

关于王祯《农书》脚踏风扇车的讨论

史晓雷按：

2011年10月9日，我收到自然科学史研究所曾雄生老师转发的一封邮件，主要内容是郑州大学王星光老师就其9月份在日本北海道参加第11届东亚农业史研讨会时提交的一篇论文的补充说明（曾、王之前同参加了该会议）。补充说明涉及的内容是关于复原元代王祯《农书》中的脚踏风扇车动力机构的问题。因为曾老师知道我刚在2011年《中国农史》第3期发表了一篇与脚踏风扇车有关的论文，因此邮件同时转发了我。我在《中国农史》上发表的论文为《王祯〈农书〉中的颴扇新解》，论证的重心在于那架风扇车是一部卧式、鼓风处为敞开式的风扇车，而且考证了我国最早出现圆筒状鼓风结构的风扇车是在15世纪晚期。该文对脚踏风扇车的动力机构没有关注，因为我一直认为就是一个曲柄连杆装置。当曾老师把王老师的看法转给我时，才发现由于明本那幅插图的原因，问题可能比原来想得复杂，因此才有了下面的这些讨论，包括后来郑州大学柴国生博士也参与了其中。

在当时讨论期间，王星光老师与柴国生博士的论文已经被《中国科技史杂志》录用（正式发表在该刊2011年第4期），但还未正式发表，曾老师在征询王老师的意见后，王老师同意在论文正式刊发后把我们之间的讨论公开，以求教于同行专家。现经过笔者整理，予以公开。

2011年10月9日曾雄生老师致王星光老师邮件，转发史晓雷。

星光兄：

您好。照片及文章收到。谢谢。我对机械力学所知甚少，所以上次对大作匿名审稿时只是提到复原的重点在于力的传动部分，但我也给不出一个更合理的办法。（见附件，不妥之处请海涵）

以我使用手摇风扇车的经验，带动扇叶做功的是其曲柄连杆装置，它可以保证扇叶所产生的风流，向一个方向吹，用以簸扬谷物等。

您所说利用惯性原理，可以产生连续的风流（叶轮正向加反向转动），但风的流向相反，似难以用于谷物等的清选。

前些日子，这边毕业的一个学生（现在哈尔滨师大工作的史晓雷博士）也写过一篇同样题材的文章，跟您所持观点大致相同。（见《中国农史》今年第3期）可参考。

顺颂大安

按：邮件附王星光老师的补充说明（当为之前王致曾的内容）

关于《王祯农书》记载 足踏式风扇车相关问题的补充说明

《王祯农书》所记载的足踏式风扇车，是依据惯性原理，通过缠绕于掉轴上的拉绳驱动叶轮转动生风工作的。这种风扇车使用时，需要先将固定于掉轴端的合适长度的拉绳均匀缠绕于掉轴上，之后将拉绳另外一端选择适当的位置固定于地面，要使得未被缠于掉轴上的拉绳能够被拉直，处于伸展状态；然后，用脚向下用力踩踏拉绳，拉绳即拉动叶轮旋转，产生风流工作。由于惯性的作用，拉绳被完全放开后，会被反向自动缠绕到掉轴上，待拉直后，操作者再次踩踏拉绳，叶轮即反向转动，如此叶轮即可转动不停，生风进行清选作业。风扇车两侧的导风板，则是汇聚风流到储料斗处，保证足够的风力。这种依据惯性原理，通过柔性拉绳驱动机具工作轴双向旋转做功的驱动方式，在传统木工钻孔工具——压钻上也得到了很好地利用，既是今天这种压钻仍有广泛的应用（如下图。特别说明：以下图片均为笔者在百度图库中搜索出用以说明压钻的形制及使用状况的，不做他用。如做他用，需征得图片作者的同意。）晓雷按，此处图片略。

10月10日史晓雷致曾雄生、王星光老师的邮件

曾老师、王星光老师台鉴：

感谢曾老师转发我王老师就王祯《农书》颉扇鼓风原理的说明，恰好笔者刚完成了一篇拙文，现就王老师的原理谈点浅见。

1、王老师阐述的那种鼓风原理，并搜集了泵钻的一些照片，意思是利用叶轮的惯性，缠绕后在力的作用下再反向旋转，如此循环进行鼓风。这从机械原理上讲是行得通的，即能够实现鼓风。

2、但这种原理的鼓风效率会很低，原因如下。开始的时候，如王老师所言，要将绳子缠绕于曲柄上，然后发力，但这一发力之后呢，你只能等叶轮旋转减速到0，然后再发力，反向旋转。因为绳长是一定的，每次发力时曲柄的位置就是初始发力的位置，因此这里起关键作用的仍然是曲柄+惯性的作用（叶轮本身相当于一惰轮）。

我的看法是不需要如此复杂，就是不需要绳子缠绕（如果绳子要缠绕的话，冗余度还要较大，否则反向会更频繁，效率更低；但绳子一长，发力的频率也会降低，也是在降低功效），直接利用的曲柄与惯性的作用（我甚至感觉那根绳子应该是或者用稍有柔韧性的竹条或荆条更佳，那样就是曲柄连杆机构了，会更利索），原理如图 1-2。这样如果如我所绘的高槛在左侧的话，脚踏发力的区域在曲柄运转到左上角位置，这与《农政全书》中描绘的脚踏搅车（现在一些农村地区仍沿用）道理是一样的。这样，鼓风的方向就永远是一个方向。

这样的结构与王老师所言区别在：可以在发力的区间随时鼓风（不一定每周都发力），因此不会出现哪怕是短暂的停歇，而且鼓风方向始终如一。

注：我没有亲自体验过鼓风时顺逆时针是否会对鼓风效果产生影响，但就我绘的图上，应该逆时针更顺利些（风被逼到高槛下），因为出风口在左侧。如果是顺时针的话，左侧的风口太大，风力无法与高槛下泻的谷物垂直，效果会差（汉代的敞开放式风扇车也应该有顺逆时针之分的，原因亦然）。到了圆筒状鼓风机机构出现后，这更明显，我文章中提到的我国最早绘有该种风扇车的《顾氏画谱》可以明显看到操作者是在逆时针搅动曲柄（该风扇车型式同上，也即叶轮在右）。

仅是我的浅见，望两位老师不吝指正。

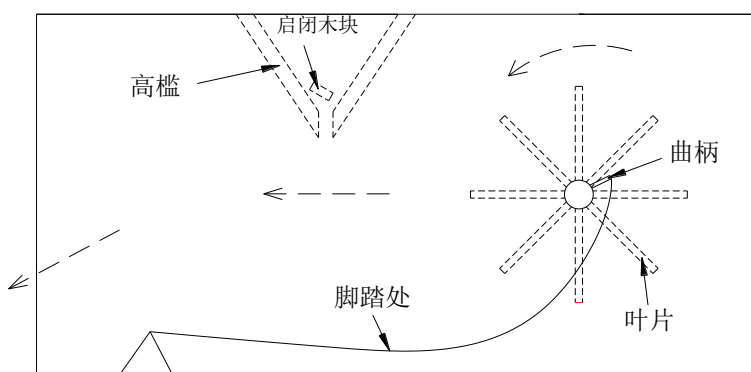


图1 颉扇的结构图（论文中图）

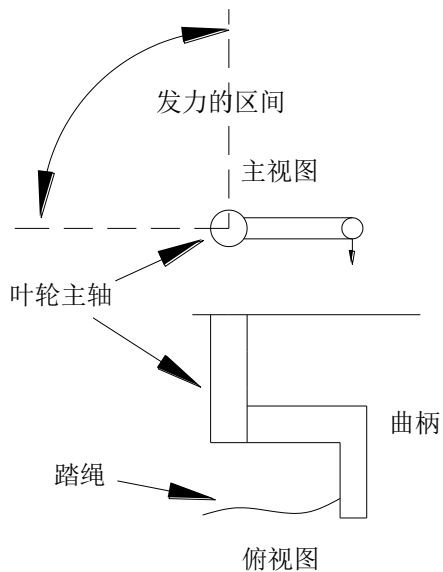


图2 曲柄连杆机构示意图
(临时绘的示意图)

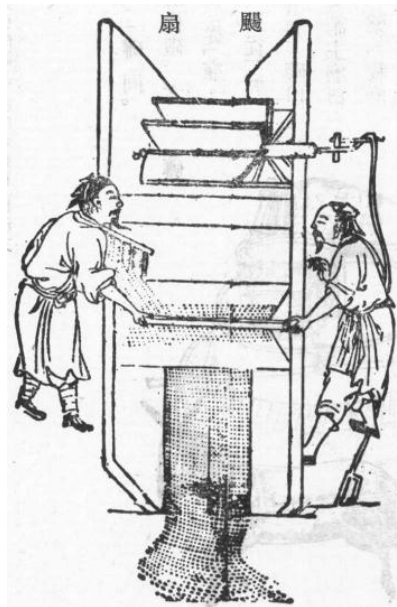


图3 明本(取自王毓瑚校本)颧扇

10月10日曾雄生老师致史晓雷邮件

晓雷:

你好。邮件收到。我因缺乏想像力,很难根据描述悬想足踏式风车的工作原理,真的希望请个木工师傅做出一个实物来验证,其他的部分可以都不管,就转动部分加以复原即可。

10月11日王星光老师致史晓雷邮件,转发曾雄生老师

史博士:

您好!风扇车一文,让你费心了,甚为曾教授和你的严谨求实精神所感动。望以后多联系。关于风扇车问题,根据曾教授的意见和你的阐发,作如下补充说明,请指正。

再次对你的帮助表示感谢!

祝研安

附关于复原风扇车的补充说明:

- 1.该种足踏式风扇车在原理上是能够实现连续煽风,进行清选作业的,能得到史博士的肯定深感欣慰。我们征求了其他物理教授的意见,也是基本肯定的。
- 2.文章中复原的足踏式风扇车是忠实于《王祯农书》中附图中的风扇车的,而忠实于原始史料、器物,也正是复原工作应遵循的基本原则。史博士设想“直接利用的曲柄与惯性的作用(那根绳子应该是或者用稍有柔韧性的竹条或荆条更佳,那样就是曲柄连杆机构了,会更利索)……鼓风的方向就永远是一个方向”是很有道理的,不过,我们还是以《王祯农书》中的附图为参照来加以研究。
- 3.对于史博士指出的该种风扇车顺时针煽风时,风流无法与下泻的谷物垂直,导致清选效果较差,我们也有同感,这一点也正是该种风扇车的缺陷所在,应该也是导致该种风扇车较早退出生产领域的重要原因之一。对此,文章中已有分析。
- 4.由于该种风扇车叶轮双向旋转煽风,风流的稳定性要较手摇式差,这是事实。但是,我们从农业生产实际中可以知道,场圃间第一道工序的清选工作,最为常用的方法就是用木锨向半空扬洒待清选的谷物,通过自然风清选谷物。自然风风流的稳定性也是较差的,甚至风向

也不是很稳定，但风力的大小只要在一定的范围内就能够满足清选的需要。而《王祯农书》中的这种足踏式风扇车产生的风力大小主要通过调整叶轮的转速来实现，因而叶轮在一定的转速区间内是能够产生满足清选需要的风流的。

2011年10月13日史晓雷致王星光、曾雄生老师的邮件

王老师并曾老师：

这几天学校有课，迟复为歉。王老师是学界前辈，在研究所时就听师弟田闯多次提及您。学术探讨，多多益善。

现在我与王老师的分歧是，王老师的意思是鼓风机所用为泵钻的原理，我认为是曲柄连杆机构。我也同意王老师的方式能够产生鼓风，但鼓风的效果会差，而且这种方式在我国古代脚踏机构中非常独特——就是如果这样的话将是唯一的。如果一种声称比较特殊的话，应该有较充分的证据，目前看这种证据还不足以使其认为是泵钻的原理——当然这是个人的看法。

王老师回复中谈到应该以王祯原图为参照，这的确是复原的基础。王祯《农书》最早的两个版本系统是明本与四库本，如上所示。

先看四库本（图2），如果是采用泵钻式缠绕踏绳的话，绳子的末端（而且应该是死结）不会偏离主轴外端较远的位置，而四库本图中绳子的末端就在曲柄的外端，即使开始缠绕发力后可以运转，但在转动过程中，因为绳子是柔性的，在曲柄末端的话运转过程中很难保证绳子自动会继续缠绕下去，尽管可以采取别的措施去保证，但图中这种画法自然的理解是曲柄连杆机构。

再看明本（图1），明本的外端露出了一段曲柄，绳子缠绕的问题似乎可以解决。但与四库本一样，有同样一个不符合王老师所言的情境出现，即：在两图所显示的绳子完全脱离曲柄的情况下（即没有缠绕的状态），操作者的右脚不可能仍处在踏绳上，因为此时叶轮正在高速旋转，必须保证绳子不受张力，否则绳子的回绕就会受影响。反之，如果是曲柄连杆机构的话，操作者的脚可以一直处在绳子上（不用一直发力），因为需要周期性的发力，不需要把脚挪下绳子（泵钻式需要等绳子反转，时间较长，操作者不可能独脚维持这段时间）。在曲柄连杆机构中，绳子可以认为基本总处在张力状态下，而在泵转情形下，只有缠绕到尽头才能使绳子处于张力情况。

再有，汉代画像石已经出现有的脚踏纺车、南宋《耕织图》（现存的是蚕织图）中的缣丝图采用的均是曲柄连杆机构，这种机构到元代已经非常成熟。如果是曲柄连杆式鼓风，较之脚踏缣丝图，无非是把缣丝的轱轮换做风扇车的叶轮而已。至于它的效率，我已经说过了，可以同向连续鼓风，也较泵钻式原理要好。

最后，王祯《农书》中多次出现曲柄连杆机构（水排、手推磨、脚踏车），在风扇车上出现也显得自然，如果用泵钻式的话，就有些突兀，而且王祯的原句是“或手转、足蹶”，如果这种足蹶的方式有些不寻常的话，王祯对该细节就应该有一点笔墨，可惜没有。

总之，我的浅见是，泵钻式鼓风能行得通（风效不佳），但应该不是王祯表达的本意。希望王老师和曾老师批评指正。

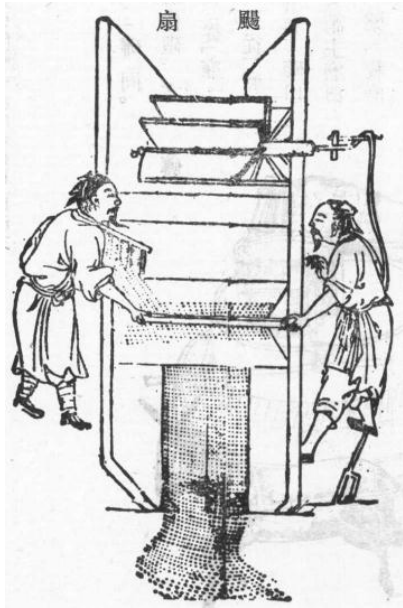


图1 明本

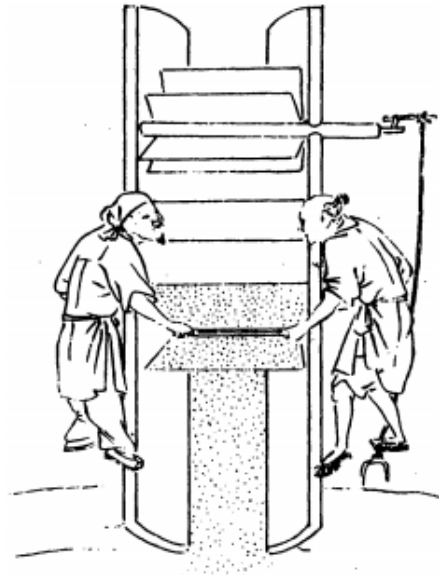


图2 四库文渊阁本

10月13日曾雄生老师致信史晓雷，转发王星光老师

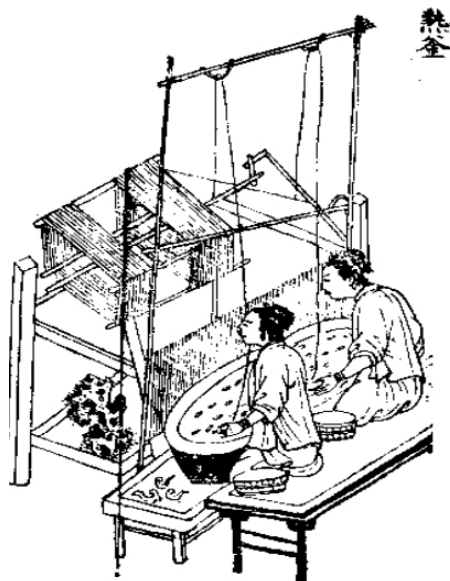
晓雷

你好。我也同意是曲柄连杆机构在推动扇叶朝固定方向转动。关键是踏板如果通过绳索去驱动这个曲柄连杆？我这几天也想了想，是不是曲柄和绳索之间还有个活环一类的东西。遵王老师的意见，等他的文章在《中国科技史杂志》上正式发表之后，再请你将相关讨论整理上网。到时我想也一并附上两位的大作。谢谢，辛苦了。

10月14日史晓雷致曾、王老师的邮件

曾老师并王老师：

回答曾老师的疑问，王祯的原图没有踏板，也不需要踏板，那个门形物是卡在地上的齿钉，起到保证绳子张力的作用。绳子靠近此物的地方本身就作为踏板了。另外，曲柄和绳索之间不需要环形物，只要是死结就可以，道理同下图。不同的是下图用的是脚踏木杆，用绳子驱动是一样的道理（我之前说过的用柔性的竹条之类会更好），但木杆的末端一定是活动的，不能卡死在地面。 晓雷 又及



王祯《农书》热釜图

10月16日郑州大学柴国生博士参与进来讨论，于当日下午3点半发送邮件至曾、王、史。史晓雷于当晚7点多进行了回复，回复的内容是直接柴博士原文的基础上说明的，就是下文中标识为蓝色的部分，图片为柴博士原文附，这里一并给出，特说明。

各位老师好：

很高兴能够与各位老师对风扇车的相关问题进行交流。附件是根据各位老师近期对足踏式风扇车进行讨论的相关内容和问题，整理出的个人的一些不成熟的看法，请多多指正！
恭祝研安！

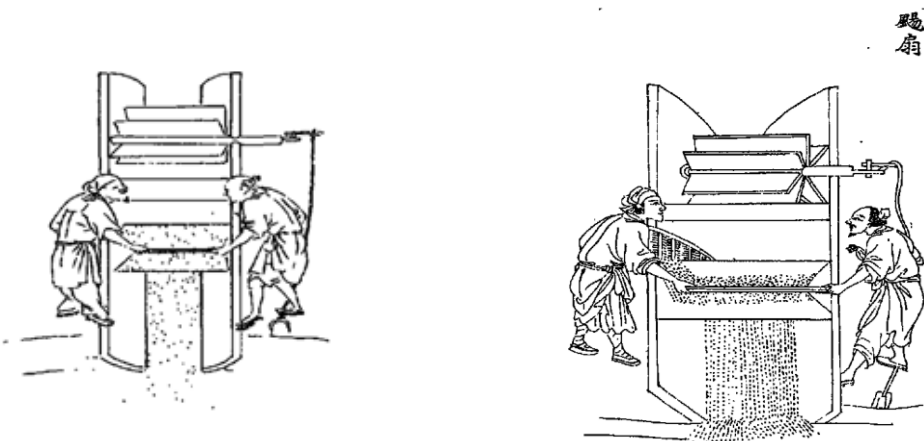


图1《王祯农书》（四库全书版）中的足踏式风扇车图 图2《农政全书》（四库全书版）中的足踏式风扇车

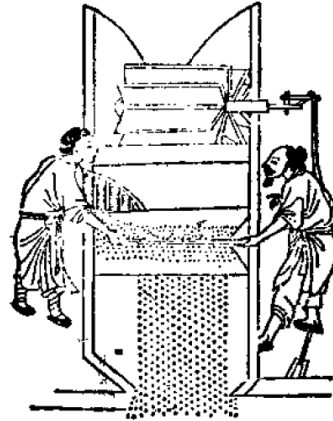
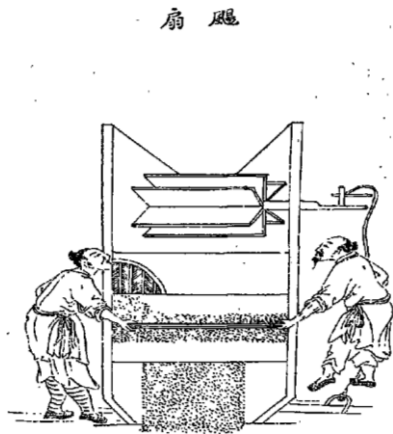


图3 《授时通考》(四库全书版)中的足踏式风扇车图([8], 555 页) 图4 《东鲁王氏农书译注》中的足踏式风扇车图([9], 306 页)

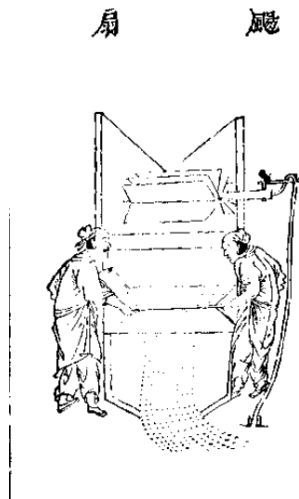


图5: 《三才图会》附图(上海古籍社, 1988 年)

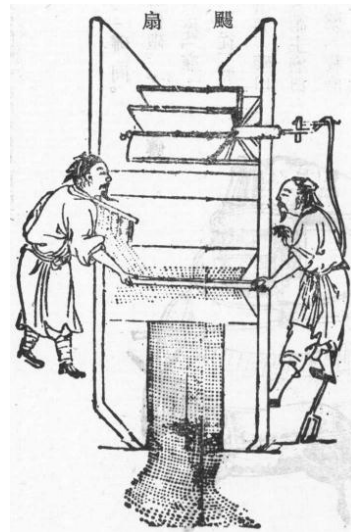


图6: 《王祯农书》(明本)附图

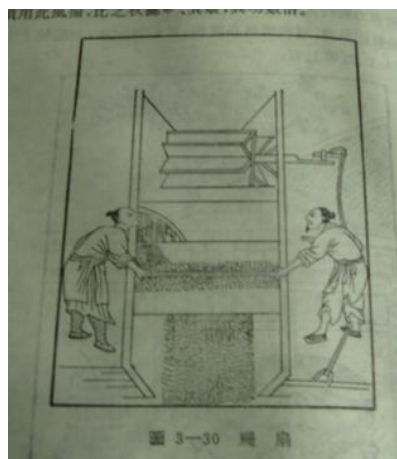


图7: 《授时通考校注》中的附图(马宗申校注, 农业出版社 1991 年版)

首先, 关于图的问题。今存《王祯农书》中的图样, 主要有两个系统, 即明本和库本。这一点, 王毓瑚先生在《王祯农书·校者说明》中做了详细地考释, 并且对书中图样的采用也做了详细地说明, 指出:

“至于插图，则采用明本的，库本所根据的（永乐）大典本虽然就时代来说是在前，但原本已不可复见，库本的插图究竟是十八世纪的人摹绘的，而且至少有一部分可以肯定是修改过的。反之，明本的图则确确实实是十六世纪的作品。我们所着意的，不在于是否书画更美了一些，或者说表现的器物更完善了一些，而是要尽可能忠实地反映著书时的真实情状。最早的明本的刊行上距著书时代虽然已在两个世纪以上，虽难保完全没有走样，但比较起来还是距离最近的，因而即使有些改动，也应当是比较小的。……为了避免进一步走样，所以的图都是就原书原图摄影制版的。”

我们对图的选择，在基于王毓瑚先生的上述分析之外，也对现存的其他农书的足踏式风扇车图也进行了比对，如成书于明代的《三才图会》、《农政全书》，附图分别为上图的图4、图5；以及《四库全书》中的图样，上图的图1、图2、图3，在这些图中，图4、图5、图2与图6在拉绳与掉轴连接部位是一致的，图3更接近于图6，只有图1与图6差别较大。

而图1与图6（库本与明本）的区别，可能的原因有二，一是临摹时造成的错误，二是原图即是如此。第一种可能是完全存在的，而且可能性要更大。我们将上图中单行本与收录于《四库全书》中的图样进行比较，可以明显地看出库本改绘的痕迹。如图3与图7的叶轮，以及左侧人头与簸箕的相对位置等；图1与图6相比，叶轮部分、左侧人所持的簸箕等；图2与图4相比，叶轮、簸箕等等，这些都是明显的改绘痕迹。对此，王毓瑚先生在《校者说明》中也有所分析，指出：

“清代皇家所编写的《图书集成》、《授时通考》和《库本》本书的插图，特别是那些带有背景和人物的，以及比较复杂的机械，都有些像是‘工笔画’；更有一些简直近似风景画了。料想本书的原稿未必是如此。《图书集成》的这些图大都是引自《农政全书》的，但看得出来一般是经过了改绘，从而画面显得精致。据此推测，库本的那些图也未必是原来《永乐大典》本的忠实的摹绘。”

王先生的这种分析是符合实际的。此外，就《王禎农书》风扇车图的两个不同系统，图1与图6相比要粗糙的多，图6能清楚地看清左侧操作者所持的簸箕的形状，而图1则完全看不出有簸箕这一工具，叶轮也较图6缺乏立体感。

另一方面，图1、图2、图3均为《四库全书》中的附图，而拉绳与掉轴的连接方式，三种图就有三种不同的样式，这无疑说明了《王禎农书》在后世的传刻过程中，图的走样、失真是非常严重的。在这三幅图中，就拉绳与掉轴的连接方式而言，图3与图6一样，图2接近于图6（图2要正常工作也只能通过我们文章中所推测的方式）。《王禎农书》的文字记载过于简略，对解决这个问题无甚作用。也就是说，现在我们所能够依据的只能是不同时代、不同版本古籍中所附的图样，而现存的这些附图中绝大多数图样都与图6一致或接近于图6，这应该可以说明图6更接近于《王禎农书》原始的图样。

不能因为后世流传的图绝大多数与明本近而认为图6更近于王的愿意（我这里的意思是四库本与明本同样重要，当然是指四库本王禎《农书》）。这里姑且不论王禎表现的是否是曲柄连杆问题（《三才图会》与《授时通考》关于此图的祖本出自明本，与明本相近是自然的；四库全书诟病很多，但其沿绘不同的书时，大致还是对的。您所言的图2与图3，因为祖本就出自明本，自然描绘的接近明本），上次我仅以四库本与明本比较，就是这个意思：因为这两个本子源头不同，是现存两个系统之祖本，以此对比足矣，其他本自然无法作为评判的依据。

对于第二种可能，我们认为存在的可能性也是有的，但就目前所能够见到的图文资料来说，无疑缺乏确实的证据。因为，元本及《永乐大典》本的《王禎农书》我们已无法复见，而且图1则确实是清人的作品。对于图1中所反映出的曲柄连杆结构，我们在文章交付杂志社之前也已有过讨论，这种结构要优于图6的结构，这是事实。这至少说明四库本《农书》

的绘者是按照曲柄连杆机构去理解的，而没有按照泵钻的原理去描绘。王祯农书受《耕织图》影响很大，这点我在博士论文已经做了阐述，曲柄连杆机构到元代已经非常成熟，而且《耕织图》中就存在极类似的机构，如果王祯描绘的是泵钻的原理，他怎么一笔也不提及呢？如果这是王祯的原创或者复原的机构（如水排、水轮三事），王祯就该多一点笔墨。泵钻的原理用于脚踏装置，在技术史上看是很突兀的事情。

但从现存的资料来说，能够反映曲柄连杆结构仅有图 1 这唯一的一幅图，而另外一种结构则在绝大多数图样中被反映出来（四库本延续到聚珍本已经变成了圆筒状鼓风机机构，且四库本较明本年代晚，自然影响没明本大，但它的评判地位与明本是一样的，不能根据后世图的多少做标准，姑且不论明本图是否表示曲柄连杆机构）。因此，我们认为拉绳缠绕驱动的结构与《王祯农书》原图一致的可能性要更大。

基于以上的分析，我们在复原时选择了图 6，而这种驱动方式的可行性是不存在问题的。在压钻上的普遍利用也充分说明了这种方式的可行性，当然，用在风扇车上其缺陷也是显而易见的。但是，存在缺陷并不能说明这种结构的风扇车在历史上是不可能存在的，相反，因为存在缺陷才导致其失传或被改进，而造成原有的结构不为后人所见、所知，进而造成认识、理解上的诸种错误。这也符合事物发展和被认识的基本规律。

有一点需要说明，脚踏式风扇车的驱动机构如果是曲柄连杆结构，其原理也同样依据的是惯性原理。即在拉绳的非发力区间，叶轮要靠惯性保持旋转并带动绳子运动。这种方式对操作者的要求也是很高的，因为掌握不好用力点，将对工作造成较大的影响，特别是当曲柄在上升过程没有到达可发力点时，脚向下用力则必然导致叶轮反转，影响正常工作。因此，这种曲柄连杆结构，并非真正意义上连杆不间断对曲柄施加作用力的曲柄连杆结构。这种结构叶轮的转向，在拉绳的拉力方向一定的情况下，主要取决于对拉绳发力时曲柄的位置，如下曲柄受力分析图（图 8），只有当曲柄所处的位置，受到绳子的拉力 F ，产生的两个分力，水平力 $F_2 \geq$ 垂直力 F_1 时，脚对拉绳施加向下的力，才能保证叶轮逆时针旋转，否则，将导致叶轮倒转或无法旋转。因此，叶轮逆时针旋转，对拉绳施加力的发力区间的起始点，应该在史博士标注起点的右侧（顺时针方向） 45° 处，即下图 9 标注的位置和区间（图 8、图 9 临时用 word 绘图工具绘制，不够规范，仅作参考，为说明问题之用）。

对操作者“要求很高”，其实不高。这与农政全书上的搅车道理一样，农村的老太太都可以轻松掌握。唯一不同的是，风扇车发力时需要的力量稍大些。至于发力时，柴博士谈到死点的问题，这仍与搅车是一样的道理，因为脚踏曲柄机构旋转开以后，基本可以实现匀速转动，操作者很快就能掌握它的火候（即发力区间），周期性地去发力脚踩，并不需要多高的技巧。反而，缠绕式的往复旋转才需要些技巧，因为即使是缠绕比较短的话，也要几周，操作者必须眼看着到转速基本为 0 了再发力，因为脚此时并没力在绳上（否则影响缠绕），而操作者同时还需要看左手处的粮斗——这才需要技巧。而曲柄连杆机构完全可以在不看右侧的情况下操作。

（柴博士所绘的发力区间是对的，因为我当时考虑的是脚踏处就在叶轮轴下方的情形，王祯的本意会在左侧，绳子会向左倾斜）

此外，对于这种曲柄连杆结构，曾老师的意见是对的，即拉绳与曲柄连接处应有一个活动环。如果绳子用死结紧固在曲柄上，当叶轮带动曲柄旋转时则必然将绳子缠绕于曲柄上，最终将导致叶轮被绳子拉紧而无法运转。

关于操作的相关问题。图 6 反映的结构，在绳子完全脱离曲柄后，操作者的脚能否一直踏在拉绳上的问题。这一点，图 1 反映的曲柄连杆结构与图 6 反映的拉绳驱动的结构的操作应该是一样的，即脚不必要完全抬离拉绳，但要随拉绳产生的向上的张力顺势向上抬起（待到最高点时方能再向下用力，再次踩踏），而且这一上升的过程中脚不能发力，否则两种结构都无法实现正常作业。也就是说，图 6 反映的结构在绳子在反向缠绕于掉轴的过程中会反

作用于脚上一个向上的力，这时脚要随着这个力慢慢向上抬起。这一过程的长短，主要取决于绳子在掉轴上的缠绕长度。在操作中，绳子主要处在两个位置之间运动，即绳子缠绕于掉轴上处于拉展状态的位置，以及绳子被踏拉至地面这一位置。绳子在掉轴上的缠绕长度，即是绳子从拉展到碰触地面而从掉轴上脱离的长度或稍长，也就是说缠绕的长度不会太长，而这个周期也不会太长。因为叶轮要保持一定的转速才能产生合用的风流，而惯性力是有限的，如果周期过长则必然使得叶轮转速减低过多而无法产生合用的风流。因此，史博士认为的操作者无法单脚长时间站立的情况，是没有这个担心的必要的。

这里再多的争论看来也无效了，期待一次试验的评判吧。

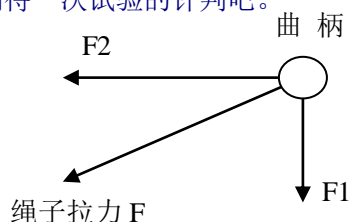


图 8：曲柄受力分析图

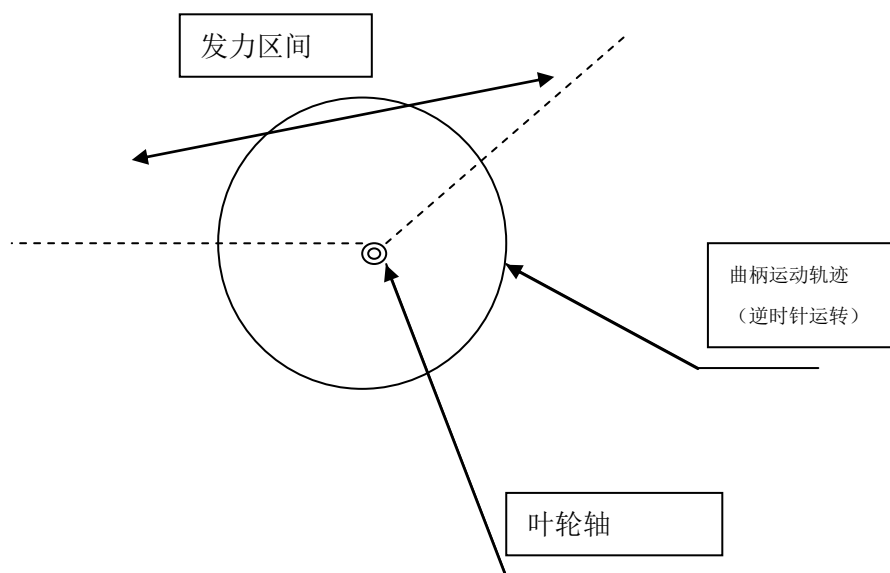


图 9：拉绳的发力区间图

10月16日晚柴博士致信史晓雷，转发曾雄生、王星光老师。算是对此次讨论的一个总结。史博士好：

您的分析是很有道理的。之所以会从现有的史料中得出两种不同的结果，除了理解的不同外，最根本的原因还是史料的不足，因此，只能期待有更多、更好相关的史料被发现，来解决这一技术史上的疑案。祝顺利！