电路习题详解

（下册）

（日） 大下真二郎 著
陈国呈 译

机械工业出版社
China Machine Press

电路习题详解

下　册

（日）　大下真二郎　著

陈　国　呈　译

机械工业出版社

译　者　序

本书原著名为《详解电气回路练习》，共分上下两册。书中精心选择、汇集了大量习题并进行详细解答，为此译者取其译名《电路习题详解》，似感更加贴切原著的意旨和内涵，以期读者一目了然，领会本书的含义，全书分成上下两册。

译者20世纪80年代在日本学习期间，有幸拜读了原著，发现是一本好书。从那以后，原著就一直成为译者工作中的伴侣，它不但可以指导如何解题，有些题目的结论在工作中可以直接借用，这总比自己再从头分析和推导省力得多。电路课程覆盖面广，内容抽象，原理和法则看似简单，真正理解并不容易，碰到解题更可能束手无策。正如原著作者在序言中所言，只有通过大量练习，加深理解，才能消化成为自己的知识。本书内容涵盖了直流电、交流电、傅里叶变换、拉氏变换、一端口网络、二端口网络、滤波器、过渡过程、分布参数电路，内容丰富、习题量多、有代表性，并全部作了解答。本书不但对电专业的大专院校学生是很好的习题指导书，对从事相关领域教学与科研的研究生、教师及工程技术人员都是很好的工具书和参考书。该书从1979年3月第一次发行以来，截至2000年10月，上册已印刷51次，下册也印刷37次，可见其人气之高。为此，译者萌发翻译本书的念头。翻译时，力求原汁原味、忠于原文，又尽量使语言简练，少占篇幅，并对原著中一些疏忽差错顺便做了订正。如果本书的出版能对读者的学习和工作起到促进作用，译者将感到莫大欣慰。

本书出版时曾得到日本信州大学工学博士大下真二郎教授、北京机械工业出版社责任编辑周娟编审、上海新源变频电器有限公司的大力支持，本书在翻译过程中，周勤利、陈颖娟同志帮助译者输入了全部文稿。译者谨借此机会向以上各位表示衷心的感谢。

限于译者自身的学识水平和精力，书中难免还有疏忽、误解和欠妥之处，务请读者批评指正，不胜感激。来信请寄上海市延长路149号，

上海大学自动化学院14信箱（邮编200072）

译者

于上海大学

2001年9月

序　言

本书收集了电工学以及以电路知识为必要基础的理工科学生的许多参考题解。

现代科学技术的发达令人膛目相对，其中电子学和通信学可以说扮演了中心的角色。这些惊人的进步与发展不局限于电气领域，还深刻地渗透到以机械、精密仪器、建筑、化学为龙头的工、理、医、农、经济学等学术领域和现实社会，可以预料，今后还将不断扩大，令人刮目相看。

电路是电工学的基础，对电子学、通信学、电力学、情报学来说都极为重要。但是，由于其内容抽象，单单学习原理和法则还难以充分理解，有必要通过大量的练习使之消化为自己的东西。本书的目的是以习题为中心，以期彻底把握电路知识。

各章节安排如下，先列出基本要领、归纳整理出电路的原理和法则，简要叙述每个章节的框架。然后为了帮助读者理解，由浅入深精心地选择并汇集了大量习题进行详细解说，这对培养读者的理解能力十分重要。

本书还收集了电气主任技术员、无线电通信员、无线电技术员的几乎全部的高级试题，这对参加这类全国统考的应试者来说是一本绝好的参考书！此外，从就业应试的倾向来看，可以说电路考试必不可少，而且所占比重不轻，难度也越来越高。因此，可以说无论是公务员考试还是就业考试，本书都是不可缺少的好伴侣。

利用本书做练习时，最好先充分理解基本要领，再自己独立解题，然后看书上的解题。通常一个题目有多种解法，为节约用纸，书上选择了比较简单的解法，读者可通过与自己的解法进行比较，进一步加深理解。

在汇总本书时，曾参考了很多教科书、参考书和文献，由于数量很大，这里不一一列出以上的书名，谨借此机会向编著这些参考书的

先辈们表示感谢。出版时还得到共立出版社（株）以中村康弘、齐藤英明先生为首的出版社诸位的鼎立相助，也深表感谢。

由于作者的误解和疏忽，书中可能有意料不到的错误，为了将来的修订，务请读者批评指正，不胜荣幸。

作者
于日本信升大学
1980年3月

目　　录

上 册 内 容

第1章　一端口网络

提　　要

1.1　概述　对于一个电路，计算其特性的过程称为电路**分析**；反之，给定某特性，要求设计满足该特性的电路过程称为电路**合成**。实践中，往往由于某种需要才设计电路，此时必须有电路合成的知识。要合成电路，总是将所需要的特性用数学描述，然后设计满足该特性的电路，但并不是说对任意函数都能设计出电路，而仅仅是该函数在满足某条件时才有相应的电路能实现。本章着重阐述具有一对端子的无源线性电路的驱动点阻抗、导纳的数学性质及电路的合成。这种电路网络称为**一对端子电路**（one terminal pair circuit）或**一端口网络**（one port）。

1.2　阻抗函数　用 $j\omega$ 表达的驱动点阻抗 $Z(j\omega)$ 的式子里，将 $j\omega$ 换成**复数角频率**（complex angular frequency）$s(=\sigma+j\omega)$，所得复函数$Z(s)$称为**阻抗函数**。反之，将复函数 $Z(s)$里的 s 用 $j\omega$ 代替，就变成原来的复数阻抗 $Z(j\omega)$。$Z(s)$是复数 s 的函数，即定义在 s 平面上的复数函数，s 平面虚轴上的值 $Z(j\omega)$通常表示复数阻抗。

现将电阻 R、电感 L、电容 C 等阻抗中的 $j\omega$ 用 s 代替，则有

$$Z_R=R,\ Z_L=sL,\ Z_C=\frac{1}{sC} \tag{1.1}$$

线性网络任意两个端子间的阻抗是由上述元件的串联或并联联结而成的，因此，阻抗函数是下式所示的**有理函数**[㊀]。

$$Z(s)=\frac{a_0+a_1s+\cdots+a_ns^n}{b_0+b_1s+\cdots+b_ms^m}=\frac{f(s)}{g(s)} \tag{1.2}$$

式中，系数 a 和 b 都是正实数或者零，分母、分子的次数 m 和 n 都是正数，其差$|m-n|$为 0 或者 1。上述规定不仅适于驱动点阻抗，也适合于驱动点导纳，因此，把阻抗和导纳总称为**导抗**（immittance）。

㊀　式（1.2）中 $f(s)$、$g(s)$ 称为有理整函数（rational integral function），用有理整函数之比定义的函数称为有理函数（rational function）。

一个线性电路必对应一个阻抗函数，但是给定一个关于 s 的有理函数 $Z(s)$，有可能不存在对应的电路；反之也可能存在两个以上的电路。存在一个对应一端口网络的条件是阻抗函数必须是下列条件定义的正实函数（positive real function），这是布劳恩（Brune）发现的。

1.3 正实函数 （定义）满足下列条件的 s 的函数 $Z(s)$ 称正实函数。

（1）$Z(s)$ 是 s 的实有理函数；

（2）在 $Res\geqslant 0$ 范围内，$ReZ(s)\geqslant 0$。

（定理） $z(s)$ 为正实函数的充要条件可表达如下：

（1）$Z(s)$ 在右半平面是正则的。

（2）虚轴上 $ReZ(s)\geqslant 0$。

（3）虚轴上有1阶零点[1]，其微分系数为正。

（4）虚轴上有1阶极点[1]，其留数为正实数。

1.4 电抗函数 仅由电感和电容构成的不含电阻的电路称为电抗电路，其驱动点导抗称为**电抗函数**（reactance function）。电抗函数是正实函数，具有以下性质。

（1）电抗函数是奇函数的正实函数。故其分母或分子必有一方是偶函数，剩下一方为奇函数，且分子、分母的次数之差在1以下。

（2）电抗函数的零点和极点都是1个，并交互排列在 s 平面的虚轴上。

（3）虚轴上的一次微分系数为正。

（4）原点和无穷远点必为零点或极点。

（5）可展开为部分分式或连分式。

1.5 电抗函数的合成

（1）佛斯特（Foster）展开（部分分式展开） 设驱动点阻抗是以电抗函数形式给出的

$$Z(s)=H\frac{(s^2+\omega_1^2)(s^2+\omega_3^2)\cdots(s^2+\omega_{2n+1}^2)}{s(s^2+\omega_2^2)\cdots(s^2+\omega_{2n}^2)} \tag{1.3}$$

[1] 使 $Z(s)$ 为零的 s 称为**零点**（zero point），为∞的 s 称为**极点**（pole），在 s 平面上一般用○和×表示。

则其可以展开为如下部分分式：

$$Z(s)=\frac{h_0}{s}+\sum_{k=1}^{n}\frac{h_{2k}s}{s^2+\omega_{2k}^2}+h_{\infty}s \tag{1.4}$$

式中，系数 h_0、h_{2k}、h_{∞} 由下式给出，可以是零或正实数。

$$\left.\begin{aligned} &h_0=[sZ(s)]_{s=0}\geqslant 0,\ h_{\infty}=\left[\frac{1}{s}Z(s)\right]_{s=\infty}\geqslant 0\\ &h_{2k}=\left[\frac{s^2+\omega_{2k}^2}{s}Z(s)\right]_{s^2=-\omega_{2k}^2}>0\ (k=1,2,\cdots,n)\end{aligned}\right\} \tag{1.5}$$

如果式（1.4）右边的各项能用电路来实现，则将其串联起来可实现 $Z(s)$，因此，各项可以用电路表示。因为电容 C_0 的阻抗为 $1/(sC_0)$，故第一项为

$$\frac{h_0}{s}=\frac{1}{sC_0}\quad C_0=\frac{1}{h_0}=\frac{1}{[sZ(s)]_{s=0}} \tag{1.6}$$

此时单用电容 C_0 就可以实现。同理，最后一项用电感 L_{∞} 就可以实现。

$$h_{\infty}s=sL_{\infty}\quad L_{\infty}=h_{\infty}=\left[\frac{Z(s)}{s}\right]_{s=\infty} \tag{1.7}$$

又中间各项所表示的是电感 L_{2k} 和电容 C_{2k} 的并联电路。

$$Z_{2k}(s)=\frac{h_{2k}s}{s^2+\omega_{2k}^2}=\frac{sL_{2k}\cdot\frac{1}{sC_{2k}}}{sL_{2k}+\frac{1}{sC_{2k}}}=\frac{\frac{s}{C_{2k}}}{s^2+\frac{1}{L_{2k}C_{2k}}} \tag{1.8}$$

$$C_{2k}=\frac{1}{h_{2k}}=\frac{1}{\left[\frac{s^2+\omega_{2k}^2}{s}Z(s)\right]_{s^2=-\omega_{2k}^2}},$$

$$L_{2k}=\frac{h_{2k}}{\omega_{2k}^2}=\frac{1}{\omega_{2k}^2}\left[\frac{s^2+\omega_{2k}^2}{s}Z(s)\right]_{s^2=-\omega_{2k}^2} \tag{1.9}$$

最后，将该 C_0、L_{∞} 和 L_{2k}、C_{2k} 并联电路串联起来，如图 1.1 所示，可以实现电抗电路 $Z(s)$。又当驱动点导纳 $Y(s)$ 为电抗函数时，同理也可找出具有各项导纳的电路，然后将其并联起来得已实现，式（1.3）为导纳函数 $Y(s)$ 时，则式（1.4）右边的第一项对应于电感 L_0，最后一项对应于电容 C_{∞}

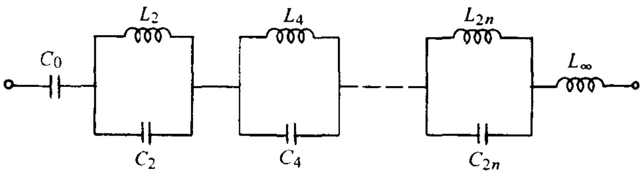


图 1.1

$$\left.\begin{aligned}&\frac{h_0}{s}=\frac{1}{sL_0}\quad L_0=\frac{1}{h_0}=\frac{1}{[sY\ (s)]_{s=0}}\\&h_\infty s=sC_\infty\quad C_\infty=h_\infty=\left[\frac{Y\ (s)}{s}\right]_{s=\infty}\end{aligned}\right\}\tag{1.10}$$

而中间项是用电感 L_{2k}和电容 C_{2k}串联电路实现的。

$$Y_{2k}(s)=\frac{h_2 s}{s^2+\omega_{2k}^2}=\frac{1}{sL_{2k}+\dfrac{1}{sC_{2k}}}=\frac{\dfrac{s}{L_{2k}}}{s^2+\dfrac{1}{L_{2k}C_{2k}}}\tag{1.11}$$

所以
$$L_{2k}=\frac{1}{h_{2k}}=\left[\frac{s}{(s^2+\omega_{2k}^2)Y(s)}\right]_{s^2=\omega_{2k}{}^2},$$

$$C_{2k}=\frac{h_{2k}}{\omega_{2k}^2}=\frac{1}{\omega_{2k}^2}\left[\frac{s^2+\omega_{2k}^2}{s}Y(s)\right]_{s^2=\omega_{2k}{}^2}\tag{1.12}$$

因此，用导纳合成电抗 $Y\ (s)$ 时，其电路如图 1.2 所示。

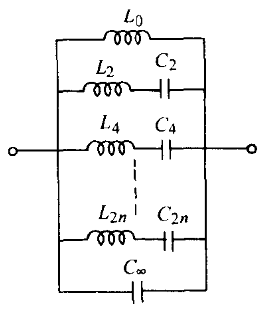


图 1.2

（2）考尔（Cauer）展开（连分数展开）

当式(1.3)的电抗函数在无穷远点有极点时，可将其分离并写成

$$Z(s)=a_0 s+Z_1(s)\tag{1.13}$$

式中，$Z_1(s)$ 是式 (1.4) 去掉最后一项后归并出来的，比 $Z(s)$ 低一阶，是一个在 $S=\infty$处没有极点的电抗函数。由于电抗函数在 $s=\infty$处必须有零点或极点，所以 $Z_1(s)$ 在 $s=\infty$处必须有零点。将 $1/Z_1\ (s)$ 在 $s=\infty$处的极点分离出来，则有

$$\frac{1}{Z_1(s)}=a_1 s+Z_2(s)\tag{1.14}$$

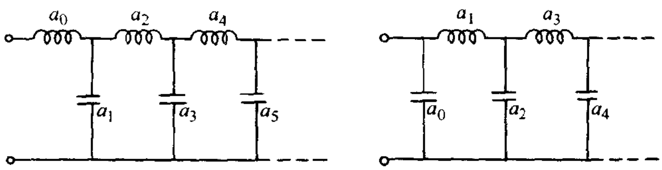
如此以同样步骤重复下去，电抗函数可以展成如下的连分式：

$$Z(s) = a_0 s + \cfrac{1}{a_1 s + \cfrac{1}{a_2 s + \cfrac{1}{a_3 s + \cdots}}} \tag{1.15}$$

通常用如下式子表示：

$$Z(s) = a_0 s + \frac{1|}{|a_1 s} + \frac{1|}{|a_2 s} + \frac{1|}{|a_3 s} + \cdots \tag{1.16}$$

如果电抗函数表示的是阻抗，则与其相当的电路如图 1.3a 所示。同理，如果式（1.16）表示的是导纳，则其电路如图 1.3b 所示。



a)　　　　b)

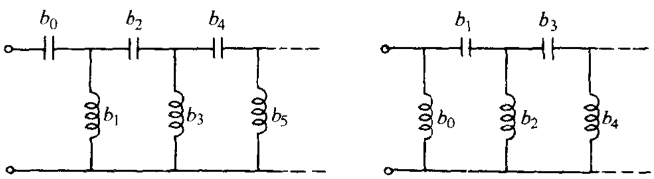
图　1.3

a）阻抗时　b）导纳时

再来看原点，位于原点的极点依次分离并展开后有

$$Z(s) = \frac{b_0}{s} + \frac{1|}{\left|\frac{b_1}{s}\right.} + \frac{1|}{\left|\frac{b_2}{s}\right.} + \frac{1|}{\left|\frac{b_3}{s}\right.} + \cdots \tag{1.17}$$

因此如果 $Z(s)$ 表示的是阻抗，则其电路如图 1.4a 所示。同理，如果式（1.17）表示的是导纳，则其合成电路如图 1.4b 所示。且电抗一端口网络的零点和极点分别对应于串联谐振和并联谐振。



a)　　　　b)

图　1.4

a）阻抗时　b）导纳时

1.6　*RL* 一端口网络　由 LC 谐振电路可以构成电抗电路，仅由电阻 R 和电感 L 组成的 RL 一端口网络也能这样处理。这种只含有两类元

件的电路称为**二元件电路**。LC 串联电路和 RL 串联电路的阻抗 $Z_{LC}(s)$、$Z_{RL}(s)$分别为

$$Z_{LC}(s)=sL+\frac{1}{sC}=\frac{1}{s}\left(s^2L+\frac{1}{C}\right) \tag{1.18}$$

$$Z_{RL}(s)=R+sL \tag{1.19}$$

将 $Z_{LC}(s)$乘以 s 倍，有

$$sZ_{LC}(s)=s^2L+\frac{1}{C} \tag{1.20}$$

将 s^2 改为 s，令 $1/C=R$，则有

$$[sZ_{LC}(s)]_{\substack{s^2=s\\1/C=R}}=Z_{RL}(s) \tag{1.21}$$

因为阻抗函数 $Z_{LC}(s)$ 为奇正实函数，故 $sZ_{LC}(s)$ 为偶函数，是 s^2 的有理函数。和 LC 电路的情况一样，RL 电路也可以展成部分分式，这只要对式（1.4）做上述变换即可求得

$$\begin{aligned}Z_{RL}(s) &= h_0+\sum_{k=1}^{n}\frac{h_k s}{s+\omega_k}+h_\infty s\\ &= h_0+\sum_{k=1}^{n}h_k-\sum_{k=1}^{n}\frac{\omega_k h_k}{s+\omega_k}+h_\infty s\end{aligned} \tag{1.22}$$

上式仅在负实轴上及无穷远点处存在极点，除无穷远点外，极点的留数取负值。而且，即便 $s=0$ 也可以是 Z（s）的零点，但不会为极点。满足式（1.22）关系的电路如图 1.5 所示。

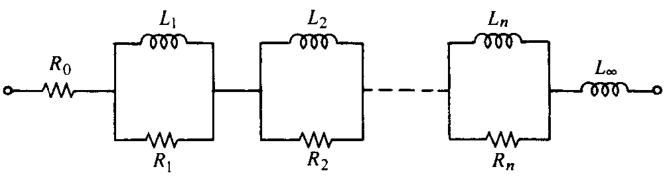


图 1.5

由式（1.22）和图 1.5 求得 R_0、R_k、L_k、L_∞为

$$\left.\begin{aligned}&R_0=h_0=[Z_{RL}(s)]_{s=0},L_\infty=\left[\frac{Z_{RL}(s)}{s}\right]_{s=\infty}\\ &R_k=h_k=\left[\frac{s+\omega_k}{s}Z_{RL}(s)\right]_{s=-\omega_k},L_k=\frac{R_k}{\omega_k}=\frac{1}{\omega_k}\left[\frac{s+\omega_k}{s}Z_{RL}(s)\right]_{s=-\omega_k}\end{aligned}\right\} \tag{1.23}$$

$Z_{RL}(s)$ 除了上述 RL 并联电路的串联联结之外，还可以像电抗函数一样利用 RL 串联电路的并联联结，或利用连分式展开的梯形电路来合成。

1.7 *RC* 一端口网络 仅由 R、C 构成的电路也可以像 RL 电路一样进行分析。因为 RC 串联电路的阻抗 $Z_{RC}(s)$ 为

$$Z_{RC}(s) = R + \frac{1}{sC} \tag{1.24}$$

所以，将 LC 串联电路的阻抗乘以 s 倍，将所得结果中的 s^2 换成 s，并令 $L=R$，就得到 $Z_{RC}(s)$ 。对式（1.4）进行替换，则有

$$Z_{RC}(s) = \frac{h_0}{s} + \sum_{k=1}^{n} \frac{h_k}{s+\omega_k} + h_\infty \tag{1.25}$$

该阻抗 $Z_{RC}(s)$ 包括 $s=0$ 的点在内，所有的极点都在负实轴上，其留数为正。且 $s=\infty$的点是零点或有限的实数值，因此，负实轴上的最右边有极点存在。式（1.25）可由图 1.6 电路合成的，C_0、C_k、R_k、R_∞ 分别为

$$\left.\begin{aligned} C_0 &= \frac{1}{h_0} = \frac{1}{[sZ_{RC}(s)]_{s=0}}, R_\infty = h_\infty = [Z_{RC}(s)]_{s=\infty} \\ C_k &= \frac{1}{h_k} = \frac{1}{[(s+\omega_k)Z_{RC}(s)]_{s=-\omega_k}}, R_k = \frac{h_k}{\omega_k} = \frac{[(s+\omega_k)Z_{RC}(s)]_{s=-\omega_k}}{\omega_k} \end{aligned}\right\} \tag{1.26}$$

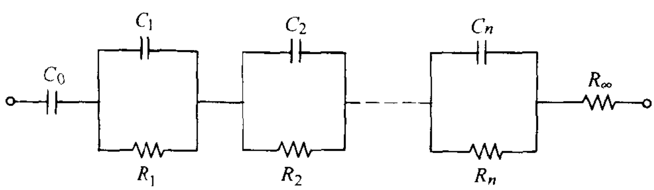


图 1.6

利用 RC 串联电路的并联联结或利用梯形电路同样可以合成。

1.8 互逆电路 设两个电路的阻抗为 Z_1、Z_2，如果其积 Z_1Z_2 是与频率无关的常数，即存在如下关系时

$$Z_1Z_2 = R^2 \tag{1.27}$$

称该两个电路为 R 的**互逆电路**（inverse network）。现假定阻抗 Z_1 的电路是由 n 个阻抗串联而成，则可写成

$$Z_1=Z_{11}+Z_{12}+\cdots+Z_{1n} \tag{1.28}$$

Z_1 的逆电路 Z_2 及其导纳 Y_2 为

$$Z_2=\frac{R^2}{Z_1}=\frac{R^2}{Z_{11}+Z_{12}+\cdots+Z_{1n}} \tag{1.29}$$

所以 $$Y_2=\frac{1}{Z_2}=\frac{Z_{11}+Z_{12}+\cdots+Z_{1n}}{R^2}=\frac{Z_{11}}{R^2}+\frac{Z_{12}}{R^2}+\cdots+\frac{Z_{1n}}{R^2} \tag{1.30}$$

即 Z_1 的逆电路 Z_2 是由构成 Z_1 的 n 个阻抗 Z_{11}，Z_{12}，…，Z_{1n}的各对应逆电路并联而成的，由 n 个阻抗并联构成的电路 Z_2 的逆电路 Z_1 是各阻抗的逆电路串联而成的。

1.9 恒电阻电路 如果一个电路的阻抗的虚部与频率无关恒为零，实部也与频率无关为某个恒定值，该电路称为**恒电阻电路**（constant resistance network）。根据式（1.2），驱动点阻抗一般可写成

$$\begin{aligned}Z(\omega)&=\frac{f(\omega)}{g(\omega)}=\frac{f_1(\omega)+\mathrm{j}f_2(\omega)}{g_1(\omega)+\mathrm{j}g_2(\omega)}\\&=\frac{f_1(\omega)g_1(\omega)+f_2(\omega)g_2(\omega)+\mathrm{j}[f_2(\omega)g_1(\omega)-g_2(\omega)f_1(\omega)]}{g_1^2(\omega)+g_2^2(\omega)}\end{aligned} \tag{1.31}$$

为使虚部为零，可令下式成立：

$$f_2(\omega)g_1(\omega)-g_2(\omega)f_1(\omega)=0 \tag{1.32}$$

将该关系代入式（1.31），有

$$Z(\omega)=\frac{f_1(\omega)}{g_1(\omega)}=\frac{f_2(\omega)}{g_2(\omega)} \tag{1.33}$$

由式（1.2）有

$$\begin{aligned}Z(\omega)&=\frac{a_0-a_2\omega^2+\cdots+(-1)^n a_{2n}\omega^{2n}}{-b_2\omega^2+b_4\omega^4+\cdots+(-1)^{n-1}b_{2n-2}\omega^{2n-2}}\\&=\frac{a_1-a_3\omega^2+\cdots+(-1)^{n-1}a_{2n-1}\omega^{2n-2}}{b_1-b_3\omega^2+\cdots+(-1)^{n-1}b_{2n-1}\omega^{2n-2}}\end{aligned} \tag{1.34}$$

要使式（1.34）成立，则必须 $a_0=a_{2n}=0$。而且，要使上式与 ω 无关，还必须使下式成立：

$$\frac{a_1}{b_1}=\frac{a_2}{b_2}=\cdots=\frac{a_{2n-1}}{b_{2n-1}}=K \tag{1.35}$$

利用上式关系，则式（1.34）为