

文章编号: 1001-0920(2002)03-0375-03

应用无损耗电阻器的直流电机速度控制方法研究

吴建华, 迟德选, 殷洪义, 徐心和

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 将无损耗电阻器应用于直流电动机调速系统, 采用瞬时值补偿控制方法, 通过控制无损耗电阻器的输出, 实现了电动机的转速控制, 并改善了速度控制系统的动态特性。无损耗电阻器控制方案适用于要求无超调且响应快的系统, 如某些机器人速度-位置控制系统和机械加工控制系统。

关键词: 无损耗电阻器; 开关阵列; 速度控制; 超调量

中图分类号: TP 13

文献标识码: A

Study on the speed control of DC motors by loss-less resistors

WU Jian-hua, CHI De-xuan, YIN Hong-yi, XU Xin-he

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The loss-less resistor (LLR) is applied to a DC motor speed control system. A instantaneous value compensation algorithm based on LLR is proposed. The change of the motor speed is realized by controlling the output of the LLR, and the energy loss in the system is reduced compared with using a power amplifier. Dynamic characteristics of the system are also improved. A overshoot of the system is eliminated and the response time of the system is reduced. The control method is suitable for systems that are demanded to have no overshoot but to have quite quick response, such as the robot speed-position control system and some mechanical process control systems.

Key words: loss-less resistor; switch matrix; speed control; overshoot

1 引言

无损耗电阻器(LLR 或 LLR)是具有 IU 电阻特性且不消耗电能理想元件^[1,2]。LLR 由理想开关阵列和电路储能元件组成^[3], 通过控制 LLR 的开关阵列的导通状态, 可得到所期望的输出, 作用到电路和系统中能实现电阻器的某些功能, 以减少电路系统中的能量损耗。

我们在分析了 LLR 特性的基础上建立了 LLR 的数学模型^[4], 基于直流电动机的变电阻调速方式,

将无损耗电阻器应用于直流电动机的速度控制系统。由于 LLR 可有任意形式的输出, 所以采用瞬时值补偿控制方法, 可改变电动机的转速, 并能改善系统的动态性能。仿真实验取得了预期的结果。

2 无损耗电阻器的数学模型

电压型无损耗电阻器的电路原理如图 1 所示, 它由电容元件和一个理想开关阵列($K1, K2, K3, K4$) 组成。其中, a 和 b 为输出端, $u_{c_0}(t)$ 为输出量, 恒

收稿日期: 2001-07-13; 修回日期: 2002-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(69372039)

作者简介: 吴建华(1953—), 女, 辽宁阜新, 副教授, 从事电工新技术、数字信号处理等研究; 徐心和(1940—), 男, 河北山海关人, 教授, 博士生导师, 从事机器人、智能控制等研究。

流源 $i_s(t)$ 、理想开关阵列的状态转换时间 $t_k (k = 1, 2, \dots, N)$ 和开关阵列的状态转换周期 T_P 为控制量。

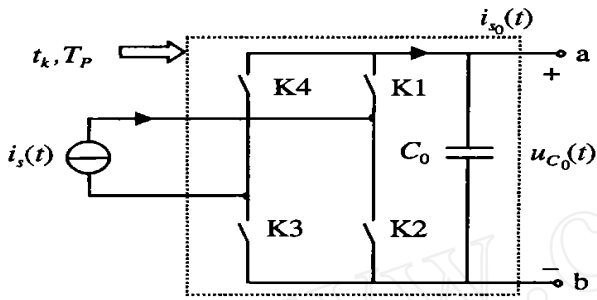


图1 无损耗电阻器原理

根据电路原理,图1中的无损耗电阻器的输出

$$u_{C_0}(t) = u_{C_0}(t_0) + \frac{1}{C_0} \int_{t_0}^t i_{s_0}(t) dt \quad (1)$$

设 M_1 表示理想开关阵列的状态是 K_1 与 K_3 闭合, K_2 与 K_4 断开; M_2 表示 K_2 与 K_4 闭合, K_1 与 K_3 断开。在第 k 个开关阵列状态转换周期内, M_1 状态持续时间为 t_k , M_2 状态持续时间为 $T_P - t_k$ 。

为便于分析,设图1中 $i_s(t)$ 为一恒定值 I_S , 并设每个开关转换周期 T_P 内, 开关阵列的状态先是 M_1 方式, 后是 M_2 方式。这样, 当 I_S, T_P 和 C_0 确定后, 通过改变开关阵列的开关转换时间 $t_k (k = 1, 2, \dots, N)$, 便可控制无损耗电阻器的输出电压 $u_{C_0}(t)$ 以不同形式输出。

经推导, 可得 $u_{C_0}(t)$ 在第 k 个周期的平均值^[4]

$$\bar{u}_{C_0}(kT_P) = u_{C_0}(t_0) + \frac{I_S}{C_0} \left(\sum_{k=1}^k 2t_k - kT_P + \frac{1}{2}T_P - \frac{t_k}{T_P} \right) \quad (2)$$

当开关状态的转换周期 T_P 足够小时, 对于 $k = 1, 2, \dots, N$, 序列数 $\bar{u}_{C_0}(kT_P)$ 可逼近 $u_{C_0}(t)$ 。由式(2)得

$$t_k = T_P - \left[T_P^2 - \left\{ \frac{C_0}{I_S} [u_{C_0}(kT_P) - u_{C_0}(t_0)] + kT_P - \frac{1}{2}T_P - \sum_{k=1}^{k-1} 2t_k \right\}^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

由式(3), 根据 $u_{C_0}(t)$ 的期望特性, 可确定相应的开关状态转换时间 $t_k (k = 1, 2, \dots, N)$ 。式(2)和式(3)即为图1无损耗电阻器端口特性的数学模型 ($i_s(t)$ 为恒定值时)^[4]。

3 无损耗电阻器在直流电动机调速系统中的应用

无损耗电阻器用于直流电动机调速的原理如图2所示。其中, $u_g(t)$ 为速度给定信号, $u_o(t)$ 为测速发电机输出电压, $u_a(t)$ 为电枢电压, 激磁磁通为恒定量, 理想电压源 E 对应于电动机的额定转速。

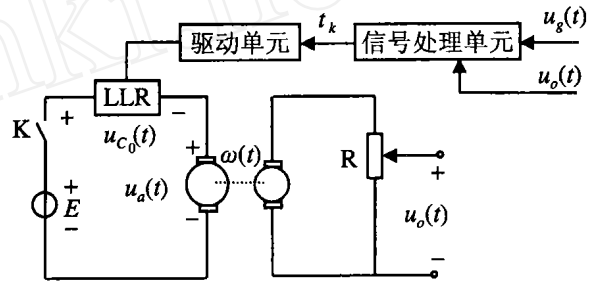


图2 无损耗电阻器用于电动机速度控制原理

图2所示他激直流电动机-测速发电机组空载时的数学模型为

$$\frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{1}{k_e(T_m T_e s^2 + T_m s + 1)} \quad (4)$$

式中, T_m 为机组的机电时间常数, T_e 为电动机电枢回路的电磁时间常数, k_e 为反电势系数。如图2所示, 电枢电压 $u_a(t) = E - u_{C_0}(t)$ 。根据速度给定信号 $u_g(t)$ 调整 $u_{C_0}(t)$, 可得到相应的电枢电压以控制电机转速。设该系统具有衰减振荡的特性, 对系统的动态特性要求是消除超调量, 并减少响应时间。

由电路理论可知, 当图1中 C_0 足够大时, 图2中 LLR 的输出可看成是理想受控电压源, 系统的输出响应 $u_o(t)$ 可看成是由 E 和 $u_{C_0}(t)$ 共同作用产生的。 $E \cdot 1(t)$ 单独作用产生的响应为 $\omega_E(t) \cdot 1(t)$, $u_{C_0}(t)$ 单独作用产生的响应为 $\omega(t) \cdot u_b(t)$, 则二者共同作用产生

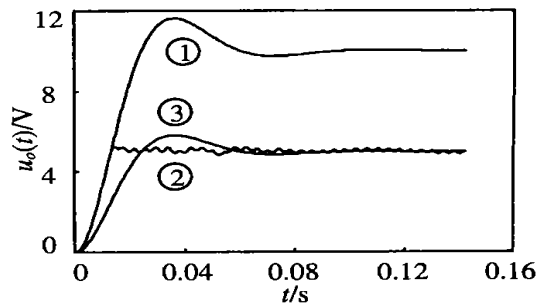


图3 系统输出 $u_o(t)$ 曲线

的响应为 $u_o(t)$ 。设系统的期望输出值(对应某一转速值)为 $k_g u_g$, 若使 $u_b(t) = [k_g u_g - u_E(t)] \cdot 1(t - t_0)$, t_0 为 $u_b(t)$ 产生的初始时刻, 则这时的系统输出 $u_o(t)$ 如图 3 中曲线 所示。由于 $u_{C_0}(t)$ 的补偿作用, 系统的输出达到期望输出值(稳态值) $k_g u_g$, 系统的动态特性消除了超调量, 并且缩短了响应时间。

信号处理单元根据系统的数学模型和给定的速度信号 $u_g(t)$, 计算出补偿响应 $u_b(t) = [k_g u_g(t) - u_E(t)] \cdot 1(t - t_0)$ 。根据系统的数学模型, 由 $u_b(t)$ 计算出 $u_{C_0}(t - t_0) \cdot 1(t - t_0)$, t_0 为 $u_E(t)$ 第 1 次达到期望输出值(稳态值) $k_g u_g$ 的时间。根据式(3) 计算出 $t_k (k = 1, 2, \dots, N)$ 。驱动单元将根据序列值 t_k 控制开关阵列的转换。

对于每次改变速度给定信号, 在检测到输出转速信号值达到 $k_g u_g$ 时, 无损耗电阻器便开始动态补偿过程(可由一组控制开关实现)。同时根据给定速度信号变化值 Δu_g 的正负, 通过正反向开关决定 E 加在电路中的极性, 以控制电机的加减速和正反转。控制策略是设 $t_1 < t_2$, $\Delta u_g = u_g(t_2) - u_g(t_1)$ 。当 $\Delta u_g > 0$ 时, E 正向加入; 当 $\Delta u_g < 0$ 时, E 反向加入。这些处理都是由信号处理单元和驱动单元完成的。

4 实验结果

实验系统如图 2 所示。电动势 $E = 10 \text{ V}$, 无损耗电阻器的开关阵列状态转换周期 $T_P = 0.002 \text{ s}$, $\frac{C_0}{I_s} = \frac{1}{3} 10^{-4} (\text{F/A})$ 。他激直流电动机的主要参数为 $T_e = 0.0099 \text{ s}$, $T_m = 0.0101 \text{ s}$, $K_e = 0.42 \text{ V/(kr/min)}$ 。

电动机-测速发电机系统的数学模型描述如下

$$\frac{U_a(s)}{U_a(s)} = \frac{1}{10^{-4} s^2 + 0.0101 s + 1}$$

给定的速度信号电压 $u_g = 5 \text{ V}$, 输出响应 $u_o(t)$ 的曲线如图 3 中曲线 所示。未加动态补偿时, 电枢电压 $u_a(t) = 5 \cdot 1(t)$ 的输出 $u_o(t)$ 如曲线 所示。实现此控制结果的开关阵列转换时间序列 $t_k (k = 1, 2, \dots, N)$ 如图 4 所示。

由图 3 可以看出, 测速发电机的输出电压(对应电动机转速) $u_o(t)$ 从 $t = 0$ 开始按曲线 变化, 达

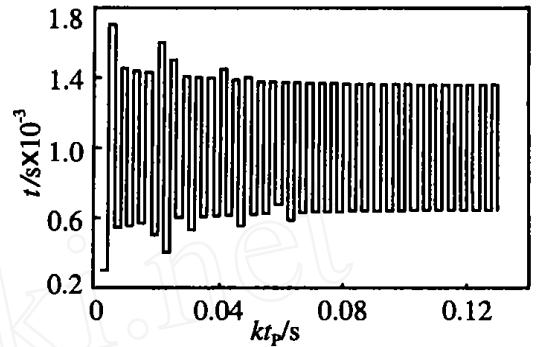


图 4 无损耗电阻器的开关转换时间序列 t_k

到给定转速(对应 5 V 给定信号)后稳定在曲线 , 无超调且具有较快的响应速度。

对于曲线 出现的脉动, 可通过对无损耗电阻器的开关阵列转换时间序列 $t_k (k = 1, 2, \dots, N)$ 的精调得到改善; 还可通过适当增加无损耗电阻器的开关阵列转换频率, 以减小脉动的幅值。增加开关转换频率会增加开关的损耗, 需要在实际应用中综合考虑, 优化选择。

5 结 语

实验结果说明, 无损耗电阻器可用于直流电机转速的控制。由于无损耗电阻器的应用, 减少了电路的损耗(与采用功率放大器的调速方法相比), 消除了系统的超调量并减少了系统的响应时间, 从而改善了调速系统的动态性能。对于无损耗电阻器在调速系统中的扰动控制及优化设计, 还需做进一步的研究。

参考文献(References):

- [1] S Singer Realization of loss-free resistive elements[J] IEEE Trans CAS, 1990, 37(1): 54-58
- [2] S Singer, D Smilovitz Transmission line-based loss-free resistor[J] IEEE Trans CAS 1994, 41(2): 120-126
- [3] 顾树生, 殷洪义, 王安娜, 等 无损耗电阻理论及应用研究(I)[J] 控制与决策(Control and Decision), 1995, 10(5): 474- 479
- [4] 吴建华, 殷洪义, 徐心和 无损耗电阻器的特性研究[J] 东北大学学报(Journal of Northeastern University), 2001, 22(4): 370-372