

# Dynamic Bellows (动态波纹管) 的设计方针和设计问题及其对策措施

## 1. 前言

金属焊接波纹管 Dynamic Bellows (以下称波纹管) 的作用主要体现在保持气密性的同时吸收如 Figure 1 所示的轴向位移和轴直角方向位移、弯曲方向位移。在选择波纹管时，用于吸收轴向位移的波纹管可方便地根据产品目录进行选择，但用于吸收轴直角方向位移、弯曲方向位移的波纹管很多时候在选择上较为困难。

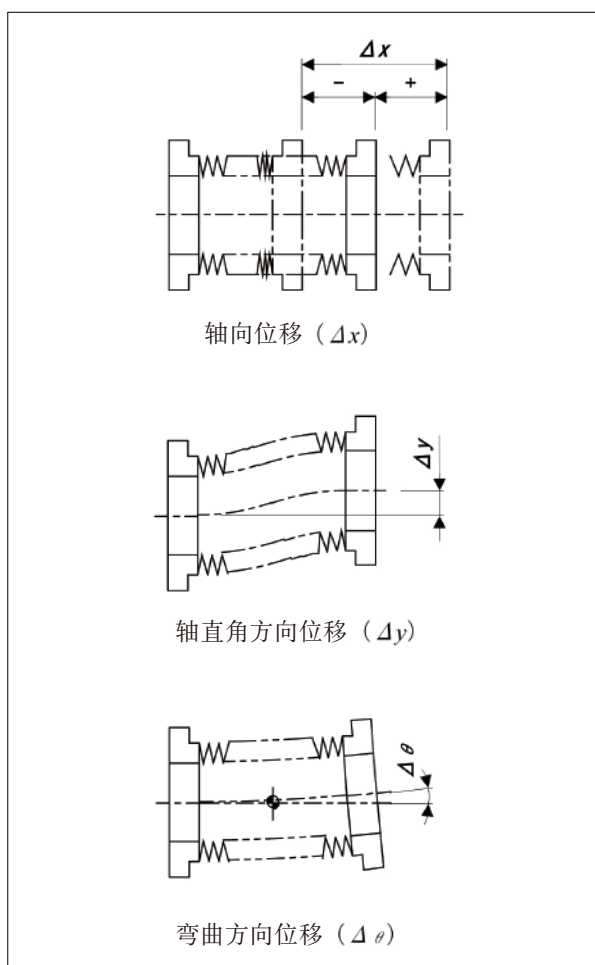


Figure 1 位移的种类

此外，保持气密性时，波纹管内侧压力比外侧压力高的情况下，会产生 Figure 2 所示的压曲，可能会导致变形或损坏，设计时需要予以注意。

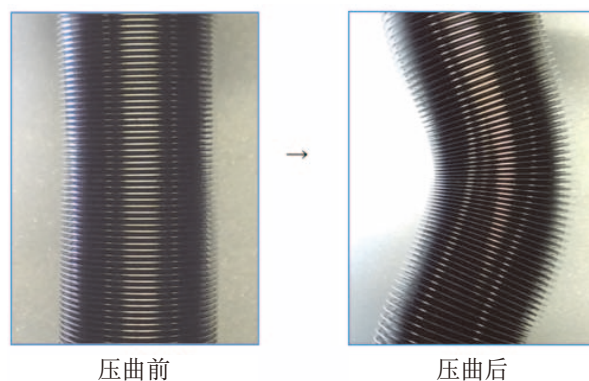


Figure 2 波纹管的压曲

并且，在水平安装波纹管时，如 Figure 3 所示会因为自重而产生水平下垂，与压曲一样需要予以注意。

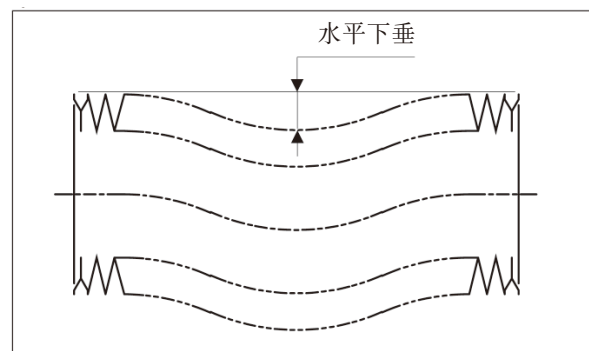


Figure 3 波纹管的水平下垂

本刊中，对本公司的标准品 V 系列 (产品目录 No. PC08) 在吸收轴直角方向位移时的选择方法和压曲以及水平下垂相关设计注意事项进行了说明。

## 2. 波纹管的设计方针

### 2-1) 轴直角方向位移的思路

在研究波纹管的轴直角方向位移时, 应将轴直角方向位移量换算为轴向位移量。

其计算公式如下所示。

$$\Delta x(y) = \frac{3 \times D \times \Delta y}{L} \quad \dots\dots\dots (1)$$

此处,  $\Delta x(y)$ : 轴向位移量换算值(mm)

$D$ : 波纹管外径(mm)

$\Delta y$ : 轴直角方向位移量(mm)

$L$ : 波纹管长度(mm)

此外, 知道可容许的轴向位移量换算值时, 可根据该位移量计算出可容许的轴直角方向位移量。

其计算公式如下所示。

$$\Delta y(\max) = \frac{\Delta x(y) \times L}{(3 \times D)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

此处,  $\Delta y(\max)$ : 容许轴直角方向位移量(mm)

### 2-2) 轴向位移与轴直角方向位移的组合

前项所示为仅发生轴直角方向位移的情况, 但通常与轴向位移组合使用的情况较多。根据公式(1)可知,  $L$  越小则轴向位移量换算值  $\Delta x(y)$  越大, 因此需要根据轴向位移以最小长度进行计算。

此时的公式(1)为

$$\Delta x(y) = \frac{3 \times D \times \Delta y}{(L - \Delta x)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

公式(2)为

$$\Delta y(\max) = \frac{\Delta x(y) \times (L - \Delta x)}{(3 \times D)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

但是,  $\Delta x$ : 收缩侧轴向位移量(mm)。

2-1)、2-2)项共通的注意事项是, 发生轴直角方向位移的波纹管会变为Figure4所示的形状, 因是伸展与收缩的组合, 因此轴向位移量换算值  $\Delta x(y)$  需要分别设定伸展侧和收缩侧的容许范围。

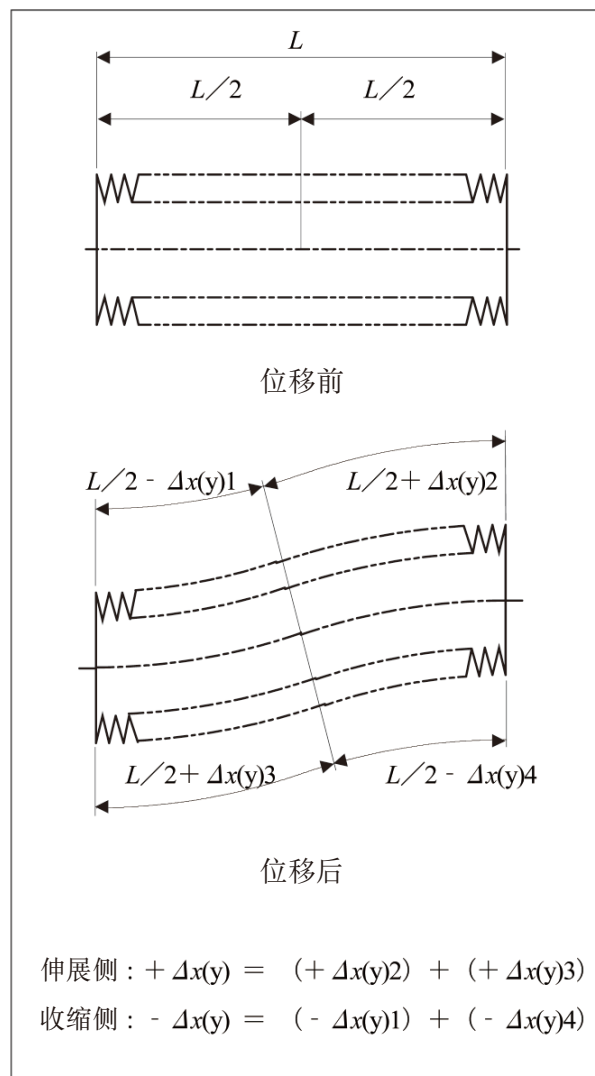


Figure4 轴直角方向位移形状

因此, 长度  $L$  的波纹管会发生  $+\Delta x(y)$  和  $-\Delta x(y)$  的位移。

## 3. V系列的选择步骤

### 3-1) 仅轴直角方向位移

下面介绍基于上述设计方针的V系列(产品目录No PC08)的选择示例。请配合产品目录一起阅读。

选择流程如Figure5所示此外, 各Step的详情如下所示。

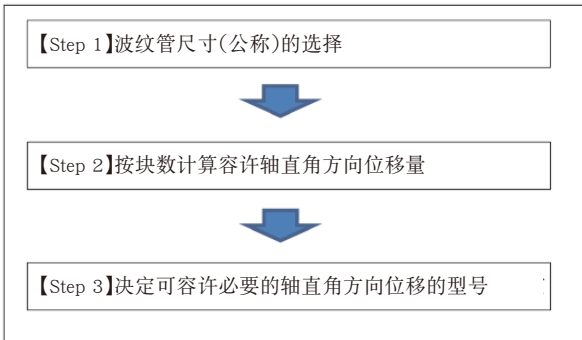


Figure5 V系列的选择步骤

**【Step 1】波纹管尺寸(公称)的选择**

根据要安装波纹管的机器等的空间来选择波纹管尺寸(公称)。这里以选择V20为例进行说明。

V20的产品目录数值(1块规格)

内径: 20mm, 外径: 40mm

伸缩量: 10mm, 伸展长度: 15mm, 收缩长度: 5mm

**【Step 2】按块数计算容许轴直角方向位移量**

对于选择的尺寸(公称), 按块数计算可容许的轴直角方向位移量

-1块时-

伸缩量: 10mm, 伸展长度: 15mm, 收缩长度: 5mm

假设波纹管长度  $L = 10\text{mm}$ 、 $\Delta x = \pm 5\text{mm}$ 。

根据公式(2),

$$\Delta y(\text{max}) = \frac{5 \times 10}{(3 \times 40)} \approx 0.4\text{mm}$$

-2块时-

伸缩量: 20mm, 伸展长度: 30mm, 收缩长度: 10mm

假设波纹管长度  $L = 20\text{mm}$ 、 $\Delta x = \pm 10\text{mm}$ 。

根据公式(2),

$$\Delta y(\text{max}) = \frac{10 \times 20}{(3 \times 40)} = 1.6\text{mm}$$

同样地增加块数进行计算, 汇总到 Table1 中。

Table1 V20的块数与位移量

块数	1	2	3	4	5
L (mm)	10	20	30	40	50
$\Delta x$ (mm) $\pm$	5	10	15	20	25
$\Delta y$ (max) (mm)	0.4	1.6	3.7	6.6	10.4

**【Step 3】决定可容许必要的轴直角方向位移的型号**

选择可容许必要的轴直角方向位移的块数, 决定型号。

例如, 需要 5mm 的轴直角方向位移量时, 根据 Table1,

块数为 4 块, 型号为 V20-111-4。

但是, 需要注意波纹管长度  $L$  为不包括两端配件在内的长度。V20-111-4 时, 两端的配件长度为各 3mm, 因此全长为 46mm。

**3-2) 伴有轴向位移的轴直角方向位移**

伴有轴向位移时, 如 2-2) 项所说明的那样, 需要根据轴向位移以最小长度进行计算。

选择的流程与 Figure5 相同。

**【Step 1】波纹管尺寸(公称)的选择**

根据要安装波纹管的机器等的空间来选择波纹管尺寸(公称)。这里以选择 V30 为例进行说明。

V30 的产品目录数值(1块规格)

内径: 30mm, 外径: 50mm

伸缩量: 10mm, 伸展长度: 15mm, 收缩长度: 5mm

**【Step 2】按块数计算容许轴直角方向位移量**

对于选择的尺寸(公称), 按块数计算对于轴向位移量可容许的轴直角方向位移量此处, 必要的轴向位移量为 10mm 时, 1 块时轴向位移量换算值  $\Delta x(y)$  为 0, 因此最少需要 2 块。

-2块时-

伸缩量: 20mm, 伸展长度: 30mm, 收缩长度: 10mm,

波纹管长度  $L = 20\text{mm}$ , 仅轴向位移量时最大可容许  $\Delta x$

$= \pm 10\text{mm}$ 。

将必要的轴向位移量 10mm 设为  $\Delta x = \pm 5\text{mm}$  时, 根据轴直角方向位移, 可容许的轴向位移量换算值  $\Delta x(y)$  为  $10\text{mm} - 5\text{mm} = 5\text{mm}$ 。根据公式(4),

$$\Delta y(\text{max}) = \frac{5 \times (20 - 5)}{(3 \times 50)} = 0.5\text{mm}$$

-3块时-

伸缩量: 30mm, 伸展长度: 45mm, 收缩长度: 15mm,

波纹管长度  $L = 30\text{mm}$ , 仅轴向位移量时最大可容许  $\Delta x$

$= \pm 15\text{mm}$ 。

将必要的轴向位移量 10mm 设为  $\Delta x = \pm 5\text{mm}$  时, 根据轴直角方向位移, 可容许的轴向位移量换算值  $\Delta x(y)$  为  $15\text{mm} - 5\text{mm} = 10\text{mm}$ 。根据公式(4),

$$\Delta y(\text{max}) = \frac{10 \times (30 - 5)}{(3 \times 50)} = 1.6\text{mm}$$

同样地增加块数进行计算, 汇总到 Table2 中。

Table2 V30的块数与轴向位移量、轴直角方向位移量

块数	2	3	4	5	6
L (mm)	20	30	40	50	60
$\Delta x$ (mm)±	5	5	5	5	5
$\Delta x(y)$ (mm)±	5	10	15	20	25
$\Delta y$ (max) (mm)	0.5	1.6	3.5	6.0	9.1

**【Step3】 决定可容许必要的轴直角方向位移的型号**

选择可容许必要的轴直角方向位移的块数，决定型号。

例如，必要的轴直角方向位移量需要5mm时，根据Table2，块数为5块，型号为V30-111-5。此外，包括两端的配件长度在内，全长为56mm。

**4. 设计问题及其对策措施****4-1) 波纹管压曲的研究**

波纹管压曲是波纹管设计方面的问题之一。波纹管和柱子及弹簧一样，会因为压缩力而产生压曲现象，而不再笔直。参照Figure2。

该压曲极限值可通过常用的欧拉方程推导出近似值。

$$F_{cr} = \frac{4 \times \pi^2 \times EI}{L^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

此处， $F_{cr}$ ：压曲极限负载 (N)

$EI$ ：波纹管弯曲刚性 (N·mm<sup>2</sup>)

$L$ ：波纹管长度 (mm)

※关于 $EI$ ，请参照华尔卡评论第40卷第1期<sup>1)</sup>。

**4-2) 波纹管压曲压力**

压曲压力是波纹管承受内压时开始压曲的极限压力，可将波纹管的有效面积承受的压力所产生的推力作为与压曲负载相当的力进行计算。

$$P_{cr} = \frac{4 \times \pi^2 \times EI}{(A \times L^2)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$A = \left(\frac{d+D}{2}\right)^2 \cdot \frac{\pi}{4} \quad \dots\dots\dots (7)$$

此处， $P_{cr}$ ：波纹管压曲压力(MPa)

$A$ ：波纹管有效面积(mm<sup>2</sup>)

$d$ ：波纹管内径(mm)

$D$ ：波纹管外径(mm)

此处，波纹管长度 $L$ 越长压曲压力越小，耐压曲的强度降低，因此计算式应以使用上的最大长度(伸展长度)进行计算。

大幅超过该极限压力时，波纹管会发生压曲，不再伸缩，结果会导致波纹管变形、使用寿命缩短、提早损坏。

Figure6所示为压曲导致波纹管损坏的案例。



Figure6 波纹管的压曲导致的损坏

**4-3) V系列压曲研究**

下面对本公司标准品V系列(产品目录No PC08)的压曲进行研究。请同时参照产品目录。

产品目录中记载块数限制的栏中，记载了V系列的容许压力0.1MPa的压力为外压时和内压时的块数限制。其中，内压时的块数限制由前项的压曲压力决定。

下面介绍压曲压力的计算案例。

例1) V20的块数限制4块的计算

根据公式(6)，

$$P_{cr} = \frac{4 \times \pi^2 \times 15477}{(706.86 \times 60^2)} = 0.24 \text{ MPa}$$

此处，波纹管长度 $L$ 以伸展长度进行计算。

此处省略 $EI$ 的详情。

4块时的 $L$ 为伸展长度15mm×4块=60mm。

根据公式(7)，波纹管有效面积  $A$  为

$$A = \left(\frac{20+40}{2}\right)^2 \times \frac{\pi}{4} = 706.86 \text{ mm}^2$$

例2) V100的块数限制6块的计算

根据公式(6)，

$$P_{cr} = \frac{4 \times \pi^2 \times 485068}{(10386.89 \times 90^2)} = 0.22 \text{ MPa}$$

此处，波纹管长度  $L$  在6块时为伸展长度  $15\text{mm} \times 6\text{块} = 90\text{mm}$ 。

根据公式(7)，波纹管有效面积  $A$  为

$$A = \left(\frac{100+130}{2}\right)^2 \times \frac{\pi}{4} = 10386.89 \text{ mm}^2$$

根据上述计算结果，内压0.1MPa未超过压曲压力，因此不会发生压曲。

对必要的轴向位移量选择可使用的块数时，超过该块数限制的情况下需要设置产品目录中记载的导向器。从下项开始，将对导向器进行介绍。

#### 4-4) 压曲防止对策措施

超过块数限制时需要设置导向器，下面介绍其结构案例。

【例1】波纹管内部有轴时

Figure7 为比较常见的案例。

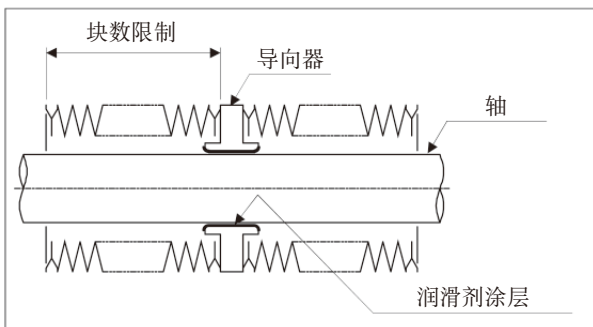


Figure7 导向器内侧润滑剂涂层

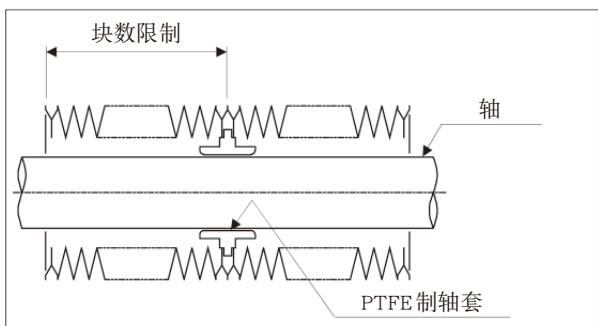


Figure8 导向器内侧有PTFE制轴套

【例2】波纹管内部没有轴时

结构变得复杂，需要确保导杆位置的精度。

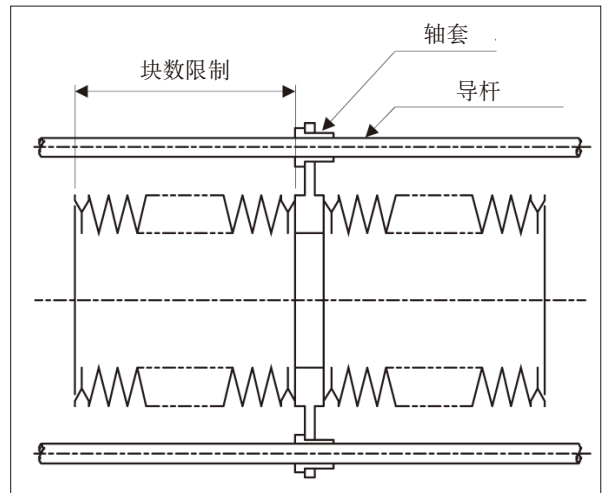


Figure9 在周围设置导杆

如上所述，需要设置导向器以使每段的块数在块数限制以下。

有轴直角方向位移时，无法设置导向器，因此不允许超出块数限制的轴直角方向位移。

#### 4-5) 基于外压的块数限制

V系列的块数限制还记载了外压0.1MPa的情况。此时块数不由压曲压力决定，而是取决于波纹管的水平下垂(参照Figure3)不超过1mm。

其计算公式如下所示。

$$y(\max) = \frac{9.8 \times W \times L^3}{(384 \times EI)} \dots (8)$$

此处， $y(\max)$ ：波纹管水平下垂(mm)

$W$ ：波纹管重量(kg)

$L$ ：波纹管长度(mm)

$EI$ ：波纹管弯曲刚性( $\text{N} \cdot \text{mm}^2$ )

此外，该计算公式未考虑外压的影响。承受外压时，波纹管的下垂量会变小，因此这里计算的是波纹管内部外部均为大气压时的值。

例1) V20的块数限制9块的计算

根据公式(8),

$$y(\max) = \frac{9.8 \times 0.13 \times 135^3}{(384 \times 15477)} = 0.53 \text{ mm}$$

此处, 波纹管长度 $L$ 以伸展长度进行计算。

此处省略 $EI$ 的详情。

9块时的 $L$ 为伸展长度 $15\text{mm} \times 9\text{块} = 135\text{mm}$ 。此外, 波纹管重量 $W$ 为 $0.13\text{kg}$ 。

例2) V210的块数限制20块的计算

根据公式(8),

$$y(\max) = \frac{9.8 \times 5.32 \times 300^3}{(384 \times 5653926)} = 0.65 \text{ mm}$$

此处, 20块时的 $L$ 为伸展长度 $15\text{mm} \times 20\text{块} = 300\text{mm}$ , 此外, 波纹管重量 $W$ 为 $5.32\text{kg}$ 。

#### 4-6) 水平下垂防止对策措施

超过块数限制时需要设置导向器, 其结构案示例与4-4)压曲防止对策措施相同。

## 5. 结语

本刊中, 对本公司的标准品Dynamic Bellows(动态波纹管)V系列(产品目录No. PC08)在吸收轴直角方向位移时的选择方法和块数限制相关设计注意事项进行了说明。

正如文中所述, 在超过块数限制的状态下使用时, 有导致波纹管变形和使用寿命缩短、损坏的危险, 需要充分予以注意。

希望本刊能为选择V系列时规避设计问题提供帮助。

## 6. 参考文献

- 1) 华尔卡评论 第39卷第4号 密封讲座(23)
- 第39卷第5号 密封讲座(24)
- 第39卷第6号 密封讲座(25)
- 第39卷第7号 密封讲座(26)
- 第40卷第1号 密封讲座(27)
- 第40卷第9号 密封讲座(28)



伊奈 正文  
营业本部  
技术解决方案组