

# 伺服系统的离线惯量辨识方法\*

李俊<sup>1</sup>, 任连新<sup>2</sup>, 廖振雄<sup>3</sup>, 赵智杰<sup>3</sup>

- (1. 深圳市合信自动化技术有限公司, 广东 深圳 518055;
2. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640;
3. 深圳市科创思科技有限公司, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 针对传统离线惯量辨识方法计算精度不高, 应用场合受限的问题, 提出了一种改进的离线惯量辨识方法。该方法采用加减速指令规划在辨识过程中引入了转矩积分的计算方式, 消除了负载与摩擦的影响, 提高了辨识结果的精确度。建立了伺服系统离线惯量辨识的计算模型。对所提方法进行了试验验证。结果表明, 该方法可以有效提高辨识结果的精确度, 在带负载的场合同样适用。

**关键词:** 伺服系统; 离线惯量辨识; 加减速规划; 转矩积分

中图分类号: TM 383.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)04-0040-04

doi: 10.12177/emca.2019.184

## Off-Line Inertia Identification of Servo System\*

LI Jun<sup>1</sup>, REN Lianxin<sup>2</sup>, LIAO Zhenxiong<sup>3</sup>, ZHAO Zhijie<sup>3</sup>

- (1. Shenzhen Co-Trust Technology Co., Ltd., Shenzhen 518055, China;
2. School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
3. Shenzhen Kechuangsi Technology Co., Ltd., Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** The traditional off-line inertia identification methods have low calculation accuracy and limited application occasions. Aiming at this problem, an improved off-line inertia identification method is proposed. Acceleration and deceleration programming with the torque calculation method is introduced into the identification process, and the effects of friction and load are eliminated, so that the accuracy of identification results is improved. A calculation model is established for the off-line inertia identification of servo system. The proposed method is experimentally verified. The results show that this method can effectively improve the identification accuracy, and it also applies to the loaded case.

**Key words:** servo system; off-line inertia identification; acceleration and deceleration programming; torque integral

## 0 引言

在伺服系统应用领域里, 要求系统对负载变化和速度改变有很好的动态响应。转动惯量和负

载转矩的变化会严重影响系统的性能。为了达到伺服系统良好的高精度控制动态与静态特性, 需要精确辨识出系统的惯量, 并以此为依据相应地调节控制器参数<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2019-12-23; 收到修改稿日期: 2020-02-24

\* 基金项目: 广东省省级科技计划项目 (2016B090911003)

作者简介: 李俊 (1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电源、变频器、伺服系统等开发。

任连新 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与运动控制。

廖振雄 (1987—), 男, 硕士, 研究方向为伺服系统开发。

随着参数辨识的相关理论与技术的发展,参数辨识的理论不断完善,逐渐开始应用在转动惯量的辨识技术中。转动惯量辨识采取的方法主要有在线辨识和离线辨识两大类。转动惯量的在线估算是通过分析伺服电机对负载扰动的响应,采取模型参考自适应、递推最小二乘等算法得到转动惯量的估计值。伺服系统负载转矩的观测需要正确的转动惯量,这一矛盾导致转动惯量的在线估算值常常无法收敛。离线辨识是通过规划的速度给定,测量采集伺服电机在一段行程内实际的速度与转矩,得到系统的转动惯量。常见的离线转动惯量辨识采取的方法主要有直接计算法、加减速法、人工轨迹法等<sup>[2]</sup>。此外,还有一些离线辨识方法,如文献[3]利用周期性的正余弦位置指令和转矩指令实现转动惯量离线辨识。

加减速法是在电机正式运转之前,通过对电机进行加速和减速来计算电机的转动惯量,具有负载惯量识别精度相对较高和方法简单等优点。本文拟采用规划的加减速法作为速度指令,将转速微分运算转换成用规划行程首尾的转速作差的运算来解决运算中微分带来的误差。选择特定的速度给定信号,并利用数学方法消元法消除干扰项。与传统加减速法相比,该辨识方法具有受干扰项影响小、辨识精确度高等优点。

## 1 伺服系统动力学模型

伺服电机的运动方程为

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - B\omega_m - T_L \quad (1)$$

式中: $J$ 为伺服电机转子和所带负载的总转动惯量; $\omega_m$ 为电机机械角速度; $T_e$ 为电磁转矩; $B$ 为黏滞摩擦因数; $T_L$ 为负载转矩。

## 2 传统转动惯量离线辨识算法的局限性

式(1)中,可以通过测量得到的参数有电磁转矩信号 $T_e$ 以及电机机械角速度 $\omega_m$ ,而负载转矩 $T_L$ 、黏滞摩擦因数 $B$ 、总转动惯量 $J$ 是无法通过测量得到的。因为辨识的主要目的是得到总转动惯量,所以消除负载转矩与摩擦的影响至关重要。

在传统加减速离线辨识方法中,直接忽略负

载转矩带来的影响,这样就无法在带负载的情况下进行惯量辨识,应用场合受到极大的限制。且认为黏滞摩擦因数很小而忽略不计,则伺服电机运动方程简化为

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e \quad (2)$$

伺服系统中,转速的反馈值根据单个周期内编码器的位置脉冲增量计算得出,这一步的计算本身就是一次微分运算。在电机实际运行过程中,机械的振动、伺服系统控制参数调整的不合理、外部负载的扰动等因素均会引起编码器反馈位置的抖动,位置的抖动通过微分运算得到了放大,并叠加到反馈速度信号当中。如果再用反馈速度作微分运算,得到的机械加速度信号将会有很大的误差,无法准确辨识转动惯量。

为了精确辨识出伺服系统的转动惯量,需要解决如下问题:

- (1) 带负载的应用场合受限;
- (2) 无法忽略的黏滞摩擦带来的影响;
- (3) 计算过程中微分运算引入的误差。

## 3 改进的转动惯量离线辨识算法

改进的离线惯量辨识方法对传统离线辨识方法引入的这些问题作不同程度的优化,提高了辨识精度,拓展了应用场合。

由式(1)得知,合成转矩产生了机械加速度,进而导致了伺服电机速度的改变,而扰动转矩中又包含和转动惯量无关的量 $B\omega_m$ 、 $T_L$ 。这2个无关项可以合并成一个无关项:

$$T'_L = B\omega_m + T_L \quad (3)$$

要消除这个无关项 $T'_L$ ,需要作出一个假设:与伺服系统电流环响应相比,负载转矩的变化足够缓慢。将式(3)代入式(1)作如下变换:

$$\omega_m = \frac{1}{J} \int (T_e - T'_L) dt \quad (4)$$

在数字处理器控制的伺服系统中,信号都是离散的,在一段可控制的行程内,规划速度给定,对式(4)进行离散化得:

$$\omega_m = \frac{1}{J} \sum (T_e - T'_L) \Delta t \quad (5)$$

式中: $\Delta t$ 为辨识周期。

假设经过 $n$ 个辨识周期伺服电机走完了规划

的行程,则有:

$$\omega_m \Big|_0^{n\Delta t} = \frac{\sum_0^n (T_e - T'_L) \Delta t}{J} \quad (6)$$

$$\Delta\omega_m = \omega_m \Big|_0^{n\Delta t} = \omega_{m,n\Delta t} - \omega_{m_0} \quad (7)$$

显然,伺服电机运动方程这样的变换将转速微分运算转换成了用规划行程首尾的转速作差的运算,消除了传统辨识算法中计算过程中的二次微分引入的误差。

为了消除无关项  $T'_L$ , 需要选择特定的速度给定信号, 并利用数学方法消元法进行消除。在一段特定的行程内, 规划速度给定, 进行第一次辨识, 辨识完成后回到行程起始点, 重新规划速度给定, 进行第二次辨识, 辨识完成后回到行程起始点。

伺服系统应用场合一般存在行程限制, 因此要选择一段合适的行程, 2 次辨识规划的速度指令以设计简单、容易实现为原则, 但形式应该相同, 第二次辨识的速度给定一般要小于第一次辨识的速度给定, 但要保证  $n$  个辨识周期是相同的。比如 2 次速度指令均选择匀加速-匀速-匀减速这样的三段规划, 那么需要满足条件:

(1) 2 次辨识过程的匀速段速度 (即到达速度) 不同, 第二次辨识的到达速度一般大于第一次辨识的到达速度。

(2) 2 次辨识过程中的匀加速、匀速、匀减速三段的指令执行时间完全相同。

根据上述负载转矩缓慢变化的假设, 2 次辨识过程负载转矩与黏滞摩擦的作用相近, 可近似认为 2 次辨识过程中无关项  $T'_L$  是不变的, 则有:

$$\begin{cases} \Delta\omega_{m_1} = \frac{\sum_0^n (T_{e_1} - T'_L) \Delta t}{J} \\ \Delta\omega_{m_2} = \frac{\sum_0^n (T_{e_2} - T'_L) \Delta t}{J} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中 2 次辨识过程相减, 无关项  $T'_L$  的积分求和项将被消除, 最终得到:

$$J = \frac{\sum_0^n (T_{e_1} - T_{e_2}) \Delta t}{\Delta\omega_{m_1} - \Delta\omega_{m_2}} \quad (9)$$

伺服系统实际运行中, 因为 2 次辨识过程规

划的速度指令不同。2 次辨识走过的行程将会不同, 无关项所包含的负载转矩与黏滞摩擦不可能完全相同, 但这样的消元法已经近似地消除了无关项给惯量辨识带来的干扰, 使伺服系统在带负载的情况下仍然能比较准确地辨识系统惯量, 拓宽了应用场合<sup>[4-7]</sup>。

## 4 试验验证

为了验证所提改进的离线惯量辨识算法的正确性与可行性, 搭建了如下试验环境。2 台伺服驱动器均使用深圳市合信自动化技术有限公司自主开发的 A4S 高性能伺服驱动器, 2 台伺服电机均使用多摩川公司型号为 TSM3006N2307E200 的 400 W 永磁同步电机, 组成 2 套伺服系统, 一套作为主拖进行惯量辨识, 另外一套作为模拟的负载施加近似恒定的负载转矩, 并以刚性联轴器联接, 不同惯量的惯量盘加在电机轴上以改变系统的整体惯量, 伺服电机、联轴器、惯量盘同轴联接, 且惯量全部已知。

试验用电机参数如表 1 所示。刚性联轴器与惯量盘均是定制产品, 其中联轴器惯量与电机转子惯量相同, 5 个不同惯量的惯量盘, 其惯量分别为电机转子的 1、2、5、8、10 倍。

表 1 试验用电机参数

参数名称	参数值
电机极对数	5
转子转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	0.4×10 <sup>-4</sup>
反电动势系数/[V·(kr·min <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup> ]	48.5
额定功率/W	400
额定扭矩/(N·m)	1.27
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	3 000

试验过程中需要对速度指令进行规划, 因此主拖伺服工作在速度模式下。为了验证的方便, 选择 2 次规划的速度指令如图 1 所示, 包含了匀加速、匀速、匀减速的过程, 同时测得伺服电机的反馈转速与反馈力矩。

被拖伺服在速度模式下加不同的负载进行试验。定义电机转子、联轴器、惯量盘的总转动惯量与电机转子惯量的比值为  $rat\_0$ , 惯量辨识值与电机转子惯量的比值为  $rat\_1$ , 定义辨识误差  $e$ , 则有:

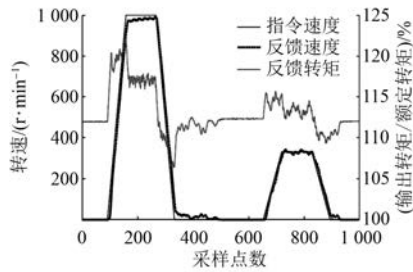


图1 给定转速、反馈转速和反馈转矩的试验波形

$$e = (| \text{rat}_1 - \text{rat}_0 | / \text{rat}_0) \times 100\% \quad (10)$$

根据式(10)得到误差百分比。拖动不同的负载进行5次试验,负载以额定负载的百分比表示,每次试验均安装不同的惯量盘到伺服电机轴上,记录rat\_0、rat\_1以及e的试验数据。被拖伺服在速度模式加100%的负载,记录试验数据如表2所示。

表2 100%额定负载试验结果

rat_0	rat_1	e/%
4.00	3.88	3.00
5.00	5.11	2.20
8.00	8.17	2.13
11.00	10.75	2.27
13.00	12.69	2.38

被拖伺服在速度模式加50%的负载,记录试验数据如表3所示。

表3 50%额定负载试验结果

rat_0	rat_1	e/%
4.00	3.93	1.75
5.00	5.08	1.60
8.00	8.13	1.63
11.00	10.85	1.36
13.00	12.77	1.77

被拖伺服不加负载,进行5次试验,记录试验数据如表4所示。

表4 空载试验结果

rat_0	rat_1	e/%
4.00	3.91	2.25
5.00	5.10	2.00
8.00	8.15	1.88
11.00	10.80	1.82
13.00	12.74	2.00

从表2~表4可以看出,伺服系统可以比较准确地辨识出折算到电机转子上的总转动惯量,带负载的情况下辨识误差在3%以内,不带负载的情况下辨识误差在2%以内。且辨识误差随着所加负载的减小而减小,验证了上述提到的改进的离线辨识方法无法完全消除无关项影响的观点。

## 5 结 语

本文分析了传统惯量辨识方法的缺陷,设计了改进的离线惯量辨识算法进行优化改善,并通过试验验证了该方法的正确性和可行性。合理利用该方法,伺服系统可以在带负载的场合快速准确地辨识出系统的总转动惯量。

### 【参考文献】

- [1] 王成元,夏加宽,孙宜标.现代电机控制技术[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [2] 王朔,于东,王志成,等.交流伺服系统实时惯量辨识方法综述[J].组合机床与自动化加工技术,2017(10):1.
- [3] ANDOH F.Moment of inertia identification using the time average of the product of torque reference input and motor position[J].IEEE Transactions on Power Electronics,2007,22(6):2534.
- [4] 王黎光,徐海波,杨永生,等.改进加减速度转动惯量辨识的应用研究[J].机械设计与制造,2019(8):45.
- [5] KHOV M, REGNIER J, FAUCHER J. Detection of turn short-circuit faults in stator of PMSM by on-line parameter estimation [C] // 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion,2008:161.
- [6] BOLOGNANI S, ZIGLIOTTO M, UNTERKOFLE K. On-line parameter commissioning in sensorless PMSM drives[C]//ISIE'97 Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1997.
- [7] RAMAKRISHNAN R, ISLAM R, ISLAM M, et al. Real time estimation of parameters for controlling and monitoring permanent magnet synchronous motors[C] // 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference,2009.