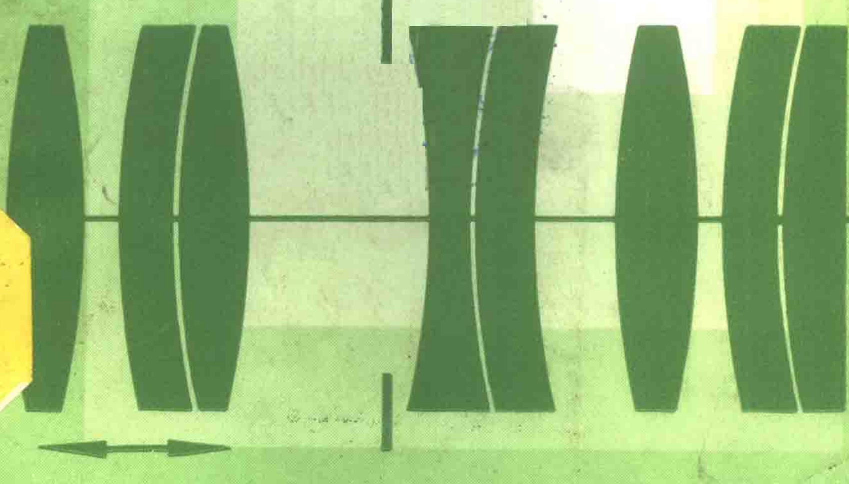
变焦距光学系统设计

陶纯堪 著



变焦距光学系统设计

陶纯堪 著

国防工业出版社

内容简介

本书是一本设计变焦距光学系统的专著，是作者在这方面工作的总结。本书详细介绍了作者提出的“变焦过程的微分方程”，该方程不仅高度概括了变焦过程的运动规律，而且用它容易设计出外形尺寸紧凑、倍率大、像质符合要求的变焦距光学系统。书中还介绍了作者提出的用h-h_p图和孔径图结合分析变焦距光学系统光束结构的方法，这种方法对选定初始形式、决定校正像差方案和判明系统渐晕情况，均十分有用。

本书不仅论述了概念和方法，而且还举例说明各种类型的设计过程，并给出结果。

本书供从事光学仪器设计的科研人员、有关工厂的设计人员、高等院校有关专业的师生及具有相应基础且与变焦距光学系统有关的人员参考。

变焦距光学系统设计

陶纯堪 著

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行　各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168　1/32　印张 5 3/4　148千字

1988年7月第一版　1988年7月第一次印刷　印数：0,001—1,400册

ISBN 7-118-00012-4/TN1　定价：2.35元

前　言

随着人们生产实践活动领域的扩展和深入，提出了既要能对被观察物体作大区域小倍率的概观，同时又能对它作小区域大倍率的仔细观察，变焦距光学系统就是在这样的要求下产生的。

它的历史可追溯到最早于1902年出现的放映物镜[1]。

变焦距光学系统从原理方案上来讲有两种：一为光学补偿；另一为机械补偿，或称为绝对补偿。在机械加工精度不断提高的今天，完全可以保证凸轮的准确性以使像面稳定。因而后者在目前已成为变焦系统中的一种最基本类型。本书仅讨论后者。

本书对变焦系统发展史上几种基本分析方法作了概述，强调了把变焦过程作为一个以各组份的倍率为参量的微分过程来理解。全书主要讨论了涉及变焦系统设计全局的四个基本问题：

（1）变焦系统变焦方程和对变焦概念的一些讨论；

（2）从变焦方程出发，分析变焦系统的高斯解区问题，以求选准高斯解，减少设计工作中的盲目性；

（3）用h-h_p图和孔径图，把变焦系统各组份的移动，与它们的第一和第二辅助光线高以及第一和第二辅助光线偏角联系起来，推断变焦系统在各焦距位置的初级像差状况；

（4）变焦系统消像差设计及几个变焦系统设计例。

纵观变焦系统设计的几个阶段，实践证明前述第（4）个问题是重要的，然而前三个问题的影响却是深刻的。

1973年3月作者在西安应用光学研究所一次变焦系统设计的初次尝试和随之的总结[2]构成本书的一些基本观点，实践表明一种好的变焦系统分析方法应当达到：既便于使用者用它精确计算；也便于用它与变焦运动中的物理概念联系，即便于作概念判断。只有达到这两点的分析方法才便于使用，才能推广，从而才具有生

命力。本书介绍的这种方法，则兼有这两个特点。从1973年至今，各工厂、研究所从事变焦系统研制的单位广为应用这种方法便是一个证明，当然这个方法还要不断完善和发展。

在作者从事变焦系统设计过程中，不断得到中国科学院西安光学精密机械研究所薛鸣球所长的热忱指导，他关于变焦系统的有关论述[3][4][5][6]是本书的基本参考文献。在本书的编写过程中又承他仔细审阅，对此表示深切感谢。

西安应用光学研究所姚多舜同志以及华东工学院901教研室冯海友同志均热情提供描光路程序。902教研室游明俊、迟泽英和沈伟生等同志从百忙中为本书的出版做了大量工作。绘图室张翔争同志完成了全部描图。在此一并表示谢忱。

为便于阅读，请读者注意：

（1）书中经常使用 l，lm，m，sm，s 作为下角标，它们分别表示长焦，次长焦，中焦，次短焦，短焦等焦距位置；

（2）书中凡提及长度量，其单位均为mm。

最后，由于作者水平所限，书中定有不少缺点和不足之处，望读者多提宝贵意见。

作　　者

目 录

第一章　变焦系统变焦过程的微分方程

本章的中心是介绍变焦系统变焦过程的微分方程，或称变焦方程。即用一个微分方程把变焦系统的运动规律和各参数统一起来描述。

§1-1　变焦系统工作过程和对它的基本要求

变焦系统要改变焦距，而每个组份焦距一经设计与加工之后，就是固定不变的，要变焦，只能改变各组份之间的间隔。

改变组份之间的间隔，系统的像面随之移动。为了消除像面的有害移动，需要有的组份作抵消像面移动的补偿运动，从而产生了不同的补偿形式。

几个运动组份固连在一起作同方向的移动，达到在变焦的同时能减少像面移动，这种系统叫做光学补偿系统。此种系统，本书不研究。各个运动组份按不同的运动规律作较复杂的移动，达到完全防止[1]像面移动。这种系统叫做机械补偿系统。它需要用机械加工办法加工成准确的凸轮，保证运动组份的准确移动，从而有效地防止有害的像面移动。现在，由于机械加工水平完全有保证，从而这种补偿形式的系统也就越来越显示出它的优越性。目前，大多数变焦系统都属于这种补偿形式。

图1-1-1是一个变焦系统。ϕ_1和ϕ_4在变焦过程中是固定不动的，分别叫前固定组和后固定组。ϕ_2和ϕ_3叫做变倍组和补偿组。在变焦过程中它们各自按自己的运动规律移动q和Δ，移动量用

---

[1] 至少理论上能完全防止像面移动。

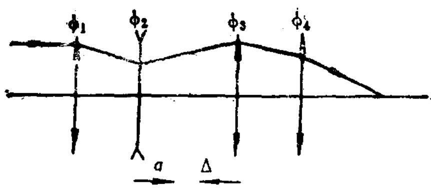


图1-1-1　变焦系统示意图

凸轮来控制。变倍组沿光轴作微小移动q，补偿组则相应地沿光轴作微小补偿移动Δ，从而保证时时没有残余的像面移动。

机械补偿系统有多种类型，但基本的是两种：其一，正组补偿变焦系统，即补偿组ϕ_3具有正的光焦度；其二，负组补偿变焦系统，即补偿组ϕ_3具有负的光焦度。

变焦系统的使用，应满足如下基本要求：

（1）均匀改变焦距；

（2）变焦过程中像面保持稳定；

（3）相对孔径基本保持不变；

（4）成像质量符合要求。

§1-2　变焦过程中的几个重要规律

由变焦系统的两个基本要求，即前述第（1）和第（2）项，我们发现：在分析变焦组份运动中起支配作用的是如下四个规律：

1. 系统焦距的改变是依靠组份之间间隔的改变来实现的。

由高斯光学知，由两个组份ϕ_1和ϕ_2构成的系统，如图 1-2-1 所示，其总光焦度为

$$\varphi=\varphi_1+\varphi_2-d\varphi_1\varphi_2 \tag{1-2-1}$$

由于组份ϕ_1和ϕ_2的光焦度φ_1和φ_2是不能改变的，欲改变此系统的焦距，即改变它的总光焦度φ，只能依赖于改变它们相互之间的间隔d来实现。变焦系统焦距的改变，就是利用这个道理。系统总焦距改变的主动因素是改变活动组份相互之间的间隔。

由此进一步引伸得出：在变焦系统的变倍组ϕ_2和补偿组ϕ_3的可能的几条补偿像面的曲线中，使相互间隔改变最迅速的那一条曲线，必然是使系统焦距变化最迅速的补偿曲线。

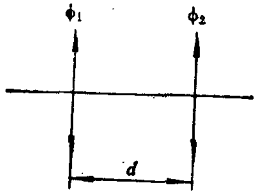


图1-2-1　总光焦度与间隔的关系

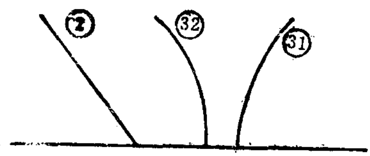


图1-2-2　补偿曲线

如图1-2-2，补偿组ϕ_3可能沿㉜曲线移动，也可能沿㉛曲线移动。可以发现，当补偿组ϕ_3沿㉛曲线移动时，使它与变倍组之间的间隔改变快，因而总焦距变化快。相反，补偿组若沿㉜曲线移动时，间隔改变慢。所以选㉛曲线作为补偿曲线。

2. 系统像面的稳定，即像面位移的补偿依赖于各个运动组份共轭距改变量的总和为零来实现，即

$$\sum_i \Delta L_i = 0 \qquad (1\text{-}2\text{-}2)$$

图1-2-3是由ϕ_1和ϕ_2两个组份组成的系统。物点为A，像点为A'。ϕ_1和ϕ_2的共轭距分别为L_1和L_2，合成共轭距为$\overline{AA'}$

$$\overline{AA'} = L_1 + L_2$$

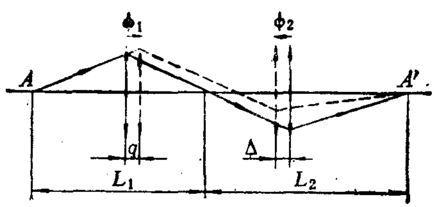


图1-2-3　共轭距关系图

如果ϕ_1向右移动q，它的共轭距L_1改变ΔL_1。为了要保持像点仍为A'不变，那么ϕ_2就要作相应的移动Δ，以使它的共轭距L_2变化，其改变量为$\Delta L_2=-\Delta L_1$，从而使像面不动。所以要保持像面不动，必须$\sum\limits_i \Delta L_i=0$，即各个组份引起的共轭距改变量应能完全抵消。这里式（1-2-2）是对所有运动组份取和。如不满足此式，必有剩余像面位移存在，最终像面将不稳定。后面我们会看到，无论变焦系统有多复杂，式（1-2-2）均成立。

3．物像交换原则

由前知：变焦的任何瞬间都要求其像面移动得到补偿。然而，对一个已知的物点和要求的像点，我们要问：一个组份有几个位置可实现像面补偿？要回答这个问题就要用物像交换原则。在此我们只简单介绍它，其详细运用留待以后各节再讲。

图 1-2-4(a)，h_1和h_1'为组份在位置A时的物高和像高。l_1和l_1'为此时的物距和像距。u_1和u_1'分别为物方和像方孔径角。则倍

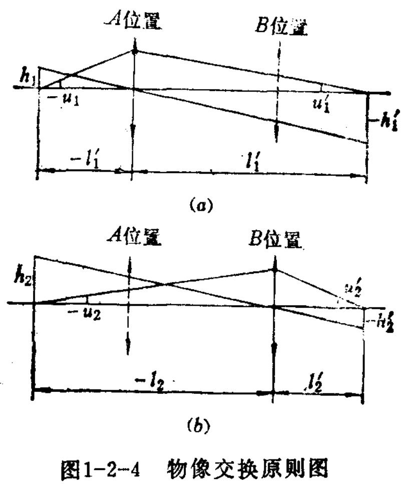


图1-2-4　物像交换原则图

（a）透镜处于A位置；

（b）透镜处于B位置。

率为

$$m_1=\frac{h_1'}{h_1}=\frac{l_1'}{l_1}=\frac{u_1}{u_1'} \tag{1-2-3}$$

图1-2-4（b），当组份移动到B位置时，对应的量是h_2，h_2'，l_2, l_2', u_2, u_2'。此时的倍率m_2为

$$m_2=\frac{h_2'}{h_2}=\frac{l_2'}{l_2}=\frac{u_2}{u_2'} \tag{1-2-4}$$

这两种情况下共轭距没有变化。如果我们取$l_1'=-l_2$，$l_1=-l_2'$，即把物和像互相交换，有

$$m_1=\frac{l_1'}{l_1}=\frac{(-l_2)}{(-l_2')}=\frac{1}{m_2} \tag{1-2-5}$$

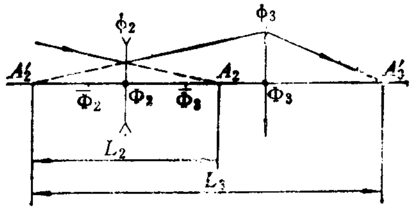
前后两个位置的倍率之比，即变焦比Γ为

$$\Gamma=\frac{m_1}{m_2}=\frac{m_1}{\dfrac{1}{m_1}}=m_1^2 \tag{1-2-6}$$

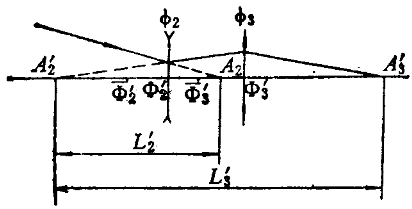
这说明：对任何一个组份，当它由A位置移到B位置时，其共轭距不变，倍率由m_1变到$m_2=1/m_1$。或者说，对任何一个组份都存在一种现象：该组份可以有两个位置实现共轭距不变，即物面和像面稳定不变，而在这两个位置上倍率互为倒数。这相当于在保持共轭距不变的同时，把物面和像面交换一下，这就是物像交换原则。

如图1-2-5（a），在该时刻ϕ_2的共轭距为L_2，ϕ_2有两个保持L_2不变的物像交换位置Φ_2和$\overline{\Phi}_2$。ϕ_3的共轭距为L_3，它的物像交换位置为Φ_3和$\overline{\Phi}_3$。图1-2-5（b），ϕ_2的新共轭距L_2'，它此时的物像交换位置为Φ_2'和$\overline{\Phi}_2'$。Φ_3'和$\overline{\Phi}_3'$是ϕ_3此时的物像交换位置。

所以，在变焦系统的整个变焦移动过程中，每个活动组份每瞬间都有两个位置是它的物像交换位置。若把每个瞬间的位置连接起来，ϕ_2有两条物像交换位置曲线，而ϕ_3也有两条物像交换位置曲线。从而，对每个活动组份凡提及物像交换原则，一定有两



(a)



(b)

图1-2-5 正组补偿物像交换原则例图

（a）某一时刻；（b）另一时刻。

条孪生的曲线，它们一定是成双成对地出现。变倍组有它自己的两条曲线，补偿组亦有其两条曲线。凡活动组份，都有自己的两条补偿曲线。

物像交换原则有如下特点：

（1）变焦系统的任何运动组份每时每刻都有两个物像交换位置，对每个运动组份都存在孪生的两条补偿曲线；

（2）组份在此两个物像交换位置上的倍率互为倒数，即 $m_1 = 1/m_2$；

（3）变焦比 $\Gamma = m_1^2$，即 $m_1 = \pm\sqrt{\Gamma}$，$m_2 = \pm\dfrac{1}{\sqrt{\Gamma}}$；

（4）组份在这一对物像交换位置上共轭距不变。

4. 当运动组份处于倍率 $m = -1$ 时，对分析变焦移动有至关重要的意义。

由几何光学的高斯公式知

$$\frac{1}{l'}-\frac{1}{l}=\frac{1}{f'} \qquad (1\text{-}2\text{-}7)$$

式（1-2-7）两边同乘 l 得

$$l=f'\left(\frac{1}{m}-1\right) \qquad (1\text{-}2\text{-}8)$$

式（1-2-7）两边同乘l'得　$l'=f'(1-m)$ (1-2-9)

共轭距

$$L=l'-l=f'(1-m)-f'\left(\frac{1}{m}-1\right)$$

所以

$$L=f'\left(2-\frac{1}{m}-m\right) \qquad (1\text{-}2\text{-}10)$$

由式（1-2-10）知，L随m的变化关系是三条曲线之和。第一条，$L=2f'$，是平行于m轴的直线。第二条，$L=-f'm$，是一条过坐标原点的倾斜直线。第三条，$L=-f'\frac{1}{m}$，是一条双曲线。三条曲线加和的结果，极值发生在$m=-1$处，如图1-2-6所示。

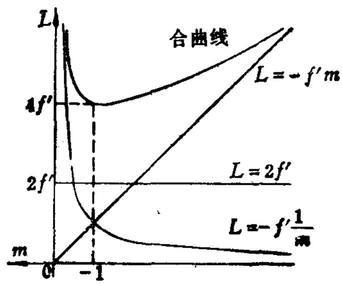


图1-2-6　共轭距L与m的关系

此时的共轭距取极小值

$$L_{min}=4f' \qquad (1\text{-}2\text{-}11)$$

由此可知，对任何一个焦距为f'的组份来说，它可以提供任意大的共轭距。合曲线表明：无穷大的共轭距发生在两个位置：（1）

$m=0$ 时，$L=\infty$，即平行光入射，像点在后焦点。（2）$m=-\infty$ 时，$L=\infty$，即物在前焦点，像点在∞。然而，最小共轭距却为一个确定值$L_{min}=4f'$。要组份提供出比$4f'$更小的共轭距是不可能的。$m=-1$ 这个特殊点成为我们分析变焦运动的关键点。

§1-3 变焦系统变焦方程和对它的讨论

从分析变焦系统的全局，有四个问题是较重要的：

（1）变焦系统变焦方程是说明变焦系统在变焦和像面位移得到补偿条件下，运动组份的运动方程；

（2）基于变焦方程所获得的高斯解区.这种高斯解只是从使补偿曲线平滑所给出的高斯解；

（3）分析变焦系统的光束结构和渐晕情况，找出有利于消像差设计的高斯解；

（4）消像差设计得出系统最终结构参数。

设计实践证明：高斯解的取值恰当与否对变焦系统设计的全过程影响是深刻的，讨论变焦方程和由它而定的高斯解区十分重要。

恩格斯指出："只有用微分运算才能使自然科学有可能用数学来不仅仅表明状态，并且也能用数学来表明过程：运动。"（《自然辩证法》第172页）把变焦过程理解为一个连续的微分过程是我们的出发点。机械补偿，即绝对补偿，必须用组份的非线性移动来达到像面位移的完全补偿，构成运动的制约条件。微分过程只能用微分来描写，而要达到像面补偿这个制约条件启发我们认识到：必定存在一个微分方程。

（一）方程的建立

我们先从只有 4 个组份的系统入手。由于只有运动组份才产生像面位移，所以我们只分析运动组份。

为了统一符号起见，约定：运动组份向右的移动量为正，反之为负。

对变倍组ϕ_2，物点不动，由于ϕ_2微分移动dq，产生像点微小

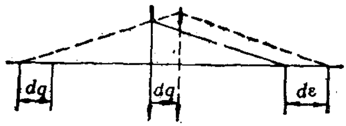


图1-3-1 $d\varepsilon$和dq的关系

移动$d\varepsilon$。若以ϕ_2的倍率m_2表示$d\varepsilon$，则为

$$d\varepsilon=(1-m_2^2)dq \tag{1-3-1}$$

对这个公式可理解为：首先假设像点随物点以及组份一起向右移动dq；然后设物点返回原位，像点相应向左移动m_2^2dq。所以像点实际相对于原位置移动$(1-m_2^2)dq$。此式中m_2^2为纵向放大率。

由式（1-3-1）知道：$|m_2|<1$时，$d\varepsilon$和dq同方向；$|m_2|>1$时，$d\varepsilon$和dq反方向。这是因为倍率由m_2到$1/m_2$，只有在此两端点时共轭距相同[1]，除此而外，共轭距均变短。当$m_2=-1$时，共轭距达到最短，以此点为分界点，$d\varepsilon$和dq由同向到反向。

由于ϕ_2的移动，引起整个运动组份的像面移动为

$$m_3^2(1-m_2^2)dq \tag{1-3-2}$$

由于ϕ_3移动，引起整个运动组份的像面移动为

$$(1-m_3^2)d\Delta \tag{1-3-3}$$

为达到像面稳定，两个像面移动的代数和，必为零。

$$m_3^2(1-m_2^2)dq+(1-m_3^2)d\Delta=0 \tag{1-3-4 a}$$

即

$$(1-m_2^2)dq+\frac{1-m_3^2}{m_3^2}d\Delta=0 \tag{1-3-4 b}$$

为把式（1-3-4 b）表示成以倍率m为自变量的微分方程，需用m来表示dq和$d\Delta$。

[1] 参考图1-2-6。

对变倍组ϕ_2，m_2的改变是由于物距的改变而引起。用ϕ_2的物距l_2表示m_2，加以微分，并且注意到$dl_2=-dq$，得

$$dm_2=-\frac{m_2^2}{f_2'}dl_2 \tag{1-3-5}$$

和

$$dq=\frac{f_2'}{m_2^2}dm_2 \tag{1-3-6}$$

式中f_2'是ϕ_2的焦距。

对补偿组，m_3的改变是由于像距的改变而引起，即

$$d\Delta=f_3'dm_3 \tag{1-3-7}$$

式中 f_3'是ϕ_3的焦距。将（1-3-6），（1-3-7）代入（1-3-4 b）有

$$\frac{1-m_2^2}{m_2^2}f_2'dm_2+\frac{1-m_3^2}{m_3^2}f_3'dm_3=0 \tag{1-3-8}$$

这就是变焦过程微分方程。联合运用(1-3-8),(1-3-6),(1-3-7),并通过简单积分便可方便地计算和分析变焦过程。

（二）方程的讨论

（1）方程形式的讨论

从式(1-3-8)可知，不论变焦系统的型式如何[●]，不论一个系统中各个组份的具体位置如何，也不论各个组份由于位置不同而引起的位移量如何，各个运动组份均以$\frac{1-m^2}{m^2}f'dm$的形式在方程中出现，亦即各个运动组份用m为变量的数学表达式都完全相同。由式（1-2-10）可知，一个组份的共轭距

$$L=l'-l=f'\left(2-\frac{1}{m}-m\right) \tag{1-3-9}$$

微分得

$$dL=-d\left[f'\left(\frac{1}{m}+m\right)\right]=\frac{1-m^2}{m^2}f'dm$$

● 个别情况除外，详见§1-5的例子。

所以式（1-3-8）实际上是

$$\sum_i dL_i = 0 \tag{1-3-10}$$

式（1-3-10）的物理意义是：所有运动组份共轭距任何瞬间的微分改变量加和必须为零，即各个运动组份由于移动引起的共轭距的微分变化，必须互相抵消。

（2）方程解的讨论

从数学上讲，式（1-3-8）属于多变量全微分型微分方程。其所以是全微分型，因为它是逐次假设某个组份移动，其它组份不动而构成的方程。由式（1-3-8），设$U(m_2,m_3)$为原函数，则有

$$dU(m_2,m_3) = 0$$

其通解为

$$U(m_2,m_3) = f_2'\left(\frac{1}{m_2} + m_2\right) + f_3'\left(\frac{1}{m_3} + m_3\right) = C \text{（常量）}$$

设ϕ_2和ϕ_3都处于系统长焦这个初始位置。则

$$m_2 = m_{2l};\quad m_3 = m_{3l}$$

同样有

$$f_2'\left(\frac{1}{m_{2l}} + m_{2l}\right) + f_3'\left(\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l}\right) = C \quad \text{（常量）}$$

消去常量C，得方程的特解

$$f_2'\left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} + m_2 - m_{2l}\right) + f_3'\left(\frac{1}{m_3} - \frac{1}{m_{3l}} + m_3 - m_{3l}\right) = 0 \tag{1-3-11}$$

从而补偿组ϕ_3的倍率m_3构成二次方程

$$m_3^2 - bm_3 + 1 = 0 \tag{1-3-12}$$

其中

$$b = -\frac{f_2'}{f_3'}\left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} + m_2 - m_{2l}\right) + \left(\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l}\right) \tag{1-3-13}$$