

实验十三 物体色度值的测量

研究光源或经光源照射后物体透、反射颜色的学科称为色度学。这是一门有着广泛应用的学科，目的是对人眼能观察到的颜色进行定量的测量。无论是在纺织、印染、印刷、染料、涂料、塑料、食品、油漆、建筑等行业，还是在计量、医学、电视、电影、照相、环境美化、交通信号、产品鉴定以及遥感、信息处理和空间光学等各个领域，都离不开对颜色的测量和研究。

色度学本身涉及到物理、生理及心理等领域的知识，是一门交叉性很强的边缘学科。为了把“颜色”这个经过生理及心理等因素加工后的生物物理量变换到客观的纯物理量，从而能使用光学仪器对色光进行测量，以消除那些因人而异，含混不清的颜色表达方式，需要经过大量的科学实验，将感性认识上升到理性阶段，再去指导人们对颜色的正确测量。

【实验目的】

1. 了解并掌握测色原理；
2. 了解 1931CIE xy 色度图的作用；
3. 计算滤色镜的色度值。

【实验原理】

1. 色度学的两个实验结论

通过大量的有关人眼对颜色的实验，可总结出两个基本的实验事实：一个事实是三原色合成法则，即任何颜色都能用不多于三种的合适的单色光按一定比例混合得到，这三种色光被称为三原色。这三种单色光一般选取 R（红）、G（绿）、B（蓝）三色；第二个事实是颜色的加法法则，即在一定的观察条件下，颜色的混合满足简单相加关系，而这个一定的观察条件是相当宽的，一般的应用中都能够满足。

在很多地方我们都可看到这两个法则的运用。最直接的，大家贴近仔细地瞧正在发光地的电脑显示屏或电视机显示屏，就可看到白色的屏，是由红、绿、蓝三种颜色的小发光点或条组成的。

2. 颜色三刺激值和色度空间

国际照明委员会（简称 CIE）规定 R、G、B 三原色的波长分别为 700 nm、546.1 nm 和 435.8 nm。在颜色的匹配实验（所谓匹配，就是用三原色去凑到与待测的色光一致）中发现，当这三原色光的相对亮度比例为 1.0000：4.5907：0.0601 时就能匹配出等能白光。所以 CIE 选取这一比例作为红、绿、蓝三原色的各自单位量，分别记为 (R)、(G)、(B)，即当颜色为等能白光时 (R)：(G)：(B)=1：1：1。显然，当 (R)、(G)、(B) 不等份时，混合的结果为色光，颜色匹配可用颜色方程表示

$$C = R(R) + G(G) + B(B) \quad (1)$$

式中 C 表示待配色光，(R)、(G)、(B) 代表产生混合色的红、绿、蓝三原色的单位

量。R、G、B 分别为匹配待配色所需要的红、绿、蓝三原色单位量的份数，这个份数被称为颜色刺激值，相当于色光 C 中的权重。

按照颜色的加法法则，权重的比例不变，颜色就不变，但总的光能可以变化，所以 C 的数值大小表示了亮度。很明显，当红、绿、蓝三原色单位量已定的条件下，对某一色光来说 R、G、B 的各份量大小是唯一确定的，所以我们可以用 R、G、B 构成一个色度空间，而 C 是色度空间的一个点。又因为红、绿、蓝三原色的单位化只是一个比例关系，可相差一个比例常数，所以 C 的坐标不用 R、G、B 直接表示，而是用在总量中占的比例，即 R、G、B 的相对大小来表示。

3. 光谱三刺激值和 1931CIE-XYZ 标准色度系统

如果取色光 C 为单一波长的光，那么匹配所得到的份数就是这个单色光的刺激值。如果 C 的波长遍及可见光范围，则可得到刺激值按波长的变化，这个变化称为光谱三刺激值。它反映了人眼对光~色转换按波长变化的规律，这是颜色定量测量的基础。这相当于眼睛有三个独立的探测通道，每一个通道的光谱灵敏度即光谱响应就是光谱三刺激值。显然，为了得到正确的光谱三刺激值，每一被测波长光的光强必须相等。

CIE-RGB 光谱三刺激值是以 317 位正常视觉者，用 CIE 规定的红、绿、蓝三原色光，对等能光谱色从 380 nm 到 780 nm 所进行的专门性颜色混合匹配实验得到的。实验时，匹配到光谱中某个一波长为等能光谱色时所需要的红、绿、蓝三原色数量，称为 CIE-RGB 光谱三刺激值，记为 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$ 。它是 CIE 在对等能光谱色进行匹配时用来表示红、绿、蓝三原色的专用符号。因此，匹配某波长 λ 的等能光谱色 C (λ) 的颜色方程为

$$C(\lambda) = \bar{r}(\lambda)(R) + \bar{g}(\lambda)(G) + \bar{b}(\lambda)(B) \quad (2)$$

上面介绍的表色系统称为 1931CIE-RGB 真实三原色表色系统，但在实际应用中十分不便，因此 CIE 推荐了一个新的国际色度学系统—1931CIE-XYZ 系统，又称为 XYZ 国际坐标制。它是通过对 R、G、B 三刺激值进行坐标转换完成的。其转换关系如式 3 所示：

$$\begin{aligned} X &= 0.490R + 0.310G + 0.200B \\ Y &= 0.177R + 0.812G + 0.011B \\ Z &= 0.010G + 0.990B \end{aligned} \quad (3)$$

对应的光谱三刺激值记为 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 。其中 $\bar{y}(\lambda)$ 曲线被调整到恰好等于明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 。因而用 $\bar{y}(\lambda)$ 曲线还可以用来计算一个色光的亮度特性。 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 按波长的变化如图 1 所示。

明视觉光谱效率函数是指在明视觉条件下，用等能光谱色照射时，亮度随波长变化的相对关系，它反映了人眼对光的亮度感觉。式 (2) 中的 C (λ) 在数值上表示等能光谱色的相对亮度，就是 $V(\lambda)$ 。如图 2 所示，其中最大值为 C (555)。

4. 色度坐标

同样，在 XYZ 标准色度系统中，色度空间坐标也用三原色各自在 (X + Y + Z) 总量

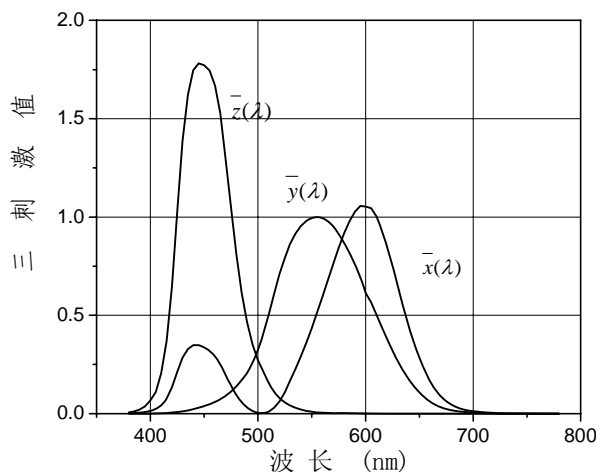


图1 CIE 1931 标准色度观察者光谱三刺激值

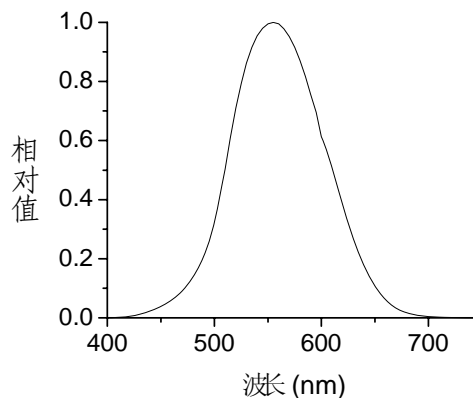


图2 明视觉光谱效率函数 $V(\lambda)$

中的相对比例来表示.

除颜色的明度可直接由 Y 表示外, 其余的三个色度坐标分别为

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z &= \frac{Z}{X+Y+Z} \end{aligned} \tag{4}$$

由于 $(x+y+z) = 1$, 故色度坐标一般只选用 x 、 y 即可.

5. 色度图

在颜色匹配实验中所得到的 R 、 G 、 B 的量值称为颜色三刺激值. 在 XYZ 标准色度系统中就是 X 、 Y 、 Z . 综上所述, 任何颜色光都可以被分解为三个对人眼的颜色刺激值 X 、 Y 、 Z . 因此, 包括光源颜色, 物体的透、反射颜色等等自然界所能观察到的任何颜色均能由 Y 、 x 、 y 这三个参数来表征, 其中 x 、 y 表示了色调、饱和度, 而 Y 表示了亮度.

把上述的规律归纳起来, 可以集中地表示在 1931CIE- xy 色度图中. 如图 3, 色度图的 x 坐标相当于红原色的比例, y 坐标相当于绿原色的比例. 因为 $z = 1 - (x + y)$, 则蓝原色的比例就无需给出. 图中的偏马蹄

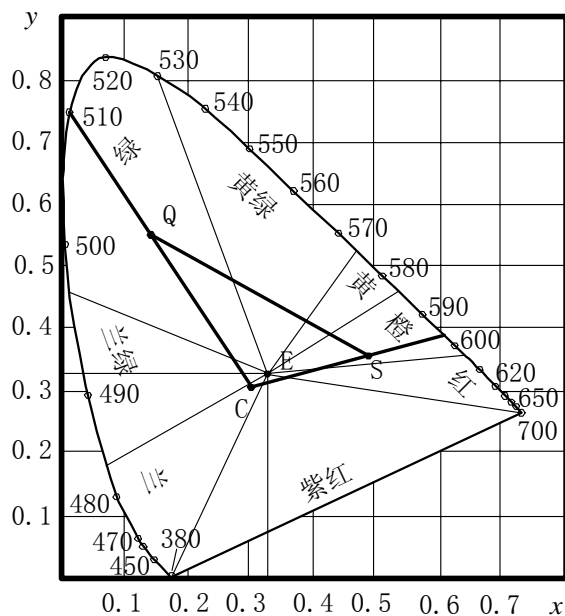


图3 1931CIE xy 色度图

形曲线是光谱轨迹. 连接 400 nm 和 700 nm 的直线是无法用单色可见光表示的紫红色, 它是由光谱两端的红和紫色混合后所得到的非光谱色. 凡是偏马蹄形曲线内部的所有坐标点 (包括这条封闭曲线本身) 都是物理上能够实现的颜色.

由于三原色的份量各占 1/3, 所以色度坐标为 $x = y = z = 0.33$ 的 E 点称为“等能白”. 这是一个假想的白光, 而用于颜色测量中的三个由 CIE 规定的标准光源 A、C、D 则分别位于 E 点的周围 (物体的颜色与照明光源有关).

例如颜色 Q 的坐标为: $x_Q = 0.16$ 、 $y_Q = 0.55$, 颜色 S 的坐标为: $x_S = 0.50$ 、 $y_S = 0.34$. 在用标准 C 光源照明时, 可由 C 点过 Q 作一直线至光谱轨迹相交处, 即得知颜色 Q 的主波长为 511.3 nm. 此处的光谱轨迹上的颜色就相当于颜色 Q 的色调 (绿色). 同理, 由 C 点经 S 点连线后交于光谱轨迹上, 又可得颜色 S 的主波长为 595 nm (橙色). 某一颜色离开 C 点接近光谱轨迹的程度表明此颜色的纯度, 即相当于它的饱和度. 愈靠近光谱轨迹处, 颜色的纯度愈高. QS 联线上将能得到此橙绿两种颜色相混合后的各种中间色. 过 C 点的直线交于光谱轨迹上两个交点, 系表示此两种颜色成互补关系. 即是说, 凡过 C 点所有直线的端点对应出的这两个颜色经适当混合后将会得到中性色.

6. 标准照明体 A 和标准光源 A

我们知道, 照明光源对物体的颜色影响很大. 不同的光源, 有着各自的光谱能量分布及颜色, 在它们的照射下物体表面呈现的颜色也随之变化. 为了统一对颜色的认识, 首先必须规定标准的照明光源. 因为光源的颜色与光源的色温密切相关, 所以 CIE 规定了标准照明体的色温标准, 其中常用的是标准照明体 A, 代表黑体在 2856K 发出的光 ($X_0 = 109.87$, $Y_0 = 100.00$, $Z_0 = 35.59$).

CIE 规定的标准照明体是指特定的光谱能量分布, 并不是一个物理上的光源. 为了实现 CIE 规定的标准照明体的要求, 还必须规定标准光源, 以具体实现标准照明体所要求的光谱能量分布. 对于标准照明体 A, CIE 推荐的标准光源 A 为色温为 2856 K 的充气螺旋钨丝灯, 其光色偏黄. 其光谱分布如图 4 所示.

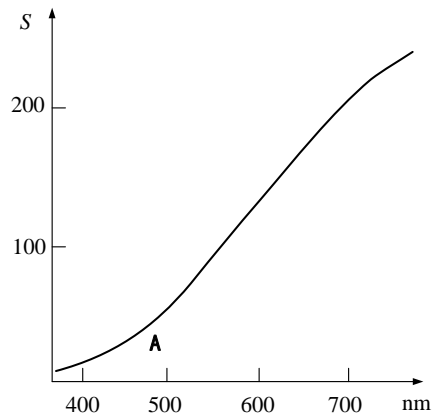


图 4 A 光源的功率分布

7. 光的色度学参数计算方法

前面已指出, 任何颜色光都可以被分解为三个对人眼的颜色刺激值 X、Y、Z. 所以颜色的测量就归结于如何计算 X、Y、Z. 而计算的基础就是人眼的光 ~ 色转换规律: 光谱三刺激值.

由于光谱三刺激值是在等能光谱色条件下测定的, 而要探测的光的光强按波长有强弱的变化, 必须对光谱刺激值按探测的光的光强变化乘上一个比例因子. 很容易想到, 这个比例因子就是被测光的光谱功率分布——光强与波长的关系. 又考虑到色光加法原理我们即可得出 X、Y、Z 的计算方法:

如果用 $S(\lambda)$ 表示某待测光源的相对光谱功率分布, 则该光源的三刺激值应为

$$\begin{aligned}
X &= k \int S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\
Y &= k \int S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\
Z &= k \int S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda
\end{aligned} \tag{5}$$

式中, 常数 $k = \frac{100}{\int S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}$, 称为调整因子, 它是将 Y 值调整为 100% 时得到的常数项. 光谱刺激值 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 可由查表得到. 所以只要测得 $S(\lambda)$ 就能计算 X、Y、Z, 进而根据式 (4) 求出色度坐标.

在实际计算时, 积分可用求和代替:

$$\begin{aligned}
X &= k \sum S(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\
Y &= k \sum S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\
Z &= k \sum S(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda
\end{aligned} \tag{6}$$

例: 已测量到被测光谱 $S(\lambda)$ 由两根线谱构成, 其波长为 500 nm, 600 nm, 光强比为 2:1, 线宽为 $\Delta\lambda = 1$ nm. 在此基础上加一滤色片, 此时测得的光强分别是原来的 1/4 和 1/2, 分别计算 Y, x, y, 并简单讨论.

由图 1 或附表可查得:

波长为 500 nm 的光谱三刺激为: $\bar{x}(\lambda) = 0.00$, $\bar{y}(\lambda) = 0.32$, $\bar{z}(\lambda) = 0.27$

波长为 600 nm 的光谱三刺激为: $\bar{x}(\lambda) = 1.05$, $\bar{y}(\lambda) = 0.61$, $\bar{z}(\lambda) = 0.00$

$$X = k(2 \times 0.00 + 1 \times 1.05) = 1.05k$$

$$Y = k(2 \times 0.32 + 1 \times 0.61) = 1.25k$$

$$Z = k(2 \times 0.27 + 1 \times 0.00) = 0.54k$$

$k = 100/1.25 = 80.0$, 所以有 $X = 84$, $Y = 100$, $Z = 43$, 这里 $Y = 100$, 其意义是把被测光当作光源看, 其相对亮度为 100%, 算出 $x = 0.38$, $y = 0.45$. 由图 4 可知其坐标点位于黄绿区, 而且近于 E 点, 偏白, 说明颜色的纯度不高, 虽然单根谱线的纯度为 100%

加入滤色片后

$$X = k(2 \times 1/4 \times 0.00 + 1 \times 1/2 \times 1.05) = 0.52k = 42$$

$$Y = k(2 \times 1/4 \times 0.32 + 1 \times 1/2 \times 0.61) = 0.46k = 37$$

$$Z = k(2 \times 1/4 \times 0.27 + 1 \times 1/2 \times 0.00) = 0.54k = 43$$

这里的 k 要用前面已算出的值, 由此可见, 由于滤色片的加入, $Y = 37\%$, 即其亮度减少了 63%, $x = 0.49$, $y = 0.42$. 由图 4 可知其坐标点由于滤色片的影响而偏向于红区.

对透射物体而言, 公式 (6) 中的 $S(\lambda)$ 项将包含两个内容: $S(\lambda) = S_N(\lambda)\tau(\lambda)$. 其中 $S_N(\lambda)$ 是透射某物体时所用光源的相对光谱功率分布, 常用的光源是标准 A 光源. 而透射率 $\tau(\lambda)$ 则

是表示在某个波长值下，出射光强与入射光强的比值，即

$\tau(\lambda) = \frac{E_o(\lambda)}{E_i(\lambda)}$ 。因此，对透视物体的颜色三刺激值有

$$\begin{aligned} X &= k \int S_A(\lambda) \tau(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int S_A(\lambda) \tau(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int S_A(\lambda) \tau(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (7)$$

同理，对反射物体也是相应处理，其实，我们关心的只是光的功率谱 $S(\lambda)$ 。至于如何得到它并不是色度学所关心的。

表 1 列出了 CIE 标准照明体 A（即：标准 A 光源）的相对功率谱和 CIE 1931 标准观察者光谱三刺激值 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 的加权值，以便于实验结果计算。

【实验仪器】

平面光栅单色仪、光电倍增管、标准 A 光源和 R、G、B 色滤色镜等。

【实验内容】

1. 画一张 1931CIE-xy 色度图，建议用 oringin 画这张图，画这张图时需要大量的数据，我们已经放在了选课网上（进入“实验预习”后选择本实验即可），是 excell 形式，很容易与 oringin 接口（也可参见附图 1）。

2. 安排合理的光路，测量 R、G、B 三色滤色镜的透过率 $\tau(\lambda)$ 。

3. 用实验室给出的标准 A 光源校准整个测量系统的光谱响应，在此基础上测量色光源的光谱。设标准 A 光源的光谱为 $S_A(\lambda)$ ，未知色光源的光谱为 $S_X(\lambda)$ ，测量系统的光谱响应为 $D(\lambda)$ ，对两个光源分别测量可得到： $A_1(\lambda) = D(\lambda) S_A(\lambda)$ ， $A_2(\lambda) = D(\lambda) S_X(\lambda)$ 。所以有：

$$S_X(\lambda) = \frac{A_2(\lambda)}{A_1(\lambda)} S_A(\lambda) \quad (8)$$

4. 作 R、G、B 三色滤色镜的透过率曲线和色光源的发光光谱曲线，计算色度值 Y、x、y，并在 1931CIE-xy 色度图上作图，求出主波长并讨论。

为保证实验精度， $\Delta\lambda$ 的取值不能太大，实验中可从 400 nm 开始，每隔 10 nm 读取一个数值，直至 750 nm 为止。在实验前，请仔细阅读有关实验仪器的使用说明。

【思考题】

1. 什么是光谱三刺激值？光谱三刺激值有什么意义？
2. 什么是颜色三刺激值？它与光谱三刺激值是什么关系？

【参考资料】

- [1] 崔唯编著. 色彩构成. 北京: 中国纺织出版社, 1996
- [2] 安宁编著. 色彩原理与色彩构成. 北京: 中国美术学院出版社, 1999
- [3] 汤顺青主编. 色度学. 北京: 北京理工大学出版社, 1990
- [4] 杜功顺编. 印刷色彩学. 印刷工业出版社, 1995

【附录】

CIE 标准照明体 A 与光谱三刺激值的加权值

($\lambda = 380-780 \text{ nm}$; $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$)

波长 $\lambda(\text{nm})$	$S_{A(\lambda)}\bar{x}(\lambda)$	$S_{A(\lambda)}\bar{y}(\lambda)$	$S_{A(\lambda)}\bar{z}(\lambda)$	波长 $\lambda(\text{nm})$	$S_{A(\lambda)}\bar{x}(\lambda)$	$S_{A(\lambda)}\bar{y}(\lambda)$	$S_{A(\lambda)}\bar{z}(\lambda)$
380	0.0006	0.0000	0.0029	580	4.8594	4.6139	0.0090
385	0.0011	0.0000	0.0053	585	5.3549	4.4668	0.0077
390	0.0024	0.0000	0.0113	590	5.7896	4.2704	0.0062
395	0.0047	0.0001	0.0224	595	6.1403	4.0379	0.0058
400	0.0097	0.0003	0.0463	600	6.3518	3.7733	0.0048
405	0.0174	0.0004	0.0825	605	6.4299	3.4855	0.0037
410	0.0356	0.0010	0.1699	610	6.3345	3.1780	0.0019
415	0.0694	0.0020	0.3319	615	6.0877	2.8622	0.0013
420	0.1308	0.0039	0.6283	620	5.6865	2.5358	0.0013
425	0.2269	0.0077	1.0974	625	5.1267	2.1901	0.0007
430	0.3246	0.0133	1.5840	630	4.4962	1.8523	0.0000
435	0.4055	0.0207	2.0036	635	3.8779	1.5529	0.0000
440	0.4632	0.0306	2.3236	640	3.2791	1.2812	0.0000
445	0.4976	0.0426	2.5484	645	2.7004	1.0344	0.0000
450	0.5155	0.0583	2.7173	650	2.1681	0.8183	0.0000
455	0.5230	0.0788	2.8621	655	1.7078	0.6372	0.0000
460	0.5097	0.1052	2.9254	660	1.3141	0.4861	0.0000
465	0.4690	0.1380	2.8539	665	0.9850	0.3625	0.0000
470	0.3882	0.1808	2.5581	670	0.7241	0.2651	0.0000
475	0.2998	0.2375	2.1979	675	0.5368	0.1958	0.0000
480	0.2138	0.3108	1.8179	680	0.4022	0.1461	0.0000
485	0.1372	0.4004	1.4575	685	0.2877	0.1041	0.0000
490	0.0799	0.5196	1.1322	690	0.2019	0.0729	0.0000
495	0.0387	0.6813	0.9608	695	0.1429	0.0515	0.0000
500	0.0136	0.8960	0.7545	700	0.1047	0.0377	0.0000
505	0.0070	1.1878	0.6191	705	0.0756	0.0271	0.0000
510	0.0285	1.5398	0.4843	710	0.0549	0.0199	0.0000
515	0.0934	1.9818	0.3585	715	0.0394	0.0144	0.0000
520	0.2127	2.3855	0.2627	720	0.0283	0.0097	0.0000
525	0.3849	2.7859	0.2012	725	0.0158	0.0069	0.0000
530	0.6069	3.1609	0.1547	730	0.0140	0.0050	0.0000
535	0.8631	3.4987	0.1140	735	0.0101	0.0041	0.0000
540	1.1567	3.7999	0.0809	740	0.0072	0.0031	0.0000
545	1.4904	4.0616	0.0555	745	0.0052	0.0021	0.0000
550	1.8660	4.2841	0.0375	750	0.0032	0.0010	0.0000
555	2.2887	4.4701	0.0255	755	0.0021	0.0010	0.0000
560	2.7550	4.6110	0.0181	760	0.0021	0.0010	0.0000
565	3.2564	4.6974	0.0130	765	0.0011	0.0000	0.0000
570	3.7853	4.7285	0.0101	770	0.0011	0.0000	0.0000
575	4.3259	4.7002	0.0092	775	0.0000	0.0000	0.0000
580	4.8594	4.6139	0.0090	780	0.0000	0.0000	0.0000
				总和: X, Y, Z x, y, z	109.8472 0.4476	100.0000 0.4074	35.5824 0.1450