

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.049

涡电发动机的仿真与负载突变控制研究

冯贻赞, 翟世杰

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要:针对当涡电发动机负载快速突变时其核心机性能也会受到影响并出现喘振、熄火等现象的问题,研究并设计发电机转矩负载突变时的稳定控制方法。基于 MATLAB/Simulink 对涡电发动机进行部件级建模,建立涡电发动机总体模型。在发动机总体模型的基础上,建立传统 PID 控制模型,对发动机转速控制效果进行数值仿真分析,明确传统 PID 控制方式的局限性。针对传统 PID 控制无法在控制过程中改变参数的问题,研究并建立一种模糊自适应 PID 控制模型以及与之对应的模糊规则表,将模糊自适应 PID 控制效果与传统 PID 控制效果进行比较,验证模糊自适应 PID 控制方案的可行性。

关键词:涡电发动机;数值仿真;负载突变;模糊 PID 控制

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)02-0260-05

Turbo-electric Engine Simulation and Sudden Load Change Control Research

FENG Yiyun, ZHAI Shijie

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper studies and designs a stable control method for the generator torque load during sudden changes with regard to the turboelectric core engine's unideal performance, surge and flameout ect. caused by the sudden load change of its generator. Based on MATLAB/Simulink, a component-level modeling of the turboelectric engine is conducted to establish an overall model of the turboelectric engine, on which a traditional PID control model is built, and the numerical simulation analysis on the engine speed control effect is carried out, and the limitations of the traditional PID control method are clarified. As for the problem that traditional PID control cannot change parameters during the control process, a fuzzy adaptive PID control model and its corresponding fuzzy rule table are studied and established, and the control effect of fuzzy adaptive PID control is compared with that of traditional PID control, which verifies the feasibility of the fuzzy adaptive PID control scheme.

Keywords: turbo-electric engine; numerical simulation; sudden load change; fuzzy PID control

0 引言

对于混合电推进系统,其通常包括发动机、发电机电组、能源管理模块及传动机构等。涡电发动机^[1](如图 1 所示)是一种将微型发动机航改燃后与高速发电机组成的整体,包含进气道、压气机、燃烧室、涡轮、喷管、自由(动力)涡轮、侧排气装置以及负载(发电机)。

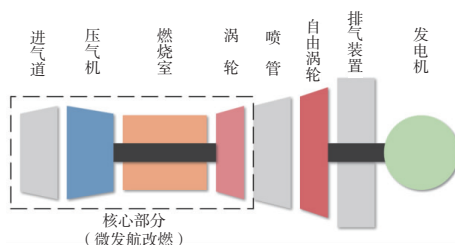


图 1 涡电发动机的模型结构图

由图 1 可见,发电机所连接的自由涡轮与核心机涡轮不共轴,而是气动连接。结合微型航改燃^[2]及高速直驱电机技术,涡电发动机的发电量与质量之比可达到 4 kW/kg 以上,可用于车载电磁炮发电系统、无人机混合动力系统或野战便携发电系统等。

对于涡电发动机来说,发电机负载突变将直接影响自由涡轮转速,进而影响到核心机性能。如果核心机燃油量调节的速度太快,则可能引起燃烧室熄火或压气机喘振的问题^[3];而如果太慢,则很有可能会发生涡轮超转导致核心机停机。

当前,微型航改燃的涡电系统尚处于试验阶段,国内未有成熟产品,湖南动力机械研究所的黄兴等与南京航空航天大学的傅鑫等的合作目前处于样机试验阶段^[4]。因此,目前涡电发电机电功率负载控制问题研究欠缺,有必要结合发动机数

学模型仿真,开展针对涡电发动机负载快速突变的稳定控制研究。

1 涡电发动机数学模型

本文针对设计点附近发电机负载突变带来的转速变化问题,基于 Simulink 平台建立数学模型^[5]。对模型进行了一定的简化,包括流动的一维简化、发电机的简化,还做出了一定的假设,包括空气燃气参数不随时间变化,忽略压气机喘振边界,忽略油气比对燃烧室出口温度的影响等。本文建模思路参考了文献[6],具体模型不同,计算方法有所不同。

1.1 大气模块

大气模块根据工作高度计算出该位置的大气温度 T 和压强 P 。

发动机进口静温,即大气总温为

$$T_{s0} = \begin{cases} 216.5, & H > 11\ 000 \\ 288.15 - 0.006\ 5H, & H \leq 11\ 000 \end{cases} \quad (1)$$

本文背景为地面,高度 H 为 0,故发动机进口静压,即大气总压为

$$P_{s0} = 101\ 325 (4 - 0.225\ 577 \times 10^{-4} H)^{5.255\ 9} \quad (2)$$

1.2 进气道模块

进气道模块的作用是通过飞行条件马赫数 M_a 计算发动机的进口参数。

进口气流总温为

$$T_{t0} = T_{s0} \left(1 + \frac{k-1}{2} M_a^2 \right) \quad (3)$$

进口气流总压为

$$P_{t0} = P_{s0} \left(1 + \frac{k-1}{2} M_a^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (4)$$

由经验公式确定进气道总压恢复系数为

$$\sigma_i = \begin{cases} 1, & M_a \leq 1.0 \\ 1 - 0.075 (M_a - 1)^{1.35}, & M_a > 1.0 \end{cases} \quad (5)$$

则进气道出口总温及总压分别为

$$T_{t1} = T_{t0} \quad (6)$$

$$P_{t1} = P_{s0} \cdot \sigma_i \quad (7)$$

1.3 压气机模块

通过在通用特性图上插值的方法,压气机模块可以根据压气机部件通用特性图,在已知换算转速、压比、换算流量和效率这 4 个参数中的两个的情况下,计算得到其他两个参数。

压气机折合转速为

$$N_{\text{heor}} = \frac{N_b / \sqrt{T_{t1}}}{N_{\text{hd}} / \sqrt{T_{t1d}}} \quad (8)$$

式中: T_{t1} 为压气机进口总温; N_{hd} 为压气机设计点转速; T_{t1d} 为压气机进口设计点总温。

压气机特性插值为

$$\pi_c = \frac{P_{t2}}{P_{t1}} \quad (9)$$

根据折合转速、压比 π_c 在软件 GasTurb 获得的压气机特性图中插值^[7]得出折合流量 $W_{\text{ac,cor}}$ 与效率 η_c 。利用压气机特性差值函数,通过 Simulink 中的自定义模块实现。

压气机出口流量、出口总温及功率分别为:

$$W_{a1} = W_{\text{ac,cor}} \frac{P_{t1}}{101\ 325} \sqrt{\frac{288.15}{T_{t1}}} \quad (10)$$

$$T_{t2} = T_{t1} \left(\frac{\pi_c^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_c} + 1 \right) \quad (11)$$

$$Q_c = W_{a1} \cdot C_p (T_{t2} - T_{t1}) \quad (12)$$

1.4 燃烧室模块

燃烧室模块出口流量、总温及总压计算过程如下:

$$W_b = W_{a1} + W_f \approx W_{a1} \quad (13)$$

$$T_{t3} \approx T_{t2} + \frac{H_u \cdot \eta_b \cdot W_f}{W_b \cdot C_p} \quad (14)$$

式中: H_u 为燃油低热值,取值为 42 900 kJ/kg; η_b 为燃烧效率。

$$P_{t3} = P_{t2} \cdot \sigma_b \quad (15)$$

式中 σ_b 为燃烧室总压恢复系数。

1.5 涡轮和动力涡轮模块

动力涡轮同涡轮计算方法一样,这里以核心机涡轮模块为例,动力涡轮计算不做赘述。

涡轮落压比、效率及出口总温计算分别为:

$$\pi_t = \frac{P_{t3}}{P_{t4}} \quad (16)$$

$$\eta_t = f_4(N_{\text{heor}}, \pi_t) \quad (17)$$

$$T_{t4} = T_{t3} [1 - (1 - \pi_t^{\frac{1-k'}{k'}}) \cdot \eta_t] \quad (18)$$

1.6 尾喷管模块

对于涡电发动机,动力涡轮带动发电机旋转^[8],气体大部分动能在经过动力涡轮即被消耗,因此当气体到达尾喷管时已经处于较低速度,类似于涡轴发动机^[9]。出口总温与总压如下:

$$T_{t9} = T_{t5} \quad (19)$$

$$P_{t9} = P_{t5} \cdot \sigma_{nz} \quad (20)$$

式中 σ_{nz} 为尾喷管总压恢复系数。

1.7 发电机模块

发电机由动力涡轮驱动,通过减速器与动力

涡轮轴相连,发电机负载突变主要是其电功率负载突变^[10],本文将发电机电流、电压负载等参数简化成转矩负载。发电机功率如下:

$$Q_{cl} = \frac{T_e \cdot N_3}{9\ 950} \quad (21)$$

式中 N_3 为发电机转速。

2 传统 PID 转速控制分析

2.1 涡电发动机整体模型

将建立好的发动机各部件模块进行封装,按照发动机气路进行连接,并加入容腔^[11]模块和轴转速模块,即建立好涡电发动机的总体模型。

2.2 位置式 PID 转速控制分析

本文采用的位置式 PID 控制算法^[12]规律如下:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (22)$$

将上式变形为

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (23)$$

令 $K_i = K_p / T_i$; $K_d = K_p T_d$, 则有:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (24)$$

式中: K_p 为比例参数; K_i 为积分参数; K_d 为微分参数^[13]。控制器参数的设定将以式(24)为基准,主要对 3 个控制参数 K_p 、 K_i 、 K_d 进行设定。

主动控制以发电机 3 200 r/min 为目标转速,在第 15 s 添加负载突变。采用试凑法对传统位置式 PID 控制参数进行整定^[14]。

手动整定后转速响应如图 2 所示。

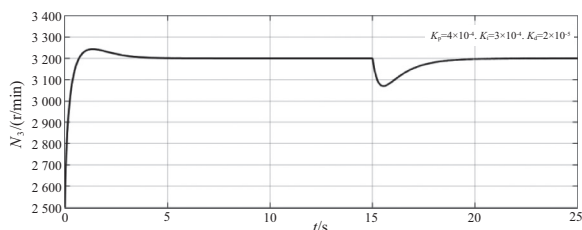


图2 位置式PID发电机转速响应图

对图2进行分析,得到在参数整定后转速响应曲线的峰值时间 $t_p = 1.35$ s, 按照 $\pm 2\%$ 标准则调节时间 $t_s = 2.85$ s, 超调量 $\sigma = 5.65\%$; 应对负载突变时, 转速最低降至 3 070 r/min, 稳定时间 $t' =$

1.63 s。

该控制算法面对负载突变扰动时控制效果一般, 转速最大下降幅度超过 100 r/min, 并且稳定至原转速所需的时间较久。

核心机部分指标变化情况如图3所示。

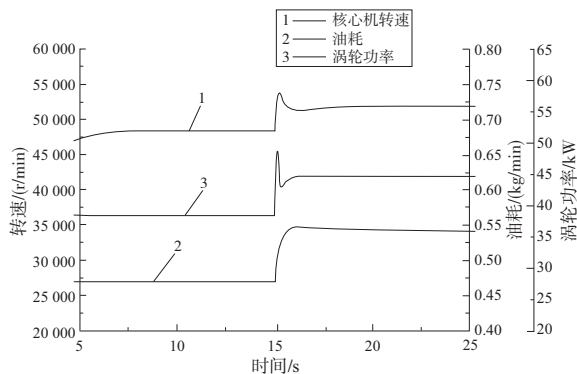


图3 位置式PID核心机部分性能指标图

可见,在发电机负载突增后,核心机需要提高转速以适应更高的功率需求,因此存在一定超转风险可能会引发核心机损坏等问题^[15],因此控制方法有进行改进的必要。

3 模糊自适应PID转速控制分析

3.1 模糊PID控制原理

与传统的PID控制算法相比,模糊PID控制算法^[16]正逐渐被人们理解并接受,并且正逐步应用于生产与生活中^[17]。

模糊PID控制器主要由模糊控制器^[18]与PID控制器两者组合而成,如图4所示。其中,模糊控制器运行过程主要包括3个模块^[19]:模糊化、模糊推理、清晰化,具体结构如图5所示。

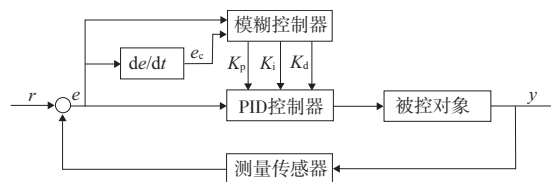


图4 模糊PID控制结构图



图5 模糊控制结构图

本文系数 K_p 、 K_i 、 K_d 三者分别采用了不同的模糊规则,具体规则如表1、表2和表3所示。

表 1 K_p 模糊规则表

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NB	NB	NM	ZO	ZO
NS	NM	NM	NM	NM	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	PM	PM	PM
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PM	PB
PB	ZO	ZO	PM	PM	PM	PB	PB

表 2 K_i 模糊规则表

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NM	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 K_d 模糊规则表

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

模糊控制器将误差 e 与误差变化率 e_c 变化区间分成 6 个部分,并分别用 N 正 P 负与 S 小 M 中 B 大组合来表示各个区间的边界;模糊化处理得到它们各自所占的隶属度大小,控制器输出 U 则可通过设计模糊规则表确定对应的隶属度清晰化后的 U 最终值^[20]。

比例系数 K_p 、积分系数 K_i 、微分系数 K_d 三者的三维分布如图 6 所示:

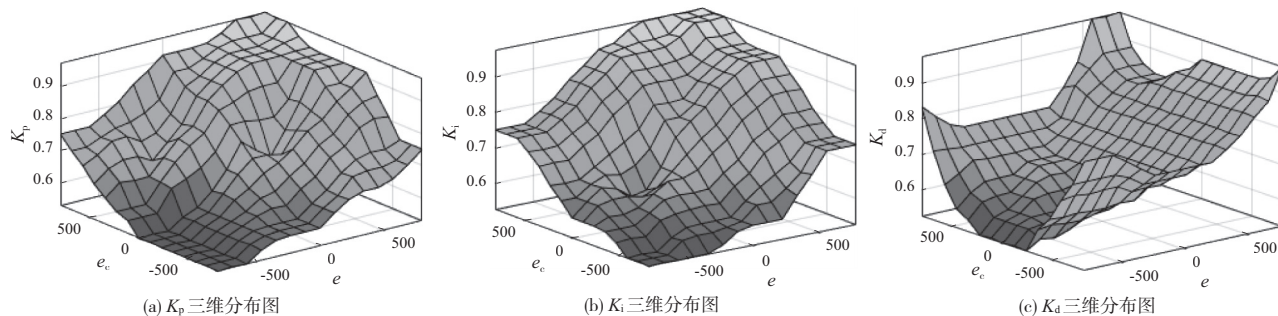


图 6 模糊控制器输出三维图

3.2 模糊 PID 转速控制分析

经过整定,设置误差 e 的论域为 $[-800, 800]$,误差变化率 e_c 的论域为 $[-1\ 066, 1\ 066]$,比例系数 K_p 、积分系数 K_i 、微分系数 K_d 三者的论域均为 $[-1, 1]$,系数增益设置为 1.25 倍,得到的转速响应如图 7 所示。

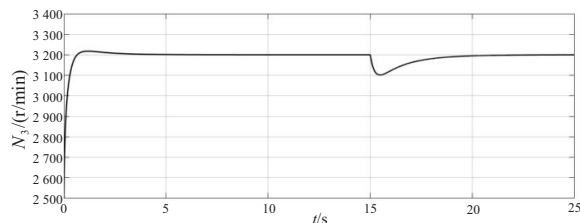


图 7 模糊 PID 转速响应图

对图 7 进行分析,得到在位置式 PID 基础上采用模糊 PID 后转速响应曲线的峰值时间 $t_p = 1.17\text{ s}$,按照 $\pm 2\%$ 标准则调节时间 $t_s = 1.66\text{ s}$,超调量 $\sigma = 2.43\%$;应对负载突变时,转速最低降至 $3\ 105\text{ r/min}$,稳定时间 $t' = 1.26\text{ s}$ 。

由图 7 可见,相比作为基础的位置式 PID,模糊 PID 控制下,发电机转速响应的峰值时间 t_p 与调节时间 t_s 分别降低了 13.3% 与 41.8%,超调量减少了 60%,转速降低幅度减少了 26.9%,稳定时间加快了 22.7%。

图 8 为模糊 PID 控制下核心机部分指标变化情况,呈现与位置式 PID 近似的变化趋势。

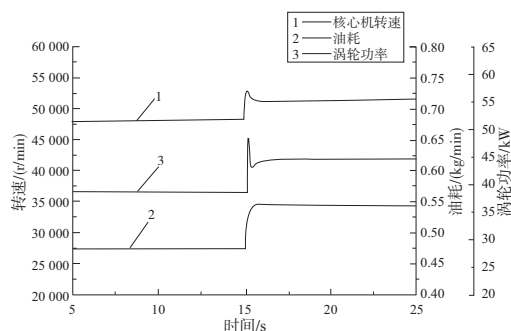


图8 模糊PID核心机部分性能指标图

将模糊PID下核心机转速与位置式PID时进行对比,如图9所示。

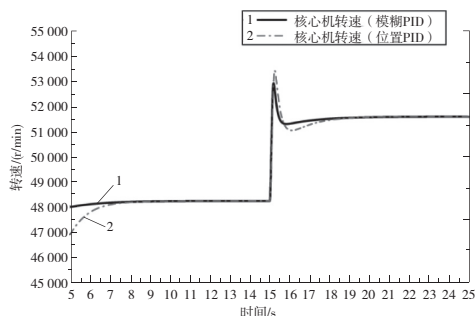


图9 模糊PID与位置式PID核心机转速突变图

由图9可见,与位置式PID相比,模糊PID可使核心机转速超调减少,更快使转速稳定,因此可同时达到降低核心机与发电机故障的风险。

尽管位置式PID参数设定可能不是最优解,但以该参数设置为基础的模糊PID控制效果所展示的改善情况足以证明模糊PID控制在发电机负载突变问题上能发挥更好的效果。

4 结语

本文基于MATLAB/Simulink仿真平台建立了涡电发动机的总体性能模型。针对发电机负载突变后转速恢复慢会产生隐患的问题,对发动机控制进行了仿真建模。建立了一种传统的位置式PID控制模型,对控制效果进行了分析。为了改善负载扰动控制效果,研究并建立了一种模糊自适应PID控制策略模型,将其控制效果和传统PID控制策略比较。结果表明:由于模糊PID具有控制参数可自动调节的功能,其不仅有更好的阶跃响应效果,在面对发电机负载突变时,也具有更好的控制效果,各项指标能够提升20%以上,故模糊PID控制对于涡电发动机是一种可行的控制方案,并且相比传统PID是一种更优解。

参考文献:

- [1] 黄兴,罗潇,李伟,等. 一种紧凑型涡电发动机、混合电推进系统、电动飞行器:CN115370478A[P].2022-11-22.
- [2] 张宇鹏,谭春青,汪建文. 微型航改燃机燃料特性影响的研究[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2020,39(2):119-127.
- [3] 向导. 航空发动机高振动与喘振的判断和处置[J]. 中国航班 2022(18):7-10.
- [4] 中国航发湖南动力机械研究所. 一种涡电一体化高速对转发电系统及飞行器推进系统:CN116613931A.[P]. 2023-08-18.
- [5] 夏飞. 基于MATLAB/SIMULINK的航空发动机建模与仿真研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2007.
- [6] 刘家兴,翟世杰,赵晨旭. 针对脉冲发电机突变负载的微型燃气轮机工作性能研究[J]. 机械制造与自动化,2022,51(1):203-206.
- [7] 鲁寨军,王甲强,张梓轩,等. 基于查表插值算法的高压CO₂管道泄漏瞬态特性数值模拟[J]. 安全与环境学报,2023,23(2):442-450.
- [8] 黄朝晖,袁奇,余承智,等. 燃气轮机动力涡轮转子动力学相似试验模型的设计方法研究[J]. 西安交通大学学报,2023,57(10):78-88.
- [9] 骆居正. 涡轴发动机/直升机综合建模及三发匹配控制研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2022.
- [10] 方鋈,张天宏. 多电航空发动机发电机负载突变时的自抗扰控制研究[J]. 推进技术, 2024, 45(8): 241-250.
- [11] 张睿. 变循环发动机建模及气动性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
- [12] 王祎晨. 增量式PID和位置式PID算法的整定比较与研究[J]. 工业控制计算机,2018,31(5):123-124.
- [13] 付兵. PID控制参数整定方法研究[J]. 设备管理与维修,2023(23):15-17.
- [14] 陈文,徐晓龙,钟晓伟,等. 基于改进遗传算法的环形倒立摆PID参数整定[J]. 计算机仿真, 2021, 38(3):165-169.
- [15] 杨子超,罗海明,余荣良. 一种直升机发动机超转停车故障分析[J]. 电子制作,2022,30(7):98-100,52.
- [16] 郝文鑫. 基于变论域自适应模糊PID的高温超导直线电机控制系统研究[D]. 北京:北京林业大学,2023.
- [17] 吕晓丹,吴次南. 改进型模糊神经网络PID控制器的设计与仿真[J]. 数据采集与处理,2021,36(2):365-373.
- [18] 杨永琳,孙晋亮,孙雪雁,等. 四旋翼无人机模糊PID控制器设计与仿真[J]. 滁州职业技术学院学报, 2023,22(4):56-59,69.
- [19] 杨昕红,刘长文. 基于MATLAB的直流无刷电机模糊PID控制设计[J]. 仪表技术与传感器, 2019(11):105-108.
- [20] 朱尧富. 模糊自整定PID控制器的设计与仿真[J]. 电子技术,2013,42(10):58-60.

收稿日期:2023-10-11