

## 有限远共轭显微镜光镊设计和误差分析\*

任洪亮†

(华侨大学信息科学与工程学院, 厦门 361021)

(2012年8月20日收到; 2012年12月26日收到修改稿)

光镊是研究单分子生物物理特性的独特工具, 因而光镊设备的研发是一个极为重要的课题. 本文根据矩阵光学, 对基于有限远共轭显微镜的光镊操控光路进行计算, 得出了阱位径向操控和轴向操控方程, 并分析了光束调控系统、共焦系统后置透镜和耦合透镜安装位置误差及物镜轴向位置调整对光镊阱位径向及轴向操控精度的影响. 计算结果显示, 当物镜初级像面和耦合透镜像方焦点完全重合, 光束调控系统和耦合透镜的距离误差对阱位径向和轴向操控精度没有影响. 光镊系统元器件定位不准时, 基于无限远共轭显微镜光镊的阱位径向操控误差和轴向操控误差都小于基于有限远共轭显微镜光镊的阱位径向操控误差和轴向操控误差. 当光镊耦合透镜定位误差控制在小于 10 mm 时, 基于有限远共轭显微镜光镊的径向和轴向操控误差分别小于 5.9% 和 11.4%, 有限远共轭显微镜仍然存在改造为光镊的价值. 本文理论为基于有限远共轭显微镜的光镊设计、改造和操控提供理论和实验指导.

关键词: 光镊, 光学设计, 矩阵, 误差

PACS: 07.60.-j, 87.64.M, 33.80.Gj

DOI: 10.7498/aps.62.100701

## 1 引言

光镊<sup>[1]</sup>自发明后, 在测定驱动蛋白的行走模式<sup>[2]</sup>、测定 DNA 螺旋结构的弹性<sup>[3]</sup>和进行 DNA 打结<sup>[4]</sup>等方面发挥了不可替代的作用, 已经成为生物学家们的一个基本操作工具<sup>[2-5]</sup>, 因而光镊系统设计是一个极为重要的课题. 光镊设计涉及显微光学<sup>[6]</sup>、激光光学<sup>[7]</sup>、荧光光谱学<sup>[8]</sup>、拉曼光谱学<sup>[9]</sup>、光电测量<sup>[10]</sup>和电光控制<sup>[11]</sup>等众多领域, 具有相当高的复杂度. Zhou 等<sup>[12]</sup>研制成功暗场照明光镊, 突破了光镊中被捕获纳米粒子无法直接观察的技术瓶颈. 降雨强等<sup>[13]</sup>研究了在低频率及低采样频率下, 用布朗运动法测量光阱刚度的方法. 这些工作都极大地促进了光镊技术的发展. Fällman 和 Axner<sup>[14]</sup>创造性地提出了保持物镜后瞳充满度的捕获光路设计方案, 但并没有对器件安装位置误差对阱位操控影响进行定量分析.

矩阵光学利用光线转移矩阵进行光线追迹, 形式简洁优美, 在镜头设计<sup>[15]</sup>等光学设计方面发挥

了重要作用. 目前新研制的光镊一般都基于无限远校正光学显微镜, 任洪亮等<sup>[16]</sup>利用矩阵光学对基于无限远校正光学显微镜的光镊阱位操控误差进行了系统分析. 然而众多实验室存在将已有的有限远共轭显微镜改造为光镊的需求. 本文根据矩阵光学原理, 对基于有限远共轭光学显微镜的光镊捕获光路进行计算, 分析了物镜位置调节、透镜和光束调控装置等器件安装误差对光镊阱位径向和轴向操控的影响, 为光镊系统设计和调试提供理论指导.

## 2 光镊捕获光路及阱位操控原理

## 2.1 光镊捕获光路

光镊是利用强会聚激光进行光学操控的工具, 并要求具有显微观察的能力, 因此, 光镊系统中关键器件之一是配备高数值孔径物镜的显微镜. 20 世纪 80 年代以前显微镜主要为有限远共轭光学显微镜, 目前高端显微镜一般为无限远校正光学显微镜. 有限远共轭显微镜是指物平面上点的经物镜成

\* 国家自然科学基金(批准号: 61178015)、福建省自然科学基金(批准号: 2012J05120)、中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: JB-ZR1146)和厦门市科技计划(批准号: 3502Z20113017)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: renhongliang@ustc.edu

像后中间像(即初级像)位置距离物镜后焦面为一个有限值. 无限远校正显微镜是指物镜的物平面上的点经过物镜后成像于无限远处, 也就是说, 由标本通过物镜的光线不在物镜成像, 而是作为无限远

的平行光束进入成像透镜(即辅助透镜), 由成像透镜形成中间像. 构建光镊需要物镜具有高数值孔径, 这类物镜后瞳一般位于物镜后焦面.

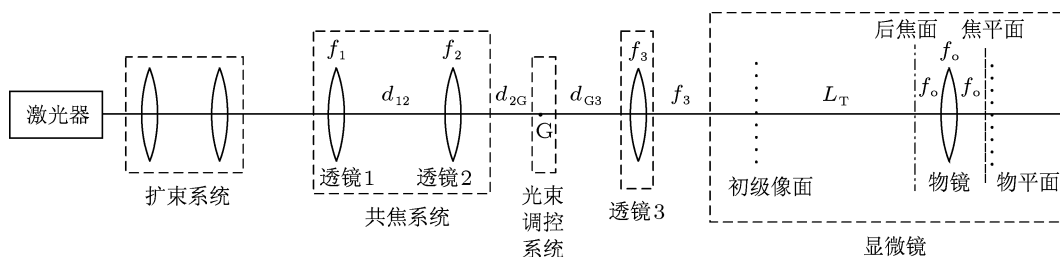


图1 基于有限远共轭显微镜的光镊光路图

图1为基于有限远共轭显微镜的光镊捕获光路示意图, 激光器出射的激光通过扩束系统、共焦系统、光束调控系统和耦合透镜3, 经物镜在物平面会聚, 该会聚点即为光镊捕获场中心. 光束调控系统一般为声光偏转器或者压电偏转镜, 用于偏转光束, 进行光镊阱位径向操控. 光束调控系统也可以用空间光调制器, 对捕获光束进行相位及振幅调制. 本文假设光束调控系统为压电偏转镜.  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  和  $f_0$  分别是透镜1, 透镜2, 透镜3和物镜的焦距,  $d_{12}$  是透镜1和透镜2之间的距离,  $d_{2G}$  是透镜2和光束调控系统之间的距离,  $d_{G3}$  是光束调控系统和透镜3之间的距离,  $L_T$  为光学筒长. 激光器出射光束经过扩束系统后, 准直距离增加, 透镜1和扩束系统间距一般远小于激光准直距离, 因此可以将入射到透镜1上的光束看成是光强具有高斯分布的平行光.

图1中光镊通过轴向移动共焦系统的前置透镜(即透镜1)来微调光束会聚点, 从而实现光镊阱位的轴向调控. Fällman<sup>[14]</sup> 指出实现光镊捕获稳定性的基本条件是在阱位操控的同时要保持物镜后瞳充满度不变, 因而也就要求光镊光路中物镜后瞳共轭面的光斑大小保持恒定.

## 2.2 光镊阱位径向操控

光线在两个参考面之间传播可以用线性方程组来表示<sup>[17]</sup>

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中,  $x_1$  和  $\theta_1$  是分别是入射面光线横向坐标和光线角度,  $x_2$  和  $\theta_2$  分别是出射面光线横向坐标和光

线角度.

光线从光束调控系统传输到物镜后瞳的光线转移方程为

$$\begin{pmatrix} x_{\text{BFP}} \\ \theta_{\text{BFP}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & f_3 + L_T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_3} & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & d_{G3} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_G \\ \theta_G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{L_T}{f_3} & L_T + f_3 - d_{G3} \frac{L_T}{f_3} \\ -\frac{1}{f_3} & 1 - \frac{d_{G3}}{f_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_G \\ \theta_G \end{pmatrix}. \quad (2)$$

如果要保证光束调控系统和物镜后瞳为物像共轭平面, 则需要取矩阵元  $B = 0$ , 即要求矩阵元  $L_T + f_3 - d_{G3} \frac{L_T}{f_3} = 0$ , 可求得光束调控系统和耦合透镜3的距离为

$$d_{G3} = f_3 \frac{L_T + f_3}{L_T}, \quad (3)$$

此时, 物镜后瞳处光斑大小和光束调控系统处光斑大小之比为

$$\frac{x_{\text{BFP}}}{x_G} = -\frac{L_T}{f_3}. \quad (4)$$

通过选择合适的耦合透镜3焦距  $f_3$  可以调整物镜后瞳处光斑半径大小  $|x_{\text{BFP}}|$ . 如果选择  $f_3 = L_T$ , 则  $d_{G3} = 2L_T = 2f_3$ , 这意味着物镜后瞳和光束控制系统与耦合透镜3都相距两倍焦距. 众所周知, 这两个平面之间成倒立实像, 放大倍数为  $-1$ , (2) 式简

化为

$$\begin{pmatrix} x_{\text{BFP}} \\ \theta_{\text{BFP}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -\frac{1}{f_3} & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{\text{G}} \\ \theta_{\text{G}} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$\frac{x_{\text{BFP}}}{x_{\text{G}}} = -1$ , 物镜后瞳处光斑大小和光束调控系统处光斑大小相等.

光束调控系统平面到物镜物平面上的光线方程为

$$\begin{pmatrix} x_{\text{T}} \\ \theta_{\text{T}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & u \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_0} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_{30} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_3} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_{\text{G}3} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{\text{G}} \\ \theta_{\text{G}} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

其中, 物距  $u = \frac{f_0(L_{\text{T}} + f_0)}{L_{\text{T}}}$ , 物镜和透镜 3 距离  $d_{30} = f_3 + L_{\text{T}} + f_0$ , (6) 式化为

$$\begin{pmatrix} x_{\text{T}} \\ \theta_{\text{T}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{f_3 f_0}{L_{\text{T}}} \\ \frac{L_{\text{T}}}{f_3 f_0} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{\text{G}} \\ \theta_{\text{G}} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

光镊径向位置  $x_{\text{T}}$  与光束调控系统引入的光束偏转角  $\theta_{\text{G}}$  关系, 即径向操控方程为

$$x_{\text{T}} = -\frac{f_3 f_0}{L_{\text{T}}} \theta_{\text{G}}. \quad (8)$$

### 2.3 光镊阱位轴向操控

光镊阱位轴向操控分为物镜高度调节法和外界光束调节法两类. 物镜高度调节法通过调节物镜高度可以直接调整光镊阱位和样品池界面的距离, 由于捕获平面和成像面 (即物平面) 保持在同一平面, 系统始终保持成像清晰, 实验过程中, 由于球差的存在, 调节范围一般限制在数十微米, 而且物镜高度调节法无法实现多光镊之间的相对阱位操控. 外界光束调节法则通过外界透镜轴向位移来调控光束会聚点, 实现光镊阱位轴向控制.

光镊设计中一般通过沿光轴移动共焦透镜组中的前置透镜 1 来微调光束发散或者会聚程度, 从而实现光镊阱位的轴向调控, 如果要在调整透镜 1 轴向位置时保持物镜后瞳充满度不变, 则要求物镜后瞳共轭面光束调控系统处的光斑稳定. 相应地, 光束调控系统处光斑大小  $x_{\text{G}}$  与透镜 1 处光斑大小  $x_1$  之比  $\frac{x_{\text{G}}}{x_1}$  为常数, 这要求光束调控系统位于共焦

透镜组中后置透镜 2 的像方焦点处<sup>[14]</sup>, 即  $d_{2\text{G}} = f_2$ , 因而,  $x_{\text{G}} = -\frac{f_2}{f_1} x_1$ .

透镜 1 将准直光会聚到透镜 1 的像方焦点, 通过移动透镜 1 来操控光镊轴向阱位, 实际上是改变移动透镜 1 像方焦点和透镜 2 物方焦点的距离  $\Delta d_{12}$ . 光线从透镜 1 像方焦点到物镜物平面的光线转移矩阵为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & u \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_0} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_{30} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_3} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_{\text{G}3} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & f_2 \\ -\frac{1}{f_2} & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f_3 f_0}{L_{\text{T}} f_2} & 0 \\ 0 & \frac{L_{\text{T}} f_2}{f_3 f_0} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

其中, 矩阵元  $B = 0$ , (9) 式为物像共轭矩阵, 横向放大率为

$$\beta = \frac{f_3 f_0}{L_{\text{T}} f_2}, \quad (10)$$

纵向放大率与横向放大率的关系为  $\gamma = \beta^2$ , 由此得光镊阱位轴向操控方程为

$$\Delta z_{\text{T}} = \left( \frac{f_3 f_0}{L_{\text{T}} f_2} \right)^2 \Delta d_{12}. \quad (11)$$

类似推导可得移动透镜 3 操控光镊轴向阱位的方程为

$$\Delta z_{\text{T}} = \left( \frac{f_0}{L_{\text{T}}} \right)^2 \Delta d_{30}, \quad (12)$$

其中,  $\Delta d_{30}$  为透镜 3 的移动距离. 当物镜放大倍数  $M_0 = 100$ ,  $\frac{f_0}{L_{\text{T}}} = \frac{1}{M_0} = 0.01$ , 透镜 3 移动精度一般可达  $\Delta d_{30} = 1 \mu\text{m}$ , 移动透镜 3 来操控光镊轴向阱位精度可达  $0.1 \text{ nm}$ , 具有很高的精度. 但是如果阱位轴向动态操控范围要达到  $30 \mu\text{m}$ , 透镜 3 移动范围要达到  $300 \text{ mm}$ , 物镜后瞳光斑半径改变为  $x'_{\text{BFP}} = x_{\text{BFP}} + 300 \text{ mm} \times a \tan\left(\frac{x_{\text{BFP}}}{L_{\text{T}}}\right)$ , 即物镜后瞳处光斑半径从  $3 \text{ mm}$  变为  $8.6 \text{ mm}$ , 光场分布会有很大改变, 光镊刚度将剧烈变化, 因而移动透镜 3 来操控光镊轴向阱位应限于数微米动态范围. 物镜高度调节  $30 \mu\text{m}$ , 物镜后瞳处光斑半径只有  $0.6 \mu\text{m}$  的变化, 可以认为不会改变物镜后瞳充满度.

### 3 光镊中器件安装误差对阱位操控精度的影响

图 2 为光镊中器件安装误差示意图, 物镜高度调节范围设为  $\varepsilon_1$ , 用于调节成像面和样品池界面距离. 耦合透镜 3 由于存在定位误差, 其像方焦点和物镜理想初级像面距离为  $\varepsilon_2$ , 耦合透镜 3 像方焦点和物镜理想初级像面总偏移为  $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ . 相应地, 物距应该改变为

$$u' = \frac{f_0(L_T + f_0 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{L_T + \varepsilon_1 + \varepsilon_2}, \quad (13)$$

一般光镊配置中,  $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \leq 0.03 \text{ mm} + 10 \text{ mm} \approx 10 \text{ mm}$ ,  $L_T = 160 \text{ mm}$ ,  $f_0 = \frac{L_T}{M_0} = 1.60 \text{ mm}$ , 物镜物平面到物镜距离  $u = \frac{f_0(L_T + f_0)}{L_T} = 1.616 \text{ mm}$ , 而物镜与透镜 3 的距离发生了变化后, 物镜实际物平面 (即实际新阱位面) 到物镜距离为  $u' = \frac{f_0(L_T + f_0 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{L_T + \varepsilon_1 + \varepsilon_2} = 1.615 \text{ mm}$ , 得阱位面移动距离为  $u - u' = 1.0 \mu\text{m}$ .

耦合透镜 3 和光束调控系统之间的距离与设计值偏移  $\delta$ , 光束调控系统和透镜 2 像方焦点的偏移为  $\xi$ . 光束调控系统到物镜新阱位面的光线方程为

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x'_T \\ \theta'_T \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & u' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_0} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_{30} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_3} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_{G3} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} 1 & \delta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_G \\ \theta_G \end{pmatrix} \end{aligned}$$

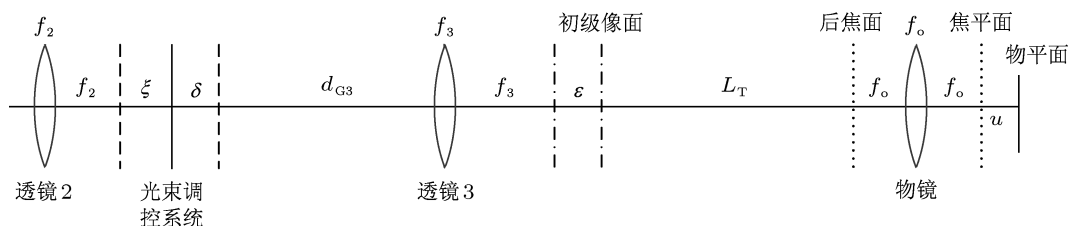


图 2 光镊中器件安装误差示意图

$$= \begin{pmatrix} 0 & -\frac{f_3 f_0}{L_T + \varepsilon} \\ \frac{L_T + \varepsilon}{f_3 f_0} & \frac{\delta(L_T + \varepsilon)}{f_3 f_0} + \frac{\varepsilon f_3}{L_T f_0} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_G \\ \theta_G \end{pmatrix}, \quad (14)$$

当物镜初级像面和透镜 3 像方焦点完全重合,  $\varepsilon = 0$ , (14) 式化为

$$\begin{pmatrix} x'_T \\ \theta'_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{f_3 f_0}{L_T} \\ \frac{L_T}{f_3 f_0} & \frac{\delta L_T}{f_3 f_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_G \\ \theta_G \end{pmatrix}. \quad (15)$$

径向操控方程为  $x'_T = -\frac{f_3 f_0}{L_T} \theta_G$ , 与  $\delta$  无关, 表明当物镜初级像面和透镜 3 像方焦点完全重合, 光束调控系统和耦合透镜 3 距离  $d_{G3}$  存在的误差  $\delta$  对径向操控精度没有影响.

当  $\varepsilon \neq 0$ , 径向操控方程为

$$x'_T = -\frac{f_3 f_0}{L_T + \varepsilon} \theta_G, \quad (16)$$

仪器经调试后, 一般透镜的安装位置误差不大于  $10 \text{ mm}$ . 样品池折射率和粒子周围液体折射率的不匹配对光镊捕获力影响较大<sup>[18]</sup>, 物镜轴向位置调整行程一般不大于  $30 \mu\text{m}$ . 因此假设  $f_3 = L_T = 160 \text{ mm}$ , 物镜高度调节  $\varepsilon_1 = 30 \mu\text{m}$ , 耦合透镜 3 定位误差  $\varepsilon_2 = 10 \text{ mm}$ ,  $\varepsilon_1 \ll \varepsilon_2$ ,  $\varepsilon \approx 10 \text{ mm}$ , 则阱位径向操控相对误差为  $5.9\%$ . 而基于无限远共轭显微镜的光镊阱位径向操控误差小于  $1\%$ <sup>[16]</sup>, 由此可见, 在阱位径向操控方面基于无限远共轭显微镜的光镊优于基于有限远共轭显微镜的光镊. 并且误差项随  $\varepsilon$  的增加而增加, 误差由耦合透镜 3 定位不准引起, 因而要求耦合透镜 3 具有较高的定位精度. 物镜高度调节值  $\varepsilon_1 = 30 \mu\text{m} \rightarrow 0$ ,  $x'_{Te1} = -\frac{f_3 f_0}{L_T + \varepsilon_1} \theta_G \rightarrow -\frac{f_3 f_0}{L_T} \theta_G$ , 可以认为物镜高度调整不会影响光镊径向位置操控.

光线从透镜 1 像方焦点到物镜新阱位面的光线转移矩阵为

$$\begin{aligned}
 & \begin{pmatrix} x'_T \\ \theta'_T \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 1 & u' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_0} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_{30} + \varepsilon \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 & \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_3} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_{G3} + \delta + \xi \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 & \times \begin{pmatrix} 0 & f_2 \\ -\frac{1}{f_2} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{L_2} \\ \theta_{L_2} \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \frac{f_3 f_0}{f_2(L_T + \varepsilon)} & 0 \\ -\frac{\varepsilon f_3}{f_2 L_T f_0} - \frac{(L_T + \varepsilon)(\delta + \xi)}{f_2 f_3 f_0} & \frac{f_2(L_T + \varepsilon)}{f_3 f_0} \end{pmatrix} \\
 & \times \begin{pmatrix} x_{L_2} \\ \theta_{L_2} \end{pmatrix}. \quad (17)
 \end{aligned}$$

当物镜初级像面和透镜 3 像方焦点完全重合,  $\varepsilon = 0$ , (17) 式化为

$$\begin{pmatrix} x'_T \\ \theta'_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f_3 f_0}{f_2 L_T} & 0 \\ -\frac{L_T(\delta + \xi)}{f_2 f_3 f_0} & \frac{f_2 L_T}{f_3 f_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{L_2} \\ \theta_{L_2} \end{pmatrix}. \quad (18)$$

矩阵元  $B = 0$ , 物像共轭关系成立, 纵向放大率  $\gamma = \beta^2 = A^2 = \left(\frac{f_3 f_0}{f_2 L_T}\right)^2$ , 光镊阱位轴向操控关系为  $\Delta z_T = \left(\frac{f_3 f_0}{L_T f_2}\right)^2 \Delta d_{12}$ , 与定位误差为零时完全一致, 暗示光束调控系统存在一定位置误差时不会影响光镊阱位轴向操控精度。

当  $\varepsilon \neq 0$ , (17) 式中矩阵元  $B = 0$ , 物像共轭关系仍然严格成立, 纵向放大率为

$$\gamma = \left(\frac{f_3 f_0}{f_2(L_T + \varepsilon)}\right)^2, \quad (19)$$

光镊阱位轴向操控关系为

$$\Delta z_T = \left(\frac{f_3 f_0}{f_2(L_T + \varepsilon)}\right)^2 \Delta d_{12}. \quad (20)$$

当  $\varepsilon = 10 \text{ mm}$ , 透镜 2 焦距为  $f_2 = 60 \text{ mm}$ , 透镜 3 焦距为  $f_3 = L_T = 160 \text{ mm}$ , 阱位轴向操控相对误差达到 11.4%, 即在光镊定位不准时, 基于有限远共轭显微镜光镊的轴向操控精度小于基于无限远共轭显

显微镜光镊的轴向操控精度<sup>[16]</sup>. 由于物镜高度调整  $\varepsilon_1 \leq 30 \text{ }\mu\text{m}$ , 误差几乎为零, 可以认为不会影响光镊轴向位置操控。

样品池中的溶液介质折射率为  $n_m$ , 物镜匹配油折射率为  $n_o$ , 当  $n_m \neq n_o$ ,  $n_m$  与  $n_o$  失配会引起球差, 从而导致阱力下降, 光阱性能变弱<sup>[18]</sup>. 在近轴区, 轴向阱位变化  $\Delta z'_T$  为

$$\Delta z'_T = \frac{n_m}{n_o} \Delta z_T. \quad (21)$$

## 4 结论

本文把所有透镜和物镜都看成是理想薄透镜, 根据矩阵光学, 对基于有限远显微镜的光镊光路进行计算, 实际上高数值孔径的物镜与简单薄透镜有较大差异, 因此以上分析和实际情况有一定的偏差, 主要适用于近轴区. 本文分析了物镜轴向位置调整, 以及光束调控系统、共焦系统后置透镜和耦合透镜等器件安装位置误差对光镊阱位操控精度的影响. 计算结果表明: 物镜高度调整基本不会影响光镊阱位径向操控和轴向操控; 当物镜初级像面和耦合透镜 3 像方焦点完全重合, 光束调控系统和耦合透镜 3 距离存在的误差  $\delta$  对径向操控和轴向操控精度都没有影响; 当耦合透镜 3 定位偏移量为  $\varepsilon_2 = 10 \text{ mm}$ , 阱位径向操控相对误差达到 5.9%, 阱位轴向操控定位相对误差达到 11.4%, 即耦合透镜 3 安装位置误差对光镊阱位轴向操控精度影响最大, 对径向操控精度影响相对较小. 基于无限远共轭显微镜光镊的阱位径向及轴向操控误差都小于基于有限远共轭显微镜光镊的阱位径向及轴向操控误差, 并且由于无限远共轭显微镜可以在光路中方便地插入光学元件, 因此新建光镊首选无限远共轭显微镜. 但当器件安装误差控制在数个毫米时, 有限远共轭显微镜基础上改建的光镊的轴向和径向操控相对误差都可以控制在 10% 以内, 因此仍然存在将有限远共轭显微镜改造为光镊的价值. 本文理论为基于有限远显微镜的光镊设计、改造和调整提供重要的理论指导。

## 附录 A1

样品经物镜成像到初级像面的转移矩阵为

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 &= \begin{pmatrix} 1 & L_T + f_o \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_o} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & u \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} -\frac{L_T}{f_o} & L_T + f_o - u\frac{L_T}{f_o} \\ -\frac{1}{f_o} & 1 - \frac{u}{f_o} \end{pmatrix}, \quad (22)
 \end{aligned}$$

样品经物镜成像, 因而矩阵元  $B = L_T + f_o - u\frac{L_T}{f_o} = 0$ , 可知物距为

$$u = \frac{f_o(L_T + f_o)}{L_T}, \quad (23)$$

由于  $f_o = \frac{L_T}{M_o} = \frac{L_T}{100} \ll L_T$ ,  $M_o$  为物镜放大率, 可知  $u \approx f_o$ ,

且  $f_o < u < 2f_o$ , 成像矩阵为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{L_T}{f_o} & 0 \\ -\frac{1}{f_o} & -\frac{f_o}{L_T} \end{pmatrix}. \quad (24)$$

光线从物镜初级像面到物平面的转移矩阵为成像矩阵  $M$  的逆矩阵

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} -\frac{f_o}{L_T} & 0 \\ -\frac{1}{f_o} & -\frac{L_T}{f_o} \end{pmatrix}. \quad (25)$$

- [1] Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E, Chu S 1986 *Opt. Lett.* **11** 228
- [2] Svoboda K, Schmidt C F, Schnapp B J, Block S M 1993 *Nature* **365** 721
- [3] Gross P, Laurens N, Oddershede L B, Bockelmann U, Peterman E J G, Wuite G J L 2011 *Nat. Phys.* **7** 721
- [4] Yasuharu A, Ryohei Y, Ken-ichirou A, Yoshie H, Hidetake M, Kazuhiko K J, Hiroyasu I 1999 *Nature* **399** 446
- [5] Dholakia K, Čížmár T 2011 *Nat. Photon.* **5** 335
- [6] Overton G 2009 *Laser Focus World* **45** 17
- [7] Vanzi F, Capitano M, Sacconi L, Stringari C, Cicchi R, Canepari M, Maffei M, Piroddi N, Poggesi C, Nucciotti V, Linari M, Piazzesi G, Tesi C, Antolini R, Lombardi V, Bottinelli R, Pavone F S 2006 *J. Muscle Res. Cell M* **27** 469
- [8] Mishra Y N, Ingle N, Mohanty S K 2011 *J. Biomed. Opt.* **16** 105003
- [9] Kong L B, Zhang P F, Wang G W, Yu J, Setlow P, Li Y Q 2011 *Nat. Protoc.* **6** 625
- [10] Farre A, Marsa F, Montes-Usategui M 2012 *Opt. Express* **20** 12270
- [11] Valentine M T, Guydosh R, Gutierrez-Medina B, Fehr A N, Andreas-son J O, Block S M 2008 *Opt. Lett.* **33** 599
- [12] Zhou J H, Tao R Z, Hu Z B, Zhong M C, Wang Z Q, Cai J, Li Y M 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 068701
- [13] Jiang Y Q, Guo H L, Liu C X, Li Z L, Cheng B Y, Zhang D Z, Jia S T 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1721 (in Chinese) [降雨强, 郭红莲, 刘春香, 李兆霖, 程丙英, 张道中, 贾锁堂 2004 物理学报 **53** 1721]
- [14] Fällman E, Axner O 1997 *Appl. Opt.* **36** 2107
- [15] Zhao Y Z, Sun H Y, Song F H, Tang L M, Wu W W, Zhang X, Guo H C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2284 (in Chinese) [赵延仲, 孙华燕, 宋丰华, 唐黎明, 吴伟伟, 张曦, 郭惠超 2008 物理学报 **57** 2284]
- [16] Ren H L, Ding P F, Li X Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 210701 (in Chinese) [任洪亮, 丁攀峰, 李小燕 2012 物理学报 **61** 210701]
- [17] Lü B D 2003 *Laser Optics Beam Characterization, Propagation and Transformation, Resonator Technology and Physics* (3rd Ed.) (Beijing: Higher Education Press) p34 (in Chinese) [吕百达 2003 激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理 (第三版) (北京: 高等教育出版社) 第 34 页]
- [18] Xu S H, Li Y M, Lou L R 2006 *Chin. Phys.* **15** 1391

# Design and error analysis for optical tweezers based on finite conjugate microscope\*

Ren Hong-Liang<sup>†</sup>

(College of Information Science and Engineering of Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

(Received 20 August 2012; revised manuscript received 26 December 2012)

## Abstract

Optical tweezers are unique tools for studying biophysical properties of single molecules. Design and construction of optical tweezers are very important. The optical path, the radial manipulation equation and axial manipulation equation of optical tweezers based on a finite conjugate microscope system are calculated using matrix optics. The influences of axial position adjustment of the objective, the installation location error of the coupling lens, the installation location error of the laser beam control system, and the installation location error of the confocal system lens' on radial trap position manipulation accuracy and axial trap position manipulation accuracy are analyzed. The results show that axial position adjustment of objective introduces no error in radial and axial trap position manipulation. The misalignment of laser beam control system has no effect on the radial manipulation, nor on axial manipulation when the coupling lens maintains alignment. It is concluded that misalignment of components of optical tweezers based on a finite conjugate microscope system has a greater effect on trap position manipulation error than misalignment of components of optical tweezers based on an infinite conjugate microscope system. The radial trap position manipulation error is less than 5.9% and the axial trap position manipulation error is less than 11.4% when the coupling lens installation location error is less than 10 mm. It is shown that optical tweezers can be modified from a finite conjugate microscope system. The formulations provide the basis for theoretical analysis of experimental alignment and adjustment.

**Keywords:** optical tweezers, optical design, matrix, error

**PACS:** 07.60.-j, 87.64.M, 33.80.Gj

**DOI:** 10.7498/aps.62.100701

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61178015), the Natural Science Foundation of Fujian Province, China (Grant No. 2012J05120), the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. JB-ZR1146), and the Science and Technology Program of Xiamen, China (Grant No. 3502Z20113017).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: renhongliang@ustc.edu