变速器齿轴跨棒距柔性化检测研究与应用

周南平

麦格纳动力总成（江西）有限公司　中国　南昌

摘要：变速器跨棒距是表示齿厚的一个间接参数，用两根小圆棒卡在相对的齿槽里，测量其外缘的尺寸，这就是跨棒距。而跨棒距检具是控制轴齿零件加工质量主要的工具，现有产品品种较多，单一型号检具已经无法满足工厂的生产需求。本文针对跨棒距检测出现的难点，研制出能够适应多个产品齿形加工后跨棒距检测的柔性化检具，对提高检具效率具有重大作用。

关键词：跨棒距，检具，柔性化

0　绪论

齿轮作为变速器的核心传动元件，其制造精度直接决定了整车的传动平稳性、噪声水平及承载能力。目前，齿轴的加工已广泛采用数控滚齿、插齿、磨齿和珩齿等精密工艺。随着市场对产品个性化和快速响应的需求日益增长，推动制造业向多品种、小批量的柔性生产模式转变。这对齿轮的加工精度和检测效率提出了前所未有的挑战。

在齿轮的众多几何参数中，齿厚是保证齿轮正确啮合的关键。直接测量齿厚较为困难，工程上普遍采用测量跨棒距（M 值）的方法来间接控制齿厚。跨棒距是指将两根精确的量棒（或量球）置于相对的齿槽中，测量其外缘间的距离，如图 1 所示。跨棒距检具作为生产现场控制齿轴加工质量较为直接、高效的工具，其性能至关重要。

传统的跨棒距检具主要分为两类。第一类是齿轴千分尺或公法线千分尺，如图 2 所示。这类检具结构简单，但测量稳定性与重复性较差，其结果极易受操作者测量力、量棒放置姿态及读数视差等人为因素影响，数据一致性难以保证。此外，数据采集依赖人工记录，无法实现自动化的统计过程控制（SPC），因此仅适用于单件试制或极小批量生产。

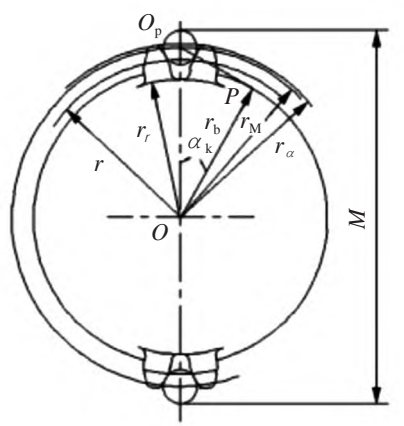


图 1　跨棒距检测



图 2　千分尺检测

第二类是采用两顶尖定位的专用检具，如图 3 所示。此类检具定位精度高，但核心局限在于其“一具一测”的专用性。其测头与夹具通常是为特定模数、齿数及压力角的齿轮量身定制。在多品种生产环境下，每增加一种新型号的轴齿零件，就必须投入一整套全新的专用检具，包括机械主体、定制测头及校准规，导致设备投资成本急剧攀升。更为重要的是，每套检具都需独立与工控机（或 SPC 系统）连接，大量检具的并行连接容易引发数据通道拥堵和通信协议冲突，对工控机的处理能力构成巨大压力，最终导致测量软件运行不稳定，严重影响整个测量系统的可靠性与生产效率。

针对上述痛点，本文提出并研制了一种新型的齿轴跨棒距柔性化检测装置，旨在通过模块化、可调式的设计，实现“一具多测”，从而解决传统检具的局限性，提升检测效率，降低制造成本。

1　跨棒距测量原理与误差分析

1.1　跨棒距测量数学模型

跨棒距的精确测量建立在严密的数学模型之上。对于标准直齿圆柱齿轮，其跨棒距 M 值的计算分为偶数齿和奇数



图 3　传统跨棒距检具

齿两种情况。

偶数齿齿轮：

量棒位于直径方向上相对的两个齿槽中，M 值为量棒中心距与量棒直径之和。

M= d+D 其中，D 为量棒（或量球）直径，d 为两量棒中心所在圆的直径。

奇数齿齿轮：

量棒位于相隔 (z−1)/2 个齿的两个齿槽中，两量棒中心与齿轮中心连线夹角为 90°/z。M 值计算公式为：

$$M=d\cdot\cos(\pi/2z)+D$$

无论奇数齿还是偶数齿，关键在于求解量棒中心圆直径 d。根据渐开线齿轮啮合原理，量棒中心位于齿廓法线上，其压力角 α_m 可通过下式确定：$inv(\alpha m)=inv(\alpha)+D/m\cdot z\cdot\cos(\alpha)+\pi/2z\cdot 2x\cdot\tan(\alpha)/z$

其中，$inv(\alpha)=\tan(\alpha)-\alpha$ 为渐开线函数，α 为分度圆压力角，m 为模数，z 为齿数，x 为变位系数。

求得 α_m 后，量棒中心圆直径 d_d 可表示为：

$$d=m\cdot z\cdot\cos(\alpha)/\cos(\alpha_m)$$

1.2　主要误差来源分析

为保证测量精度，必须对系统误差进行识别与控制。主要误差来源包括：

（1）量球定位误差：量球在齿槽中的实际接触点与理论点存在偏差，受齿形误差、齿槽表面粗糙度影响。

（2）度误差：检具与工件的热膨胀系数差异会导致测量误差。对于钢制零件，温度每变化 1℃，尺寸变化约为 11.5 μm/m。精密测量应在标准温度（20℃）下进行。

（3）测头对心误差：两测量测头的轴线未能通过工件回转中心，引入测量偏差。

（4）顶尖同轴度误差：用于定位工件的两顶尖存在同轴度偏差，导致工件轴线倾斜，影响测量结果。

（5）标准件误差：用于校准检具的标准件自身存在制造误差和磨损。

2　柔性化检具的结构设计

基于上述分析，本文设计了一种新型的柔性化跨棒距检测装置，其三维结构如图 4 所示。

2.1　总体方案设计

本设计的核心思想是，构建一个具有两个独立运动自由度的可调平台：一个用于适应不同长度的工件(纵向调节)，另一个用于适应不同直径的齿轮（横向调节)。检具主体采用高强度铝合金，以减轻重量并保证稳定性。设计过程运用 CREO 软件进行参数化建模，并对关键运动部件进行了运动学仿真，确保无干涉、运动平稳。

2.2　机械结构详解

检具主要由机体组件、安装板组件、固定组件和测量组件四部分构成。

（1）机体与齿条组件：机体作为整个检具的基座，其两侧安装有高精度的直线齿条，为安装板组件的纵向移动提供导向和驱动力。

（2）安装板组件：这是实现柔性化的关键。它由第一安装板和第二安装板组成。两者通过内置的滑块与机体上的导轨配合，并通过齿轮与机体两侧的齿条啮合。转动手轮或驱动电机，可使整个安装板组件沿机体纵向（即工件轴向）精确移动。

（3）固定组件：负责工件的定位与夹紧。下固定件固定在机体底部，作为工件的定位基准。上固定件安装在第一安装板上，随第一安装板一同纵向移动。通过调节第一安装板的位置，可使上固定件压紧工件上端面，实现稳定夹持。

（4）测量组件：这是执行测量的核心。它集成在第二安装板上，由第一测量件和第二测量件构成。两个测量件通过精密导轨安装在第二安装板上，可沿横向（即工件径向）相向或相背移动。

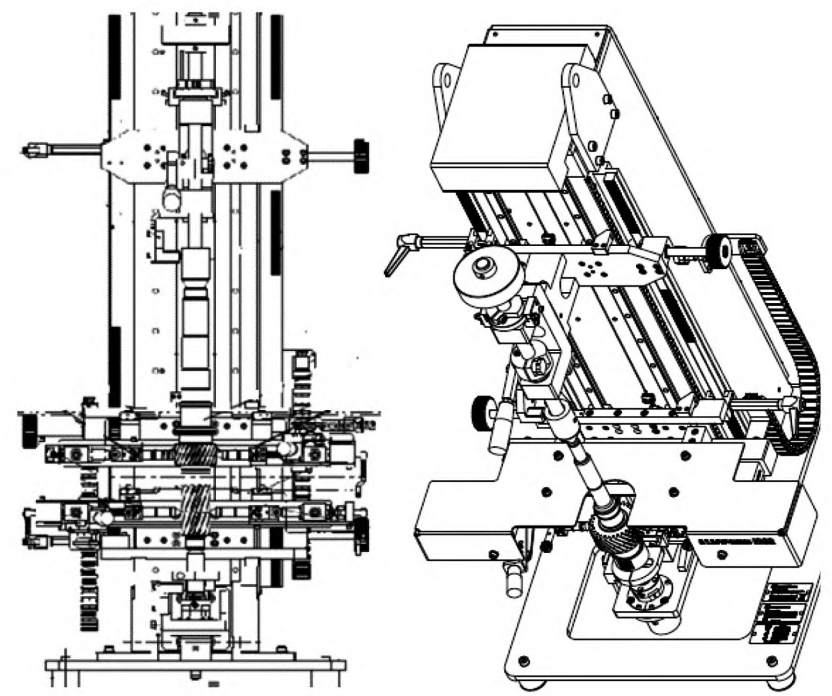


图 4　检具结构示意图

测量件前端装有高精度电感测头或量球安装座。通过横向调节，可以精确匹配不同型号齿轮的跨棒距测量范围。

测量时，首先根据工件长度，纵向移动安装板组件，使上、下固定件正确夹持工件。然后，根据齿轮规格，横向移动测量组件，使两测头对准待测齿槽。启动测量程序，测头自动采集数据并传输至数据处理单元。整个过程实现了对不同型号工件的快速适配

3 检具性能验证与应用

3.1 验证方案与过程

为验证该柔性化检具的综合性能，本文制定了全面的验证方案，涵盖功能、精度和效率四个方面。

（1）功能验证：对检具的工件装卸、定位夹紧、偏差量拾取与数据读取等功能进行逐一测试，确保其设计功能全部实现。

（2）精度验证：标准件标定：选用GCr15 轴承钢材料制造高精度标准件，其尺寸稳定性与耐磨性优异。使用三坐标测量机对标准件的 M 值进行精确标定，作为检具校准的基准。

（3）重复性与再现性（R&R）研究：随机选择一种典型零件，由三名操作者在不同时间对同一零件进行多次测量，收集数据并进行 MSA 分析。分析结果显示，该检具的 R&R 值小于 10%，表明其测量系统良好，满足生产过程控制要求。

（4）效率验证：对测量节拍（从放置工件到输出结果）和换型节拍（从更换一种零件到完成另一种零件的首次测量）进行计时。实测结果表明，两项节拍均稳定在 60 s 以内，达到了设计目标。

3.2 柔性化测试与车间应用

为检验其柔性化能力，我们选取了涵盖不同模数（1.5~3.0）、齿数（15~50）和轴长（100~300 mm）的 20 种变速器齿轴零件进行测试。测试流程严格按照校零、测量、输出、保存的步骤进行。测试结果表明，该检具对所有 20 种零件均能实现稳定、准确的测量，MSA 结果均符合标准，充分证明了其强大的柔性化能力。

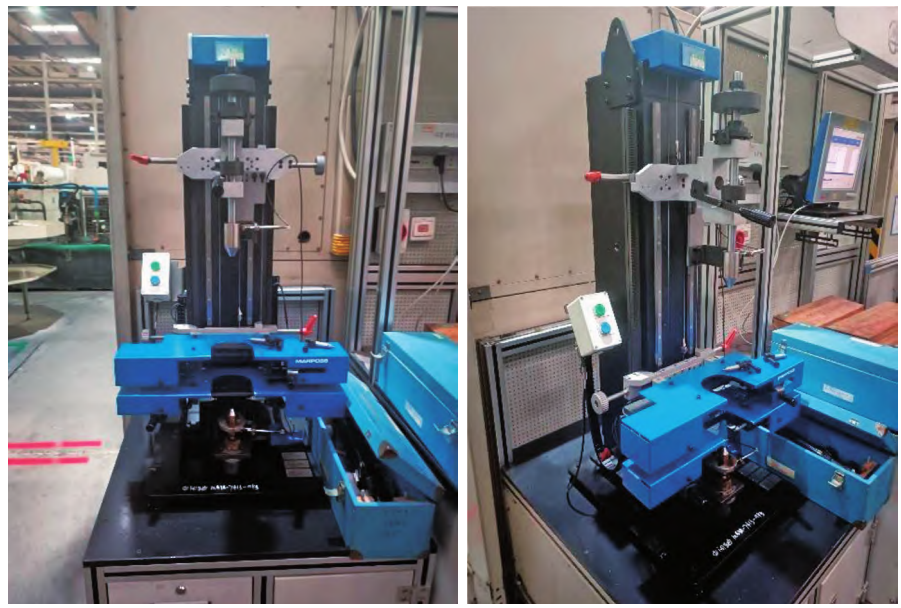


图 5 齿条式柔性检具

目前，该柔性化检具作为一种标准检测工具在生产车间已得到大量投入使用，如图 5 所示。其应用效果显著：

（1）经济效益：一台柔性化检具替代了近 20 台传统专用检具，大幅降低了检具的采购、维护和管理成本。

（2）效率提升：换型时间从过去需要更换整套检具的数十分钟，缩短至 1 min 以内，极大提升了生产线的应变能力。

（3）系统稳定性：大幅减少了与 SPC 系统连接的物理节点数量，降低了数据传输负载，使测量软件运行更加稳定可靠。

（4）空间优化：检具占地面积显著减少，优化了车间空间布局。

4 结论

本文针对传统检具在多品种、小批量生产模式下的局限性，研制了一种新型齿轴跨棒距柔性化检测装置。该装置通过创新的模块化与双自由度调节设计，实现了对多品种轴齿零件的快速、精确检测，从根本上解决了“一具一测”的瓶颈。实践证明，该检具可覆盖 20 余种零件，测量与换型节拍均控制在 60 s 内，显著提升了检测效率与设备利用率。其高精度与高稳定性有效降低了制造成本与 SPC 系统复杂度，为多品种、小批量生产模式下的质量控制提供了高效经济的解决方案，具有显著的工程实用价值与行业推广意义。

参考文献

[1] 陆秋龙，王云祥 . 渐开线花键测量方法研究 [J]. 机械传动 ,2020(07) .

[2] 韩文静 . 轴承支座内花键跨棒距尺寸稳定性攻关 [J]. 金属加工 (冷加工)，2016(13) .

[3] 张伟 . 一种圆柱直齿轮跨棒距检具设计 [J]. 机械工程师 ,2007(04).

[4] 李晓梨 . 齿轮跨棒距检验夹具的设计 [J]. 汽车工艺 ,1991(04) .