

表面微观结构二维测量和三维测量的应用分析

大众动力总成（上海）有限公司 朱正德

摘要：在以汽车工业为代表的批量生产制造业中，工件表面微观结构的二维测量迄今仍处于主流地位，这主要是由所采用的工艺和已建立的完善的评定体系决定的。但近几年，随着激光造型等新工艺在一些重要工序中的应用日趋增多，表面微观结构的三维测量也进入了实用阶段，本文就相关的评定参数做了介绍，并通过实例分别对采用传统检测手段和先进的自动变焦光学方法进行三维测量做了描述。

关键词：表面微观结构 激光造型 评定参数 传统手段的应用 自动变焦三维测量

工件的表面形貌包括了粗糙度、波度和形状误差，而表面微观结构则主要指前二项（见图 1），它们均为零件重要的质量监控指标。关于工件表面微观结构的三维测量，国外早在上世纪八、九十年代已经做了不少前期工作。以检测方式而言，就有借助传统的触针/电感式粗糙度测量仪，通过增加一个精密工作台产生横向微量位移，以组成三维测量；此外还研究了数种不同原理的光学测量方法，如光切法、光学探针和干涉显微镜等。尽管在此基础上开发的某些仪器也获得了一些应用，但主要还是在电子（材料）、军工等工业部门，且偏重于表面缺陷探测范畴。其实，迄止本世纪初，即使在工业化国家，表面微观结构的三维测量也还没有在那些主流制造业，如汽车行业中获得真正的应用，原因何在呢？

周所周知，检测技术本质上讲是服务于制造工艺的，是为了验证工艺方法的执行效果。而触针/电感型二维测量及其应用的评定参数至今仍然在国内外有着广泛的应用，正是因为它尚能适应、满足对批量生产条件下零件制造工艺执行效果的验证。

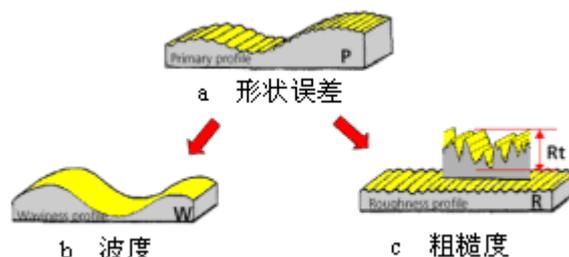


图 1 表面微观结构示意图

1. 二维测量用于工件表面微观结构评定的技术分析

1.1 表面微观结构与工件配合面的工艺性能

为了确保产品的质量和可靠性，在零部件制造过程中，企业必须严格遵循技术要求，并在事后进行验证。以汽车发动机为例，几乎所有存在配合关系的工件，对其相关表面都有一定的要求，尤其是那些关键部位，其配合面的状态决定了所应具备的工艺性能，将直接影响发动机的运行质量。下面通过发动机中的汽缸体缸孔和连杆大头孔两个案例进行探讨。

作为发动机中那些重要的摩擦付，配合面的状态是否符合要求至关重要，在诸多影响因素中，除了表面硬度、宏观几何精度外，配合面的微观结构更是往往会决定相关的工艺性能。例如，对于缸孔来说，通常情况下，

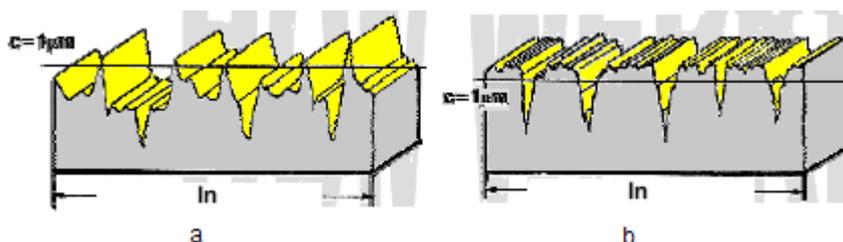


图 2 缸壁摩擦付表面的“平台结构”

经过珩磨加工后的工件表面应同时具备这样两项功能，一方面需要具有很光顺的表面和尽可能多的承载

面积，从而确保相互运动时的滑动性和耐磨性。另一方面，又需要一个开放性的表面微观结构，以保障表面的储油能力，即这个表面仍然是“粗糙”的。为了同时能体现出这两项功能，就需要使经珩磨加工的工件表面在相对粗糙的基础上呈现出平台结构的精细的表面形态（见图 2b）。在图 2 中，利用自最高峰顶向下 $1\mu\text{m}$ 的截线 c，分别与 a、b 两种表面微观结构相交后的情况可以清晰地看到，后者的耐磨性要高得多，且同时具有相当充分的储油能力。如此的构造，决定了有足够的润滑剂在摩擦付表面贮存，润滑剂能将两个摩擦付表面完全的分，以及做到在任何运行状态下磨损最小。其机理是润滑油由于特殊的工件表面微观形态结构将能在表面驻留很长时间，并形成流体动态压力。理想状态下，在润滑剂和施载体、受载体之间因粘着力而不会产生相对运动。相对运动只存在于润滑层内部，因而不会产生工件的很大磨损。不同于上述活塞环-缸壁（缸孔内壁或缸套内壁）这组摩擦付，在发动机的活塞—连杆—曲轴运动机构中，与曲轴中的连杆轴颈组成运动摩擦付的，并非直接是连杆大头孔的内壁，而是一对（两半组成）轴瓦。因此，连杆大头孔不同于之前研究的缸孔，其内壁和轴瓦乃是紧紧地贴合在一起，两者之间不仅没有高频次的相对运动，而且还要求在传递高负荷的扭矩时竭力避免出现滑动，那怕是很小的错移，以免影响发动机的运行。为此，长期以来在产品结构和工艺上，采取了分别在两片轴瓦和分体的两半连杆体上加工止口的方法，以防止产生滑移现象。这已是很成熟的制造技术，沿用至今。但近年来，汽车发动机业界出于种种考虑，不断改进产品结构和改进工艺，上述连杆轴瓦止口限位工艺已在一些企业的新产品中被取消，且这种情况逐渐在增多。显然，这种简化了的结构和工艺直接带来了连杆大头孔内壁与轴瓦之间的配合会提出更高的要求，最基本的一点就是：被紧紧压入孔中的轴瓦与孔壁必须有足够的摩擦力，以确保发动机在高速运转中轴瓦不会有滑移。而这一点也只能由连杆大头孔内壁的有特定要求的表面微观结构来实现和保证。那么，该如何在工件表面产生和验证这些有特定要求的微观结构呢？

1.2 加工工艺方法与工件的表面纹理

无论是缸孔还是连杆大头孔，业内现今采用的最终精加工工艺仍是珩磨，通过精镗工序之后的粗珩和精珩两次珩磨（有时还会有半精珩），在工件表面进行宏观和微观几何加工。珩磨是利用油石、即砂条（一般称“珩磨条”）对工件进行加工的一种工艺过程，在表面形成的微观结构

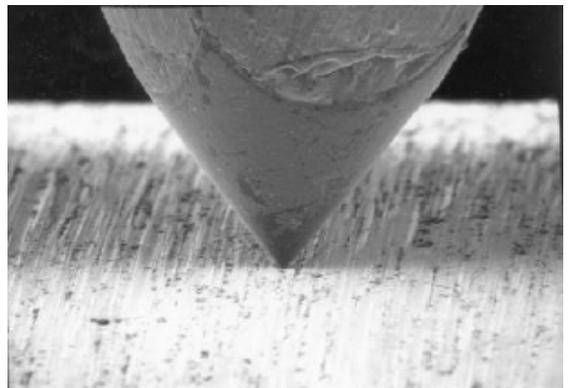


图 3 连续纹理表面的粗糙度测量

虽然会有所差别，见前一节图 2a、b，但就其本质来讲，都属于连续性的纹理状，而这种形态又是一般传统的切削型工艺方法所共有的。事实上，无论是精镗、磨削，还是车、铣、刨，在工件表面形成的都无一不是连续性的纹理结构。图 3 是采用触针/电感方式对这类表面进行粗糙度测量的一张放大图，再结合图 2 的二帧示图，可以得到这样的结论：对应于利用传统工艺方法加工的工件表面，由于普遍呈现连续性的纹理结构，因此，在取向相同的情况下，采取二维测量时在不同截面所获得的测值具有可比性和趋同性。故在验证被加工面微观形态的符合性时，采用二维测量是完全可行的，最多为了更加客观起见，可选相距较远的位置多“拉”几条线、即多测几次而已。这种做法迄今还为国内外制造业所广泛采用。

1.3 工件表面微观结构符合性的验证

如何验证加工后的工件表面微观构造能否满足所要求的工艺性能？首先就是要确立对应的粗糙度评

定参数，以对被检表面的微观特征进行有针对性的定量表述。以缸孔内壁为例，如果仅采用 R_a 、 R_z 等单一“振幅”类（又称“高度”类）参数，显然不足以完成对表面的正确评价，而必须再导入一些综合性的评定参数。在这些评定参数中， R_k 称为中心区峰谷高度，又称有效负荷粗糙后

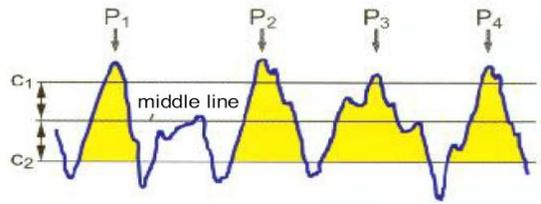


图4 评定参数PC的含义

度。从其形成的机制来看，相对于给定的一个值，它对应最大的轮廓支承长度率。故 R_k 的实质是这部分的中心区深度将在高负载运行中被磨损掉，但又能最大程度地达到耐磨性。 R_{pk} 是超过中心区峰谷高度的轮廓波峰平均高度，又被称为初期磨损高度，而 R_{vk} 是从中心区下限到有实体材料的轮廓波谷的平均深度，它反映了润滑油的储存深度，体现了摩擦付在高负载工况下的失灵保护。 Mr_1 和 Mr_2 分别为波峰、波谷轮廓支承长度率，由轮廓中心区上、下截止线决定，其实 Mr_1 表示了表面的初期磨损负荷率，而 Mr_2 则为长期磨损负荷率。下面一组来自某汽车发动机厂缸孔内壁粗糙度的要求颇有代表性： R_k 1.5~3.0, R_{pk} 0.3, R_{vk} 0.9~1.6, Mr_1 10%, Mr_2 80~95%。此外，也还需要用几项传统的粗糙度评定参数同时对缸壁表面进行监控，分别为： R_a 0.375~0.75, R_z 3.0~5.0。

至于对连杆大头孔内壁的评定要求，眼下多数国内企业还只采用 R_a 或 R_z ，且通过调研发现，所设定的指标值的分散性还较大，如在以 R_a 为评定参数时，从 R_a 0.2、 R_a 0.3 到 R_a 1.6、 R_a 2.0 都有。可见此时对孔壁微观结构的要求还是较宽松的。但如前所述，随着近年来产品结构和工艺的改进，对连杆大头孔内壁的微观结构要求也在提高，以下表述的要求有一定的代表性：1) R_z $A \pm a$, 2) $R_{pc} \min n (\pm C)$ 。

第一项评定参数 R_z 的值已不同于习惯表示，而是要求 R 其保持在一定范围内，以确保被测表面必须“粗糙”到一定程度。另一项评定参数为 R_{pc} （有时也被称为 PC），即“标准化的轮廓波峰统计”，也可简称为“波峰计数（Peak Count）”，即在评定长度内，超过了所设定的统计边界上限和下限（ C_1 , C_2 ）的波峰和波谷的数目，参见图 4。但必须指出的是：计数原则为轮廓线都超出边界的上下限，而且需要将评定长度内的 R_{pc} 转换成长度为 10mm 的标准距离。据此，评定指标 $R_{pc} \min n (\pm C)$ 的含义为：当统计边界为 $\pm C$ 时，被测表面上 10mm 标准距离内的波峰计数值 R_{pc} 必须大于 n 。举一个实例予以说明：

- $R_z = (8 \pm 3) \mu m$ 取样长度 0.8mm, 评定长度 4mm
- $R_{pc} \min = 170/cm$ 统计边界 $\pm 0.3 \mu m$

实际进行粗糙度测量时，仪器只经过 4mm 的评定长度，但在评定时，需转换到 10mm 的标准距离，并要求 $\geq R_{pc} 170$ ，而统计边界为 $\pm 0.3 \mu m$ 。

2, 激光造型工艺与成型表面的特点

激光造型作为一种新工艺，直到本世纪初才在其诞生地——汽车工业强国德国的少数企业得到实际应用，但在用于发动机汽缸体缸孔和连杆大头孔精加工等关键工序的实践中，已经充分显示了这种先进技术的很大优



图5 三种常选的沟槽造型结构示意图

越性。近年来，激光造型在欧洲汽车发动机业界的应用日益增多，并自 2009 年开始，进入了国内的主流汽车发动机生产企业，展现了它十分广阔的市场前景。

简单地说，这项新技术就是利用激光头所发出的数控激光束在被加工表面制作出符合事先设定要求的表面微观结构的一种工艺方法。在实施表面造型的加工过程中，高能量的光束将有部分被工件表面反射、有部分则被吸收，被吸收的光束能在瞬间将材料加热并使之达到气化状态。这种“激光刀”产生的光束的切削能力取决于脉冲频率、功率、开关时间和进给速度等。由于温度升高是瞬间产生的，并且具有很高的能量聚集密度，因此光束只在一个有限的局部做瞬间切削，工件材质的特性不会由此而产生变化。另一方面，粘结在工件表面上的冷却剂残余物将被蒸发或燃烧，也不会影响到激光束切削的质量。专用造型设备的数控系统能驱使激光头做上下和旋转运动，并对光束的开关时间和能量进行相应的控制，从而使用户能获得不同要求的、可控的表面微观结构。

对于缸孔精加工工序而言，最终获得的理想表面，应该是一个既有较高光洁度的平台结构，又具有可控的、适量而又充足的微观构造，以使机油有较长的驻留时间和良好的流体动态压力。为此，在引入了这项新技术后，选择的是规整、均匀的沟槽方案，具有交错断续或交叉点坑的分布特征。图 5 是常选的三种沟槽构造形式：袋状（左）、杯状（中）和块状（右）。上述结构的一个共同点是无交叉、不连通，各沟槽相互之间没有任何联系，能有效存储润滑油而不易流失，便于形成均匀油膜，使摩擦付处于流体润滑状态。由此，既保证了足够的润滑，又阻止了过多的机油窜入燃烧室，还可减少应力影响，对改善摩擦性能有很大好处。相比之下，传统珩磨工艺在缸孔内表面形成的往往就是相互连通的网状沟槽结构，且表面粗糙度偏“粗”，导致储油量过多。而采取激光造型工艺的结果是使润滑油的消耗量会有较大幅度的减少，涉及环保的指标，如颗粒物排放和油粒排放则有明显降低。图 6 是采用这项新颖工艺加工的缸孔的实况，从图中可见，真正实施激光造型的只是位于承受高负载的缸孔上死点附近进行的区域，以保证活塞环在该区域受到高负荷时的良好润滑。图 6 其实是汽车已运行十多万公里、再拆解后的缸壁表面情况，在图中，无论是造型形成的规则沟槽，还是下部珩磨加工的网纹都清晰可见。这也说明了利用激光造型技术可使磨损大幅度降低，从而延长发动机的使用寿命。



图 6 采用激光造型工艺加工后的缸孔

相比缸孔在整个圆周范围实施烧蚀造型，连杆大头孔精加工在引入这项新技术后，只是在孔圆周的 4 个矩形表面上进行造型，图 7 中四个箭头所指处的局部阴影区域即是。那每一块造型区域又有多大呢？

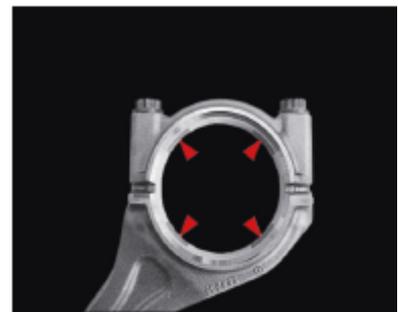
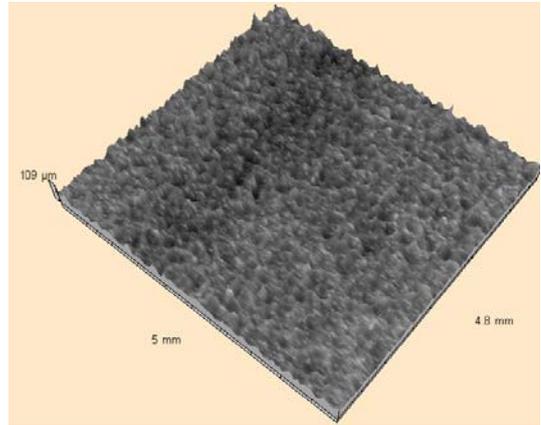


图 7 大头孔圆周上的造型区

对于一台小排量轿车发动机，其连杆大头孔的外径一般不超过 50mm，厚度不超过 20mm，则取高（轴向）为 13~15mm，宽（圆周向）度、既弧长则稍大些，但一般不用长度单位 mm 表示，而采用对应的角度标注，约为 35°。

如前所述，缸孔激光造型乃是在其表面上加工出规则、均匀的沟槽。而对于连杆大头孔，则是在精磨后的圆周面上完成较均匀的凸峰状造型，无疑两者是不一样的，所产生微观结构的均匀程度也是不同的，后者更为困难。图 8 是经过激光造型后的表面构造三维图。从前面的介绍可知，由于连杆大头孔珩磨后要求体现的工艺性能就是确保与轴瓦间有足够的摩擦力，因此规则、均匀的程度，以及烧蚀造型过程中珩生的一些粘结熔堆和氧化物不会影响其工艺效果。

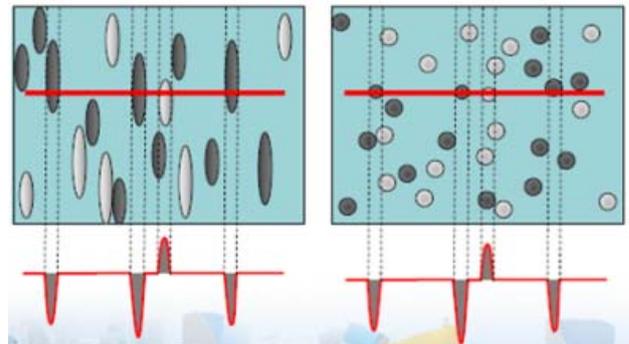


通过以上介绍可清楚地看到，经激光造型形成的工件表面微观构造，与传统的工件经切削加工后的成型面有很大差别，最大的不同后者为连续性的纹理结构，而前者则具有断续性、不连贯的特征。两者之间的这个差别导致在进行检测和评定时，若还是把二维测量、评价的方式用于执行激光成形的工件表面就会产生较大误差。一个显见的事实是，如前所述，对工件加工面的技术要求，在若干重要部位还需满足相关工艺性能，指的都是（配合面）。因此在理论上，当进行检测和评价时也应该把“面”作为对象，之所以无论国内还是国外一直沿用二维测量方法，正

图 8 大头孔经激光造型后的表面微观结构的三维图

是利用了传统切削加工形成的工件表面所具有的这种连续性纹理结构特征，而采取的一种“简化”方案。

图 9 的成型表面实例类似于前面图 5 的沟槽造型结构，但表面上也存在少量不高的凸起（即白色区域）。图 9 中，左边的为“袋状”，右边的为“杯状”。假如以图中的红线作为二维测量时的测针运行轨迹，就可能得出以下的一些评定结论：



- 如图中显示的状态，所得到的结果应该是相同的，这只要对对应于下方的二维测量截线就能看出。而事实上，即使就取图中这一块平面来看，左边的袋装构造较之右边的杯状，其储油空间要大的多。

图 9 经激光造型后的工件表面示例

- 即使是对同一个表面，只要稍稍移动一下测针的测量轨迹，也会得出完全不同的结果。设想把左（或右）示图中的红线稍稍下移，就会造成只测到一个沟槽、甚至测不着的情况，从而得出与图 9 完全不一样的评定结论，显然以上者两种情况都说明，此时若再沿用二维测量方式是不可行的。

3. 与表面微观结构三维测量相对应的评定参数

在本文第一节中所介绍的那些用以验证由传统的加工方法形成的表面微观构造的二维评定参数，其实也同样适用于利用激光造型技术加工出的表面。因为虽然两者的工艺过程不同，但配合面需符合的要求、即应该实现的工艺性能是完全一样的。然而，由前面的分析可知，若再采用二维测量的方法来检验经激光造型后形成的表面就会出现很大的误差，为了更确切地验证此时工件表面的微观构造是否符合所要求的工艺性能，必须采用“三维评价”做法，并建立了相应的评定参数和检测方法。

事实上，除个别参数外，三维评定参数都是建立在二维评定参数的基础上的，且均可以一一对应。

当然，就现今已应用于实际也即已创建的参数的数量来看，3D 参数要少的多，但已能覆盖包括上述表面重要工艺性能的全部涉及项目。以下是一个对照表，列出了部分常用的评定参数：

表 1 二维（2D）和三维（3D）评定参数对照表

二维(2D)	R_a	R_z	R_q	R_{sk}	t_p	R_k	R_{pk}	R_{rk}	R_{vk}	M_{r1}	M_{r2}	R_{pc}
三维(3D)	S_a	S_z	S_q	S_{sk}	S_{tp}	S_k	S_{pk}	S_{rk}	S_{vk}	S_{r1}	S_{r2}	S_{pc}

以最常用的“振幅”类评定参数之一的 R_a 为例，其含义是在取样长度内，经滤波后的全部轮廓偏距绝对值的算术平均值，可表述为：

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} |Z_i|$$

对应的 3D 评定参数则可以表述为：

$$S_a = \frac{1}{nm} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} |Z_{i,j}|$$

不同于 2D 类的评定参数所采取的采样、数据处理和评价都是囿于一个截面，即只是在工件被检表面上的一个法向截面进行，3D 类参数则有所不同。它的测量对象并非工件表面上的一个截面，而是一个区域，至于到底如何实现测量、评定则可以有不同的方式。

另一个常用的二维评定参数 R_z 往往被称为十点高度，其含义是在经滤波后的轮廓评定长度内，5 个最高的轮廓峰高值和 5 个最低的轮廓谷深值的绝对高度的平均值。 R_z 可以用下式表达：

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |Z_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |Z_{vi}| \right)$$

式中的 P 代表最高的 5 个峰值， V 代表最低的 5 个谷深值。

而对应的 3D 评定参数的表述形式为：

$$S_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |Z_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |Z_{vi}| \right)$$

实际上，两者的表达方式完全一样，只是 R_z 仅反映了一个截面的范围，而 S_z 则反映了一个区域，故后者表达式中的峰高和谷深完全有可能不在同一个截面内。

在众多 3D 评定参数中， S_{sc} 是极个别的无法与 2D 参数相对应、且具有独特内涵的一项评定参数，被称为波峰曲率算术平均值，其含义为：在被测表面轮廓范围内，被测得的众多波峰最大曲率的平均值。藉助 S_{sc} ，人们就能较全面的了解该工件表面波峰、凸起的大致情况，是呈浑圆状还是比较尖锐，这对弄清和更全面地了解配合状况存在很大的意义。 S_{sc} 的单位是 $1/\mu m$ ，也就是曲率的单位，其数学表达式为：

$$S_{sc} = -\frac{1}{2} \times \frac{1}{K} \sum_{K=0}^K \left[\frac{\partial_z^2(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial_z^2(x, y)}{\partial y^2} \right] \Bigg|_{x=x_n^k, y=y_n^k}$$

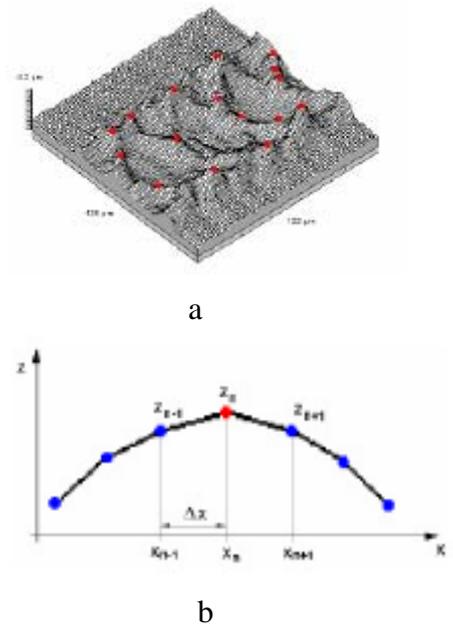


图 10 三维评定参数 S_{sc} 的含义简释

图 10 是对 S_{sc} 的含义和上式的简单注释, 式中括号内的前一项的含义则可简单地通过图 10b 来表示。

4, 传统检测手段在表面微观结构三维测量中的应用及其不足

对于表面微观结构的二维测量, 无论采样、数据处理和评价都是基于一个平面, 即工件被检表面的某个法向截面。而三维测量则完全不同, 它的测量对象并非工件表面上的一个截面, 而是某个区域。此时, 如果仍采用传统的触针式检测方法, 就必须逐个在 m 个平行的法向面上进行测量, 最终根据这 m 个二维测量的采样结果来做数据处理和评价, 以反映出被测区域的表面微观特征。 m 一般大于 100。

图 11 是对经过激光造型加工的连杆大头孔表面检测的实景图, 所采用的测量仪器与进行 2D 参数检测时的粗糙度仪相同, 但必须增添能提供新的二项功能的相关硬件、软件: 精密微动工作台和 3D 数据处理软件。实际的测量过程如下:



图 11 连杆大头孔激光造型表面的检测

- 如前所述, 大头孔的造型面乃是圆周上的四块, 故实施检测时需分别进行, 再统一分析, 这就得装夹、调整 4 次才能完成一个工件的测量。

- 从图中可见, 测头是沿着圆周方向移动的, 每完成一次类似于 2D 的粗糙度测量后, 工作台的伺服电机就会带动工件平移一个微小距离 e , 然后再进行下一次测量。

- 对大头孔上每一块造型面的测量, 并不是覆盖其整个面积, 而只是截取其中一部分, 如一种取法是 $2\text{mm} \times 0.5\text{mm}$, 圆周方向为 2mm 。

- 具体的仪器设置为

- 取样长度 L_c 0.25mm,

- 测量速度 0.5mm/s

- X 方向和 Y 方向的采样密度 $2.5 \mu\text{m} \times 2.5 \mu\text{m}$

X 方向是仪器测头沿圆周测量时的走向, $2.5 \mu\text{m}$ 是采样密度;

Y 方向是工作台每次微动距离, 也即每相隔 $2.5 \mu\text{m}$ 将测一次;

Y 方向的长度是 0.5mm , 因此完成对整个截取面得检测需要测量 201 次 (条)

由于配备了三维测量软件, 因此在对所采集数据进行处理的基础上, 就能按照产品 (图纸) 技术要求中规定的评定参数, 对被测工件的激光造型表面做出评价, 主要的评定指标的设置有这样二种:

- 沿袭前面介绍的用于珩磨后表面工艺性能评价时所采用的 2 个二维评定参数 R_a 和 R_{pc} , 只需换成 S_a 和 S_{pc} , 这在表 1 上都是在列的。

- 同样也可评价工件造型表面的工艺性能, 但所采用的三维评定参数为 S_a 和 S_{sc} , 它们的含义在前一节已作了详细说明。事实上, 选择 S_a 和 S_{sc} 显然能更确切地反映出对连杆大头孔内壁微观结构的要求。

再回到前面图 10 中的测量实例, 当选择所列的设置值对连杆激光造型表面进行检测时, 采用的评定参数事实上就是 S_a 和 S_{sc} 这两项, 且明确规定了只有当符合: $S_a \geq 0.18 \mu\text{m}$, $S_{sc} \geq 0.052 1/\mu\text{m}$ 时, 才算合格, 即能满足相应的工艺性能的要求。

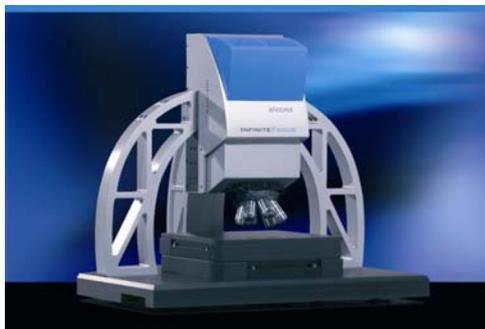
上述建立在传统测量原理基础上的表面形貌三维检测方法，虽然已在国外部分企业有了实际应用，但其技术上存在的先天不足也是客观的事实，主要表现在：

- 效率太低。就以图 11 所示的对连杆大头孔激光造型面得测量为例，即使只测其莫一块（约 $10 \times 12\text{mm}^2$ ）中的一个区域，耗时也要近 40 分钟，若考虑到辅助时间，完成该工件全部检查任务需时甚至会达三个小时。
- 检测质量较差。鉴于以下一些原因，决定了利用传统方式进行三维测量难以得到理想的结果：
 - 区域面积扫描时由多次单一线扫描拼合而成，线扫描之间的表面形貌信息丢失。
 - 触针式探头的尺寸导致了在测量维纳米结构和陡峭变化表面时容易出错。
 - 探头在粗糙的表面上移动时，会发生横向偏离和跳动，导致滑动不流畅及产生的测量轨迹非一条直线而是有扭动的线。此外，在材料偏软时会在表面形成划痕。

以上这些因素都会影响三维测量结果的准确性和重复性，也就是使检测质量变差。

5. 自动变焦三维形貌测量技术及其实际应用

如前所述，虽然在多年前已有过诸多光学法用于工件表面三维形貌测量的尝试，但迄今真正在主流制造业获得实际应用的却很少见。原因除了传统的二维测量技术尚能满足极大多数现有的工艺方法外，那些光学测量方式在技术上也确有自身的一些局限性，从而制约了它们形成有效的产品。但不久前才出现的自动变焦三维形貌测量技术使这一局面发生了很大的变化，而基于这一原理研制的商品化仪器也已在诸多领域得到了成功的应用，尤其是在最苛刻的汽车制造业。



a



b

图 12 基于自动变焦三维测量原理的检测仪器

图 12 是由（奥）Alicona 公司基于这一工作原理开发的三维形貌测量仪，图 a 是仪器的基本型，此时被测工件时在静态下进行测量。其工作原理的要点如下：光学系统在沿 Z 轴移动（图 12b）的过程中连续地、逐层扫描被检工件的表面，从聚焦不足一直扫描到聚焦过度，这样在每个表面上的每一个点就都有一条相对应的对比度变化曲线，其中的峰值所

对应的 Z 轴位置、即该点能被最佳聚焦的位置，也就是该点在表面上的 Z 轴位置。光学装置下端是物镜，而另一端是反映影像的 CCD，根据 CCD 上所获得的被测表面上数千万个点的 Z 轴位置建立的三维模型，就能获得表面的三维形貌，或只取其中的粗糙度。Z 轴的位移精度很高，分辨率可达 10nm ，而逐层扫描的间隔和扫描的面积则是可调的。当检测的要求只是工件的表面粗糙度，垂直方向（Z 轴）的测量范围就较小，如定为 $20\ \mu\text{m}$ ，如此时选间隔值为 $0.1\ \mu\text{m}$ ，即每相隔 $0.1\ \mu\text{m}$ 拍一张，那么完成全部逐层扫描就得拍 200 张照片。在扫描面积较小，譬如 $a \times a$ 的正方形单边 $a=2\sim 3\text{mm}$ 时，整个测量过程将在不到 1 分钟内完成。

自动变焦三维测量优于其他光学方法的重要一点就是既能对工件表面的细微处也能对宏观外形进行精确、快捷的检测。Alicona 公司所研制仪器的最大测量高度，即轴向扫描范围可达 23mm ，而最大扫描

面积为 100mm×100mm，与前面提到的逐层间隔一样，这些参数都是预先设置的。

但为了对图 7 所示的连杆大头孔的激光造型面进行相关测量，就必须再在图 12 基本型仪器的基础上予以专项设计，主要表现在特殊的载物工作台等机构上，见图 13。从图中可以看出，工件固定于一装夹单元，而在被测的大头孔内有一可回转的反射棱镜。在整个测量过程中，反射镜转动后先后停留在 4 个位置，分别对准 4 个激光造型面，每个之间的间隔是 90°。图 14 是这台专用测量仪器的工作示意图，图中所示，仪器对被测表面的逐层扫描乃是通过由物镜透出的光线，经过反射镜水平地投到连杆大头孔内的激光造型面上的。由于整个检测均自动进行效率很高，加上工件的装卸也不过短短的几分钟，相比前面介绍的传统方法，工效提高了几十倍。

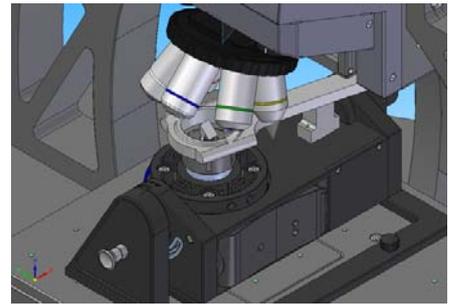


图 13 连杆大头孔专用测量仪

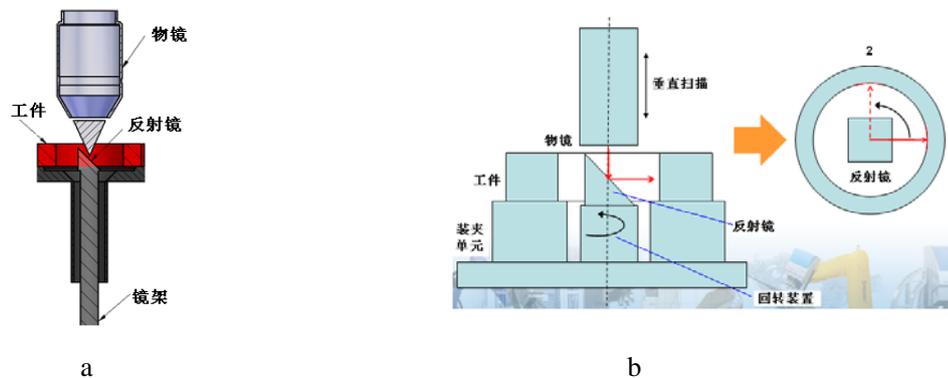


图 14 孔径专用测量仪工作原理示意图

表 2 是自动变焦三维测量技术与其他三种国内外有较多工业应用的光学法在表面检测能力上的一个简单对比，从中对这项测量技术的优越性可见一斑。

表 2. 四种工业中常用的光学测量方法的对比

	形 貌	表面粗糙度
结构光学传感器 (structured light)	可以测量	无法测量
共聚焦显微镜 (confocal)	无法测量 *	可以测量
白光干涉仪 (interferometry)	无法测量	可以测量
自动变焦三维测量 (Focus-Variation)	可以测量	可以测量

* 有限的可能，只能测量非常狭小平整的工件表面形貌

参考文献

1. (德) Gehring 公司 物体表面激光造型珩磨加工——改善表面摩擦性能
VDI-Z (德国汽车工业协会) 专业领域年度一览
- 2, 王洪祥等 超精密加工表面微观形貌的光学测量方法 成都 《工具技术》 1999.No.5
- 3, 朱正德 标准体系的完善提升了零件的粗糙度检测水平 上海 《上海标准化》 2009.No.2