# 基于卡尔曼滤波器的容错控制和硬件在环验证

刘 莹,任雅浩,王继强,胡忠志

(南京航空航天大学能源与动力学院,南京 210016)

摘要:为了有效地开展微型燃气轮机传感器的故障诊断和容错控制,在采用基于模型的设计方法建立微型燃气轮机部件级模型的基础上,使用了一种基于扩展卡尔曼滤波器的故障诊断和容错控制方法,能够有效地诊断出传感器故障,并重构正确信号继续进行闭环控制。使用MATLAB/Simulink的自动代码生成技术,将微型燃气轮机模型及故障诊断和容错控制方法在全数字仿真 平台和硬件在环仿真平台进行集成和验证,结果表明:基于模型的设计方法的数字仿真结果与硬件在环仿真结果具有很高的一致性。 关键词:微型燃气轮机;卡尔曼滤波器;容错控制;硬件在环

中图分类号:V233.7 文献标识码:A doi:10.13

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.S1.017

#### Fault Tolerant Control and Hardware-in-the-loop Verification based on Kalman Filter

LIU Ying, REN Ya-hao, WANG Ji-qiang, HU Zhong-zhi

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to effectively develop fault diagnosis and fault tolerant control of micro gas turbine sensors, a fault diagnosis and fault-tolerant control method based on extended Kalman filter was used based on the model-based design method to establish the component-level model of micro gas turbine. This method could effectively diagnose the sensor fault and reconstruct the correct signal to continue the closed-loop control. By using MATLAB/Simulink automatic code generation technology, the micro gas turbine model and method of fault diagnosis and fault-tolerant control were integrated and verified in the full digital simulation platform and hardware-in-the-loop simulation platform. The results show that the numerical simulation results of the model-based design method are consistent with those of the hardware-in-the-loop simulation results.

Key words: micro gas turbine; Kalman filter; fault tolerant control; hardware-in-the-loop

0 引言

随着环境问题日益凸显,电网追求低碳化发展, 分布式热电联产(Combined Heat and Power, CHP)系 统因具有高效、节能的特点而受到国内外广泛关注<sup>[1]</sup>。 微型燃气轮机是分布式热电联产的发电核心部件,其 动态性能对整套系统的启动速度、机动性能、运行效 率等至关重要<sup>[2]</sup>。因此,研究微型燃气轮机的数学建 模以及控制算法具有重要价值。微型燃气轮机数字 控制器中的传感器容易在运行过程中发生故障,控制 系统需要能够及时诊断出故障并通过容错功能实现 控制系统的安全运行,对于保证微型燃气轮机继续完 成后续任务具有重要意义<sup>[3]</sup>。

20世纪60年代美国国家航空与宇航管理局基于

涡轮增压器发展了一种微型燃气轮机发电装置,随后进一步研究了微型燃气轮机在航天飞机上的应用。 之后的几十年间,微型燃气轮机发电技术得到了迅速发展,在更多的领域得到了应用,成为了国内外的研究热点<sup>(4)</sup>。

虽然中国在微型燃气轮机发电方面与国外相比 还有很大差距,但是众多学者开展了大量的研究工 作。20世纪70年代,中国开发了功率为37、200 kW 等燃气轮机<sup>[5]</sup>。目前,微型燃气轮机的发展得到相当 的重视,前景甚为广阔。

为了提高微型燃气轮机系统的控制性能,需要建 立相应的数学模型,至今国内外已有很多针对微型燃 气轮机的建模与控制研究,传感器和气路的故障诊断

**收稿日期:**2019-11-20 **基金项目:**中央高校基本科研业务费(NS20200017)资助 作者简介:刘莹(1995),女,在读硕士研究生,研究方向为航空发动机建模及控制;E-mail:18351987175@163.com。

引用格式:刘莹,任雅浩,王继强,等.基于卡尔曼滤波器的容错控制和硬件在环验证[J].航空发动机,2021,47(增刊1):100-107. LIU Ying, REN Yahao, WANG Jiqiang, et al. Fault tolerant control and hardware-in-the-loop verification based on kalman filter[J]. Aeroengine, 2021,47(S1):100-107. 工作也有不少。Rowen等<sup>10</sup>用一阶线性环节和延迟环 节简单代替了特定工况下的微型燃气轮机部件特性, 但该形式不够完整准确: 姬芬竹等四以模块化方法建 立了微型燃气轮机各组件稳态数学模型以及起动和 停车的动态模型,并搭建了回热器模型;王朝蓬等<sup>[8]</sup> 建立了某型单轴微型燃气轮机的性能计算模型,基于 此数学模型研究了微型燃气轮机的稳态控制规律和 高度气候特性;陈鹏宇等99以稳态通用特性曲线为基 础搭建压气机和涡轮等部件,采用分段集总参数法对 回热器进行建模,研究了基于转速和温度的双闭环控 制策略下的微型燃气轮机稳态和动态性能。基于模 型和基于数据的故障诊断方法不仅广泛应用在航空 发动机上,在微型燃气轮机的气路故障和传感器故障 诊断方面的应用也比较成熟。张逸轩[10]以3轴燃气 轮机为研究对象,基于卡尔曼滤波算法有效诊断了包 含健康参数的气路故障;张兵凹也采用了基于卡尔曼 滤波器的方法对传感器恒偏差、渐变型和突变型故障 进行了有效诊断和隔离,但并未进行故障诊断之后的 容错控制研究。

本文基于1簇卡尔曼滤波器进行微型燃气轮机 传感器的容错控制,并在数字仿真的基础上将其在硬 件在环平台上进行了集成和验证。

# 1 T100微型燃气轮机建模

本文的研究对象为T100 微型燃气轮机<sup>1121</sup>,其部件结构如图1所示。T100主要由燃气涡轮发动机、发电机、电气系统、监控系统等组成。其中燃气涡轮发动机主要构件包括燃烧室、压气机、涡轮和回热器。



图1 T100 微型燃气轮机部件结构

在MATLAB/Simulink软件环境中搭建微型燃气 轮机的稳态及动态模型。考虑到后续需要进行模型 和控制方法在硬件在环平台的集成和验证,在此过程 中的传递和转换阶段容易出现错误,不易排查,因此 引入基于模型的设计(Model Based Design, MBD)方 法,利用该方法可以及时发现其中的缺陷并不断修正 和验证迭代,最后直接通过模型生成和移植可执行的 嵌入式代码进行集成和验证<sup>[13-14]</sup>,从而大幅提高工作 效率。MBD技术已经在汽车电子、航空发动机等领 域取得了广泛应用,具有较强的工程实用性<sup>[15]</sup>,

采用模块化的建模方式时需要考虑整体系统的 热力学计算方程和部件级的能量和流量平衡方程。 在分析气动热力学公式的同时,还需要通过通用特性 图修正,基于 MATLAB/Simulink 平台搭建 T100 微型 燃气轮机的部件级数学模型。根据设计点数据搭建 的模型在非设计点的数据会出现较大误差,需要对其 进行修正以提高其计算的可靠性。

将30%、40%、50%、70%、100%负载点处的压比、转速、涡轮出口温度的试验数据与动态模型仿真数据进行对比,如图2~7所示。



从图中可见,搭建的微型燃气轮机部件级模型仿 真数据与试验数据的误差保持在3.6%以内,因此该 模型满足数字仿真的精度需求,可保证基于此模型开 展的传感器故障诊断及容错控制研究具有较高的置 信度。



#### 2 传感器故障诊断

采用基于卡尔曼滤波器组的方法进行航空发动 机传感器的故障诊断,需要建立发动机的状态变量模 型。搭建完成的微型燃气轮机的非线性模型为

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = h(x, u) \end{cases}$$
(1)

式中:x为n维状态变量;y为m维输出变量;u为r维 控制变量。

在某一个稳态点(x<sub>0</sub>, u<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>)附近按照泰勒级数展 开,将非线性模型转化为线性模型

$$\begin{vmatrix} \Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta y = C\Delta x + D\Delta u \end{vmatrix}$$
(2)

式中: $\Delta x$ 为状态变量偏移值; $\Delta y$ 为输出变量偏移值;  $\Delta u$ 为控制变量偏移量;A为状态矩阵、B为输出矩阵; C为前馈矩阵;D为干扰矩阵。

微型燃气轮机模型主要考虑转子的转动惯性和 回热器的热惯性,因此选取转速*N*。和回热器壁面温 度*T*。作为状态变量,燃油量*W*,为控制变量,输出变量 选择T100模型中测量<sup>116</sup>的*N*。、*T*。、压气机出口温度*T*2、 涡轮出口温度*T*4、压气机出口压力*P*2、涡轮出口压力 *P*4、燃烧室入口温度*T*28、排气装置入口温度*T*48。

结合小扰动法和拟合法求解矩阵A、B、C、D<sup>[17]</sup>,即 先采用小扰动法得到系统矩阵的初值,再采用拟合法 进行修正,求解得到矩阵后还需要采用相似归一化的 方法对其进行处理,以避免各状态变量的数量级相差 过大。

微型燃气轮机的状态变量方程求解完成后,基于 卡尔曼滤波器进行传感器的故障诊断及容错控制。 卡尔曼滤波算法中的5个核心公式为

$$\hat{x}_{k}^{-} = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1}$$

$$P_{k}^{-} = AP_{k-1}A^{T} + Q$$

$$K_{k} = P_{k}^{-}H^{T}(HP_{k}^{-}H^{T} + R)^{-1}$$

$$\hat{x}_{k} = \hat{x}_{k}^{-} + K_{k}(z_{k} - H\hat{x}_{k}^{-})$$

$$P_{k} = (I - K_{k}H)P_{k}^{-}$$
(3)

针对 60%~100% 负载范围内的微型燃气轮机进 行传感器偏置和漂移2种情况的故障诊断研究。

传感器可能发生的故障多种多样,目前常用偏置 故障和漂移故障2种分类方法。

传感器偏置故障的数学表达式为

$$y_{out} = y_{in} + \Delta y$$
 (4)  
式中: $y_{out}$ 为变量输出值; $y_{in}$ 为变量输入值。

漂移故障的数学表达式为

$$y_{\rm out} = y_{\rm in} + k \left( t - t_0 \right) \tag{5}$$

式中:k为传感器测量值偏离正常值的速率;t<sub>0</sub>为传感器发生故障的时刻。

基于卡尔曼滤波器组的传感器故障诊断方法的 原理如图8所示。假设有m个传感器,则设计m+1个 卡尔曼滤波器,其中第0个卡尔曼滤波器利用所有的 m个可测参数偏离量,其余的m个滤波器每个都只利 用m-1个可测参数偏离量。以第i个卡尔曼滤波器为 例,其输入中包含了除第i个以外的其余m-1个可测 输出偏离量。因此,如果第i个传感器发生了故障,那 么只有第i个卡尔曼滤波器得到的估计结果是正确 的,因为其没有使用发生故障传感器的测量信息,而 其他的卡尔曼滤波器则都使用了故障传感器的信息, 因而估计结果都不同程度地偏离了实际情况。





卡尔曼滤波器的输入及滤波后的输出之差称为 残差,第*i*个卡尔曼滤波器的残差*e*为

$$e^{i} = \Delta y^{i} - \Delta y^{i}_{f} (i = 1, 2, \cdots, m)$$

$$(6)$$

式中: $\Delta y^i$ 为可测输出偏离量,是滤波器的输入; $\Delta y_j^i$ 为滤波后的可测输出偏离量。

由该残差计算残差的加权平方和为

$$W_{i} = \left(e^{i}\right)^{T} \cdot \left[\operatorname{diag}\left(\sigma^{i}\right)^{2}\right]^{-1} \cdot e^{i}$$

$$(7)$$

式中:n为采集样本数; o<sup>i</sup>为每个传感器的标准偏差, 是传感器本身特性及测量噪声的度量。

在*t*=40 s时刻对转速传感器分别施加 2% 的阶跃 突变和一定速率的斜坡信号以模拟偏置故障和漂移 故障,仿真结果如图9、10所示。

为了更接近下一步在硬件在环仿真平台的集成 验证环境,对每个传感器信号都分别添加白噪声,本文 选择方差为0.2的白噪声,仿真结果如图11、12所示。



当上文所设计的故障诊断系统诊断出转速信号 故障时,基于卡尔曼滤波器的原理,使用其他未发生 故障的传感器信号重构出转速信号送到PI控制器 中,实现闭环控制。

微型燃气轮机的离散状态空间方程为

$$x[n+1] = A[n]x[n] + B[n]u[n] + G[n]w[n]$$
  

$$y[n] = C[n]x[n] + D[n]u[n] + H[n]w[n] + v[n]$$
(8)

式中:w为系统噪声:v为测量噪声。

w和v满足

$$E[w[n]] = E[v[n]] = 0$$
(9)

$$E[w[n]w^{T}[n]] = Q[n]$$
(10)

$$E[v[n]v^{T}[n]] = R[n]$$
(11)

$$E[w[n]v^{T}[n]] = N[n]$$
(12)

式中:Q为过程噪声矩阵;R为观测噪声矩阵。

状态估计为

$$\hat{x}[n+1|n] = A[n]\hat{x}[n|n-1] + B[n]u[n] + L[n](y[n] - C[n]\hat{x}[n|n-1] - D[n]u[n])$$
(13)

卡尔曼滤波器增益通过离散Riccati方程求解

$$L[n] = (A[n]P[n]C^{T}[n] + \bar{N}[n]) \cdot (C[n]P[n]C^{T}[n] + \bar{R}[n])^{-1}$$
(14)

$$M[n] = P[n]C^{T}[n](C[n]P[n]C^{T}[n] + \bar{R}[n])^{-1} (15)$$

$$Z[n] + (I-M[n]C[n])P[n]) = M[n]C[n]^{T} + I$$

$$M[n]\overline{R}[n]M^{T}[n]$$
(16)

$$P[n+1] = (A[n] - \bar{N}[n]\bar{R}^{-1}[n]C[n])$$
  

$$Z(A[n] - \bar{N}[n]\bar{R}^{-1}[n]C[n])^{T} + (17)$$
  

$$\bar{Q}[n] - N[n]\bar{R}^{-1}[n]N^{T}[n]$$

式中:P为Riccati方程的解;Q为过程噪声矩阵;R为 观测噪声矩阵;单位矩阵I具有适当的维度,并且

$$\bar{Q}[n] = G[n]Q[n]G^{T}[n]$$
(18)

$$R[n] = R[n] + H[n]N[n] + N'[n]H'[n] + H[n]Q[n]H^{T}[n]$$

$$\overline{N}[n] = G[n](Q[n]H^{T}[n] + N[n])$$
(19)
$$P[n] = E[(x - \hat{x}[n|n - 1](x - \hat{x}[n|n - 1]^{T}]$$

$$Z[n] = E[(x - \hat{x}[n|n](x - \hat{x}[n|n]^{T}] \quad (20)$$

离散卡尔曼滤波器对当前状态估计使用延迟状态估计的形式,使用n - 1时刻的输入值u[n - 1]和测量值y[n - 1]估计状态 $\hat{x}[nln - 1]$ ,滤波器输出 $\hat{x}[nln - 1]$ 和式(13)中的一样,测量量估计值 $\hat{y}[nln - 1]$ 定义为

 $\hat{y}[n|n-1] = C[n]x[n|n-1] + D[n]u[n-1]$ (21) 从而估计当前时刻的转速变化量,对转速信号进

行重构,重构的转速信号为

$$N[n] = N_{ss}[n] + \hat{x}[n|n-1]$$
(22)

卡尔曼滤波器的增益矩阵 K采用离线计算,即首 先计算出固定负载点处的增益矩阵 K,在60%~100% 范围内的其他负载点处的增益矩阵 K则采用切换、插 值、基于 BP神经网络的方式得到。选取每8%负载1 个点进行试验,为了提高试验效率,再次选取每2% 负载1个点进行仿真试验,检验仿真精度,对比结果 如图13所示。



图 13 8% 与 2% 的切换方式仿真结果对比

从图中可见,每8%负载1个点与每2%负载1个 点的仿真结果误差不大,因此选取每8%负载1个点的 仿真方式,仍可满足精度要求,同时提高了试验效率。

除了选定的负载点处计算好的增益矩阵K,其他 负载点处的K另外采用插值和BP神经网络2种方法 求得,其中插值直接使用Simulink模块库中的Lookup Table模块,其原理与切换方法相同,选取每8%负 载和每2%负载1个点进行对比,仿真结果对比如图 14所示。



BP神经网络是一种按误差逆传播算法训练的多 层前馈网络,其结构包括1个输入层、1个输出层、1个 或多个隐含层。BP神经网络的学习规则是采用最速 下降法,通过方向传播不断调整网络的权值和阈值, 使网络的误差平方和最小。使用只含有1个隐含层 的简单3层BP神经网络模型,根据选定负载点的增 益矩阵K训练求得其他负载点的K。

切换、插值、BP神经网络3种方法的仿真结果如图15所示。



#### 4 FWorks集成及验证

数字控制系统主要包括数字电子控制器、执行机 构、传感器3大部件,三者的研发是分开进行的,导致 微型燃气轮机控制系统集成时需要反复迭代修改,且 硬件在环平台运行存在各种不明确的限制条件,因此 在进行 HIL 平台的集成之前需要先进行模型和算法 的可靠性验证,以降低排错的难度。开发微型燃气轮 机控制系统的全数字仿真平台进行模型和算法的仿 真将大大提高控制系统的研发效率,实现 HIL 平台与 FWorks(全权限数字电子控制系统协同设计综合平 台)之间代码的无缝移植。

### 4.1 FWorks平台简介

全数字仿真是用数学模型的形式表示微型燃气 轮机、数字电子控制器、执行机构等部件,并在计算机 中进行仿真。FWorks平台(全权限数字控制系统协 同设计综合平台)有2个主要功能:(1)实现多用户协同 设计功能,依靠 socket 网络通信实现;(2)给用户提供 控制逻辑和各部件的替换功能,依靠动态链接库技术 (Dynamic Link Library,简称DLL)实现<sup>[18]</sup>。全权限数字 电子控制系统仿真平台框架如图16所示。



图 16 FADEC 仿真平台框架

FWorks平台包括服务器端和客户端。服务器端包括模型库并具有网络连接、网络通信等功能,以提供发动机部件级模型给用户使用。客户端包括FADEC系统各部件模型库、FADEC系统基线模型,并具有网络通信、文件传输、人机交互等功能,以方便用户搭建FADEC系统模型,设计发动机控制逻辑。

#### 4.2 代码生成和集成

发动机模型应为C++编写的工程文件,以便于集成Windows socket通信程序。基于T-MATS搭建的T100微型燃气轮机模型在Simulink环境中运行,需要进行模型的格式转化。利用Code Generation工具将Simulink中的T100模型转化为C++代码,最终集成到FWorks平台的服务器模型库中。集成流程如图17所示。



图 17 代码生成集成流程

按照图中步骤便可以完成微型燃气轮机模型的代码生成和集成。

### 4.3 仿真结果

代码转换前后的转速仿真结果对比如图18所示。 从图中可见,Simulink仿真结果与FWorks仿真结果基 本一致,验证了代码生成的有效性。



## 5 HIL集成及验证

## 5.1 硬件在环平台简介

硬件在环仿真平台是将真实的数字电子控制器 引入微型燃气轮机闭环仿真中的一种实时仿真系统。 仿真回路中存在真实的控制系统可以大幅提高仿真 的置信度,弥补全数字仿真的不足。硬件在环仿真平 台的优点在于提高了微型燃气轮机控制系统的开发 效率,缩短了研发周期,降低了研发风险和成本,是微 型燃气轮机控制系统从理论研究到实际应用的关键 环节。

硬件在环仿真平台外 观如图19所示。

HIL平台主要由监视 工作台、仿真器和数字电



子控制器3部分组成。监图19 硬件在环仿真平台外观 视工作台包括主控计算机和综合测控计算机,用于显 示和记录发动机当前的工作状态、控制器的输入输出 和告警信息;仿真器主要包括模型计算机、信号调理 装置、数据采集系统、负载模拟装置和系统试验适配 装置(故障注入模块),可对发动机整个工作包线内的 稳态和动态特性进行模拟,模拟发动机真实的传感器 信号和控制器的执行机构信号,并进行采集和显示, 同时可对输入输出控制器信号进行故障注入仿真;数 字电子控制器即真实的物理硬件,可将设计的控制算 法下载至控制器中,并且该控制器具有双通道结构, 可对容错控制算法和通道切换进行仿真研究。

## 5.2 代码生成和集成

所采用的T100模型基于MATLAB/Simulink平台运行,在HIL平台运行时需要转换成dll的形式,前文在FWorks中集成的发动机模型和控制器已按照HIL

要求生成相应的dll文件,此处可直接使用。实现容 错控制算法在HIL仿真平台上的闭环试验,需要完成 设备开环标定、模型加载与通道配置、控制器加载与 通道配置等必备步骤。

### 5.3 仿真结果

在数字和HIL仿真中的转速重构信号对比如图 20所示。



从图中可见,HIL平台的仿真效果与Simulink的 相差无几,而其中误差产生的主要原因是HIL平台需 要进行信号转换和传感器信号调理,且信号调理板卡 存在过程噪声,基本验证了基于MBD方法的容错控 制算法在Simulink平台与HIL平台的一致性。

# 6 结论

本文为研究微型燃气轮机传感器故障诊断及容 错控制,对微型燃气轮机部件级数学模型进行线性 化,在状态变量方程的基础上设计基于卡尔曼滤波器 的故障诊断和信号重构模块,得到如下结论:

(1)数字仿真结果表明,基于1簇卡尔曼滤波器的方法能够有效地诊断出传感器故障并重构出正确的需求信号继续进行闭环控制。

(2)基于 MBD 的方法采用自动生成代码技术,将 微型燃气轮机模型和故障诊断及容错控制方法集成 到软件平台 FWorks 和硬件平台 HIL 进行验证。通过 对比仿真结果验证了代码生成的有效性,实现了从数 字仿真到硬件在环平台的无缝衔接。

#### 参考文献:

[1] 郭平生,唐贤健,潘士虎,等.冷热电联产中带抽燃气微型燃气轮机的建模与仿真[J].武汉理工大学学报,2010,34(6):1293-1296.
 GUO Pingsheng, TANG Xianjian, PAN Shihu, et al. Modeling and simu-

lation of a gas-extracted micro gas turbine in a combined cooling, heating and power generation [J].Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 34(6): 1293-1296. (in Chinese)

[2] 靳智平. 微型燃气轮机发电在我国的应用前景[J]. 电力学报, 2004, 19(2):95-97.

JIN Zhiping. Application prospects of microturbine in electric power industry of our country [J].Journal of Electric Power, 2004, 19(2):95–97. (in Chinese)

- [3] Kumar A, Viassolo D. Model-based fault tolerant control[R]. NASA-CR-2008-215273.
- [4] 余涛, 童家鹏. 微型燃气轮机发电系统的建模与仿真[J]. 电力系统 保护与控制, 2009, 37(3): 27-32.

YU Tao, TONG Jiapeng. Modeling and simulation of the microturbine generation system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (3):27-32.(in Chinese)

[5]谢哲.现阶段我国微型燃气轮机发展与应用推广[J].科技与创新, 2018(8):160-161.

XIE Zhe. The development and application promotion of micro gas turbines in my country at this stage [J]. Science and Technology & Innovation, 2018(8):160–161.(in Chinese)

- [6] Rowen W I.Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines[J].Journal of Engineering for Power, 1983, 105(4):865–869.
- [7] 姬芬竹,谷可帅,丁元章,等.电动汽车微型燃气轮机增强器性能仿 真与起动控制的研究[J].汽车工程,2016,38(6):661-668.
  JI Fenzhu, GU Keshuai, DING Yuanzhang, et al.A research on the performances simulation and start control of micro gas turbine range extender for electric vehicles[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(6): 661-668.(in Chinese)
- [8] 王朝蓬,陈玉春,赵强.微型燃气轮机稳态控制规律研究与特性计算[J].科学技术与工程,2010,10(9):2255-2259.
   WANG Chaopeng, CHEN Yuchun, ZHAO Qiang. Steady control law research and performance calculation of the micro turbine generator[J].

Science Technology and Engineering, 2010,  $10\,(9)$  : 2255–2259.(in Chinese)

[9]陈鹏宇,宋华.微型燃气轮机非线性建模与控制方法研究[C]//中国 自动化大会论文集.北京:中国自动化学会,2018:292-297.
CHEN Pengyu,SONG Hua. A research on nonlinear modeling and control strategy of microturbine [C]// China Academic Journal Electronic Publishing. Beijing: Chinese Association of Automation, 2018: 292-297.(in Chinese) [10] 张逸轩.基于卡尔曼滤波器方法的燃气轮机气路故障诊断研究 [D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.

ZHANG Yixuan. Research on gas path fault diagnosis of gas turbine based on Kalman filter[D].Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018.(in Chinese)

[11] 张兵.基于卡尔曼滤波器的燃气轮机故障诊断研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.

ZHANG Bing.Research on fault diagnosis of gas turbine based on Kalman filter[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016. (in Chinese)

[12] Malmquist A. Analysis of a gas turbine driven hybrid drive system for heavy vehicles[R].Sweden: Institutionen for elkraftteknik, 1999.

[13] 吴远盛,陈超,朱帅琦.基于MBD的某型发动机控制软件开发[J]. 航空兵器,2018(4):73-77.

WU Yuansheng, CHEN Chao, ZHU Shuaiqi. Development of a certain type of engine control software based on MBD[J]. Aero Weaponry, 2018(4):73-77.(in Chinese)

[14] 马恩,刘富荣,王鸿钧.基于 MBD 的商用航空发动机控制软件架构设计[J].航空计算技术,2013,43(6):95-99.
 MA En,LIU Furong, WANG Hongjun.Architecture design of commer-

cial aero-engine control system software[J]. Aeronautical Computing Technique, 2013,43(6):95–99. (in Chinese)

[15] 王建锋, 臧军, 姜殿文, 等. 基于模型的矢量喷管控制系统设计[J]. 航空发动机, 2017, 43(4):23-29.

WANG Jianfeng, ZANG Jun, JIANG Dianwen, et al. Design for vector nozzle control system based on model[J]. Aeroengine, 2017, 43 (4): 23–29.(in Chinese)

[16] Gaeta A D, Reale F, Chiariello F, et al.A dynamic model of a 100 KW micro gas turbine fueled with natural gas and hydrogen blends and its application n a hybrid energy grid[J]. Energy, 2017, 129:299–320.

[17] 蒲星星,刘尚明,周媛,等.重型燃气轮机分段线性化状态空间模型的建立[J].热力透平,2010,39(4):221-225.
PU Xingxing, LIU Shangming, ZHOU Yuan, et al. Heavy duty gas turbine modeling of piece-wise linear state space model[J].Thermal Tuebine, 2010,39(4):221-225.(in Chinese)

[18] Cao C, Shen J, Luo M C, et al. FWorks: an intergrated digital simulation platform for FADEC systems[C]// Proceedings of the 36th Chinese Control Conference. Liaoning. Dalian: Technical Committee on Control theory, Chinese Association of Automation ,2017 :26–28.

(编辑:刘 静)