

无人直升机发动机转速控制系统的嵌入式设计

申 星, 韩 波, 李 平, 云昭洁

(浙江大学工业控制研究所, 杭州 310027)

摘 要: 为提高无人直升机的飞行性能, 针对其飞行环境复杂、飞行状态变化快等特点, 建立发动机的数学模型, 采用总矩前馈与转速反馈的串级控制结构, 设计实现一个基于嵌入式单片机 MC9S08 的恒定转速控制系统。实验结果证明, 该系统的转速控制精度高, 系统响应速度快, 安全性及控制效果良好。

关键词: 无人直升机; 恒定转速; 发动机模型; 总矩前馈; 串级控制; 嵌入式单片机

Embedded Design for Engine Rotating Speed Control System of Unmanned Helicopter

SHEN Xing, HAN Bo, LI Ping, YUN Zhao-jie

(Industrial Control Research Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

【Abstract】 With the premise of improving the performance of unmanned helicopter, this paper designs a constant rotating speed control system for engine based on embedded microchip MC9S08, which works in the complex environment with fast state change of flight mode. By constructing engine model, the cascade control system is composed of collective feedforward block and speed feedback block. Experimental results prove that the system has advantages of high accuracy, security and excellent properties of fast response.

【Key words】 unmanned helicopter; constant rotating speed; engine model; collective feedforward; cascade control; embedded single-chip

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.03.078

1 概述

无人直升机具有独特的飞行性能及使用价值^[1], 已经成为航空领域的研究热点。无人直升机的发动机在各种飞行条件下能否保持恒定转速成为提高飞行性能的前提。当前, 对于小型航模无人直升机, 发动机转速控制可以通过设置油门-主旋翼桨矩角(以下简称总矩)曲线, 使转速在一定范围内, 但无法实现转速的精确控制, 难以满足工程应用要求。并且由于不能实时检测发动机故障, 飞行的安全性存在隐患。因此, 开发精度高、安全性好的无人直升机发动机转速控制系统具有重要的意义。本文通过分析样例 90 级无人直升机的发动机特性, 建立发动机模型, 开发了基于嵌入式单片机 MC9S08 的无人直升机发动机转速控制系统。

2 发动机转速控制系统设计

发动机转速控制系统结构如图 1 所示。

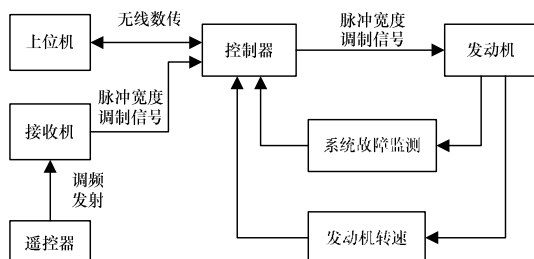


图 1 发动机转速控制系统结构

控制器接收上位机命令进行发动机转速的手动/自动控制, 同时控制器发送故障监测、转速等信号给上位机, 用以判别发动机的工作状态。在转速控制过程中, 当发动机启动或发生故障时, 转速采用遥控器手动控制; 当发动机转速达到闭环切换阈值时, 转速切入自动控制, 保证转速控制的高

精度及安全性。

无人直升机飞行过程中发动机的转速取决于油门开度及总矩, 需要构成油门-转速控制回路^[2]。当发动机恒速运转时, 操作输入、飞行状态或气流环境等的改变会引起负载变化^[3], 在仅使用反馈控制的情况下存在控制滞后, 从而导致发动机转速不稳定。因此, 本文研究的发动机转速闭环控制采用总矩前馈与转速反馈的串级控制结构, 如图 2 所示。可以看出, 建立发动机特性对象模型, 以辨识控制参数是实现发动机转速精确控制的前提。

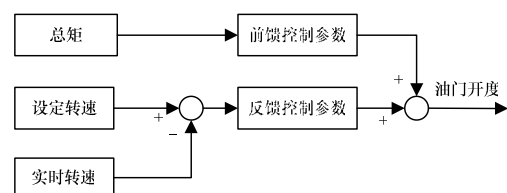


图 2 发动机转速闭环控制结构

3 发动机转速控制系统实现

3.1 发动机建模

无人直升机发动机转速是油门开度及总矩的非线性函数, 由于无人直升机在机械设计上充分保证了在舵机动态响应范围内油门开度与油门舵机输入、总矩与总矩舵机输入有相对较好的线性度, 并且发动机在飞行过程中转速基本保持恒定, 因此发动机转速的数学模型可以描述为:

基金项目: 国家“863”计划基金资助项目(2006AA10z204)

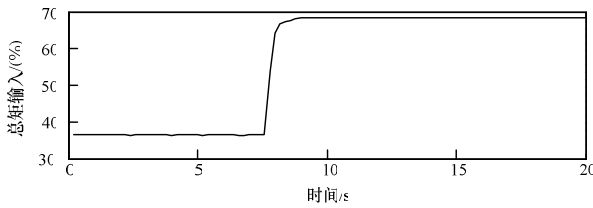
作者简介: 申 星(1987—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 无人直升机动力控制系统, 导航系统; 韩 波, 副教授、博士; 李 平, 教授、博士、博士生导师; 云昭洁, 硕士研究生

收稿日期: 2011-07-23 **E-mail:** xshen@iipc.zju.edu.cn

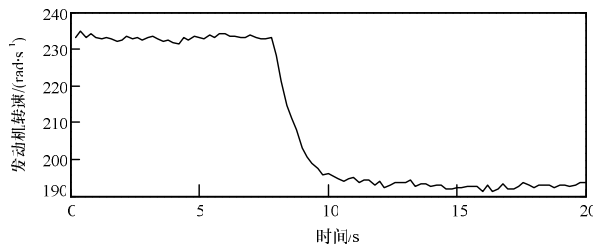
$$\Omega(s) = \frac{-K_1}{T_s + 1} u_c(s) + \frac{K_2}{T_s + 1} u_{th}(s) \quad (1)$$

其中, Ω 为发动机转速; u_c 为总矩舵机输入; u_{th} 为油门舵机输入; K_1 、 K_2 、 T_s 分别是系统模型的增益和时间系数, 在一定负载条件下可认为是常数, 因此, 本文通过系统单位阶跃响应辨识, 舵机输入信号均采用满量程的百分比表示。

样例 90 级无人直升机在总距-转速的阶跃响应实验中, 油门舵机输入保持恒定, 总距阶跃信号通过操纵遥控器发生。图 3 为单次实验中的总距-发动机转速阶跃响应曲线。多次实验计算平均值确定 $K_1 = 0.38$ 。在油门-转速阶跃响应实验中, 总距舵机输入保持恒定, 油门阶跃信号也通过操纵遥控器发生。图 4 为单次实验中的油门-发动机转速阶跃响应曲线, 多次实验计算平均值得 $K_2 = 0.71$, $T = 1.47$ s。

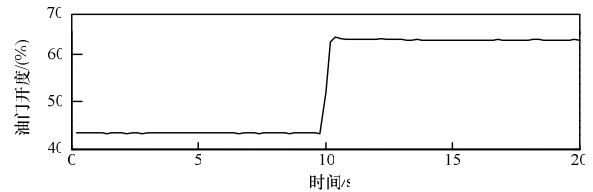


(a)总距阶跃输入曲线

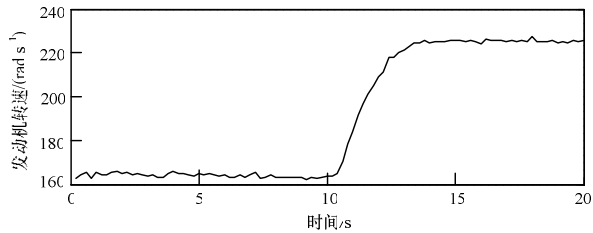


(b)发动机转速响应曲线

图 3 总距-发动机转速阶跃响应曲线



(a)油门开度阶跃输入曲线



(b)发动机转速响应曲线

图 4 油门-发动机转速阶跃响应曲线

无人直升机飞行时总距变化是对发动机恒速运转的最大扰动, 可使用静态前馈控制器补偿以减小总矩变化的影响。由于模型存在非线性及前馈补偿效果的有限性, 还需进行反馈校正。当前, 无人直升机已有成熟的发动机控制算法, 但 PID 控制因其简单有效仍被广泛使用, 而且使用本文的嵌入式单片机能够满足控制性能要求, 因此, 反馈控制器采用增量式的 PI 控制。系统整个控制器输出为:

$$\Delta u_{th}(k) = k_p \Delta e + k_i e(k) T_s + k_f \Delta u_c \quad (2)$$

其中, T_s 为控制周期; Δu_{th} 是油门增量; Δu_c 是总矩增量。PI 控制器参数在开环阶跃响应模型的基础上应用 Ziegler-Nichols 参数整定公式进行初整定^[4]; 静态前馈控制器参数也由阶跃模型计算得到估计值。最后通过实验整定控制器参数以达到最优的控制效果。样例 90 级无人直升机发动机转速控制系统的控制参数最终整定为: $k_p = 2.90$, $k_i = 2.29$, $k_f = 0.58$, $T_s = 0.02$ s。

3.2 发动机转速控制的硬件实现

无人直升机发动机转速控制系统要求油门开度控制与其他控制舵机同步, 因此, 发动机转速控制器在采集转速信号、温度信号以及舵机电压信号时还需测量油门、横滚、俯仰、尾舵、尾舵辅助、总矩等 6 路遥控器舵机信号, 并输出油门控制信号、发动机状态信号及其他 5 路舵机原始遥控信号。由于单片机 MC9S08 自带 8 路定时/脉宽调制 TPMx 接口、16 路 AD 转换通道以及 RS232 接口, 因此舵机控制信号使用 TPMx 接口配合十进制计数器 CD4017 产生^[5]; 发动机温度及舵机电压经电路处理后由 AD 采样模块读取; 发动机状态通过单片机的 RS232 接口发送至无线传输模块与上位机通信。

转速测量的精度直接影响转速控制效果。速度的测量可以使用光电管、霍尔传感器或者编码器, 在满足精度的前提下, 基于安装使用的方便以及成本考虑, 本文采用开关型数字霍尔传感器与磁珠构成了速度检测装置, 并使用电压比较电路以提高速度检测装置的抗干扰能力及驱动能力。霍尔传感器输出的数字信号输入电压比较器 LM311 的正输入端, 电压比较器负输入端连接可调节的基准电压, 然后将 LM311 输出信号连接至 TPMx 端口测量发动机转速。

发动机的工作状态监测能够保证及时发现故障。发动机在正常工作状态下, 根据发动机特性, 其温度将在一定的范围内, 因此, 以发动机温度作为判断发动机运行故障的辅助信号。本文使用铂电阻 PT100 作为温度测量传感器, PT100 的阻值在发动机测量的温度范围内与温度呈线性关系, 采用电阻分压的方法测量阻值变化产生的压差, 经 AMP04FS 放大后输入单片机的 AD 采样接口。同时, 转速控制系统在飞行过程中需频繁控制多路舵机, 当供电电压不够时会导致油门舵机控制失灵。因此, 系统需时刻检测舵机电压, 确保系统工作的稳定性。本文使用 LM158 和线性光耦 HCNR200^[6] 构成舵机电压检测电路。系统将待测用电阻分压, 为隔离前后端电路并提高负载能力, 分压信号用 LM158 电压跟随器输出, 输出信号由线性光耦 HCNR200 隔离放大后输入 AD 采样模块。

3.3 发动机转速控制的软件实现

发动机转速控制软件需实现与上位机的交互通信、转速闭环控制及紧急故障处理。

发动机启动时, 油门开度由遥控器手动控制, 并传送实时转速及发动机状态数据给上位机。当转速达到闭环切换阈值且发动机状态正常时, 上位机发送转速闭环命令。

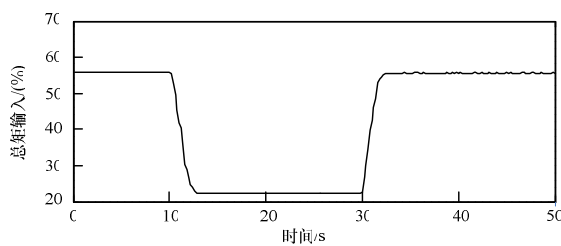
发动机转速闭环控制要求控制过程安全平滑, 控制精度高。因此, 当发动机转速低于所需转速值时, 发动机设定的转速是以当前转速为基点的斜坡函数, 从而保证发动机的转速过渡平稳, 降低转速超调。速度检测装置在发动机运转一圈产生一个脉冲信号, 信号上升沿触发 TPMx 端口中断, 在中断程序中读取定时器值, 并对定时时间为 20 ms 的溢出标志位计数, 当下一次触发时再读取定时器值, 然后计算脉宽周期。为提高速度采样的精度, 防止速度跳变, 系统采用测

量多个脉冲周期后再与上次计算周期值取平均值的方法, 最后实现发动机转速测量精度为 0.1 Hz。

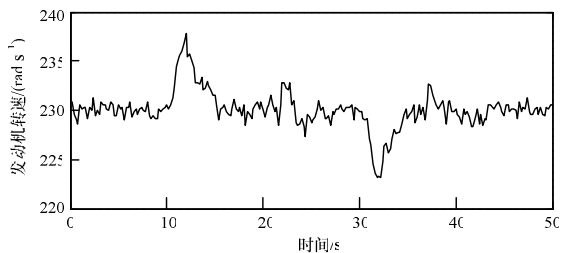
无人直升机由于飞行环境复杂, 可能导致发动机或者传感器出现故障^[7], 因此转速闭环时控制软件必须实时监测系统状态并做出反应即切入手动控制。转速闭环时, 当上位机监测到发动机状态异常或者发动机转速连续 20 次低于怠速阈值时, 上位机发送命令切入手动控制, 为防止转速控制在临界点频繁切换, 怠速阈值设定低于闭环切换阈值, 以形成滞环。

4 实验结果与分析

无人直升机飞行环境复杂, 如需要有效规避雷达威胁^[8], 因此, 需要具有良好的机动性, 要求发动机转速控制系统在负载变化时能快速响应并恢复恒定转速。本文比较了总矩输入变化时 PI 反馈控制和前馈-PI 反馈复合控制的发动机转速曲线, 分别如图 5 和图 6 所示。

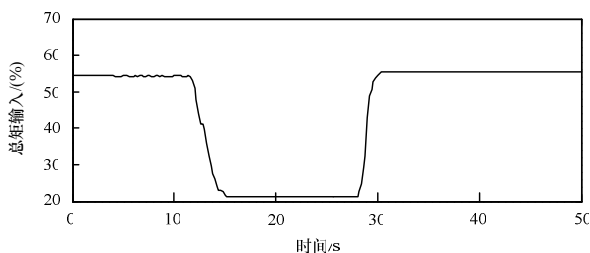


(a)总矩输入变化曲线

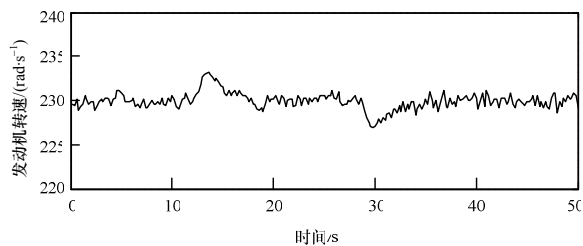


(b)发动机转速控制曲线

图 5 发动机转速 PI 反馈控制曲线



(a)总矩输入变化曲线



(b)发动机转速控制曲线

图 6 发动机转速前馈与 PI 反馈复合控制曲线

在相同的总矩变化情况下, 图 5 显示发动机转速偏离设定值最大幅度达到 7 rad/s, 而图 6 中转速的最大偏离值仅为 3 rad/s, 超调减小, 振荡周期明显变短。

图 7 是无人直升机一次完整飞行的发动机转速曲线。发动机转速手动控制至 170 rad/s 时切入闭环控制, 转速以斜坡形式达到设定值并保持恒定, 数据分析显示恒定转速的控制精度为 1 rad/s。然后在 44 s 时软件模拟发动机状态故障, 发动机转速迅速切入手动控制, 切换后的平稳转速曲线证明此时无人直升机的发动机控制是安全有效的。

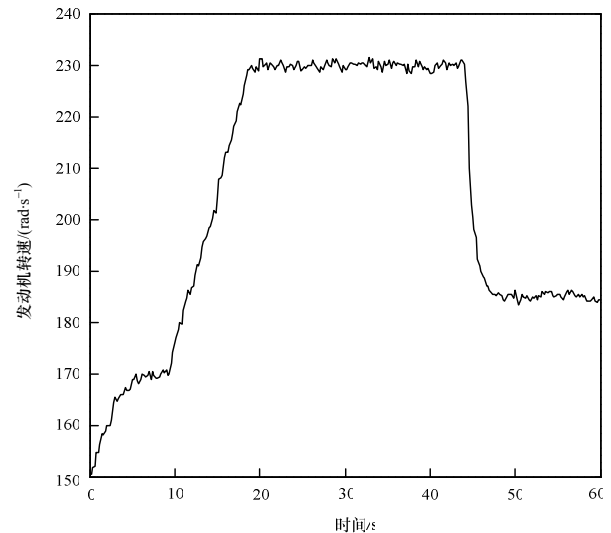


图 7 实验飞行发动机转速曲线

5 结束语

由于设计实现精度高、安全性好的发动机转速控制系统对于研发无人直升机意义重大, 因此本文利用嵌入式单片机 MC9S08 开发了一个发动机转速控制系统。通过飞行实验证明了该系统具有较高的转速控制精度, 在发动机发生故障时能够及时检测到并进行处理, 提高了无人直升机飞行的安全性, 具有较高的工程应用价值。

参考文献

- [1] 彭延辉, 徐国华. 无人驾驶直升机的技术发展及其关键技术[J]. 飞行力学, 2004, 22(1): 1-5.
- [2] Buskey G, Roberts J, Corke P, et al. Helicopter Automation Using a Low-cost Sensing System[J]. Computing & Control Engineering Journal, 2004, 15(2): 8-9.
- [3] 王小青, 黄一敏, 杨一栋, 等. 小型无人直升机发动机控制系统设计[J]. 航空动力学报, 2007, 22(12): 2139-2142.
- [4] 詹训进. 用 Ziegler-Nichols 方法拓展整定 PID 调节器的参数[J]. 韶关学院学报: 自然科学版, 2006, 27(9): 42-45.
- [5] 徐玉, 韩波, 李平. 基于 AVR 的舵机控制器设计[J]. 工业控制计算, 2004, 17(11): 38-42.
- [6] 杨小晨, 王欣. 高精度线性光栅 HCNR200/201 及其应用[J]. 仪器仪表用户, 2003, 10(5): 41-42.
- [7] 吴康. 基于 SVM 与小波变换的微型无人直升机传感器故障诊断[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [8] 章国林, 李平, 韩波, 等. 多雷达威胁环境下的无人机路径规划[J]. 计算机工程, 2011, 37(4): 206-209.

编辑 张帆