

## 低屋面横向通风牛舍(LPCV)

李守忠 编译

### 一、引言

第一栋低屋面横向通风牛舍(LPCV)于2005年秋建造于美国南达科他州，其建筑型式和管理模式目前已在美国7个州被普遍认可，另外10个州也在考虑采用这种模式。LPCV的概念现在已经扩展到相当于8—24列自由卧栏的牛舍跨度，但大多数牧场选择12—16列型式。

图1所示为8列式LPCV牛舍端视图。牛舍一面侧墙配置蒸发板，另一面侧墙安装风机。图2所示为尾对尾8列式LPCV牛舍的平面工艺布局，这种设计相当于把两个4列式牛舍并在一起。LPCV牛舍或隧道通风牛舍的优势是通过牛舍的风速是稳定的，舍内最大通风率时的风速一般低于13km/h，而冬季风速则可降低到3.2km/h以下。

在2006年针对LPCV牛舍舍内空气质量进行了研究。从舍内三个取样点采集的样品中对悬浮颗粒含量的分析结果为：牛舍东端78.2ppm，牛舍中部74.8ppm，牛舍西端94.8ppm。这些值比鸡舍和猪舍尘埃浓度低10—100倍(Jerez等, 2006)，也低于美国国家标准(150ppm)。这些空气样本采集自使用沙子做卧床垫料的LPCV牛舍，使用干牛粪或锯末等有机垫料的牛舍空气悬浮颗粒浓度是否会升高还有待于进一步研究。

试验表明，LPCV牛舍中散发的有害气体以含氮气体(NH<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, NO)为主。在春季试验的最低通风率(11900m<sup>3</sup>/分钟)下，氨气浓度和散发速度最高。试验测定的氨气平均浓度(春季=1219±5ppb, 夏季=1117±4ppb)远远低于自然通风散栏式牛舍(36—51ppm)。

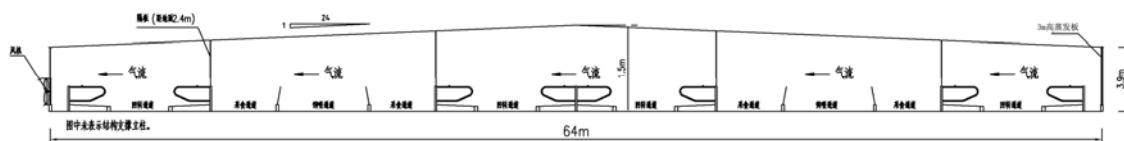


图1. 8列式LPCV散栏式牛舍剖视图

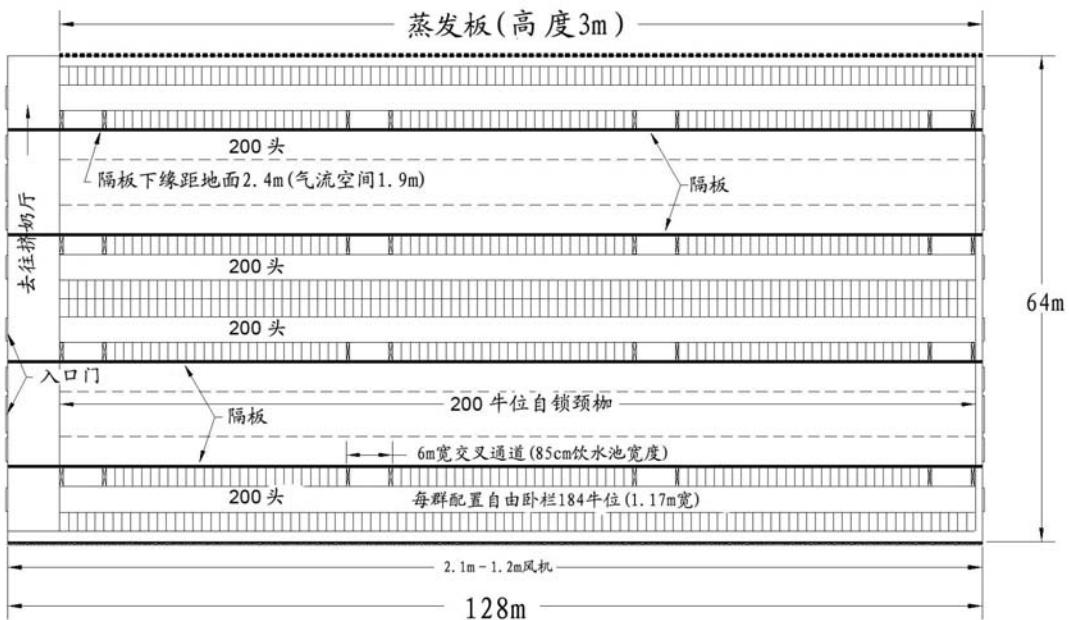


图2. 8列式LPCV散栏式牛舍平面工艺图（牛舍长度根据养殖容量确定）

表1. 800头容量的LPCV牛舍平均有害气体浓度

季节	换气率	NH <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	NO
		(ppb)	(ppb)	(ppb)
春季	低	1,370	445	8
	中	1,181	296	27
	高	1,108	417	0
夏季	低	1,084	176	0
	中	1,157	145	4
	高	1,112	155	0

## 二、LPCV牛舍工艺设计

LPCV牛舍的优点包括：低屋面、占地面积小、奶牛往返挤奶厅的行走距离短、可控制光照以及良好的奶牛养殖环境和人员工作环境，但必须根据不同地区的具体条件进行针对性设计。下面概述LPCV牛舍建设的一些工艺设计问题。

### 1、牛舍跨度

在炎热季节，通风率（即舍内空气全部更新的时间）应为60—120秒，即风机每60—120秒钟就要把舍内空气完全排出，更换为舍外新鲜空气。而冬季需要降低舍内通风率，在北达科他州800头容量的LPCV牛舍冬季的通风率一般为180—240秒。冬季通风率必须能够最大限度降低舍内湿度和有害气体如氨气的浓

度，以免损害奶牛健康。这个地区对牛舍通风率的管理依据是舍内氨气浓度而不是温度，这就使其牛舍的通风率高于其它地区的牧场。

LPCV牛舍的跨度范围在60—150m，表观上可以分为8列式、10列式、12列式、16列式、24列式。表2所示为侧墙配置3m高蒸发板的情况下，不同跨度牛舍空气通过蒸发板的不同速率和牛舍换气时间的关系。设备供应商建议空气通过蒸发板的最大速率为122m/分钟，超过122m/分钟会降低蒸发板的效率。牛舍通风率初始设定应为120秒以下；跨度超过91m时，根据蒸发板通气率，牛舍通风率可以在180—240秒之间。蒸发板通气率加快会使其降温效率下降，导致舍内温度升高。

表2. 牛舍跨度和空气通过蒸发板速率对通风率影响的比较（秒）

空气通过蒸发板速度 (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·分钟)	牛舍表观跨度 (脊高4.3m & 屋面坡比0.5/12)				
	60m (90.6)*	76m (99.1)	91m (118.9)	122m (158.6)	150m (271.8)
76.4	77	100	123	174	231
91.7	64	83	103	145	192
107.0	55	71	88	125	165
122.2	48	62	77	109	144

\* 牛舍断面近似值(m<sup>2</sup>)。

堪萨斯州的奶牛专家在2007年夏季对四个LPCV牛舍进行了评估，表3是对7月17日到8月16日期间牛舍内各区域温度升高情况的总结。数据表明，隔板之间温度平均升高0.32<sup>0</sup>C，牛舍横向每米跨度温度平均升高0.0167<sup>0</sup>C/m，相当于每30m牛舍跨度温度升高0.556<sup>0</sup>C。由于使用蒸发板降温系统造成的舍内高湿度，每30m牛舍跨度的温湿度指数（THI）约升高1个单位。

表3. 2007年夏季4个LPCV牛舍隔板间和单位跨度温度平均升高情况

牧场编号	隔板间温度平均升高值 (0C) *	温度平均升高/牛舍跨度*
# 1	0.36	0.0155 <sup>0</sup> C/m
# 2	0.28	0.0140 <sup>0</sup> C/m
# 3	0.34	0.0200 <sup>0</sup> C/m
# 4	0.26	0.0173 <sup>0</sup> C/m
平均值	0.32	0.0168 <sup>0</sup> C/m

\*平均值来源于每小时一次实测数据，共计2880个。

## 2、牛舍山墙门设计

第一栋LPCV牛舍对应舍内每条功能通道都设置有山墙门，以便于饲喂和清粪设备进出，也可在备用发电机故障等突发情况下用以紧急通风或奶牛的应急出口。配置山墙门考虑的重点是建造投资和维修费用，多数人选择只配置对应饲喂通道的山墙门，相当于牛舍每4列自由卧栏（假定自由卧栏为四列式布置）山墙门从10个减少到2个。这种设计需要在牛舍两端各延长一定的空间来满足小型机械和运沙车等设备进出牛通道的需要，但不适于牵引式车辆使用。

还有一种设计是只在一端山墙配置饲喂通道门，另一端设置机械设备缓冲区，让牵引式车辆从一端进入牛舍，在另一端横穿牛舍退出。这就使牛舍的山墙门从每8列自由卧栏20个或4个减少到2个，但这种设计会减少舍内自由卧栏的有效配置数量。确定山墙门配置需要权衡原始投资和维修成本与舍内自由卧栏减少的关系。如果充分利用舍内空间配置自由卧栏，就应该对应每条通道全部配置山墙门，在舍内不增加额外缓冲空间的情况下，这种设计会使每栏位平均占有牛舍面积减少5—10%。

## 3、牛舍隔热保温

对屋面和墙体进行隔热处理可以减少夏季辐射热对牛舍的影响，防止冬季舍内发生结露现象。自然通风的散栏式牛舍一般不做隔热处理，但屋面坡比为1/3，使热空气不断上升并从敞开的屋脊散发到舍外。而LPCV牛舍是通过风机把热空气排出舍外的，在夏季通风率必须足够高，以保证舍内温度不会明显升高。冬季由于牛舍通风率降低，湿热空气在接触低温金属表面时会发生结露现象，露滴又会滴落在牛舍地面上。

屋面采用复合保温板时在接缝处需要进行密封处理，否则由于奶牛呼出的湿气和尿液蒸气，接缝处会受到牛舍空气中高湿度的腐蚀而变形，最终使隔热材料与钢板分离，出现钢板结露现象；拖拉机在舍内作业时排出的热废气也会加重这类问题。根据需要采用不同的喷涂隔热材料可以避免这些问题的发生。另外也可以考虑采用刚性隔热板材。

#### 4、牛舍清粪工艺

目前大多数LPCV牛舍采用刮板 + 水冲的清粪工艺，刮板将粪便刮到中央粪道，再用水把掺有沙子的牛粪尿冲到分沙系统。由于挤奶厅的高效率和奶牛往返挤奶厅距离较短，其他清粪方式没有足够的时间清运这么大的牛舍里的粪便。

以饲养量3300头的泌乳牛舍为例，配置72位转盘式挤奶厅，每天3次挤奶，每小时进出挤奶厅的奶牛头数平均463头；假定使用直径2.4m橡胶轮胎做刮粪板，行进速度8km/h，刮粪效率为60%（除去开门和返回时间），操作人员1名，奶牛排粪量为头日68kg。设计方案一：奶牛分12群，每群275头，占舍长度186m，每群奶牛日排粪量为18.7吨。这样，在每天二次清粪管理的情况下，每群通道每次清粪时间需要42分钟，而每群每班挤奶时间为36分钟。设计方案二：奶牛分8群，每群412头，占舍长度275m，每群日排粪量28吨，清粪时间需要90分钟，而每群挤奶时间只需要54分钟。这二种设计方案下，一个清粪工都是不可能在一群奶牛挤奶结束前完成清粪工作的，因而就要考虑配备二个清粪工或实行三次清粪制。如果采用三次清粪制，方案一每群的清粪时间可以减少到28分钟，方案二可以减少到62分钟。配备二名清粪工适合方案二，因为即使采用三次清粪制，清粪时间仍然超过挤奶时间。这个例子说明在选择挤奶厅和设计牛群大小的时候，必须重点考虑清粪方式，特别是使用橡胶轮胎做清粪刮板的情况下。另外，由于在刮板清粪操作中没有时间弹性，所以对清粪工的管理要求也非常关键。

使用沙子做卧床垫料的牛舍，采用水冲式清粪工艺需要至少2%的地面坡度，如果牛舍与地面同坡度，就要限制牛舍跨度以规避雨雪荷载的影响。另外，由于蒸发板必须尽可能水平安装以保证其正常工作，所以对于采用水冲式清粪的牛舍就要求在地面有坡度的情况下屋脊线接近水平，即牛舍侧墙不是同一高度，这样就可以缓解雨雪荷载的压力和避免蒸发板的安装问题。

由于传统的看法是8个泌乳牛群配置一座挤奶厅，所以LPCV牛舍的跨度设计倾向于122m（16列式）。扩大单个牛群的奶牛数量就会增加牛舍长度，必要时可以考虑把泌乳牛分成12群，以保证足够的时间进行清粪和卧栏维护工作。

## 5、牛舍光照设计

在没有自然光照的情况下，合理设计人工光照对于LPCV牛舍非常重要。研究表明，10—15尺烛光（fc）照度对泌乳牛是必需的（Dahl, 2001）。使用金属卤素灯时，安装高度取决于灯具底部与工作面之间的距离。散栏式牛舍工作面定义在自由卧栏隔栏顶部或地面以上约1.2m。金属卤素灯一般安装高度为3.6—6m。LPCV牛舍配置荧光灯的安装高度在1.8—3.6m比较合适，每群配置二排荧光灯，相当于每列自由卧栏一排。

每套灯具配置二根2.4m的荧光灯管，安装高度为混凝土地面以上约3m，安装间隔约6m，安装位置在颈枷上方。图3的光照值为牛舍横向10个测定点的平均值，牛舍平均光照为27.9fc（9.9—44.8fc）。除靠近蒸发板和风机的卧栏外，其它区域的光照都在或超过建议的照度范围。灯管（灯泡）的照度随着使用时间的延长会下降，特别是在灯具上沾满灰尘和污物时。补充光照也方便员工在舍内进行工作。

光照设计必须能够满足不同生产阶段奶牛的需要，如泌乳牛需要长周期，而干奶牛需要短周期。适当的光照水平对保证人员安全有效地工作也是必需的。

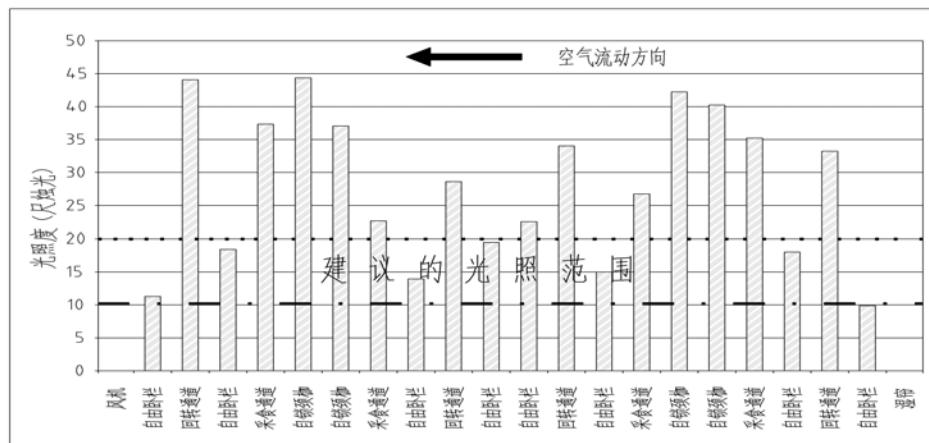


图3. 8列式LPCV散栏式牛舍横向区域光照分布

## 6、挤奶中心

建造LPCV牛舍的主要挑战之一是牛舍的通风系统如何与挤奶中心（挤奶厅和待挤厅）作为整体来设计。自然通风的散栏式牛舍配置挤奶厅一般采用“T”

或“H”型布局，而蒸发降温的牛舍需要封闭，在舍内设置隔板用于增加奶牛休息区域的气流速度。但待挤厅不适合设置隔板，因为待挤厅里配置有赶牛器等设备。另外，大多数待挤厅是净跨设计，如果安装隔板就必须增加结构立柱。风机工作时如果在牛舍或挤奶厅距离风机最近处有进气口，就会在小区域形成空气对流，影响蒸发降温效果。奶牛进出挤奶厅和牛舍的过程也会影响蒸发降温系统的作用。

目前认为待挤厅还是适合采用自然通风设计，通过风机和喷淋系统进行降温。挤奶厅通风设计必须考虑挤奶员和奶牛舒适度。

## 7、通风设计

LPCV牛舍目前普遍的通风设计是通过配置在进风口的蒸发板来控制的。蒸发板生产商建议空气通过蒸发板的最大流速为 $122\text{m}^3/\text{m}^2/\text{分钟}$ ，一般设计值为 $106-114\text{m}^3/\text{m}^2/\text{分钟}$ 。安装3m高蒸发板需要4-4.3m的侧墙高度。如果不安装蒸发板，开敞侧墙的空气流速就会增加。

LPCV牛舍风机的最大工作静压应该控制在3.8mm水柱以下。了解静压的概念对于在春秋季节控制风机开启数量很关键。如果进气空间不足，静压就会增加，造成风机空转。LPCV牛舍与挤奶厅之间的通道如果不封闭，即使蒸发板关闭也存在进气空间。关于是否在冬季关闭蒸发板还有很多争议；如果不封闭蒸发板，那么增加运转风机数量不会增加静压。如果冬季关闭蒸发板，就需要另外的进气口。经验的做法是每台风机工作状态下需要 $4.6\text{m}^2$ 进气空间。

## 8、冬季通风

LPCV牛舍冬季如何控制风机的运行尚没有标准可依，目前各牧场都有自己的操作方法，但归结起来主要是两种模式：第一种是降低通风率（关闭风机）防止地面粪便冻结；这种方法可以预防奶牛跛行问题，但会造成舍内氨气浓度升高。另外，由于舍内温度升高导致舍内外温差增大，使舍内湿度相应增加，在没有进行保温处理的金属表面如屋面檩条等会出现水凝现象。第二种是根据进气口温度来控制运转风机的数量，这种方式的特点是限定在低于设定温度时运转风机的最少数量；但是当舍外温度进一步下降时仍会有一定数量的风机在

运转，使舍内温度继续降低，造成地面粪便冻结。

尽管存在不同意见，但大多数专家倾向于把冬季最大通风率设定为8分钟。与8列式牛舍冬季的风机运行程序相比，16列式牛舍需要二倍的风机数量，增加的通风量要求侧墙进风口面积比8列式牛舍增加一倍；同时，由于进风口必须通过更多的空气以满足8分钟通风率的需要，造成牛舍进风侧60m舍内空间的气温较低。冬季在保证足够通风率的情况下，16列式牛舍空气升温速度就不会像8列式牛舍那样快。在非常寒冷的气候条件下，16列式LPCV牛舍靠近进风口通道上的粪便大多会冻结。另一个问题是雪天对进风口的管理措施，如果開啟进风口，雪必然会被吸入舍内；使用蒸发板可以防止雪进入牛舍，却会降低其使用寿命。

冬季牛舍进风口应该位于侧墙上部，使进入牛舍的空气在接触奶牛和地面前有升温的时间。也可以采用卷帘覆盖蒸发板，这就使进风口处于蒸发板中部，随着静压增加上卷帘可以自动调整，增加进风口大小。如果采用单卷帘，应该从上向下卷，始终使进风口处于侧墙上部。还有一种选择方案是在使用单卷帘的情况下，在卷帘上方留出45—60cm开口。如果在蒸发板下方设置进风口会使冷空气直接接触奶牛和通道地面，并且在冰雪覆盖进风口时将不得不提高进风口位置。

## 9、通风设计：隔板的作用

LPCV牛舍内部工艺布置与自然通风牛舍非常相似，只是舍内增设隔板将气流从上部空间导向奶牛休息区域。最初建造的一些LPCV牛舍都配置了隔板，而新建的LPCV牛舍倾向于取消隔板，以降低造价和维修成本。隔板可以使自由卧栏处的气流速度从3.2—4.8km/h提高到9.6—12.8km/h，这取决于隔板数量。由于清粪车操作可能会意外损坏隔板，有的牛舍在回转通道和转群通道处选择厚帆布做隔板，以降低损坏的可能。

隔板下部空间的作用是调节通过牛舍和每个隔板时的气流速度，表现为气流突遇隔板时静压的变化，类似于空速管原理。为使风机的静压最小化，提高风机运行效率，隔板设计是关键。从实际使用效果和考虑到对奶牛的影响，隔板距离地面高度不能低于2.1m。另外，在不设置隔板的LPCV牛舍要达到8km/h或

以上的气流速度并不经济，因为至少需要增加一倍的风机，导致夏季运行成本增加。LPCV牛舍是否设置隔板，必须考虑原始投资与日常运行成本的关系。

## 10、蒸发板与高压喷雾的比较

蒸发降温是让热空气通过高压水雾或湿表面实现的，在空气温度下降的同时空气湿度升高。理论上讲，在空气湿度100%或饱和状态下可以使温度达到最低，大多数设计者认为，如果空气经过蒸发板时湿度能够提高到75%，就可以保证进入舍内的空气温度降到足够低。空气通过蒸发板时的降温是由于相对湿度的作用，如果两股气流温度相同但相对湿度不同，那么低湿度气流降温幅度会高于高湿度气流。由于舍外气温在变化，所以通过蒸发板进入舍内的空气温度也在变化。

夏季消除奶牛热应激问题需要用水，不论采用低压喷淋还是蒸发降温系统。目前的LPCV牛舍更倾向于采用蒸发降温系统，也有个别牧场安装使用高压喷雾降温系统。蒸发降温系统设计的前提是假定空气没有增加或损失热量，降温效果是由空气吸纳水分的能力决定的。较低的相对湿度会增加空气降温幅度。蒸发板和高压喷雾是目前常用的二种增加空气湿度的方法。高压喷雾系统是向气流中喷射微小雾滴，而蒸发板是将水喷在纤维材料上，空气通过纤维材料的孔隙时接触并带走水分。图4所示是从2007年7月17日到8月16日对一个LPCV牛舍蒸发板的降温能力测定结果，测定数据为牛舍蒸发板侧第一个隔板处和环境之间每小时的平均温差。在下午，蒸发板可以将气温降低4.4-7.2°C，这是由于下午随着空气相对湿度下降使蒸发板的降温能力增强。

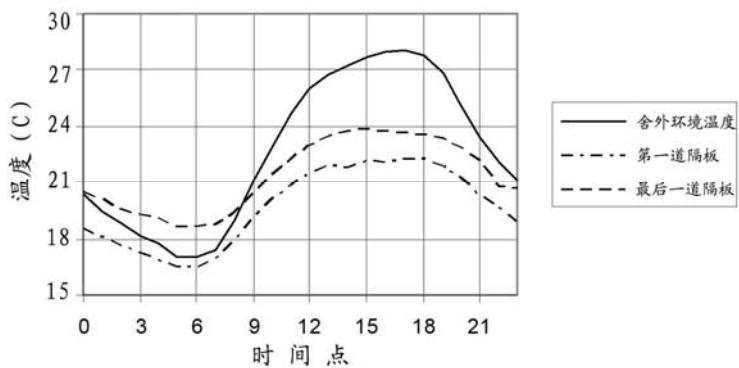


图4. LPCV散栏式牛舍不同位置每小时平均温度 (2007. 7. 17—8. 16)

### 三、结论

LPCV散栏式牛舍的设计和使用还处于初期认识阶段，但这类牛舍很明显可以带给养牛者很多潜在的效益，其中一个好处就是在一年中的任何季节都可以对奶牛环境进行人为控制，目前看来最大的问题是LPCV牛舍的冬季管理。LPCV牛舍具有很大的发展潜力，但合理的设计应该是针对特定的气候条件进行设计。科学设计的目的仍然是满足养牛者对生产效益和奶牛舒适度的需要。