

感应电动机解耦变结构控制系统 抖振抑制和消除的研究¹⁾

毛宗源 邱焕耀

(华南理工大学自动化系 广州 510641)

摘 要

本文在设计出一种新型的交流电动机控制系统——解耦变结构控制系统的基础上^[1],对其中滑模变结构带来抖振问题进行了研究,通过分析系统抖振产生的原因,提出了抖振抑制和消除的方法,并对各种方法进行比较,选择了最适合本系统的小区间PI控制法.文中还给出了仿真曲线和分析.

关键词: 解耦变结构控制,抖振,小区间PI控制法.

1 引言

感应电动机的解耦控制原理最早由日本学者 K. Ohnishi 和 K. Miyachi 提出^[2,3]. 实现解耦控制的过程中遇到由于电动机转子电阻变化而破坏解耦条件的问题,为了克服转子电阻变化给解耦控制系统带来的不良影响. 文献[1,5]提出了采用滑模变结构的方法,从而提出了感应电动机的解耦变结构控制. 这样得到的控制系统具有设计简单,不需要电动机精确的数学模型,鲁棒性强等优点. 但是,解耦变结构在具体实现时,由于时间滞后等因素引起抖振^[4],不采取有效的措施抑制和消除抖振,转速的频繁变化必然影响系统的正常工作.

2 解耦变结构调速系统

2.1 解耦条件和解耦调速系统的数学模型

感应电动机基于转差频率控的解耦条件^[2]

$$i_{1\alpha} = \text{const.}, \quad \omega_{sL} = \frac{r_2}{L_2 \cdot i_{1\alpha}} \cdot i_{1\beta}, \quad (1)$$

其中, $i_{1\alpha}$ 、 $i_{1\beta}$ 为定子电流的 α 、 β 轴分量; ω_{sL} 滑差频率; r_2 、 L_2 为转子电阻和电感.

转子电阻的变化对解耦控制系统的影响可以作为干扰量 h_1 、 h_2 .

1) 广东省科学基金资助的课题.

本文于1991年7月22日收到

在完全解耦条件下,感应电动机的数学模型如图 1(a) 所示^[5]。图中考虑了系统负荷和干扰量 h_1, h_2 。

2.2 解耦变结构控制^[1]

根据系统性能要求: (1) $\lambda_{2\alpha} = \text{const.}$, 解耦条件; (2) 转速静差为 0; (3) 快速性好, 选择系统的切换面为

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= 0, (S_1 = \lambda_{2\alpha} - \lambda_{2\alpha}^{ref}), \\ S_2 &= 0, (S_2 = \omega_r - \omega_r^{ref}), \\ S_3 &= 0, (S_3 = i_{1\beta} - i_{1\beta}^{ref}), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中, $\lambda_{2\alpha}, \lambda_{2\alpha}^{ref}$ 是转子实际磁链和参考磁链; $i_{1\beta}, i_{1\beta}^{ref}$ 是定子 β 轴的实际电流和参考

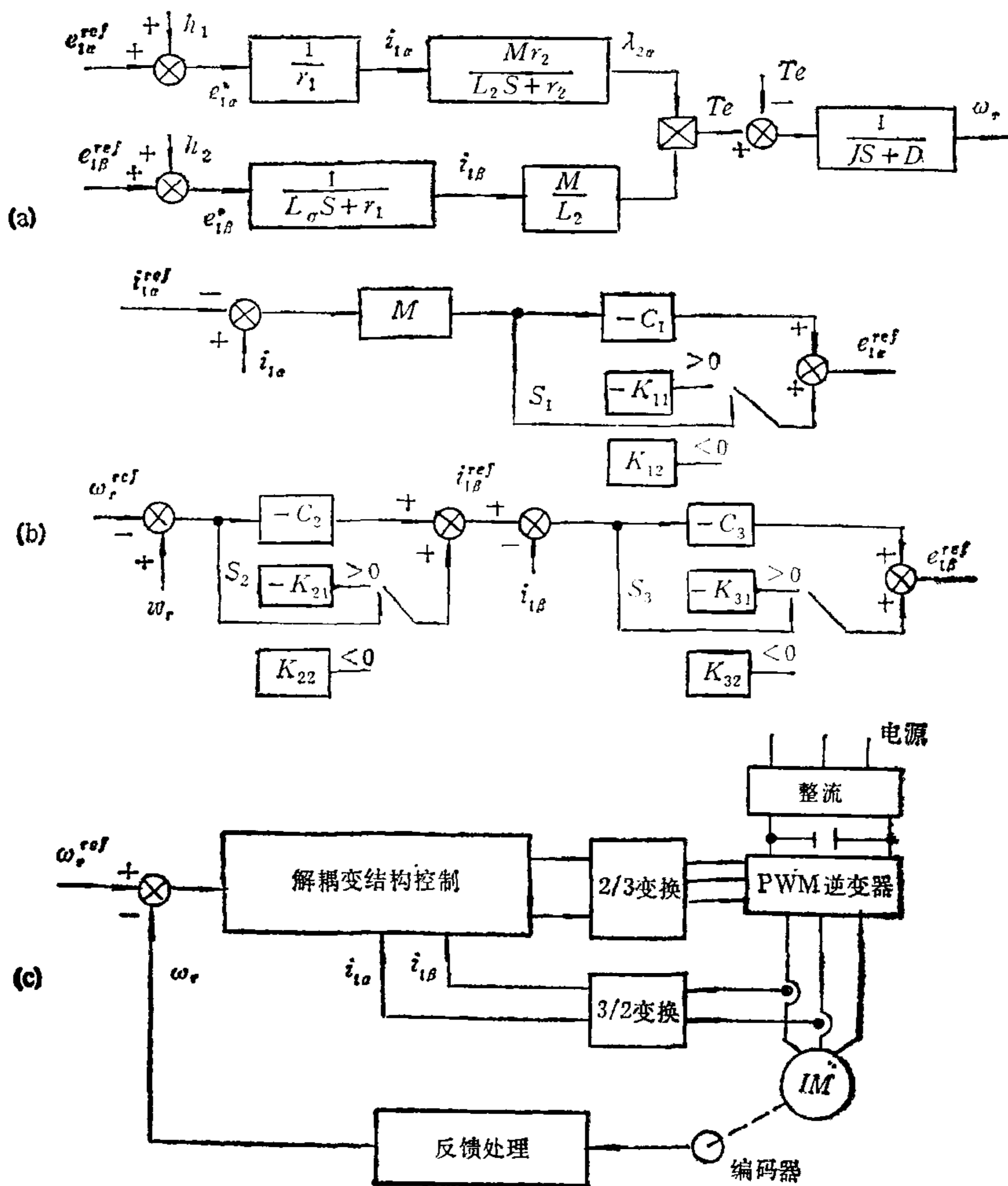


图 1 解耦变结构控制系统图

电流; ω_r, ω_r^{ref} 是转子实际转速和参考转速。

控制规律可选择为

$$\left. \begin{aligned} e_{1\alpha}^{ref} &= -C_1 \varepsilon_1 - K_1 \text{Sgn}(S_1), \\ e_{1\beta}^{ref} &= -C_3 \varepsilon_3 - K_3 \text{Sgn}(S_3), \\ i_{1\beta}^{ref} &= -C_2 \varepsilon_2 - K_2 \text{Sgn}(S_2), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 分别是磁通偏差, 转速偏差和定子电流 β 轴分量偏差, 并有 $\varepsilon_i = S_i (i = 1, 2, 3)$; $e_{1\alpha}^{ref}, e_{1\beta}^{ref}$ 是定子电势参考量在 α 轴, β 轴的分量; $C_i (i = 1, 2, 3), K_i (i = 1, 2, 3)$ 是控制参数。

根据滑模存在条件: $S_i \cdot \dot{S}_i < 0$, 可以选择控制参数 $C_i, K_i^{[1]}$ 。

$$\left. \begin{aligned} C_1 &> -\frac{r_1}{M}, \quad K_1 > \left| h_1 - \frac{r_1}{M} \lambda_{2\alpha}^{ref} \right|, \\ C_2 &> -\frac{D}{K_g}, \quad K_2 > \frac{T_l + D\omega_r^{ref}}{K_g}, \\ C_3 &> -r_1, \quad K_3 > |h_2 - r_1 \cdot i_{1\beta}^{ref}|. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 r_1 是定子电阻; M 是定子与转子互感系数; D 是摩擦系数; $K_g = (M^2 i_{1\alpha}^{ref}) / L_2$; T_l 是阻力矩。

C_i, K_i 的选择并不需要电机精确的数学模型, 只要知道参数变化的范围。当干扰 h_1, h_2, T_l 有界时, 可以容易地确定 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 的增益, 使系统对参数变化和干扰不敏感。

解耦变结构控制系统如图 1(b), (c) 所示。

3 抖振产生的原因分析

在完全解耦的条件下, 由图 1(a) 可以写出电机的数学模型, 即

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}. \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \lambda_{2\alpha} \\ \omega_r \\ i_{1\beta} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{r_2}{L_2} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{D}{J} & \frac{K_g}{J} \\ 0 & 0 & -\frac{r_1}{L_\sigma} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{Mr_2}{L_2 r_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_\sigma} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} e_{1\alpha}^{ref} \\ e_{1\beta}^{ref} \end{bmatrix},$$

J 为转动惯量。这里暂不考虑干扰量 h_1, h_2, T_l 。

式(3)所表示的控制规律是开关控制。式(2)表示切换面 S_i 是不连续面的正常运动段, 即 $S_i \neq 0$ 时, 运动轨迹是光滑的, 因为在切换面以外, 式(5)处处满足解的存在的唯一性。滑动模态段, 即 $S_i = 0$ 时, 轨迹也是光滑的, 因为式(5)的解亦处处存在唯一。

由上可见, 滑动模变结构系统本身并无抖振问题, 换句话说抖振并非由滑模变结构所

引起的,而是由其它原因引起的.在本系统中,引起抖振的主要原因是时间滞后.

引起时间滞后的主要原因为: 1) 当系统运动到达切换面 S_i 时,由于系统存在机械、电气、热惯性,且系统能源总是有限大的,不可能无限大,因此系统的切换不可能从一个方向的数值瞬时变化到反方向的数值,这样相点就会穿越切换面. 2) 本系统是数字系统,采样周期不可能无限小,因而相点可能在采样间隔穿越切换面.

设系统相点在 t_1 时到达切换面,但由于以上原因, $u = u^+$ 未能立刻切换成 $u = u^-$, 经过一段滞后时间 τ , 相点穿过切换面后才切换成 $u = u^-$, 即切换发生在 $x(t + \tau)$. 同样相点穿过切换面才由 $u = u^-$ 切换成 $u = u^+$, 因而形成了相平面上系统运动的齿形曲线,这就是抖振.

4 抖振的抑制和消除方法及比较

仿真用感应电动机参数为

(1kW, 100V, 8.4A, 60Hz, 4 极, 1710rpm),

$r_1 = 0.49\Omega$, $r_2 = 0.45\Omega$, $L_1 = 38.8\text{mH}$, $L_2 = 35.4\text{mH}$, $M = 35.4\text{mH}$,

$J = 0.024\text{Nm} \cdot \text{s}^2/\text{rad}$, $D = 0.0011\text{Nm} \cdot \text{s}/\text{rad}$, $i_{1\alpha} = 6.83\text{A}$, $i_{1\beta} = 11.54\text{A}$.

4.1 抖振的抑制

采用数字系统,时间滞后不可避免,在不修改变结构数学模型的前提下,抖振也是不可避免的,但可以抑制其振幅.

缩短采样周期可以减小滞后时间,从而抑制抖振的振幅,但缩短采样周期受到微机和电子器件的限制.

从仿真曲线图 2 可知,减小 K_i 可以抑制抖振的幅值,因而在满足抗参数变化和干扰前提下应尽量选取较小的 K_i , 按如下条件选取的不对称参数 K_i 比按式(4)选取更利于抑制抖振的振幅.

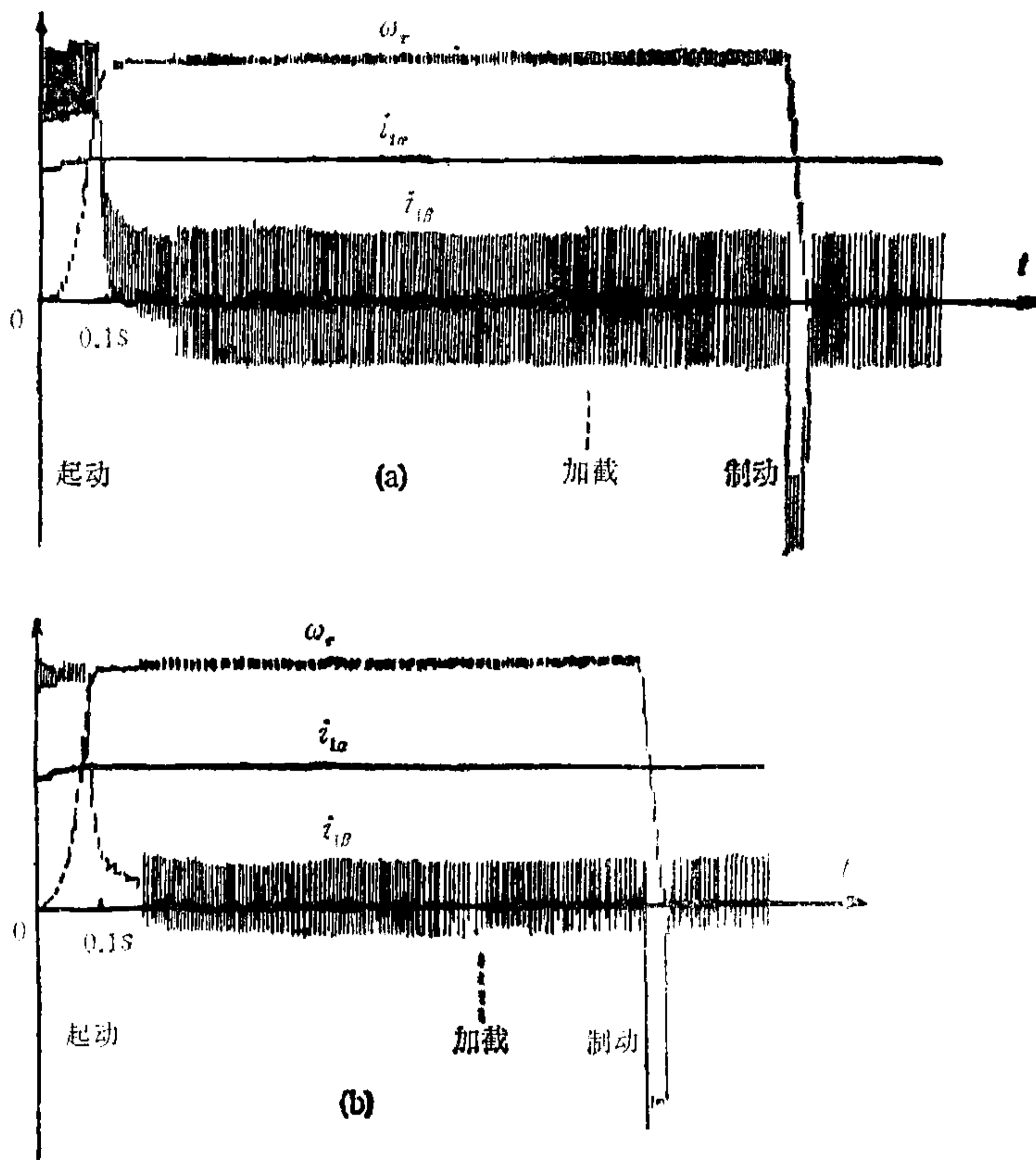
$$\left. \begin{aligned} & \begin{cases} K_1 > h_1 - r_1 i_{1\alpha}^{ref}, & \text{当 } S_1 > 0 \text{ 时,} \\ K_1 > r_1 i_{1\alpha}^{ref} - h_1, & \text{当 } S_1 < 0 \text{ 时,} \end{cases} \\ & \begin{cases} K_2 > \frac{T_l - D\omega_r^{ref}}{K_g}, & \text{当 } S_2 > 0 \text{ 时,} \\ K_2 > \frac{D\omega_r^{ref} - T_l}{K_g}, & \text{当 } S_2 < 0 \text{ 时,} \end{cases} \\ & \begin{cases} K_3 > h_2 - r_1 i_{1\beta}^{ref}, & \text{当 } S_3 > 0 \text{ 时,} \\ K_3 > r_1 i_{1\beta}^{ref} - h_2, & \text{当 } S_3 < 0 \text{ 时,} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

4.2 抖振的消除

为了消除抖振,必须修改控制规律,同时要保证滑模变结构对系统参数变化和干扰不敏感性.

1) 单位向量连续方法.

控制规律为



$$\begin{aligned}
 \text{(a)} \quad C_1 &= 80, \quad K_1 = \begin{cases} -3.35(S_1 > 0 \text{ 时}), \\ 3.77(S_2 < 0 \text{ 时}), \end{cases} \quad C_2 = 14, \quad K_2 = 1, \quad C_3 = 4, \quad K_3 = 5.65. \\
 \text{(b)} \quad C_1 &= 80, \quad K_1 = \begin{cases} -3.35(S_1 > 0 \text{ 时}), \\ 3.37(S_1 < 0 \text{ 时}), \end{cases} \quad C_2 = 14, \quad K_2 = \begin{cases} 1(S_2 > 0 \text{ 时}), \\ 0.6(S_2 < 0 \text{ 时}), \end{cases} \\
 C_3 &= 4, \quad K_3 = \begin{cases} -2.8(S_3 > 0 \text{ 时}), \\ 5.65(S_3 < 0 \text{ 时}). \end{cases}
 \end{aligned}$$

图 2 选取不同控制参数时系统仿真曲线

$$u_i = -C_i \varepsilon_i - K_i \frac{S_i}{|S_i| + \delta_i}, \quad \delta_i > 0 \text{ 且很小}. \tag{7}$$

在 S_i 的 δ 邻域里, 有

$$u_i = -C_i \varepsilon_i - \frac{K_i}{\delta_i} \cdot S_i. \tag{8}$$

在 $|S_i| \gg \delta_i$ 时, 有

$$u_i = -C_i \varepsilon_i - K_i \text{Sgn}(S_i). \tag{9}$$

(9)式与本系统(3)式有相同的控制规律。

δ_i 的选择必须适当, 使系统既能保持变结构控制的优点, 又能在 S_i 的 δ_i 邻域内使相点趋于切换面 S_i , 从而消除抖振。 δ_i 太小则不能消除抖振, δ_i 太大则失去变结构控制对参数变化和干扰不敏感的优点。

从图 3 仿真曲线可见, 单位向量控制连续化方法可以消除抖振。 由于小范围内相当

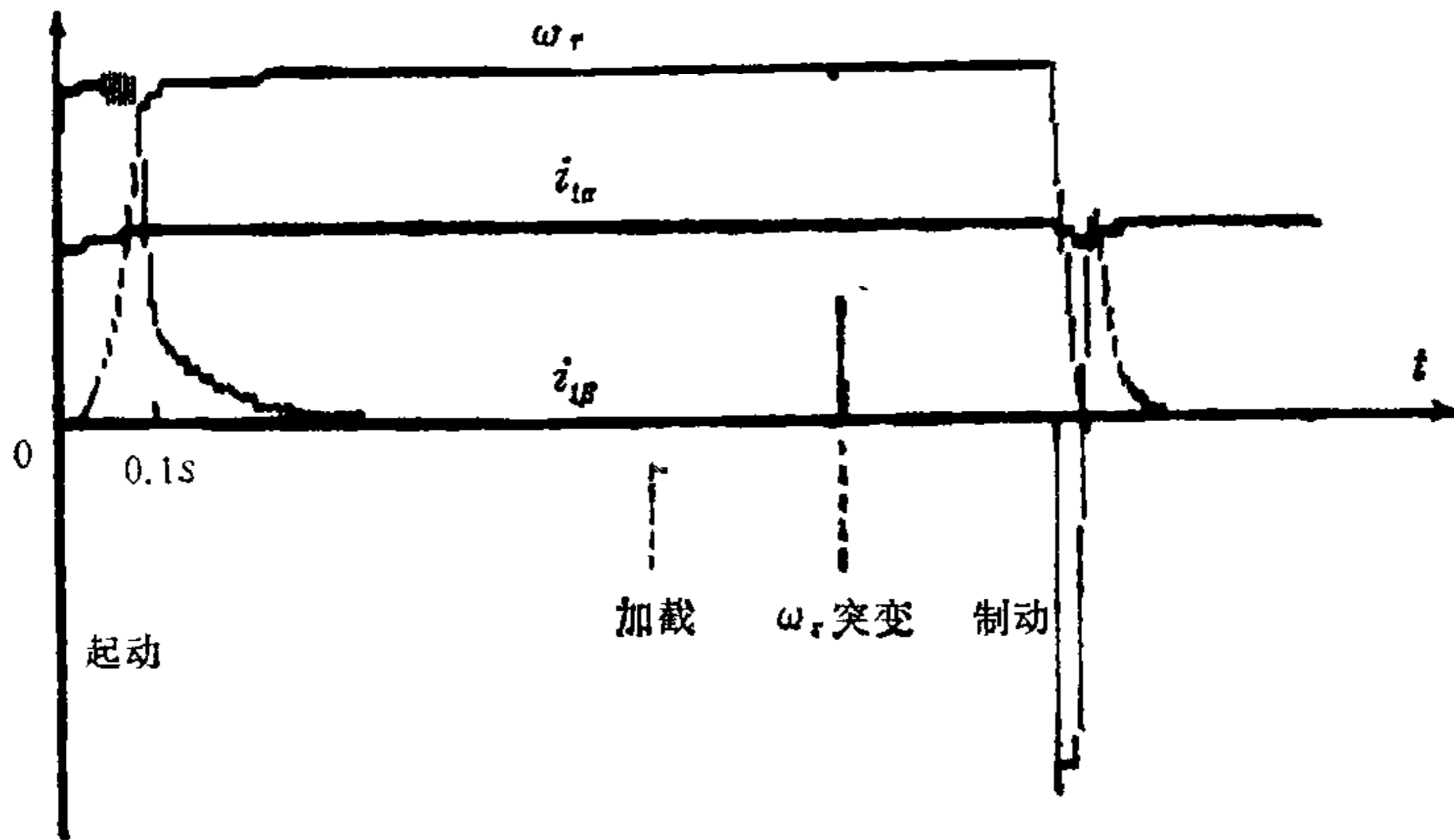


图3 采用单位向量连续法消除抖振的系统仿真曲线
(转子电阻按 $R_2 = R_{20} + Kt$ 变化时)

于 P 控制,存在静差,且算法也较复杂。

从仿真曲线可知,(1)系统起动、制动很快,励磁(即 $i_{1\alpha}$)上升快,且运行中保持不变;(2)抗干扰性好;(3)突加负载时 ω_r 不变;(4) r_2 变化时系统仍保持良好性能。

2) 饱和特性法。

控制规律为

$$u_i = -C_i \varepsilon_i - K_i \text{Sat}(S_i), \tag{10}$$

其中

$$\text{Sat}(S_i) = \begin{cases} -1, & \text{当 } S_i < -\Delta_i \text{ 时,} \\ S_i/\Delta_i, & \text{当 } -\Delta_i \leq S_i \leq \Delta_i \text{ 时,} \\ +1, & \text{当 } S_i > \Delta_i \text{ 时,} \end{cases}$$

Δ_i 是小正数。

在 $-\Delta_i$ 和 $+\Delta_i$ 间 u_i 是比例控制,其余各点上与开关控制相同, Δ_i 的选择与(7)式中 δ_i 的选择遵循相同的原則。

仿真结果表明,饱和特性法可以消除抖振,但存在静差,由于仿真曲线与图3相似,从略。

3) 小区间 PI 法。

此法在 $-\Delta_i$ 和 $+\Delta_i$ 间采用 PI 控制,此外,各点与开关控制相同。 Δ_i 的选择也与(7)式中 δ_i 的选择有相同的原則。 PI 控制的参数要求小偏差时系统动态模型选取,把整个系统校正化为典型“I”型或典型“II”型系统。使系统无超调,无静差。

图4所示为采用小区间 PI 法消除抖振的系统仿真曲线。由仿真结果表明:(1)小区间 PI 控制法能较好地消除抖振,并消去静差;(2)励磁电流(即 $i_{1\alpha}$)上升快,并在运行中保持不变,起动时转矩电流 $i_{1\beta}$ 保持 11.54A,即起动转矩大,起动快;(3)突加负载 T_l 时, ω_r 不变,励磁电流 $i_{1\alpha}$ 亦不变;(4) ω_r 突然变化时,系统能很快地恢复到 ω_r^{ref} ;(5)转子电阻 r_2 按 $r_2 = r_{20} + Kt$ 变化时,系统仍保持良好的动态,静态性能,抗干扰性好,起动

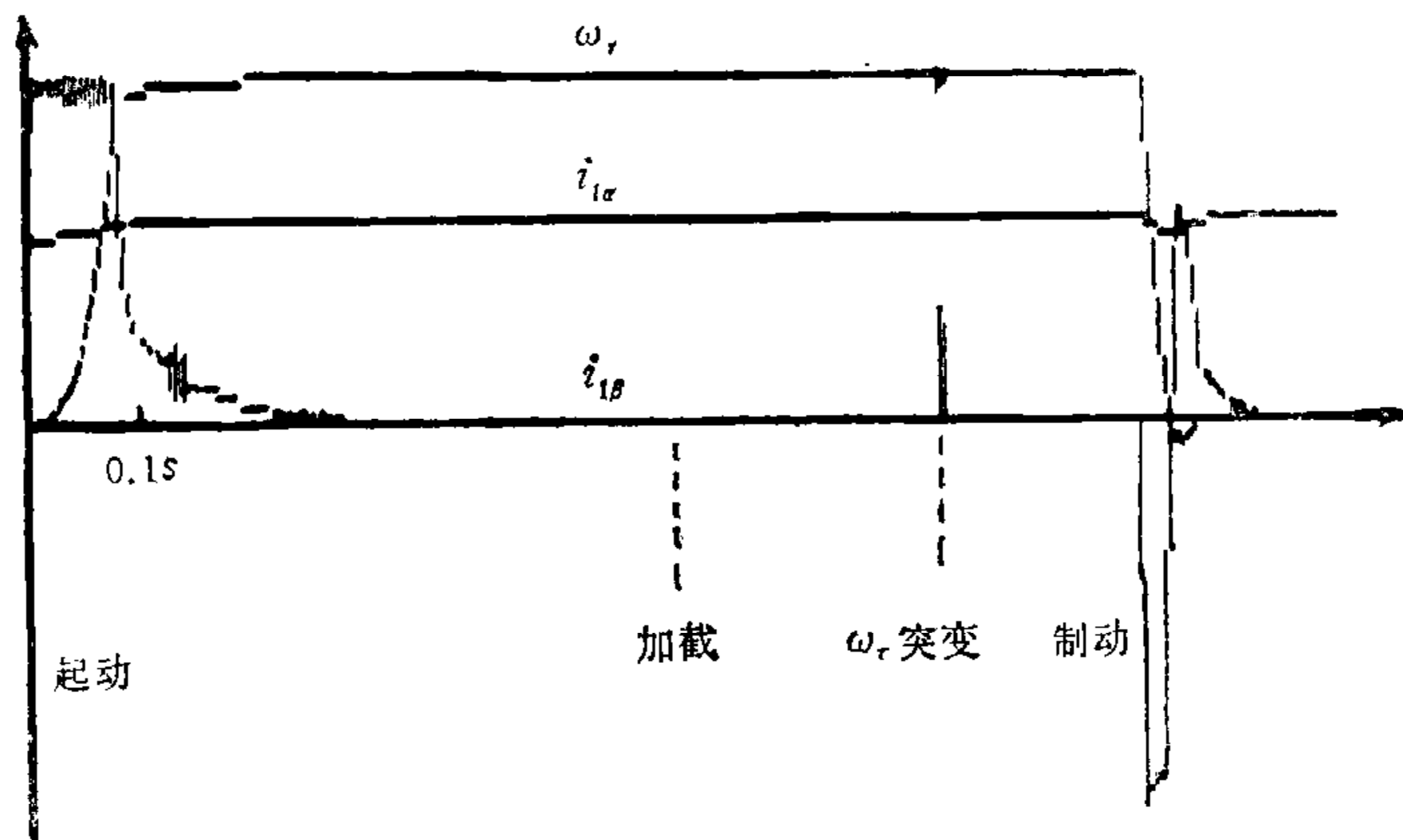


图4 采用小区间PI法消除抖振的系统仿真曲线

制动性能好。

参 考 文 献

- [1] 毛宗源,邱焕耀,姚菁. 解耦变结构调速系统的研究. 控制理论与应用,1992,9(5): 512—518.
- [2] Ohnishi K and Miyachi K. Principle of Constant Magnitude Regulation of Secondary Flux Based on Slip Frequency Control in Induction Motor Drive. *Int. Conf. on Electrical Machines*, Budapest, 1982, 9.
- [3] Ohnishi K, Suzuki H, Miyachi K. Decoupling Control of Secondary Flux and Secondary Current in Induction Motor Drive with Controlled Voltage Source and Its Comparison with Volt/Herz Control. *IEEE, IAS*. 1982, 28B.
- [4] 高为炳. 变结构控制理论基础. 中国科学技术出版社,1990.
- [5] 毛宗源,姚菁. 解耦变结构 AC 位置伺服系统的研究. 仪器仪表学报,1991,12(4): 350—358.

THE STUDY OF QUIVER ELIMINATION AND RESTRAINT FOR THE DECOUPLING-VARIABLE STRUCTURE CONTROL SYSTEM IN INDUCTION MOTOR

MAO ZONGYUAN QIU HUANYAO

(Dept. of Autom. the South China Univ. of Tech. Guangzhou 510641)

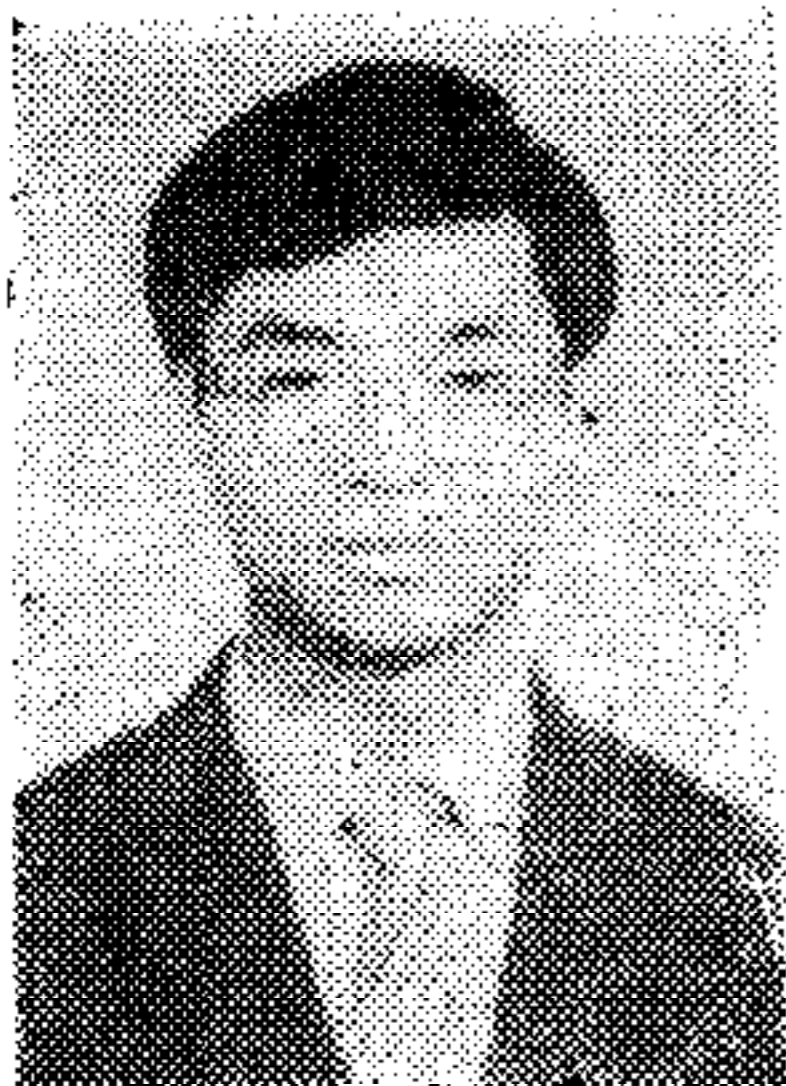
ABSTRACT

In this paper, on the basis of a new type control system in induction motor——decoupling variable structure control system^[1]. The quiver is the key problem in the sliding mode variable structure control system. This problem is specially studied. The causes which lead to quiver are analysed. The methods of quiver elimination and restraint is discussed and compared. Small range PI control method is selected as the suitable one in this system. Simulation curve and analysis is given in the paper.

Key words: Decoupling, variable structure control; quiver; small area PI control method.



毛宗源 1962年毕业于大连工学院(现大连理工大学),同年9月到广州华南理工大学任教,现任该校自动化系教授。主要研究领域:工业控制、模糊控制、变结构控制。出版了6本著作,发表学术论文40余篇。



邱焕耀 1966年11月生。1989年在广州华南理工大学自动化系获学士学位,1992年获工学硕士学位。现在广州市黄埔区对外经济委员会从事计算机网络的研究工作。发表学术论文3篇。