

1. 一种控制涡轮发动机压气机变螺距静子叶片角度位置的系统,所述压气机包括至少两个分别以一转速 (N_1 、 N_2) 旋转的转子,每个所述转子包括转子级,静子级直接布置在每个所述转子级的出口位置,以适用于以稳定转速运行时的涡轮发动机,所述系统包括:

- 根据其中一个所述转速 (N_1 , N_2) 计算叶片角度设定位置 (VSV_{CAL}) 的装置 (20), 以及
- 修正所述设定位置 (VSV_{CAL}) 的模块 (1), 该模块包括:
 - o 测定叶片角度位置 (VSV) 的装置 (2);
 - o 测量涡轮发动机燃油流量 (WFM) 的装置 (3);
 - o 储存器 (4), 其中, 叶片连续角度位置 (VSV_{COU} , VSV_{REF}) 与在所述角度位置 (VSV_{COU} , VSV_{REF}) 处测量的涡轮发动机燃油流量 (WFM_{COU} , WFM_{REF}) 相关联;
 - o 测定修正角 (VSV_{CORR}) 的装置 (5), 所述装置可根据叶片连续两次角度位置 (VSV_{COU} , VSV_{REF}) 之间测量的燃油流量 (WFM_{COU} , WFM_{REF}) 之间的差, 计算所述修正角 (VSV_{CORR});
 - 将所述修正角 (VSV_{CORR}) 加到所述角度设定位置 (VSV_{CALC}) 以计算优化设定位置 ($VSV_{新}$) 的加法器 (S), 以及
 - 根据所述优化设定位置 ($VSV_{新}$) 来控制叶片的角度位置的传动装置 (6)。

2. 根据权利要求 1 所述的系统, 其特征在于, 所述修正所述设定位置的模块 (1) 包括检查涡轮发动机状态的装置 (8) 和抑制叶片当前角度位置 (VSV_{COU}) 修正的装置 (7), 如果涡轮发动机状态不适合叶片角度位置修正时, 所述抑制叶片当前角度位置修正的装置 (7) 则启动。

3. 根据权利要求 1 或 2 所述的系统, 其特征在于, 所述修正所述设定位置的模块 (1) 包括限制所述修正角的 (VSV_{CORR}) 值的装置 (9), 所述装置用来限制所述修正角 (VSV_{CORR}) 的值。

4. 一种包括根据权利要求 1-3 中任意一项所述的控制涡轮发动机压气机变螺距静子叶片角度位置的系统的涡轮发动机。

5. 一种优化涡轮发动机压气机静子叶片当前角度位置 (VSV_{COU}) 的方法, 所述压气机包括至少两个分别以一转速 (N_1 、 N_2) 旋转的转子, 适用于以稳定转速运行时的涡轮发动机, 在所述方法中, 至少以转速 (N_1 , N_2) 为函数计算角度设定位置 (VSV_{CAL}), 其中:

- a) 在所述叶片的参考角度位置 (VSV_{REF}) 处, 测定涡轮发动机参考燃油流量 (WFM_{REF});
- b) 在所述叶片的当前角度位置 (VSV_{COU}) 处, 测定涡轮发动机当前燃油流量 (WFM_{COU});
- c) 根据所述参考燃油流量 (WFM_{REF}) 和所述当前燃油流量 (WFM_{COU}) 之间的差, 计算修正角 (VSV_{CORR}), 以便降低燃油流量;
- d) 将所述修正角 (VSV_{CORR}) 加到前面计算的所述角度设定位置 (VSV_{CAL}) 上, 以便获得优化设定位置 ($VSV_{新}$);
- e) 修正所述叶片的所述当前角度位置 (VSV_{COU}), 从而使其与优化设定位置 ($VSV_{新}$) 一致。

6. 根据权利要求 5 所述的方法, 其特征在于,

- 以前次迭代的步骤 (b) 的所述当前角度位置 (VSV_{COU}) 作为步骤 (a) 的所述参考角度位置 (VSV_{REF}), 重复实施步骤 (a) 到 (e)。

7. 根据权利要求 5 或 6 所述的方法, 其特征在于,

- 通过最优化法计算所述修正角 (VSV_{CORR})。

8. 根据权利要求 7 所述的方法, 其特征在于, 所述最优化法为燃油函数 F 的最速下降

法,燃油函数 F 限定了相对于所述叶片的角度位置 (VSV) 的涡轮发动机的燃油流量 (WFM)。

9. 根据权利要求 5 或 6 所述的方法,其特征在于,限定所述修正角 (VSV_{CORR}) 的值,以限制涡轮发动机瞬变过程的发生。

控制静子叶片角度位置的系统和优化所述角度位置的方法

[0001] 本发明涉及燃气涡轮发动机领域,所述发动机包括至少两个转子,而且包括一个或多个静子级,在这些级中,叶片为变螺距叶片。

[0002] 本发明的目的是优化所述静子叶片的角度位置,以便当涡轮发动机以稳定转速运行时,可降低燃油消耗。“稳定转速”是指发动机转速,在该转速下由发动机所提供的推力始终大体不变。

[0003] 例如,双转子燃气涡轮发动机的每个转子 (spool) 包括至少一个压气机和一个安装在所述压气机下游的涡轮。按照惯例,在本申请中,术语“上游”和“下游”的定义是相对于涡轮发动机中空气的流动方向。传统上,压气机包括几个转子级 (rotor stages),目的是加速和压缩发动机内从上游到下游移动的空气流。为了在加速后对空气流整流,静子级直接布置在每个转子级的出口位置。

[0004] 静子级的形状为固定轮形式,轴向延伸,径向静子叶片安装在静子轮的周缘。为了通过转子级下游的静子级对空气流的整流进行优化,可以对静子叶片的角度方向进行修正,所述叶片称之为变螺距叶片。为此,涡轮发动机包括一个控制压气机静子叶片角度位置的系统。

[0005] 传统上,参照示意图 1A,双转子涡轮发动机 M 的静子叶片角度位置主要取决于高压转子的转速 N_2 和压气机入口位置的温度 T_{25} 。为此,针对转子的给定转速 N_2 ,控制系统设有计算每个静子轮上叶片角度位置设定值 VSV_{CAL} 的装置 20。所计算出的设定值 VSV_{CAL} 发送到传动装置 6,后者用来修正涡轮发动机 M 静子叶片的当前角度位置。

[0006] 计算装置 20 根据以前确定的数学定律进行编程,目的是适合“平均寿命 (average)”发动机,既不是太新 (刚出厂的新发动机),也不是太“旧 (worn)” (准备大修)。

[0007] 实际上,实际的发动机都不符合针对其所计算的数学定律的“平均寿命”发动机。当前系统的数学定律考虑了发动机的裕度要求 (老化的鲁棒性裕度、发动机与发动机的差异裕度 (margins of dispersion)、污垢裕度等)。结果,叶片的角度位置并没有针对实际的发动机进行优化,而是对新发动机或降性能发动机都是固定的。

[0008] 一种解决方案是修正数学定律,以便考虑到发动机的磨损和发动机之间差异的参数。然而,这个解决方案很难实施,所述参数很多,难于模拟。

[0009] 为了解决这些缺陷,申请者提出了一种可控制涡轮发动机压气机变螺距静子叶片角度位置的系统,所述压气机包括至少两个转子,每个转子以转速 (分别为 N_1 和 N_2) 旋转,适用于以稳定转速运行的涡轮发动机,所述系统包括:

[0010] - 根据其中一个转速 (N_1, N_2) 计算叶片角度设定位置的装置,以及

[0011] - 修正设定位置的模块,该模块包括:

[0012] ○ 确定叶片角度位置的装置;

[0013] ○ 测量涡轮发动机燃油流量的装置;

[0014] ○ 存储器,其中,叶片连续角度位置与在所述角度位置测量的涡轮发动机燃油流量相联系;以及

[0015] ○ 确定修正角的装置,所述装置可根据叶片的连续两个角度位置之间测量的燃油

流量之间的差来计算修正角。

[0016] 根据本发明的系统可有利地确定叶片的角度位置,以优化涡轮发动机的燃油消耗。申请者已经确定,涡轮发动机在给定稳定转速时,其燃油流量是叶片角度位置的函数,而且,该函数具有局部的最小值。换句话说,通过局部改变叶片的角度位置,可以确定叶片当前角度位置必须修正的范围,以限定燃油流量。本发明的修正模块可以对控制叶片角度位置的传统系统进行补充,改善发动机给定稳定转速时的性能。

[0017] 不同于现有技术,在现有技术中,确定叶片角度位置的定律对于所有发动机来讲都是固定不变的,不考虑发动机参数差异或其磨损参数,根据本发明的系统允许根据发动机状态来调整叶片的角度位置。申请者并不是列出发动机磨损或差异的所有参数和获得多个复杂数学定律,而是直接测量角度变化对燃油消耗的影响。

[0018] 根据本发明,在对应于“平均寿命”发动机的数学模型的基础上计算出的理论设定位置得到了修正。这种系统可以直接装入目前的涡轮发动机中。而由此需要解决的新的问题是确定叶片角度位置的最佳值。

[0019] 优选地,该系统包括了一种加法器 (adder),将修正角补充到设定角度位置上,以计算优化的设定位置。因此而修正设定值,以考虑燃油的消耗。

[0020] 另外,优选地,该系统包括一个传动装置,根据优化的设定位置,控制叶片的角度位置。这样,传动装置可对当前角度位置进行修正,以便“符合”优化的设定位置。

[0021] 另外,优选地,修正模块包括检查涡轮发动机状态的装置和抑制修正叶片当前角度位置的装置,所述抑制装置只有在涡轮发动机状态不适合对叶片角度位置进行修正时才启动。

[0022] 如果涡轮发动机状态不适合对叶片角度位置进行修正时,所述抑制装置则启动。根据检查装置的指令,抑制装置可以阻止对叶片角度位置的修正,因为此时修正会危及涡轮发动机或不适合其工作状态。

[0023] 优选地,修正模块包括限制修正角值的装置,所述装置用来限制修正角值,目的是保持在无风险工作范围内。

[0024] 本发明还涉及到包括上述控制系统的涡轮发动机。

[0025] 另外,本发明还涉及到优化涡轮发动机压气机静子叶片当前角度位置的方法,所述压气机包括至少两个转子,每个转子以转速 (N_1 , N_2) 旋转,适用于以稳定转速工作的涡轮发动机,所述方法包括:

[0026] a) 在叶片参考角度位置处,确定涡轮发动机的参考燃油流量;

[0027] b) 在叶片的当前角度位置处,确定涡轮发动机的当前燃油流量;

[0028] c) 根据参考燃油流量和当前燃油流量之间的差,计算修正角,以便降低燃油流量;

[0029] d) 将所述修正角加到此前计算设定位置上,以便获得优化设定位置;

[0030] e) 修正叶片的当前角度位置,从而使其与优化设定位置一致。

[0031] 优选地,以前次迭代的步骤 (b) 的当前角度位置作为步骤 (a) 的参考角度位置,重复实施步骤 (a) 到 (e)。

[0032] 有利的是,这样,可以“逐步”优化叶片的角度位置,确保精确优化,不会带来任何有害的不利影响,诸如出现瞬变过程。

[0033] 再者,优选地,采用最优化方法来计算修正角,优选地,采用燃油函数 F 的最速下降法,确定相对于叶片角度位置的涡轮发动机的燃油流量。

[0034] 燃油函数 F 允许局部最小值,确保最优化方法的收敛性。它也可以偶尔是凸的,确保最佳角度位置的存在。

[0035] 还优选地,修正角的值得到限制,以便保持在无风险运行范围内(超速、湍振、温度升高,等等)。

[0036] 根据本发明的另一个实施方式,检查发动机的状态,且如果涡轮发动机状态不适合修正叶片角度位置时,可阻止对叶片当前角度位置的修正。

[0037] 下面借助附图可以更好地理解本发明,附图如下:

[0038] - 图 1A 示出了根据现有技术控制叶片角度位置的系统;

[0039] - 图 1B 示出了采用本发明的修正角度位置的模块来控制叶片角度位置的系统;

[0040] - 图 2 为涡轮发动机静子叶片角度控制系统第一个实施方式示意图,该系统用来计算修正角;

[0041] - 图 3 为控制系统第二个实施方式示意图,所示系统带有修正抑制装置;

[0042] - 图 4 为控制系统第三个实施方式的示意图,所示系统带有限制修正角值的装置,以及

[0043] - 图 5 为发动机燃油流量变化示意曲线图,该流量随发动机静子叶片角度位置而变化,适用于发动机的确定的稳定转速。

[0044] 图 1B 所示为根据本发明的涡轮发动机高压压气机静子叶片角度位置控制系统,所示为双转子发动机;低压转子的转速为 N_1 ,高压转子的转速为 N_2 。借助于油门,发动机通过向其指示所需推力而得到控制;推力与低压转子的转速直接联系。为此,推力设定赋予了低压转子转速设定 N_{1_DMD} 。为了清晰起见,涉及低压转子转速的标记 N_1 同样也用于发动机推力,因为这两个参数之间是直接联系的。同样,标记 N_1 可对应于与发动机推力具有直接联系的其它参数,特别是对应于所属领域技术人员所熟知的参数 EPR “发动机压力比”。

[0045] 传统上,涡轮发动机包括根据高压本体转速 N_2 和高压转子温度 T_{25} 计算静子叶片设定角度位置 VSV_{CAL} 的装置 20。所述计算装置 20 采用所属领域技术人员所熟知的数学定律来进行编程,从而可根据高压转子转速 N_2 来计算设定角度位置 VSV_{CAL} 。

[0046] 根据本发明的控制系统还包括修正发动机 M 静子叶片设定位置 VSV_{CAL} 的模块 1。修正模块 1 可确定修正角 VSV_{CORR} ,优化燃油消耗。控制系统还包括加法器 S ,用来接收所计算的设定值 VSV_{CAL} 和修正角 VSV_{CORR} ,作为输入信息,以便将对应于其两个输入参数 (VSV_{CORR} , VSV_{CAL}) 总和的优化设定值 $VSV_{新}$ 作为输出信号来发送。控制系统还包括传动装置 6,该传动装置可根据优化的设定值 $VSV_{新}$ 来对叶片当前角度位置 VSV_{CUI} 进行修改。

[0047] 依然参照图 1B,控制系统包括估算为保持转速 N_1 所必需的燃油的模块 31,又称之为修正网,该模块将转速设定值 N_{1_DMD} 作为输入信息来接收,该转速设定值 对应于所期望转速,也就是说,对应于所期望的推力级。控制系统还包括燃油控制装置 30,该装置由修正网 31 控制,能够根据发动机有效转速 N_{1_EFF} —例如,由转速传感器所测的一来对燃油流量进行修正。

[0048] 如果提供给发动机 M 的燃油流量不能达到所要求推力 (N_{1_EFF} 低于 N_{1_DMD}),修正网 31 会指示燃油控制装置 30,增加给发动机 M 的燃油供给流量,从而弥补期望转速 N_{1_DMD} 和有效

转速 $N1_{EFF}$ 之间的差别。

[0049] 参照图 2, 根据本发明第一个实施方式的修正模块 1, 包括测定叶片角度位置 VSV 的装置 2, 所述装置本身已为人们所熟知, 其形式如位置传感器, 以及在叶片给定角度位置 VSV 处测定涡轮发动机燃油流量 WFM 的装置 3。测定流量的装置 3 可以是直接的, 例如可采用安装在涡轮发动机燃烧室喷油器上游的传感器的形式, 或者是间接的, 例如, 测量封闭涡轮发动机燃油管路通道截面的部件的线性位置, 而该截面的尺寸已知。一般来讲, 这些测定装置 2, 3 都会连续起动, 目的是不断地监视叶片的角度位置和燃油消耗情况。

[0050] 修正模块 1 还包括一个储存器 4, 其中, 叶片连续角度位置 VSV 都与在所述角度位置 VSV 处所测的涡轮发动机的燃油流量 WFM 相关。随着时间的推移, 修正模块 1 的储存器 4 由所述测定装置 2, 3 给予补充。实际上, 储存器 4 仅容纳了一定数量的数值对 (VSV, WFM), 最老的数值对总是被更新的数值对所取代。例如, 储存器 4 包括至少两对: 一对是当前值 (VSV_{COU} , WFM_{COU}), 另一对是过去值, 称之为参考值 (VSV_{REF} , WFM_{REF})。

[0051] 在本案例下, 对发动机稳定转速运行有一定限制, 发动机提供的推力始终为大体恒定不变。例如, 在稳定工作时, 转速 $N1$ 不变, 或者, 参数 EPR 不变。在稳定转速时, 通过分析离散函数, 以下称之为燃油函数 F, 根据静子叶片的角度值 VSV_{COU} , 可以很方便地监视燃油流量 WFM_{COU} 的变化, 而所述函数则由控制系统 1 中的储存器 4 的数值对来确定。

[0052] 对于涡轮发动机以恒定转速 $N1$ 运行来讲, 又称之为“iso $N1$ ”, 申请者已经研究了燃油函数 F, 该函数确定了相对于叶片角度位置 VSV_{COU} 的燃油流量 WFM_{COU} , 同时, 确定了该燃油函数 F 为局部凸的, 因此, 存在燃油消耗最低的叶片角度位置, 这个最佳角度位置标记为 VSV_{OPT} 。图 5 示出了发动机确定的稳定转速的燃油函数 F 和最佳角度位置。

[0053] 角度位置 VSV_{OPT} 称之为发动机最佳位置有两个原因。首先, 相对于发动机的确定的稳定转速为最佳, 最佳角度位置会随着给定转速的变化而变化。第二, 相对于发动机本身为最佳, 通过显然考虑了发动机磨损状态和制造差异, 所述角度位置 VSV_{OPT} 被确定为“适合”该发动机。换句话说, 根据制造裕度和与安装相关的变化情况, 给定发动机并不具有与同一系列另一台发动机完全相同的特性, 结果, 每台发动机有其特定的最佳角度位置 VSV_{OPT} 。

[0054] 修正模块 1 还包括测定修正角 VSV_{CORR} 的装置 5, 所述装置可根据在叶片连续两次角度位置之间所测燃油流量之间的差来计算修正角 VSV_{CORR} 。换句话说, 修正角 VSV_{CORR} 并不是通过分析发动机固有参数来计算的, 而是通过对所需结果的优化来进行的, 从而获得尽可能最低的燃油消耗 WFM_{OPT} 。

[0055] 为此, 测定修正角 VSV_{CORR} 的装置 5 可在 iso $N1$ 时测定燃油函数 F 的局部最小值, 且可通过了解该函数的仅仅几个值 (最后的连续角度位置) 来测定。在本示例中, 测定修正角 VSV_{CORR} 的装置 5 是通过优化函数来编程的, 其作用就是在限制其值的同时可测定修正角 VSV_{CORR} 。具体来讲, 如果叶片当前角度位置 VSV_{COU} 通过太高的修正角值 VSV_{CORR} 来修改时, 发动机会出现瞬变过程, 这会对发动机带来损坏。

[0056] 优化的原则在于, 局部具有叶片当前角度位置的变化, 测量该角度变化对有效燃油流量的影响, 以便从中了解如何修正当前角度位置。

[0057] 因此, 根据本发明的优化功能可以通过限制瞬变过程的发生而安全地改善发动机的效能。下面介绍最速下降法的优化功能, 但是, 其它优化方法也适用, 诸如采用最小平方方法进行最优化等。最速下降法可非常简单地优化角度位置。

[0058] 最速下降法采用储存器 4 内存储的数值对 (VSV_{COU} , WFM_{COU} ; VSV_{REF} , WFM_{REF}), 计算叶片当前角度位置 VSV_{COU} 时燃油函数 F 的梯度值, 所述角度位置相对于其此前的角度位置 VSV_{REF} 。于是, 从中可推断出燃油函数 F 的收敛性方向。通过线性优化, 根据当前角度位置 VSV_{COU} 梯度值和饱和增量 $SAT1$ 和收敛性率 μ , 计算修正角 VSV_{CORR} , 选择收敛性率 μ , 从而在与最佳角度位置 VSV_{OPT} 的快速收敛性和防止涡轮发动机出现瞬变过程之间取得折中。

[0059] 根据最优化功能, 从中推断出修正角值 VSV_{CORR} , 该值必须加到设定位置 VSV_{CAL} , 目的是获得优化设定值 $VSV_{新}$ 。传动装置 6 可修正叶片当前角度位置 VSV_{COU} , 以便对应于优化的设定位置 $VSV_{新}$ 。优化的设定位置 $VSV_{新}$ 不一定对应于最佳角度位置 VSV_{OPT} , 因为当前角度位置 VSV_{COU} 修正过大会造成压气机喘振。优选地, 最优化可重复地逐渐进行。

[0060] 根据叶片角度位置的最优化情况, 将发动机调整到以较低燃油流量运行的给定转速上。参照图 1B, 燃油控制装置 30 指示修正网 31 保持相同转速 $N1$, 尽管因叶片当前角度位置修正而对高压转子特性进行了修正。因此, 节省了燃油。

[0061] 优选地, 参照图 4, 修正模块 1 包括限定修正角值 VSV_{CORR} 的装置 9, 用来通过梯度饱和和阈值 $SAT2$ 来限制修正角, 以防止在对叶片当前角度位置 VSV_{COU} 进行修正期间出现振动。另外, 还可以检查最优化方法的收敛性速度。饱和函数 $SAT2$ 和饱和增量 $SAT1$ 可以一起使用, 也可单独使用。

[0062] 例如, 最速下降优化法可以遵循如下迭代的数学关系:

$$[0063] \quad VSV_{CORR}(t) = -SAT1[\text{gradient } F(VSV_{COU}) \times \mu] + VSV_{CORR}(t-1)$$

$$[0064] \quad VSV_{CORR}'(t) = \text{sign}VSV_{CORR}(t) * \min(|VSV_{CORR}(t)|, SAT2)$$

$$[0065] \quad VSV_{新}(t) = VSV_{CAL}(t) + VSV_{CORR}'(t)$$

[0066] 为了启动最优化过程, 必须对叶片当前角度位置进行非常轻微修正, 目的是进行优化和开始该程序。而后, 通过“激活”系统来启动优化方法。另外, 初始化也可以从表示叶片角度位置 VSV 变化方向的数学模型中产生, 从而减小燃油流量 WFM 。

[0067] 根据本发明的优选实施方式, 参照图 3, 修正模块 1 包括抑制装置 7, 用来通过测定修正角的装置 5 来相抵消所计算的修正角值 VSV_{CORR} 。这样, 在发动机不以稳定转速运行时, 就可以阻止传动装置 6 对叶片角度位置的修正。

[0068] 不言而喻, 限制装置 9 和抑制装置 7 可以在同一控制系统 1 中使用。

[0069] 在这个实施方式中, 抑制装置 7 采用了“或”逻辑门的形式, 连接到测量发动机状态—也就是说, “其健康状态”—的装置 8 上。例如, 测量发动机状态的装置 8 包括:

[0070] - 储存喘振类型事件的装置。如果在涡轮发动机使用寿命期间发现喘振现象, 抑制装置 7 就会抑制该逻辑程序。

[0071] - 测量相对于预定裕度的排气温度裕度的装置, 称之为 EGT “排气温度”裕度参数。如果发现裕度不足, 抑制装置 7 就会抑制该逻辑程序。

[0072] - 通过测量流量系数和高压压气机效能的传感器来估算涡轮发动机压气机状态的装置。这些系数代表了发动机的状态, 将其与相对于“健康”发动机 (即, 良好状态下的发动机) 预定阈值进行比较。如果超过阈值, 抑制装置 7 就会抑制该逻辑程序。

[0073] - 测量发动机稳定性的装置, 所述装置用来测量各个值, 诸如低压转子转速 ($N1_{EFF}$)、高压转子转速 ($N2$) 及其变化情况。如果出现瞬变过程, 抑制装置 7 就会抑制该逻辑程序。

[0074] 同样,如果飞机驾驶员想操作油门来使发动机加速或减速,则会禁止修正,且不再对叶片角度位置进行优化。这种检查通过监测发动机瞬变过程的装置(图中未示)来进行。

[0075] 另外,本发明还涉及到对涡轮发动机压气机静子叶片当前角度位置优化的方法,所述压气机包括至少两个转子,每个转子都以一种速度旋转,适用于以稳定转速运行的涡轮发动机,所述方法包括:

[0076] a) 在叶片参考角度位置 VSV_{REF} 处,确定涡轮发动机参考燃油流量 WFM_{REF} ;

[0077] b) 在叶片当前角度位置 VSV_{COU} 处,确定涡轮发动机当前燃油流量 WFM_{COU} ;

[0078] c) 根据参考燃油流量 WFM_{REF} 和当前燃油流量 WFM_{COU} 之间的差,计算修正角 VSV_{CORR} ,以便减小燃油流量;

[0079] d) 将修正角 VSV_{CORR} 加到设定位置 VSV_{CAL} 上,以便计算优化设定位置 $VSV_{新}$;

[0080] e) 修正叶片当前角度位置 VSV_{COU} ,从而使其与优化设定位置 $VSV_{新}$ 一致。

[0081] 优选地,以前次迭代的步骤 (b) 的当前角度位置 VSV_{COU} 作为步骤 (a) 的参考角度位置 VSV_{REF} ,重复实施步骤 (a) 到 (e)。

[0082] 如图 5 所示,叶片角度位置 VSV_{COU} 在每次重复 (I_1, I_2, I_3) 后都会优化,从而将燃油消耗降到最小。有利的是,这样会接近最佳角度位置 VSV_{OPT} ,以优化给定转速时的燃油消耗,同时,防止了瞬变过程的发生,瞬变过程在叶片角度位置突然改变的情况下很可能会损坏发动机。

[0083] 再者,优选地,测试发动机转速的稳定性,且如本发明控制系统上面所述,如果稳定性测试失败时,叶片当前角度位置 VSV_{COU} 的修正就会被禁止。

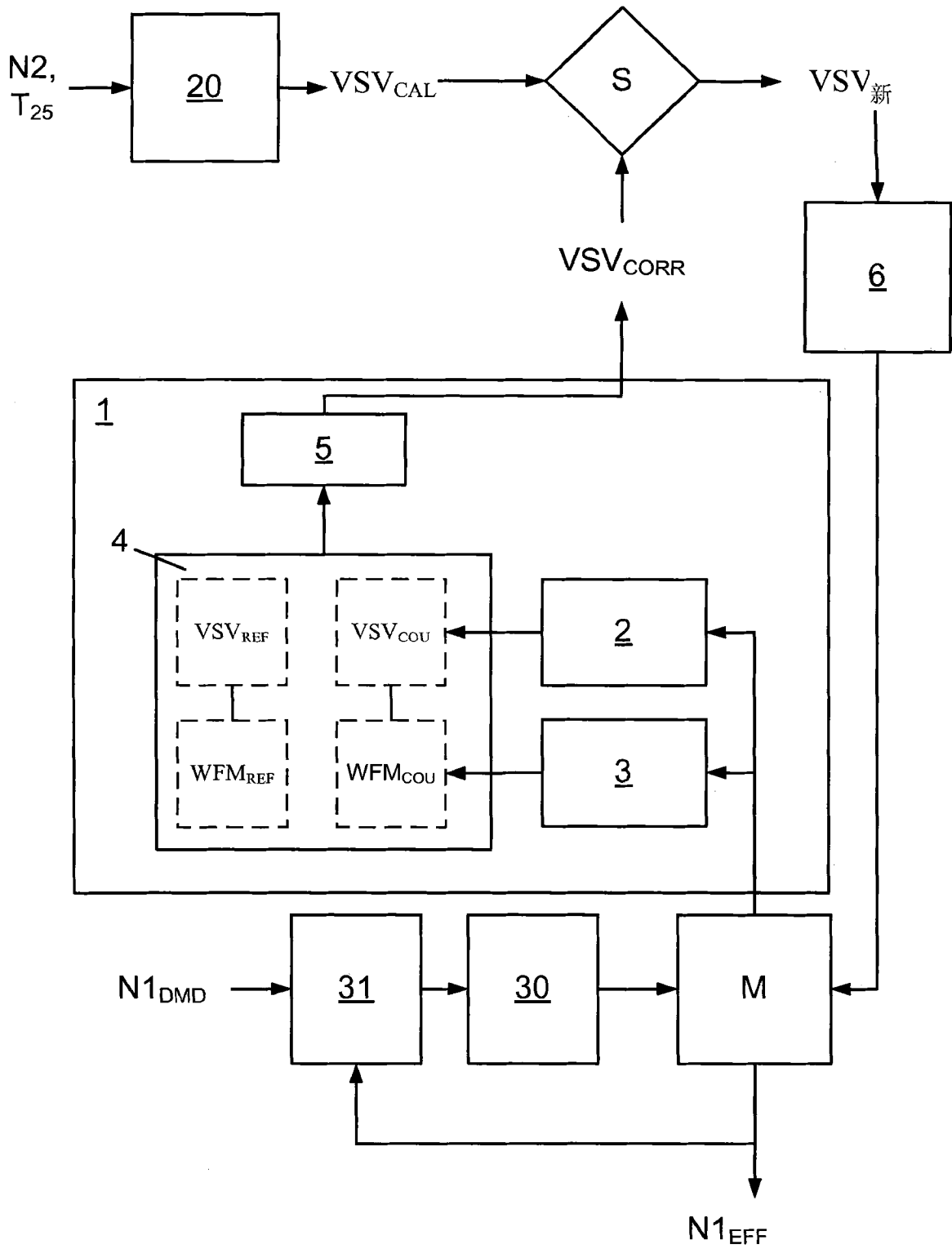


图 2

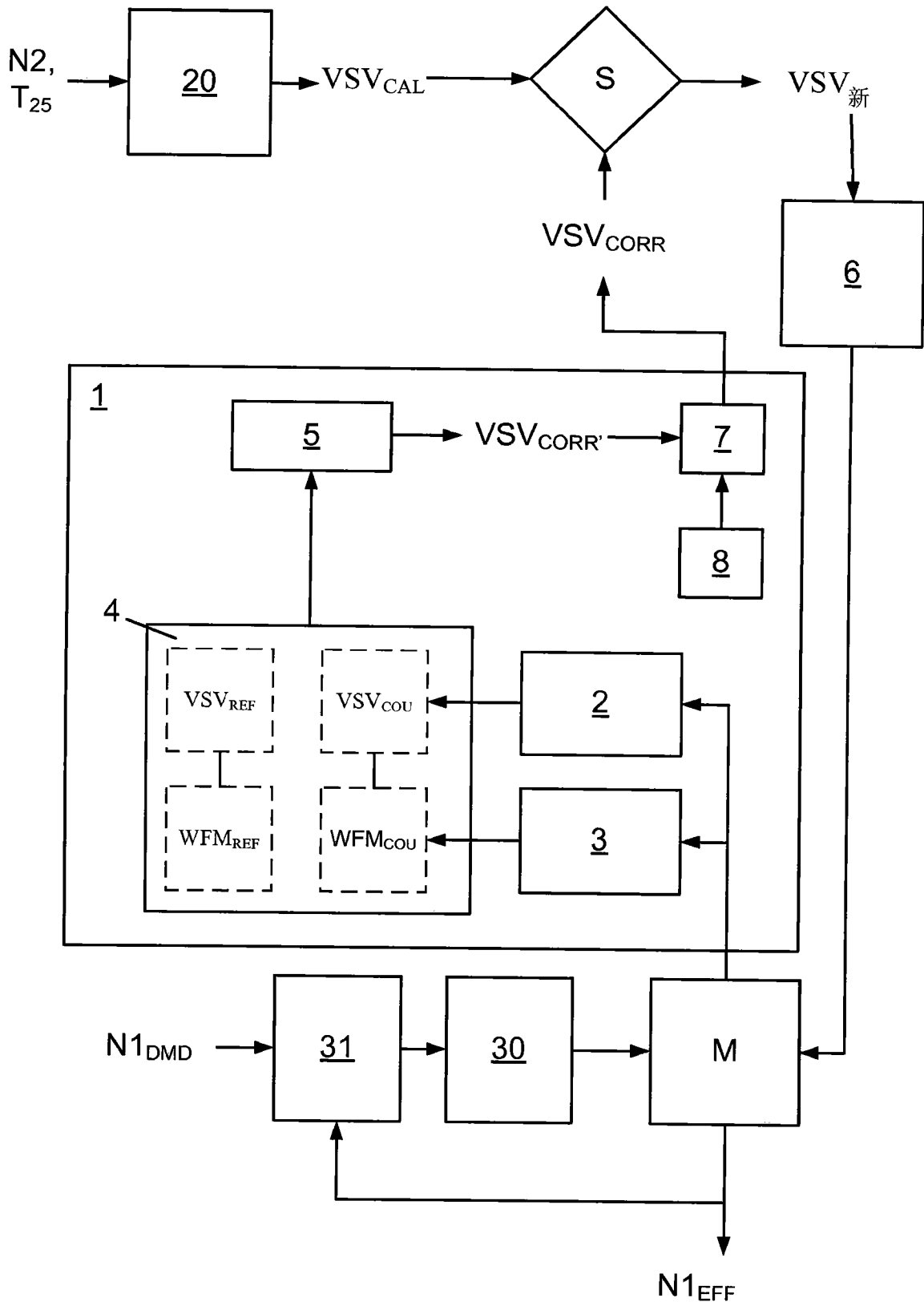


图 3

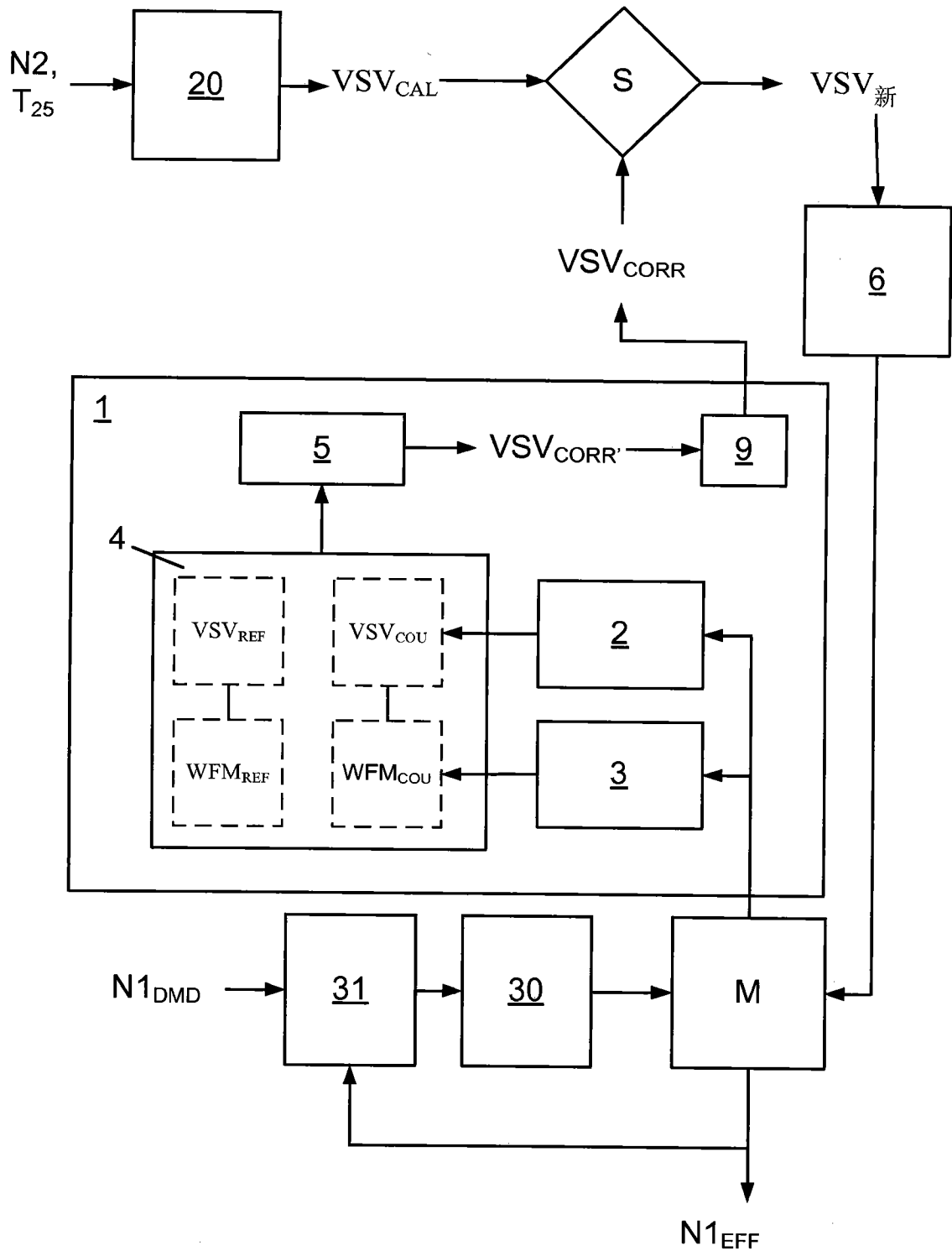


图 4

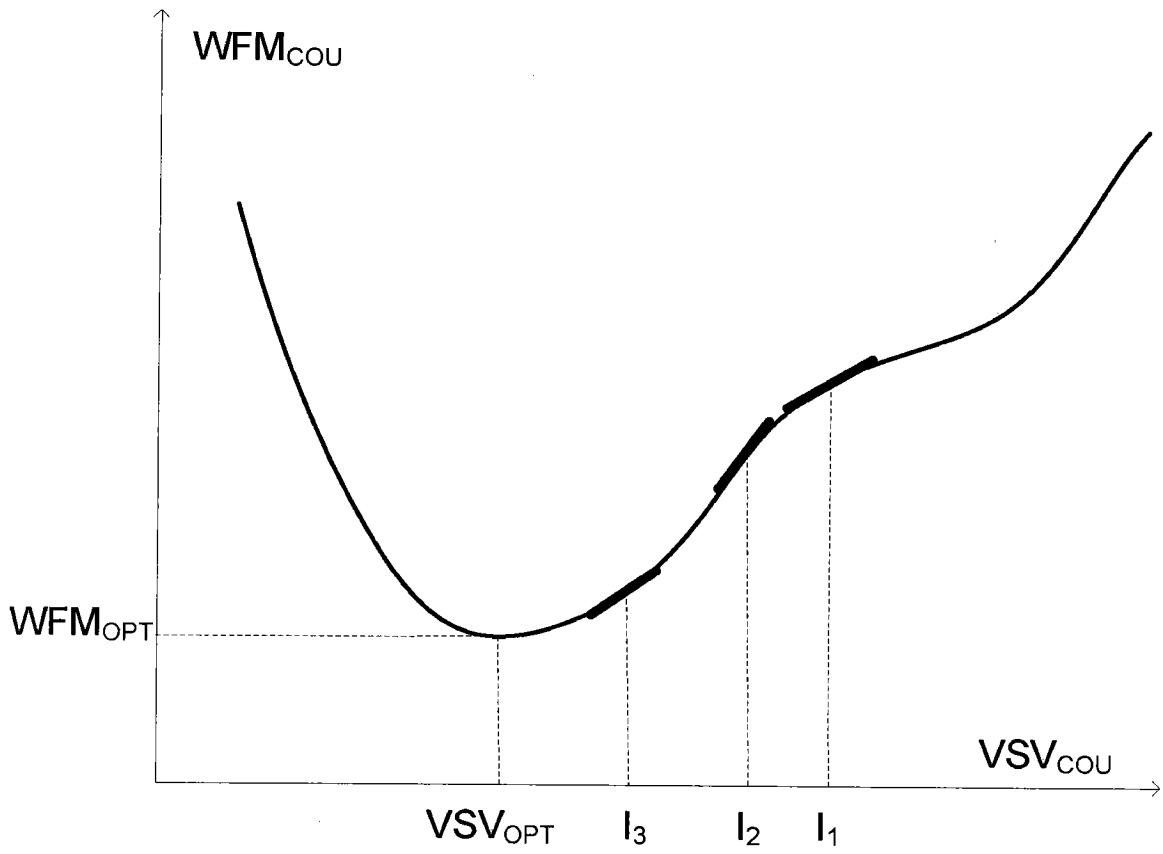


图 5