

消除振铃现象的一种改进方法

张汉祥

(大连铁道学院电气工程系 116022)

摘要

本文分析了采样控制系统中产生振铃现象的真正原因,提出了消除振铃现象的一种改进方法。理论分析和实际算例表明,此法比大林提出的方法效果好。

关键词: 采样控制系统,大林算法,振铃现象。

一、振铃现象的来源

图1是采样控制系统结构图。设数字控制器DC和被控对象 $W(s)$ 对应的 z 传递函数分别为 $D(z)$ 和 $W(z)$,闭环 z 传递函数为 $M(z)$ 。于是有

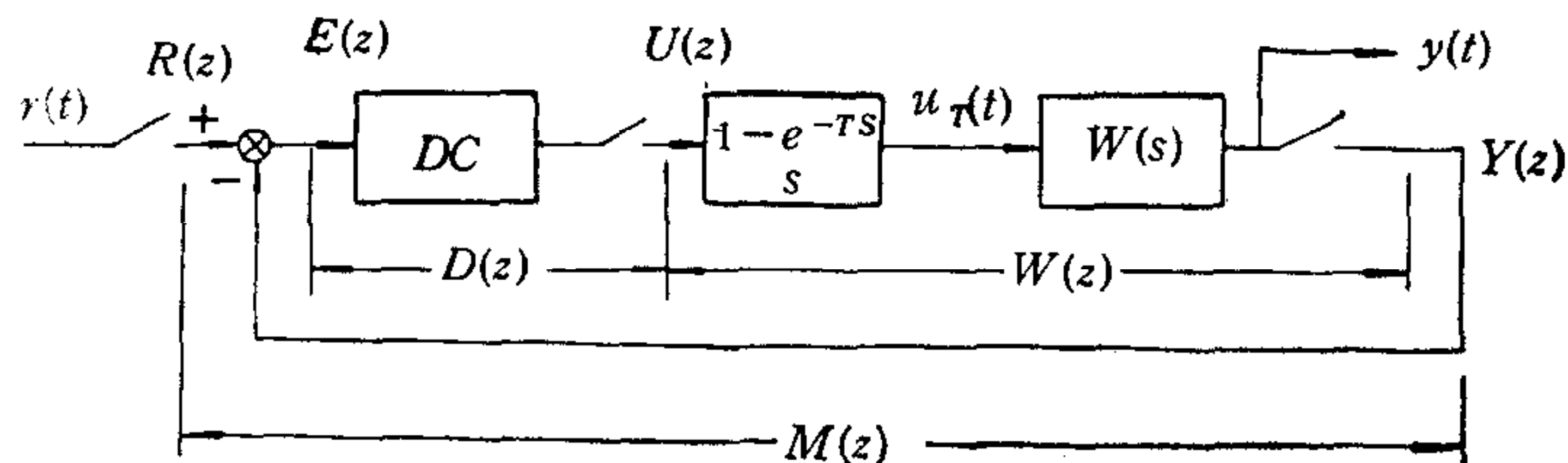


图1 采样控制系统结构图

$$U(z) = \frac{M(z)}{W(z)} R(z) = G(z) R(z), \quad (1)$$

式中 $G(z) = M(z)/W(z)$. (2)

在暂态, $U(z)$ 对应的 $u(kT)$ 是变化的,相应地, $u_T(t)$ 每隔一个采样周期 (控制周期) T 发生一次阶跃,从而引起 $y(t)$ 在相邻两次采样时刻之间产生纹波。分析表明,当 $r(t)$ 为阶跃函数时,若 $G(z)$ 含有接近于 -1 的极点,则 $u(kT)$ 将以频率 $2/T$ 作缓慢衰减的脉振,使 $y(t)$ 出现严重的纹波,这不但影响控制质量,而且加速了执行器的机械磨损。这种现象称为振铃现象, $G(z)$ 中相应的极点称为振铃极点。振铃极点越接近于

-1, $u(kT)$ 的脉振幅度越大, 脉振衰减越慢。

又 $U(z)$ 也可写成

$$U(z) = D(z)E(z), \quad (3)$$

而

$$D(z) = \frac{M(z)}{W(z)[1 - M(z)]} = G(z) \frac{1}{1 - M(z)}, \quad (4)$$

因为偏差 $E(z)$ 不能独立设定, 所以不应按式(3)而应按式(1)来分析系统参数对 $U(z)$ 及 $u(kT)$ 变化特征的影响。相应地, 那种认为 $D(z)$ 中含有接近于 -1 的极点是引起振铃现象原因的提法是不确切的, 因为由式(4)可见, 若该极点是来自 $G(z)$, 则该提法是正确的, 而若是来自 $1 - M(z)$, 则该提法就不正确了。

二、振铃现象的消除方法

大林算法给出的期望闭环 z 传递函数为^[1]

$$M_0(z) = z^{-l} \frac{(1 - \sigma)z^{-1}}{1 - \sigma z^{-1}}, \quad (5)$$

式中 $\sigma = \exp(-T/\tau)$, τ 是选定的时间常数, l 等于或近似等于 $W(s)$ 含的纯滞后时间的采样周期数。

假设 $W(z)$ 含有一个振铃因子, 即有

$$W(z) = Q(z)(1 + z_i z^{-1}), \quad (6)$$

式中 $z_i \approx 1$ 。因此数字控制器为

$$D_0(z) = \frac{M_0(z)}{W(z)[1 - M_0(z)]} = \frac{M_0(z)}{Q(z)(1 + z_i z^{-1})[1 - M_0(z)]}. \quad (7)$$

将式(5)和(6)代入式(2), 所得 $G(z)$ 将含有振铃极点 $-z_i$ 。为消除此振铃极点, 必须修改闭环 z 传递函数, 方法有以下两种:

1. 大林提出的方法(简称方法一)

把数字控制器由 $D_0(z)$ (式(7))修改成 $\bar{D}_0(z)$, 即

$$\bar{D}_0(z) = \frac{M_0(z)}{Q(z)(1 + z_i)[1 - M_0(z)]}, \quad (8)$$

相应地, 闭环 z 传递函数变成

$$\bar{M}_0(z) = \frac{\bar{D}_0(z)W(z)}{1 + \bar{D}_0(z)W(z)} = \frac{M_0(z)(1 + z_i z^{-1})}{1 + z_i - (1 - z^{-1})z_i M_0(z)}, \quad (9)$$

于是, $\bar{M}_0(z)$ 和 $W(z)$ 都含有因子 $(1 + z_i z^{-1})$, 这两个因子互相抵消, 使 $G(z)$ 不含振铃极点 $-z_i$ 了。

2. 本文给出的方法(简称方法二)

把被控对象对应的 z 传递函数写成

$$W(z) = W_0(z) \frac{1 + z_i z^{-1}}{1 + z_i}, \quad (10)$$

式中 $W_0(z)$ 不含振铃因子。

取期望闭环 z 传递函数为

$$M(z) = M_0(z) \frac{1 + z_i z^{-1}}{1 + z_i}, \quad (11)$$

式中 $M_0(z)$ 如式(5)。于是有

$$G(z) = \frac{M(z)}{W(z)} = \frac{M_0(z)}{W_0(z)}, \quad (12)$$

$$D(z) = \frac{M(z)}{W(z)[1 - M(z)]} = \frac{M_0(z)}{W_0(z) \left[1 - M_0(z) \frac{1 + z_i z^{-1}}{1 + z_i} \right]}. \quad (13)$$

显然, $G(z)$ 也不含振铃极点 $-z_i$ 了。

三、两种消除振铃方法的比较

1) 步骤不同: 方法一是从修改数字控制器入手, 方法二是直接修改期望闭环 z 传递函数。

2) 效果不同: 用方法一, 得闭环 z 传递函数如式(9), 由该式很难估出暂态下系统输出的变化规律。用方法二, 得闭环 z 传递函数如式(11), 此时系统输出为

$$\begin{aligned} Y(z) &= M(z)R(z) = M_0(z)R(z) \frac{1 + z_i z^{-1}}{1 + z_i} \\ &= Y_0(z) \frac{1 + z_i z^{-1}}{1 + z_i}, \end{aligned} \quad (14)$$

式中

$$Y_0(z) = M_0(z)R(z) \quad (15)$$

显然, $Y_0(z)$ 就是未消除振铃极点时系统的输出, 它对应的 $y_0(t)$ 有显著的纹波。由式(14)可得 $Y(z)$ 对应的 $y(kT)$ 为

$$y(kT) = \frac{y_0(kT) + z_i y_0(kT - T)}{1 + z_i}.$$

相应地, 近似有

$$y(t) = \frac{y_0(t) + z_i y_0(t - T)}{1 + z_i}, \quad (16)$$

$y_0(t)$ 的纹波向上凸的期间, $y_0(t - T)$ 的纹波恰好向下凹(见图2), 按式(16)加权平均的结果, 使消除振铃极点后系统输出 $y(t)$ 的纹波大为削弱, 振铃现象几乎完全消除。

3) 数字控制器不同: 方法一用的数字控制器 $\bar{D}_0(z)$ 如式(8), 或者根据式(6)和(10)将它写成

$$\bar{D}_0(z) = \frac{M_0(z)}{W_0(z)[1 - M_0(z)]}, \quad (17)$$

方法二用的数字控制器 $D(z)$ 如式(13), 比 $\bar{D}_0(z)$ 稍复杂些。

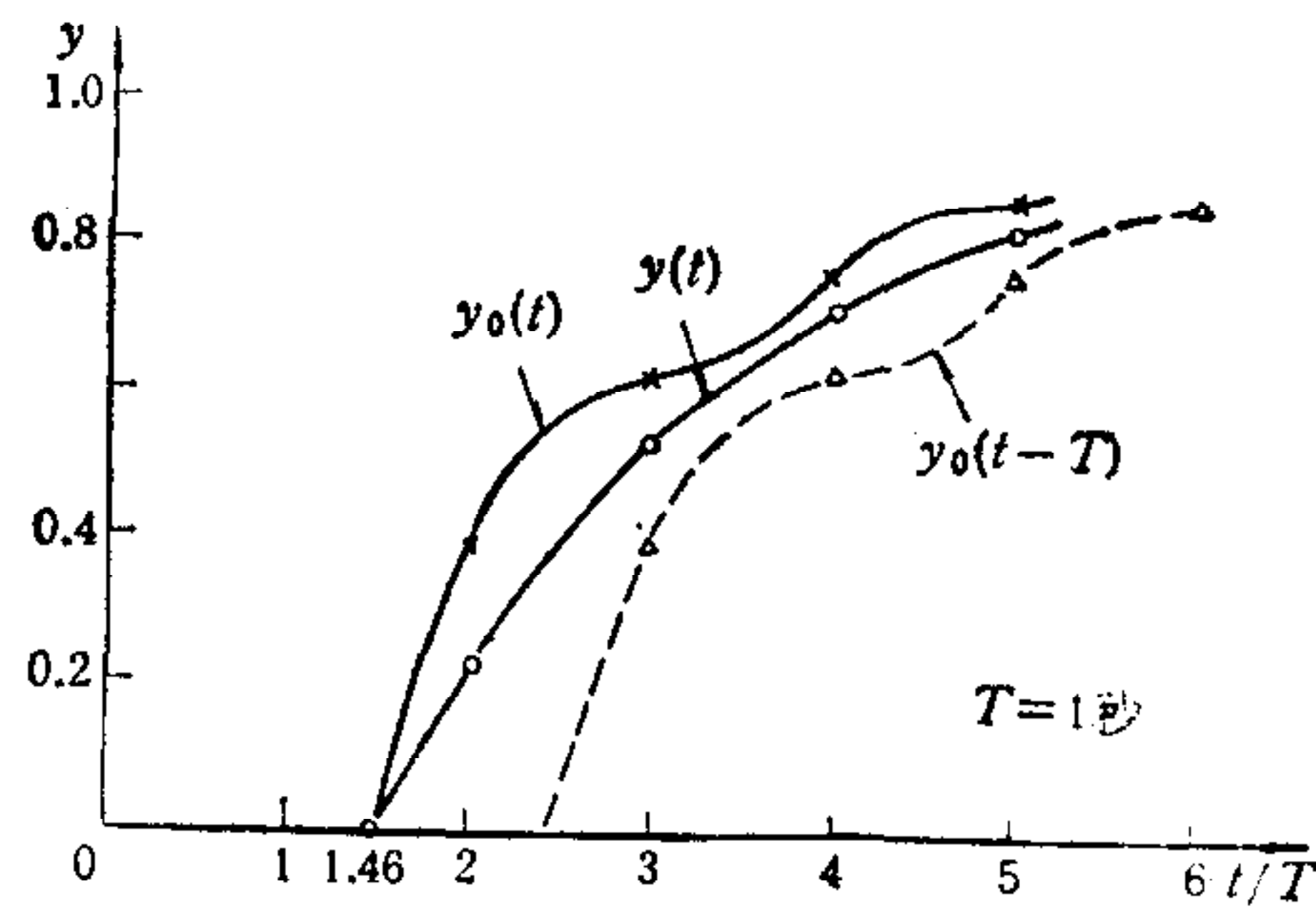


图 2 算例的系统输出响应

四、振铃现象及其消除举例

设
$$W(s) = \frac{e^{-1.46s}}{3.34s + 1},$$

$T = 1$ 秒。于是根据零阶保持器法可求得

$$W(z) = \frac{0.1493z^{-2}(1 + 0.733z^{-1})}{1 - 0.7413z^{-1}},$$

其中有一个振铃因子 $(1 + 0.733z^{-1})$ 。取 $\tau = 2$ 秒, $l = 1$, 按式(5)计算, 得

$$M_0(z) = z^{-1} \frac{(1 - 0.6065)z^{-1}}{1 - 0.6065z^{-1}} = \frac{0.3935z^{-2}}{1 - 0.6065z^{-1}}.$$

对于单位阶跃输入 $R(z) = 1/(1 - z^{-1})$, 分别求出未消除振铃极点、用方法一消除振零极点以及用方法二消除振铃极点等三种情况下的控制作用。 $U_0(z)$, $\bar{U}(z)$ $U(z)$ 以及系统输出 $Y_0(z)$, $\bar{Y}(z)$ 和 $Y(z)$, 用长除法展开, 取前几项系数列于表 1。

从表 1 可见, 方法二消除振铃的效果比方法一好。

表 1 算例计算结果

变量 \ 次幂系数	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^{-3}	z^{-4}	z^{-5}
$U_0(z)$	2.6356	0.3484	1.8096	0.6078	1.4093	0.7736
$Y_0(z)$	0	0	0.3935	0.6322	0.7769	0.8647
$\bar{U}(z)$	1.5210	1.3161	1.4450	1.2351	1.1634	1.0630
$\bar{Y}(z)$	0	0	0.2271	0.5312	0.7534	0.9009
$U(z)$	1.5210	1.3161	1.1920	1.1160	1.1110	1.1090
$Y(z)$	0	0	0.2271	0.5313	0.7158	0.8277

图 2 给出了输出量 $y_0(t)$ (与 $Y_0(z)$ 对应) 和 $y(t)$ (与 $Y(z)$ 对应) 的变化曲线。

五、结 束 语

1) 产生振铃现象的真正原因是 $G(z)$ 而不是 $D(z)$ 含有接近于 -1 的极点。

2) 用本文给出的方法消除振铃现象,其效果比用大林的方法好,但数字控制器稍复杂些。

3) 若 $W(z)$ 中含有 $m > 1$ 个振铃因子,则为了消除振铃,本文有关公式中的 $(1 + z_i z^{-1})/(1 + z_i)$ 应代之以 $\prod_{i=1}^m [(1 + z_i z^{-1})/(1 + z_i)]$ 。

参 考 文 献

- [1] 谢剑英,微型计算机控制技术,国防工业出版社,(1985),12,138—158.
- [2] 顾兴源,计算机控制系统,冶金工业出版社,(1981),12,148—168.
- [3] 潘新民,微型计算机控制技术,人民邮电出版社,(1985),8,268—273.

A MODIFIED TECHNIQUE FOR ELIMINATING RING PHENOMENA

ZHANG HANXIANG

(Dept. of Electric Engineering Dalian Institute of Railway Technology, 116022)

ABSTRACT

The real reason that causes the ring phenomena in sampling control systems is analyzed. A modified technique for eliminating ring phenomena is presented. Theoretical and calculation examples show that this technique is more effective than that one given by Mr. Dahlin.

Key words: Sampling system; Dahlin algorithm; ring phenomena.