

文章编号: 1000-8055(2005)05-01066-06

# 燃气轮机控制技术综述

薛银春<sup>1,2</sup>, 孙健国<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016;

2 中国航空动力控制系统研究所, 江苏 无锡 214063)

**摘要:** 对燃机控制系统的发展进行了综述, 对国内外各种常见的燃机方案进行了说明和比较, 着重对燃机数控系统的总体结构, 电子控制器、液压机械执行装置、控制软件的设计, 系统的数字仿真和半物理模拟试验等进行了较全面的阐述, 最后, 对燃机数控技术的发展进行了展望。

**关键词:** 航空、航天推进系统; 燃气轮机; 控制系统; 综述; 仿真; 半物理模拟试验

**中图分类号:** V 233.7

**文献标识码:** A

## A Survey of Gas Turbine Control Technique

XU E Yin-chun<sup>1,2</sup>, SUN Jian-guo<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Power,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2 China Aviation Motor Control System Institute, Wuxi 214063, China)

**Abstract:** This paper surveyed the development of gas turbine control system, and briefed the scheme of some typical gas turbine control system. The development of overall structure, the design of digital controller, hydraulic actuator, control software, and the digital and semi-physical simulation in gas turbine control system was discussed. On this basis, the development trend of gas turbine control technique was provided.

**Key words:** aerospace propulsion system; gas turbine; control system; survey; semi-physical simulation

与所有旋转动力机械一样, 燃气轮机也走过了从液压机械式控制、模拟式电子控制到数字式电子控制的发展道路。20世纪70年代, GE 公司的 LM 1500 燃气轮机配套使用由美国大陆公司研制的模拟式电子控制器实现了逻辑顺序控制, 而燃油控制仍然由液压机械式控制器实现。直到20世纪90年代, 燃气轮机开始全面配置数字电子控制系统。经过十多年的发展, 燃气轮机(组)控制已有多种数字控制系统, 例如: S&S 公司成套的 LM 6000 机组和 TPM 公司成套的 FT8 机组等采

用了美国 WOODWARD 公司的 NETCOON 5000 系列燃机控制系统<sup>[1]</sup>, GE 公司的 PG6000 系列机组则采用了 GE SPEED TRON IC 的 MARK V<sup>[2]</sup>。1998年, GE Power System 和 GE Fanuc 联合开发的 MARK VI 控制系统在北美市场推出, 该控制系统可带现场总线和远程 I/O, 可实现全厂一体化控制, 操作系统也从 MARK V 的 DOS 升级到 Win NT<sup>[3]</sup>。并且, 燃气轮机的数字电子控制系统已经实现了标准化、系列化的发展, 硬件实现了模块化, 配置了菜单式的开发软件。总之, 在燃

**收稿日期:** 2005- 01- 31; **修订日期:** 2005- 06- 30

**作者简介:** 薛银春(1962- ), 男, 江苏江阴人, 南京航空航天大学能源与动力工程学院博士生, 中国航空动力控制系统研究所研究员, 主要从事燃机动力控制研究

机控制40多年5 400多台机组的实践中, 电子控制技术占了26年, 应用机组4 400余台, 电子控制技术得到不断发展<sup>[4, 5]</sup>。

国内在20世纪80年代发展轻型燃气轮机的同时, 迅速地开展了燃机数控系统的研制。WJ6, WJ5, WP6和WZ5等燃机数控系统已应用于工业现场, 最近推出的QD100, QD128, QD70也都配置了数控系统, 但总体上还处于量身裁衣、单台定制的初级阶段。燃机数控系统的研制一般采用两种方式, 一种方式是软硬件全部自行研制, 这种方式针对性强, 批产成本低, 但研制费用高, 较适用于有批量的燃气轮机。第二种方式是选用标准的工业控制硬件配上自行开发的控制软件, 该方式研制周期短, 但适应性差, 而且有时还不得不制作一些接口电子硬件, 一般适合于量少或功率等级较大的燃气轮机控制配套。

本文对燃机数控系统的总体方案和部件的设计进行了综述, 并对国产燃气轮机控制系统的发展进行了展望。

## 1 燃机控制系统的基本要求

燃机数控系统是燃机发电机组的配套产品, 主要由电子控制器、燃油流量控制装置、监控操作员站等组成。主要控制功能有: 程序控制, 自动调节, 自动保护, 显示和记录等。

主要性能指标(常规要求)如下:

(1) 转速控制, 稳态精度 $\pm 0.2\%$ 。加减速时, 允许转速变化不超过 $\pm 2\%$ , 载荷突变50%或以上时, 转速变化不超过 $\pm 3\%$ 。

(2) 功率控制精度为 $\pm 0.3\%$ 。

(3) 排气温度限制(基本负荷)控制精度为 $\pm 0.5\%$ 。

## 2 电子控制器

### 2.1 电子控制器的基本形式

电子控制器是燃机数控系统的核心部件, 它运行控制软件, 采集燃机机组的状态信息, 进行数学运算和逻辑判断, 输出控制信号, 使燃机机组按照设定的程序安全、可靠地工作。

早期的电子控制器都是自行研制的。为了保证系统的可靠性, 电子控制器采用双通道结构方式, 它由两个完全相同的通道组成, 每个通道均由电源模块、输入模块、CPU 模块、输出模块等组成。双通道之间采用串行通讯协议, 或采用DMA 方式进行数据交换。双通道中一个通道为主控通

道, 另一个为热备份通道, 当主控通道出现故障, 自动切换至备份通道工作, 当两个通道均出现故障时, 数控退出控制工作, 控制系统自动应急停车。

### 2.2 电子控制器的发展

随着燃气轮机产业化发展, 专用燃机电子控制器无论在研制周期、成本、可靠性、维修性等方面都难以满足主机的要求。标准化、通用型工业控制机的迅速发展, 它可靠性的不断提高和环境适应性的日益增强, 使它逐渐成为数控系统的首选对象。上世纪90年代, 开始使用工业控制机, 配上信号处理模块、输入输出模块, 实现燃机的控制<sup>[6]</sup>。美国WOODWARD 公司的NETCOON-5000就是这样的典型结构。

使用工业控制机作为燃机的电子控制器实现了规模化生产, 降低了成本, 缩短了研制周期, 可靠性也基本能满足要求。但工控机对工作环境要求比较高, 传感器离控制器距离较远, 信号传输易受干扰, 对电缆屏蔽、接地等要求比较高。这类系统在工作了几年、十几年后, 故障率急剧上升, 现在都面临着频繁维修、更新换代的要求。

近年来智能数据采集模块开始大量应用在工业控制现场。智能数据采集模块内部包含了微处理器和信号处理电路, 对传感器信号进行处理, 直接转换成数字信号, 通过通讯总线传送到中央计算机。智能数据采集模块具有分辨力高、性能优良、稳定性好、可靠性高的特点, 而且各种信号种类齐全, 它可以安装在传感器附近, 监控计算机通过通讯总线和分布在现场的各类智能数据采集模块相连接。这种形式的控制系统比工控机加输入、输出模块的方案更为可靠、稳定, 而且结构简单, 扩展灵活, 可靠性高, 共享网络资源能力强, 安装和使用方便, 已逐渐成为工业控制的主流形式, 在燃机控制系统中也有广阔的应用前景。

### 2.3 监控管理

早期的燃机控制大都针对单机研制, 较少将燃机动力装置及全厂统一考虑进去, 监控计算机加智能数据采集模块组成的燃机控制系统是最典型的结构, 见图1。

近年来, 燃机控制设计必须越来越多地考虑到其应用的对象。例如, 对于燃机动力电站工程, 一般要求将燃机及燃料、锅炉、汽机、电气和全厂辅机设备实施统一监控、统一管理和统一操作, 只需用多台计算机构成网络结构, 做成集中的监控

操作系统, 通过网络与各控制器进行信息交换; 而

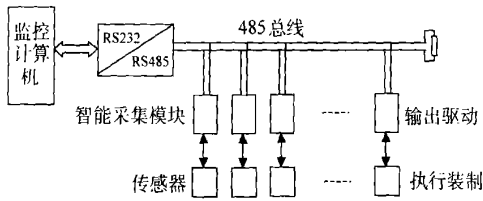


图1 燃机控制系统框图

Fig 1 Scheme of control system of gas-turbine

舰用燃机也将控制和监控分别设计, 以满足舰载技术条件<sup>[7]</sup>。

### 3 液压机械执行装置

电子控制器的输出信号不能直接控制燃机的工作状态, 要通过电液转换装置和液压放大机构, 才能得到燃机的输入变量, 如燃油流量、压气机进口导叶角度等等。这就需要设计液压机械执行装置。

国产燃气轮机数控系统的燃油计量阀一般都由设计单位自行研制。主要由进口油滤、中心油滤、定压活门、压差活门、计量活门、放气活门、安全活门、电液伺服阀等组成。

目前, 世界各著名燃气轮机制造商普遍采用系列化设计制造的燃油流量阀, GE 公司的 LQ 系列燃油流量阀就是国外用于燃气轮机燃油计量调节较为成熟的产品, 该阀结构上是带旁通的三通型计量调节阀, 内部动作全为电动执行形式, 输入和反馈信号均为标准的  $4 \sim 20 \text{ mA}$  信号, 可以和电子控制器接口。LQ 系列燃油计量调节阀主要有压差活门、计量活门、增压活门、停车电磁阀和直流电动执行机构组成。

## 4 控制软件

### 4.1 控制软件功能

燃气轮机发电机组控制软件是燃机数控系统的重要组成部分。通过电子控制器的 I/O 接口完成各种指令信号和燃气轮机状态参数的采集; 通过通讯接口完成与台架计算机的数据通讯, 然后进行信号处理、故障诊断、状态监视、历史记录处理、参数存取、控制规律计算等; 同时完成闭环控制规律和相应逻辑运算, 从而获得燃油流量和其他开关量输出信号, 驱动相应的执行机构, 完成燃机发电机组的启动、加减速和停车等的控制和稳态调节, 同时对系统的重要参数进行监视和检查。

控制软件完成以下功能:

(1) 采集模拟量、频率量和开关量信号, 并进行滤波平滑和消颤等处理;

(2) 输出模拟量和开关量信号;

(3) 具有对电子控制器的机内故障检测功能;

(4) 具有对传感器进行故障诊断功能;

(5) 具有对燃气轮机的起动控制功能;

(6) 具有对起动机的控制功能;

(7) 完成燃气轮机的稳态和过渡态的燃油控制功能;

(8) 完成发电机组加载或减载控制功能;

(9) 完成燃气轮机的超转限制功能;

(10) 完成燃气轮机的超温限制功能;

(11) 压气机导叶或放气活门等防喘控制功能;

(12) 完成燃气轮机正常停车和应急停车功能;

(13) 完成双通道之间通讯以及与监控装置的通讯功能。

具有双通道结构的电子控制器, 数控系统控制软件储存在电子控制器两个通道的各自程序存储器中, 它们可以是完全相同的, 也可以是由不同的小组成员编制的。后者称为非相似冗余软件, 能够避免共模错误, 具有更高的可靠性。

### 4.2 控制规律的设计

燃机的控制规律的设计中主要应保证对机组运行的稳定性和可靠性要求。

起动控制: 大部分燃机的起动供油都是按  $G_T = f(N, T_0)$  的规律进行的, 这里的  $T_0$  是考虑大气温度变化的影响。如果燃机需要在高原地区运行, 则还应加上大气压力的修正,  $G_T = f(N, T_0, P_0)$ 。一般燃机在起动过程中还要加上涡轮后温度的限制, 以防止起动过程超温。

燃机起动供油规律的设计主要应保证能把燃机可靠地起动起来, 常采用简单的起动供油规律  $G_T = f(t)$ , 再加上涡轮后温度的限制  $T_4 = f(N)$ , 甚至  $T_4 = \text{Const}$ 。这样起动时间比较长一点, 但同样能把燃机可靠地起动起来。

由于燃气轮机(包括航空发动机)的稳态工作线是单调上升的, 因此采用  $G_{T, K+1} = G_{T, K} + K \cdot \Delta t$ , 总能够把供油量拉到稳态工作线的上面, 把转速逐步往上拉, 再加上涡轮后温度的限制就可以安全、可靠地把燃机起动起来。十多年前 WJ6

地面燃机就采用这样的起动供油控制规律, 取得了满意的效果。索拉公司的轻型燃机的起动供油规律就是  $G_T = G_{T0} + K * t$ , 当  $T_4$  达到 880.2 K 时停止增加燃油, 等待转速上升, 涡轮后温度下降, 当  $T_4$  降到 866.3 K 再恢复增加燃油, 当  $T_4$  达到 921.8 K 时就不断减少燃油, 待涡轮后温度下降到 866.3 K 再恢复增加燃油。如此简单的起动供油规律一样能可靠地把燃机起动起来。其原理与上面说的是一样的。

**加、减速控制:** 燃机的加、减速控制一般都用  $G_{T,K+1} = G_{T,K} \pm K * \Delta t$ , 再加上温度限制。尽管加、减速过程时间可能长一点, 但安全可靠。GE 公司的 LM 系列燃机等都是用的这种加、减速控制规律。

**稳态控制:** 燃气轮机一般都长期稳定工作在负载状态。如果带动的是泵、压缩机类的负载, 燃机的稳态控制就是对输出轴的转速控制, 即  $N_p = \text{Const}$ 。调节  $N_p$  即调节输出功率。

如果燃机带动的是发电机组, 则根据发电机

组的工作性质采取不同的控制规律。  
如果燃机-发电机组是独立发电机或是电网中的主发电机, 它必须保持电网的频率等于 50 Hz, 否则电网上的电器都无法正常工作, 而机组的输出功率则随着电网上负荷的变化而随时改变。这时燃机的稳态控制也就是保持输出轴的转速稳定, 即  $N_p = \text{Const}$ 。

如果燃机-发电机组是电网中的调峰发电机, 它只负责平抑用电高峰, 补充用电缺口, 则一般根据电网调度的指令输出一定的电量。它们的控制规律就是  $G_T = C$ 。调节  $C$  就改变机组的发电量。

燃机的控制最困难的是电负荷控制, 燃机发电机组可以把发电机的输出电流作为前馈信号, 实现前馈控制, 即一旦发现电流急剧变化, 就迅速把供油量调整到负荷对应的水平上, 再通过 PD 控制实行稳态控制。对于燃机压缩机组这样的负荷形式, 由于没有前馈信号可取, 电负荷控制就更难了。一般只能采用变参数的 PD 控制, 通过数

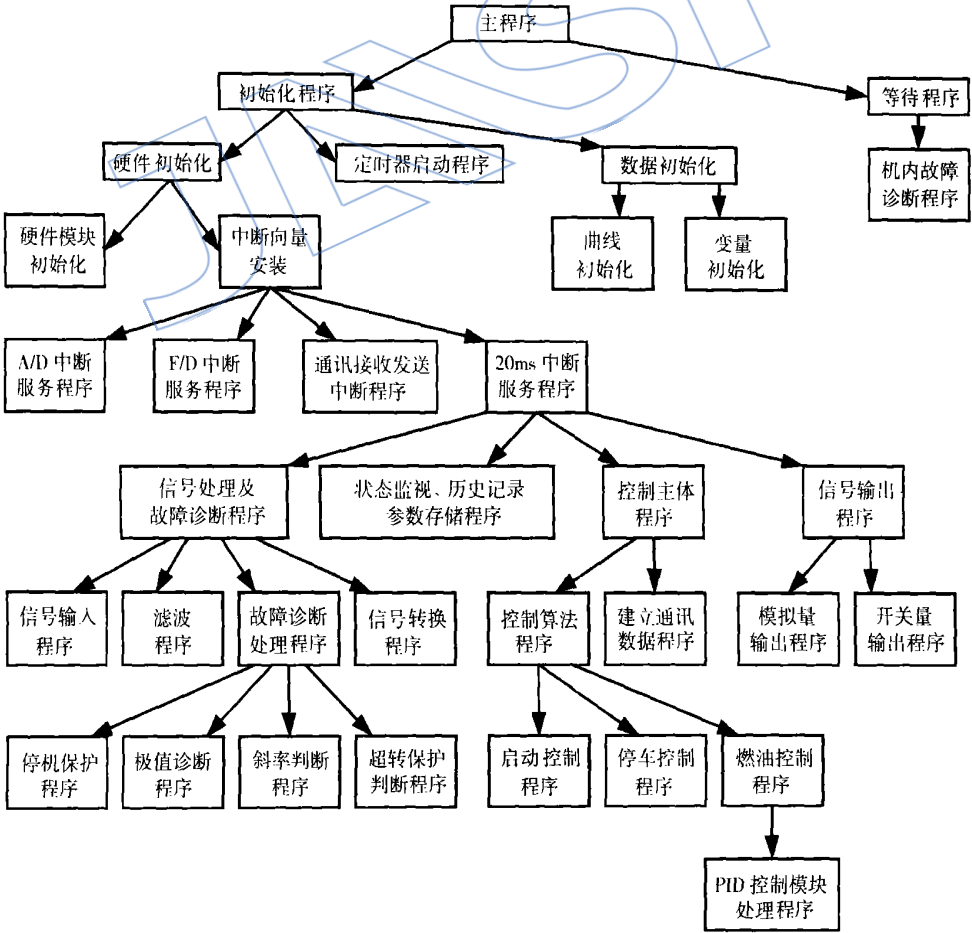


图2 软件结构层次划分图  
Fig. 2 Software Configuration

字仿真和半物理模拟试验,反复调整参数,尽可能减少超调量,改善动态品质。

控制算法目前以PI控制最为常用,如何将现代控制理论较好地应用于燃机动力控制工程也在不断探索之中<sup>[8~11]</sup>。

4 3 软件结构设计

软件结构层次划分见图2,图2详细描述了整个控制软件的层次和模块调用关系。

4 4 控制软件的设计

早期的燃机数控系统都是自制的电子控制器,这时的控制软件都是嵌入式软件。一般都是软件设计人员在软件开发环境下,先采用C语言编程,再下载到目标机上运行,软件定型后就固化到电子控制器中的程序存储器。软件的管理、调度都是由设计人员编制调度管理程序实现的,数据的采集、输出也是由编程人员根据所使用的电路芯片编制采样程序、输出驱动程序。这时候的软件设计人员几乎无所不知,要求对系统结构、电子硬件、控制规律都十分清楚。但软件的研制效率很低,错误也难以避免。

随着计算机控制系统在工业控制领域中的日益广泛应用,一种集工业控制诸多强大功能于一身的组态软件也应运而生。这种组态软件,将流程

控制、数据采集、设备控制与输出、网络数据传输、双机热备份、工程报表、数据与曲线动态显示等功能都实现了模块化设计,可稳定运行于Windows98/2000/NT操作系统,并支持国内外众多数据采集与输出设备。软件设计人员只需将各功能模块在流程图中连接起来,并填上适当的参数,就完成了全部设计工作。应用组态软件大大提高软件设计工作效率。

5 系统数字仿真和半物理模拟试验

系统数字仿真和半物理模拟试验是燃机数控系统研制过程中非常重要环节。

在燃机数控系统的方案设计过程中,系统数字仿真可用于初步验证数控系统的控制方案,用来选择数控系统控制软件所采用控制算法及相应的控制算法系数。系统数字仿真一般在MATLAB/Simulink环境下进行。

在燃机数控系统所有部件研制成功后,首先进行部件(或分系统)性能试验,然后进行系统总成,电子控制器(含控制软件)、液压机械装置及部份传感器均采用实物,燃机用燃气轮机及其负载的数学模型代替,在半物理模拟试验台上进行试验验证。

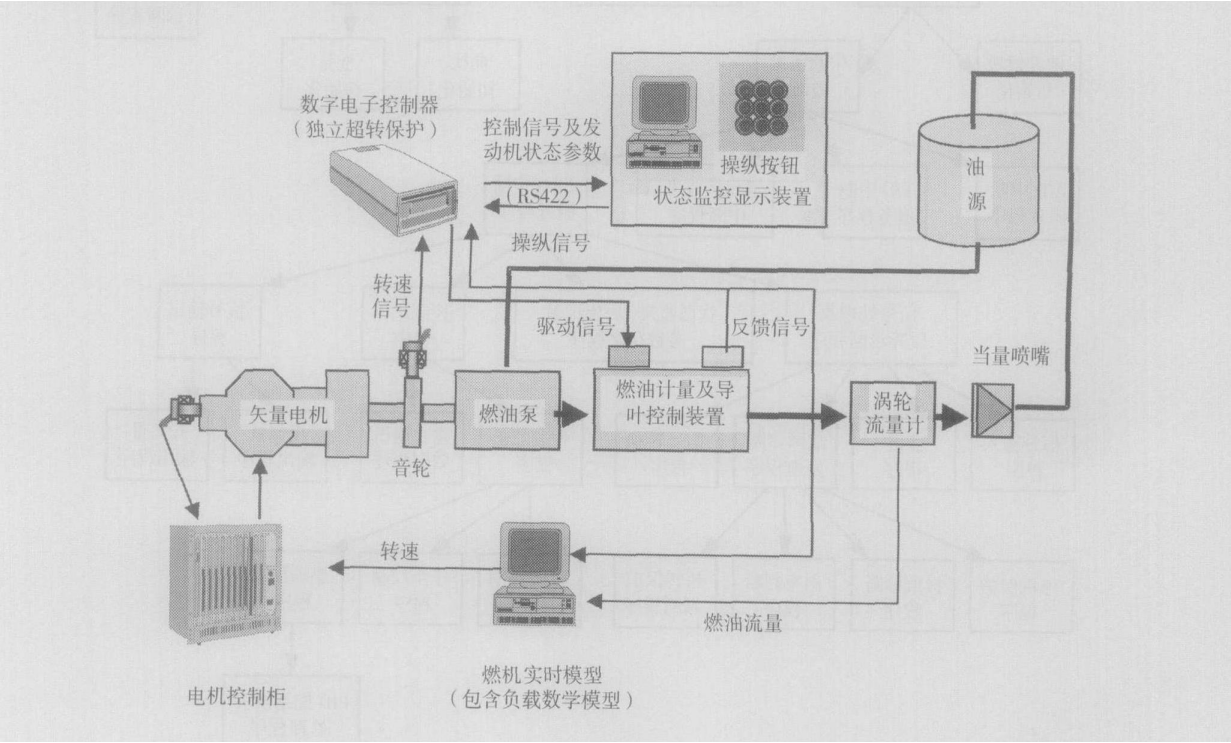


图3 燃机控制系统半物理模拟试验原理图

Fig 3 Principle of semi-physical simulation of control system of gas-turbine

燃机数控系统的半物理模拟试验原理图如图3所示。

数控系统半物理模拟试验的主要目的是提高数控系统在燃机联机试车中安全性和工作可靠性,降低风险,减少成本。

通过数控系统半物理模拟试验,验证所设计的燃机数控系统的如下一些特性:

(1) 燃机数控系统的各组成部件之间具有良好的工作匹配性;

(2) 各个控制回路(燃油控制回路、几何可调控制回路等)的动、静态特性满足系统要求,且各控制回路共同工作时具有较好的控制品质;

(3) 数控系统逻辑控制准确,在故障出现或应急状态时能按给定的工作逻辑进行自动控制,保证燃机系统工作安全;

(4) 系统控制功能正确,性能稳定,精度满足设计要求,在燃机起动、稳态、加、减速、并网、加、减载、停机等工作过程中,数控系统都具有很好的控制能力,保证燃机稳定、安全地工作。通过半物理模拟试验,还可以对控制软件进行系统测试,验证控制软件的可靠性。

## 6 结束语

燃气轮机开始在工业现场广泛使用,其控制系统就迅速从液压机械式控制器发展为模拟式电子控制系统,进而发展成数字电子控制系统。以后将在一体化分布式系统结构、现代控制理论的工程化<sup>[3,5]</sup>等方面有较大进展。这主要是由于燃气轮机使用场合千变万化,数控系统可以通过输入、输出的增减,软件的修改、参数的调整,灵活地适应使用要求的变化。另外一个原因是工业燃机对可靠性的要求非常高,需要监控的参数非常多,监控的逻辑又十分复杂,这都是其它控制系统所难以胜任的。本文综述了燃气轮机数控系统方案的设计,详细论述了系统总体设计、电子控制器、液压机械执行装置、控制软件的设计以及系统数字仿真和半物理模拟试验,对各种常见的方案都作了充分的说明。采用上述方案研制的燃机数控系统已经广泛应用于国内外各种燃气轮机的控制。

现代工业控制的一个重要技术发展方向就是分布式控制系统的应用<sup>[12]</sup>。如果单从燃机控制而言,由于机组设备比较集中,控制变量又不多,对分布式控制系统的应用要求还不强烈,更多的是应用上位计算机、智能采集模块加通讯总线,它本

质上还是集中控制模式。如果考虑到配套设备的控制,如余热锅炉的控制,水处理系统的控制,以至整个电厂多台燃机发电机组的协调控制,那么将这些控制系统通过局部总线连接起来,形成分布式控制系统,由上位机进行协调管理,这是现代企业必然的发展方向,也应是今后燃机控制的重要研究方向。

## 参考文献

- [1] LM 6000 Operation and Maintenance Manual[Z]. S&S, 1995
- [2] Johnson D, Miller R W, Ashley T. SPEEDTRON CTM Mark V Turbine Control System[R]. GER-3658E, 1996
- [3] SPEEDTRON CTM Mark VI Turbine Control[Z]. GE Co., 2000
- [4] 吴石贤. 燃气轮机控制系统概况[J]. 发电设备, 2003, (2): 56~58  
WU Shi-xian. Control System of Gas-Turbine[J]. *Generating Equipment*, 2003, (2): 56~58
- [5] 刘尚明. 从 Mark I 到 Mark VI 至 Mark VI- 兼谈燃气轮机控制技术发展[J]. 燃气轮机技术, 2001, 14(1): 22~28  
LIU Shang-ming. From Mark I to Mark VI and After Mark VI- Presentation on Development of Gas Turbine Control System[J]. *Gas Turbine Technology*, 2001, 14(1): 22~28
- [6] Oceanak, Scott, Baker, et al. Development Design and Testing of a Standard Gas Turbine Control[A]. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2004, Volume 2: Aircraft Engine; Ceramics Controls, Diagnostics, and Instrumentation[C]. 2004: 527~533
- [7] 张仁兴. 舰船燃气轮机电子控制柜设计特点的分析[J]. 热能动力工程, 2001, 16(2): 165~167.  
Zhang Ren-xing. An Analysis of the Design Features of an Electronic Control Console for a Naval Gas Turbine[J]. *Thermal Power Engineering*, 2001, 16(2): 165~167.
- [8] 张建生, 吕欣荣. 浅谈燃气轮机的控制[J]. 节能, 2000(3): 9~12  
ZHANG Jian-sheng, LU Xin-rong. Primary Analysis on Gas Turbine Control[J]. *Energy Conservation*, 2000(3): 9~12
- [9] Monopoli R V. Model Following Control of Gas Turbine Engine[J]. *J. of Dynamic System, Measurement and Control*, 1992, 114(9): .
- [10] 曾进. 燃气轮机最优控制研究[J]. 热能动力工程, 2000, 15(6): 662~666  
CENG Jin. Optimal Control of Gas Turbine[J]. *Thermal Power Engineering*, 2000, 15(6): 662~666
- [11] Dambrosio L, Camporeale S M, Fortunato B. Control of Gas Turbine Power Plants by Means of the Weighted One-Step Ahead Adaptive Technique[J]. *Journal of Systems and Control Engineering*, 2002, 216(N 14): 317~24
- [12] 05271457 Title: Distributed Control System for Turbine Engines[M]. Publication Year: 1999