

DOI:10.12405/j.issn.2097-1486.2026.03.007

明程宗猷《耕余剩技》射弩问题考辨

冯卓群^{1*}, 王尤迪^{2*}

1. 上海斑鱼狗科技有限公司, 上海 201101
2. 上海市七宝中学附属鑫都实验中学 语文组, 上海 201108

摘要:明代武术家程宗猷在他的著作《耕余剩技·蹶张心法·古铜大弩机说》中提出多年悬而未决的射弩问题。程宗猷观察到弦推箭射法射程短于弦撞箭射法射程, 他 60 岁时仍未找到导致这一现象的原因, 希望以后有学识广博的人找到导致这一现象的原因。400 多年以后, 通过调查傈僳族传统弩, 建立等效模型, 对弦撞箭射法与弦推箭射法进行力学分析, 作者找到了导致这一现象的原因, 解答了程宗猷射弩问题。弦撞箭射法是区别于更早出现的弦推箭射法的射箭方法, 其特点是, 撒放后, 有巨大的弦中点空跑距离, 适用的箭质量小。弦撞箭射法这一发明, 是古代中华民族在长期实践中取得的重要科技成就, 是宝贵的非物质文化遗产精髓。

关键词:弦撞箭射法; 弦推箭射法; 《耕余剩技》; 傈僳族

中图分类号:G852

文献标志码:A

文章编号:2097-1486(2026)03-0273-09

Research on the question of crossbow shooting in *Remaining Technique of Farming by CHENG Zongyou of the Ming Dynasty*

FENG Zhuoqun^{1*}, WANG Youdi^{2*}

1. Shanghai Pied Kingfisher Technology Company limited, Shanghai 201101, China
2. Chinese group, Xindu Experimental Middle School Affiliated to Shanghai Qibao High School, Shanghai 201108, China

Abstract: Martial artist CHENG Zongyou of the Ming Dynasty raised a question of crossbow shooting in his book *Remaining Technique of Farming, Method of Foot-Operated Crossbow, Ancient Copper Big Crossbow Mechanism Theory* that remained unsolved for many years. CHENG Zongyou observed that the range of string pushing arrow shooting method is shorter than that of string hitting arrow shooting method. He had not found the cause of this phenomenon even at the age of 60, expecting that the later knowledgeable people would do this. After more than 400 years, through investigating traditional crossbow of the Lisu ethnic group, establishing an equivalent model, conducting a mechanical analysis of string hitting arrow shooting method and string pushing arrow shooting method, the authors found the cause of this phenomenon and answered CHENG Zongyou's question of crossbow shooting. String hitting arrow shooting method is an shooting arrow method that differs from earlier emerging string pushing arrow shooting method. Its characteristic is that it has a huge empty running distance of the midpoint of the string after release, and the suitable arrow mass is light. The invention of string hitting arrow shooting method is an important technological achievement attained by the ancient Chinese nation in the long-term practice, and it is also the essence of the precious intangible cultural heritage.

Keywords: string hitting arrow shooting method; string pushing arrow shooting method; *Remaining Technique of Farming*; the Lisu ethnic group

*通信作者

基金项目:国家社科基金冷门“绝学”和国别史等研究专项项目“‘丝绸之路’沿线传统弓箭文化的分类整理与技术传承”(19VJX143)

收稿日期:2026-02-07; **修回日期:**2026-05-24

0 引言

程宗猷,字冲斗,明代武术家,籍贯新安海阳(今安徽省休宁县),著有《少林棍法阐宗》《蹶张心法》《长枪法选》《单刀法选》,合辑成《耕余剩技》^{[1][2]}。从《耕余剩技·耕余剩技叙》中可知,《少林棍法阐宗》定稿于明万历四十四年(1616年)。《蹶张心法》《长枪法选》《单刀法选》定稿于明天启元年(1621年),在同一年,《少林棍法阐宗》《蹶张心法》《长枪法选》《单刀法选》合辑成《耕余剩技》发行^[2]。

程宗猷另著有《射史》^[5]。《射史·射史小叙》中写道:

吾兄冲斗先生,少探六艺之蕴,壮怀三箭之勋,其於武库之属种种长技,无不抉微洞秘,目无全牛。初以母老不愿仕,多聘俱弗就。嗣年六十二,始应天津李开府召,幡然而改,稍稍露其半豹^[5]。

《皇明李忠文先生集》收录了明代大臣李邦华的奏疏,《皇明李忠文先生集·卷之三·抚津茶言·到任疏》中记载明天启二年(1622年)李邦华赴任天津巡抚,《皇明李忠文先生集·卷之三·抚津茶言·条陈兵政疏》中记载在同一年,程宗猷赴天津从军的义举^[6]。结合《射史·射史小叙》《皇明李忠文先生集·卷之三·抚津茶言·到任疏》《皇明李忠文先生集·卷之三·抚津茶言·条陈兵政疏》,可推测明天启二年(1622年)李邦华赴任天津巡抚时,程宗猷62岁。中国人向来使用虚岁^[7]。可推测程宗猷出生于1561年,1621年《耕余剩技》发行时程宗猷60岁。

从《耕余剩技·蹶张心法·蹶张心法自序》中可知,程宗猷从寿春(今安徽省寿县^[8])当地人手中购买一具古铜弩机,利用这具古铜弩机制造腰开弩,之后效法这具古铜弩机制造小弩机,利用小弩机制造蹶张弩^[2]。

程宗猷在《耕余剩技·蹶张心法·古铜大弩机说》中,坦荡地提出射弩疑问:

余复去田盘,制有扣之箭,入弦试之,箭非抡高,则打翻而落,且去不远。岂随弦括去之力,不如离弦击去之力之强耶?盖余但得古机,未见古弩入扣之法,不得其妙,古人谅有奇制,余故揭出,以俟博洽君子,复此不逮也^[2]。

程宗猷60岁时仍未找到导致这一现象的原因,希望以后有学识广博的人找到导致这一现象的原因。400多年以后,笔者通过调查傈僳族传统弩,建

立等效模型进行力学分析,找到了导致这一现象的原因。本文解答《耕余剩技·蹶张心法·古铜大弩机说》中程宗猷射弩问题。

1 《耕余剩技·蹶张心法》内容研究

弩曾经在军事中有较高的重要性。在实战中,汉代对弩很重视^[9]。典型的汉代金属弩机安装在弩身后部,零件包括牙、钩心、悬刀、枢轴、郭。望山在牙后,望山、两牙下部连为一体。钩心置于牙前,其后分为两齿,两齿夹住两牙下部连接处,下齿可嵌入悬刀凹口。使用时,先拉弦触动望山,牙上升,两牙下部连接处抬起钩心上齿,钩心下齿嵌入悬刀凹口,使弩机关锁,牙挂住弦。然后把箭置于弩身顶部箭槽内。最后扳动悬刀,牙、钩心摆动,撒放牙挂住的弦,把箭射出^[10]。典型的汉代金属弩机有3个需要活动的零件,牙、钩心、悬刀。

宋代新发明层出不穷^[11]。《宋史·兵十一·器甲之制》中记载:

开庆元年,寿春府造筒木弩,与常弩明牙发不同,箭置筒内甚稳,尤便夜中施发。又造突火枪,以钜竹为筒,内安子窠,如烧放,焰绝然后子窠发出,如砲声,远闻百五十余步^[12]。

南宋开庆元年(1259年)制造的突火枪,是已知较早的管形射击火器。管形射击火器出现后,弩在军事中的重要性下降。

《耕余剩技·蹶张心法·古铜弩机说》中写道:

古机前有牙,后有规。规有纹,以准远近。外有郭,以为总司。千斤之弩,挂於一寸之牙,发於半指之力,其妙无以加矣。自古弩废,今虽有其机,亦仅存於博古家为鉴玩之具^[2]。

意思是:古代弩机前面有牙,后面有规(望山)。规(望山)上有纹路,来瞄准远处近处。外面有郭,作为总的承担。拉力千斤的弩,挂在一寸的牙上,用半指的力量触发,这样的精妙无法增加了。自从古代弩废弃,现在虽然存在古代弩机,也仅存于博古家中作为鉴赏和把玩的器具。

《耕余剩技·蹶张心法·改古新制铜弩机说》中写道:

今四方擅弩之地,而皆不用古机,惟以鹿角为机。如弩弦粗大,一入角机,则滚出弦逃。如弦细小,则机拨而弦不发。余故师古式,制小机^[2]。

意思是:如今各处擅长用弩的地方,却都不用古代弩机,只用鹿角制造弩机。如果弩弦太粗大,一旦进入鹿角弩机,弦就滚出弩机逃离。如果弦太细小,

那么拨动弩机却不能撒放弦。我因此学习古代弩机,制造小弩机。

从中可知,明代弩一般不使用金属弩机,金属弩机只作为古玩。明代往往用鹿角制造弩机,明代鹿角弩机对弦的粗细敏感,弦太粗、太细,都会导致故障。

《耕余剩技·蹶张心法·蹶张弩说》中写道:

其弩上弦,只余五寸至机,箭发只有五寸之力^[2]蹶张心法,蹶张弩说。

意思是:那弩上弦,弦只剩下五寸到弩机,箭发射只有五寸的力气。蹶张弩如图1。

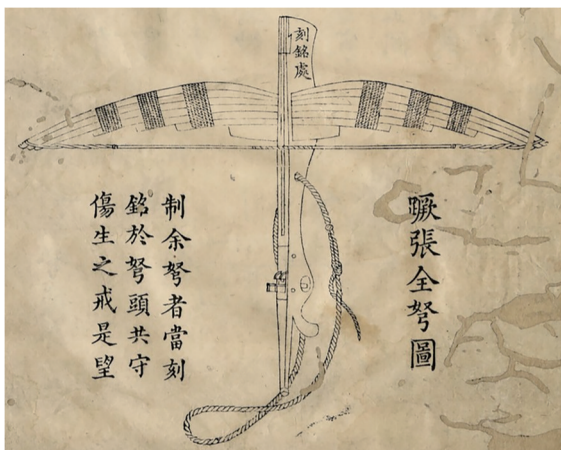


图1 蹶张弩^[2]蹶张心法,蹶张全弩图

Figure 1 Foot-operated crossbow^[2]蹶张心法,蹶张全弩图

《耕余剩技·蹶张心法·造弩身尺寸说》描写了蹶张弩的弩身尺寸。明代营造尺长32 cm^[13]。根据明嘉靖牙尺(图2),明代营造尺一尺十寸,一寸十分^[14]³⁴。

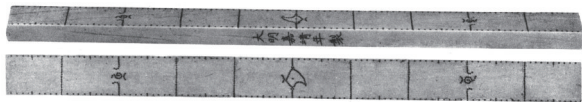


图2 明嘉靖牙尺^[14]³⁵

Figure 2 Ming Jiajing ivory ruler^[14]³⁵

《耕余剩技·蹶张心法·造弩身尺寸说》中写道:

箭槽尽处离机钩一寸四分,名曰田盘^[2]蹶张心法,造弩身尺寸说。

意思是:箭槽尽头处距离弩机的钩(牙)一寸四分,名叫田盘。

从中可知,撒放后,弦中点向前移动距离五寸,弦中点先移动一寸四分到达田盘,弦中点才接触箭。也就是说,撒放后,弦中点向前移动距离五寸,其中弦中点空跑距离一寸四分。巨大的弦中点空跑距离是否会白白浪费能量,引起了笔者的疑惑。

《耕余剩技·蹶张心法·削弩箭说》描写了制造蹶

张弩的弩箭的工艺。《耕余剩技·蹶张心法·削弩箭说》中写道:

箭头斜削三刀,毋大锐,此常射禽用也,临敌必用铁簇。箭尾要齐,齐处当半破开寸许,将翎夹入。其翎用金竹或桂竹笋箨薄者,一正一反,为阴阳翎。苗竹笋箨厚硬,箨叶焦脆,皆不堪用。安翎后开处,当用麻扎^[2]蹶张心法,削弩箭说。

意思是:箭杆头部斜削三刀,不要太锐利,这种箭常用来射鸟类,面对敌人必须用铁箭头。箭尾要平齐,平齐的地方应当从中间劈开约一寸,把箭羽夹入。那箭羽用薄的金竹(*Phyllostachys sulphurea*)^[15]²⁵¹或者桂竹(*Phyllostachys bambusoides*)^[15]²⁹²的笋箨,一正一反,制造阴阳翎。毛竹(*Phyllostachys heterocycla* cv. *Pubescens*)^[15]²⁷⁴^[16]的笋箨厚硬,箨竹(*Indocalamus tessellatus*)^[15]⁶⁸⁹的叶焦脆,都不能用。安装箭羽后箭杆劈开的地方,应当用麻纤维捆扎。

《耕余剩技·蹶张心法·古铜弩机分寸说》描写了程宗猷从寿春当地人手中购买的古铜弩机的尺寸。《耕余剩技·蹶张心法·古铜弩机分寸说》中写道:

匣长三寸四分,阔一寸,高九分^[2]蹶张心法,古铜弩机分寸说。

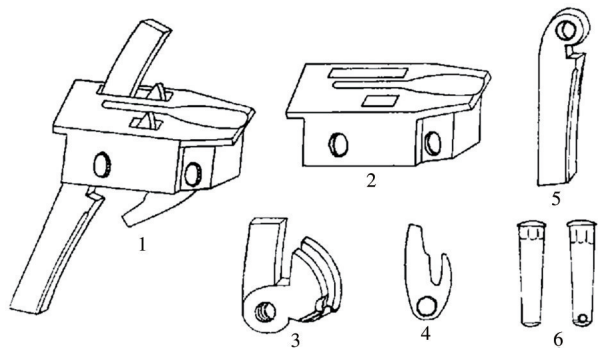
意思是:匣(郭)长三寸四分,宽一寸,高九分。古铜弩机如图3。

1957—1958年,中国科学院考古研究所洛阳发掘队在洛阳市西郊先后清理了西周、战国、汉、晋、唐、宋各时期的墓葬400余座,两汉墓葬占半数以上,时间包括西汉中叶至东汉晚期这一阶段。在西汉晚期墓葬(墓8014)中发现1件尺寸较大的铜弩机(图4)。郭顶部前端呈斜肩形,郭顶部有箭槽,箭槽延伸到牙后方。郭长9.6 cm,前端宽1.8 cm,后端宽2.9 cm,高2.9 cm。枢轴一端呈帽状,另一端有圆孔^[17]。其形制与程宗猷从寿春当地人手中购买的古铜弩机相似,程宗猷从寿春当地人手中购买的古铜弩机是西汉形制。

《耕余剩技·蹶张心法·古铜大弩机说》全文:

此旧制大弩原机也,余以之制腰开之强弩,射颇准而有力。然犹效今弩之存田盘,安箭离弦寸余,使弦远击箭尾而发者也。然机上有一槽,直至挂口,必古时以有扣之箭,插入弩弦而发者。余复去田盘,制有扣之箭,入弦试之,箭非抢高,则打翻而落,且去不远。岂随弦括去之力,不如离弦击去之力之强耶?盖余但得古机,未见古弩入扣之法,不得其妙,古人谅有奇制,余故揭出,以俟博洽君子,复此不逮也^[2]蹶张心法,古铜大弩机说。

意思是:这是从前制造的大弩原来的弩机,我用

图3 古铜弩机^[2]照张心法,古铜弩机全图^[2]照张心法,古铜弩机散图Figure 3 Ancient copper crossbow mechanism^[2]照张心法,古铜弩机全图^[2]照张心法,古铜弩机散图图4 铜弩机^[17]

1. 弩机全形 2. 郭 3. 牙 4. 钩心 5. 悬刀 6. 枢轴

Figure 4 Copper crossbow mechanism^[17]

1. Complete crossbow mechanism 2. Frame 3. Tooth 4. Catch 5. Trigger 6. Pivot

它制造腰开的强弩,射弩很准并且有力。然而还仿效现在的弩存在田盘,离弦一寸多安放箭,使弦远距离撞击箭尾发射。然而古代弩机顶部有一个槽,直到挂口(牙),必然古代用有扣弦处的箭,插入弩弦发射。我又去掉田盘,制造有扣弦处的箭,插入弦试射,箭不是冲向高处,就是翻滚落下,并且射出距离不远。难道箭尾跟随弦射出的力气,不如弦离开箭打击箭射出的力气强吗?大概我只得到古代弩机,没有见过古代弩弦插入扣弦处的方法,没有得到其中的精妙,古人料想有奇特的形制,我因此揭露出来等待学识广博的君子,回复这个不足之处。

1980年12月,在秦始皇陵封土西侧的一陪葬坑的试掘方内,出土了两乘大型彩绘铜车马,制造时间大致为公元前221—前210年^{[18]1,375}。铜马车的尺寸为当时实用车辆的二分之一^[19]。一号铜车马包括完整的铜弩1件(图5)。弩身通长39.5 cm,顶部有一纵长的箭槽,箭槽延伸到牙后方,箭槽长31.2 cm。弦亦为铜制,弦曲线长71.6 cm,水平长68 cm,直径

0.3~0.4 cm。一号铜车马包括66支铜箭,可分为两型(图6)。I型62支,通长35.2 cm,箭头四棱形,箭末端有凹口,凹口深0.6 cm,宽0.3 cm。II型4支,通长34.7 cm,箭头平头无锋,箭末端有凹口,凹口深0.6 cm,宽0.3 cm^{[18]107-110,115,121}。两型箭末端都有凹口,凹口宽度接近弦直径。由此可见,箭末端凹口是扣弦处。

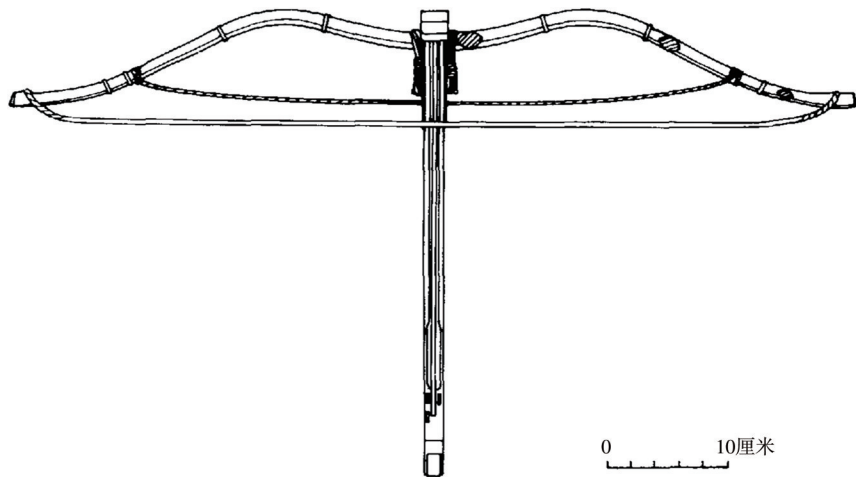
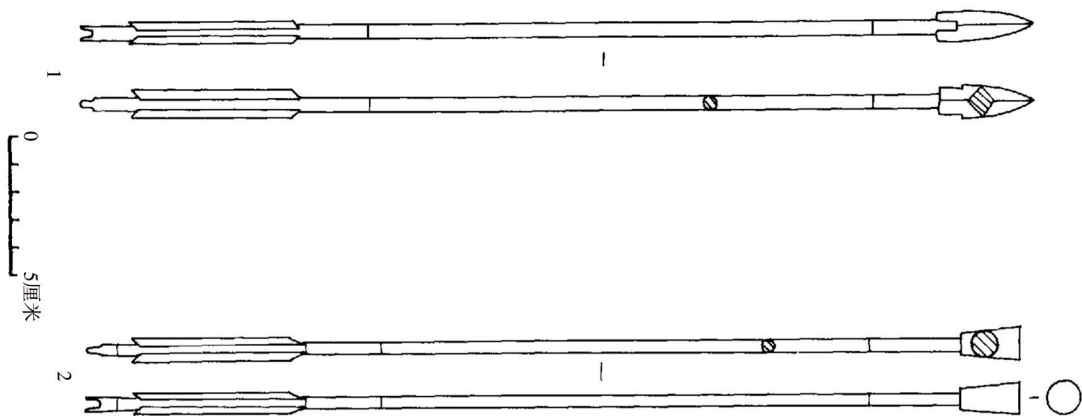
程宗猷的猜测“必古时以有扣之箭,插入弩弦而发者”成立。秦汉弩的箭槽往往延伸到牙后方,明代弩的箭槽往往在牙前方,并且箭槽到牙距离远。秦汉弩箭往往有扣弦处,明代弩箭往往没有扣弦处。

把箭置于靠近弦中点的位置,撒放后,弦中点立即推动箭,笔者将其视为弦推箭射法。故意把箭置于弦中点前一段距离,撒放后,弦中点先向前移动一段距离,弦中点才接触箭,弦中点猛烈撞击箭,笔者将其视为弦撞箭射法,其特点是,撒放后,有巨大的弦中点空跑距离。笔者根据把箭射出的方式,把射箭方法明确区分为弦推箭射法、弦撞箭射法。仪德刚、张柏春观察到瑶族传统弩的箭槽到扳机有一段距离,没有明确区分弦推箭射法、弦撞箭射法^[20]。

秦汉时期弩往往采用弦推箭射法,明代弩往往采用弦撞箭射法。程宗猷为了探究弦撞箭射法、弦推箭射法的区别,主动改变把箭射出的方式,没有主动改变其他条件,通过对比实验,观察到弦推箭射法射程短于弦撞箭射法射程。看来弦撞箭射法巨大的弦中点空跑距离并不会白白浪费能量,加深了笔者的疑惑。程宗猷60岁时仍未找到导致这一现象的原因,希望以后有学识广博的人找到导致这一现象的原因。程宗猷提出的射弩疑问多年悬而未决。

2 傈僳族传统弩调查

由于各民族的社会条件不同,历史发展有快有

图5 一号车铜弩^{[18]108}Figure 5 Copper crossbow of chariot number one^{[18]108}图6 一号车铜箭^{[18]124}

1. I 型 2. II 型

Figure 6 Copper arrows of chariot number one^{[18]124}

1. Type I 2. Type II

慢。民族学资料无疑对解释和研究文物的制作技术、使用方法及各种文化艺术品的内涵是有助益的^[21]。笔者带着疑惑调查民族传统弩。傈僳族以善用弩弓和射技精而著称^[22]。中华人民共和国成立前,杂居在内地及聚居在怒江地区的傈僳族都以农业生产为主,采集和狩猎作为农闲期间或季节性的生产补充手段,怒江傈僳族几乎“家家有渔网,户户有弩弓”^[23]。中国境外傈僳族大部分认同来自中国西部的历史,由于与中华民族有着深厚的历史渊源,中国境外傈僳族也被视为华人^[24]。

《唐书·艺文志第四十八》中记载:

樊绰蛮书十卷,咸通中岭南西道节度使蔡袭从事^[25]。

唐代《蛮书·卷第四·名类第四》中记载:

栗粟两姓蛮、雷蛮、梦蛮,皆在茫部台登城东西

散居,皆乌蛮、白蛮之种族^[26]。

这是已知较早的傈僳族记载,傈僳族自古以来就在中国生活。

明代《云南图经志书·卷之四·北胜州·风俗》中记载:

巢处山林,有名栗粟者,亦罗罗之别种也。居山林,无室屋,不事产业,常带药箭弓弩,猎取禽兽。其妇人则掘取草木之根,以给日食。岁输官者,惟皮张耳^[27]。

这是已知较早的傈僳族使用弩的记载,傈僳族使用弩的历史悠久。

传承至今的傈僳族传统弩,往往采用弦撞箭射法,其中的极端情况,撒放后,弦中点空跑距离甚至占弦中点向前移动距离一半以上。2025年2月,笔者在云南省怒江傈僳族自治州收集的傈僳族传统弩

(图7)是这种极端情况,质量1.3 kg。弩担用木材制造,长102 cm,宽5.2 cm,厚2.4 cm。弩身用木材制造,长84 cm,宽7.1 cm,厚2.0 cm。弩机包括牙、悬刀、枢轴,牙、悬刀用兽骨制造,枢轴用铁钉制造。弦用化学纤维线制造,弦中段4.4 cm缠绕植物纤维线。弦中点到牙挂弦处19 cm,箭槽到牙挂弦处11 cm。



图7 傈僳族传统弩

Figure 7 Lisu traditional crossbow

2024年9月,笔者在云南省怒江傈僳族自治州收集的傈僳族传统弩箭(图8),质量7.1 g,长40 cm,质心到前端21 cm。箭杆用竹材制造,直径0.5 cm,箭杆头部呈三棱锥状,没有单独的箭头,箭羽用竹篾折成,竹篾厚度0.5 mm,箭杆尾部劈开夹住箭羽,箭杆尾部用植物纤维线扎紧,没有扣弦处。这支弩箭的箭杆,与《耕余剩技·蹶张心法·削弩箭说》中描写的相似。

傈僳族传统弩使用时,先拉弦到牙挂弦处,牙挂住弦,悬刀后部下降。然后把箭置于弩身顶部箭槽内。最后扳动悬刀,悬刀后部抬起顶弦,撒放牙挂住的弦,把箭射出。傈僳族传统弩机只有1个需要活

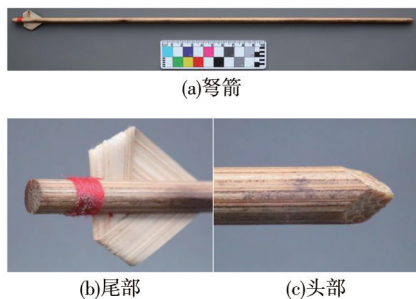


图8 傈僳族传统弩箭

Figure 8 Lisu traditional crossbow arrow

动的零件,悬刀。

2024年9月,笔者在云南省怒江傈僳族自治州收集的傈僳族传统弩机(图9)。牙用兽骨制造,质量11.2 g,长5.8 cm,宽1.6 cm,高0.9 cm。悬刀用兽骨制造,质量7.8 g,长6.3 cm,宽1.5 cm,厚0.5 cm。枢轴用竹材制造,质量0.1 g,长1.6 cm,直径0.3 cm。



图9 傈僳族传统弩机

Figure 9 Lisu traditional crossbow mechanism

傈僳族传统弩机的牙、悬刀用兽骨制造^{[28]33}。傈僳族传统弩弦太粗会滑出弩机,太细难以把箭射出^{[28]48-49}。傈僳族传统弩机对弦的粗细敏感,弦太粗、太细,都会导致故障。傈僳族传统弩机的制造材料、常见故障,与《耕余剩技·蹶张心法·改古新制铜弩机说》中描写的明代鹿角弩机相似。

3 弦撞箭射法与弦推箭射法力学分析

为了便于分析弦撞箭射法,进而清晰地揭示弦撞箭射法原理,笔者建立力学分析模型。假设弩担是2个长方体物块,长方体物块的质量集中在其几何中心,这2个长方体物块绕其根部铰链摆动会储存或释放弹性势能。假设箭是1个长方体物块,长方体物块的质量集中在其几何中心。弩担质量 m_1 ,箭质量 m_2 。弦是轻绳,弦撞箭为完全弹性碰撞。开弩储存的势能可全部转化为动能,弩担前方有阻尼板,弩撞撞阻尼板时,弩担动能转化为内能耗散。笔者绘制了弦撞箭射法示意图(图10)。开弩后(图10(a)),弩担、弦围成菱形。撒放后,弦中点向前移动距离为弩担几何中心向前移动距离的4倍。弦即将绷直时,弦即将撞箭,此时开弩储存的势能几乎全部转化为弩担动能,弩担几何中心速度为 v_1 ,弦中点速度为弩担几何中心速度的4倍。弦撞箭如图10(b),弦撞箭后,弩担几何中心速度为 v'_1 ,箭速度为 v'_2 。

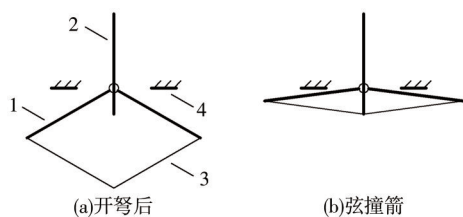


图10 弦撞箭射法示意图

1. 弩担 2. 箭 3. 弦 4. 阻尼板

Figure 10 Diagram of string hitting arrow shooting method

1. Crossbow limb 2. Arrow 3. String 4. Damping plate

为了求弦撞箭后弩担几何中心速度 v'_1 、箭速度 v'_2 ,笔者建立等效模型。把弩担、箭等效成小物块,把弦等效成轻质杠杆。笔者绘制了弦撞箭等效模型示意图(图11)。弩担到杠杆支点的距离为 r ,箭到杠杆支点的距离为 $4r$ 。

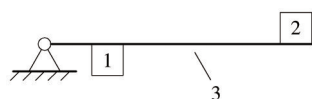


图11 弦撞箭等效模型示意图

1. 弩担 2. 箭 3. 弦

Figure 11 Diagram of equivalent model of string hitting arrow

1. Crossbow limb 2. Arrow 3. String

由能量守恒定律得式(1),由角动量守恒定律得式(2),联立式(1)(2),求弦撞箭后弩担几何中心速度 v'_1 、箭速度 v'_2 。

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \quad (1)$$

$$r m_1 v_1 = r m_1 v_1' + 4 r m_2 v_2' \quad (2)$$

由式(1)得

$$m_1 (v_1 + v_1') (v_1 - v_1') = m_2 v_2'^2 \quad (3)$$

由式(2)得

$$m_1 (v_1 - v_1') = 4 m_2 v_2' \quad (4)$$

式(3)比式(4)得

$$v_1 + v_1' = \frac{1}{4} v_2' \quad (5)$$

联立式(4)(5)得

$$v_1' = \frac{m_1 v_1 - 16 m_2 v_1}{m_1 + 16 m_2} \quad (6)$$

$$v_2' = \frac{8 m_1 v_1}{m_1 + 16 m_2} \quad (7)$$

由式(6)得,当 $m_1 = 16 m_2$ 时, $v_1' = 0$,弦撞箭后弩担几何中心静止,弩担动能传递给箭的效率最高。弩担动能为0,箭动能几乎等于开弩储存的势能。

质量相等的箭,改用弦推箭射法,弦即将绷直时,箭即将离开弦,箭速度等于弦中点速度,此时弩担几何中心速度为 v_1'' ,弦中点速度为弩担几何中心速度的4倍,箭速度为 $4v_1''$ 。

弩担动能为

$$\frac{1}{2} m_1 v_1''^2 \quad (8)$$

箭动能为

$$\frac{1}{2} m_2 (4v_1'')^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{16} m_1 (4v_1'')^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1''^2 \quad (9)$$

由式(8)(9)得,弦即将绷直时,弩担动能等于箭动能。箭离开弦时,箭动能等于开弩储存的势能的一半。

4 结语

明代武术家程宗猷在他的著作《耕余剩技·蹶张心法·古铜大弩机说》中提出多年悬而未决的射弩问题。400多年以后,笔者为了解答程宗猷射弩问题,调查傈僳族传统弩,建立等效模型进行力学分析。

结合田野调查和力学分析可知,对于质量小的箭,采用弦撞箭射法,可以使开弩储存的势能转化为箭动能的效率较高,弦中点猛烈撞击箭时,弩担动能减小,箭动能增加,弩担动能传递给箭。质量相等的箭,改用弦推箭射法,开弩储存的势能转化为箭动能的效率较低,弦绷直时,箭离开弦,此时弩担动能无法传递给箭,弩担动能转化为内能耗散。

原来,采用弦撞箭射法时,在弦中点空跑过程

中,开弩储存的势能转化为弩担动能,弦中点猛烈撞击箭时,弩担动能传递给箭,巨大的弦中点空跑距离是弦撞箭射法必需的。弦撞箭射法巨大的弦中点空跑距离并不会白白浪费能量,消除了笔者对巨大的弦中点空跑距离的疑惑。程宗猷在《耕余剩技·蹶张心法·古铜大弩机说》中,使用的箭质量小,其质量适合弦撞箭射法,改用弦推箭射法,开弩储存的势能转化为箭动能的效率降低,箭动能降低,射程缩短,这就是程宗猷观察到弦推箭射法射程短于弦撞箭射法射程的原因。

与弦推箭射法相比,弦撞箭射法有其独特的优点:

箭初速提高,在一定距离上,箭飞行时间缩短,风速、重力加速度等环境因素对箭道的影响减小,射箭精度提高^[29];

适用的箭尺寸小、速度快,敌人或猎物难以看到箭飞行轨迹,难以躲闪;

适用的箭质量小,可携带箭的数量增加;

制造适用的箭需要的材料少,成本低。

在人类历史进程中,弓箭对人类生存和发展有过重要的影响,渗透在政治、经济、军事、文化、科技、教育等诸多领域^[30-31]。弩从弓发展而来^[10]。传统弓采用弦推箭射法,秦汉时期弩往往采用继承自弓的弦推箭射法。明代弩往往采用弦撞箭射法,弦撞箭射法是区别于更早出现的弦推箭射法的射箭方法,其特点是,撒放后,有巨大的弦中点空跑距离,适用的箭质量小。弦撞箭射法这一发明,是古代中华民族在长期实践中取得的重要科技成就,是宝贵的非物质文化遗产精髓。

笔者根据把箭射出的方式,把射箭方法明确区分为弦推箭射法、弦撞箭射法。笔者通过探求弦撞箭射法独特的优点,丰富了射箭的文化内涵。

致谢:感谢东华大学仪德刚教授对本文提出的诸多宝贵修改意见。特此致谢!

参考文献:

- [1] 大辞海编辑委员会.大辞海:体育卷[M].上海:上海辞书出版社,2008:391.
- [2] 程宗猷.耕余剩技[M].刻本.绍兴:绍兴图书馆,1621.
- [3] 休宁县地方志编纂委员会.休宁县志[M].合肥:安徽教育出版社,1990:41.
- [4] 周伟良.武魂壮豪情《耕余》彪千秋:程宗猷和他的《耕余剩技》[J].体育文史,1985(04):17-20.
- [5] 程宗猷.射史[M].刻本.北京:中国国家图书馆,1629.

- [6] 李邦华.皇明李忠文先生集[M].刻本.东京:国立公文书馆,1726.
- [7] 赵宪卿.实足年龄推算法[M].北平:北平文化学社,1935:3.
- [8] 寿县地方志编纂委员会.寿县志[M].合肥:黄山书社,1996:36.
- [9] 孙机.汉代物质文化资料图说[M].北京:文物出版社,1991:144.
- [10] 中国历史大辞典编纂委员会.中国历史大辞典[M].上海:上海辞书出版社,2000:2016.
- [11] 王鸿生.科学技术史[M].北京:中国人民大学出版社,2011:84.
- [12] 脱脱.宋史:兵十一,器甲之制[M].刻本.北京:中国国家图书馆,1480.
- [13] 丘光明.中国历代度量衡考[M].北京:科学出版社,1992:104.
- [14] 国家计量总局,中国历史博物馆,故宫博物院.中国古代度量衡图集[M].北京:文物出版社,1984.
- [15] 中国科学院中国植物志编辑委员会.中国植物志:第九卷,第一分册[M].北京:科学出版社,1996.
- [16] 郭起荣,杨光耀,杜天真,等.毛竹学名百年之争[J].世界竹藤通讯,2006,4(01):18-20. DOI:10.13640/j.cnki.wbr.2006.01.005.
- [17] 陈久恒,叶小燕.洛阳西郊汉墓发掘报告[J].考古学报,1963(2):1-58.
- [18] 秦始皇兵马俑博物馆,陕西省考古研究所.秦始皇陵铜车马发掘报告[M].北京:文物出版社,1998.
- [19] 杨欢.秦陵出土青铜马车制作比例研究[J].秦始皇帝陵博物院,2017:357-364.
- [20] 仪德刚,张柏春.广西巴马县瑶族制弩方法的调查[J].中国科技史料,2003,24(1):80-89. DOI:10.3969/j.issn.1673-1441.2003.01.010.
- [21] 王恒杰,张雪慧.民族考古学基础[M].北京:中央民族大学出版社,1999:10.
- [22] 云南省地方志编纂委员会.云南省志:卷七十二,体育志[M].昆明:云南人民出版社,1994:38.
- [23] 傈僳族简史编写组.傈僳族简史[M].昆明:云南人民出版社,1983:88.
- [24] 李贵明.追赶太阳的民族:傈僳族[N].人民日报海外版,2017-06-10(7).
- [25] 欧阳修.唐书:艺文志第四十八[M].刻本.北京:中国国家图书馆,1739.
- [26] 樊绰.蛮书:卷第四,名类第四[M].刻本.武英殿聚珍版.北京:中国国家图书馆,1774.
- [27] 陈文.云南图经志书:卷之四,北胜州,风俗[M].刻本.北京:中国国家图书馆,1455.
- [28] 李自强,胡耀辉,周健华.傈僳族弩弓文化[M].昆明:云南民族出版社,2019.

- [29] 中国国家体育总局. 射箭[M]. 北京:人民体育出版社,2001: 502-503. 1000-0224.2024.1.zrkxxyj202401002.
- [30] 张中原,仪德刚.吐鲁番洋海弓箭分类研究[J]. 自然科学史研究,2024, 43(1): 15-30. DOI:10.3969/j.issn. 1000-0224.2024.1.zrkxxyj202401002.
- [31] 张中原,仪德刚.吐鲁番洋海复合弓的技术演进[J]. 东华大学学报(社会科学版),2025, 25(2): 74-87. DOI:10.19883/j.1009-9034.2025.0056.



冯卓群,男,1994年生,山西吕梁交城人,初级社会体育指导员,硕士毕业于南京航空航天大学,获工程硕士学位,研究方向为航空工程。Email:632543486@qq.com



王尤迪,女,1995年生,新疆伊犁察布查尔人,中级教师,硕士毕业于南京师范大学,获文学硕士学位,研究方向为中国语言文学。Email:2393886754@qq.com

(责任编辑:彭 鹏)