

位置伺服系统外干扰的一种预见补偿算法

谭跃钢

(武汉工业大学机电学院·武汉, 430070)

摘要: 位置伺服系统的外界干扰虽然各种各样,但是有的干扰是事先可以确知的。本文就是对这种事先能确知的外界干扰,应用预见控制的理论,给出了一种预见补偿算法。通过实际的数值仿真和实验的分析,表明只要选取合适的预见信息量,这种对已知外界干扰的预见补偿算法就可消除该干扰对系统的影响作用。从而说明了这种预见补偿算法的有效性和实际应用的可行性。

关键词: 位置伺服系统; 预见控制; 干扰补偿

1 前言

我们知道,位置伺服系统所受干扰的类型是多种多样的。在实际中,有一些干扰是事先可以确知的。例如机器人移动中的路障干扰、电机启停引起的电荷或电磁干扰等等,这些干扰虽然在未来时间才会作用影响到系统,但在系统的当前运行时刻往往都是已知的了。对这种能事先确知的干扰,我们可以考虑采用当前的补偿控制方式来加以克服。这就像控制操作汽车运行一样,当发现前方道路有凹凸等情况时,就可在当前的操作中采取适当的补偿措施,使汽车在道路凹凸等的影响下能平稳的运行。本文就是依据这种思想来展开研究的。通过分析可以看到这种对已知外界干扰的预见补偿算法的有效性和可行性。

2 位置伺服系统在外干扰作用下的数学模型

图1所示为直线型直流无刷电机^[1]构成的一个位置伺服装置。工作时定子绕组在控制电流 $i(t)$ 作用下,所产生的电磁力可推动滑块按要求的位移 $x_p(t)$ 和速度 $x_v(t)$ 运动。当考虑滑块上受到外力干扰 $d(t)$ 时,经推演可得该位置伺服系统的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p(t) \\ \dot{x}_v(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{D}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p(t) \\ x_v(t) \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_F}{M} \end{bmatrix} i(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{M} \end{bmatrix} d(t).$$

(1a)

或写为

$$\dot{X}(t) = A_c X(t) + B_c i(t) + E_c d(t). \quad (1b)$$

式中 M ——滑块的总质量,为 $M = 4.75\text{kg}$; D ——总的粘性摩擦系数,为 $D = 23\text{Nm/s}$; K_F ——电机的推力系数,为 $K_F = 3.8\text{N/A}$ 。

此时系统的输出方程为

$$x_p(t) = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_p(t) \\ x_v(t) \end{bmatrix} = CX(t). \quad (2)$$

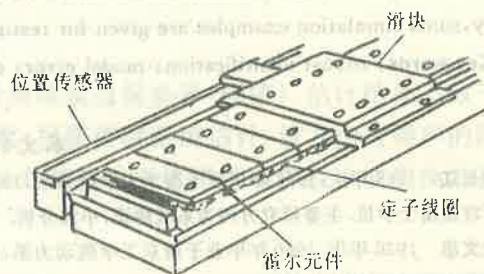


图1 直线型直流电机的位置伺服装置

对(1)式和(2)式经离散化(离散周期取 1 毫秒)后为

$$X(k+1) = AX(k) + Bi(k) + Ed(k), \quad (3)$$

$$x_p(k) = CX(k). \quad (4)$$

现在设该位置伺服系统的位置输出目标为 $R(k)$, 则系统的输出位置误差 $e(k)$ 为

$$e(k) = R(k) - x_p(k) = R(k) - CX(k). \quad (5)$$

考虑系统的外界干扰 $d(k)$ 从当前时刻 k 到未来 $(k + M_d)$ 时刻之间是已知的. 为保证位置伺服系统的位置控制精度和对已知时间内的外干扰进行修正补偿. 对(3)式表示的系统, 取新的状态向量 $X_d(k) = \{[e(k) \quad \Delta X^T(k) \quad \Delta d(k) \quad \Delta d(k+1) \cdots \Delta d(k+M_d)]^T\}_{[3+(M_d+1)] \times 1}$.

式中的 Δ 为一阶差分算符. 这样就可推演得到位置伺服系统在外力干扰作用下的扩大状态方程为

$$\begin{aligned} X_d(k+1) &= \begin{bmatrix} \Phi & G_{pd} \\ 0 & A_d \end{bmatrix} X_d(k) + \begin{bmatrix} G \\ 0 \end{bmatrix} \Delta i(k) \\ &\quad + \begin{bmatrix} G_R \\ 0 \end{bmatrix} \Delta R(k+1). \end{aligned} \quad (6)$$

式中

$$G_{pd} = [G_d \quad 0 \quad \cdots \quad 0]_{3 \times (M_d+1)},$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & -CA \\ 0 & A \end{bmatrix}_{3 \times 3}, \quad G = \begin{bmatrix} -CB \\ B \end{bmatrix}_{3 \times 1},$$

$$G_d = \begin{bmatrix} -CE \\ E \end{bmatrix}_{3 \times 1}, \quad G_R = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}_{3 \times 1},$$

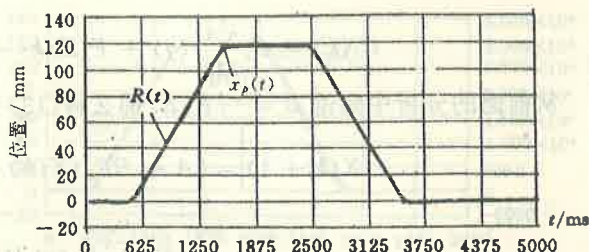
$$A_d = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ & & 0 & 1 & 0 \\ & & & \ddots & \ddots \\ & & & & 0 & 1 \\ & & & & & 0 \end{bmatrix}_{(M_d+1) \times (M_d+1)}$$

3 外干扰的预见补偿算法

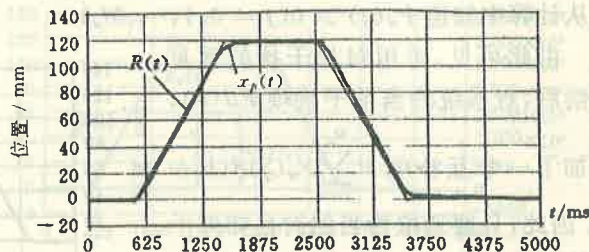
对(6)式, 设位置目标信号 $R(k)$ 一定, 即认为 $\Delta R(k+1) = 0$. 此时我们来考虑如下的二次型评价函数:

$$\begin{aligned} J = \sum_{j=0}^{\infty} \{ & X_d^T(k) \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} X_d(k) \\ & + h(\Delta i(k))^2 \}. \end{aligned} \quad (7)$$

式中 Q 为 3×3 阶半正定加权矩阵. h 为正的加权系数. 显然, 由(6)式和(7)式提出的控制问题, 实际上是一个最优调节器问题. 那么, 依据最优调节器的解, 由(7)式可求得该位置伺服系统在

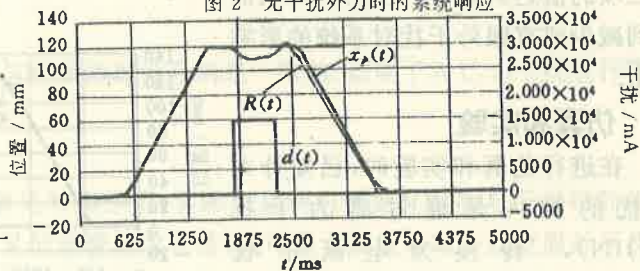


(a) 仿真结果

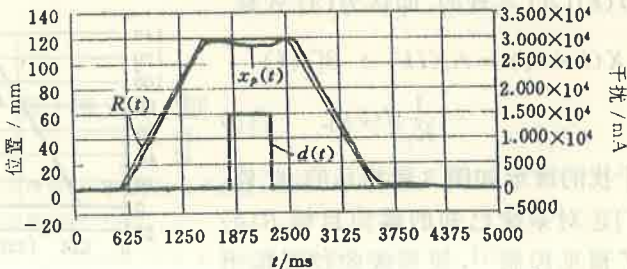


(b) 实验结果

图2 无干扰外力时的系统响应



(a) 仿真结果



(b) 实验结果

图3 有外力干扰时的系统响应

外力干扰作用下的修正补偿最优控制输入 $\Delta i^*(k)$ 为

$$\Delta i^*(k) = F_0 X_0(k) + \sum_{j=0}^{M_d} F_d(j) \Delta d(k+j). \quad (8)$$

$$\text{式中 } X_0(k) = [e(k) \quad \Delta X^T(k)]^T, \quad (9)$$

$$F_0 = -(h + G^T P G)^{-1} G^T P \Phi, \quad (10)$$

$$F_d(j) = -(h + G^T P G)^{-1} G^T [(\Phi + G F_0)^T]^j P G_d, \quad (11)$$

$$P = Q + \Phi^T P \Phi - \Phi^T P G (h + G^T P G)^{-1} G^T P \Phi. \quad (12)$$

又令 $F_0 = [F_e \quad F_r]$, 并设系统的初始条件为零, 即 $X(0) = 0, e(0) = 0, i^*(0) = 0, d(0) = 0$. 则(8)式又可写为

$$i^*(k) = F_e \sum_{j=1}^k e(j) + F_r X(k) + \sum_{j=0}^{M_d} F_d(j) d(k+j). \quad (13)$$

从前面的分析中知道 $B = -K_F E$. 那么将(13)式代入(3)式后, 就得

$$X(k+1) = (A + B F_r) X(k) + B F_e \sum_{j=1}^k e(j) + B \left[\sum_{j=0}^{M_d} F_d(j) d(k+j) - \frac{1}{K_F} d(k) \right]. \quad (14)$$

又从计算中知道 $F_d(j) > 0 (j = 0, 1, \dots, M_d)$.

由此可见, 采用对外干扰的预见补偿后, 对系统的当前干扰项 $E d(k)$,

增加了一个互补项 $B \sum_{j=0}^{M_d} F_d(j) d(k+j)$. 因此, 只要选取恰当的对已知外干扰的预见步数 M_d , 就可使(14)式右边第三项的值达到最小, 甚至为零. 从而达到减少或克服外干扰对系统的影响作用.

4 仿真和实验

在进行仿真和实验时, 已知外力干扰的加入是通过将力干扰 $d(k)(N)$, 转换为电流干扰 $\frac{1}{K_F} d(k)(A)$ 实现的. 即认为(3)式是

$$X(k+1) = A X(k) + B \left[i(k) - \frac{1}{K_F} d(k) \right]. \quad (15)$$

其干扰的波形如图3所指示的. 此外, 我们还对系统已知的输出目标 $R(k)$ 作了预见控制^[2], 使系统的位置输出能与目标一致, 以便讨论对于干扰作用下的补偿作用. 计算时取

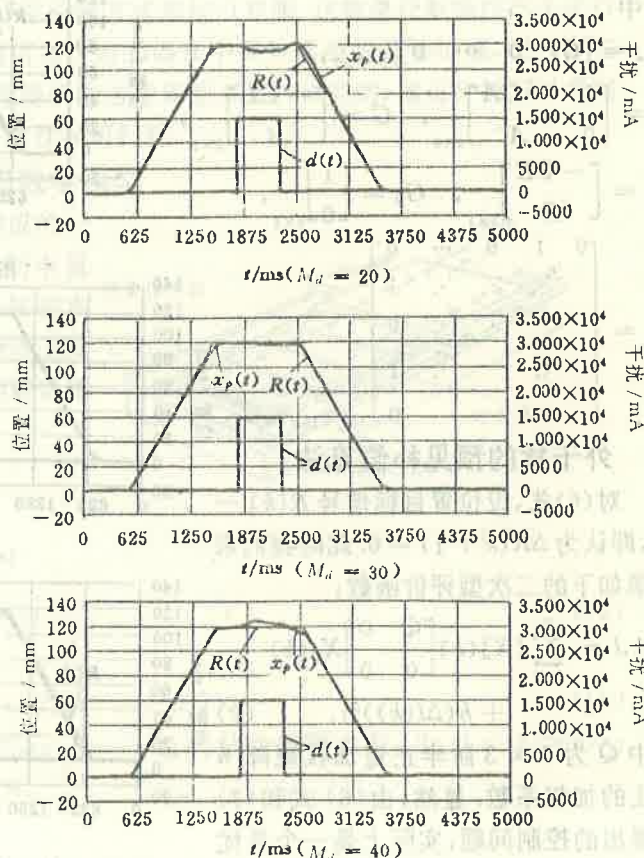


图4 外力干扰的预见补偿下的系统仿真响应

$$Q = \text{diag}(20 \quad 2.5 \times 10^6 \quad 1), \quad h = 50.$$

当伺服系统未受到干扰外力作用时的仿真和实验结果分别如图 2(a)、(b)所示. 可见此时系统的位置输出 $x_p(t)$ 能严格地按目标位置 $R(t)$ 响应. 当伺服系统受到干扰外力影响, 但未进行对干扰的预见补偿控制, 这时得到的仿真和实验结果分别如图 3(a)、(b)所示. 可见这时系统在外力干扰的影响下, 其位置输出 $x_p(t)$ 偏离了位置目标 $R(t)$. 表明系统在外力干扰作用下, 其响应输出受到了严重的影响.

当对外力干扰进行预见补偿控制时, 得到的仿真和实验结果分别如图 4 和图 5 所示. 由此看到: 在对外力干扰进行预见补偿后, 随着预见步数 M_d 的增加, 其补偿修正的效果就越好. 在预见步数 M_d 超过某个数值后, 其补偿修正作用就转换为对系统的一种新干扰. 这就表明只要选取合适的对干扰的预见步数 M_d , 就能很好地补偿修正干扰对系统的影响作用.

以上分析表明, 仿真和实验结果与前面的理论分析是一致的, 证明了对已知干扰进行预见补偿控制的有效性和可行性.

5 结 论

对位置伺服系统已知外干扰的预见补偿作用, 实际上是利用预见补偿项与干扰项的相互作用来实现的. 只要预见补偿项的预见信息量选取合适, 就可最大限度地减少或克服外干扰对系统的影响作用, 从而可提高系统的运行平稳性. 这种对已知外干扰的预见补偿控制方法是有效的, 具有实际应用的价值.

参 考 文 献

- 1 白木学, 宫尾修美. リニアサ・ボ・クとシステム設計. 日本: 総合電子出版, 1986
- 2 土谷武士, 江上正. デジタル予見制御. 日本: 産業図書, 1992
- 3 黒玉慎三, 須田信英. システム制御のためのマトリクス理論. 日本: 計測自動制御学会, 1992

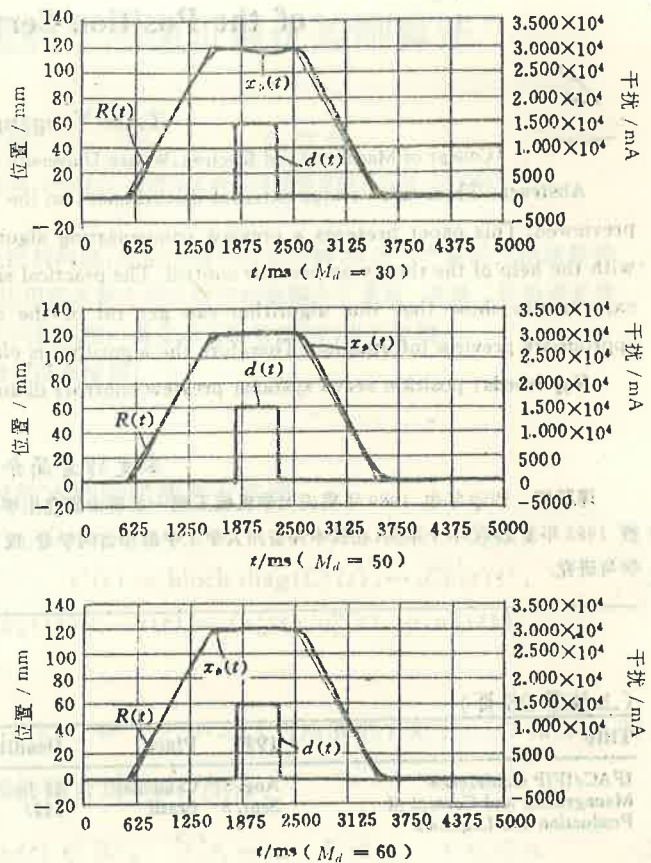


图 5 外力干扰的预见补偿下的系统实验响应

A Preview Compensating Algorithm of External-Disturbances of the Position Servo System

TAN Yuegang

(College of Machinery and Electron, Wuhan University of Technology • Wuhan, 430070, PRC)

Abstract: There are various external-disturbances on the position servo system, but some of these can be previewed. This paper presents a preview compensating algorithm for the foreknown external-disturbances with the help of the theory on preview control. The practical simulation of numerical value and the analysis of experiments show that this algorithm can get rid of the disturbances on the system only if selecting appropriate preview information. Therefore the algorithm is effective and feasible.

Key words: position servo system; preview control; disturbance compensation

本文作者简介

谭跃钢 1959年生, 1989年重庆大学机械工程一系硕士研究生毕业, 同年进入武汉工业大学机电学院任教, 现为副教授, 1993年至1994年一年间, 在日本神奈川大学工学部作访问学者。现主要从事预见控制技术, 机械电子一体化技术等教学与研究。

(上接第 95 页)

Title	1997	Place	Deadline	Further Information
IFAC/IFIP Conference Management and Control of Production and Logistics	Aug. 31- Sept. 3	Campinas Brazil	15 Jan. 1997	Mr. Roberto de Oliveira CTI, Rodovia D. Pedro I (SP-65) km 143. 6. Caixa Postal 6162 13081-970 Campinas. SP. Brazil FAX +55 19 240 20 29 e-mail, MCPL97@ia.cti.br http://mcp197.ensieg.fr
IFAC Symposium Robot Control	Sept 3-5	Nantes France	15. Dec. 1996	Prof. W. Khalil LAN-Ecole Centrale de Nantes F-44072 Nantes Cedex France FAX +33 40 74 74 06 e-mail, Khalil@lan.ec-nantes.fr http://www.ec-nantes.fr
IFAC Workshop New Trends in Design of Control Systems	Sept. 7-10	Smolenice Slovakia	31 Jan. 1997	IFAC Workshop'97 Ms. Alena Kozakova, Fac. of El. Engg. Ilkovicova 3. SK-81219 Bratislava, Slovakia FAX+42/7/72 9734 e-mail;ntdcs@kasr.elf.stuba.sk
IFAC Conference Manoeuvring and Control of Marine Crafte-MCMC'97	Sept. 10-12	Brijuni Croatia	1 Feb. 1997	Prof. Z. Vukic, University of Zagreb Fac. of El. Engg. and Computing Unska 3. HR-1000 Zagreb. Croatia FAX +385/1/6129809 e-mail;zoran.vukic@fer.hr
IFAC Symposium(6th) Automated Systems Based on Human Skill-Joint Design of Technology and Organization	Sept. 17-19	Kranjska Gora Slovenia	25 Sept. 1996	Dr. Janjko Cernetic J. Stefan Institute, POB 3000, Jamova 39 SLO-1001 Ljubljana. Slovenia FAX +386/61/219 385 Fax +42/7/72 9734 e-mail;janko.cernetic@ijs.si