

传动轴扭矩测量误差分析

禹精达^{1,2}, 朱 晖²

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 通信与信息工程学院, 山西 太原 030051)

摘 要: 传动轴扭矩测量是研究车辆动力系统性能的重要手段。介绍了传动轴扭矩精确测量的重要性, 给出了影响传动轴扭矩测量精度的一些因素, 并详细分析了由传动轴扭矩应变式测量方式、传动轴本身产生的弯矩以及传动系统带来的扭振对测试结果所产生的影响, 为下一步更精确地测量传动轴的扭矩打下了坚实的基础。

关键词: 传动轴; 扭矩测量; 误差分析; 弯矩; 扭振

中图分类号: TH133.2

文献标识码: A

文章编号: 1006-4414(2011)04-0004-02

Measurement error analysis of shaft torque

Yu Jing-da^{1,2}, Zhu Hui²

(1. Key laboratory of instrumentation science & dynamic measurement, North university of China, Ministry of education, Taiyuan Shanxi 030051, China;

2. School of information and communication engineering, North university of China, Taiyuan Shanxi 030051, China)

Abstract: Study of the vehicle shaft torque measurement is an important tool for vehicle power system performance. the importance of accurate measurement of shaft torque is described, the factors which affect the accuracy of shaft torque measurement are provided, and a detailed analysis that how these factors caused the error to the drive shaft torque measurement are given, such as the impact of test results of the shaft strain measurement of torque and the moment itself and the drive shaft drive torque caused by the earthquake. Then more accurate measurements for the next drive shaft torque laid a solid foundation.

Key words: drive shaft; torque measurement; error analysis; bending moment; twisting shock

1 应变式测量方法产生的误差

传动效率是评价一台车辆机动性能优劣的重要指标, 是指传动装置的输出功率与输入功率的比值, 即 $\eta = P_o / P_i$ (其中: 输入功率 P_i 是由动力装置传递给传动装置的功率, 输出功率 P_o 可通过对联接器的测量获得, 即 $P_o = T \cdot \omega$; T 为连接器扭矩, $N \cdot m$; ω 为连接器转速, r/min)。提高传动装置的传动效率是提高车辆机动性能的主要手段, 所以必须对传动输出功率进行精确测量, 影响传动轴扭矩测量精度的因素有很多, 笔者对传动轴扭矩测量误差给予了全面的分析。

1.1 电桥非线性引起的误差

要说明因电桥非线性引起的测量误差, 需讨论单桥臂工作时电桥输出与应变电压的关系^[1]。单臂工作时直流应变电桥如图1所示, 图中 E 为供桥电压, V_o 为电桥输出电压, R 为工作电阻, ΔR 为工作电阻因应变引起的电阻增量。

当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 时, 电桥输出电压 V_o 为:

$$V_o = V_{AB} - V_{BC} = \frac{\Delta R}{2(2R + \Delta R)} E \quad (1)$$

因 $R \gg \Delta R$, 且 $\Delta R/R = K\varepsilon$ (K 为灵敏系数, ε 为

应变值), 则式(1)可写为:

$$V_o \approx \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} E = \frac{1}{4} EK\varepsilon \quad (2)$$

从式(1)到式(2), 实际上是从非线性到线性关系的近似处理^[2]。近似处理带来了一定的误差。由式(1)展开得:

$$\begin{aligned} V_o &= \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} E = \frac{E}{4} \times \frac{\Delta R}{R} \frac{1}{1 + \frac{1}{2}(\frac{\Delta R}{R})} \\ &= \frac{E}{4} \times \frac{\Delta R}{R} [1 - \frac{1}{2} \times \frac{\Delta R}{R} + (\frac{1}{2} \times \frac{\Delta R}{R})^2 + \dots] \end{aligned} \quad (3)$$

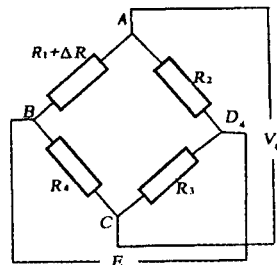


图1 单臂工作时直流应变电桥

由式(2)、(3)可得相对非线性误差为:

$$\gamma = -\frac{1}{2} \times \frac{\Delta R}{R} + \left(\frac{1}{2} \times \frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \dots$$

$$\approx -\frac{1}{2} \times \frac{\Delta R}{R} = -\frac{1}{2} K \varepsilon \quad (4)$$

当 $\varepsilon = 10000 \times 10^{-6}$, $K = 4$ 时, 误差 = -2%, 因此在大变形测量中误差较大, 应予修正。

1.2 机械性能引起的误差

根据应变式电阻片的特性, 如果胶层过厚或粘贴剂固化处理不好, 就会造成应变式电阻片稳定性差或不完全服从胡克定律, 从而使应变式电阻片产生机械滞后的现象^[3]。机械滞后的误差大小可从加载曲线得出, 如图2所示。机械滞后不仅影响扭矩测量的大小, 而且时间上还会滞后, 这将影响结构各部件变形的相互关系, 所以需要加以修正。可采用重复加卸载试验的办法来减小机械滞后量, 一般可重复2~6次^[4]。

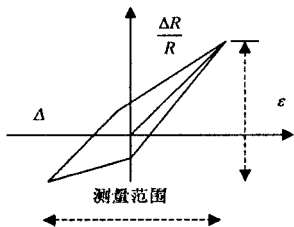


图2 机械滞后加载曲线图

2 传动轴弯矩产生附加扭矩

在应变式扭矩传感器的测量过程中产生弯矩的原因有很多, 其中由于传动轴是弹性轴, 负载和原动机之间不能保证完全同心, 以及轴的附加结构和重力等原因, 都会产生弯矩。为确定附加扭矩是如何产生的, 下面分析一下弹性轴同时受到扭矩和弯矩时的受力情况。

在弹性轴上取一个正六边形的单元体的受力情况^[5]如图3所示, 其中 σ_x 为弯矩产生的正应力, τ_y 、 τ_x 为扭矩产生的剪应力, 且有 $\tau_y = \tau_x$ 。

任取一斜截面, 以 α 表示斜截面外法线与 x 轴的夹角如图4所示 (其中: t 表示斜截面切线, n 表示斜截面的外法线), 在斜截面法线应力 σ_α 与切线应力 τ_α 的公式如下:

$$\sigma_\alpha = -(1 + \cos 2\alpha) \frac{\sigma_x}{2} + \tau_x \sin 2\alpha \quad (5)$$

$$\tau_\alpha = -\sin 2\alpha \frac{\sigma_x}{2} - \tau_x \cos 2\alpha \quad (6)$$

在弹性轴只受到扭矩作用时, 在轴线与轴表面上成 135° 和 45° 角的方向上存在最大的且相等的压应力和拉应力^[6], 所以在这两个方向上分别贴上应变

式扭矩传感器组成直流差动电桥, 与轴线成 135° 、 45° , 由式(5)、(6)得, 当 $\alpha = 45^\circ$ 时有:

$$\sigma_\alpha = -\frac{\sigma_x}{2} + \tau_x \quad (7)$$

$$\tau_\alpha = -\frac{\sigma_x}{2} \quad (8)$$

当 $\alpha = 135^\circ$ 时, 则:

$$\sigma_\alpha = -\frac{\sigma_x}{2} - \tau_x \quad (9)$$

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_x}{2} \quad (10)$$

其中: $\tau_x = M/W_p$, W_p 为轴截面极距, M 为轴所受扭矩; $\sigma_x = M_n y/\mu$, M_n 为轴所受弯矩, y 为应变片与中性轴的垂直距离, μ 为被测轴的泊松比。

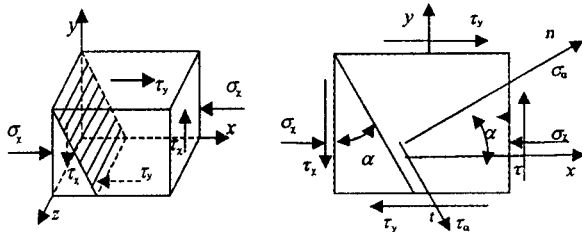


图3 正六边形同时受弯矩和 图4 斜截面分解应力分析
扭矩的应力分析

当传动轴存在弯矩时, 在 135° 、 45° 的方向上电阻应变片所受正应力是由弯矩和扭矩共同产生的。

3 扭振产生附加扭矩

(1) 车辆动力传动系统扭振产生的原因有内、外因两种^[7]: ①内因是在车辆动力传动系统中, 发动机燃气压力和惯性力矩呈周期性变化, 这些力矩作用在发动机曲轴上形成机理力矩; ②外因是轴系本身不但具有惯性, 而且具有弹性, 由此决定了其固有的扭振特性。因此, 对于车辆动力传动系统而言, 扭振是普遍存在的, 只是轴系的差别和激励的不同, 扭振的强弱程度不同而已。车辆动力传动系统轴系的扭转振动是车辆振动的一种重要形式, 当激励力矩的频率等于系统固有频率时, 系统将发生共振。共振时, 系统中往往产生很大的扭振附加力矩和附加应力, 即附加扭矩。

(2) 传动装置中传动轴一般采用万向节连接器, 工作转速高于 500 r/min (包括 500 r/min) 的万向联轴器存在动平衡问题。在理想的情况下, 当轴旋转与不旋转时对轴承产生相同的压力, 这样的回转体是平衡的回转体。轴系动平衡是指在轴两个校正面上同时进行校正平衡, 校正后的剩余不平衡量, 以保证轴在动态时是在许用不平衡量的规定范围内。万向节即

(下转第8页)

3.2 主要参数设定

仿真模型主要参数设定如下: 发动机转速 1500r/min; 变量泵排量 100mL/rev, 变量马达排量为 105mL/rev; 变量泵的输入电流饱和区间为 $[-1, 1]$, 马达输入电流饱和区间为 $[0.3, 1]$; 溢流阀压力设为 30MPa; 设定泵的输入阶跃信号为 400, 泵反馈增益 k 为 0.5, 此时两马达转速目标值均为 400r/min; 设定马达输入阶跃信号为 0, 左马达反馈增益为 -1, 右马达反馈增益为 1。

3.3 仿真结果及分析

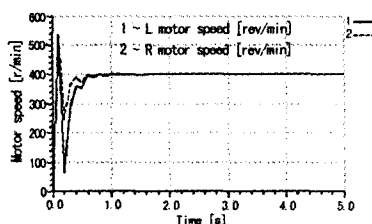


图4 $\delta = 3.33$, $\gamma = 2$, $\gamma' = 1.71$ 时马达转速曲线

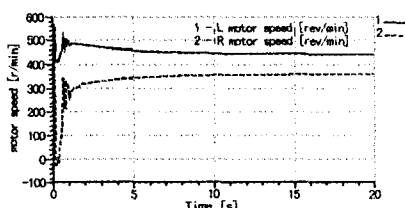


图5 $\delta = 3.3$, $\gamma = 4$, $\gamma' = 3.42$ 时马达转速曲线

(1) 由图4可知,在排量比 $\delta=3.33$,负载比 $\gamma=2$,当量负载比 $\gamma'=1.71$ 时,两马达转速经控制系统调整后实现了转速同步。

(2) 由图5可知,在排量比 $\delta=3.3$,负载比 $\gamma=4$,

当量负载比 $\gamma'=3.42$ 时,两马达转速经控制系统调整后无法实现转速同步。

(3) 由图6可知,在排量比 $\delta=3.3$,负载比 $\gamma=4$,当量负载比 $\gamma'=3.27$ 时,两马达转速经控制系统调整后实现了转速同步。

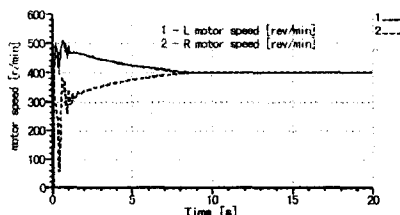


图6 $\delta = 3.3$, $\gamma = 4$, $\gamma' = 3.27$ 时马达转速曲线

4 结论

马达排量比 δ 大于当量负载比 γ' 是在控制系统作用下,两马达可实现转速同步的充分必要条件(按当量负载比 γ' 的定义,负载比 γ 可认为是阻尼系数 $B=0$ 时的马达的当量负载比),这意味着马达的排量比 δ 在很大程度上决定了在系统在多大的负载范围内可以实现转速的同步可调,如果要在负载变化范围较大的情况下实现两马达转速同步,就必须相应的提高马达的排量比 δ 来适应当量负载比 γ' 的变化。

参考文献:

- [1] 桑勇,王占林,祁晓野.基于广义预测控制的泵马达调速控制的研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2007(22):4-6.
- [2] 吴保林,裘丽华.单泵驱动双马达速度同步可实现的负载特性分析[J].中国机械工程,2010(3):206-211.
- [3] 付永领. AMESim 系统建模和仿真——从入门到精通[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006.

(上接第5页)

万向接头,英文名称 universal joint,是实现变角度动力传递的机件,用于需要改变传动轴线方向的位置,两轴的最大夹角 λ 允许范围一般为 $15^\circ \sim 20^\circ$,它是车辆驱动系统的万向传动装置的“关节”部件^[8]。在传动装置中,轴间交角 λ 越大,传动轴的转动越不均匀,产生的附加交变载荷就越大。以上动平衡和交角 λ 的存在,两者都能引起传动轴弯矩的变化,对扭矩的测量产生影响,即附加扭矩。

4 结论

从理论上分析了三个影响传动轴扭矩测量精度的因素:应变式测量方法本身产生的误差;由传动轴弯矩产生的附加扭矩;由车辆传动力系统产生的扭振带来的附加扭矩。如何减少应变式测量方式带来的

误差,以及如何消除弯矩和扭振带来的附加扭矩,将是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 张建民. 传感器与检测技术[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [2] 郑秀瑶,谢大吉. 应力应变电测技术[M]. 北京:国防工业出版社,1985.
- [3] 孙宇宁. 应变式测力传感器的非线性误差及其校正[J]. 测绘信息与工程, 1998(1):38-41.
- [4] 陶宝祺,王妮. 电阻应变式传感器[M]. 北京:国防工业出版社,1993.
- [5] 孙望超,李冬华. 工程力学[M]. 北京:科学技术出版社,1994.
- [6] 张有颐. 转矩测量技术[M]. 北京:计量出版社,1996.
- [7] 项昌乐. 装甲车辆传动系统动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
- [8] 毕小平,王普凯. 坦克动力-传动装置性能匹配与优化[M]. 北京:国防工业出版社,2004.