

制动器试验台的控制方法分析

摘要

本文介绍了一种用电动机驱动电流进行能量补偿实现惯量模拟的方法,根据机械动力学原理建立了扭矩平衡方程,并通过电动机驱动电流与其产生的扭矩之间的关系建立了电流依赖于可观测量的数学模型,并设计出车辆路试的模拟实验中驱动电流值的计算机控制方法和改进方法,并给出相应的评价。

对于问题 1, 通过能量守恒定理计算等效惯量;

对于问题 2, 由圆柱环刚体对柱体轴线的转动惯量公式计算飞轮的转动惯量, 进而计算出机械惯量;

对于问题 3, 建立了电流依赖于瞬时转速的数学模型, 由于制动器性能的复杂性, 电动机驱动电流与时间之间的精确关系是很难得到, 我们把建立的数学模型离散化, 便于计算机实现;

对于问题 4, 评价了题中某种试验方法得到的执行结果, 以能量误差的大小作为评价控制方法优劣的重要指标;

对于问题 5, 通过理论推导和分析, 给出了根据前一时间段观测到的瞬时转速, 设计出本时间段电流值的计算机控制方法。由于瞬时转速非常容易测量, 并且在工程实际中大大简化了操作过程和节省了实验成本, 计算机容易实现。当每个时刻的瞬时转速越逼近无电惯量时的瞬时转速(可以通过缩短时间间隔实现), 则能量误差也会越来越小, 从而很好地模拟了实际车辆的路试。

对于问题 6, 重新设计了一个计算机控制方法, 此模型建立了电流依赖于瞬时转速和瞬时扭矩的函数关系, 相对于单一变量控制提高了精确性, 通过扭矩控制, 减小了能量误差, 更准确地模拟的路试的情况。

关键词: 等效转动惯量; 机械惯量; 基础惯量; 制动扭矩; 电机扭矩; 瞬时扭矩; 瞬时转速; 角速度; 电流。

一 问题的重述

汽车设计阶段为检测制动器的综合性能,此时须在专门的制动器试验台上对所设计的路试进行模拟试验。模拟试验的原则是试验台上制动器的制动过程与路试车辆上制动器的制动过程尽可能一致。试验台工作时,电动机拖动主轴和飞轮旋转,达到与设定的车速相当的转速后电动机断电同时施加制动,当满足设定的结束条件时就称为完成一次制动。路试车辆的车轮在制动时承受载荷。将这个载荷在车辆平时具有的能量(忽略车轮自身转动具有的能量)等效地转化为试验台上飞轮和主轴等机构转动的能量。在制动过程中,让电动机在一定规律的电流控制下参与工作补偿由于机械惯量不足而缺少的能量,从而满足试验的原则。一般假设试验台采用的电动机驱动电流与其产生的扭矩成正比,且试验台工作时主轴的瞬时转速与瞬时扭矩是可观测的离散量。由于制动器性能的复杂性,电动机驱动电流与时间之间的精确关系时很难得到的。要求建立电动机的驱动电流依赖于可观测量的数学模型,并根据建立的模型在给定的条件下计算驱动电流。以能量误差的大小为指标根据题中给出的执行某种控制方法试验得到的数据对该方法执行的结果进行评价。根据所建立的数学模型,给出根据时间段观测到的瞬时转速与/或瞬时扭矩,设计本时间段电流值的计算机控制方法,并对该方法进行评价。

二 问题的分析

制动器设计的初衷就是为了对人的安全起到很好的保护作用。基于当前国际法规的不断完善和在这方面一些技术的突破,于是就有了基于不同机理的制动器。当前的制动器可以更好的适应更严格的布置尺寸参数并提高更高的效率,同时使得汽车动能转换成热量后耗散的过程最佳化。而为了更好的检测和改进汽车的制动系统,需要结合不同方面的知识,通过不同的模型,从不同的方面对其进行优化。如要能正确模拟,则需尽可能地确保在尽可能多的时间内,机械惯量系统和电惯量系统的状态一样,即同时刻同转速同角加速度。

下图是台架试验机模拟原理图。

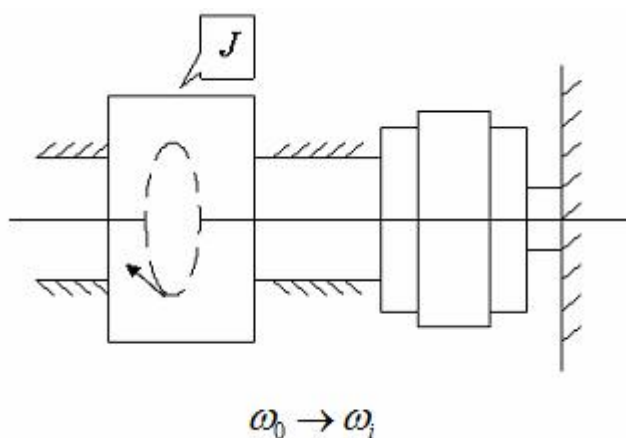


图 1 台架试验机模拟原理图

二 模型假设

- (1) 主轴的角速度与车轮的角速度始终一致；
- (2) 假设飞轮以其中心线为轴转动；
- (3) 电动机供电时所散发的热能忽略不计；
- (4) 不考虑连续问题离散化所产生的误差；
- (5) 试验台采用的电动机的驱动电流与其产生的扭矩成正比，且试验台工作时的瞬时转速与瞬时扭矩是可精确观测的离散量；
- (6) 测控系统具有较高的可靠性和稳定性，可以长时间的无故障的工作，不考虑由于其自身的不稳定性而造成的监测数据的不准确；
- (7) 测控系统应能很好的实现对系统转速和扭矩的精确测量，不考虑其自身存在的数据测量的系统误差；
- (8) 测控系统应根据实验要求能够及时快速的对电动机的电流进行调整；
- (9) 测控系统应能对各种所需的数据进行灵敏地采集；

三 符号说明

| 符号 | 名称 | 单位 |
|----------|----------|-------------------------------------|
| M | 汽车的质量 | kg |
| r | 车轮的滚动半径 | m |
| F | 制动时承受的载荷 | N |
| g | 重力加速度 | $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ |
| d_1 | 飞轮的的外直径 | m |
| d_2 | 飞轮的的内直径 | m |
| m | 飞轮的质量 | kg |
| ρ | 飞轮的密度 | $kg \cdot m^{-3}$ |
| h | 飞轮的厚度 | m |
| J_{dx} | 等效惯量 | $kg \cdot m^2$ |
| J_{jj} | 机械惯量 | $kg \cdot m^2$ |

| | | |
|----------|---------|--------------------|
| T_{dj} | 电机输出扭矩 | $N \cdot m$ |
| T_{zd} | 制动扭矩 | $N \cdot m$ |
| I | 电机输出的电流 | A |
| w | 角速度 | $rad \cdot s^{-1}$ |
| v | 线速度 | $m \cdot s^{-1}$ |
| n | 主轴的转速 | r / s |

四 模型的建立与求解

4.1 等效转动惯量和机械惯量的计算

4.1.1 等效转动惯量的计算

对于一般的研究对象，在不考虑研究系统的势能时，系统的能量可以仅由平动动能提供。由动能定理知，平动时的动能是： $E = \frac{1}{2} M \cdot v^2$ 。同时由[1]知能量

与惯量之间表达式为 $E = \frac{1}{2} J w^2$ 。由于载荷的车辆在平动时具有的能量等效地转化为试验台上飞轮和主轴等转动时具有的能量，由能量守恒定理知：

$$\frac{1}{2} M v^2 = \frac{1}{2} J_{dx} w^2, \quad (1)$$

由于主轴的角速度与车轮的角速度始终一致，所以主轴的角速度为： $w = \frac{v}{r}$,

同时注意到

$$F = M \cdot g,$$

故可知：

$$J_{dx} = \frac{F}{g} \times r^2 \quad (2)$$

由已知的数据求得单个前轮的等效转动惯量为： $J_{dx} = 52.0 kg \cdot m^2$ 。

4.1.2 机械惯量的计算

当空心圆柱体（厚度不可忽略）绕其中心轴线转动时，其柱体转动惯量（见文献[1]的 224 页）为：

$$J = \frac{1}{2} m \left(\left(\frac{d_1}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_2}{2} \right)^2 \right), \quad (3)$$

其中飞轮的质量 $m = r \cdot V = r \cdot h \cdot p \left(\left(\frac{d_1}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_2}{2} \right)^2 \right)$ 。由此即有：

$$J = \frac{1}{2} r \cdot h \cdot p \left[\left(\frac{d_1}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_2}{2} \right)^2 \right] \cdot \left[\left(\frac{d_1}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_2}{2} \right)^2 \right],$$

通过已知的数据，求得 3 个飞轮的转动惯量分别为：30.0, 60.0, 120.0 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)。

注意到基础惯量为 $J_0 = 10 \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ，所以可能的机械惯量为：

$$10, 40, 70, 100, 130, 160, 190, 220 \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^2)。$$

由于电动机能补偿的能量相应的惯量的范围为 $[-30, 30] \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ，从而对于已经求得的等效转动惯量 $52 \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ，通过电动机补偿，符合条件的机械惯量有

$$40 \text{kg} \cdot \text{m}^2 \text{ 和 } 70 \text{kg} \cdot \text{m}^2,$$

对应机械惯量为 $40 \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ，电动机应补偿 $52 - 40 = 12 \text{kg} \cdot \text{m}^2$ 的惯量；

对应机械惯量为 $70 \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ，电动机应补偿 $52 - 70 = -18 \text{kg} \cdot \text{m}^2$ 的惯量。

4.2 混合电惯量模型的建立与求解

目前国内较为流行的制动器台架试验机中，惯量的模拟完全依靠飞轮的转动惯量来实现。这种模拟方法的缺点是惯量调整必然有级，而且体积庞大。虽然增大飞轮片数可以提高模拟精度，但势必进一步增大试验台主机的体积，且使传动主轴长度增加。

另一种惯量模拟方法是采用“电惯量”进行模拟。这种方法的基本思想是通过调速系统控制电动机的转矩或者转速，使电惯量系统受载后的动力特性与机械惯量系统动力特性一致，即转速变化一致，实现惯量模拟。它可以在整个模拟范围内连续模拟惯量。但是纯粹的电惯量系统模拟大惯量的时候要求电动机的容量相当大，增加了实际控制的难度。同时电惯量系统耗电量大，在一些电力供给紧张的地区或是部门，试验成本会大幅度的提高。

采用机械惯量和电惯量混合模拟，可以克服单纯依靠飞轮惯量和单纯依靠电惯量的缺点。这种模拟方法用大惯量的飞轮模拟主要部分，用电惯量进行精确调整，既可以实现惯量无级调整，减小主机体积，又可以降低功率，同时对电机容

量要求和控制要求也降低。

4.2.1 混合电惯量模型的驱动电流观测

对于一般的制动，首先设定一个固定的机械惯量（通过飞轮的组合，找出一组据此等效转动惯量数值最近的飞轮组，以此为设定的固定机械惯量），然后通过驱动电流带动飞轮运转，直到转速达到机械转动惯量要求的转速为止。接着在达到机械转动惯量后维持转速不变，然后在改变电流的同时进行制动制动，直至转轮停止或达到某一速度。

一般地，机械惯量不等于等效惯量，因此在制动过程中可以让电动机在一定规律下参与工作，来调整系统的能量，使之满足模拟实验的原则。

根据机械动力学原理,可建立扭矩平衡方程：（以下用标量计算）

$$T_{zd} - T_{dj} = J_{jx} \frac{dw}{dt} \quad (4)$$

由假设知，电动机的驱动电流 I 与其产生的扭矩 T_{dj} 成正比： $I = \frac{3}{2} T_{dj}$ ，于是结合（4）式我们得到：

$$I = \frac{3}{2} (T_{zd} - J_{jx} \frac{dw}{dt}) \quad (5)$$

由于制动器性能的复杂性，电动机驱动电流与时间的精确关系是很难得到的，于是在工程实际中的计算机控制的方法是把整个制动时间离散化为若干个小时间断： $[0, t_0], [t_0, t_1], [t_1, t_2], \dots, [t_{n-1}, t_n]$ ，得到的离散化模型为

$$I = \frac{3}{2} (J_{zd} - J_{jx}) \frac{\Delta w}{\Delta t} \quad (6)$$

其中 $\Delta w_i = w_i - w_{i-1}$ ， $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ ， $i = 1, 2, \dots, n$ 。

注意到 $n = w \cdot r$ ， $\Delta n = \Delta w \cdot r$ ， $\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\Delta w}{\Delta t} \cdot r$ ， $b = \frac{\Delta w}{\Delta t}$ ，有

$$(J_{zd} - J_{dx}) b = \frac{2I}{3} \quad (7)$$

由于评价控制方法优劣的一个重要数量指标是能量误差的大小，这里的能量误差是指所设计的路试时的制动器与相对应的实验台上制动器在制动过程中消耗的能量之差。为了降低能量误差，我们可以在每个 t_i 处调整电动机的驱动电流，使得主轴和飞轮的转速和模拟路试的机械惯量系统同时间的转速相等，而这一过程可以通过观测瞬时转速或瞬时扭矩来建立模型，用计算机来实现。

在制动的每个小时间断 $[t_{i-1}, t_i]$ 上，制动器吸收的能量为

$$E = \int_{t_{i-1}}^{t_i} T_{zd} w dt, \quad (8)$$

其中制动扭矩

$$T_{zd} = J_{zd} \frac{dw}{dt}, \quad (9)$$

于是

$$E = \frac{1}{2} J_{zd} (w_i^2 - w_{i-1}^2), \quad (10)$$

注意到 J_{zd} 是由飞轮和电机共同模拟产生的，其中机械惯量 J_{jx} 为常数，需电机补偿的转动惯量为 $J_{dj} = J_{zd} - J_{jx}$ 。从而电机需要输出一个扭矩 T_{dj} ，并且 T_{dj} 要满足两个条件：

- (1) T_{dj} 与 J_{jx} 共同作用后，能保证供给制动器准确数量的能量；
- (2) T_{dj} 能保证按与(7)式一致的时间函数关系供给制动器所应吸收的部分能量。

根据(8)式，模拟大小为 J_{dj} 的转动惯量时，电动机应输出的扭矩为：

$$T_{dj} = J_{dj} \frac{dw}{dt}. \quad (11)$$

但是用(11)式模拟转动惯量时，有两个缺点：

- (1) 为了计算 $\frac{dw}{dt}$ ，对从制动器试验台上来的速度信号要进行微分计算；
- (2) 由于要用 $\frac{dw}{dt}$ ，模拟回路是一个反馈系统容易产生不稳定。

由于在制动器试验台上，制动扭矩可以被准确的测出，所以可用 T_{zd} 来表示 T_{dj} 。由(9)和(11)得

$$T_{dj} = \frac{J_{dj}}{J_{dz}} T_{zd}, \quad (12)$$

因此，在制动试验过程中，控制电动机的驱动电流使其产生的扭矩为：

$$T_{dj} = \frac{J_{dj}}{J_{dz}} T_{zd},$$

即可实现对车辆平时时制动器负载的模拟。

4.2.2 混合电惯量模型的驱动电流的求解

在一般情况下，由于驱动电流并不是均匀变化的，也即电机转速曲线并不是线性的，如图 3：

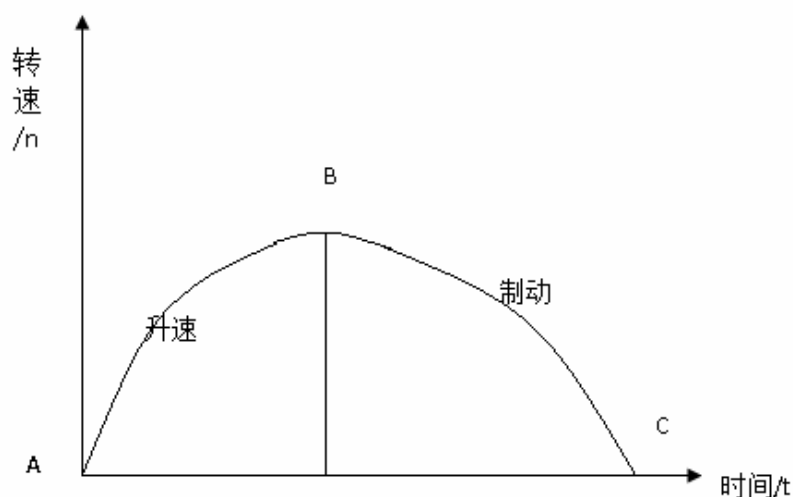


图 3 电机转速曲线图

只有在合成力矩为恒定时电机转速才为线性的。此时主轴的转速是均匀减少的（即其制动减速度为常数），如图 4 中，分别表示两种制动模式。

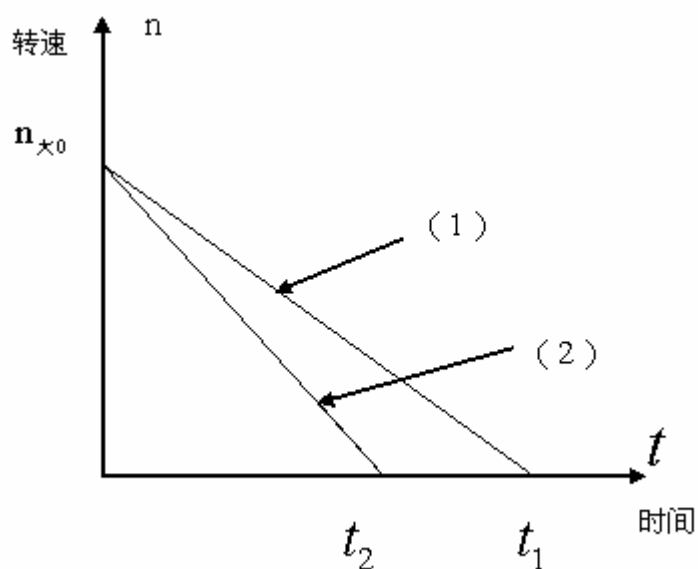


图 4 恒定力矩制动时的输出转速

此时驱动电流得计算式中 $\frac{\Delta w}{\Delta t}$ 为一个常量，可以直接代入公式求解。

由已知条件： $J_{zd} = 52 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ， $\Delta v = 50 \text{ km/h} = \frac{50}{3.6} \text{ m/s}$ ， $\Delta t = 5 \text{ s}$ ， $r = 0.286 \text{ m}$ 。

当 $J_{jx} = 40 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 时，电动机应输入的驱动电流为： 174.8 A ；

当 $J_{jx} = 70\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 时，电动机应输入的驱动电流为：262.2 A（反向供电）。

4.2.2.1 下面从另一个角度建立模型：

设任意时刻 i 的瞬时转速主轴的转速为 n_i （单位为 r/s ），瞬时角速度为 $2 \cdot p \cdot n_i$ ，瞬时线速度为 $2 \cdot p \cdot r \cdot n_i$ ，瞬时扭矩由制动系统的扭矩和电动机的扭矩的代数和构成设为 $T - T_i$ ，其中 T 为制动器的扭矩，我们假设它始终维持不变，其中 T_i 为由电动机产生的瞬时扭矩。

(1). 在没有完全机械惯量的情况下，制动器的扭矩始终维持不变，故有：

$$T = J_{dx} \cdot \frac{dw}{dt}, \quad (13)$$

其中 J_{dx} 表示等效惯量。

则在此情况下， $\frac{dw}{dt}$ 恒为一常数，且有：

$$\frac{dw}{dt} = \frac{d(2 \cdot p \cdot n)}{d(t)} = 2 \cdot p \cdot \frac{dn}{dt}, \quad (14)$$

其中的 n 为转速，定义 $K = \frac{dn}{dt}$ ，即转速加速度恒定，据此我们可以知道在此情况下任意时刻飞轮的转速 n_i 。设起始状态时飞轮的转速为 n_0 ，则在此情况下 t 时刻的转速 n_i ：

$$n_i = n_0 - \Delta t \cdot K = n_0 - T \cdot t \cdot \frac{1}{2 \cdot p \cdot J_{dx}}, \quad (15)$$

(2). 下面，我们做有电惯量参与的情况，下面我们简称为电惯量系统。

设等效惯量 $J_{dx} = J_{jx} + J_{dj}$ （ J_{jx} 表示机械惯量， J_{dj} 电机惯量），据题意我们需要用

此系统模拟出于(1)中一样的情况，其必要条件是每时每刻两系统的飞轮的转速都是一样，我们取很短的时间间隔（例如时间间隔为 10ms ），这样我们就可以用离散量来模拟连续量。我们称此模型为滞后追赶模型，其决策条件为当前情况下所测得扭矩、转速和系统(1)对应的下一时间（相差一个时间间隔）的转速共同决定。

对于题目三中给定的特殊情况：

系统(2)完全可以模拟出系统(1)的全部情况,取任意一对相邻时刻 t_i, t_j ($t_i < t_j$), t_i 时刻的转速可以由式(15)求得为 n_i , 相应的 t_j 时刻的主轴的转速为 n_j , 为了在 t_j 时刻主轴的转速能达到 n_j , 在 t_i 时刻电动机的电流要突变。

设 t_i 时刻电流突变为 I_i , 则有:

$$T - \frac{I_i}{1.5} = J_j \cdot \frac{dw}{dt}, \quad (16)$$

在此情况下,系统(1)和系统(2)在任何时刻的转速都是一样的,即 $\frac{dw}{dt}$ 始终同步, n_i, n_j 分别也是系统(1)在 i, j 时刻的转速。

由式(15)和式(16)可得:

$$\frac{T - \frac{I_i}{1.5}}{J_{jx}} = \frac{T}{J_{dx}} = \frac{dw}{dt}, \quad (17)$$

式(17)经化简得:

$$(J_{dx} - J_{jx}) \cdot \frac{dw}{dt} = \frac{I_i}{1.5}$$

对于任意一个系统, $(J_{dx} - J_{jx})$ 恒定不变, 上面我们已经假设制动器的扭矩维持不变, 故有 $\frac{dw}{dt}$ 恒定不变, 所以任意时刻的突变电流 I_i 都相同, 这便是题目中所要求的在问题1和问题2的条件下, 假设制动减速带为常数的情况。这时有:

$$I_i = 1.5 \cdot (J_{dx} - J_{jx}) \cdot \frac{dw}{dt} = 1.5 \cdot J_{dj} \cdot \frac{dw}{dt}, \quad (18)$$

在问题1和问题2的情况下, 我们可以求得初始角速度为 $w = \frac{v}{r}$, $\Delta t = 5s$ 后停止运动, 则 $\frac{dw}{dt} = \frac{w}{\Delta t} = \frac{v \cdot r}{\Delta t}$, $I = 1.5 \cdot J_{dj} \cdot \frac{v \cdot r}{\Delta t}$ 分别代入各个问题中的 J_0 便可求个电流的情况。

由问题二中求得的 $J_{dj} = 12.0$ 或 $J_{dj} = -18.0$ 得 $I = 174.6$ 或 -262.5 , 方向为正表示推动飞轮旋转, 负表示阻碍飞轮运动的电流。

4.2.3 混合电惯量模型的检验

由于评价控制方法的优劣的一个重要指标是能量误差的大小, 本题中的能量误差是指设计的路试时的制动器与相对应的试验台上制动器在制动过程中消耗的能量之差。本题中, 路试车辆的能量损失为:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot J_{dx} \cdot (w_0^2 - w_t^2), \quad (19)$$

其中 w_0 , w_t 分别为制动开始时和结束时飞轮的角速度。

代入所给数据计算得 $\Delta E = 5215.0$ (焦耳)。

在制动试验台上损失的能量是一个累加和：

$$\Delta E' = \sum_{i=1}^m P_i \cdot \Delta t_i, \quad (20)$$

其中 P_i 为第 i 个时间段的平均功率。

电动机的瞬时功率为： $P_i = \overline{T_{dj}^i} \cdot \overline{w_i}$ ，其中的 $\overline{T_{dj}^i}$ 表示电动机在第 Δt_i 内的平均扭矩， $\overline{w_i}$ 为各个时段的平均角速度，我们可以近似地取 $\overline{T_{dj}^i}$ 为在第 i 时刻的扭矩 T_{dj}^i ，取 $\overline{w_i}$ 为在第 i 时刻的角速度 w_i ，则有：

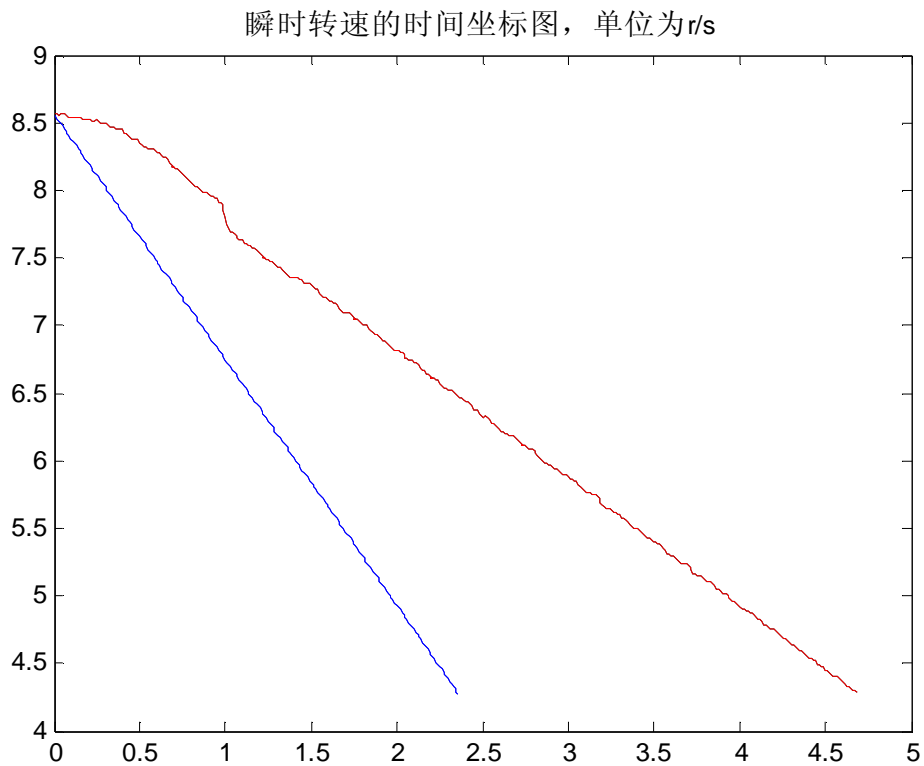
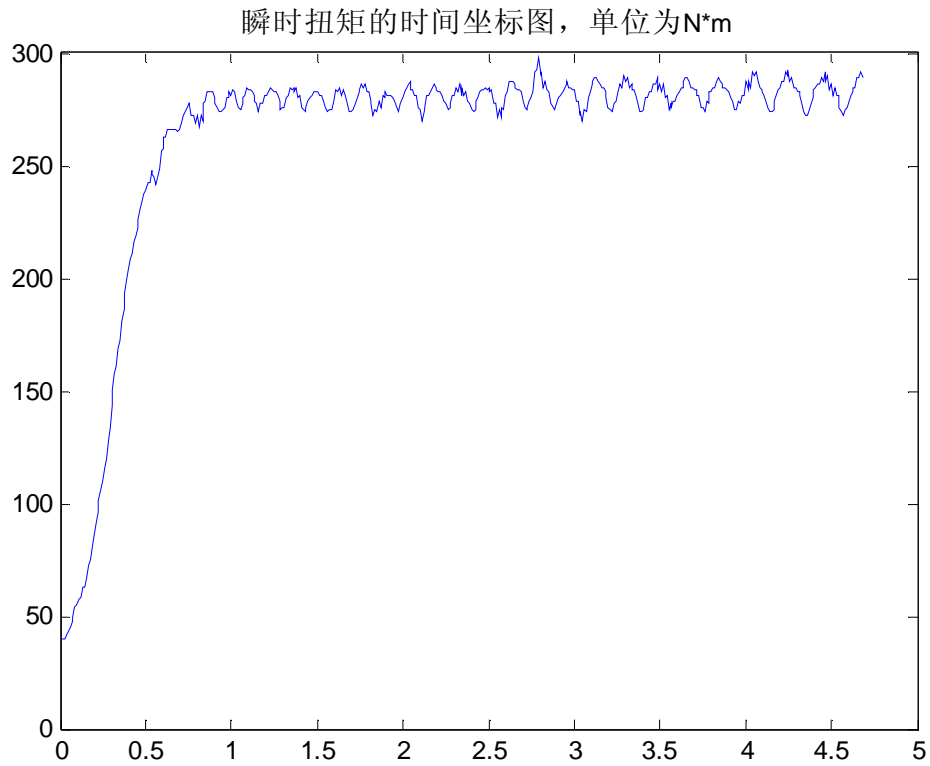
$$\Delta E' = \sum_{i=1}^m T_{dj}^i \cdot w_i \cdot \Delta t_i, \quad (21)$$

其中 $\Delta t_i = 0.01s$ 。

使用 MATLAB 编程并代入附表中的数据计算得到： $\Delta E' = 4921$ (焦耳)，

其能量误差为：
$$h = \left| \frac{\Delta E - \Delta E'}{\Delta E} \right| = 5.6299\%。$$

下面进行曲线误差分析：



从上面的瞬时扭矩的时间坐标图我们可以发现，在开始的一段短暂的时间内，瞬时扭矩变化很快，然后慢慢趋于平和，处在一个中心的波动之中；在上面的瞬时转速的时间坐标图中，红色曲线表示由 A2009data.xls 提供的数据绘制成主轴瞬时转速与时间的关系，我们可以从 A2009data.xls 分析得知 $T_{zd} = 300$ 左右，蓝色

曲线即是反映 $T_{zd} = 300$ 时机械惯量系统时的情况，二者偏差较大，理论上（如式（15）），红色曲线的应该下降更快，蓝色较平缓，但是恰恰相反，我们猜想这可能是由于电动机一直提供较大的扭矩，制动扭矩更大所造成，这样就很容易造成能量的浪费，实际偏差也较大。但是得到此数据的算法也是一个较好的算法，最起码它能很快地使得系统处于平衡状态。

4.3 基于瞬时转速控制驱动电流检测模型的计算机控制方法

在实际情况下，考虑到各种人为和非人为因素的影响，要使得主轴达到匀减速会非常的困难。为此，我们需要建立可观测量和驱动电流的函数关系，进而及时调整电流，即根据已知条件设计出各时刻的突变电流，减少能量误差，更真实地模拟实际车辆的路试。为此我们通过电惯量系统模拟机械惯量系统来实现模拟实验实现目标。

在电惯量系统中，主轴第 i 时刻的转速 n_i' 很可能和机械惯量系统同时刻的转速不同，但是我们希望在第 j 时刻能达到机械惯量系统在 $j(i < j)$ 时刻的速度。

为此我们可以假设在第 i 时刻到第 j 时刻很短的时间间隔 Δt 内，主轴转速的加速

度 $K = \frac{dn}{dt}$ 保持不变，于是有：

$$n_j = n_i' - K \cdot \Delta t, \quad (22)$$

n_i' 表示主轴在 i 时刻的主轴瞬时转速， n_j 表示机械惯量系统的主轴在 j 时刻的瞬时转速。

由（17）式得：

$$K = \frac{T_{zd} - \frac{2I_i}{3}}{2 \cdot p \cdot J_{jx}}, \quad (23)$$

结合（22），（23）式，得：

$$\begin{aligned} \frac{T - \frac{2I_i}{3}}{2 \cdot p \cdot J_{jx}} \cdot \Delta t &= n_i' - n_j, \\ \Rightarrow I_i &= \frac{3}{2} \cdot \left(T - \frac{2 \cdot p \cdot J_{jx} \left(n_i' - \left(n_0 - T_{zd} \cdot j \cdot \frac{1}{2 \cdot p \cdot J_{dx}} \right) \right)}{\Delta t} \right), \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow I_i = \frac{3}{2} \cdot \left(T - \frac{2 \cdot p \cdot n_i' \cdot J_{jx} - 2 \cdot p \cdot n_0 \cdot J_{jx} + T_{zd} \cdot j \cdot \frac{J_{jx}}{J_{dx}}}{\Delta t} \right),$$

又 $j = i + \Delta t$ ，得：

$$I_i = \frac{3}{2} \cdot \left(T_{zd} - \frac{2 \cdot p \cdot n_i' \cdot J_{jx} - 2 \cdot p \cdot n_0 \cdot J_{jx} + T_{zd} \cdot (i + \Delta t) \cdot \frac{J_{jx}}{J_{dx}}}{\Delta t} \right) \quad (24)$$

其中 $T_{zd}, J_{jx}, J_{dx}, n_0, \Delta t$ 分别表示制动器的扭矩、机械惯量、等效惯量、初始转速

和观测的时间间隔，由于 $T_{zd}, J_{jx}, J_{dx}, n_0, \Delta t$ 皆为已知量， n_i' 为主轴的瞬时转速可

以通过测量得知，于是便得到了一个瞬时突变电流与瞬时转速的一元函数

$$I_i = f(i, n_i').$$

该控制方法的评价：

(1) 根据我们的分析和理论推导，确定了电动机的驱动电流仅是瞬时转速的一元函数。由于瞬时转速非常容易测量，并且在工程实际中大大简化了操作过程和节省了实验成本，计算机容易实现。

(2) 在此控制方法中，当每个时刻的瞬时转速越逼近无电惯量时的瞬时转速（可以通过缩短时间间隔实现），则能量误差也会越来越小，从而很好地模拟了实际车辆的路试。

(3)，该方法的缺点在于没有直接地刻画制动过程中能量的变化过程，这样就有可能增大了能量误差。

(4)，由于电动机的延时性，每个时刻我们都是根据无电惯量时的下个时刻的转速来调节本时刻的突变电流，所以会导致能量误差变大，此处有待于进一步地改进。

五 模型的改进

5.1 基于瞬时扭矩和瞬时转速的改变驱动电流的计算机控制方法

在机械惯量制动系统中，设系统有一标准扭矩 $T_{bz} = T_{zd}$ ，其作用是使得

$T_{bz} = T_{zd} = J_{dx} \cdot \frac{dw}{dt}$ ，相应地，在电惯量系统中，如要能准确模拟出机械惯量式制

动系统的情况，则也有一个标准扭矩 $T_{bz}' = J_{jx} \cdot \frac{dw}{dt}$ ，由于二者能准确模拟，则有

$$\frac{T'_{bz}}{J_{dx}} = \frac{T_{zd}}{J_{jx}}$$

在电惯量系统中，设实际测量得到的第*i*时刻的瞬时转速为 n_i' ，瞬时扭矩为 T_i' ，设第*i*时刻的突变电流为 I_i ，则有：

$$T_i' = T_{zd} - \frac{I_{i-\Delta t}}{3}, \quad (25)$$

上式中的 $I_{i-\Delta t}$ 为第*i*- Δt 时刻的突变电流，其一直持续到第*i*时刻，为了能模拟出机械惯量制动系统的情况，我们必须有：

$$n_i' - \frac{dn}{dt} \cdot \Delta t = n_{i+\Delta t}, \quad (26)$$

其中的 $\frac{dn}{dt}$ 为第*i*时刻到第*i*+ Δt 时刻的转速度的加速度，在此很短的时间内可以认为恒定不变，为了达到这个转速度加速度我们要改变其系统扭矩，设为 T'' ，且满足：

$$T_i'' = T_{zd} - \frac{I_i}{3} = J_{jx} \cdot \frac{dw}{dt} = 2 \cdot p \cdot J_{jx} \cdot \frac{dn}{dt}, \quad (27)$$

由式（25），（26），（27）可以推得：

$$T_i' + \frac{I_i - I_{i-\Delta t}}{3} = 2p \cdot J_{jx} \cdot \frac{n_i' - n_{i+\Delta t}}{\Delta t},$$

于是：

$$I_i = 3 \left(2p \cdot J_{jx} \cdot \frac{n_i' - n_{i+\Delta t}}{\Delta t} - T_i' \right) + I_{i-\Delta t}$$

$$\Rightarrow I_i = 3 \left(2p \cdot J_{jx} \cdot \frac{n_i' - \left(n_0 - T_{zd} \cdot (i + \Delta t) \cdot \frac{1}{2 \cdot p \cdot J_{dx}} \right)}{\Delta t} - T_i' \right) + I_{i-\Delta t},$$

上式中的 T_i' , I_i , $I_{i-\Delta t}$, J_{zd} , n_i' , $n_{i+\Delta t}$ 分别表示第*i*时刻主轴的瞬时扭矩、第*i*时刻的突变电流、第*i*- Δt 时刻的突变电流、机械惯量、第*i*时刻主轴的瞬时转速、第*i*+ Δt 时刻机械惯量系统中的转速，均为已知或可测量，于是得到了 I_i 是 T_i' 和 n_i' 的二元函数。利用计算机进行实时监控和递推就可以模拟出任意第*i*时刻电动机突变电流 I_i 的大小。

该控制方法的评价：

(1). 此模型建立了电流依赖于瞬时转速和瞬时扭矩的函数关系，相对于单一变量控制提高了精确性，通过扭矩控制，减小了能量误差，更准确地模拟的路试的

情况；

(2).但是此算法立式中含有较多的参数，可能会增加测量误差，可能会影响精确度的提高。

六 参考文献

- [1] 漆安慎, 杜婵英, 力学 (第二版), 高等教育出版社, 2005.
- [2] 梁波、李玉忍, 模糊自整定 PID 在制动器试验台电惯量模拟应用, 电子测量技术, 第 31 卷第 10 期: 87-89, 2008。
- [3] 马继杰、吴博达、刘笑羽、程光明、孙景阳、王森林, 制动器惯性台架电模拟惯量的研究, 试验·测试, 第 4 期: 49~52, 2009。
- [4] 陈建军, 制动器试验台机械惯量电模拟控制方法, 起重运输机械, 12 期: 27~31, 2007。
- [5] 林荣会, 制动器试验台的双分流加载法, 青岛建筑工程学院报, 第 18 卷第 3 期: 51~54, 1997。
- [6] 胡寿松, 自动控制理论[M], 国防工业出版社, 19948。
- [7] 林荣会、姜建平, 双分流加载式制动器试验台的电模拟系统[J], 自动化与仪器仪表, 第 3 期: 39~42 , 1997。
- [8] 文小玲、陈兵, 直流调速系统单神经元自适应速度控制方法[J], 武汉化工学院学报, 第 26 卷第 3 期: 57~60, 2004。
- [9] 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[J], 电气传动, 第 4 期: 29~32, 1996。
- [10] 胡建元等, 采用单个神经元的 PID 学习控制[J], 控制与决策, 第 2 期, 1993。
- [12] 张光杰, 车辆制动的台架检测和数据处理方法分析, 农业机械学报, 12 期: 86~89, 1994。
- [13] 魏义, 汽车制动器总成制动性能试验台测控系统关键技术的研究, 合肥工业大学硕士学位论文, 2008。