

文章编号 1004-924X(2016)06-1359-06

## 小型力矩电机波动力矩的测量

王向军<sup>1,2</sup>, 王晓青<sup>1,2\*</sup>

- (1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;
2. 天津大学 微光机电系统技术教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要:**综合考虑现有无刷直流力矩电机波动力矩动静态测量方法的不足,提出了一种精确测量力矩电机波动力矩的方法。分析了力矩电机波动力矩经典测量方法的误差来源,根据力矩电机分体式的结构特点和可以长期堵转的性能特点,提出了采用电机定子相对转子旋转测量波动力矩的方法。在力矩电机转子堵转的状态下,通过外力旋转定子,测量电机堵转力矩的波动值,从而有效减少测量过程中惯性力矩和摩擦力矩引入的误差。根据提出的测量方法搭建了一套波动力矩测量装置,使用蜗轮蜗杆机构实现了定转子的相对旋转,并对测量装置进行了校准实验。实验结果表明,对于量程为0~1 Nm的装置,其测量准确度可达0.3%,线性度为0.1%,基本满足无刷直流力矩电机对波动力矩测量的精度要求。

**关键词:**力矩电机;无刷直流电机;波动力矩;力矩测量

**中图分类号:** TM359.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162406.1359

## Measurement of torque ripples for small torque motors

WANG Xiang-jun<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-qing<sup>1,2\*</sup>

- (1. *State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072 China;*
  2. *MOEMS Education Ministry Key Laboratory, Tianjin University, Tianjin 300072, China)*
- \* *Corresponding author, E-mail: tjwqxq@tju.edu.cn*

**Abstract:** According to the shortcomings in classical dynamic and static measurement for the torque ripple of a torque motor, a method to measure precisely the torque ripple was presented. The error sources of the classical torque ripple measurement methods were analyzed. Then a new method to measure the torque ripple based on the relative rotation of the stator to a rotor was proposed according to the unique characteristics of the torque motor with a separate structure and the ability to endure long time block. Under the condition of rotor block of the torque motor, the stator was rotated by the external force and the torque ripple of the motor was measured. Using this method, the errors of the inertia moment and the friction torque were effectively reduced. A set of measuring device was built based on the proposed method, and the relative rotation of the stator and rotor was realized with a worm gear mechanism. A verifying experiment was performed and the experimental results show that

收稿日期:2016-01-25;修订日期:2016-02-26.

基金项目:国家教育部科技支撑计划资助项目(No. 625010110);国家自然科学基金与中国民用航空总局联合研究基金资助项目(No. 61179043)

the measurement accuracy of the device with a range of 0—1 Nm is 0.3% and the linearity is 0.1%, which meets the requirements of torque motors for high precision torque ripple measurement.

**Key words:** torque motor; brushless direct current motor; torque ripple; torque measurement

## 1 引言

力矩电机具有可堵转运行,空载转速低,过载能力强等特点,在机械制造、自动控制、航空航天以及国防等领域得到广泛应用。无刷永磁直流力矩电机作为一种直接驱动型电机,其输出力矩中的波动成分将对负载的稳定运行产生直接影响,因此如何对力矩电机的波动力矩进行控制和补偿得到了广泛的关注,并取得了较好的成果<sup>[1-4]</sup>。在研究力矩电机波动力矩的控制和补偿方法过程中,对波动力矩进行精确的测量起到关键作用,是力矩电机设计制造中的重要环节,但对此的研究相对较少。目前对波动力矩的测量方法主要有静态测量和动态测量<sup>[5]</sup>。Zhu 提出的静态测试方法将扭矩转化为压力进行测量,但该方法只能测量齿槽波动转矩而无法测量电磁波动转矩<sup>[6]</sup>,Gobbi R 等提出一种改进的静态测量方法,通过手动旋转电机转子来实现波动力矩的测量<sup>[7]</sup>,但该方法中固定和旋转转子均需要人工反复操作,费时费力。动态测量方法使电机带动负载旋转,电机输出轴产生位移或形变,经传感器转换成电信号输出,从而得到波动力矩。动态测量波动力矩的测量方法的误差来源主要有惯性力矩,摩擦力矩和弯矩等。为减小测量误差,Sun L 等提出通过大惯性飞轮对惯性力矩进行补偿<sup>[8]</sup>,Heins G 等使用反作用扭矩传感器测量定子的反作用力矩,从而避免了摩擦力矩和惯性力矩的引入<sup>[9]</sup>,但上述动态测量法需要考虑共振频率问题,对测试系统刚度提出了较高要求。

本文综合考虑现有动静态测量方法的优缺点,提出一种定子相对旋转的测量波动力矩的方法,既可以测量齿槽转矩,又能实现总的波动力矩测量,同时避免了惯性力矩和摩擦力矩引入的误差,并搭建了一套测试设备,通过负载装置使得转子堵转,通过蜗轮蜗杆机构旋转定子,实现了一个机械周期内波动力矩的自动测量。

## 2 测量原理

测量力矩电机波动力矩的经典动态测量装置如图 1 所示<sup>[8]</sup>,被测力矩电机与负载(通常为制动器或电机)同轴连接,测量时,被测电机拖动负载旋转,传感器至于二者之间,感受轴上应变,输出扭矩值。力矩波动系数<sup>[10]</sup>为:

$$k_{mt} = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{M_{\max} + M_{\min}} \times 100\%, \quad (1)$$

其中: $k_{mt}$ 为力矩波动系数; $M_{\max}$ 为最大堵转力矩; $M_{\min}$ 为最小堵转力矩。

在上述测量方法中,传动轴上的运动方程为:

$$J_r \ddot{\theta}_r = T_{\text{motor}} - b\dot{\theta}_r - T_b, \quad (2)$$

其中: $J_r$ 为转子转动惯量; $\theta_r$ 为转子扭转角; $T_{\text{motor}}$ 为电机输出转矩; $b$ 为轴承黏滞摩擦系数; $T_b$ 为负载转矩。

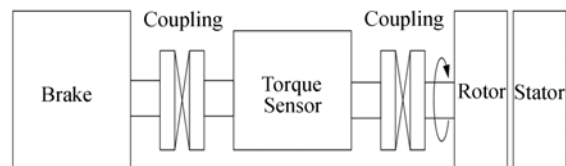


图 1 波动力矩经典测量方法示意图

Fig. 1 Block diagram of classic torque ripple measurement method

扭矩传感器位于转子和负载中间,当被测力矩电机带动负载旋转时,由于扭矩作用,二者之间不可避免的产生一个偏转角度差,扭矩传感器实际测量的就是电机转子和负载之间轴上因转矩产生的应变,若将扭矩传感器考虑进运动方程,则式(2)转化为:

$$J_r \ddot{\theta}_r = T_{\text{motor}} - b\dot{\theta}_r - k_s(\theta_r - \theta_b), \quad (3)$$

其中: $k_s$ 为扭矩传感器刚度; $\theta_b$ 为负载扭转角。

$k_s(\theta_r - \theta_b)$ 即为扭矩 1:

$$T_{\text{meas}} = k_s(\theta_r - \theta_b) = T_{\text{motor}} - b\dot{\theta}_r - J_r \ddot{\theta}_r. \quad (4)$$

可以看出,在波动力矩经典动态测量法的测

量过程中,由于转子转速  $\dot{\theta}_r$  不为零,加速度  $\ddot{\theta}_r$  也不可能恒为零,测量结果将不可避免的含有惯性力矩  $J_r \ddot{\theta}_r$  和摩擦力矩  $b_b \dot{\theta}_r$  的干扰,实际测量值将小于电机实际输出力矩,影响测量精度。

为解决这一问题,提出一种电机定子相对转子转动的波动力矩测量方法如图 2 所示。

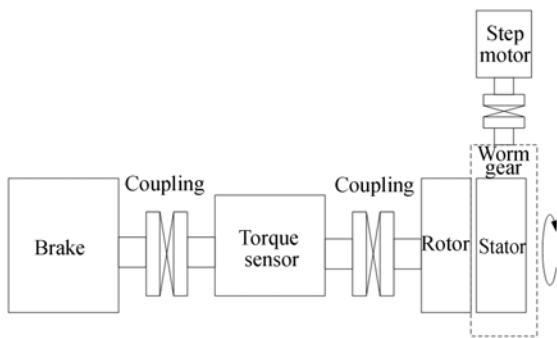


图 2 波动力矩测量方法示意图

Fig. 2 Block diagram of torque ripple measurement method proposed

考虑到力矩电机可以长时间堵转的特点,测量时,将转子与测量轴刚性连接或与负载连接使转子堵转。通过用外力旋转定子的方式实现定转子的相对旋转,测量出 1 个机械周期内电机堵转力矩的转矩波动,从而计算得到波动力矩。在这种测量方法中,因为测试过程中转子始终处于堵转状态,因此  $\dot{\theta}_r = \ddot{\theta}_r = 0$ ,式(4)转化为:

$$T_{\text{meas}} = k_s(\theta_r - \theta_b) = T_{\text{motor}}. \quad (5)$$

可以看出,该测量方法同时避免了惯性力矩和摩擦力矩的引入误差,提高了测量精度,尤其适合小型力矩电机的力矩测量。

### 3 测量装置设计

#### 3.1 测量系统要求

为达到波动力矩测量的高精度要求,同时考虑测试设备的实用性和功能可扩展性,在搭建前需要着重考虑传感器、制动器、拖动装置和连接件的选择。

1) 选择高精度的非接触应变式扭矩传感器,传感器应既可以测量堵转时轴上的静态扭矩,也可以测量传动轴在旋转时的动态扭矩,测量精度不小于 0.1%。

2) 采用蜗轮蜗杆机构配合步进电机作为被测电机定子的拖动机构。蜗杆的展开螺旋角应小于蜗轮蜗杆接触的摩擦角,实现自锁。在步进电机不通电的情况下,被测电机定子将固定不动,转子旋转,可向一般测功机的功能进行扩展。蜗轮蜗杆采用大传动比,降低定子的旋转角速度,实现更精确的测量。

3) 使用磁滞制动器作为系统载荷,磁滞制动器具有非接触式的扭矩传输,避免了摩擦力的干扰,而且输出的负载力矩与励磁电流成良好的线性关系,易于控制。当没有励磁电流通过制动器时,传动轴自由旋转,被测电机实现空载。

4) 使用波纹管联轴器作为传动轴上的连接件,因为它可以在有效传递扭矩的同时抵消因安装误差导致的同轴度偏差。

5) 搭载光电编码器。搭建的测试装置出于实用性考虑,应不局限于波动力矩、堵转力矩的测量,光电编码器可测量传动轴的位置信息,有利于实现测试装置的多功能扩展。

#### 3.2 测量系统搭建

搭建了一套测量 0~1Nm 的小型力矩电机测量装置。装置由测量平台,数据显示和驱动控制等组成,其结构如图 3 所示。

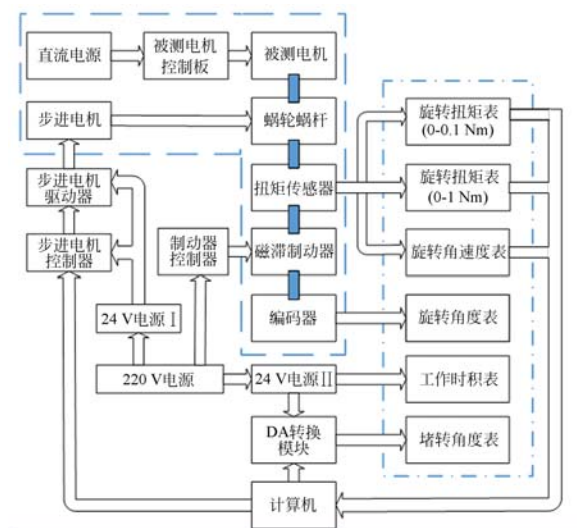


图 3 波动力矩测试装置结构框图

Fig. 3 Block diagram of torque ripple measurement set

该测量装置采用最大输出力矩为 1Nm 的磁滞制动器作为负载使转子堵转,定子的拖动装置使用传动比为 1:80 的蜗轮蜗杆配合步进电机。

测量时,定子与蜗轮固定在一起,由步进电机作为动力拖动蜗杆旋转,进而带动定子转动。轴的一端连接编码器,用于测量校准实验中轴的偏转角。装置实物如图 4 所示。

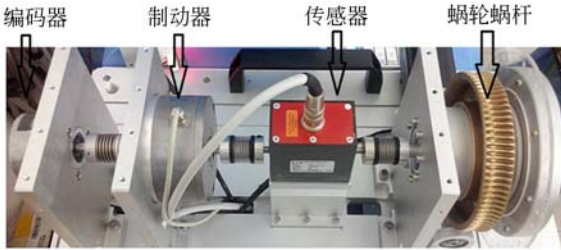


图 4 测量装置实物图  
Fig. 4 Real measurement set

### 4 校准与实验

由于力矩的标准件较为少见,使用杠杆配合砝码组成校准机构对搭建的测量系统进行了校准实验,校准装置如图 5 所示。

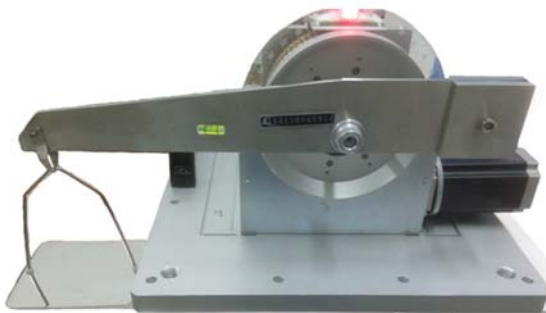


图 5 力矩校准装置  
Fig. 5 Torque calibration equipment

在校准装置中,杠杆长度、砝码质量、加载砝码后杠杆的偏转角度都会影响校准装置的精度。所以应在对波动力矩测量装置进行校准前,首先对校准装置的精度进行分析,确保其拥有较高的精度。

杠杆长度标称值为 250 mm,送检实测值为 250.03 mm。砝码标称质量和实测质量、悬挂砝码后测量轴的偏转角度及综合计算上述误差得到的力矩相对误差如表 1 所示。

由表 1 可知,所使用的杠杆砝码校准装置的最大相对误差为 0.06%,精度较高,可以用于校准测试装置。

表 1 力矩校准装置误差分析

Tab.1 Result of system scale calibration

| 砝码检定<br>质量/g | 杠杆角度<br>偏差/(°) | 标称力矩<br>值/Nm | 实际力矩<br>值/Nm | 相对误<br>差/% |
|--------------|----------------|--------------|--------------|------------|
| 8.173        | 0              | 0.02         | 0.020 01     | 0.06       |
| 20.42        | 0.1            | 0.05         | 0.050 00     | 0.00       |
| 28.593       | 0.1            | 0.07         | 0.070 01     | 0.02       |
| 40.847       | 0.1            | 0.1          | 0.100 02     | 0.02       |
| 81.688       | 0.3            | 0.2          | 0.200 02     | 0.01       |
| 122.535      | 0.4            | 0.3          | 0.300 03     | 0.01       |
| 204.219      | 0.8            | 0.5          | 0.500 00     | 0.00       |
| 245.066      | 1              | 0.6          | 0.599 97     | 0.01       |
| 326.764      | 1.3            | 0.8          | 0.799 90     | 0.01       |
| 367.60       | 1.5            | 0.9          | 0.899 79     | 0.02       |
| 408.173      | 1.6            | 1.0          | 0.999 75     | 0.03       |

使用该校准装置对搭建的波动力矩测试装置进行多点重复测量,结果如图 6 所示。

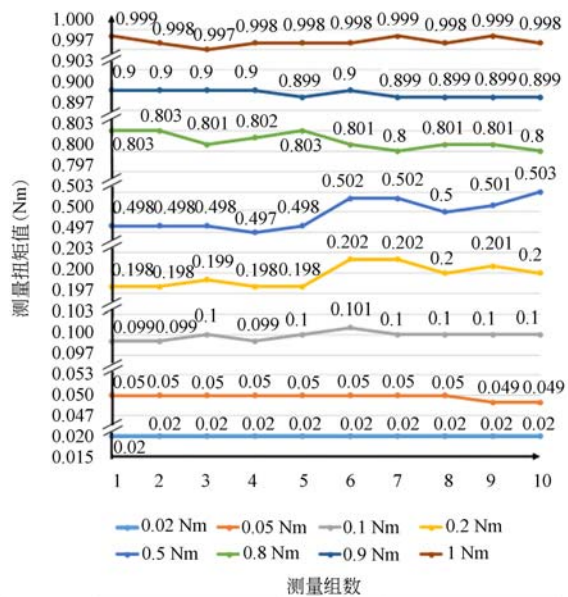


图 6 校准实验结果  
Fig. 6 Result of calibration

根据测量结果,装置的测量准确度为:

$$\delta_A = \pm \frac{\Delta_{Amax}}{Y_{Fs}} \times 100\%, \quad (6)$$

其中  $\Delta_{Amax}$  为最大测量绝对误差值,  $Y_{Fs}$  为满量程扭矩值。

分别计算各个测量点 10 组测量值的平均值,使用最小二乘法进行线性拟合,得到线性度  $\delta_L$ :

$$\delta_L = \pm \frac{\Delta_{L_{\max}}}{Y_{Fs}} \times 100\%, \quad (7)$$

其中: $\Delta_{L_{\max}}$ 为最大拟合偏差值。

分别计算各个测量点的10组测量值的标准偏差 $\sigma$ ,计算重复性 $\delta_Z$ :

$$\delta_Z = \pm \frac{2\sigma_{\max}}{Y_{Fs}} \times 100\%. \quad (8)$$

其中: $\sigma_{\max}$ 为最大标准偏差。

通过计算得到,该套装置的测量准确度为0.3%,线性度为0.1%,重复性0.4%,具有良好的测量精度。使用该装置对外径为60 mm的某型号无刷直流力矩电机的波动力矩进行了5次测量,测量结果如表2所示,一次典型测量所得的力矩波形如图7所示。

表2 某型号力矩电机波动力矩测量结果

Tab. 2 Result of torque ripple measurement for a certain torque motor

| 测量次数 | 最大堵转力矩   | 最小堵转力矩   | 波动系数  |
|------|----------|----------|-------|
|      | /Nm      | /Nm      | /%    |
| 1    | 0.084 3  | 0.067 8  | 10.85 |
| 2    | 0.085 6  | 0.068 1  | 11.38 |
| 3    | 0.084 9  | 0.068 2  | 10.91 |
| 4    | 0.086 6  | 0.069    | 11.31 |
| 5    | 0.085 9  | 0.068 8  | 11.05 |
| 测量均值 | 0.085 46 | 0.068 38 | 11.10 |

## 参考文献:

- [1] 宋彦,高慧斌,张淑梅,等. 直流力矩电机力矩波动的自适应补偿控制[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10):2212-2220.  
SONG Y, GAO H B, ZHANG SH M, et al.. Adaptive compensation of torque ripple in DC torque motor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2212-2220. (in Chinese)
- [2] ZHU H, XIAO X, LI Y. Torque ripple reduction of the torque predictive control scheme for permanent-magnet synchronous motors [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(2):871-877.

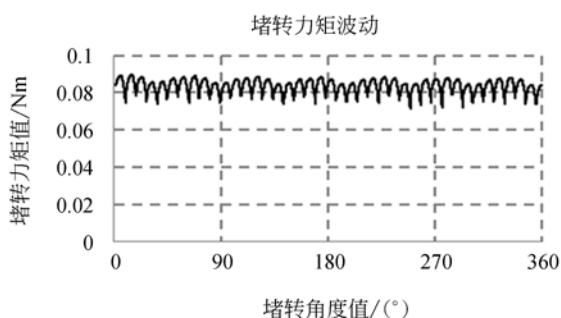


图7 波动力矩测量波形图

Fig. 7 Waveform of torque ripple measurement

## 5 结 论

本文针对无刷直流力矩电机波动力矩测量对精度要求高的特点,提出了一种测量方法,电机转子与制动器相连,既可空载或带负载转动,亦可实现转子堵转,设计了蜗轮蜗杆拖动装置,可在转子堵转的情况下带动定子旋转。该测量方法在制动器加载,转子堵转的情况下,实现全自动力矩波动测量和齿槽力矩测量,同时避免了传统动态测量中惯性力矩和摩擦力矩的干扰。在非堵转的情况下,又可实现一般测功机的功能,进行力矩电机的空载和带负载实验,实现了功能扩展,提高了设备的实用性。根据提出的测量方法搭建了相应的测试装置,设计了校准实验并使用力矩电机进行了实验测试,测试结果表明,对于测量0~1 Nm的装置,测量准确度为0.3%,线性度为0.1%,尤其适合小型力矩电机的参数测量。

- [3] ISLAM R, HUSAIN I, FARDOUN A, et al.. Permanent-magnet synchronous motor magnet designs with skewing for torque ripple and cogging torque reduction [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009, 45(1):152-160.
- [4] 谢进进,刘刚,文通. 双框架磁悬浮控制力矩陀螺磁轴承负载力矩复合补偿的控制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8):2211-2219.  
XIE J J, LIU G, WEN T. Composite compensation for load torque of active magnetic bearing in DGM-SCMG [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 2211-2219. (in Chinese)
- [5] 李省阁,李江涛,李锋. 无刷直流力矩电动机转矩波动测试方法探讨[J]. 微电机, 2014, 47(9):76-78.

- LI X G, LI J T, LI F. Testing method exploration of torque fluctuation in brushless DC torque motor [J]. *Micromotors*, 2014, 47(9): 76-78. (in Chinese)
- [6] ZHU Z Q. A simple method for measuring cogging torque in permanent magnet machines [C]. *Power & Energy Society General Meeting*, 2009. PES '09. IEEE, 2009:1-4.
- [7] GOBBI R, SAHOO N C, VEJIAN R. Experimental investigations on computer-based methods for determination of static electromagnetic characteristics of switched reluctance motors [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, 57(10):2196-2211.
- [8] SUN L, GAO H, SONG Q, *et al.*. Measurement of torque ripple in PM brushless motors [C]. *Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the IEEE*, 2002: 2567-2571,4.
- [9] HEINS G, THIELE M, BROWN T. Accurate torque ripple measurement for PMSM [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2011, 60(12): 3868-3874.
- [10] GB/T 10401-2008, 永磁式直流力矩电动机通用技术条件[S].  
General specification for permanent magnet direct current torque motors [S].

#### 作者简介:



王晓青(1990—),女,辽宁沈阳人,博士研究生,2013年于天津大学获得学士学位,主要从事微机电系统测试方面的研究。E-mail:tjuwxq@tju.edu.cn

#### 导师简介:



王向军(1955—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,博士生导师,主要从事精密测试技术与仪器、光电探测与传感技术、影像与视觉测量方面的研究。E-mail:xdocuwjw@vip.163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)