

文章编号 1004-924X(2002)03-0290-05

电机转矩转速测量方法的分析

赵思宏,范惠林

(空军第二航空学院 三系兵器教研室,吉林 长春 130022)

摘要:电机的转矩和转速是最重要的两个参数,对它们的测量必须准确。根据用户提出的测量航空电机具体要求,本文分析了转矩和转速的测量原理,指出了采用应变式和光电式传感器构成测量仪更适合测量大转矩、高转速电机。虽然与传统的测量方法一致,但经过理论分析,得出了这种测量方式机械结构影响测量稳定性的原因,即传动轴受减速器齿轮啮合力作用产生的弯曲应变和结构谐振对测量精度影响最大。本文通过精确的计算,充分地考虑了机械结构对测量稳定性的影响,提出了选择转矩传感器及转速传感器的基本原理与方法。据此,在所研制的电机测量仪中,大大地提高了测量精度,并有效地减小了测量仪的体积和重量,适合航空工业应用。

关键词:转矩和转速;传感器;减速器;测量稳定性;测量精度

中图分类号:V242.44 **文献标识码:**A

1 引言

随着现代化工业的发展,越来越多的新型电机不断研制出来。转矩和转速是电机最重要的两个参数,要合理地选用电机,必须要准确地对转矩和转速进行测量。在以往的转矩和转速测量中,通常将电机与传感器和负载直接连接起来,这种方法构成的电机转矩转速测量仪具有结构简单,测量平稳等优点,但如果测量各种大转矩电机,需要加大负载,将导致测量仪体积和重量增加,且受旋转轴固有频率的影响,不适合于测量高速电机。

针对用户提出的要求,被测电机多为航空设备,转速及转矩较高,同时测量仪需适宜外场作业,因而测量仪的体积、重量受到严格的限制。为此改变以往用转动惯量较大的旋转体作为负载的方法,采用磁粉制动器作为负载,有效地减小了体积和重量。但是磁粉制动器有极限转速,当被测电机转速较高时,必须通过减速器对待测速率进行减速,所以采用两级减速器进行减速。这种机械结构会对测量稳定性带来一定的影响,传动轴受减速器齿轮啮合力作用产生的弯矩和结构谐振

对测量的影响最大。本文对这种影响进行了充分的分析与计算,旨在找到最合理的测量方法,准确地选择传感器。在原始的设计中,由于没有对这种影响进行分析,当电机以 2000r/min 旋转时,示值出现小幅波动的现象,检查发现传感器轴有轻微弯曲,同轴度超差,这是由于传感器轴受径向力作用而弯曲;当电机以 16000r/min 旋转时,示值出现大幅振荡,经计算得知传感器轴的固有频率与其转速相近,这就是我们所提到的变形谐振问题。

2 电机转矩和转速的测量方法及传感器的选择

为了把转矩和转速信息能够准确地从电机中提取出来,通常是由传感器将被测信息转换为电信号,并对电信号存储、传输、分析计算,最终显示测量结果。传感器是整个测量仪器的核心,对传感器的选择必须合理,并保证能够在一定的工作环境下正常地工作。

(1) 电机转矩的测量方法:转矩的测量,可分为传递法、平衡力法及能量转化法。平衡力法是

收稿日期:2001-10-11;修订日期:2002-03-27

基金项目:空军 2001 年装备检测设备资助项目(No. 20010330 - 12)

通过外加已知的与被测转矩方向相反的转矩,当传动轴静止或匀速转动时,外加转矩与被测转矩相等。这种方法简单,但必须通过另外一种方法测量外加的转矩或力及力臂,这样会对测量引入一定的累计误差。

能量转化法是通过利用能量守恒的原理间接测量转矩,不易实现。传递法是将被测转矩传递到弹性元件上,根据弹性元件物理参数的变化来测量转矩的方法。变化的参数可以是变形、应力、或应变等(由于应变较变形、应力更容易测量,这里采用应变法),使用的弹性元件是扭轴,等截面圆柱形扭轴的应变可按下式计算:

$$\epsilon_{45^\circ} = -\epsilon_{135^\circ} = \frac{16 T}{G d^3}$$

式中, ϵ_{45° 、 ϵ_{135° 分别为扭轴表面上与母线成 45° 及 135° 夹角螺旋线上的应变值; T 为转矩; d 为扭轴直径; G 为其扭轴材料的切变弹性模量。所产生的应变可以引起贴在表面的电阻应变片阻值的变化而形成应变型转矩传感器。电机主轴旋转时,将转矩传递到扭轴上,扭轴上所产生的应变,通过转矩传感器的电阻应变片转换成相应的电信号,该信号通过处理后送显示器显示转矩数值。这种传感器使用方便,精度高,易于集成。

(2) 电机转速的测量方法:测量电机转速有机械式、电气式、光电式几种^[4]。机械式较简单易行,但精度较低。电气式分为发电机式、电涡流式等,精度较高,但却产生电磁阻力矩,给转矩的测量带来较大的系统误差。光电数字式检测是利用光电原理检测转速,它有线性好、分辨力高、测速范围大等优点,而且不会对电机输出转矩造成损失,见图 1。

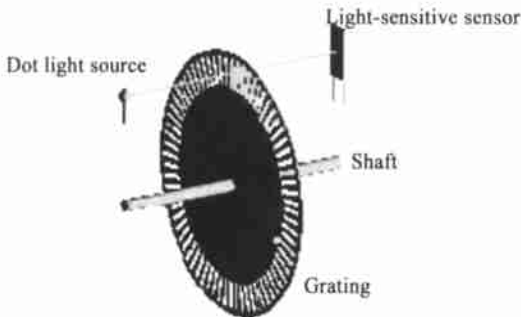


图 1 光电式电机转速的测量原理图

Fig. 1 Principles of the rotational speed measurement.

它是在传感器轴上安装一时刻有均匀透明格子的码盘,当码盘随着轴旋转时,光源发出的细光束透过透明的格子射到光敏传感器上,再由光敏传感器转换成电脉冲^[2],计数器接收后经计算可以得到转速的数据。设在给定时间内计数器测定的脉冲数为 N ,则被测电机轴的转速 n 为: $n = \frac{60 N}{m t}$, 式中, m 为光学码盘线数, t 为计数时间。

选好传感器之后,可考虑将两种传感器集成起来,共用一套放大电路及信号处理系统和显示系统,可以简化测量步骤,有效地减小测量仪体积。

3 机械结构对测量稳定性的影响

测量是靠机械传动来实现的,因为传感器极易受工作环境的影响^[2],所以机械传动结构是测量误差的重要来源。其中传动轴受减速器齿轮啮合力作用产生的弯矩和结构谐振对测量的影响最大,约是信号处理电路带来误差(例如零漂)的几十倍甚至更高,在设计转矩和转速测量仪时必须对这两方面影响给与足够的重视。图 2 为转矩和转速测量仪结构图,将粘贴电阻应变片和配置有测速码盘轴简称为传感器轴,用户提出的测量要求见表 1。

表 1 用户提出的测量要求

Table 1 Requirements to measurement by the user		
Technical index	Data	Accuracy requirement
Max. torque	50N/ m	$\pm 0.5\%$
Max. rotational speed	20000r/ min	$\pm 0.5\%$
Outline	0.6 × 0.5 × 0.3 (m)	
Weight	50kg	

(1) 传感器轴的确定:根据用户提出的能够测量到 $50 N \cdot m$ 转矩的要求,同时考虑到减速器的传动性质和保证一定的测量裕度,必须首先保证传感器轴具有一定的强度。如果待测是三相电机,启动时转矩为额定转矩 $2 \sim 3$ 倍^[5],为避免过载可能造成的传感器永久性破坏,测量裕度取量程的 3 倍,即 $150 N \cdot m$ 。在实际结构中,为保证磁粉制动器的额定转速,采用两级减速器进行减速,设传感器轴所要承受的转矩为 $T_{传}$,前后级减速

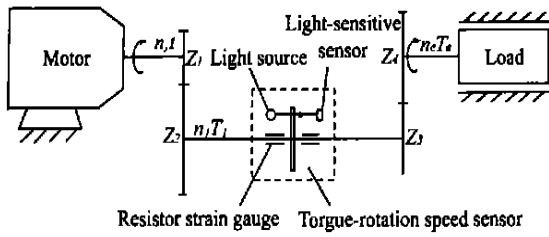


图 2 测量仪结构示意图

Fig.2 Structural diagram of the measuring apparatus.

器的传动比为 $i_{21} = i_{43} = 1.5$, 传感器扭轴所受的转矩 $T_{传} = i_{21} 150 = i_{43} 150 = 1.5 \times 150 = 225 N \cdot m$, 对于实心轴, 由强度条件

$$\sigma_{max} = \frac{T_{传}}{W_n} \quad [\text{许用}], \quad W_n = \frac{d^3}{16}$$

得:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16 T_{传}}{\text{许用}}} = \sqrt[3]{\frac{16 \times 225 \times 10^3}{3.14 \times 30}} = 33 \text{mm}$$

其中 σ_{max} 为最大理论扭矩, W_n 抗扭截面模量, $\text{许用} = 30 \text{Mpa}$ 为许用剪应力, d 为传感器轴直径。其次, 为了使传感器具有一定的灵敏度, 在保证强度的情况下, 应选择适当的刚度, 所以取轴的直径 $d = 35 \text{mm}$ 。

(2) 转矩传感器在径向力作用下的分析: 设被测转矩为 $T_{待测}$, 电阻应变片所测得的最大应变为 $45^\circ, 135^\circ$, 由 $T_1 = T_{待测} i_{21}$ 得理想情况下的转矩测量表达式为:

$$T_{待测} = \frac{T_1}{i_{21}} = \frac{T_1}{i_{43}} = \frac{Gd^3}{i_{21} 16} \cdot 45^\circ = - \frac{Gd^3}{i_{21} 16} \cdot 135^\circ$$

这是理想转矩传感器的工作原理, 在没有弯曲应变的情况下, 转矩传感器测量线性较好。

在两级减速器工作的条件下, 传感器轴要受到齿轮啮合产生的啮合力作用, 致使传感器轴弯曲。弯曲的轴首先是使电阻应变片产生纵向应变, 使输出信号增加, 带来测量误差。如图 3 所示。

$$T_{待测} = \frac{Gd^3}{i_{21} 16} (45^\circ + \text{拉}) \\ = - \frac{Gd^3}{i_{21} 16} (135^\circ + \text{压})$$

在这里, $T_{待测}$ 为有测量误差的转矩测量值, 拉, 压分别为传感器轴受啮合力作用下在 45° 和 135° 方向上产生的附加应变。可见, 附加拉,

压是转矩测量误差的主要来源, 同时由于轴的纵向弯曲致使码盘产生倾斜, 使光束不能全部通过码盘透明的格子照射到光敏元件上, 引起转速测量误差^[1]。一般来说, 它们不可能通过补偿电路来彻底消除, 必须依靠机械结构本身来增加测量的稳定性。经分析及实验可得, 在传感器轴同轴度误差小于 0.05mm 时, 基本上可以保证绝大多数测量要求。这里可以通过考察在径向力作用下传感器轴的最大形变量 y_{max} 的方法, 只要最大形变量 y_{max} 小于所允许的同轴度误差的一半, 即满足设计要求。

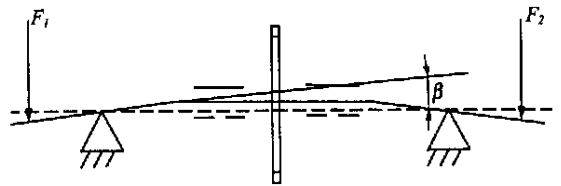


图 3 传感器轴径向力作用下产生的变形图

Fig.3 Deformation of the shaft of the sensor under radial force.

$$\text{由 } F_1 = F_2 = \frac{2 T_{主动轮}}{D_1} \tan \beta = \frac{150 \times 10^3}{25} \tan 20^\circ =$$

2183 N 可得:

$$y_{max} = \frac{2 F_1 c L^2}{EI} = \frac{2 \times 2183 \times 35 \times 150^2}{210 \times 10^3 \times \frac{1}{64} \times 35^4} \\ = 0.022 \text{mm};$$

其中: F_1, F_2 为齿轮啮合而使轴所承受的径向力; 电机轴上主动论的最大转矩, 分度圆直径, 压力角分别为 $T_{主动轮} = 150 N \cdot m, D_1 = 50 \text{mm}, \beta = 20^\circ$; 轴承间距, 作用力到相应轴承的作用距离分别为 $L = 150 \text{mm}, c = 35 \text{mm}$; EI 为抗弯模量, E 为弹性模量, 对于钢为 $2.10 \times 10^5 \text{N/mm}^2$, I 为轴惯性矩, 对于圆形为 $\frac{1}{64} d^4 (\text{mm}^2)$ 。

通过计算得最大形变量 $y_{max} = 0.022 \text{mm} \times \frac{1}{2} = 0.011 \text{mm}$, 即同轴度未超差, 所选传感器轴满足测量过程中同轴度要求。

(3) 轴临界转速的确定: 由于轴和轴上零件的结构不能保证严格的对称, 又由于材质不均匀、加工误差、自重产生的变形、摩擦产生的热变形等原因, 使整个轴的中心不与回转中心重合, 而具有一定的偏心, 则轴转动时的离心力的方向随轴转

动,是一个周期性的干扰力,为强迫振动源^[3]。在低速转动时,它的影响不大。高速时就很大,因为它与角速度的平方成正比。当干扰力的频率达到系统自振角频率时,运转便不稳定,产生变形谐振,不但会影响测量精度,而且有可能破坏整个传感器。用户提出能达到测量直流电机的转速为 20000r/min,属高速电机^[5],所以必须对临界转速进行校验。因为码盘与传感器轴相比,质量可以忽略,故可假定传感器轴为质量均匀的轴,相当于

两端简支的梁。根据弹簧刚度的定义 $k = \frac{qL}{\frac{5qL}{384EI}}$

$= \frac{384EI}{5L^3}$ 可得:

$$\begin{aligned}
 n_{\text{临界}} &= 30 \sqrt{\frac{k}{m}} = 2620 \sqrt{\frac{EI}{qL^4}} \\
 &= 2620 \sqrt{\frac{EI}{\frac{1}{4}d^2L^4}} \\
 &= 2620 \sqrt{\frac{2.10 \times 10^5 \times \frac{1}{64} \times 35^4}{7.6 \times 10^{-5} \times \frac{1}{4} \times 35^2 \times 150^4}} \\
 &= 51000 \text{ r/min}
 \end{aligned}$$

上两式中 E 为弹性模量,对于钢为 $2.10 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, I 为轴惯性矩,对于圆形为 $\frac{1}{64}d^4$ (mm^2), q 为单位长度质量, ρ 为密度。对于用户提出的电机测量范围为 $0 \sim 20000 \text{ r/min}$ 的要求,且为了保证安全测量,取转速测量裕度为 1.5 。转换到传感器轴的等效转速为:

$$\begin{aligned}
 n_{\text{等效}} &= 20000 i_{12} = 20000 \times \frac{1}{1.5} \times 1.5 \\
 &= 20000 \text{ r/min}
 \end{aligned}$$

只要轴临界转速大于转换到传感器轴的等效转速,即满足设计要求。由计算得,轴临界转速远大于等效转速,故所选的传感器轴满足工作需要。

4 结论

根据以上具体的分析,确定采用 JN328D 型

的一体化的转矩转速传感器,图 4 为测量仪的实际结构。重量为 29kg,体积为 $0.5 \times 0.4 \times 0.3$ (m) (不含被测电机)。其测量精度检验如表 2、3 所示:

表 2 转矩测量精度检验

Table 2 Inspection of the torque - measuring accuracy

Test result Data	Load (N.m)	Unload (N.m)	Max. absolute error (N.m)
5 N.m	4.81	4.85	0.19
10.5N.m	10.1	10.2	0.4
20N.m	19.5	19.6	0.5
33.8N.m	33.3	33.6	0.2
50 N.m	49.7	49.78	0.3

表 3 转速测量精度检验

Table 3 Inspection of the rotational speed - measuring accuracy

Test Data	Test result (r/min)	Max. absolute error (r/min)
1400r/min	1337	3
2800r/min	2788	12
6000r/min	5981	19
9600r/min	9577	23
15500r/min	15465	35



图 4 研制成功的测量仪的实际结构

Fig. 4 Structure of the developed measuring apparatus.

经用户的长期使用证明,测量仪具有工作稳定,测量精度高等特点,说明电机转矩转速测量方法的分析正确,传感器选择得当。

参考文献:

- [1]王宪平. 直线度误差组合分离方法及其误差分析[J]. 光学 精密工程, 2001, (5): 83 - 85.
- [2]张红胜. 光电定角比相法检测圆光栅测量精度的提高[J]. 光学 精密工程, 2001, (2): 124 - 126.
- [3]师汉民. 振动分析、辨识与建模[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1998, 135 - 136.
- [4]夏士智. 测量系统设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997, 90 - 93.
- [5]编写组. 机床设计手册—电力传动及控制系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995, 837 - 878.

Research on the measurement of motor 's torque and rotational speed

ZHAO Si-hong, FAN Hui-lin

(*Second Aeronautical Institute of Air Force, Changchun 130022, China*)

Abstract: The torque and rotational speed of a motor are the most important two parameters, their measurement must be accurate. According to the requirements to the measurement aviation motor by the user, this paper analyzes the measurement principles of torque and rotational speed, and points out that the measuring apparatus composed of optoelectric sensors is more suitable for measuring heavy torque and high rotational speed. Through analysis the reasons influencing measuring stability have been found out, which are the flexure strain and structure resonance produced by the transmission axle under the function of the gearing - in force of the reduction gear. This paper, through accurate calculation, takes account of the effects of the mechanical structure on the measuring stability and gives the basic principles and method of choosing the torque sensor and rotational speed sensor. Besides, the measuring accuracy of the apparatus has been considerably increased, the size made smaller, and weight lost, so that they are fit for a aviation use.

Key words: torque and rotational speed; sensors; reduction gears; measuring stability; measuring accuracy

作者简介: 赵思宏(1965 -), 男, 吉林省长春市人, 研究生, 讲师, 空军某型飞机专家组成员;

范惠林(1962), 男, 山东省潍坊市人, 研究生学历, 副教授, 空军某航空学院学术委员会委员。