

第二研究设计院

多分支管道应力计算方法

多分支管道应力计算方法

第二研究设计院

1972 年 9 月

毛主席语录

我们应该谦虚，谨慎，戒骄，戒躁，全心全意地为人民服务，……

自然科学是人们争取自由的一种武装。人们为着要在社会上得到自由，就要用社会科学来了解社会，改造社会进行社会革命。人们为着要在自然界里得到自由，就要用自然科学来了解自然，克服自然和改造自然，从自然里得到自由。

目 录

序言	1
附号说明	3
多分支管系的应力计算方法	7
一、 N 分支管道的基本方程	8
二、解方程	17
三、求变位	23
四、应力计算	26
五、计算结果	28
六、许用应力与焊接缝系数的选取	31
附录 I：管道计算一般分析方法公式推导	33
附录 II：座标变换公式推导	83
附录 III：关于弯管的弯曲系数 K 与弯管应力加强系数的计算公式	93
附录 IV：关于使用多分支管系应力计算程序的管道参数填写方法	99
附录 V：各种钢材的机械性能(常温及高温)及物理性能	110
参考文献	138

序 言

随着我国工业的不断发展,对管道应力计算的要求愈来愈广和愈来愈严,尤其对电厂、化工及其它涉及管道工程的高参数的出现,为使这些工程的安全运行并维持最长的寿命,便对管道系统布置提出了更严格的要求,而要满足这些要求,就必须对管道系统的各管段应力、力、力矩及变位(线变位及角变位)有一个比较清楚的数量概念。但目前为止,很多工程均以人工简化计算来实现,即便有电子计算机程序计算也只是通过某种简化之后,将一复杂管系化为简单的情况进行计算的,甚至有些简化往往与实际相差很远,以致无法将所作计算作为参考。

倘若采用本文所述的方法,用人工来计算一个10个分支且共有三十九段的管道系统,根据我们的初步估计大约需一个技术员工作160天(一个每天工作八小时的熟练计算员),这显然用时太长,进度缓慢不适应我国工业建设发展的需要。因此,为了节约时间,节约人力和提高管道设计质量的要求,我们特在109乙型电子计算机上设计了可计算20个分支以内的管道应力计算程序。如果利用我们设计的程序,在109乙机上对上述十个分支39段的管系(如图3例所示管系)只要2分钟左右(除去填数据,穿孔,校核,输入时间)便可算出我们所要求的全部结果(包括每一管段坐标位置,角变位,线变位,力矩,力及综合应力)。程序设计完成后,除解决本单位的一些管系布置方案外,还为兄弟单位作过一些计算,效果是较良好的。

本文所述的方法是用结构力学及能量原理列出 n 分支管系

的变位方程，然后用矩阵方法，通过线性变换（引入一个矩阵 Γ ）将原方程的系数矩阵化为对角线上的分块矩阵，解出变位方程，据此来计算管系各点的力，力矩，应力和变位等。为了便于读者对本文所述方法有比较深入地了解，特在附录 I 中给出了“管道计算一般分析方法的公式推导。”并在附录 II、III、IV 和 V 中分别给出了为我们计算所需的“坐标变换公式推导”、“弯管的弯曲系数 K 的计算公式”、“关于使用计算多分支管系应力的计算程序的管道参数填写方法”和“各种钢材的机械性能（常温及高温）及物理性能”。由于我们水平有限，错误在所难免，请读者批评指正。

王世刚 陈昌友
1972 年 9 月于北京

符号说明

a	在工作平面内的管段中点的水平坐标
b	在工作平面内的管段中点的垂直坐标
b_i	变位矢量
c	管段工作平面离坐标平面的距离
C_a, C_{aa} 等等.....	三角常数
d	直径
h	弯管弯曲特性($=tR/r_m$)
K	弯管弯曲系数或称柔性系数
l	长度
p	压力
q	管道形式常数
r	半径
r_m	管子平均半径
s	管道形式常数; 距离
s_a, s_{aa}, s'_a , 等等.....	管道形式常数
t	管壁厚度
U, U_0, U'_{00} 等等...	管道形式常数
V, V_0, V'_{00} 等等...	管道形式常数
w	风力单位荷载
w_x, w_y, w_z ,	分别在 x, y, z 方向的单位荷载
x, y, z ,	一点的坐标; 坐标轴
A_i	分支点; 矩阵元素(或矩阵块)
B_i	矩阵元素(或矩阵块)

C_i	节点; 矩阵元素(或矩阵块)
D	直径
E	弹性模量
E_c	冷态(即常温)下弹性模量
E_h	热态(工作温度)下弹性模量
F	力
F_i	未知反力(矢量)
F_x, F_y, F_z	沿坐标轴方向的分力
G	剪切模量
I	惯性矩
J	惯性积
K	常数
L	长度
M	力矩
M_b	在管段平面内的弯矩
M'_b	正交于管段平面的弯矩
M_t	扭矩
M_x, M_y, M_z	相对于坐标系并沿所指下标的轴的力矩分量
M'_x, M'_y, M'_z	沿所指下标的轴的力矩分量
M_u	合成弯矩
M_K	扭力矩
N	分支数
O	坐标原点
O'	固定端
P	点; 集中荷载
Q	刚度比

R	弯管弯曲半径
T	温度
U	管道形式系数; 变形位能
U_b, U_t	分别为弯曲位能及扭矩位能
V	管道形式系数
W	总均匀荷载
Z	断面模量
Γ	矩阵变换; 矩阵
α	线胀系数, 角
β	弯管纵向应力加强系数
γ	弯管周向应力加强系数
ε	冷拉系数
δ	挠度; 线变位
θ	角; 角变位
ν	波松比
σ	应力, 综合应力
σ_2	内压轴向应力
σ_a	总轴向应力
σ_t	内压切向应力
σ_u	热胀弯曲应力
σ_r	内压径向应力
τ	热胀扭应力; 切应力
$[\sigma]$	许用应力
σ_b	强度极限(常温下)
σ_s^t	屈服极限(工作温度下)
σ_D^t	持久极限(工作温度下)
σ_n^t	蠕变限(工作温度下)

n_b, n_D, n_s, n_n	安全系数
Φ	角
φ	角; 焊缝系数
ψ	角
Δ	线性热胀量

多分支管道应力计算方法

一般说来,管道应力计算的必要性,主要表现在对电厂、化工、反应堆及其他涉及管道布置的工程,在这些工程中由于管道因热胀及外载影响而产生较大的变位、力、力矩及应力,为使管道不致因热胀及外载影响而招致破坏或者为防止管道产生过大变位而招致损坏工程的其他设施及结构,因此,对管道布置方案必须进行变位、力、力矩及应力的校核计算,据此以修正布置方案的不合理部分,并提供管道布置的各部分变位、力、力矩及应力的计算数据,以便在布置方案时作为依据。在通常情况下,一般只对管道热胀进行计算,至于外载影响可以忽略不计,尤其对洞内工程及厂内管道。当然,也有例外的情况,如果外载影响甚大时,例如风荷很大的地方,以至因此能引起管道破坏的情况下,必须考虑这种外载影响。对于这种情况一般是少见的。所以,我们在计算中只考虑了热胀影响。管道应力的基本方程的推导,是基于管子材料服从虎克定律,且将管子视为一根杆子来研究,用能量法推导出来的。至于管子自重等外来因素,均认为已通过管道支吊架的合理布置而得到克服。由于管道计算随着分支的增多,计算越来越烦沉,以至无法以手算来完成,即使最简单的管系,由人工手算也是十分耗费的,这样不符合抢建工程的要求。因此,我们设计了用109乙型晶体管电子计算机的管道计算程序,以实现工程抢建的要求。以下我们就列方程、解方程、求变位、应力计算等几部分来叙述,最后在附录中引出管道变位方程的推导及方程的系数计算公式与座标变换公式等。

一、 N 分支管道的基本方程

我们这里所研究的管系是空间任意走向的管系，而且管系的各个分段的形式（直线、弧线、倾斜或其它等形式）也是任意的。根据结构力学的知识，管系一点的变位等于该点的所有作用力及力矩与相应强度系数的乘积之和。我们在建立管系的基本方程时，均以解除固定端的约束，代以相应的力及力矩，对空间问题而言，解除一个约束，便有六个未知力（三个力及三个力矩）及与此相应的六个变位方程。若解除二个约束，便有 12 个未知力及与此相应的 12 个变位方程，依次类推，若解除 N 个约束，即有 $6n$ 个未知力及与此相应的 $6n$ 个方程。其固定端的转角，一般视为零，至于位移便以相应的 Δx , Δy , Δz 来表示。为了对管系基本方程（即变位方程）有比较清楚的认识，我们不仿先讨论单固定管系的情况，进而再研究 N 分支的问题。

(1) 单固定管系

所谓 n 分支管系，即将管子解除 n 个约束之后，使管系变为静定问题，解除一个约束，就是单分支管系，解除两个约束，就是两个分支的管系，依次类推，若解 N 个约束，便是 N 分支管系。图 1 所示的管系便是一个单分支管系。这个管系的变位方程如方程(1)所示，其中的力矩 M_x , M_y , M_z 及力 F_x , F_y , F_z 是解除固定端 A 后在 A 点处的未知力矩和未知力，它们的方向均假定为正（力矩及转角按右手坐标系法则，逆时针为正，反之为负，力和位移与坐标系正向一致者为正，以下同）。而方程(1)中的系数的意义及计算方法分别表示在表 1, 2, 3 中。

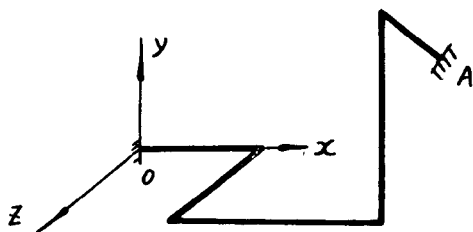


图 1 单固定管系

$$\begin{matrix} M_x & M_y & M_z & F_x & F_y & F_z \\ \left(\begin{matrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xz} & B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ A_{xy} & A_{yy} & A_{yz} & B_{yx} & B_{yy} & B_{yz} \\ A_{xz} & A_{yz} & A_{zz} & B_{zx} & B_{zy} & B_{zz} \\ B_{xx} & B_{yx} & B_{zx} & C_{xx} & C_{xy} & C_{xz} \\ B_{xy} & B_{yy} & B_{zy} & C_{xy} & C_{yy} & C_{yz} \\ B_{xz} & B_{yz} & B_{zz} & C_{xz} & C_{yz} & C_{zz} \end{matrix} \right) A_1 & = & \left(\begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ EI\Delta x \\ EI\Delta y \\ EI\Delta z \end{matrix} \right) b_1 \end{matrix} \quad (1)$$

方程(1)可以写为表 1 的具体形式:

(2) N 分支的管系:

图 2 所示的管系, 为 N 分支的管系, 在计算这类管系时, 为了列出整个管系的变位方程, 除了考虑各分支端点的解除约束之后的力及力矩的因素影响之外, 还需要考虑各分支相互之间的影响, 而这种影响主要表现在强度系数的计算上。同时, 应当注意, 当计算强度系数时, 对每个分支应分别求和。为此, 我们规定从跟支管联结的点到固定端 0 的管段相对于支管而言, 称为总线。(参看图 2) 由图 2 看出 $C_1 0$ 是支管 $A_1, A_2, A_3 \cdots A_{n-1}, A_n$ 的总线, $C_2 0$ 是支管 $A_2, A_3, \cdots A_{n-1}, A_n$ 的总线, $C_3 0$ 是支管 $A_3 \cdots A_{n-1}, A_n$ 的总线, $\cdots C_{n-1}$ 是 A_n 的总线。当对支管 $A_1, A_2, A_3, \cdots A_{n-1}, A_n$ 建立强度系

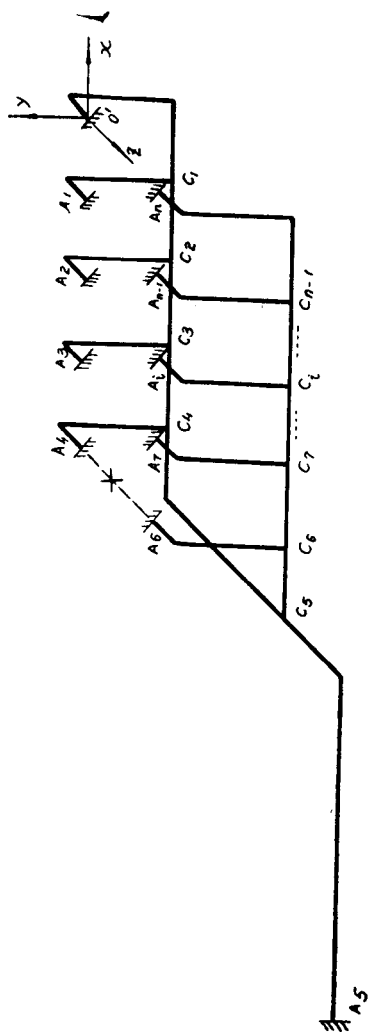


图 2 N 分支管系

数的方程时, 应从所研究的支管到固定端 0 求和, 将所得到的系数分别乘以支管端部 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 的相应反力 $\bar{F}_1, \bar{F}_2, \dots, \bar{F}_n$ (此为矢量形式, 每个矢量包含 6 个分量)。至于其他支管对某一支管的影响, 例如支管 $A_2, \dots, A_n$ 对支管 A_1 的影响可以这样来考虑, 即将支管 $A_2, \dots, A_n$ 的管端反力 $\bar{F}_2, \dots, \bar{F}_n$ 乘上总线 $C_1 0$ 的系数; 若考虑支管 $A_1, A_3, \dots, A_n$ 对支管 A_2 的影响, 即将支管 $A_3, \dots, A_n$ 的管端反力 $\bar{F}_3, \dots, \bar{F}_n$ 乘上总线 $C_2 0$ 的系数加上将支管 A_1 的管端反力 $\bar{F}_1$ 乘上总线 $C_1 0$ 的系数, 余类推。为了建立方程方便起见, 我们规定: $A_1, A_2, \dots, A_n$ 分别代表支管 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 的端部到固定端 0 的强度系数, 实际它们是一个 6 阶矩阵; 用 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_{n-1}$ 分别代表支管 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_{n-1}, A_n$ 的节点 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_{n-1}$ 到固定端 0 的系数 (即总线系数, 其计算方法和支管系数计算方法相同), 也是六阶矩阵。这样一来, 我们就得到 N 分支管系的如下形式的方程:

$$\begin{matrix} F_1 & F_2 & F_3 & \dots & F_n \end{matrix}
 \begin{pmatrix} A_1 & C_1 & C_1 & \dots & C_1 \\ C_1 & A_2 & C_2 & \dots & C_2 \\ C_1 & C_2 & A_3 & \dots & C_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_1 & C_2 & C_3 & \dots & C_{n-1} & A_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_{n-1} \\ b_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

表 1 中的参数计算, 对于直线管段及弯曲管段, 可分别按表 2 及表 3 的公式计算, 至于其他形式的管段, 可参照附录中的一般计算公式。

表 1 单分支管系的一般变位方程

平面	M_x	M_y	M_z	F_x	F_y	F_z	自由项
x	S	0	0	0	S_b	$-S_a$	
y	U	0	q	$C_y q$	U_0	$-C_y U$	
z	V	q	0	$-C_z q$	$C_z V$	$-V_0$	
Σ	A_{xx}	A_{xy}	A_{xz}	B_{xx}	B_{xy}	B_{xz}	0
x	0	V	q	$-V_0$	$-C_x q$	$C_x V$	
y	0	S	0	$-S_a$	0	S_b	
z	q	U	0	$-C_z U$	$C_z q$	U_0	
Σ	A_{xy}	A_{yy}	A_{yz}	B_{yx}	B_{yy}	B_{yz}	0
x	0	q	U	U_0	$-C_x U$	$C_x q$	
y	q	0	V	$C_y V$	$-V_0$	$-C_y q$	
z	0	0	S	S_b	$-S_a$	0	
Σ	A_{xz}	A_{yz}	A_{zz}	B_{zx}	B_{zy}	B_{zz}	0
x	0	$-V_0$	U_0	$U_{00}+V_{00}$	$-C_x U_0$	$-C_x V_0$	
y	$C_y q$	$-S_a$	$C_y V$	$S_{aa}+C_y^2 V$	$-C_y V_0$	$-S_{ab}-C_y^2 q$	
z	$-C_z q$	$-C_z U$	S_b	$S_{bb}+C_z^2 U$	$-S_{ab}-C_z^2 q$	$-C_z U_0$	
Σ	B_{xx}	B_{yx}	B_{zx}	C_{xx}	C_{xy}	C_{xz}	$EI\Delta x$
x	S_b	$-C_x q$	$-C_x U$	$-C_x U_0$	$S_{bb}+C_x^2 U$	$-S_{ab}-C_x^2 q$	
y	U_0	0	$-V_0$	$-C_y V_0$	$U_{00}+V_{00}$	$-C_y U_0$	
z	$C_z V$	$C_z q$	$-S_a$	$-S_{ab}-C_z^2 q$	$S_{aa}+C_z^2 V$	$-C_z V_0$	
Σ	B_{xy}	B_{yy}	B_{zy}	C_{xy}	C_{yy}	C_{yz}	$EI\Delta y$
x	$-S_a$	$C_x V$	$C_x q$	$-C_x V_0$	$-S_{ab}-C_x^2 q$	$S_{aa}+C_x^2 V$	
y	$-C_y U$	S_b	$-C_y q$	$-S_{ab}-C_y^2 q$	$-C_y U_0$	$S_{bb}+C_y^2 U$	
z	$-V_0$	U_0	0	$-C_z V_0$	$-C_z V_0$	$U_{00}+V_{00}$	
Σ	B_{xz}	B_{yz}	B_{zz}	C_{xz}	C_{yz}	C_{zz}	$EI\Delta z$

表 2 直线管段的形式常数计算公式

参 数	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=90^\circ$	$\alpha=\alpha$
S	KQL	KQL	KQL
S_a	aS	aS	aS
S_b	bS	bS	bS
q	0	0	$(1.3-K)QL\cos\alpha\sin\alpha$
Cq	0	0	Cq
U	S	$1.3S$	$(K\cos^2\alpha+1.3\sin^2\alpha)QL$
U_0	S_a	$1.3S_a$	$aU-bq$
CU	CU	CU	CU
V	$1.3S$	S	$(K\sin^2\alpha+1.3\cos^2\alpha)QL$
V_0	$1.3S_b$	S_b	$bV-aq$
CV	CV	CV	CV
$S_{ab}+C^2q$	bS_a	bS_a	$bS_a+\frac{SL^2}{12}\cos\alpha\sin\alpha+C^2q$
CU_0	CU_0	CU_0	CU_0
CV_0	CV_0	CV_0	CV_0
$S_{aa}+C^2V$	$aS_a+\frac{SL^2}{12}+C^2V$	aS_a+C^2V	$aS_a+\frac{SL^2}{12}\cos^2\alpha+C^2V$
$S_{bb}+C^2U$	bS_b+C^2U	$bS_b+\frac{SL^2}{12}+C^2U$	$bS_b+\frac{SL^2}{12}\sin^2\alpha+C^2U$
$U_{00}+V_{00}$	$aU_0+bV_0+\frac{SL^2}{12}$	$aU_0+bV_0+\frac{SL^2}{12}$	$aU_0+bV_0+\frac{SL^2}{12}$

其中 $A_1, A_2, \dots, A_{n-1}, A_n$ 为六阶矩阵, 它们的计算与方程(1)中的系数计算方法完全一样, 即是从支管端点 $A_1, A_2, \dots, A_{n-1}, A_n$ 到固定端 (即坐标原点) 0 进行计算的强度系数。