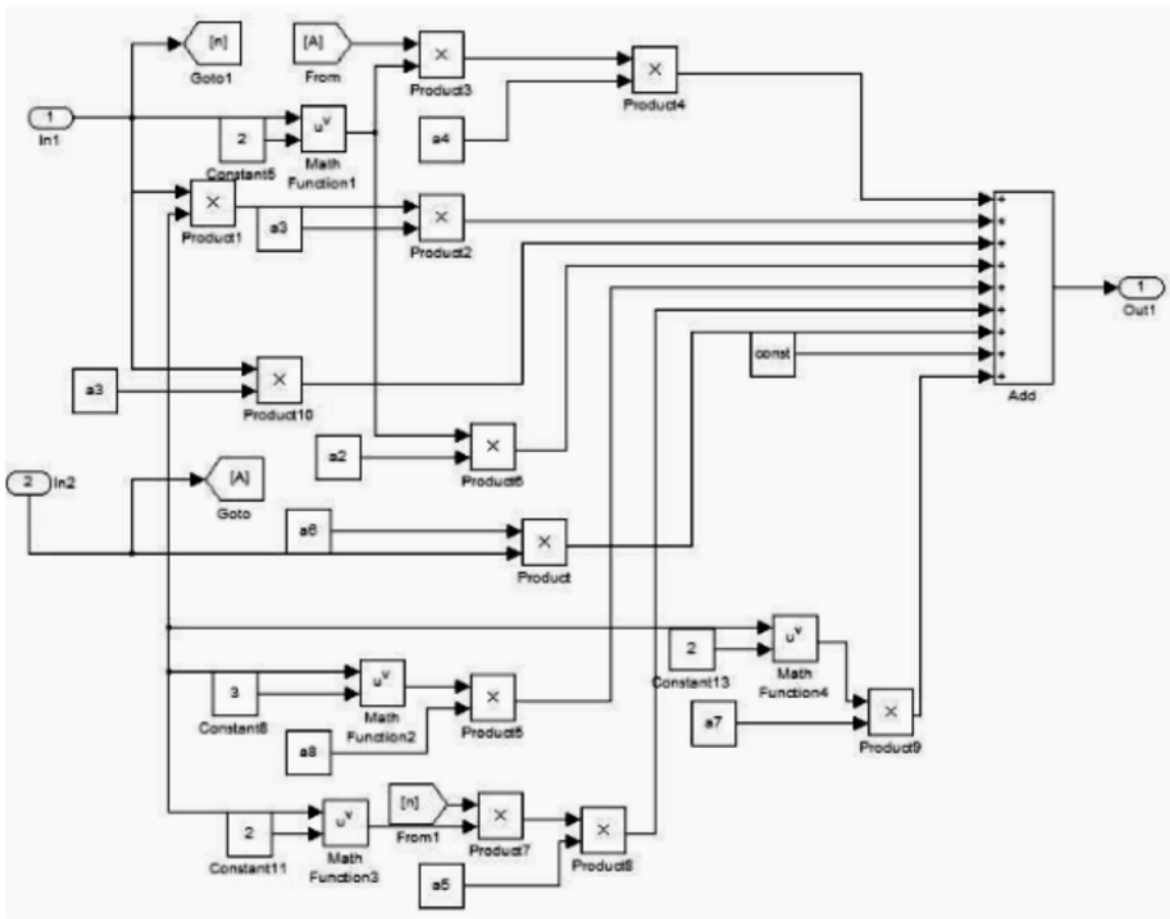


图5



(a)



(b)

图6

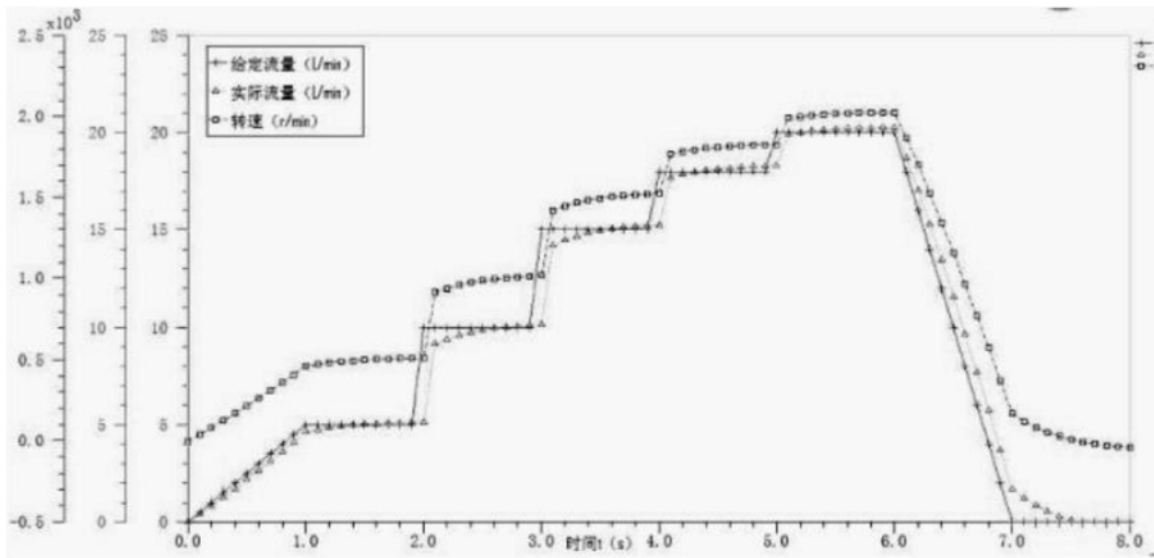


图7