

基于虚拟仪器的数字式气动失稳 仿真系统的研制与应用

郭贵喜, 刘世官, 薛秀生
(沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)



郭贵喜(1980), 男, 工程师, 从事
航空发动机测试研究工作。

收稿日期: 2009-06-23

1 引言

航空发动机在工作范围内存在旋转失速和喘振 2 种气动失稳现象, 严重制约着发动机性能的提升。在其气动失稳控制技术研究, 气动失稳特征的模拟仿真至关重要, 为了给某型涡扇发动机消喘系统在开发研制中提供方案设计优化与工程试验仿真, 同时也是为了探索该领域仿真试验的新技术, 开展了气动失稳数字仿真研究。此类仿真不仅可以模拟各种形式的发动机失稳信号和环

摘要: 设计了基于航空发动机动态压力失稳特征的数字式仿真系统, 重点阐述了基于虚拟仪器技术仿真系统的优化搭建过程及其关键技术, 并在某型涡扇发动机消喘系统研制过程中成功地进行了应用。结果表明, 新的优化方案能对发动机的失稳特征进行有效控制, 其实时性和适用性均有实质提高。

关键词: 气动失稳; 仿真系统; 虚拟仪器技术; 优化设计; 涡扇发动机

Development and Application of Digital Aerodynamic Instability Simulation System Based on Virtual Instruments

GUO Gui-xi, LIU Shi-guan, XUE Xiu-sheng

(Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: The digital simulation system based on the aeroengine dynamic pressure instability characteristic was designed. The optimization build process and key technologies of simulation system virtual instruments were illustrated, and it was successfully applied on the development of a turbofan engine anti-surge system. The results show that the instability characteristic of the new optimization anti-surge scheme engine can effectively control and its real-time ability and operability are both actually increased.

Key words: aerodynamic instability; simulation system; virtual instruments; optimization design; turbofan engine

境干扰信号, 还可以及时发现失稳控制系统设计中存在的问题。

本文采用 PCI 总线和通用串行总线转换模块硬件, 结合 Labview 创新灵活的软件模块化思想, 依据虚拟仪器技术解决方案, 研制了 1 套数字式气动失稳仿真系统, 并在涡扇发动机消喘

系统的优化设计与试验验证上得到应用。

2 系统开发平台与仿真系统结构

气动失稳仿真系统以计算机(PC)为核心硬件平台, 使用高性能的数据输入输出设备, 由用户

自行定义虚拟面板各项参数,利用先进的 Labview 虚拟仪器开发软件实现仿真任务的分析和仿真数据的处理分析,最后完成具体仿真功能。

仿真系统结构如图 1 所示,其中仿真数据运算控制部分是整个系统的核心,将来自特征数据库或自定义数据信息按照仿真需求,通过数模转换程序控制下的 D/A 转换模块将仿真信号输出。由于使用的 D/A 转换模块输出信号范围、板载内存和消喘系统输入模块工作模式的限制,必须在输出前对信号进行信号调理。

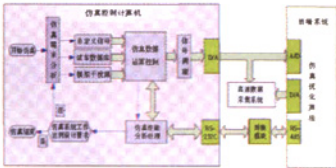


图 1 仿真系统

消喘系统功能模块自带 DA/AD 转换机制,仿真控制计算机发送的仿真信号容易被消喘系统接收。经过一系列复杂运算与逻辑判断,决定是否发出消喘指令性信号。消喘系统将当前的状态特征信息通过串口反馈给控制计算机,同时运算控制参数信息也由串口传递给消喘系统,经过控制计算机的仿真判别模块,判定系统是否达到设计要求,是则仿真结束,否则重新修改完善设计,继续进行仿真。

另外,在试验和实际应用中,消喘系统会受到工作现场其他因素的干扰,为了验证系统的抗干扰能力,仿真系统能够提供各种常见干扰源,例如:均匀白噪声、高斯白噪声、周期性随机噪声等;

还可以是幅值相位的自由组合,以更好地模拟工作现场情况。

仿真特征参数和消喘系统指令性信号都由仿真系统外的高速数据采集系统进行实时记录和分析,对仿真系统功能的有效性和性能做出评估。

3 系统框架软件

对于基于虚拟仪器技术开发的仿真系统来说,软件就是仿真仪器,传统仪器中由硬件电路实现的数据分析处理功能改由功能强大的软件程序代替,所以软件开发成为核心环节。

综合本系统使用要求和应用范围,软件平台包括 3 个主要模块。

(1)仿真数据运算控制作为主控模块,在整个仿真系统中占据着举足轻重的地位。该模块根据用户提出的仿真需求具体化为失稳特征参数配置,并对数据的输入输出进行控制与对比分析。

(2)数据输入输出控制部分,担负着仿真数据正确有效的收发功能,涉及到仪器接口驱动程序(或协议)的编写调用与控制。

(3)仿真性能分析判定模块,根据不同的仿真需求,需要正确梳理判断条件的逻辑关系,模块参数也需要实时调整,并要具有处理突发事件的应对机制,以满足仿真结果的正确性。

根据设计需要,由仿真系统调用大量的信号分析处理函数,例如:信号的放大,滤波,瞬态记录与显示,各种统计规律提取以及干扰源模拟等,以此来完成数据的计算与生成、信号的发送与采集、信号的分析与处理功能,并且这些功能都可以根据用户需求

而随时修改。类似的传统仪器仪表板上的各种开关、按钮由仿真系统使用软件提供的各种“控件”来代替,这样用户就可以通过操控计算机鼠标和键盘来完成传统仪器的“手动”和“触摸”操作,体现了仿真系统与计算机的深层次结合。

整个仿真系统的软件编制过程还采用了分层化设计方法,由程序主模块调用各功能模块程序完成仿真相应功能,

各功能模块也可以调用更底层的函数或子 VI 完成相应操作。这些都体现了虚拟仪器开发的优势。该程序流程

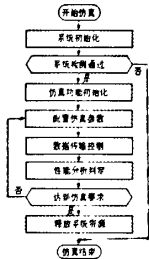


图 2 仿真系统程序流程

对于复杂的功能模块也可以采取分层设计,比如设计仿真参数配置模块、仿真性能分析判定模块、数据输入输出控制模块等,具体可以细化更多的底层功能,如图 3 所示的参数配置模块和图

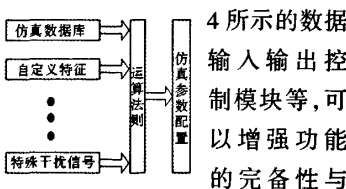


图 3 参数配置流程

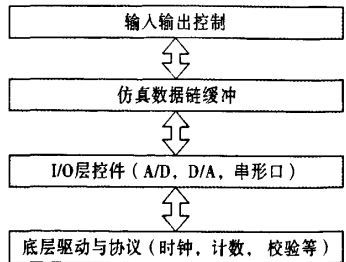


图 4 输入输出控制模块流程

这种设计方法使得设计思路更加清晰,任务分配更加合理,有利于以后系统移植和功能扩展。

4 关键技术

高精度的仿真模型可以最大限度的替代实物进行研究和试验,尤其是针对此类具有高度危险性和破坏性的试验意义重大。影响本系统仿真程度的技术涉及到很多方面。

4.1 数据传输技术

仿真的精度决定仿真的逼真程度。由于现代计算机都采用双精度浮点数据类型,单纯从计算能力上看,足以满足基本仿真的计算精度要求。制约仿真精度的瓶颈在于系统数据传输过程的硬件部分,为此,系统需选用高性能的数据输入输出功能卡,发挥虚拟仪器技术优势构建硬件驱动平台。

为了实现仿真控制计算机与消喘系统之间的有效数据交换,可以通过 A/D 转换机制、CAN 总线、以太网等方式。在本系统数据传输网络中,硬件条件提供了 D/A、A/D 转换模块,和全双工串行总线。从图 1 中可以看到仿真数据通过 D/A、A/D 转换模块传递给消喘系统,而仿真计算机的控制信号和消喘系统的判定信息通过全双工串行总线 RS-485 与 RS-232C 进行通信。这使数据交换在速度和精度上都有了保证。

4.2 仿真数据库的建立

目前,国内外学者对某型发动机失稳特征做出了许多预估,其中大部分是通过分析其产生机理而建立的一些数理模型。但是由于对失速/喘振的机理认识不

够,并且现代多级压气机结构设计和流场状态越来越复杂,各种模型的分析均不尽人意。

通过分析压气机不稳定工作参数可知,压气机出口不稳定流动的共同特点是压力脉动,并具有相对固定的频率范围。在一般情况下,压气机不稳定过程的物理现象与其特性有关,压气机特性越陡,其不稳定工作以喘振形式出现的可能性就越大;压气机特性越平坦,其不稳定就越有可能以旋转失速形式出现。而且,不同型号发动机(压气机)的气动失稳特性也表现出很大的差异,在工程上用相对脉动幅值和脉动频率表征压气机气动失稳特征,需要多方面归纳、积累和总结发动机失稳案例,提取失稳特征,针对不同型号的发动机(压气机)建立相应的工程数学模型和比较完善的依据物理过程建立数学模型进行数值仿真的方法更有效。

仿真系统生成仿真信号后,在失稳积分时间上按照信号发射的时序统计算式“ $P_{\infty} - A_0 P_{dc}$ ”的值,当该算式小于零时,其值自动赋零,否则在接下来的时间段 T_0 内进行积分运算

$$\Sigma A = \int_0^{T_0} (P_{\infty} - A_0 P_{dc}) dt \quad (1)$$

式中: A_0 为失稳门槛限制值; T_0 为失稳积分时间; P_{∞} 为脉动压力仿真信号交流分量; P_{dc} 为脉动压力仿真信号直流分量。

在模拟失稳信号的全部或大部仿真时间内,仿真分析判断模块实时检测失稳能量幅度相对累加变量 ΣA ,当它大于某个设定常量时,就确定发动机内部气流出

现了不稳定流动,仿真系统根据预先设定的逻辑关系确定消喘指令信号 K1 的输出模式,以此来仿真整个消喘过程。

一般情况下,可以选择发动机(压气机)某级或出口的动态压力特征量作为仿真信息,也可以对其进行适当组合。此外,仿真系统提供了对各状态失稳特征进行优化处理的功能,例如:对幅值可以增大或减小,对频率可以放大和压缩,对组合信号的相位进行相互调节等。这些变换可以达到仿真数据灵活的自由组合,使得仿真效果更加逼近实际物理过程,同时也可检验相同失稳特征,不同发展规律的仿真过程。

另外,还可以根据仿真需求,产生用户自定义的任意形式仿真模型,如平稳信号(直流)、交变信号(交流)、周期信号、脉冲信号和其它自由组合信号,可以模拟发动机(压气机)的一些稳态、过渡态等工作特征,再掺杂进失稳特征信号,使得仿真形式更加灵活。

4.3 虚拟仪器技术的应用

虚拟仪器技术是 20 世纪 90 年代发展起来的 1 种新技术,融计算机技术、总线技术、微电子技术和测试测量技术于一身。虚拟仪器的硬件平台本身就基于 PC 机与数据功能模块,因此对本系统具有良好的适应性。本系统使用的数模转换模块由 NI 公司提供,可以直接调用自身提供的驱动程序,如果使用其他厂家提供的功能模块,可以很方便地调用或搭建驱动与控制程序,实现良好的数据输入输出控制、数据缓冲区分配和调理模块的动态调整。针对串行总线 RS-485 与 RS-232C

的通信协议,虚拟仪器技术可以很好地配置协议,并控制其工作状态。

Labview 作为一种业界领先的工业标准图形化编程工具,在开发测试测量,控制仿真系统方面具有非常大的优势。Labview 利用 NI 的虚拟仪器技术,让复杂的数据分析处理工作变得非常简单,使得不用将大量的时间精力耗费在实验系统设备的搭建、执行与维护上,不必拘泥于软硬件的运行调试,不必像文本编译语言那样繁琐的调用链接库、复杂的读写端口,定义特殊通信协议。甚至一些基本的数据处理功能,如滤波和时频变换也只需配置一些基本参数就可以方便实现。大大提高了研究人员的工作效率。从开发时间、成本、运行效率和精度方面,均比传统文本编译模式有较大优势。运用虚拟仪器技术的结果,使得开发人员在仿真系统搭建过程中更加专注于仿真功能的开发。

5 系统应用

对新研制的发动机消喘系统,为了优化其设计方案,解决在整机喘振试验气动失稳过程中存在的延报和漏报现象,使用本仿真系统对其进行参数调试和性能验证。

在某次仿真试验中,特别针对发动机失稳特征,将系统控制参量进行一定的调节,使得消喘指令性信号 K1 实时有效。系统方案优化前后对同 1 组失稳信号的仿真结果如图 5、6 所示。

从图 5 中可见,由于原方案的参数配置不合理,消喘系统未

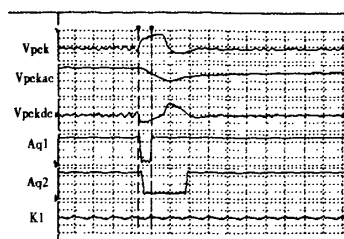


图 5 失稳信号原设计方案的仿真结果

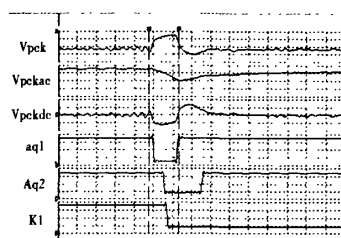


图 6 失稳信号优化设计方案的仿真结果

能正常工作(消喘指令 K1 信号未有动作)。从图 6 中可见,调节参数配置,优化设计方案后,消喘指令 K1 发出信号非常迅速有效,达到了系统的仿真要求。通过仿真试验可以验证,新的优化方案在设计机理上发生了变化,能对发动机的失稳特征有效控制,其实时性和适用性有了实质提高,真正达到了系统要求的防喘功能。

在俄罗斯研制 1 套发动机消喘系统,通常需要进行约 500 次的现场整机喘振试验,不仅耗费大量的人力物力,而且研制周期长,而通过该仿真系统,共进行了 70 余次的试验,就完成了某型发动机适用消喘系统的优化设计与验证。

6 结论

(1)分析了航空发动机的不稳定流动特点,在工程上一般使用相对脉动变化幅度和相应频率

来表征气动失稳特征。建立针对不同发动机的失稳特征数据库,相比普通的依据数理方程建立的模型更贴近工程实际。

(2)对于不同型号发动机,只需调节仿真系统中 A_0 、 T_0 等参数,就可以满足对气动失稳的仿真要求,而对于同一台发动机也可以有多个组合。本系统可以根据设计需求,对实时性和可靠性 2 个技术指标进行优化。

(3)应用该数字式仿真系统可提高仿真试验的置信度和逼真度,减少了因消喘系统试验所要求的发动机整机喘振次数,避免了由于实体发动机喘振对机械结构的磨损,大大降低了试验成本,并加快了项目的攻关进度。

参考文献

- [1]Gourdai nN,Urguburu S B,Leboeuf F,et al.Numericalsimulation of rotating stall in a subsonic compressor[J].Aerospace Science and Technology, 2006,10(1): 9-18.
- [2]Dremina I M, Furlatovb V I, V.Ivanova O V,et al. Precursors of stall and surge processes in gas turbines revealed by wavelet analysis [J].Control Engineering Practice, 2002, 6(2):599-604.
- [3]John D Wright. Gas Property Equations for the NIST Fluid Flow Group[J].Gas Flow Measurement Calibration Services, February, 2004(2).
- [4]张会生,刘华利,刘峻.半物理仿真系统中定时及数据通讯技术研究[J].测控技术,2002,2(9): 60-62.
- [5]临界流流量计临界流函数的探讨[J].现代测量与实验室管理,2008(2): 11-13.
- [6]黄家焯,冯国泰.航空发动机特性技术仿真与发展展望 [J].推进技术, 2002,23(4):346-351.