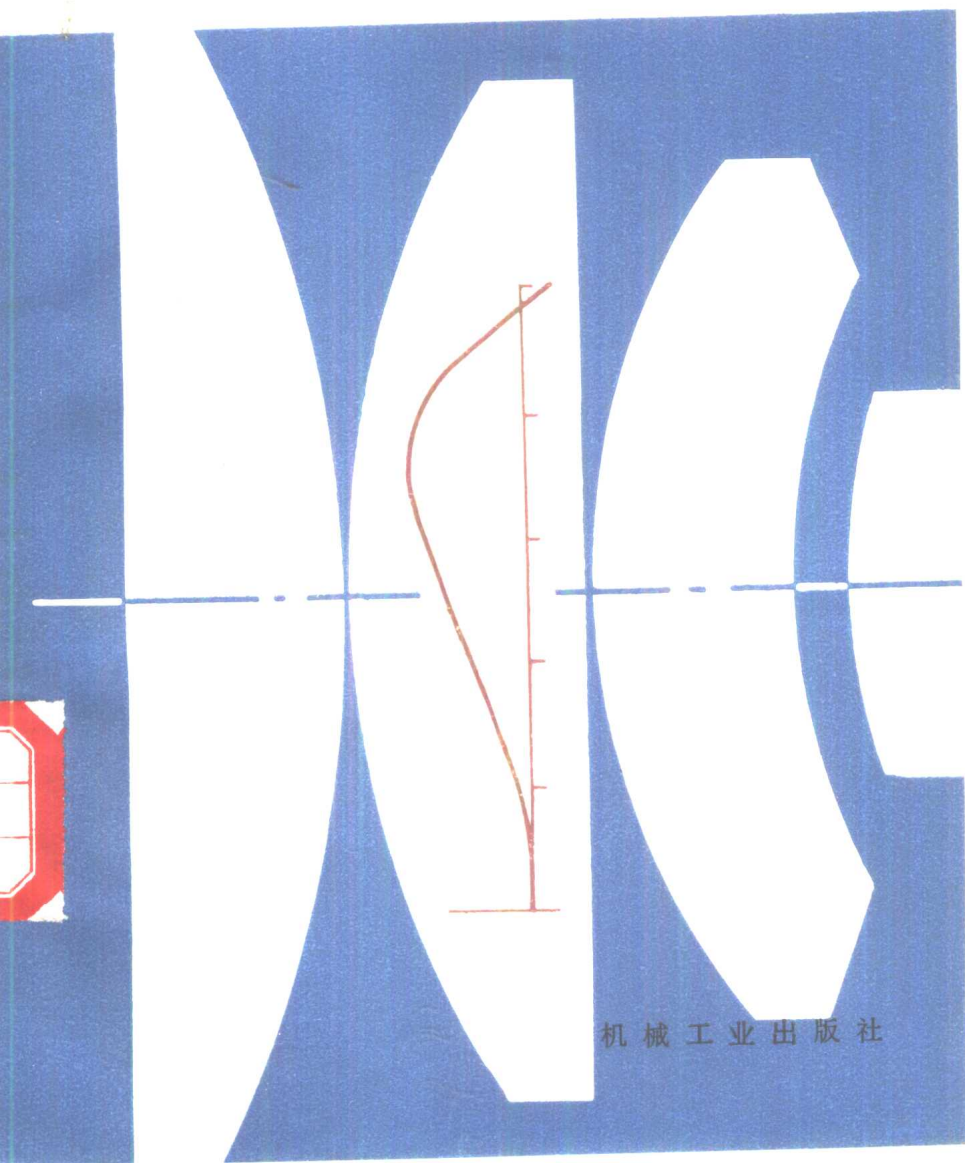


工程光学系统设计

林大键 著



机械工业出版社

工程光学系统设计

林大键 著



机械工业出版社

本书重点介绍适用于电子计算机进行各种光学系统设计的方法和技巧。全书主要内容有：光线光路计算和结果处理、由薄透镜、厚透镜和非球面构成的光学系统象差理论和设计方法；复消色差望远系统构成的思路和计算方法。典型照相物镜设计；变焦距物镜的高斯光学理论和设计方法；光学设计最近进展部分——图象信息处理用的物镜和微缩光刻物镜等设计问题；光学设计应用基础——象差自动校正和平衡方法；以及光学系统质量控制、使各种光学系统成为光学仪器实用化的重要部分——象质评价、象差公差、光学零件制造公差的计算方法等。

本书可供有关科研和工程技术人员从事工程光学系统研究、具体设计、分析计算参考，也可作为高等院校光学专业的师生阅读、参考。

工程光学系统设计

林大键 著

责任编辑：郑姗姗

封面设计：王 伦

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32 · 印张 16 · 字数 355 千字

1987年9月重庆第一版·1987年9月重庆第一次印刷

印数 0.001~4.900 · 定价：3.80元

统一书号：15033·6836

前 言

本书目的在于总结个人从事工程光学系统设计的经验、技巧和我国光学设计的部分成就。

早在1962年之前，我国的光学设计理论和方法已经逐渐形成了自己的系统，这点已于王之江所著的《光学设计理论基础》一书中提到，书中也写到“具体设计方法将另写专书来论述”。但是，由于工作调动等多种原因，写成专著之事就拖了下来。本书就是基于上述想法而写作的。

全书共有十章。第一章属于光学设计基础，简单介绍各种适用于编制电子计算机程序的光线光路计算公式组、象差分布式、以及计算结果的处理方法。第二章属于薄透镜象差理论的具体应用，解决如何应用初级象差理论来求解光学系统初始结构参数问题。第三章着重解决如何根据复消色差的思路，来构成大型折反射光学系统。第四章属于厚透镜象差理论的应用，着重介绍各种典型摄影物镜象差校正的可能性、由厚透镜构成光学系统的设计方法。第五章和第六章属于光学设计最近进展部分。第七章介绍非球面象差理论应用和常用非球面的面形系数求解方法。第八章较系统地介绍变焦距物镜的高斯光学理论和设计方法。第九章属于光学设计质量控制、使光学系统成为光学仪器实用化的重要部分。第十章属于光学设计的应用基础研究部分，也是光学设计方法的进展、不断实用化的重要部分。

本书是在集体工作基础上产生的，作者向中国科学院光

机所的同事们致以衷心谢意。尤其王之江、薛鸣球等人从事富有创造性的光学设计工作，以及蒋筑英、李元康、李家英、史光辉、王效才、翁志成、韩昌元和冯秀恒等人的卓有成效的工作，为本书提供了素材。

孙国良同志特为本书写了第十章。叶宝球同志写了第八章的第一部分，并为原稿的整理工作花了大量时间。兰邦固同志为本书定稿工作给予不少帮助，在此一并致谢。

本书不可能全面论述光学系统设计的所有问题。关于其它方面的报导，读者可以参阅书末所列的参考文献。

如果读者已具有应用光学基础知识，并已具有初步光学设计知识，粗略读过王之江著的《光学设计理论基础》，再读本书可能受益更大。

林大键

目 录

第一章	光线光路计算及其结果处理.....	1
1.1	球面光线追迹式.....	2
1.2	非球面光线追迹式.....	14
1.3	光线计算结果处理.....	24
第二章	由初级象差理论求解光学系统初始结构参数的 光学设计方法	41
2.1	初级象差与结构参数关系式.....	41
2.2	求解由单透镜组合的系统结构参数方法.....	56
2.3	双胶合薄透镜初始结构参数求解方法.....	68
2.4	双贴合薄透镜初始结构参数求解方法.....	76
2.5	无光焦度双贴合薄透镜初始结构参数求解方法.....	79
2.6	开尔纳目镜初始结构参数求解方法.....	84
2.7	对称型目镜初始结构参数求解方法.....	92
2.8	远心物镜初始结构参数求解方法.....	96
2.9	匹兹瓦型物镜初始结构参数求解方法.....	103
第三章	复消色差望远物镜	109
3.1	复消色差透射式平行光管物镜.....	109
3.2	大型复消色差折反射望远物镜.....	118
第四章	典型摄影物镜.....	134
4.1	各种典型摄影物镜象差校正的可能性.....	135
4.2	厚透镜构成的光学系统设计方法.....	144
4.3	星体测量相机摄影物镜.....	179
第五章	图象信息处理用的物镜	192
5.1	傅里叶变换物镜.....	193
5.2	线性成象物镜.....	216

第六章	大规模集成电路制造和检测用的光学系统	220
6.1	微缩物镜和投影光刻物镜	220
6.2	调平调焦光学系统	248
6.3	掩模缺陷检测光学方法	256
第七章	常用的非球面物镜	265
7.1	非球面初级象差理论的应用	265
7.2	按照光线光路求解非球面面形	281
第八章	变焦距物镜	293
8.1	概述	293
8.2	变焦距物镜的高斯光学理论	297
8.3	变焦距物镜光学设计的一般方法	349
第九章	象质评价、象差公差和零件制造公差计算方法	397
9.1	光学系统质量评价的一般方法	398
9.2	光学系统的象差公差	426
9.3	光学零件制造公差计算方法	433
第十章	光学系统象差的自动校正	460
10.1	问题的数学描述	462
10.2	问题的解法——阻尼最小二乘法	471
10.3	约束条件的处理	478
10.4	实际程序的描述	480
10.5	计算实例	500
	参考文献	505

第一章 光线光路计算及其结果处理

从使用要求确定了光学设计的指标后，光学设计者的进一步任务就是进行外形尺寸计算、选择透镜结构型式和透镜内部结构参数的确定。

运用象差理论作指导，从初级象差求解方程可以初步近似地得到光学系统内部结构参数。但由于高级象差的存在，高级象差与光学系统内部结构参数是复杂的隐函数关系，目前还不可能从此复杂的关系中直接解得到设计结果。无论根据应用初级象差理论解方程，高级象差理论作形势判断，逐次逼近法进行透镜设计，或者用近代电子计算机进行象差自动校正和平衡及多次迭代逼近的光学设计方法，均不可避免地要进行光线计算。

光线计算是光学设计的基本问题之一。其目的在于解决光线经光学系统后的位置（高斯光学性能）和光束结构特性（象差特性），以判断象差理论运用的正确性、光学系统各个变数改变过程是否恰当、以及光学系统的成象质量。例如，计算光学系统的点列图、波象差和光学传递函数等，都要进行光线光路计算。同时，经光线计算后，可绘制光路图，了解光线在透镜组的各个入射面上的形势、光阑坐标对象差曲线的影响、以及光线遮拦和各透镜的通光口径等。

光线计算的问题可归结为：

(1) 起算 选择几个量以确定空间的光线位置(坐标选择)。起算时，确定光线与某参考面（物面或入瞳面）的

交点位置和入射方向，以及确定一个系统性能应该至少算哪些光线。

(2) 折射 用折射定律的公式算出光线折射后的坐标。

(3) 转面 求出相对于下一个折射面的光线坐标。

(4) 终结计算 转到象面上的光线位置，以确定高斯光学性能和算出象差。

为了使计算光线的公式组在任何条件下使用均持有同一形式，应选取如下符号规则：

(1) 长度 以球面或非球面的顶点为坐标原点起算，与光线进行方向相同的长度为正量。

(2) 角度 光线或其投影与坐标轴的夹角，由坐标轴起算，折射角由光线起算，顺时针方向为正量。

对于反射面情况，须将该面之后的 n' 和 d 变号， r 不变号。即坐标轴方向仍按初始入射方向，每经反射一次将间隔距 d 和折射率 n' 变号一次，就仍可按上述符号规则进行光线计算。

光线计算有各种各样的方法。本章主要介绍适用于借助电子计算机进行计算的常用公式组和计算结果处理方法，即如何由光线计算结果求象差、作象差曲线图和光路图。

1.1 球面光线追迹式

1.1.1 含轴面光线追迹式

1. 轴上点光线计算

由轴上物点发出的光线可用下式进行计算：

$$\sin I = \frac{L-r}{r} \sin U \quad \}$$

$$\left. \begin{aligned} \sin I' &= \frac{n}{n'} \sin I \\ U' &= U + I - I' \\ L' &= \left(\frac{\sin I'}{\sin U'} + 1 \right) r \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

应用上式光线计算时，起算坐标为 L 和 U ，如图1-1所示。当物距 $L \rightarrow \infty$ 时，起算坐标为 y 和 $U=0$ ，公式(1-1)中的第一式应改为：

$$\sin I = y/r.$$

为了求入射光线在折射面上的高度 y ，用公式(1-2)：

$$y = r \sin(U + I) \quad (1-2)$$

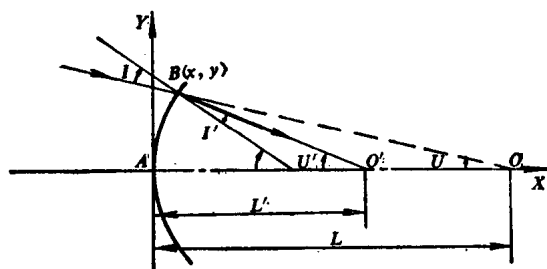


图1-1 光线追迹的各个量

对于平面情况用下式：

$$\left. \begin{aligned} I &= -U \\ \sin I' &= \frac{n}{n'} \sin I \\ U' &= -I' \\ L' &= L \tan U / \tan U' \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

起算坐标为已知量。当利用上述公式组计算出射光线坐标 L' 和 U' 之后，还得将坐标转换到下一面，以便继续算下

去。转面计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} L_2 &= L'_1 - d_1 \\ U_2 &= U'_1 \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

式中, d_1 表示前一面到后一面的顶点距离。这样就可以用上述公式循环进行计算, 直至算完最后一面为止。

近轴光线计算, 以角弧度代替正弦值, 即为:

$$\left. \begin{aligned} i &= \frac{l-r}{r} u \\ i' &= \frac{n}{n'} i \\ u' &= u + i - i' \\ l' &= \left(\frac{i'}{u'} + 1 \right) r \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式中, 当 $l \rightarrow \infty$, 即 $u=0$ 时, $i=h/r$ 。对平面情况用下式:

$$\left. \begin{aligned} i &= -u \\ i' &= \frac{n}{n'} i \\ u' &= -i \\ l' &= l \frac{n'}{n} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

近轴光线的转面公式为:

$$\left. \begin{aligned} l_2 &= l'_1 - d_1 \\ u_2 &= u'_1 \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

2. 轴外点子午光线计算

从物高 H 的一点发出一束光, 如图 1-2 所示。该光束的中心线为主光线, 限制该光束的宽度是由光瞳直径 $2y$ 所决定。已知物距 ($-l$)、入瞳距 (L_p)、物高 (H) 和入瞳半高

(y), 则起算光线坐标用下式:

$$\left. \begin{aligned} H &= -(l-L_r) \operatorname{tg} U + \bar{m} y \\ L &= L_r + \bar{m} y / \operatorname{tg} U \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

分别求各条光线的 U 和 L 。式中 $\bar{m}$ 为各带光的比例系数, 一般算 11 条光线, 则取 $\bar{m} = 0, \pm 0.3, \pm 0.5, \pm 0.71, \pm 0.85, \pm 1.0$ 。

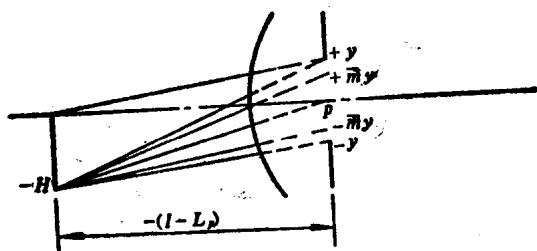


图 1-2 轴外光线的起算

为了简单说明起见, 取五条光线为例, 即取

$\bar{m} = 1$ 时, 求 U 、 L 用下式:

$$\begin{aligned} H &= -(l-L_r) \operatorname{tg} U + y \\ L &= L_r + y / \operatorname{tg} U \end{aligned}$$

$\bar{m} = 0.71$ 时, 求 U 、 L 用下式:

$$\begin{aligned} H &= -(l-L_r) \operatorname{tg} U + 0.71y \\ L &= L_r + 0.71y / \operatorname{tg} U \end{aligned}$$

$\bar{m} = 0$ 时, 求 U 、 L 用下式:

$$\begin{aligned} H &= -(l-L_r) \operatorname{tg} U \\ L &= L_r \end{aligned}$$

$\bar{m} = -0.71$ 时, 求 U 、 L 用下式:

$$H = -(l-L_r) \operatorname{tg} U - 0.71y$$

$$L = L_r - 0.71y/\operatorname{tg} U$$

$\bar{m} = -1$ 时, 求 U 、 L 用下式:

$$H = -(l - L_r)\operatorname{tg} U - y$$

$$L = L_r - y/\operatorname{tg} U$$

当物体在无限远处时, 即 $l \rightarrow \infty$, 此时一束光的所有 U 角均相同, $U = U_r$ 为已知量, 仍可用公式(1-8)求各带光的 L 。公式(1-8)中 $H = 0$, 即为轴上点光线, 此时各带光的 U 角计算式为:

$$\operatorname{tg} U = \bar{m} y / (l - L_r)$$

$$L = l$$

因为轴上点光束上下对称于光轴, 故 $\bar{m} \geq 0$ 。

算出各条光线的起算坐标 L 和 U 之后, 均可用公式(1-1)和(1-4)进行子午光线计算, 终结计算, 即求各条光线与象面交点高度 H' , 用下式:

$$H' = -(l' - L')\operatorname{tg} U' \quad (1-9)$$

公式的符号物理意义如图1-3所示。

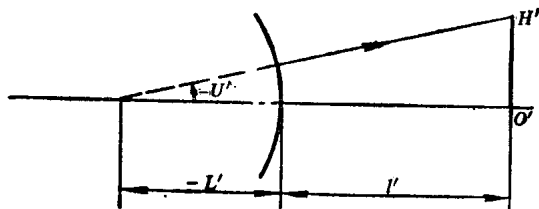


图 1-3 轴外光线与象面交点高度 H' 的计算

1.1.2 邻主光线细光束追迹式

轴上点细光束计算, 也即称为 l 计算, 已在上节介绍了。轴外点的细光束计算, 称为 s 、 t 计算, 需先计算一条主

光线 L_r 之后,再沿主光线进行邻主光线的“近轴光线计算”。计算按下列步骤进行:

(1) 起算数据 用下式求起算的 s_t :

$$-t_1 = -s_1 = [-l_1 + (\overline{BA}^2 / 2r_1)] / \cos U_{r1} \quad (1-10)$$

式中 $\overline{BA}^2 / 2r_1 = X_1$ 如图1-4所示,

$$\begin{aligned} \overline{BA} &= L_{r1} \sin U_{r1} \sec \frac{I_{r1} - U_{r1}}{2} \\ &= L'_{r1} \sin U'_{r1} \sec \frac{I'_{r1} - U'_{r1}}{2} \end{aligned}$$

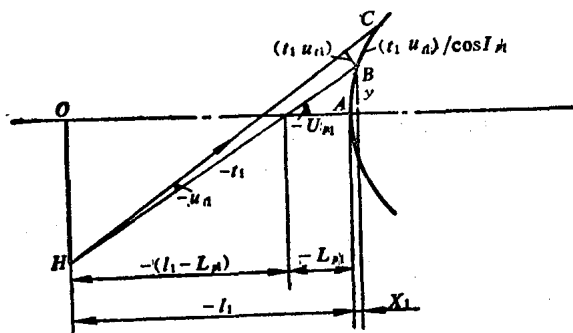


图1-4 邻主光线细光束追迹起算各个量

(2) 计算公式组

子午细光束:

$$\left. \begin{aligned} i_t &= \frac{(t / \cos I_r) - r}{r} u_t \\ i'_t &= \frac{n \cos I_r}{n' \cos I'_r} i_t \\ u'_t &= u_t + i_t - i'_t \end{aligned} \right\} \quad (1-11a)$$

$$t' = \left(\frac{i'_t}{u'_t} + 1 \right) r \cos I'_t \quad]$$

弧矢细光束:

$$\left. \begin{aligned} i_s &= \frac{(s \cos I_p) - r}{r} u_s \\ i'_s &= \frac{n}{n'} i_s \\ u'_t &= (i_s + u_s) \frac{\cos I'_p}{\cos I_p} - i'_t \\ s' &= \left(\frac{i_s}{u_s} + 1 \right) r / \cos I'_s \end{aligned} \right\} \quad (1-11b)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} t u_t / \cos I_t &= t' u'_t / \cos I'_t = h_t \\ s u_s &= s' u'_s = h_s \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

起算时, 取 $u_{t1} = u_{s1} = u_1$, u_1 为轴上点近轴光线计算的孔径角, 一般取 $u_1 = \sin U_1$. 将公式 (1-10) 代入公式 (1-12), 则有:

$$\left. \begin{aligned} h_{s1} &= (h_1 - X_1 u_1) / \cos U_{r1} \\ h_{t1} &= h_{s1} / \cos I_{r1} \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

当物体位于无限远处, 即 $l_1 \rightarrow \infty$ 时, $t_1 = s_1 = l_1 = \infty$, $u_{t1} = u_{s1} = u_1 = 0$, 则公式 (1-11a) 和 (1-11b) 中

$$\left. \begin{aligned} i_{t1} &= \frac{(t_1 / \cos I_{r1}) - r_1}{r_1} u_{t1} = h_{t1} / r_1 \\ i_{s1} &= \frac{(s_1 \cos I_{r1}) - r_1}{r_1} u_{s1} = h_{s1} \cos I_{r1} / r_1 \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

式中,
$$h_{s1} = h_1 / \cos U_{s1}$$
$$h_{t1} = h_{s1} / \cos I_{t1}$$

(3) 转面公式 用公式(1-15)算其后面一面的 s 、 t :

$$\left. \begin{aligned} t_2 &= t'_1 - D \\ s_2 &= s'_1 - D \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

式中,
$$\left. \begin{aligned} D &= (d - X_1 + X_2) \sec U'_{s1} \\ X_1 &= \overline{B_1 A_1}^2 / 2r_1 \\ X_2 &= \overline{B_2 A_2}^2 / 2r_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

(4) 终结计算公式 用下式(1-17)求 x'_i 和 x'_s :

$$\left. \begin{aligned} t' &= h_t \cos I'_t / u'_t \\ s' &= h_s / u'_s \\ x'_i &= l' - (t' \cos U'_t + X) \\ x'_s &= l' - (s' \cos U'_s + X) \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

式中各符号物理意义, 如图1-5所示。

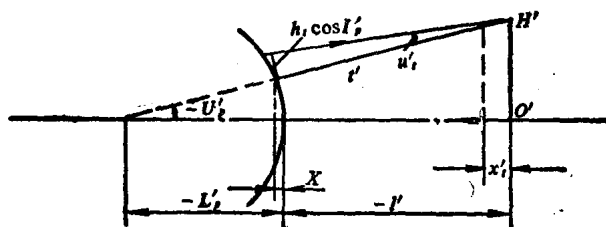


图1-5 邻主光线细光束终结计算

1.1.3 球面空间光线追迹式

任意一条光线的空间位置可由其与参考面的交点和该光线的方向余弦(光线矢量在坐标轴的投影)所决定。

下面将分别讨论光线的起算空间坐标、空间光线计算的

公式组、转面公式和终结计算。空间光线计算公式很多，在此只介绍一种便于利用电子计算机编程进行计算的公式。

(1) 空间光线的起算坐标 如图 1-6 所示，有一条空间光线 $\overline{OP}$ ，它从物点 $O(x_0, y_0, z_0)$ 发出，通过光瞳面(y_p 与 z_p 所组成的平面)的一点 $P(x_p, y_p, z_p)$ 。图中切平面 T 为 Y_T 和 Z_T 所组成的平面，它垂直于光轴 X 、与球面相切且通过球面顶点 O_T (坐标原点)。

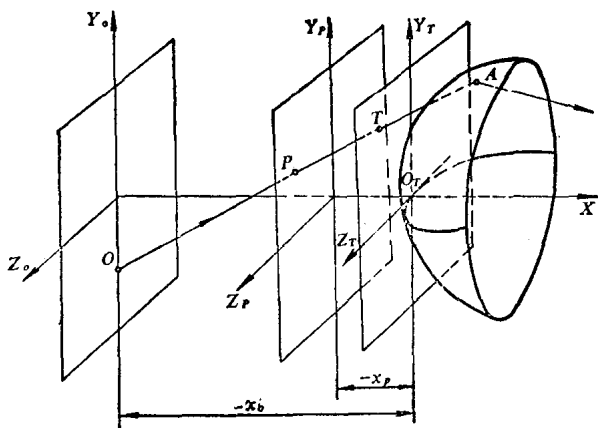


图 1-6 空间光线的起算

物点坐标 $O(x_0, y_0, z_0)$ 为已知， $-x_0 = -L_1$ (物距， $y_0 = H$ (物高)， $z_0 = 0$ (物点在 y_0 轴上))。光瞳面到切平面的距离 $-x_p = -L_p$ (为入瞳距)。光线从物点 O 发出，通过光瞳面上 P 点和切平面上 T 点，与球面交于 $A(x_1, y_1, z_1)$ 点。光线从物点 O 到与光瞳面交点 P 的长度为：

$$\overline{OP} = \pm (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)^{1/2} \quad (1-18)$$