

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2019 年 12 月 19 日 (19.12.2019)



(10) 国际公布号
WO 2019/237284 A1

(51) 国际专利分类号:
G06F 17/50 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2018/091091

(22) 国际申请日: 2018 年 6 月 13 日 (13.06.2018)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(71) 申请人: 大连理工大学 (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国辽宁省大连凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。

(72) 发明人: 杜宪 (DU, Xian); 中国辽宁省大连凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。马艳华 (MA, Yanhua); 中国辽宁省大连凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning

116024 (CN)。孙希明 (SUN, Ximing); 中国辽宁省大连凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。彭凯 (PENG, Kai); 中国辽宁省大连凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(54) Title: METHOD FOR MODELING STARTING PROCESS OF MICRO GAS TURBINE ENGINE

(54) 发明名称: 一种微型燃气涡轮发动机起动过程建模方法

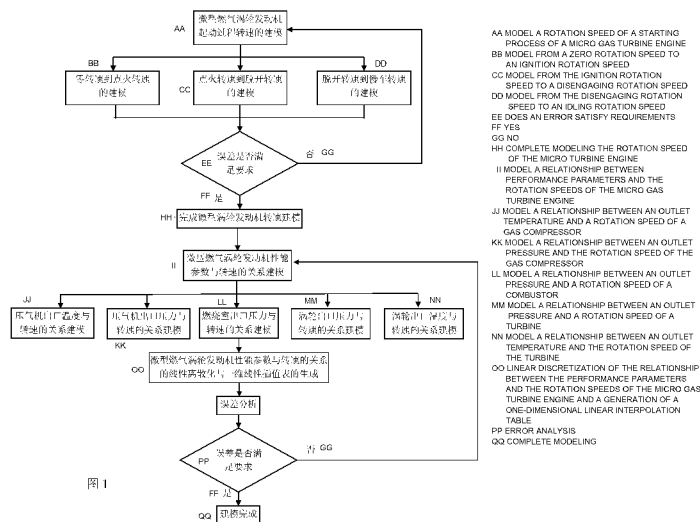


图 1

(57) Abstract: A method for modeling a starting process of a micro gas turbine engine. Steps are as follows: modeling rotation speeds of the micro gas turbine engine; modeling a relationship between performance parameters and the rotation speeds of the micro gas turbine engine; and performing an error analysis. The method for modeling the starting process of the micro gas turbine engine is based on a method for modeling a starting process of a micro gas turbine engine according to a combination of a mechanism and an identification method, and makes up for the deficiency of the prior art; moreover, an operation is simple, accuracy is high, and modeling the whole



(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

micro gas turbine engine can be implemented. The method has certain expansibility and can be extended to other fields.

(57) 摘要: 一种微型燃气涡轮发动机起动过程建模方法, 步骤如下: 微型燃气涡轮发动机转速的建模; 微型燃气涡轮发动机的性能参数与转速的关系建模; 误差分析。该微型燃气涡轮发动机起动过程建模方法基于机理和辨识方法相结合的微型燃气涡轮发动机起动过程建模方法, 弥补了现有技术的不足, 且操作简单, 准确率高, 并可实现整个微型燃气涡轮发动机的建模。该方法具有一定的拓展性, 可推广到其它领域。

一种微型燃气涡轮发动机起动过程建模方法

技术领域

本发明属于发动机建模技术领域，具体涉及一种微型燃气涡轮发动机起动过程建模方法。

背景技术

微型燃气涡轮发动机是一个复杂的热力学系统，由压气机、燃烧室和涡轮组成。在对微型燃气涡轮发动机起动的研究过程中，如何建立微型燃气涡轮发动机慢车转速以下的数学模型并进行起动性能的数值计算，能为微型燃气涡轮发动机起动过程的控制提供参考。因此，对微型燃气涡轮发动机的起动过程进行建模是非常有价值的。

在微型燃气涡轮发动机建模技术方面，国内外公开发表的文献较少，亦未有相关专利涉及此方面的内容。在已有文献中，多是利用支持向量机等方法对发动机起动过程进行建模，但是支持向量机需要大量的发动机起动过程数据，通过对输入输出数据的训练得到发动机的起动模型，然而对于新研发的微型燃气涡轮发动机而言，一般通过燃气涡轮发动机的设计参数得到起动过程的燃油计划，为了保证燃气涡轮发动机能成功起动，通过人工手动的方法完成微型燃气涡轮发动机的起动过程。通过人工起动得到的实验数据建立燃气涡轮发动机的起动模型，然后再通过起动模型进一步优化发动机起动过程的燃油计划，存在一定的局限性。

对于微型燃气涡轮发动机而言，当前的起动过程建模技术已经渐渐满足不了工程的实际需要。因此，探索出一种有效且适用于工程实践的高效建模方法成为一个亟需解决的问题。微型燃气涡轮发动机起动建模技术也因此具备了广阔的研究和应用前景。

发明内容

本发明是为了解决现有技术存在的燃气涡轮发动机起动过程建模数据要求量大，效率低下，建模精度不高的问题，而提出的一种微型燃气涡轮发动机起动过程建模方法。

一种微型燃气涡轮发动机起动过程建模方法，包括以下步骤：

第一步，微型燃气涡轮发动机转速的建模；

第二步，微型燃气涡轮发动机的性能参数与转速的关系建模；

第三步，误差分析。

现具体阐述如下：

第一步，微型燃气涡轮发动机转速的建模；

步骤 1：分析微型燃气涡轮发动机起动过程机理，通过发动机转子效应建模方法，具体是通过微型燃气涡轮发动机起动电机的电流值和微型燃气涡轮发动机的转速值，建立燃气涡轮发动机剩余转矩模型，在此基础上计算得到稳态燃料量，从而通过线性插值的方法得到微型燃气涡轮发动机燃料量和微型燃气涡轮发动机转速之间的关系，运用多项式拟合的方法得到微型燃气涡轮发动机燃料量和转速之间的表达式；

步骤 2：根据微型燃气涡轮发动机起动过程的燃料量和发动机转速的试验数据，并与步骤 1 所建的稳态燃料量和微型燃气涡轮发动机转速的关系式进行对比，得到起动过程的燃料量与稳态燃料量之间的差值；

步骤 3：步骤 2 得到的燃料量差值能使微型燃气涡轮发动机产生加速效应，由于燃料量差值与微型燃气涡轮发动机转速之间的关系是高度非线性的，利用分段线性化的方法去拟合燃料量差值与微型燃气涡轮发动机转速之间的关系；

步骤 4：燃料量差值和起动机电流共同作用，使微型燃气涡轮发动机产生加

速效应，通过对微型燃气涡轮发动机的加速度进行积分，从而得到微型燃气涡轮发动机的速度；

第二步，微型燃气涡轮发动机的性能参数与转速的关系建模；

步骤 5：由于微型燃气涡轮发动机的转速与燃气性能参数之间的关系十分密切，采用多项式拟合的方法得到微型燃气涡轮发动机性能参数（压气机出口压力、压气机出口温度、燃烧室出口温度、燃烧室出口压力、涡轮后出口温度和涡轮后出口压力等）与微型燃气涡轮发动机转速之间的关系；

步骤 6：由于通过生成的多项式计算燃气涡轮发动机性能参数会减慢模型的速度，同时也可能引起数值计算不稳定的现象，所以将多项式进行离散化，生成一维插值表的形式，有利于提高起动模型的实时性。

第三步，误差分析。

所建立的微型燃气涡轮发动机起动模型的各个性能参数与试验数据的误差均在 5% 以内，各个性能参数此处指压气机出口压力、压气机出口温度、燃烧室出口压力、涡轮出口压力、涡轮出口温度、微型燃气涡轮发动机转速。

本发明的有益效果：

现有微型燃气涡轮发动机建模方法多是利用纯机理或机器学习的方法，难以准确刻画微型燃气涡轮发动机的起动过程，而机器学习需要大量的试验数据。在工程实践中，目前普遍采用的纯机理操作繁复，效率低下，建模准确度不高。本发明提供了一种基于机理和辨识方法相结合的微型燃气涡轮发动机起动过程建模方法，弥补了现有技术的不足。本发明操作简单，准确率高，并可实现整个微型燃气涡轮发动机的建模。该方法具有一定的拓展性，可推广到其它领域。

附图说明

图 1 为微型燃气涡轮发动机建模流程图。

图 2 为剩余转矩与燃料量的关系图。

图 3 为燃料量差值与剩余扭矩关系图。

图 4 为起动过程建模误差对比图，其中，(a)压气机出口温度误差；(b)压气机出口压力误差；(c)燃烧室出口压力误差；(d)涡轮出口压力误差；(e)涡轮出口温度误差；(f)燃机转速误差。

具体实施方式

为了使本发明的目的、技术及优点更加清楚明白，以下结合附图及实例，对本发明进行进一步详细说明。

一种微型燃气涡轮发动机起动过程建模方法，包括以下步骤：

步骤 1：微型燃气涡轮发动机的起动过程分为 3 个阶段，第一阶段，发动机转速由零到涡轮开始产生功率的转速，发动机完全由起动机带动加速；第二阶段，由涡轮开始产生功率的转速到起动机脱开；第三阶段，由起动机脱开转速至慢车转速；

按照发动机起动过程的各个阶段，对其进行建模；

第一阶段，发动机转速由零到涡轮开始产生功率的转速（即从零转速到点火转速），发动机完全由起动机带动加速，满足发动机转子运动方程，即满足公式 (1)。

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{st} \quad (1)$$

式中 $M_{st} = K_{st} \times I_{st}$ ，其中 I_{st} 表示起动机电流值， K_{st} 为起动机转矩常数，针对不同类型的起动机，其值不同。此处所指的起动机为电起动机。 ω 为微型燃气涡轮发动机的角速度， J 为归算到微型燃气涡轮发动机轴上的转动惯量，即等效转动惯量，针对不同的微型燃气涡轮发动机的结构，利用机械能守恒进行归算。具

体的归算公式参照 (2)

$$\frac{1}{2} \times J \times \omega^2 = \frac{1}{2} \times J_1 \times \omega_1^2 + \frac{1}{2} \times J_2 \times \omega_2^2 + \dots + \frac{1}{2} \times J_n \times \omega_n^2 \quad (2)$$

式中, J_1 为微型燃气涡轮发动机轴带动的负载 1 的转动惯量, ω_1 为微型燃气涡轮发动机轴带动的负载 1 的角速度; J_2 为微型燃气涡轮发动机轴带动的负载 2 的转动惯量, ω_2 为微型燃气涡轮发动机轴带动的负载 2 的角速度; J_n 为微型燃气涡轮发动机轴带动的负载 n 的转动惯量, ω_n 为微型燃气涡轮发动机轴带动的负载 n 的角速度。

第二阶段, 发动机转速由点火转速到起动机脱开转速, 发动机在起动机和涡轮的共同带动下加速, 满足发动机转子运动方程, 即满足公式 (3)。

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{st} + M_g \quad (3)$$

式中, M_{gas} 就是点火后微型燃气涡轮发动机的剩余扭矩 ($M_{gas} = M_T - M_C - M_f$), M_T 代表涡轮产生的扭矩, M_C 代表压气机消耗的扭矩, 一般与压气机转速的平方成正比, M_f 表示摩擦引起的扭矩消耗, 一般与转速的平方成正比; M_{st} 是电起动机提供的扭矩, 与 (1) 式中相同。J 与公式 (1) 计算过程相同, ω 公式 (1) 相同。

第三阶段, 发动机在剩余转速的作用下由发动机在起动机脱开转速加速慢车转速的过程, 满足公式 (4)。

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{ga} \quad (4)$$

式中, J 与公式 (1) 相同, ω 公式 (1) 相同。 M_{gas} 与公式 (3) 计算过程相同。

步骤 2: 第一阶段微型燃气涡轮发动机转速的建模

首先, 通过计算得到发动机等效转动惯量 (具体参见公式 (2)); 利用转子

运动方程式，结合起动机电流值，根据 $M_{st}=K_{st} \times I_{st}$ 计算得到起动机加在微型燃气涡轮发动机轴上的转矩值，利用一阶龙格-库塔方法（欧拉方法）对其进行积分，得到该模型的微型燃气涡轮发动机转速，保证该微型燃气涡轮发动机的转速和试验数据中的燃机转速误差在 5% 以内；

步骤 3：第二阶段微型燃气涡轮发动机转速的建模

步骤 3.1：通过计算得到发动机等效转动惯量（具体参见公式（2））；利用转子运动方程式，结合起动机电流值，得到燃机剩余转矩值，燃机剩余转矩=涡轮产生的转矩-压气机消耗的转矩-摩擦引起的转矩，筛选出燃机剩余扭矩绝对值为零的所有点，根据筛选出的燃机剩余扭矩绝对值为零的点，利用线性插值方法确认出各点相对应的燃料量，该燃料量即为对应点的“稳态燃料量”；

步骤 3.2：在步骤 3.1 的基础上，进行多项式拟合，得到燃机转速和稳态燃料量之间的关系表达式，其关系式是一个三项多项式，具体的多项式系数因燃料种类的不同而有所差别，此处采用的燃料为天然气，其具体表达式参见公式（5）：

$$W_{fss} = 1.693 \times 10^{-16} \times N_g^3 - 7.637 \times 10^{-12} \times N_g^2 + 2.842 \times 10^{-7} \times N_g - 0.0004557 \quad (5)$$

步骤 3.3：微型燃气涡轮发动机的剩余转矩和燃料量差值之间的函数关系十分复杂，呈现高度的非线性，对其进行简化，采用分段线性函数刻画该复杂关系，假设燃机剩余转矩与燃料量差值之间是分段一次函数关系，即采用公式（6）进行刻画。

$$M_{gas} = k(n) \times (W_f - W_{fss}) + b(n) \quad (6)$$

式中， $k(n)$ 、 $b(n)$ 为系数，不同的燃机转速，其值不相同，即 $k(n)$ 、 $b(n)$ 数值是燃机转速 n 的函数， $(W_f - W_{fss})$ 为动态燃料量和多项式得到的稳态燃料量之间的差值，燃机转速不同，其值也不同；

步骤 3.4: 微型燃气涡轮发动机的剩余转矩与起动机作用在燃机轴上的转矩求和, 再利用一阶龙格-库塔方法 (欧拉方法) 对其进行积分, 得到该模型计算出的微型燃气涡轮发动机转速, 保证该微型燃气涡轮发动机的转速和试验数据中的燃机转速误差在 5% 以内;

步骤 3.5: 为了保证步骤 3.4 中提到的“微型燃气涡轮发动机的转速和试验数据中的燃机转速误差在 5% 以内”, 需要根据微型燃气涡轮发动机的转速来实时调整公式 (6) 中的 $k(n)$ 、 $b(n)$, 使构建的微型燃气涡轮发动机起动模型的转速最大程度地接近试验转速。

步骤 4: 第三阶段微型燃气涡轮发动机转速的建模

首先, 通过计算得到发动机等效转动惯量 (具体参见公式 (2)); 利用转子运动方程式, 结合燃料量, 根据公式 (6) 计算得到起动机加在微型燃气涡轮发动机轴上的转矩值, 利用一阶龙格-库塔方法 (欧拉方法) 对其进行积分, 得到该模型的微型燃气涡轮发动机转速, 保证该微型燃气涡轮发动机的转速和试验数据中的燃机转速误差在 5% 以内; 需要根据微型燃气涡轮发动机的转速来实时调整公式 (6) 中的 $k(n)$ 、 $b(n)$, 使构建的微型燃气涡轮发动机起动模型的转速最大程度地接近试验转速。

步骤 5: 微型燃气涡轮发动机的性能参数与燃气涡轮发动机转速之间的关系十分密切, 此处提到的燃气涡轮发动机的性能参数主要包括: 压气机出口温度、压气机出口压力、燃烧室出口压力、涡轮出口温度、涡轮出口压力五个参数, 利用 MATLAB 自带的拟合工具拟合出燃气涡轮发动机的性能参数和燃气涡轮发动机转速的函数表达式, 即:

$$T_2 = K_T \times N_g^2 \quad (7)$$

式(7)中, T_2 为压气机出口温度, K_T 为压气机出口的温度系数, 不同的启动运行过程, 其参数不同, N_g 表示微型燃气涡轮发动机的转速;

$$P_2 = K_p \times N_g^2 \quad (8)$$

式(8)中, P_2 压气机出口压力, K_p 为压气机出口的压力系数, 不同的启动运行过程, 其参数不同, N_g 表示微型燃气涡轮发动机的转速;

$$P_{3c} = K_c \times N_g^2 \quad (9)$$

式(9)中, P_{3c} 为燃烧室出口压力, K_c 为燃烧室的压力系数, 不同的启动运行过程, 其参数不同, N_g 表示微型燃气涡轮发动机的转速;

$$P_4 = \text{constant} + k_{wp} \times N_g \quad (10)$$

式(10)中, 故涡轮出口压力 P_4 建模为常值 + $k_{wp} \times N_g$, 常值为标准大气压强的 1.03 倍, $k_{wp} \times N_g$ 与微型涡轮发动机工作转速有关, k_{wp} 随微型涡轮发动机转速的变化而变化;

$$\begin{aligned} T_4 &= K_t \times N_g & N_g &\in [0, 0.4 \times N_{gt}] \\ T_4 &= \text{constant} & N_g &\in [0.4 \times N_{gt}, N_{idle}] \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中, T_4 为涡轮出口温度, K_t 为涡轮出口的温度系数, 不同的启动运行过程, 其参数不同, N_g 表示微型燃气涡轮发动机的转速, N_{gt} 表示微型燃气涡轮发动机的额定转速, N_{idle} 表示微型燃气涡轮发动机的慢车转速;

步骤 6: 将所得的燃气涡轮发动机性能参数和转速之间的多项式函数关系进行线性化离散, 即对公式(7)、(8)、(9)、(10)、(11)进行线性离散, 为了保证离散精度, 微型燃气涡轮发动机转速的步长值取为 $0.2\% \times N_{gt}$, 将离散化处理后的数据放入相应的一维线性插值表。

误差分析: 根据燃气涡轮发动机的试验数据, 得到压气机出口压力、压

气机出口温度、燃烧室出口压力、涡轮出口压力、涡轮出口温度、微型燃气涡轮发动机转速等参数与燃机起动模型之间的差距均在 5%以内，说明本发明所提出的微型燃气涡轮发动机起动过程的建模方法是有效的、可行的。

权利要求书

1.一种微型燃气涡轮发动机起动过程建模方法，其特征在于，步骤如下：

步骤 1：微型燃气涡轮发动机的起动过程分为 3 个阶段，第一阶段，发动机转速由零到涡轮开始产生功率的转速，发动机完全由起动机带动加速；第二阶段，由涡轮开始产生功率的转速到起动机脱开；第三阶段，由起动机脱开转速至慢车转速；

按照发动机起动过程的各个阶段，对其进行建模；

第一阶段，发动机转速由零到涡轮开始产生功率的转速即从零转速到点火转速，发动机完全由起动机带动加速，满足发动机转子运动方程，即满足公式 (1)：

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{st} \quad (1)$$

式中 $M_{st} = K_{st} \times I_{st}$ ，其中 I_{st} 表示起动机电流值， K_{st} 为起动机转矩常数； ω 为微型燃气涡轮发动机的角速度， J 为归算到微型燃气涡轮发动机轴上的转动惯量，即等效转动惯量，针对不同的微型燃气涡轮发动机的结构，利用机械能守恒进行归算；具体的归算公式 (2)

$$\frac{1}{2} \times J \times \omega^2 = \frac{1}{2} \times J_1 \times \omega_1^2 + \frac{1}{2} \times J_2 \times \omega_2^2 + \dots + \frac{1}{2} \times J_n \times \omega_n^2 \quad (2)$$

式中， J_1 为微型燃气涡轮发动机轴带动的负载 1 的转动惯量， ω_1 为微型燃气涡轮发动机轴带动的负载 1 的角速度； J_2 为微型燃气涡轮发动机轴带动的负载 2 的转动惯量， ω_2 为微型燃气涡轮发动机轴带动的负载 2 的角速度； J_n 为微型燃气涡轮发动机轴带动的负载 n 的转动惯量， ω_n 为微型燃气涡轮发动机轴带动的负载 n 的角速度；

第二阶段，发动机转速由点火转速到起动机脱开转速，发动机在起动机和涡轮的共同带动下加速，满足发动机转子运动方程，即满足公式 (3)：

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{st} + M_{gas} \quad (3)$$

式中, M_{gas} 是点火后微型燃气涡轮发动机的剩余扭矩 M_{gas} , M_T 代表涡轮产生的扭矩; M_c 代表压气机消耗的扭矩, 与压气机转速的平方成正比; M_f 表示摩擦引起的扭矩消耗, 与转速的平方成正比; M_{st} 是电起动机提供的扭矩, 与公式 (1) 相同; J 与公式 (1) 相同, ω 与公式 (1) 相同;

第三阶段, 微型燃气涡轮发动机在剩余转速的作用下, 由发动机在起动机脱开转速加速慢车转速的过程, 满足公式 (4):

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{ga} \quad (4)$$

式中, J 与公式 (1) 相同, ω 与公式 (1) 相同; M_{gas} 与公式 (3) 相同;

步骤 2: 第一阶段微型燃气涡轮发动机转速的建模

首先, 通过计算得到发动机等效转动惯量, 见公式 (2); 利用转子运动方程式, 结合起动机电流值, 根据 $M_{st} = K_{st} \times I_{st}$ 计算得到起动机加在微型燃气涡轮发动机轴上的扭矩值, 利用一阶龙格-库塔方法对其进行积分, 得到该模型的微型燃气涡轮发动机转速, 保证该微型燃气涡轮发动机的转速和试验数据中的燃机转速误差在 5% 以内;

步骤 3: 第二阶段微型燃气涡轮发动机转速的建模

步骤 3.1: 通过计算得到发动机等效转动惯量, 见公式 (2); 利用转子运动方程式, 结合起动机电流值, 得到燃机剩余扭矩值, 燃机剩余扭矩=涡轮产生的扭矩-压气机消耗的扭矩-摩擦引起的扭矩, 筛选出燃机剩余扭矩绝对值为零的所有点, 根据筛选出的燃机剩余扭矩绝对值为零的点, 利用线性插值方法确认出各点对应的燃料量, 该燃料量即为对应点的“稳态燃料量”;

步骤 3.2: 在步骤 3.1 的基础上, 进行多项式拟合, 得到燃机转速和稳态燃

料量之间的关系表达式，其关系式是三项多项式，表达式（5）：

$$W_{fss} = 1.693 \times 10^{-16} \times N_g^3 - 7.637 \times 10^{-12} \times N_g^2 + 2.842 \times 10^{-7} \times N_g - 0.0004557 \quad (5)$$

步骤 3.3：微型燃气涡轮发动机的剩余转矩和燃料量差值之间的函数关系十分复杂，呈现高度的非线性，对其进行简化，因此，采用分段线性函数刻画该复杂关系，假设燃机剩余转矩与燃料量差值之间是分段一次函数关系，即采用公式（6）进行简化

$$M_{gas} = k(n) \times (W_f - W_{fss}) + b(n) \quad (6)$$

式中， $k(n)$ 、 $b(n)$ 为系数，不同的燃机转速，其值不相同，即 $k(n)$ 、 $b(n)$ 数值是燃机转速 n 的函数， $(W_f - W_{fss})$ 为动态燃料量和多项式得到的稳态燃料量之间的差值，燃机转速不同，其值也不同；

步骤 3.4：微型燃气涡轮发动机的剩余转矩与起动机作用在燃机轴上的转矩求和，再利用一阶龙格-库塔方法对其进行积分，得到该模型计算出的微型燃气涡轮发动机转速，保证该微型燃气涡轮发动机的转速和试验数据中的燃机转速误差在 5% 以内；

步骤 3.5：为了保证步骤 3.4 中提到的“微型燃气涡轮发动机的转速和试验数据中的燃机转速误差在 5% 以内”，需根据微型燃气涡轮发动机的转速来实时调整公式（6）中的 $k(n)$ 、 $b(n)$ ，使构建的微型燃气涡轮发动机起动模型的转速最大程度地接近实际的试验转速；

步骤 4：第三阶段微型燃气涡轮发动机转速的建模

首先，通过计算得到发动机等效转动惯量，见公式（2）；利用转子运动方程式，结合燃料量，根据公式（6）计算得到起动机加在微型燃气涡轮发动机轴上的转矩值，利用一阶龙格-库塔方法对其进行积分，得到该模型的微型燃气涡轮发动机转速，保证该微型燃气涡轮发动机的转速和试验数据中的燃机转速误

差在 5% 以内；需根据微型燃气涡轮发动机的转速来实时调整公式 (6) 中的 $k(n)$ 、 $b(n)$ ，使构建的微型燃气涡轮发动机起动模型的转速最大程度地接近实际的试验转速；

步骤 5：微型燃气涡轮发动机的性能参数与燃气涡轮发动机转速之间的关系十分密切，燃气涡轮发动机的性能参数包括压气机出口温度、压气机出口压力、燃烧室出口压力、涡轮出口温度和涡轮出口压力五个参数，拟合燃气涡轮发动机的性能参数和燃气涡轮发动机转速的函数表达式，即：

$$T_2 = K_T \times N_g^2 \quad (7)$$

式 (7) 中， T_2 为压气机出口温度， K_T 为压气机出口的温度系数，不同的起动运行过程，其参数不同， N_g 表示微型燃气涡轮发动机的转速；

$$P_2 = K_p \times N_g^2 \quad (8)$$

式 (8) 中， P_2 压气机出口压力， K_p 为压气机出口的压力系数，不同的起动运行过程，其参数不同， N_g 表示微型燃气涡轮发动机的转速；

$$P_{3c} = K_c \times N_g^2 \quad (9)$$

式 (9) 中， P_{3c} 为燃烧室出口压力， K_c 为燃烧室的压力系数，不同的起动运行过程，其参数不同， N_g 表示微型燃气涡轮发动机的转速；

$$P_4 = \text{constant} + k_{wp} \times N_g \quad (10)$$

式 (10) 中，故涡轮出口压力 P_4 建模为常值 + $k_{wp} \times N_g$ ，常值为标准大气压强的 1.03 倍， $k_{wp} \times N_g$ 与微型涡轮发动机工作转速有关， k_{wp} 随微型涡轮发动机转速的变化而变化；

$$\begin{aligned} T_4 &= K_t \times N_g & N_g &\in [0, 0.4 \times N_{gt}] \\ T_4 &= \text{constant} & N_g &\in [0.4 \times N_{gt}, N_{idle}] \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中, T_4 为涡轮出口温度, K_t 为涡轮出口的温度系数, 不同的起动运行过程, 其参数不同, N_g 表示微型燃气涡轮发动机的转速, N_{gt} 表示微型燃气涡轮发动机的额定转速, N_{idle} 表示微型燃气涡轮发动机的慢车转速;

步骤 6: 将所得的燃气涡轮发动机性能参数和转速之间的多项式函数关系进行线性化离散, 即对公式(7)、(8)、(9)、(10)、(11)进行线性离散, 为了保证离散精度, 微型燃气涡轮发动机转速的步长值取为 $0.2\% \times N_{gt}$, 将离散化处理后的数据放入相应的一维线性插值表。

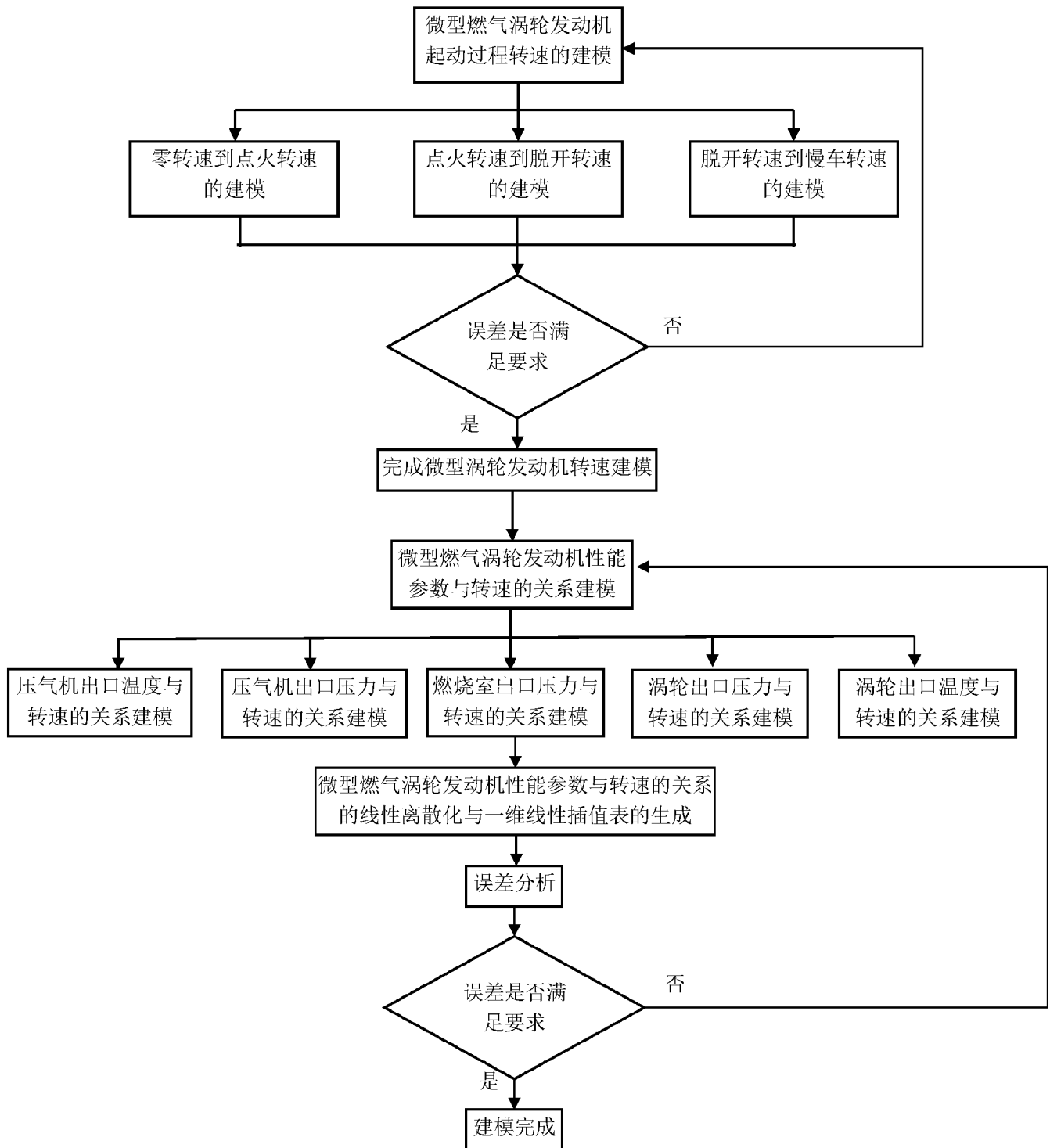


图 1

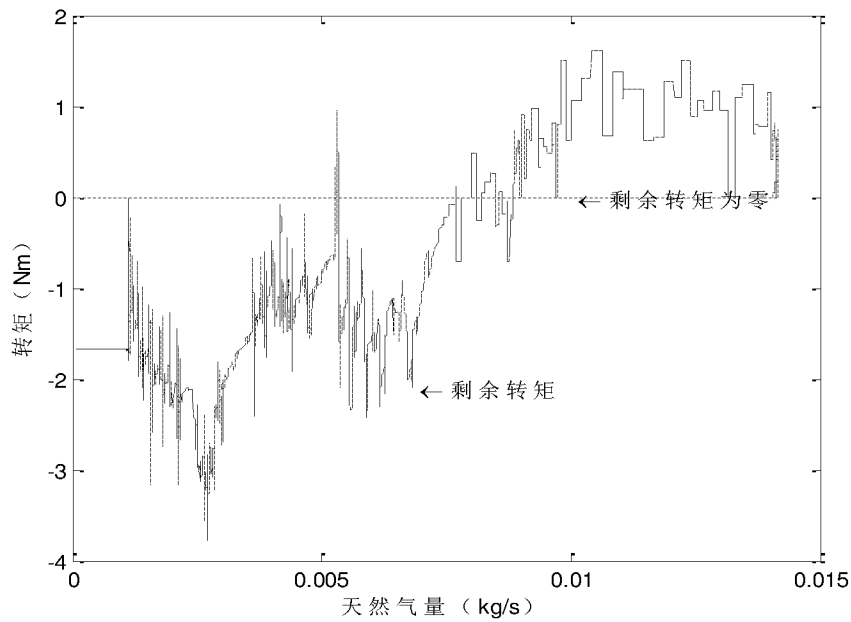


图 2

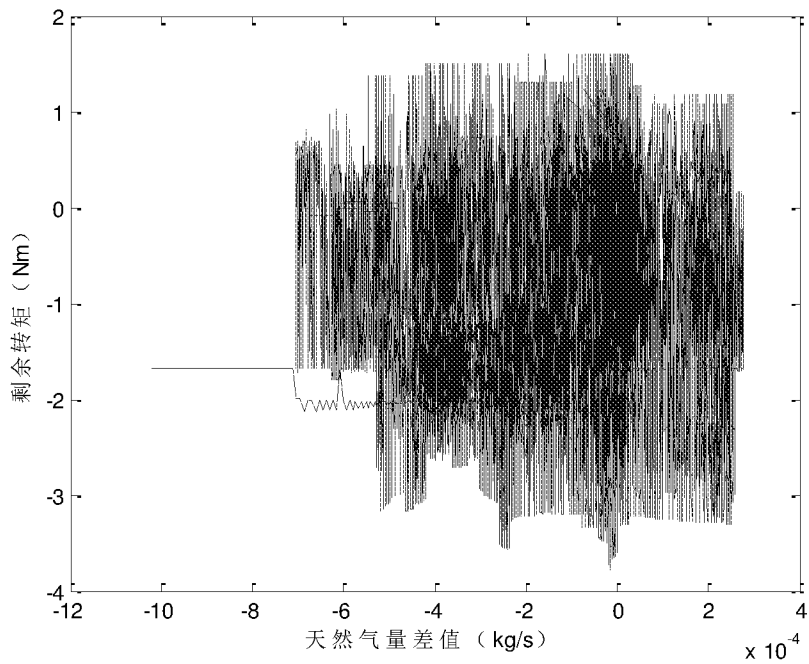
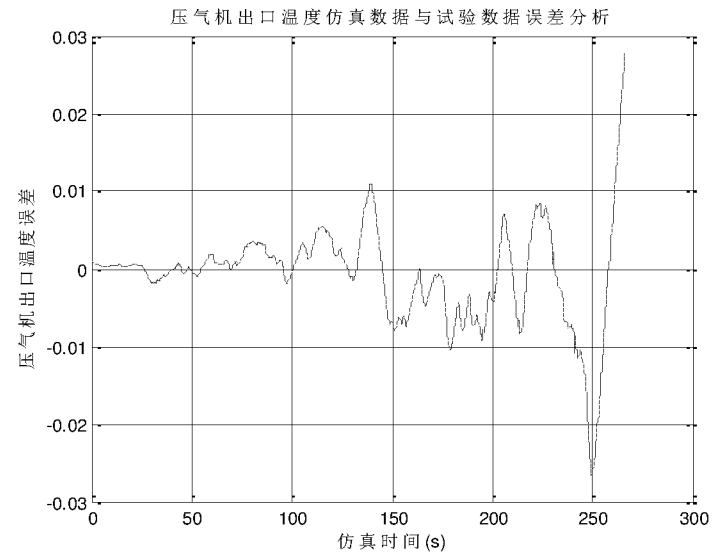
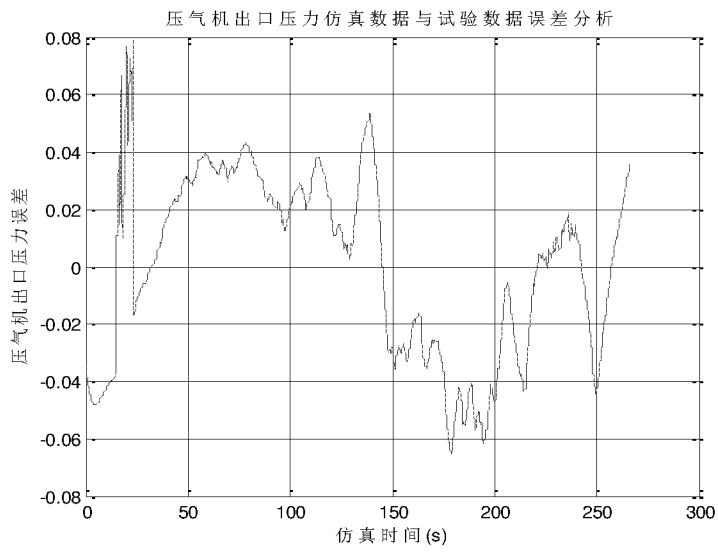


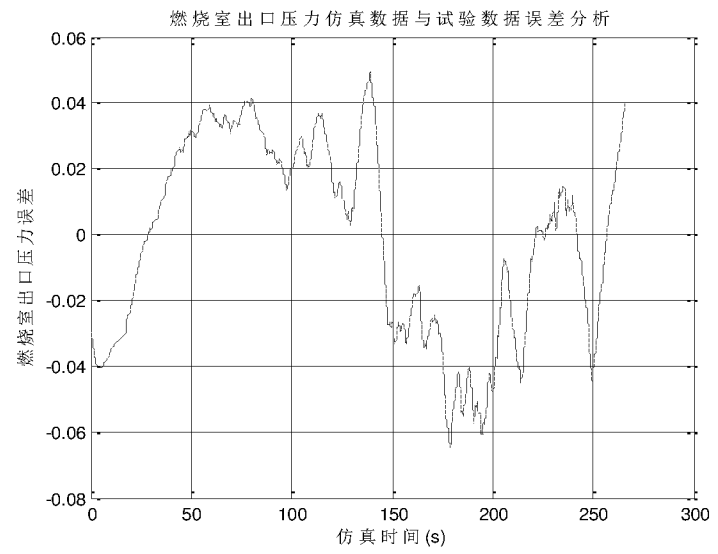
图 3



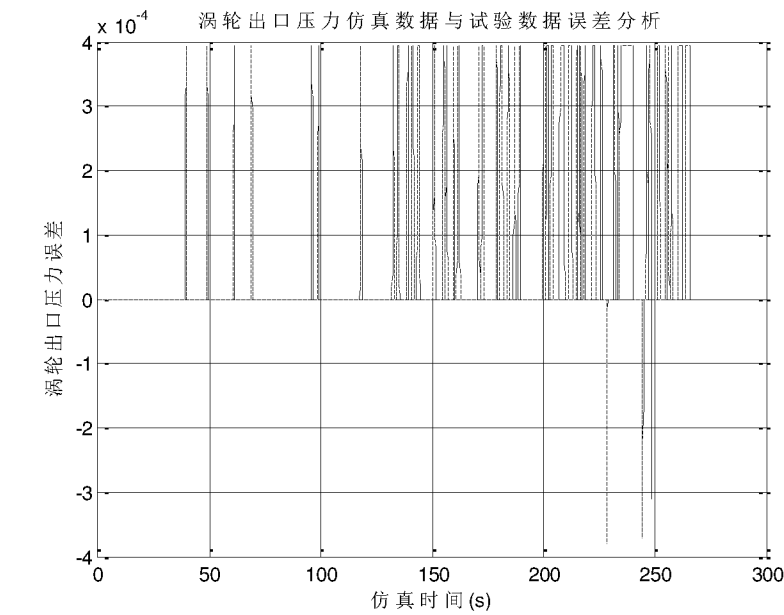
(a)



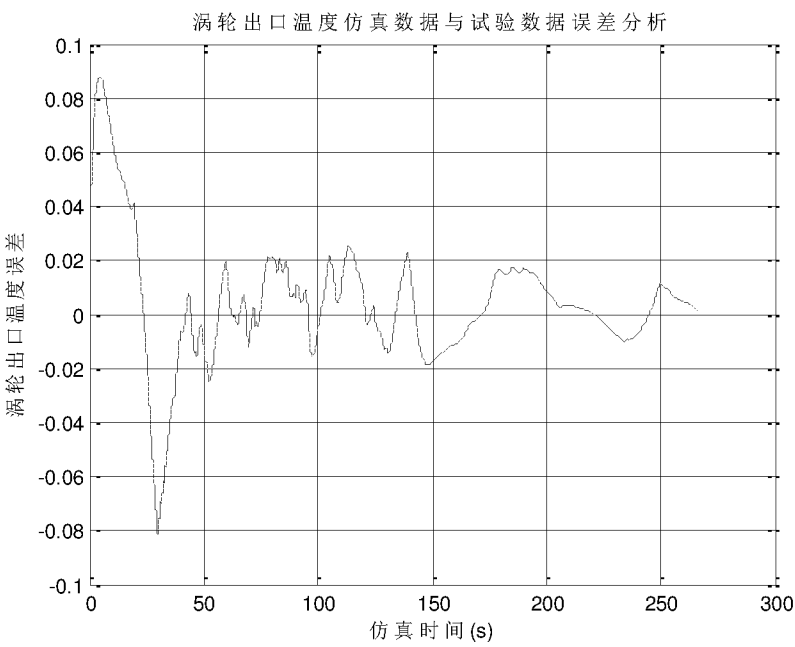
(b)



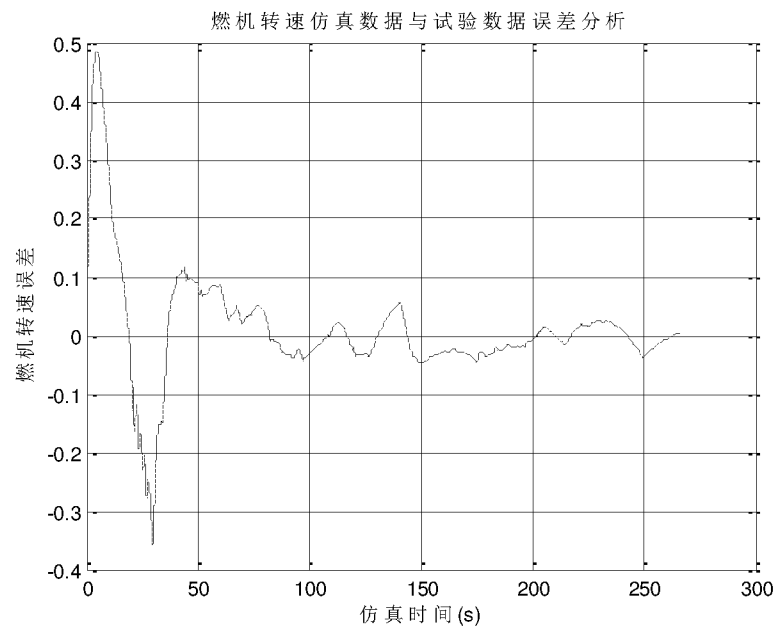
(c)



(d)



(e)



(f)

图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2018/091091

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 17/50(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F; F02C

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNMED, CNABS, CPRSABS, CNKI, DWPI, VEN: 涡轮, 燃气轮机, 起动, 启动, 建模, 阶段, 转速, 功率, 转矩, 惯量, 负载, 点火; turbine, start+, model, state, rotation, speed, power, torque, inertia, load, ignition

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 106569977 A (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS) 19 April 2017 (2017-04-19) description, pp. 4-9, and figures 1-9	1
A	CN 103838920 A (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS) 04 June 2014 (2014-06-04) entire document	1
A	CN 105021403 A (INSTITUTE OF AUTOMATION, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 04 November 2015 (2015-11-04) entire document	1
A	CN 102567569 A (GENERAL ELECTRIC COMPANY) 11 July 2012 (2012-07-11) entire document	1
A	CN 108153149 A (DOOSAN HEAVY INDUSTRIES AND CONSTRUCTION CO., LTD.) 12 June 2018 (2018-06-12) entire document	1
A	US 2017038750 A1 (SIEMENS AG) 09 February 2017 (2017-02-09) entire document	1



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

- “A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- “E” earlier application or patent but published on or after the international filing date
- “L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- “O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- “P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

21 February 2019

Date of mailing of the international search report

25 March 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

National Intellectual Property Administration, PRC (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2018/091091

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2002071398 A (CENTRAL RES INST ELECT) 08 March 2002 (2002-03-08) entire document	1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2018/091091

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	106569977	A	19 April 2017	CN	106569977	B	22 January 2019
CN	103838920	A	04 June 2014	CN	103838920	B	17 August 2016
CN	105021403	A	04 November 2015	None			
CN	102567569	A	11 July 2012	JP	2012113708	A	14 June 2012
				US	8712739	B2	29 April 2014
				FR	2967724	A1	25 May 2012
				JP	5916069	B2	11 May 2016
				US	2012130688	A1	24 May 2012
				DE	102011055474	A1	24 May 2012
				FR	2967724	B1	09 March 2018
CN	108153149	A	12 June 2018	KR	101842370	B1	26 March 2018
				EP	3333380	A1	13 June 2018
				US	2018156073	A1	07 June 2018
US	2017038750	A1	09 February 2017	None			
JP	2002071398	A	08 March 2002	None			

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2018/091091

A. 主题的分类 G06F 17/50 (2006.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类																										
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) G06F; F02C 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNMED, CNABS, CPRSABS, CNKI, DWPI, VEN: 涡轮、燃气轮机、起动、启动、建模、阶段、转速、功率、转矩、惯量、负载、点火; turbine, start+, model, state, rotation, speed, power, torque, inertia, load, ignition																										
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>CN 106569977 A (南京航空航天大学) 2017年 4月 19日 (2017 - 04 - 19) 说明书第4-9页和附图1-9</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 103838920 A (南京航空航天大学) 2014年 6月 4日 (2014 - 06 - 04) 全文</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 105021403 A (中国科学院自动化研究所) 2015年 11月 4日 (2015 - 11 - 04) 全文</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 102567569 A (通用电气公司) 2012年 7月 11日 (2012 - 07 - 11) 全文</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 108153149 A (斗山重工业建设有限公司) 2018年 6月 12日 (2018 - 06 - 12) 全文</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2017038750 A1 (SIEMENS AG) 2017年 2月 9日 (2017 - 02 - 09) 全文</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>JP 2002071398 A (CENTRAL RES INST ELECT) 2002年 3月 8日 (2002 - 03 - 08) 全文</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	A	CN 106569977 A (南京航空航天大学) 2017年 4月 19日 (2017 - 04 - 19) 说明书第4-9页和附图1-9	1	A	CN 103838920 A (南京航空航天大学) 2014年 6月 4日 (2014 - 06 - 04) 全文	1	A	CN 105021403 A (中国科学院自动化研究所) 2015年 11月 4日 (2015 - 11 - 04) 全文	1	A	CN 102567569 A (通用电气公司) 2012年 7月 11日 (2012 - 07 - 11) 全文	1	A	CN 108153149 A (斗山重工业建设有限公司) 2018年 6月 12日 (2018 - 06 - 12) 全文	1	A	US 2017038750 A1 (SIEMENS AG) 2017年 2月 9日 (2017 - 02 - 09) 全文	1	A	JP 2002071398 A (CENTRAL RES INST ELECT) 2002年 3月 8日 (2002 - 03 - 08) 全文	1
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																								
A	CN 106569977 A (南京航空航天大学) 2017年 4月 19日 (2017 - 04 - 19) 说明书第4-9页和附图1-9	1																								
A	CN 103838920 A (南京航空航天大学) 2014年 6月 4日 (2014 - 06 - 04) 全文	1																								
A	CN 105021403 A (中国科学院自动化研究所) 2015年 11月 4日 (2015 - 11 - 04) 全文	1																								
A	CN 102567569 A (通用电气公司) 2012年 7月 11日 (2012 - 07 - 11) 全文	1																								
A	CN 108153149 A (斗山重工业建设有限公司) 2018年 6月 12日 (2018 - 06 - 12) 全文	1																								
A	US 2017038750 A1 (SIEMENS AG) 2017年 2月 9日 (2017 - 02 - 09) 全文	1																								
A	JP 2002071398 A (CENTRAL RES INST ELECT) 2002年 3月 8日 (2002 - 03 - 08) 全文	1																								
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																										
<table border="0"> <tr> <td> * 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 </td> <td> “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件 </td> </tr> </table>			* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																						
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																									
国际检索实际完成的日期		国际检索报告邮寄日期																								
2019年 2月 21日		2019年 3月 25日																								
ISA/CN的名称和邮寄地址		授权官员																								
中国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		张炜 电话号码 62085300																								

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2018/091091

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	106569977	A	2017年 4月 19日	CN 106569977 B	2019年 1月 22日
CN	103838920	A	2014年 6月 4日	CN 103838920 B	2016年 8月 17日
CN	105021403	A	2015年 11月 4日	无	
CN	102567569	A	2012年 7月 11日	JP 2012113708 A	2012年 6月 14日
				US 8712739 B2	2014年 4月 29日
				FR 2967724 A1	2012年 5月 25日
				JP 5916069 B2	2016年 5月 11日
				US 2012130688 A1	2012年 5月 24日
				DE 102011055474 A1	2012年 5月 24日
				FR 2967724 B1	2018年 3月 9日
CN	108153149	A	2018年 6月 12日	KR 101842370 B1	2018年 3月 26日
				EP 3333380 A1	2018年 6月 13日
				US 2018156073 A1	2018年 6月 7日
US	2017038750	A1	2017年 2月 9日	无	
JP	2002071398	A	2002年 3月 8日	无	

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2015年1月)