

半实物仿真系统中零阶保持器的 数字补偿方法

郭 涛

(北京控制与电子技术研究所, 北京 100038)

摘 要

本文介绍了零阶保持器数字补偿的一般方法, 使受控对象在数学模型难以描述的情况下得到良好的相位补偿, 并在飞行器的姿态控制系统中得到应用。

关键词: 模型检验, 数字补偿, 频率特性。

一、引 言

飞行器姿态控制系统的半实物仿真包括计算机和实物两大部分。半实物仿真系统与真实系统的主要区别在于: 部分动态模型由计算机代替。计算机与实物接口的数模转换通道带有零阶保持器 (ZOH), 工作时会产生负相移 ($\omega_c T/2$), 使系统稳定性变差, 设计人员难以确定系统的上限和下限状态。一方面, 由于实物部分数学模型难以描述, 很难将控制对象和 ZOH 一起离散化; 另一方面, 真实的系统中并没有 ZOH, 所以系统设计时不考虑 ZOH 的影响。这就使设计的系统性能在仿真实验中显得比预期效果差。

当计算机与实物连接时, 计算机接收动态实时输入并产生实时动态输出, 象实物模型一样, 不允许有超过的幅度和相位误差, 否则试验的真实性即相似程度将要受到怀疑。仿真模型建立起来以后, 必须进行整体和局部测试与检验, 对误差进行修正和补偿, 取得正确的模型特性作为仿真的依据。

本文提供了设计补偿器的一般方法, 进而给出七种可供选用的补偿器¹⁾。最后用频率特性测试仪测出了补偿前后计算机部分的频率特性, 并对几种补偿器的仿真结果进行了比较。

二、修正方法

ZOH 的频率特性如下 (T 为采样周期):

本文于 1991 年 10 月 21 日收到。

1) 黄柯棣, 银河仿真机系统功能讨论。

$$G_h(j\omega) = \frac{1 - e^{-j\omega T}}{j\omega}, \quad (1)$$

令 $\Delta = \omega T$, 上式可写为

$$G_h(j\omega) = T \frac{\sin(\Delta/2)}{\Delta/2} \angle -\Delta/2. \quad (2)$$

从其幅频特性可以看出, ZOH 是一个低通滤波器, 但也通过一些高频分量; 从相频特性来看, ZOH 还会产生负相移 ($\Delta/2$).

设计数字补偿器的目的就是要消除 ZOH 对幅频和相频的影响. 补偿器是由补偿项构成的, 补偿项应当是已知的或容易获得的数据项. 实时控制中, 补偿项只能是当前帧和前几帧算出的值 ($r_n, r_{n-1}, \dots, r_{n-k+1}$) 及其各阶微分项 ($\dot{r}_n T, \dot{r}_{n-1} T, \dots, \dot{r}_{n-k+1} T, \dots, r_n^{(l)} T^l, r_{n-1}^{(l)} T^l, \dots, r_{n-k+1}^{(l)} T^l$). 这些补偿项经系数加权综合, 将形成 D/A 之前的输出项 \hat{r}_n

$$\hat{r}_n = \sum_{i=1}^k (\alpha_i r_{n-i+1} + \beta_i \dot{r}_{n-i+1} T + \dots + \gamma_i r_{n-i+1}^{(l)} T^l). \quad (3)$$

以下给出求这些系数的一般方法.



图1 控制系统框图

$$G_h(j\omega) = \left[1 + \underbrace{\left(-\frac{1}{6} \Delta^2 + \frac{1}{120} \Delta^4 + \dots \right)}_{\text{实部误差 } \varepsilon_R} + j \underbrace{\left(-\frac{1}{2} \Delta + \frac{1}{24} \Delta^3 + \dots \right)}_{\text{虚部误差 } \varepsilon_I} \right] T.$$

构造补偿器 $H_c(e^{j\Delta})$, 使得 $S = H_c(e^{j\Delta})G_h(j\omega)/T$ 中的 ε_R 和 ε_I 最小, 同时要保证 \hat{r}_n 简单易算. 通常选用的补偿方法, 是利用 r_n 和 r_{n-1} 进行外插^[1].

$$\hat{r}_n = 1.5r_n - 0.5r_{n-1},$$

$$S = 1 + \frac{1}{3} \Delta^2 - j \frac{3}{4} \Delta^3 + \dots. \quad (4)$$

如果用差分形式 $\dot{r}_n = (r_n - r_{n-1})/T$ 代入上式, 将得到精度更高的补偿器,

$$\hat{r}_n = r_n + \frac{1}{2} \dot{r}_n T,$$

$$S = 1 + \frac{1}{12} \Delta^2 - j \frac{1}{24} \Delta^3 + \dots \quad (5)$$

这两种补偿器基本上可以满足实验要求。如果希望补偿效果更好一些,就需要引入更多的补偿项。下面以引入 r_{n-1} 为例给出设计补偿器的一般方法。设补偿器的构造为

$$\hat{r}_n = K_1 r_n + K_2 r_{n-1} + K_3 \dot{r}_n T, \quad (6)$$

频域上相应地有

$$H_e(e^{j\Delta}) = K_1 + K_2 e^{-j\Delta} + jK_3 \Delta, \quad (7)$$

$$S = H_e(e^{j\Delta}) G_h(j\omega) / T$$

$$= \left(1 - j \frac{\Delta}{2} - \frac{\Delta^2}{6} + j \frac{\Delta^3}{24} + \frac{\Delta^4}{120} + \dots \right)$$

$$\cdot \left[K_1 + K_2 \left(1 - j\Delta - \frac{\Delta^2}{2} + j \frac{\Delta^3}{6} + \frac{\Delta^4}{24} + \dots \right) + jK_3 \Delta \right],$$

整理后,有

$$\begin{aligned} S = & (K_1 + K_2) + \left(-\frac{1}{6} K_1 - \frac{7}{6} K_2 + \frac{1}{2} K_3 \right) \Delta^2 + j \left(K_3 - \frac{3}{2} K_2 - \frac{1}{2} K_1 \right) \Delta \\ & + j \left(\frac{1}{24} K_1 + \frac{5}{8} K_2 - \frac{1}{6} K_3 \right) \Delta^3 + \left(\frac{1}{120} K_1 \right. \\ & \left. + \frac{31}{120} K_2 - \frac{1}{24} K_3 \right) \Delta^4 + \dots \end{aligned} \quad (8)$$

为了使 $j\Delta$, Δ^2 为零,实部近似为 1,令

$$\begin{cases} K_1 + K_2 = 1, \\ -\frac{1}{6} K_1 - \frac{7}{6} K_2 + \frac{1}{2} K_3 = 0, \\ K_3 - \frac{3}{2} K_2 - \frac{1}{2} K_1 = 0, \end{cases} \quad (9)$$

由此求出 $K_1 = \frac{5}{6}$, $K_2 = \frac{1}{6}$, $K_3 = \frac{2}{3}$, 所以有

$$\hat{r}_n = \frac{5}{6} r_n + \frac{1}{6} r_{n-1} + \frac{2}{3} \dot{r}_n T,$$

$$S = 1 + j \frac{1}{36} \Delta^3 + \frac{1}{45} \Delta^4 + \dots \quad (10)$$

可见这种补偿方法比前者高一阶精度。仍用这种设计方法,再引入 \dot{r}_{n-1} 项,可以设计出更高一阶精度的补偿器

$$\hat{r}_n = \frac{1}{36} (30r_n + 6r_{n-1} + 23\dot{r}_n T + \dot{r}_{n-1} T),$$

$$S = 1 + \frac{13}{2160} \Delta^4 + j \frac{7}{1440} \Delta^5. \quad (11)$$

根据这种设计方法,按照实际需要,给出各种可供选用的补偿器见表 1 (其中方法 1 相当于无补偿)。

表 1 各类补偿器比较

方法	补偿项	补偿器 \hat{r}_n	$S = H_c(e^{i\Delta})G_h(j\omega)/T$
1	r_n	r_n	$1 - j \frac{1}{2} \Delta - \frac{1}{6} \Delta^2 + \dots$
2	r_n, r_{n-1}	$1.5r_n - 0.5r_{n-1}$	$1 + \frac{1}{3} \Delta^2 - j \frac{3}{4} \Delta^3 + \dots$
3	r_n, \dot{r}_n	$r_n + \frac{1}{2} \dot{r}_n T$	$1 + \frac{1}{12} \Delta^2 - j \frac{1}{24} \Delta^3 + \dots$
4	r_n, \dot{r}_{n-1}	$r_n + \frac{1}{2} \dot{r}_{n-1} T$	$1 + \frac{7}{12} \Delta^2 - j \frac{13}{24} \Delta^3 + \dots$
5	r_n, r_{n-1}, r_{n-2}	$\frac{11}{6} r_n - \frac{7}{6} r_{n-1} + \frac{2}{3} r_{n-2}$	$1 + 0.3\Delta^4 + j0.25\Delta^3 + \dots$
6	$r_n, \dot{r}_n, \dot{r}_{n-1}$	$\frac{T}{12} (7\dot{r}_n - \dot{r}_{n-1}) + r_n$	$1 + \frac{13}{360} \Delta^4 + j \frac{1}{24} \Delta^3 + \dots$
7	r_n, \dot{r}_n, r_{n-1}	$\frac{5}{6} r_n + \frac{1}{6} r_{n-1} + \frac{2}{3} \dot{r}_n T$	$1 + \frac{1}{45} \Delta^4 + j \frac{1}{36} \Delta^3 + \dots$
8	$r_n, r_{n-1}, \dot{r}_n, \dot{r}_{n-1}$	$\frac{1}{36} (30r_n + 6r_{n-1} + 23\dot{r}_n T + \dot{r}_{n-1} T)$	$1 + \frac{13}{2160} \Delta^4 + j \frac{7}{1440} \Delta^3 + \dots$

三、仿真测试结果

数学模型的频率特性一般可以精确地计算出来,做为理论值。控制系统中数学模型编排得是否正确,特别是经计算机输出的信号是否正确,最直观可靠的方法是用“频率特性测试仪”测出模型运行时各频率点的幅值及相位,再与理论值进行比较,如果数据很接近,说明计算机部分的数学模型以及补偿器的设计是正确的。把实物拿掉后构成简单的自闭合模型,外加正弦信号 $A_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$ 对系统进行测试。

测试结果表明,加补偿器后幅值与理论值非常接近,只有相位对于不同的补偿器反应有明显差别。测试结果中包括计算机的量化误差以及测试方法的误差等,但仍可以看出:

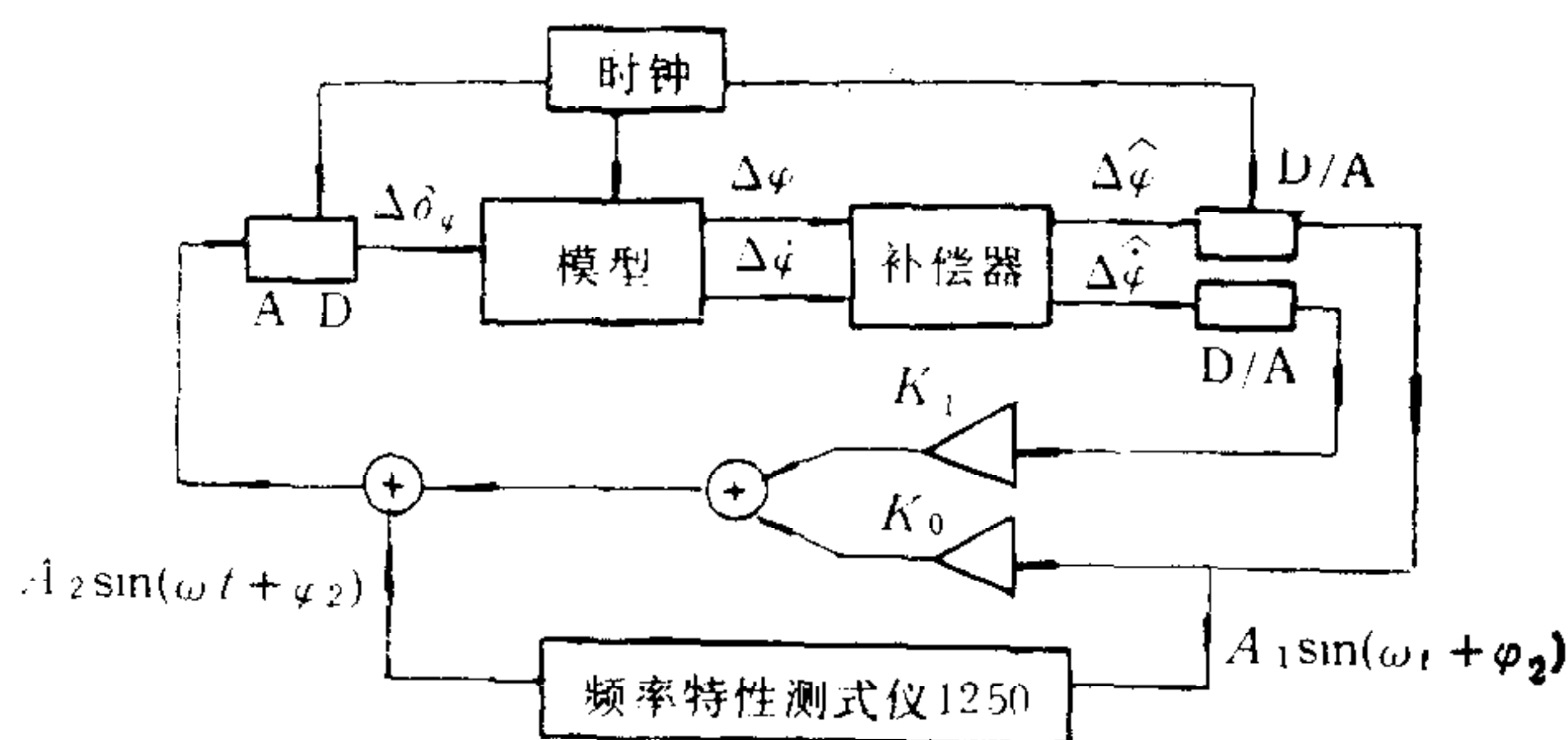


图 2 测试数学模型的频率特性

方法 3 明显好于无补偿的方法 1, 方法 7 优于方法 3, 更接近于理论值。

这种方法在一定频段内有效。如果 ω 很大, 致使 $\Delta > 1$, 则得不到补偿效果。

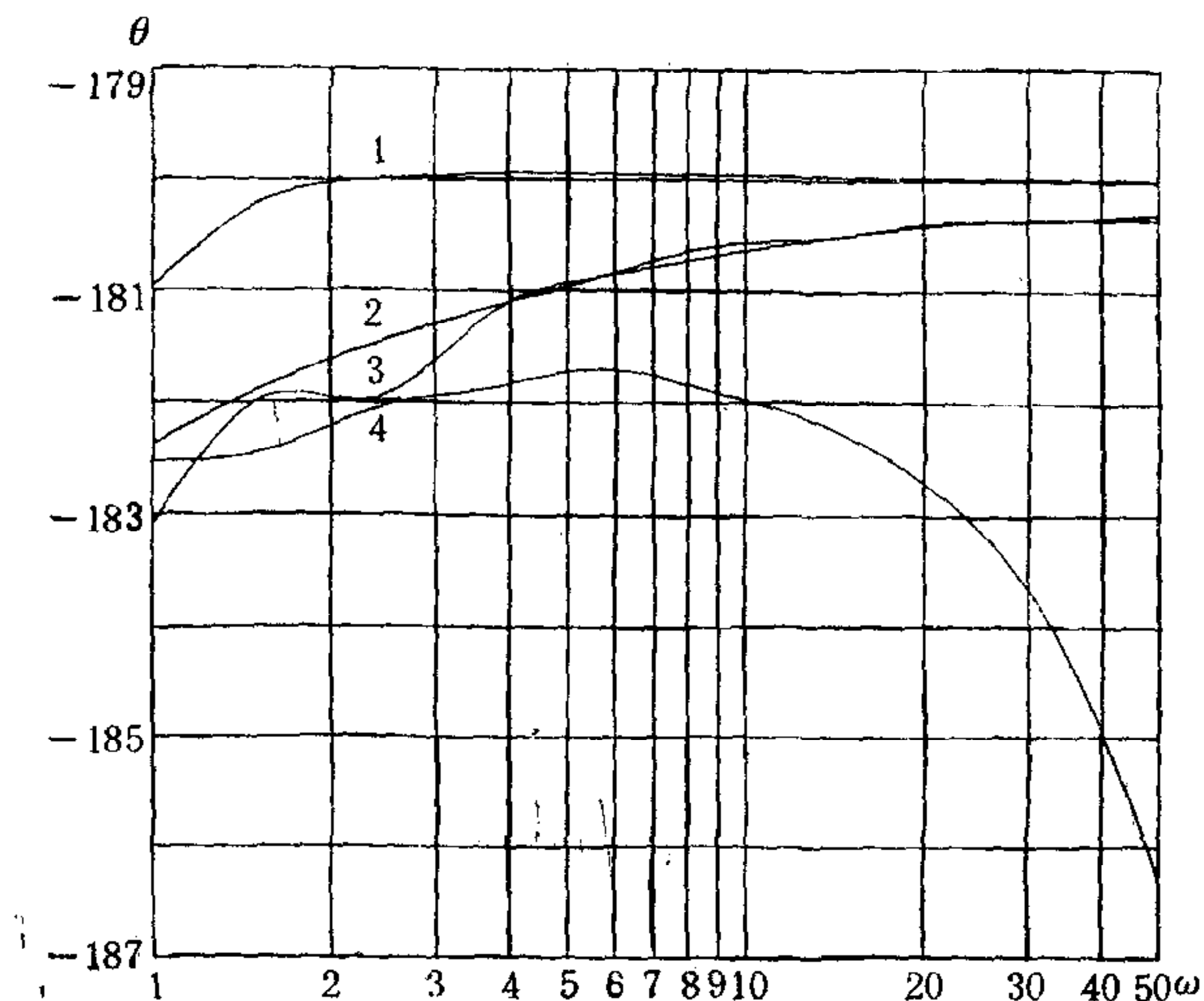


图 3 补偿效果比较

曲线 1: 理论值。曲线 2: $\hat{r}_n = \frac{5}{6} r_n + \frac{1}{6} r_{n-1} + \frac{2}{3} \dot{r}_n T$ (方法 7)。

曲线 3: $\hat{r}_n = r_n + \frac{1}{2} \dot{r}_n T$ (方法 3)。曲线 4: $\hat{r}_n = r_n$ (方法 1, 未补偿)。

参 考 文 献

- [1] 周炎勋, 王正中, 邱陶国, 模拟与混合计算技术, 国防工业出版社 (1980)。

A METHOD OF DIGITAL COMPENSATION FOR THE CONTROL SYSTEM OF THE SIMULATOR

GUO TAO

(Beijing Institute of control and Electronic Technology, 100038 Beijing)

Key words: Model test; Digital compensation; Frequency characteristic.