

Điều khiển lượng nhiên liệu cung cấp cho động cơ xăng áp dụng phương pháp điều khiển tối ưu LQR

-Control of fuel supply for gasoline engine application optimization control method LQR

NCS. ĐÀO QUANG KHANH
PGS.TS. LƯU KIM THÀNH; PGS.TS. TRẦN ANH DŨNG
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Tóm tắt

Bài báo đề cập tới vấn đề nghiên cứu mô hình toán, khảo sát sự phụ thuộc của góc bướm ga với lượng nhiên liệu cung cấp cho động cơ xăng. Trên cơ sở phương pháp điều khiển tối ưu LQR thiết kế bộ điều khiển phản hồi trạng thái nhằm mục tiêu điều khiển lượng nhiên liệu cung cấp cho động cơ theo giá trị tốc độ đặt.

Abstract

This paper studies the problem granted to the engine model, examines the throttle angle dependence of the amount of fuel supplied to the gasoline engine. Based on the method of optimal control design LQR controller for state feedback control to target the fuel supply to the engine speed set value.

Key words: Control of Fuel supply, LQR (Linear Quadratic Regulator), state space feedback controller, SI (spark-ignition), FI (Fuel Injection).

1. Đặt vấn đề

- Một mô hình động cơ có thể xây dựng bằng cách mô phỏng một số các hệ thống nhỏ riêng biệt như đường hút, đường xả, piston-xi lanh, hệ turbo tăng áp,... Trong đó mối quan hệ tổng quát cho lưu lượng của mô hình dòng chảy theo [4] mối quan hệ đó được mô tả như sau [4]:

$$\dot{m}_\alpha = \frac{P_{atm}}{\sqrt{RT_{atm}}} A_{eff}(\alpha) \Psi\left(\frac{P_{im}}{P_{atm}}\right) \quad (1)$$

Diện tích mặt cắt ngang hiệu quả nhất của van tiết lưu $A_{eff}(\alpha)$:

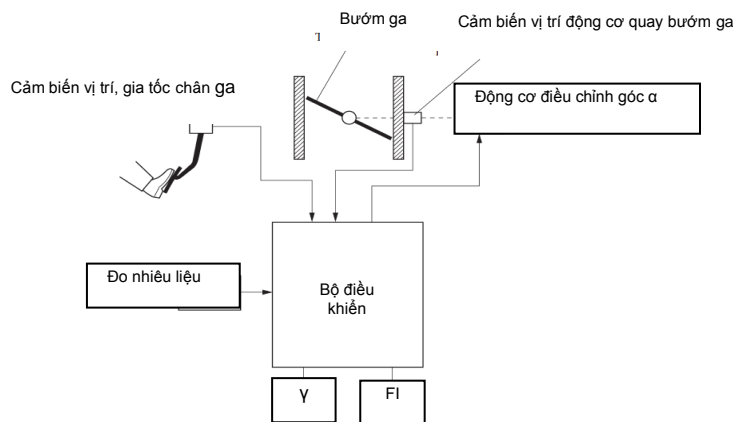
$$A_{eff}(\alpha) = C_{dh} A(\alpha) = C_{dh} \left(1 - \frac{\cos(\alpha + \alpha_{ci})}{\cos(\alpha_{ci})}\right) \quad (2)$$

- Hệ thống điều chỉnh trùng pha trục cam γ hoạt động bởi áp lực dầu qua bộ điều khiển van dầu, thiết bị có thể được định vị trong từng vị trí γ (trong khoảng $\gamma = -40^\circ$ đến $+40^\circ$) với tốc độ tối đa $200^\circ/s$ theo góc φ . Theo [3] γ được tính theo công thức sau:

$$\frac{d\Delta\varphi}{dt} = \gamma \dot{\varphi} \sin \varphi$$

(3)

$$\gamma = (200^\circ/s) \frac{2\pi}{180^\circ} \frac{360^\circ}{\omega_e} = \frac{2513}{\omega_e}$$



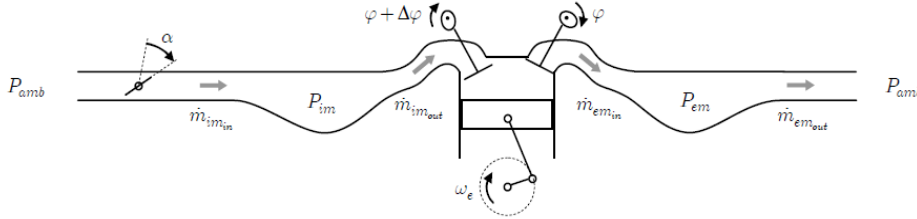
Hình 1. Hệ thống điều khiển phối hợp góc α , γ

- Vấn đề đặt ra là phải điều chỉnh góc bướm ga α và góc trùng pha trục cam γ phù hợp với thời gian tăng, giảm tốc độ động cơ nhằm mục tiêu giảm thiểu lượng tiêu hao nhiên liệu. Nhiệm vụ của người điều khiển lúc này là đặt cho động cơ đột trong một tốc độ bằng chân ga, bộ điều khiển sẽ tự động phối hợp góc α và γ theo tốc độ đặt (hình 1).

2. Nội dung

2.1. Mô hình toán mô tả động cơ xăng

Xét một động cơ bốn kỳ sử dụng phương pháp đánh lửa đốt cháy nhiên liệu SI, không xét đến quá trình làm mát, turbo tăng áp mà chỉ khảo sát động cơ theo hai mặt: Đường nhiên liệu vào xi lanh và đường khí thải từ xi lanh ra ngoài. Hình 2 thể hiện mô hình dòng chảy phân phối khí trong động cơ đốt trong [3].



Hình 2. Mô hình dòng chảy phân phối khí trong động cơ đốt trong

Trong đó các ký hiệu hình 2 như sau: α : Góc mở chân ga, [rad], φ : Góc mở sớm trên trục cam, [rad], P_{amb} : Áp suất môi trường xung quanh, [Pa], P_{im} : Áp suất đường hút, [Pa], P_{em} : Áp suất đường xả, [Pa], $m_{im,in}$: Lượng nhiên liệu vào ống nạp, [mm³], $m_{im,out}$: Lượng nhiên liệu ra khỏi ống nạp [mm³], $m_{em,in}$: Lượng nhiên liệu vào ống nạp [mm³], $m_{em,out}$: Lượng nhiên liệu ra khỏi ống nạp [mm³], ω_e tốc độ góc của động cơ [rad/s], τ_e mô men trên trục động cơ [Nm], τ_l mô men cản [Nm].

Theo [3] ta có hệ phương trình vi phân đầy đủ như sau:

$$\left. \begin{aligned} \dot{P}_{im}(t) &= \left(\frac{\lambda RT_{im,o}}{V_{im}} \right) \left[C_{dth} A_{th} \left(1 - \frac{\cos(\alpha + \alpha_{cl})}{\cos(\alpha_{cl})} \right) \frac{P_{amb}}{\sqrt{RT_{amb}}} 0.685 \left(1 - \exp\left(9 \frac{P_{im}}{P_{amb}} - 9 \right) \right) - \eta_{vol}(\gamma) \frac{P_{im} V_d}{RT_{im,o}} \frac{\omega_e n_{cyl}}{4\pi} \right] \\ \dot{P}_{em}(t) &= \left(\frac{\lambda RT_{em,o}}{V_{em}} \right) \left[\eta_{vol}(\gamma) \frac{P_{im} V_d}{RT_{im,o}} \frac{\omega_e n_{cyl}}{4\pi} \left(1 + \frac{1}{\lambda \left(\frac{A}{F} \right)_s} \right) - C_{dexh} A_{exh} \frac{P_{em}}{\sqrt{RT_{em,o}}} 0.685 \left(1 - \exp\left(9 \frac{P_{im}}{P_{amb}} - 9 \right) \right) \right] \\ \dot{\omega}_e(t) &= \frac{1}{J_e} \left[\eta_i(P_{im}, \omega_e) \frac{1}{\mu \left(\frac{A}{F} \right)_s} \frac{H_l}{\omega_e} \left(\eta_{vol}(\gamma) \frac{P_{im} V_d}{RT_{im,o}} \frac{\omega_e n_{cyl}}{4\pi} \left(1 + \frac{1}{\lambda \left(\frac{A}{F} \right)_s} \right) \right) - \frac{V_d n_{cyl}}{4\pi} (P_{em} - P_{im} + fmep) - \tau_l \right] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Khảo sát động cơ xăng Ford 2.0L với các thông số được liệt kê trong bảng 1, thay thế các thông số và tuyến tính hóa các phương trình (4), tìm ra được các ma trận như sau [3]:

$$A = \begin{pmatrix} -12.62 & 0 & -1965 \\ 27.66 & -2330 & 4319 \\ 0.02249 & -0.002113 & 0.2317 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 83283 & 7510 \\ 0 & -16512 \\ 0 & -11.99 \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Bảng 1. Thông số của động cơ đốt trong hãng Ford 2.0L

Ký hiệu	Ý nghĩa	Giá trị	Ký hiệu	Ý nghĩa	Giá trị
$\left(\frac{A}{F} \right)_s$	Tỷ lệ hòa khí	14,64	T_{amb}	Nhiệt độ không khí môi trường	288,15 [K]
A_{exh}	Tiết diện đường xả	0,00385 [m ²]	T_{im}	Nhiệt độ không khí trong đường hút	288,15 [K]
A_{th}	Tiết diện đường hút	0,00385 [m ²]	T_{em}	Nhiệt độ không khí trong đường xả	593 [K]
C_{dth}	Hằng số đường hút	0,85	V_{im}	Thể tích đường hút	0,004 [m ³]
C_{dexh}	Hằng số đường xả	0,7	V_{em}	Thể tích đường xả	0,004 [m ³]
H_l	Nhiệt trị thấp	44,106 [J/kg]	V_d	Thể tích buồng đốt	0,0006638 [m ³]
J_e	Mô men quán tính	0,15 [kg m ²]	α_{cl}	Góc mở α trung bình	7 ⁰
η_{cyl}	Số xi lanh	6	η_i	Hiệu suất chỉ thị	$f(P_{im}, \omega_e)$
P_{amb}	Áp suất không khí	101325 [Pa]	η_{vol}	Hàm thể tích hiệu quả	$f(\gamma)$
R	Hằng số khí	287,327	λ	Tỷ lệ nhiệt dung	1.4

		[J/kgK]		
--	--	---------	--	--

2.2. Phương pháp điều khiển tối ưu LQR (Linear Quadratic Regulator)

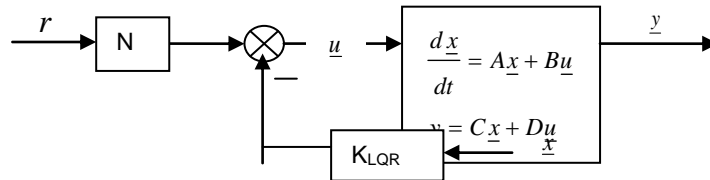
Bài toán điều khiển tối ưu LQR thiết kế bộ điều khiển trạng thái dựa trên phương trình trạng thái quen thuộc của đối tượng ở dạng phương trình Cauchy [1]:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A \cdot x + B \cdot u \\ y &= C \cdot x + D \cdot u\end{aligned}\quad (5)$$

và điều kiện cực tiểu hàm chỉ tiêu chất lượng dạng toàn phương:

$$J = 0.5 \int_0^{\infty} (\underline{x}^T Q \underline{x} + \underline{u}^T R \underline{u}) dt \rightarrow \min \quad (6)$$

Trong đó \underline{x} - Véc tơ trạng thái ($n \times 1$); \underline{u} - Véc tơ điều khiển ($m \times 1$); A, B, C, D - Các ma trận hệ số không đổi; Q, R - Các ma trận đường chéo của các trọng số được đưa ra bởi người thiết kế.



Hình 3. Cấu trúc bộ điều khiển LQR

Luật điều khiển $\underline{u} = -K_{lqr} \underline{x}$ (coi tín hiệu đặt bằng không), trong đó $K_{lqr} = R^{-1} B^T P$ - Ma trận các hệ số phản hồi, được xác định sau khi giải phương trình Riccati theo ma trận vuông P.

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1} B^T P = 0 \quad (7)$$

Hệ kín mới có phương trình trạng thái như sau [5]:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= (A - BK_{lqr}) x + BNr \\ y &= Cx + DNr\end{aligned}\quad (8)$$

Tương đương:
$$G(s) = \left[C \left(sI - (A - BK_{lqr}) \right)^{-1} B + D \right] N \quad (9)$$

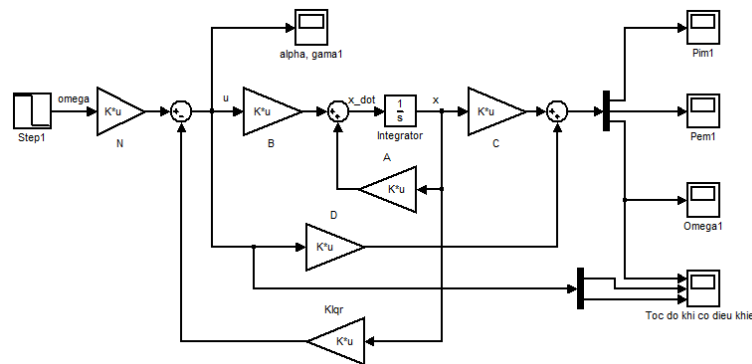
Tìm ma trận tiền xử lý N sao cho hệ kín bằng 1 tại tần số $s = 0$ [5]:

$$G(0) = - \left[C \left((A - BK_{lqr}) \right)^{-1} B + D \right] N = 1 \quad (10)$$

$$\Leftrightarrow N = - \left[C \left((A - BK_{lqr}) \right)^{-1} B + D \right]^{-1} \quad (11)$$

2.3. Tổng hợp bộ điều khiển, kết quả mô phỏng

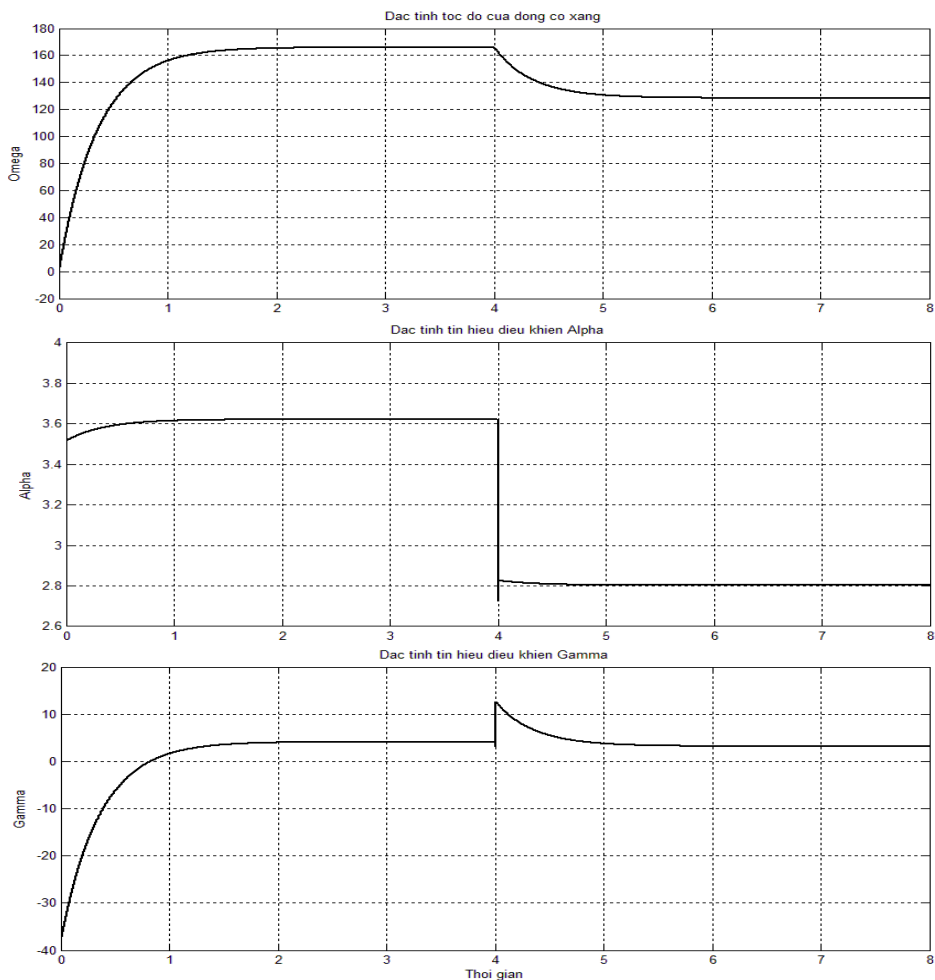
Từ phương trình phi tuyến của động cơ xăng (4), sau khi đã tuyến tính hóa ta thu được các ma trận A, B, C, D, hệ thống áp dụng điều khiển LQR cho động cơ xăng có cấu trúc simulink [2] như hình 4.



Hình 4. Cấu trúc hệ thống áp dụng điều khiển LQR

Trong đó K_{lqr} - Ma trận phản hồi trạng thái cần tìm, N - Ma trận bù tín hiệu đặt, $u = [\alpha, \gamma]^T$, $x = [P_{im}, P_{em}, \omega_e]^T$, $y = [\omega_e]$. Việc tìm ma trận K_{lqr} tổng hợp theo (7), N được tổng hợp theo (11) như trên cho kết quả hệ số ma

trận K_{lqr} như sau: $K_{lqr}=[0,0008 \ 0,0001 \ -0,0006; 0,0933 \ -0,0255 \ -0,2483]$, $N=[0,0236 \ 0; 0 \ -2,8311]$; với các ma trận trọng lượng $Q = [1 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 1]$, $R = [150000 \ 0; 0 \ 100]$.



Hình 5. Đặc tính tốc độ động cơ xăng khi đặt $\omega_1=168$ [rad/s] (tại $t = 0$ s), $\omega_2 = 128$ [rad/s] (tại $t = 4$ s) và đặc tính tín hiệu điều khiển α , γ .

3. Kết luận

Bài toán tự động điều chỉnh góc bướm ga α , góc trùng pha trục cam γ bằng phương pháp điều khiển tối ưu LQR đã đáp ứng được yêu cầu chất lượng đặt ra của bài toán: tối ưu góc α và γ từ đó tối ưu lượng nhiên liệu cung cấp cho động cơ xăng, cho chất lượng động học tốt. Bài toán cho phép hiệu chỉnh bộ điều khiển K tùy thuộc vào yêu cầu chất lượng đặt ra của hệ thống bằng cách thay đổi các phần tử trên đường chéo chính của ma trận trọng lượng Q và R.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Trần Anh Dũng, *Điều khiển hiện đại lý thuyết và ứng dụng*, Nhà xuất bản Giao thông vận tải, năm 2013.
- [2] Nguyễn Phùng Quang, *Matlab & Simulink dành cho kỹ sư điều khiển tự động*, NXB Khoa học và Kỹ thuật Hà Nội năm 2005.
- [3] J.P.R. Jongeneel, *Input redundant internal combustion engine with linear quadratic Gaussian control and dynamic control allocation*, 2009.
- [4] Pushkaraj A. Panse, *Dynamic Modeling and Control of Port-Fuel Injection Engines*, 2011.
- [5] Julio H. Braslavsky, *Control Systems Design - Introduction to Optimal Control and Estimation*, 2008.