

Prediktívne riadenie chemického reaktora

Anna Vasičkaninová, Monika Bakošová, Ján Dvoran

Väčšina procesov chemickej technológie sú procesy zložité, nelineárne, s dopravným oneskorením. Ich riadenie klasickým PID regulátorom nie je vždy uspokojujivé. Jednou z možností dosiahnutia zlepšenia je prediktívne riadenie. Aplikácia prediktívneho riadenia na chemický reaktor tvorí obsah príspevku. Porovnanie výsledkov prediktívneho riadenia reaktora s linearizovaným, nelineárnym a fuzzy modelom typu Takagi-Sugeno s riadením pomocou PID regulátora poukazuje na vhodnosť použitia prediktívneho riadenia s fuzzy modelom.

Úvod

Prediktívne riadenie sa stalo v posledných rokoch populárnym spôsobom návrhu riadenia. Algoritmy prediktívneho riadenia sú aplikovateľné na procesy s dopravným oneskorením, neminimálne fázové, nestabilné či na mnohorozmerové procesy. Sú odolné a mnohostranne použiteľné. Možno uvažovať s obmedzeniami na vstupné a výstupné veličiny priamo pri návrhu regulátora. Kvalita riadenia býva vyššia ako pri PID regulátoroch (Mikleš, 2004).

Na predikciu budúceho riadeného výstupu systému sa používa matematický model systému, ktorý môže byť ľubovoľný. Vhodný model však musí dostatočne vystihovať dynamické vlastnosti procesu. Niektoré modely priamo zahŕňajú modely porúch, v iných sa predpokladá, že poruchy sú konštantné. Zároveň musí byť známa trajektória žiadanej veličiny do budúcnosti. Výpočet budúcich riadiacich zásahov zahŕňa minimalizáciu vhodnej účelovej funkcie s budúcimi trajektóriami prírastkov riadenia a regulačnej odchýlky. Realizuje sa však len prvý akčný zásah a celý postup minimalizácie funkcionálu sa opakuje v ďalšej perióde vzorkovania. Rastúci výkon a dostupnosť výpočtovej techniky zároveň umožňuje efektívne využívať popri klasických metódach i nové prístupy k modelovaniu a optimalizačným výpočtom. Chemické reaktory tvoria veľmi dôležité časti chemických technológií. Ale keďže ide o procesy nelineárne, s časovo premenlivými parametrami a v prípade exotermických reaktorov i rizikové z hľadiska bezpečnosti prevádzky, patria k najťažšie zvládnuteľným procesom z hľadiska riadenia a bývajú problémom riadenia klasickými metódami.

Prediktívne riadenie

Spoločnou myšlienkou mnohých metód riadenia je predikcia trajektórie výstupnej veličiny na základe modelu procesu. Často sa používajú lineárne modely, pretože v prípade bez obmedzení možno vypočítať trajektóriu akčných zásahov. Pred každým akčným zásahom regulátor vypočíta podľa interného modelu, ako sa bude systém za daných podmienok správať. Súčasťou prediktívneho regulátora je optimalizačný algoritmus, ktorý hľadá optimálny akčný zásah minimalizáciou účelovej funkcie

$$J(k, u(k)) = \sum_{j=N_1}^{N_2} (y_m(k+j) - y_r(k+j))^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_u} (\Delta u(k+j-1))^2 \quad (1)$$

Signál $y_m(k+j)$ je výstup j krokov v budúcnosti predikovaný vzhľadom na informácie dostupné do času k , $y_r(k+j)$ je postupnosť žiadanej veličiny a $\Delta u(k+j-1)$ je postupnosť budúcich prírastkov riadenia, ktoré majú byť vypočítané. Parametre N_1 a N_2 sú minimálny a maximálny horizont, ktoré určujú interval v budúcnosti, keď treba sledovať trajektóriu žiadanej veličiny. N_u je horizont riadenia a jeho využitie znižuje výpočtovú náročnosť metódy. Parameter λ je váhový koeficient riadiaceho signálu.

Rovnica (1) sa používa v kombinácii s obmedzeniami na vstupné a výstupné veličiny:

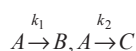
$$\begin{aligned} u_{\min} &\leq u \leq u_{\max} \\ \Delta u_{\min} &\leq \Delta u \leq \Delta u_{\max} \\ y_{\min} &\leq y \leq y_{\max} \\ \Delta y_{\min} &\leq \Delta y \leq \Delta y_{\max} \end{aligned}$$

Riadiaci systém tvorí model systému a optimalizačný blok, v ktorom sa určuje taká hodnota akčného signálu, ktorá minimalizuje funkcionál J . Optimálna hodnota akčného signálu je vstupom riadeného systému.

Experimentálne výsledky

Riadený systém

Riadeným systémom je prietokový chemický reaktor s dokonalým miešaním reakčnej zmesi a s dvoma paralelnými exotermickými reakciami 1. poriadku typu:



Riadenou výstupnou veličinou reaktora je teplota reakčnej zmesi T , riadiacou veličinou je prietok chladiaceho média q_c . Hodnoty parametrov reaktora sú uvedené v tab. 1.

Parametre	Jednotky	Hodnoty
q	m ³ min ⁻¹	0.015
V	m ³	0.23
V _C	m ³	0.21
ρ	kg m ⁻³	1020
ρ _C	kg m ⁻³	998
C _p	kJ kg K ⁻¹	4.02
C _{pc}	kJ kg K ⁻¹	4.182
A	m ²	1.51
k	kJ m ² min ⁻¹ K ⁻¹	42.8
k ₁₀	min ⁻¹	1.55.10 ¹¹
k ₂₀	min ⁻¹	4.55.10 ²⁵
E ₁ /R	K	9850
E ₂ /R	K	22019
ΔrH ₁	kJ kmol ⁻¹	-8.6.10 ⁴
ΔrH ₂	kJ kmol ⁻¹	-1.82.10 ⁴
c _{Av}	kmol m ⁻³	4.22
c _{Bv}	kmol m ⁻³	0
c _{Cv}	kmol m ⁻³	0
u _v	K	328
u _{cv}	K	298
q ^s _c	m ³ min ⁻¹	0.004
u ^s	K	363.61
u ^s _c	K	350.15
c ^s _A	kmol m ⁻³	0.4915
c ^s _B	kmol m ⁻³	2.0042
c ^s _C	kmol m ⁻³	1.7243

Tab.1 Parametre reaktora

Nelineárny matematický model reaktora

Zjednodušený nelineárny matematický model reaktora tvorí 5 diferenciálnych rovníc (Bakošová, 2004).

$$\frac{dc_A}{dt} = \frac{q}{V}c_{Av} - \frac{q}{V}c_A - k_1c_A - k_2c_A \quad (2)$$

$$\frac{dc_B}{dt} = \frac{q}{V}c_{Bv} - \frac{q}{V}c_B + k_1c_A \quad (3)$$

$$\frac{dc_C}{dt} = \frac{q}{V}c_{Cv} - \frac{q}{V}c_C + k_2c_A \quad (4)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{q}{V}T_v - \frac{q}{V}T - \frac{Ak}{V\rho C_p}[T - T_c] + \frac{Qr}{V\rho C_p} \quad (5)$$

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{q_c}{V_c}T_{vc} - \frac{q_c}{V_c}T_c + \frac{Ak}{V_c\rho C_{pc}}[T - T_c] \quad (6)$$

Rýchlostné konštanty reakcií sú nelineárnymi funkciami teploty:

$$k_1 = k_{10}e^{-\frac{E_1}{RT}} \quad k_2 = k_{20}e^{-\frac{E_2}{RT}}$$

Pre reakčné teplo platí:

$$\dot{Q}_r = k_1c_A V(-\Delta_r H_1) + k_2c_A V(-\Delta_r H_2)$$

Linearizovaný matematický model reaktora

Pri aplikácii prediktívneho riadenia sa použil linearizovaný model reaktora v tvare (7) s maticami **A**, **B**, **C** a s periódou vzorkovania 1:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} -0.5594 & 0 & 0 & -0.0284 & 0 \\ 0.2662 & -0.0652 & 0 & 0.0098 & 0 \\ 0.2280 & 0 & -0.0652 & 0.0187 & 0 \\ 6.5956 & 0 & 0 & -0.1538 & 0.0685 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0737 & -0.0928 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -248.2571 \end{bmatrix}$$

Fuzzy model reaktora

Fuzzy model reaktora typu Takagi-Sugeno bol na základe nameraných tréningových údajov získaný v tvare (Driankov, 1993; Roubos, 1999)

ak $T(k)$ je A_1 a $T(k-1)$ je A_2 a $q_c(k)$ je A_3

potom $T(k+1) = a_{1i}T(k) + a_{2i}T(k-1) + b_{1i}q_c(k) + b_{0i}$

$$i=1, \dots, 5 \quad (8)$$

Premisné parametre σ_i , c_i Gaussovských funkcií príslušnosti sú uvedené v tab. 2 (Jang, 1993). Hodnoty konzekventných parametrov pravidiel sú uvedené v tab. 3.

$T(k)$		$T(k-1)$		q_c	
σ_i	c_i	σ_i	c_i	σ_i	c_i
0,331	363,601	0,331	363,601	-0,0003	0,0040
0,331	357,182	0,331	357,109	0,0019	0,0091
0,331	353,426	0,331	353,423	0,0099	0,0112
0,331	356,059	0,331	356,054	-0,0014	0,0101
0,331	366,577	0,331	366,587	0,0002	0,0020

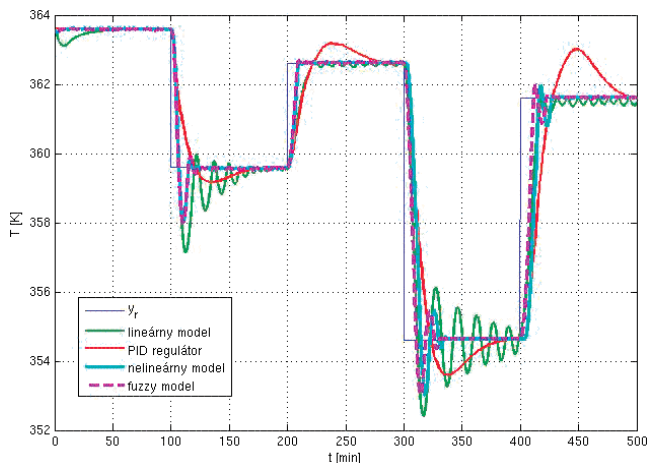
Tab.2 Parametre Gaussovských funkcií príslušnosti vstupov

a_{1i}	a_{2i}	b_{1i}	b_{0i}
2,21	-1,22	-19,5	3,64
2,21	-1,22	-23,97	4,21
2,07	-1,07	-10,39	-0,90
2,07	-1,08	-4,19	3,73
2,04	-1,04	-0,0003	-0,17

Tab.3 Parametre konzekventov pravidiel

Porovnanie výsledkov prediktívneho riadenia s rôznymi typmi modelov

Na obr. 1 sú znázornené priebehy teploty reakčnej zmesi pri prediktívnom riadení reaktora s nelineárnym, linearizovaným a fuzzy modelom. Tieto priebehy sú porovnané s riadením pomocou PID regulátora navrhnutého experimentálnou metódou podľa Chiena, Hronesa a Reswicka (Ogunnaike, 1994). Navrhnutý regulátor mal parametre $K_C = -0,003$, $T_I = 16,8$, $T_D = 1,41$ (Vasičkaninová, 2005). Z porovnania priebehov vyplýva, že linearizovaný model je pre tento typ pre-



Obr.1 Porovnanie výsledkov simulácie prediktívneho riadenia s rôznymi modelmi a s PID regulátorom

diktívneho regulátora najmenej vhodný. Priebehy s nelineárnym a fuzzy modelom sú podobné, v porovnaní s PID regulátorom sa rýchlejšie ustália na žiadanej hodnote.

Záver

Prediktívne regulátory sa používajú v mnohých oblastiach a v kombinácii s modernými metódami môžu byť vhodným nástrojom zlepšenia kvality riadenia zložitých systémov. Dokumentujú to aj výsledky riadenia chemického reaktora s fuzzy modelom.

Tento príspevok vznikol s grantovou podporou VEGA MŠ SR a SAV pre projekty č. 1/3081/06 a 1/4055/07.

Literatúra

[1] BAKOŠOVÁ, M., VASIČKANINOVÁ, A., KARŠAIOVÁ, M., ONDROVIČOVÁ, M: PID controller tuning for cascade control of a chemical reactor. In: Proc. 6. International Scientific-Technical Conf.

Process Control 2004. Kouty nad Desnou. University of Pardubice, p. 63. ISBN 80-7194-662-1.

[2] DRIANKOV, D., HELERENDOORN, H: An Introduction to Fuzzy Control. Springer-Verlag, Berlin, 1993.

[3] JANG, S. R.: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference Systems, IEEE Trans. Systems, Man & Cybernetics 23, p. 665 – 685, 1993.

[4] MIKLEŠ, J., FIKAR, M: Process modelling, identification and control II. Bratislava: STU Press 2004.

[5] OGUNNAIKE, B. A., RAY, W. H.: Process Dynamics, Modelling, and Control. Oxford University Press. New York. 1259. 1994. p. 536 – 541. ISBN 0-19-509119-1.

[6] PASSINO, K. M., YURKOVICH, S: Fuzzy Control. Addison-Wesley, California, 1998.

[7] ROUBOS, J. A., MOLLOV, S., BABUŠKA, R., VERBRUGGEN, H. B.: Fuzzy model-based predictive control using Takagi-Sugeno models. In: International Journal of Approximate Reasoning 22, 1999, p. 3 – 30.

[8] VASIČKANINOVÁ, A., BAKOŠOVÁ, M: Cascade fuzzy logic control of a chemical reactor. V Proc. 15. Int. Conference Process Control '05, Štrbské Pleso, High Tatras, 2005.

Ing. A. Vasičkaninová
doc. Ing. M. Bakošová, CSc.
doc. Ing. J. Dvoran, CSc.

Slovenská technická univerzita
 Fakulta chemickej a potravinárskej technológie
 Ústav informatizácie, automatizácie a matematiky
 Radlinského 9, 81237 Bratislava
 e-mail: anna.vasickaninova stuba.sk
 monika.bakosova stuba.sk
 jan.dvoran@stuba.sk

62