

電力建設勘測設計資料

59008

发电厂管道手册

第 7 册

管道应力计算

水利电力部北京电力设计院编

水利电力出版社

DL 5027-1993

中华人民共和国国家标准

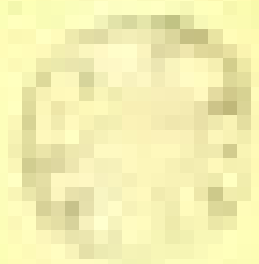
GB 5027-1993

发电厂管道手册

主编

管德成 李群

中国电力出版社



北京 中国电力出版社

內 容 提 要

发电厂管道手册第7册“管道应力计算”的主要内容是平面及立体管道的热胀应力及补偿的计算。其中除叙述了正规的弹性重心原理的应力计算方法外,还包括了经常遇到的各种类型补偿器的简化计算公式及图表,以简化计算程序。

本手册可供从事火力发电厂管道设计、施工及运行人员使用,也可作为高等工业学校及中等专业学校有关专业的学生的参考书。

发 电 厂 管 道 手 册

第7册

管道应力计算

水利电力部北京电力设计院编

*

2230 R 487

水利电力出版社出版(北京西郊科学路二里内)

北京市书刊出版业营业许可证出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印

新华书店科技发行所发行 各地新华书店经售

*

787×1092 1/32开本 * 6印张 * 133千字

1959年11月北京第1版

1959年11月北京第1次印刷(0001—2,720册)

统一书号: 15143·1806 定价(第10类)1.10元

目 录

第一章 平面管道应力计算	4
第一节 使用弹性重心方法的实质	4
第二节 复原力 P_x 和 P_y 的计算	4
第三节 位移量 Δx 和 Δy 的计算	6
第四节 线惯性力矩和线惯性积对管道坐标轴和弹性重心坐标轴的换算公式	7
第五节 线惯性力矩、线惯性积和静力矩的计算	8
第六节 热胀力矩与应力计算	14
第七节 其他应力的计算	15
第八节 综合应力、允许综合应力及安全系数	16
第九节 允许最大热胀弯曲应力与热胀补偿能量	17
第十节 平面管道的计算示例	18
第二章 立体管道应力计算	21
第一节 复原力 P_x 、 P_y 和 P_z 的计算	21
第二节 立体管道的线惯性力矩、线惯性积和静力矩的计算	23
第三节 立体管道热胀应力和综合应力的计算	25
第四节 立体管道的计算示例	26
第三章 II-型补偿器的热胀补偿计算	33
第一节 II-型补偿器概述	33
第二节 对称直角弯的 II-型补偿器	33
第三节 半对称直角弯的 II-型补偿器	35
第四节 不对称直角弯的 II-型补偿器	36
第五节 对称圆弯的 II-型补偿器	37
第六节 半对称圆弯的 II-型补偿器	38
第七节 不对称圆弯的 II-型补偿器	40
第四章 带波紋的 II-型补偿器热胀补偿计算	41
第一节 带波紋的 II-型补偿器概述	41
第二节 装在垂直管段上带波紋的 II-型补偿器	42
第三节 装在水平管段上带波紋的 II-型补偿器	42
第四节 波紋型补偿器的推力计算	43
第五章 I-型管道热胀补偿计算	44
第一节 I-型管道概述	44
第二节 对称直角弯的 I-型管道	45
第三节 不对称直角弯的 I-型管道	46
第四节 两端具有导向支架的直角弯 I-型管道	47

第五节	对称圆弯的 Γ -型管道	48
第六节	不对称圆弯的 Γ -型管道	49
第七节	两端具有导向支架的圆弯 Γ -型管道	51
第六章	在两个平面上位移的 Γ -型管道的热胀补偿计算	53
第一节	在两个平面上位移的 Γ -型管道概述	53
第二节	在两个平面上位移的对称直角弯的 Γ -型管道	54
第三节	在两个平面上位移的不对称直角弯的 Γ -型管道	55
第四节	在两个平面上位移的对称圆弯的 Γ -型管道	57
第五节	在两个平面上位移的不对称圆弯的 Γ -型管道	59
第七章	Z-型管道热胀补偿计算	61
第一节	对称直角弯的 Z-型管道	61
第二节	半对称直角弯的 Z-型管道	62
第三节	不对称直角弯的 Z-型管道	63
第四节	对称圆弯的 Z-型管道	65
第五节	半对称圆弯的 Z-型管道	66
第六节	不对称圆弯的 Z-型管道	66
第八章	其他形状的平面管道热胀补偿计算	68
第一节	对称直角弯的 U-型管道	68
第二节	不对称直角弯的 U-型管道	69
第三节	对称圆弯的 U-型管道	70
第四节	不对称圆弯的 U-型管道	71
第五节	直角弯的鹅颈型管道	71
第六节	圆弯的鹅颈型管道	72
第九章	多支点管道的应力计算	73
第一节	多支点平面管道的应力计算	73
第二节	多支点立体管道的应力计算	74
第十章	热胀补偿的简化计算和估算方法	75
第一节	热胀补偿的简化计算方法	75
第二节	热胀补偿的估算方法	76
附录(计算图表)		
1.	弹性模数表	
2.	管道应力计算常用数据表	
3.	线膨胀系数图表	
4.	介质内压力产生的切向应力图表	
5.	介质内压力产生的轴向应力图表	
6.	平面管道允许最大热胀弯曲应力和内压力产生的轴向和切向应力表	
7.	管子允许最大热胀弯曲应力图表	
8.	管子钢材的屈服点及蠕变极限表	
9.	管道自然补偿的允许综合应力图表	

10. 热胀应力补偿图表
11. 对称直角弯的 II-型补偿器 K 值图表
12. 半对称直角弯的 II-型补偿器 K 值图表
13. 装在垂直管段上带波纹的 II-型补偿器补偿能量图表
14. 热胀应力图表
15. 对称直角弯的 I-型管道 K 值图表
16. 不对称直角弯的 I-型管道 A 点的 K 值图表
17. 不对称直角弯的 I-型管道 B 点的 K 值图表
18. 不对称直角弯的 I-型管道 B 点的 K 值图表
19. 两端具有导向支架的直角弯 I-型管道 K 值图表
20. 在两个平面上位移的对称直角弯的 I-型管道 $(\sigma_a^{us})_{AP_z}$ 、 $(\sigma_a^{us})_{BP_z}$ 的
热胀应力形状系数 K 值图表
21. 在两个平面上位移的对称直角弯的 I-型管道 τ_{AP_z} 、 τ_{BP_z} 、 τ_{BP_z} 和 $(\sigma_a^{us})_{BP_z}$
的计算图表
22. 在两个平面上位移的不对称直角弯的 I-型管道 $(\sigma_a^{us})_{AP_z}$ 的热胀应力形状
系数 K 值图表
23. 在两个平面上位移的不对称直角弯的 I-型管道 $(\sigma_a^{us})_{BP_z}$ 的计算图表
24. 在两个平面上位移的不对称直角弯的 I-型管道 τ_{AP_z} 、 τ_{BP_z} 和 τ_{BP_z} 的
计算图表
25. 在两个平面上位移的不对称直角弯的 I-型管道 $(\sigma_a^{us})_{BP_z}$ 的计算图表
26. 对称直角弯的 Z-型管道 A 、 Γ 点的 K 值图表
27. 半对称直角弯的 Z-型管道 K 值图表

第一章 平面管道应力计算

第一节 使用弹性重心方法的实质

如图 1-1 所示的 Γ -型管道 ABB ，两端 A 和 B 点固定，通过热介质产生热膨胀后，即呈 $AB'B$ 之形状，在两端产生反作用力 P_x 和 P_y ，同时也产生力矩 M_A 和 M_B 来阻止两端 A 和 B 点的移动。产生 P_x 和 P_y 其理易明；而力矩 M 的产生，如将端部 A 点放大

(如图 1-2 所示)也容易理解，因为要求不发生 $A'_1A'_2$ 的移动而保持 A_1A_2 的位置，就必须产生力矩 M_A 才能办到。

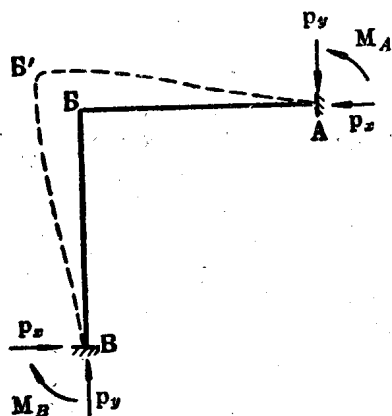


图 1-1

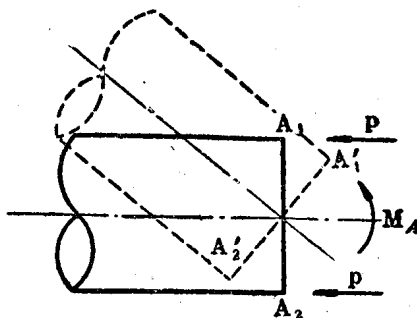


图 1-2

为了便于理解热胀伸长与反作用力之间的关系，如图 1-3 所示，可以假定 B 端不固定，任其自由伸长到 B' 点，产生位移 Δx 和 Δy 。

要使 B' 回复到 B 点，必须在 B' 点施加力 P_x 和 P_y ，同时也施加力矩 M_B 。

P_x 和 P_y 称为复原力； M_B 为 B 点的弯曲力矩。

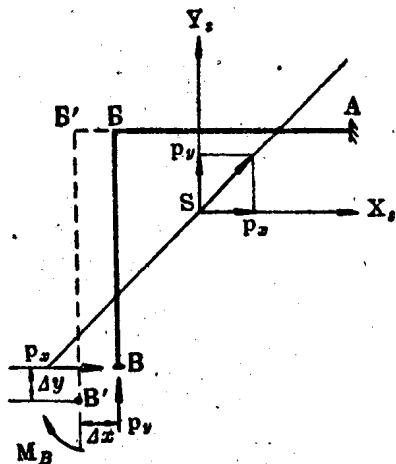


图 1-3

进行热胀应力计算时，必须求出 B 点(或 A 点)的复原力 P_x 、 P_y 和力矩 M ，因为这三个均为未知数，计算困难，若设在热胀后弹性线的重心 S (简称弹性重心)施加复原力 P_x 和 P_y 而不在 B 点施加力矩，同样可以使 B' 点回复到 B 点之原来位置；换句话说， P_x 和 P_y 作用在弹性重心 S ，相当于 P_x 、 P_y 和 M_B 作用在 B 点，这样计算就简单了，当求出复原力 P_x 和 P_y 后，即可求出任何一点之力矩，从而计算其热胀应力。

第二节 复原力 P_x 和 P_y 的计算

如图 1-3 所示的管道 ABB ，假设在 B 端任其自由伸长到 B' 点后，在弹性重心 S 施

以与热胀伸长方向相反之 1 公斤的单位力, 并沿该力之方向定一組坐标軸 X_s 、 Y_s 。

X_s 軸方向的力不但使 B' 点向 X_s 方向位移, 而且也必然使它在 Y_s 軸方向位移; 同样, Y_s 軸方向的力也是这样的。

設 作用在 X_s 方向 1 公斤的力在 X_s 方向产生的位移量为 δ_{xx} ;

作用在 X_s 方向 1 公斤的力在 Y_s 方向产生的位移量为 δ_{xy} ;

作用在 Y_s 方向 1 公斤的力在 Y_s 方向产生的位移量为 δ_{yy} ;

作用在 Y_s 方向 1 公斤的力在 X_s 方向产生的位移量为 δ_{yx} ;

則 作用在 X_s 方向的复原力 P_x (公斤) 在 X_s 方向产生的位移量为 $P_x \cdot \delta_{xx}$;

作用在 X_s 方向的复原力 P_x (公斤) 在 Y_s 方向产生的位移量为 $P_x \cdot \delta_{xy}$;

作用在 Y_s 方向的复原力 P_y (公斤) 在 Y_s 方向产生的位移量为 $P_y \cdot \delta_{yy}$;

作用在 Y_s 方向的复原力 P_y (公斤) 在 X_s 方向产生的位移量为 $P_y \cdot \delta_{yx}$;

故 复原力 P_x 和 P_y (公斤) 在 X_s 方向产生的总位移量为 $P_x \cdot \delta_{xx} - P_y \cdot \delta_{yx}$;

复原力 P_x 和 P_y (公斤) 在 Y_s 方向产生的总位移量为 $P_y \cdot \delta_{yy} - P_x \cdot \delta_{xy}$;

因为复原力 P_x 和 P_y 要使 B' 点回复到 B 点的位置,

$$\text{所以} \quad P_x \cdot \delta_{xx} - P_y \cdot \delta_{yx} = \Delta x; \quad (1-1)$$

$$P_y \cdot \delta_{yy} - P_x \cdot \delta_{xy} = \Delta y. \quad (1-2)$$

δ_{xx} 是作用于管道上 X_s 方向的单位力使管道在 X_s 方向产生的位移, 因此 δ_{xx} 与管道对 X_s 軸之綫慣性力矩 I_{xs} 成正比例, 同时与管子本身之弯力刚性 $E_t \cdot J$ 成反比例, 即

$$\delta_{xx} = \frac{I_{xs}}{E_t \cdot J};$$

同理

$$\delta_{yy} = \frac{I_{ys}}{E_t \cdot J};$$

$$\delta_{xy} = \delta_{yx} = \frac{I_{xys}}{E_t \cdot J}.$$

代入公式(1-1)和(1-2)得:

$$P_x \cdot I_{xs} - P_y \cdot I_{xys} = \Delta x \cdot E_t \cdot J; \quad (1-3)$$

$$P_y \cdot I_{ys} - P_x \cdot I_{xys} = \Delta y \cdot E_t \cdot J. \quad (1-4)$$

由公式(1-3)和(1-4)可解出复原力 P_x 和 P_y , 即

$$P_x = \frac{\Delta x \cdot I_{ys} + \Delta y \cdot I_{xys}}{I_{xs} \cdot I_{ys} - I_{xys}^2} E_t \cdot J \text{ (公斤)}; \quad (1-5)$$

$$P_y = \frac{\Delta y \cdot I_{xs} + \Delta x \cdot I_{xys}}{I_{xs} \cdot I_{ys} - I_{xys}^2} E_t \cdot J \text{ (公斤)}. \quad (1-6)$$

采用下列单位时, 公式(1-5)和(1-6)可变为

$$P_x = \frac{\Delta x \cdot I_{ys} + \Delta y \cdot I_{xys}}{I_{xs} \cdot I_{ys} - I_{xys}^2} E_t \cdot J \times 10^{-6} \text{ (公斤)}; \quad (1-7)$$

$$P_y = \frac{\Delta y \cdot I_{xs} + \Delta x \cdot I_{xys}}{I_{xs} \cdot I_{ys} - I_{xys}^2} E_t \cdot J \times 10^{-6} \text{ (公斤)}, \quad (1-8)$$

式中 P_x 、 P_y —— X 、 Y 軸向的复原力, 公斤;

I_{xs} —— P_x 力对通过管道弹性重心坐标 X_s 軸的綫慣性力矩, 公尺³。根据第一章第四节和第五节进行計算;

I_{y_3} —— P_y 力对通过管道弹性重心坐标 Y_3 轴的綫惯性力矩, 公尺³。根据第一章第四节和第五节进行计算;

I_{xy_3} —— P_x 和 P_y 力对通过管道弹性重心坐标 X_3 和 Y_3 轴之綫惯性积, 公尺³。

根据第一章第四节和第五节进行计算;

$\Delta x, \Delta y$ —— X, Y 轴向的位移量, 公分。根据第一章第三节进行计算;

E_t —— $t^\circ\text{C}$ 时管子的弹性模数, 公斤/公分²。由附录 1 的表中查得;

J ——管子的断面惯性力矩, 公分⁴。由附录 2 的表中查得, 亦可由下式计算:

$$J = \frac{\pi}{64} (D_n^4 - D_i^4) \quad (\text{公分}^4), \quad (1-9)$$

式中 D_n ——管子的外直径, 公分;

D_i ——管子的内直径, 公分。

第三节 位移量 Δx 和 Δy 的计算

任何一种形状的管道 (如图 1-4), 设 A 点固定, B 点任其自由移动, 则当热介质流通后, 即产生热胀伸长 Δt , 其方向为其两端点的连线, 其伸长量为其两端点的直线距离与膨胀系数的乘积; 座标轴向的热胀伸长量 Δx_t 和 Δy_t 为管道在坐标轴的投影长度与膨胀系数的乘积, 即

$$\Delta x_t = L_x \cdot \alpha_t \cdot \Delta t \quad (\text{公分}); \quad (1-10)$$

$$\Delta y_t = L_y \cdot \alpha_t \cdot \Delta t \quad (\text{公分}); \quad (1-11)$$

$$\Delta t = L \cdot \alpha_t \cdot \Delta t \quad (\text{公分}). \quad (1-12)$$

$$\text{因为 } L = \sqrt{L_x^2 + L_y^2},$$

$$\text{所以 } \Delta t = \sqrt{L_x^2 + L_y^2} \cdot \alpha_t \cdot \Delta t \\ = \sqrt{(L_x \cdot \alpha_t \cdot \Delta t)^2 + (L_y \cdot \alpha_t \cdot \Delta t)^2},$$

$$\Delta t = \sqrt{\Delta x_t^2 + \Delta y_t^2} \quad (\text{公分}), \quad (1-13)$$

式中 L_x ——管道在 X 轴的投影长度, 公分;

L_y ——管道在 Y 轴的投影长度, 公分;

L ——管道两固定端的直线距离, 公分;

α_t ——綫膨胀系数, 在 $t^\circ\text{C}$ 时单位长度温升 1°C 时的热胀伸长量, 公分/公分 $^\circ\text{C}$ 。由附录 3 之图表查得

Δt ——温升, $^\circ\text{C}$;

Δx_t —— X 轴向的热胀伸长量, 公分;

Δy_t —— Y 轴向的热胀伸长量, 公分;

Δt ——总的热胀伸长量, 公分。

如果管道施行冷紧和当两端 (或一端) 的设备具有受热位移的情况时, 则坐标轴向的

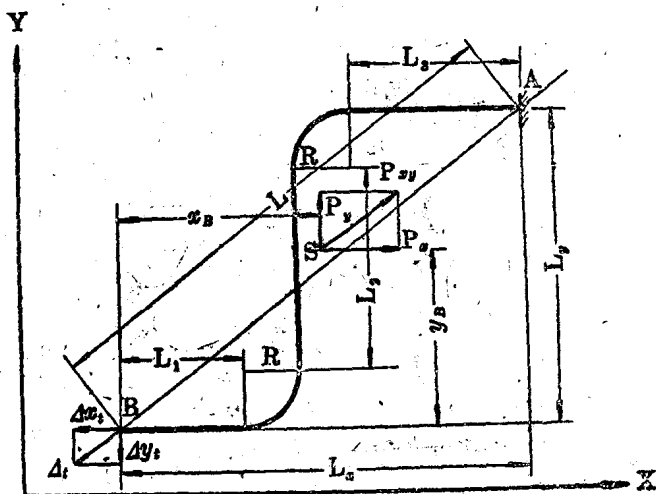


图 1-4

位移量 Δx 和 Δy 为:

$$\Delta x = \Delta x_i \pm \Delta x_0 - \Delta x_p \text{ (公分);} \quad (1-14)$$

$$\Delta y = \Delta y_i \pm \Delta y_0 - \Delta y_p \text{ (公分),} \quad (1-15)$$

式中 Δx ——X 轴向位移量, 公分;

Δy ——Y 轴向位移量, 公分;

Δx_i ——X 轴向的管道热胀伸长量, 公分。见公式(1-10);

Δy_i ——Y 轴向的管道热胀伸长量, 公分。见公式(1-11);

Δx_0 ——端部设备在 X 轴向的位移量, 公分;

Δy_0 ——端部设备在 Y 轴向的位移量, 公分;

Δx_p ——X 轴向的冷紧量, 公分;

Δy_p ——Y 轴向的冷紧量, 公分。

在实际计算中, 一般不考虑冷紧量, 而把安装冷紧量当作备用量考虑。

注: Δx_0 和 Δy_0 的正负值决定于端部设备的位移与管道的热胀伸长方向, 当方向相同时为负值, 相反时为正值。

第四节 綫惯性力矩和綫惯性积对管道坐标轴和彈性重心坐标轴的换算公式

$$\left. \begin{aligned} I_x &= I_{xs} + L_{np} \cdot \bar{y}^2 \text{ (公尺}^3\text{)} \\ I_{xs} &= I_x - L_{np} \cdot \bar{y}^2 \text{ (公尺}^3\text{)}, \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

$$\left. \begin{aligned} I_y &= I_{ys} + L_{np} \cdot \bar{x}^2 \text{ (公尺}^3\text{)} \\ I_{ys} &= I_y - L_{np} \cdot \bar{x}^2 \text{ (公尺}^3\text{)}, \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

$$\left. \begin{aligned} I_{xy} &= I_{xys} + L_{np} \cdot \bar{x} \cdot \bar{y} \text{ (公尺}^3\text{)} \\ I_{xys} &= I_{xy} - L_{np} \cdot \bar{x} \cdot \bar{y} \text{ (公尺}^3\text{)}, \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

式中 I_x, I_y, I_{xy} ——对管道坐标轴的綫惯性力矩与綫惯性积, 公尺³;

I_{xs}, I_{ys}, I_{xys} ——对彈性重心坐标轴的綫惯性力矩与綫惯性积公尺³;

$\bar{x}, \bar{y}$ ——彈性重心与管道坐标的轴向距离, 公尺;

L_{np} ——管道的相当长度, 公尺。

管道的相当长度为其各个管段元件的相当长度之和。

直管元件在平面管道上的相当长度为其实际长, 弯管元件在平面管道上的相当长度为

$$\left. \begin{aligned} L_{np} &= \frac{R \cdot \alpha}{k} \text{ (公尺)} \\ L_{np} &= \frac{\pi \cdot R \cdot \alpha^\circ}{180 \cdot k} \text{ (公尺)}, \end{aligned} \right\} \quad (1-19)$$

式中 R ——弯管的弯曲半径, 公尺;

α, α° ——弯管的弧度和角度;

k ——弯管的减刚系数(或称卡尔曼系数), 系根据 λ 值决定的。

卡尔曼証明: 管子受弯后, 其断面椭圆化, 将使綫惯性力矩、綫惯性积和静力矩减弱, 减弱的程度决定于管子的尺寸(即内外径和壁厚)和弯曲半径, 因此在弯管元件计算力矩时, 其长度应予以修正, 此修正值即上述的减刚系数 k ,

$$k = \frac{1 + 12\lambda^2}{10 + 12\lambda^2}, \quad (1-20)$$

$$\text{而 } \lambda = \frac{4 \cdot S \cdot R}{D_m^2}, \quad (1-21)$$

式中 S ——管壁厚度, 公分;

R ——弯管的弯曲半径, 公分;

D_m ——管子的平均直径, 公分。

λ 、 k 值亦可由附录 2 的图表中查得。 k 值永远小于 1, 即 $k < 1$ 。

第五节 綫慣性力矩、綫慣性积和靜力矩的計算

綫慣性力矩: 平面管道对其坐标軸的綫慣性力矩为該管道的微分管段与其距坐标軸的距离的平方乘积的积分和。如图 1-5 所示, AB 管道对 X 軸和 Y 軸的綫慣性力矩为:

$$I_x = \int_A^B y^2 \cdot dl; \quad (1-22)$$

$$I_y = \int_A^B x^2 \cdot dl. \quad (1-23)$$

或按第一章第四节的公式(1-16)和(1-17),

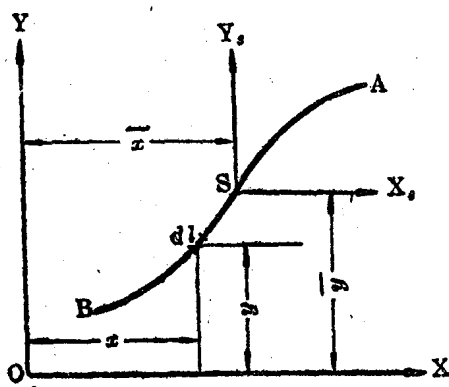


图 1-5

$$I_x = I_{xs} + L_{np} \cdot \bar{y}^2;$$

$$I_y = I_{ys} + L_{np} \cdot \bar{x}^2.$$

綫慣性积: 平面管道对其坐标軸的綫慣性积为該管道的微分管段与其距坐标两軸的距离乘积的积分和。如图 1-5 所示, AB 管道对坐标軸的綫慣性积为:

$$I_{xy} = \int_A^B x \cdot y \cdot dl, \quad (1-24)$$

或按第一章第四节的公式(1-18),

$$I_{xy} = I_{xys} + L_{np} \cdot \bar{x} \cdot \bar{y}.$$

靜力矩: 平面管道对其坐标軸的靜力矩为該管道的微分管段与其距坐标軸的距离乘积的积分和, 或等于其相当长度与彈性重心的軸距离相乘积。如图 1-5 所示, AB 管道对 X 和 Y 軸的靜力矩为:

$$\left. \begin{aligned} S_x &= \int_A^B y \cdot dl \\ S_x &= L_{np} \cdot \bar{y}, \end{aligned} \right\} \quad (1-25)$$

或

$$\left. \begin{aligned} S_y &= \int_A^B x \cdot dl \\ S_y &= L_{np} \cdot \bar{x}, \end{aligned} \right\} \quad (1-26)$$

或

式中 S_x, S_y ——管道对其坐标軸的靜力矩, 公尺²;

$\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 和 L_{np} 与第一章第四节相同。

由于实际上一条管道不是任意的一条曲綫, 而是由直管和弯管等元件所組成的, 所

以一条管道对其坐标轴的綫慣性力矩、綫慣性积与靜力矩为其組成的各个元件的力矩的总和。

(1) 直管元件的綫慣性力矩、綫慣性积和靜力矩的計算:

如图1-6所示的AB直管元件与坐标軸OX成 β° 时, 对坐标X-Y軸的綫慣性力矩、綫慣性积和靜力矩的計算如下:

因为 $y = a + l \cdot \sin \beta$, $x = b + l \cdot \cos \beta$, 代入公式(1-22)到(1-26)积分后即求得:

$$\begin{aligned} I_x &= \int_A^B (a + l \cdot \sin \beta)^2 dl \\ &= \int_A^B (a^2 + 2a \cdot l \cdot \sin \beta + l^2 \cdot \sin^2 \beta) dl \\ &= \left(a^2 \cdot l + 2a \frac{l^2}{2} \sin \beta + \frac{l^3}{3} \sin^2 \beta \right)_0^L, \end{aligned}$$

$$\text{即 } I_x = a^2 \cdot L + a \cdot L^2 \cdot \sin \beta + \frac{L^3}{3} \sin^2 \beta \quad (\text{公尺}^3); \quad (1-27)$$

同样可求得:

$$I_y = b^2 \cdot L + b \cdot L^2 \cdot \cos \beta + \frac{L^3}{3} \cos^2 \beta \quad (\text{公尺}^3); \quad (1-28)$$

$$I_{xy} = a \cdot b \cdot L + b \frac{L^2}{2} \sin \beta + a \frac{L^2}{2} \cos \beta + \frac{L^3}{3} \sin \beta \cdot \cos \beta \quad (\text{公尺}^3); \quad (1-29)$$

$$S_x = a \cdot L + \frac{L^2}{2} \sin \beta \quad (\text{公尺}^2); \quad (1-30)$$

$$S_y = b \cdot L + \frac{L^2}{2} \cos \beta \quad (\text{公尺}^2). \quad (1-31)$$

$$\text{因为 } a = \bar{y} - \frac{L}{2} \sin \beta, \quad b = \bar{x} - \frac{L}{2} \cos \beta,$$

以 a 、 b 代入公式(1-27)到(1-31)即得:

$$I_x = \frac{L^3}{12} \sin^2 \beta + L \cdot \bar{y}^2 \quad (\text{公尺}^3); \quad (1-32)$$

$$I_y = \frac{L^3}{12} \cos^2 \beta + L \cdot \bar{x}^2 \quad (\text{公尺}^3); \quad (1-33)$$

$$I_{xy} = \frac{L^3}{12} \sin \beta \cdot \cos \beta + L \cdot \bar{x} \cdot \bar{y} \quad (\text{公尺}^3); \quad (1-34)$$

$$S_x = L \cdot \bar{y} \quad (\text{公尺}^2); \quad (1-35)$$

$$S_y = L \cdot \bar{x} \quad (\text{公尺}^2). \quad (1-36)$$

因直管元件的相当长度 $L_{np} = L$, 依据公式(1-16)到(1-18)可知对于通过直管元件彈性重心坐标軸的綫慣性力矩与綫慣性积为:

$$I_{xx} = \frac{L^3 \cdot \sin^2 \beta}{12} \quad (\text{公尺}^3); \quad (1-37)$$

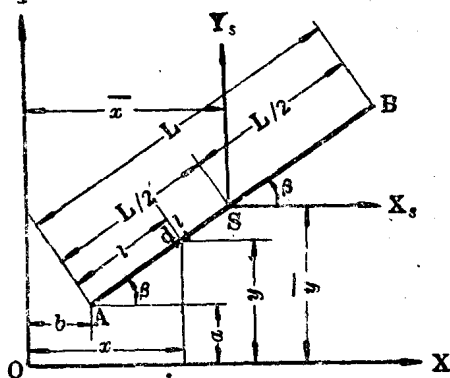


图 1-6

$$I_{ys} = \frac{L^3 \cdot \cos^2 \beta}{12} \quad (\text{公尺}^3); \quad (1-38)$$

$$I_{xys} = \frac{L^3 \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta}{12} \quad (\text{公尺}^3), \quad (1-39)$$

式中 a 、 b 、 L 、 $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 等长度单位均为公尺。

但平面管道的直管元件经常出现的是垂直或平行于坐标轴，即 $\beta = 90^\circ$ 或 $\beta = 0^\circ$ 。

当 $\beta = 90^\circ$ ，即直管元件垂直于 X 轴时(如图 1-10 所示)，则

$$\sin \beta = 1, \quad \cos \beta = 0,$$

以之代入上述各公式，即得“直管和弯管在平面内的惯性量表”(表 1-1) 中图 1-10 下所示诸值。

当 $\beta = 0$ ，即直管元件平行于 X 轴时(如图 1-11 所示)，则

$$\sin \beta = 0, \quad \cos \beta = 1,$$

以之代入上述各公式，即得表 1-1 中图 1-11 下所示诸值。

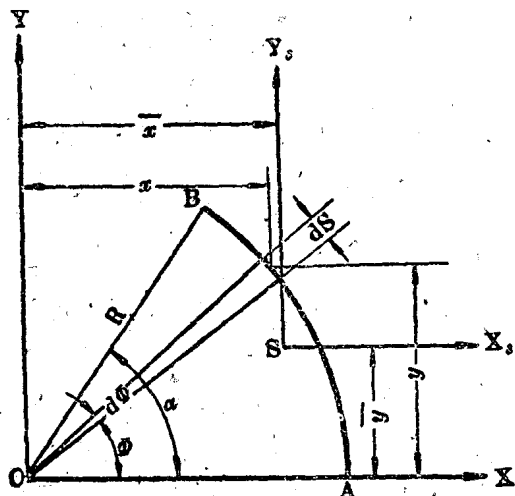


图 1-7

(2) 弯管元件綫惯性力矩、綫惯性积和靜力矩計算:

任何弯曲角度的弯管元件对于通过其彈性重心坐标的綫惯性力矩与綫惯性积的計算如下:

如图 1-7 所示任何弯曲角度之弯管元件，設以圓心为坐标上的 O 点，計算其对坐标軸的綫惯性力矩与綫惯性积。

$$\text{因为} \quad ds = \frac{1}{k} R \cdot d\phi;$$

$$y = R \cdot \sin \phi;$$

$$x = R \cdot \cos \phi.$$

代入公式(1-22)到(1-26)积分后即求得:

$$I_x = \int_A^B y^2 \cdot ds = \int_0^\alpha (R \cdot \sin \phi)^2 \cdot \frac{1}{k} R \cdot d\phi = \frac{R^3}{k} \left[\frac{1}{2} \left(\phi - \frac{\sin 2\phi}{2} \right) \right]_0^\alpha,$$

即

$$I_x = \frac{R^3}{2k} \left(\alpha - \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \quad (\text{公尺}^3). \quad (1-40)$$

同样可求得

$$I_y = \frac{R^3}{2k} \left(\alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \quad (\text{公尺}^3); \quad (1-41)$$

$$I_{xy} = \frac{R^3}{2k} \sin^2 \alpha \quad (\text{公尺}^3). \quad (1-42)$$

弯管元件彈性重心与圓心之坐标軸距离为

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= \frac{R \cdot \sin \alpha}{\alpha} \quad (\text{公尺}) \\ \bar{y} &= \frac{18CR \cdot \sin \alpha}{\pi \cdot \alpha^3} \quad (\text{公尺}); \end{aligned} \right\} \quad (1-43)$$

或

$$\left. \begin{aligned} \bar{y} &= \frac{R}{\alpha} (1 - \cos \alpha) \text{ (公尺)} \\ \bar{y} &= \frac{180R}{\pi \cdot \alpha^\circ} (1 - \cos \alpha) \text{ (公尺)}. \end{aligned} \right\} \quad (1-44)$$

因此, 任何弯曲角度的弯管元件对其弹性重心坐标的綫慣性力矩与綫慣性积按第一章第四节公式(1-16)到(1-19)即可求得:

$$I_{xx} = I_x - L_{np} \cdot \bar{y}^2 = \frac{R^3}{2k} \left(\alpha - \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) - \frac{R \cdot \alpha}{k} \left(\frac{R}{\alpha} (1 - \cos \alpha) \right)^2,$$

$$\text{即} \quad I_{xx} = \frac{R^3}{k} \left(\frac{1}{2} \left(\alpha - \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) - \frac{1}{\alpha} (1 - 2 \cos \alpha + \cos^2 \alpha) \right) \text{ (公尺}^3\text{)}. \quad (1-45)$$

同样可求得

$$I_{yy} = \frac{R^3}{k} \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\sin 2\alpha}{4} - \frac{1}{\alpha} \sin^2 \alpha \right) \text{ (公尺}^3\text{)}; \quad (1-46)$$

$$I_{xy} = \frac{R^3}{k} \left(\frac{\sin^2 \alpha}{2} - \frac{\sin \alpha}{\alpha} + \frac{1}{\alpha} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \right) \text{ (公尺}^3\text{)}, \quad (1-47)$$

式中 I_{xx} 、 I_{yy} 、 I_{xy} ——对弹性重心坐标的綫慣性力矩与綫慣性积, 公尺³;

R ——弯管的弯曲半径, 公尺;

k ——减刚系数, 根据第一章第四节公式(1-20)进行计算或由附录2的图表中查得;

α 、 α° ——弯管弧度和角度。

任何弯曲角度的弯管元件对任何坐标(如图1-8中的 $X-Y$ 坐标)的綫慣性力矩与綫慣性积的计算按第一章第四节的公式(1-16)、(1-17)和(1-18)进行, 即

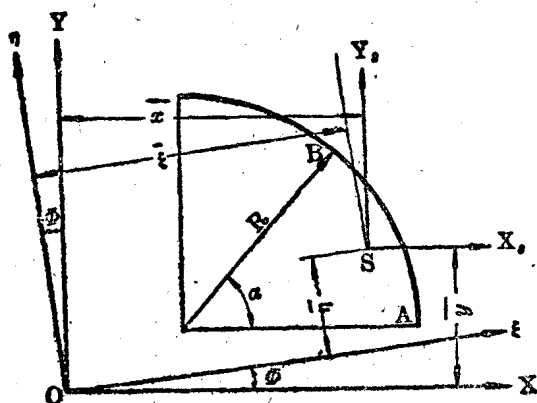


图 1-8

$$I_x = I_{xx} + L_{np} \cdot \bar{y}^2 \text{ (公尺}^3\text{)};$$

$$I_y = I_{yy} + L_{np} \cdot \bar{x}^2 \text{ (公尺}^3\text{)};$$

$$I_{xy} = I_{xy} + L_{np} \cdot \bar{x} \cdot \bar{y} \text{ (公尺}^3\text{)}.$$

静力矩的计算按公式(1-25)和(1-26)进行, 即

$$S_x = L_{np} \cdot \bar{y} \text{ (公尺}^2\text{)};$$

$$S_y = L_{np} \cdot \bar{x} \text{ (公尺}^2\text{)}.$$

弯管元件对于与 $X-Y$ 坐标轴移成 Φ 角的 $\xi-\eta$ 坐标轴(如图 1-8 中所示)的綫慣性力矩与綫慣性积可按下列公式計算:

$$I_\xi = I_x \cdot \cos^2 \Phi + I_y \cdot \sin^2 \Phi - I_{xy} \cdot \sin 2\Phi \text{ (公尺}^4\text{)}; \quad (1-48)$$

$$I_\eta = I_y \cdot \cos^2 \Phi + I_x \cdot \sin^2 \Phi + I_{xy} \cdot \sin 2\Phi \text{ (公尺}^4\text{)}; \quad (1-49)$$

$$I_{\xi\eta} = \frac{I_x - I_y}{2} \sin 2\Phi + I_{xy} (\cos^2 \Phi - \sin^2 \Phi) \text{ (公尺}^4\text{)}. \quad (1-50)$$

彈性重心对 $\xi-\eta$ 坐标轴距离为

$$\bar{\xi} = \bar{x} \cos \Phi + \bar{y} \sin \Phi \text{ (公尺)}; \quad (1-51)$$

$$\bar{\eta} = \bar{y} \cos \Phi - \bar{x} \sin \Phi \text{ (公尺)}. \quad (1-52)$$

但在管道布置中經常出現的弯管元件, 其弧綫不是正对坐标中心(如图 1-12 所示)就是正偏向坐标一轴(如图 1-13 所示), 而且其弯曲角度一般均为 90° , 即 $\alpha = \frac{\pi}{2}, \alpha^\circ = 90^\circ$.

則 $\sin 2\alpha = \sin \pi = 0, \sin^2 \alpha = \sin^2 \frac{\pi}{2} = 1,$

$$\sin \alpha = \sin \frac{\pi}{2} = 1, \cos \alpha = \cos \frac{\pi}{2} = 0.$$

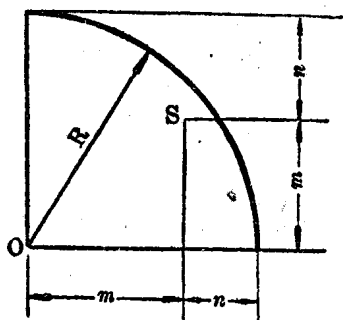


图 1-9

代入公式(1-45)到(1-47), 即得 90° 弯管元件对于其彈性重心坐标轴的綫慣性力矩与綫慣性积, 但当其弧綫正对坐标中心时, 慣性积为負值; 其弧綫正偏向坐标一轴时, 則为正值。

为了加快和簡化計算起見, 茲将 90° 弯管元件經常出現的形状求出其綫慣量值列于表 1-1 中。

90° 弯管元件的彈性重心对其圆心的軸向距离(如图 1-9 所示)按公式(1-43)和(1-44)求得,

因 $\sin \alpha = \sin \frac{\pi}{2} = 1, \cos \alpha = \cos \frac{\pi}{2} = 0,$

故

$$\bar{x} = \bar{y} = m = 0.637R;$$

$$n = R - m = 0.363R.$$

在进行各个管道元件的綫慣性积与靜力矩的計算时, 应注意其彈性重心与坐标的軸距离的正負号, 因其值是随軸距离的正負号而变化的, 但在綫慣性力矩計算时, 因其值与軸距离是平方关系, 所以永远是正值。为避免軸向有負值, 尽可能将管道放置在同一正象限内进行应力計算。

在平面管道中, 其彈性重心的軸距离可按公式(1-25)和(1-26)求得, 即

$$\bar{y} = \frac{S_x}{L_{np}} \text{ (公尺)};$$

$$\bar{x} = \frac{S_y}{L_{np}} \text{ (公尺)}.$$

直管和弯管在平面内的惯性量表

管段名称	图1-10 垂直于X轴时	图1-11 平行于X轴时	图1-12 弧正对坐标中心时	图1-13 弧偏向坐标中心时
L_{np}	L	L	$1.57 \frac{R}{k}$	$1.57 \frac{R}{k}$
S_x	$\frac{1}{2} L^2 + La \text{ 或 } L\bar{y}$	$La \text{ 或 } L\bar{y}$	$1.57 \frac{R}{k} \bar{y}$	$1.57 \frac{R}{k} \bar{y}$
S_y	$L \cdot b \text{ 或 } L\bar{x}$	$\frac{1}{2} L^2 + L \cdot b \text{ 或 } L \cdot \bar{x}$	$1.57 \frac{R}{k} \bar{x}$	$1.57 \frac{R}{k} \bar{x}$
$I_x = I_{xs} + L_{np} \cdot \bar{y}^2$	I_{xs}	I_{xs}	I_{xs}	I_{xs}
	$\frac{L^3}{12}$	0	$0.149 \frac{R^3}{k}$	$0.149 \frac{R^3}{k}$
	$\frac{1}{3} L^3 + L^2 \cdot a + L \cdot a^2$	$L \cdot a^2$	$1.57 \frac{R}{k} \bar{y}^2$	$1.57 \frac{R}{k} \bar{y}^2$
$I_y = I_{ys} + L_{np} \cdot \bar{x}^2$	I_{ys}	I_{ys}	I_{ys}	I_{ys}
	0	$\frac{1}{12} L^3$	$0.149 \frac{R^3}{k}$	$0.149 \frac{R^3}{k}$
	Lb^2	$\frac{1}{3} L^3 + L^2 \cdot b + L \cdot b^2$	$1.57 \frac{R}{k} \bar{x}^2$	$1.57 \frac{R}{k} \bar{x}^2$
$I_{xy} = I_{xys} + L_{np} \cdot \bar{x} \cdot \bar{y}$	I_{xys}	I_{xys}	I_{xys}	I_{xys}
	0	0	$-0.137 \frac{R^3}{k}$	$+0.137 \frac{R^3}{k}$
	$\frac{1}{2} L^2 \cdot b + L \cdot a \cdot b$	$\frac{1}{2} L^2 \cdot a + L \cdot a \cdot b$	$1.57 \frac{R}{k} \bar{x} \cdot \bar{y}$	$1.57 \frac{R}{k} \bar{x} \cdot \bar{y}$

第六节 热胀力矩与应力计算

在平面管道中, 受热膨胀后为使管道两端保持原来形状(即两端固定)而在其弹性重心施加复原力 P_x 和 P_y , 这将使管道任何一点产生弯曲力矩与弯曲应力; 弯曲力矩的大小, 决定于该点与弹性重心的轴向距离, 弯曲应力则决定于力矩的大小。

如图1-4所示管道 AB 的 B 点弯曲力矩为

$$M_B^{us} = M_x + M_y,$$

而

$$M_x = P_x \cdot y_B \text{ (顺时针方向为正号);}$$

$$M_y = -P_y \cdot x_B \text{ (逆时针方向为负号),}$$

则

$$M_B^{us} = P_x \cdot y_B - P_y \cdot x_B.$$

当管道在弹性重心施加复原力 P_x 和 P_y 的计算完竣, 由其正负号决定力的方向后, 即可计算任何一点的弯曲力矩。

由于弯曲力矩产生了弯曲应力, 其力系沿管子的轴向(如图1-14所示), 因而称为热胀轴向弯曲应力(σ_a^{us}), 其计算公式如下:

当在管子外壁时:

$$\sigma_a^{us} = \frac{M_B^{us}}{W} \text{ (公斤/公分}^2\text{)}, \quad (1-53)$$

因为

$$W = \frac{\pi}{32} \left(\frac{D_n^4 - D_o^4}{D_n} \right) \text{ (公分}^3\text{)}, \quad (1-54)$$

$$J = \frac{\pi}{64} (D_n^4 - D_o^4) \text{ (公分}^4\text{)},$$

所以

$$W = \frac{2J}{D_n} \text{ (公分}^3\text{)}. \quad (1-55)$$

代入公式(1-53)即得

$$\sigma_a^{us} = \frac{M_B^{us} \cdot D_n}{2J} \text{ (公斤/公分}^2\text{)}. \quad (1-56A)$$

当在管子内壁时则应为

$$\sigma_a^{us} = \frac{M_B^{us} \cdot D_o}{2J} \text{ (公斤/公分}^2\text{)}, \quad (1-56B)$$

式中 W ——管子的断面系数, 公分³;

J ——管子的断面惯性力矩, 公分⁴。由附录2的表中查得;

D_n 、 D_o ——管子的外直径和内直径, 公分;

M^{us} ——热胀弯曲力矩, 公斤-公分;

σ_a^{us} ——热胀轴向弯曲应力, 公斤/公分²。

如果计算弯管段上的热胀弯曲应力时, 还须考虑到弯管在受力弯曲时截面趋于椭圆化的特性, 则计算轴向弯曲应力须加以修正, 即公式(1-56A)和(1-56B)须乘上轴向应力系数 μ 。

μ 的计算如下式所示:

当 $\lambda < 1.47$ 时,

$$\mu = \frac{2}{3k} \sqrt{\frac{5+6\lambda^2}{18}},$$

当 $\lambda \geq 1.47$ 时,

$$\mu = \frac{12\lambda^2 - 2}{12\lambda^2 + 1}.$$

(1-57)