

膜片特性設計手冊



国外航空编辑部

74.8

膜片特性設計手冊

国外航空编辑部

编者按：遵照毛主席关于“洋为中用”的教导，将美国《膜片特性设计手册》翻译出来，供从事弹性敏感元件工作的工人、技术人员参考、借鉴。

这本书的内容包括膜片特性、膜片设计与应用以及附录三个部分。首先借助图象法，表达了弹性元件（主要是膜片）的基本属性和各主要参数对膜片特性的影响。阐明了设计与制造多参数膜片时应注意的问题。提出了改进膜片设计的途径。特别是通过实验总结出各参数对膜片特性的影响，对设计膜片尚有一定的参考价值。但对工艺问题谈的较简单、一般。

在翻译、校对工作中，得到太行仪表广、七〇四研究册有关同志的协助，在此表示谢意。由于我们水平有限，错误和不当之处在所难免，敬希读者指正。

目 录

编者按

第一第 膜片的特性

§ 1. 概述	(1)
§1.1. 膜片的定义	(1)
§1.2. 术语、符号和单位	(3)
§ 2 在无压力下, 力——挠度的特性	(4)
§2.1. 力变为挠度	(4)
§2.2. 力——挠度的非线性	(4)
§2.3. 力常数	(7)
§2.4. 力——挠度的周期弹性	(8)
§3. 在无作用力下压力——位移特性	(18)
§3.1. 压力变为位移	(18)
§3.2. 非线性的压力——位移	(19)
§3.3. 压力常数	(25)
§3.4. 压力——位移的弹性	(28)
§3.5 性能规范	(29)
§4. 压力——力特性(无位移时)	(35)
§4.1. 压力变为力	(35)
§4.2. 有效面积	(36)
§4.3. 压力——力周期弹性	(37)

§5. 在某一个量为常数时压力——力——位移的关系	(40)
§5.1. 压力——位移——力的关系	(40)
§5.2. 在压力为常数时(不为零), 力变为位移	(42)
§5.3. 在力为常数时(不为零)压力变为位移	(42)
§5.4. 在位移为常数时(不为零)压力变为力	(43)
§6. 在两个变量成正比时, 压力——力——位移的关系	(45)
§6.1. 并联弹簧	(46)
§6.2. 串联弹簧	(50)
§7. 有效能量	(51)
§8. 温度影响	(55)
§9. 其它特性	(56)

第二篇 膜片的设计和应用

§ 1 概述	(58)
§ 2 膜片	(59)
§2.1 材料规格	(59)
§2.1.1 种类和硬度	(60)
§2.1.2 材料厚度	(63)
§2.1.3 予热处理	(67)
§2.2 膜片尺寸	(68)
§2.2.1 工作部分直径	(68)
§2.2.2 硬心直径和间隔宽度	(72)
§2.2.3 波纹的数目和形状	(78)

§2.2.4轴向间矩	(90)
§2.2.5外波纹或凸缘的形状	(92)
§2.2.6成型方法	(92)
§2.2.7成型后的处理	(93)
§3膜片组合	(95)
§3.1 组合方法	(95)
§3.2. 组合后的处理	(99)
§4. 膜片的应用	(101)

附 录

I. 膜片术语	(103)
Ⅰ. 膜片符号和方程简要	(109)
Ⅱ. 测量膜片特性的设备和方法	(112)
(1) 作用力——挠度(位移)测量	(112)
(2) 压力——挠度测量	(114)
(3) 压力——作用力测量	(118)
(4) 容积——变化测量	(119)
Ⅳ. 压力——位移曲线方程	(120)
V. 减小膜片非线性的选配	(124)
Ⅵ. 有效面积的计算	(129)
Ⅶ 单波纹膜片: P-F-X的关系	(132)
Ⅷ 膜片的分类应用	(144)

第一篇 膜片的特性

§ 1 概 述

§1.1 膜片的定义

膜片是一种可以在大致垂直于它的挠性面方向移动的压力传感元件。它是一种将两种压力不等的流体分开，多少具有挠性的薄膜，并且支承于大致为同一平面的衬盘和垫块或硬心的中间（见图1）。

此定义将膜片与另外两种主要形式的压力传感元件包端管和波纹管区别开来。前者是用椭圆管或扁圆管弯成弧形的或螺旋形的管子，后者的圆柱波纹壁在平行于圆柱方向上是富有弹性的。

膜片的挠性面或许没有波纹而接近平形，或许制成各式各样的波纹。膜片最普遍的用途，是将两种流体压力差变成挠度或力，或挠度和力的组合。从中心杆或垫块对衬盘的关系，可以求得挠度或力。常常将两个膜片在其周边处密封接合而制成一个膜盒。将又作为压力进道的支撑导管，接在膜盒中某一个膜片的中心上，则从另一个膜片的中心可以获得力或挠度。将许多个膜片密封在一起，制成一连串的互通的膜盒组，则此种组合和波纹管相似。

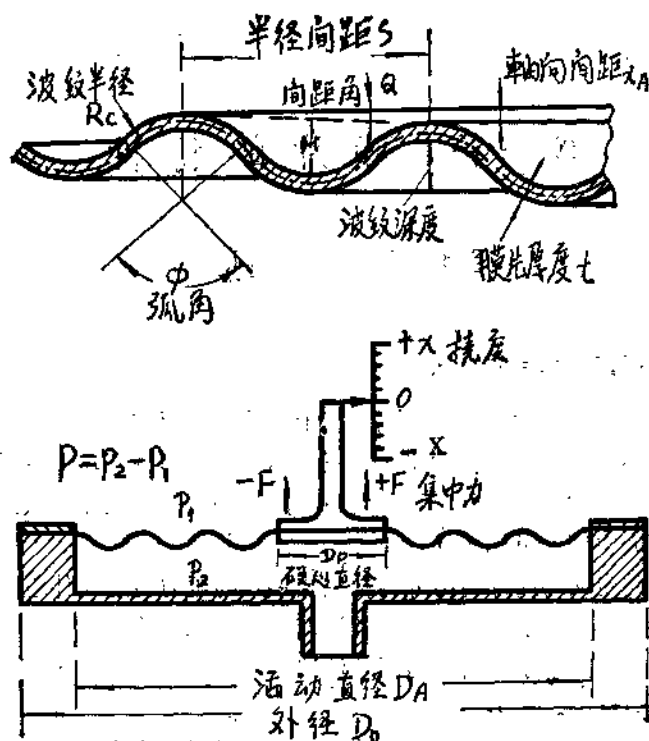


图1 膜片的尺寸和符号(多波纹膜片)

参 考 资 料

因为李氏和万氏(G. H. Lee, L. M. Van der Py)参考资料第16项已收集了有关膜片的书目, 所以在本手册中, 无需将参考书一一列出。附录IX中列出的文献, 这些文献中有部分为本手册所引录或论及。

§1.2 术语、符号和单位

本手册企图统一描述膜片及其特性使用的术语和符号。附录I中，为了参考方便已按英语字母顺序将术语列出，并且对初次提及的术语作了较详细的说明，附有星号的术语已为美国机械工程师学会（ASME）膜片研究小组所批准。附录II是符号总表，其中有些符号已在图1中注出。

通常压力测量以磅/吋²（Psia）表示，但在某些情况下，使用吋水柱、毫米水银柱等较为方便。当膜片某一面的压力为大气压时，则把另一面大于大气压的压力视为正。当膜片某一面为真空时，则另一面的压力，通用绝对压力单位，如绝对磅/吋²或绝对吋水银柱来表示。虽然，在某些情况下，使用毫米去测定挠度较为方便，但一般采用吋或密耳（0.001吋），当挠度处在正压力产生的方向吋为正。

力一般采用磅重、千克或克测定，产生正挠度的力为正。所以，反抗正压力的力和减小挠度的力都是负的。

采用白京汉（参考资料第18项）侯赛，（参考资料第2项），瓦尔和裘克（参考资料第8项）诸人所描述的因次分析法，可以用无因次形式表示出上述各个量。那么，无因次挠度为 X/D_a ，其中 X 为挠度（密耳）， D_a 为活动直径或暴露直径（吋）。无因次的力为 $10^6 F/ED_a^2$ ，其中 F 为集中力（磅）， E 为膜片材料的弹性模量（磅/吋²）。无因次压力为 $10^6 P/E$ ，其中 P 为压力（磅/吋²）。无因次的有效面积为 $4A_e/\pi D_a^2$ 或 A_e/A_a ，其中 A_e 为有效面积， A_a 为活动面积或暴露面积。

§ 2 在无压力下, 力—挠度的特性

§2.1 力变为挠度

在压力测量装置中, 膜片虽然一般地用于改变压力差为挠度或力, 但又可以把它认为是改变力为挠度的弹性元件。利用砝码对膜片施加已知力 F , 并且测定此力导致的挠度 X , 可以测膜片的力——挠度特性。测定力和挠度的设备以及使用方法在附录Ⅱ中描述。

用图2曲线A那种力——挠度图象, 可以说明力和它的对应挠度之间的关系。当从双方对膜片施加力时, 将可发现整条典型的膜片曲线, 向零挠度轴(即纵轴)凹曲, 略成S形。曲线的拐点不一定落在力和挠度的零点标坐上。

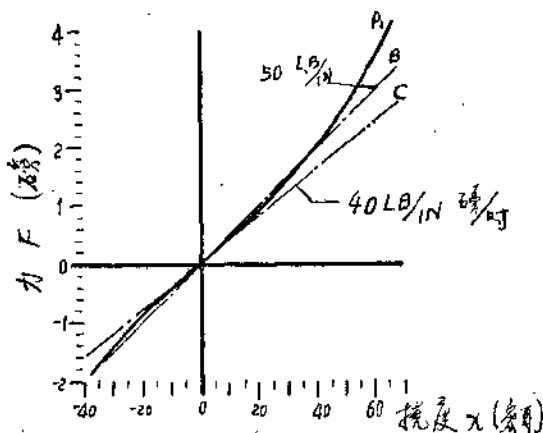


图2 力—挠度曲线

§2.2 力—挠度的非线性

用图2的直线B或C与曲线A比较, 可以看出力—挠度曲线的线性偏移, 偏移有时很小, 用放大比例绘出力或挠度曲线

之间的差, 制成象图3那样的S形偏移曲线, 就可以说明得更清楚。这种偏移可以表示为, 观察力和指定挠度上选定直

线之间的差，
或指定力上挠度之间的差。
测定对应于指定力的挠度，
一般较为方便。如果最小的力和挠度分别为 F_1 和 X_1 ，最大的力和挠度分别为 F_4 和 X_4 （见图3a，图象A）的循环内，

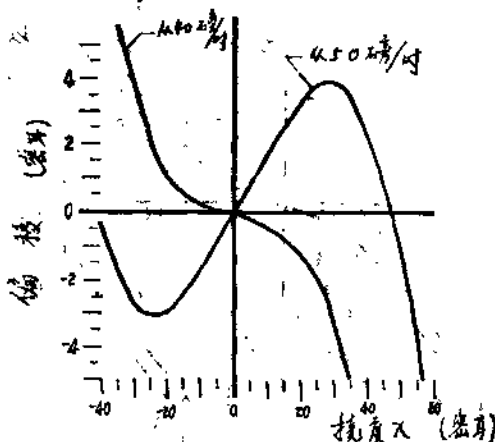
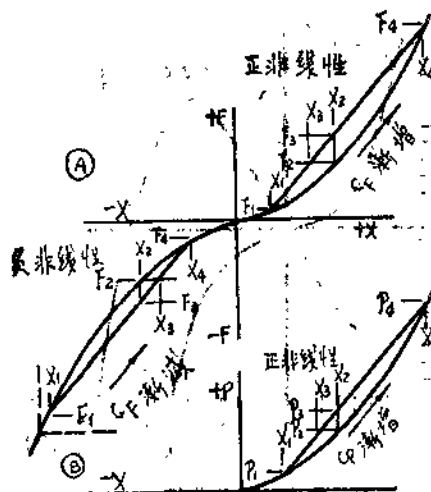


图8 力—挠度的偏移曲线

计算指定力的非线性，则此非线性以位移距的 $(X_4 - X_1)$ 百分比率 Z_x 表示， Z_x 就等于 $100(X_2 - X_3)/(X_4 - X_1)$ ，其中 X_2 为对应于指定力 F_2 的挠度， X_3 为对应于同一力 F_2 的直线挠度。 X_3 的值可以从直线方程 $X_3 = X_2 + (X_4 - X_1) \times (F_2 - F_1)/(F_4 - F_1)$ 求得。当等于 F/X （在下述说明）的力常数， C_f 随着力增加而增加时，则非线性为正。

如果测定对应于指定挠度的力，则以每百分数 $(F_4 - F_1)$ 计的非线性就为 Z_F ， $Z_F = 100 \times (F_3 - F_2)/(F_4 - F_1)$ ，其中力 F_2 对应于指定挠度 X_2 ， F_3 为对应于同一的挠度 X_2 的直线力。 F_3 的值用上述相同的方法可以求得。非线性曲线的特性将在压力——挠度非线性一节内详细描述。

力—挠度循环



$Z =$ 以百分数表

示的非线性。

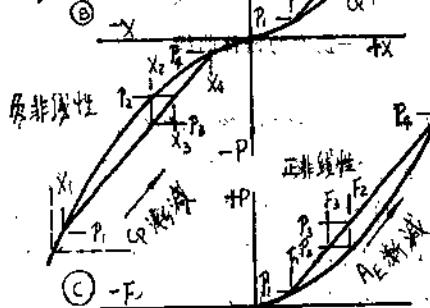
$$Z_x = 100 (X_2 - X_3) / (X_4 - X_1)$$

$$Z_F = 100 (F_3 - F_2) / (F_4 - F_1)$$

$$C_F = \Delta F / \Delta X$$

当 C_F 随着 F 和 X 增加而增加时, Z 为正。

压力—挠度循环



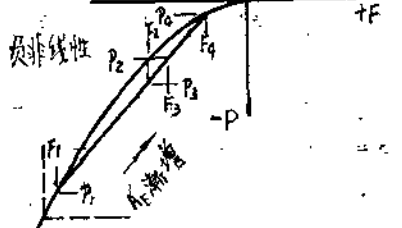
$$Z_X = 100 (X_2 - X_3) / (X_4 - X_1)$$

$$Z_P = 100 (P_3 - P_2) / (P_4 - P_1)$$

$$C_P = \Delta P / \Delta X$$

当 C_P 随着 P 和 X 增加而增加时, Z 为正。

压力—力循环



$$Z_F = 100 (F_2 - F_3) / (F_4 - F_1)$$

$$Z_P = 100 (P_3 - P_2) / (P_4 - P_1)$$

$$A_E = -F / \Delta P$$

当 A_E 随着 F 和 P 增加而减小时, Z 为正。

图 3 A 非线性方程

§2.3 力 常 数

在进行测定力——挠度的特性时，如果每次施加砝码的增量相等，而在连续测得的挠度之间的差又相等，则力——挠度曲线为一根斜率 C_f 不变的直线，此直线方程为 $F = C_f X$ 。 C_f 通常叫力常数，有时称为弹性比或弹性刚度（见15页和参考资料第2项）通常以磅/吋表示。

可是，在膜片的测定中，将会发现连续的挠度读数之间的差会渐增或渐减。这情况说明了，挠度与负载成比例，所谓“力常数”也不是常数，所以力常数不能用唯一的值表示量距内

所有各个点。如果对应两个已知力 F_1 和 F_5 的挠度 X_1 和 X_5 （见图4）为已知，则大约在 X_1 和 X_5 当中某一挠度的力常数 C_f ，大致等于 $(F_5 - F_1)/(X_5 - X_1)$ ；即通

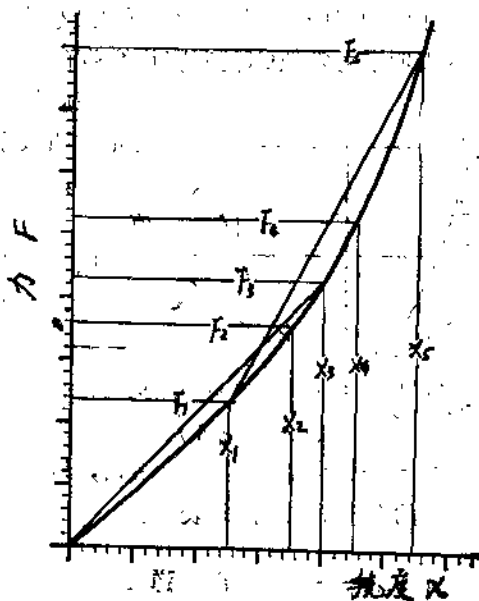


图4 力——挠度斜率的测定

过曲线上这些点的弦的斜率。如果用零力位置代替 X_1 ，则力常数等于 F_5/X_5 。如果力——挠度曲线的非线性很大，则用此法算出 C_f 的值只是近似而已，使用价值很小。如果选择更接近的点，如 F_2, X_2 和 F_4, X_4 ，则 C_f 的值更接近于曲线上切线的斜率，即 $\Delta F/\Delta X$ 。所以，表示力常数随着膜片偏移而变化的最好方法，是一条用变换小的力测定的，根据间隔的平均力 F_3 或平均挠度 X_3 绘出的力常数曲线如图5所示。这是一条平滑的曲线，它在 $F-X$ 曲线转变方向之处，某一力和挠度的 C_f 值为最小（即膜片刚度为最小之点）但不一定为零。当膜片从这个位置向任一方向偏移时， C_f 的值增加。此曲线不但表明了力常数 C_f 的最小值和此值出现的地方，而 X 表明了力常数 C_f 随着膜片偏移而增加的速度。

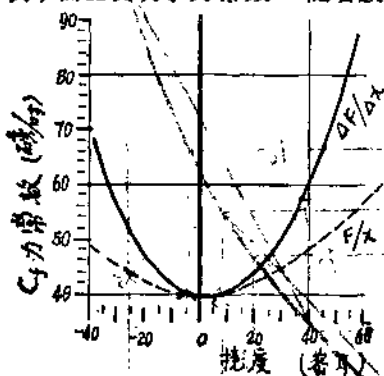


图5 力常数曲线

是力常数的倒数，以吋/磅表示。

在膜片自由位置测得的力常数叫做原始力常数或原始刚度，它不一定为最小值。

因为力常数 C_f 不是一个常数，使用“力率”或“力——挠度率”等名词可能更为准确。有时也使用“力敏感度”或“力挠度”等名词，以符号 X_f 表示，它是

§2.4 力——挠度的周期弹性

膜片的弹性挠度变化量，就是膜片的弹性位移。一个很

理想的弹性膜片，当它受到某个力作用时，无论作用力是在增加或减少，无论作用力的作用时间长短，或作了几次或无数次，它每次总是精确地产生相同的位移量。在这些条件下的位移称为“弹性位移”。膜片要达到这样的理想性能，只有当应力处于某极限以内，膜片材料的热处理和时效等做的很好才能达到。对于比较不复杂的弹性元件如弹簧和弹簧片是很容易计算出它们产生应力的载荷。因为膜片应力的计算过程又长又麻烦，所以很少采用计算的办法。一般根据实验结果，测定膜片的极限尺寸和载荷。高氏、皮氏和哈氏等人已将应力计算出来（参考资料第10、12项）。最大应力点用应力层方法已经测定出来。

在时间和载荷变化下，膜片对于某一特定载荷的位移，因无力重复而引起的误差，就是弹性误差。该误差包括飘移、弹性后效、迟滞、原始变形等等。该误差可用图表说明，如图6所示。图中，时间用周边距表示，如 T_0 、 T_1 、 T_2 等等；载荷用径向距表示，如 L_0 、 L_1 等等，向中心渐增的位移用轴向距 X_0 、 X_1 、 X_2 等等表示。

非弹性误差的载荷周期用点线表示，从 T_0 开始，在 T_0 处载荷和位移均为零。在获得一个原始位移读数所需的时间，用 T_0 到 T_1 表示。从 T_2 到 T_3 的短时间内，要求第一个载荷 L_1 ，而膜片的位移值对载荷成正比。从 T_2 到 T_3 时间内作出位移读数时，载荷保持不变（因膜片假定为无弹性误差，其位移保持不变）。按照上述方法，可以选择更多的载荷 L_2 、 L_3 和 L_4 。则位移为 X_2 、 X_3 、 X_4 等等。如果载荷 L_4 保持时间长，膜片为静止状态（假定膜片为无弹性误差）。当载荷减小到 L_3 ，膜片位移就回到 X_3 并为静止状态。此外，在载荷

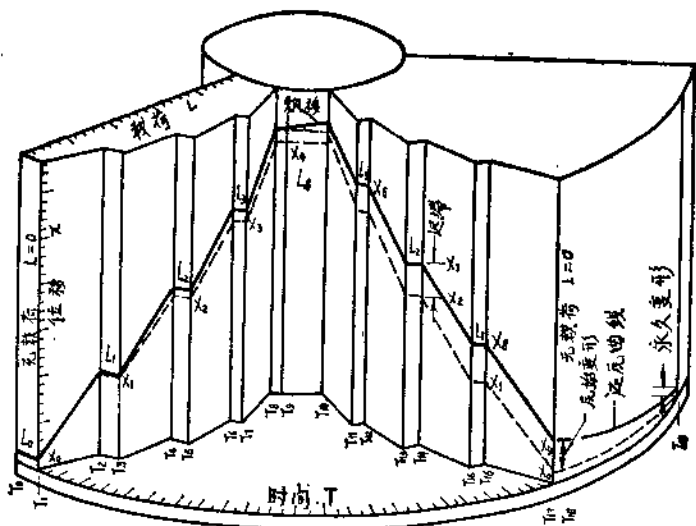


图 6 弹性滞后现象

L_2 、 L_1 和无载荷时，所有的膜片位移应与载荷变化相应的变到同一值。

这些特性可以用三面投影表示：载荷—位移面，载荷—时间面和位移—时间面，如图 7 所示。除了用实际位移与弹性位移之差代替位移外，与参考资料第 2 项第 26 页中侯赛所阐明的有些相似。弹性位移是一个未知量，除载荷很小（即弹性误差为零）时，实际上是不能测量的。因此，这里所表示的是在较高应力下出现的现象。在载荷—时间面上已表示出载荷的施加和消除情况。虽然可以采用非常灵敏的测量仪器测量弹性误差。但没有弹性误差的弹性元件是值得怀疑的，膜片的性能曲线除了误差已放大外，与图 7 实线表

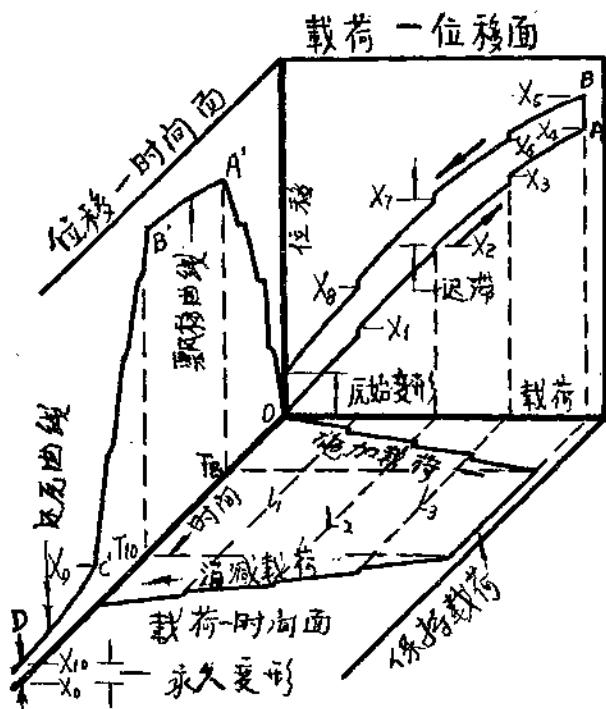


图 7 用三个面表示的弹性滞后现象

示的有些相似。当载荷 L 保持不变时,膜片继续按照某一速度而位移,此速度依据许多因素,主要是应力的材料和材料的弹性极限而定。这种位移的变化叫做飘移,并且是随时间而减少。当飘移在载荷变化而引起的位移同向时为正。在某些情况下,特别在较小载荷,此种飘移很小以致不