

仪表计量系统中扭矩倍增器误差分析及校准

张勇

(河北唐山汇中仪表股份有限公司 河北 唐山 063000)

摘要: 扭矩倍增器是一种可以提高扭矩的装置。本文对扭矩倍增器的原理进行阐述, 比较国内现有几种扭矩倍增器的校准方法, 分析其计算结果及校准数据误差, 指出导致这一误差出现的诸多因素, 并提出减少这一误差的方法措施, 以期提升扭矩倍增器的工作效能提供积极参考。

关键词: 扭矩倍增器; 计量校准; 数据结果; 误差

0 引言

扭矩倍增器, 也称扭力放大器, 是能够帮助操作者将小扭矩输入转化为大扭矩输出的辅助装置, 在工业制造、航空航天、汽车船舶等领域均有十分广泛的应用。根据杠杆原理, 力臂越长, 作用力越大, 但在实际操作中, 装置实际占有空间有限, 无法无限制地加长力臂。采用扭矩倍增器, 通过传动设备并结合应用各种扭矩扳手, 能够实现在有限空间内几倍至几十倍扭矩的增大, 能够有效解决各种大量程扭矩扳手占用空间大、稀缺的问题, 还具有操作便捷的优势。然而, 扭矩倍增器在持续应用过程中, 会因制作工艺、设备磨损、变形等问题, 导致扭矩放大出现变化, 无法精准输出设定扭矩, 必须对扭矩倍增器展开计量校准, 细致分析误差产生的原因, 并提出应对措施, 以保障扭矩倍增器应用的准确性, 正确发挥其应有效能。

1 扭矩倍增器的工作原理及结构特点

扭矩倍增器是一种扭矩辅助计量器具。其工作原理是齿轮传动原理, 通过在适当位置固定扭矩倍增器的反作用力臂, 并将其作为支点, 用以完成输入端小扭矩向输出端大扭矩的转变。扭矩倍增器通常由输入端、输出端和反作用力臂组成, 主要有两种构成形式: 输入端和输出端同轴形式、输入端和输出端不同轴形式, 如图所示。

例, 在使用过程中, 需要配合使用扭矩扳手, 扭矩扳手、扭矩倍增器和被锁物保持同轴线对准, 反作用力臂与抵挡物的平面接触, 还要确保反作用力点与扭矩倍增器保持尽可能远的距离。

值得注意的是, 扭矩倍增器制造厂家一般会明确最大输出扭矩、放大倍率, 操作人员在实际应用时, 需要将放大倍率除去, 并依据计算后的数值, 选择对应的扭矩扳手。由此可见, 放大倍率、最大输出扭矩是否正确是决定扭矩倍增器拧紧力是否正确

2 扭矩倍增器的计量校准方法及结果

2.1 校准方法比较

当前社会对计量的多元化需求在不断增加, 尤其在生产中, 很多传感器都需要进行计量校准。扭矩倍增器作为一种扭矩放大装置, 在工业生产中已经有了广泛的应用, 它是一种可以为操作者提高扭矩的装置, 其放大倍数可以达到 5 ~ 125 倍, 最大输出扭矩可以达

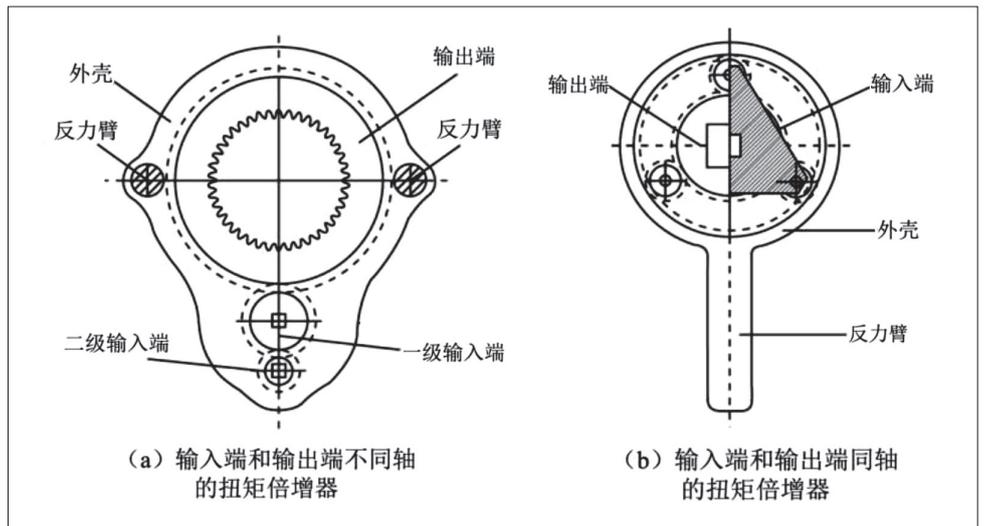


图 扭矩倍增器的结构类型

到50000Nm。扭矩倍增器不同于其他扭矩仪，其本身无法产生扭矩，是由外来的扭矩作用在其扭矩的输入端，经过自身的放大系统使输出的扭矩值放大几倍甚至是几十倍。我国关于扭矩倍增器的生产和使用起步较晚，大多为国外设备进口，目前国内外关于扭矩倍增器计量校准的技术研究较少。在我国，扭矩倍增器主要应用在航空发动机及大扭矩涡轮发动机相关领域，这些领域对其数据准确性有较高要求，必须定期测量、计算与校准，加强发动机维护，才能保障航天设备应用的安全性。目前，国内关于扭矩倍增器的计量校准方法有三种：(1) 利用加载装置带动扭矩测试仪旋转，施加并测量输入端和输出端扭矩，主要参照民航和军工相关标准，如《发动机专用扭矩倍增器校准规范》《扭矩倍增器校准规范》；(2) 利用扭矩扳子对输入端进行施加和测量，利用扭矩测试仪测量输出端输出扭矩，该方法主要参照《扭矩扳子检定规程》；(3) 将设备送至原厂进行测量、校准，具体见表1。

表1 扭矩倍增器校准方法比较

校准方法	民航及军工相关标准	《扭矩扳子检定规程》	原厂校准
使用设备	扭矩测试仪	输入端：标准扭矩扳子 输出端：扭矩测试仪	扭矩测试仪
判断方法	放大倍数的相对示值误差	输入端和输出端扭矩值的相对示值误差	输入扭矩值，测量数值为标准的相对误差

另外，对扭矩倍增器进行校准时，需要严格按照相应技术标准和规范展开，这样才能确保校准结果准确，具体技术标准见表2。

表2 扭矩倍增器准确度级别及技术标准

级别	输入端扭矩示值重复性 R	放大倍率允许误差 e
5	5%	±5%
10	10%	±10%

2.2 校准结果计算

首先，确定扭矩倍增器放大倍率的测量模型：

$$K = \frac{m}{M} \tag{1}$$

式中：K—扭矩倍增器放大倍率；

M—输入端扭矩值；

m—输出端扭矩值。

在实际计算时，K 属于无量纲。假设以输出扭矩值作为校准点，扭矩倍增器放大倍率出厂标准值为 K_0 ，放大倍率示值误差为 e ，实际测量 n 次，示值重复性为 R ，由此可获得扭矩倍增器放大倍率示值误差和重复性计算公式，具体如下：

$$e = \frac{K_0 - m / \bar{M}}{K_0} \times 100\% \tag{2}$$

$$R = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{\bar{K}} = \frac{m / M_{\min} - m / M_{\max}}{m / \bar{M}} = \frac{\bar{M}}{M_{\min} \cdot M_{\max}} (M_{\max} - M_{\min}) \times 100\% \tag{3}$$

3 扭矩倍增器计量校准误差分析

由上述可知，扭矩倍增器校准时受力结构复杂，与校准装置存在多个连接端，包括输入端、输出端、反作用力臂、反作用挡块、输入及输出扭矩装置等。而且，还需要根据实际情况，在扭矩倍增器输入端和输出端加装部分转接件。与此同时，通过实际校准获悉，扭矩倍增器存在重复性大的问题，部分重复性数值已经达到了5% ~ 10%。可见，扭矩倍增器与校准装置接触部位及加载方式的不同，导致的系统误差也存在差异。本文对此展开定性分析，具体包含以下几种。

3.1 丝杠加载方式

此种方式主要遵循《扭矩扳子检定规程》中关于带有倍增器扭矩扳子的相关内容，加载方式与安装方式均一致，检测对象则转换为扭矩倍增器。为确保丝杠加载方式的准确性，还需要配合使用扭矩扳子，将其与扭矩倍增器输入端保持同轴串联的形式后，将丝杠转动，完成扭矩加载。实践中发现，扳子承载的负荷主要来源于丝杠和导轨，当施加的作用力较大时，扳子会出现局部弯曲情况，当导轨刚性较弱时，丝杠向扳子施加的作用力会出现一定角度的偏移。同时，通过实践分析，当丝杠发生运动时，导轨也会随之运动，并在垂直于导轨的方向出现一个较大位置的偏移，也就是说，在垂直方向出现一定分力，继而对倍增器输入端测量的准确性造成影响。综合来看，丝杠加载方式产生系统误差主要有如下两个原因：(1) 垂直于导轨方向出现一定分力，导致系统出现弯矩；(2) 平行于导轨方向的力出现一定偏移。

3.2 反作用力臂与校准装置挡板刚性接触

总结分析扭矩倍增器校准误差产生原因时发现，普遍存在加载扭矩较大、反作用力臂弯曲、校准装置挡板变形等情况。本文通过实验假设对这种情况产生原因分析获得如下结论：当校准装置挡块向反作用力臂施加推力时，产生了一定角度的偏移，则这一推力在水平方向和垂直方向的力分别为：

$$F_x = F \cdot \sin \theta \tag{4}$$

$$F_n = F \cdot \cos \theta \tag{5}$$

式中： F —挡块向反作用力臂施加的推力；
 F_x —反作用力臂受到的静摩擦力；
 F_n —倍增器对反作用力臂的正压力；
 θ —实际倾斜角度。

在了解水平方向和垂直方向的力后，可以计算出反作用力臂实际受到的扭矩，以及由此导致的系统误差，具体计算公式如下：

$$T = F_n \cdot L - F_x \cdot r = F \cos \theta \cdot L - F \sin \theta \cdot r \tag{6}$$

$$d = T - F_n \cdot L = -F \sin \theta \cdot r \tag{7}$$

式中： T —反作用力臂受到的扭矩；
 L —反作用力臂的长度；
 r —倍增器中心与弯曲变形区域之间的垂直距离；
 d —反作用力臂或校准装置挡板变形导致的系统误差。

值得注意的是，计算出的误差结果不等于零，而且，随着扭矩加载，校准装置挡板对反作用力臂施加的推力的倾斜角度也会随之发生变化，是一个动态化、非线性的变化趋势，由此导致的系统误差也会发生改变。

3.3 倍增器与校准装置连接状态、扭矩施加状态偏差导致的系统误差

针对这种情况导致的系统误差，通过实践发现存在较多影响因素，具体包括人员操作误差，导致丝杠加载、转轴加载速率等存在差异；扭矩倍增器扭矩施加方向存在差异，使得附加扭矩增加，倍增器自身重力也成为附加扭矩的一部分；扭矩测量仪与倍增器连接偏差，没有保持同轴状态等。种种因素都表明无法对附加扭矩进行定量分析，只能通过以往经验数据和本次实验数据相结合的方式，对其开展定性分析，并开展多次重复性实验，尽可能将不同影响因素排除，以获得最接近实际的系统误差数值。例如，首先确定某种测量评定方式，其次在重复性条件下，针对被测量对象开展 10 次连续重复性实验，最后根据贝塞尔公式计算得出测量点的标准差。如输出端 B 点 10 次测量数值分别为 48.9、48.9、48.5、48.9、48.8、48.9、48.5、48.7、48.5、48.8，平均值为 48.77，标准差为 0.181。

4 结语

综上所述，现有的扭矩测量装置无法满足扭矩倍增

器的计量要求，因此需要设计扭矩倍增器专用计量校准装置来进行扭矩倍增器的校准。目前，我国关于扭矩倍增器的计算校准方法有三种：参照扭矩倍增器的校准规范实施的校准方法；参照《扭矩扳子检定规程》，利用扭矩测试仪实施的校准方法；将设备送至原厂进行校准的方法。同时，结合本人长期工作经验和实验分析获悉，导致扭矩倍增器系统误差产生的原因主要有三点：丝杠加载方式，反作用力臂与校准装置挡板刚性接触，倍增器与校准装置连接状态、扭矩施加状态偏差导致的系统误差，需要结合实际情况进行误差原因分析。此外，根据误差产生的原因，相关人员可以通过相应措施减少误差，包括加强计量校准人员专业培训和技能锻炼，尽可能将人为因素导致的误差降至最低；保障倍增器校准装置各部件质量，确保扭矩扳子、导轨、挡块等的刚度符合要求；在输入、输出扭矩设备传感器头部安装导向轴承，能够在一定程度上减少倾斜角带来的误差。

参考文献：

[1] 谢石昊. 扭矩倍增器计量校准和误差分析方法 [J]. 计量与测试技术, 2021, 48(09): 81-82+86.
 [2] 曹旻, 金炜. 扭矩倍增器校准方法及测量不确定度评估 [J]. 计量科学与技术, 2021, 65(04): 52-57.
 [3] 孙铭权. 水下 ROV 扭转工具结构方案与驱动方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
 [4] 刘洋. 新型煤矿纯机械式锚杆预紧控制装置分析 [J]. 凿岩机械气动工具, 2020(01): 26-30.
 [5] 刘阳, 张川, 潘正婕, 等. 输电线路大型地脚螺栓自动扭矩扳手设计 [J]. 科技创新导报, 2020, 17(07): 83-84.
 [6] 罗林聪, 邢鑫, 朱君, 等. 工业现场蒸汽流量计在线计量校准测试技术研究及应用 [J]. 中国测试, 2020, 46(S1): 89-94.
 [7] 汪树青, 韦邦跃, 吴勇, 等. 仪器仪表测量不确定度评定方法 [J]. 电子技术与软件工程, 2019(10): 80-81.
 [8] 钟玉莲. 热工仪器仪表计量校准的分析与研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2018(07): 93+96.

作者简介：张勇（1987.03-），男，汉族，本科，工程师，研究方向：机械设计、结构设计。