

# 制动器试验台机械惯量电模拟控制方法

绍兴文理学院 陈建军

**摘要:** 通过分析得出按规律改变电流环给定电压可以实现电惯量系统; 以双闭环直流调速为基础, 引入扰动补偿前馈控制, 讨论并确立了单神经元控制器的电惯量系统控制策略; 通过仿真试验表明电模拟系统控制方法的可行性。

**关键词:** 制动试验; 电惯量; 双闭环; 神经网络

**Abstract:** The paper expounds how to get the electric inertia system by means of changing setting voltage and how to make feed - forward compensation for brake perturbation based on double closed - loop DC converter. It also covers the control strategy adopted by the electric inertia system with single neuron controller. Simulation test shows that it is practicable.

**Keywords:** brake test; electric inertia; double closed - loop; neural network

传统的惯性式制动试验系统目前广泛采用机械惯量飞轮来模拟旋转机械装置的惯性。这种方法虽然能较好地再现制动机构的工作状况, 但由于试验中含有一组惯性质量飞轮, 就难以回避系统体积大、安装精度要求高、始终存在模拟级差等问题。为此提出了基于电惯量的制动器试验系统的设计思想, 其关键点是用电机按照一定的控制算法输出力矩和转速来模拟机械惯量, 这样不仅系统结构简单, 而且调试方便, 自动化程度高。

## 1 制动器试验系统的数学模型

机械惯量式制动系统的工作过程是: 由电机调速系统控制电机带动惯量飞轮转动, 当转速达到设定值时切断电源, 然后由制动器控制系统控制制动器对惯量飞轮进行制动。

根据机械动力学原理, 可建立如下力矩平衡方程式

$$M(t) - M_f(t) = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

式中  $M(t)$  ——电机输出力矩

$M_f(t)$  ——制动力矩

$\omega$  ——角速度

$J$  ——等效转动惯量

由于制动试验是在无动力条件下完成的, 相当于  $M(t) = 0$ , 即可得到其数学模型为

$$J \frac{d\omega}{dt} = -M_f(t) \quad (2)$$

由式 (2) 便可推出恒制动力矩的转速曲线方程

$$\Delta n_J(t) = n_J(t) - n_J(t_0) = -\frac{375}{GD^2} M_f t \quad (3)$$

式中  $GD^2$  为飞轮惯量 (也称飞轮转矩)。制动曲线如图 1 中 (1) 所示, 为匀减速运动; 减小飞轮惯量, 则其制动时间将缩短, 制动曲线如图 1 中 (2) 所示, 仍为匀减速运动。

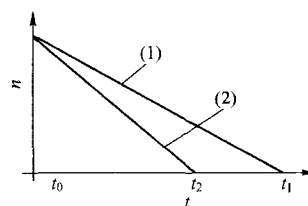


图 1 机械惯量飞轮制动曲线对比图

由此可见, 电惯量系统若要模拟原系统的工作状况, 就必须按图 1 中曲线 (1) 运行, 即电惯量系统的最终实现是以控制转速为手段的。

## 2 电惯量系统模型

转速、电流双闭环直流调速形式在实际的自动调速系统中得到了广泛的应用, 它的特点是系统调整性能好, 动态响应快, 系统抗干扰能力强, 2 个调节器 (ASR 和 ACR) 可分别设计, 调整方便。本文就是以双闭环调速系统为理论基础来研究电模拟系统输出转速来拟合机械惯量系统所输出转速的。

如图2所示为转速、电流双闭环调速系统等效动态结构图<sup>[1]</sup>, 其中  $W_{ASR}(s)$  转速调节器的传递函数,  $W_{cli}(s)$  为电流环的等效闭环传递函数。因为稳速运行的直流调速电机, 在受到恒力矩  $M$  作用时, 负载电流将瞬间发生变化, 从而导致电机转速的变化。由图2可得到零初始条件下, 系统输出转速变化与负载电流变化之间的闭环传递函数

$$\frac{\Delta n_L(s)}{\Delta I_L(s)} = \frac{\frac{2h^2}{h+1} T_{\Sigma_n}^2 K_e (T_{\Sigma_n} + 1) s}{\frac{2h^2}{h+1} T_{\Sigma_n}^3 s^3 + \frac{2h^2}{h+1} T_{\Sigma_n}^2 s^2 + h T_{\Sigma_n} s + 1} \quad (4)$$

式中  $K_e = R / (C_e T_m)$

$R$ ——电枢电阻

$C_e$ ——电机额定励磁下电动势转速比

$T_m$ ——机电时间常数

$\Delta I_L$ ——调速系统负载电流变化量

$\Delta n_L$ ——负载力矩作用下电机转速变化量

$H$ ——调速系统中频宽

$T_{\Sigma_n}$ ——惯性时间常量

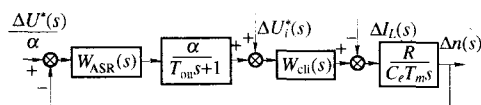


图2 双闭环调速系统等效结构图

传统的制动器试验中, 电机控制系统不存在闭环反馈, 只有飞轮与制动恒力矩2个环节, 其转速变化规律按式(3)进行; 当引入转速、电流反馈双闭环控制后, 系统数学模型即转速变化规律发生变化, 将按式(4)进行。为符合真实情况, 可通过改变控制系统的各种给定信号, 使电机输出转速变化能准确模拟机械惯量系统的转速变化。

## 2.1 只改变转速环给定电压来实现控制

在转速环给定电压单独作用而制动转矩不变的情况下, 由图2可得零初始条件下系统输出转速变化与转速环给定信号变化之间的闭环传递函数<sup>[1]</sup>

$$\frac{\Delta n_s(s)}{\Delta U_n^*(s) / \alpha} = \frac{h T_{\Sigma_n} s + 1}{\frac{2h^2}{h+1} T_{\Sigma_n}^3 s^3 + \frac{2h^2}{h+1} T_{\Sigma_n}^2 s^2 + h T_{\Sigma_n} s + 1} \quad (5)$$

式中  $U_n^*(s)$ ——速度环给定信号增量的拉氏变换

$\Delta n_s(s)$ —— $\Delta U_n^*(s)$ 对应的系统速度响应变化的拉氏变换

$\alpha$ ——转速反馈系数

此时, 电惯量系统输出转速变化量是转速环给定增量作用下和制动转矩作用下的转速响应变化的迭加。为达到拟合, 要求机械惯量系统与电惯量系统在相同初速度和制动转矩作用下, 两者的转速变化一致, 即满足

$$\Delta n_s(s) + \Delta n_L(s) = \Delta n_J(s) \quad (6)$$

## 2.2 只改变电流环给定电压来实现控制

由图2可得零初始条件下系统输出转速变化与电流环给定变化之间的闭环传递函数<sup>[1]</sup>

$$\frac{\Delta n_c(s)}{\Delta U_i^*(s)} = \frac{\frac{2h^2}{h+1} T_{\Sigma_n}^2 \frac{K_e}{\beta} \frac{s(T_{\Sigma_n} s + 1)}{2 T_{\Sigma_n} s + 1}}{\frac{2h^2}{h+1} T_{\Sigma_n}^3 s^3 + \frac{2h^2}{h+1} T_{\Sigma_n}^2 s^2 + h T_{\Sigma_n} s + 1} \quad (7)$$

式中  $\Delta U_i^*(s)$ ——电流环给定信号增量的拉氏变换

$\Delta n_c(s)$ —— $\Delta U_i^*(s)$ 对应的系统速度响应变化的拉氏变换

$\beta$ ——电流反馈系数

此时, 电惯量系统输出转速变化量是电流环给定增量作用下和制动转矩作用下的转速响应变化的迭加。为达到拟合需满足

$$\Delta n_c(s) + \Delta n_L(s) = \Delta n_J(s) \quad (8)$$

## 2.3 改变转速环和电流环给定信号来实现控制

此时, 电惯量系统转速响应是转速环给定作用下, 电流环给定作用下以及制动转矩作用下响应的3者之迭加, 即满足

$$\Delta n_s(s) + \Delta n_c(s) + \Delta n_L(s) = \Delta n_J(s) \quad (9)$$

由于电流环更接近负载作用点, 因此, 可通过改变电流环给定电压来抵消因恒转矩作用而导致调速系统转速变化, 同时通过改变转速环给定电压实现机械惯量模拟, 即由以下2式获得转速环与电流环给定信号的变化规律。

$$\begin{cases} \Delta n_s(s) = \Delta n_J(s) \\ \Delta n_c(s) + \Delta n_L(s) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

将有关各式代入上式, 并分别进行拉氏反变换便可得

$$\Delta U_n^*(t) = -K_m M \alpha \frac{2h T_{\Sigma_n}^2}{h+1} \delta(t) - K_m M \alpha t + \frac{2 T_{\Sigma_n} (1-h) K_m M \alpha}{h+1} e^{\frac{1}{h T_{\Sigma_n}} t} \quad (11)$$

$$\Delta U_i^*(t) = 2 \beta K_e M T_{\Sigma_n} \delta(t) + 2 K_e M \quad (12)$$

理论上,当电惯量系统受到相同的恒定制动转矩且初始速度一致时,如果其转速环给定电压信号及电流环给定电压信号分别如式(11)和(12)变化时,该电惯量系统的输出转速变化能完全模拟原机械惯量系统的转速变化<sup>[2,3]</sup>。

## 2.4 双闭环调速系统的进一步优化

对于制动负载转矩扰动,其作用位置在电流环之外且转速环之内,因此,只能依靠转速环来抑制。由此不可避免产生这样的结果,即只有在电机转速发生变化后,转速反馈环节才能发挥调节作用,这样就导致了转速调节滞后。由于双闭环调速系统的转速环采取了限幅设计,其输出限幅值决定了允许的最大电流,在正常运行时,转速调节器饱和与不饱和2种情况<sup>[4]</sup>。由上可见,不宜采用通过改变转速环给定信号进行机械惯量模拟。

由于电流环的作用位置距制动负载转矩扰动的作用点较近,而电流环又具有对电网电压扰动起抗干扰的作用,正常运行时电流调节器不会达到饱和状态,因此,通过有效改变电流环的给定信号,则可以更及时地调节制动负载扰动对电惯量系统的影响。

鉴于此,在传统双闭环调速系统的基础上,引入对电流环给定信号的有效控制和对制动负载转矩扰动进行补偿的前馈控制,构成一种复合直流调速控制系统则可进一步优化对机械惯量的电模拟。

在制动转矩  $M(s)$  作用于系统的同时,通过对其观测,并经一个滤波时间常数为  $\tau_0$  的滤波环节,得制动转矩观测值  $\hat{M}(s)$ ,再经过负载扰动补偿器  $H$ ,将  $\hat{M}(s)$  馈入原调速系统,即可实现前馈补偿。并经校正可得扰动补偿器的传递函数为

$$H = \frac{2h^2}{h+1} \frac{\beta T_{\Sigma i}^2}{C_m T_l} \frac{T_l s + 1}{T_H s + 1} \quad (13)$$

## 3 电惯量系统的神经网络控制策略与算法

由于传统的转速双闭环 PID 控制器参数整定较为困难,自适应能力较差,对系统参数扰动的鲁棒性不强,要想获得较理想的模拟效果可以引入神经网络控制方法。为保持传统双闭环控制方法的优越性,提高系统响应的快速性和保证系统的限流特性,电流环仍采用传统 PID 调节器,转速环则采用神经网络控制,运用传统 PID 控制机理,构建单神

经元自适应 PID 控制器<sup>[5]</sup>,以提高整个系统的鲁棒性与自适应性。为此引入神经网络控制策略为

$$u(k) = K_u \left( \sum_{i=1}^3 w_i(k) x_i(k) \right) / \sum_{i=1}^3 ||w_i(k)||$$

$$u_g(k) = U_{\max} \frac{1 - e^{-u(k)}}{1 + e^{-u(k)}}$$

$$w_i(k+1) = w_i(k) + \eta_i e(k) |u_g(k)| x_i(k)$$

式中  $U_{\max}$ ——激发函数的最大限幅值

采用该控制策略无需对系统进行精确建模,其算法简单,易于实时控制,即使在受控对象参数变化时,依然有良好的控制品质。根据电惯量系统中电机传动系统的特点,利用单神经元控制器改造系统的转速环,并将无监督的 Hebb 学习规则和有监督的 Widrow-Hoff 规则结合起来,设计控制器的学习算法<sup>[6]</sup>,可有效地解决常规 PID 转速控制中的一些如速度响应超调,自适应能力差等缺点,从而大大提高拟合效果。

## 4 仿真研究与结论

为了比较和研究几种电模拟控制方法的实际效果,利用 MatLab 对制动器试验台电模拟控制方法进行了仿真。

### 4.1 仿真结果

直流电机技术参数: 220 V, 136 A, 1 460 r/min,  $R = 0.5 \Omega$ ,  $C_e = 0.132$  Vmin/r,  $\lambda = 1.5$ 。

仿真各参数取值:  $T_{oi} = 2$  ms,  $T_s = 1.7$  ms,  $T_1 = 30$  ms,  $T_m = 180$  ms,  $K_s = 40$ ,  $h = 5$ ,  $a = 0.007$  Vmin/r,  $\beta = 0.05$  V/A,  $K_i = 1.103$ ,  $\tau_i = 30$  ms,  $T_H = 1$  ms,  $\tau_0 = 16.8$  ms,  $T_{on} = 10$  ms,  $U_{\max} = 10$  V。

单神经元自适应 PID 控制器参数取值:  $K_u = 30$ ,  $w_1(0) = 0.1$ ,  $w_2(0) = 0.1$ ,  $w_3(0) = 0.001$ ,  $\eta_1 = 0.01$ ,  $\eta_2 = 1$ ,  $\eta_3 = 0.001$ ,  $T = 2$  ms。

仿真零时刻,输入转速环给定电压  $U_n^*$ , 10 s 后加入带扰动的制动转矩  $M$  和电流给定变化电压  $\Delta U_i^*$ , 分别进行 3 次仿真试验,得到的仿真结果如图 3、图 4、图 5 所示。

### 4.2 结论

(1) 各仿真制动曲线较好地模拟出理想制动曲线,表明用“电惯量”代替“机械惯量”这个思路是可行的;

(2) 图 4 和图 5 仿真制动曲线较图 3 更为平滑,波动更小,这证明扰动前馈补偿控制的引入和

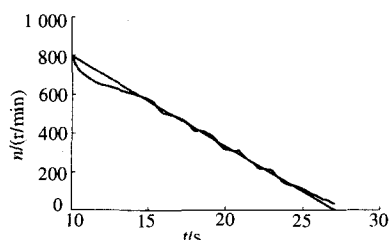


图3 无转矩扰动前馈补偿控制仿真结果

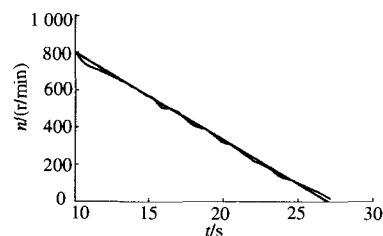


图4 有转矩扰动前馈补偿控制仿真结果

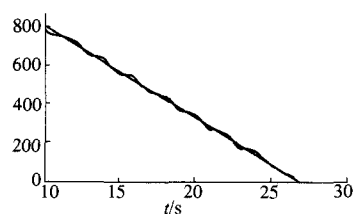


图5 采用单神经元自适应PID控制仿真结果

单神经元自适应PID控制器的运用取得了良好的效果,有效地抑制了负载扰动,大大提高了控制品质;

(3) 研制出成本低,控制精度和自动化水平高的惯性式制动器试验台是完全可能的。

#### 参 考 文 献

- 1 朱晓锦,张为公等.汽车同步器试验系统机械惯量电模拟研究与实现.汽车工程,2001(23):134—138
- 2 张青,张鸣.转速的双闭环PID控制,湖北工学院学报,2004(19):3
- 3 周洪旋.制动器试验台电惯量系统控制方法研究.吉林大学硕士学位论文,2005
- 4 陈伯时.电力拖动自动控制系统.北京:机械工业出版社,2000
- 5 刘卫国,李钟明等.神经网络在电机控制系统中的应用.微特电机,1996(4)
- 6 王晓东,陈伯时等.基于单神经元自适应PID控制器直流调速系统的研究,电气传动,1996(4)

作 者:陈建军

地 址:浙江省绍兴市绍兴文理学院工学院

邮 编:312000

收稿日期:2007-04-12

## 箱形主梁的三维参数化设计及有限元分析

宁波大红鹰职业技术学院 李 华

**摘 要:**根据QD系列桥式起重机箱形主梁的结构特点,介绍了基于SolidWorks平台的箱形主梁三维参数化设计方法,并实现了箱形主梁与有限元分析软件ANSYS之间的程序接口。对于设计人员来说,具有一定的参考价值和现实意义。

**关键词:**箱形主梁;参数化设计;有限元分析

**Abstract:** This article expounds how to perform 3D parameterized design of box girder of the QD series overhead traveling crane with Solidworks platform and how to realize program interface between box girder and finite element analysis software. It provides a reference for designers.

**Keywords:** box girder; parameterized design; finite element analysis

### 1 箱形主梁的参数化设计

参数化设计是指通过改动图形中某一部分或某几部分的尺寸,或者修改已定义好的零件参数,自动完成对图形中相关部分的改动,从而实现对图形

的驱动<sup>[2]</sup>。参数驱动的方式便于用户修改和设计。

#### 1.1 分析箱形主梁结构形式,确定建模思路

QD系列箱形主梁主要由上盖板、下盖板、腹板、大小筋板、角钢等零部件焊接而成。为了减轻质量,应将箱形主梁做成等强度梁,腹板的下边缘

《起重运输机械》 2007(12)