航空发动机地面试车台加温加压进气控制系统设计

周 易[1],黄 猛[2],陶国云[1],罗振伟[1],王晓宇[1]
(1.中国航发沈阳发动机研究所,沈阳 110015;2.空军装备部驻沈阳地区第二军事代表室,沈阳 110015)

摘要:为模拟不同飞行状态下航空发动机的工作环境,设计了航空发动机地面试车台,该试车台能够通过管道供气的方式为航空发动机提供一定温度、压力的气体。介绍了包括进气系统及其控制系统在内的硬件系统架构的总体设计方案,以及模糊PID控制器的基本原理和设计思路。针对该试车台的加温加压进气系统设计了基于西门子PLC平台的控制系统,并在实际的试车工作中完成了验证与应用。其中,最后1级压力调节系统采用了模糊PID控制方法,在西门子PLC平台使用2种编程语言分别设计了模糊PID控制器模块,并对比了2种编程语言的设计效率和运行效果。分别通过计算机仿真和试车台试验及试车将模糊PID控制器的控制效果与传统PID控制器的进行对比,结果表明:模糊PID控制器的控制效果更优。

关键词:地面试车台;加温加压进气系统;可编程控制器;模糊PID控制;航空发动机
中图分类号:V263.4+7 **文献标识码:**A **doi:**10.13477/j.cnki.aeroengine.2022.05.014

Heating and Pressurizing Air Intake Control System Design of Aeroengine Ground Test-bed

ZHOU Yi[1],HUANG Meng[2],TAO Guo-yun[1],LUO Zhen-wei[1],WANG Xiao-yu[1]
(1.AECC Shenyang Engine Research Institute,Shenyang 110015,China;2.Second Military Representative Office of Air Force Equipment Department Stationed in Shenyang Area,Shenyang 110015,China)

Abstract: In order to simulate the working environment of aeroengines under different flight conditions,an aeroengine ground test-bed with the capability of supplying air to aeroengine at certain temperature and pressure through pipeline was designed. The framework the hardware system architecture including the intake system and its control system,as well as the fundamental principles and design concept of the fuzzy PID controller were introduced. The control system based on Siemens PLC platform was designed for the heating and pressurizing air intake system of the test-bed,and had been verified and put into operation during engine test. Fuzzy PID control method was adopted for the last stage pressure regulating system. Two programming languages were used to design the fuzzy PID controller modules on the Siemens PLC platform,and the design efficiency and operation performance of the two programming languages were compared. The control performance of fuzzy PID controller was compared with that of traditional PID controller through computer simulation,commissioning and engine test respectively. The results show that the fuzzy PID controller has better performance.

Key words:ground test-bed;heating and pressurizing air intake system;programmable logic controller;fuzzy PID control;aeroengine

0 引言

航空发动机地面试车台能够通过管道供气的方式为航空发动机提供一定温度、压力的气体,模拟在不同飞行状态下发动机的工作环境。加温加压进气系统是试车台的重要组成部分,直接影响发动机试验环境的模拟情况。为保证发动机的试验环境,对进气系统的供气温度、压力、流量范围和随动能力等提出了非常高的要求。

目前中国已有用于航空发动机整机的地面试车台,能够为航空发动机整机提供高空模拟状态下的进排气环境,但是其进气温度、压力的调节精度不高;国外同样有类似的航空发动机地面试车台,但是其具体设计参数无法知悉。

但志宏等[1]介绍了模糊比例-积分-微分(Proportional Integral Derivative,PID)控制器的技术原理和基于可编程控制器(Programmable Logic Controller,PLC)的控制器解决方案及设计方法;张松等[2]将常规PID

收稿日期:2020-10-20 **基金项目:**航空动力基础研究项目资助
作者简介:周易(1992),男,硕士,工程师,主要从事航空发动机设备设计、自动化技术工作;E-mail:zhouyi0331@126.com。

引用格式:*周易,黄猛,陶国云,等.航空发动机地面试车台加温加压进气控制系统设计[J].航空发动机,2022,48(5):130-136.ZHOU Yi,HUANG Meng,TAO Guoyun,et al.Heating and pressurizing air intake control system design of aeroengine ground test-bed[J].Aeroengine,2022,48(5):130-136.*

控制和模糊控制结合起来,构成兼有二者优点的排气环境压力控制系统的具体实施方案;廖邦兴等[3]提出了核心机燃油与控制系统的选用原则和核心机控制计划制订的基本方法;彭勇刚[4]针对模糊控制技术应用的几个关键问题及其解决方法进行了研究,扩大了模糊控制的应用范围;熊荆江[5]结合某高空模拟试车台建设的工程实践,对该高空台供气调节系统的设计进行了深入研究;钱伟[6]从控制理论的基本概念与方法出发,在构造合适的 Lyapunov-Krasovskii 泛函的基础上,采用不同的分析方法探讨了时滞系统的若干问题;乔彦平等[7]将遗传算法应用到进排气系统进气压力自动控制系统中,对自动控制系统的 PID 控制参数进行优化,获得良好的控制效果;张松等[8]结合高空台调压系统的特点,提出了上位机、下位机+实物部件的形式组成半物理仿真系统,实现了模型计算、数据采集、上下位机数据通讯及系统参数控制等功能;赵涌等[9]提出在进气压力常规 PID 反馈控制的基础上增加按空气流量补偿的前馈控制,构成压力复合控制系统;王述彦等[10]设计了模糊 PID 控制器并进行了仿真和试验验证,改善了控制效果;王季方等[11]、刘向杰等[12]、蔚东晓等[13]结合近年来模糊控制的最新研究成果,简要介绍了模糊控制的概念和特点,并对模糊控制的原理作了说明,较详细的介绍了模糊控制的现状;冯晓露等[14]提出了一种新的基于遗传算法的动态模糊控制器优化方法,对模糊控制器控制规则表中的数据进行实时在线的动态优化;傅强等[15]对航空发动机的双变量解耦控制方法进行了研究,提出了一种基于遗传算法的 PID 神经网络解耦控制算法,克服了 BP 算法易陷入局部权值的缺点;刘福才等[16]对模糊系统的通用逼近性、模糊系统作为通用逼近器的充分条件和必要条件以及模糊系统的逼近精度等方面的研究进行了较为详尽的综述;刘凯[17]介绍了某间冷燃气轮机台架试验控制系统总体设计方案,对燃气轮机控制系统的组成、功能实现方案、控制逻辑以及燃气轮机的安全保护、数据监控等方面进行了较为详细的阐述。

本文针对该试车台的加温加压进气系统,设计了基于西门子 PLC 平台的控制系统。

1　加温加压进气系统结构与原理

加温加压进气系统的设计指标:进口压力范围为 100 ~ 1000 kPa;进口流量≤200 kg/s;最大温升≤350℃(流量≤100 kg/s)。该系统的基本结构如图 1 所示。

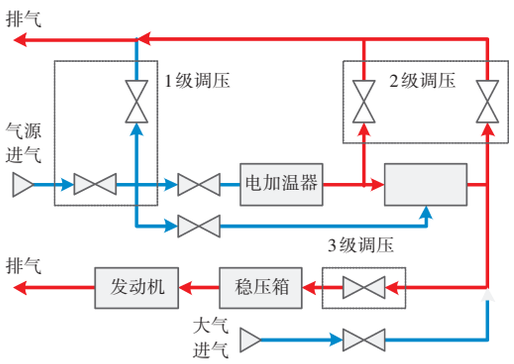


图 1　加温加压进气系统的基本结构

在气源进气后,通过第 1 级调压系统粗调进气压力,并通过调节电加热器的功率得到特定温度、压力和流量的压缩空气。与电加热器流路并联的管路平时关闭,当需要对压缩空气进行快速降温时打开,利用掺混器将冷却气与热气混合。

随后通过第 2 级调压系统进一步粗调进气压力,为第 3 级调压系统中的阀门提供适当的备压。最后通过第 3 级调压系统快速精确地调节供气压力,经过稳压箱过滤压缩空气压力和温度的波动与畸变,最终保证发动机进口(即稳压箱出口)气体的温度、压力、流量满足需求。

在加温加压进气系统中,设计指标的流量需求较大,因此管道通径都很大。第 1、2 级调压系统对压力控制的精度要求不高,综合考虑实际需求及设备成本,一般选用电动的套筒式调节阀和电动调节蝶阀。而第 3 级调压系统是发动机进口前的最后 1 级压力调节,需要快速准确地响应发动机的压力需求,因此选用响应速度快、调节精度高、出口流场好的液压轴流阀。

为了迅速发现各部件故障或故障征候,需要对进气系统中可能发生故障的设备(电加热器、掺混器、阀门和进气管道、稳压箱)进行监控,故在每个部件的进、出口都设有温度、压力变送器,以监视每个部件的工作状态,并根据不同的故障综合进行传感器的放置和排布。

温度变送器选择的类型是绝缘式 K 型铠装热电偶。压力变送器则选用常见的扩散硅式绝压变送器,变送器的引压管足够长,便于将高温压缩空气的温度降低到变送器能允许的温度;引压管具有避免堆积在管内的冷凝水结冰的功能。

2　控制系统设计

2.1　控制系统总体设计

控制系统采用基于西门子 WinCC 平台的上位机

监控系统进行人机交互操作，通过西门子PLC实现对进排气系统各设备的控制，包括系统压力、温度、流量等参数的调节与控制；当发生超温、超压等异常情况时报警，具有自保护功能。控制系统的结构如图2所示。

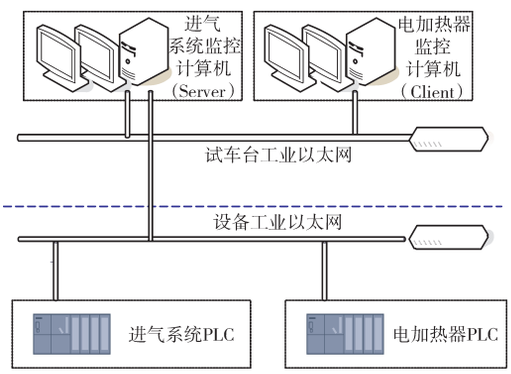


图2 控制系统结构

加温加压进气系统的温度调节利用电加热器实现，电加热器为成套设备，控制系统由设备供应商进行集成，能够实现本地和远程的温度给定闭环控制、功率给定开环控制等功能。

对加温加压进气系统结构与原理进行分析可知，第1级调压系统由于管径较大，阀门动作较慢，且不需要进行压力精确调节，因此在控制系统中不需要进行闭环控制。

第2级调压系统主要负责为第3级调压系统提供适当的备压。为了保持第3级调压系统中的液压轴流阀上游压力稳定，减少前级调压系统的压力波动干扰，提高发动机进气压力的控制精度，同时考虑到电动调节阀动作较慢的特点，本文设计了1个死区控制算法实现第2级调压控制。在死区控制算法中，需要设置的参数为目标压力值、死区压力值范围、阀位动作步进速度。死区控制算法流程如图3所示。图中P为实测压力值，P_0为目标压力值，P_d为死区压力值。

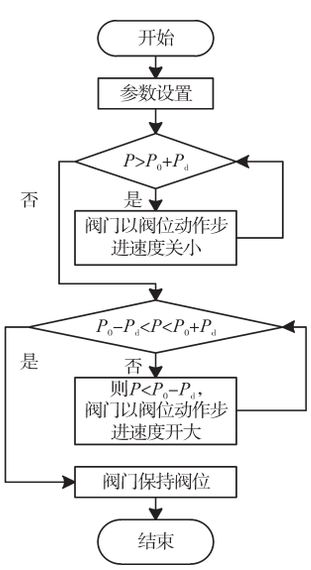


图3 死区控制算法流程

第3级调压系统需要快速精确地调节供气压力，且保持与发动机状态随动，采用同时调节轴流阀前压力和稳压箱出口压力的调节方案，即采取主路截流、旁路放气的方法，对轴流阀进行压力闭环控制，第2级调压系统随动调节。

在保持旁路前的主气路上已调好温度的空气总质量不变的情况下，使总供气量不受发动机状态改变的影响，保持发动机进口压力稳定，确保发动机在不同工作状态下所需要的空气流量。

整套加温加压进气系统由许多具有非线性、大滞后等特性的设备组成，在温度、压力的调节与控制中相互干扰的影响因素很多，因此在第3级调压系统中，使用传统的PID控制器效果一般。现有的控制系统采用的PID控制方式，是根据调试经验摸索出若干套PID参数，针对发动机的不同状态进行切换。这种方式有较大缺陷：一方面需要提前调试若干套PID控制参数，造成前期工作量过大以及能源的浪费；另一方面，调试得到的控制参数无法保证最优。

另外，由于系统结构复杂，参数具有时变性，且各设备状态之间耦合度较高，因此搭建系统仿真模型的难度很大，模型的精确度不高，这也造成了控制器设计与仿真验证的难度加大。

针对系统的上述特点，本文为第3级调压系统设计了一种模糊PID控制器，其优点为：根据工程人员的经验设计控制器参数，不需要搭建系统的精确数学模型；控制器的参数能够根据系统响应曲线的不同阶段实时在线整定，能够适应发动机试车过程中的不同状态点；控制器参数可调且易调，经过优化可以适应后续其他型号发动机的不同试验要求。

2.2 压力模糊PID控制器设计与仿真

模糊PID控制器不需要借助精确的数学模型，而是利用模糊数学的基本理论和方法，把工程人员PID控制器参数设计的经验转化为模糊推理的模糊集合和模糊规则，利用代码予以实现后，在控制过程中实时运行算法，在线整定PID控制器参数。模糊算法将系统的误差e以及误差变化率e_c作为输入，利用e和e_c描述系统当前状态，并实时计算出合适的控制参数K_p、K_i和K_d，输出到PID控制器，从而实现参数在线整定。模糊PID控制器原理如图4所示。

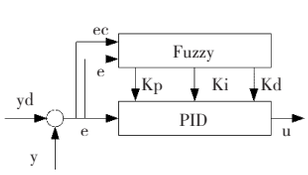


图4 模糊PID控制器原理

根据以往控制器的设计和调试经验，利用MAT-

LAB 平台下的模糊算法工具箱设计了 1 个模糊 PI 控制器。模糊 PI 控制器设计流程如图 5 所示。

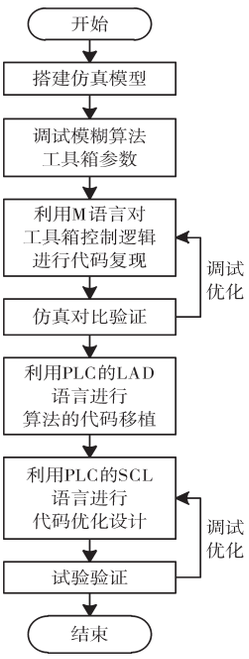


图 5　模糊 PI 控制器设计流程

本文对模糊算法工具箱的算法逻辑进行了分析并调整了模糊算法的参数设置。

为了便于模糊算法的运行,应将加温加压进气控制系统的进气压力误差 e 以及误差变化率 e_c 线性变换至区间[−1, 1]内,其变换式为

$$e=\begin{cases}-1, e<-50\\ e/50, -50<e<50\\ 1, e>50\end{cases} \quad (1)$$

$$e_c=\begin{cases}-1, e_c<-50\\ e_c/50, -50<e_c<50\\ 1, e_c>50\end{cases} \quad (2)$$

定义 3 个模糊集合 N、Z 和 P,分别表示 e 和 e_c 的取值趋向于定义域的下限值(Negative)、零(Zero)和上限值(Positive)。

根据 e 和 e_c 在各模糊集合上的隶属度,利用模糊规则进行模糊推理,将计算得到的模糊参数进行反模糊化处理,得到整定后的 K_p 和 K_i 值。模糊推理规则如下:

(1) If (e is N) and (e_c is N) then (K_p is Z)(K_i is Z);
(2) If (e is N) and (e_c is Z) then (K_p is P)(K_i is Z);
(3) If (e is N) and (e_c is P) then (K_p is P)(K_i is Z);
(4) If (e is Z) and (e_c is N) then (K_p is Z)($K_i$is P);
(5) If (e is Z) and (e_c is Z) then (K_p is Z)(K_i is P);
(6) If (e is Z) and (e_c is P) then (K_p is Z)(K_i is P);
(7) If (e is P) and (e_c is N) then (K_p is P)($K_i$is Z);
(8) If (e is P) and (e_c is Z) then (K_p is P)(K_i is Z);
(9) If (e is P) and (e_c is P) then (K_p is P)($K_i$is Z)。

每条模糊规则都使用 e 和 e_c 在各模糊集合上的隶属度值确定 K_p 和 K_i 在各模糊集合的隶属度。

例如第(3)条模糊规则,K_p 在模糊集合 P 和 K_i 在模糊集合 Z 的隶属度为

$$K_{P_{P3}}=K_{i_{Z3}}=\frac{e_N+e_{cP}}{2} \quad (3)$$

式中:$K_{p,p3}$ 为第(3)条模糊规则下 K_p 在模糊集合 P 上的隶属度;$K_{i,z3}$ 为第(3)条模糊规则下 K_i 在模糊集合 Z 上的隶属度;e_N 为 e 在模糊集合 N 上的隶属度;$e_{c,p}$ 为 e_c 在模糊集合 P 上的隶属度。

根据上述 9 条模糊规则,可以求出 K_p 和 K_i 在不同模糊集合上的 9 个隶属度值。取其中的最大值为 K_p 和 K_i 在对应模糊集合的最终隶属度值

$$\begin{aligned}K_{P_Z}&=\max(K_{P_{Z1}},K_{P_{Z4}},K_{P_{Z5}},K_{P_{Z6}})\\ K_{P_P}&=\max(K_{P_{P2}},K_{P_{P3}},K_{P_{P7}},K_{P_{P8}},K_{P_{P9}})\\ K_{i_Z}&=\max(K_{i_{Z1}},K_{i_{Z2}},K_{i_{Z3}},K_{i_{Z7}},K_{i_{Z8}},K_{i_{Z9}})\\ K_{i_P}&=\max(K_{i_{P4}},K_{i_{P5}},K_{i_{P6}})\end{aligned} \quad (4)$$

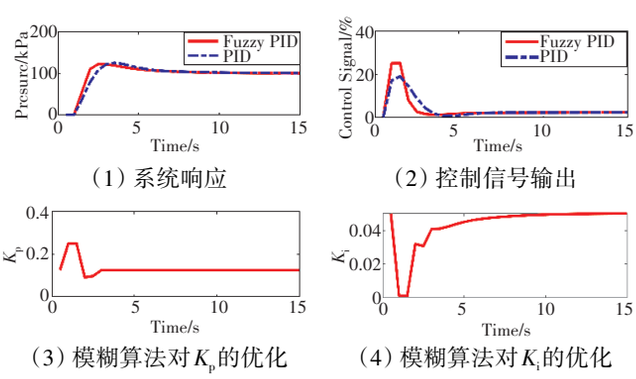
根据 K_p 和 K_i 在各模糊集合的隶属度值,通过反模糊化处理得到最终的 K_p 和 K_i 值。基于最终将该控制器工程化的考虑,在 PLC 编程中,计算函数的积分较为困难,因此在反模糊化过程中,利用 K_p 和 K_i 的隶属度值求其实际值时,不使用常用的中位数法,而是用最大隶属度法实现。反模糊化计算为

$$K_p=\begin{cases}f_{K_{P_Z}}^{-1}(K_{P_Z}), K_{P_Z}>K_{P_P}\\ f_{K_{P_P}}^{-1}(K_{P_P}), K_{P_P}>K_{P_Z}\end{cases} \quad (5)$$

$$K_i=\begin{cases}f_{K_{i_Z}}^{-1}(K_{i_Z}), K_{i_Z}>K_{i_P}\\ f_{K_{i_P}}^{-1}(K_{i_P}), K_{i_P}>K_{i_Z}\end{cases} \quad (6)$$

式中:$f_{K_{P_Z}}^{-1}$、$f_{K_{P_P}}^{-1}$、$f_{K_{i_Z}}^{-1}$、$f_{K_{i_P}}^{-1}$ 分别为 K_p 和 K_i 在各模糊集合上隶属度函数的逆函数。

利用 M 语言将上述分析结果进行代码复现,并进行仿真验证,得到的结果与模糊算法工具箱的运算结果相同,模糊 PID 控制器仿真曲线如图 6 所示。仿真结果表明,模糊 PID 控制器能够有效减小系统响应的超调,加快系统响应速度,K_p 和 K_i 的优化过程符合模糊规则的逻辑。



(1) 系统响应　(2) 控制信号输出

(3) 模糊算法对 K_p 的优化　(4) 模糊算法对 K_i 的优化

图 6　模糊 PID 控制器仿真曲线

2.3　压力模糊 PID 控制器移植与优化

西门子 PLC 平台有顺序功能流程图(Sequential Function Chart, SFC)、梯形图语言(Ladder Logic Pro-

gramming Language，下文简称 LAD）、功能块图（Function Block Diagram，FBD）、结构化控制语言（Structured Control Language，SCL）等多种编程语言。其中 LAD 语言直观易懂，适用于数字量逻辑控制，在工程实际中应用广泛；SCL 语言是一种类似于计算机高级语言的编程方式，适用于复杂运算功能、复杂数学函数、数据管理、过程优化等应用领域。

基于 LAD 语言进行模糊 PID 控制器的代码移植，控制程序包含的程序块及用途如下：

（1）“FC1000_模糊 PID 控制器”（功能块）为控制器主程序，包含与 PLC 主程序的数据 IO 接口，能够实现模糊 PID 控制器的主要功能；

（2）“FC1001_TRIMF 函数”（功能块）为一种分段线性函数，用于计算变量在模糊集合上的隶属度；

（3）“FC1002_TRIMF 逆函数”（功能块）为 FC1001 中 TRIMF 函数的逆函数，用于根据变量的隶属度反模糊化求变量值；

（4）“FC1003_取平均数”（功能块）能够计算 2 个浮点数的平均值；

（5）“DB1000_模糊 PID 控制器参数”（数据块）用于存储模糊 PID 控制器的参数。

LAD 语言是一种图形化的编程语言，其优点是直观易懂，缺点是基本指令类型较少，实现复杂功能时程序结构较为繁琐；而 SCL 语言是一类高级编程语言，在实现算法方面较 LAD 语言有明显优势。

利用 SCL 语言将模糊 PID 控制器进行代码优化，实现与 LAD 程序相同的功能，2 种语言程序块代码量对比见表 1。

从表中可见，SCL 语言实现复杂算法具有编程简单、代码量较少、能够减小 CPU 运算负荷等优点。

2.4 小结

设计后的压力控制系统、温度控制系统的控制回路分别如图 7、8 所示。

压力控制系统充分考虑了硬件条件限制，通过手动控制、死区控制、模糊 PID 控制等多种方式实现了发动机进口压力控制。温度控制系统为厂家集成设备，主要的设计工作在于上位机人机交互系统的数据通讯接口、控制界面设计、多系统联动的协调机制等方面。

表 1 2 种语言程序块代码量对比

功能块	数据类型	LAD 代码量（Bytes）	SCL 代码量（Bytes）
FC1000	局部数据	182	0
	代码	4314	0
	装载存储器	4592	1812
	工作存储器	4350	1624
FC1001	局部数据	24	0
	代码	286	0
	装载存储器	416	284
	工作存储器	322	218
FC1002	局部数据	0	0
	代码	0	0
	装载存储器	270	172
	工作存储器	190	110
FC1003	局部数据	0	
	代码	0	
	装载存储器	146	
	工作存储器	86	
合计		15178	4220

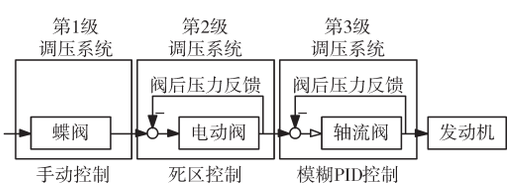


图 7 压力控制系统的控制回路

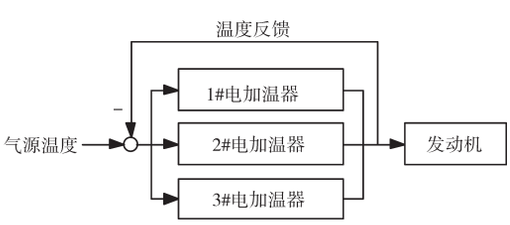
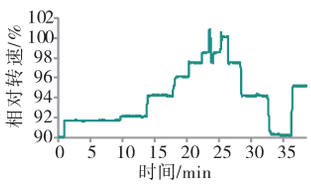


图 8 温度控制系统的控制回路

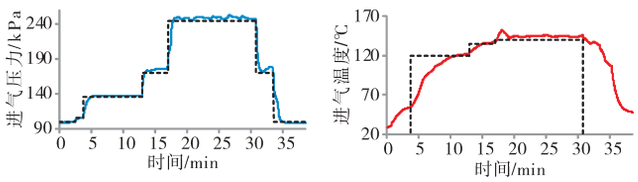
3 发动机试车验证

本文所设计的加温加压进气控制系统已经在实际试车工作中得到应用。在某次加温加压试车中，发动机相对转速以及压力、温度控制曲线如图 9 所示，图中黑色虚线为控制目标。

气源来气温度约为 70℃，流量约为 60 kg/s。试车流程的 20～30 min 为数据采集阶段，发动机对进气系统的要求为：进气压力为 245～255 kPa；进气温度为 140～150℃；进气流量约



（a）发动机相对转速



(b) 压力控制　　(c) 温度控制

图 9　发动机相对转速以及压力、温度控制曲线

为 50 ~ 55 kg/s。

发动机的其他状态为过渡阶段,用于发动机和设备的状态调整与协调匹配。

在此期间,发动机转速一直在变化,加温加压进气控制系统根据发动机的要求进行实时闭环控制。试车数据分析结果为:

进气压力目标为 135 ~ 140 kPa 时,将控制目标设定为 137 kPa,过渡态由 100 kPa 调整至 137 kPa 共用时约 100 s,无超调,稳态控制精度为 0.04 ~ 0.81 kPa;进气压力目标为 245 ~ 255 kPa 时,将控制目标设定为 250 kPa,过渡态由 137 kPa 调整至 250 kPa 共用时约 200 s,无超调,稳态控制精度为 -3.09 ~ 3.07 kPa。

进气温度目标为 140 ~ 150 ℃,开始加温时,发动机处于状态调整阶段,温升率不能过快,因此分阶段进行温度调节。最终将控制目标设定为 145 ℃,过渡态由 100 ℃(气源站来气温度)调整至 145 ℃共用时约 10 min,超调 2.15 ℃,稳态控制精度为 -2.53 ~ 1.10 ℃。

在试车结束后的发动机状态下降阶段,需要先降低发动机的进气温度,后降低进气压力。在实际操作中,直接将目标温度设为 0 ℃,进气压力随进气温度的降低分阶段调整。

由试车数据可知,加温加压进气控制系统能够实时跟随发动机的状态变化,维持进气压力和温度的稳定。

4　结束语

本文所述的航空发动机地面试车台加温加压进气控制系统能够完全满足发动机地面试车对进气压力、温度、流量的要求。

针对多级调压系统设计了 1 个模糊 PID 控制器,分别利用 MATLAB 仿真平台和实际试验试车对其控制效果进行了验证。仿真结果和试验试车数据都表明,模糊 PID 控制器的控制效果更优。

模糊 PID 控制器在设计过程中不依赖于系统的精确模型。而在航空发动机设备设计领域中,整个系统的结构往往比较复杂,参数具有时变性和不确定性,系统建模较为困难。因此,在未来的航空发动机设备设计中,模糊 PID 控制器应当加以推广和应用。

参考文献:

[1] 但志宏,张松. PLC 实现的 FUZZY 自适应 PID 控制器在高空模拟试验中的应用[J]. 自动化技术与应用,2011,30(1):20-23,42.
DAN Zhihong, ZHANG Song. The application of fuzzy-PID controller on the basis of PLC in aeroengine altitude simulating tests[J]. Techniques of Automation and Applications, 2011, 30(1): 20-23, 42. (in Chinese)

[2] 张松,郭迎清,侯敏杰,等. 复合控制技术在高空台进排气调压系统中的技术研究[J]. 测控技术,2009(11):29-33.
ZHANG Song, GUO Yingqing, HOU Minjie, et al. Research of composite control technology on inlet/exhaust pressure adjustment system of simulated altitude platform[J]. Measurement & Control Technology, 2009(11): 29-33. (in Chinese)

[3] 廖邦兴,钟小红. 核心机燃油与控制系统研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2003(3):19-21.
LIAO Bangxing, ZHONG Xiaohong. An investigation on core engine fuel and control system[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2003(3): 19-21. (in Chinese)

[4] 彭勇刚. 模糊控制工程应用若干问题研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.
PENG Yonggang. A study on engineering application of fuzzy control [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)

[5] 熊荆江. 某航空发动机高空模拟试车台供气系统设计研究[D]. 长沙:湖南大学,2011.
XIONG Jingjiang. The research on design of air supply system on aeroengine simulated altitude test facility[J]. Changsha: Hunan University, 2011. (in Chinese)

[6] 钱伟. 时滞系统若干问题的研究[D]. 杭州:浙江大学,2009.
QIAN Wei. Research on several problems of time-delay systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese)

[7] 乔彦平,黄单. 基于遗传算法的高空台进排气控制仿真研究[J]. 测控技术,2012,31(6):83-86.
QIAO Yanping, HUANG Dan. Simulation research on altitude simulated test facility inlet-exhaust pressure control system based on genetic algorithm[J]. Measurement & Control Technology, 2012, 31(6): 83-86. (in Chinese)

[8] 张松,郭迎清,赵涌,等. 进排气调压系统半物理仿真程序的设计与实现[J]. 计算机测量与控制,2010,18(2):401-403,410.
ZHANG Song, GUO Yingqing, ZHAO Yong, et al. Design and realization of semi-physical simulation program in inlet/exhaust pressure adjustment system[J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(2): 401-403, 410. (in Chinese)

[9] 赵涌,侯敏杰,黄振南,等. 航空发动机高空模拟试验进气压力复合控制研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2010,23(1):37-41.

ZHAO Yong, HOU Minjie, HUANG Zhennan, et al. Research on aircraft engine inlet pressure compound control in altitude simulationtest [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2010, 23(1): 37-41. (in Chinese)

[10] 王述彦,师宇,冯忠绪.基于模糊PID控制器的控制方法研究[J].机械科学与技术,2011,30(1):166-172.
WANG Shuyan, SHI Yu, FENG Zhongxu. A method for controlling a loading system based on a fuzzy PID controller[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(1): 166-172. (in Chinese)

[11] 王季方,卢正鼎.模糊控制中隶属度函数的确定方法[J].河南科学,2000(4):348-351.
WANG Jifang, LU Zhengding. The Determine Method of Membership Function in Fuzzy Control[J]. Henan Science, 2000(4): 348-351. (in Chinese)

[12] 刘向杰,周孝信,柴天佑.模糊控制研究的现状与新发展[J].信息与控制,1999,(4):283-292.
LIU Xiangjie, ZHOU Xiaoxin, CHAI Tianyou. Status and development of fuzzy control[J]. Information and Control, 1999, (4): 283-292. (in Chinese)

[13] 蔚东晓,贾霞彦.模糊控制的现状与发展[J].自动化与仪器仪表,2006(6):4-7.
YU Dongxiao, JIA Xiayan. Present situation and development of fuzzy control[J]. Automation & Instrumentation, 2006(6): 4-7. (in Chinese)

[14] 冯晓露,覃来丰,岑可法.基于遗传算法的模糊控制器动态优化方法[J].浙江大学学报(工学版),2007,41(3):461-465.
FENG Xiaolu, QIN Laifeng, CEN Kefa. Dynamic optimizing method of fuzzy controller based on genetic algorithm[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2007, 41(3): 461-465. (in Chinese)

[15] 傅强,樊丁.航空发动机PID神经网络解耦控制[J].推进技术,2007,28(2):208-210.
FU Qiang, FAN Ding. A PID neural network decoupling control of aeroengine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(2): 208-210. (in Chinese)

[16] 刘福才,陈超,邵慧,等.模糊系统万能逼近理论研究综述[J].智能系统学报,2007,2(1):25-34.
LIU Fucai, CHEN Chao, SHAO Hui, et al. Researches for universal approximation of fuzzy systems: a survey[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2007, 2(1): 25-34. (in Chinese)

[17] 刘凯.某间冷燃气轮机台架试验控制系统总体设计方案研究[J].航空发动机,2017,43(5):48-53.
LIU Kai. Research on overall design scheme of control system of test bed experimental for a intercooled gas turbine[J]. Aeroengine, 2017, 43(5): 48-53. (in Chinese)

(编辑:刘 静)