

· 计算与仿真 ·

一种燃气轮机模块化非线性仿真模型

(上海交通大学) 苏 明 陈德来 张园蔚 翁史烈

[摘要] 提出了一种基于典型部件和环节的燃气轮机模块化仿真建模方法。该方法避免了微分方程右函数计算中的迭代,简化了仿真计算流程,提高了模型的灵活性和通用性。经测试,用该方法建立的三轴燃气轮机全非线性仿真模型在 486PC 机上就能实现实时仿真。

关键词 燃气轮机 系统仿真 模块化建模

中图分类号 TK472 U664.131

1 引言

在现代先进燃气轮机的开发研制过程中,对其动态过程和特性进行计算机仿真已是必不可少的环节。随着对燃气轮机性能和排放标准的提高,燃气轮机的结构和控制系统更为复杂,对燃气轮机的仿真也提出了更高的要求。在仿真建模中,不仅要考虑模型的准确性、运行的实时性,而且还要求能依对象的具体结构快速灵活的构造和修改模型,提高建模的效率,缩短仿真模型的开发、调试和应用的周期。采用模块化建模思想进行仿真建模是一条有效的途径,也是仿真建模技术发展的一个方向。

目前计算机软硬件技术已发展到了新的阶段。在计算机仿真方面,已出现了许多成熟的具有图形化模块化建模功能的通用仿真平台,为各领域的仿真建模和动态仿真分析提供了高效的、功能强大的支撑环境。利用仿真技术的最新成果,在高水平的仿真支撑环境下进行二次开发,能有效减少重复劳动,快速提高仿真技术应用水平。因此研究适合于通用仿真平台的模块化仿真建模方法就具有重要意义。对燃气轮机这类热力系统,建模中的关键问题之一是解决系统综合和微分方程右函数求解过程中的迭代问题。在热力系统模块化仿真方面,国内外都已开展了研究并取得了许多成果。但由于流体网络中存在的流量压力耦合关系,使得现有的许多模块化模型在进行系统的综合和求解时必须用专门的处理方法并建立专用的仿真软件或平台。本文以一个三轴燃气轮机为例,介绍一种非迭代的燃气轮机非线性模块化仿真模型。该模型简化了仿真计算流程,提高了模型的灵活性和通用性。

2 仿真对象分析

燃气轮机总体性能的仿真已有一段历程,其仿真模型按简化程度不同来分类,有线性化、准非线性化和非线性化模型等 [1][2]。由于燃气轮机是一种非线性很强的热力机械,在进行大工况范围的仿真

时,应采用非线性模型以保证精度。

一台燃气轮机可看作由压气机、涡轮等转动部件和包括燃烧室在内的流动连接段串接而成。连接压气机和涡轮的转轴建立了其机械联系,而流动连接段则建立了各转动部件间的气动联系。以一个船用三轴燃气轮机为例,其系统连接关系如图 1 所示。

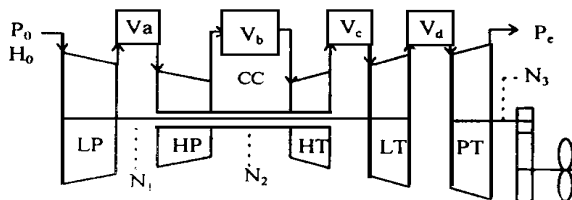


图 1 船用三轴燃气轮机

其中 V_a 、 V_c 和 V_d 是纯流动连接段, V_b 是燃烧室。对燃气轮机这样的热力系统,决定其动态过程的主要是各种惯性。如果不考虑热惯性,则主要的有转动惯性和容积惯性。容积惯性相对于转动惯性要小得多,在以往动态仿真计算中常将其略去,即认为流量压力是瞬间平衡的。动态过程的计算归结为求解描述转动惯性的转子微分方程。微分方程右函数的计算依靠求解满足压力和流量平衡条件的一组复杂的非线性代数方程。由于各部件间紧密的气动联系,满足平衡条件的这组非线性代数方程无法用显式表示,必须采用迭代求解。

实际上,在动态过程中,流动的不平衡总是存在的,只是相对于转动惯性而言,其趋于平衡的速度更快。从流过某一体积的纯流动动态变化过程(即无加热或放热及做功的情况)来看,正是由于流入流出的流体存在流量差,才产生了其间压力的变化。在燃气轮机动态建模中,如在各流动连接段处集中考虑容积惯性,则原来各部件间的流量平衡方程就应改用反映容积惯性的压力流量动态微分方程。

3 燃气轮机模块化仿真建模设计

从模块化仿真建模的角度考虑,关键问题是合理地划分和设计模块,使得模块具有典型性和可连接性。这里的可连接性是指模块间输入输出变量能够匹配,即模块的每一个输入量都可以直接从另外模块的输出量中得到。根据以上分析,可将压气机、涡轮等转动部件列为一类模块。这类模块的特点是其进出口间存在压力梯度,其流量主要由压比(或膨

胀比)决定 而流动连接段可作为另一类模块,这类模块主要考虑容积惯性,且称为容积型模块 这样划分模块,不仅物理意义明确,而且为模块的连接和系统模型的综合带来了便利。

图 2所示的是部分典型模块示意图 其中图 2a和图 2b是基本部件模块,图 2c和图 2d属容积型模块。构成整个燃气轮机仿真模型还需其它模块(略)。图 2中箭头所指的是数据传输的方向。模块内部采用端口化的变量,如 P_1, H_1, G_1 和 P_2, H_2, G_2 等,下标 1代表气流入口端的参数,2代表出口端的参数。所以图 2中的模块都表示气流从左流入右侧流出。模块中放在括号内的是微分方程状态变量

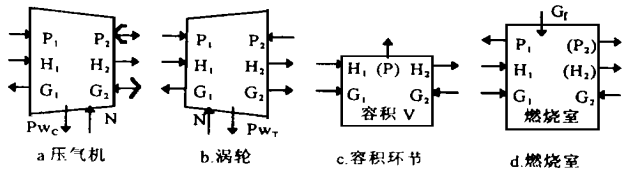


图 2 部分仿真模块示意图

3.1 压气机模块
在总体性能仿真计算中,压气机特性通常都以特性图或曲线形式给出。以压比和折合转速为自变量,折合流量和效率可表达为如下的函数形式:

$$\frac{G_1}{P_1} \frac{T_1}{N} = f_1 \left(\frac{P_2}{P_1}, \frac{N}{T_1} \right)$$

$$Z_c = f_2 \left(\frac{P_2}{P_1}, \frac{N}{T_1} \right) \quad (1)$$

只要 P_1, P_2, H_1 和转速 N 给定,就能确定压气机的状态。利用特性图表插值和变比热关系,就能算出出口焓 H_2 输入功 P_{w_c} 和进出口的流量 G_1, G_2 所以在压气机模块中, P_1, P_2, H_1 和 N 定义为输入量(箭头向内), G_1, G_2, P_{w_c} 为输出量(箭头向外)。如需要,还可输出其它参数,如温度等。

3.2 涡轮级模块

涡轮通常也有类似的流量和效率特性。涡轮模块的计算及输入输出变量与压气机相似。

3.3 纯容积环节模块

纯容积环节模块代表的是具有一定当量容积的流动连接部分。忽略容积内流体同外界的传热及进出口的压差,用一个集中参数压力 P 表示容积中气体的平均压力。对单纯的流动连接部分,动态计算中主要考虑因流入流出流量差而引起的压力变化,依质量守恒条件,有如下压力流量微分方程:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{RT}{V} (G_1 - G_2) \quad (2)$$

出口流体的焓 H_2 可认为等于进口的焓 H_1 该模块输入变量为 G_1, H_1, G_2 , 输出量为 P (状态变量) 和 H_2 另外还有 P 的导数值。

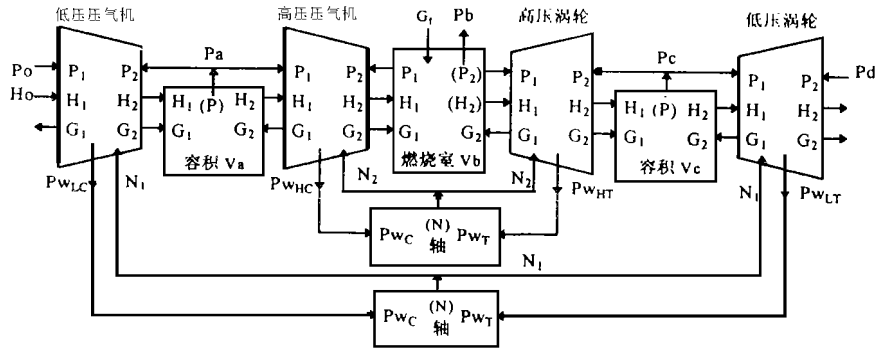


图 3 燃气轮机模块化仿真模型(部分)

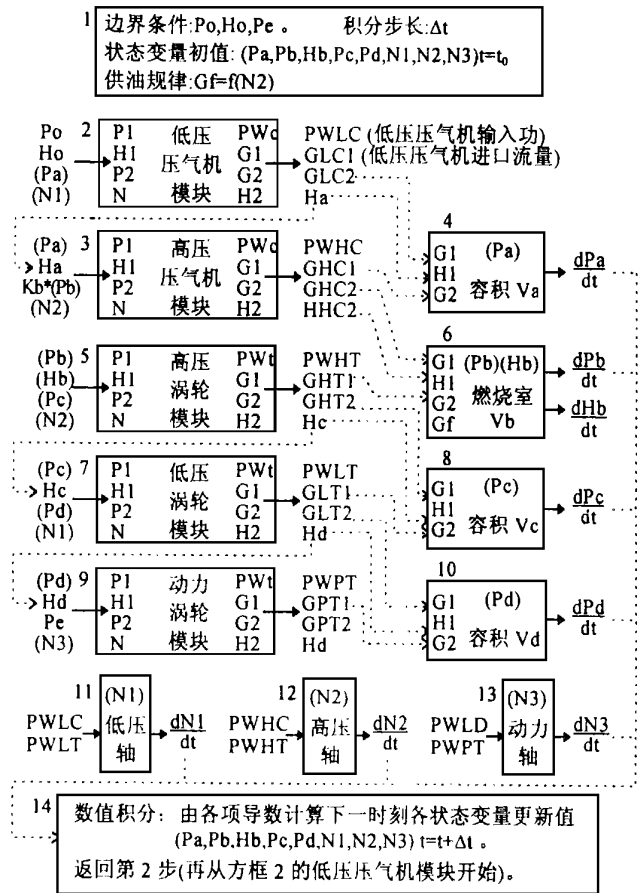


图 4 仿真实例计算流程图示

3.4 燃烧室模块

燃烧室除了有压缩空气流入口(端口 1)和燃气

流出口(端口 2)以外,还有燃油输入端. 模块中的输入量有流入的压缩空气流量 G_1 及其焓 H_1 , 燃油量 G_f 以及出口端燃气流量 G_2 . 考虑燃烧室的容积惯性,根据质量和能量守恒原理,其动态过程可用一组出口压力和焓的微分方程表达. 其函数一般式为:

$$\frac{dP_2}{dt} = f_P(G_f, G_1, G_2, H_1) \quad (3)$$

$$\frac{dH_2}{dt} = f_H(G_f, G_1, G_2, H_1)$$

如要考虑燃烧室向周围的放热,则方程中还可加入放热量 Q 这一项. 从燃烧室输出的量有状态变量 P_2 和 H_2 及其导数值. 另外还有进口端压力 P_1 , 它等于 P_2 乘压损系数 K_b .

除以上介绍的两类模块以外,还有其它模块,如反映转子转动惯量的转子模块(即转子微分方程)、负荷模块(反映负荷特性)等.

对图 1 所示的燃气轮机,用上述模块组合连接后即可得到如图 3 示的模块化仿真模型(部分). 由图 3 可看出,各模块的输入输出变量是互相匹配的. 图中的高低压压气机用的是同一种模块,其差别只是模块中的压气机特性不同. 涡轮的情况也相同,三轴燃气轮机有高压涡轮(HT)、低压涡轮(LT)和动力涡轮(PT),只需建一个涡轮模块就可重复使用.

4 仿真结果

上述模块化仿真建模方法,在系统模型的连接和综合时模块间连接关系简单明确,适用于各种通用仿真平台. 即使没有通用仿真平台,直接用高级语言编程也很方便. 对图 1 所示的燃气轮机,用 FORTRAN 语言编制了仿真程序进行了实题运算. 其计算流程如图 4 示. 图中各模块左上角外的数字为计算顺序号. 标在方框外的是系统变量名,对应的模块内部变量列在框内,其中带括号的为状态变量. 由图 4 可见,顺序对各模块计算时,其输入量都是确定的,无需再用迭代.

仿真结果见图 5 图中显示的是燃油从设计值降到 80% 的响应曲线,带 * 号的是设计点参数. 结果表明,本模型中的容积型环节能很好地“自动”平衡部件间的流量. 对容积很有限的这种轻型燃气轮机,在动态过程中以及过程最终达到的稳态点上,结果都很稳定. 作为比较,图 5 中还给出了用常规模型计算的结果(用离散点标出). 在达到稳定点后,状态变量对时间的导数趋于零,本文的含容积惯性的仿真模型和以往所用的常规非线性模型两者结果相同. 对动态过程,由于气体的容积惯性相对于转子的转动惯性要小,特别是本例容积也较小,两种模型的仿真结果只是在燃油突降后的 2 到 3 秒钟内略显差异,本模型响应稍有滞后. 这正是容积惯性的影响所致. 对于实际容积更大的燃气轮机,因本仿真模型已考虑了容积惯性的影响,故能更准确的反映实际过程. 考虑容积惯性后,虽然对仿真步长有一定限制,

但简化了计算流程,避免了每一次右函数计算时的大量迭代,大大降低了每一积分步长的计算时间,在总体上提高了仿真运算速度. 经测试,本算例在单台 486PC 机上就能实现燃气轮机全非线性实时仿真,而在 586PC 机上能达到数倍超实时仿真运算.

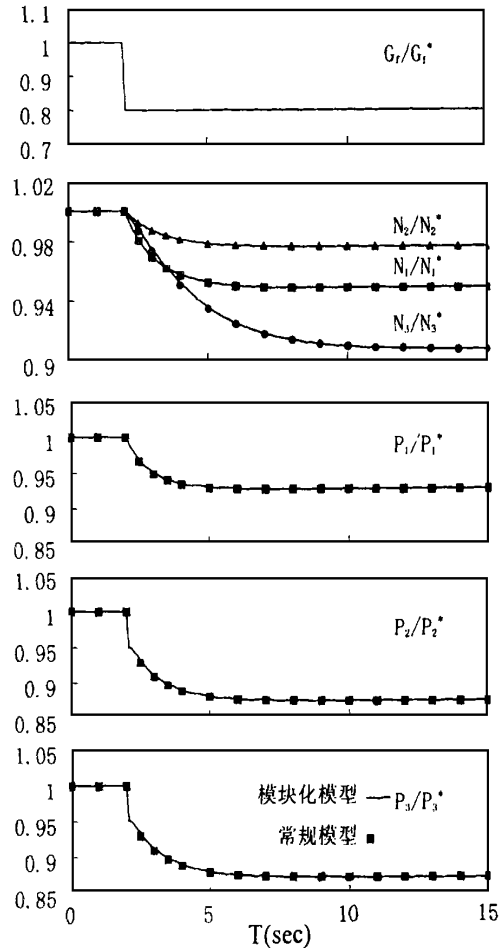


图 5 模块化模型仿真结果和比较

参考文献

- 1 翁史烈. 燃气轮机性能分析, 上海: 上海交通大学出版社, 1987. 87 ~ 91.
- 2 苏明, 翁史烈, 张佰年. 船用三轴燃气轮机动态过程实时仿真的数学模型, 上海交通大学学报, 1990(3): 1~ 4.
- 3 Su Ming. Simulation Investigation on System Identification of Gas Turbine. NTIS Na PB95104238.

作者简介 苏明 1958年生 上海交通大学动力与能源工程学院教授. 中国动力工程学会和中国系统仿真学会理事. 主要从事热力系统稳态动态性能及系统仿真研究工作. (联系地址: 上海交通大学动力与能源工程学院, 邮政编码 200030) (渠源 编辑)

jiang Industrial University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 427 ~ 428

The shortcomings of a straight tube Rijke type pulsating combustor are analysed. Through the use of contraction at two ends successfully realized is the coal pulsating combustion of a Rijke - ZT type pulsating combustor for a combustion chamber with a diameter of 1 meter and length-diameter ratio of 4.5. This leads to the preliminary resolution of the problem of creating a large-sized Rijke type pulsating combustor.

Key words pulsating combustion, Rijke type pulsating combustor, Rijke-ZT model pulsating combustor

煤焦特性及其 N_2O 生成影响因素的实验研究 = **An Experimental Study of Coal Char Properties and Its N_2O Generation Influencing Factors** [刊, 中] / Zeng Dong, Zheng Shouzhong, Cai Song (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 429~ 431

The pyrolysis of two kinds of coal and coke combustion test has been conducted on a fluidized bed. Studied is the effect of coal type, particle diameter and pyrolysis conditions on coal char properties and N_2O conversion rate. The results of the study show that with the exception of the particle diameter both the coal type and pyrolysis conditions have a marked effect on N_2O conversion rate of N in the coal char. Key words coal char, nitrous oxide, pyrolysis, combustion

流化床锅炉床下点火装置的设计 = **The Design of an Ignition Device under a Fluidized Bed Boiler Bed** [刊, 中] / Yang Jialin, Chi Yong, Jiang Xuguang, et al (Zhejiang University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 432~ 434

The superior advantages of an ignition mode under a fluidized bed boiler bed are listed. Presented are the design method and procedures of a pre-combustion cylindrical ignition device. In connection with practical applications some optimum design schemes have been proposed. Key words ignition device, fluidized bed, boiler start-up, burner, pre-combustion chamber

一种燃气轮机模块化非线性仿真模型 = **A Modularized Non-linear Simulation Model for Gas Turbines** [刊, 中] / Su Ming, Chen Delai, Zhang Yuanwei, et al (Shanghai Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 435~ 437

Proposed is a method for setting up a gas turbine modularized simulation model based on typical components and segments or links. This method allows to avoid the iteration in differential equation right function calculation and simplify the simulation calculation flow process, thus enhancing the flexibility and universality of the model. Through tests and measurements it is found that the totally nonlinear simulation model set up with the help of the above-cited method can realize a realtime simulation on a 486 PC. Key words gas turbine, system simulation, modularized modeling

四边对流换热的内含热源各向同性矩形域稳态热传导解析 = **Anisotropic Rectangular Domain Steady-state Heat Conduction Analysis of Four-side Convection Heat Exchange in the Presence of an Internal Heat Source** [刊, 中] / Zhang Chengzong, Wang Anwen (Naval Academy of Engineering) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 438~ 440

Through an analytic solution of steady-state heat conduction of anisotropic rectangular domain in the pres-