

# 小型汽油机恒转速QFT鲁棒控制

邵金菊, 魏民祥, 温卫东, 任龙杰, 孙桂芝

(南京航空航天大学能源与动力学院 南京 210016)

**【摘要】**给出了某小型无人直升机汽油发动机的恒转速鲁棒控制。根据阶跃响应,可辨识得到用于控制器设计的发动机线性区间模型。针对该模型具有不确定性以及进气-做功之间存在时变时滞等特点,采用基于定量反馈理论(QFT)的鲁棒控制方法实现发动机的恒转速控制,使其在严重的负载扰动条件下能准确地跟踪期望的发动机转速。仿真结果表明,该控制器动态响应速度快、对旋翼总距变化等干扰抑制作用强,能使发动机转速稳定在目标转速允许误差范围内,并具有一定的鲁棒性。

**关键词** 干扰抑制; 汽油发动机; 区间系统; QFT; 无人直升机

中图分类号 V233.7

文献标识码 A

## Robust Speed Control of Mini Gasoline Engine Based on QFT

SHAO Jin-ju, WEI Min-xiang, WEN Wei-dong, REN Long-jie, and SUN Gui-zhi

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

**Abstract** A robust speed control of a gasoline engine for a mini unmanned helicopter is presented. A set of linear interval plants used for controller design is developed from step responses. According to the nonlinear nature of the engine and the induction-to-power delay of the manifold filling dynamics, a robust feedback control approach is adopted to realize the speed control of engine based on quantitative feedback theory (QFT), which can provide reference speed tracking despite the presence of torque load disturbances. The off-line simulations show that the proposed engine control strategy has quick transient response and is robust to disturbances such as overall pitch variation.

**Key words** disturbance rejection; gasoline engine; interval plants; quantitative feedback theory; unmanned helicopter

小型无人直升机采用双缸二冲程风冷活塞式电喷汽油发动机,要求发动机转速在旋翼总距变化、外界阵风扰动时,能跟随期望的参考轨迹,具有快速的动态响应以及良好的干扰抑制能力。发动机转速控制系统的综合要面对对象模型不确定性问题,其不确定性主要来源于发动机的非线性、进气-做功之间的时滞、不可测量的外部扰动等。如何在发动机对象模型存在以上不确定性的情况下,使系统达到相应的性能指标,是发动机转速控制系统必须解决的问题。

目前,工程中广泛应用的发动机恒转速控制方法主要是前馈控制和反馈PID控制的联合控制<sup>[1-2]</sup>。这种控制方法需要进行大量的发动机标定,控制策略的调整具有试探性,很难实现最优。另外,一些先进控制算法如滑模控制<sup>[3]</sup>、 $\mu$ 综合方法<sup>[4]</sup>也逐步应用于发动机恒转速控制,但未能将系统模型的不确定性、干扰的大小与系统反馈量联系起来,而且没

有直接考虑吸气-做功之间的纯时间延迟。

针对发动机模型的不确定性和时滞问题,本文采用QFT型频域设计方法<sup>[5-9]</sup>来实现恒转速的鲁棒控制。其主要优点是设计过程中可以综合考虑对象的不确定范围和系统的性能指标,并能实现不确定性系统的鲁棒稳定和鲁棒性能设计要求。设计目标是在系统模型具有参数不确定性、外部阶跃扭矩扰动的情况下,利用反馈信息保证发动机转速变化稳定在给定的时域容差内。针对发动机的非线性特性,本文采用时域辨识方法,将发动机模型表示成带有时间延迟的区间系统,即系统传递函数的系数是不确定的,但其变化范围已知且有界。为验证所设计控制器的性能,本文进行了离线仿真。

### 1 控制器设计方法

系统输出关于期望工况点的变化 $Y(s, \mathbf{a})$ ,由不确定传递函数表示如下:

$$Y(s, \mathbf{a}) = G_U(s, \mathbf{a})U(s) + \gamma G_W(s, \mathbf{a})W_U(s) \quad (1)$$

式中  $\mathbf{a}$  为  $l$  维的不确定系统的参数向量, 即  $\mathbf{a} \in \Omega \subset R^l$ ;  $\gamma$  为扰动大小;  $U(s)$  为关于某标称控制量的控制输入变化量的拉氏变换;  $W_U(s)$  为外部不可测量扰动的拉氏变换, 并将其看作是单位阶跃扰动函数;  $G_U(s, \mathbf{a}) \in RH_2$  为被控对象特性;  $G_W(s, \mathbf{a}) \in RH_2$  为扰动特性;  $RH_2$  为稳定、严格有界、有理系数传递函数。输出性能指标用允许的输出变化时域容差为:

$$|y(t, \mathbf{a})| \leq \beta \quad \forall \mathbf{a} \in \Omega \quad (2)$$

式中  $y(t, \mathbf{a})$  为系统输出关于期望工况点的变化量。设计目标是针对不确定对象模型和外部阶跃扰动, 设计一个固定阶数、常系数控制器来满足式(2)给定的性能指标。

由单位负反馈可知,  $U(s) = -G_c(s)Y(s, \mathbf{a})$ , 闭环结构如图 1 所示。则扰动到系统输出  $Y(s, \mathbf{a})$  之间的闭环传递函数为:

$$\frac{Y(s, \mathbf{a})}{W_U(s)} = \frac{\gamma G_W(s, \mathbf{a})}{1 + L(s, \mathbf{a})} \quad (3)$$

式中  $L(s, \mathbf{a}) = G_c(s)G_U(s, \mathbf{a})$ ;  $G_c(s)$  为需设计的控制器。

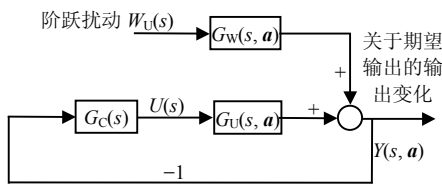


图1 闭环系统结构

根据时域和频域之间的关系<sup>[9]</sup>, 时域容差式(2)可由式(4)频域幅值不等式来实现, 即对象输出端扰动到对象输出的频率特性被限定为:

$$\left| \frac{1}{1 + L(j\omega, \mathbf{a})} \right| \leq \left| \frac{\beta}{\gamma G_W(j\omega, \mathbf{a})} \right| \quad \forall \mathbf{a}, \omega > 0 \quad (4)$$

本文利用以下回路整形方法来设计实现控制器。首先, 从参数空间选取  $m$  个参数向量, 即  $\mathbf{a}_i \in \Omega$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ 。再从频率空间中选取  $n$  个有代表性的离散频率点即  $\omega_j \in \Delta$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ 。频率集合  $\Delta$  一般包含低频、中频、高频, 其中系统的谐振频率包含在中频段。在每个频率点  $\omega = \omega_j \in \Delta$ , 计算各个选择模型的频率响应, 构造出不确定对象的对象模板。在各个频率点, 根据相应频率下的对象模板, 在幅值-相位平面中求解式(4), 构造开环回路频率响应曲线  $L(j\omega, \mathbf{a})$  的下限幅值约束, 以满足式(2)的性能指标。

另外, 为了保证闭环系统稳定, 闭环增益还需

满足式(5),  $M$  值用来保证一定的相位裕度和幅值裕度, 则有:

$$\left| \frac{L(j\omega, \mathbf{a})}{1 + L(j\omega, \mathbf{a})} \right| \leq M \quad (5)$$

最后利用传统的回路整形方法来设计控制器, 使回路传递函数  $L(j\omega, \mathbf{a})$ , 对  $\forall \omega > 0$  和  $\forall \mathbf{a} \in \Omega$  都满足下限幅值约束式(4)和稳定边界约束式(5)。

## 2 发动机模型的建立

### 2.1 发动机模型结构

对于电控汽油喷射发动机, 用于转速控制的基本控制输入量是进气量。进气量的变化可通过调节节气门开度来实现。汽油发动机的动态特性主要由进气管进气子模型、进气-做功时间延迟、发动机曲轴旋转动态特性3部分组成<sup>[10]</sup>。旋翼总距变化、外界阵风扰动等引起的发动机需求扭矩的变化作为标量扰动输入, 这一外界负载可由测功机来模拟, 其简化的模型如图2所示。发动机模型的输入量分别为节气门开度  $U(s)$  和负载扭矩扰动  $D(s)$ , 其输出量为发动机转速  $Y(s)$ 。

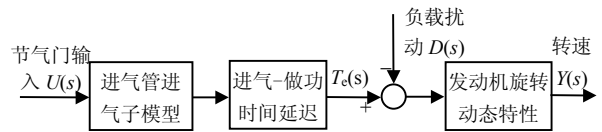


图2 简化的发动机模型

### 2.2 发动机试验台架

为了辨识得到发动机的开环传递函数, 避免进行开环高速试验的危险, 本文从发动机闭环台架结构内部, 通过机载ECU来测量节气门位置信号及发动机转速信号, 发动机试验台架结构如图3所示。

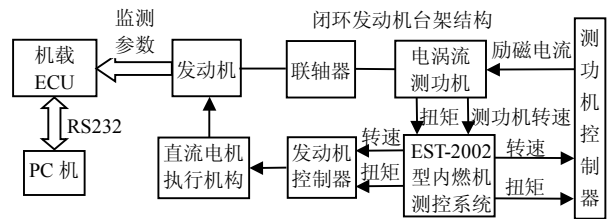


图3 发动机动态试验台架结构示意图

EST-2002型内燃机测控系统采用测功机回路和发动机油门双回路的控制技术, 具有恒位置、恒转速、恒扭矩等控制特性, 可实现发动机动态试验的重复性操作。

电涡流测功机吸收发动机的输出功率, 改变其励磁电流的大小, 可模拟发动机不同的外界负载。

试验发动机是某型直列双缸二冲程电控燃油喷射汽油机。其机载ECU可以监测发动机转速、节气

门开度、缸体温度、进气温度等参数。

PC机通过串口与发动机机载ECU进行通信, 实时采集发动机运行参数, 其采样频率为5 Hz。

### 2.3 发动机模型

发动机的动态特性随转速和负载的变化而变化, 需在多个转速/负载工况点上进行重复实验。本文在3个不同稳态工况点进行了实验, 如表1所示。在每个实验工况点, 给节气门或者负载扭矩以阶跃输入, 同时保持另外一个不变。本文节气门开度阶跃变化量为4%, 负载扭矩扰动 $T_d$ 变化量为2 N·m。

表1 3个稳态工况点

转速/r·m <sup>-1</sup>	节气门开度/(%)	负载扭矩/N·m
3 000	18	11.5
3 500	24	14.1
4 000	27	16.7

根据实验阶跃响应曲线, 辨识得到节气门到发动机转速之间传递函数 $G_U(s, \mathbf{a})$ , 其可由带有时间延迟的一阶惯性环节表示, 即:

$$G_U(s, \mathbf{a}) = \frac{K_1 e^{-\tau s}}{T_1 s + 1} \quad (6)$$

式中  $K_1$  为增益;  $T_1$  为时间常数;  $\tau = 0.6$  s 为时间延迟。3个不同工况下辨识得到的发动机模型参数如表2所示。确定 $G_U(s, \mathbf{a})$ 的这些参数的不确定程度, 使得到的线性区间系统的阶跃响应能包容实际测量得到的发动机转速的瞬态响应, 其辨识得到线性区间系统 $G_U(s, \mathbf{a})$ 的阶跃响应如图4所示。其中, 模型上限响应对应的参数分别为 $K_{1\max} = 200.20$ ,  $T_{1\max} = 3.81$ ; 模型下限响应对应的参数分别为 $K_{1\min} = 79.80$ ,  $T_{1\min} = 2.19$ 。

表2 3个不同转速和负载扭矩下发动机模型的参数

	转速/r·m <sup>-1</sup>		
	3 000	3 500	4 000
负载扭矩/N·m	11.50	14.10	16.70
$K_1$	158.75	178.50	87.50
$T_1/s$	3.60	3.70	2.20
$\tau/s$	0.70	0.60	0.40
拟合精度/(%)	86.54	89.78	88.43

由于负载扭矩到发动机转速之间扰动动态特性 $G_W(s, \mathbf{a})$ 不在反馈回路中, 不会影响闭环稳定性。所以将其表示为具有固定参数的线性传递函数。由实验数据分析可得,  $G_W(s, \mathbf{a})$ 可由无时间延迟的一

阶惯性环节表示, 即:

$$G_W(s, \mathbf{a}) = \frac{K_2}{T_2 s + 1} \quad (7)$$

式中  $K_2$  为增益;  $T_2$  为时间常数。取3个不同工况阶跃响应的平均值, 辨识得到的发动机模型参数为 $K_2 = 103.1$ ,  $T_2 = 8.1$ 。

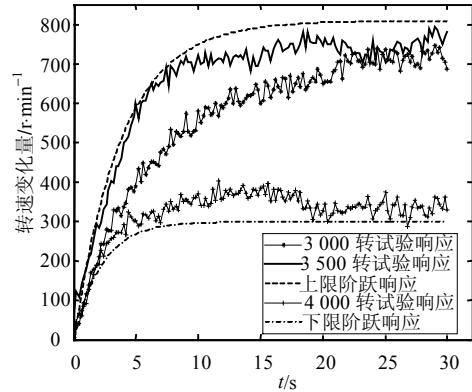


图4 辨识得到的线性区间系统 $G_U(s, \mathbf{a})$ 的阶跃响应

由此, 所建发动机线性区间模型及其相应的参数变化区间如下:

$$Y(s) = \left[ \frac{K_1 e^{-\tau s}}{T_1 s + 1} \quad \frac{K_2}{T_2 s + 1} \right] \begin{bmatrix} U(s) \\ D(s) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中  $K_1 = (1 + 0.43\varepsilon) \times 140$ ;  $T_1 = (1 + 0.27\varepsilon) \times 3$ ;  $K_2 = 103.1$ ;  $T_2 = 8.1$ ;  $\tau = 0.6$ ;  $\varepsilon \in [-1, 1]$ 。

## 3 发动机鲁棒控制器的设计

发动机工作在慢车转速3 500 r/min的反馈结构如图1所示, 其性能指标如下:  $|y(t)| \leq 100$  r/m,  $\gamma = 2$  N·m,  $M = 1.2$ 。

### 3.1 控制器设计

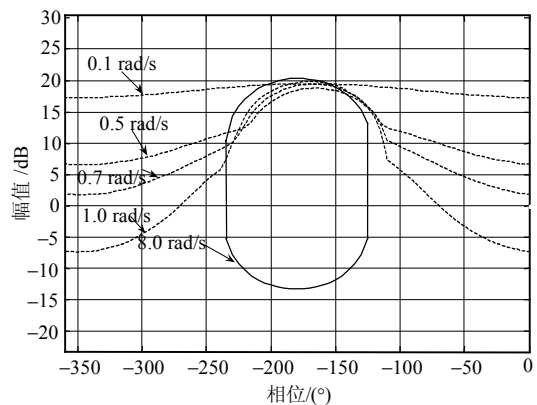


图5 复合边界约束

利用图1的闭环反馈结构和式(8)及上述性能指标来计算控制器设计所需的幅值约束。在离散频率点 $\omega = 0.1, 0.5, 0.7, 1, 8$  rad/s, 分别根据式(4)和式(5)计算下限幅值边界和鲁棒稳定边界。根据计算

出的不同性能指标边界, 确定复合边界。在增益-相位平面上, 计算出的复合边界约束如图5所示。在绘有复合边界的Nichols图上做出标称对象的开环频率响应曲线  $L(j\omega, \mathbf{a}_0)$ , 采用回路整形设计控制器, 本文取  $\mathbf{a}_0 = [K_1, T_1] = [79.8, 2.19]$ , 综合得到的控制器如下:

$$G_C(s) = \frac{0.04375(s + 0.08528)}{(s + 0.3747)(s + 13.91)(s + 0.1173)(s + 200)}$$

### 3.2 闭环性能

发动机在慢车转速3 500 r/min运转时, 加2 N·m阶跃负载扰动, 模拟旋翼总距变化时发动机外界负载扭矩变化, 得到转速瞬态响应曲线如图6所示。由图可知, 发动机转速可保持在允许容差范围内, 且没有震荡。发动机模型参数存在扰动时, 控制系统在相同阶跃扰动下的闭环响应如图7所示。由图可知, 闭环系统仍满足式(9)的性能指标要求, 即系统具有一定的鲁棒性。

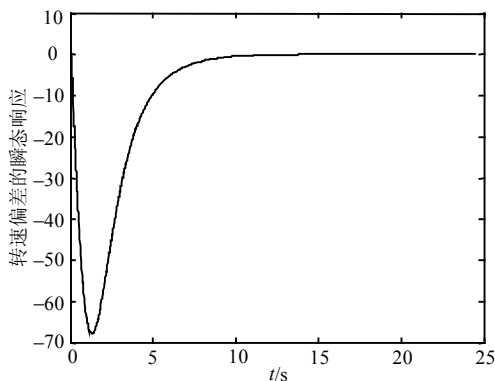


图6 2 N·m阶跃扰动下的闭环转速控制系统的时间响应

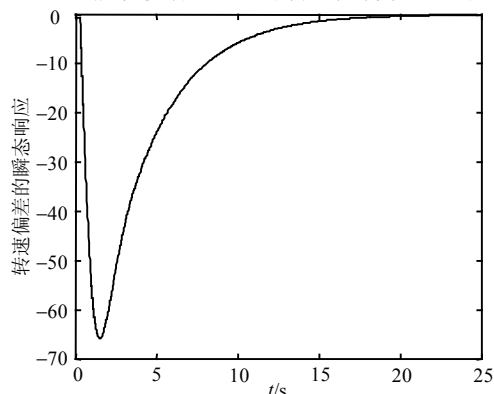


图7 模型参数存在扰动时, 2 N·m扰动下的闭环响应

## 4 结论

本文给出了负载扭矩阶跃扰动下, 某小型汽油

机恒转速鲁棒控制。所采用的QFT型控制器设计方法, 可以综合考虑对象模型参数不确定性、时滞和性能指标。

### 参 考 文 献

- [1] 杨志家, 赵光宙, 严兆大. 发动机怠速模型及前馈补偿控制[J]. 小型内燃机, 1997, 26(5): 19-23.  
YANG Zhi-jia, ZHAO Guang-zhou, YAN Zhao-da. Engine IDLE model and feedforward compensation control[J]. Small Internal Combustion Engine, 1997, 26(5): 19-23.
- [2] 彭召勇. 无人直升机飞行控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2000.  
PENG Zhao-yong. Research on flight control technology of the unmanned helicopter[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2000.
- [3] MAN Xue-lu, ROBERT N K L. Modeling, design and implementation of discrete sliding mode control for an engine IDLE speed control system[C]//Proceedings of the American Control Conference. Anchorage, AK: [s.n.], 2002: 1984-1989.
- [4] HROVAT D, BODENHEIMER B. Robust automotive IDLE speed control design based on  $\mu$ -synthesis[C]//Proceedings of the American Control Conference. San Francisco, CA: [s.n.], 1993: 1778-1783.
- [5] NATARAJ P S V, THAREWAL S. Automatic design of QFT pre-filter using interval analysis[C]//2004 IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design. [S. l.]: IEEE, 2004: 156-160.
- [6] NANDAKUMAR R, HALIKIAS G D, ZOLOTAS A C. An optimization algorithm for designing fixed structure controllers using the QFT method[C]//2002 IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design Proceedings. Glasgow, Scotland: IEEE, 2002: 157-162.
- [7] GLASS J W, FRANCKEK M A. Frequency-based nonlinear controller design for regulating systems subjected to time domain constraints[J]. Int J Robust Nonlinear Control, 2000, 10: 39-57.
- [8] BOJE E. Pre-filter design for tracking error specifications in QFT[J]. Int J Robust Nonlinear Control, 2003, 13: 637-642.
- [9] JAYASURIYA S, FRANCKEK M A. A QFT type design methodology for a parallel plant structure and its application in IDLE speed control[J]. Int J Control, 1994, 60(5): 653-670.
- [10] HROVAT D, SUN Jing. Models and control methodologies for IC engine IDLE speed control design[J]. Control Eng Practice, 1997, 5(6): 1093-1100.

编辑 黄 莘