



Fig. 33.1 Traditional Petzval lens form.

33.1 介绍

从第 25 章的作业“快速线性透镜 (Rapid Rectilinear)”起，设计一直从后组开始。当该步骤完成以后，通过添加一组完全一样的（不过是翻转的）前半部镜组，使得镜头关于光阑对称。后组受前组控制，同时还需要对对称镜头继续优化。在这一章中，我们将打破这一设计传统。本章的练习将设计一个 Petzval 肖像透镜（见图 33.1）。这不是一个对称镜头，它相当于是消色差标准透镜做前组和一个 Celor 型的后组镜头的结合，而光阑处于前后两组之间。

Petzval 透镜是行业竞赛的产物。那还是照相业的早期。在此之前，Chevalier 透镜（第 19 章）得到了普遍应用。由于镜头的 F 数较大，曝光时间长。在人像摄影时，如果曝光时间需要持续几秒钟，人们（尤其是小孩）会变得烦躁不安，结果由于景物移动影像会变得模糊。这难以满足客户的需求。新的行业需要有一种更快的镜头，于是有了这一场竞赛。Petzval 的设计为 $f/3.6$ ，比当时市面上的其他镜头快两倍。

33.2 近轴薄透镜的 Petzval 设计

首先，我们考虑 Petzval 的薄透镜型式，该结构由两个分离的正组元构成。一个关键特征是，每一个组元将边缘光线折转相同的数量，见图 33.2。此外，边缘光线在 ϕ_2 上的高度为其在 ϕ_1 上的一半，也就是 $y_2 = \frac{1}{2}y_1$ （想一下，中间位置也是类似的情况）。

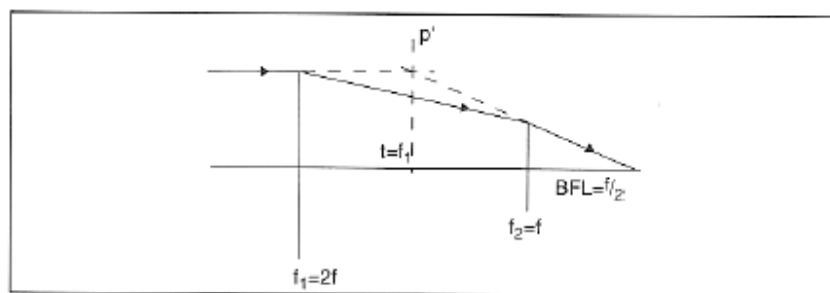


Fig. 33.2 Thin lens Petzval.

对于第一组元列出弯曲方程 (bending equation)：

$$u_1' = u_1 - y_1 \phi_1 \quad (33.1)$$

$$u_1' = -y_1 \phi_1 = u_2 \quad (33.2)$$

在第二个面上产生的弯曲为：

$$u_2' = u_2 - y_2 \phi_2 = 2u_1' \quad (33.3)$$

或者

$$\begin{aligned} 2u_2 &= u_2 - y_2\phi_2 \\ u_2 &= -y_2\phi_2 \end{aligned} \quad (33.4)$$

将 33.2 式代入 33.4 式可得：

$$y_1\phi_1 = y_2\phi_2 \quad (33.5)$$

或者

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{\phi_2}{\phi_1} = \frac{f_1}{f_2} \quad (33.6)$$

从 28.2 节可知：

$$\phi = \left(\frac{1}{y_1}\right)(y_1\phi_1 + y_2\phi_2) \quad (33.7)$$

将 33.5 代入 33.7 式：

$$\begin{aligned} \phi &= \left(\frac{1}{y_1}\right)(2y_1\phi_1) \\ \phi &= 2\phi_1 \end{aligned} \quad (33.8)$$

或者

$$\phi_1 = \frac{1}{2}\phi \quad (33.9)$$

或者

$$f_1 = 2f \quad (33.10)$$

这样前组的焦距就是整个系统焦距的两倍。

让我们回到式 33.6，将第二个组元的高度 y 的约束代入：

$$\begin{aligned} \frac{y_1}{\left(\frac{y_1}{2}\right)} &= \frac{f_1}{f_2} \\ f_2 &= \frac{f_1}{2} \end{aligned} \quad (33.11)$$

将式 33.10 代入，可得：

$$f_2 = f \quad (33.12)$$

后组的焦距等于整个系统的焦距。

现在我们需要计算出前后两组之间的间隔。我们需要用到第 4.6.2 节的式 4.18：

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 - t\phi_1\phi_2 \quad (33.13)$$

结合式 33.9：

$$\phi = \frac{1}{2}\phi + \phi_2 \left(1 - \frac{1}{2}t\phi\right) \quad (33.14)$$

可得 ϕ_2 :

$$\phi_2 = \frac{\phi}{2} \left[1 - \left(\frac{t\phi}{2} \right) \right]$$

$$\phi_2 = \frac{\phi}{2 - t\phi}$$
(33.15)

将式 33.15 改写成焦距形式:

$$f_2 = 2f - t$$
(33.16)

通过式 33.12 可得 t:

$$t = f$$
(33.17)

两组间隔等于系统焦距。

通过传递方程 (Transfer Equation) 可得 BFL:

$$y_3 = y_2 + u_2' t_{BFL} = 0$$

$$t_{BFL} = \frac{-y_2}{u_2'}$$
(33.18)

而由式 33.2 和式 33.3 有 $u_2' = 2u_2$, 则:

$$t_{BFL} = \frac{-y_2}{2u_2}$$
(33.19)

将式 33.4 代入可得:

$$t_{BFL} = \frac{-y_2}{2(-y_2\phi_2)} = \frac{1}{2\phi_2}$$
(33.20)

结合式 33.12 可得:

$$t_{BFL} = \frac{1}{2}f = BFL$$
(33.21)

后截距为系统焦距的一半。

33.3 Zemax 中 Petzval 设计过程概述

我们假设前半部已经是消色差的。这意味着, 在优化过程中前半部消色差系统中不设置变量, 这是一个关键。我们的主要任务是进行后组的设计, 从而使得整体系统的所有球差都减小。

既然我们知道了前部消色差系统的焦距, 我们也就知道后组的焦距为其一半。我们能够使用 Celor 方程 (28.5 节) 来确定后组中两个光学元件的光焦度和其间隔。薄透镜的曲率半径能够由其光焦度计算出来 (在一开始, 我们假设透镜都是等凸或者等凹的)。在上述计算中有些地方需要注意。如果在 celor 光焦度方程中 ϕ_p 为零, 我们会发现练习中计算出的曲率半径会很小。另一种方法是给定 ϕ_p 一个有限值。但是给定多少为好呢? 在任何情况下, 可以将后组光焦度的一倍至五倍作为其值。曲率半径将会放松而且透镜间距将会增大。

慎重起见, 可以依然使用 ϕ_p 为零时得到的曲率半径。将这些值输入 Zemax, 加上实际的玻璃厚度。将曲率半径和空气间隔作为变量来优化使之达到合适的

EFL 和色差校正。你将会发现球差变得很大。你可以通过通过轴上 TRAC (on-axis TRAC) 来减小它，但是需要使得空气间隔不作为变量。此时，后组已经可以和前组整合在一起了。

这里有两个重要的约束条件。第一，光阑必须处于两组透镜正中。这可以通过设置光阑到后组的空气间隔随着前组到光阑的空气间隔变化。第二，系统焦距与后截距之比为 2。用 TTHI 得到 BFL 的值。使用 DIVI 获得 EFL 和 TTHI 的比值。

DIVI 的目标值应该为 2。

此时组装好的镜头应该满足一阶 Petzval 条件 (first order Petzval conditions)。设置所有后组的曲率半径和前组到光阑的距离为变量。使用 EFLY 来保持后组焦距为其设计值。使用 AXCL 来恢复色差校正。

在以上的优化后，采用 TRAC 来减小和平衡各阶球差。设置所有后组半径和前组到光阑距离为变量。

接下来的是一系列关于视场逐渐增加的优化。如果一次性增加到全部要求的视场，你往往会被警告说某个操作数无法计算。将一次性操作分作几步来达到视场要求可以避免这个问题。（不要忘记，视场每次变化后需要更新 TRAC。）

最后进行的优化主要是整理一下设计。如果后组的正透镜看上去比较厚，那么可以减薄它。可以将后组的负透镜的直径与正透镜设置成一样。你可以插入一个虚拟像面并且设置其厚度为变量来观察有什么不同。最终的设计应该看起来和图 33.1 相似。最后整个镜头将有一个较平的弧矢区，但是相当一部分区域在有色差的前组损失掉了 (The resulting lens will probably have a fairly flat sagittal field, but considerable ground will have been lost on the color front)。这是主要是由于第二个约束条件造成的。如果将后组的 EFLY 和 DIVI 操作数关掉重新优化的话，色差校正会改变，RMS 尺寸也会有所改善。尽管看上去依然像是 Petzval 结构，但你会发现 BFL 变得与前后两组间距相同甚至更大，而且，后组焦距再也不是 5”了。

33.4 历史背景注释：Joseph M. Petzval

Petzval (图 33.3) 于 1807 年生于匈牙利。在布达佩斯大学过了两年拮据的数学教授生活后，他搬到了后来一直生活的维也纳大学，并在那里找到了一份一样的差事。奇怪的是，当同事告诉他关于快速镜头设计大奖时 Petzval 竟一点也不懂得镜头设计。但是 Petzval 依然勇敢的参加了比赛。不过他得到了奥地利军方的帮助。为了应付繁冗的轨迹追迹，军方招募曾经为炮兵计算弹道轨迹的人来协助 Petzval 完成这项工作。这项令人满意的设计总共花费了他们六个多月的时间。1840 年，镜头制造完成并进行了测试，它得到了高分。但是铂金奖章却给了 Chevalier，它的另一款镜头获得了大奖。具有讽刺意味的是，通过自然的优胜劣汰，到目前为止肖像摄影师却依然偏爱 Petzval 的镜头，这样 Chevalier 的新镜头逐渐消失了。这是好消息，不过也有不好的消息：Petzval 失去了对其新镜头的权益的控制。很快，每个人都开始制造 Petzval 镜头而没有酬谢它的发明者。



Fig. 33.3 Joseph M. Petzval, inventor of the Petzval portrait lens.

33.5 成像质量 IV

在光学设计中有一种成像质量评估的经验法则：当像差较小时，采用衍射预测来预估成像质量；但是，当像差很大时，采用几何预测。这是合理的，但是，多小才是“小”呢？让我们探究一下这个问题。对于一个无像差光学成像系统，几何光学的预测结果是一个点像，如图 33.4a。对于同样的系统，衍射光学的预测结果是一个叫做 Airy 斑的对称斑点（假设出瞳是圆形的），如图 33.4b 所示。但是对于这两种方法，最佳像面的位置是相同的——近轴平面（paraxial plane）。如果我们朝任意方向移动像面，成像质量将会恶化。

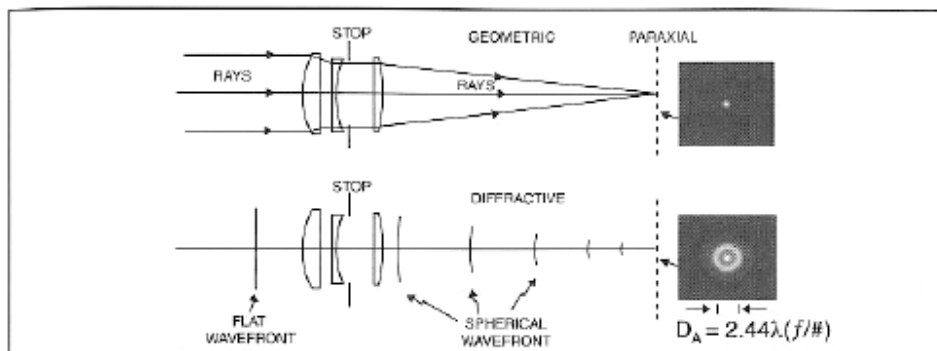


Fig. 33.4 Best image location for an unaberrated imaging system is the paraxial plane: **a.** geometric; **b.** diffractive.

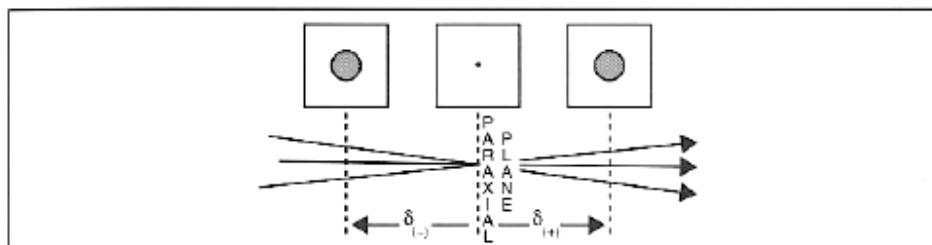


Fig. 33.5 Geometric blur diameter increases symmetrically about paraxial focus (No aberration).

从几何学的角度，当它远离近轴平面时模糊斑直径将逐渐增大，如图 33.5 所示。回到图 32.4 可以看到衍射像也将会增大。

现在使我们的成像系统存在像差。我们将对球差进行实验。现在最佳像面不再是近轴平面了，而像斑，不管是几何的还是衍射的，也将不再对称。图 33.6 给出了几何像的例子，图 33.7 给出了衍射像的例子。

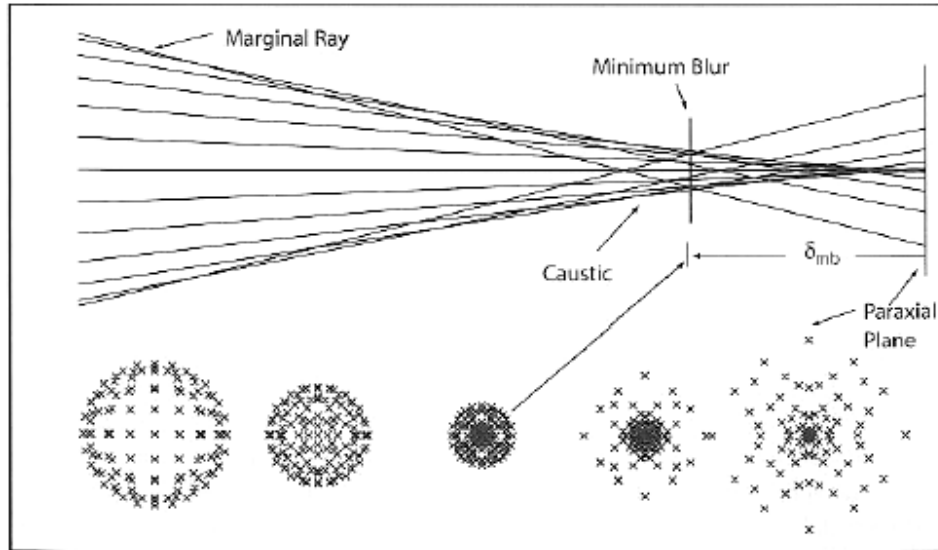


Fig. 33.6 Spherically aberrated imaging system showing non-symmetric spot diagrams about paraxial focus.

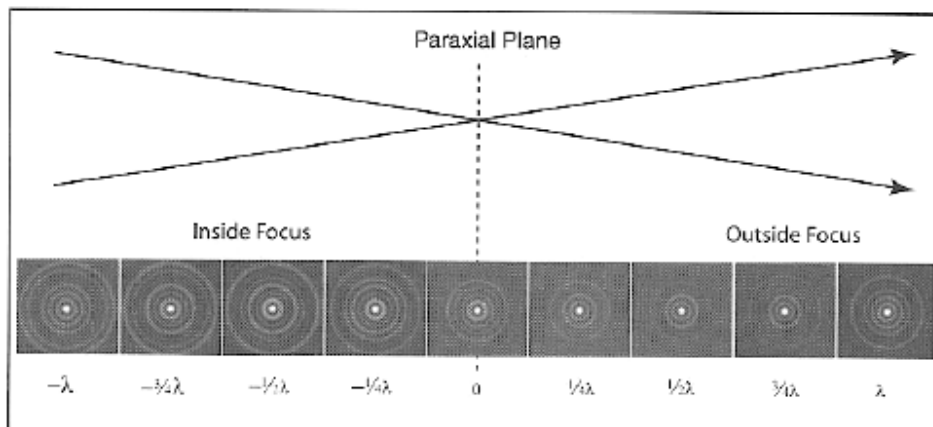


Fig. 33.7 Spherically aberrated imaging system showing non-symmetric point spread functions about paraxial focus.

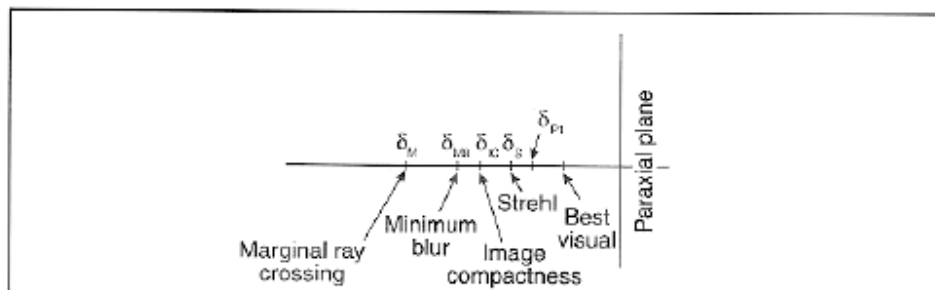


Fig. 33.8 Relative location of best image planes for spherically aberrated (3λ) system.

现在系统存在球差，那么最佳像面在近轴焦点的什么位置？这取决于所用的像质评价标准（几何的或者衍射的），如表 33.1 和图 33.8 所示。

我们讨论一下表 33.1 前三个像质标准，后两个将简略谈之。第一个峰是从轴上强度图得到的，该图可以由理论或者经验法则得到。最直观的是依靠主观或者经验。观察者通过显微镜观察星点像，并且设置焦点于最接近 Airy 斑的位置。观察者必须使得衍射环最少，使得第一暗环尽量暗，使得第一亮环的功率最小。

这里观察的范围是 $\lambda/2$ 到 3λ ，这能够包含我们所感兴趣的过渡区域。这里的数据是用和 10.3 节同样的单透镜得到的。在现在的情形下，平的一面对准 HeNe 校准光束。球差总量由透镜前的虹膜光阑控制。表 33.2 列出了前三个标准的光阑尺寸和轴向位置。

Table 33.1 Best Image Plane Criteria.	
Criteria	Axial Location
1) Minimum Blur (MB)	$\delta_{MB} = 8(f/\#)^2 \left[-\frac{3}{2} W_{040} \right]$
2) Image Compactness (IC)	$\delta_{IC} = 8(f/\#)^2 \left[-\frac{4}{3} W_{040} \right]$
3) Strehl (S)	$\delta_S = 8(f/\#)^2 [-W_{040}]$
4) 1 st Peak (P ₁)	(Via axial intensity plots)
5) Best Visual (BV)	$\delta_{BV} = 8(f/\#)^2 [-0.531 W_{040}]$ (empirical)

Table 33.2 Spherical aberration, stop size, and axial displacement.					
W_{040}	Stop Radius	$f/\#$	δ_{MB}	δ_{IC}	δ_S
$\lambda/2$	1.310 cm	18.72	-1.330mm	-1.831mm	-0.887mm
λ	1.558	15.74	-1.881	-1.672	-1.245
2λ	1.853	13.24	-2.662	-2.367	-1.775
3λ	2.051	11.96	-3.258	-2.896	-2.172

节 32.2.1 中无像差系统的轴向亮度图是一个 **sinc-squared** 函数。现在看看图 33.9，它的左下方是球差值从一半波长到三倍波长的理论轴向强度图（这些图的比例尺相同）。在一半波长时，图形看上去依然像 **sinc-squarish**，但是中心亮斑向近轴焦点左侧漂移。当像差增加时，这种偏移随之增加，像的形状剧烈变化（尽管按照 $W_d = -W_{040}$ 亮斑依然是轴对称的）。理论和经验上都曾证明相对于近轴平面第一个完整的轴向强度峰值（P₁）处于最佳像面位置。（此时，最佳像最接近于 Airy 像。）

在图 33.9 中每个轴向图的右侧是扫视最佳像面处的点扩散函数得到的实验情况下的辐射亮度，该最佳像面是由表 33.1 和 33.2 中各种标准定义的。当一半波长时，S 和 P₁ 代表的曲线是一致的，并且类似于 Airy 像（At a half wave, S and P₁ are Airy-like, and are actually coincident）。当一个波长时，S 和 P₁ 依然类似于 Airy 像（Airy-like）而且两者一致。然而，超过一个波长后，这两个面开始明显的分开了，并且只有 P₁ 保持 Airy 像形状（Airy-like form）。平面 P₁ 一直包含各标准中的

最大峰值。BV 始终保持 **Airy 像形状 (Airy-like form)**，但是其峰值强度总是小于 P_1 。几何标准 IC 和 MB 和初始情况相比有了很大的变化。

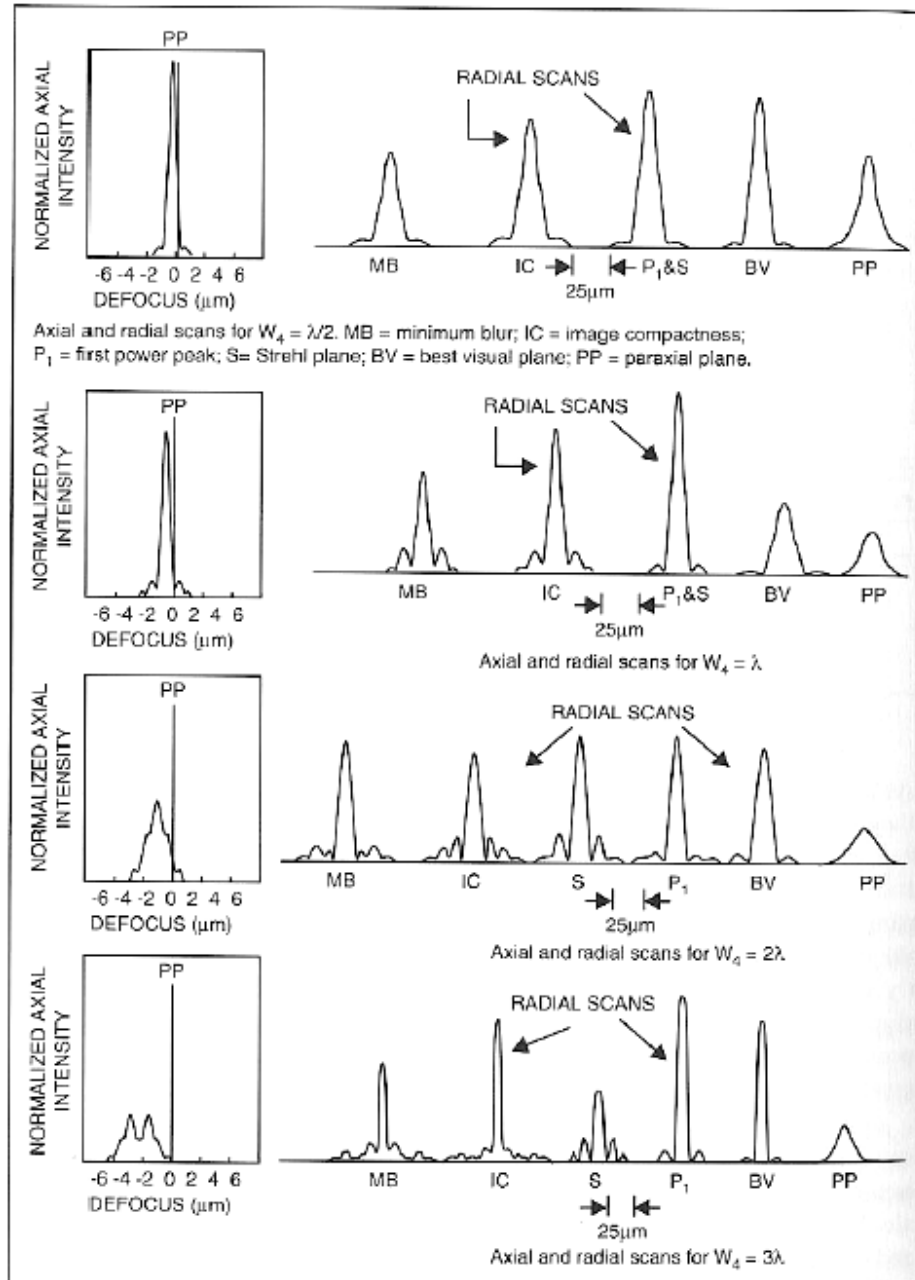


Fig. 33.9 Theoretical axial intensity scans (left column), and measured radial intensity scans at various criteria planes for best image for various amounts of spherical aberration. For the axial profiles the abscissa values are given in terms of exit pupil OPD in microns. Peterson, P. and Geary, J. "Intermediate Spherical Aberration," *Optical Engineering*, pp. 1232-1240, Vol. 25, No. 11 (1986).

经验法则的前一半适用于一个波长以外的衍射 **Strehl 标准 (The first half of the rule-of-thumb does apply to the diffractive Strehl criteria out to one wave)**。后半关于大像差的经验法则不能用于几何标准 IC 或者 MB。这两种方法都不能解出最佳像面。在上述方法中得到的最可能的最佳像面是 P_1 (通过扫视轴上强度得到)。

不论在大像差还是小像差的情况下，P1 都可以得到最佳星点像。因此，经验法则实际对 P1 标准根本不起作用。

33.6 作业

Table 33.3 Front achromat				
Surf. no.	Radius	Thick.	Glass	Semi-Diam
1	2.971"	0.5"	K7	1.15"
2	-2.971"	0.12"	LF7	1.15"
3	10.3491"			1.15"

Table 33.4			
Strict Petzval		Relaxed Petzval	
Target Spot Sizes		Target Spot Sizes	
$\bar{U}$	RMS	$\bar{U}$	RMS
0°	28	0°	21
7°	78	7°	37
10°	125	10°	47

设计一个 5"EFL, f/5 的 Petzval 镜头，其半视场角为 10°。使用 Celor 方程来确定后组元件的光焦度。后组的材料分别为 LF7 和 K7。要求使得 $\Phi_{pz} = 0$ 。光阑必须处于前后两组间隔的中间位置。此外，EFL 与 BFL 的比必须为 2。在整合前后两组的初始状态时，设置前后两组间隔为 4.4"。

在此作业中，没有必要设计前组的消色差透镜。消色差透镜为一个 10"EFL, f/4.35 的透镜（参数已列于表 33.3）。该透镜对 F, d, C 光进行了色差校正，所以后组必须对同样的光谱范围进行校正。

在按照严格条件设计后，解除约束（例如关闭 EFLY 和 DIVI），然后再进行优化。

一般将 RMS 尺寸处理得与在表 33.4 列出的尺寸差不多。在此处采用如下设置：square, centriod。

建议文件夹命名为：Petzval；文件命名为：Petz1o1b 等等。

说明：

1. 本文原著 Joseph M.Geary，由光电论坛网友自发组织翻译，仅供学习参考之用；
2. 尽管译者已尽心校对，仔细斟酌，但由于水平所限，错误在所难免，因此仅供大家参考，如果有疑问请对照原文，同时欢迎大家批评指正；
3. 本文顺序与原文基本一致，在个别句子中，为了更符合汉语习惯对语序有所调整，但意思应该是一样的；
4. 参与翻译的网友较多，每个人对同一单词的翻译不尽相同，因此希望大家能对一些常用词的统一翻译给些意见。
5. 文中有一些用红色标出的句子为翻译时可能翻错的句子，希望能有高人指点。