

管壳式换热器管束固有频率的计算



学 院 计算机科学与技术

专 业 计算机科学与技术

年 级 2005 级

姓 名 顾 海 晖

指导教师 张坤龙副教授

2009 年 6 月 18 日

摘 要

换热器是化工生产中不可或缺的设备,而管壳式换热器又是其中应用最广泛的。管壳式换热器由于振动引起的破坏会导致设备最终失效报废,而无论是在设计阶段避免振动,还是研究管束振动原因,都需要首先计算换热管的固有频率。

现行的 GB151-1999 标准中给出的计算公式在计算不等跨情况固有频率时十分复杂,使用人工计算耗时长且误差较大。论文编写了一个计算机程序计算不同情况下的换热管固有频率。实验表明,该程序弥补了标准的不足,提高了计算的速度和精度。

关键词: 换热器; 固有频率; 计算程序

ABSTRACT

Heat exchanger is an essential ingredient of chemical production equipment, and shell and tube heat exchanger is one of the most widely used. Shell and tube heat exchanger as a result of damage caused by vibration of equipment will lead to the ultimate end-of-life failure, and whether it is at the design stage to avoid vibration, vibration control, or research reasons, first of all need to calculate the natural frequencies of heat exchange tube.

The existing standard GB151-1999 is given in the calculation of the formula for calculating the natural frequencies ranging from cross-case complexity of the time, the use of a long and time-consuming manual calculation errors. Papers prepared a computer program calculated the heat exchanger under different circumstances the natural frequencies. The experiments show that the procedure to make up for lack of a standard to improve the calculation speed and accuracy.

Key words: heat exchanger; natural frequency; calculation procedures

目 录

第一章	概 述	1
1.1	研究背景	1
1.2	固有频率的计算方法	2
1.2.1	铁摩辛柯(S.P.Timoshenko)法计算公式	2
1.2.2	麦克达夫—弗格拉(Macduff and Feglar)法	2
1.2.3	甘那巴斯(V.Ganapathy)法	3
1.2.4	GB151-1999 计算方法	3
1.2.6	ASME 锅炉与压力容器规范计算方法	6
1.2.7	ANSYS 模拟软件计算方法	6
1.3	论文研究目的和内容	7
1.3.1	研究目的	7
1.3.2	研究内容	7
第二章	固有频率的计算公式	8
2.1	管子振动的微分方程	8
2.2	管子自振频率（固有频率）的计算	10
2.3	小结	12
第三章	固有频率的计算程序	13
3.1	创建文件	13
3.2	程序输入输出参数	13
3.3	计算步骤和程序流程框图	15

3.3.1 计算机计算固有频率步骤	15
3.3.2 流程框图	16
3.4 迭代计算固有频率	17
3.5 小结.....	19
第四章 固有频率计算程序的验证.....	20
4.1 利用标准计算方法验证	20
4.2 ANSYS 软件模拟计算验证	23
4.3 小结.....	27
第五章 结论.....	29
参考文献	30
附 录.....	32
外文资料	
中文翻译	
致 谢	

第一章 概述

1.1 研究背景

换热器不仅在石油、化工、动力等工业的建设中占有重要地位，约占设备总质量的20%~30%，建设费用高达10%~40%，而且在生产过程中总耗费中占有的比例也很高，因而，换热器的性能优劣，寿命长短，极大地关系着许多企业的投资和经济效益，不少专家和学者都致力于换热器的研究^[1]。在众多换热器中，管壳式换热器的应用已有很悠久的历史。现在，它被当作一种传统的标准换热设备在许多工业部门中大量使用，尤其是在化工、石油、能源等行业中更为广泛^[2]。其结构如图1-1所示。随着工业生产迅速发展和生产规模不断扩大，管壳式换热器趋于大型化，并且，由于换热器尺寸和管束支撑间距的增大，以及流体流速提高、运行工况不稳定等因素影响，经常引起换热器管束发生流体诱导振动，造成换热器局部失效甚至整体报废，给工厂带来巨大的经济损失^{[3]-[4]}。换热器结构，如图1-1所示。

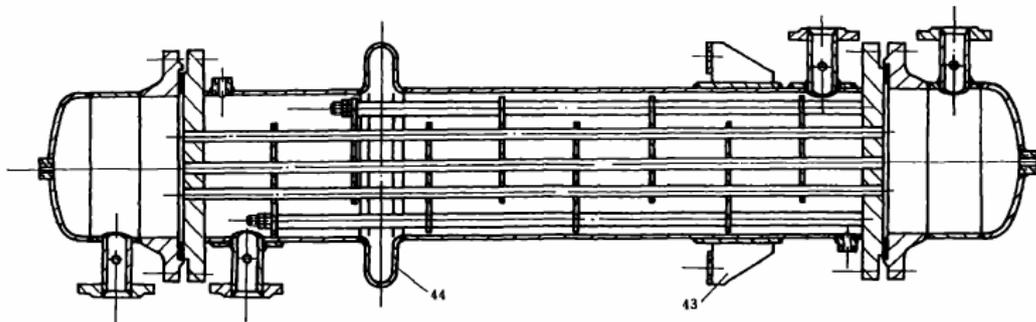


图 1-1 换热器结构示意图

在换热器的设计中往往考虑较多的是传热的优化，即采用什么样的尺寸可满足高效的传热，而忽视了振动^[5]。每台换热器在运行过程中，其换热管都会产生或大或小的振动。产生振动的振源为流体稳定流动产生的振动、流体速度的波动、通过管道或其他连接件传播的动力机械振动。其中前2者为流体诱发的振动源，需基于振动分析的方法在换热器设计中加以解决；后者可在管道及附属设备设计中加以解决^[6]。通过长时间的研究与探讨，现在普遍认为引起换热管发生振动的原因主要有卡曼涡街、紊流抖振、声振动、流体弹性激振和射流转换^{[7]-[11]}。

换热器管子由于振动发生的破坏的主要形式有两种^[12]：一种是管子的磨损，管子的磨损是在振幅很大情况下，管子之间发生互相碰撞而磨平穿透，或者在振动时管子与支持板之间发生相对位移使管壁逐渐变薄而最后磨穿；另一种是管子的疲劳断裂，管子的疲劳断裂是由于管子振动时，承受反复弯曲作用的周期交变应力引起的，可能引起跨度中间的损坏，也可能引起管子与管板连接处的泄漏。

不管是哪种情况发生，都可能导致操作过程的中断或设备的损坏。

1.2 固有频率的计算方法

随着计算机的发展，人们开始应用一些软件来模拟振动研究。赖永星, 刘敏珊利用大型有限元程序ANSYS的参数化设计语言，对模型进行智能化网格剖分、材料参数设定、模型几何参数设置，完成了多种节径比的正方形排列管束的建模，并采用流固耦合法进行了管束在两种流体中的动特性计算^[23]。还有一些另外的计算方法。

1.2.1 铁摩辛柯(S. P. Timoshenko)法计算公式

此计算公式基于铁摩辛柯梁推导出来的，考虑了剪切变形和转动惯量效应的影响，在计算时具有较高的精确度，但只适用于单跨管，而不适用于多跨管的计算。对转等跨、两端固定、中间简支的管子自振频率的计算不能使用，所以有很大的局限性。

$$f = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EIg}{\bar{m}}} \quad (1-1)$$

式中： f —管子的自振频率， $1/s$ ；

λ —特性系数， $1/m$ ；

\bar{m} —管子每单位长度的质量， kg/m ；

E —管材弹性模量， kg/m^2 ；

I —管子横截面惯性矩， m^4 ； $I = \frac{\pi}{64}(d_o^4 - d_i^4)$

g —重力加速度， m/s^2 ；

d_o —管子外径， m ；

d_i —管子内径， m 。

1.2.2 麦克达夫—弗格拉(Macduff and Feglar)法

此式可适用于等跨、两端固定、中间简支的管子自振频率的计算，是以等跨长为基础的，而在实际换热器中，折流板间的管段大多数是跨长不相等的，若管子的跨长相差较大，或计算精度要求较高时，此式将不适用。

$$f = 0.04944C_n \sqrt{\frac{EIg}{W_e L_i^4}} \quad (1-2)$$

式中： C_n —频率常数，无量纲；

W_e —单位管子长度的有效重量, kg/m, $W_e = W_m + W_t + W_s$;

W_m —管子单位长度自重, kg/m;

W_t —单位长度的管程流体重量, kg/m;

W_s —被管子取代的壳层流体单位长的虚拟重量, kg/m;

L_i —每跨长度, m;

其他符号意义同前。

1.2.3 甘那巴斯(V. Ganapathy)法

甘那巴斯法同麦克达夫-弗格拉法一样, 也适用于等跨、两端固定、中间简支的管子自振频率的计算, 但也是以等跨长为基础的, 在实际计算中具有一定的误差。

$$f = \frac{2.54CR \cdot 10^2}{L_i^2} \sqrt{\frac{E\gamma_s}{E_s\gamma}} \quad (1-3)$$

式中: C —频率常数, 无量纲;

R —管子的回转半径, m;

A —管子的横截面积, m^2 ;

E_s —钢材的弹性模量, kg/m^2 ;

γ_s —钢材的重度, kg/m^3 ;

γ —管材的重度, kg/m^3 ;

其他符号意义同前。

综上所述可知, 上述几式计算的结果偏差较大, 对于不同支承情况都用同一组公式, 误差较大, 不适合于工程应用。关于自振频率的计算, 国内外一些学者进行了一些探讨, 在此基础上, 制定了相应的标准, 下面就对国内外标准进行介绍。

1.2.4 GB151-1999 计算方法

国内关于换热器的现行标准主要是 GB151-1999《管壳式换热器》, 其中关于振动的相关章节在附录 E 中。该部分主要介绍了换热器管束振动的原因、计算方法、及判定规则等。主要包括: 流体诱发振动的计算, 换热管固有频率的计算, 振动的判据, 防振措施以及相关例题。

GB151-1999 中, 给出了两端固定中间简支情况下的固有频率计算公式^[25]:

a. 等跨管情况下计算公式：

$$f_n = 35.3\lambda_n \sqrt{\frac{E(d_o^4 - d_i^4)}{ml^4}} \quad (1-4)$$

λ_n —频率常数，无因次。可以查 GB151-1999 中表 E2 查得。

b. 非等跨管时候固有频率 f_n 计算公式：

$$f_n = 35.3k^2 \sqrt{\frac{E(d_o^4 - d_i^4)}{ml^4}} \quad (1-5)$$

k —弯曲系数， $\text{rad}^{1/2}/\text{m}$ 。对于两端固定，其他简支的直管， k 可通过求解下列频率方程得出。

$$\alpha_n \beta_0 + \beta_n \delta_0 = 0 \quad (1-6)$$

α_n 、 β_0 、 β_n 、 δ_0 分别按式(1-7)、式(1-8)计算：

$$\left. \begin{aligned} \alpha_n &= S_n - \frac{T_n U_n}{V_n} \\ \beta_n &= T_n - \frac{U_n^2}{V_n} \\ \gamma_n &= V_n - \frac{T_n^2}{V_n} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

式中：

$$\begin{aligned} S_n &= \frac{1}{2}(chkl_n + \cos kl_n) \\ T_n &= \frac{1}{2}(shkl_n + \sin kl_n) \\ U_n &= \frac{1}{2}(chkl_n - \cos kl_n) \\ V_n &= \frac{1}{2}(shkl_n - \sin kl_n) \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_0 & \beta_0 \\ \gamma_0 & \delta_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{n-1} & \beta_{n-1} \\ \gamma_{n-1} & \alpha_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{n-2} & \beta_{n-2} \\ \gamma_{n-2} & \alpha_{n-2} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} \alpha_2 & \beta_2 \\ \gamma_2 & \alpha_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 \\ \gamma_1 & \alpha_1 \end{bmatrix} \quad (1-8)$$

式中： n —总跨数；

l_n —第 n 跨的间距， m 。

在实际工程应用中，不等跨距的换热器，多半是中间折流板支持段的跨距是相等的，而两端跨距与中间不相等。考虑到这个实际，GB151-1999 又给出了两个简化公式：

c. 端跨距为 l_1 ，其他跨距均为 l 时，固有频率计算公式：

$$f_n = 35.3\lambda_n \sqrt{\frac{E(d_o^4 - d_i^4)}{ml^4}} \quad (1-9)$$

频率常数 λ_n 经过查图(GB151-1999 中，图 E12、E13)查得。

d. 两端跨距分别为 l_1 与 l_2 ，其他跨距均为 l 时：

此时换热管的固有频率按公式(1-5)计算，但是当跨数 $n > 4$ ，跨距比 $K_1 = l_1 / l$ 和 $K_2 = l_2 / l$ 均小于 2.5 时，对于两端固定，其他支承都是简支的直管，可利用公式(1-9)来估算其第一振型固有频率。频率常数 λ_n 由图(GB151-1999 中图 E12、E13)查得，但跨距比因按 K_1 、 K_2 中的较大值。

可以看出，GB151-1999 给出了两端固定，中间简支情况下的换热器管束固有频率的计算公式和方法，但是没有给出其他支承情况下（两端简支；一端简支，一端固支）的计算公式，并且在求解方程(1-7)、(1-8)时，计算比较复杂需要不断的迭代，因此，需要用计算机编程来实现这个步骤。随着工业换热器的发展，出现了一些两端不全是固支情况的换热器（例如：浮头式，具有保温层的换热器管板），这些情况在 GB151-1999 中都没有相应的计算方法。因此本文拟在振动理论分析基础上，建立不同边界条件下的振动方法，通过编制程序进行求解，为标准的修订提供计算依据。

另外，在两端跨距分别为 l_1 与 l_2 ，其他跨距均为 l 时，GB151-1999 提出了在满足所给条件下的近似计算公式，那么这个简化的误差是多少，适用范围是否过大，或者过小，这都是本文将要研究的内容。

1.2.5 TEMA 标准计算方法

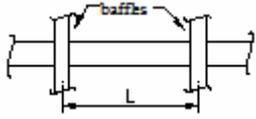
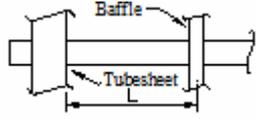
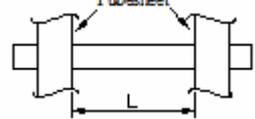
美国管式换热器制造商 (TEMA) 标准^[27]是世界上最早公布的有关管壳式换热器设计、制造、安装与维护方面的标准，至今已有 65 年的历史。早在 1941 年便开始出版的美国管式换热器制造商协会 (TEMA) 标准，于 1978 年发行第六版时，首次将“管束振动”列入标准。尽管是作为推荐性的切实可行的方法，并不要求设计者与制造厂严格遵守执行，但对保证换热器的安全运转，仍然起了很大的作用^[26]。

在 TEMA 标准中，第 V 部分介绍了管子的流体诱导振动。其中，关于管子的固有频率，TEMA 标准推荐的是一种简化的计算方法。对于光滑直管，其固有频率计算公式为：

$$f_n = 10.838 \frac{AC}{l^2} \left[\frac{EI}{\omega_0} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-10)$$

其中：A—管子轴向力系数，通过计算得出；
C—边界几何支承情况常数。

表 1-1 边界支承常数 C 值表

	两端简支	两端固支	一端简支，一端固支
常数			
C	9.9	15.42	22.37

将多跨管视为多根具有不同支承条件的单跨管，计算出每一段的单跨管的固有频率，把这些单跨管的最低的固有频率作为多跨管的固有频率。而实际上，管子发生振动时，整根管子的频率是一样的，而不是有 n 个频率。很显然，这样计算的结果是不准确的。

1.2.6 ASME 锅炉与压力容器规范计算方法

ASME 是 American Society of Mechanical Engineers（美国机械工程师协会）的英文缩写。美国机械工程师协会成立于 1880 年，在世界各地建有分部，是一个有很大权威和影响的国际性学术组织。ASME 主要从事发展机械工程及其有关领域的科学技术，鼓励基础研究，促进学术交流，发展与其他工程学、协会的合作，开展标准化活动，制定机械规范和标准。

为了适应核电厂设备安全运转与发展的需要，1995 年 ASME 锅炉与压力容器规范开始将“管与管束的流体诱发振动”作为非限定性规范列入第三篇附录 N 中，并使其成为核电厂设备制造规则以及核电厂操作维护规范的一个组成部分。与 TEMA 标准不同的是对所推荐的预测振动的计算公式都给以简要的说明并标有出处，还列出设计计算的步骤。

1.2.7 ANSYS 模拟软件计算方法

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场和声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。它是由世界上最大的有限元分析软件公司之一的美国 ANSYS 公司开发，并能与多数 CAD 接口，实现数据共享和交换，如 Pro/Engineer、NASTRAN、Alogor、I-DEAS、AutoCAD 等，是现代产品设计中的高级 CAD 工具之一^[26]。

ANSYS 有限元软件包是一个多用途的有限元法计算机设计程序，可以用来求解结构、流体、电力、电磁场及碰撞等问题。因此它可应用于以下工业领域：

航空航天、汽车工业、生物医学、桥梁、建筑、电子产品、重型机械、微机电系统、运动器械等。

ANSYS 软件主要包括三个部分：前处理模块，分析计算模块和后处理模块。

前处理模块提供了一个强大的实体建模及网格划分工具，用户可以方便地构造有限元模型；分析计算模块包括结构分析（可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析）、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析，可模拟多种物理介质的相互作用，具有灵敏度分析及优化分析能力；后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示（可看到结构内部）等图形方式显示出来，也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。

ANSYS 软件提供了 100 种以上的单元类型，用来模拟工程中的各种结构和材料。该软件有多种不同版本，可以运行在从个人机到大型机的多种计算机设备上，如 PC, SGI, HP, SUN, DEC, IBM, CRAY 等^{[28]-[30]}。

1.3 论文研究目的和内容

1.3.1 研究目的

随着科技的发展，工业所用的换热器越来越广泛，多年来人们已经认识到振动会对换热器造成巨大的影响。当管束的自振频率和驱动力频率相近时，换热器就会由于共振而失效。为了预测和防止换热器流体诱导振动破坏，不论采用何种诱导振动机理和预测方法都离不开管束固有频率的准确计算。

在固有频率的计算上，很多学者都提出了计算公式，而这些公式也被各种标准所采纳，成为规范性的标准。但是，在现行的标准中对于固有频率的计算方法都存在一些不足。计算公式都是近似公式，公式里面用的参数需要查图得到，难免产生误差。所以本文拟在振动理论分析基础上，编制程序进行固有频率的计算。

1.3.2 研究内容

基于以上考虑，本文研究内容如下：

- (1)利用 C++编写计算机程序求解换热器固有频率。
- (2)通过理论分析和推导，给出换热器管束的振动微分方程。

工业上的换热器一般是不等跨的，中间为折流板支承，可以看作是简支情况。而两边的支承边界条件情况就不同了，可能是固支，也可能是简支。本文以梁振动理论为基础，列出管子的微分方程。给出在一端简支，一端固支和两端简支情况下的边界条件，代入微分方程并求解，得出在不同边界条件下的管子的固有频率计算公式。

(4)以具体实例为依据，分别利用计算程序和标准中的公式，以及 ANSYS 模拟计算固有频率，对比分析，得出结果。

第二章 固有频率的计算公式

编写计算机程序计算换热管固有频率需要有相应的计算公式。由于 1.2 中介绍的各种算法都没有给出必要的计算公式，所以本文从量振动理论出发推导相应计算公式。

2.1 管子振动的微分方程

在工业上常用的换热器中，各折流板间的距离一般是相等的。另外，在计算换热器管子的自振频率时，一般都把折流板对管子的支撑作用简化成简支条件，而将管子两端的管板对管子的支撑作用简化为固定边界。本文在这种简化模型的基础上，考虑到管子是具有分布质量的弹性体，将其作为无限自由度的系统来处理，从梁的基本微分方程出发，求出不同支承边界条件下（主要是标准中没有给出的一端固支，一端简支和两端简支情况）的管子的频率方程，从而为工程设计提供精确而简单的计算换热器管子的自振频率的方法。下为管子振动时的微体受力图，见图 2-1。

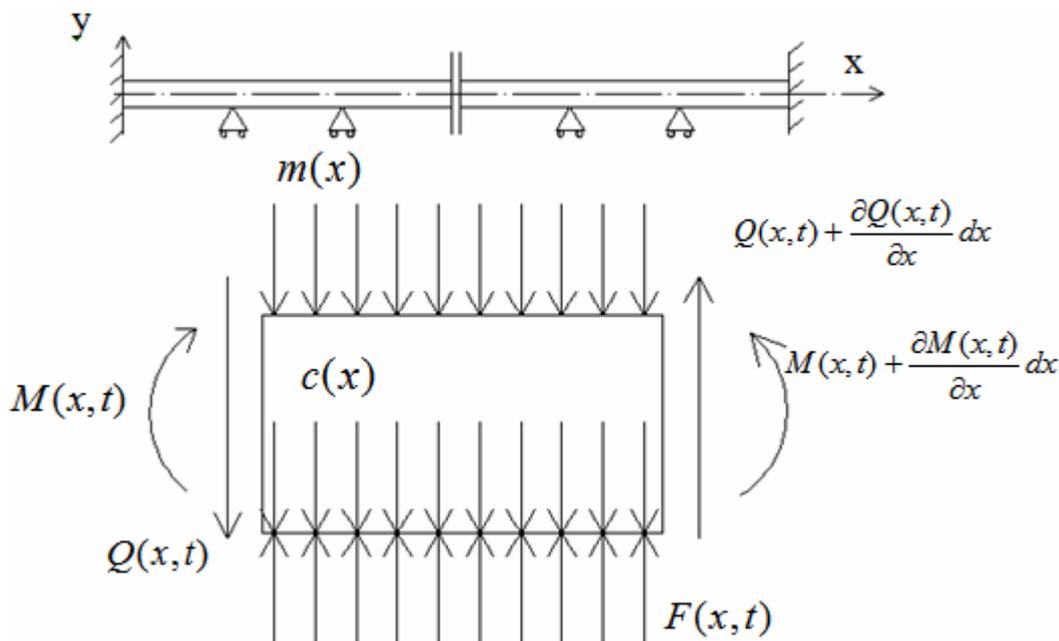


图 2-1 管子振动时的微体受力图

如图 2-1 所示，根据弹性力学方法，取管子的一小段微体，进行受力分析，可得管子的横振微分方程为：

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

式中： $Y(x, t)$ ——管子在瞬时 t 坐标 x 处的位移， m ；

C ——管子单位长度上的阻尼， $\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ；

$m(x)$ ——管子单位长度上的质量，kg/m；

$F(x,t)$ ——作用于管子单位长度上的外力，N/m。

对于无阻尼的自由振动，方程(2-1)可以简化为：

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

由梁振动形式分析可得瞬时位移 $Y(x,t)$ 形式为：

$$Y(x,t) = y(x) \sin(\omega t + \theta) \quad (2-3)$$

将(2-3)式代入(2-2)式，化简得：

$$\frac{d^4 y(x)}{dx^4} - k^4 y(x) = 0 \quad (2-4)$$

式中： ω 为管子的自振圆频率： $k = \left[\frac{m\omega^2}{EJ} \right]^{\frac{1}{4}}$

方程(2-4)的一般解的形式为：

$$y(x) = A'e^{kx} + B'e^{-kx} + C'\cos kx + D'\sin kx \quad (2-5)$$

为了推导简化，将上式变化为：

$$y(x) = AS(kx) + BT(kx) + CU(kx) + DV(kx) \quad (2-6)$$

其中的 S、T、U、V 都是三角函数和双曲函数的组合：

$$\begin{cases} S(z) = \frac{1}{2}(chz + \cos z) \\ T(z) = \frac{1}{2}(shz + \sin z) \\ U(z) = \frac{1}{2}(chz - \cos z) \\ V(z) = \frac{1}{2}(shz - \sin z) \end{cases}$$

针对不同跨数、不同的边界条件推导管子的频率方程，需要考虑 3 种支撑情况，按照梁振动计算固有频率的知识，要根据端点条件才能决定固有频率，对于梁最简单支承情况的端点条件为：

固定端：位移与转角等于零，即

$$Y = 0; \quad \frac{dy}{dx} = 0 \quad (2-7)$$

简支端：位移与弯矩等于零，即

$$Y = 0; \quad EJ \frac{d^2 Y}{dx^2} = 0 \quad (2-8)$$

自由端：弯矩与剪力等于零，即

$$EJ \frac{d^2 Y}{dx^2} = 0; \quad \frac{d}{dx} (EJ \frac{d^2 Y}{dx^2}) = 0 \quad (2-9)$$

通过推导和计算，经过整理得出各种边界条件下换热器管子的频率方程，见表 2-1。

表 2-1 各种边界条件下换热器管子的频率方程

边界条件	$N = 1$	$N = 2$	$N \geq 3$
两端简支	$\gamma = 0$	$\alpha_1 \gamma_2 + \alpha_2 \gamma_1 = 0$	$\alpha_0 \gamma_n + \alpha_n \gamma_0 = 0$
两端固支	$\beta = 0$	$\alpha_1 \beta_2 + \alpha_2 \beta_1 = 0;$	$\delta_0 \beta_n + \alpha_n \beta_0 = 0$
一端简支，一端固支	$\alpha = 0$	$\alpha_1 \alpha_2 + \beta_1 \gamma_2 = 0$	$\delta_0 \alpha_n + \beta_0 \gamma_n = 0$

2.2 管子自振频率（固有频率）的计算

由 2.1 可知各种支承条件下的管子的频率方程，因为方程中的 α_i 、 β_i 、 γ_i 都是 $S(kl_i)$ 、 $T(kl_i)$ 、 $U(kl_i)$ 、 $V(kl_i)$ 的函数，所以可将频率方程的一般形式写为：

$$G[\alpha(kl_i), \beta(kl_i), \gamma(kl_i) | 1 \leq i \leq n] = 0 \quad (2-10)$$

令 $kl_i = \lambda_i (1 \leq i \leq n)$ ，并给出其中某一个 $\lambda_m (1 \leq m \leq n)$ 的值，则有：

$$\lambda_i = \frac{l_i}{l_m} \lambda_m \quad 1 \leq i \leq n \quad (2-11)$$

将(2-11)式代入(2-10)式，如果此时(2-10)成立，则这个 λ_m 就是所求的；若方程(2-10)不成立，则再给出 λ_m 赋新值直到方程(2-10)成立（这一步可以用计算机编程来实现），这样求得 λ_m ，便可以得到下式：

$$k = \frac{\lambda_m}{l_m} \quad (2-12)$$

将 $k = \left(\frac{m\omega^2}{EJ}\right)^{\frac{1}{4}}$ 代入(2-12)式，可得：

$$\omega = \left(\frac{\lambda_m}{l_m}\right)^2 \sqrt{\frac{EJ}{m}} \quad (2-13)$$

这就是管子的自振圆频率，而管子的自振频率为：

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\lambda_m}{l_m}\right)^2 \sqrt{\frac{EJ}{m}} \quad (2-14)$$

对于某一种支承情况，可求得无穷多个这样的 λ_m ，分别将它们按从小到大的顺序记为 λ_{m1} 、 λ_{m2} 、 \dots ，从而从(2-14)式可以得到无穷多个频率：

$$f_j = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\lambda_{mj}}{l_m}\right)^2 \sqrt{\frac{EJ}{m}} \quad j=1,2,3,\dots \quad (2-15)$$

则 f_j 的物理意义是：管子的第 j 阶自振频率。

对于工程上的常用换热器，中间各折流版间的距离一般是相等的，如图 2-2 所示。

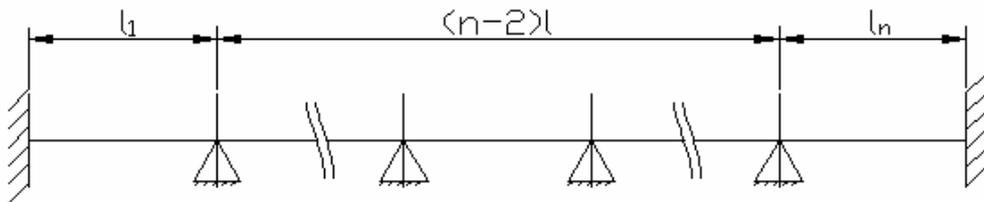


图 2-2 常见换热器管子结构示意图

各跨间距不相等时，直管固有频率 f_n 按下式(2-16)计算：

$$f_n = 35.3k^2 \sqrt{\frac{E(d_o^4 - d_i^4)}{ml^4}} \quad (2-16)$$

k —弯曲系数， $rad^{0.5}/m$ 。各跨管均为同一值。

对于全部简支情况下多跨管，求解下列频率方程：

$$\alpha_0 \gamma_n + \alpha_n \gamma_0 = 0 \quad (2-17)$$

对于两端固定的多跨管，求解下列频率方程：

$$\delta_0 \beta_n + \alpha_n \beta_0 = 0 \quad (2-18)$$

对于一端固定，一段简支情况下单跨管，求解下列频率方程：

$$\delta_0 \alpha_n + \beta_0 \gamma_n = 0 \quad (2-19)$$

α_n 、 β_n 、 γ_n 、 α_0 、 β_0 、 γ_0 、 δ_0 分别按公式(2-20)、(2-21)计算

$$\left. \begin{aligned} \alpha_n &= S_n - \frac{T_n U_n}{V_n} \\ \beta_n &= T_n - \frac{U_n^2}{V_n} \\ \gamma_n &= V_n - \frac{T_n^2}{V_n} \end{aligned} \right\} \quad (2-20)$$

$$S_n = \frac{1}{2}(chkl_n + \cos kl_n)$$

$$T_n = \frac{1}{2}(shkl_n + \sin kl_n)$$

式中：

$$U_n = \frac{1}{2}(chkl_n - \cos kl_n)$$

$$V_n = \frac{1}{2}(shkl_n - \sin kl_n)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_0 & \beta_0 \\ \gamma_0 & \delta_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{n-1} & \beta_{n-1} \\ \gamma_{n-1} & \alpha_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{n-2} & \beta_{n-2} \\ \gamma_{n-2} & \alpha_{n-2} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} \alpha_2 & \beta_2 \\ \gamma_2 & \alpha_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 \\ \gamma_1 & \alpha_1 \end{bmatrix} \quad (2-21)$$

式中：n—总跨数；

l_n —第 n 跨的间距，m。

公式 2-16 到公式 2-21 就是编写程序所需要的理论计算公式。

2.3 小结

本章通过理论推导得出了计算固有频率的理论方程，为下一步编写源代码做好准备。

第三章 固有频率的计算程序

3.1 创建文件

程序使用 Visual C++6.0 编写。

(1) 建立工程：

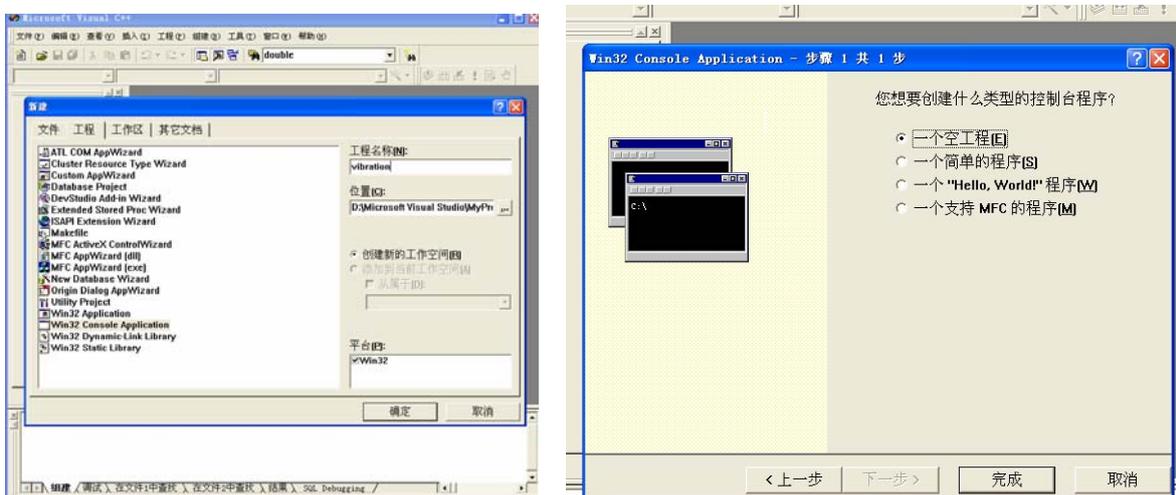


图 3-1 建立工程

(2) 创建源文件：

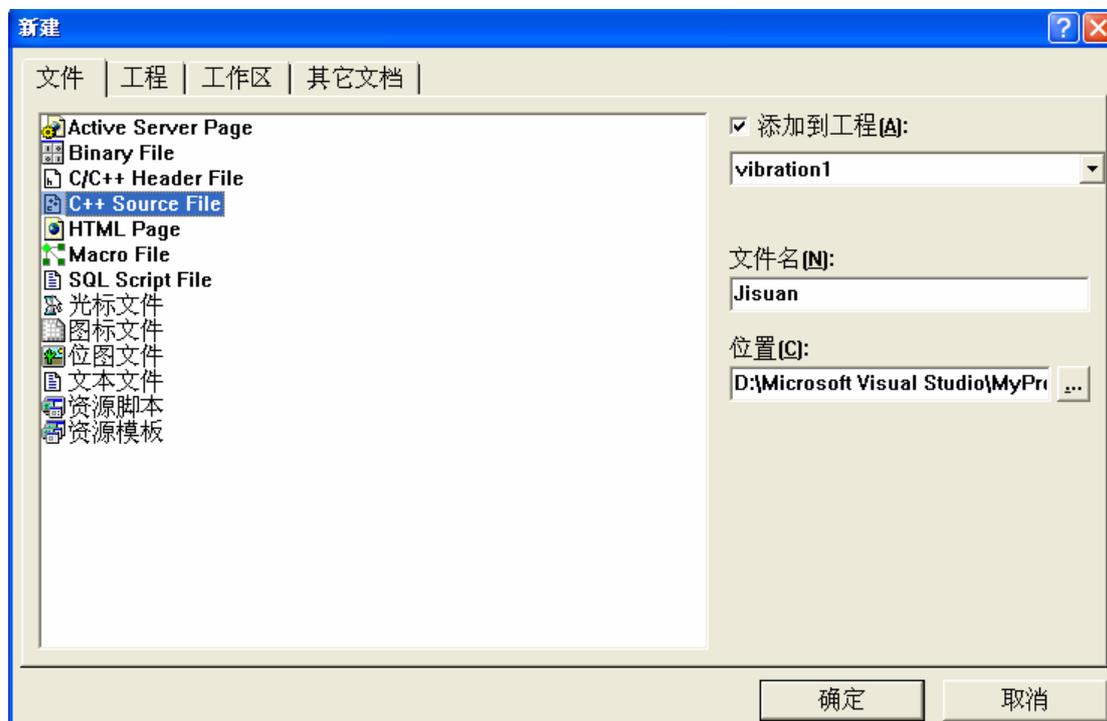


图 3-2 创建源文件

3.2 程序输入输出参数

由第二章可知，计算固有频率需要输入的参数为：跨数 N 、求解频率阶数 n 、

支承情况（1：两端固定；2：一端固定，一端简支；3：两端简支）、弹性模量 E (单位：MPa)、管子内外径(单位：m) d_o , d_i 、管材密度(单位：kg/m³)、各跨长度(m)。

运行完成后输出为：弯曲系数 k 值(单位：rad/m)、频率常数(无因次)、固有频率 f_n (单位：Hz)。

为了输入输出的方便，本程序使用文件输入输出。输入文件和输出文件以及程序放在同一根目录下。通过输入输出文件进行 IO 操作具有很好的特性：

(1) 简化输入输出操作，在多次计算同一类情况时候，可以只修改其中一个参数变可以完成修改。

(2) 便于取出计算结果。

输入文件命名为“input.txt”，输入文件内容如下：

```
N  n  p  E      do      di      r
4  2  3  203000  0.025  0.02  1.71
```

L1~Ln:

```
1.4  1.4  1.4  1.4
```

符号说明:

(1) N——跨数

(2) n——求解频率的阶数

(3) p——支承情况，范围 1 到 3。(1:两端固定;2:一端固定，一端简支;3:两端简支)

(4) E——弹性模量(单位:MPa)

(5) d_o ——管子外径(单位:m)， d_i ——管子内径(单位:m)。

(6) r——单位长度质量(单位:kg/m)。

(7) L1~Ln——各跨长度(单位:m)，可以往下面继续添加。中间用制表符(Tab 键)隔开，不要换行。

输出文件为“result.txt”内容为：

换热器管束振动计算程序输出文件 09.06.08

参数设置情况:

跨数 N=4

求解前 2 阶固有频率

边界条件:两端简支

弹性模量 E=203000 MPa

管子外径 $d_o=0.025$ m

管子内径 $d_i=0.02$ m

管子单位长度质量 $r=1.71 \text{ kg/m}$

初始频率值 $f_1=1 \text{ Hz}$

$L_1=1.4 \text{ m}$

$L_2=1.4 \text{ m}$

$L_3=1.4 \text{ m}$

$L_4=1.4 \text{ m}$

计算结果(n 为阶数, M 为余数项, Cn 为频率常数, f 为固有频率)

n	M	Cn	f
1	1.34558e-007	9.86961	29.4118
2	-9.25921e-008	11.514	34.3122

在输入文件中, 跨数 N、求解固有频率阶数 n、支承情况 p 定义为整型, 弹性模量 E、管子的内径 di、管子的外径 do、管子单位长度质量 r、各跨长度定义为双精类型。

3.3 计算步骤和程序流程框图

3.3.1 计算机计算固有频率步骤

输入初始参数后, 执行以下步骤:

- (1) 先给固有频率 f 赋初值;
- (2) 利用公式(2-16)反求 k 值;
- (3) 将 k 值代入公式(2-20)、(2-21), 求出 α_n 、 β_n 、 γ_n 、 α_0 、 β_0 、 γ_0 、 δ_0 ;
- (4) 根据支承条件, 从表 2-1 选择对应的频率方程, 将(3)步骤求得的值代入率方程等号左边的多项式, 把求得的值赋给 M(频率方程余数项);
- (5) 判断 M 值是否满足要求: 不满足则让固有频率 f 值增加 0.000001 并回到步骤(2); 满足则记录 k 值, 并计算出频率常数(无因次)和固有频率 f_n ;
- (6) 判断所求频率阶数是否小于 n, 小于则让固有频率 f 值增加 0.000001, 并回到步骤(2)
- (7) 按任意键结束程序。

关于上述步骤的相关说明如下:

- (1) 设置频率方程余数项 M 值的解释: 例如计算全部简支情况下管束的固有频率时, 在进行具体计算时要求 $\alpha_0\gamma_n + \alpha_n\gamma_0 = 0$, 如果不为零, 则需要再改变 k 值, 依此类推, 直至计算出的余数值为零时, k 才为方程(2-52)的解。所以令 $M = \alpha_0\gamma_n + \alpha_n\gamma_0$, 但一般采用的数值解法很难达到使 M 的值为 0 的要求。实

际计算时可认为只要余数 M 在许可的范围内接近 0 就可以了，例如 $M \leq 10^{-6}$ 时，所得出的 k 值就足够准确了。

(2) 在本程序中，要求 $M \leq |10^{-4}|$ 的解释：考虑到程序的识别能力，如果对 M 值要求过严格，则在计算机迭代过程中难免出现对固有频率值的遗漏，把 M 的限制扩大，增加计算机识别能力。将 $M \leq |10^{-4}|$ 后求得的频率常数值和 $M \leq |10^{-6}|$ 时求得值相差不到 0.01，并且修改后求得的频率常数稍偏小，对工程上应用不会造成影响。

3.3.2 流程框图

计算固有频率程序的流程框图，如图 3-1 所示。

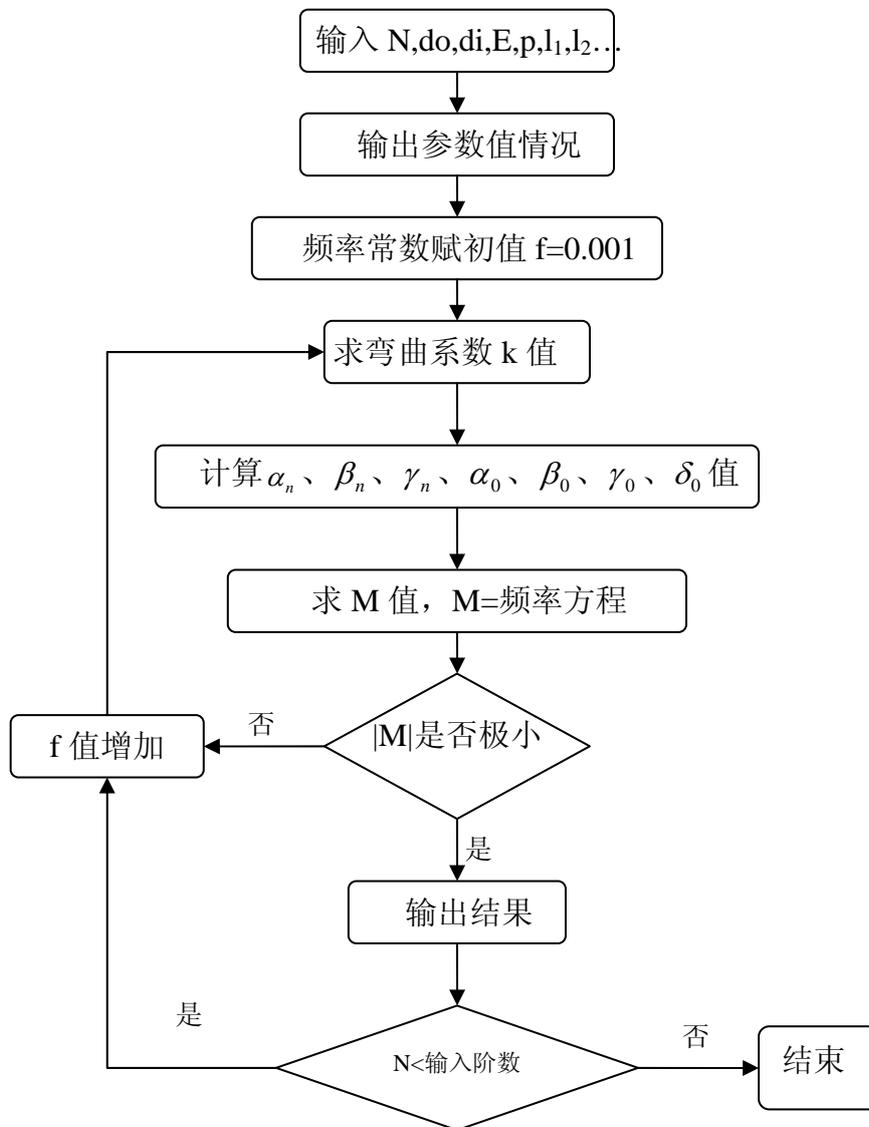


图 3-1 计算固有频率程序框图

3.4 迭代计算固有频率

采用 do-while 循环不断重复计算余数项 M 值,直到 M 满足要求,则输出计算结果。如果不满足,则从给出 k 值(先让 f 值增加 0.0001, 让后反求 k 值), 再判断 k 值是否满足要求。以下程序段是用来迭代计算固有频率的程序的一部分。具体代码如下:

```
do
{
    k=pow((f1/(35.3*hh)),0.5);//弯曲系数, 各跨管均为同一数值
    for(i=0;i<N;i++)
    {
        s[i]=0.5*(cosh(k*L[i])+cos(k*L[i]));
        t[i]=0.5*(sinh(k*L[i])+sin(k*L[i]));
        u[i]=0.5*(cosh(k*L[i])-cos(k*L[i]));
        v[i]=0.5*(sinh(k*L[i])-sin(k*L[i]));
        a[i]=s[i]-t[i]*u[i]/v[i];//a[i]即是  $\alpha[i]$ 

        b[i]=t[i]-u[i]*u[i]/v[i];// b[i]即是  $\beta[i]$ 

        c[i]=v[i]-t[i]*t[i]/v[i];// c[i]即是  $\gamma[i]$ 
    }
    if(N>=3)//判断跨数是否大于三
    {
        double a11,a12,a21,a22,b11,b12,b21,b22;
        for(i=0;i<N-1;i++)//计算  $\alpha_0$ 、 $\beta_0$ 、 $\gamma_0$ 、 $\delta_0$ 
        {
            if(i==0)
            {
                b11=a[i];
                b12=b[i];
                b21=c[i];
                b22=a[i];
            }
            else
            {
```

```

        a11=b11;
        a12=b12;
        a21=b21;
        a22=b22;
        b11=a[i]*a11+b[i]*a21;
        b12=a[i]*a12+b[i]*a22;
        b21=c[i]*a11+a[i]*a21;
        b22=c[i]*a12+a[i]*a22;
    }
}
a0=b11;b0=b12;c0=b21;d0=b22;
//a0 即是  $\alpha_0$ 、b0 即是  $\beta_0$ 、c0 即是  $\gamma_0$ 、d0 即是  $\delta_0$ 
//判断支承情况, 1: 两端固定; 2: 一端固定, 一端简支; 3: 两端简支
    if(pp==1)
        M=a[N-1]*b0+b[N-1]*d0;
    if(pp==2)
        M=b0*c[N-1]+a[N-1]*d0;
    if(pp==3)
        M=a0*c[N-1]+a[N-1]*c0;
}
else if(N==2)//跨数为 2 时候.
{
    if(pp==1)
        M=a[0]*b[1]+a[1]*b[0];
    if(pp==2)
        M=a[0]*a[1]+b[0]*c[1];
    if(pp==3)
        M=a[0]*c[1]+a[1]*c[0];
}
else if(N==1)//跨数为 1.
{
    if(pp==1)
        M=b[0];
    if(pp==2)
        M=a[0];
}

```

```
        if(pp==3)
            M=c[0];
    }
    if(M>-0.0001&&M<0.0001)//判断余数项是否满足要求.
    {
        f=35.3*k*k*hh;//如果满足,则计算固有频率.
        if(int(f)!=int(f0))//判断固有频率以上一次迭代的是否不一样
        {
            f0=f;
            j++;
            cout<<endl<<"第"<<j<<"阶固有频率"<<endl;
            cout<<"弯曲系数 k="<<k<<endl;
            cout<<"固有频率 f"<<j<<"="<<f<<endl;//输出频率结果
        }
        else f1=f1+0.00001;
    }
    else f1=f1+0.00001;
}while(j<jj);
```

3.5 小结

本章通过编写 C++ 程序，把第二章复杂的公式转化为计算机程序，实现了程序计算固有频率的目的。

第四章 固有频率计算程序的验证

4.1 利用标准计算方法验证

在 GB151-1999 和 GB151-1989 中，已经给出了均布支承情况下的换热器管束固有频率的计算公式(4-1)，这部分公式也给出了准确的参数值，所以可以用这个公式来验证程序在计算均布支承情况下的计算准确性。

$$f_n = 35.3\lambda_n \sqrt{\frac{E(d_o^4 - d_i^4)}{ml^4}} \quad (4-1)$$

λ_n —频率常数，无因次。

E —管材弹性模量，MPa；

d_o —管子外径，m；

d_i —管子内径，m。

m —管子每单位长度的质量，kg/m；

l —每段管子的跨长

其中， d_o 、 d_i 、 E 、 m 、 l 都是已知的。对于等跨管，频率常数 λ_n 可以从表中查出，见表 4-1。

表 4-1 等跨直管的频率常数 λ_n

跨数	两端固定		两端简支		一端固定，一端简支	
	一阶	二阶	一阶	二阶	一阶	二阶
1	22.396	61.737	9.870	39.520	15.434	50.017
2	15.418	22.373	9.870	15.418	11.514	19.921
3	12.648	18.469	9.870	12.648	10.631	15.418
4	11.514	15.418	9.870	11.514	10.305	13.289
5	10.950	13.693	9.870	10.950	10.150	12.169
6	10.631	12.648	9.870	10.631	10.065	11.514
7	10.434	11.973	9.870	10.434	10.014	11.101
8	10.305	11.514	9.870	10.305	9.980	10.825
9	10.215	11.188	9.870	10.215	9.957	10.631
10	10.150	10.950	9.870	10.150	9.940	10.491
20	9.941	10.150	9.870	10.005	9.887	10.028

也就是说，对于等跨管的计算，公式给出了准确的计算公式和频率常数值。所以我们可以用等跨管的公式计算(按 GB151-199)和程序计算做比较，验证程序计算的误差。

以 GB151-1999 中附录 E 中第 5 部分的例题为基础，将两端跨长改为和中间相同，跨数从 1 开始变化到 10 跨，再加上 20 跨的情况，其他参数不变。于是可以得到以下参数值，见表 4-2。

表 4-2 验证程序计算实例参数表

管材弹性模量	管子外径	管子内径	管子每单位长度的质	每段管子的跨长
MPa	m	m	量, kg/m	m
203000	0.025	0.02	1.71	1.4

分别代入不同支承边界条件下的频率常数值，计算不同条件下的固有频率。再用程序分别计算对应的固有频率值，记录，记录到表 4-2，表 4-3，表 4-4 中，比较两者的误差。

首先计算两端固支情况下的固有频率，计算结果如下表(表 4-2)所示。

表 4-2 两端固支情况

跨数	一阶固有频率			二阶固有频率		
	公式计算	程序计算	偏差	公式计算	程序计算	偏差
1	66.74093	66.673	0.10178%	183.9786	183.787	0.10414%
2	45.94622	45.9467	0.00103%	66.67239	66.6731	0.00107%
3	37.69152	37.6913	0.00058%	55.03832	55.0365	0.00331%
4	34.31216	34.3121	0.00016%	45.94622	45.9463	0.00016%
5	32.63142	32.6309	0.00158%	40.80566	40.8046	0.00260%
6	31.68078	31.681	0.00068%	37.69152	37.6916	0.00021%
7	31.09372	31.0947	0.00317%	35.67999	35.6805	0.00142%
8	30.70929	30.7083	0.00323%	34.31216	34.3122	0.00013%
9	30.44109	30.4406	0.00160%	33.34066	33.3421	0.00431%
10	30.24738	30.2477	0.00104%	32.63142	32.6308	0.00189%
20	29.62456	29.623	0.00526%	30.24738	30.2477	0.00104%

从表 4-2 可以看出，对于两端固支情况，等跨支承的换热器管束一阶和二阶固有频率公式计算值与程序计算值误差基本在万分之一(0.001%)一下。只有在单跨情况下偏差达到了 0.1%。由此可知在计算此种情况时候，程序的准确性是很高的。

对于两端简支情况，其频率常数值可从 GB151-1989 中查得，计算结果如表

4-3 所示。

表 4-3 两端简支情况

跨数	一阶固有频率			二阶固有频率		
	公式计算	程序计算	偏差	公式计算	程序计算	偏差
1	29.412974	29.4117	0.00433%	117.7711	117.647	0.10537%
2	29.412974	29.4117	0.00433%	45.946225	45.9468	0.00125%
3	29.412974	29.4115	0.00501%	37.69152	37.6911	0.00111%
4	29.412974	29.4116	0.00467%	34.312157	34.3118	0.00104%
5	29.412974	29.4116	0.00467%	32.631415	32.6306	0.00250%
6	29.412974	29.4116	0.00467%	31.680783	31.6808	0.00005%
7	29.412974	29.4117	0.00433%	31.093716	31.0944	0.00220%
8	29.412974	29.4117	0.00433%	30.709291	30.708	0.00420%
9	29.412974	29.4117	0.00433%	30.441087	30.4404	0.00226%
10	29.412974	29.4117	0.00433%	30.247385	30.2476	0.00071%
20	29.412974	29.4117	0.00433%	29.815279	29.6229	0.06452%

从表 4-3 可以看出，对于两端简支情况，等跨支承的换热器管束一阶和二阶固有频率公式计算值与程序计算值误差基本在万分之一(0.001%)一下。只有在 20 跨计算时候偏差达到 0.064%。由此可知在计算此种情况时，程序的准确性是很高的。

对于一端固定，一端简支情况的情况，其频率常数值可从 GB151-1989 中查得，计算结果如表 4-4 所示。

表 4-4 一端固定，一端简支情况

跨数	一阶固有频率			二阶固有频率		
	公式计算	程序计算	偏差	公式计算	程序计算	偏差
1	45.993905	45.9451	0.10611%	149.05256	148.894	0.10638%
2	34.312157	34.3116	0.00162%	59.365335	59.3654	0.00011%
3	31.680783	31.6808	0.00005%	45.946225	45.9463	0.00016%
4	30.709291	30.7081	0.00388%	39.601724	39.601	0.00183%
5	30.247385	30.2476	0.00071%	36.264081	36.2625	0.00436%
6	29.994082	29.9946	0.00173%	34.312157	34.312	0.00046%
7	29.8421	29.8411	0.00335%	33.081401	33.0811	0.00091%
8	29.740778	29.741	0.00075%	32.25891	32.2576	0.00406%
9	29.672238	29.6722	0.00013%	31.680783	31.681	0.00068%
10	29.621577	29.6229	0.00447%	31.263578	31.2621	0.00473%
20	29.463635	29.4650	0.00463%	29.88382	29.8848	0.00328%

从表 4-4 可以看出，对于一端固定，一端简支情况，等跨支承的换热器管束一阶和二阶固有频率公式计算值与程序计算值误差基本在万分之一(0.001%)一下。只有在单跨情况下偏差达到了 0.1%。由此可知在计算此种情况时，程序的准确性是很高的。

由表 4-2，表 4-3，表 4-4 可知，程序计算结果和公式计算结果误差很小，在工程上可以忽略，证明程序在计算均布情况下的正确性。

4.2 ANSYS 软件模拟计算验证

用程序计算均布情况下的固有频率已经在 4.1 验证了正确性。但是程序是否适用于非均布情况下的换热管的固有频率计算，这需要用别的方法来验证。首先是因为标准没有给出具体的计算非等跨情况频率的计算公式，其次虽然给了几个近似计算公式但是其适用范围有限。

ANSYS 软件可以模拟计算工程上的一些实际问题，在工程上的到广泛应用，并且 ANSYS 计算的结果得到工程界的认可。所以本文利用 ANSYS 软件模拟计算和程序计算结果对比，验证程序的正确性。为了方便起见，我们使用的实例参数和均跨情况中使用的实例参数部分取成一样的，具体见表 4-5。

表 4-5 参数表

管材弹性模量 MPa	管子外径 m	管子内径 m	管子每单位长度的质 量, kg/m	中间每段管子的跨 长(m)
203000	0.025	0.02	1.71	1.4

不同点是此实例分为三种支承情况，每种情况又分为四种跨数，每种跨数再分为 8 种不同跨距。分类情况见图 4-1。其中，跨数变化时，只是中间跨数增加减少，除了端跨距外，其他跨距都为 1.4m。跨距变化时，只是右端跨距变化，变化范围见图 4-1。

说明：(1) 使用 GB151 计算时，对于两端支承条件不是固支的情况，频率常数从 GB151-1989 中查得。

(2) 在跨数分类时，当 $N > 4$ 跨时候，频率常数曲线变化小，比较密集，所以跨数从 4 跨开始取，当跨数 $N > 8$ 以后，频率常数左边部分基本趋近与一条直线，没有取更多值的必要，所以跨数分为 4、5、6、8 四种情况。

(3) 在跨长变化时，影响查表的是 K 值，所以只用改动右端跨距使得 K_2 值变化即可。而在设定 l_n 值时，需让 K_2 在变化超过 2.5 这个范围。

利用 ANSYS 软件模拟计算各种情况下的固有频率，计算结果填入表中。在

用程序计算相应的频率，也记录到表中，对比两者的差别。

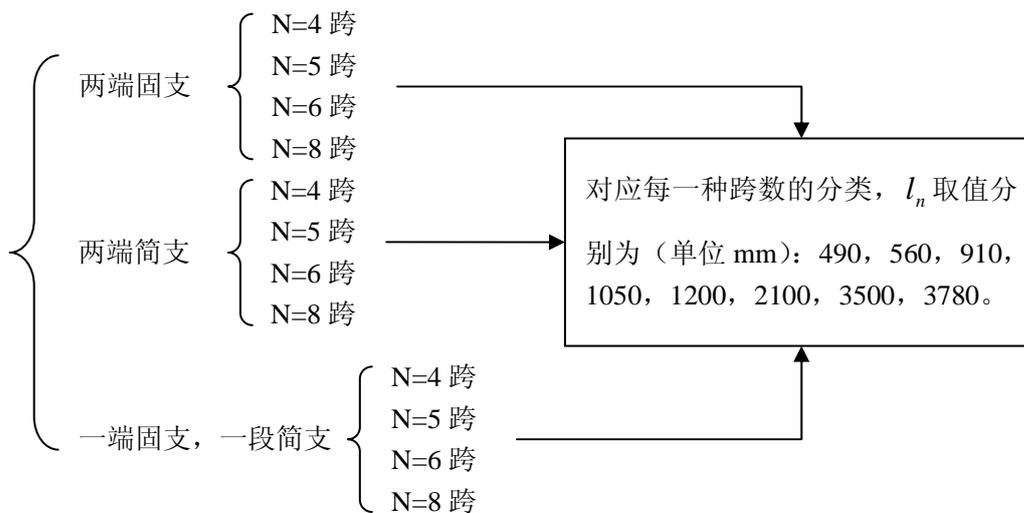


图 4-1 分类情况图

由表 4-6 可知，在两端固定情况下在 4 跨、5 跨、6 跨以及各个跨长变化下，程序计算固有频率和 ANSYS 模拟计算固有频率误差很小。最大误差为 0.6% 是在 4 跨情况出现，最小误差 0.15% 在每种跨长情况下都出现。对比一阶频率偏差和二阶频率偏差，可得到在上述情况下一阶频率的计算误差比二阶频率计算误差小。只有在 8 跨情况下 L_2 长为 3.5 和 2.37 时表现出一阶偏差比二阶偏差大的情况。这可能是计算精度的影响。

在表 4-7 中对比较程序计算结果和 ANSYS 计算结果可得，在上述各种跨数情况下，程序计算一阶和二阶固有频率结果和 ANSYS 计算结果误差最大为 0.55%，最小误差为 0.04%。误差在允许范围之内，证明程序计算两端简支情况下非等跨支撑的正确性。

从表 4-8 可以得出，程序计算的频率值和 ANSYS 计算的频率值偏差小于 1%，最大偏差为 0.57%，最小偏差为 0.04%。误差在允许范围内。证明了程序在计算一端固支，一段简支情况下非等跨管固有频率的正确性。所以用此程序来计算换热器固有频率是可行的。

另外，随着跨距比的增加，管束固有频率值降低。随着跨数的增加，管束的固有频率值减小。

表 4-6 两端固定计算结果

跨数 N	右端长 L2(m)	K2(无 量纲)	程序计算频率		ANSYS 计算频率		误差	
			一阶 (Hz)	二阶 (Hz)	一阶 (Hz)	二阶 (Hz)	一阶	二阶
4	0.49	0.35	40.2324	58.7267	40.411	59.078	0.44%	0.60%
	0.56	0.4	39.9784	58.3698	40.15	58.709	0.43%	0.58%
	0.91	0.65	38.7911	56.7874	38.947	57.105	0.40%	0.56%
	1.05	0.75	38.2873	56.0417	38.44	56.355	0.40%	0.56%
	1.2	0.86	37.6469	54.8532	37.796	55.16	0.40%	0.56%
	2.1	1.5	23.5992	39.4639	23.634	39.621	0.15%	0.40%
	3.5	2.5	9.21147	25.5455	9.2067	25.597	0.05%	0.20%
	3.78	2.7	7.95908	22.2056	7.9536	22.238	0.07%	0.15%
5	0.49	0.35	35.4909	48.796	35.626	49.049	0.38%	0.52%
	0.56	0.4	35.3785	48.5164	35.51	48.76	0.37%	0.50%
	0.91	0.65	34.8328	47.2268	34.958	47.453	0.36%	0.48%
	1.05	0.75	34.5958	46.6555	34.719	46.878	0.36%	0.48%
	1.2	0.86	34.2945	45.8634	34.416	46.081	0.35%	0.47%
	2.1	1.5	23.5183	35.4403	23.553	35.567	0.15%	0.36%
	3.5	2.5	9.2064	25.4652	9.2016	25.517	0.05%	0.20%
	3.78	2.7	7.95509	22.1708	7.9496	22.203	0.07%	0.15%
6	0.49	0.35	33.2568	42.6079	33.373	42.802	0.35%	0.46%
	0.56	0.4	33.1991	42.4371	33.313	42.626	0.34%	0.45%
	0.91	0.65	32.9119	41.6169	33.022	41.795	0.33%	0.43%
	1.05	0.75	32.7848	41.2523	32.895	41.428	0.34%	0.43%
	1.2	0.86	32.6222	40.764	32.731	40.937	0.33%	0.42%
	2.1	1.5	23.502	33.3474	23.537	33.459	0.15%	0.33%
	3.5	2.5	9.20599	25.4445	9.2012	25.496	0.05%	0.20%
	3.78	2.7	7.95478	22.1646	7.9492	22.197	0.07%	0.15%
8	0.49	0.35	31.3281	36.4613	31.428	36.601	0.32%	0.38%
	0.56	0.4	31.3074	36.3908	31.407	36.528	0.32%	0.38%
	0.91	0.65	31.2017	36.0379	31.3	36.171	0.32%	0.37%
	1.05	0.75	31.1537	35.8779	31.252	36.01	0.32%	0.37%
	1.2	0.86	31.0916	35.6669	31.189	35.798	0.31%	0.37%
	2.1	1.5	23.498	31.4126	23.533	31.511	0.15%	0.31%
	3.5	2.5	9.23	25.4376	9.2012	25.489	0.31%	0.20%
	3.78	2.7	7.97	22.1633	7.9492	22.196	0.26%	0.15%

表 4-7 两端简支情况计算结果

跨数 N	右端长 L2 (m)	K2(无 量纲)	程序计算频率		ANSYS 计算频率		误差	
			一阶 (Hz)	二阶 (Hz)	一阶 (Hz)	二阶 (Hz)	一阶	二阶
4	0.49	0.35	39.0582	57.113	39.213	57.43	0.40%	0.56%
	0.56	0.4	38.7725	56.6953	38.923	57.006	0.39%	0.55%
	0.91	0.65	37.2747	54.3354	37.413	54.624	0.37%	0.53%
	1.05	0.75	36.4182	52.425	36.552	52.701	0.37%	0.53%
	1.2	0.86	34.9479	48.482	35.075	48.731	0.36%	0.51%
	2.1	1.5	16.34	37.55	16.352	37.694	0.07%	0.38%
	3.5	2.5	6.30415	20.7866	6.2993	20.818	0.08%	0.15%
	3.78	2.7	5.4489	18	5.444	18.018	0.09%	0.10%
5	0.49	0.35	34.9587	47.5113	35.083	47.737	0.36%	0.48%
	0.56	0.4	34.8261	47.1902	34.949	47.411	0.35%	0.47%
	0.91	0.65	34.1082	45.4509	34.225	45.656	0.34%	0.45%
	1.05	0.75	33.69	44.3037	33.804	44.502	0.34%	0.45%
	1.2	0.86	32.939	42.1227	33.05	42.309	0.34%	0.44%
	2.1	1.5	16.3231	34.3818	16.335	34.501	0.07%	0.35%
	3.5	2.5	6.30202	20.7633	6.2967	20.794	0.08%	0.15%
	3.78	2.7	5.461	17.9871	5.4419	18.005	0.35%	0.10%
6	0.49	0.35	32.9791	41.804	33.09	41.981	0.34%	0.42%
	0.56	0.4	32.9087	41.6009	33.018	41.775	0.33%	0.42%
	0.91	0.65	32.637	40.8509	32.624	40.649	0.33%	0.41%
	1.05	0.75	32.2856	39.7786	32.39	39.939	0.32%	0.40%
	1.2	0.86	31.8531	38.4383	31.956	38.592	0.32%	0.40%
	2.1	1.5	16.3212	32.7136	16.333	32.821	0.07%	0.33%
	3.5	2.5	6.32	20.7597	6.2965	20.791	0.37%	0.15%
	3.78	2.7	5.47	17.9855	5.4417	18.004	0.52%	0.10%
8	0.49	0.35	31.2269	36.1209	31.325	36.254	0.31%	0.37%
	0.56	0.4	31.2006	36.0331	31.298	36.165	0.31%	0.37%
	0.91	0.65	31.0505	35.535	31.147	35.663	0.31%	0.36%
	1.05	0.75	30.958	35.2218	31.054	35.348	0.31%	0.36%
	1.2	0.86	30.7779	34.6118	30.873	34.735	0.31%	0.36%
	2.1	1.5	16.321	31.1444	16.333	31.242	0.07%	0.31%
	3.5	2.5	6.32	20.771	6.2965	20.79	0.37%	0.09%
	3.78	2.7	5.47	18.01	5.4417	18.003	0.52%	0.04%

表 4-8 一端固定，一端简支情况计算结果

跨数 N	右端长 L2(m)	K2(无 量纲)	程序计算频率		ANSYS 计算频率		误差	
			一阶 (Hz)	二阶 (Hz)	一阶 (Hz)	二阶 (Hz)	一阶	二阶
4	0.49	0.35	39.6606	57.9509	39.826	58.282	0.42%	0.57%
	0.56	0.4	39.352	57.5526	39.513	57.878	0.41%	0.57%
	0.91	0.65	37.7376	55.2687	37.884	55.574	0.39%	0.55%
	1.05	0.75	36.8135	53.3376	36.954	53.63	0.38%	0.55%
	1.2	0.86	35.233	49.2306	35.365	49.493	0.37%	0.53%
	2.1	1.5	16.3449	37.9936	16.357	38.145	0.07%	0.40%
	3.5	2.5	6.30501	20.7925	6.3002	20.823	0.08%	0.15%
	3.78	2.7	5.44961	18.0036	5.4447	18.022	0.09%	0.10%
5	0.49	0.35	35.2347	48.174	35.364	48.412	0.37%	0.49%
	0.56	0.4	35.0929	47.8434	35.22	48.076	0.36%	0.49%
	0.91	0.65	34.327	46.0502	34.447	46.266	0.35%	0.47%
	1.05	0.75	33.8815	44.8557	33.999	45.064	0.35%	0.46%
	1.2	0.86	33.0845	42.5749	33.198	42.769	0.34%	0.46%
	2.1	1.5	16.3236	34.6073	16.336	34.731	0.08%	0.36%
	3.5	2.5	6.30166	20.7642	6.2968	20.795	0.08%	0.15%
	3.78	2.7	5.44688	17.9876	5.442	18.006	0.09%	0.10%
6	0.49	0.35	33.1243	42.2219	33.237	42.406	0.34%	0.44%
	0.56	0.4	33.0497	42.0106	33.161	42.192	0.34%	0.43%
	0.91	0.65	32.637	40.8509	32.745	41.022	0.33%	0.42%
	1.05	0.75	32.3917	40.115	32.498	40.281	0.33%	0.41%
	1.2	0.86	31.937	38.7186	32.041	38.877	0.33%	0.41%
	2.1	1.5	16.3213	32.8396	16.333	32.949	0.07%	0.33%
	3.5	2.5	6.3014	20.7598	6.2966	20.791	0.08%	0.15%
	3.78	2.7	5.452	17.9856	5.4417	18.004	0.19%	0.10%
8	0.49	0.35	31.2802	36.2998	31.379	36.436	0.32%	0.38%
	0.56	0.4	31.2529	36.2087	31.352	36.343	0.32%	0.37%
	0.91	0.65	31.0964	35.6929	31.194	35.823	0.31%	0.36%
	1.05	0.75	31.0002	35.3686	31.097	35.497	0.31%	0.36%
	1.2	0.86	30.8131	34.7378	30.909	34.863	0.31%	0.36%
	2.1	1.5	16.321	31.1936	16.333	31.292	0.07%	0.32%
	3.5	2.5	6.32	20.762	6.2965	20.79	0.37%	0.13%
	3.78	2.7	5.47	18.01	5.4417	18.003	0.52%	0.04%

4.3 小结

本章的内容主要包括：

- (1) 利用标准给的计算方法验证了程序计算均跨情况管热管固有频率的正

确性。

(2) 利用 ANSYS 软件模拟方法以多个实例为基础验证了程序计算非等跨管固有频率的正确性。

第五章 结论

工程上计算换热管固有频率的方法很多，在我国现行的标准 GB151-1999 中给出计算均布支承情况下的固有频率方程和计算参数。由于计算公式的复杂和手工计算容易造成误差的原因，标准并没有给出计算非均布情况下的换热管固有频率计算方法。本文编写了一个计算机 C++ 程序计算各种不同情况下的固有频率，补充了标准的不足。论文结合标准计算方法、ANSYSA 模拟计算方法分别验证了程序在计算均布情况下的计算正确性和计算非等跨情况下的固有频率计算正确性。实验结果证明程序计算误差很小，切实可行。

论文的主要工作包括：(1) 以梁振动原理推导出各种边界条件下换热器管子的频率方程。结合方程给出计算各种边界条件和情况下的固有频率计算方程。(2) 利用 VC++ 比编写求解换热管固有频率的程序。(3) 通过验证证明换热管固有频率的程序误差很小。

由于时间的关系，程序采用了命令行风格的用户界面，这样使得程序的使用不太方便。下一步的工作可以为程序开发图形用户界面。

参考文献

- [1]朱雨峰. 翅片管换热器管束振动的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [2]B. Peng, Q. W. Wang *et al.* An Experimental Study of Shell-and-Tube Heat Exchangers With Continuous Helical Baffles[J]. *Journal of Heat Transfer* 2007, 129(10): 1425-1431.
- [3]符兴承,吴金星. 管壳式换热器管束振动分析及防振措施[J]. *化学工业与工程技术*. 2003, 24(3): 26-29.
- [4]朱有庭. 热交换器研究的回顾与展望[J]. *化工装备技术*. 1994, 15(1): 1-3.
- [5]李汉. 管壳式换热器振动问题探讨[J]. *化工设计*.2007, 17 (1): 17-19.
- [6]金志浩, 金文等. 振动分析在管壳式换热器设计中的应用[J]. *沈阳化工学院学报*, 2001, 15(1): 57-60.
- [7]曾涛. 管壳式换热器的传热强化及管束的振动[J]. *化工装备技术*, 2000, 21 (3): 25-26.
- [8]吴声鹤. 管壳式换热器管束振动与防范[J]. *振动、测试与诊断*. 1992, 12(4): 28-33.
- [9]H.G.D.GOYDER.FLOW-INDUCED VIBRATION IN HEAT EXCHANGERS[J]. *Trans IChemE*.2002,80:226-232..
- [10]R.Ajith Kumar, V. Sugumaran *et al.* Decision tree: A very useful tool in analysing flow-induced vibration data[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, (2008) 22: 202 - 216.
- [11]D. Bouris, E. Konstantinidis *et al.* Design of a novel, intensified heat exchanger for reduced fouling ratesreduced fouling rates[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 (2005) 3817 - 3832.
- [12]赵庆国. 换热器振动的研究[D]. 天津: 天津大学, 1985.
- [13]钱颂文, 岑汉钊等. 换热器管束流体力学与传热[M]. 北京:中国石化出版社, 2001.
- [14]李安军, 邢桂菊等. 国内换热器流体诱导振动的研究状况[J]. *辽宁化工*. 2007, 36(12): 849-856.
- [15]金志浩, 振动分析在管壳式换热器中的应用[J]. *沈阳化工学院学报*, 2001, 15 (1): 57- 60.
- [16]陈绍元. 管壳式换热器管子振动分析[J]. *计算与分析*, 1997, 14 (2): 23 - 31.
- [17]聂清德, 郭宝玉. 换热器管束中的流体弹性不稳定性[J]. *力学学报*. 1996, 28(2): 151-158.
- [18]聂清德, 候增炎. 换热器的防振[J]. *石油化工设备*. 1985, 14(5): 1-24.
- [19]张颖, 王茂廷等. 流体诱发换热器管束振动机理与防振[J]. *化工装备技术*. 2008, 29(2): 44-46.
- [20]Shahab Khushnood, Zaffar M. Khan *et al.* A review of heat exchanger tube bundle vibrations in two-phase cross-flow[J]. *Nuclear Engineering and Design* 230 (2004): 233-251.
- [21]Kenan Yakut, Bayram Sahin. Flow-induced vibration analysis of conical rings used for heat transfer enhancement in heat exchangers[J]. *Applied Energy* 78 (2004): 273 - 288.

- [22]S.A.Al-Kaabi,Y.A.Khulief *et al.* Prediction of Flow Induced Vibrations in Tubular Heat Exchangers Part II: Experimental Investigation[J]. Journal of Pressure Vessel Technology. 2009, 131: 1-7.
- [23]赖永星, 刘敏珊. 静止外部流体对换热器管束动特性的影响分析[J]. 压力容器. 2004, 21(12): 22-25.
- [24]连华英, 聂清德. 换热器管子的自振频率[EB/OL]. <http://www.cnki.net>.
- [25]GB151-1999, 管壳式换热器[S]. 1999.
- [26]尹泉. 换热器管束振动流场的模拟计算研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [27]Standards Of The Tubular Exchanger Manufacturers Association[S]. 8th Ed.1998.
- [28]Saeed Moaveni 著, 欧阳宇等译.有限元分析-ANSYS 理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.3-4.
- [29]张波, 盛和太. ANSYS 有限元数值分析原理与工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 1—5.
- [30]过永德. 机械振动基础[M]. 北京: 兵器工业出版社,1992.139-140.
- [31]任小康, 李喜平 C/C++程序设计[M]. 兰州: 兰州大学出版社.
- [32]陆明, 王保旗. C++程序设计与数据结构基础[M]. 天津: 天津大学出版社.
- [33]康晓林, 汪涛. 标准 C++实用教程[M]. 北京: 电子工业出版社

附 录

附录一 程序源代码

```

#include<iostream.h>
#include<math.h>
#include<stdlib.h>
#include<fstream.h>
#define N0 100
int main()
{
    int N,n,pp,i=0,j=0;//定义跨数，定义求解固有频率阶数,支承情况(1：两端固定；2：一端
    固定，一端简支；3：两端简支)
    double E,dO,di,r,f1=1,L[N0];//定义弹性模量，管子内外径
    for(int j1=0;j1<N0;j1++) L[j1]=0;
    char ch;
    ifstream input("input.txt");
    ofstream output("result.txt");
    while(!input){cout<<"cannot find input.txt!";return 1;}
    while(!output) {cout<<"cannot creat result.txt!";return 1;}
    output<<" 换 热 器 管 束 振 动 计 算 程 序 输 出 文 件
09.06\n*****\n 参数设置情况: \n"<<endl;
    do
    {
        input.get(ch);
    }while(ch!='\n');
    input>>N>>n>>pp>>E>>dO>>di>>r;
    input.get(ch);
    do
    {
        input.get(ch);
    }while(ch!='\n');
    do
    {
        input>>L[i];
        i++;
    }while(i<N);
    input.close();
    output<<"跨数 N="<<N<<endl<<"求解前"<<n<<"阶固有频率"<<endl;
    switch(pp)
    {
    case 1:output<<"边界条件:两端固定"<<endl;break;
    case 2:output<<"边界条件:一端固定，一端简支"<<endl;break;
    case 3:output<<"边界条件:两端简支"<<endl;break;
    }
}

```

```

default:output<<"输入错误！"<<endl;break;
}
output<<"弹性模量 E="<<E<<" MPa"<<endl<<"管子外径 do="<<dO<<" m"<<endl<<"管子内径 di="<<di<<" m"<<endl<<"管子单位长度质量 r="<<r<<" kg/m"<<endl<<"初始频率值 f1="<<f1<<" Hz"<<endl;
for(i=0;i<N;i++) output<<"L"<<i+1<<"="<<L[i]<<" m"<<" "<<endl;
cout<<"read data sucess!"<<endl;
double f=0,f0,k,hh,M,M1=1;
bool l=0,l1=0;
hh=pow((E*(dO*dO*dO*dO-di*di*di*di)/r),0.5);
double s[N0],t[N0],u[N0],v[N0];
double a[N0],b[N0],c[N0];
double a0,b0,c0,d0;
j=0;
//进入迭代求解过程，判断余项 M 是否满足要求，否则重新设定迭代初值
cout<<"Please wait!....."<<endl;
output<<"n*****\n 计算结果(n 为阶数，k 为弯曲系数，Cn 为频率常数，f 为固有频率)\n"<<endl;
output<<"n\x09"<<"k\x09"<<"Cn\x09"<<"f\x09"<<endl;
do
{
k=pow((f1/(35.3*hh)),0.5);//弯曲系数，各跨管均为同一数值
for(i=0;i<N;i++)
{
s[i]=0.5*(cosh(k*L[i])+cos(k*L[i]));
t[i]=0.5*(sinh(k*L[i])+sin(k*L[i]));
u[i]=0.5*(cosh(k*L[i])-cos(k*L[i]));
v[i]=0.5*(sinh(k*L[i])-sin(k*L[i]));
a[i]=s[i]-t[i]*u[i]/v[i];
b[i]=t[i]-u[i]*u[i]/v[i];
c[i]=v[i]-t[i]*t[i]/v[i];
}
if(N>=3)
{
double a11,a12,a21,a22,b11,b12,b21,b22;
for(i=0;i<N-1;i++)
{
if(i==0)
{
b11=a[i];
b12=b[i];
b21=c[i];
b22=a[i];
}
}
}
}

```

```
else
{
    a11=b11;
    a12=b12;
    a21=b21;
    a22=b22;
    b11=a[i]*a11+b[i]*a21;
    b12=a[i]*a12+b[i]*a22;
    b21=c[i]*a11+a[i]*a21;
    b22=c[i]*a12+a[i]*a22;
}
}
a0=b11;b0=b12;c0=b21;d0=b22;
if(pp==1)
    M=a[N-1]*b0+b[N-1]*d0;
if(pp==2)
    M=b0*c[N-1]+a[N-1]*d0;
if(pp==3)
    M=a0*c[N-1]+a[N-1]*c0;
}
else if(N==2)
{
    if(pp==1)
        M=a[0]*b[1]+a[1]*b[0];
    if(pp==2)
        M=a[0]*a[1]+b[0]*c[1];
    if(pp==3)
        M=a[0]*c[1]+a[1]*c[0];
}
else if(N==1)
{
    if(pp==1)
        M=b[0];
    if(pp==2)
        M=a[0];
    if(pp==3)
        M=c[0];
}
float Cn;
if(fabs(M)>1) f1=f1+0.001;
else f1=f1+0.000001;
if(fabs(M1)>=fabs(M)) {l=0;l1=1;} else l=1;
if(l&&l1)
{
```

```
Cn=k*k*L[1]*L[1];
j++;
cout<<j<<"ok!"<<endl;
output<<j<<"\x09"<<M1<<"\x09"<<Cn<<"\x09"<<f1-0.00001<<"\x09"<<endl;
l1=0;
}
M1=M;
}while(j<n);
output.close();
system("pause");
}
```

附录二 程序运行截图

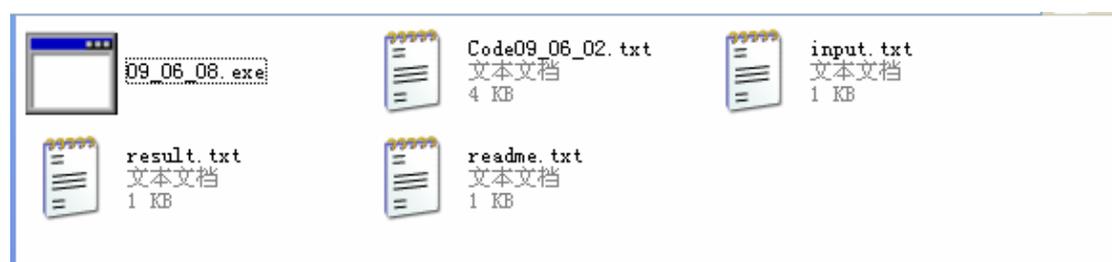


图 1 文件列表

```
read data sucess!
Please wait!.....
1ok!
2ok!
请按任意键继续. . .
```

图 2 程序运行提示

```

N      n      p      E      do      di      r
4      2      3      203000  0.025  0.02   1.71
L1~Ln:
1.4    1.4    1.4    1.4

*****
符号说明:
(1) N——跨数
(2) n——求解频率的阶数
(3) p——支承情况范围1到3。(1:两端固定;2:一端固定, 一端简支;3:两端简支)
(4) E——弹性模量(单位:MPa)
(5) do——管子外径(单位:m), di——管子内径(单位:m)。
(6) r——单位长度质量(单位:kg/m)。
(7) L1~Ln——各跨长度(单位:m), 可以往下面继续添加。中间用制表符(Tab键)隔开, 不要换行。

```

图 3 输入文件截图

```

换热器管束振动计算程序输出文件 09.06.08
*****
参数设置情况:

跨数N=4
求解前2阶固有频率
边界条件:两端简支
弹性模量E=203000 MPa
管子外径do=0.025 m
管子内径di=0.02 m
管子单位长度质量r=1.71 kg/m
初始频率值f1=1 Hz
L1=1.4 m
L2=1.4 m
L3=1.4 m
L4=1.4 m

*****
计算结果(n为阶数, k为弯曲系数, Cn为频率常数, f为固有频率)

n      k      Cn      f
1      1.34558e-007  9.86961  29.4118
2      -9.25921e-008  11.514  34.3122

```

图 4 输出文件截图

致 谢

本论文的工作是在张坤龙老师的悉心指导下完成的，张坤龙老师严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响。在此衷心感谢张坤龙老师对我的关心和指导。

周伟同学对我的论文工作提供了许多宝贵的意见，并给予我很大的帮助，在此表示衷心的感谢。

最后，感谢我的家人，他们的理解和支持使我在学校能够顺利的完成学业。