

文章编号:1000-582X(2002)08-0014-04

用 MATLAB 分析流体输配管网的初步研究^{*}

肖益民,付祥钊

(重庆大学城市建设与环境工程学院,重庆 400045)

摘要:在暖通空调领域,涉及大量的流体输配管网分析问题。要进行系统设计优化分析、运行调节方案分析等等,都需要对管网的水力工况进行定量分析。文章运用图论和流体管网的基本理论,用 MATLAB 对流体输配管网的计算机分析进行了初步研究。根据管网的基本回路分析法,提出了一种方便可靠的将管道系统转化为网络图的描述方法,以及从管网的网络图直接生成管网分析所需要的一些基础矩阵的方法。对 MATLAB 的功能及其对于求解管网分析问题的高效率特性进行了分析,并开发了相应的程序。

关键词:图论;流体输配管网;分析

中图分类号:TP391.75

文献标识码:A

在暖通空调领域,涉及大量的流体输配管网分析问题。要进行设计优化分析、运行调节方案分析等等,希望对管网的水力工况进行定量的分析。数学理论、计算机技术的发展为这种要求提供了可能。程序是将专业问题转化为计算机的具体工作的桥梁。MATLAB 的特性使之成为搭建这种桥梁的高效率工具。

1 MATLAB 简介^[1-3]

MATLAB 原先是作为 MATRIX 试验室使用 LINKPACK 和 EISPACK 矩阵软件工具包的接口,后来发展成为集通用科学计算、图形交互、系统控制和程序设计为一体的软件。MATLAB 的基本单位是矩阵。工程科学中的种种解析或数值计算问题,诸如矩阵变换、微积分运算、线性与非线性方程求解、常微分与偏微分方程求解、插值与拟合、统计及优化等问题,运用一般程序设计语言编程求解时,算法分析及编制程序往往很复杂,而 MATLAB 只需一个或少数几个函数或表达式就能完成。即解决这些问题的算法和具体的程序已经被其“封装”起来,用户只需按 MATLAB 的语法写出符号表达式或调用函数就能完成计算任务,而它的语法又非常接近数学书写习惯。除了计算功能强大之外, MATLAB

还带有数十个工具箱,直接面向自动控制系统、数字信号处理、时间序列分析和动态系统仿真等。MATLAB 的图形功能也很强大,具有数据的可视化、动画、以及一定的图形用户界面开发功能。MATLAB 还具有很好的开放性,用户可以创建自己的“库函数”;能够方便地与 C、FORTRAN 等语言进行接口,还有专为 C/C++ 设计的数学函数库,在 C/C++ 编程时可以直接调用这些函数进行计算,从而将其强大的数学计算功能融入到这些优秀的程序设计语言中去。

2 运用 MATLAB 进行流体输配管网的计算机分析

2.1 管网分析的基本回路法

图论是解决图和网络分析最有力的数学工具;当利用计算机分析管网问题时,希望其所依据的算法便于编程,形成的程序具有通用性。根据图论的分析所形成的算法能够满足这些要求。一般地,在暖通空调领域的流体管网,如城市集中供热管网、中央空调水系统、通风系统、燃气输配管网等,当管网的布置及结构确定时,可以用图论中的有向连通赋权图来描述,其权可为管路的阻抗。根据质量守恒和能量守恒原理,这些流体输配管网应满足:

* 收稿日期:2002-04-20

作者简介:肖益民(1974-),男,重庆人,讲师,重庆大学博士研究生。主要从事暖通空调理论及节能方面的研究。

$$\begin{cases} A \times G = Q \\ B_f \times \Delta H = 0 \\ \Delta H = S \times |G| \times G + Z - DH \end{cases} \quad (1)$$

式中, A ——流体管网的关联矩阵, 当管网的节点数为 n , 管段数为 b 时, A 为 $n \times b$ 阶矩阵;

G ——管路流量向量, b 维列向量;

B_f ——管网网络图的基本回路矩阵, $(b - n) \times b$ 阶矩阵;

Q ——节点流量向量, 定义为节点的净出流量, 入流为正, 出流为负, n 维列向量;

DH ——管路水泵扬程向量, 与管路方向一致时为正, 反之为负, b 维列向量;

ΔH ——管路压降向量, b 维列向量;

S ——以管路的阻抗为元素的 $b \times b$ 阶对角矩阵;

Z ——管路的起止节点位能差向量, b 维列向量;

$|G|$ ——以支路流量的绝对值为元素的 $b \times b$ 阶对角矩阵。

当管路的结构形式确定后, (1) 式中的 G 和 ΔH 为未知数, 其余各向量、矩阵为已知量。式中 A 和 B_f 阵的构成规则可参阅文献 [4 ~ 6], 此处不再赘述。通过求解式 (1), 就能够达到进行流体管网水力运行工况分析的目的, 以此来改进设计、确定运行调节方案等。

式 (1) 为一非线性方程组, 求解方法有很多。“MKP” 法的求解过程如下:

1) 假定链支管路的流量 $G_i^k (k = 0)$, 按照图论的知识可知, G_i^k 应为 $b - n + 1$ 维列向量;

2) 求解式 (1) 中的第一式, 解出管网的树支管路流量 $G_i^k (k = 0)$, 从而得到管路流量向量 $G^k (k = 0)$;

3) 构造 M^k 矩阵 (Maxwell 矩阵, $(b - n) \times (b - n)$ 阶), $M^k = B_f \times 2 \times S \times |G^k| \times B_f^T$;

4) 求 ΔG_i^{k+1} ,

$$\Delta G_i^{k+1} = - (M^k)^{-1} \times \Delta H^k$$

$$\Delta H^k = B_f \times (S \times |G^k| \times G^k + Z - DH);$$

5) 用 $\max(\text{abs}(G^{k+1} - G^k)) \leq \epsilon$, 判断计算结果是否满足精度要求, 若已满足, 则结束计算, 否则 $G_i^{k+1} = G_i^k + \Delta G_i^{k+1}$, 返回第 2 步。

3.2 实现 MKP 法的前期数学分析与编程工作及技巧

在求解过程中, 管网的节点流量、管路的阻抗这些专业原始数据, 分析者可以容易地确定; 除此之外, 关联矩阵 A 、基本回路矩阵 B_f 也是需要事先确定的。当

一个流体输配管网的结构形式被确定且将其转化为网络图以后, 这 2 个矩阵可以按照图论的相关定义与定理来确定。对矩阵 A , 当进行管网节点编号、管段编号及标明方向后, 可以由分析者按其定义写出, 但当管网规模较大时, 这项工作就很复杂, 而且容易出错。另外, 上述求解过程要求的是基于网络图最小树的 B_f 矩阵, 很难直观地写出。

对图论中所有的图的表示方法进行对比后, 笔者认为, 采用“二数组”方法对网络图进行描述以及计算机存储, 最接近分析人员对管网的描述习惯, 也不易出错。“二数组法”的规则为: 对于由节点 $n1$ 和 $n2$ 组成的管段 I , 若其方向为 $n1$ 指向 $n2$, 则二数组 IA :

$$IA(I, 1) = n1, IA(I, 2) = n2 \quad (2)$$

所以, 分析人员只需对管网进行节点和管段编号、假定管段的流向, 并按照管段的顺序依次输入其起止节点号即可。因为二数组也完全确定了一个网络图, 所以我们可以找到它与 A 之间的关系, 并据此编写程序生成 A 阵。经分析, 发现二者之间存在如下关系:

$$Aa(IA(I, 1), I) = 1, I = 1, b;$$

$$Aa(IA(I, 2), I) = -1, I = 1, b \quad (3)$$

式中的 Aa 为增广关联矩阵, 删除任意一行后即得到 A 。

在已知各管段的阻抗 S 之后, 该管网成为一个赋权图。可以依据图论的有关算法求出对应于权值 S 的最小树。在此基础上, B_f 阵可以依据生成的最小树以及 B_f 阵和 A 阵之间的关系得到。二者的关系为:

$$B_f = [(-A_t^{-1} \times A_t)^{-1} I_b] \quad (4)$$

式中 A_t 为 A 对应于最小树的分块阵, A_t 为 A 对应于链支的分块阵, I_b 为 $b - n$ 阶单位矩阵, I_b 之前没有运算符, 表示分块连接。

A 可以由 IA 依据矩阵元素值之间的对应关系直接得到, 而求取 B_f 阵要先求取最小生成树。笔者根据以上的分析和图论中最小生成树的算法之一——连通片法, 运用 MATLAB 语言, 开发了矩阵 A 的生成程序 IatoA.m、最小树的生成程序 mintree.m、以及 B_f 矩阵的生成程序 Bfj.m, 对具有任意多个节点及管段的管网, 可以方便地生成 A 阵、最小生成树及 B_f 阵。运用时只需按管段标号顺序, 以 TXT 文件格式输入管段的起止节点及阻抗即可。

3.3 MKP 法求解过程的实现

该求解过程的计算程序实现涉及大量的矩阵运

算,因一般的编程语言是以“数”——即矩阵的单个元素为计算单元的,故编写相应的程序是一项复杂而耗时的的工作,要编写出具有通用性的应用程序更是需要较高的编程能力,这就成为暖通专业人员用计算机分析专业问题的一大限制。MATLAB 是以矩阵为计算单元的,而且其语法规则接近于原始的数学书写习惯,为专业人员提供了对这类问题进行计算机分析的“利器”,编程效率很高。

笔者开发了基于以上求解方法的 MALTALAB 程序 MKP.m,可用于进行具有任意节点和管路数目的管网水力工况分析。为说明 MATLAB 编程的高效率,将其主程序段摘录如下:

```
%MKP 法迭代求解
q(NB) = []
g = zeros(1,B)
G = ones(1,B)
for i = 1:lnum
    str = num2str(i)
    str1 = num2str(lnum)
    str = ['请输入第',str,'条链支管路的初始流量
(共有',str1,'条链支管路):']
    gl(i) = input(str)%gl = [1,1,1]
end
c = size(L)
s1 = diag(s)
K8 = 0
while max(abs(g - G)) > 0.001
    K8 = K8 + 1
    g = G
    q1 = q
    for i = 1:c(2)
        G(L(i)) = gl(i)
        q1 = q1 - A(:,L(i)) * G(L(i))
    end
    d = size(t)
    GT1 = at \ q1
    for i = 1:d(2)
        G(t(i)) = GT1(i)
    end
    for i = 1:c(2)
        G(L(i)) = gl(i)
```

```
end
gk = diag(G)
mk = Bf * 2 * s1 * abs(gk) * Bf'
dhk = - Bf * (s1 * abs(gk) * G' + Z - DH)
dgl = mk \ dhk
gl = gl + dgl'
end
Gout = zeros(2,B)
Gout(1,:) = [1:B]
Gout(2,:) = G
delth = s1 * abs(gk) * G' + Z - DH
fid = fopen('G.txt','w')
fprintf(fid,'管段号 流量 \ r')
fprintf(fid,'%3d %12.8f \ r',Gout)
status = fclose(fid)
```

例如,程序中在求 M^k 和 ΔH^k 时,只需

$m^k = B_f * 2 * s1 * abs(gk) * B_f'$ 及 $dhk = - B_f * (s1 * abs(gk) * G' + Z - DH)$ 两个几乎完全与数学符号式一致的表达式,就完成了其他程序语言需要大量程序段才能完成的工作。MATLAB 编程的高效性可见一斑。

笔者运用开发的程序进行了算例分析,验证了各程序的正确性。在目前的计算机硬件条件支撑下,其运算速度完全可以满足要求。限于篇幅,此处略去具体的算例分析过程。

3 结 语

根据流体输配管网分析的问题描述及求解特点,选择 MALTALAB 作为计算机求解的编程工具,易于实现,可以获得很高的编程效率。

文章只是对管网的水力工况分析问题进行了研究,在实际工程中,管网的工作不完全是静态的,一些参数可能随时间变化,流动和传热等现象之间可能存在耦合,这些问题的数学描述可能要用到微分方程(组)甚至偏微分方程(组),由于 MATLAB 在这些问题的求解方面具有强大的功能,它有望成为分析这些问题的强有力的工具,我们将在这方面做进一步的工作。

参考文献:

- [1] 王沫然. MATLAB5.X 与科学计算[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [2] 姚东. MATLAB 命令大全[M]. 北京:人民邮电出版社,2000.

- [3] 刘志俭. MATLAB 应用程序接口用户指南[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [4] 费培之. 图和网络及其应用[M]. 成都: 四川大学出版社, 1996.
- [5] 付祥钊. 流体输配管网[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [6] 徐瑞龙. 通风网路理论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.

Primary Research about the Analysis of Pipe-network for Fluid Supply by MATLAB

XIAO Yi-min, FU Xiang-zhao

(College of Urban Construction and Environment Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In the domain of HV&AC, there are many problems about pipe-network for fluid supply. In order to make analysis on optimized design and project of regulation in operation, some quantitative analysis on hydraulic performances of pipe-network should be done. With graph theory and fundamental theory of pipe-network for fluid supply. Based on the analysis method of basic loop of pipe-network, a convenient, reliable description technique is introduced which could translate pipe system into network graph, and obtains some methods which could get some basic matrix that is needed in pipe network analysis from the graph of pipe network. This article also analyses MATLAB's function, high efficiency in solving the problems of pipe network analysis and develops relevant program.

Key words: graph theory; pipe-network for fluid supply; analysis

(责任编辑 姚 飞)

(上接第 13 页)

Dynamic Heat Transfer Analysis of a Water Storage Roof

LIU Yu-dong, TONG Ming-wei

(College of Thermal Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: On the basis of analyzing the complicate heat and humid exchange between the outdoor air and the water layer of the roof, the authors obtained a heat transfer model and its transmit matrix. The temperature and heat flux responses of the internal roof surface is greatly lowered than that of non-water layer roof. It can be concluded that the maintenance of a water layer on the roof is a good way to resist the fluctuation of outdoor temperature and significantly reduce the cooling load of a building.

Key words: water storage roof; transfer function; temperature; heat flux responses

(责任编辑 张 苹)