

怎样制作笛子

笛子是非常普通的一种乐器，从小学生到职业演奏家，从牧童到文人雅士，都可以手持一管，吹出自己喜爱的乐曲。

笛子的历史非常悠久。在先秦的文献中已有记载，然而那时的笛子有点像箫，竖着吹。在河南舞阳贾湖出土的 8000 年前的 16 支骨笛，笛有 7 孔，东汉马融（79-166）《长笛赋》却说笛有 4 孔，说明 7 孔笛到东汉已失传了 6000 多年。现在的笛子估计是汉代从少数民族传来的。初时称为横吹，或羌笛。唐代诗人王之涣的名句“羌笛何须怨杨柳，春风不度玉门关”所指的羌笛就是现在的笛子。最早的笛子只有三、四个指孔，因为那时的音律只有五音，没有后来的 *fa* 和 *xi*。后来才定型为六个指孔。西洋的长笛起步很晚，大约公元 1100 年才有类似中国六个指孔的笛子的记载。几经改进，到 19 世纪才定型为有锥形管、键式长笛。锥形管计算、制作都比较复杂，本文只谈中国笛子的问题。

笛子的制作说起来是十分简单的事，找一根竹管、金属管或塑料管，打几个洞就可以了。但仔细推敲起来，却并不简单。问题是：怎样挖洞，怎样确定洞间的距离，才能使笛子发音准。笛子的制作虽历经数千年，却至今没有一个令人满意的公式来计算洞间的距离。1975 年出版的一本书介绍笛子的制作时，还是这样说的：“开孔先开吹孔，堵上笛塞，然后开基音孔。开始先钻小一些，边扩大边试吹，听筒音是否准确。如低时可将向靠吹孔边扩大一些；如高时，则向另一端扩大一些。”就这样，从基音孔起一孔一孔地边开边吹，一不小心，一根笛料就报废了。实际上，如果没有一根现成的好笛子在身边，即使一开始开一个小孔也不知道应该开在什么地方。所以虽经过千年历史仍不免有点盲目性。

乐器和力学有密切的关系，许多著名的力学家都从事过乐器的研究。明朝王子朱载堉（1536-1611）曾从事过乐器研究，在世界上最早制定了十二平均律。英国大力学家瑞利（Rayleigh, 1842-1919）的巨著《声学理论》是一本研究乐器与振动的经典著作。笛子的制作也是一个经典的力学问题。笛子从吹孔到指孔长度同发音频率的关系，应当能运用力学知识加以精确化。以往也有过不少研究，只不过误差较大不能符合实际需要而已。

笔者曾花过一段时间自己制作过各种尺寸的笛子，并初步总结了一些规律，特别是总结出然后计算指孔距离的公式。现在把它写在下面以供爱好者参考。

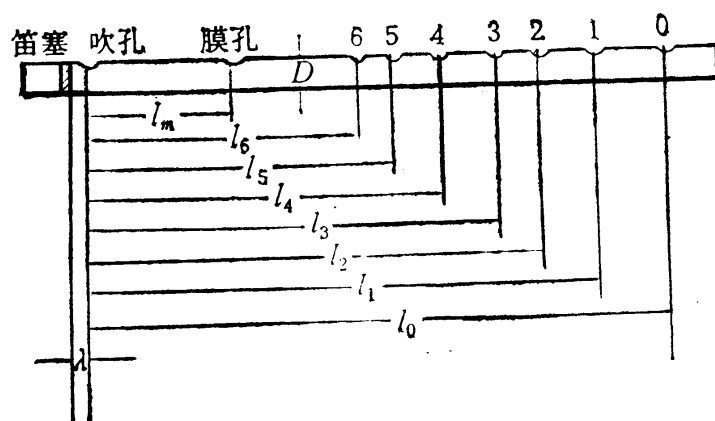


图 1

如图表示一根笛子，图中距离皆以孔中心起算。图中 0 表示基音孔，1，……，6 等数字表示第几个指孔。

- 1) 笛管直径 D 与 l_0 之比以 $l_0/D \approx 20$ 较好，过短时共鸣性能差，发音不丰满。过长则由于空气的黏性作用使发音不均匀，即近基音孔端数音音量小，近吹孔的数音音量大。
- 2) 笛塞到吹孔的距离 $\lambda \approx 0.8D$ 为好，过大过小皆影响音准。特别是影响高阶泛音的音准。
- 3) 孔径 d 一般依管径略有变化。一般取 $d = 5$ 到 8mm ，具体说，

$$D = 11 \text{ 到 } 12\text{mm} \text{ 时 } d = 5\text{mm}$$

$$D = 13 \text{ 到 } 14\text{mm} \text{ 时 } d = 6\text{mm}$$

$$D = 15 \text{ 到 } 16\text{mm} \text{ 时 } d = 7\text{mm}$$

$$D \geq 17\text{mm} \text{ 时 } d = 8\text{mm}$$

d 过大则吹奏时指端不易堵严指孔，所以指孔直径在 8mm 以上的笛子很少。吹孔比上述指孔直径略大 1 到 2mm 皆是正常的。且吹孔可以做成椭圆形的，其长轴沿笛管。

- 4) 吹孔到指孔的距离 l_i ($i = 0, 1, \dots, 6$) 与发音频率 f_i ($i = 0, 1, \dots, 6$) 的关系按公式

$$l_i = v/2f_i - \Delta l (i = 0, 1, \dots, 6) \quad (1)$$

计算。式中 v 为声速。可以近似取 $v = 345700\text{mm/s}$ 。它约为 气温在 25°C 时的声速。之所以这样取，是考虑无论冬夏，人体吹出的气体均带有体温，吹奏一段时间后笛管温度会近似于 25°C 。气温和这个温度的误差对音准的影响可以略去。

按照物理学研究的结果，两端开管的共振频率 f 与长度 \tilde{l} 的关系为

$$\tilde{l} = v/2f \quad (2)$$

(1) 式与这个式子的区别在于右端有一个修正补偿长度 Δl 。这是由于在开启指孔以外的一段空气柱也参与部分共振，吹孔也是开端，但比较小，还应计及笛塞到吹孔段影响以及管外空气的惯性修正。所以 Δl 的引进即使对于两端开口带有直管亦是必要的，对于笛子则更加不可略去。

据笔者总结各种尺寸笛子的规律，若近似取

$$\Delta l = 4D \quad (\text{mm}) \quad (3)$$

则笛子的音准基本可以保证。于是我们有

$$l_i = \tilde{l}_i - 4D \quad (i = 0, 1, \dots, 6) \quad (4)$$

这个公式用于箫也是非常准的。

现将笛子音域范围的频率及由 (2) 式算得的 \tilde{l} 列表如下 (以 mm 为单位)。

	G	$G^\#$	A	B^b	B	C^2	$C^\#$	D	$D^\#$	E	F	$F^\#$
f	372	415.3	440.0	466.2	493.9	523.3	554.4	587.3	622.3	659.3	698.5	740.0
\tilde{l}	441.0	416.2	392.8	370.8	350.0	330.3	311.8	294.3	277.8	262.2	247.5	233.6
	G	$G^\#$	A	B^b	B	C^3	$C^\#$	D	$D^\#$	E	F	$F^\#$
f	784.0	830.6	880.0	932.3	987.8	1046.5	1108.8	1174.2	1244.6	1318.5	1396.9	1480.0
\tilde{l}	220.5	207.9	196.4	185.4	175.0	165.2	155.4	147.2	138.8	131.1	123.7	116.8

举例说，要制作一根 G 调的笛子，第三指孔为 G ，查表得它的音阶顺序为

孔号	0	1	2	3	4	5	6
音名	D	E	$F^\#$	G	A	B	C^3
\tilde{l}	294.3	262.2	233.6	220.5	196.4	175.0	165.2
$\tilde{l} - \Delta l$	242.3	210.2	181.6	168.5	144.4	123.0	113.2

基音孔对应的 $\tilde{l} = 294.3\text{mm}$ ，选直径 $D = 13\text{mm}$ ，于是 $\Delta l = 52\text{mm}$ ，由 (4) 算得实长 l 列于上表的末一行。

为了发音准确，在基音孔外部最好留出 $2D$ 长的多余部分。如果多余部分过长，则在基音孔外约 $2D$ 长的部位打两个孔，以减少这段多余部分管中空气参加共振。同时这些孔也可以起装饰作用。

孔心按上述尺寸定好后即可以用 $\phi 6$ 的钻头直接打孔。

5)膜孔，距吹孔 l_m 到 $l_0/4$ 最好。这样可以使各音较好的振动，它不应处于任何音（包括超吹的高音）的波节上，否则吹这个音时笛膜将不起作用。吹起曲子来，个别音等于笛膜，效果不好。

按上述各点将笛子的孔打好后，安上笛塞。笛塞要严密，光滑，塞得不透气，可以用通常的软木塞或橡皮削制。打好的各孔还需用小刀或锉刀修饰一下，刮去毛刺，并且使各孔边缘向内倾斜。最后贴上笛膜。

好，一管音阶较准的笛子做好了。吹奏时，若吹某音，则对应这个音到基音孔的指孔全部打开。这种笛子与传统的笛子稍有不同，传统笛子 fa 稍高 xi 稍低，靠调整指法符合音准。现在你的这根笛子对预先规定的调名（如上面说的 G 调笛）指法就非常简单。如果适当变换指法还可以吹出几个升降半音来，上述 G 调笛子可以吹出 C 调（筒音为 2）和 F 调（筒音为 6）来。如果你还想多吹几个半音，那么在笛子上可以多打几个半音孔，把拇指与小指也用上。经过一段练习，你一定能用它吹奏出美妙动听的乐曲来。何妨一试？

最早刊登于《力学与实践》后被收入《力学诗趣》（南开大学出版社，1998），《身边的力学》（北京大学出版社，1997）中