

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.10.026

燃气轮机动态仿真容积效应法研究

梁 超, 吴新跃

(海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 针对燃气轮机动态建模容积效应法运用过程中,使用真实体积运算时计算结果振荡较大,无法对燃气轮机动态过程进行实时有效的运算的问题,对容积效应法的原理进行分析,提出了采用虚拟容积计算方法计算容积大小。采用面对对象的模块化建模方法,基于Matlab/Simulink平台,运用容积效应法建立了燃气轮机动态仿真模型,解决了在常规建模时迭代次数太多的问题。分别计算了在相同工况变化条件下,采用真实容积和虚拟容积方法建立的两种模型的仿真结果。研究表明,采用虚拟容积的仿真模型更稳定,并且计算结果更准确。

关键词: 容积效应法;燃气轮机;动态建模;Simulink

中图分类号: TK47; TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)10-1277-04

Volume effect of gas turbine dynamic simulation

LIANG Chao, WU Xin-yue

(School of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The numerical results of the volume effect of the dynamic simulation model of gas turbine were oscillating, the principle of volume effect method was analyzed. The virtual volume calculation method was proposed to calculate volume size. Based on the Matlab/Simulink, the dynamic simulation model of a gas turbine developed by the objected-oriented modularized modeling method was established by the volume effect method. The number of iteration was reduced. The models in the same situation based on real volume and virtual volume were calculated. The results indicate that the simulation model based on virtual volume is more stable and more accurate.

Key words: volume effect; gas turbine; dynamic simulation; Simulink

0 引 言

利用数学模型代替真实燃气轮机作为被控对象进行性能研究,是具有一定准确性且经济性好的方法。在对燃气轮机进行仿真时,文献[1-5]都采用模块化建模方法进行仿真。在对燃气轮机进行稳态分析计算时一般都采用流量法进行计算^[6-7],通过对每个模块的输入输出流量平衡和转子产生和消耗功率的平衡建立非线性方程组,需要用牛顿-拉弗逊($N-R$)等迭代算法求解。在进行动态分析时,因为迭代算法需要反复进行迭代计算,为了提高实时性,采用容积效应法建立容积模块消除计算时的迭代过程,即可以缩短计算时间,又能保证模型的计算精度。

本研究通过对容积效应法原理进行分析,提出运用容积效应法时更合理的容积大小的计算方法。

1 容积模块的建立

在对三轴燃气轮机动态建模中,主要解决低高压气机之间,高压压气机与燃烧室之间,高、低压涡轮间,低压与动力涡轮间4个管道间的流量不平衡问题,故在这4个模块间加入容积模块,通过对容积模块的计算,实现整个系统的流量平衡,模型示意图如图1所示。

容积模块代表的是具有一定当量容积的纯流动部分,如图2所示。设一股总压分别为 P_{in} , T_{in} , W_{in} 的流体流入容腔,以 P_{out} , T_{out} , W_{out} 流出。在动态过程中,容腔内有质量、能量的积聚和动量的变化,进出口参数将不再

收稿日期: 2013-05-23

作者简介: 梁 超(1986-),男,湖北监利人,主要从事舰船机械CAD/CAM仿真方面的研究. E-mail: ygvlexy@163.com

相等。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的变化,系统计算达到平衡,从而消除计算的迭代过程。建模过程中,假设容积内流体同外界的传热及进出口的压差很小可以忽略,只考虑质量的累积而引起的压力变化。

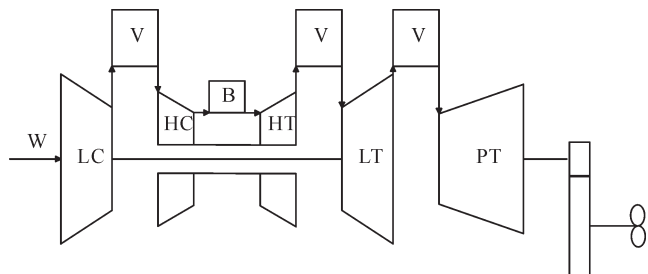


图1 三轴燃气轮机模块化模型

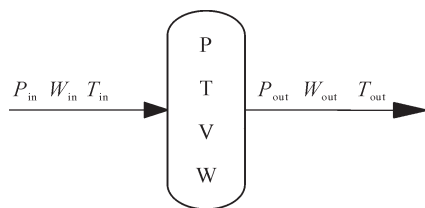


图2 容积模块示意图

对部件间容积环节作如下假设:

- (1) 流动方向上的无传热量;
- (2) 容积大小不变。

基于容积模块假设,有 $T_{out}=T_{in}$ 。则有质量守恒方程式:

$$PV = mRgT \Rightarrow \frac{dP}{dt} = (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out})RgT_{out}/V = (W_{in} - W_{out})RgT_{out}/V \quad (1)$$

式中: Rg —气体常数, $J/(kg \cdot K)$; V —容腔体积, m^3 ;

P —容积模块内压力, Pa 。 T —模块内温度, K ; W_{in} , W_{out} —模块入口, 出口的质量流量, kg/s 。

2 基于容积法的三轴燃气轮机模型的建立

基于 Matlab/Simulink 平台建立燃气轮机各个模块模型的方法在文献中已有详细的介绍, 这里直接给出在 Matlab/Simulink 平台上建立的三轴燃气轮机的最终模型, 如图3所示。

3 对容积效应法参数的讨论

3.1 真实容积大小情况下的容积效应法计算

在实际建模中, V 一般认为是各个管路连接段和燃烧室的容积大小^[8-10]。但在对三轴燃气轮机建模过程中发现, 如果采用实际容积作为容积大小的由来的话, 以某型燃气轮机高低压涡轮间的容积模块计算为例分析, 两涡轮间的体积大小为 $0.02 m^3$, 1.0 工况时高压涡轮进口压力为 $1.9e6 Pa$, 出口压力为 $0.74e6 Pa$, 出口温度为 $T=1.24e3 K$, 燃气气体常数为 $Rg=284.7 J/(kg \cdot K)$, 则当流量差为 $0.01 kg/s$ 时, 有:

$$\Delta P = (G_{in} - G_{out})RgT_{out}/V = 0.01 \times 284.7 \times 1.24e3 / 0.02 = 1.76e5 Pa \quad (2)$$

从式(2)可以看出当流量差为 $0.01 kg/s$ 时, 压强的改变量可以达到 1.7 个大气压左右, 从而对高压涡轮的下一步膨胀比误差 ΔPR 为:

$$\Delta PR = \frac{1.76e5}{0.75e6} = 2\% \quad (3)$$

这样各个模块误差的累积将对最后的计算结果

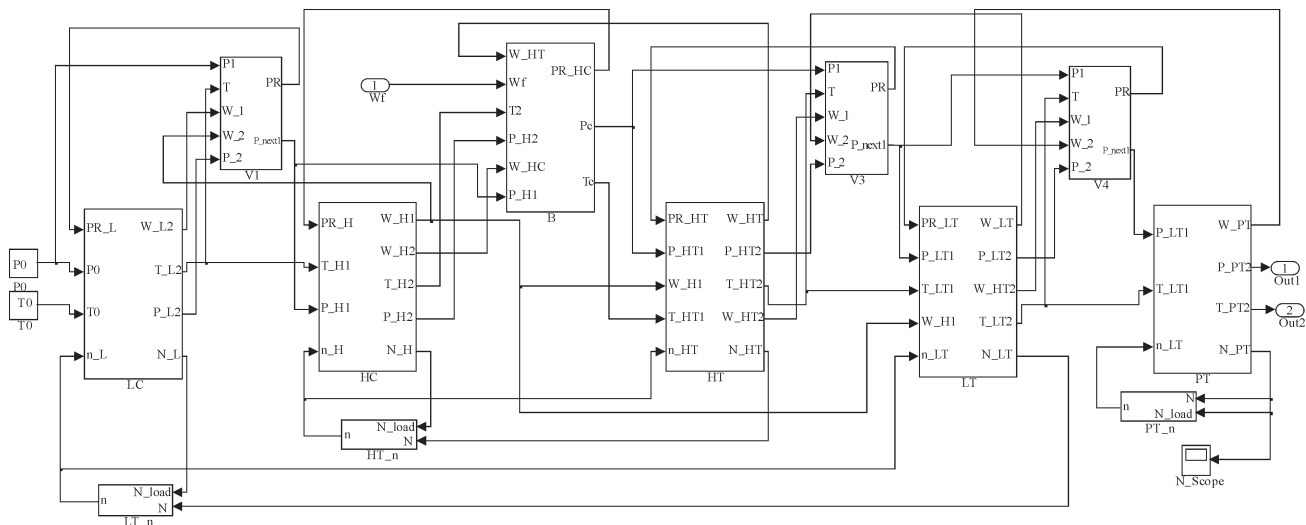


图3 基于 MATLAB/SIMULINK 的三轴燃气轮机模型

P, T, W, PR, N, n —压力、温度、压比(膨胀比)、功率和转速; 下标 LC, HC, B, HT, LT, PT —低压压气机, 高压压气机, 燃烧室, 高压涡轮, 低压涡轮和动力涡轮; 1, 2—模块的进口和出口; W_f —燃油量

的收敛性产生很大的影响。现结合 Matlab/Simulink 建立的模型,将4个容积模块的体积设置为真实管道的体积大小,容积模块模型如图4所示。计算燃机从1.0工况运行到0.6工况的过程即输入燃油量的变化。已知实际0.6工况下动力涡轮输出功率为15 126 kW,计算得出的动力涡轮输出功率变化如图5所示。

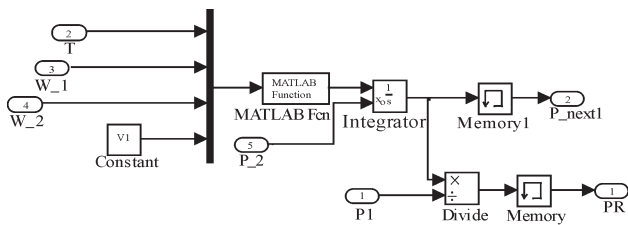


图4 真实体积下的容积模块模型

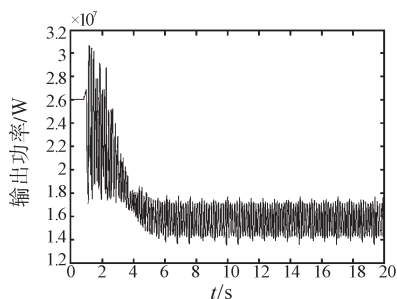


图5 真实体积下燃气轮机1.0工况运行0.6工况过程动力涡轮输出功率

从图5可以看出,在用真实管道体积大小计算容积效应法时,燃机输出功率的趋势是符合现实规律的,但运行过程中计算结果上下波动很大,大小无法确定,误差为计算真值的 $\pm 0.2/1.51$ 即 $\pm 14.3\%$ 以内,这样的计算结果在实时预测来说是不可以接受的,也无法为后续的计算提供稳定精确值。

3.2 虚拟容积大小的容积效应的计算

通过前面计算结果可以看出,容积效应法计算时运用实际容积大小得到的结果是不符合规律、不理想的。一般对这种情况的处理是将气体常数定为“kJ/(kg·K)”,从而使计算结果振荡缩小“ $1e3$ 倍”,从而使结果达到稳定值。但笔者认为,容积模块的加入是为了取消迭代过程,达到各个模块间的流量平衡,符合运行规律,则对容积大小的选择应符合热力学方程式:

$$PV = mRgT \quad (4)$$

此时,容积大小应为容积模块入口的4个变量(P 、 T 、 m 、 Rg)计算得出,容积模块的计算条件为体积不变的情况下。如果采用实际体积的大小计算,是不符合热力学规律的。同样,本研究在基于Simulink平台上

对容积模块进行相应的改动后的容积模块模型如图6所示。

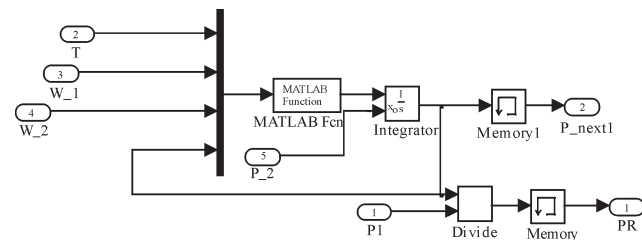


图6 虚拟容积下的容积模块模型

从模型中可以看出,每次计算时的容积大小是计算出来的结果,是变化的。在相同的供油律下运行整体燃机系统模型后动力涡轮的输出功率变化如图7所示。

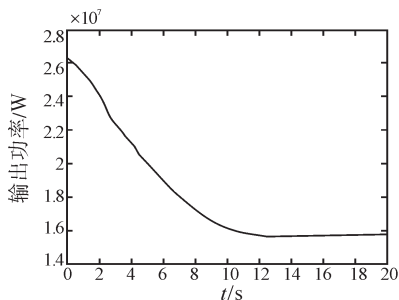


图7 虚拟体积下燃气轮机1.0工况运行0.6工况过程动力涡轮输出功率

从图7可以看出,计算结果趋势正确,曲线光滑且收敛。两种方法的计算结果如表1所示。

表1 两种计算方法结果比较

计算方法	实际真值/MW	仿真计算值	相对误差/%
实际容积	1.512 6	1.51 ± 0.2	± 14.3
虚拟容积	1.512 6	1.56	3.31

从表1中可以得出,采用虚拟容积大小计算时结果收敛度和精确度更高,也可以为后续计算提供准确的稳定值。

4 结束语

本研究采用容积效应法建立燃气轮机实时动态模型,并采用Simulink平台建立模型求解,取消了为保证流量平衡条件下的计算迭代过程,保证了算法的有效性;

针对“容积效应法运用过程中,使用真实体积计算时计算结果振荡较大,无法对燃气轮机动态过程进行实时有效的运算”的问题,本研究对容积效应法的原理进行分析,提出采用虚拟容积计算方法计算容积大小。计算结果表明,采用虚拟容积大小计算条件下的动态仿真模型的计算结果精度更高,结果更稳定。

(下转第1292页)

的工业以太网,图5(a)中“△”上方的细线为控制现场总线。图5(b)中采用双环结构,是为了更好地保证通信质量和整个系统的稳定性和鲁棒性。

传统混合型工业以太网是目前许多公司采用的工业网络架构模型。这是一种过渡的方案,它在工业现场的管理层和车间层使用以太网,向上可以和Internet连接,向下可以读取车间里各个控制子系统的状态信息。系统在设备层采用独自の现场总线技术,如CAN、Profibus、ASI等^[10]。它们与以太网之间通过专用的网关连接。这种方案可以利用现有以太网所能提供的通信功能,每个网关是以太网的节点,同时也是下面子系统的主站。网关可以实现对子系统实时的控制,并把子系统内部的信息进行预处理,只把一些重要的信息按照TCP/IP的帧的格式发送到以太网上。因为设备现场总线的繁多协议同样影响着终端用户的使用,而现场总线统一开放的思想还是没有完全实现,这种方法不利于整个系统的管理和维护,开发成本高。在未来随着工业以太网性能的提高,越来越多的以太网技术被应用到现场层,本研究正是对这种方法的一种变革和创新^[11]。

6 结束语

任何一个系统都不是孤立存在的,对于水利系统来说,基于整个水系的综合考虑,综合规划是必然的发展趋势。本研究所需监控和调度管理的对象,因为节点多,位置分散,而且一旦故障后果十分严重,笔者基于简单实用和稳定可靠的原则设计了基于PLC和EtherCAT的“透明”泵站SCADA系统。整个系统在实现水资源综合管理、合理分配与利用的同时,通过信息采集与统计分析、信息共享和集成来提高运行管理效率,实现了水资源管理的科学和高效的决策。系统

设备选型上主要采用技术上成熟、产品可靠及兼容性好的PLC系统,同时为了便于“透明”管理和未来扩展的需要,采用了基于EtherCAT的通信架构。本研究在系统的实施过程中充分考虑到与其他相关的机电设备的接口,确保系统接口的可靠性、合理性。综合来说,整个系统简单实用,稳定可靠,在同行业中具有一定的先进性和创新性。

参考文献(References):

- [1] 王建中,茅睿炜.鲁仁全基于节能控制的排水泵站选泵方法[J].机电工程,2009,26(6):20-23.
- [2] 王 斐,张 生.模糊PID控制在泵站高效运行中的分析[J].微计算机信息,2010,5(1):81-82.
- [3] 翟 华,李贵闪,严建文,等.基于以太网技术的大型冲压生产线的远程监控系统设计[J].机床与液压,2012(1):92-94.
- [4] 孙传恒,杨信廷,李文勇,等.基于监管的分布式水产品追溯系统设计与实现[J].农业工程学报,2012,28(8):146-153.
- [5] 袁 梦,刘 萍,余 勃,等.组合秤包装生产线分布式监控系统的软件设计[J].包装工程,2009,30(11):10-13.
- [6] 高 雁.机柜包装生产线的设计方法[J].包装与食品机械,2012(15):69-71.
- [7] Quantum. Quantum Ethernet I/O 系统规划指南[R],Quantum,2011.
- [8] WU Shao-en, BIAZ S, WANG Hong-gang. Rate adaptation with loss diagnosis on IEEE 802.11 networks[J]. **International Journal of Communication Systems**, 2012 (25): 515-528.
- [9] 王整风.基于PLC与触摸屏技术的原煤取样系统的设计与开发[J].煤矿机械,2008(11):172-173.
- [10] 胡 炼,罗锡文,张智刚,等.基于CAN总线的分布式插秧机导航控制系统设计[J].农业工程学报,2009,25(12):88-92.
- [11] 黄文君,谢东凯,卢 山,等.一种高可用性的冗余工业实时以太网设计[J].仪器仪表学报,2010,31(3):704-708.

[编辑:洪炜娜]

(上接第1279页)

参考文献(References):

- [1] 张学镭,王松龄.简单循环燃气轮机系统建模及其变工况性能分析[J].动力工程,2006,26(5):619-623.
- [2] 史霖鑫,臧述升.基于SIMULINK的气垫船三轴燃气轮机的动态仿真[J].燃气轮机技术,2006,19(3):37-39.
- [3] 常 隽,屈卫东.基于MATLAB/SIMULINK的燃气轮机系统动态模型仿真研究[J].微型电脑应用,2010(6):41-44.
- [4] 敖晨阳,张 宁,陈华清.基于MATLAB的三轴燃气轮机动态仿真模型研究[J].热能动力工程,2001,16(5):523-526.
- [5] 夏 迪,王永泓. PG9197E型燃气轮机变工况计算模型的建立[J].热能动力工程,2008(4):338-342.
- [6] 童万军,唐世建.基于流量法的齿轮传动涡扇发动急动态

建模[J].航空动力学报,2011,26(6):1377-1383.

- [7] 张 杰,张雪梅,沈 岑,等.基于Modelica/Dymola的小型燃气轮机建模与仿真[J].机电工程,2013,30(4):476-479.
- [8] 黄开明,刘 杰.基于无迭代法的航空发动机的实时模型[J].航空发动机,2004,30(2):35-38.
- [9] UZOL O. A new high-fidelity transient aero thermal model for real-time simulations of the T700 helicopter turbo shaft engine[J]. **Thermal Science and Technology**, 2011, 31(1): 37-44.
- [10] 韩晓光,曲文浩,董 瑜,等.基于Simulink的燃气轮机动态仿真的模型[J].航空发动机,2010,36(3):20-25.

[编辑:洪炜娜]