



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115702288 A

(43) 申请公布日 2023. 02. 14

(21) 申请号 202180042708.1

宫川修二郎 宫地健

(22) 申请日 2021.07.06

(74) 专利代理机构 上海立群专利代理事务所

(30) 优先权数据

(普通合伙) 31291

2020-116438 2020.07.06 JP

专利代理师 杨楷 毛立群

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

(51) Int.Cl.

2022.12.12

F02D 45/00 (2006.01)

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2021/025526 2021.07.06

(87) PCT国际申请的公布数据

W02022/009904 JA 2022.01.13

(71) 申请人 国立研究开发法人海上·港湾·航

空技术研究所

地址 日本国东京都

申请人 三井易艾斯机械有限公司

(72) 发明人 奥雷克谢·邦达伦科 福田哲吾

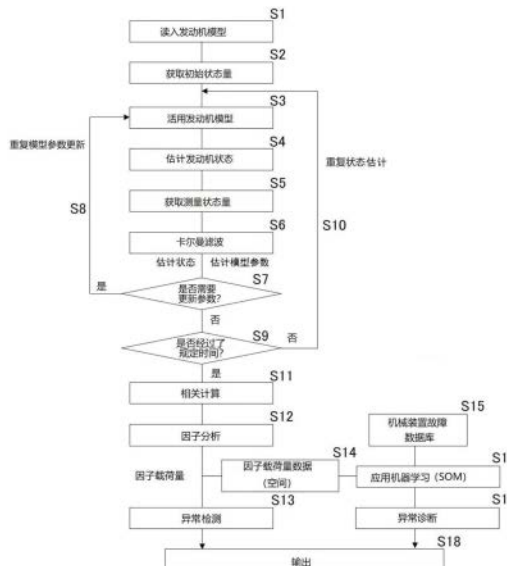
权利要求书2页 说明书12页 附图12页

(54) 发明名称

发动机的异常诊断方法、发动机的异常诊断程序及发动机的异常诊断系统

(57) 摘要

本发明的发动机的异常诊断方法、发动机的异常诊断程序及发动机的异常诊断系统执行以下步骤:步骤(S2):获取发动机模型(10)的初始状态量;步骤(S3),应用初始状态量并活用发动机模型(10);步骤(S4),得到估计状态量;步骤(S5),获取测量状态量;步骤(S6),将测量状态量与估计状态量的残差施加到非线性卡尔曼滤波器;步骤(S10),将卡尔曼增益应用于发动机模型(10)并重复步骤(S4)~(S6);步骤(S11),计算测量状态量或残差的相关;步骤(S12),进行因子分析,求出因子载荷量;步骤(S13),计算因子得分,检测异常;步骤(S16),将因子载荷量应用于机器学习;步骤(S17),基于机器学习诊断异常;步骤(S18),输出诊断结果。



1. 一种发动机的异常诊断方法,是使用数学的发动机模型对发动机的异常进行异常诊断的方法,其特征在于,执行以下步骤:

初始状态量获取步骤,获取所述发动机模型的初始状态量;

发动机模型活用步骤,将所述初始状态量应用于所述发动机模型并活用所述发动机模型;

发动机状态估计步骤,利用所述发动机模型基于所述初始状态量计算所述发动机的状态并得到估计状态量;

测量状态量获取步骤,获取所述发动机的测量状态量;

卡尔曼滤波步骤,将获取的所述测量状态量与计算出的所述估计状态量的残差施加到非线性卡尔曼滤波器;

重复步骤,将施加到所述非线性卡尔曼滤波器而得到的卡尔曼增益应用于所述发动机模型,重复所述发动机状态估计步骤、所述测量状态量获取步骤、所述卡尔曼滤波步骤;

相关计算步骤,计算施加到所述非线性卡尔曼滤波器时的所述测量状态量或者所述残差的相关;

因子分析步骤,对所述测量状态量或者所述残差的所述相关进行因子分析,求出因子载荷量;

异常检测步骤,根据所述因子载荷量计算因子得分,对所述异常进行检测;

机器学习应用步骤,将所述因子载荷量应用于机器学习;

异常诊断步骤,基于所述机器学习对所述异常进行诊断;

输出步骤,输出包含所述发动机的所述异常的诊断结果的异常信息。

2. 如权利要求1所述的发动机的异常诊断方法,其特征在于,进一步执行模型更新步骤,将在所述卡尔曼滤波步骤中得到的结果、或者对所获取的所述测量状态量进行处理而得的结果应用于所述发动机模型活用步骤,更新所述发动机模型。

3. 如权利要求1或权利要求2所述的发动机的异常诊断方法,其特征在于,基于相关矩阵进行所述相关计算步骤中的所述测量状态量或所述残差的所述相关的计算。

4. 如权利要求3所述的发动机的异常诊断方法,其特征在于,在所述因子分析步骤中基于作为所述相关矩阵的协方差矩阵来进行奇异值分解即SVD,从而导出所述因子载荷量。

5. 如权利要求1~4的任一项所述的发动机的异常诊断方法,其特征在于,所述机器学习使用自组织映射即SOM。

6. 如权利要求1~5的任一项所述的发动机的异常诊断方法,其特征在于,在所述初始状态量获取步骤中获取的所述初始状态量是所述发动机的载荷( $Q_p$ )与包含燃料泵齿条位置( $h_p$ )的燃料供给量。

7. 如权利要求1~6的任一项所述的发动机的异常诊断方法,其特征在于,在所述测量状态量获取步骤中获取的所述测量状态量是所述发动机的转速( $n_e$ )。

8. 如权利要求1~7的任一项所述的发动机的异常诊断方法,其特征在于,得到增压器转速( $n_{tc}$ )、扫气压力( $P_s$ )、扫气温度( $T_s$ )及排气温度( $T_e$ )作为所述发动机状态估计步骤的所述估计状态量。

9. 一种发动机的异常诊断程序,是使用数学的发动机模型对发动机的异常进行异常诊断的程序,其特征在于,

使计算机执行权利要求1~8的任一项所述的发动机的异常诊断方法中的所述初始状态量获取步骤、所述发动机模型活用步骤、所述发动机状态估计步骤、所述测量状态量获取步骤、所述卡尔曼滤波步骤、所述重复步骤、所述相关计算步骤、所述因子分析步骤、所述异常检测步骤、所述机器学习应用步骤、所述异常诊断步骤及所述输出步骤。

10. 一种发动机的异常诊断系统,其特征在於,具备:

发动机;

条件输入单元,输入发动机模型的初始状态量;

状态量测量单元,测量所述发动机的状态并得到测量状态量;

计算机,执行权利要求1~8的任一项所述的发动机的异常诊断方法或权利要求9所述的发动机的异常诊断程序;

信息提供单元,提供由所述计算机输出的包含所述发动机的异常的诊断结果的异常信息。

11. 如权利要求10所述的发动机的异常诊断系统,其特征在於,通过所述计算机进行所述发动机模型的更新。

12. 如权利要求10或权利要求11所述的发动机的异常诊断系统,其特征在於,通过所述状态量测量单元得到所述发动机的转速( $n_e$ )作为所述测量状态量。

13. 如权利要求10~12的任一项所述的发动机的异常诊断系统,其特征在於,通过所述信息提供单元提供所述发动机的增压器转速( $n_{tc}$ )、扫气压力( $P_s$ )、扫气温度( $T_s$ )及排气温度( $T_e$ )中的至少1个的结果作为所述异常的诊断结果。

14. 如权利要求10~13的任一项所述的发动机的异常诊断系统,其特征在於,具备异常时控制单元,基于所述异常信息的所述输出,在异常时控制所述发动机。

15. 如权利要求10~14的任一项所述的发动机的异常诊断系统,其特征在於,使用人机交互单元作为所述信息提供单元来提供所述异常信息。

16. 如权利要求10~15的任一项所述的发动机的异常诊断系统,其特征在於,具备发送单元,将由所述信息提供单元提供的所述异常信息发送至其他地方。

17. 如权利要求10~16的任一项所述的发动机的异常诊断系统,其特征在於,具备连接单元,将所述状态量测量单元、所述计算机与所述信息提供单元在线连接。

## 发动机的异常诊断方法、发动机的异常诊断程序及发动机的异常诊断系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及使用数学的发动机模型来对发动机的异常进行异常诊断的发动机的异常诊断方法、发动机的异常诊断程序及发动机的异常诊断系统。

### 背景技术

[0002] 从安全方面、效率方面等观点出发,在早期检测搭载于船舶等的发动机的异常至关重要。

[0003] 在此,在专利文献1中,公开有一种燃气涡轮发动机的性能估计系统,利用由在发动机的某动作点中设计为最优的卡尔曼滤波器增益与忠实地模型化了实机发动机的非线性动态仿真模型构成的恒定增益扩展卡尔曼滤波器(CGKEKF),在观测变量与观测变量估计值之间产生差的情况下,通过对构成模型的状态变量的一部分的调参进行调整以使该差最小,从而将该非线性动态仿真模型制成始终相对于实机忠实的模型。此外,在段落0010中,记载有发动机性能估计系统及方法,通过发动机的非线性动态仿真模型与估计滤波器,始终估计、检测与监控由于发动机使用引起的经年变化或损伤引起的性能劣化。

[0004] 此外,在专利文献2中,公开有一种系统,是用于在飞机飞行中实时决定飞机的飞行参数的系统,基于确定飞机的应被估计的至少2个事前选择的飞行参数之间的相互依赖关系的飞行力学方程式而构成,包含形成为在飞机的飞行中提供所选择的飞行参数的联合估计值的扩展卡尔曼滤波器。

[0005] 此外,在专利文献3中,公开有一种卡尔曼滤波器,构成为在控制器的各执行周期中向控制器提供新的过程变量估计以能够由控制器生成用于控制过程的控制信号,并根据缓慢或间歇的过程反馈信号来产生过程变量值的估计。

[0006] 现有技术文献

[0007] 专利文献

[0008] 专利文献1:日本特开2009-68359号公报

[0009] 专利文献2:日本特开2013-49408号公报

[0010] 专利文献3:日本特开2018-88289号公报

### 发明内容

[0011] 发明要解决的技术问题

[0012] 在专利文献1中,如段落0005中的记载“可以成为充分反映了使可测量项目与无法测量项目之间的相关关系变化的经年劣化或损伤等的影响的高精度的非线性动态仿真模型”所述,专利文献1是依次调谐非线性动态仿真模型,根据可测量项目估计发动机的无法测量项目,使用该估计结果控制燃气涡轮发动机的发明,而并非进行发动机的异常的早期检测及其原因的诊断的发明。

[0013] 专利文献2是通过扩展卡尔曼滤波器同时估计由飞行力学方程式相互关联的至少

两个飞行参数并用于飞机的飞行控制的发明,而并非进行发动机的异常的早期检测及其原因的诊断的发明。

[0014] 专利文献3是涉及化学过程或石油过程等的过程控制系统中的卡尔曼滤波器的改善的发明,而并非进行发动机的异常的早期检测及其原因的诊断的发明。

[0015] 因此,本发明的目的在于提供一种能够进行发动机的异常的早期检测及其原因的诊断的发动机的异常诊断方法、发动机的异常诊断程序及发动机的异常诊断系统。

[0016] 用于解决上述技术问题的方案

[0017] 与方案1的记载对应的发动机的异常诊断方法,是使用数学的发动机模型对发动机的异常进行异常诊断的方法,其特征在于,执行以下步骤:初始状态量获取步骤,获取发动机模型的初始状态量;发动机模型活用步骤,将初始状态量应用于发动机模型并活用发动机模型;发动机状态估计步骤,利用发动机模型基于初始状态量计算发动机的状态并得到估计状态量;测量状态量获取步骤,获取发动机的测量状态量;卡尔曼滤波步骤,将获取的测量状态量与计算出的估计状态量的残差施加到非线性卡尔曼滤波器;重复步骤,将施加到非线性卡尔曼滤波器而得到的卡尔曼增益应用于发动机模型,重复发动机状态估计步骤、测量状态量获取步骤、卡尔曼滤波步骤;相关计算步骤,计算施加到非线性卡尔曼滤波器时的测量状态量或者残差的相关;因子分析步骤,对测量状态量或残差的相关进行因子分析,求出因子载荷量;异常检测步骤,根据因子载荷量计算因子得分并检测异常;机器学习应用步骤,将因子载荷量应用于机器学习;异常诊断步骤,基于机器学习诊断异常;输出步骤,输出包含发动机的异常的诊断结果的异常信息。

[0018] 根据方案1记载的本发明,能够通过利用测量状态量、或者测量状态量与计算出的估计状态量的残差来进行因子分析,基于计算出的因子得分早期地检测发动机的异常。此外,能够将因子载荷量应用于机器学习来诊断发动机的异常的原因。

[0019] 方案2所记载的本发明的特征在于,进一步执行模型更新步骤,将在卡尔曼滤波步骤中得到的结果、或者对所获取的测量状态量进行处理而得的结果应用于发动机模型活用步骤,更新发动机模型。

[0020] 根据方案2所记载的本发明,能够更新发动机模型并将估计状态量的计算精度始终保持为较高的状态。

[0021] 方案3所记载的本发明的特征在于,基于相关矩阵进行相关计算步骤中的测量状态量或残差的相关的计算。

[0022] 根据方案3所记载的本发明,能够通过简单的计算提高测量状态量或残差的相关的计算精度。

[0023] 方案4所记载的本发明的特征在于,在因子分析步骤中,基于作为相关矩阵的协方差矩阵来进行奇异值分解(SVD),从而导出因子载荷量。

[0024] 根据方案4所记载的本发明,能够不受协方差矩阵的形状所限制而提取出本质上的重要的内容,早期地检测发动机的异常。

[0025] 方案5所记载的本发明的特征在于,机器学习使用自组织映射(SOM)。

[0026] 根据方案5所记载的本发明,能够利用作为无监督机器学习的自组织映射(SOM)对发动机的异常的原因进行分类。

[0027] 方案6所记载的本发明的特征在于,在初始状态量获取步骤中获取的初始状态量

是发动机的载荷( $Q_p$ )与包含燃料泵齿条位置( $h_p$ )的燃料供给量。

[0028] 根据方案6所记载的本发明,能够基于在估计发动机的状态中至关重要的发动机的载荷( $Q_p$ )与包含燃料泵齿条位置( $h_p$ )的燃料供给量,得到估计状态量。

[0029] 方案7所记载的本发明的特征在于,在测量状态量获取步骤中获取的测量状态量是发动机的转速( $n_e$ )。

[0030] 根据方案7所记载的本发明,能够将对发动机而言测量的机会较多的发动机的转速( $n_e$ )用于发动机的异常诊断,还能够提高测量精度。

[0031] 方案8所记载的本发明的特征在于,得到增压器转速( $n_{tc}$ )、扫气压力( $P_s$ )、扫气温度( $T_s$ )及排气温度( $T_e$ )作为发动机状态估计步骤的估计状态量。

[0032] 根据方案8所记载的本发明,能够得到对于在估计发动机的状态中有用的增压器转速( $n_{tc}$ )、扫气压力( $P_s$ )、扫气温度( $T_s$ )、或者排气温度( $T_e$ )的诊断结果。

[0033] 与方案9的记载对应的发动机的异常诊断程序,是使用数学的发动机模型对发动机的异常进行异常诊断的程序,其特征在于,使计算机执行发动机的异常诊断方法中的初始状态量获取步骤、发动机模型活用步骤、发动机状态估计步骤、测量状态量获取步骤、卡尔曼滤波步骤、重复步骤、相关计算步骤、因子分析步骤、异常检测步骤、机器学习应用步骤、异常诊断步骤及输出步骤。

[0034] 根据方案9所记载的发明,能够通过利用测量状态量、或者测量状态量与计算出的估计状态量的残差来进行因子分析,基于计算出的因子得分早期地检测发动机的异常。此外,能够将因子载荷量应用于机器学习来诊断发动机的异常的原因。

[0035] 与方案10的记载对应的发动机的异常诊断系统,其特征在于,具备:发动机;条件输入单元,输入发动机模型的初始状态量;状态量测量单元,测量发动机的状态并得到测量状态量;计算机,执行发动机的异常诊断方法、或者发动机的异常诊断程序;信息提供单元,提供由计算机输出的包含发动机的异常的诊断结果的异常信息。

[0036] 根据方案10所记载的本发明,能够利用计算机提供包含进行发动机的异常的早期检测及其原因的诊断的结果的异常信息。

[0037] 方案11所记载的本发明的特征在于,通过计算机进行发动机模型的更新。

[0038] 根据方案11所记载的本发明,通过计算机更新发动机模型,由此能够容易地提高估计状态量的计算精度。

[0039] 方案12所记载的本发明的特征在于,通过状态量测量单元得到发动机的转速( $n_e$ )作为测量状态量。

[0040] 根据方案12所记载的本发明,能够将对发动机而言测量的机会较多的发动机的转速( $n_e$ )用于发动机的异常诊断,还能够提高测量精度。

[0041] 方案13所记载的本发明的特征在于,通过信息提供单元提供发动机的增压器转速( $n_{tc}$ )、扫气压力( $P_s$ )、扫气温度( $T_s$ )及排气温度( $T_e$ )中的至少1个的结果作为异常的诊断结果。

[0042] 根据方案13所记载的本发明,能够得到对于在估计发动机的状态中有用的增压器转速( $n_{tc}$ )、扫气压力( $P_s$ )、扫气温度( $T_s$ )、或者排气温度( $T_e$ )的诊断结果。

[0043] 方案14所记载的本发明的特征在于,具备异常时控制单元,基于异常信息的输出,在异常时控制发动机。

[0044] 根据方案14所记载的本发明,通过在异常时控制发动机,能够防止发动机的异常变严重或导致故障。

[0045] 方案15所记载的本发明的特征在于,使用人机交互单元作为信息提供单元来提供异常信息。

[0046] 根据方案15所记载的本发明,通过从人机交互单元提供发动机的异常信息,船员等能在异常时迅速且适当地进行应对。

[0047] 方案16记载的本发明的特征在于,具备发送单元,将由信息提供单元提供的异常信息发送至其他地方。

[0048] 根据方案16所记载的本发明,即使在远离发动机的场所也能够实时地获知包含发动机的异常的诊断结果。

[0049] 方案17所记载的本发明的特征在于,具备连接单元,将状态量测量单元、计算机与信息提供单元在线连接。

[0050] 根据方案17所记载的本发明,能够在线实时地传输并提供包含发动机的异常的诊断结果。

[0051] 发明效果

[0052] 根据本发明的发动机的异常诊断程序,能够通过利用测量状态量、或者测量状态量与计算出的估计状态量的残差来进行因子分析,基于计算出的因子得分早期地检测发动机的异常。此外,能够将因子载荷量应用于机器学习来诊断发动机的异常的原因。

[0053] 此外,在进一步执行将在卡尔曼滤波步骤中得到的结果、或者对所获取的测量状态量进行处理而得的结果应用于发动机模型活用步骤从而更新发动机模型的模型更新步骤的情况下,能够更新发动机模型从而将估计状态量的计算精度始终保持在较高的状态。

[0054] 此外,在基于相关矩阵进行相关计算步骤中的残差的相关的计算的情况下,能够通过简单的计算提高测量状态量或残差的相关的计算精度。

[0055] 此外,在因子分析步骤中,基于作为相关矩阵的协方差矩阵来进行奇异值分解(SVD),从而导出因子载荷量的情况下,能够不受协方差矩阵的形状所限制而提取出本质上重要的内容,早期地检测发动机的异常。

[0056] 此外,在使用自组织映射(SOM)作为机器学习的情况下,能够利用作为无监督机器学习的自组织映射(SOM)对发动机的异常的原因进行分类。

[0057] 此外,在初始状态量获取步骤中获取的初始状态量是发动机的载荷( $Q_p$ )与包含燃料泵齿条位置( $h_p$ )的燃料供给量的情况下,能够基于在估计发动机的状态中至关重要的发动机的载荷( $Q_p$ )与包含燃料泵齿条位置( $h_p$ )的燃料供给量,得到估计状态量。

[0058] 此外,在测量状态量获取步骤中获取的测量状态量是发动机的转速( $n_e$ )的情况下,能够将对发动机而言测量的机会较多的发动机的转速( $n_e$ )用于发动机的异常诊断,还能够提高测量精度。

[0059] 此外,在得到增压器转速( $n_{tc}$ )、扫气压力( $P_s$ )、扫气温度( $T_s$ )及排气温度( $T_e$ )作为发动机状态估计步骤的估计状态量的情况下,能够得到对于在估计发动机的状态中有用的增压器转速( $n_{tc}$ )、扫气压力( $P_s$ )、扫气温度( $T_s$ )、或者排气温度( $T_e$ )的诊断结果。

[0060] 此外,根据本发明的发动机的异常诊断程序,能够通过利用测量状态量、或者测量状态量与计算出的估计状态量的残差来进行因子分析,基于计算出的因子得分早期地检测

发动机的异常。此外,能够将因子载荷量应用于机器学习来诊断发动机的异常的原因。

[0061] 此外,根据本发明的发动机的异常诊断系统,能够利用计算机提供包含进行发动机的异常的早期检测及其原因的诊断的结果的异常信息。

[0062] 此外,在通过计算机进行发动机模型的更新的情况下,通过计算机更新发动机模型,由此能够容易地提高估计状态量的计算精度。

[0063] 此外,在通过状态量测量单元得到发动机的转速( $n_e$ )作为测量状态量的情况下,能够将对发动机而言测量的机会较多的发动机的转速( $n_e$ )用于发动机的异常诊断,还能够提高测量精度。

[0064] 此外,在通过信息提供单元提供发动机的增压器转速( $n_{tc}$ )、扫气压力( $P_s$ )、扫气温度( $T_s$ )及排气温度( $T_e$ )中的至少1个的结果作为异常的诊断结果的情况下,能够得到对于在估计发动机的状态中有用的增压器转速( $n_{tc}$ )、扫气压力( $P_s$ )、扫气温度( $T_s$ )、或者排气温度( $T_e$ )的诊断结果。

[0065] 此外,在具备基于异常信息的输出,在异常时控制发动机的异常时控制单元的情况下,通过在异常时控制发动机,能够防止发动机的异常变严重或导致故障。

[0066] 此外,在使用人机交互单元作为信息提供单元来提供异常信息的情况下,通过从人机交互单元提供发动机的异常信息,船员等能在异常时迅速且适当地进行应对。

[0067] 此外,在具备将由信息提供单元提供的异常信息发送至其他地方的发送单元的情况下,即使在远离发动机的场所也能够实时地获知包含发动机的异常的诊断结果。

[0068] 此外,在具备将状态量测量单元、计算机与信息提供单元在线连接的连接单元的情况下,能够在线实时地传输并提供包含发动机的异常的诊断结果。

## 附图说明

[0069] 图1是本发明的实施方式的发动机的异常诊断系统的方框图。

[0070] 图2是其发动机的异常诊断程序的流程图。

[0071] 图3是其发动机的异常诊断的概要图。

[0072] 图4是其因子分析的概念图。

[0073] 图5是示出其使用测量数据进行因子分析的例子图。

[0074] 图6是示出其因子得分的例子图。

[0075] 图7是示出其各测量值的因子载荷量的变化的图。

[0076] 图8是示出其发动机的数学模型的例子图。

[0077] 图9是示出其发动机模型的参数的图。

[0078] 图10是示出其卡尔曼滤波器的预测(估计)步骤与更新(校正)步骤的概念与计算式的图。

[0079] 图11是示出其卡尔曼滤波器与因子分析的关系的图。

[0080] 图12是示出其通过因子得分而进行异常检测的例子图。

## 具体实施方式

[0081] 下面对本发明的实施方式的发动机的异常诊断方法、发动机的异常诊断程序及发动机的异常诊断系统进行说明。



[0082] 图1是发动机的异常诊断系统的方框图。

[0083] 发动机的异常诊断系统使用数学的发动机模型10对搭载于船舶等的发动机1的异常进行诊断。

[0084] 发动机的异常诊断系统具备:条件输入单元2,输入发动机模型10的初始状态量;状态量测量单元3,测量发动机1的状态并得到测量状态量;计算机4,执行发动机的异常诊断方法或程序;信息提供单元(人机交互单元:HMI)5,提供由计算机4输出的包含发动机1的异常的诊断结果的异常信息;异常时控制单元6,基于异常信息的输出,在异常时控制发动机1;发送单元7,将由信息提供单元5提供的异常信息发送至其他地方;及连接单元8,将各设备在线连接。发动机模型10优选与发动机1相对应并从一开始就装入计算机4,但是例如在与船舶的维护等相关联地使发动机1的一部分或全部变更为不同的状态的情况下,也可以经由条件输入单元2等在中途进行变更。

[0085] 连接单元8例如是路由器或LAN等,将状态量测量单元3、计算机4、信息提供单元5在线连接。由此,能够在线实时地传输并提供包含发动机1的异常的诊断结果。另外,在线连接能够经由连接单元8而利用无线、有线的任一种。

[0086] 发送单元7设置在计算机4中。此外,计算机4具备控制部11、初始状态量获取部12、发动机状态估计部13、测量状态量获取部14、卡尔曼滤波部15、重复部16、相关计算部17、因子分析部18、异常检测部19、机器学习应用部20、异常诊断部21、发动机模型更新部22、主存储器23、辅助存储器24、发动机模型活用部27、输出部28等。

[0087] 辅助存储器24例如是硬盘等。在辅助存储器24中保存有发动机模型10、因子载荷量空间25及机械装置故障数据库26。发动机模型10是基于发动机1的规格及特性而预先构筑的模型。在因子载荷量空间25中,从检测出发动机1的异常后累积因子载荷量数据。此外,在机械装置故障数据库26中,汇集有通过模拟程序进行发动机1的故障的模拟而收集的数据。另外,在存在实际发生故障时的发动机状态值的情况下,也能够将该发动机状态值汇集到机械装置故障数据库26中。

[0088] 条件输入单元2是鼠标、键盘及触摸面板等。计算机4的操作者或者用户101使用条件输入单元2输入初始状态量。作为初始状态量,优选输入发动机1的载荷( $Q_p$ )和包含燃料泵齿条位置( $h_p$ )的燃料供给量。由此,能够基于在估计发动机1的状态中至关重要的发动机1的载荷( $Q_p$ )与包含燃料泵齿条位置( $h_p$ )的燃料供给量,得到估计状态量。所输入的初始状态量被发送到计算机4的初始状态量获取部12而获取。此外,在运行条件变化到足以使发动机模型10变化时,也能够通过条件输入单元2输入条件信号。

[0089] 状态量测量单元3是各种传感器等。在状态量测量单元3中,优选得到发动机1的转速( $n_e$ )作为测量状态量。由此,能够将对发动机1而言测量的机会较多的发动机1的转速( $n_e$ )用于发动机1的异常诊断,还能够提高测量精度。另外,作为由状态量测量单元3测量的测量状态量,除此之外还有例如发动机1的扫气压力( $P_s$ )、排气温度( $T_e$ )及发动机1的载荷( $Q_p$ )等。由状态量测量单元3测量的测量状态量被发送到计算机4的测量状态量获取部14。此外,作为测量状态量,除了测量值本身以外,也可以是测量值的某个期间的平均值或与平均值的差等基于测量值进行处理而得的值。

[0090] 输出部28将由计算机4得到的发动机1的诊断结果输出到发送单元7、信息提供单元(人机交互单元)5及异常时控制单元6。

- [0091] 另外,信息提供单元5、异常时控制单元6及发送单元7也能设置在计算机4的外部。
- [0092] 信息提供单元5优选提供发动机1的增压器转速( $n_{tc}$ )、扫气压力( $P_s$ )、扫气温度( $T_s$ )及排气温度( $T_e$ )中的至少1个的结果作为发动机1的异常的诊断结果。由此,能够得到对于在估计发动机1的状态中有用的增压器转速( $n_{tc}$ )、扫气压力( $P_s$ )、扫气温度( $T_s$ )、或者排气温度( $T_e$ )的诊断结果。此外,信息提供单元5不仅能提供发动机1的异常的诊断结果,还能提供包含异常检测信息的所有与异常相关联的信息。
- [0093] 发送单元7经由连接单元8通过有线或无线LAN将被输出的诊断结果发送到设置在与计算机4不同的场所的设备。由此,即使在远离发动机1的场所也能够实时地获知包含发动机1的异常的诊断结果的异常信息。另外,在图1中,作为接收异常信息的地方,示出了桥100及船公司等陆地上的用户101。例如,在计算机4处于轮机舱的情况下,信息提供单元5通过船内LAN将异常信息发送到桥100。
- [0094] 信息提供单元(人机交互单元)5例如是监视器、扬声器等。通过从信息提供单元(人机交互单元)5提供发动机1的异常信息,船员等能在异常时迅速且适当地进行应对。此外,在信息提供单元5中,除了人机交互单元以外,还包括暂时储存异常信息的存储单元、将异常信息传输至例如智能手机的传输单元等所有与信息的提供相关的单元。
- [0095] 异常时控制单元6基于异常检测结果或异常的诊断结果在异常时自动或者根据来自船员的操作来控制发动机1。通过在异常时控制发动机1,能够防止发动机1的异常变严重或导致故障。另外,向异常时控制单元6提供的信息或信号也可以是提供给信息提供单元5的信息的未加工的信息或信号。
- [0096] 图2是发动机的异常诊断方法的流程图,图3是发动机的异常诊断的概要图。另外,由于发动机的异常诊断方法能作为程序来提供,因此下面将发动机的异常诊断程序作为使计算机执行发动机的异常诊断方法中的各步骤的程序进行说明。
- [0097] 若个人计算机开始执行发动机的异常诊断程序,则控制部11读入存储在辅助存储器24中的发动机模型10(发动机模型读入步骤S1)。
- [0098] 在发动机模型读入步骤S1之后,初始状态量获取部12获取由条件输入单元2输入的发动机模型10的初始状态量(初始状态量获取步骤S2)。
- [0099] 在初始状态量获取步骤S2之后,控制部11在发动机模型活用部27中对所读入的发动机模型10应用初始状态量并活用发动机模型10(发动机模型活用步骤S3)。在发动机模型活用步骤S3中,进行发动机模型10的初始设定或更新。为了使用发动机模型10,需要应用任意的初始状态量,只要在活用发动机模型10的发动机模型活用步骤S3中应用尽可能接近当前的状态的初始状态量(例如载荷或燃料量),则可实现在发动机模型10中的计算时间变少、根据发动机模型10进行的估计计算的精度提高等发动机模型10的活用。此外,通过在发动机模型活用步骤S3中活用在卡尔曼滤波步骤S6中的残差的输入、或者对所获取的测量状态量进行处理而得的结果,可进行发动机模型10的更新,发动机模型10忠实地再现实物的发动机1而实现活用。
- [0100] 发动机状态估计部13利用发动机模型10基于初始状态量计算发动机1的状态并得到估计状态量(发动机状态估计步骤S4)。
- [0101] 此外,测量状态量获取部14获取通过由状态量测量单元3进行的测量而得到的发动机1的测量状态量(测量状态量获取步骤S5)。

[0102] 卡尔曼滤波部15将获取的测量状态量与计算出的估计状态量的残差输入至非线性卡尔曼滤波器(卡尔曼滤波步骤S6)。在卡尔曼滤波步骤S6中,进行状态估计与模型参数的估计。

[0103] 在卡尔曼滤波步骤S6之后,发动机模型更新部22判定是否需要更新发动机模型10(模型更新判定步骤S7)。

[0104] 发动机模型更新部22在模型更新判定步骤S7中判定为“是”、即需要更新发动机模型10的情况下,将在卡尔曼滤波步骤S6中得到的结果或者对所获取的测量状态量进行处理而得的结果应用于发动机模型活用步骤S3,通过更新模型参数来更新发动机模型10(模型更新步骤S8)。通过更新发动机模型10,能够与发动机1的经年劣化等相对应地将估计状态量的计算精度始终保持为较高的状态。此外,通过计算机4更新发动机模型10,由此能够容易地提高估计状态量的计算精度。模型更新判定步骤S7中的判定是通过预先对模型参数设定阈值来进行的。

[0105] 另一方面,在模型更新判定步骤S7中判定为“否”、即由发动机模型更新部22判定无需更新发动机模型10的情况下,重复部16判定是否经过了规定的时间(时间经过判定步骤S9)。重复部16例如以0.1秒等的时间划分,以 $k$ 、 $k+1$ 、 $k+2$ …重复进行。

[0106] 重复部16在时间经过判定步骤S9中判定为“否”、即未经过规定的时间的情况下,将输入至非线性卡尔曼滤波器得到的卡尔曼增益应用于发动机模型10,重复进行发动机状态估计步骤S4、测量状态量获取步骤S5、卡尔曼滤波步骤S6(重复步骤S10)。

[0107] 这样,使用状态估计与模型参数估计这样的卡尔曼滤波器的两个功能,重复进行发动机模型10的更新与状态估计。另外,在测量状态量可靠的情况下,使用跟踪滤波器来鉴定模型参数,卡尔曼滤波器也能够仅进行状态估计。

[0108] 此外,非线性卡尔曼滤波器优选设为无迹卡尔曼滤波器或者扩展卡尔曼滤波器。由此,能够使卡尔曼增益对于作为非线性系统的发动机1而言更加适当,提高估计状态量的计算精度。

[0109] 另一方面,在时间经过判定步骤S9中判定为“是”、即重复部16判定为经过了规定的时间的情况下,相关计算部17计算在向非线性卡尔曼滤波器进行输入时得到的残差的相关(相关计算步骤S11)。相关计算步骤S11中的残差的相关的计算优选基于相关矩阵进行。由此,能够通过简单的计算提高残差的相关的计算精度。

[0110] 另外,也能够使用所获取的测量状态量代替向非线性卡尔曼滤波器进行输入时得到的残差来计算相关。

[0111] 在相关计算步骤S11之后,因子分析部18对残差的相关进行因子分析,求出因子载荷量(因子分析步骤S12)。

[0112] 另外,也能够使用所获取的测量状态量的相关来代替残差的相关,进行因子分析,求出因子载荷量。

[0113] 在因子分析步骤S12之后,异常检测部19根据因子载荷量计算因子得分,检测异常(异常检测步骤S13)。也能够将在异常检测步骤S13中检测到的异常作为异常信息输出。

[0114] 在因子分析步骤S12中,基于作为相关矩阵的协方差矩阵来进行奇异值分解(SVD),从而导出因子载荷量。由此,能够不受协方差矩阵的形状所限制而提取出本质上重要的内容,早期地检测发动机1的异常。

[0115] 在因子分析步骤S12中求出的因子载荷量被累积在因子载荷量空间25中(因子载荷量累积步骤S14)。机器学习应用部20读出存储在机械装置故障数据库26中的数据(机械装置故障数据读出步骤S15),并且将因子载荷量应用于机器学习(机器学习应用步骤S16)。作为机器学习,使用自组织映射(SOM)。由此,能够利用作为无监督机器学习的SOM对发动机1的异常的原因明确地进行分类。另外,作为机器学习算法,除SOM以外还能够使用SVM(Supportvectormachine:支持向量机)、模糊C均值(FuzzyC-means)等。

[0116] 异常诊断部21基于机器学习诊断异常(异常诊断步骤S17)。

[0117] 在异常检测步骤S13及异常诊断步骤S17之后,输出部28输出包含发动机1的异常的诊断结果的异常信息(输出步骤S18)。在输出步骤S18中的异常信息的输出中,除了异常的诊断结果以外,还能够包含异常检测信息和附带的信息。输出目的地如上所述是信息提供单元(人机交互单元)5、异常时控制单元6及发送单元7。

[0118] 以下对使用了因子分析的发动机1的异常诊断详细地进行说明。

[0119] 图4是因子分析的概念图。因子分析是探索在所有的测量值(测量状态量) $y_m$ 中共同的、其关系性由 $a_{im}$ 表示的隐藏(无法测量)的变量因子F的分析。其使用线性的关系参数 $a$ 如下式(1)所示。

[0120] [数1]

$$[0121] \quad y_i = a_{i1}f_1 + a_{i2}f_2 + \dots + a_{im}f_m + u_i \Rightarrow \mathbf{Y} = \mathbf{AF} + \mathbf{U} \quad \dots(1)$$

[0122] 在式(1)中, $f$ 是公因子, $a_{im}$ 是线性系数,剩余的 $u_i$ 是无法说明的因子带来的测量错误或噪声。

[0123] 各个测量值 $y_m$ 与某个数量的公因子 $f$ 线性相连。线性系数 $a_{im}$ 被称为因子载荷量。因子分析是指探索隐藏的变量(因子),但该因子也能够视为测量值发生变化时的某种异常(事故原因)。

[0124] 图5是示出使用了测量数据的因子分析的例子图。如图5所示,若例举基于测量值的具体跟踪变化的主因子与因子载荷量A的计算例作为使用了测量数据Y的因子分析的例子,则测量值 $y_1, y_2, \dots, y_m$ 例如表示发动机1的扫气压力、排气温度、……发动机载荷,将某个时刻的区间(例如 $0 \sim t$ 区间)汇总在一起制作矩阵(图5的(a))。计算该矩阵的协方差矩阵,除以各变量的标准偏差,求出R(图5的(b))。对R进行奇异值分解(SVD),求出奇异值S。接着,求出第1因子载荷量A(图5的(c))。将各第1因子载荷量 $a$ 的平方相加并除以方差的总和而得到的值是因子得分D(指数)(图5的(d))。

[0125] 另外,还能够通过对协方差矩阵的相关矩阵进行奇异值分解(SVD),求出第1阶段的因子载荷量,对其使用EM(ExpectationMaximization:期望最大化)法,进一步求出具有特征的显著的因子载荷量。

[0126] 图6是示出因子得分的例子图,图6的(a)示出原始的因子得分F1(D1),图6的(b)示出过滤后的因子得分F1(D1)。此外,图7是示出各测量值的因子载荷量的变化的图,图7的(a)是扫气压力,图7的(b)是增压器转速,图7的(c)是排气温度,图7的(d)是扫气温度。如果因子得分D1(主指数)以时间序列排列,则例如如图6所示,在发动机1的空气冷却器的冷却水的流量开始减少时等、在发动机1发生异常(某种变化)时可以看到变化。

[0127] 换言之,如图7所示,因子载荷量矩阵A中包含的信息表示因推进系统的某种变化引起的异常。进而,因子载荷量(矩阵A的行)表示作为误差的要素的推进系统参数间的关系

强度,表示异常原因的特征。因此,通过使用机器学习算法,例如自组织映射(SOM)等对因子载荷量进行机器学习,可将因子载荷量用于推进系统的事故的原因分类。此外,因子得分D1可用于异常的早期检测。

[0128] 如图3所示,在本发明中,使用卡尔曼滤波观测器作为卡尔曼滤波部15,在此,使用测量状态量与估计状态量的残差进行因子分析。即,本发明中,作为另一种方法,使用测量状态量与由发动机状态估计部13得到的估计状态量之间的通过卡尔曼滤波部15固有计算出的残差E代替测量值(测量状态量)Y,进行与上述同样的因子分析。该残差E是指与估计状态量的偏差,若认为估计状态量为正常状态,则反映与正常状态的偏差。因此,能够基于残差E检测到在发动机1发生了某种异常这一情况。

[0129] 卡尔曼滤波观测器以数字孪生的发动机模型10为基础。在卡尔曼滤波观测器中,将通过发动机1的动态过程获取的测量状态量与基于初始状态量通过数学的发动机模型10的过程计算出的估计状态量的残差E输入至非线性卡尔曼滤波器。由此得到卡尔曼增益。将卡尔曼增益应用于发动机模型10,用于数学的发动机模型10的过程控制。

[0130] 这样,通过使用作为发动机1的数字孪生模型的发动机模型10监测发动机状态,能够在较早的阶段检测出发动机1的故障,诊断原因。

[0131] 图8是示出发动机的数学模型的例子的图。

[0132] 图8中的箭头的左侧是实际的发动机1中的燃料供给系统(燃料泵齿条位置( $h_p$ ))与发动机1的转速( $n_e$ )等的测量系统的关系图,示出发动机1中的测量点与测量值。图8中的右侧示出作为发动机1的数学模型的发动机模型10。

[0133] 此外,在图8中用以○包围的英文字母示出状态量测量单元3。以○包围的“T”为温度计,以○包围的“P”为压力计,以○包围的“n”为转速计,以○包围的“Q”为轴马力计。载荷变动由轴马力计测量。

[0134] 对每个步骤( $k, k+1, k+2, \dots$ )测量出测量值,利用发动机模型10进行每个步骤计算(估计)。为了提高发动机模型10的估计精度,获取能够最可靠且高精度地测量的发动机1的转速( $n_e$ )从而计算卡尔曼增益,逐渐校正发动机模型10。这便是卡尔曼滤波。

[0135] 在图8所示的发动机1的数学模型中,通常状态下的行为能够由非线性的状态空间模型表示。非线性的状态空间模型由以状态方程式X表示的方程式、以状态量x表示的各参数、以输入量u表示的输入构成。状态方程式X的右边由右侧的正中央的方框所示的各函数来表现,状态量 $n_e, n_{tc}, P_s, T_e, P_e, G_f$ 与输入量 $h_p, Q_p$ 的关系以5个式子来表现。

[0136] 例如,取燃料泵齿条位置( $h_p$ )与发动机的载荷( $Q_p$ )作为输入,取发动机1的转速( $n_e$ )、增压器转速( $n_{tc}$ )、扫气压力( $P_s$ )、排气压力( $P_e$ )、排气温度( $T_e$ )、燃料流量( $G_f$ )作为状态(x)与输出(y),表示出各个系统函数F与观测方程式y(t)的输出函数H。

[0137] 在图8的例子中输出的观测值y与状态量x相等。

[0138] 图9是示出发动机模型的参数的图。

[0139] 作为模型参数,可例举螺旋桨转矩等发动机的载荷( $Q_p$ )、发动机扭矩( $Q_e$ )、惯性矩( $I_e, I_{tc}$ )、燃料泵齿条位置( $h_p$ )、发动机的转速( $n_e$ )、增压器转速( $n_{tc}$ )、大气压( $P_a$ )、大气温度( $T_a$ )、扫气压力( $P_s$ )、扫气温度( $T_s$ )、气缸内最大压缩压力( $P_c$ )、气缸内最大燃烧压力( $P_z$ )、气缸内平均有效压力( $P_i$ )、扫气箱体积( $V_{a,r}$ )、排气箱体积( $V_{e,r}$ )、热力学常数( $R_a, R_e, k_e, C_{pe}, C_{pa}$ )、冷却水温度( $T_w$ )、压缩机出口温度( $T_c$ )、排气压力( $P_e$ )、排气温度( $T_e$ )、涡轮出口温度

( $T_{out}$ )、涡轮出口压力( $P_{out}$ )、燃料流量( $G_f$ )、扫气流量( $G_a$ )、压缩机空气流量( $G_c$ )、排气流量( $G_e$ )。

[0140] 图10是示出卡尔曼滤波器的预测(估计)步骤(卡尔曼滤波步骤S6)与更新(校正)步骤(模型更新步骤S8)的概念与计算式的图。

[0141] 若考虑到发动机模型10与实体的差异和由状态量测量单元3进行的测量的不确定性,则在基于发动机模型10得到的估计状态量与测量状态量之间会产生误差(残差)。计算该误差,通过测量状态量进行校正,并且使估计状态量尽可能接近正确的值,这便是作为非线性卡尔曼滤波器的无迹卡尔曼滤波器。在图10中示出无迹卡尔曼滤波器的基础。

[0142] 通过应用卡尔曼滤波器,在离散的各采样时间k中,考虑测量与建模的不确定性,并且利用计算出的误差重复表示推进系统的行为(下式(2))。

[0143] [数2]

$$[0144] \quad e_k = y_k - \hat{y}_{k|k-1} \quad \dots(2)$$

[0145] 在通常状态的运转中,将误差的分布视为0平均的正态分布。为了检测异常状态,将由卡尔曼滤波器生成的误差提供至因子分析。

[0146] 图11是示出卡尔曼滤波器与因子分析的关系的图。

[0147] 根据相关矩阵(协方差矩阵)估计因子分析模型( $Y=AF+U$ )的参数A。如上所述,卡尔曼滤波观测器以数字孪生的发动机模型10为基础,每次均进行协方差估计,并将卡尔曼增益作为应校正哪个状态量的指示符(indicator)使用。

[0148] 图12是示出通过因子得分而进行异常检测的例子图。

[0149] 图12是进行实际发动机1的增压器吸滤器的闭塞模拟实验,在发动机的异常诊断系统中迅速检测出异常的例子。另外,曲线图的横轴为采样的次数,1次为0.1秒。虽然增压器吸滤器逐渐闭塞而压力损失增加,但是由于在压力损失开始增加的初始阶段,因子得分F1急剧上升,因此能够检测出异常。

[0150] 如此,通过利用测量状态量与计算出的估计状态量的残差来进行因子分析,能够基于计算出的因子得分早期地检测发动机1的异常。此外,能够将因子载荷量应用于机器学习来诊断发动机1异常的原因。此外,能够利用计算机4提供包含进行发动机1的异常的早期检测及其原因的诊断的结果的异常信息。

[0151] 另外,计算机4的各构成要素及外围单元能适当地外设或内置,也能通过多个计算机对计算机4进行作用分担,或者将一部分设为分立电路。

[0152] 工业实用性

[0153] 本发明例如能够进行下水船舶的发动机的异常的早期检测与诊断,即使在远离的场所也能够实时地获知包含发动机的异常的诊断结果,因此有助于安全且高效的航行。此外,本发明也能够利用于船舶以外的发动机的异常的早期检测与异常诊断。

[0154] 附图标记说明

[0155] 1发动机

[0156] 2条件输入单元

[0157] 3状态量测量单元

[0158] 4计算机

[0159] 5信息提供单元(人机交互单元)

- [0160] 6异常时控制单元
- [0161] 7发送单元
- [0162] 8连接单元
- [0163] 10发动机模型
- [0164] S2初始状态量获取步骤
- [0165] S3发动机模型活用步骤
- [0166] S4发动机状态估计步骤
- [0167] S5测量状态量获取步骤
- [0168] S6卡尔曼滤波步骤
- [0169] S8模型更新步骤
- [0170] S10重复步骤
- [0171] S11相关计算步骤
- [0172] S12因子分析步骤
- [0173] S13异常检测步骤
- [0174] S16机器学习应用步骤
- [0175] S17异常诊断步骤
- [0176] S18输出步骤。

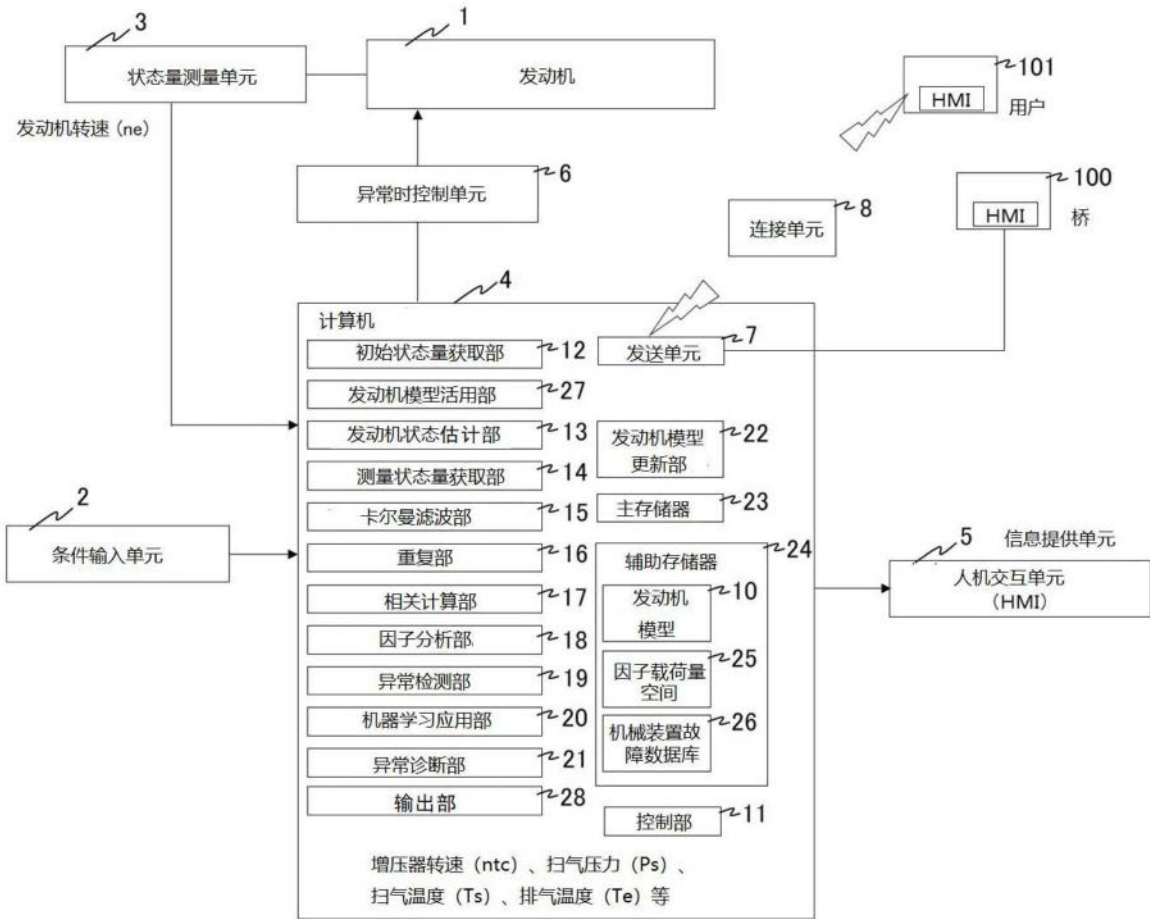


图1



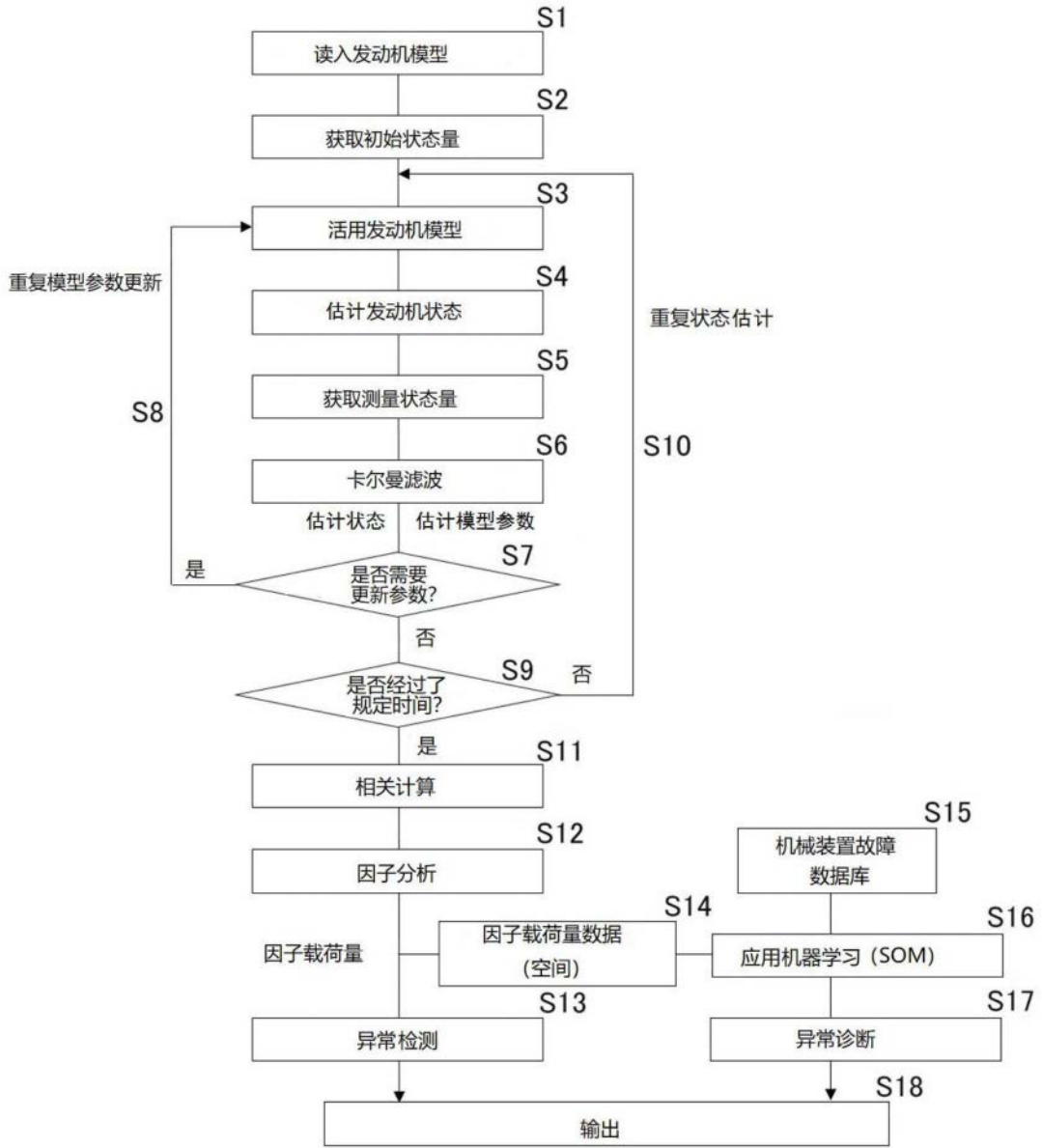


图2

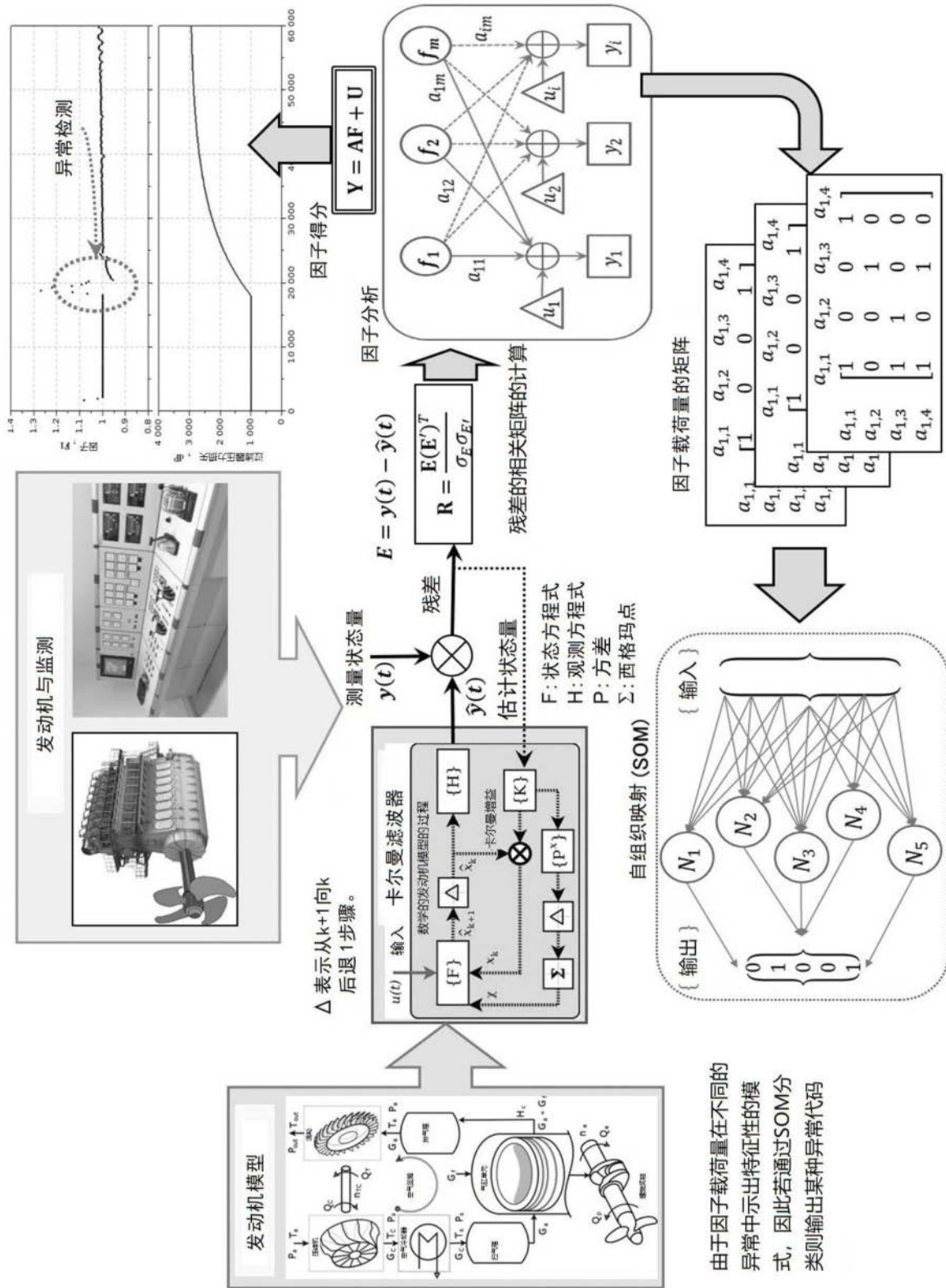


图3

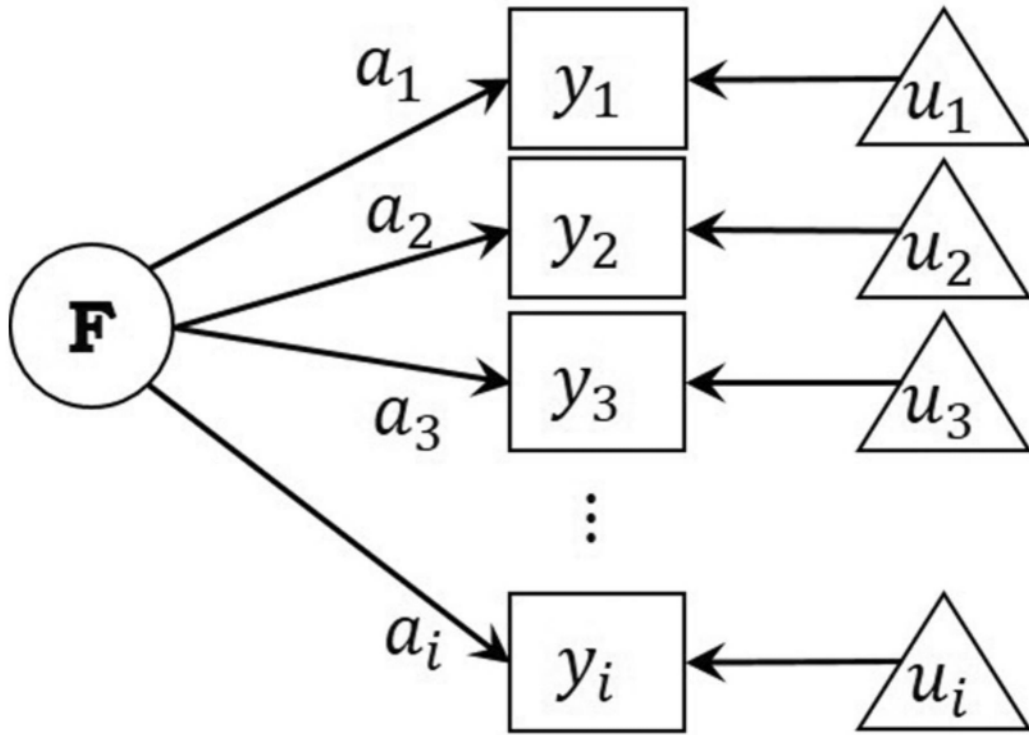


图4

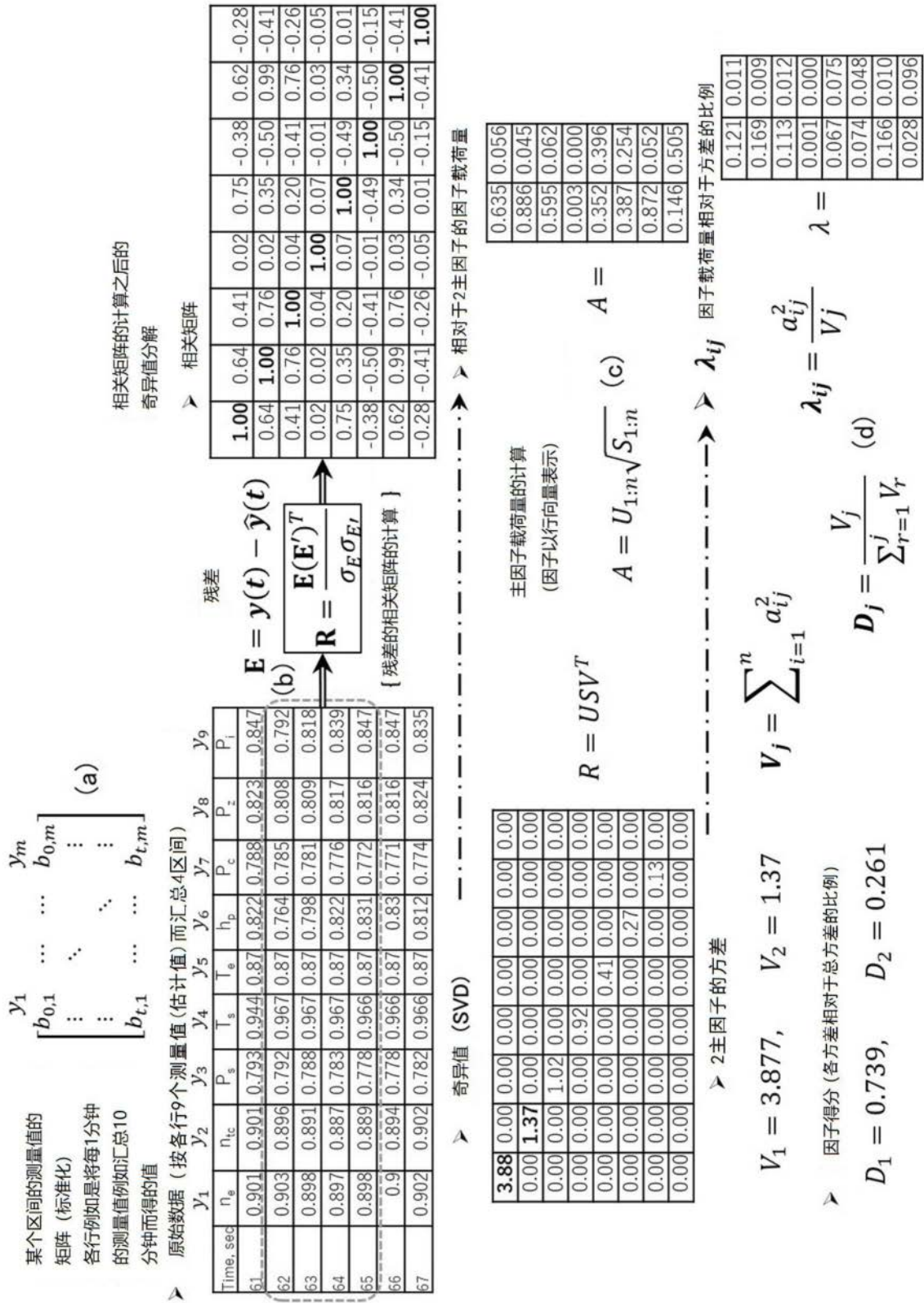
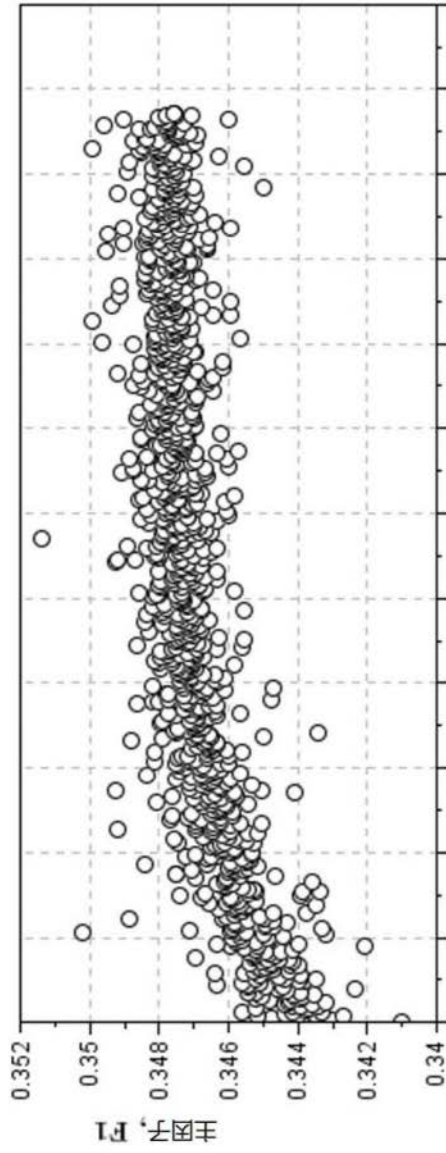
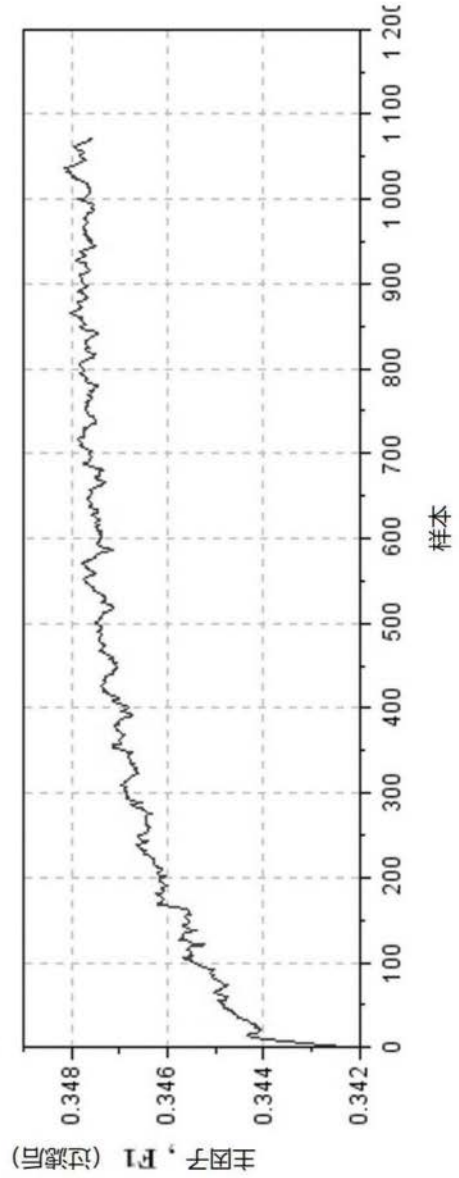


图5

$$A = U\sqrt{S} \xrightarrow{\text{因子载荷矩阵与其中的因子得分}} F1 = D1 = \frac{V_1}{\sum_{r=1}^J V_r}$$



(a)



(b)

图6



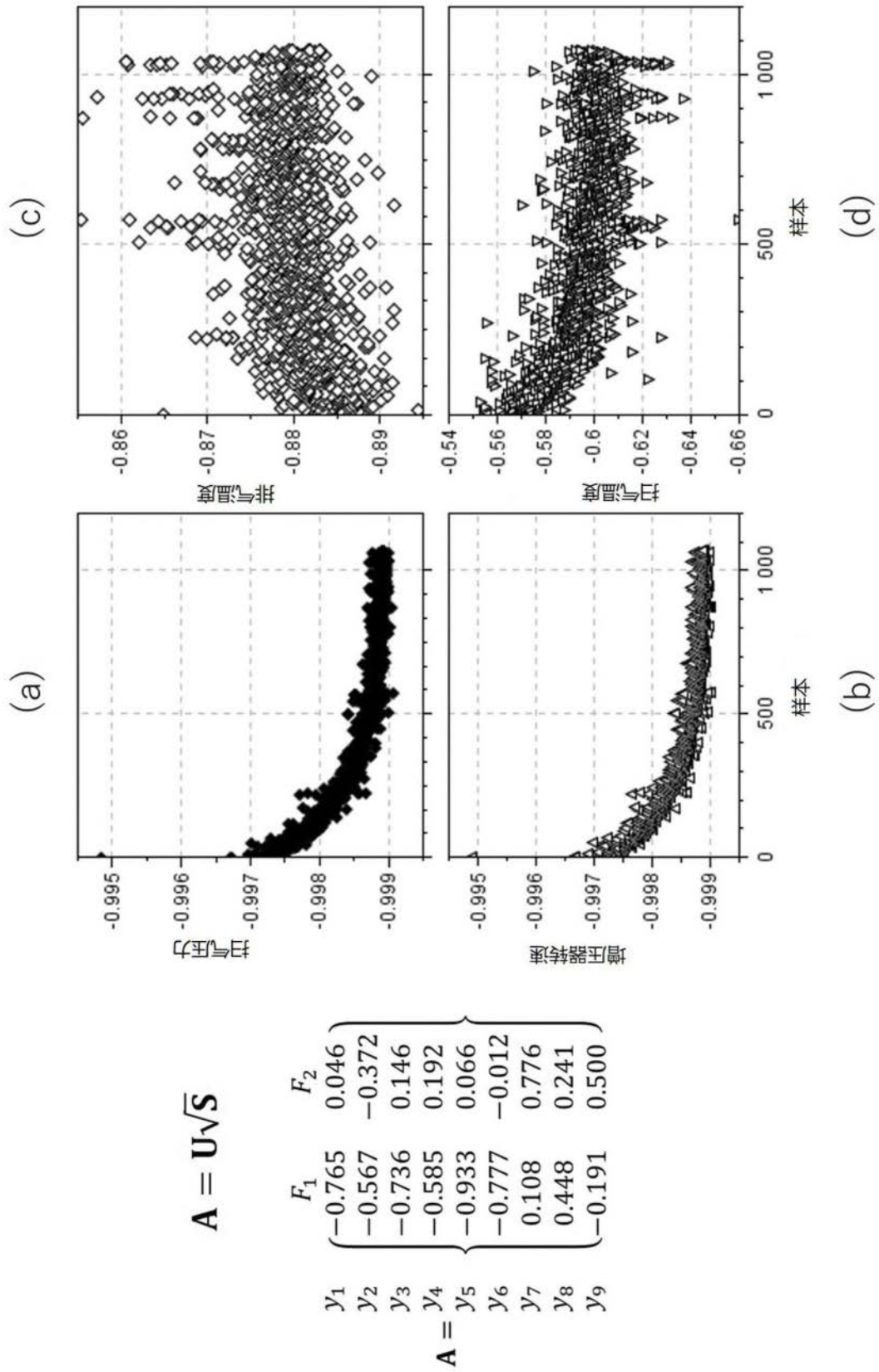


图7

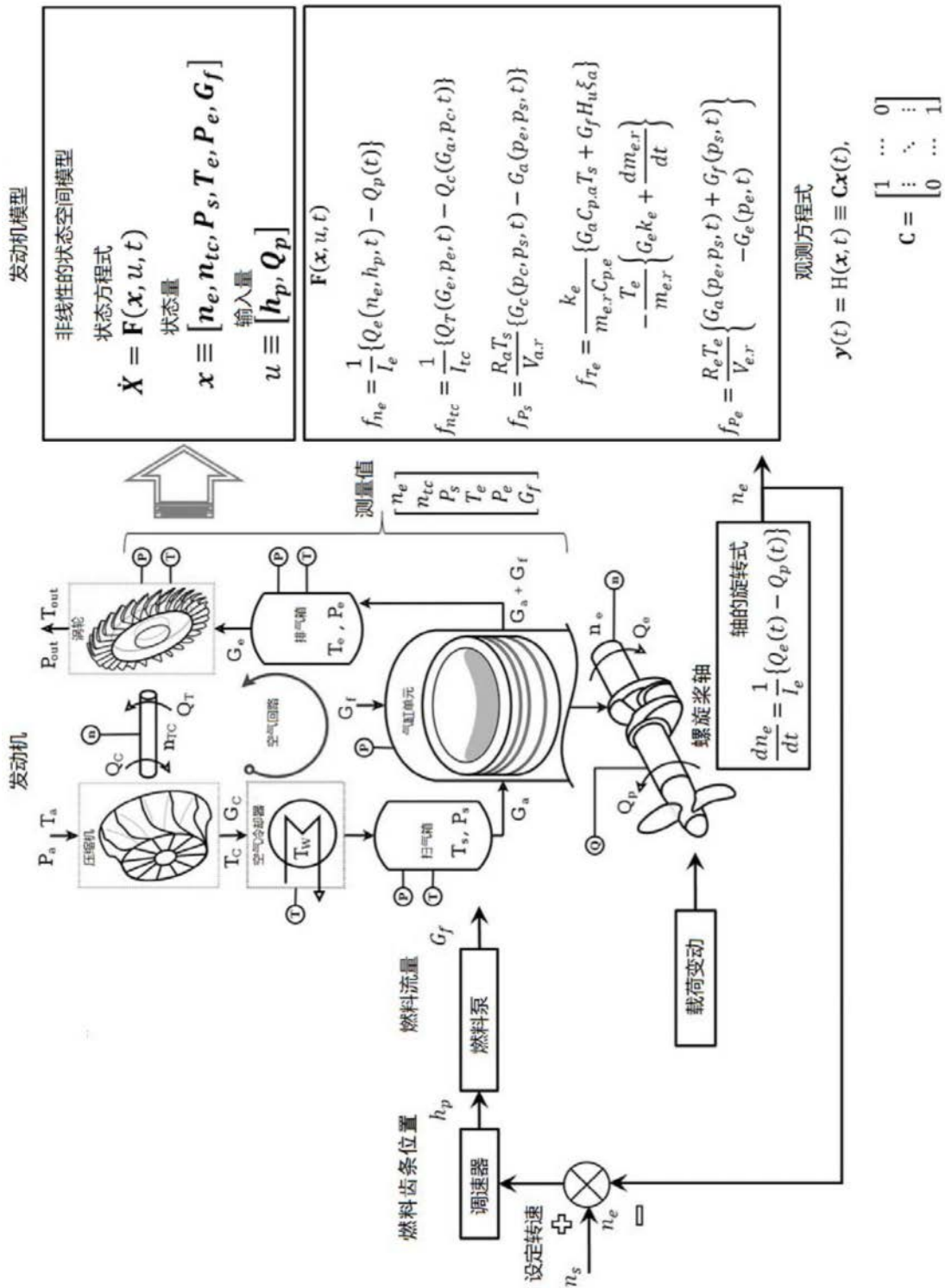
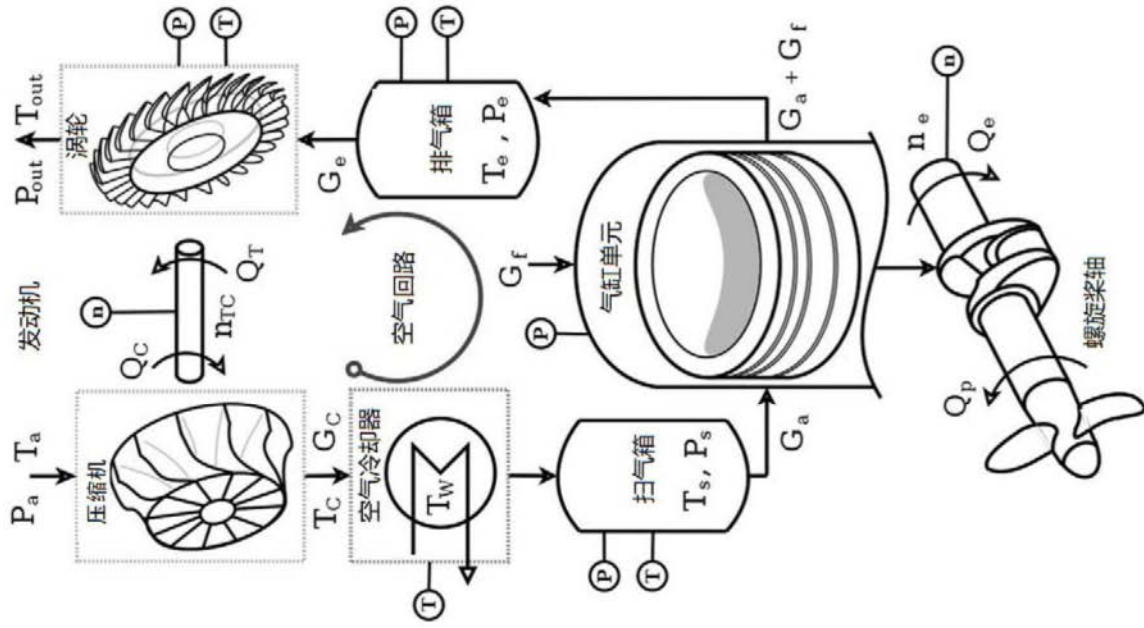


图8



- |                                         |                    |
|-----------------------------------------|--------------------|
| $Q_p$ - 螺旋桨转矩                           | $T_w$ - 冷却水温度      |
| $Q_e$ - 发动机扭矩                           | $T_c$ - 压缩机出口温度    |
| $I_e, I_{tc}$ - 惯性矩                     | $P_e$ - 排气压力       |
| $h_p$ - 燃料泵齿条位置                         | $T_e$ - 排气温度       |
| $n_e$ - 发动机转速                           | $T_{out}$ - 涡轮出口温度 |
| $n_{tc}$ - 增压器转速                        | $P_{out}$ - 涡轮出口压力 |
| $P_a$ - 大气压                             | $G_f$ - 燃料流量       |
| $T_a$ - 大气温度                            | $G_a$ - 扫气流量       |
| $P_s$ - 扫气压力                            | $G_c$ - 压缩机空气流量    |
| $T_s$ - 扫气温度                            | $G_e$ - 排气流量       |
| $P_c$ - 气缸内最大压缩压力                       |                    |
| $P_z$ - 气缸内最大燃烧压力                       |                    |
| $P_i$ - 气缸内平均有效压力                       |                    |
| $V_{a,r}$ - 扫气箱体积                       |                    |
| $V_{e,r}$ - 排气箱体积                       |                    |
| $R_a, R_e, k_e, C_{pe}, C_{pa}$ - 热力学常数 |                    |

图9



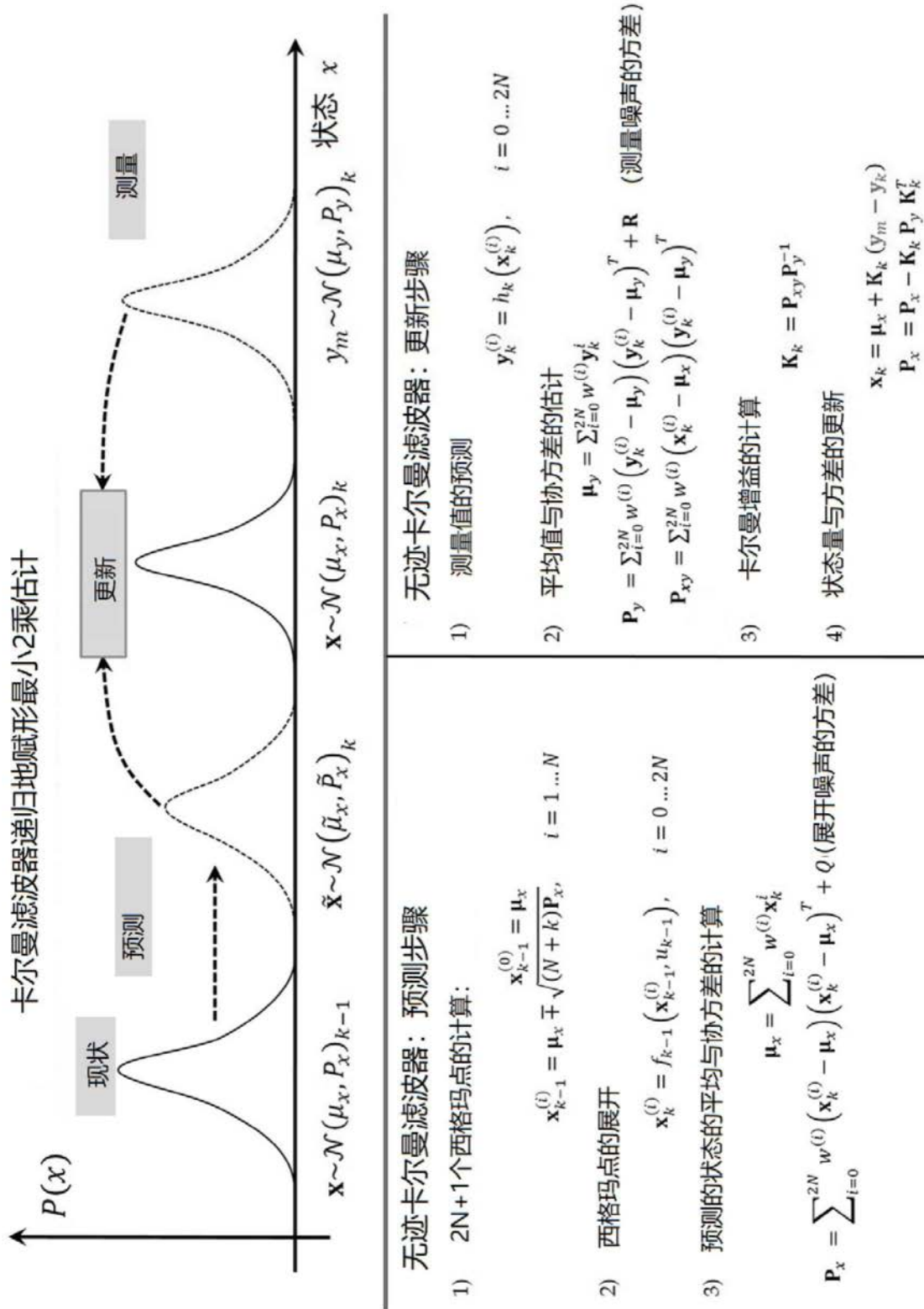


图10



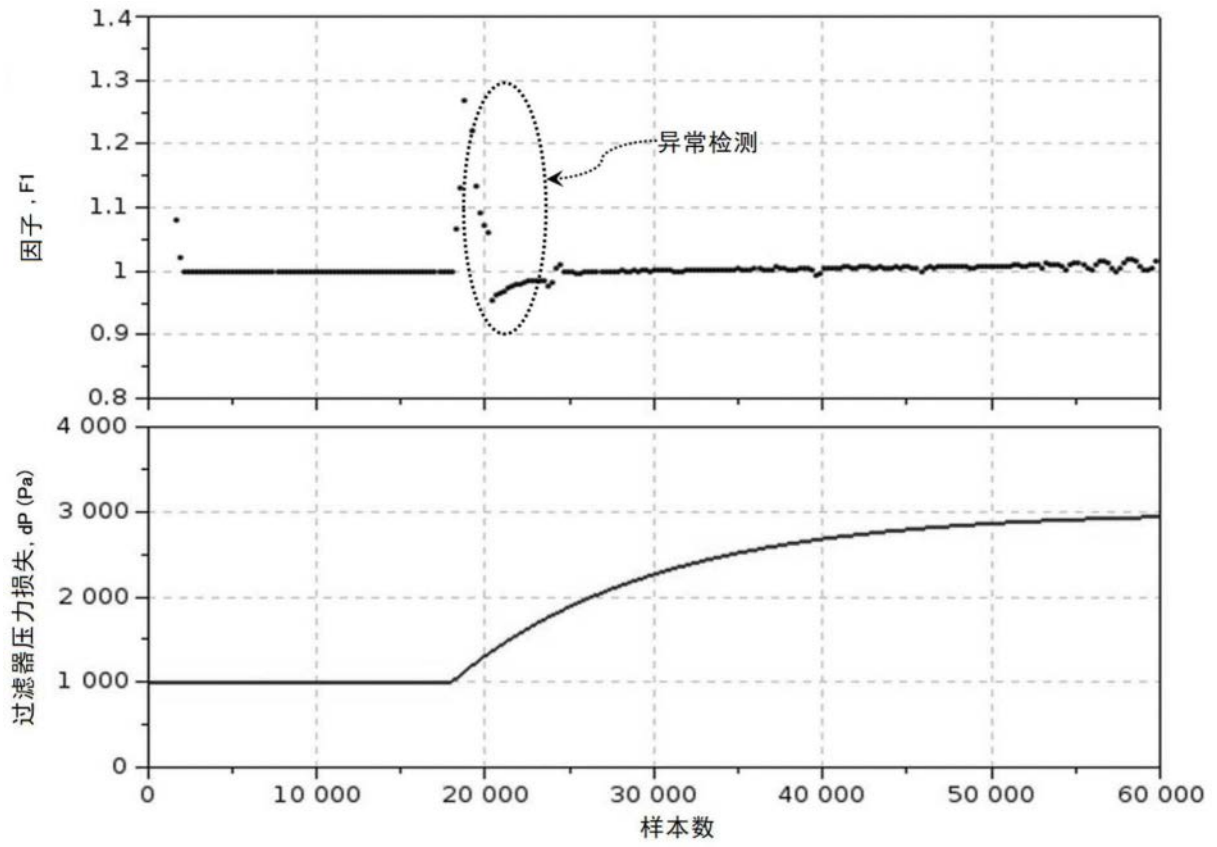


图12