

基于模型预测内模的实时控制算法

孙 进¹, 霍红光¹, 曹建安², 杨明杰², 于 敏²

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710048)

摘 要:对具有滞后性、外界扰动和被控对象参数不确定性、快速性要求高的一类单输入-单输出线性系统的非恒值实时控制的模型预测内模的控制算法进行了进一步的分析研究。从理论上分析了该控制算法的系统稳定性条件、稳态控制误差,研究了在逆变电源控制系统中,该控制算法对负载的鲁棒性和对扰动的抑制能力。算法仿真表明:该控制算法能够克服外界扰动和被控对象参数不确定性,系统具有较强的鲁棒性,稳态控制精度高,动态响应速度快。

关键词:内模控制;模型预测控制;逆变电源

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2010.04.018

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)04-0089-05

对于具有滞后性、外界扰动和被控对象参数不确定性、快速性要求高的一类非恒值实时控制的单输入-单输出线性系统,现有的数字控制方法处理上述问题各具优缺点^[1]:PID 控制具有较好的快速性能,但在滞后明显、非恒值控制的系统中稳态精度较差;无差拍控制的快速性和稳态性能较好,但鲁棒性差;离散滑模控制具有很好的快速性和强鲁棒性,但稳态效果不佳,理想滑模切换面难于选取,控制效果受采样速率影响;模糊控制不依赖控制对象的数学模型,但是存在控制精度不高的缺点;重复控制能够很好地克服输出波形周期性的畸变,具有很好的稳态性能,易于实现,然而动态性能较差。作为先进控制技术的一种,内模控制(Internal Model Control, IMC)是一种鲁棒性强,设计简单而且有效的控制策略,参数调整与系统动态品质和鲁棒性的关系比较明确^[2-4];模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)是一类基于模型的闭环优化控制策略,在纯滞后的过程控制中体现了极大的优越性,且动态性能良好^[5-6],MPC 中的动态矩阵控制(Dynamic Matrix Control, DMC)是一种基于对象阶跃响应的预测控制算法,适用于存在滞后性、开环渐近稳定的非最小相位系统^[7-9]。将内模控制的结构和模型预测控制的算法相结合的控制策略应用于逆变电源控制系统中,既能保证系统具有较强的鲁棒性,又能有效克服纯滞后环节给系统设计带来的困难^[10]。本文对基于模型预测内模的控制算法进行了进一步的分析研究。

1 基于模型预测内模的控制算法

基于模型预测内模的控制算法^[10],设计的一类非恒值实时控制的单输入-单输出系统的结构见图 1。图中虚线以上为开环控制,虚线以下为内模控制,两者为并联结构。

图 1 中: $r(z)$ 、 $d_o(z)$ 、 $y(z)$ 分别为非恒值的参考信号、外界扰动、被控物理量的离散序列; $e(z)$ 为输出和给定信号的偏差; $G_p(z)$ 为被控对象实际模型的广义 Z 变换; $S(z)$ 为低通滤波器; $G_{IMC}(z)$ 为内模控制器; $G_p(z)$ 为被控对象理论模型;虚框部分 $G_c(z)$ 为系统控制器; $d_o(z)$ 为外部扰动; $y(z)$ 为被控对象的输出。通

* 收稿日期:2009-10-22

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2007E233)

作者简介:孙 进(1968-),女,重庆人,副教授,主要从事电力电子与电力传动研究。

E-mail: sunjin314@sina.com

过结构图变换,得到图2(a)。图中 $d_r(z)$ 为开环控制的跟踪误差, $y_r(z)$ 为开环控制下被控对象的输出, $y_m(z)$ 为内环控制下被控对象的输出。 $d_r(z)$ 作为系统扰动的一部分,和 $d_o(z)$ 一起转移到内模控制的闭环回路当中;反馈信号从电压输出信号 $y(z)$ 转移到图2(a)中 $y_m(z)$ 和 $(d_o(z) + d_r(z))$ 叠加后的信号点上。因此,内模控制的参考信号为零,在内模控制器作用下能够完全消除 $d_r(z)$ 和 $d_o(z)$ 对系统被控物理量的影响。

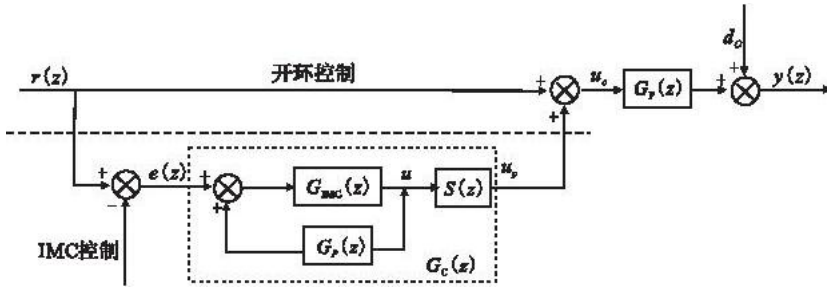
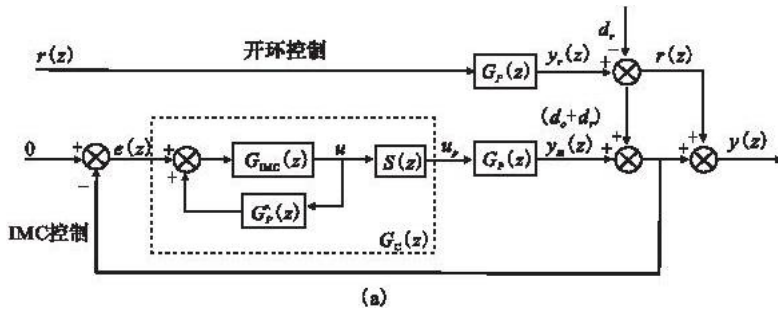
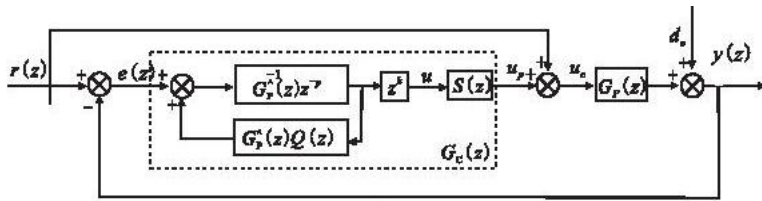


图1 基于模型预测内模控制算法的系统控制结构图

Fig.1 diagram of Internal Model Control with Model Prediction



(a)



(b)

图2 控制系统等效结构图

Fig.2 Parametric block diagram of inverter in practice

1.1 基于模型预测内模的控制算法原理及内模控制器的模型

根据文献[10]中所采用模型预测算法 DMC 的原理可知,采用被控对象单位阶跃响应的前 N 个有限的离散采样值 $a_i (i=1, 2, \dots, N)$ 来描述其动态过程,并称之为阶跃响应模型,则阶跃响应模型近似等于 $G_p(z)$ 阶跃响应的 Z 变换:

$$\frac{1}{1-z^{-1}}G_p(z) \approx \sum_{i=1}^N a_i z^{-i} + \sum_{i=N+1}^{+\infty} z^{-i} \quad (1)$$

设预测步长为 p ,当前时刻为 k ,那么在控制序列 $u_c(i) (i=k, k-1, \dots)$ 的作用下, $G_p(z)$ 在 $(k+p)$ 时刻的模型预测输出 $y_m(k+p)$ 可由式(2)计算:

$$y_m(k+p) = y_m(k) + \sum_{i=N-p}^{N-1} \Delta u_c(k-i)(1-a_i) + \sum_{i=1}^{N-p-1} \Delta u_c(k-i)(a_{i+p}-a_i) + a_p \Delta u_c(k) \quad (2)$$

式中: $y_m(k)$ 为 k 时刻被控对象输出的测量结果; $\Delta u_c(k)$ 为 k 时刻被控对象的输入控制增量; $\Delta u_c(k-i)$, $(i=1, 2, \dots, N-1)$ 为在 $(k-i)$ 时刻的被控对象的输入控制增量; $a_i (i=1, 2, \dots, N)$ 为前面的阶跃响应模型。图2(a)中,将系统总扰动 $d_o(z) + d_r(z)$ 定义为 $d(z)$,并作为模型预测算法在系统未来 $(k+p)$ 时刻期望输出的补偿量,使得在模型预测控制算法作用下,系统的输出能够消除总扰动 $d(z)$ 的影响。令期望输出等于预测输出 $y_m(k+p)$,并结合式(2),可得式(3):

$$-d(z) = y_m(k) + \sum_{i=N-p}^{N-1} \Delta u_c(k-i)(1-a_i) + \sum_{i=1}^{N-p-1} \Delta u_c(k-i)(a_{i+p}-a_i) + a_p \Delta u_c(k) \quad (3)$$

在每一个时刻 k , 由式(3) 计算该时刻的控制增量 $\Delta u_c(k)$, 并与前一个时刻的控制量 $u_c(k-1)$ 相叠加, 以构成实际控制量 $u_c(k) = u_c(k-1) + \Delta u_c(k)$, 使被控对象在未来 $(k+p)$ 时刻的输出预测值尽可能接近给定的期望值, 到下一时刻又重复式(2), 计算求出 $\Delta u_c(k+1)$ 。式(3) 经过 Z 变换, 并结合图 1, 可得系统误差 $e(z)$ 为:

$$e(z) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}(z^{-1})(z^p - 1)\Delta U_c(z) \tag{4}$$

式中: $\mathbf{A} = [0 \ a_1 \ \dots \ a_N \ a_{N+1} \ \dots]_{1 \times (+\infty)}$; $\mathbf{B}(z^{-1}) = [1 \ z^{-1} \ \dots \ z^{-N} \ z^{-(N+1)} \ \dots]_{1 \times (+\infty)}^T$ 。

将阶跃响应模型作为被控对象理论模型 $G_p(z)$ 的阶跃响应, 可得:

$$\frac{1}{1-z^{-1}}G_p(z) \approx \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}(z^{-1}) = \frac{1}{1-z^{-1}}; G_p^\wedge(z)G_p^\wedge(z) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}(z^{-1})(1-z^{-1}) \tag{5}$$

由于 $G_p(z) \approx G_p^\wedge(z)$, 将被控对象的理论模型作为实际模型的近似。由式(4-5), 得到图中嵌入的模型预测算法的内模控制器 $G_{IMC}(z)$ 为:

$$G_{IMC}(z) = G_p^\wedge^{-1}(z)z^{-p} \tag{6}$$

1.2 控制系统的实际参数结构设计

为了分析系统在中高频段的稳定性, 将图 2(a) 变换成图 2(b) 的控制系统结构图, 增加了一个低通滤波器 $Q(z)$; 低频段因 $S(z)$ 引起的系统相位滞后通过在阶跃响应模型中增加 z^k 因子来补偿。由此, 系统数字控制器 $G_c(z)$ 为:

$$G_c(z) = \frac{1}{\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}(z^{-1})z^{-k}(z^p - Q(z))1 - z^{-1}}S(z) \tag{7}$$

$$e(z) = (1 - G_p(z))M(z)r(z) - M(z)d(z) \tag{8}$$

式中:

$$M(z) = \frac{1 - Q(z)z^{-p}}{1 - H(z)z^{-p}} \tag{9}$$

$$H(z) = Q(z) - z^k S(z)G_p^\wedge^{-1}(z)G_p(z) \tag{10}$$

1.3 系统控制性能分析

1.3.1 系统的鲁棒稳定性条件

由误差表达式(8) 可得图 3。

由于 $1 - G_p(z)$ 和 $1 - Q(z)z^{-p}$ 均为稳定环节, 因此系统的稳定性仅由正反馈回路决定。由控制理论的小增益定理可知, 系统鲁棒稳定性的充分条件^[11] 为:

$$|H(e^{j\omega T})| < 1 \tag{11}$$

式中 $\omega \in [0, \frac{\pi}{T}]$, T 表示采样周期。

由于随机误差、系统固有的高频扰动和理论模型不准确性的存在, 因此将这些因素作为 $G_p(z)$ 的附加不确定性 Δ , 且 Δ 在低频段很小、在中高频段较大, 并表示为:

$$G_p^\wedge^{-1}(z)G_p(z) = 1 + \Delta \tag{12}$$

将式(12) 代入式(10), 可得:

$$|H(e^{j\omega T})| = |Q(z) - z^k S(z)(1 + \Delta)| \Big|_{z=e^{j\omega T}} \tag{13}$$

为满足系统鲁棒稳定性的充分条件式(10), 并获得良好的稳定性和稳态精度, 需按照以下要求分别设计低通滤波器 $Q(z)$ 和 $S(z)$: 在低频段, 使 $|Q(e^{j\omega T})| \approx 1, |S(e^{j\omega T})| \approx 1$, 由于在低频段被控对象的附加不确定性 Δ 为很小值, 带入式(12), 可得 $H(e^{j\omega T}) \ll 1$, 满足鲁棒稳定性的充分条件式(10); 同理, 由于在中高频段 Δ 为较大值, 此时在中高频段保证 $|Q(e^{j\omega T})| \ll 1, |S(e^{j\omega T})| \ll 1$, 则代入式(12), 可使得 $H(e^{j\omega T}) \ll 1$, 也能满足鲁棒稳定性条件式(10)。

1.3.2 系统稳态性能分析

若 $d(z)$ 为阶跃扰动, 令 $d(z) = \frac{k}{1-z^{-1}}$ (k 为常数), 代入式(7) 中, 由于在稳态下有 $\lim_{z \rightarrow 1} |H(z)| \rightarrow 0$ 和 $\lim_{z \rightarrow 1} |1 - G_p(z)| \rightarrow 0$

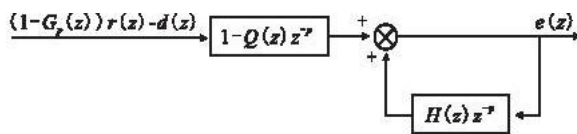


图 3 误差表达式结构图

Fig. 3 Block diagram of error expression

$-Q(z)z^{-p}| \rightarrow 0$, 由 Z 变换的终值定理可得由扰动引起的稳态误差 $e_d(\infty) \rightarrow 0$, 即控制算法能消除阶跃扰动引起的误差。

对于任意类型的参考信号 $r(z)$, 由式(7)和稳态下 $\lim_{z \rightarrow 1} |G_p(z)| \rightarrow 1$, 并结合 Z 变换的终值定理可得: 由 $r(z)$ 引起的稳态误差 $e_r(\infty) \rightarrow 0$, 即控制算法能跟踪任意类型的参考信号 $r(z)$, 适于非恒值控制的系统。

2 控制算法在逆变电源控制系统中的仿真

逆变电源具有滞后性和负载参数的不确定性, 属于非恒值控制系统。因此, 本文以逆变电源作为本控制算法的一个典型应用对象, 该逆变电源原理见图 4。

根据基于模型预测内模的实时控制算法的系统结构和参数要求对逆变电源控制系统进行设计。仿真模型参数: 输出频率 $f = 50 \text{ Hz}$ 、峰值电压 $u_m = 95 \text{ V}$; 滤波参数: $L = 2.6 \text{ mH}$ (仿真中 L 串联 $2 \text{ } \Omega$ 电感电阻和死区等效电阻), $C = 20 \text{ } \mu\text{F}$ (仿真中 C 串联 $2 \text{ } \Omega$ 引线电阻), 开关频率 $f_{sw} = 10 \text{ kHz}$ 。进行半载 ($24 \text{ } \Omega$) 突加至额定负载 ($12 \text{ } \Omega$) 仿真, 突加载输出电压仿真局部波形见图 5, u_o 为逆变电源输出电压, u_L 为突加的负载端电压, 额定负载输出电流有效值 $I_o \approx 5.6 \text{ A}$, 突加电流有效值增量 $\Delta I_o \approx 2.8 \text{ A}$ 。

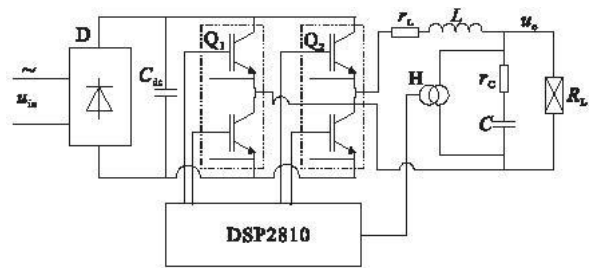


图 4 数字控制逆变电源系统原理图

Fig. 4 Schematic diagram of digital SPWM inverter

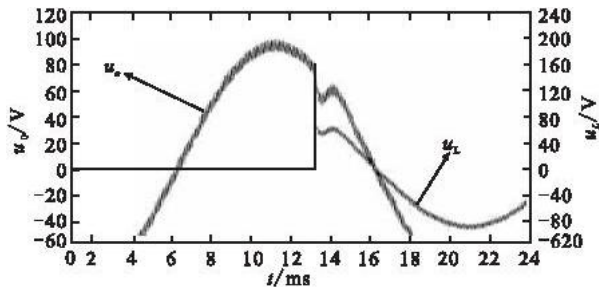


图 5 突加载时逆变电源输出电压仿真局部波形

Fig. 5 Simulation waveform of output voltage with step load

由式(10)可知系统的稳定性由 $|H(e^{j\omega T})|$ 决定, 而由式(7)可知, 系统对扰动的抑制能力由 $|M(e^{j\omega T})|$ 决定。以 $12 \text{ } \Omega$ 负载作为被控对象的算法模型, 而实际负载由 $4 \text{ } \Omega$ 增大至 $1000 \text{ } \Omega$, 作为被控对象的附加不确定性 Δ , 以此研究被控对象参数变化对系统鲁棒稳定性和扰动抑制能力的影响。见图 6, $|H(e^{j\omega T})|$ 落在 Z 域以原点为圆心的单位圆内, 因此系统始终稳定, 且稳定裕量较大。其中, 当实际负载由 $4 \text{ } \Omega$ 增大至等于 $12 \text{ } \Omega$ 的模型负载, $|H(e^{j\omega T})|$ 缩向 Z 域的原点, 稳定裕量递增, 并达到最大值; 当实际负载由等于 $12 \text{ } \Omega$ 的模型负载增大至 $1000 \text{ } \Omega$, $|H(e^{j\omega T})|$ 向 Z 域的以原点为圆心的单位圆扩展, 稳定裕量逐渐缩小, 但随着实际负载阻值的不断增大, 系统的稳定裕量变化很小, 处于收敛状态, 此时仍然留有很大的稳定裕量。图 7 中, $M(e^{j\omega T})$ 的幅频特性整体向高频方向偏移, 对低频段的扰动抑制能力提高, 而 $|M(e^{j\omega T})| > 0$ 部分的频段向高频移动, 且宽度变窄, 并逐渐集中至略小于 7 dB 的峰值, 使得对于该局部频段扰动的抑制能力变差, 但对整体扰动的抑制能力变化并不明显。

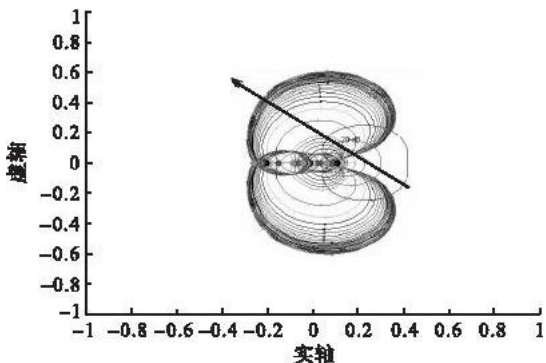


图 6 $H(e^{j\omega T})$ 的乃奎斯特图

Fig. 6 Nyquist diagram of $H(e^{j\omega T})$

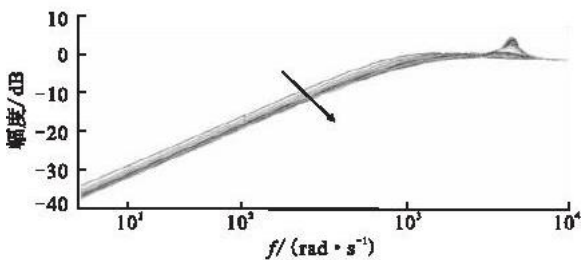


图 7 $M(e^{j\omega T})$ 的幅频特性

Fig. 7 Magnitude - frequency characteristic of $M(e^{j\omega T})$

3 结束语

本文对将模型预测和内模控制相结合的新型控制算法进行了进一步的分析研究,通过设计2个低通滤波器即可使系统获得鲁棒稳定性,且该控制算法能够消除阶跃扰动引起的控制误差,并适于非恒值控制。采用该控制算法对逆变电源控制系统进行了仿真,结果表明,该控制算法在具有滞后性、非恒值控制的逆变电源系统中,能够克服外界扰动和被控对象参数不确定性,系统具有较强的鲁棒性,稳态控制精度高、动态响应速度快。

参考文献:

- [1] 谢力华,苏彦民. 正弦波逆变电源的数字控制技术[J]. 电力电子技术,2001,35(6):52-55.
XIE Lihua, SU Yanmin. Digital Control of Sine Wave Inverter[J]. Power Electronics,2001,35(6):52-55. (in Chinese)
- [2] 杜建铭,吴序堂,毛世民,等. 周期性机械系统误差的内模控制研究[J]. 西安交通大学学报,2003,37(5):492-498.
DU Jianming, WU Xutang, MAO Shimin, et al. Study on Internal Model Control of the Periodic Mechanical Systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003,37(5):492-498. (in Chinese)
- [3] 孔雪娟,王荆江,彭力,等. 基于内模原理的三相电压源型逆变电源的波形控制技术[J]. 中国电机工程学报,2003,23(7):67-70.
KONG Xuejuan, WANG Jinjiang, PENG Li, et al. The Waveform Control Technique of Three-phase Voltage Source Inverter Power Supply Based on Internal Model Principle [J]. Proceeding of the CSEE, 2003, 23 (7):67-70. (in Chinese)
- [4] Li Cuiyan, Zhang Dongchun, Zhuang Xianyi. Theory and Applications of the Repetitive Control [C]//SICE Annual Conference. Hokkaido, Japan: Institute of Tecnology, 2004:27-34.
- [5] David Mayne. Model Predictive Control: the Challenge of Uncertainty in Model Predictive Control [C]//Techniques and Applications Conference. London: IEE Two-Day Workshop, 1999:1-5.
- [6] Zou Yuanyuan, Liu Xiaohua. Deadbeat Properties in Generalized Predictive Control with Pure Dead-time [C]//Intelligent Control and Automation Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou: [s. n], 2004: 709-712.
- [7] Lou Haichuan, Dai Wenzhan. Dynamic Matrix Control for Integrating System Based on One Point Prediction [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics. Jinan: IEEE Press, 2007:36-39.
- [8] 郑辑光,施仁,王孟效. 纸机先进控制算法研究[J]. 西安交通大学学报,2001,35(12):1272-1274.
ZHENG Jiguang, SHI Ren, WANG Mengxiao. The Advanced Control Algorithm of Paper Mashine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(12):1272-1274. (in Chinese)
- [9] Zhang Zhilin, Shen Yi, Wang Yan. Measure and DMC Control of Battery Separator Thickness Uniformity [C]//8th International Conference on Control Automation Robotics and Vision. Kunming: [s. n], 2004:851-854.
- [10] 杨明杰,曹建安,于敏. 基于模型预测的内模控制数字逆变电源[J]. 电力电子技术,2008,42(5):84-86.
YANG Mingjie, CAO Jian'an, YU Min. The Internal Model Control Digital Inverter Power Supply Based on Model Predictive Control [J]. Power Electronic Technology, 2008, 42 (5):84-86. (in Chinese)
- [11] Zhang Kai, Kang Yong, Xiong Jian, et al. Direct Repetitive Control of SPWM Inverter for UPS Purpose [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2003, 18(3):784-792.

(编辑:田新华)

Real-time Control Algorithm Based on Internal Model Control with Model Prediction

SUN Jin¹, HUO Hong-guang¹, CAO Jian-an², YANG Ming-jie², YU Min²

(1. Telecommunication Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. School of Electrical

Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The algorithm with less computation and combining the model predictive control with the internal model control is suitable for the non - constant real - time control of SISO system , which has high requirements in time - delay phenomenon, external disturbance and load parameter uncertainty. The system stability conditions, steady - state control error of the algorithm are analyzed theoretically. In the inverter power control system, the robustness and load disturbance rejection of the algorithm are studied. The simulation result shows that the use of the control algorithm can overcome the external disturbance and the load parameter uncertainty, and the control system can achieve good robustness, high steady - state accuracy, fast dynamic performance.

Key words: internal model control; model predictive control; inverter power supply

(上接第 41 页)

[10] Howland P E. A Passive Metric Radar Using A Transmitter of Opportunity [C]//International Conference of Radar. Paris: [s. n], 1994:370 - 375.

(编辑:田新华)

Maneuvering Targets Tracking in the Bistatic Forward Scattering Radar

WANG Hui - jun^{1,2}, LIU Wei - ping³, CAO Yun - he¹, ZHANG Shou - hong¹

(1. National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. Unit 94119, Tianshui 741020, Gansu, China; 3. Shanghai Aerospace Electronics Technology Institute, Shanghai 201109, China.)

Abstract: Based on the characteristic that the Bistatic forward scattering radars are superior to the monostatic radars in effectively detecting and tracking the small radar cross section (RCS) targets, non - variable acceleration and variable acceleration motion models are constructed. The Extended Kalman Filter algorithm is applied to keeping targets in track, the parameters (trace of the target, velocity and acceleration of the targets) of the moving targets are accurately estimated which establish the foundation for radar imaging and identification. By applying Gauss - Newton iterative algorithm, the efficiency and accuracy of the filtering results are improved. The models proposed and the effectiveness of the algorithms are verified by simulating the non - variable and variable acceleration motion targets.

Key words: EKF; maneuvering targets; forward scattering radar