

水电站厂房 动力分析

舒扬荣 王日宣

水利电力出版社

水电站厂房 动力分析

舒扬桀 王日宣

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是研究水电站厂房振动的专著。介绍各种型式水电站厂房包括坝后式、引水式、河床式及溢流或(挑流式)的自振特性计算理论,阐述水电站厂房的抗震计算方法及各种水电站厂房地震荷载的分布规律。最后介绍了溢流(或挑流)式水电站厂房的水流问题,作用在厂房顶上的脉动荷载特性及此类水电站厂房的抗振计算理论与具体方法。本书主要特点是文字简洁、内容丰富、成果新颖。例如,对坝后式及引水式水电站厂房自振特性几种计算方法的分析研究及评价,二元并联体系理论在河床式水电站厂房动力分析中的应用,随机振动理论以及它们在溢流(或挑流)式水电站厂房抗振计算中的应用等,都是近年来的研究成果。

本书可供从事水电站建筑的科研、教学及设计等水电技术人员参考,并可作为有关院校结构振动专业的大学生、研究生的参考教材。

水电站厂房动力分析

舒 扬 梁 王 日 宣

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 7.75印张 172千字

1987年6月第一版 1987年6月北京第一次印刷

印数0001—2380册 定价1.60元

书号 15143·6406

前 言

水电站厂房是水利枢纽工程的一个重要组成部分，其结构型式在一定情况下又具有工业厂房的特点。由于水电站厂房结构复杂，其结构形式、构造受枢纽布置等因素影响。所以，迄今有关水电站厂房抗振研究的文献、著作很少，尤其在动力分析方面研究进展更缓慢，这种情况不仅国内这样，国外也是如此。为此，如何结合我国水电建设的生产实践，开展水电站厂房抗振设计方面的科学研究工作，是一项非常重要的任务。

水电站厂房一般受三种动荷载作用：机组振动荷载、地震荷载及高速水流作用下的脉动荷载。机组振动荷载对水电站厂房的影响一般不大，主要在机墩设计时考虑这部分动荷载，目前在其他专著及文献中已有提及。但有抗地震荷载要求的水电站厂房及在高速水流作用下的水电站厂房（如溢流式及挑流式水电站厂房），在设计时都要进行动力分析。其内容包括：（1）水电站厂房自振特性的计算，（2）在动荷载作用下水电站厂房的动力反应。在一般情况下，前者是后者的基础，后者是动力分析的主要目的。

水电站主厂房一般是采用封闭式刚架结构型式，从外表上看是一个整体封闭盒式结构。但是，由于各个机组段之间均有分缝的要求，所以其实际受力状态均是以一个机组段为一个单元，对于中间机组段的厂房部分为两侧开口的盒式板壳。中间机组段厂房的长度相对于厂房的宽度及高度相差不大。按其受力状态可以简化为平面问题来处理。而在端部的

厂房部分，为一侧开口、三侧封闭的盒式板壳，属于空间结构，应该按空间问题来处理，根据实际经验，如按平面问题处理也是可行的。

天津大学水利系自1958年以来，根据生产实践的需要，先后对溢流式、挑流式、坝后式、引水式及河床式等型式水电站厂房的抗振问题作了较为系统的研究工作，得出了一些带有规律性的结论。在总结多年科研成果的基础上，编者编著了本书。其内容包括：第一章论述各种型式水电站厂房自振特性的计算方法；第二章介绍了坝后式、引水式等水电站厂房的抗震计算方法、原则及各种型式水电站厂房地震荷载的分布规律；第三章论述了溢流（或挑流）式水电站厂房的水流问题，作用在厂房顶上的脉动荷载特性及此类水电站厂房的抗振计算理论与具体方法；第四章介绍水电站地下厂房的抗震计算。

本书第二章的第一节由李振富同志执笔，第四章由吴霁云同志执笔。在编写过程中曾得到河海大学喻远光同志的仔细审阅，并提出许多宝贵修改意见，特此表示感谢。

编 者

1986年6月

目 录

前言

第一章 水电站厂房的自振特性	1
第一节 概述	1
第二节 坝后式与引水式水电站厂房的自振特性	17
第三节 河床式水电站厂房结构的自振特性	39
第四节 溢流（或挑流）式水电站厂房的自振特性	55
第二章 坝后式、引水式与河床式水电站厂房 的抗震计算	92
第一节 概述	92
第二节 反应谱理论用于水电站厂房的抗震计算	104
第三节 水电站厂房地震荷载的分布规律	135
第四节 水电站厂房的震害及抗震的构造措施	164
第三章 溢流（或挑流）式水电站厂房的抗振计算	171
第一节 概述	171
第二节 溢流（或挑流）式厂房的水流问题	175
第三节 溢流（或挑流）式厂房顶的脉动荷载	184
第四节 溢流（或挑流）式厂房的抗振计算	198
第四章 水电站地下厂房的抗震计算	231
第一节 概述	231
第二节 地震波作用下传播介质的应力状态	231
第三节 地下厂房的抗震计算	235
参考文献	241

第一章 水电站厂房的自振特性

第一节 概 述

水电站厂房一般可简化为平面刚架来处理。刚架按其构造来讲是由梁、柱组成的，因此，刚架的动力计算是以梁的计算为基础。梁是弹性体，其质量是沿几何形状而分布，具有无限多自由度。工业与民用建筑部门在研究地震作用下厂房刚架结构的振动分析时，通常采用的计算图形过于简单，即将质量集中于横梁，而柱子被看成为无质量的弹性部件，这样简化处理给出的自振频率（主要是基本频率）的误差可能不很大，而求得的振型与实际结果的出入就十分显著，至于梁、柱沿轴向的内力分布情况就更是难以反映了。因此，为了比较清楚地了解刚架结构的振动特性，按梁、柱组成的刚架体系作比较精确的分析，这对水电站厂房来讲是十分必要的。为此，对均质梁按无限自由度进行分析计算，进而将其结果应用到分析水电站厂房的振动问题上去。

一、均质梁的横向自由振动

作为刚架结构元件的梁、柱，其长度比横截面的最大尺寸一般都大五倍以上，其变形主要是弯曲变形（剪切变形可忽略），在以后讨论中均假定梁或柱在振动时不发生扭转现象。下面就研究这种梁的横向振动。

一个质量为均匀分布的单跨梁，两端简支（见图1-1），设 x 轴为梁静止时的轴线，原点座标在梁的左端，梁长为 l ，以 $y(x, t)$ 表示梁的任意截面 x 处，在 t 时刻的横向位移， $\bar{m}$ 表

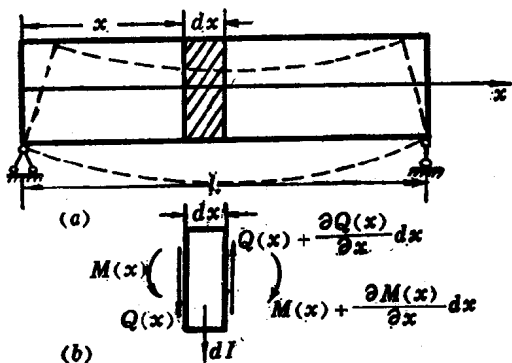


图 1-1

示梁单位长度的质量， dI 表示 dx 长度的微块振动时的惯性力，即

$$dI(t) = -\bar{m}dx \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}$$

在梁上距左端 x 处，取长度为 dx 元素来进行分析，在自由振动过程的某一时刻，作用在该元素上的内力如图1-1所示，由平衡条件可得：

$$\frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} + \bar{m} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1-1)$$

又因为
$$Q(x,t) = \frac{\partial M(x,t)}{\partial x}$$

$$M(x,t) = EJ \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2}$$

式中 EJ 为梁的抗弯刚度，将上两式代入方程式(1-1)后则得：

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EJ \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \right] + \bar{m} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1-2)$$

对于等截面梁, J 为常数, 则上式可变为:

$$EJ \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1-3)$$

式 (1-3) 就是均质梁的弯曲自由振动微分方程式。

用分离变量法解式 (1-3), 令

$$y(x, t) = y(x)T(t)$$

代入 (1-3) 式得:

$$EJ \frac{d^4 y(x)}{dx^4} T(t) + \bar{m} \frac{d^2 T(t)}{dt^2} y(x) = 0$$

$$\frac{\frac{EJ}{\bar{m}} \frac{d^4 y(x)}{dx^4}}{y(x)} = - \frac{\frac{d^2 T(t)}{dt^2}}{T(t)} = \omega^2 \quad (1-4)$$

上式必须为一常数, 令它等于 ω^2 , 于是可将式 (1-4) 分离为下列两个常微分方程:

$$\frac{d^2 T(t)}{dt^2} + \omega^2 T(t) = 0 \quad (1-5)$$

$$\frac{d^4 y(x)}{dx^4} - \frac{\omega^2 \bar{m}}{EJ} y(x) = 0 \quad (1-6)$$

式 (1-5) 的解答是人们所熟悉的, 为:

$$T(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$$

由此可见, ω 是梁的自振频率。

$$\left. \begin{array}{l} \text{再令} \\ \text{或} \end{array} \right\} \begin{array}{l} K^4 = \frac{\bar{m} \omega^2}{EJ} \\ \omega = K^2 \sqrt{\frac{EJ}{\bar{m}}} \end{array} \quad (1-7)$$

则 (1-6) 式又可变为:

$$\frac{d^4 y(x)}{dx^4} - K^4 y(x) = 0 \quad (1-8)$$

它的特征方程为:

$$r^4 - K^4 = 0$$

它的解为: $r_{1,2} = \pm K$, 及 $r_{3,4} = \pm iK$

因此 (1-8) 式的一般解答可写为:

$$y(x) = \frac{C_1}{2} (e^{Kx} + e^{-Kx}) + \frac{C_2}{2} (e^{Kx} - e^{-Kx}) \\ + \frac{C_3}{2} (e^{iKx} + e^{-iKx}) + \frac{C_4}{2} (e^{iKx} - e^{-iKx})$$

$$\text{或 } y(x) = c_1 \operatorname{ch} Kx + c_2 \operatorname{sh} Kx + c_3 \cos Kx + c_4 \sin Kx \quad (1-9)$$

这个关系的转换, 利用了下列关系:

$$\operatorname{ch} Kx = \frac{1}{2} (e^{Kx} + e^{-Kx}), \quad \operatorname{sh} Kx = \frac{1}{2} (e^{Kx} - e^{-Kx})$$

$$\cos Kx = \frac{1}{2} (e^{iKx} + e^{-iKx}),$$

$$\sin Kx = \frac{1}{2i} (e^{iKx} - e^{-iKx})$$

式 (1-9) 还可借助 “克雷洛夫函数” 化成如下更便于应用的形式。

“克雷洛夫函数” 共有四个, 其定义如下:

$$\left. \begin{aligned} A_{Kx} &= \frac{1}{2} (\operatorname{ch} Kx + \cos Kx) \\ B_{Kx} &= \frac{1}{2} (\operatorname{sh} Kx + \sin Kx) \\ C_{Kx} &= \frac{1}{2} (\operatorname{ch} Kx - \cos Kx) \\ D_{Kx} &= \frac{1}{2} (\operatorname{sh} Kx - \sin Kx) \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

又令:

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{1}{2}(L_1 + L_3) \\ c_2 &= \frac{1}{2}(L_2 + L_4) \\ c_3 &= \frac{1}{2}(L_1 - L_3) \\ c_4 &= \frac{1}{2}(L_2 - L_4) \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

将式(1-10)、(1-11)的关系代入(1-9)式, 则(1-9)式又可变为:

$$y(x) = L_1 A_{Kx} + L_2 B_{Kx} + L_3 C_{Kx} + L_4 D_{Kx} \quad (1-12)$$

“克雷洛夫函数”之优点在于它有下列性质:

$$\begin{aligned} \frac{dA_{Kx}}{dx} &= K D_{Kx}, & \frac{dB_{Kx}}{dx} &= K A_{Kx}, \\ \frac{dC_{Kx}}{dx} &= K B_{Kx}, & \frac{dD_{Kx}}{dx} &= K C_{Kx} \end{aligned}$$

且有, 当 $x=0$ 时 $A_{Kx}=1$, $B_{Kx}=C_{Kx}=D_{Kx}=0$

将式(1-12)不断对 x 求导数, 就可得到下面四个式子:

$$\begin{aligned} y(x) &= L_1 A_{Kx} + L_2 B_{Kx} + L_3 C_{Kx} + L_4 D_{Kx} \\ \frac{dy(x)}{dx} &= \varphi(x) = K(L_1 D_{Kx} + L_2 A_{Kx} + L_3 B_{Kx} + L_4 C_{Kx}) \\ \frac{d^2 y(x)}{dx^2} &= \frac{M(x)}{EJ} \\ &= K^2(L_1 C_{Kx} + L_2 D_{Kx} + L_3 A_{Kx} + L_4 B_{Kx}) \\ \frac{d^3 y(x)}{dx^3} &= \frac{Q(x)}{EJ} \end{aligned}$$

$$=K^2(L_1 B_{Kx} + L_2 C_{Kx} + L_3 D_{Kx} + L_4 A_{Kx})$$

以 y_0 , φ_0 , M_0 , Q_0 依次表示梁左端 ($x=0$) 处的位移、转角、弯矩及剪力, 将它们代入以上各式则得:

$$L_1 = y_0$$

$$L_2 = \frac{\varphi_0}{K}$$

$$L_3 = \frac{M_0}{EJK^2}$$

$$L_4 = \frac{Q_0}{EJK^2}$$

再令 $\bar{M}_0 = \frac{M_0}{EJ}$, $\bar{Q}_0 = \frac{Q_0}{EJ}$

这样, 以上各式就变为以初参数 y_0 , φ_0 , $\bar{M}_0$, $\bar{Q}_0$ 所表示的初参数公式:

$$y(x) = A_{Kx} y_0 + \frac{B_{Kx}}{K} \varphi_0 + \frac{C_{Kx}}{K^2} \bar{M}_0 + \frac{D_{Kx}}{K^2} \bar{Q}_0 \quad (1-13)$$

$$\varphi(x) = KD_{Kx} y_0 + A_{Kx} \varphi_0 + \frac{B_{Kx}}{K} \bar{M}_0 + \frac{C_{Kx}}{K^2} \bar{Q}_0 \quad (1-14)$$

$$M(x) = EJK^2 C_{Kx} y_0 + EJKD_{Kx} \varphi_0 + A_{Kx} M_0 + \frac{B_{Kx}}{K} Q_0 \quad (1-15)$$

$$Q(x) = EJK^2 B_{Kx} y_0 + EJK^2 C_{Kx} \varphi_0 + KD_{Kx} M_0 + A_{Kx} Q_0 \quad (1-16)$$

克雷洛夫函数 A_{Kx} , B_{Kx} , C_{Kx} , D_{Kx} 为 Kx 的函数, 当 Kx 已知时其值可按 (1-10) 式求出, 为了应用方便, 许多

书籍均列表备用^{[1][2]}。

下面举例说明如何用初参数公式进行单跨梁的自由振动计算。

【例 1-1】 求图1-2所示两端为简支的梁的自由振动特性。梁为等截面，其抗弯刚度为 EJ 。

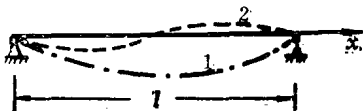


图 1-2

自由振动特性与其初始条件无关，只须考虑其边界条件，对两端简支的梁来说，其边界条件为：

$$\left. \begin{array}{l} \text{在 } x=0 \text{ 处: } y_0=0, M_0=0 \\ \text{在 } x=l \text{ 处: } y(l)=0, M(l)=0 \end{array} \right\} \quad (1-17)$$

在初参数公式里，各式都包含四个初参数 y_0, φ_0, M_0, Q_0 。其中两个必然为已知，另外两个为未知，但这两个未知的初参数可以借助梁右端($x=l$)处的边界条件求出。此处 φ_0, Q_0 为未知，可利用 $x=l$ 处 $y(l)=M(l)=0$ 条件求出。将 $y(l)=M(l)=0$ 条件代入式(1-13)，式(1-15)得：

$$\left. \begin{array}{l} y(l) = \frac{B_{Kl}}{K} \varphi_0 + \frac{D_{Kl}}{K^3} \bar{Q}_0 = 0 \\ M(l) = EJK D_{Kl} \varphi_0 + \frac{B_{Kl}}{K} \bar{Q}_0 = 0 \end{array} \right\} \quad (1-18)$$

式(1-18)可简化为下列形式：

$$\left. \begin{array}{l} K^2 B_{Kl} \varphi_0 + D_{Kl} \bar{Q}_0 = 0 \\ K^2 D_{Kl} \varphi_0 + B_{Kl} \bar{Q}_0 = 0 \end{array} \right\} \quad (1-19)$$

令 φ_0 与 $\bar{Q}_0$ 的系数行列式等于零, 即得到体系的频率方程式为:

$$\begin{vmatrix} K^2 B_{K1} & D_{K1} \\ K^2 D_{K1} & B_{K1} \end{vmatrix} = 0 \quad (1-20)$$

这就是频率方程, 因为 $K^2 \neq 0$ ($K=0$ 时, 即 $\omega=0$, 这表示梁没有振动), 故得:

$$B_{K1}^2 - D_{K1}^2 = 0 \quad (1-21)$$

$$(B_{K1} + D_{K1})(B_{K1} - D_{K1}) = 0$$

把克雷洛夫函数表达式(1-10)代入上式, 则得:

$$\sin Kl \operatorname{sh} Kl = 0 \quad (1-22)$$

因为 $K \neq 0$, 故 $\operatorname{sh} Kl \neq 0$, 于是式(1-22)变成:

$$\sin Kl = 0 \quad (1-23)$$

所以 $Kl = n\pi$ ($n=1, 2, 3, \dots$)

据式(1-7), 得简支梁的自振频率为:

$$\omega_n = \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}} \quad (n=1, 2, \dots) \quad (1-24)$$

所以

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= \frac{\pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}} = \frac{9.8696}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}} \\ \omega_2 &= \frac{4\pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}} = \frac{39.478}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}} \end{aligned} \right\} \quad (1-25)$$

无限自由度体系, 具有无限个自振频率, 也具有无限多个对应的振型。

据 $y_0=0$ 或 $M_0=0$ 的条件可得:

$$\bar{Q}_0 = -\frac{K^2 B_{K1}}{D_{K1}} \varphi_0$$

$$= -K^2 \varphi_0 \frac{1}{2} (\text{sh} Kl + \sin Kl) - \frac{1}{2} (\text{sh} Kl - \sin Kl) \quad (1-26)$$

对简支梁, $\sin Kl = 0$, $\text{sh} Kl \neq 0$

所以式 (1-26) 变为:

$$\bar{Q}_0 = -K^2 \varphi_0 \quad (1-27)$$

又因为 $y_0 = M_0 = 0$, 故由 (1-13) 式得:

$$\begin{aligned} y(x) &= \frac{B_{Kx}}{K} \varphi_0 + \frac{D_{Kx}}{K^3} \bar{Q}_0 \\ &= \frac{B_{Kx}}{K} \varphi_0 + \frac{D_{Kx}}{K^3} (-K^2 \varphi_0) \\ &= \frac{\varphi_0}{K} (B_{Kx} - D_{Kx}) = \frac{\varphi_0}{K} \sin Kx \quad (1-28) \end{aligned}$$

因为振型与振幅大小无关, 所以振型函数为 $\sin Kx$, 式 (1-26) 振型的振型函数可写为:

$$y_j(x) = \sin K_j x = \sin \frac{j\pi}{l} x \quad (1-29)$$

图1-2中绘出两个振型, 振型1为一个半波, 振型2为两个半波。对于任意阶振型, 其振动时不动的点称为该振型的节点, 振动最大的点称为腹点。

二、横向振动杆件的杆端弯矩和杆端力

这里将讨论稳态简谐振动体系。这种运动既可出现在自由振动中, 也可能出现在长时间作用的简谐外荷载所产生的强迫振动中。刚架的动力计算和结构静力学的方法相似, 是在单跨梁计算的基础上, 可以利用结点的线位移和角位移作为未知数来进行刚架的动力计算。

从某刚架体系中取出一根杆件 gh 如图1-3所示。为了表

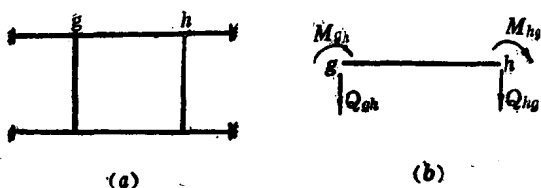


图 1-3

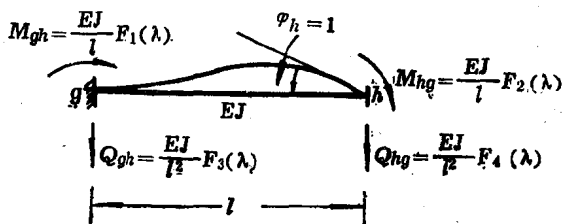


图 1-4

示体系其余部分对杆件 gh 两端的作用，在杆件两端分别施加杆端外力矩 M_{gh} 、 M_{hg} 和杆端外力 Q_{gh} 、 Q_{hg} （均为时间 t 的函数），并假定绕杆端顺时针作用的力矩为正，杆端力 Q_{hg} 及 Q_{gh} 以图示的方向为正。如果知道了杆端的变形，则可通过杆端截面列出方程式来计算出全部杆端弯矩和杆端力。这个结论不管杆件端部的支承方式如何，即无论是固定端、铰支、一端自由或是弹性支承都是适用的。

例如，一个一端固定杆件的右端，由于简谐运动 $\varphi_h \sin \omega t$ （其幅值 $\varphi_h = 1$ ）的作用而发生转动，而杆件两端的其它位移和转角均为零（如图1-4）。

在图中，杆件中间各截面上无荷载作用，则式（1-6）是适用的运动方程，其解为式（1-9），相应的边界条件为：

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } x=0, \quad y(0)=0, \quad y'(0)=0 \\ \text{当 } x=l, \quad y(l)=0, \quad y'(l)=1 \end{aligned} \right\} \quad (1-30)$$

对式 (1-9) 求各阶导数得:

$$\left. \begin{aligned} y(x) &= c_1 \operatorname{ch} Kx + c_2 \operatorname{sh} Kx + c_3 \cos Kx + c_4 \sin Kx \\ y'(x) &= K(c_1 \operatorname{sh} Kx + c_2 \operatorname{ch} Kx - c_3 \sin Kx \\ &\quad + c_4 \cos Kx) \\ y''(x) &= K^2(c_1 \operatorname{ch} Kx + c_2 \operatorname{sh} Kx - c_3 \cos Kx \\ &\quad - c_4 \sin Kx) \\ y'''(x) &= K^3(c_1 \operatorname{sh} Kx + c_2 \operatorname{ch} Kx + c_3 \sin Kx \\ &\quad - c_4 \cos Kx) \end{aligned} \right\} \quad (1-31)$$

将 (1-30) 式中的边界条件代入式 (1-31) 中的前两式中得:

$$\text{当 } x=0 \text{ 时,} \quad c_1 + c_3 = 0,$$

$$c_2 + c_4 = 0$$

当 $x=l$ 时, 令 $Kl=\lambda$, 得:

$$c_1 \operatorname{ch} \lambda + c_2 \operatorname{sh} \lambda + c_3 \cos \lambda + c_4 \sin \lambda = 0$$

$$\frac{\lambda}{l}(c_1 \operatorname{sh} \lambda + c_2 \operatorname{ch} \lambda - c_3 \sin \lambda + c_4 \cos \lambda) = 1$$

$$\text{由此得: } c_1 \operatorname{ch} \lambda + c_2 \operatorname{sh} \lambda - c_1 \cos \lambda - c_2 \sin \lambda = 0$$

$$c_1 \operatorname{sh} \lambda + c_2 \operatorname{ch} \lambda + c_1 \sin \lambda - c_2 \cos \lambda = \frac{l}{\lambda}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{所以得: } c_1(\operatorname{ch} \lambda - \cos \lambda) + c_2(\operatorname{sh} \lambda - \sin \lambda) &= 0 \\ c_1(\operatorname{sh} \lambda + \sin \lambda) + c_2(\operatorname{ch} \lambda - \cos \lambda) &= \frac{l}{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (1-32)$$

由式 (1-32) 得: