滚珠丝杠螺距不等：戳穿微型应用的神话

作者：Jeff Johnson
PE 全球产品线经理 - 丝杠
Thomson Industries, Inc.

螺纹螺距不等指的是单个螺距间隔距离内发生不稳定的螺距误差。该概念难以可视化显示，除非通过将螺纹从丝杠圆柱上展开来表示，如图 1 所示。

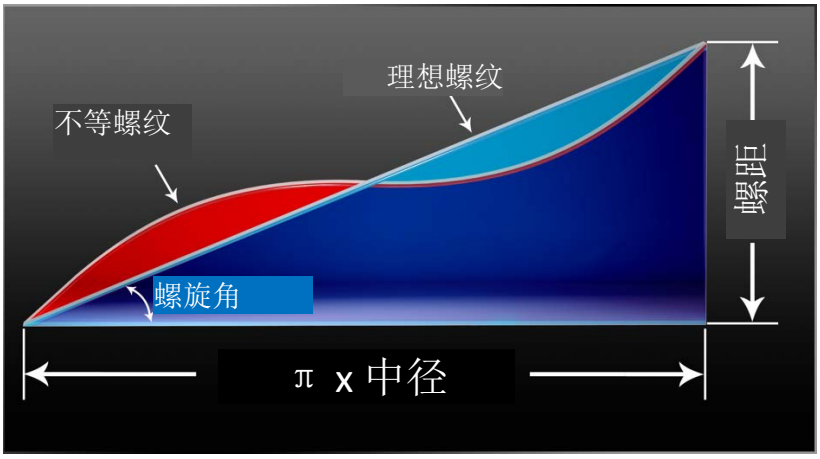

图 1. 螺纹螺距不等的图形解释

许多设计工程师根据 ISO、DIN 和 JIS 工业标准（见图 2），对滚珠丝杠的导程精度进行宽泛定义。他们在定义时只考虑超过 300 mm（V_{300}）的累积误差，但是往往忽视测量或控制每转导程精度（$V_{2\pi}$）的值。每转导程精度通常被称为滚珠丝杠螺距不等，因为它向滚珠丝杠运行中引入了难以预测的摆动。在行程长度小于 300 mm 的微型丝杠应用中，每转导程精度是一个关键参数。

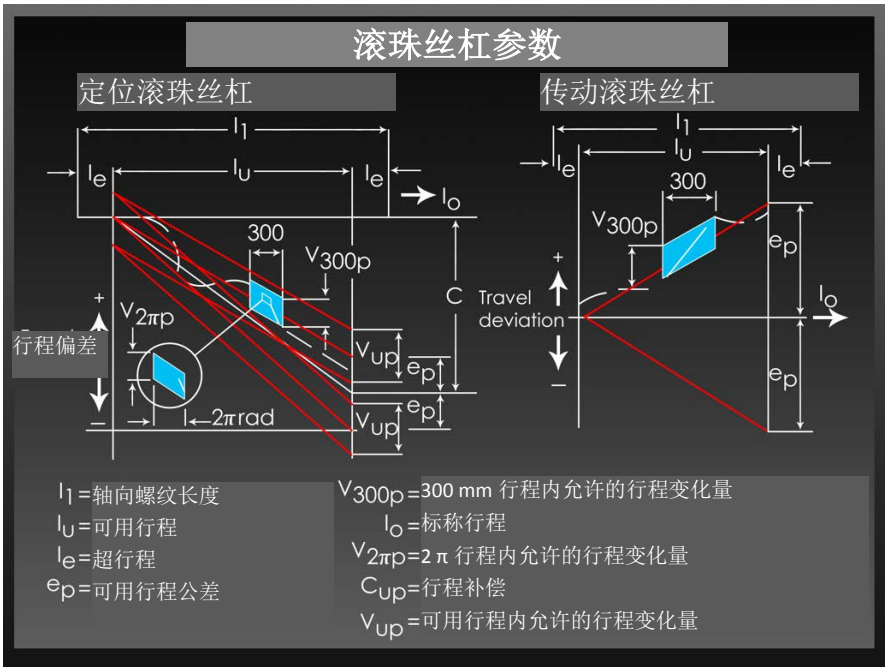

图 2. 滚珠丝杠参数说明

许多工程师错误地假定 $V_{2\pi}$ 误差相对于总体导程精度 V_{300} 无关紧要，并因此在应用中设计滚珠丝杠时忽略了该误差。如表 1 所示，典型 P5 丝杠的每转导程误差可达 8 µm，或者等于 300 mm 内丝杠允许导程误差的 1/3（23 µm）。

	公差等级				
	1	3	4	5	7
v300p [µm]	6	12	18	23	52
v2πp [µm]	4	6	7	8	12

表 1 DIN 69051 公差值

显示和量化该误差是具有挑战性的，即使对制造商也是如此，因为这需要昂贵的专用分析设备，但专用分析设备并不是常备设备。因此，许多制造商必须依靠手动的单独测量，而不是可测量和记录完整行程内 100%位置精度的动态连续测量。例如，采用 2 mm 导程的 Ø12 mm 滚珠丝杠在 300 mm 内有 150 个螺距，可能需要超过 600 个测量结果来精确描述特性。

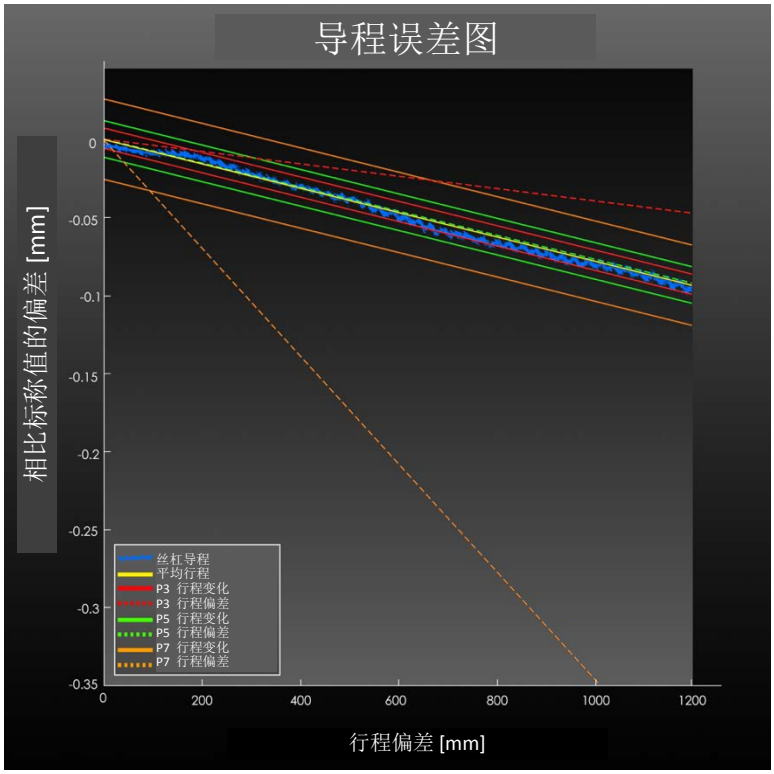

图 3. 动态导程分析的典型输出

因此，当一些制造商收到用于行程小于 300 mm 精密应用的组件要求时，他们通常会制造具有 V_{300} 精度等级的更长丝杠，并向客户交付满足客户要求的短丝杠段。例如，如果客户要求 125 mm 行程的 P5（23 µm/300 mm）丝杠，制造商可能会先制造一根 2 米长的 P5 丝杠，然后切割出 250 mm 的丝杠。这为客户提供了符合要求的产品，但是可能无法解决影响应用关键运动需求的实际性能参数。结果可能是价格昂贵的返工和延误 OEM 制造商满足他们客户需求的能力。

图 4. 激光导程精度测量仪

作为一家直线运动部件的领先制造商，Thomson Industries 设计并开发了一种用于微型丝杠的专用导程精度测量装置（见图 4），可动态测量丝杠的整个行程长度，并按照国际标准给出精度等级（实际数据以及用于验证每转和每 300mm 性能的 P3 到 T7 精度范围，见图 3）。动态测量（旋转丝杠的连续导程精度采集）也是用于质量检查和持续产品改进的重要工具，而这构成了 Thomson 文化的基础。

例如，考虑一下这种情况，一家医疗流体泵制造商为新医疗设备指定了 P5 精度和 150mm 行程长度。由于他们并不是丝杠专家，他们只会在规范文档中指定 23 µm/300 mm 的导程精度。尽管流体泵制造商没有办法独立测量丝杠精度，但是他们能够动态测量流体离散，将该数据与丝杠精度关联，并最终拒绝满足最初要求精度的标准丝杠产品。指定 300mm 的累计误差最终被确定与该应用无关，需要一个自定义技术参数来实现所需性能。通过将动态流体分散数据与动态丝杠性能相关联，Thomson 能够明确识别对泵性能造成负面影响的丝杠特性。随后，该数据被用于修订丝杠技术参数，并消除系统中的非期望误差。

滚珠丝杠应用场景

解决滚珠丝杠螺距不等问题的解决方案当然是指定完全符合应用要求的产品，而这需要制造商具有将产品性能与应用关键技术参数相匹配的专业知识。Thomson 拥有广泛的滚珠丝杠产品、数十年的应用经验以及全面的制造能力和专用检测设备，可充分认识和解决最复杂的需求。

ISO/DIN/JIS 标准是产品理解的良好开端，但是不应是该过程的终点。导程精度不仅是总体精度的一部分，而且必须与其他参数关联起来解释。除了所需的应用导程精度和相关的螺距不等，还要结合端部加工、轴径径向跳动、直线度和整个系统的几何公差等。

尽管大部分讨论通常都集中在定位精度方面的丝杠性能上，相应的滚珠螺母让分析变得更加复杂。由于滚珠螺母是丝杠与负载之间的接口，可以通过螺母与丝杠多个螺距的相互作用来消除或者放大螺距不等影响。大多数滚珠螺母带有 3-10 个滚珠承载滚道，因而同时与丝杠上的多个螺纹接触。因此，使用单个球规来精确测量丝杠精度是至关重要的。

领先制造商拥有可以与客户共同工作的专家，以便在其确定需求任务书和后续选择产品来满足这些需求的过程中，为客户提供帮助。挑战可能是工程师基于对丝杠参数的理解，从产品目录中订购滚珠丝杠。对于需要 300 mm 以上行程长度的应用，这可能不是问题，但是在当今向微型产品发展的趋势背景下，这正变得越来越重要。行程范围 100 mm 或 200 mm，导程 1 mm、2 mm 或 3 mm 的微型滚珠丝杠并不少见，但指定 300 mm 累计误差是毫无意义的。

考虑生产成本

精确、内容完整的技术参数还会影响生产成本和价格。轧制丝杠是远远比磨削丝杠便宜的生产工艺，而 V_{300} 参数的要求是选择制造方法的决定因素。现代螺纹滚压设备的改进通常可获得 P3 丝杠的 V_{300} 值，但是采用滚压工艺控制螺距不等要更加复杂，通常需要实现比指定等级高一个等级的导程精度（例如，P3 丝杠可能需要指定为 P5 等级）。或者，客户可以选择传统的螺纹磨削工艺来改善螺距不等，这会将价格提高到滚压产品的 5-10 倍。

对于精密应用，另一个解决方案是为短行程应用指定 V_{300} 精度，购买比较便宜的滚压产品，然后使用软件来达到所需精度。尽管导程误差可能在行程中摆动，但是该误差是可重复的，可以通过软件映射和校正。由于映射过程本身耗费时间，而且必须由旋转编码器、光学监测或者其他次级反馈解决方案提供支持，总体解决方案实现起来可能成本更高。软件和硬件解决方案还可在高精度应用中结合使用，以提供最精确的系统。

解决螺距不等

在微型应用中控制滚珠丝杠的螺距不等将需要最终用户、制造商和标准小组共同努力。最终用户必须认识到滚珠丝杠规定的产品目录技术参数只是一个因素，必须利用供应商的资源来帮助他们获得满足需求的性价比最高的产品。正确的供应商将提供资源和激励，使得他们的客户能够理解和确定他们实际需要的技术参数。标准组必须认识到需要微型滚珠丝杠的应用要求不同的精度等级，并提供正确的指导。