

基于力矩的发动机建模和速度跟踪控制

吴志虎¹, 刘 尚², 裴 润¹

(1 哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2 长沙理工大学 数学与计算科学学院, 湖南 长沙 410067)

摘 要: 基于发动机力矩控制的思想, 通过对发动机实际物理模型和相关脉谱图数据的分析, 建立了一个非线性的发动机模型. 在模型的基础上, 充分考虑模型参数的不确定性因素, 设计了一个反馈线性化的发动机速度控制器, 并利用积分器对系统进行增广, 以减少速度跟踪的稳态误差. 模型设计的控制器在 enD YNA 发动机模型上的仿真表明, 所设计的控制器能够达到理想的控制性能.

关键词: 发动机力矩; 脉谱图; 反馈线性化; 发动机速度; enD YNA

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007- 2683 (2009) 01- 0019- 04

Torque-based Engine Modeling and Feedback Linearization Tracking Control of Engine Speed

WU Zhi-hu¹, LIU Shang², PEI Run¹

(1. Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Mathematics and Computational Science, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: In this paper, based on the idea of engine torque control, after analyzing the practical physical model and some of the engine runtime map data, a nonlinear engine model was built. On the basis of this nonlinear model, a feedback linearization controller was designed for engine speed control, with model parameter uncertainty being sufficiently taken into account. In order to decrease the steady state errors of speed tracking, an augmented integral control approach was applied. Simulation results on the enD YNA engine model show us that suggested controller has achieved desired response performance.

Key words: engine torque; map data; feedback - linearization; engine speed; enD YNA

1 引 言

车辆的速度跟踪问题是发动机控制系统中一类很重要的问题, 需要保证在一定速度和负载范围内, 车辆能够达到要求的稳定转速, 如车辆的速度巡航控制需要发动机保持在一个稳定的转速内. 为了有效控制发动机转速, 减少开发时间, 需要对发动机系

统建立相应的控制模型. 基于发动机力矩的建模与控制是现代发动机管理系统的一个重要特征, 文献 [1 - 2] 对这种建模和控制思想进行了具体分析, 并在 Bosch 公司的 ME7 发动机管理系统上得到实现. 本文根据力矩建模的思想, 利用发动机的物理原理和脉谱图数据, 建立了一个带有不确定性的发动机非线性动力学模型, 并利用反馈线性化和积分控制方法设计了一个控制器, 使得发动机能够稳定工作

在转速范围内的任意转速附近.

2 基于力矩的发动机建模

发动机力矩的产生过程是根据气缸的进气量进行喷油,在适当的时候进行点火,气缸混合气燃烧产生热能,气体膨胀产生压力推动活塞沿气缸壁做往复运动,通过曲柄连杆机构,将热能转化成驱动力矩带动曲轴旋转.

发动机的进气由节气门控制,进气量与节气门开角的关系是一个代数关系.不考虑节气门的动力学,并假设进入进气歧管的空气质量流量 $\dot{m}_{a, in}$ 能够测量得到.根据文[3],有进气歧管动力学,即

$$\dot{p} = -\frac{V_d}{4\pi V_m} \eta_v \mu \omega + \frac{RT}{V_m} \dot{m}_{a, in} \quad (1)$$

式中: p 为进气歧管压力; V_d 为气缸的位移体积; V_m 为进气歧管容积; η_v 为发动机的容积效率; ω (rad/s) 为发动机的转速; R , T 分别为空气常数和进气歧管温度.这里容积效率可以通过查询表得到各种工况下的名域值,发动机转速以及温度和压力通过对传感器信号处理得到.根据文[4],发动机气缸进气可以表示为如下形式,即

$$\dot{m}_{a, out} = -\frac{\eta_v \mu \omega V_d}{4\pi RT} \quad (2)$$

根据文[5],混合气在最优点火角 α_{opt} 和当量空燃比 $\lambda_{sto} = 14.7$ 的条件下燃烧产生力矩 T_{opt} .实际上由于发动机爆震的存在将会导致推迟点火,以及进气测量和燃油喷射的偏差,实际的目标燃烧力矩 T_{tar} 为

$$T_{tar} = T_{opt} f(\alpha_{ign}) f(\lambda) \quad (3)$$

其中,点火角效率校正函数 $f(\alpha_{ign}) = f(\alpha_{opt} - \alpha_{rel})$, $\alpha_{ign} = \alpha_{opt} - \alpha_{rel}$ 为最优的点火角与实际的点火角 α_{rel} 之差.

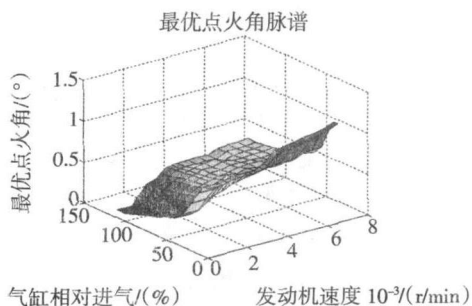


图1 发动机的最优点火角脉谱

因为发动机不是在最优点火角上燃烧,发动机的燃烧效率降低,这样实际产生的力矩通过点火角

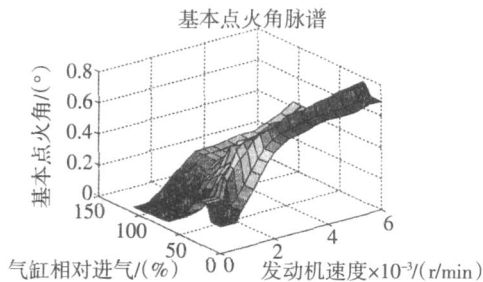


图2 发动机的基本点火角脉谱

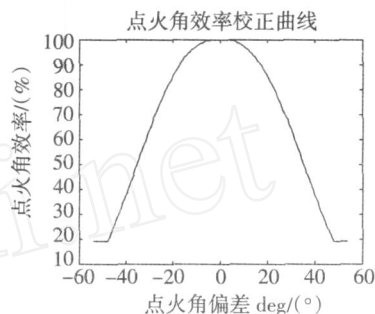


图3 点火角的效率校正曲线

效率函数来校正,但是在控制算法中,必须保证发动机的点火效率,也就是说,点火效率是在一定范围内的,即 $[0.8 \sim 1]$ 之间.本文假设空燃比都是保证在当量状态,这样,空燃比效率校正因子 $f(\lambda) = 1$.

在当量空燃比情况下,有

$$\dot{m}_f = \frac{1}{\lambda_{sto}} \dot{m}_{a, out} \quad (4)$$

$$T_{opt} = \frac{C_H \dot{m}_f}{\omega} = \frac{C_H \dot{m}_{a, out}}{\omega} = C_H \frac{\eta_v V_d}{4\pi R T} p \quad (5)$$

式中: $\dot{m}_f$ 是喷油嘴的平均喷油质量流量; C_H 是混合气燃烧热常数.发动机的旋转动力学如下式所示^[6],即

$$J\dot{\omega} = T_{tar} - T_{pump} - T_{fric} - T_{load} \quad (6)$$

式中: J 为曲轴的转动惯量; T_{pump} 是发动机的泵气力矩, $T_{fric} = f(\omega)$ 是折算后作用在曲轴上的摩擦力矩,为发动机转速的非线性函数,发动机摩擦力矩是由实验测试得出的数据通过多项式拟合得到. T_{load} 是负载力矩.

$$T_{pump} = \frac{(p_e - p) \eta_v V_d}{4\pi} \quad (7)$$

其中 p_e 是废气歧管压力.本文中只考虑在稳态情况下的曲轴旋转动力学,时滞对系统的影响可以忽略不计,结合上面的公式,可得到如下的曲轴旋转动力学方程,即

$$J\dot{\omega} = C_H f(\alpha_{ig}) \frac{V_d}{4\pi R T} \eta_v p - \frac{(p_b - p) \eta_v V_d}{4\pi} - f(\omega) - T_{load} \quad (8)$$

结合式 (1)、(8),得到了发动机的基于力矩的动力学模型. 基于上述模型,在发动机点火角效率已知的情况下,设计控制器,控制进气歧管的进气量,使得发动机能够实现在转速范围内的任意转速.

3 控制器设计与分析

3.1 非线性系统的反馈线性化

反馈线性化方法主要是采用反馈的方法,来对消系统中存在的非线性部分,将非线性系统转化成一个线性系统,来对控制器进行设计^[7]. 对如下所示的系统:

$$\dot{x} = Ax + \hat{f}(x) + \delta(x) + g(x)u \quad (9)$$

采用如下式所示的控制器,即

$$u = \frac{-\hat{f}(x) + Kx}{g(x)} \quad (10)$$

式中, $g(x) \neq 0$, 就能使原系统转化为

$$\dot{x} = A_K x + \delta(x) \quad (11)$$

这里 $A_K = A + K$, $\delta(x)$ 是系统的不确定部分,可以看作一个干扰项.

定理 1 对系统 (9), 如果存在如式 (10) 的控制 u , 满足 $A_K P + P A_K = -I$, 且矩阵 $P > 0$ 正定, 不确定部分满足 $\|\delta(x)\| \leq k \|x\| + \varepsilon$, k, ε 为大于零的实数, 则状态 x 将会终端全局有界.

证明: 令 $V(x) = x^T P x$,

则 $\dot{V} = x^T (P A + A^T P) x + 2x^T P \delta(x)$

如果 $\|\delta(x)\| \leq k \|x\| + \varepsilon$, 可以得到:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\|x\|_2^2 + 2k \|P\|_2 \|x\|_2^2 + 2\varepsilon \|P\|_2 \times \\ & \|x\|_2 \leq - (1 - \theta_1) \|x\|_2^2 - \theta_1 \|x\|_2^2 + \\ & 2k \|P\|_2 \|x\|_2^2 + 2\varepsilon \|P\|_2 \|x\|_2 \end{aligned} \quad (12)$$

这里 $\theta_1 \in (0, 1)$, 且满足 $k \leq \theta_1 / (2 \|P\|_2)$

这样, 从上式可以得到

$$\dot{V} \leq - (1 - \theta_1) \|x\|_2^2 + 2\varepsilon \|P\|_2 \|x\|_2 \quad (13)$$

$$\dot{V} \leq - (1 - \theta_1) (1 - \theta_2) \|x\|_2^2,$$

$$\forall \|x\|_2 \geq \frac{2\varepsilon \|P\|_2}{(1 - \theta_1)\theta_2} = c_0 \varepsilon \quad (14)$$

这里, $\theta_2 \in (0, 1)$, 这样, 当 $\|x\|_2 \geq c_0 \varepsilon$ 时, $\dot{V} < 0$, 保证终端状态有界, 得证. K 的选取将保证 A_K 的所有特征值都位于复平面的左半平面, 在没有不确定部分存在的情况下, 系统是渐近稳定的.

3.2 发动机速度控制器设计

为了达到稳定的速度跟踪, 这里考虑一个发动机速度的误差模型, 这样, 就能够将速度的跟踪问题转化成一个镇定问题. 一般情况下, 速度要求是一个恒定转速, 可以假设稳态情况下需要的发动机输出转速为 ω_0 . 这样, 发动机实际转速与要求转速之差为 $e = \omega - \omega_0$, 在前面的控制器设计中, 考虑状态反馈增益 K 使得系统稳定, 在设计过程中, 如果状态取 $(e, \dot{e})$, 由于存在着模型的不确定性, 有可能存在比较大的稳态误差, 这里, 考虑积分控制器设计, 也就是说, 增广系统, 增加一个系统状态, 误差的积分 $\sigma = \int_0^t (\tau) d\tau$ 作为系统的一个状态, 减少稳态误差. 考虑发动机动力学模型, 令

$$x_1 = \int_0^t (\omega - \omega_0) d\tau, x_2 = y - \omega_0 = \omega - \omega_0$$

$$x_3 = \dot{y} - \dot{\omega}_0 = \dot{\omega}$$

则原系统可以变为

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = x_3$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 = \dot{\omega} = & \frac{1}{J} [C_H f(\alpha_{ig}) \frac{V_d}{4\pi R T} \eta_v + \eta_v \frac{V_d}{4\pi} \times \\ & \left(\frac{RT}{V_m} u - \frac{V_d}{4\pi T V_m} \eta_v p \right) - \frac{1}{J} f'(\omega) \end{aligned} \quad (15)$$

这里 $\delta(x)$ 主要考虑建模过程中的燃烧和点火参数不确定性带来的影响. 这里的参数和数据如表 1.

表 1 发动机模型的名域参数

容积效率 η_v	发动机位移 体积 V_d / m^3	进气歧管温 度 T_m / K	空气常数 R	空燃比效率 $f(\lambda)$	曲轴的转动惯 量 $J / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	C_H	环境压力 / kPa	环境温度 / K	进气歧管容 积 V_m / m^3
0.7	0.002	293	287	1	0.4	1 846 527	98	293	0.005 5

这里: $T_{\text{fric}} = -0.000 1\omega^2 - 0.010 2\omega - 11.207 3$, 利用实验数据拟合得到. 采用如式 (16) 的控制器:

$$u = \frac{V_m}{RT} \left[\frac{V_d}{4\pi V_m} \eta_v p \omega + \frac{f'(\omega) + JKx}{C_H \hat{f}(\alpha_{ig}) \frac{V_d \eta_v}{4\pi RT} + \frac{V_d}{4\pi} \eta_v} \right] \quad (16)$$

则原系统可变为式 (11) 所描述的系统.

这里 $\eta_v = \eta_v + \Delta\eta_v$, $f(\alpha_{ig}) = \hat{f}(\alpha_{ig}) + \Delta f(\alpha_{ig})$, 且从得到的数据来看, 可以取 $\eta_v = 0.675$, $\Delta\eta_v = \pm$

$$0.175, \hat{f}(\alpha_{ig}) = 0.8, \Delta f(\alpha_{ig}) = \pm 0.2$$

$$\text{令 } a_0 = C_H \hat{f}(\alpha_{ig}) \frac{V_d \eta_v}{4\pi R T} + \frac{V_d}{4\pi} \eta_v$$

$$a_1 = c_H \frac{V_d}{4\pi R T} (\eta_v \Delta f(\alpha_{ig}) + \hat{f}(\alpha_{ig}) \Delta \eta_v) + \Delta \eta_v \frac{V_d}{4\pi}$$

$$\text{得到} \quad \ddot{\omega} = Kx + \delta(x) \quad (17)$$

$$\text{其中,} \quad \delta(x) = \frac{a_1}{a_0} Kx + \left(\frac{a_1 - 1}{a_0} \frac{1}{J} f'(\omega) + \frac{(a_0 + a_1) V_d}{J 4\pi V_m} \mu \omega \Delta \eta_v \right) \quad (18)$$

选择反馈控制器增益矩阵 K 使得 A_K 的特征值实部都是负值.

$K = [k_1 \ k_2 \ k_3] = [-30 \ -200 \ -9]$, 使得系统矩阵

$$A_K = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -30 & -200 & -9 \end{bmatrix} \text{ 满足要求.}$$

4 仿真结果

根据上面的控制器设计方法,设计控制器.

如图 4 所示, enDYNA 模型主要由四个模块组成,分别是发动机 (Engine)、动力传动部分 (MOTDN)、基本冷却系统 (Cooling Basic) 和控制 ECU 模块 (ECU EMULATOR). enDYNA 是基于物理模型和静态脉谱图构成一个完整的发动机模型,为发动机的控制系统开发提供一个实时的仿真模型,可以在 Matlab 环境下进行数字仿真,也可以下载到 dSPACE 系统里面与要开发的发动机控制 ECU 板构成半实物仿真系统,进行实时仿真,极大地方便了发动机控制算法和控制 ECU 版的开发. 本文针对一个四缸、火花点火汽油发动机模型进行速度控制器设计和仿真. 由于在模型中,控制变量是节气门处的空气质量流率,而实际的执行器是节气门开角,节气门开角与质量空气流之间是一个非线性的关系,这里的做法是利用逆推法,根据需要的空气流率及逆模型,得到相应的节气门开角,并没有考虑节气门的动力学特性.

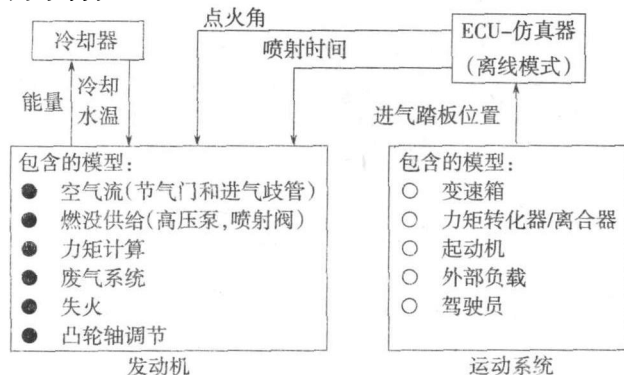


图 4 enDYNA 发动机模型结构

仿真曲线如图 5~图 7 所示,分别要求发动机跟踪不同的转速,并且作用在曲轴上的负载力矩是经常变化的,从仿真结果来看,设计的控制器能够稳定的跟踪要求的发动机转速,从而说明了设计的控制器是可行的.

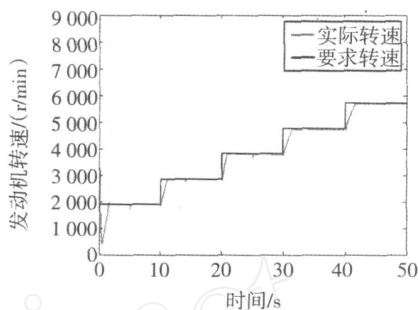


图 5 发动机转速控制曲线

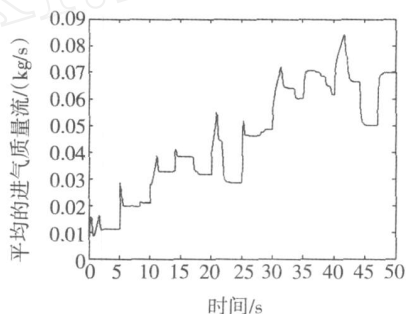


图 6 发动机节气门空气质量流

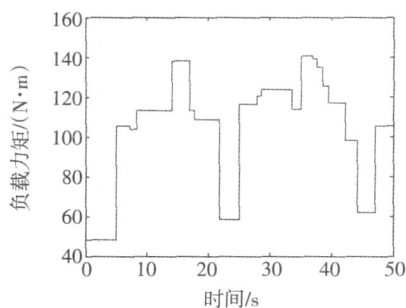


图 7 曲轴上的负载力矩

5 结 语

基于发动机物理模型和实际数据建立了一个非线性发动机速度控制模型,并设计了一个带有积分器的反馈线性化控制器,利用 enDYNA 发动机模型对控制器进行仿真. 仿真结果表明,在控制器作用下,发动机在各种负载情况下,能够保持发动机转速在要求的转速附近.

(下转第 27 页)

中的驱动引擎 `gal_engine` 和 `ial_engine` 设置为 `qvfb`, 再将其中 `qvfb` 的 `defaultmode` 设置为合适的显示模式. 然后把 `qvfb` 加到可执行路径中去, 执行 `vi bashrc` 命令, 在 `bashrc` 最后面加上 `export PATH = /usr/local/arm/2.95.3/bin : $ PATH`, 保存退出后用 `source bashrc` 命令执行一下即可.

在 `X Window` 中, 打开一个终端仿真程序, 执行 `qvfb &` 命令. 在 `qvfb` 中选中 `File Configure`, 将 `qvfb` 设置成嵌入式开发系统的液晶屏的大小. 合理设置 `MiniGUI` 的配置文件后, 接着就可以运行 `MiniGUI` 应用程序了.

执行应用程序顺利的话, 屏幕上可以看到程序的运行界面. 至此, `MiniGUI` 已经成功移植到目标系统上. 此后, 我们可以根据需求, 继续修改 `MiniGUI` 库函数及各种资源, 并且编写自己的应用程序, 使图形用户界面更加完善.

7 结 语

随着嵌入式产品应用领域的日益增长, 开发出

优秀的人机交互界面, 是嵌入式发展的趋势, 拥有广阔的市场前景. `MiniGUI` 可以稳定可靠的运行在 `Linux` 系统下, 通过上述具体的移植和后续的 `MiniGUI` 下嵌入式软件的开发过程, 能快速构建一个嵌入式可视化软件系统, 相信这种嵌入式系统将会得到越来越多的应用.

参 考 文 献:

- [1] 李善平, 刘文峰, 王焕龙, 等. `Linux` 与嵌入式系统 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [2] 祁献鹏, 郭玉东. `MiniGUI` - 面向嵌入式系统的 `GUI` 系统 [J]. 信息工程大学学报, 2001, 2(3): 8 - 10.
- [3] 霍拉鲍夫. 嵌入式 `Linux` - 硬件、软件与接口 [M]. 陈雷, 钟书毅, 译. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [4] 方宁, 马忠梅. `MiniGUI` 在 `AT91RM9200` 开发板上的移植 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2004(8): 75 - 77.

(编辑: 王 萍)

(上接第 22 页)

参 考 文 献:

- [1] GERHARDT H, HÖNNIGER H. A New Approach to Functional and Software Structure for Engine Management Systems BOSCH ME7 [J]. SAE Paper No. 980801.
- [2] HENTZ N, MEWS M, STIER G. An Approach to Torque - Based Engine Management Systems [J]. SAE Paper, No. 2001 - 01 - 0269.
- [3] HENDRICKS E, CHEVALIER A J M. Modelling of the Intake Manifold Filling Dynamics [J]. SAE Paper No. 1996 - 0037.
- [4] HEYWOOD J B. Internal Combustion Engine Fundamentals [M]. New York: McGraw - Hill, 1988.
- [5] BOHN C, BÖHME T, STAATE A. A Nonlinear Model for Design and Simulation of Automotive Idle Speed Control Strategies [C] // Minnesota, USA: Proceedings of the 2006 American Control Conference Minneapolis, 2006.
- [6] L VSHIZ M, KAO M, WILL A. Validation and Calibration Process of Powertrain Model for Engine Torque Control Development [J]. SAE Paper, NO. 2004 - 01 - 0902.
- [7] KHALIL H K. Nonlinear Systems [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2002.

(编辑: 付长缨)