

天文望远镜用的场校正器

1. 绪 言

大多数大型天文望远镜都可以做成各种观测样式变焦距形式。目前使用的多数望远镜是 Newtonian—Cassegrain 式的，插入二次双曲面镜，或用在抛物面镜的主焦点，或用在主镜后形成的 Cassegrain 或 Coudé 焦点处。最近正在制造的 Ritchey—Chrétien 望远镜具有相同的主要结构，但反射镜的形状不同。未校正的慧差，特别是在主焦点时，限制了 Newtonian—Cassegrain 望远镜的有效视场。此外，Ritchey—Chrétien 主焦点受到球差的影响，它的次焦点处的球差和慧差得到校正，但象散的存在，其视场范围受到限制。本文主要讨论辅助光学系统。这些辅助光学系统可以插入这种望远镜里，以便对较大视场给出良好的象差校正。本文所涉及的望远镜主要是 Newtonian—Cassegrain 或是 Ritchey—Chrétien，因此不同校正板时，可用这些系统。此文不与论述特殊目的望远镜，即那种象 Schmid 相机一样，设计成在单一焦点位置处给出高分辨扩大视场。但这种差别并不是完全截然分开的，因有一中间区域。对于那种要求其反射镜与 Ritchey—Chrétien 式稍有区别的望远镜的次焦点，已经提议了一些光学系统，目前至少已制造了一种；结果是，当移去校正板时，次焦点通常会遭受慧差的影响。与非更改的 Newtonian—Cassegrain Ritchey—Chrétien 系统一起工作的理想校正板是从需要改变反射镜形状的设计逐渐发展来的。本文包括如此系统。

2. 牛顿(Newtonian)望远镜的校正板

Newtonian—Cassegrain 望远镜或同样基于旋转圆锥面焦点性能的任何系统都具有完全的轴上象差校正。对于轴外成像，初级慧差恰当地描述了口径和视场角的实际有用范围的性能，同时在这些系统中离轴 α 角、张角为 $d\alpha$ 的慧差光斑，其关系式为， $d\alpha/u = \frac{3}{4}u^2$ ，其中 u 是半孔径角。因此，在孔径角最大的主焦点处，慧差最为严重。旧式的抛物面望远镜（例如 Mount Wilson 的 100 英寸望远镜）的主焦距比为 $f/5$ ，如果容许的最大慧差扩展量取为 1 弧秒（接近于大气观察的限制范围），则有效视场角扩大到离轴 2.3 弧分。根据望远镜往较小型发展的趋势（孔径角比较大），视场迅速缩小。对于牛顿望远镜，在 $f/3$ 时，离轴 0.8 弧分，慧差达到 1 弧秒。因此，对于简单的抛物面，视场很小。

Sampson 最早建议，扩大牛顿望远镜的良好分辨率的视场（他较早地考虑了广视场卡一式系统，下面将谈到）。对于 Newtonian 焦点，Sampson 研究了在反射镜和焦点之间的会聚光中采用一透镜系统，离后者足够近以便允许透镜在大型望远镜上有切实可行的尺寸。他采用一间隔很小的三个薄透镜系统，此系统几乎是远焦的并且所有透镜都是同类玻璃，因此能校正两种初级色差并能消除二级光谱效应。另外，在弧矢和正切焦点之间的他所说的平均视场，Sampson 考虑了慧差和视场平度的校正。Sampson 发现，尽管他选择了间隔很小的透镜、抛物面主镜和

比较合适的小表面曲率的透镜，但也不可能校正所有这些象差。于是，他建议主镜不应是抛物面形的，对于引用的设计方案镜子的形状与抛物面截然不同，就象抛物面区别于球面那样。

2.1 Ross 校正板

实际上，Ross首先为Newtonian望远镜制作了第一块场校正板。在第二篇文章里，Ross谈到了Sampson的关于Cassegrain焦点校正板的工作，而不是牛顿校正板。

Ross首先考虑了一正一负的双透镜。对于这种系统，薄透镜理论说明：若两个透镜接触才能同时校正位置色差和倍率色差。按照Sampson的办法，Ross也选择了一个远焦系统，因此在每片透镜都采用同牌号玻璃的情况下，就能消除二级光谱。Ross假设，主抛物镜的场曲和象散可被忽略，同时根据薄透镜像差理论他指出：如果一远焦的球面密合双透镜的两片透镜弯曲到如此形状，即对于主镜的光阑，初级象差为零而且主镜的慧差被消除，于是双透镜就产生球差和畸变，其数值只取决于双透镜在聚光束中的位置。如果主镜到双透镜的距离是 DF ，其中 F 是主镜的焦距；在Ross的条件下，双透镜产生的球差是 $4S(1-D)/D$ ，式中 S 是相当于主反射镜由球面到抛物面的这一非球面化时的球差，球面与抛物面两者在其顶点相密切。Ross指出，对于球面透镜，这种球差与这两个透镜元件的光焦度（相等的和相反的）无关，与制作透镜的玻璃的折射率也无关；但他相信，使用一个非球面透镜面就可消除球差。Wynne已经指出，对于一给定的慧差和象散校正，不管是使用球面还是非球面，不管远焦系统是由多少个接触的薄透镜组成，其球差具有相同的数值。若把一个远焦系统设计成既能校正主镜的象散又能校正慧差的系统，那么根据 $4S(1-D)/D^2$ 公式，球差稍微增大。

当间隔 D 接近1时，即校正板靠近反射

镜的焦点时，由校正板造成的球差就减少。校正板还会产生随着 D 增大而增加的畸变，通常这并不重要。校正板放在离焦点多远有一个极限值，因为当 D 接近1时，给出所要求校正象差的透镜的表面曲率变得较大，于是较高级象差变得重要了，这些限制了有效视场的大小；Ross选择0.95为 D 的折衷值。采用光线追迹，对第一阶段的薄透镜设计作某些修改，获得最终设计，其中初级象差被高级象差所平衡，并且透镜有必要的有限厚度和间隔。

Ross最早认为，对于星体光度测定和天文测量只允许很少量的球差（对称地扩大星点象），于是Sampson建议改变主镜形状就能消除其校正板产生的球差。Ross设计并制作了若干个双透镜校正板，他在60吋的 $f/5$ Moust Wilson望远镜上使用了其中一种校正板，用它摄制了一些照片，其视场约为50弧分。当 D 为0.95时，这种情况的球差相当于约为2.8弧秒的最佳平均焦点时的像的角分布。在一个 $f/3.3$ 的抛物面上，具有相同的 D 值时，像分布约为10弧秒。这些双透镜校正板还没有得到广泛使用，大概是由于这种球差的原故。

Ross后来为Newtonian望远镜设计了另一种形式校正板，包含一个凹向主镜的眉月形透镜，其后有一双透镜（图1）。Ross制作了好几个这种系统，但没有公布任何说明。温(Wynne)于1956年公布了Ross为Palomar天文台200吋 $f/3.3$ 望远镜做的三片校正板的数据。这就给出了良好的球差校正并且知道在离轴10弧分处405至656毫微米的光谱域内慧差象扩散约为4弧秒。Ross还设

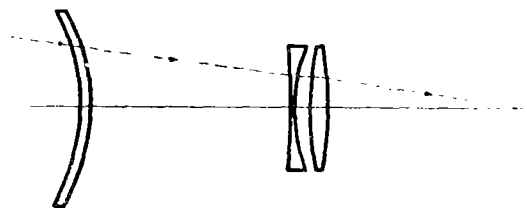


图1 Ross为Palomar天文台200吋望远镜设计的三元校正板的截面图

计了很大负光焦度的校正板以缩小主焦点处的数字孔径以及校正慧差。这就必须采用不同色散的玻璃，于是就造成某些二级光谱象差。

Paul (1935) 在一篇文章中讨论了各种望远镜系统，这种系统具有良好成像的扩大视场。在这篇文章中谈到了 Ross 双透镜校正板的处理问题。他把 Sampson 的建议付诸于实现，即改变主镜形状就能校正校正板透镜的球差；他指出，在与 Ritchey—Chretien 望远镜的主镜相同方向，反射镜面的形状偏离抛物面，因此双透镜校正板在 Ritchey—Chretien 主镜上是有用的。这种可能性直到现在还没被引起注意，见 3.2 节。把主镜从抛物面适当地变成近似双曲面来校正 Ross 双透镜校正板的球差，这种观念再次由 Rossin (1961) 提出，而这时作者把它看作是从 Baker 校正板 (2.2 节中讨论的) 发展而来的。

2.2 Baker 校正板

Baker 对 Ross 的双透镜校正板做了进一步研制，于 1947 年为美国天文协会做了有关报告，几年后才发表。放在反射镜后 DF 处的一密合双透镜，把它设计用以校正反射镜对于前方光阑距离 DF 的慧差和象散。若光阑处于反射镜上，则双透镜引入更多的球差；如果给予双透镜一正光焦度，以致其 Petzval 场曲抵消反射镜的场曲，双透镜的球差就比远焦双透镜的球差大。但在光阑处加入一个适当非球面板就能校正这种球差，而且这并不影响系统的慧差、象散和场曲的校正。非球面板有一个与双透镜相配合的中心孔，非球面板和透镜装在一起，组成一校正器装置，此校正器装置与抛物面镜相组合以使抛物面镜变成一个扩大了平视场系统。不用此装置，抛物面镜可以单独使用。与 Schmidt 相机比较，这个系统的优点是有一个平的象面，并且整个长度很短。在 Schmidt 相机里，非球面板和反射镜之间的间隔是 $2F$ 时，要使系统在扩大视场中不受渐晕的影响，入射光瞳必须实际上小于镜子的

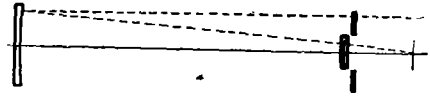


图 2 Baker 的抛物面校正器系统的截面图

直径。对于 Baker 校正器，校正板到反射镜的间隔约为 $0.8F$ ，虽然他的设计使离轴超过 1° 的斜光束出现渐晕，但这种影响仍被减少。适当地选择双透镜用的玻璃型号，就可能采用胶合的形式给出所需要的象差校正。Baker 文章中已经作了这样的事例，其相对孔径是 $f/4.5$ 。Baker 指出，对于 3° 的半角视场可用他的系统。因为双透镜具有有限的光焦度，玻璃有不同的色散，所以出现二级光谱。当 D 减小时，象质变坏，对于 Baker 的 D 为 0.8 的设计，这些影响很大，故系统只对很有限的光谱区域表现出高性能。设计成在 434 毫米给出最佳的结果，并且若在这个波长聚焦，离轴 2° 时在 405—486 毫米范围的几何象扩散大约为 2 弧秒而范围扩大到 588 毫米，约为 8 弧秒。如果系统在 588 毫米聚焦，那末对于 588—656 毫米，离轴 2° 时的象扩散大约为 5 弧秒。在离轴 3° 时，象扩散显著地变大。

已经制成了几台 Baker 校正器望远镜。其中最大的一台是 Cape 天文台的 Queen Elizabeth 望远镜，由 Sir Howard Grubb Parsons 和 Co. Ltd. 制造。它有一个直径为 39 吋的反射镜和一个 35 吋的非球面板。对于 137.8 吋的完整系统的一焦长，相对孔径比 Baker 的实例稍大；所复盖的视场 ($2^\circ \times 2^\circ$) 是比较小的。实际元件的设计很类似于 Baker 的样式。

温 (1949 年) 把 Baker 的校正器系统应用于较小视场角的设计。对于较大的 D 值 (约为 0.9)，二级光谱误差是比较小的，他给出一实例，在 $\pm 1^\circ$ 的无渐晕视场，对于 436—656 毫米的光谱域，象扩散在 1 弧秒以内。在这种情况下双透镜不是胶合的。温还提供了一些设计，其中非球面板放在镜子和

双透镜之间，并且这个板由一反射镜所取代，但这些安排很少适合于可变换的装置。

2.3. 非球面板校正器

在已经引证的长篇文章中，PAUL (1935) 讨论了把非球面板放在反射镜和焦点之间来校正牛顿望远镜的视场的可能性。他建议使用两块互相分离的非球面板来校正慧差和象散，指出，这些必定引出球差，认为用改变镜子形式的办法来校正球差。使用非球面板校正器的办法又被Meinel(1953)采纳，Meinel采用3块这样的板，而Paul使用了两块板和一块修琢反射镜。只讨论具有四次非球面度和初级像差的校正板，这样的校正板不会引出初级色差和场曲，因此用修琢的校正板不能校正抛物面镜的场曲。这就剩下4种初级象差：球差，慧差，象散和畸变。如果使用二块非球面板，我们得到四个有效参数

(抛物面的位置和其四阶非球面度系数)，那末在一个两块板系统中就可以校正四种初级象差。确实如此，但结果无用。结果是：一块板与抛物面镜重合，成为一个重程(double—Pass)，当第二块板处在反射镜曲率中心时，有效地把抛物面镜变成一个球面镜；该系统实际上成为一Schmidt相机，缺点是长而渐晕。若要减少渐晕，必要条件是：非球面板放在反射镜和其焦点间的会聚光束中。于是可看到：甚至于满足校正球差、慧差和象散的条件最少必须有三块板子（若需要校正畸变，就要有第四块板，但在天文仪器中这不是主要条件）。此外，对于一校正器系统，它的任何一个元件都不需要靠近反射镜，因为那会引起孔径的大中心遮拦。在考虑这样的非球面板校正器的过程中，Meinel指出，所有的元件在焦面前位于15%的焦长以内。这就对设计造成了一些约束。

根据Seidel理论可以推导出非球面板校正器的一些重要特性。以反射镜的焦长表示长度，反射镜的半角孔径是 u ，那末对于球差系数是 S 、放在离焦点 L 距离远的非球面

板来说，慧差系数是 SE ，象散是 SE^0 ，在那里

$$E = (1/L - 1)/u^2$$

对于位于系统孔径光阑处的抛物面镜，球差系数是零，慧差是 $-\frac{1}{2}u^2$ ，象散是1。与三块板有关的量用后缀予以标示，校正板的编号次序从反射镜开始，校正三种象差的条件是：

$$S_1 + S_2 + S_3 = 0,$$

$$S_1 E_1 + S_2 E_2 + S_3 E_3 = \frac{1}{2}u^2,$$

$$S_1 E_1^2 + S_2 E_2^2 + S_3 E_3^2 = -1$$

把， L_1 ， L_2 和 L_3 代入 E_1 ， E_2 ， E_3 得出

$$S_1 = \frac{1}{2}u^4 \frac{L_1^2(L_2 + L_3)}{(L_1 - L_3)(L_2 - L_1)};$$

$$S_1 E_1 = \frac{1}{2}u^2 \frac{L_1(1 - L_1)(L_2 + L_3)}{(L_1 - L_3)(L_2 - L_1)};$$

$$S_1 E_1^2 = \frac{1}{2} \frac{(1 - L_1)^2(L_2 + L_3)}{(L_1 - L_3)(L_2 - L_1)},$$

对应于其它两块板有相同的表达式。因此，对于 L_1 ， L_2 和 L_3 的任意选择值，可以计算三块板的4阶非球面度。因为 $1 > L_1 > L_2 > L_3$ ，所以在第一和第三块板的三种象差是负的，而在第二板是正的，于是与反射镜的慧差符号相反的第二板的慧差值 $S_2 E_2$ 一定比反射镜大。距焦面最近的第三块板不能靠近焦点太近，否则由于非球面性加大，而出现高级像差。Meinel建议，取 $L_1 = 0.15$ ， L_3 最小为0.02，借助于各项的互相抵消连同校正板的慧差和象散项（校正的慧差和象散值要比反射镜的大得多），可以求得像差校正的可能范围。通常这种情况存在严重的单色高级象差，主要是由于一块校正板的象差和上述某块校正板的象差相互作用而引起的；并且由于校正板材料的色散，存在大的高级色差。加入三块小顶点曲率的校正板，修琢项次高于四阶，就能减轻这些较高阶的影响，但不能消除。这大概是因为这些问题：没有非球面板校正器的设计用于Newtonian望远镜。这样的系统就象Ritchey Chrétien主镜校正器一样（下面讨论）已经较

详细地研究过。

2.4 四片透镜校正器

为了用透镜校正器获得对较宽视场角的较好象差校正, 似乎必须使用比 Ross 的三元件还要多的元件。温(1967)已经描述了4片透镜校正器, 它给出很高的性能。

这些校正器设计的最终阶段是采用透镜最佳计算机程序来完成, 是指温(1959), Nunn和Wynne(1959), Wynne和Wormell(1963)所描述的一般设计。为了根据这样的程序获得良好结果, 必须给予计算机一初始设计, 它具有高度象差校正的可能性。温使用的初始设计包含一对相互分离的远焦双透镜, 每个有两片相接触的薄透镜。对于这样的系统可以这样安排: 为了使较高级象差校正到最小, 两个双透镜的初级球差是相等的但符号相反, 它们象散系数的和等于镜子的但符号相反, 并且反射镜的慧差校正均匀分布在两个双透镜之间, 减少高级象差。达到薄透镜初级像差校正的这种程度, 就可解析地导出双透镜的设计。实际的双透镜必须具有有限的厚度, 如果位置色差是零, 倍率色差一般不能完全被校正, 对于双透镜具有正或负元件且靠近反射镜的情况下, 其符号是相反的。因此温采取一双透镜是正向的, 另一是负向的。这种安排容许计算机把这两个双透镜的元件分离开, 仍能校正两种初级色差。实际上已证明有用。当然, 初始设计的两个薄的远焦双透镜, 其Petzval场曲为零, 但在最佳处理中计算改变了它, 考虑到作为总体的透镜系统需要平衡反射的小场曲。

温(1967)给出了这种类型的四透镜校正器的数据, 它是为 Palomar 天文台 200吋 $f/3.3$ 望远镜设计的。其点列图表明在365—1014毫微米的光谱范围, 对于25弧分直径的视场, 几何象扩散在约 $\frac{1}{2}$ 弧秒内。满足 Royal Greenwich天文台的牛顿望远镜 (98吋 $f/3.0$) 的类似校正器对于40弧分直径的视

场给出相同的性能(图3)。使这些设计对于稍小一点视场角最佳化就能获得较好的象差校正, 但因为在最好的大气条件下可见光斑约为1弧秒, 所以考虑几何扩散为 $1\frac{1}{2}$ 弧秒的校正器系统应是一个合理的折衷方案。

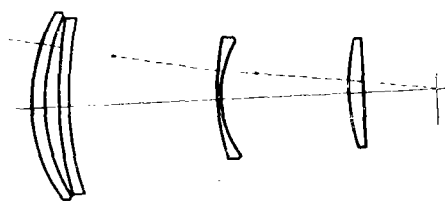


图3 由温设计的满足牛顿望远镜的校正器的截面图

对于明晰度不好的观察站, 或者对于较小的望远镜, 其分辨率受摄影胶片颗粒的限制而不受观察的限制, 使用这种校正器较大的视场是可能的。优化程序得到的象差平衡是这样, 对于某个线性直径视场象扩散保持在某个很小值内, 而在这个线性直径之外则象差增长很快; 对于象差校正有个很突然的严重变坏。象差变坏前的视场直径和其内的象扩散大小都随着校正器透镜系统的实际尺寸而增大。根据象差理论, 如果这种类型的校正器按照反射镜焦距的大小和位置的比值来计值, 这样(零)初级球差和慧差几乎不变, 所以象差校正不受到影响。象散和场曲都有变化, 但很小, 并且计算机做小变动的设计修改就可以校正它。因此, 这些校正器的尺寸可按比例增加或缩小。为了给出较小视场的较大程度校正或较大视场的较低校正, 只需要某些小的变化。后者的实例是: 温为 Oporto 天文台大学已经设计了30吋 $f/4$ 投影望远镜用的校正器, 视场是 2° 直径, 象扩散在365—852毫微米, 光谱域在约2弧秒以内。

2.5. 两块反射镜的校正器

讨论 Paul 的三块反射镜的非象散系统, 推导出大不相同的 Newtonian 焦点校正器。根据 Paul 一般分析, 得到一系统, 该系统

有一抛物面主镜，紧接着是凸面和凹面反射镜，再有半径相等的球面反射镜。整个系统校正了球差，慧差和像散（图4）；两球面反射镜间距为其曲率半径，于是这两个球面反射镜对于抛物面镜而言组成一场校正器，对于弯曲焦面给出清晰像。

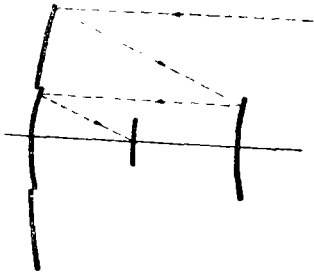


图4 Paul的三反射镜系统

Paul还考虑了三块反射镜的其它结构，包括一较好遮蔽特性的平视场系统，其中焦面在第二反射镜的极点；在此种情况他指出，象差校正不适合于抛物面主镜。一般来说，对于这三块反射镜系统，Paul指出，它们在理论上是有意义的，遗憾的是考虑遮蔽问题，其应用很受限制；对于大部分的应用，这个结论大该是正确的。

可以改型Paul的二球抛物面校正器以便在一系统给出一平视场，其中第二个反射镜近似于椭球面，第三个是对心在第二反射面的球面镜。其焦面位于第二块镜和第三块镜之间。Dimitroff和Baker(1945)简单地、不恰当地参考了这个系统，并且Baker(1969)详细地讨论了它，Baker为不同视场搞了一系列特殊设计，与一200吋 $f/3.3$ 抛物面镜一起使用。这些设计给出很高级的象差校正，当然完全没有色差。但与上述其它形式的校正器比较，对于一给定尺寸的非渐晕视场，两块反射镜校正器的实际尺寸要大得多。例如，Baker的“Case2/3”，给出20弧分直径的非渐晕视场，需要23吋和32吋直径的校正器反射镜，其间隔为147吋，挡板直径是42吋；这样的系统比起较小装置，它的装配和从望远镜中取出都不大容易。而且焦平面定位于

反射镜之间是不利的。另外，这些系统的象差的象扩散是0.01弧秒等级，比在最好观察站的大气抖动造成的象扩散小得多。因此，即使在很好的观测场所，地球天文学中这些校正器的优良性能没有完全充分利用。Baker认为，这些系统会在宇宙中获得应用，那里观测不受观看限制并且对于宽的光谱域是需要的。

3. Ritchey—Chrétien望远镜 主焦点校正器

轴上象差完全被校正的二次曲面望远镜(Newtonian, Cassegrain, Gregorian)都有未校正的慧差和象散以及一般场曲。良好分辨率的视场受慧差限制而不受象散和场曲的限制；慧差取决于视场值一阶项而象散和场曲取决于二阶项。Schwarzschild(1905)指出，通过适当地偏离二次面形就能使两个反射镜的系统齐明化（校正了球差和慧差）。对于一般的实用结构，校正象散一般也是不可能的，但是齐明反射镜系统具有相当大的扩大视场。他详细地分析了齐明反射镜对，并用于“Gregorian”式的特殊设计（两个凹面镜），其中弧矢和子午曲率近似相等但符号相反，在反射镜之间给出几乎是平面的平均象场。显然，那时还没有制造出这种形式的望远镜，但Chrétien(1922)实现了这种想法，并把Schwarzschild的分析应用于Cassegrain型望远镜，他建议这种望远镜应和弯曲的摄影板一起使用以便把象散影响减少到最小。这种望远镜是由G. W. Ritchey制造的，包括美国海军观察站，华盛顿的30吋的仪器，这种类型已经成为通称的Ritchey—Chrétien型。在一个时期内这种想法再次没有继续下去，但现在对于正在制造的或计划搞的若干新型望远镜一般都正在采纳它。目前在McDonald观察站使用的最大的Ritchey—Chrétien望远镜是107吋(2.72米)，它是在1969年完成的。温(1968)已经讨论了

Ritchey—Chrétien 望远镜的主要特性。如果只使用主镜，就会遭受球差，按照原来的设想，Ritchey—Chrétien 望远镜只提供—“Cassegrain”焦点，抛弃主焦点和Coudé焦点。显然就更需要提供另一个适当的顶点曲率的第二块反射镜以便给出一较长焦距的Coudé焦点。反射镜要非球面化以致能校正主镜的球差。Ritchey—Chrétien Coudé焦点的慧差比相应的二次曲面望远镜严重得多，但对于通常在这焦点所做的轴上分光工作，慧差是不重要的。主焦点的利用更困难。

Ritchey—Chrétien 望远镜的主镜与一个尺寸和焦距相同的抛物面镜一样，具有相同的初级慧差，象散和场曲，另外还有过校正球差。对于Ritchey—Chrétien 焦点（次焦点）处于主镜的极点的情况，以孔径边缘波象差表示的球差由下式给出：

$$W = \frac{1}{16}h^4/F^2R^3,$$

其中 h 是反射镜的半径， F 是焦距， R 是第一焦点和第二焦点处的孔径比。如一般情况下那样第二焦点在主镜极点的后面， W 值稍大一点，典型的是10—20%，它取决于后焦距。对于大型的望远镜，球差使得反射镜的直接主焦点无用，甚至于在轴上也是如此。例如，正在制造的Anglo—Australian 154吋（3.91米）的望远镜，主镜孔径是 $f/3.25$ ，孔径为 $f/7.79$ （ $R = 2.40$ ）的Ritchey—Chrétien焦点位于主镜极点后66吋处，在入等于588毫微米时， W 是66个波长，在最好折衷焦点处几何斑是8弧秒的角度直径。因此要使用Ritchey—Chrétien望远镜的主焦点，某种形式的像差校正是必须的。希望制造这种校正器以便扩大主焦点处的好分辨率的视场，同时校正轴上象差。对于不同大小的视场和下面讨论的校正器的复杂性这原来是可能的，实际上与存在球差的抛物面望远镜比较，用某种办法校正倾斜成象的象差是容易做到的。

3.1 单个非球面板的Ritchey—Chrétien主校正器

把一个适当面形的非球面板放在镜子和焦点之间的会聚光束中的任意地方就可以校正主镜的球差。Gascoign (1965)指出，若正确地选择这块板的位置，主镜慧差也可被校正。这是最简单的，可能的校正器，其吸收和表面反射造成的光损耗比其它校正器要少。因为这块板必定引起很大的象散和一些色差，故校正器给出的良好分辨率视场很小。例如，对于上述的Anglo—Australian 154吋（3.91米） $f/3.25: f/7.79$ 望远镜，非球面校正板的直径约为35厘米，离焦点1米远，在850—360毫微米光谱域，对于直径在7弧分以下的平视场，它给出的象扩散的直径是 $\frac{1}{2}$ 弧秒以内；如果这块板适当弯曲地凹向反射镜，对于一接近10弧分直径的视场也是一样。

3.2 双透镜的Ritchey—Chrétien主校正器

初级慧差和象散对于Ritchey—Chrétien主镜和相同焦距和孔径的抛物面镜都是相同的，故在2.1节讨论的校正这些象差用的吻合双透镜校正器的特性在这两种情况都一样。上面已说明，这样的双透镜有球差，其大小取决于它在会聚光束中的位置；这种球差的符号和Ritchey—Chrétien主镜的符号相反。因此有可能选择双透镜的位置，以致使它的初级球差抵消Ritchey—Chrétien镜的初级球差。简单的双透镜校正器在Ritchey—Chrétien反射镜的主焦点处给出优良成像的大视场，在这点上，使用抛物面镜是不可能的。Ritchey—Chrétien反射镜的球差 W 不仅依赖它的焦距 F 和半孔径 h ，而且依赖比率 R 。当 R 减少时， W 增大，对于给定孔径和焦距的主镜来说，较小的 R 对应远离焦点的双透镜位置，而此位置是为所要求的慧差和象散校正而选的，因此它具有较浅薄的表面曲率和较小的高级象差。但不象这篇文章讨论的其它透镜校正器，这些双透镜校

正器在它们的视场中不仅主要受高级象差的限制还受初级色差的限制。如果具有有限透镜厚度的双透镜，其位置色差被校正，那末一般情况下就有小的倍率色差。如果这些双透镜校正器要用在宽的光谱域内（如同通常所规定的那样），正是这种倍率色差限制了整个视场的大小。在角度测量中，视场大小的限制随着主镜的相对孔径和比率 R 只是缓慢改变。而极限是一个十分敏感的值，因象扩散的准则放松了，双透镜设计成大视场，于是透镜元的厚度一定随着倍率色差的增加而增大，所以要有快的缩减转变。

温(1968)给出105吋, $f/4; f/9 (R = 2.25)$ Ritchey—Chrétien 望远镜用的双镜校正器的数据；这是 McDonald 观察台的 107吋仪器的原来指标。它复盖的角视场是28弧分直径，总的象扩散在770—365毫微米的光谱范围是 $\frac{1}{2}$ 弧秒以内，而对于更有限的范围就更好。对于较大数值孔径和较大比率 R 的主镜，复盖的视场稍微小一些。例如，对于正在制造的 Anglo—Australian 望远镜 [154吋, $f/3.25; f/7.79 (R = 2.40)$]，温设计了一个双透镜校正器，复盖的视场是25弧秒直径，望远镜的象扩散总量在882—365毫微米是0.75弧秒，但对于852—546和546—365毫微米是在0.5弧秒之内。

Schulte(1966a, b)已经描述了这种双透镜校正器的另一种形式，其中一块非球面板插在反射镜和双透镜之间。这种形式是根据温早先做的有关抛物面镜校正器的工作推导而来的。设计数据由 Schulte 给出，校正器用于380厘米, $f/2.8; f/9$ 望远镜，非球面板的直径约为1米。只对一个波长(589毫微米)的点列图，其半视场角扩展到20弧分。象扩散在离轴15弧分时约为1弧秒。因此该系统比之简单的双透镜似乎没有什么优点。

3.3 多个非球面板的Ritchey—Chrétien主校正器

Köhler (1966, 1967, 1968)为欧洲北部

观察站(E.S.O)的Ritchey—Chrétien 望远镜($3\frac{1}{2}$ 米, $f/3; f/8$) 设计了一个主焦点校正器，基本上是 Meinel 的建议，即上面讨论的抛物面望远镜的三块非球面板校正器。Köhler 增添了第四块——球面透镜，靠近非球面板后面的焦面，以便校正反射镜的场曲；这个透镜引出小量的其它初级象差，特别是过校正象散。而且，根据下面所讨论的理由(§4), E.S.O设计中的反射镜对虽然稍稍偏离严格的 Ritchey—Chrétien 形式，但这对校正器的设计影响很小。三块板系统的初级象差分析除了三块板的球差、慧差和象散必须抵消主镜和后透镜的相应合成像差外，得出与上面2.3节中给出的抛物面校正器的相同象差。抛物面情形的主要差别来自 Ritchey—Chrétien 反射镜的负球差。其影响是：第一块，第二块和第三块板的象差是负，正和负时，它们的数值比对应的抛物面时稍低，但仍很大。在 Köhler 设计中，中心板的慧差系数对于反射镜的慧差系数来说是反号，大约为其几何尺寸的3倍。高级象差，尤其是色差，小于这种形式的抛物面校正器的，但仍然很大。为了减少这些影响，在超过约为20弧分的半角视场处倾斜光束的小量的孔径遮拦已经出现。设计一个30弧分的半视场角的系统，其子午面孔径缩小到其轴上值的0.75。

在最终设计中，引入了合适厚度的非球面板，其轮廓是最佳化的，给予它们小顶点曲率以及4阶修琢，而且最大块板是6阶修琢。点列图表明，在486—656毫微米范围轴上象扩散在 $\frac{1}{2}$ 弧秒以内，离轴21弧分时，甚至于增大到大于1弧秒，而离轴30弧分时对于渐晕的孔径降到小于1弧秒。对于扩大的365—1014毫微米的光谱范围，在每个位置象扩散增大3倍。图7给出这种校正器的点列图和3.4节中讨论的另一种类型的点列图。图5说明校正器的形式，非球面轮廓是过分

夸大了的。大的非球面板的直径是 $\frac{1}{2}$ 米，校正器系统的整个长度是1.09米。

Meinel 三块非球面板形式的校正器是为 $f/28:f/9$ Ritchey—Chrétien 望远镜设计的，已由Schulte说明。在420毫微米波长，离轴15分的视场角度，象扩散约为1弧秒。没有给出其它波长的图表。

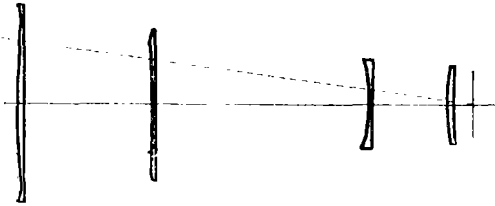


图5 Köhler为E.S.O.3.5米Ritchey—Chrétien望远镜的主焦点设计的校正器

3.4 Ritchey—Chrétien望远镜用的三元主焦点校正器

温(1965, 1966, 1968)描述了一种校正器，包含三个间隔的透镜，都是球面的。这种形式是根据如下考虑推导出来的。对于3.2节讨论的吻合双透镜校正器，只有在镜子和双透镜之间有一定的间隔的情况下才可能同时校正初级球差，慧差和象散，这种间隔取决于特殊Ritchey—Chrétien的结构；对于其它间隔，一般来说可以校正这些象差中的任意两种。如果镜子和双透镜之间的间隔比给出全部三种象差校正时的小，并且选定双透镜的透镜形状，使之可以校正主镜的球差和慧差，于是系统就存在欠校正初级像散。只需要给其它象差增加一小量，像散就会校正它，即把一个适当形状的薄的正透镜靠近焦点。这种双透镜比简单的双透镜大，具有浅薄的曲率和较小的高级像差，而且加入一后面会聚透镜就可以校正单个双透镜校正器的倍率色差；在这两方面，对于较大视场角的校正是有希望的，实际上已实现。

温(1965,1966)描述了这种形式的两种校正器。一种是：吻合的双透镜，它的会聚透镜靠近反射镜，并且后面的会聚透镜是一个胶

合的三片透镜；这种形式具有校正较好的高级色差，但三片透镜是火石玻璃，在近紫外具有一般的透过损耗。在这两个早期形式的校正器中，后面的会聚透镜离焦面很近，因此后焦距小；这样不方便，譬为与象管一起作用。

后来的设计(温1968)参考了原来的并用计算机最佳程序设计的，和上面描述的简单概念差别相当大。在这些设计中，前面的吻合双透镜是分离的，而后面的正透镜远离焦面，反射镜像差的校正以更复杂的方法分配在三个单个透镜之中，校正像差的水平比原来的要高。因三片透镜都是相同材料做的，故无二级光谱效应，此种材料可以是熔石英或是良好短波长透过的玻璃。Ritchey—Chrétien主镜和抛物面镜一样，具有相同的初级慧差，像散和场曲，这两者都有相同的焦距和孔径并且球差级取决于比率 R （见第3节）。不同结构的Ritchey—Chrétien望远镜， R 值不同，因此要求主焦点校正器具有相应不同的球差特性。假如为某个给定的主反射镜设计的校正器系统的尺寸和位置按焦距的 n 倍来表示，那末其球差也按比例增大 n 倍，其慧差不变而象散和场曲按比例约增大 $1/n$ 倍，然而在任何情况下后几种都是小的。因此为任何Ritchey—Chrétien主镜设计的校正器都可做为不同主镜用的校正器的设计基础，不同的校正器通过适当地按比例缩放而具有不同 R 值的结构，用计算机最佳化获得最后的像差平衡。总之，较小 R 值的望远镜，主镜的球差较大，需要复盖较大视场角的较大实际尺寸的校正器装置。温(1968)为kitt Peak国家天文台150吋， $f/2.8:f/8$.望远镜($R=2.86$)和为McDonald天文台107.6吋 $f/3.9:f/8.8$ 望远镜($R=2.25$)设计了三片透镜的校正器，前者复盖的完全非渐晕视场是50弧分，后者复盖的整个视场是 2° 。图6表示前者的截面图。

比之上述其它形式，这些三透镜校正器给出了高级的像差校正。为了比较，温设计了一个三透镜系统以便校正欧洲南部天文台

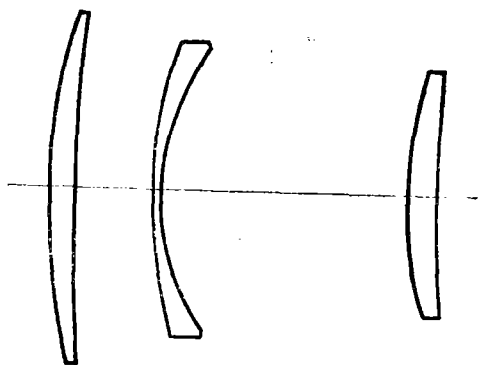


图6 温为 Kitt Peak 国家天文台150吋 Ritchey—Chrétien望远镜的主焦点设计的校正器

3 $\frac{1}{2}$ 米, $f/3$: $f/8$ 望远镜 ($R = 2.67$) 的主焦点视场, Köhler (1966, 1967, 1968) 曾经为它设计了一个非球面板校正器。各自的全视场都是 1° , 某些渐晕 (每种校正器都一样) 超过 ± 21 弧分。图 7 表示两个系统的点列图, 轴上时和 15° 、 21° 和 30° 半视场角时, 波长为 656, 588, 486 和 405 毫微米时的情况, 每种情形的圈相当于 1 弧秒的角扩散。另外, 要有较好的像差校正, 三透镜系统是相当小的并且具有较容易制作和检验的球形表面。

这些三透镜校正器的最大剩余象差是较高级的色差。用这些校正板进行天体摄影时通常采用一系列校正板, 每块校正板通过不同的滤光片; 能复盖的全部光谱范围应该是大的, 但对每次曝光都受到很大的限制。因此, 为了在大视场角内得到最佳性能, 可以使用 2 个一组或 3 个一组的校正器, 每个都是为不同光谱范围计算的。由于这些三片校正器具有比较小的尺寸和轻的重量, 所以在每次曝光之间更换它们是可行的。建议在这种情况下应提供给 Kitt Peak 新型 158 吋望远镜一系列这些校正器。

温 (1968) 对这些校正器做了进一步研究, 一是三片透镜的某些表面可以采取非球面形式, 另一是使用四个单独的球面透镜代替三片透镜, 得到的校正器的一般形式类似于 2.4 节描述的那些。在三透镜校正器的情况下, 采用球表面使性能最佳化, 让计算机

非球面化获得的性能增益小于三个表面的性能增益, 甚至小于采用三个非球面的增益, 改进是较小的, 在视场最差的地方像扩散的缩小约为 25%。使用 4 个球面透镜代替三片透镜给出同样程度的改进。

在文献中已经涉及了包括 3 片相互分离透镜的两套其它的 Ritchey—Chrétien 主焦点校正器。对于第一套校正器, Köhler 在他的一篇文章 “E S O 望远镜非球面板校正器 (3.3 节)” 中, 作过简明地描述。这套校正器是解决放弃非球面板设计问题的较早的办法。同样为 ESO 望远镜主反射镜设计的另外的三片透镜校正器是由 Baranne (1966) 描述的。所发表的报道中有很多印刷与理论上的错误。他给出两种设计, 每一种在两个发散眉月镜之间有一中心正透镜, 眉月镜的一个表面是非球面。根据给出的点列图得知, 对于较好的设计, 在 ± 30 弧分的轻微渐晕视场上, 于 370—500 毫微米光谱域, 图像扩散约为 $2 \frac{1}{2}$ 弧秒。

4. 次焦点校正器

扩大二个反射镜系统的视场的最早设想是把它看作象单个反射镜系统那样的特殊仪器, 只用于一个焦点位置。根据这些系统引出了适合的校正器, 可加到未变型的 Ritchey—Chrétien 望远镜上以便扩大其视场。有了这些校正器, 继续提出需要改型 Ritchey—Chrétien 反射镜的设计方案, 所以不使用这些校正器, 它们的性能就降低了。

校正 Cassegrain 反射镜的建议最早是由 Sampson 提出的, 他还最早提出 Newtonian 改良型的建议。Sampson 的系统包括一近似椭圆主反射镜, 第二块镜子是一个背凹面镀银的球面弯月透镜, 其后面是一球面的分离双透镜系统。透镜系统的两种初级色差都被校正了, 3 个折射元都采用同牌号玻璃, 因此二级光谱效应被消除。在离轴 1° 的视场角, 整个系统的球差, 慧差被校正, 平直的

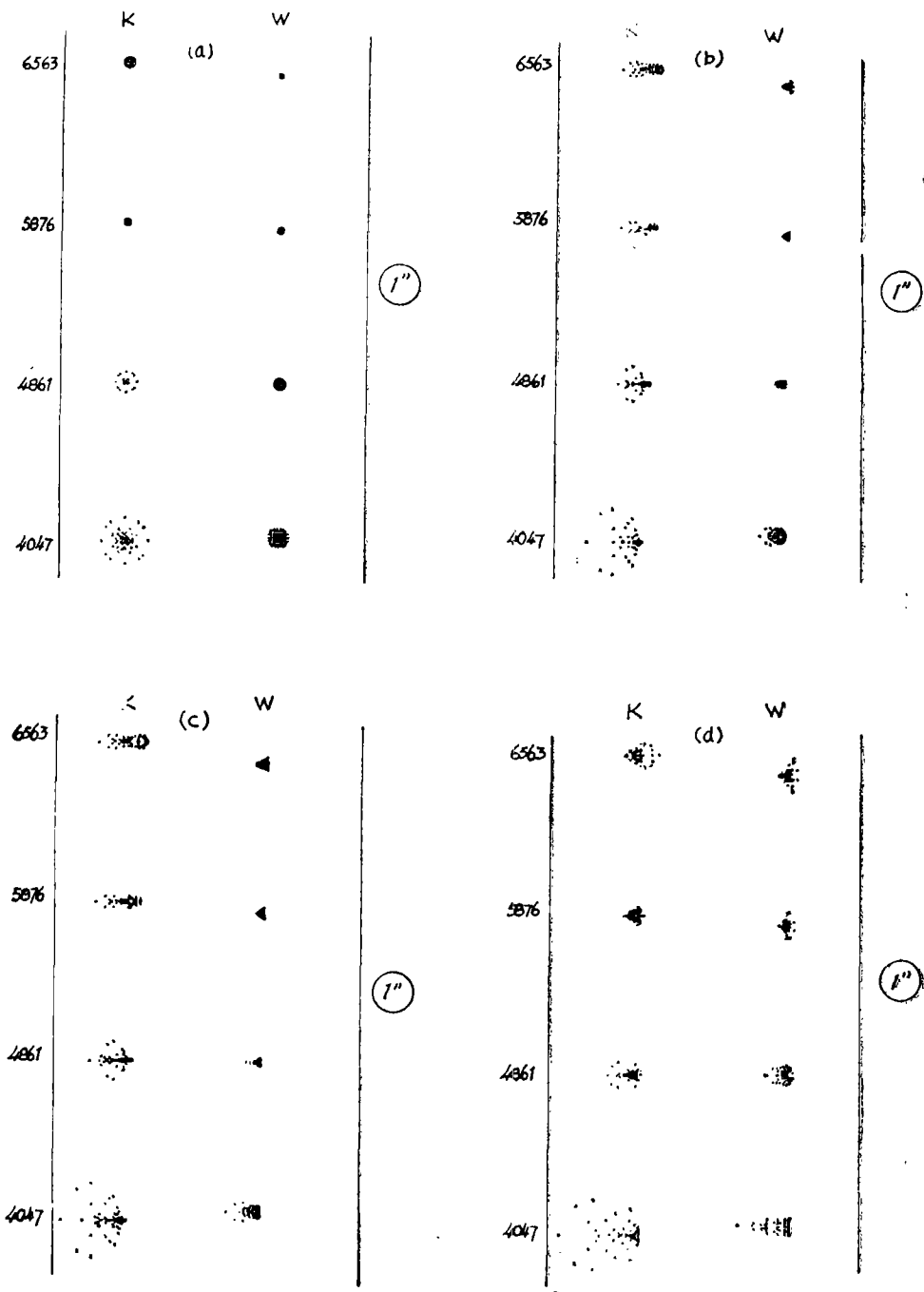


图7 把Köhler的非球面板校正器(K)和Wynne的三透镜校正器的点列图进行比较, 它们都是为ESO3.5米望远镜设计的。反映了四个波长时的图象扩散(656,588, 486和405毫微米)(a)轴上,(b)离轴15弧分,(c)21弧分),(d)30弧分。

平均视场具有 $f/14.05$ 的孔径，图象是2.2弧秒。

后来的工作与Ritchey—Chrétien式的系统有关。在Chrétien的文章描述这些系统的同年，Rear—Admiral Violette建议，Ritchey—Chrétien望远镜的象散和场曲要用一个靠近焦面的、薄的、接触的双透镜来校正并且要改变反射镜的非球面性。Violette根据他对薄透镜象差理论的最初分析得出总的结论：1. 只有在两个薄透镜接触时才能同时校正它们的初级色差；2. 若这个薄双透镜有有限的Petzval曲率，就有有限的光焦度，那末它一定是由具有不同色散的正负元件所组成。由于普通的Ritchey—Chrétien反射镜系统具有一个有限的正场曲，Violette建议采用一密切的双透镜，它有适当的负光焦度，由一冕玻璃元和一火石玻璃元组成，因此有少量的二级光谱缺陷。他认为，若Ritchey—Chrétien排列是零Petzval曲率类型的，那末二级光谱只有在具有同样玻璃材料的两片透镜的零光焦度双透镜中才能被消除；Ritchey—Chrétien结构一般没有大的中心遮挡。实际上，在普通情况下作为有用指导的薄透镜理论对于靠近焦点的透镜来说是一个很差的近似。这点下面要谈到。

继Violette之后，有40多年之久没有人进一步研究次焦点校正器问题。这期间天文学家正在设计若干Ritchey—Chrétien望远镜的结构，一些已具有相当大的尺寸。可方便使用的角视场受到限制，在较大的望远镜上（口径为3.5米或更大些）受到采用的摄影底片尺寸的限制；在较小的望远镜上受到主反射镜孔尺寸的限制；一般来说，在较大的望远镜上希望视场直径在30—50弧秒的范围，而在较小仪器上高达 1° 或最多为 $1\frac{1}{2}$ 。对于简单的Ritchey—Chrétien望远镜，由于使用了平的像面，因此象散和场曲限制了视场，其尺寸比以上系统小得多。因弧矢和正切场曲具有相同符号，若给予摄影底

片一合适的凸向反射镜的曲率，那末良好分辨率的视场就大大地扩大了；温给出焦比约为 $f/8$ 的各种Ritchey—Chrétien仪器的数字说明：采用一弯曲的底片并且象扩散达到 $\frac{1}{2}$ 弧秒，视场直径就可达到25—29弧分。实际上，若焦点附近处插入适当光焦度的场镜，代替弯曲摄影底片，这时除场曲外象差可以忽略，同级校正就在平视场上获得。

已经发表了各种较复杂的次焦点校正器。将按照它们的复杂性从最简单的开始（而不是按发表日期）进行描述。

Gascoigne (1965)建议了非球面板形式的单片校正板，离焦点很近。可以塑造此校正板使其产生一定量的像散用以很好地平衡Petzval场曲。于是弧矢和子午场曲就会相等而方向相反，在平的成像面上，比之用一简单的场镜，高分辨率场的面积就会大大增加。非球面校正板必定产生若干球差和慧着；若此校正板距焦点足够近，这些像差不记，但此校正板的非球面性要很大。而对于离焦点较远的校正板，使这两个反射镜适当地偏离Ritchey—Chrétien的实际条件就能校正球差和慧差，这就是Gascoigne建议的。

另一个单片校正板是由Köhler提议的，用在欧洲南部天文台望远镜上。它包括一个靠近焦点的单片球面透镜，具有如此形状和光焦度以便校正反射镜对的象散和场曲。这片透镜引出球差和严重的慧差，但适当地改变反射镜的非球面性就可以去掉这些影响，因此在无校正板的情况下，次焦点处存在慧差。而且单透镜必定产生若干位置色差特别是倍率色差。若校正板只用在对很窄的光谱域进行摄影，这还是容许的。复盖的视场尺寸是 ± 15 弧分，在365—768毫微米范围内任意单一波长的象扩散是在约0.4弧秒内。

对于上面涉及到的不引起大的色差的两个系统，Gascoigne的非球面校正板控制系统的象散，用此以平衡反射镜系统的Petzval场曲，非球面板反射系统的Petzval场曲，场镜校正板控制Petzval曲率，用它以

平衡反射镜系统的像散，用场镜实际不能改变的反射镜系统的象散。Schulte 建议两片校正器，其中一片是焦点前面非球面校正板，另一片是接近焦点的场镜，这样即能校正象散又能校正场曲。他为 Cerro Tololo Inter—美国天文台的 152 厘米望远镜的 $f/7.5$ 次焦点做了一个设计，该设计在 $\pm 0.75^\circ$ 视场上对于 340—660 毫微米光谱域象扩散在 $\frac{1}{2}$ 弧秒内。非球面校正板引出严重的慧差，因此再次必要改变原 Ritchey—Chrétien 型的反射镜形状。

温首先提出一种系统，此系统不偏离 Ritchey—Chrétien 反射镜的形状就可校正象散和场曲，它由两个球面透镜组成。根据薄透镜理论，两片透镜系统，且每个透镜的轴向厚度为零，则此系统只能校正两个初级色差；若其总光焦度和其 Petzval 场曲为零，那末两片透镜只能是相同玻璃材料制成的。这些考虑使 Violette 得出如此结论，一般来说 Ritchey—Chrétien 焦点用的双透镜校正板一定要包括不同色散的玻璃，以及二级光谱象差。在大多数情况下，这些薄透镜的判断法则对于小的有限厚度透镜近似有效，但并非对于各种形状的透镜都有效，对于有限厚度的透镜以及其间距近似于某一焦距，则偏离于薄透镜理论的差异就比较大。

在为 Kitt Peak 150 吋望远镜的 Ritchey—Chrétien 焦点设计的两种校正板中温说明了：使用两片分离的同种材料的球面透镜

就可能很好地校正场曲和象散，并且无色差影响，也不用改变 Ritchey—Chrétien 反射镜的形状。较早的设计使用的或是熔石英或是高紫外透过的玻璃，在 405—644 毫微米光谱域，对于 ± 15 弧分的视场象扩散约为 0.2 弧秒以内。后来的设计也是用于 Kitt Peak 的 150 吋望远镜上，复盖的视场是 ± 25 弧分，在 365—770 毫微米区域象扩散约为 $\frac{1}{2}$ 弧秒之内。Rosin 叙述了另一种形式的球面双透镜校正板，用于没改变的 Ritchey—Chrétien 反射镜对，这时他采用了色散稍微不同的两种玻璃。

Refsdal 设计了一个表面是非球面的熔石英双透镜，在 1.5 米 $f/3.5: f/7.5$ 望远镜上，对于 ± 4.5 弧分的视场，其校正是很好的，此处所用反射镜不同于 Ritchey—Chrétien 的情况。Wilson 为一个与其相似的 1.5 米 $f/3: f/8$ Ritchey—Chrétien 的改进型设计了石英双合校正板，复盖视场为 ± 30 弧分。为原来的 Ritchey—Chrétien 反射镜对寻求由相同材料做的两片透镜的满意双透镜的愿望成功了。给出的一种双透镜的设计是：使用两种不同光学玻璃，一种容易变质。还给出一个三片透镜设计，它需要对不同波长范围进行再调焦。

译自 “Progress in Optics” Vol X 第四章

{于和平 译}
{向才新 校}