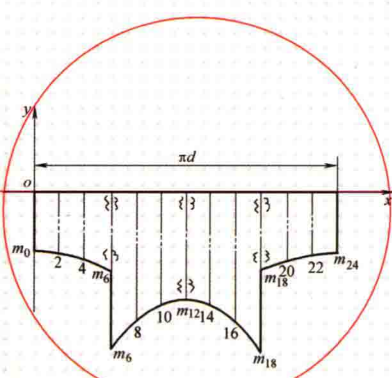
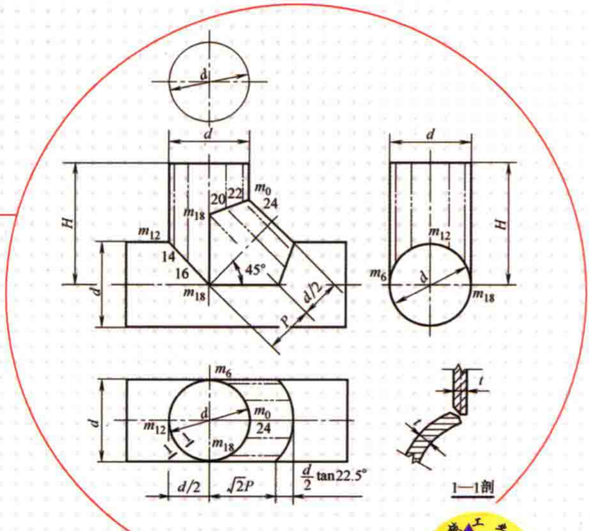
钣金展开计算实例

（坐标系法）

蒋国成 编著

方法新颖◎实例丰富◎易学易用◎数据准确





$$\begin{cases} x_i = \dfrac{\pi d}{i_{\max}} \cdot i, \\ y_i = \tan 22.5^\circ \dfrac{d}{2} \cos\left(\dfrac{360^\circ}{i_{\max}} \cdot i\right) + P\sqrt{2} - H. \end{cases}$$

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

钣金展开计算实例

(坐标系法)

蒋国成　编著

机 械 工 业 出 版 社

本书主要用平行线法、三角形法、放射线法及综合线法介绍了常用构件的计算展开。为便于读者掌握和应用钣金展开计算公式，本书本着由简入繁、循序渐进的原则，对每个典型构件均先介绍计算公式，再辅以实例进行讲解，层次清楚、容易掌握。本书主要内容包括：钣金展开计算方法的由来与相关的解析几何数学公式的应用、等径圆管的组成构件与平行线展开计算方法的应用、圆口变方（长方）口的构件与三角形展开计算方法的应用、由圆锥管组成的构件与放射线展开计算方法的应用和有关配套的几何图形与相关的数学公式的应用。

本书可供在岗的一线工人使用，也可供各类院校的相关专业师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

钣金展开计算实例：坐标系法/蒋国成编著. —北京：机械工业出版社，2017.2

ISBN 978-7-111-56016-6

Ⅰ.①钣…　Ⅱ.①蒋…　Ⅲ.①钣金工-计算方法　Ⅳ.①TG936

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 027096 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：侯宪国　责任编辑：侯宪国　责任校对：张晓蓉
封面设计：马精明　责任印制：李　飞
北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）
2017 年 9 月第 1 版第 1 次印刷
169mm×239mm · 20.5 印张 · 419 千字
0001—3000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-56016-6
定价：49.80 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
　　　　　　　010-88379203

网络服务
机 工 官 网：www.cmpbook.com
机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
金 书 网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com

前　　言

钣金加工是机械制造、汽车、造船、航空航天等行业的重要加工方法之一，从精密产品加工到重型机械加工都离不开钣金加工。我国这些行业的发展以及生产能力与需求的提高，也促进了钣金加工行业的快速发展。钣金展开是钣金加工中非常重要的一步，而钣金计算是实现钣金展开的方法之一。用计算法进行钣金展开放样，简单明了、准确无误且适用范围广，避免了图解法的操作复杂、效率低且精度低的缺点。因此，作者特编写了本书。

本书内容涵盖了常用典型管件的基本构件、相贯件、组合件等的展开计算所涉及的公式，只需要用计算器便可计算得出各类构件的展开数据，为读者提供了方便。本书中的计算公式及图形建立于划定的空间（或平面）直角坐标系中，构件的展开图曲线是平面坐标点的轨迹，计算更简便，图形清晰易操作。本书具有以下特点：

1）本书中所述坐标系法用计算式直接给出，免去推导过程，避免给一线工人带来困扰。

2）本书采用的直角坐标系法计算式经作者多年工作检验，计算所得数据与实际数据准确无误，且展开图易操作。

3）每个计算式之后都辅以计算实例来讲解说明，使读者更方便使用。

4）本书采用图文结合的形式，使所要讲述的内容一目了然。

本书由本钢集团结构设计工程师蒋国成编写，是长期工作经验的总结，并通过了实践验证。但由于编者水平有限，书中难免存在不妥或遗漏之处，敬请读者批评指正。

编　者

目　　录

第1章　钣金展开计算方法的由来与相关的解析几何数学公式的应用

钣金构件展开图的传统几何图解划法是把施工图上的钣金构件，诸如等（变）径圆（方）管、圆（棱）锥管、球形壳体及其组合构件、容器等的几何外形，按1∶1的比例放样到平整、宽阔的钢板地板平面上，划出构件的立面图、平面图、侧面图及必要的剖（切）面图。将构件的支件圆管（或圆锥管）的横截面圆周等分成若干（适当密集的）等份。选准恰当的一个等分点作为起始（零）点，并按顺序标注各等分点的序号。过各等分点作平行于等径圆管中心轴线的直线素线（若是圆锥管则为放射线素线）与构件的主件圆管（或其他形式的壳体）的相应直线素线相交得出一系列点的轨迹，这就是构件的接合线（相贯线）曲线的投影。它与直线素线的交点到素线端点的长度，可作为支件等径圆管展开图曲线上点的直角坐标的纵坐标 y_i 值；在平面直角坐标系的横轴 ox 上，截取支件圆管的直径圆周的展开长度，并等分与该支件圆管的横截面圆周所等分的相同数目的等份，由坐标原点（为零点）开始依次标注各等分点序号。从坐标原点分别到各等分点的有向线段长度，依次作为支件等径圆管展开图曲线上点的直角坐标的横坐标 x_i 值，有了这些点（x_i，y_i）的直角坐标，就可以描点连接成曲线，与有关线段一起组成该支件等径圆管的展开图。这种几何图解划法工艺过程复杂、操作费工费时、工效低，束缚了施工进度，被施工者认为是亟待攻关革新的技能工艺环节。

现代电子计算机、计算器的普遍使用，使钣金展开计算划法中复杂的、多位数的数学计算工作能够快速、准确地完成。剩下的手工（或计算机操作）划制构件展开图的事情就很容易了。钣金构件的支、主件圆管（或其他形式的壳体）几何外形特征，都可以用解析几何学中相应的数学解析式子（公式）来表示，由于支、主件壳体的相交，所以把两两相关的数学解析式子组成联立方程组，经整理化简得到一个函数式，它表示该构件的接合线（相贯线）曲线上点的直角坐标的计算式；有时，还要引进一个已知量组成新的计算式，这就是该构件的支件圆管展开图曲线上的点的直角坐标的计算式。这个计算式中的自变量是以含有另一个参变量的参数方程表示的，这个参变量的几何图形位置是构件的支件圆管（或圆锥管）的一个恰当的横截面圆周等分若干（适当密集的）等份的等分点，并选准一个等分点为起始（零）点，再依次标注各等分点的序号，这一组点序号就是参变量的取值范围。把参变量依次代入支件圆管展开图曲线上点的直角坐标的计算式，可计算得到该支件圆管展开图曲线上全部点的直角坐标，进而描划出支件圆管的展开图。

例：一个水平等径圆管与圆锥管的侧旁相交（图1.1）。这个水平等径圆管展

开图曲线上点的直角坐标的计算式的建立及推导过程如下：构件的主件圆锥管的数学解析式是二次圆锥曲面方程$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{a^2}-\frac{z^2}{c^2}=0$，水平等径圆管的圆筒表面均匀分布着平行于其中心轴线，而且过圆管横截面圆周很多（具有适当密集数目的）等分点的直线素线，这些直线素线和所过等分点的直角坐标是同一个参数方程式：

$$\begin{cases} x_i=\frac{d}{2}\sin\left(\frac{360°}{i_{\max}}\cdot i\right)+e \\ z_i=\frac{d}{2}\cos\left(\frac{360°}{i_{\max}}\cdot i\right)+H \end{cases}$$，（这里取 H 的正值，不影响最后的计算结果）。

将上述参数方程代入圆锥管的二次圆锥曲面方程，经整理、化简得构件的接合线（相贯线）曲线上点的直角坐标的纵坐标 y_i 的函数式：$y_i=\sqrt{\left(\frac{a}{c}\right)^2\left[\frac{d}{2}\cos\left(\frac{360°}{i_{\max}}\cdot i\right)+H\right]^2-\left[\frac{d}{2}\sin\left(\frac{360°}{i_{\max}}\cdot i\right)+e\right]^2}$，用这个式子 y_i 值减去等径圆管的中心轴线的截取长度 L 值的代数和，就是水平等径圆管展开图曲线上点的直径坐标的纵坐标 y_i'值（式中取 L 的负值，是为了把圆管展开图布置在平面直角坐标的第Ⅳ象限）。

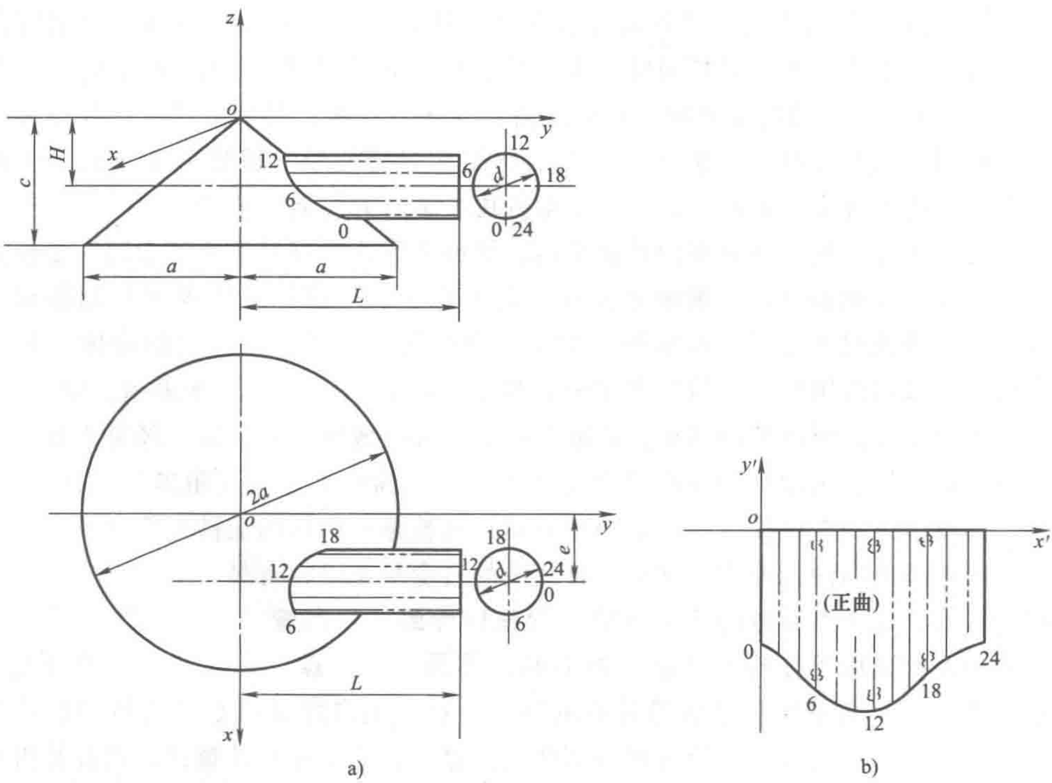


图 1.1 水平等径圆管与圆锥侧旁相交

a）水平等径圆管与圆锥侧旁相交示意图 b）水平等径圆管展开图示意

然后在横轴 ox' 上截取水平等径圆管直径圆周的展开长度 πd，并等分与圆管横截面圆周所等分的相同数目的等分点，依次标注各等分点的点序号，得圆管展开图曲线上点的直角坐标的横坐标 x_i' 值，将横坐标 x_i' 以及纵坐标 y_i' 的数学表达式联立，就得到支件水平等径圆管展开图曲线上点（x_i'，y_i'）直角坐标的计算式

$$\begin{cases} x_i' = \dfrac{\pi d}{i_{\max}} \cdot i \\ y_i' = \sqrt{\left(\dfrac{a}{c}\right)^2 \left[\dfrac{d}{2}\cos\left(\dfrac{360°}{i_{\max}} \cdot i\right) + H\right]^2 - \left[\dfrac{d}{2}\sin\left(\dfrac{360°}{i_{\max}} \cdot i\right) + e\right]^2} - L \end{cases}$$

（取 $i=0$、1、2、…、$i_{\max}$），将参变量 i 值依次代入上式计算，可得水平等径圆管展开图曲线上全部点（x_i'，y_i'）的直角坐标，进而描划出圆管的展开图。

这两种钣金构件展开图的划法的解题思路和步骤是相同的，而原来的几何图解划法又指引和启发了后者展开计算划法的形成和建立。尤其是几何图解划法中在构件的支件圆管（或圆锥管）的一个基准横截面圆周上等分若干（适当密集的）等分点，又过各等分点作相应的平行直线素线（或需要作放射性素线），这种做法在展开计算划法中就是建立这个圆管的横截面圆周上的等分一定数量的等分点的直角坐标的参数方程，它也是过各个等分点的直线素线的参数方程，再代入构件的主件圆管（或圆锥管）的数学解析式，经整理化简得到一个表示构件的接合线（相贯线）曲线投影的参数方程式，再加入所需要的一个已知量后的新方程式，与有关式子组成联立参数方程组，就是支件圆管展开图曲线上点的直角坐标的计算式。这个参变量就是支件圆管的横截面圆周上的等分点的个数按顺序排列起来的一组递增整数数列。它体现着计算工作和划展开图的顺序和精密程度，是看得见、摸得着的一组参变量的取值范围。它的应用继承了传统几何图解划法中的优点，符合工艺操作规律，容易理解与掌握，操作起来很方便，使计算工作有规律可依，有条不紊地进行。这两种划法所适用的范围和构件的规格是相同的。当构件的尺寸增大时，选择支件的横截面圆周的等分点，要相应地增多，使构件表面的直线素线的密度增加，这样构件的展开图曲线上的点也增多，便于绘制曲线成图。

方（棱）锥壳体、方（长方）形截面的折线形式的弯折管道构件的展开计算，可先根据图样上的已知条件，计算出各棱边线段相交的棱角点的直角坐标，然后应用两点间的距离公式来求解各棱边线段的长度，再应用三条线段可组成一个三角形，两个三角形拼接成一个四边形的方法，可求得方（长方）形截面折线形式的弯折管道的某一个平板的实形，如此求解整个构件的板块的展开图。

展开计算划法以数学计算式的运算工作代替了几何图解划法中大量、复杂的各种几何投影面的变换及各种线条的划制方法，解除了烦琐、辛劳的手工作业，降低了劳动强度，极大地提高了工效和产品精度，实现了该工艺计算机自动控制程序化操作，推进了生产、施工的现代化水平，会给施工带来巨大的经济效益和广泛的社会效益。

第 2 章　等径圆管的组成构件与平行线展开计算方法的应用

2.1　等径圆管斜截端的展开计算

图 2.1a 所示为等径圆管斜截端立体图。如图 2.1b 所示，等径圆管的板厚中心直径为 d，其中心轴线的截取长度为 L，与倾斜平面相交的夹角为 α（°），该等径圆管斜截端展开图曲线上的点 $m_i(x_i,\ y_i)$ 直角坐标的计算式为：

$$\begin{cases} x_i = \dfrac{\pi d}{i_{\max}} \cdot i \\ y_i = L + \tan\alpha \cdot \dfrac{d}{2}\sin\left(\dfrac{360°}{i_{\max}} \cdot i\right) \end{cases} \tag{2.1}$$

（取 $i=0$、1、2、…、$i_{\max}$）

式中　π——圆周率；

d——等径圆管的板厚中心直径；

L——等径圆管的中心轴线的截取长度；

i——参变数，最大值 $i_{\max}$ 是圆管的直径圆周需要等分的份数，且应是数“4”的整数倍。

例 2.1　如图 2.1b 所示，等径圆管的板厚中心直径 $d=110$，其中心轴线的截取长度 $L=200$，与倾斜平面相交的夹角 $\alpha=25°$，取 $i_{\max}=24$，求该等径圆管斜截端的展开图。

解：将已知数代入计算式（2.1），得该例的等径圆管斜截端展开图曲线上的点 m_i（x_i，y_i）直角坐标的计算式：

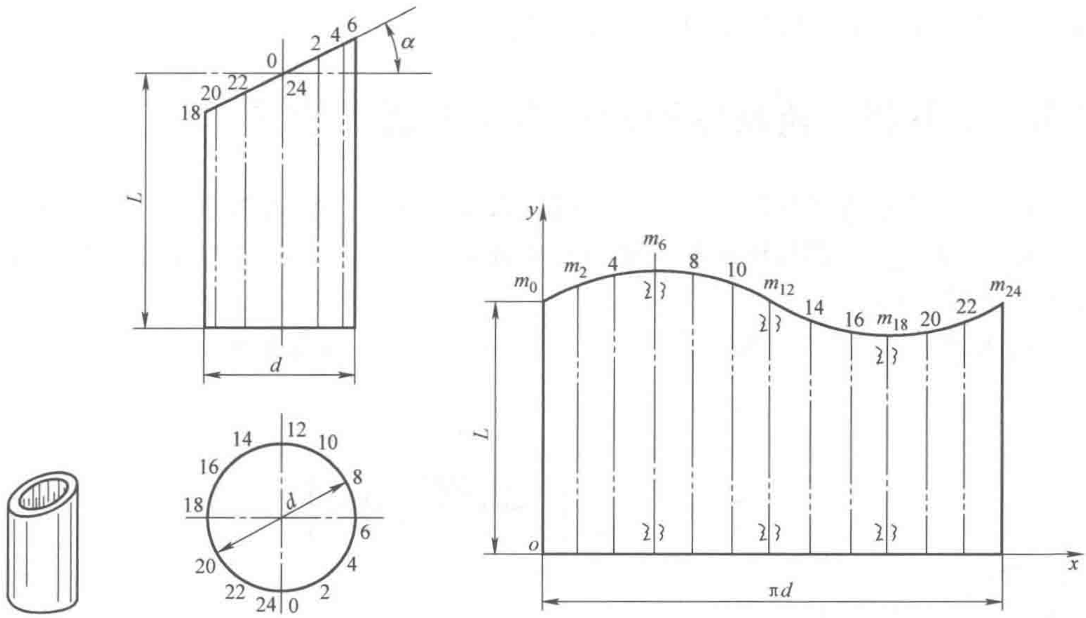
$$\begin{cases} x_i = \dfrac{100\pi}{24} \cdot i = 14.4i \\ y_i = 200 + \tan 25° \cdot \dfrac{110}{2}\sin\left(\dfrac{360°}{24} \cdot i\right) = 200 + 25.6469212\sin\ (15° \cdot i) \end{cases}$$

（取 $i=0$、1、2、…、24）

依次将 i 值代入上式计算：

当 $i=0$ 时，得：

$$\begin{cases} x_0 = 14.4 \times 0 = 0 \\ y_0 = 200 + 25.6469212\sin(15° \times 0) = 200 \end{cases}$$



a)　　b)　　c)

图 2.1　等径圆管斜截端的展开计算

a）立体图　b）示意图　c）展开图

当 $i=1$ 时，得：

$$\begin{cases} x_1 = 14.4 \times 1 = 14.4 \\ y_1 = 200 + 25.6469212\sin(15° \times 1) = 206.6 \end{cases}$$

……

将计算结果列于表 2.1 中。

表 2.1　例 2.1 等径圆管斜截端展开图曲线上的点 $m_i(x_i,\ y_i)$ 直角坐标值

直角坐标 / 点序号 i	x_i	y_i	直角坐标 / 点序号 i	x_i	y_i	直角坐标 / 点序号 i	x_i	y_i
0	0	200	4	57.6	222.2	15	216.0	181.9
12	172.8		8	115.2		21	302.4	
24	345.6		5	72.0	224.8	16	230.4	177.8
1	14.4	206.6	7	100.8		20	288.0	
11	158.4		6	86.4	225.6	17	244.8	175.2
2	28.8	212.8	13	187.2	193.4	19	273.6	
10	144.0		23	331.2		18	259.2	174.4
3	43.2	218.1	14	201.6	187.2			
9	129.6		22	316.8				

在平面直角坐标系 oxy 中，将表 2.1 中的点 $m_i(x_i,\ y_i)$ 直角坐标依次描出，得系列点 m_0、m_1、m_2、…、m_{24}。用平滑曲线连接各点，得一规律曲线与有关线

段一起组成该例的等径圆管展开图，如图 2. 1c 所示。

2.2　多节任一角度等径圆管弯头的展开计算

图 2. 2a 所示为多节任一角度等径圆管弯头立体图。如图 2. 2b 所示，节数为 N，转角为 β（°），圆管壁的板厚中心直径为 d，弯曲半径为 R 的等径圆管弯头，求该弯头的展开图。

弯头的中部节展开图的上侧曲线上的点 $m_i(x_i,\ y_i)$ 直角坐标计算式为：

$$\begin{cases} x_i = \dfrac{\pi d}{i_{\max}} \cdot i \\ y_i = \tan\dfrac{\beta}{2(N-1)}\left[\dfrac{d}{2}\sin\left(\dfrac{360°}{i_{\max}} \cdot i\right) + R\right] \end{cases} \tag{2.2}$$

（取 $i=0$、1、2、…、$i_{\max}$）

式中　N——多节等径圆管弯头的节数；

d——圆管的板厚中心直径；

β——弯头的转角（°）；

R——弯头的弯曲半径；

π——圆周率；

i——参变数，最大值 $i_{\max}$ 是圆管的直径圆周需要等分的份数，且应是数“4”的整数倍。

例 2.2　如图 2. 2b 所示，弯头的节数 $N=4$，转角 $\beta=90°$，圆管的板厚中心直径 $d=150$，弯曲半径 $R=300$，取 $i_{\max}=24$，求该弯头的展开图。

解：将已知数代入计算式（2.2），得本例的弯头中部节展开图的上侧曲线上的点 $m_i(x_i,\ y_i)$ 直角坐标计算式为：

$$\begin{cases} x_i = \dfrac{150\pi}{24} \cdot i \\ y_i = \tan\dfrac{90°}{2\times(4-1)}\left[\dfrac{150}{2}\sin\left(\dfrac{360°}{24} \cdot i\right) + 300\right] \end{cases}$$

整理后得：

$$\begin{cases} x_i = 19.635i \\ y_i = \tan15°[75\sin(15° \cdot i) + 300] \end{cases}$$

（取 $i=0$、1、2、…、24）

依次将 i 值代入上式计算：

当 $i=0$ 时，得：

$$\begin{cases} x_0 = 19.635\times0 = 0 \\ y_0 = \tan15°[75\sin(15°\times0) + 300] = 80.4 \end{cases}$$

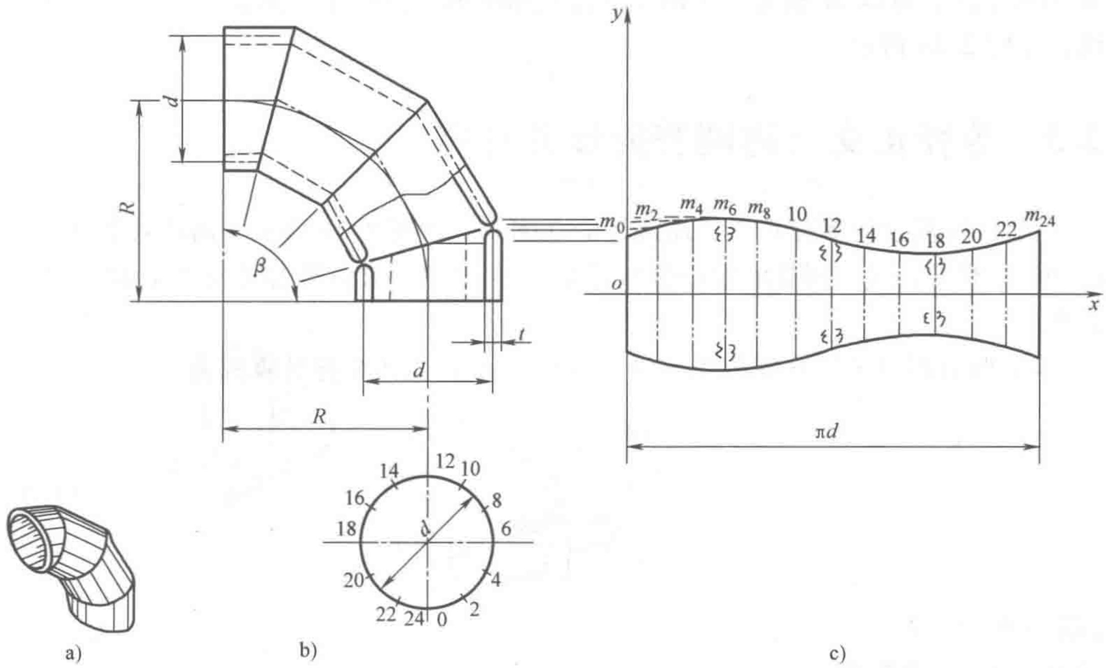


图 2.2　多节任一角度等径圆管弯头的展开计算

a）立体图　b）示意图　c）展开图

当 $i=1$ 时，得：

$$\begin{cases} x_1 = 19.635 \times 1 = 19.6 \\ y_1 = \tan 15° [75 \sin(15° \times 1) + 300] = 85.6 \end{cases}$$

……

将计算结果列于表 2.2 中。

表 2.2　例 2.2 四节 90°等径圆管弯头的中部节展开图的上侧曲线上的点 $m_i(x_i, y_i)$ 直角坐标值

直角坐标 / 点序号 i	x_i	y_i	直角坐标 / 点序号 i	x_i	y_i	直角坐标 / 点序号 i	x_i	y_i	直角坐标 / 点序号 i	x_i	y_i
0	0	80.4	2	39.3	90.4	5	98.2	99.8	15	294.5	66.2
12	235.6		10	196.4		7	137.4		21	412.3	
24	471.2		3	58.9	94.6	6	117.8	100.5	16	314.2	63.0
1	19.6	85.6	9	176.7		13	255.3	75.2	20	392.7	
11	216.0		4	78.5	97.8	23	451.6		17	333.8	61.0
			8	157.1		14	274.9	70.3	19	373.1	
						22	432.0		18	353.4	60.3

在平面直角坐标系 oxy 中，将表 2.2 中的点 $m_i(x_i, y_i)$ 依序描出，得系列点 m_0、m_1、m_3、…、m_{24}，用光滑曲线连接各点得一规律曲线，并且过点 m_0、m_{24} 作

ox 轴的垂线，再以 ox 轴为对称轴作出其对称图形，则整个图形即本例弯头的展开图，如图 2.2c 所示。

2.3 等径正交三通圆管的展开计算

图 2.3a 所示为等径正交三通圆管的立体图。如图 2.3b 所示，两圆管的直径为 d，90°正相交，竖直圆管的中心轴线截取长度为 H，求该等径正交三通圆管的展开图。

1）竖直圆管的展开图曲线上的点 $m_i(x_i, y_i)$ 直角坐标计算式为：

$$\begin{cases} x_i = \dfrac{\pi d}{i_{\max}} \cdot i \\ y_i = \dfrac{d}{2}\left|\cos\left(\dfrac{360°}{i_{\max}} \cdot i\right)\right| - H \end{cases} \tag{2.3}$$

（取 $i=0、1、2、\cdots、i_{\max}$）

式中　π——圆周率；

d——圆管的板厚中心直径；

H——竖直圆管中心轴线的截取长度；

i——参变数，最大值 $i_{\max}$ 是圆管的直径圆周需要等分的份数，且应是数“4”的整数倍。

2）水平圆管的开孔展开图曲线上的点 $N_i(x_i, y_i)$ 直角坐标计算式为：

$$\begin{cases} x_i = \dfrac{d}{2}\cos\left(\dfrac{360°}{i_{\max}} \cdot i\right) \\ y_i = \dfrac{\pi d}{360°}\left\{\arcsin\left[\sin\left(\dfrac{360°}{i_{\max}} \cdot i\right)\right]\right\} \end{cases} \tag{2.4}$$

（取 $i=0、1、2、\cdots、i_{\max}$）

式中　π、d、i——同前。

3）水平圆管的开孔展开图曲线上的点 $N_i'(x_i, y_i)$ 直角坐标计算式为：

$$\begin{cases} x_i = \dfrac{\pi d}{i_{\max}} \cdot i \\ y_i = \dfrac{d}{2}\cos\left(\dfrac{360°}{i_{\max}} \cdot i\right) \end{cases} \tag{2.5}$$

（取 $i=0、1、2、\cdots、\dfrac{i_{\max}}{4}$）

式中　π、d、i——同前。

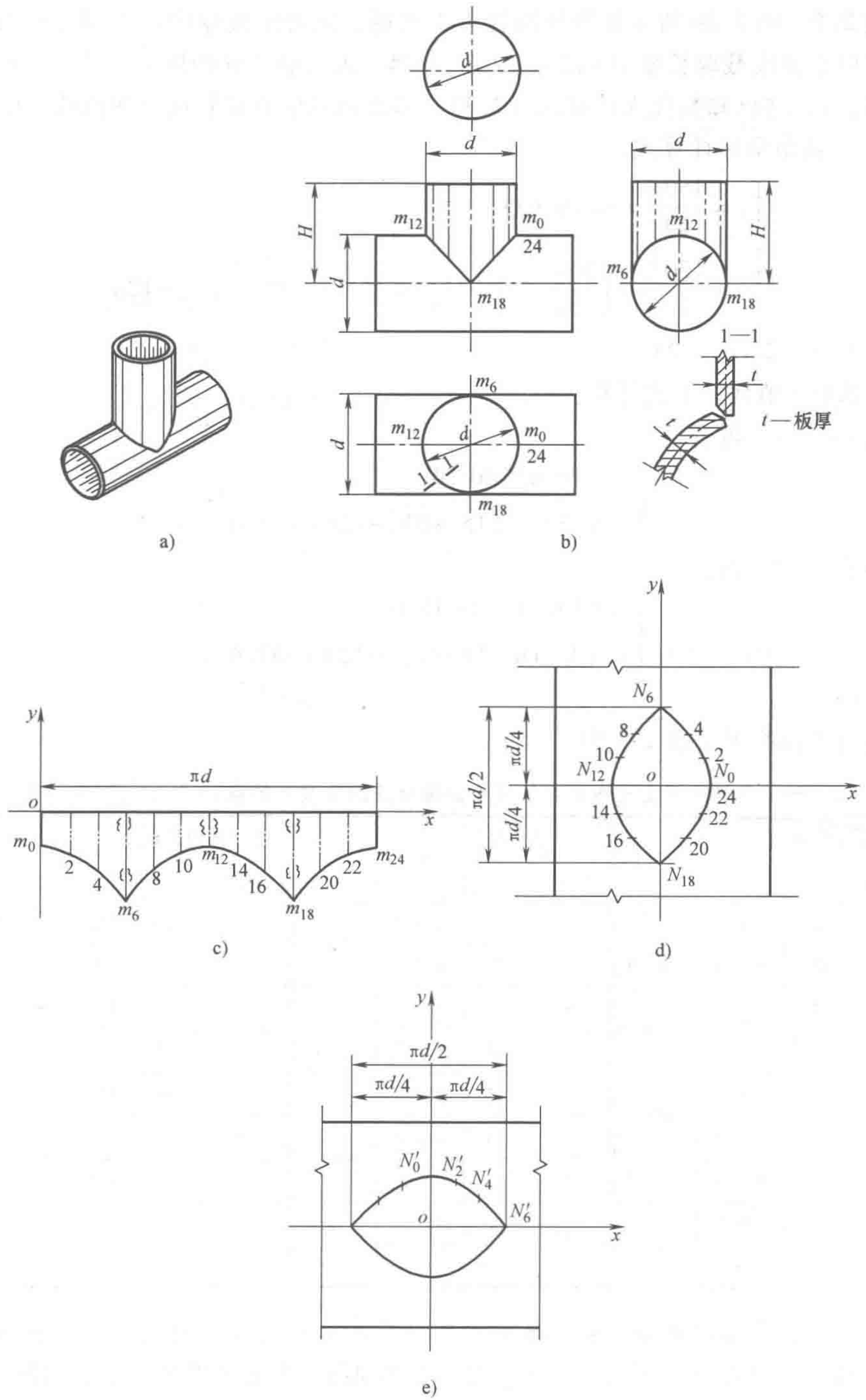


图 2.3　等径正交三通圆管的展开计算

a）立体图　b）等径正交三通圆管示意图　c）（例题）竖直圆管展开图示意

d）水平圆管开孔展开图示意（一）　e）水平圆管开孔展开图示意（二）

例 2.3　图 2.3b 所示是等径圆管正交三通，圆管的板厚中心直径 $d=150$，竖直圆管中心轴线截取长度 $H=120$，取 $i_{\max}=24$，求三通圆管的展开图。

解：1）将已知数代入计算式（2.3），得本例的竖直圆管展开图曲线上的点 m_i（x_i，y_i）直角坐标计算式：

$$\begin{cases} x_i=\dfrac{150\pi}{24}\cdot i=19.635i \\ y_i=\dfrac{150}{2}\left|\cos\left(\dfrac{360°}{24}\cdot i\right)\right|-120=75\left|\cos(15°\cdot i)\right|-120 \end{cases}$$

（取 $i=0$、1、2、…、24）

依次将 i 值代入上式计算：

当 $i=0$ 时，得：

$$\begin{cases} x_0=19.635\times0=0 \\ y_0=75\left|\cos(15°\times0)\right|-120=-45.0 \end{cases}$$

当 $i=1$ 时，得：

$$\begin{cases} x_1=19.635\times1=19.6 \\ y_1=75\left|\cos(15°\times1)\right|-120=-47.6 \end{cases}$$

……

将计算结果列于表 2.3 中。

表 2.3　例 2.3 等径正交三通圆管的竖直圆管展开图曲线上的点 $m_i(x_i, y_i)$ 直角坐标值

直角坐标 / 点序号 i	x_i	y_i	直角坐标 / 点序号 i	x_i	y_i	直角坐标 / 点序号 i	x_i	y_i
0	0	−45.0	14	274.9	−55.0	20	392.7	−82.5
12	235.6		22	432.0		5	98.2	−100.6
24	471.2		3	58.9	−67.0	7	137.4	
1	19.6	−47.6	9	176.7		17	333.8	
11	216.0		15	294.5		19	373.1	
13	255.3		21	412.3		6	117.8	−120.0
23	451.6		4	78.5	−82.5	18	353.4	
2	39.3	−55.0	8	157.1				
10	196.4		16	314.2				

在平面直角坐标系 oxy 中，将表 2.3 中的点 $m_i(x_i, y_i)$ 依序描出，用光滑曲线连接这组系列点 m_0、m_1、…、m_{24} 得一规律曲线，与相关线段组成竖直圆管的展开图如图 2.3c 所示。

2）将已知数代入计算式（2.4），得本例的水平圆管的开孔展开图曲线上的点 $N_i(x_i, y_i)$ 直角坐标计算式：

$$
\begin{cases}
x_i = \dfrac{150}{2}\cos\left(\dfrac{360^\circ}{24}\cdot i\right) = 75\cos(15^\circ\cdot i) \\[2ex]
y_i = \dfrac{150\pi}{360^\circ}\left\{\arcsin\left[\sin\left(\dfrac{360^\circ}{24}\cdot i\right)\right]\right\} = 1.308996939\{\arcsin[\sin(15^\circ\cdot i)]\}
\end{cases}
$$

（取 $i=0$、1、2、…、24）

依次将 i 值代入上式计算：

当 $i=0$ 时，得：

$$
\begin{cases}
x_0 = 75\cos(15^\circ\times 0) = 75.0 \\
y_0 = 1.308996939\{\arcsin[\sin(15^\circ\times 0)]\} = 0
\end{cases}
$$

当 $i=1$ 时，得：

$$
\begin{cases}
x_1 = 75\cos(15^\circ\times 1) = 72.44 \\
y_1 = 1.308996939\{\arcsin[\sin(15^\circ\times 1)]\} = 19.63
\end{cases}
$$

将计算结果列于表 2.4 中。

表 2.4　例 2.3 等径正交三通圆管的水平圆管的开孔展开图曲线上的点 $N_i(x_i,\ y_i)$ 直角坐标值

<table>
<tr><th>直角坐标 / 点序号 i</th><th>x_i</th><th>y_i</th><th>直角坐标 / 点序号 i</th><th>x_i</th><th>y_i</th></tr>
<tr><td>0</td><td rowspan="2">75</td><td rowspan="3">0</td><td>6</td><td>0</td><td>117.81</td></tr>
<tr><td>24</td><td>13</td><td>-72.44</td><td rowspan="2">-19.63</td></tr>
<tr><td>12</td><td>-75</td><td>23</td><td>72.44</td></tr>
<tr><td>1</td><td>72.44</td><td rowspan="2">19.63</td><td>14</td><td>-64.95</td><td rowspan="2">-39.27</td></tr>
<tr><td>11</td><td>-72.44</td><td>22</td><td>64.95</td></tr>
<tr><td>2</td><td>64.95</td><td rowspan="2">39.27</td><td>15</td><td>-53.03</td><td rowspan="2">-58.90</td></tr>
<tr><td>10</td><td>-64.95</td><td>21</td><td>53.03</td></tr>
<tr><td>3</td><td>53.03</td><td rowspan="2">58.90</td><td>16</td><td>-37.50</td><td rowspan="2">-78.54</td></tr>
<tr><td>9</td><td>-53.03</td><td>20</td><td>37.50</td></tr>
<tr><td>4</td><td>37.50</td><td rowspan="2">78.52</td><td>17</td><td>-19.41</td><td rowspan="2">-98.17</td></tr>
<tr><td>8</td><td>-37.50</td><td>19</td><td>19.41</td></tr>
<tr><td>5</td><td>19.41</td><td rowspan="2">98.17</td><td>18</td><td>0</td><td>-117.81</td></tr>
<tr><td>7</td><td>-19.41</td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

在平面直角坐标系 oxy 中，将表 2.4 中的点 $N_i(x_i,\ y_i)$ 依序描出，得系列点 N_0、N_1、…、N_{24}，用光滑曲线连接这组系列点，得含有拐点 N_6、N_{18} 的一规律闭合曲线，即本例的水平圆管的开孔展开图，如图 2.3d 所示。