

## Bridgelux 白皮书：平均光谱差异，一种客观比较光源自然度的新方法

### 摘要

照明市场正处于向人本照明（HCL）演进的早期阶段。人本照明不仅从视觉角度上对光源的光照品质提出要求，同时也从非视觉角度考虑光对人类的影响，其包括光照对人的身心健康和幸福情感的影响。回顾人类的整个进化过程，其视觉系统主要是在自然光-即白天的太阳光和晚上的月光以及火光下进化的。这些光源具有描述其自然光属性的标准化工业光谱能量定义即光谱能量分布。然而，目前行业传统的测量或评估方法，诸如相关色温（CCT）、显色指数（CRI）和 TM-30 指标 Rf 和 Rg 等，无法充分量化这些光源的自然度或接近标准自然光光谱的程度。由于缺乏定量测量光源自然度的行业标准，本文提出了一种对光源自然度进行客观比较的新方法。

### 人造光源的演进

21 世纪是全球向固态 LED 光源转变的决定性时期。尤其重要的是，LED 以其卓越的寿命和光效赢得了客户的认同，成为了照明光源的主流。以 LED 为光源的灯泡消耗的能量只是通常白炽灯泡（如卤素灯）所消耗的 10% 左右，而使用寿命至少是普通白炽灯的 10 倍。出于节约能源和减少碳排放的动机，消费者、商业实体以及政府已将 LED 技术应用于几乎所有室内和室外的照明空间。

在电气照明的大部分历史时期，传统且光效很低的钨丝灯泡一直占主导地位。荧光灯包括节能灯和荧光 T8/T5 灯管的引入是 20 世纪早期的一次尝试，旨在显著提高以流明每瓦（lm/W）为单位的能源效率或发光效率。然而，虽然荧光灯的安装和操作成本不高，但由于其具有尖锐的波峰和不平衡的光谱能量分布（SPD），因此它的光照质量或光色品质一直不太理想。对许多观测者来说，荧光灯会产生刺眼的蓝白效果，并且显色指数不高，光色演绎表现不佳。

白炽卤素灯的照明技术也是在 20 世纪发展起来的，在不牺牲光照质量的前提下，提高了钨丝灯泡的光效和寿命。但是，由于卤素光源在光效上和白炽灯相比，提高非常有限。随着 LED 光效和成本竞争力的显著提高，它们很快被 LED 固态照明所取代。

照明市场演变的每一个阶段都是由降低总成本（包括光源/控制系统/安装以及维护成本）的推动而推动的。然而，在许多情况下，技术的进步也会造成了令人遗憾的副作用，例如提高了光效，却降低了光照质量。无论是从人类进化还是光谱角度看，因其色点落在黑体辐射曲线上，并且在可见光光谱上具有理想的平滑的光谱曲线，钨丝白炽灯始终被认为是一个完美的光源。

### LED 照明市场的成熟期

自 21 世纪之交 LED 开始应用以来，专业的照明设计师一直担心 LED 照明对室内，室外空间美学的影响。事实上，照明行业在解决光照质量问题上已经取得了相当大的进展，特别是引入了 LED 产品，这些产品提高了色彩保真度，传统用显色指数（CRI）来衡量。

然而，许多年来，改善光照质量的工作比旨在提高光效的工作要少得多。LED 制造商包括芯片和封装以及灯具制造商一直在进行光效提升的竞赛，他们不断挑战，以宣布下一个新产品具有同类产品中有史以来最高的光效而努力。如此成功的工程努力导致，未来的光效提升和能源成本节约的空间，预计可以努力的空间相对已经非常有限了。从光效这个维度上讲，现在 SMD2835 封装体 已经达到 220lm/W 或更高，大多数典型灯具已经到达 140~150lm/W, LED 照明产业已经相当成熟。

这使得 LED 照明行业开始将注意力转向光照质量，而不是光效的提升。更广泛地说，照明设计师、标准规范制定者和用户正在探索以人为本的照明（HCL）即人本照明的概念。人本照明 HCL 有许多定义，但人们普遍认为它包含了光照对人的身心健康和幸福情感的影响，即从视觉和非视觉的不同纬度全面的衡量光照对人类的影响。通俗的说就是要在合适的地点，合适的时间提供合适的光照环境或者光照空间。

自然地，作为人本照明（HCL）计划的一部分，发展“自然”光源成为了照明人向前发展的一个动力和方向。人类物种在过去二十多万年的进化中，白天，人类主要受太阳光的影响，黄昏后，主要受温暖的火光的影响。因此，我们将自然光源定义为与太阳光和火光的光谱相匹配的光源。

与铁匠将金属棒放在火炉中加热使其发光的方法类似，白炽灯泡通过将其核心的微小金属元素通电发热，使其达到一定的温度来发光。当用热力学温标测量，以开尔文为单位时，金属丝的温度与光的相关色温（CCT）相对应。因此，白炽灯泡本质上是一种火光即热致发光，具有平滑的光谱曲线和中心色点落在 CIE 颜色空间黑体辐射曲线上的特点。太阳的发光原理比较复杂，光谱范围也非常的广泛，但其可见光部分，光谱能量分布和热致发光的白炽灯的是一直的，都非常的平滑。因此，只有在过去几十年里，从进化的角度来看，人类才让自己长时间暴露再非自然光下，如荧光灯或 LED 灯。

大多数照明专家和人本照明（HCL）的倡导者都强烈的认为，光源越自然，对观察者就越有益。当消费者对 LED 技术没有深入的了解时，他们会对自然光和非自然光的偏好产生疑问，通常他们会倾向于自然光。住宅和商业空间（如办公室、学校、养老院和医院）的照明规范也可能认为，最安全的选择是避免让人们接触到非自然照明，朝着符合人类发展和进化条件的自然光复制方向发展。

**这就提出了一个问题：我们如何测量人造光源的“自然度”？**

### **光照质量测量方法的建立**

光照质量包括许多特性。照明行业已经建立了量化光照质量的方法，同时也在发展新的度量标准，以应对来自行业规范制定者和消费者的需求变化，以及照明技术的变化。

光照质量的一个重要参数是颜色保真度：渲染或还原被照物体颜色的真实性，其定义是被照物体在测试光源和参考光源即标准光源照射下的颜色的相似程度的平均值。TM-30 提出颜色保真度之前，历史传统的评价指标是显色指数 CRI，通常取前 8 种常见颜色样本的显色指数的平均值，

用 Ra 表示。白炽灯泡的显色指数 CRI 为 100，表示完美的色彩还原度，而大多数 LED 产品的典型的显色指数 CRI 为 80 或 90。

对于某些应用场景，用户可能对某一特定的色调或色域范围特别敏感。例如，在服装店铺的照明应用中，红色色调的渲染或者还原通常被认为是很重要的，显色指数 CRI 的 R9 代表这个饱和的红色。

事实上，由于显色指数 CRI 是一个平均值，显示指数高，不能说明评估光源对所有颜色的还原性都很好，它可能掩盖了评估光源对某一种或者某些颜色的真实还原能力。对于需要在所有颜色范围都呈现完美光照质量的应用，行业专业人士可能采用评估光源的方式是把颜色样本扩展到 15 个，即 R1-R15，评估显色指数 CRI 的 15 个标准化颜色样本中的每一个单独样本的值。例如上面提到的针对服装店铺照明的光源，不能只是评估显色指数的平均值 Ra，同时也需要评估 R1 到 R15 单独的样本值，尤其是 R9。

在 LED 光源已经商业化的 20 多年里，显色指数 CRI，一直是照明行业评判光源光照质量的主要指标。近年来，对这种依赖显色指数 CRI 的评判方法的担忧与日俱增。度量本身是有效的，但它只提供了光照质量的一个纬度的部分度量（到目前为止，总共定义的颜色样本是 15 个，数量是非常有限的）。

为了解决这个缺点，业界推出了 IES TM-30 的评判标准，这是一种新的度量标准，它扩展了颜色保真度的定义，颜色样本增加到了 99 个，并增加了另一个关键纬度的光照质量评估：颜色饱和度。也就是说，当被照物体颜色在评估光源照射下，和参考光源照射对比时，它是否显得褪色、更强烈、更有活力，或者与它的外观本来颜色一致？和显示指数 CRI 一样，它表征是否忠实地呈现了被照物体本来的颜色，还是渲染失真了？比如，在评估光源的照射下，被照物的外观颜色已经失真了，本来红色的外观是否看上去更红了，或者是不够红，不够鲜艳。

TM-30 测量 99 个颜色样本中光源的平均性能，以得到颜色保真度 Rf 的数值和色域饱和度 Rg 的数值。此外，也可以报告 99 个标准化样本中每个样本的单个颜色保真度的数值。

显色指数 CRI 和 TM-30 都向照明设计师或行业专业人士提供了重要信息，说明光源在多大程度上与自然参考光源的照射效果相匹配，例如日光（相关色温大于 5000K 的冷色温下）或火光（相关色温低于 5000K 的暖色温下）的显色效果。然而，实际观察实践中，在具有相同显色指数 CRI、颜色保真度 Rf 和颜色饱和度 Rg 值的两个不同光源下，观看同一被照物体，可能出现不同的颜色表现。因此仅仅按照显色指数和 TM-30 来评估一个光源，不足以完全定义光照的质量或自然度。为了了解其原因，研究不同光源的光谱能量分布 SPD 是非常重要的。

### 探索自然光光谱

人类发现，从物理意义上讲，可见光是电磁辐射的一部分。像太阳这样的光子发生器产生的电磁辐射横跨一个宽光谱的波长。太阳的短波辐射，人眼看不见的波段被称作紫外线。太阳辐射的紫外线大部分被地球大气层所阻挡，但也有部分辐射会通过大气层到达地球表面，这部分紫外线会对没有保护的人类皮肤造成晒伤。

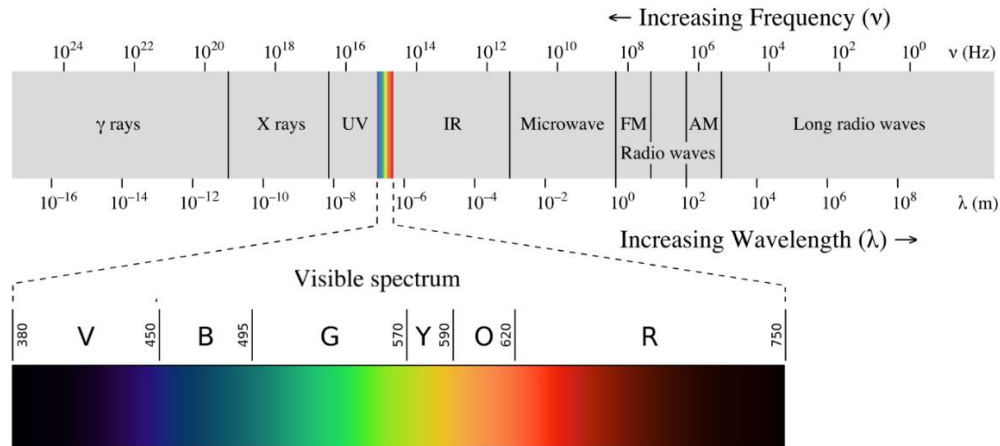


图1: 电磁辐射的光谱, 可见光从 380nm 到 780nm

(Image credit: Philip Ronan, Gringer under Creative Commons 3.0 license.)

太阳辐射的中波段 380nm 到 780nm, 是人眼看得见的, 被称作可见光。太阳光光谱的长波段是红外光, 红外光对人眼也是看不见的, 但对人的皮肤是敏感的——它是热辐射, 可以让人有温暖或热的感觉。

白天阳光颜色的变化, 从黎明时分的暖黄色到中午时的冷蓝色, 再到黄昏时的金黄色, 反映在图 1 所示的可见光光谱的每一段光谱能量强度的变化平衡, 因为蓝色、绿色和红色波段的光在通过大气层到达地球表面时, 会被大气层吸收反射, 不同时间, 蓝色、红色和绿色波段被吸收反射的比例是不一样的, 造成我们在不同时刻看到的阳光呈现出不一样的光色。

如图 2 所示, 把太阳光在一天中不同时间的光谱能量分布的图表绘制出来, 就可以非常明显的看出不同时间, 太阳光到达地球表面的可见光光谱在不同波段其能量强度是不一样的, 也完美地映射了不同时间, 呈现出不同的光色表现。还应注意的是, 太阳光谱能量分布随观测者的位置和大气条件以及季节的变化而变化。

图 2 所示的光谱能量分布是自然的, 它代表了进化使人体适应的, 以及人类进化繁衍和茁壮成长的的不同波长能量的精确平衡。这种光谱能量的平衡也决定了颜色的不同表现。例如, 在下午早些时候, 当图 2 中的光谱能量分布 SPD 显示在 600nm 以上的红色波长呈现出相对较高强度时, 红色、黄色和橙色在人眼看来会更强烈, 而在中午没有云的蓝天下, 太阳光看起来会更蓝。

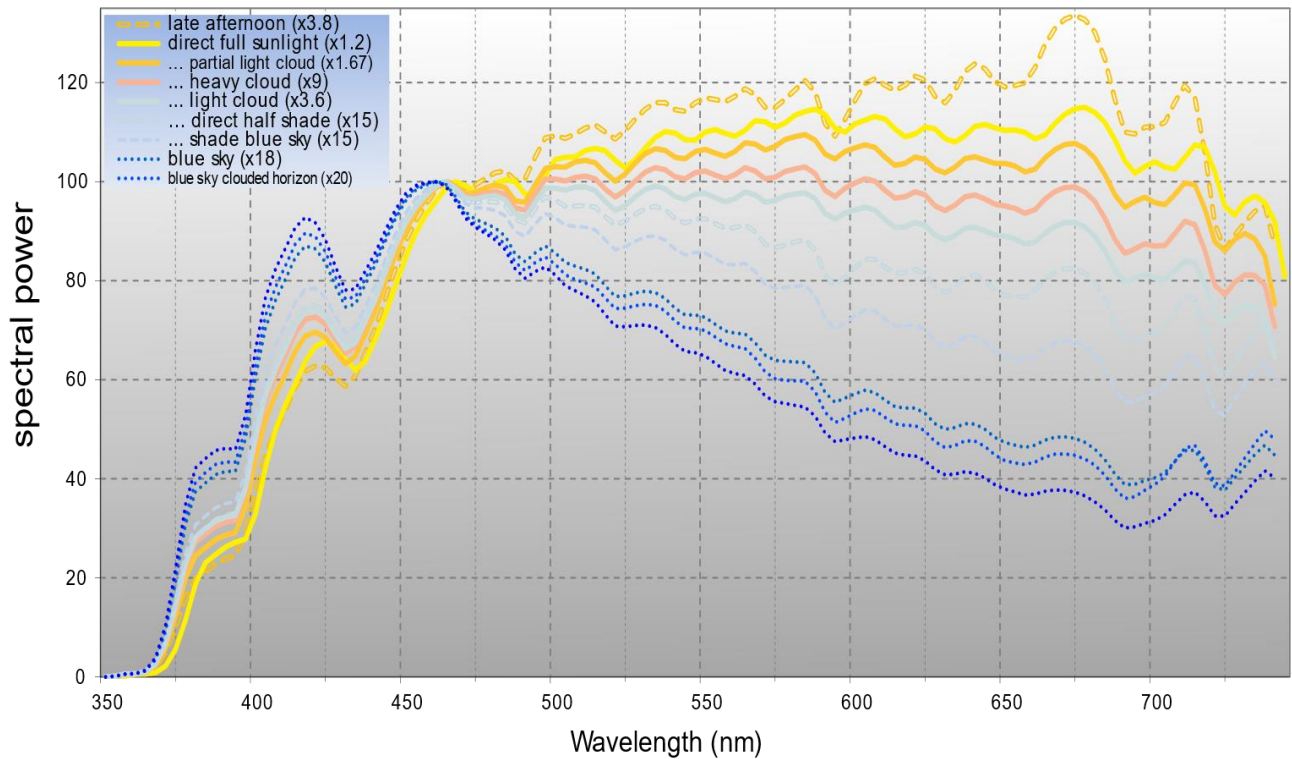


图 2：一天中不同时间和天气条件下太阳光光谱能量分布的变化。

*(Image credit: Txbangert under Creative Commons 4.0 license.)*

光谱能量分布 SPD 图，如图 2 所示，任何可见光源都可以被测量和绘制。例如应用光谱仪测出色温为 6500K 的人造光源的光谱能量分布，如果其光谱能量分布峰值接近图 2 中“蓝天” (blue sky) 曲线的峰值，则其人造光源的显色指数 CRI 值就会很高，因为测量是选择 6500K 中午日光作为参考光源的。这就会导致以此来衡量光源光照质量的基本方法，从显色指数 CRI 看，它将名列前茅，但如图 3 所示，并不意味着它一定是一个很好的，接近自然光的光源。

图 3 是 6500K 荧光灯光源的典型光谱能量分布 SPD，图 4 是 6500K 白色 LED 光源的典型光谱能量分布 SPD。很明显，这些光谱的曲线与图 2 中所示的任何日光光谱能量分布曲线都有很大的不同。近年来，LED 制造厂商在优化涂敷在 LED 半导体芯片上的荧光粉成分及应用配比上，进行了大量的研发工作，以抑制图 4 所示的蓝光波段的峰值，并提高红色和绿色光谱的光谱能量分布，以获得更好的显色指数 CRI 值。折衷考虑的结果，常常为了提高效率而牺牲光源的光照质量，由于人眼对可见光谱中绿色部分最敏感，增加绿光波段的比例，提高此波段的发光强度，从而提高整体光源光效。

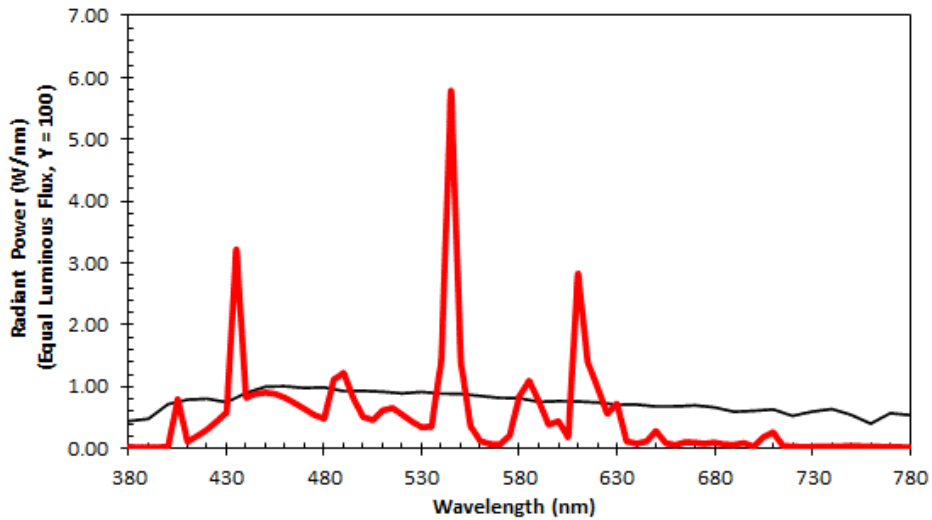


图 3: 6500K 典型荧光灯相对于 D65 标准光源的光谱能量分布。

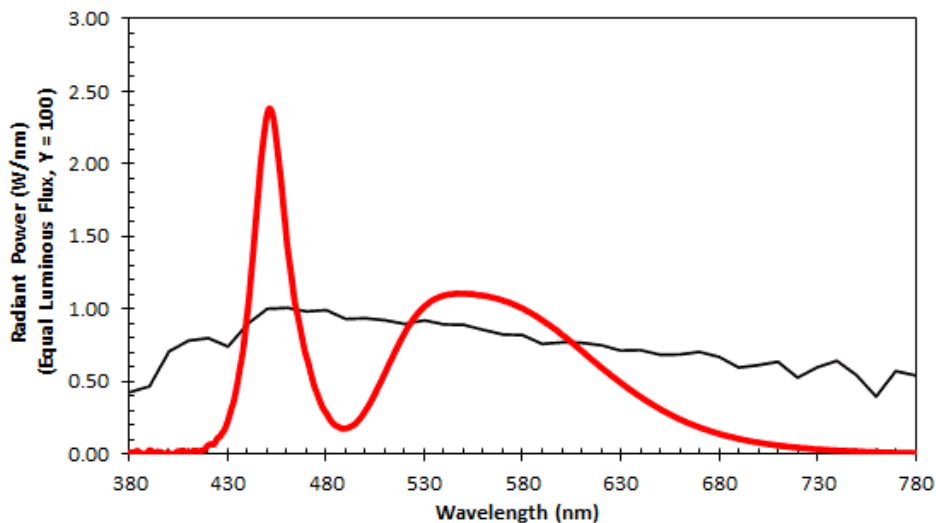


图 4: 典型 6500K 白色 LED 相对于 D65 标准光源的光谱能量分布

对于 4000K 色温 CCT 的 LED 光源（典型用于商业、办公和教育环境的室内照明），这些设计优化工作的努力结果如图 5 所示。4000K 色温 CCT 的参考光源是火光，其光谱能量分布为黑体辐射曲线 BBC，在图 5 中以黑色的虚线所示。从光谱能量分布看，CRI90 或 98 的 LED 光源比 CRI80 的光源更接近黑体辐射曲线，即更接近参考光源的光谱能量分布。尽管如此，从整个视觉光谱来看，两个 LED 光源（CRI90 或 CRI98）都显示出与自然光（参考光源火光）黑体辐射曲线 BBC 的光谱能量分布，有实质性的偏差。主要显示在光谱能量峰值（黑体曲线上方的偏差）和波谷（黑体曲线下方的偏差）处。

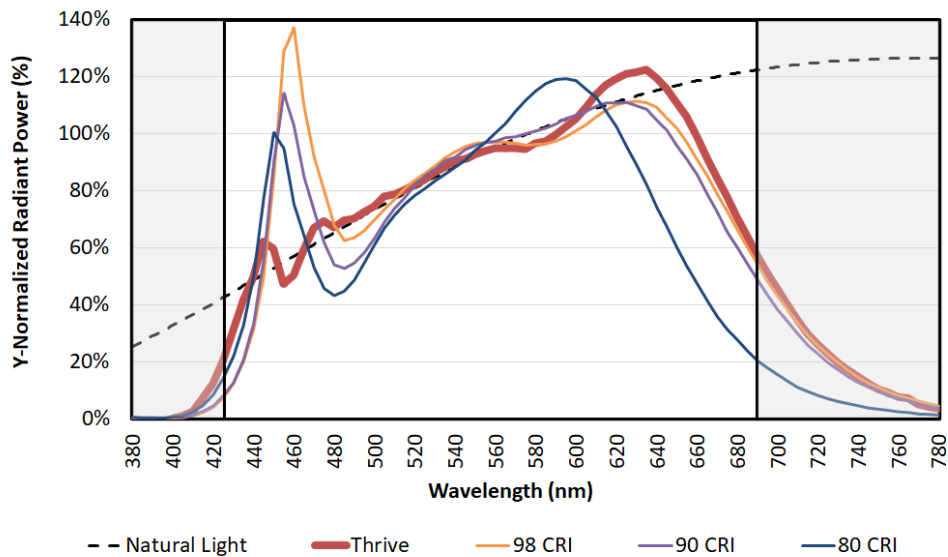


图 5: 4000K 时 LED 光源相对于黑体曲线的光谱能量分布 SPD

图 4 和图 5，是典型的 440-460nm 蓝色 LED 芯片泵浦荧光粉转化为白光的 LED 光源，光谱能量分布曲线在 440-460nm 波段，尖锐的峰值清晰可见。LED 灯的这一特性对某些人来说尤其重要，由于蓝色波段的尖锐峰值显然与自然光光谱能量分布有很大偏差，因此有可能会对人体昼夜节律的失调，这种节律是调节身体活动、休息和睡眠周期的模式。以人为本的自然照明即人本照明 HCL 的理念之一是要带给用户与昼夜节律的协调的照明。

在这方面，许多人本照明（HCL）的倡导者认为，一些 LED 制造商为了产生人工激励效应而人为增加光谱中蓝色或紫色光谱部分的能量的做法可能充满风险。（增强蓝光或紫光部分的光照能量，可以使人感到兴奋，从而提高工作效率）

另一方面，Bridgelux 则主张，在没有确凿证据表明暴露于高强度蓝光或紫光的人为的光谱中不会产生危害的长期影响的情况下，为什么要冒险呢？人类的进化告诉我们，自然光的光谱能量分布对人类的生理是最安全和最适合的。因此，在研发 Thrive™ 自然 LED 光源，Bridgelux 设计的光谱，以尽可能接近自然光的光谱能量分布。

由于缺乏一种良好的工业标准或者方法来定量测量光源的自然度，本文提出了一种对两种光源的自然度进行客观比较的新方法。

### Bridgelux Thrive™ 最好的自然 LED 光源

Bridgelux 独家开发的 Thrive™ 是人本照明光谱即自然光光谱的 LED 产品，包括 COB、SMD 以及灯丝灯等不同产品。Bridgelux 应用拥有自主知识产权的专有 LED 芯片、结合独特的荧光粉和封装技术，基于这三个方面的优势组合，优化单独的每一特有技术，并有效地相互协作，从而产生自然的光谱特性。图 5 显示了 Bridgelux Thrive™ 4000K LED 以及 Bridgelux 普通显色指数 CRI80、90 和 98 产品的光谱能量分布 SPD。

为了定量的说明图 5 中每个光源的光谱能量分布 SPD 之间的差异，或者相对自然光光谱能量分布的差异，即光源的自然度，可以进行一个简单的计算。尽管可见光的波长范围是从 380nm 到 780nm，Bridgelux 建议计算自然度的波长范围从 425nm 到 690nm。原因是该波长范围和人眼明视觉函数  $V(\lambda)$  高响应波长区域一致；光谱光效率函数即人眼明视觉函数  $V(\lambda)$  是指在明视觉条件下，人眼对 380~780nm 可见光谱范围的不同波长的辐射，即各种单色光具有不同的感受性。对于等能量的各色光，人眼觉得黄绿色最亮，其次是紫、蓝、最暗是红色，即对 425nm 到 690nm 的光敏感性最强，如图 6 所示。选择 425nm 至 690nm 的波长范围，去除低于峰值 1% 的  $V(\lambda)$  高斯分布的尾部，即人眼光敏感性很低的部分（敏感度的峰值波长是 555nm）。由图 5 和图 6 阴影框之间的面积表示，该波长范围覆盖了光谱光效率函数曲线下总面积的 99.9%。

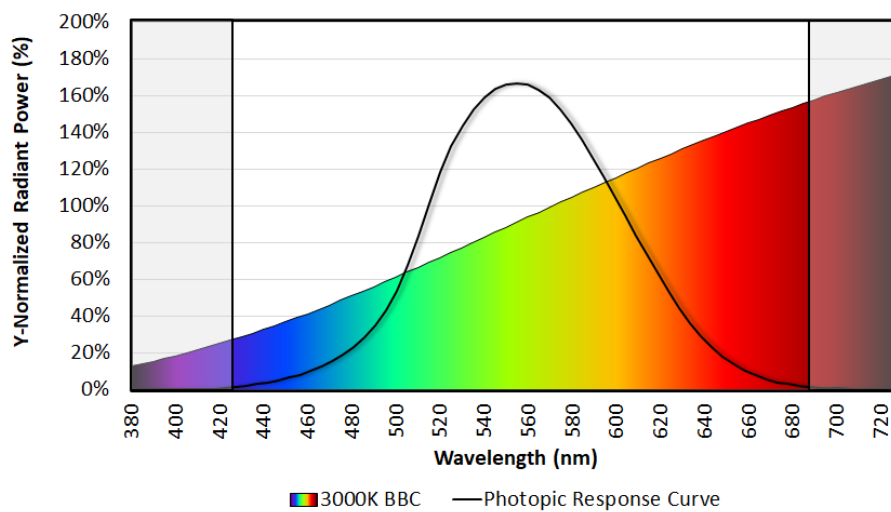


图 6: 3000K 黑体辐射曲线、明视响应曲线  $V(\lambda)$

为了计算出描述光源自然度的确定值，必须对每个光源的光谱能量分布 SPD 进行 Y 轴归一化即光谱能量的归一化，以便它们在可见光谱范围内具有可比性。然后在 425nm 到 690nm 之间，将光谱分成 266 区间，每个区间 1nm。测量评估光源与参考光源在每个光谱区间的辐射能量差，并用百分比偏差表示。然后对所有 266 个值的绝对值进行平均以产生单个值。这种计算可以表示为平均光谱差异 ASD。照明设计师、购买者和规范制定者可以比较平均光谱差异 ASD 的值，以评估所考虑的不同光源的相对自然度。其计算公式如下所示。

$$ASD = \frac{\sum_{\lambda=425}^{690} \left| \frac{\phi_{ref} - \phi}{\phi_{ref}} \right|_{\lambda}}{266}$$

平均光谱差异 ASD 值以百分比表示，用以比较同一色温 CCT 的测试光源与参考光源的光谱能量分布差异，这里需要注意的是，只用对同一色温的光源做比较才有意义。Bridgelux 使用的参考



光源是：4000K 及低于 4000K 色温的参考光源的光谱能量分布曲线是黑体辐射曲线（BBC），5000K 及大于 5000K 色温的参考光源的光谱能量分布曲线是日光光谱能量分布曲线（即标准照明体或称为标准光源，如 IES 定义的 D50、D57 和 D65）。

Bridgelux 选择这些自然光源作为参考光源，参考了现有的颜色质量度量标准选择参考光源的方法。显色指数 CRI 的测量计算选择黑体辐射曲线 BBC 作为 5000K 色温以下的参考光源，选择标准照明体作为 5000K 色温以上光源测量计算的参考光源。TM-30 使用黑体辐射曲线 BBC 作为 4000K 色温及 4000K 以下色温光源测量计算的参考光源，使用 4000K 黑体辐射曲线和 D50 标准照明体的混合作为 4000K 至 5000K 色温之间光源测量计算的参考光源，大于 5000K 色温的选用标准照明体作为参考光源。Bridgelux 测量计算平均光谱差异 ASD，所使用的参考光源和最新的 TM-30 标准一致。

图 7 是 3000K 色温不同 LED 光源的光谱能量分布 SPD 差异的对比（3000K 色温是室内住宅、酒店和零售照明应用中的比较典型色温）通过使用新定义的平均光谱差异 ASD 指标，可以看到，定量差异是明显的。用此方法对比，定量地显示了 Thrive™ LED 的优越自然性。三种普通 LED 中最好的是显色指数 CRI98 的产品，平均光谱差异 ASD 为 18%，而 Thrive™ LED 的平均光谱差异 ASD 仅为 9%，相比之下，与自然光的平均光谱差异减少了一半。与显色指数 CRI90 产品相比，显色指数 CRI98 产品的 ASD 值与显色指数 CRI90 产品相差不大，没有显著降低，这似乎有悖常理，其原因是 CRI98 产品的光谱设计是提供高显色指数 CRI 的值，而不是与自然光光谱更接近。这验证了一个前提，即显色指数 CRI 本身并不是一个对自然度的精确度量。

如前所述，平均光谱差异 ASD 可以在任何指定可见光波长范围内计算，只需对上述方程进行简单修改。然而，如果指定的波长范围明显大于所评估光源的辐射范围，则由于光谱的短波长尾部和长波长尾部的高度偏差会将结果权重降低，导致测量结果没有意义。Bridgelux 使用与人眼明视觉函数高敏感性对应的波长范围 425nm 到 690nm 之间，该范围基于人类进化，描述了人类视觉亮度感知的平均光谱灵敏度。

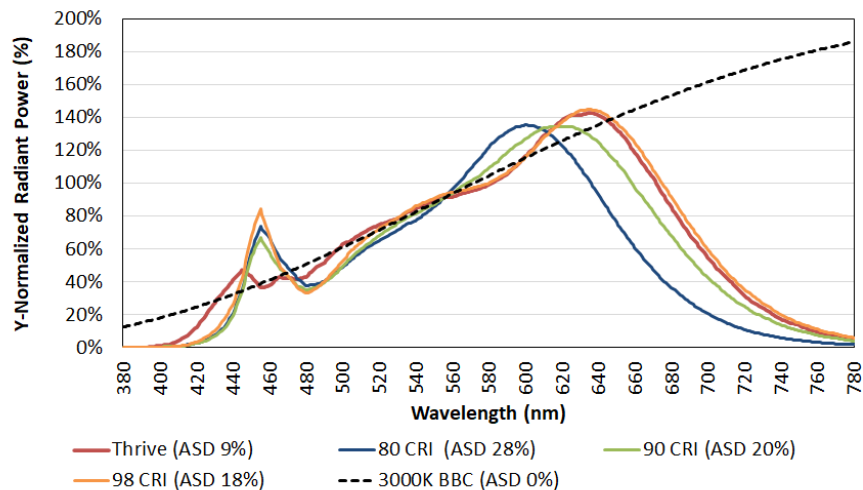


图 7: CRI80、CRI90、CRI98 和 Thrive™的光谱能量分布与黑体辐射曲线的对比

平均光谱差异 ASD 可以用来与任何光源进行比较。图 8 比较了人本照明市场中 6500K 色温 LED 光源的光谱能量分布 SPD: Bridgelux Thrive™ 和竞争者的 6500K LED 光源。比较的结果, Thrive™ LED 的 ASD 值是 8%, 而竞争者的全光谱 LED 光源的 SPD 值是 27%。值得注意的是, Bridgelux 产品显示了 LED 光源固有蓝色峰值的特别有效的抑制。这使得它比竞争对手的产品更接近自然光的光谱曲线, 平均光谱差异 ASD 值也比竞争对手低很多。

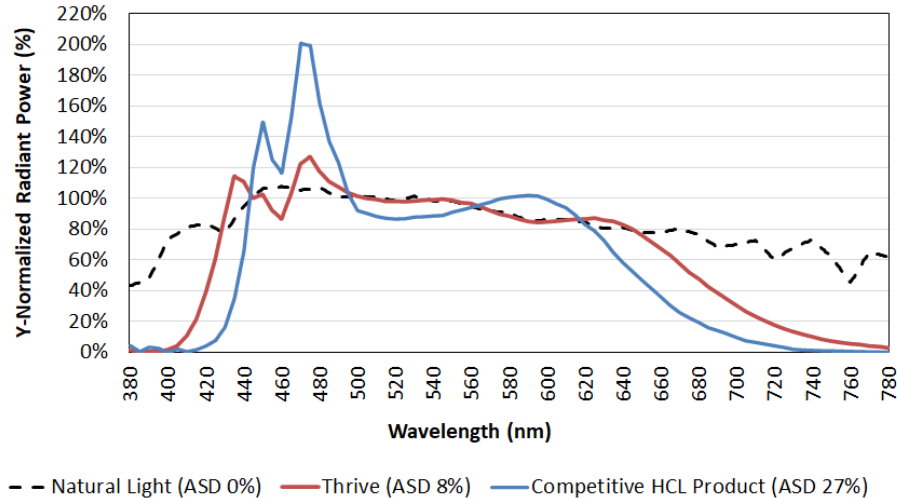


图 8: 6500K Thrive™ 和竞争者 LED 产品与作为自然光参考的标准照明体 D65 的比较

增强或抑制蓝光辐射可调节褪黑激素的分泌, 这会影响个人的节律, 使人感到兴奋或使人平静。但是, 这种人为操纵光谱能量分布 SPD 产生的非自然光辐射对人类的长期影响是未知的, 在进行长期研究结果出来之前, 它将一直处于未知。Bridgelux 的哲学是, 复制自然光是安全的, 有益于光照对人类非视觉的影响即昼夜节律以及人类情感的影响。提高或抑制蓝光辐射影响人体生理, 对人体健康有着未知和未经测试的长期影响。

虽然高显色指数 CRI 和 TM-30 指标可以由平均光谱差异 ASD 值高 (低自然度) 的光源产生, 但由于光的自然性, 平均光谱差异 ASD 值低 (高自然度) 的光源将始终对应于高显色指数 CRI 和 TM-30 指标。表 1 举例说明了这一点, 表中两个最低的平均光谱差异 ASD 值的光源 (自然光和 Thrive™) 有接近完美的显色指数 CRI 和 TM30 指标, 但是显色指数 CRI98 的光源也有接近完美的显色指数 CRI, 平均光谱差异 ASD 却很高, 达到 18%, 这表明反之则不一定成立。

Evaluation Metric		Natural Light	Thrive	80 CRI	90 CRI	98 CRI
ASD		0%	9%	28%	20%	18%
CRI	R <sub>a</sub>	100	98	83	92	98
TM-30	R <sub>f</sub>	100	98	84	91	94
	R <sub>g</sub>	100	101	93	97	102

表 1: 3000K 色温, 不同 LED 光源典型的 ASD、CRI 和 TM30 指标

Bridgelux 的 Thrive™ 系列光源经过精心的光谱能量分布设计和优化, 可在各种不同色温 CCT 上产生自然光光谱的 LED 光源。表 2 给出不同色温 Thrive™ 产品的平均光谱差异 ASD 值、显色指数 CRI 和 TM-30 指标, 此表适用于 Bridgelux 各种不同封装的 Thrive™ 产品 (Thrive™ COB/SMD 或者灯丝灯等不同封装形式的产品)。

CCT	ASD	TM-30		Typical CRI and CRI R Values															
		R <sub>f</sub>	R <sub>g</sub>	R <sub>a</sub>	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15
2700K	10%	97	100	98	98	99	95	94	97	99	98	98	93	97	92	92	99	96	98
3000K	9%	98	101	98	98	99	95	93	97	99	96	97	97	98	92	93	98	96	97
3500K	8%	97	100	98	98	98	97	98	98	98	98	97	93	97	97	95	98	97	98
4000K	8%	96	99	98	99	98	96	98	99	98	98	98	95	95	97	94	99	97	99
5000K	9%	96	99	98	99	98	96	97	98	96	97	97	92	94	97	92	98	98	99
5700K	9%	96	99	98	98	98	97	95	98	97	96	95	92	97	96	96	98	98	97
6500K	8%	96	99	98	98	98	98	98	97	96	99	99	96	98	98	91	98	99	97

表 2: Thrive™ 光源的典型 ASD、CRI 和值 TM-30 指标。

在比较两种光源之间的光照质量时, 了解人类视觉的极限是很重要的。可以识别两个光源之间的可察觉区别的极限, 通常称为刚刚可察觉区别 JND。

位于加州大学戴维斯分校的加州照明技术中心 (CLTC) 进行的研究得出了一个有趣的发现, 即人类如果使用 TM-30 标准来评估人造光源照射下的人眼视觉感知, 如果颜色样本的保真度 R<sub>f</sub> ≥ 92, 则平均观察者无法察觉到此颜色样本在该评估光源和参考自然光源照射下的视觉光色差异。因此, 92 被定义为刚刚可察觉区别 JND。因此对于人类观察者来说, 具有 TM-30 R<sub>f</sub> 值 ≥ 92 的光源基本上等同于 R<sub>f</sub> 为 100 的参考自然光源。

图 9 比较了三种人造 LED 光源: 3000K Thrive™ LED、3000K CRI LED 和竞争对手 3000K 全光谱 LED 光源。对于 3000K Thrive™ LED, 99 个 TM-30 颜色样本中, R<sub>f</sub> 值中有 97 个 ≥ 92, 低于 92 的两个 R<sub>f</sub> 值仍大于 90。对于 3000K CRI98 LED, 99 个颜色样本中, 只有 74 个 R<sub>f</sub> 值 ≥ 92, 25 个 R<sub>f</sub> 值小于 92, 其中有 13 个 R<sub>f</sub> 值也小于 90。竞争对手 3000K 全光谱的 LED 光源, 99 个颜色样本 R<sub>f</sub> 值中只有 69 个高于 92, R<sub>f</sub> 值小于 92 的 30 个颜色样本中, 其中有 16 个 R<sub>f</sub> 值也小于 90。

这从另一个角度，也支持了 Bridgelux Thrive™ LED 更接近自然光的论点，在 TM-30 测量中，98%的颜色样本，在 Thrive™ LED 和参考自然光源的照射下，人眼几乎无法察觉到色彩差异。

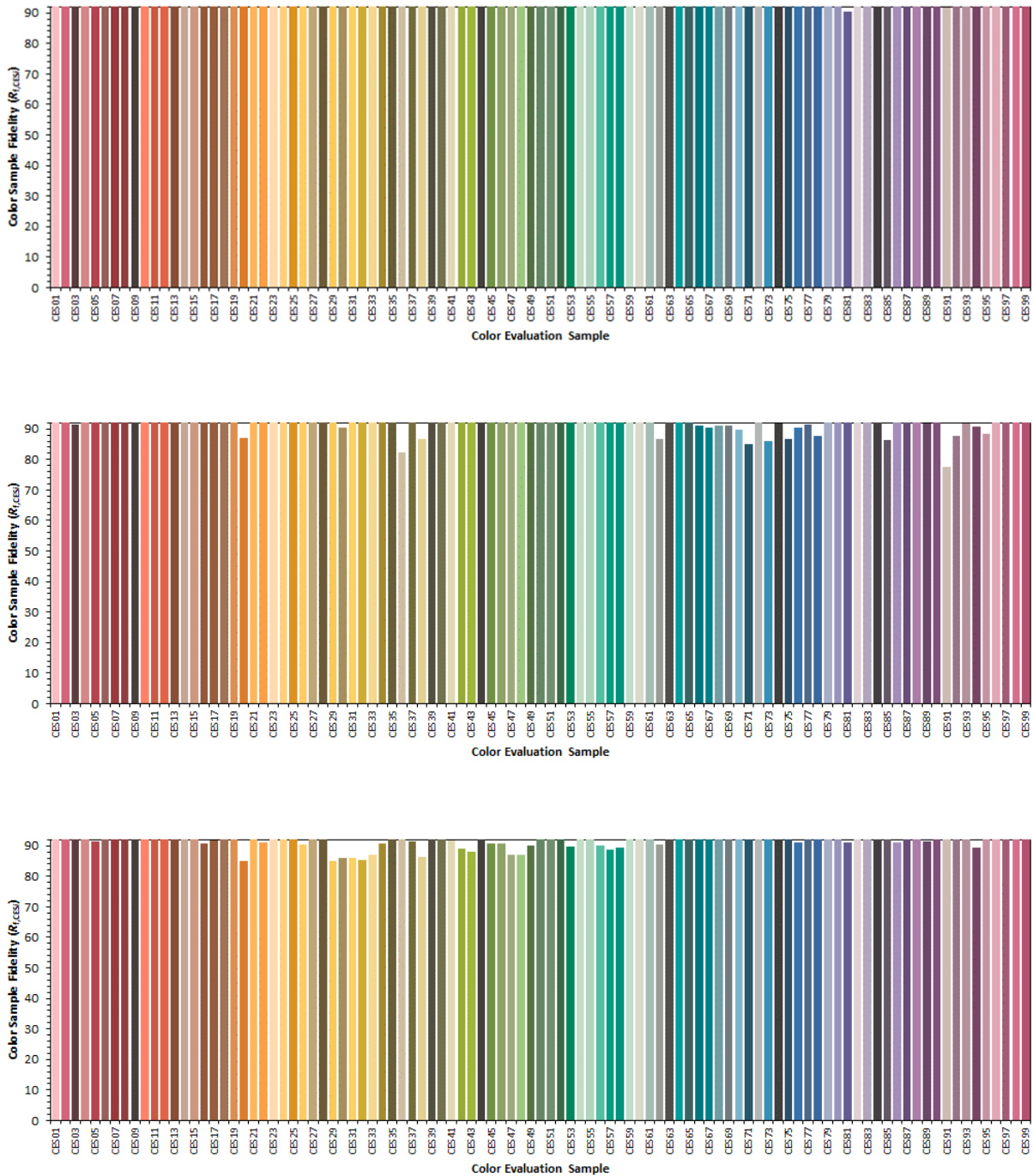


图 9: TM-30 单个颜色样本保真度 Rf 测试结果 3000K Thrive™ LED (上) 与 3000K 98 CRI LED (中) 和竞争对手 3000K 全光谱 LED (下)

在可见光光谱范围，均匀的高显色性（TM-30 99 个颜色样本都有很高的得分）和色彩饱和度性能是 Thrive™ LED 技术的独特成就。抑制蓝光部分的尖峰和填平青色波谷部分，尤其困难，但图 5、7 和 8 显示，即使在光谱的这些部分，Thrive™ LED 也与参考光源的光谱能量分布保持高度的一致性。

越来越多的研究表明，光对人类的影响不仅仅是视觉上的。目前照明行业中有几个指标用来描述光源对人体昼夜节律的影响即非视觉的影响。其中比较通用的指标包括褪黑指数（MR）、昼夜节律因子（CAF）和昼夜节律刺激值（CS）。虽然这些指标值得考虑，但它们并没有提供一种充分的方法来量化光源的自然度，因为它们来自于褪黑素反应和昼夜活动因子曲线，而不是视觉反应曲线，如图 10 所示。因此，虽然在理解光源对人类昼夜节律的影响时值得考虑，但 CAF、MR 或 CS 值只是从光源对人类非视觉影响的一个方面做出评估，只是光源属性以及对人类影响整体画面的一部分，无助于客观全面量化光源的自然性。

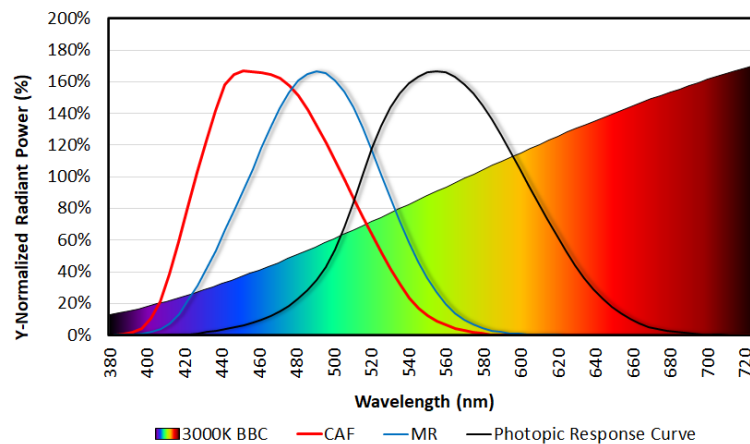


图 10: 3000K 黑体辐射曲线、CAF 和 MR 计算曲线及其人眼明视觉曲线

表 3 比较了 Thrive™ LED 和参考自然光源的 MR、CAF 和 CS 值。可以观察到，Thrive™ LED 光源的昼夜节律与自然光的昼夜节律非常相似，MR、CAF 和 CS 值的最大差异仅在测量误差允许范围内。这又一次表明了 Thrive™ LED 是如何在人类视觉和非视觉反应中模拟自然光源特性的，是人本照明应用的理想光源。

CCT	MR Value			CAF Value			CS Value 300 LUX Eye Illuminance		
	Thrive	Natural Light	Difference	Thrive	Natural Light	Difference	Thrive	Natural Light	Difference
2700K	0.515	0.522	-1.3%	0.337	0.353	-4.5%	0.297	0.302	-1.7%
3000K	0.598	0.603	-0.8%	0.419	0.428	-2.1%	0.328	0.331	-0.9%
3500K	0.669	0.679	-1.5%	0.486	0.501	-3.0%	0.358	0.360	-0.6%
4000K	0.739	0.734	0.7%	0.536	0.557	-3.8%	0.249	0.256	-2.7%
5000K	0.945	0.934	1.2%	0.744	0.759	-2.0%	0.341	0.337	1.2%
5700K	1.024	1.016	0.8%	0.828	0.840	-1.4%	0.361	0.366	-1.4%
6500K	1.093	1.079	1.3%	0.898	0.912	-1.5%	0.385	0.391	-1.5%

表 3: Thrive™ LED 和参考自然光源的 MR、CAF 和 CS 值的比较

表 4 列举出了 3000K 色温时显色指数 CRI80、90 和 98 LED 光源的 CAF、MR 和 CS 值，与 Thrive™ LED 和竞争对手 3000K 全光谱 LED 光源相比。虽然在这三个昼夜节律指标中，许多这些 LED 光源都接近自然光，但总体来看 Thrive™ LED 和自然光的匹配度最高。

Product	MR Value			CAF Value			CS Value 300 LUX Eye Illuminance		
	Value	Natural Light	Difference	Value	Natural Light	Difference	Value	Natural Light	Difference
3000K Thrive	0.598	0.603	-0.8%	0.419	0.428	-2.1%	0.328	0.331	-0.9%
3000K 80 CRI	0.560	0.603	-7.1%	0.395	0.428	-7.7%	0.323	0.331	-2.4%
3000K 90 CRI	0.548	0.603	-9.1%	0.377	0.428	-11.9%	0.318	0.331	-3.9%
3000K 98 CRI	0.585	0.603	-3.0%	0.420	0.428	-1.9%	0.331	0.331	0.0%
Competitive 3000K HCL Product	0.553	0.603	-8.3%	0.404	0.428	-5.6%	0.321	0.331	-3.0%

表 4: 3000K LED 光源的 MR、CAF 和 CS 值与自然光的比较

### Thrive™ LED 自然光源的应用

新兴的研究可能会继续建立关于自然光源与人类健康和情感之间关系的行业认知，照明设计师和行业专业人士越来越倾向于将自然照明作为朋友、家人或同事享受时光的任何照明空间，提供最安全和最舒适的光照氛围。Thrive™ LED 自然照明可以应用到零售、住宅、商业、教育和医疗环境中。艺术和文化组织也希望探索 Thrive™ LED 的自然性，以确保忠实地呈现艺术家希望观众看到的艺术品本真的色彩。

照明设计师和灯具制造商还可以通过将不同色温 CCT 的 Thrive™ LED 自然光源与可控制装置（如 Bridgelux Vesta®Flex 双通道 LED 驱动和控制模块）相结合，实现以人为本的先进照明形式即人本照明。可调白光的照明为用户提供了灵活性和对灯光的全色温（2700K 到 6500K 或者 2200K 到 6500K）控制。这使的人们可以设置 Thrive™ LED 光源的色温 CCT 与其个人昼夜节律相一致，选择功能性照明，或者进一步个性化他们的光照环境，而不仅仅是通过调光控制来调整光照亮暗的历史能力。

使用低平均光谱差异 ASD 光源实现人本照明 HCL 的整个范围超出了本白皮书的范围，但由于 Bridgelux 具有先进的 Thrive™ LED 和 Vesta 可调白光的照明产品系列，因此它是一个非常适合分析的主题。

### 结论

照明设计师和标准制定者已经准备好，从传统的比较流明输出和能源消耗跳出，考虑多个光源之间，光的自然度方面的巨大差异。

迄今为止，光照质量的测量仅限于颜色保真度，通过与参考光源的比较来比较对颜色样本的渲染能力和饱和度。用户越来越意识到 LED 光对人体健康和幸福的影响，推动了人们对模拟阳光或火光即自然光的自然照明产品的需求。

现有的光照质量评估指标不能解决光源的自然性问题。Bridgelux 引入了平均光谱差异 ASD 来提供一个度量标准以量化光源与自然参考光源的匹配程度即自然度。表 5 总结了本白皮书中讨论的 3000K LED 光源（包括与自然光光谱相比具有竞争力的 HCL 产品）的各种照明指标的测试值。可以观察到，即使显色指数 CRI 或 TM-30 指标  $R_f$  和  $R_g$  相似，平均光谱差异 ASD 的度量描述了更清晰的区分，以更好地量化光的自然度。TM-30 保真度值  $\geq 92$  的刚刚可察觉差异建议表明，与自然光更接近的产品具有相似差异，但是平均光谱差异 ASD 度量考虑了指示范围内的所有波长（266 个值与 99 个值相比），提出了一个更全面和科学可信的独立于人类观察变量的度量。

Evaluation Metric		Natural Light	Thrive	80 CRI	90 CRI	98 CRI	Competitive HCL Product
Average Spectral Difference (ASD)		0%	9%	28%	20%	18%	14%
CRI	$R_a$	100	98	83	92	98	96
	Minimum R1-R15 Value	100	92	7	79	83	84
TM-30	$R_f$	100	98	84	91	94	93
	$R_g$	100	101	93	97	102	103
	TM30 Fidelity Samples $\geq 92$	99	97	17	46	74	69
	TM30 Fidelity Samples $< 90$	0	0	70	41	13	16
Circadian Rhythm Metrics	MR $\Delta$ Natural Light	0.0%	-0.8%	-7.1%	-9.1%	-3.0%	-8.3%
	CAF $\Delta$ Natural Light	0.0%	-2.1%	-7.7%	-11.9%	-1.9%	-5.6%
	CS $\Delta$ Natural Light	0.0%	-0.9%	-2.4%	-3.9%	0.0%	-3.0%

表 5: 3000K LED 光源与自然光综合光照质量评估数值的比较

通过对这一客观得分的比较，用户可以评估 Bridgelux Thrive™ LED，它在可见光光谱范围内提供了优于其他 LED 光源光谱能量分布的匹配的 LED 自然光源，不存在一些竞争者产品中发现的紫光增强效应（增加比蓝光波长更短的紫光，而此波段对人眼伤害存在很多争议）。

## 关于 Bridgelux

### 光和生活的媒介

Bridgelux 是 LED 芯片，LED 照明光源、解决方案研发和制造的行业领导者，引领 LED 照明行业迈向新的照明时代即人本照明、携手照明公司以及个人探索和体验 LED 照明的无限可能。Bridgelux 的产品和解决方案源自世界一流的工程技术，秉持以人为本的设计理念，使客户能够为商业、工业和户外照明市场提供高性能、人本照明的 LED 光源产品以及照明方案。有关 Bridgelux 的更多信息,请访问公司网站 [www.bridgelux.com](http://www.bridgelux.com) .