



两种补偿动态摩擦力的 先进控制策略¹⁾

丛 爽

De Carli Alessandro

(中国科学技术大学自动化系 合肥 230026)

(罗马大学信息与系统系 意大利罗马 00184)

摘 要 在小型 DC 伺服电机中,静摩擦力和库仑摩擦力的影响是相当明显的. 本文提出了改善系统响应特性的两种控制策略. 第一种基于摩擦力模型的在线补偿,适用于变化信号的跟踪. 第二种基于自学习原理的重复控制,适用于周期信号的跟踪. 两种控制策略均已实施在计算机控制的伺服系统中. 给出了与常规控制结果的对比.

关键词 运动控制, 先进控制策略, 摩擦力补偿, 重复控制

1 引言

在包括运动控制在内的工业应用中,经常使用小型 DC 伺服电机,这类系统的典型特征是:被控系统常常是内在稳定的,但在其工作过程中存在着静、动摩擦力,粘摩擦力以及执行机构饱和等非线性特性. 这些使得在进行速度或位置的控制,尤其在跟踪低速或不断转向运动的参考信号时,如果对静、动摩擦力补偿得不适当,则可能产生较大的系统跟踪误差.

运动控制对系统的性能要求主要表现在:1) 稳态跟踪的精确性;2) 动态响应的精确性与快速性;3) 对系统参数变化和不确定干扰的鲁棒性. 本文提出两种易于在计算机控制系统中实现的控制策略. 当系统参考信号为一变化波形时,最方便的是采用对摩擦力的在线补偿;而对于周期性的参考信号,则可以采用重复控制.

2 基于动态摩擦力补偿的控制策略

在机电工程中,以直流电机为例,其机电动态特性的运动可由下列微分方程描述

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = -B\omega(t) + K_i i_a(t) - T_f(\omega). \quad (1)$$

其中 i_a 和 ω 分别是控制电流和角速度, B 为粘摩擦力系数, J 是总惯量, $T_f(\omega)$ 为干扰力矩, K_i 为电流系数.

1) 本文根据第三届欧洲控制会议特邀文章修改而成.

众所周知,机电系统中的摩擦力是由静摩擦力、库仑摩擦力和粘摩擦力组合而成的.其中粘摩擦力与系统的速度成正比,即是速度的线性函数,人们常常把它与线性系统的建模合为一体,成为线性系统模型的一部分.分离出粘摩擦力后所作用的静动摩擦力矩 T_f ,在系统中起着干扰作用而希望加以消除.静摩擦力矩仅存在于 $\omega=0$ 时刻,它的幅值总是大于库仑摩擦力矩.一旦 $\omega \neq 0$,就只有库仑摩擦力矩作用于执行机构,其值为一常数 T_c ,作用力的方向总是与运动方向相反.当工作点落入线性区时,有下式成立:

$$T_f = T_c \operatorname{sgn}(\omega), \quad (2)$$

其中 $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数.其正、负值代表不同的运动方向.

实验表明,干扰力矩 T_f 在低速度时,是随速度的增大从静摩擦力矩逐渐以指数形式下降到库仑摩擦力矩 T_c 值的.基于这个事实,干扰力矩 T_f 的模型可由下式给出:

$$T_f(\omega) = T_c \operatorname{sgn}(\omega) + \Delta T \cdot e^{-\alpha|\omega|} \operatorname{sgn}(\omega). \quad (3)$$

所提非线性摩擦力矩模型如图 1 所示.

模型(3)与模型(2)的不同,在于它取决于伺服电机的瞬时速度值.所以当采用前向补偿器作用于系统时,对非线性摩擦力矩进行的是动态补偿.模型(3)中的 $\Delta T = T_s - T_c$, T_s 是 $\omega = 0$ 时的静摩擦力矩,可以通过测试电机的静态特性获取,当输入一斜坡力矩时,电机从零速度变为非零速度的瞬时输入力矩值即对应着 T_s 值.对线性系统模型加上所提摩擦力模型后所得到的系统进行仿真实验,通过调整 α 值使得其输出与相同输入下实际系统的输出一致,以此来获得精确的摩擦力矩的补偿模型和 α 值.

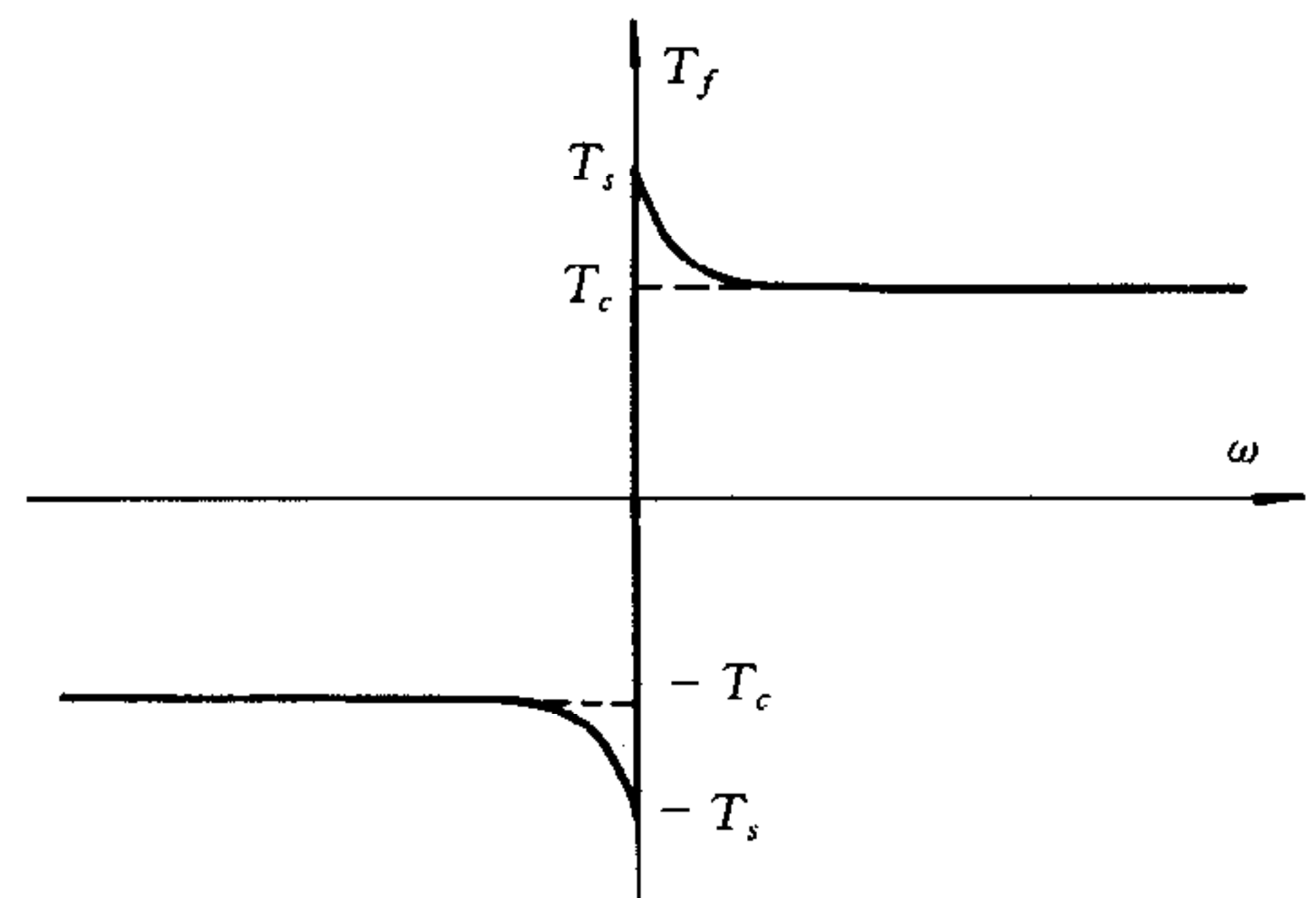


图 1 实际摩擦力矩模型

一旦非线性摩擦力得以补偿,伺服电机则呈现出线性特性.此时,可以采用常规的控制策略来获得期望的动态特性.摩擦力矩的前向补偿以及常规负反馈控制可以通过计算机控制装置来实施.在操作过程中,只要摩擦力模型的参数变化不大,就能获得满意的补偿及控制效果.当参数变化范围较大时,可以通过适当地在线修正过程加以进一步补偿.

3 新型重复控制

Inoue 等人^[1]根据内模原理提出了重复控制.即在稳定的闭环系统内设置一个可以产生与参考输入信号同周期的内部模型,从而使系统实现对外部周期参考信号的渐近跟踪并消除负载的干扰.基本重复控制器应当满足下列条件:1) 闭环系统的稳定性;2) 能够对未知形状的周期参考信号的渐近跟踪;3) 具有对负载参数变化和不确定干扰消除的鲁棒性.在闭环系统中,执行一个模型为 $G(s) = e^{-Ls} / (1 - e^{-Ls})$ (其中 L 为参考信号的周期),可以达到对外部周期信号渐近跟踪的目的.含有这个模型的控制器的系统被称为重复控制器^[2].具有这种控制器的系统被称为重复控制系统.

在文献[2]中,已证明出上述基本控制系统的稳定条件为: $\|1 - P(s)\|_{\infty} < 1$. 此处,

$P(s)$ 为被控过程的传递函数, $\|\cdot\|_{\infty} = \sup_{\omega} \bar{\sigma}(\cdot)$ 且 $\bar{\sigma}(\cdot)$ 表示矩阵的最大奇异值. 对于一般的应用系统, 其被控部分往往具有较低的频率特性, 不能在整个频率域内满足上式理想控制器的稳定性条件, 所以必须进行一些改进.

首先在时间延迟之前引入一个低通滤波器 $Q(s)$, 以改善并保证闭环系统的稳定性. 不过, 低通滤波器的加入降低了系统的跟踪性能. 这一不利因素, 可通过引入另外两个与系统误差成比例的前向回路来加以克服, 如图 2 所示. 其中, 一个加在低通滤波器的输出端, 而另一个加在控制器的输出端. 第一个前向回路用来补偿

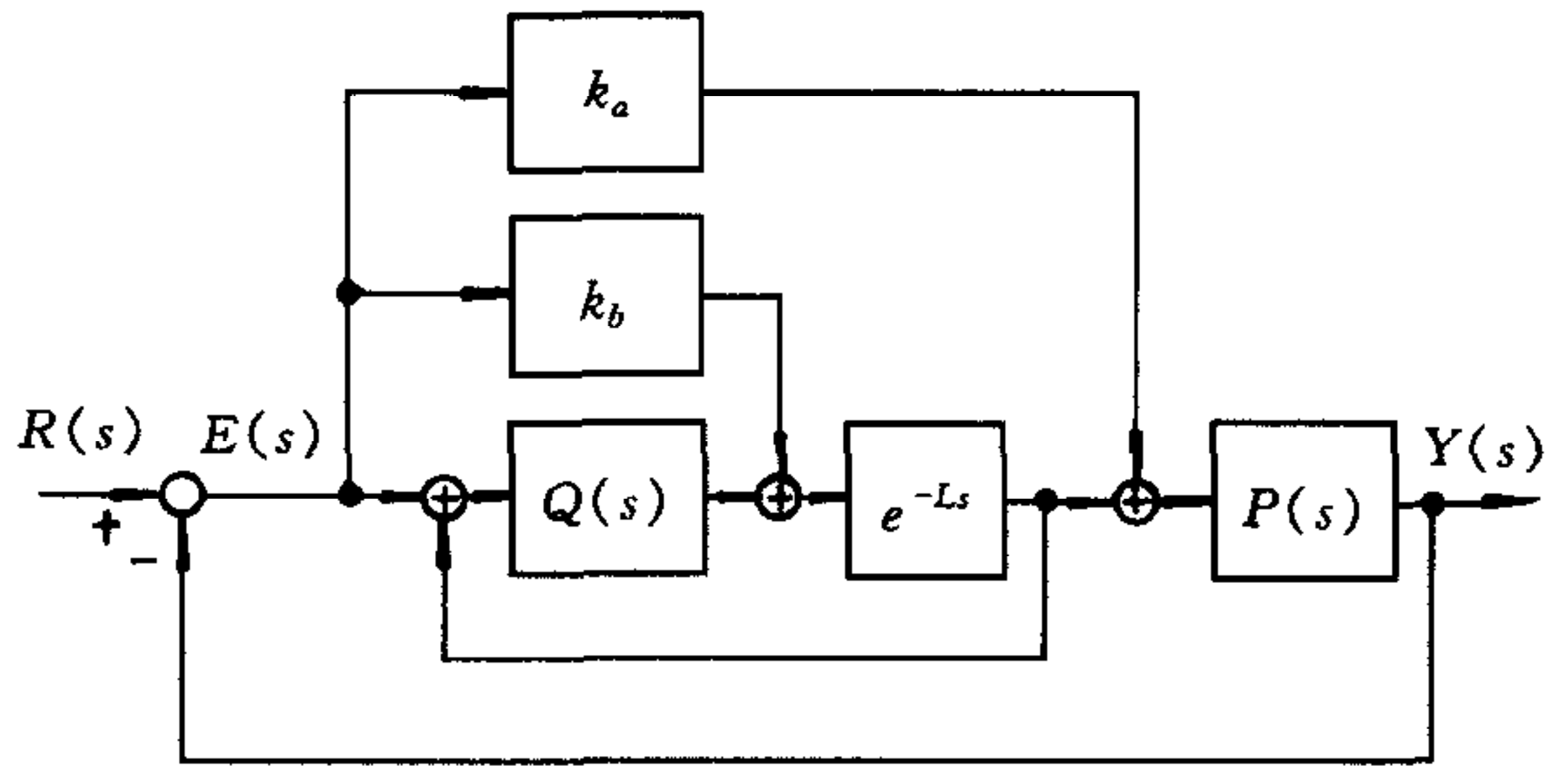


图 2 新型的重复控制系统

由低通滤波器的引入对输出信号所产生的衰减作用, 第二个用来改善重复控制器在第一个周期里的跟踪精度. 以此保证系统误差在系统稳定的前提下, 随周期而逐渐降低直至自消除.

对于改进后的重复控制系统, 其稳定条件变为

$$\left\| Q(s) \cdot \left\{ 1 - \frac{[K_b + Q(s)]P(s)}{Q(s)[1 + K_a \cdot P(s)]} \right\} \right\|_{\infty} < 1. \quad (4)$$

新型重复控制器的设计过程可以基于仿真, 通过重复下列设计过程而获得, 它包括

1) 以下列形式选择低通滤波器的传递函数 $Q(s)$

$$|Q(s)| = \frac{1}{1 + T_s}, \quad T > 0;$$

或取

$$|Q(s)| = \frac{1 + T_2 s}{1 + T_1 s}, \quad T_1 > T_2 > 0; \quad (5)$$

2) 令 K_b 为零, 在满足下列条件下决定 K_a 最大值

$$|Q(j\omega)| < \left| \frac{1 + K_a \cdot P(j\omega)}{1 + (K_a - 1)P(j\omega)} \right|; \quad (6)$$

3) 调节 K_b 值, 并在满足稳定条件(4)下, 进一步改善跟踪精度.

如果上述选择不能满足稳定性条件, 则重新修改 $Q(s)$ 并重复设计步骤, 直至满意为止.

4 实验证实与结果对比

所提两种控制策略已通过实验得以验证. 实验设备包括一个由 PWM 功率放大器提供电流控制的 DC 伺服电机系统, 一块已装入计算机中的数字信号处理器 DSP-32C 板和用来进行数模转换的 16 位 A/D、D/A 板. 伺服电机的速度是由测速器测量的. 系统的线性模型是通过采用 MATLAB 环境下的 IDENTIFICATION 工具包进行辨识获取. 系统管理与数据获取是通过 C 语言来实现.

实验是针对速度控制来进行的. 参考信号分别采用梯形波形和三角波形. 速度控制

范围为 $-2\ 000$ 到 $2\ 000\text{rpm}$. 数字采样时间为 5ms . 在电机运行的线性范围内,其动力学特性由下列传递函数给出

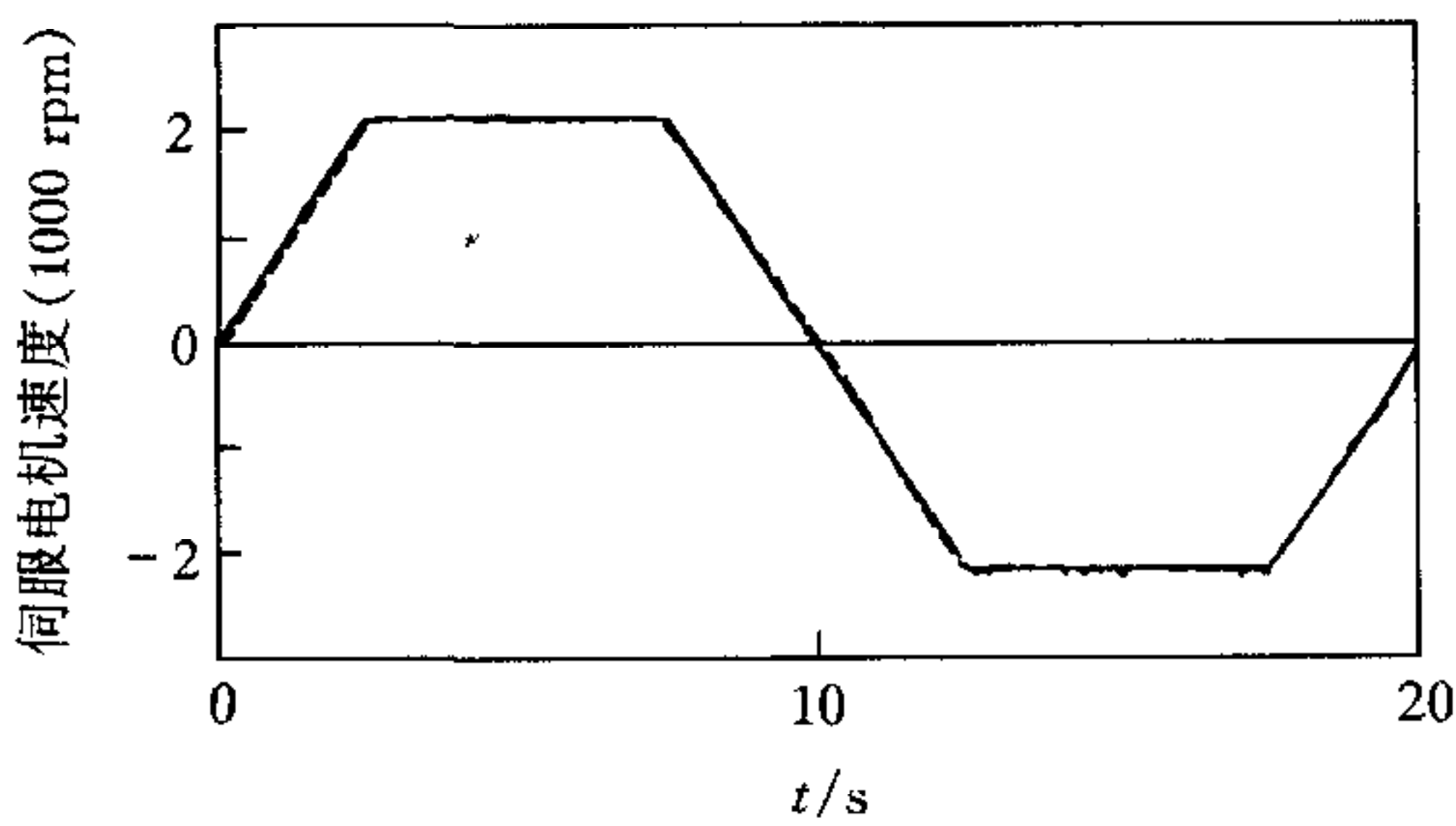
$$P(s) = \frac{1.6}{s + 1.7} \quad (7)$$

根据节 3 所提出的设计步骤,取重复控制器中的低通滤波器的传递函数为

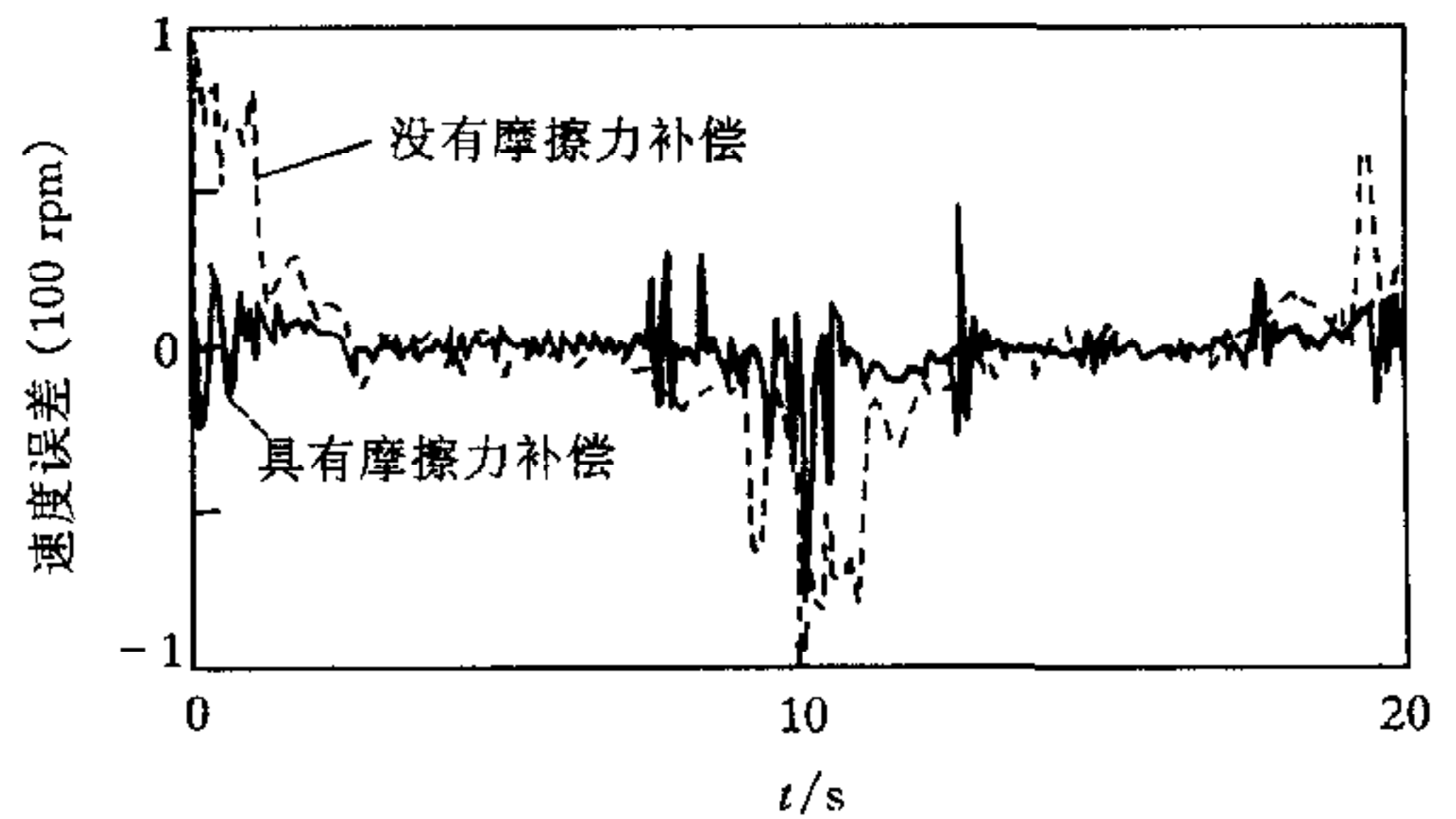
$$Q(s) = \frac{1}{1 + 0.02s} \quad (8)$$

并通过仿真实验和条件(4),(6)式,最后确定 K_a, K_b 值分别为 $35, 20$.

为了便于对比,一个采用极点配置法设计的 PI 控制器也应用于同一伺服电机. 由不同的控制方式所得到的被控变量的波形如图 3, (a) 为在一个常规的 PI 控制器控制下,没有加入摩擦力补偿和加入动态摩擦力补偿时,对梯形输入信号的响应. 在图 3(b)中给出了其误差信号以便于对比,从中很明显地展现出两种响应效果之间的差别. 摩擦力补偿后,响应在参考信号改变方向时,把由非线性摩擦力所引起的、而常规控制器难以消除的误差得以消除,大大地减少了系统的跟踪误差,提高了精度,改善了系统的动态性能.



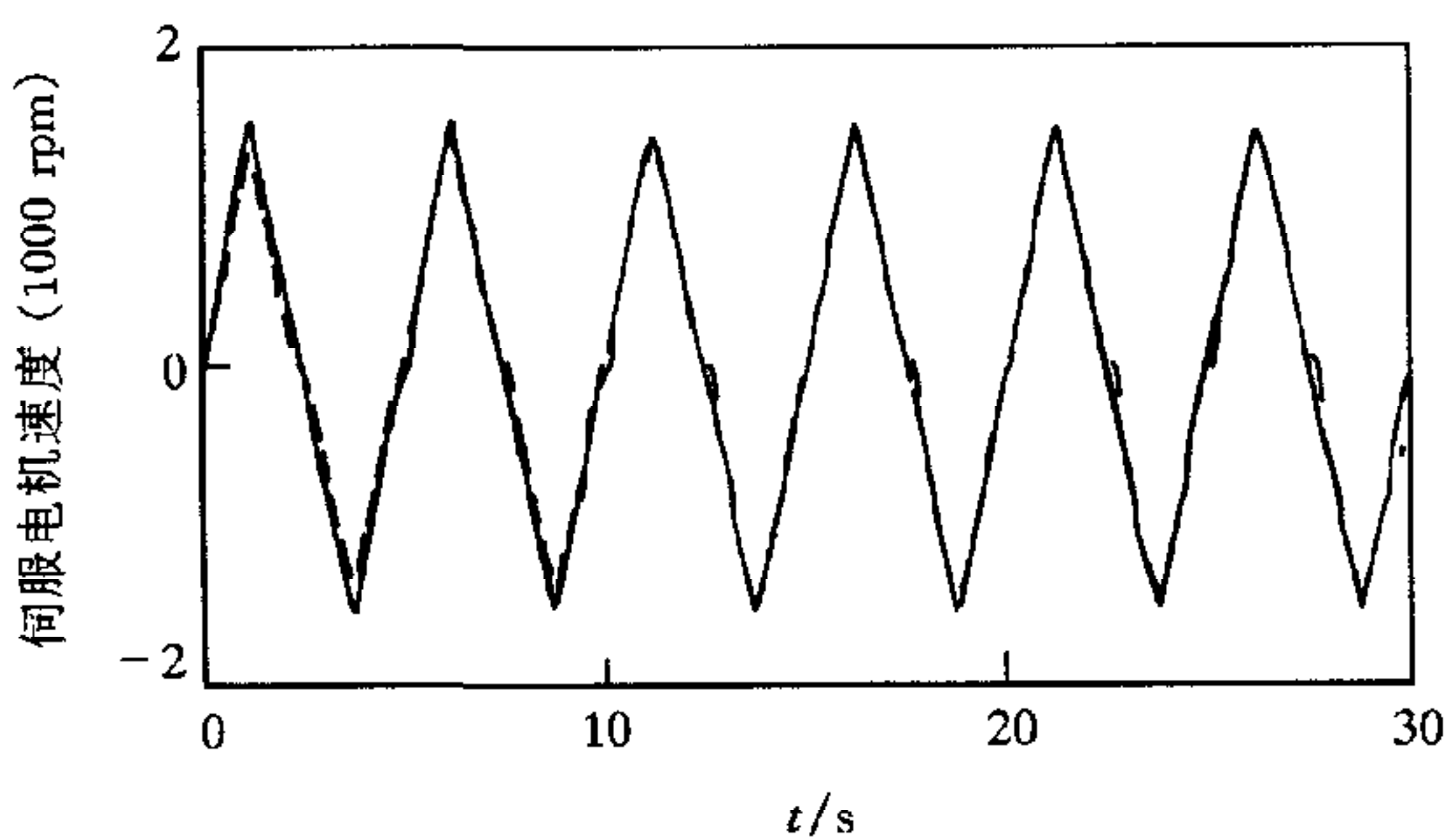
(a) 对变化信号的输入信号与输出响应



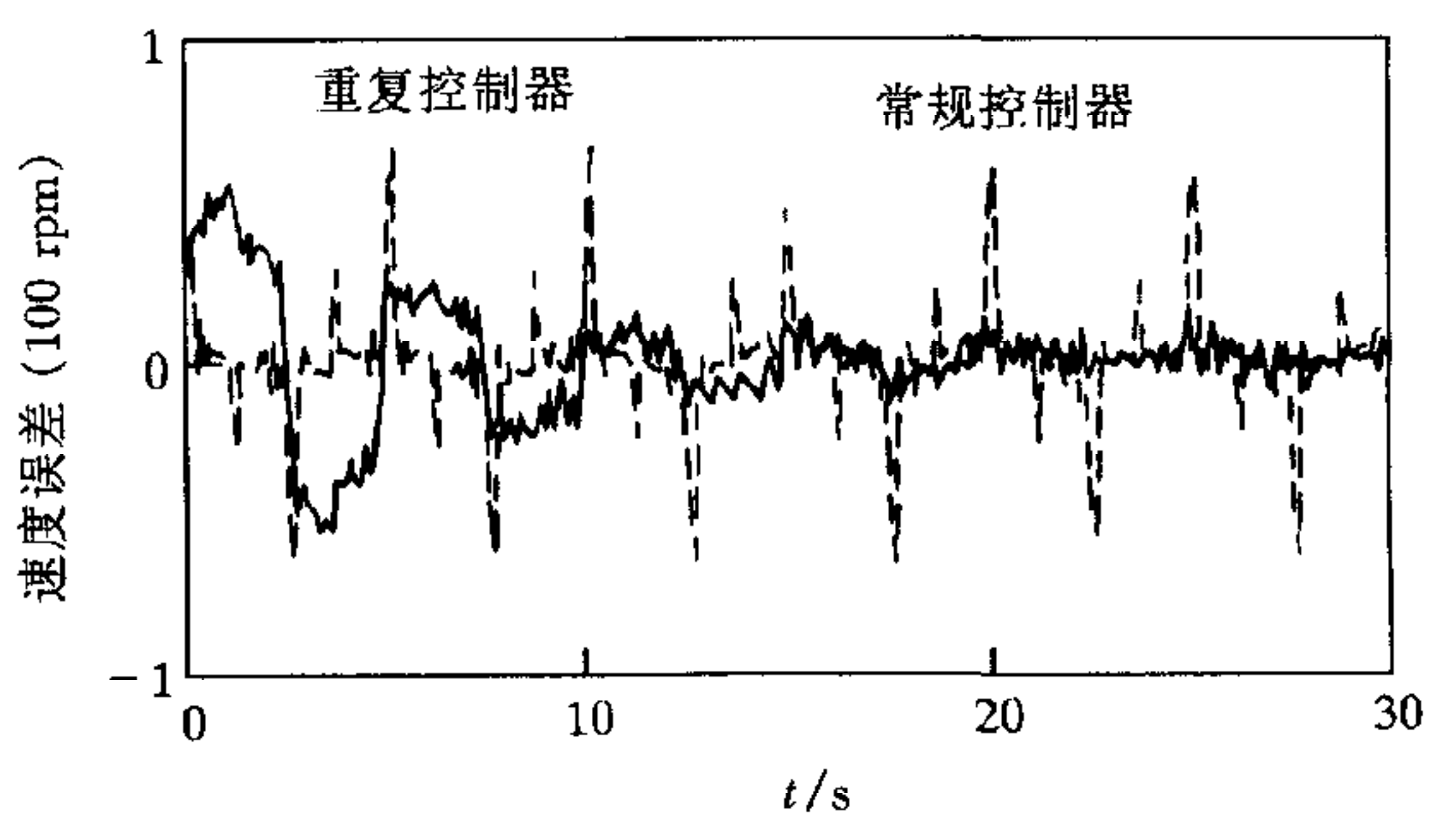
(b) 具有和没有摩擦力补偿的分别对图 3(a)的响应误差

图 3

图 4 是对重复控制系统的实验. 图 4(a)为采用 PI 控制器和重复控制器的伺服电机速度的响应,两个响应之间的误差如图 4(b)所示. 图中虚线为 PI 控制器控制的速度误差



(a) 重复控制的输入信号与输出响应



(b) 常规控制器与重复控制器分别对图 4(a)的响应误差

图 4

差. 由于采用了比例-积分控制器, 对一阶速度控制系统的常数干扰, 系统的输出误差为零. 但每当输入信号从正变为负或相反变化时, 由于非线性摩擦力的影响, 系统误差有一个很大的跳跃. 而当采用重复控制器控制时, 系统误差是随着时间而逐渐趋于零的. 实际上, 在较少的周期内, 稳态误差得以大幅度的减少.

5 结语

在小型 DC 伺服电机中, 静态和库仑摩擦力一般是非常明显的, 此时采用常规控制策略是难以达到高精度性能要求的. 被控系统性能的改善, 可以通过实施摩擦力补偿策略来达到. 控制策略可根据参考信号的形式来确定. 本文提出的两种控制策略已在实验室装置上得到证实, 与常规控制策略所得结果相比, 在小型电机中, 其性能指标得到了显著的改善.

参 考 文 献

- 1 Inoue T *et al.* High accuracy control of servomechanism for repeated contouring. In: Proc. 10th Annual Symp. Incremental Motion Contr. Syst. and Devices, 1981. 258—292
- 2 Hara S, Yamamoto Y, Omata T, Nakano M. Repetitive control system; A new type servo system for periodic exogenous signals. *IEEE Trans. Autom. control*, 1988, **33**(7):659—668
- 3 De Carli A, Cong S, Maticchioni D. Dynamic friction compensation in servodrives. In: Proceedings of the 3rd IEEE Conference on Control Applications, Glasgow, August 1994. 193—198
- 4 De Carli Alessandro, Cong Shuang. Strategies for dynamic friction compensation. In: Proceedings of 3rd European Control Conference, Rome, September 1995. 2730—2735

TWO ADVANCED CONTROL STRATEGIES FOR DYNAMIC FRICTION COMPENSATION

CONG SHUANG

(Dept. of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

DE CARLI ALESSANDRO

(Dept. of Computer and System Science, University of Rome "La Sapienza", Rome 00184)

Abstract The effects of static and coulomb friction are obvious in small size DC servomotors. The paper proposes two control strategies for improving the systems performance. The first, the on-line friction model based compensation, is suitable for tracking variable signals. The second, the repetitive control, based on self-learning principles, is suitable for tracking periodic signals. These two control strategies have been implemented on computer-based servo devices. The comparisons with conventional control results are given.

Key words Motion control, advanced control strategy, friction compensation, repetitive control