

春秋至汉代中凹轮结构与功能研究

王娜娜^{1,2} 罗丰²

(1. 西北大学丝绸之路考古合作研究中心, 陕西 西安 710127;

2. 西北大学文化遗产学院, 陕西 西安 710127)

摘要: 马车的车轮是古代车辆结构中最能体现技术水平的机械构件。考古材料可见从中国春秋时期开始就出现了一种较为特殊的辐条车轮——中凹轮, 其结构特点引起了中外学者的研究兴趣, 但少有从结构力学的角度分析这一机械结构的功能特征。本研究采用了结构力学的分析方法对中凹轮的组成构件进行受力分析, 结果表明了中凹轮的结构在防止车轮倾斜和提高转动效率方面具有重要作用, 验证了夹辅是如何对中凹轮发挥辅助支撑作用的。中凹轮结构功能的正确认识为研究古代车辆的结构性能提供了新参考。

关键词: 中凹轮 辐条 夹辅 力学分析

Abstract: The wheel of a chariot is the mechanical component that best reflects the technological level of ancient vehicles. Archaeological evidence shows that a distinctive type of spoked wheel, known as the concave-spoked wheel, appeared in China as early as the Spring and Autumn period. Its structural features have attracted scholarly attention both domestically and internationally, yet few studies have analysed its functional characteristics from a structural mechanics perspective. This study applies structural mechanics to analyse the stress on the constituent components of the concave-spoked wheel. The results indicate that the concave-spoked wheel structure plays a crucial role in preventing wheel tilt and improving rotational efficiency, and demonstrate how the jiafu (reinforcing braces) provide auxiliary support to its function. A correct understanding of the functional characteristics of the concave-spoked wheel offers a new reference for studying the structural performance of ancient vehicles.

Key words: Concave-spoked wheel; Spokes; Jiafu (reinforcing braces); structural mechanics analysis

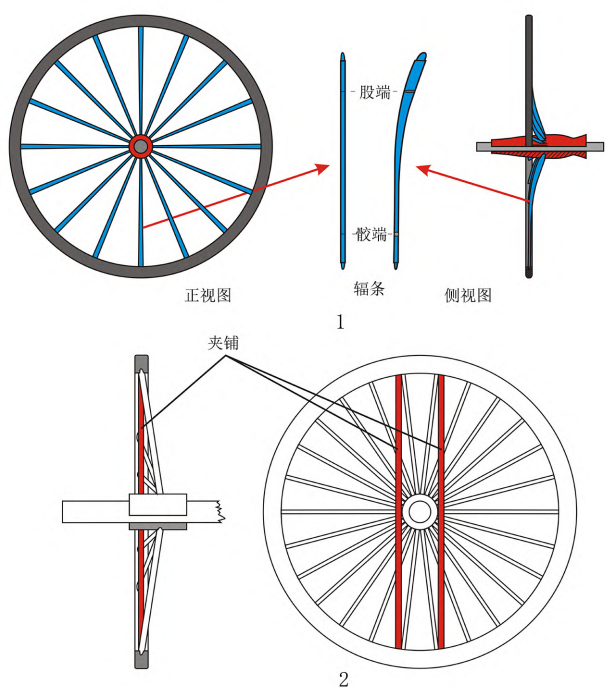
从春秋时期开始, 在中国考古材料中发现了一种工艺更加复杂的辐条车轮——中凹轮, 即辐条在接近轮毂的位置向一侧隆起, 使整个车轮呈现一种类似磁盘的形状, 这种车轮往往在外侧加有两根笔直且平行的木条, 并列在轮毂两侧, 似夹住轮毂, 支撑在轮辋的两端, 称作夹辅(图一)。学界对这种车轮的结构功能的讨论尚未达成统一意见, 需要在结构力学角度进行进一步地论证。

一、文献记载中的中凹轮

《周礼·考工记》中“眡其纁, 欲其蚤之正也”^[1]中的“纁”即表示轮中间隆起的样子, 为中凹轮。清代江永进一步解释了“纁”称为“轮筭”, “纁, 非别有一物也, 只是轮偏筭之名。……谓之轮筭何也?

轮牙稍偏于外, 而辐股向内隆起也”^[2]。“轮筭”是中国古代文献中对中凹轮的一个较为普遍的名称。这种在中国周代就已经出现的车轮结构, 直到公元15世纪, 才在欧洲开始出现^[3]。

古代学者在对早期的文献研究中, 探讨了中凹轮的结构功能。东汉郑玄为《周礼》作注时谈到“轮筭则车行不掉也”, 唐贾公彦疏曰: “止由轮有筭, 车不掉, 不掉则得轮之固也”^[4]。“掉”在这里的解释是左右摇晃, 意思是中凹轮可以避免车轮左右摇晃, 使车轮更加牢固。虽未做原理解释, 但较早地指出了中凹轮的结构功能。除此之外, 清代经学家江永也对此作出了解释: “假令……牙不稍偏向外, 则重势两平, 轮可掉向外, 又可掉向内。造车者深明此理, 欲去车掉之病, 令牙稍出三分寸之二, 不正与



图一 中凹轮结构示意图

1. 根据长沙 203 号汉墓 2 号车车轮绘制 2. 根据辉县琉璃阁 131 号战国车马坑第 16 号车车轮绘制

轮凿相当，于是重势稍偏，而轮不得掉向内矣。”^[5]这种解释又进一步解释了车轮摇晃的原因，认为中凹轮的轮辋向外侧偏，可以避免车轮向内侧移动，从而避免车轮摇晃。

古代学者比早期车辆的使用要晚几百到一千多年，对其结构的研究基于早期文献的记载，再结合自己对同时代车辆的观察。对早期实物车辆的观察和使用的缺失对其研究有重要的影响。

自 1950 年代开始，中国考古学得到快速发展，大量春秋至汉代的车辆被发现，随之就发现了中凹轮的证据。但是学者们对其功能的解读却更加多样化。郭宝钧认为中凹轮在车体倾斜时可以增加车轮支撑力^[6]。王振铎说中凹轮的设计是为了给夹辅贯穿轮辋两端提供空间，避免将轮辋加宽而采取的一种辐条的装配方式^[7]。孙机认为中凹轮会产生内倾力，使车轮不易外脱，而且在凹凸不平的路面上，可以对车身倾斜起到调剂作用^[8]。扬之水认为中凹轮的作用是增加车轮对侧向推力的反抗力，从而使辐条更牢固地推进轮辋和毂的榫眼里去^[9]。近代的车轮匠斯特尔特（George Sturt）从车行驶时的车辙形状和车轮摇摆情况的分析中得出结论，认为中凹轮应是为对抗在马匹行走过程中对车轮产生的侧向力而设计的

^[10]。物理学家史四维（André Wegener Sleeswyk）从机械角度分析，指出中凹轮能够抵抗侧向力的性能^[11]。

本研究针对中凹轮的技术性能问题，以春秋至汉代发现的中凹轮实体车辆和车辆模型为研究对象，将车轮与车辆的其他结构部件相结合进行分析，采用现代结构力学理论和分析方法，对中凹轮的支撑能力、对抗侧向力以及辅助构件对其技术性能的补偿作用等方面展开讨论，以期探讨春秋至汉代中凹轮的机械技术原理和工作性能等问题。

二、中凹轮的考古发现

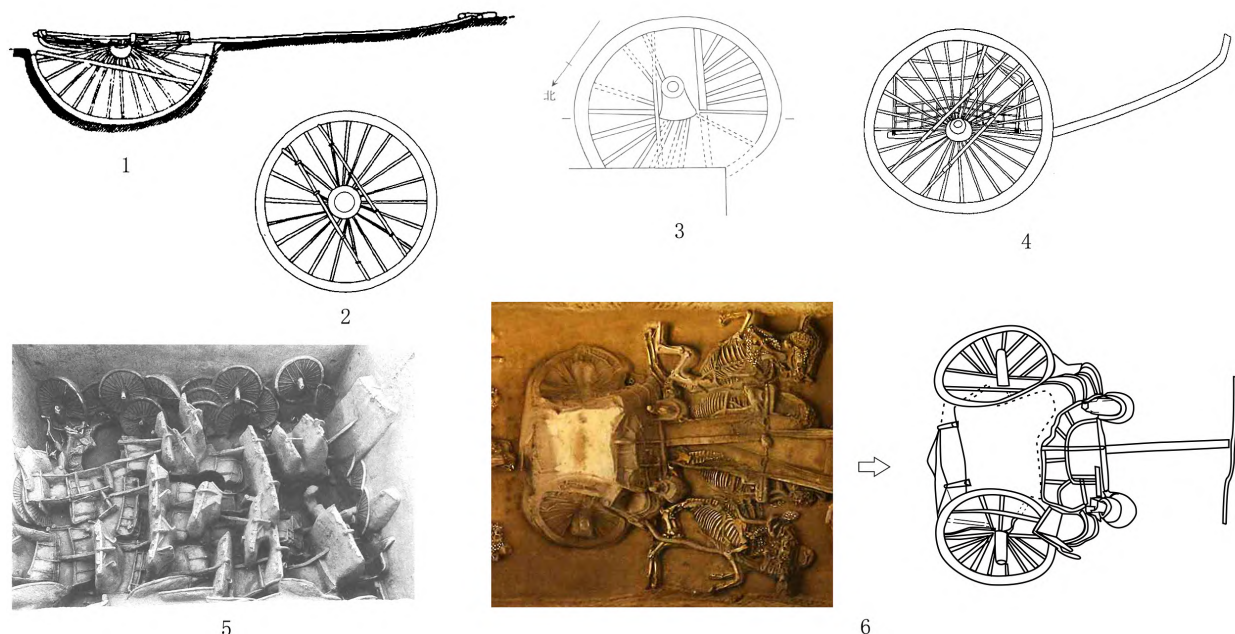
明确的中凹轮结构在古代车辆的考古发现中并不多见，主要原因可能是木质车轮的腐朽程度较高，加之墓室的坍塌或挤压等原因，导致车体严重变形，辐条轻微隆起的特征较难确认。1950 年，辉县琉璃阁战国车马坑的发掘，首次发现了车轮的中凹结构，与之一起发现的还有轮外侧的夹辅。这两根连接轮辋两端的直木因车轮的中凹结构得以安装，因此，夹辅也可成为中凹轮的指向性结构特征。鉴于此，本研究在确认中凹轮结构材料时参考了这一特征，除了确实具有中凹轮结构的木车模型材料，还选取了带有夹辅的中凹轮实体车材料，结合两种材料的不同优势，复原中凹轮的基础结构特征。

（一）实体车材料（实用器）

1950 年，位于河南省辉县琉璃阁的战国车马坑开始发掘，在此次发掘中夏鼐等人首次成功剥离出木质已经完全腐朽的古代实体车。在对保存较好的第 16 号车进行清理时发现，车轮除了 26 根辐条，还有两根笔直的木条，相互平行，夹住车毂，直抵轮辋两端，发掘者称这两根木条为夹辅。而辐条则在夹辅后面，斜向插入轮毂之中，呈中凹的碟盆状，具有类似结构的还有第 2、3、7、12 ~ 15 号车^[12]。发掘者推测坑中其他车辆中也可能存在这种辐条的安装形式。

鉴于夹辅是两根笔直的长木条，要通过轮毂两侧安装在轮辋上，必然需要辐条在接近轮毂的位置向一侧倾斜或弯曲来提供空间，因此，对于变形严重的车轮实体，通过夹辅来判断是否是中凹轮结构就变得更加简单。

1989 年，湖北宜城战国车马坑中出土了 7 辆马车，第 4 号车保存状况较好（战国中晚期，公元前 3



图二 带有夹辅的战车和车轮

1. 湖北宣城罗岗 M1CH:4 号车 2. 山东临淄区淄河店 M2:1 号车车轮 3. 山东淄博隽山 2014ZJM1: 车轮 4. 临猗程村 M1076 的车 5. 新郑郑韩故城 1 号车马坑全景 6. 行唐故郡 CMK2:4

世纪), 车轮虽上半部分无存, 但埋入轮槽中的下半部结构清楚, 清晰可见一对夹辅^[13](图二, 1)。2001 年, 郑韩故城——新郑发现的春秋时期车马坑中, 也有很多带有夹辅的车轮^[14](图二, 5)。河北行唐故郡战国早期二号车马坑中的 4 号车车轮上也可见夹辅一对^[15](图二, 6), 发表信息中只提到了车轮的直径约为 1.4 米。2014 年山东临淄隽山战国墓中也出土一个带有夹辅的车轮, 据发掘报告称, 这对夹辅是以革带绑缚于辐条上来固定的^[16](图二, 3)。在距其不远的淄河店二号战国墓中也发现了带有夹辅的车轮(战国早期)。报告中对夹辅的描述非常详细, 两根夹辅是由两端略窄、中间宽的扁平木条构成, 中间与车辐平行相交, 两端略长, 并呈三角状, 紧贴轮辋的内缘, 夹辅用革带紧缚于车辐上, 两端紧抵轮辋, 非常坚固^[17](图二, 2)。

山西临猗程村春秋车马坑 M1076 号中的车也有带夹辅的车轮。且夹辅也是两端较细, 中间较粗, 更为特别的是, 制作夹辅的木条是由粗细两种木条拼接组合而成^[18], 接近轮辋部分截面 2 ~ 2.5 厘米, 中间部分的木条较宽, 为 3 厘米, 两种粗细的木条与其相接的辐条绑缚在一起(图二, 4)。这些具有夹辅的车轮应当都具有中凹型的车轮结构, 且夹辅

应是绑缚在辐条上的。除以上带有夹辅的中凹车轮或车轮资料外, 山东临淄南马坊墓地车马坑中也发现数辆带有夹辅的车轮, 因报告尚未发表, 在此仅汇总了已发表材料的实际尺寸, 见表一。

(二) 模型材料(明器)

1951 年, 长沙 203 号汉墓中出土 4 辆木车模型, 车体零件丰富, 细节刻画精致, 当是参照当时的实用车辆缩小比例后再制作。复原的 2 号车车轮具有中凹轮结构, 轮高 51 厘米, 每轮 16 根辐条, 辐条除去插入车毂和轮辋的部分长 21.2 厘米, 靠近轮辋的部位剖面为圆形, 直径 0.5 厘米, 靠近毂端约 10 厘米处开始弯曲, 且剖面渐变为椭圆形, 厚度缩至 0.3 厘米, 宽度增至 1 厘米, 辐条靠近毂的一端比靠近辋的一端要凸出 2.5 厘米^[19](图三, 1)。但研究者在绘制复原图时将辐条凸起的一端安装面向了外侧, 根据江苏沛县古泗水地区出土汉代画像石上所见之车的中凹车轮的图像, 可见辐条在车轮中央部分是向内部凸起的^[20](图三, 3)。因此, 应是复原过程中装反了。

在甘肃武威磨咀子 48 号汉墓中出土的木车模型上(图三, 2), 中凹轮的辐条即向车厢方向凸起, 一轮 16 辐, 从复原图可见, 辐条也是在接近毂处成

表一 中凹轮实物材料相关结构尺寸信息（单位：cm）

地点	时代	轮径	轴长	轨距	舆厢底	辐条		夹辅	
						近毂端	近辋端	固定方式	截面
山西临猗	春秋	137	290	195	130×98	1×4.2	1.5×2.8	与辐条绑缚	中间3，两端2~2.5
山东隽山	战国	134~138	—	—	—	？×5.5	直径2.5~3	与辐条绑缚	3
山东淄河店	战国	—	—	—	—	扁方形	圆柱形	与辐条绑缚	中间宽，两端窄
湖北宜城	战国	134	260	188	145×114	2×5	2×3	—	—
河南辉县	战国	130	236+	182	140×105	—	—	末端插入轮辋	1.8~2
河北行唐	战国	140	—	—	—	—	—	—	—

圆弧形逐渐隆起，形成中凹形状^[21]。这两座汉墓中的木车模型，虽然都是明器，但制作精致，清晰准确地再现了中凹轮在汉代的结构特征。从木车的尺寸比例来看，这两辆车都是车轮较大，舆厢较宽的车型。

三、中凹轮的力学分析

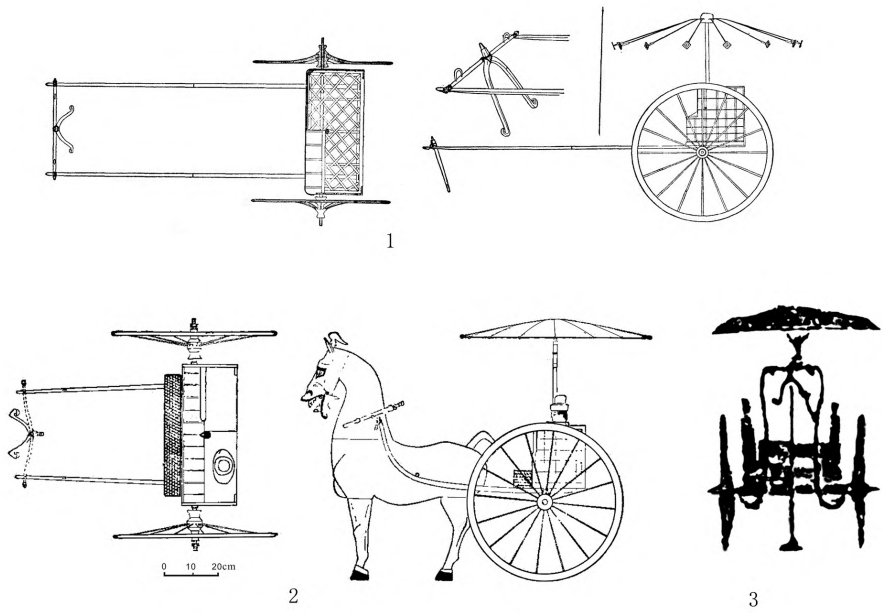
综合春秋战国时期中凹轮考古实物的尺寸信息，揭示中凹轮的整体和细节构件的结构特征。再结合与车轮紧密相关的车轴、车厢、夹辅等构件的特

征，明确车轮本身以及相关结构的信息，找出中凹轮车的整体结构特征。按照已发表信息综合尺寸和结构信息，如尺寸信息选取平均值，结构特征选取占据多数的结构特征，得出主要构件特征和尺寸如下：轮径135厘米，轴长275厘米，轨距188厘米，车舆宽138、深106厘米，车轴截面中间粗，两端细，辐条截面在近毂端宽而薄，在近辋端近圆形或方形，两根夹辅笔直，中间较粗，两端较细，而且除两端抵住或插入轮辋，中间还被绑缚在辐条上。

在此基础上，首先依据机械原理将车轴和车轮简化为力学模型，分别分析轮轴各部位的受力和变形情况，综合整体计算结果分析中凹轮的技术性能。

（一）轮与轴分析

在对轴建立分析之前，需要关注轴的基本特征和受力特征。基础特征是安装车轮的车轴末端并非水平的圆柱体结构，而是在末端逐渐变细的圆锥形结构，这使毂内侧与轴的接触面处于这一圆锥形下部的斜面上；受力特征是车轴在受到中间载重压力和两端车轮



图三 汉代中凹车轮

1. 根据长沙203号汉墓发掘报告绘制 2. 甘肃武威23号汉墓木车模型
3. 画像石上之车（显示轮轴构造）

表二 轴的最大变形挠度

	轨距	车厢宽	弹性模量（硬木）	总载重力	单点 载重力	轴直径	最大挠度
数值	1.88m	1.38m	$1.16 \times 10^{10} \text{N/m}^2$	2400N	800N	0.06m 0.07m 0.08m 0.09m	26.70mm 14.41mm 8.45mm 3.46mm

支撑力时，容易发生弯曲变形^[22]。将车轴与车轮看作简支梁集中荷载的力学模型，根据弯矩计算公式（P 为重力 G，L 为轨距长度）进行，假设车载三人，每人平均体重 75 千克，加上车厢重量估算为 20 千克，则轴上受到总压力约为 2400 牛，采用车体结构平均尺寸为参考，因缺少轴径的尺寸，所以选取常见的轴径进行计算，轴的材料选用硬木，弹性模量参考马祖等人^[23]选用参数，以此计算轴的最大变形挠度，结果见表二。由计算结果可知，车轴确实发生了变形，且变形的大小很大程度上受到轴直径的影响。

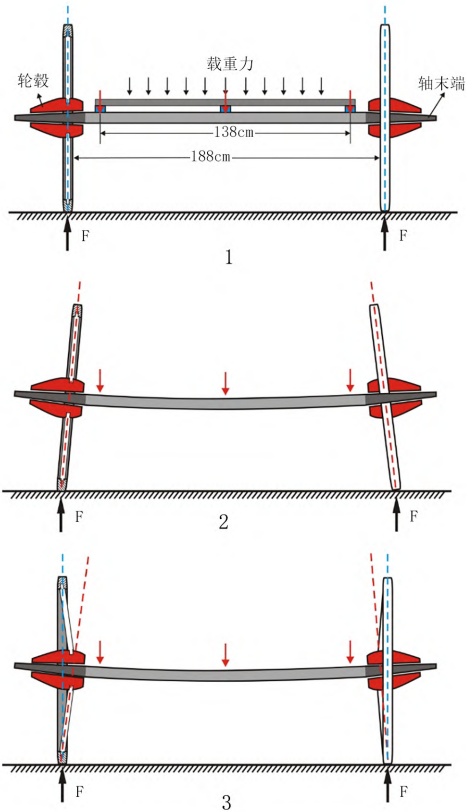
车轴中部向下的弯曲张力会使轴两端产生向上倾斜的压力，这也导致安装在轴末端的车轮产生下部外撇的倾斜（图四，2），中凹轮弯曲的辐条使辐条在插入毂的一端依然和轴末端保持垂直或近似垂

直，但在插入轮辋的一端与轮辋形成一定角度，本应倾斜的轮辋却依然保持垂直于地面，纠正了车轮倾斜的角度（图四，3）。而直辐型车轮在行驶时，如果路面颠簸，车轴的变形会随着冲击力大小的变化发生起伏，从而使车轮的倾斜程度不断发生变化，表现为车轮的左右摇摆，正对应了古人对中凹轮可防止车轮不晃动的解释。

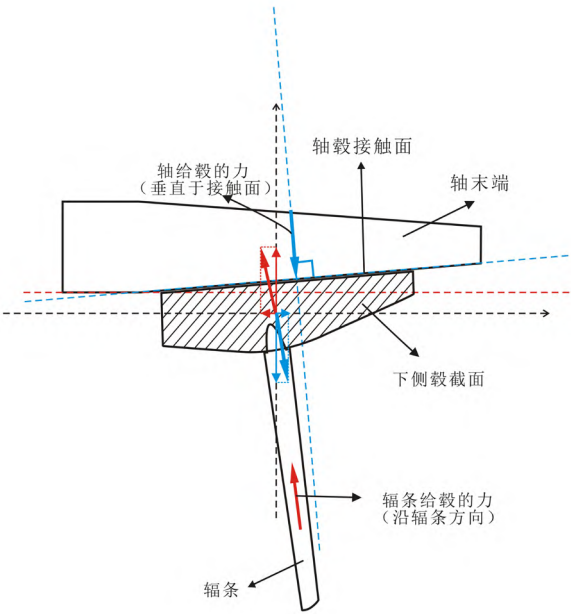
在对轮毂与轴末端的相互作用力分析时，倾斜的接触面在挤压过程中，会对轮毂产生一个向外的侧向力，倾斜角度越大，或挤压力越大，则向外的侧向力也会增大。这会对毂外用防止轮脱落的害或辖产生挤压，从而增大毂与害辖的摩擦，使车轮转动阻力增大。中凹结构中向内倾斜或弯曲的辐条会对毂产生一个向内的侧向分力，可中和部分向外的侧向力，减小对害和辖的挤压，减少摩擦阻力，有利于车轮转动（图五）。使车轮轮辋保持垂直不倾斜以及提高转动效率应该是中凹轮结构最主要的优势作用。

（二）辐条分析

从考古材料可见，辐条的形状在插入轮毂的部



图四 车轮受力变形示意图与车轮状态
（左边剖面图，右边全图）
1. 轮与轴受力示意图 2. 直辐轮变形示意图
3. 中凹轮受力示意图



图五 安装在锥形轴末端的毂的受力示意图

位开始弯曲或倾斜,这也是形成中凹轮结构的重要特征。除此之外,辐条的截面形状也在接近轮毂的部分开始转变为扁长方形或扁椭圆形,与接近轮辋一端的正方形或正圆形显著不同。其实这种辐条截面的变化在古代中国马车上不论是直辐车轮还是中凹轮都普遍存在。

辐条在近毂端厚度变窄,宽度增加,既保证轮毂有限的表面可以容纳较多的辐条插入,又可以确保辐条两端的强度不发生变化^[24]。同时,较宽的辐条在截面长轴方向上具有较大的抗弯能力^[25],对抗车轮偶然受到的侧向力时更为坚固。这可能是辐条在近毂端之所以制作成扁圆形或长方形的最初原因,但对于中凹轮弯曲的辐条来说,对抗弯能力的需求变得尤为重要。因为在即便没有偶发的侧向力时,辐条本身的弯曲就使其更容易发生弯曲变形,而弯曲部位的扁平形状则加强了抗弯能力,使轮辐本身具有更大的张力,通过轻微的变形达到不易折断的目的。综上,弯曲的辐条在支撑力的作用下,可以通过轻微的变形来避免折断。

(三) 夹辅分析

1. 夹辅的特征

“夹辅”一词的称呼来源于两根直木在轮外侧“夹住”轮毂的形象,“辅”则在《诗经》中早有记载,关于夹辅问题的研究,古代文献中将夹辅称作“辅”,《诗经·小雅·正月》中:“其车既载,乃弃而辅。……无弃而辅,员于尔辐。”^[26]唐孔颖达注曰:“车不言作辅,此云乃弃辅,则辅是可解脱之物。盖如今人缚杖于辐,以仿辅事也。”^[27]这说明“辅”在轮辋结构的车轮是可以拆下的,是起辅助作用的,也印证了前文绑在辐条上的夹辅。《左传·僖公五年》中宫之奇的谏言,以谚语“辅车相依、唇亡齿寒”^[28]来比喻虞虢两国的关系,晋杜预注曰:“辅,颊辅,车,牙车”^[29],可见夹辅在春秋时期就已十分常见,其与车相辅相依的形象已经深入人心。从古代文献中可以总结出夹辅是可拆卸的、

具有辅助作用的车构件。

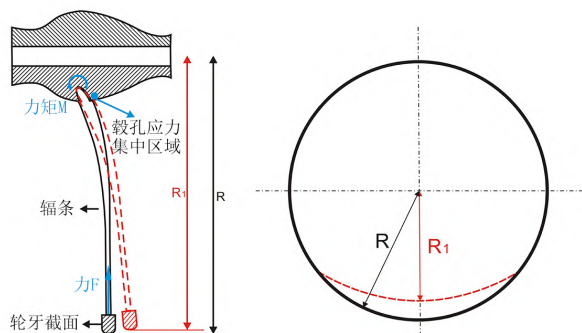
现代学者对“辅”的研究中,多偏重于名称的考证^[30]和功能的推测,学者多认可“辅”是起到辅助车轮的作用,但起到何种辅助作用却意见不一。郭宝钧认为夹辅可增加辐条的支撑力^[31],《辉县发掘报告》中认为夹辅有加固轮辋相接处的强度^[32];渠川福、魏成敏则认为“夹辅”是新制车轮的拉杆防变形装置^[33]。夹辅作为中凹轮实物材料的发现标准,在辉县琉璃阁16号车的清理时就已经明确了夹辅和车轮中凹结构的关系,但学者在对夹辅的研究中经常忽略两者的关系。早期研究中夹辅的支撑能力一直备受争议^[34],随着新的考古资料的发现,夹辅的固定方式或许并非都是支撑在轮辋内部,而是绑缚在辐条上,紧挨在轮辋一侧^[35],但并未有学者针对这一新发现对夹辅功能进行研究。

根据夹辅的考古材料,尤其是山西临猗和山东淄河店报告中夹辅的详细描述,由此可了解到夹辅的三个重要特征:一是中间部位较粗、两端较细,二是夹辅两端并非都是插入轮辋内,三是夹辅是与辐条绑缚在一起的。对于两端插入轮辋的夹辅,根据临界荷载欧拉公式可知,夹辅的长度可能削弱了其支撑能力。以山东临淄雋山战国墓中的车轮为例,可比较辐条和夹辅的支撑能力(表三)。可见夹辅的支撑力尚不如辐条的支撑力,且易发生屈曲。对于并未插入轮辋的夹辅,自然也不存在支撑作用。因此其辅助作用不可能是其纵向的支撑,可能是源于夹辅与辐条的绑缚关系。

依据前文分析,中凹轮弯曲的辐条在增大张力的同时,是非常容易变形的。而且由于车轴压力和轮支撑力不在同一直线,会对辐条产生一个扭矩,对插入孔一侧产生应力集中。这样,辐条的变形或者插入孔松动会使辐条产生角度上的位移。近而毂端即便是小角度的位移,在轮辋端亦会产生较大的位移,从而使轮辋产生变形(图六),且辐条越长,变形越明显,对较大的车轮影响尤其大。

表三 辐条和夹辅的临界载荷力

	长度	最细处 截面形状	最小截面 直径/边长	弹性模量	临界载荷力
辐条	55cm	圆形	3cm	$1.16 \times 10^{10} \text{N/m}^2$	4730N
夹辅	124cm	方形	3cm		3480N



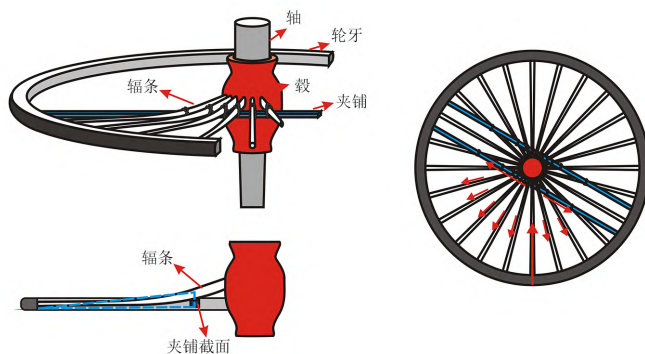
图六 轮辋变形示意图

在此情况下，夹辅紧紧绑缚在与之交叉的辐条上，每根与之交叉的辐条都和轮辋、夹辅一起形成不同截面上的稳固三角形形态（图七，左），使辐条难以产生侧向的变形或倾斜，增加了车轮的稳固性。同时，夹辅与多根辐条的绑缚关系，可以分散来自垂直于地面的辐条压力，并将力传递给其他与之相连的辐条（图七，右），有效避免辐条因压力过大而导致的辐条变形。

综合以上力学分析，再分析与车轮匹配的其他构件的结构特征，尤其是车轴和车厢，皆对车轮的转动和载重有着重要影响。

车轮在车轴上转动，需要轮毂内部和轴之间填入油脂，因此两者并非紧密安装，而存在一定的空间，这也使得车轮在轴端具有较多自由度，倾斜或左右移动。轴末端安装有害和辖以防止车轮脱落，但车轮依然会向内侧移动。古人在应对车轮向内侧移动时，通常有两种方法：一是内侧物理阻挡，内侧直径的阶梯性增大或使用轴饰，以阻挡车轮向内侧移动；二是，西周中期之后将车轴末端由圆柱体改为圆锥形^[36]，使车轮具有向外的移动倾向，从而使车轮不向内移动。这种圆锥形的轴末端在秦始皇帝陵出土的铜车马模型就可以清晰地看到^[37]。正如分析结果显示，圆锥形的轴末端会对害和辖产生挤压，增大摩擦力。中凹轮弯曲的辐条对毂的力可以抵消一部分，减轻挤压，提高车轮的转动效率。

中国先秦时期车轴多长达2米多，甚至3米多，轨距最大可到2米左右^[38]，从考古材料来看，中凹轮的车轴轴长和轨距都较大，车舆较宽，是可载多人的较大的车型。长轨距加大载重使车轴更容易发生弯曲变形，使两侧车轮上部有倾斜的倾向。再结合圆锥形的轴末端，车轮倾斜状况会更加严重。从前文分析结果可知，中凹轮结构纠正了这一倾斜，



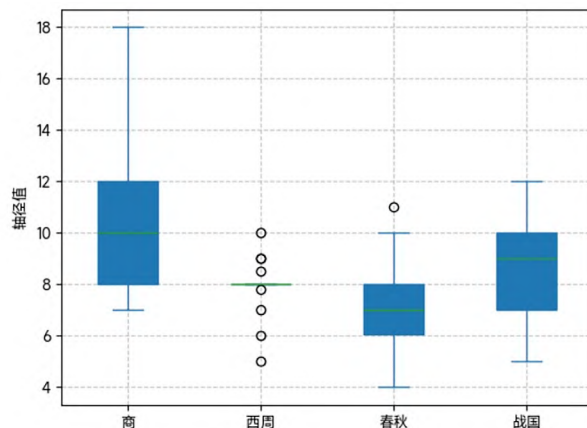
图七 有夹辅车轮结构及其稳定性能示意图

使轮辋保持与地面垂直的状态。

春秋至汉代是中国古代车辆技术发展的重要阶段。春秋时期随着周王室的衰落，诸侯争霸加剧，军事活动频繁，车辆作为战争与运输的核心工具，需求的数量与规模大幅增加，造车材料的强度和质量难免会无法达到预期标准，在对商至战国时期车辆的结构特征的统计分析中，可见车舆厢呈现越来越大的趋势，说明载重在增大，而车轴的直径从商至周就有逐渐变小的趋势（图八），这种变化可能使车轴强度变小，容易变形，从而使车产生一些缺陷。而且这一时期，车辆逐渐从礼仪象征转向实用化，载重能力、稳定性和耐用性成为重要指标。中国古人对车轮的调整是为了更加适应这一需求的积极响应。

同时，由车轮和夹辅的分析结果可知，夹辅是通过绑缚在辐条上来给辐条提供辅助支撑作用的。可以强化车轮结构稳定性，防止轮辋整体的变形，使其始终保持正圆的形态。这或可印证了《诗经》中关于“无弃尔辅，员于尔辐”的记载^[39]。

此外，综合以上目前已发表的有关中凹轮的考古资料，中凹轮上存“夹辅”的考古实物主要集中在



图八 商至战国车轴直径分布对比分析
(根据吴晓筠《商周时期车马埋葬研究》附表分析)

东周时期,东周时期车辆制造技术的进一步提升,以及对车辆使用的长期实践中,人们逐渐认识到圆锥形末端的不足而对车轮做出改进。而夹辅作为这种改进的辅助结构也应运而生。《周礼考工记》中记载有中凹轮,但未提到夹辅,而文学作品《诗经》中却有“辅”的记载,可能表明夹辅并非国家规制,而是民间实际使用时的常见辅件。这或可以解释为什么在东周墓葬的实体车上会有夹辅,而东汉的木车模型是按照国家规制制作的模型,不用考虑其实用性。但具体的分析还需要更多的考古证据来进行讨论。

四、结论

通过对东周时期中凹轮实物材料和汉代中凹轮车体模型进行结构力学分析,同时结合车轴、夹辅等构件的结构特征分析认为:1.中凹轮结构是应对具有较长的车轴和圆锥形末端产生的改良结构,可以纠正车轮的倾斜,中和车轮向外的侧向力,提高转动效率;2.夹辅作为中凹轮的辅助构件,是通过与辐条的绑缚来提高中凹轮的支撑能力,并具有防止车轮变形和纠正已发生的轻微变形的功能。

直辐车轮在长期使用中,尤其是在制造材料不足时暴露出的明显缺陷:长车轴(长达2~3米)和大轨距(约2米)的设计导致车轴易弯曲变形,进而引发车轮上半部分内侵车厢,影响行驶稳定性。在此背景下,中凹轮(轮算结构)应运而生。古代先人可能并不了解结构中的机械原理,但通过大量的实践经验,摸索出了改善车辆性能的结构。本研究以中凹轮考古资料研究为出发点,结合车厢、车轴、夹辅等构件综合考虑,利用机械原理和结构力学分析方法探讨了中凹轮的性能,对于古代车辆结构功能研究具有重要的研究意义。

注释:

- [1] 郑玄,注.贾公彦,疏.周礼注疏卷三十九[M]//阮元,校刻.十三经注疏(清嘉庆刊本),北京:中华书局,2009:1962.
- [2] 江永.周礼疑义举要[M].北京:中华书局,1985:63—64.
- [3] 史四维.木轮形式和作用的演变象[M]//李国豪.中国科技史探索,香港:中华书局香港分局,1986:476.
- [4] 郑玄,注.贾公彦,疏.周礼注疏卷三十九[M]//阮元,校刻.十三经注疏(清嘉庆刊本),北京:中华书局,2009:1964.
- [5] 孙怡让,著.汪少华,整理.周礼正义卷七十五[M].北京:中华书局,2015:3825—3826.
- [6] 郭宝钧.殷周车器研究[M].北京:文物出版社,1998:16.
- [7] 中国科学院考古研究所.辉县发掘报告[M].北京:科学出版社,1956:48—51.
- [8] 孙机.中国古独轱马车的结构[J].文物,1985(8):25—40.
- [9] 扬之水.驷马车中的诗思[J].文史知识,1998(8):67—74.
- [10] George Sturt.The Wheelwright's Shop[M].Cambridge:Press Syndicate of the University of Cambridge,1923:73—74,91—95.
- [11] 史四维.木轮形式和作用的演变象[M]//李国豪.中国科技史探索,中华书局香港分局,1986:461—462,476—477.
- [12] 中国科学院考古研究所.辉县发掘报告[M].北京:科学出版社,1956:48.
- [13] 湖北省文物考古研究所,等.湖北宜城罗岗车马坑[J].文物,1993(12):1—18.
- [14] 马俊才,衡云花.大型车马坑惊现郑韩故城——新郑春秋大型车马坑发掘的前前后后[J].寻根,2001(5):65—73.
- [15] 河北省文物考古研究院,中国社会科学院考古研究所,石家庄市文物研究所,等.车出中山——行唐故郡考古发现[M].北京:文物出版社,2021:64.
- [16] 山东省文物考古研究所,淄博市文物局.山东淄博隍山战国墓发掘简报[J].文物,2016(10):4—22,2.
- [17] 山东省文物考古研究所.山东淄博市临淄区淄河店二号战国墓[J].考古,2000(10):46—65,101—102.
- [18] 中国社会科学院考古研究所,山西省考古研究所,运城市文物局等.临猗程村墓地[M].北京:中国大百科全书出版社,2003:197—198.
- [19] 中国科学院考古研究所.长沙发掘报告[M].北京:科学出版社,1957:143.
- [20] 孙机.汉代物质文化资料图说[M].上海:上海古籍出版社,2008:126.
- [21] 甘肃省博物馆.武威磨咀子三座汉墓发掘简报[J].文物,1972(12):9—23,79—80.
- [22] Sandor B. I. The Rise and Decline of the Tutankhamun-class Chariot[J].Oxford Journal of Archaeology,2004(23):

- 153 — 175.
- [23] Mazzù A., Uberti S., Bodini L. Dynamical and structural analysis of a Bronze Age war chariot [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020 (949): 012093.
- [24] 郭宝钧. 殷周车器研究 [M]. 北京: 文物出版社, 1998: 15.
- [25] 杜白石, 杨青. 浅析秦陵铜车马的力学原理 [J]. 力学与实践, 1997 (4): 77 — 80.
- [26] 程俊英, 蒋见元. 诗经注析 [M]. 北京: 中华书局, 1991: 569 — 570.
- [27] 毛亨, 传. 郑玄, 笺. 孔颖达, 疏. 毛诗正义卷十三 [M] // 阮元, 校刻. 十三经注疏 (清嘉庆刊本). 北京: 中华书局, 2009: 950.
- [28] 杜预, 注. 孔颖达, 疏. 春秋左传正义卷十二 [M] // 阮元, 校刻. 十三经注疏 (清嘉庆刊本). 北京: 中华书局, 2009: 3896.
- [29] 杜预, 注. 孔颖达, 疏. 春秋左传正义卷十二 [M] // 阮元, 校刻. 十三经注疏 (清嘉庆刊本). 北京: 中华书局, 2009: 3896.
- [30] 汪少华. 中国古车与名物考辨 [M]. 北京: 商务印书馆, 2005: 188 — 213.
- [31] 郭宝钧. 殷周车器研究 [M]. 北京: 文物出版社, 1998: 17.
- [32] 中国科学院考古研究所. 辉县发掘报告 [M]. 北京: 科学出版社, 1956: 48.
- [33] 渠传福. 太原金胜车马坑与东周车制散论 [J]. 文物季刊, 1992 (2): 45 — 64.
- [34] 郭宝钧. 殷周车器研究 [M]. 北京: 文物出版社, 1998: 17; 渠传福. 太原金胜车马坑与东周车制散论 [J]. 文物季刊, 1992 (2): 45 — 64.
- [35] 山东省文物考古研究所. 山东淄博市临淄区淄河店二号战国墓 [J]. 考古, 2000 (10): 46 — 65, 101 — 102; 渠传福. 太原金胜车马坑与东周车制散论 [J]. 文物季刊, 1992 (2): 45 — 64.
- [36] 郭宝钧. 殷周车器研究 [M]. 北京: 文物出版社, 1998: 26.
- [37] 秦始皇帝陵博物院, 编. 秦始皇帝陵出土一号青铜马车 [M]. 北京: 文物出版社, 2012: 30 — 31.
- [38] 吴晓筠. 商周时期车马埋葬研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 211 — 231.
- [39] 程俊英, 蒋见元. 诗经注析 [M]. 北京: 中华书局, 1991: 569 — 570.

责任编辑: 罗晓艳

(上接第68页)

- [42] 徐光冀, 主编. 中国出土壁画全集 9: 甘肃宁夏新疆 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 118.
- [43] 徐光冀, 主编. 中国出土壁画全集 9: 甘肃宁夏新疆 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 78.
- [44] 徐光冀, 主编. 中国出土壁画全集 9: 甘肃宁夏新疆 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 99.
- [45] 徐光冀, 主编. 中国出土壁画全集 9: 甘肃宁夏新疆 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 18.
- [46] 徐光冀, 主编. 中国出土壁画全集 9: 甘肃宁夏新疆 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 91.
- [47] 班固, 撰. 颜师古, 注. 汉书卷一上: 高帝纪第一上 [M]. 北京: 中华书局, 2007: 39 — 53.

责任编辑: 李唐