

■ 迟 媛 著 ■ 蒋恩臣 主审

履带车辆 差速转向技术与理论

LVDAI CHELIANG
CHASU ZHUANXIANG
JISHU YU LILUN



化学工业出版社

LVDAI CHELIANG
CHASU ZHUANXIANG
JISHU YU LILUN

履带车辆 差速转向技术与理论

■ 迟 媛 ■



化学工业出版社

· 北京 ·

本书理论可以进一步充实履带车辆的转向理论,为采用动力差速式转向机构的液压机械双流驱动系统的研究和应用奠定理论基础。在分析现有履带车辆驱动分类的基础上,主要阐述履带车辆的差速转向技术及涉及的理论,并对差速转向机构的转向性能进行评价。

本书可为研究履带车辆差速转向驱动系统的工程技术人员和差速转向理论研究的科研工作者提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

履带车辆差速转向技术与理论/识媛著. —北京:化学工业出版社, 2013. 7

ISBN 978-7-122-17324-9

I. ①履… II. ①迟… III. ①履带车-转向装置-研究
IV. ①U469.603

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 097042 号

责任编辑:陶艳玲

装帧设计:韩 飞

责任校对:蒋 宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:北京云浩印刷有限责任公司

850mm×1168mm 1/32 印张4½ 字数111千字

2013年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686)

售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:32.00 元

版权所有 违者必究



序

履带车辆差速转向技术与理论

农业机械、工程机械、军事设施中有很多行走机械采用履带式行走装置,履带式行走装置能够提高车辆的负重能力、增大接地比压、减少下陷、减轻了对土壤的压实程度,同时提高了车辆离开道路的越野能力,增大了车辆的地面附着能力,使履带车辆能够通过承载能力较低的地面。对于履带车辆,不仅要有良好的通过性能,还要具有良好的转向性能,转向是否灵活、转向轨迹是否平滑直接关系到履带车辆的使用效率和驾驶员的劳动强度。车辆的转向机构是车辆的重要组成部分。传统履带式车辆的转向机构是在履带式行走装置的后桥中采用单功率流的转向离合器和制动器,转向依赖于离合器的离合程度和制动器的制动程度来实现的,也就是说借助于摩擦元件的滑磨来实现,既造成了功率损失,又降低了摩擦元件的使用寿命,同时转向费力、转弯半径大、无法在小地块转向。传统转向离合器和制动器的机械式转向系统已不能满足人们对转向性能越来越高的要求。而采用差速转向机构可实现履带车辆的连续稳定转向、转向半径最小可达到 0,具有无穷多个规定转向半径,转向省力。虽然国外一些军事上的履带车辆和一些工程机械的履带车辆采用了差速转向机构,但对差速转向系统的转向性能的评价还没有。

对于采用离合器和制动器转向机构的履带车辆转向性能理论比较完善,但对于差速转向的履带车辆的转向性能的理论较少,本书理论可以进一步充实履带车辆的转向理论,为采用动力差速式转

向机构的液压机械双流驱动系统的研究和应用奠定理论基础。本书在分析现有履带车辆驱动分类的基础上,主要阐述履带车辆的差速转向技术及涉及的理论,并对差速转向机构的转向性能进行评价。

本书可为研究履带车辆差速转向驱动系统的工程技术人员和差速转向理论研究的科研工作者提供参考。

感谢国家自然科学基金委的资助。

迟 媛

2013 年 2 月于东北农业大学



目录

履带车辆差速转向技术与理论

1 绪论

1

1.1 履带车辆行走装置	3
1.2 履带车辆转向机构分类	4
1.2.1 纯机械驱动转向机构	4
1.2.2 纯液压驱动转向机构	8
1.2.3 液压机械联合驱动转向机构	12
1.3 国内外研究现状	15
1.4 本书的主要内容	18
1.5 技术路线	20

2 动力差速式转向机构

23

2.1 履带式车辆转向行走驱动力矩	23
2.1.1 履带车辆的转向理论	24
2.1.2 履带式车辆转向行走驱动力矩的计算	29
2.2 动力差速式转向机构的运动学和动力学分析	38
2.2.1 转速分析	38
2.2.2 扭矩分析	41
2.2.3 功率分析	45
2.3 液压机械双流驱动系统的总体设计	46
2.3.1 总体结构	46
2.3.2 工作原理	47

2.4 动力差速式转向机构的设计	49
2.4.1 行星齿轮传动中分配各轮齿数应满足的条件	49
2.4.2 参数的选择和计算	50
2.4.3 动力差速式转向机构的结构设计	57
2.5 转向液压控制系统设计	60
2.5.1 工作原理	61
2.5.2 转向液压系统设计	62
2.5.3 转向液压系统动态模型的建立	65
2.6 小结	67

3 基于 ADAMS 的动力差速式转向机构的运动学仿真 69

3.1 ADAMS 简介	69
3.2 建立动力差速式转向机构的三维实体模型	72
3.3 运动学仿真及结果分析	76
3.4 小结	79

4 动力差速式转向机构的试验研究 80

4.1 车辆转向性能与评价指标	80
4.1.1 转向性能	81
4.1.2 评价指标	81
4.1.3 对履带式车辆转向机构的基本要求	82
4.1.4 影响履带车辆转向能力的因素	82
4.2 试验台的设计	85
4.2.1 履带行走装置的设计	85
4.2.2 试验参数的确定	87

4.3	直线性能试验	90
4.4	最小转向半径测试	94
4.5	最小周转向时间的测试	99
4.6	载荷比的测试	100
4.6.1	试验原理与方法	101
4.6.2	扭矩传感器的设计与标定	107
4.6.3	试验结果与分析	110
4.7	小结	117

5 转向半径的拟合公式

119

附录 A 拟合实际转向半径的 Matlab 程序

124

参考文献

126



1

绪 论

履带式车辆的履带行走装置能够提高车辆的负重能力，降低接地比压，减少下陷深度，减轻了对土壤的压实程度，使履带式车辆能够通过承载能力较低的地面，特别是在水稻产区，土壤含水率高、承压能力低、泥脚深，为了提高水稻联合收割机的通过性能，水稻联合收割机广泛采用履带式行走装置。除了水稻联合收割机采用履带式行走装置，由于履带行走装置提高了车辆离开道路的越野能力，增大了车辆的地面附着能力，所以军用坦克等军用车辆和许多工程机械如推土机、挖掘机，也采用履带式行走装置。

对于履带式车辆，不仅要有良好的通过性能，还要具有良好的转向性能，转向是否灵活、转向轨迹是否平滑直接关系着履带车辆的使用效率和驾驶员的劳动强度。虽然履带式车辆可以降低接地比压，减小下陷深度，同时由于履带接地长度大，转向时转向阻力矩远远大于轮式车辆，尤其是在小半径转向而且土质黏重的水田。车辆的转向机构是车辆的重要组成部分，转向机构性能的优劣直接影响转向性能、作业质量和工作效率。履带车辆的转向原理与轮式车辆不同，轮式车辆的转向普遍是靠车辆的轮子（前轮或后轮）相对车身偏转一个角度来实现，而履带式车辆的转向是靠改变行走装置两侧的驱动力来实现的。不同的转向原理导致了履带车辆的转向机构与轮式车辆的转向机构的不同，使得履带车辆很难在任意速度

下,按照驾驶员意愿按一定半径转向。随着农用履带车辆功率的增大和车速的提高,对其转向性能的要求也越来越高。

传统履带式车辆的转向机构是在履带式行走装置的后桥中采用单功率流的转向离合器和制动器,当车辆直行时,两侧转向离合器处于接合状态,当车辆转向时,如向左转弯时,扳动左侧操纵杆,使左侧离合器分离,因为左侧履带失去或减小了驱动力,右侧履带的驱动力不变,履带车辆便向左转向。如果履带车辆在直行中需“纠偏”,则可适当地使转向离合器半联动。如果拖拉机转较小弯,除彻底分离转向离合器外,还要利用左侧制动器制动,这时左侧履带不但没有驱动力,而且产生了与前进方向相反的制动力。也就是说,转向离合器和制动器使车辆左右转向只有一个 $R=B$ 的规定转向半径,其余转向半径均借助于摩擦元件的滑磨来实现,既造成了严重的功率损失,又降低了摩擦元件的使用寿命。

履带车辆转向系统是履带车辆动力传动系统的一个分系统,对车辆的动力性、行驶机动性、作业效率起关键作用。传统转向离合器和制动器的机械式转向系统已不能满足人们对其转向性能越来越高的要求。利用液压泵、马达连续无级调速的液压机械双流差速转向系统能极大提高履带车辆的行驶机动性和作业效率。这种转向系统在国外军用装甲车辆、拖拉机、推土机及其他工程机械上已得到使用(曹付义等,2006),国内对液压机械差速转向的研究起步较晚,多集中于液压机械差速转向方案设计及转向系统本身的运动性能分析(曹付义等,2006)。

差速转向又称滑移转向,履带轴线与机架是固定的,它依靠改变左右两侧履带的驱动力大小及方向来操纵行驶方向。简单差速器平均分配扭矩的性质对拖拉机的牵引附着性能带来极为不利的影响。当两侧驱动轮分别行驶在不同的路面上,一侧附着系数较大,另一侧附着系数较小,由于差速器平均分配扭矩的性质使得两侧驱动轮的切线牵引力相等,这时,整个车辆所能发挥的最大驱动力受限于不良路面一侧驱动轮的附着性能。

双功率流转向技术已有多年的研究历史,但因成本高和需配置特殊的控制装置等原因,长期以来主要限于用在大中功率的军用履带车辆上(王意,1997)。近年来,美国卡特公司和日本小松公司在推土机上分别使用了不同原理的液压机械双功率差速式转向机构,中国一拖公司也在研制液压机械双功率的差速式转向机构。美国卡特公司,采用了新型差速式转向机构(steering differential)与液压马达和泵组成的转向系统,仅差速式转向机构价格就在12万元(人民币)以上,价格昂贵。新型差速式转向机构作为液压机械双功率流的转向系的功率汇流部分,是需要我们解决的一项重要课题。随着农用履带车辆的增多,根据农用车辆的作业需求,对转向性能的要求愈加迫切,对新型转向机构的研究也越加迫切。为了提高转向性能,减少功率损失,在我国应加快研究和开发类似于美国CAT公司D8N履带式推土机的动力差速式转向机构,实现农用履带车辆的连续稳定转向,填补我国农用履带车辆的连续稳定转向和按任意转向半径转向的空白。

1.1 履带车辆行走装置

履带行走装置用于支承车架并使其驱动轮的回转运动转变成车体的直线行驶运动。它是通过一条卷绕的环形履带支承在地面上,主要由履带、驱动轮、支重轮、导向轮、张紧装置和托轮等组成,如图1-1所示。履带与地面接触,驱动轮不与地面接触。驱动轮在驱动扭矩的作用下,通过驱动轮上的轮齿和履带铁齿之间的啮合(或其他啮合形式)连续不断地把履带从后方卷起。接地那部分履带给地面一个向后的作用力,而地面相应地给履带一个向前的反作用力,这个反作用是推动机器向前行驶的驱动力。当驱动力足以克服行走阻力时,支重轮就在履带上表面向前滚动,从而使机车向前行驶。履带作为行走机构能够提高车辆的负重能力,减小接地比压,减少下陷深度,减轻了对土壤的压实程度(李文哲等,2005)。

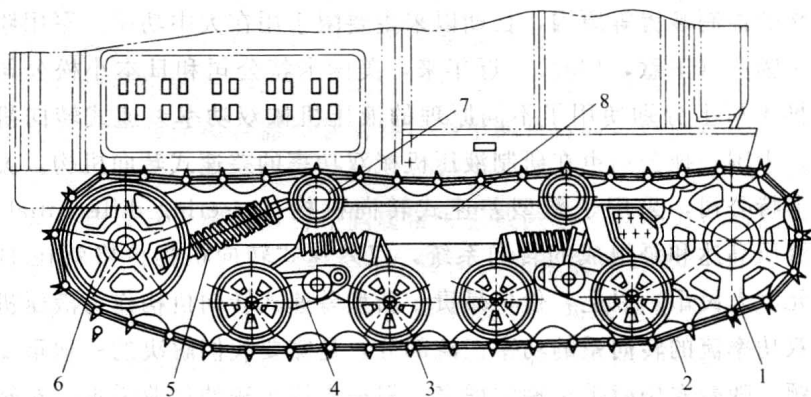


图 1-1 履带拖拉机行走系统

1—驱动轮；2—履带；3—支重轮；4—台车；5—张紧装置；

6—导向轮；7—托轮；8—车架

1.2 履带车辆转向机构分类

履带式车辆应用非常广泛，如农业机械的履带拖拉机和联合收割机、工程机械的推土机、挖掘机、摊铺机、军事上的坦克等。履带车辆转向机构可根据车辆在转向过程中功率流的传递方式分为单功率流转向机构和双功率流转向机构，也可根据在转向过程中两侧履带的运动有无联系而分为独立式转向机构和差速式转向机构 (W. Merhof. E. M. Hackbarth, 1989; 张鸿琼, 2005)，如图 1-2 所示。本文将履带式转向机构分类为采用纯机械驱动转向机构、纯液压驱动转向机构和液压机械联合驱动转向机构的形式。下面就分别阐述各种形式的转向机构。

1.2.1 纯机械驱动转向机构

纯机械驱动转向机构包括离合器和制动器、单差速器、双差速器、单级行星机构等。

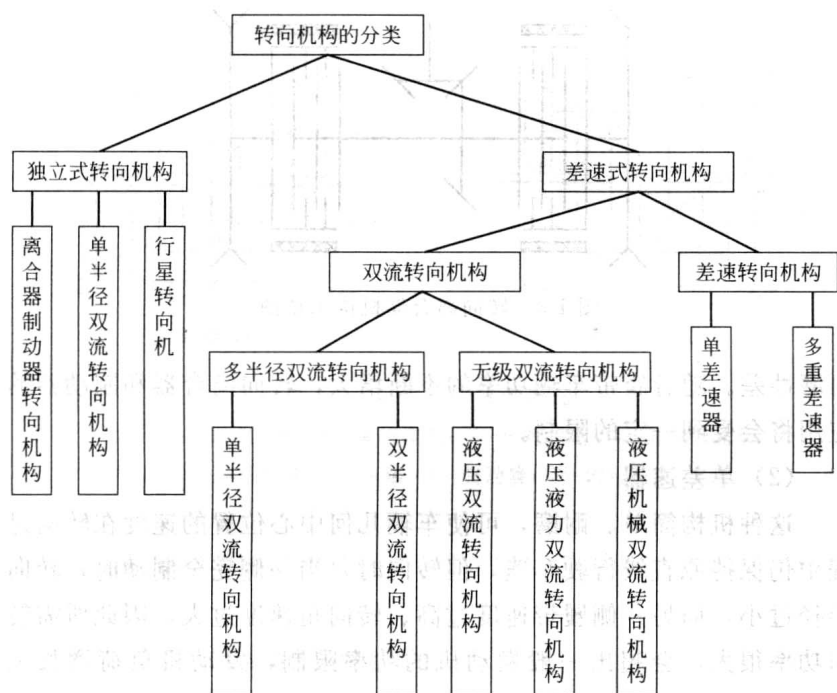


图 1-2 履带车辆转向机构分类

(1) 离合器和制动器

如图 1-3 所示，驱动轴两端装有转向离合器的主动部分，半轴上装有离合器的从动部分。从动部分也就是制动器的制动鼓。当两侧离合器都结合，制动器都放松时，两半轴的角速度相等，拖拉机即直线行驶。当慢速侧离合器局部或全部分离，或全部分离后再施加不同程度的制动，即可实现不同半径的转向。这种转向机构结构简单、制造方便、直线性好，在早期的中小型履带式拖拉机、推土机上得到了广泛运用（曹付义等，2003）。但缺点是最小转向半径 $R_{\min} = 0.5B$ （ B 为履带轨距），不能原地转向和灵活转向，而且转向费力、操纵性差，生产效率低、能耗较大，又由于转向半径的大小依赖于离合器的分离程度和制动器的制动程度，造成摩擦元件的

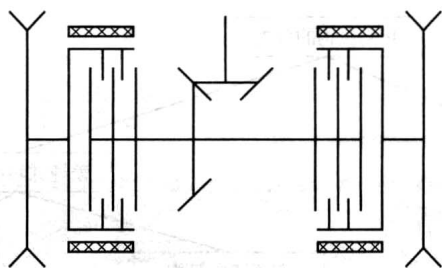


图 1-3 转向离合器机构示意图

耐磨性差。随着履带车辆功率的不断增大，转向离合器和制动器的应用将会受到一定的限制。

(2) 单差速器

这种机构简单、耐磨，可使车辆几何中心位置的速度在转向过程中仍保持原直线行驶车速，但转向时，当一侧完全制动时，转向半径过小，而另一侧履带速度过高、转向角速度过大，因此所需转向功率很大，会超出一般发动机的功率限制，发动机负荷增长太大，驾驶员若持续转向，稍有不慎就会使发动机熄火，只能用较大半径转向，或极不平稳地以小半径断续转向（曹付义等，2003）。而且这种机构有两个自由度，拖拉机的直线运行稳定性很差。因此，履带式拖拉机上并不采用它作为转向机构（华中农学院，1983）。

(3) 双差速器

在国外，有些履带拖拉机上采用双差速器转向机构，如图 1-4 所示为双差速器机构简图。双差速器的优点是结构紧凑，操纵方便，寿命长，转向时可以不降低拖拉机的平均速度。但在使用性能上有下列缺点：拖拉机的直线行驶性差，容易走偏，而且由于双差速器不能完全制动一侧履带，车辆不能原地转向，拖拉机的最小转弯半径较大， $R_{\min} = (1.3 \sim 2.0)B$ ，转向半径的变化范围没有使用转向离合器的大，转向平顺性较差。转向时快速侧履带加速，因此

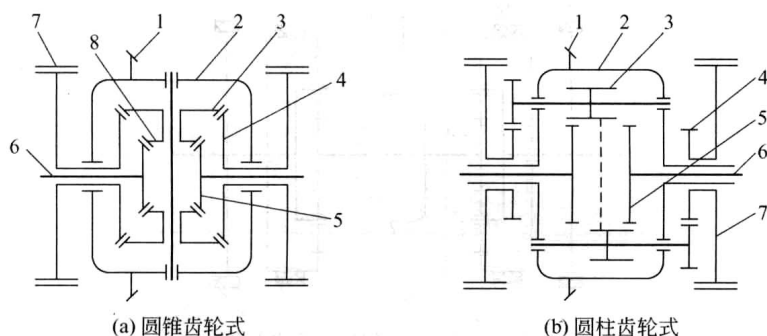


图 1-4 双差速器机构简图

- 1—中央传动大齿轮；2—差速器壳；3—外行星轮；4—制动齿轮；
5—半轴齿轮；6—半轴；7—制动器；8—内行星轮

发动机的附加载荷比采用转向离合器的大（高连兴，2000；曹付义等，2003）。

(4) 单级行星齿轮式转向机构

单级行星齿轮式转向机构的工作情况与转向离合器相似，其简图如图 1-5，传给中央传动的扭矩，经左、右两套单级行星机构，传给驱动轮（高连兴，2000）。

操作行星机构上的制动器可以改变两侧驱动轮驱动力矩的大小使车辆转向。该类转向机构相对于转向离合器转向机构能传递较大的转向力矩，能够实现单自由度运动的固定轴齿轮机构所不能实现的二自由度的速度分解与合成，行星机构的行星架、太阳轮、齿圈三元件之间具有差速关系；转向机构多点传递动力，并且机构内部径向力相互平衡。

这种机构耐磨性很高，不需保养，转向时发动机载荷的增长也不大，而且只有一个自由度，拖拉机的直线行驶性很好，机构尺寸紧凑（杨为民，2003）。但由于其结构复杂，仅在大功率的农业拖拉机、推土机及其他重型车辆上应用（曹付义等，2003）。

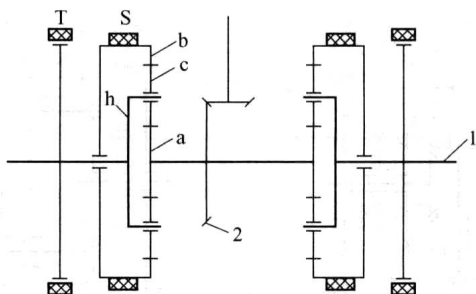


图 1-5 单级行星转向机构简图

1—半轴；2—中央传动大齿轮；

T—半轴制动器；S—行星机构制动器

a—太阳轮；b—齿圈；c—行星轮；h—行星架

还有双功率流的纯机械式转向机构，此种转向机构主要由两个变速箱（一个主变速箱、一个分动箱）、行星齿轮机构、离合器和行星机构制动器组成，在转向性能上较单功率流转向机构有很大提高，但是它的转向半径仍然是有级的。挡位越低，得到的转向半径越小；挡位越高，得到的转向半径越大。所以仍然不能适应车辆在所有不同曲率的道路上用圆滑轨迹转向行驶的需要，也不能排除部分接合摩擦组件进行滑磨转向以及由滑磨所带来的一系列问题。

1.2.2 纯液压驱动转向机构

液压驱动相对于机械驱动的优点是能够实现无级变速、在底盘上配置灵活，但它的缺点是成本高、效率低。

行走机械液压技术（mobile hydraulic）中今天已十分成熟了的液压驱动技术（hydrostatic transmission，简称“HST”），国内亦称“静液压驱动”或静压传动（王意，2000）。如图 1-6 所示的静液压驱动系统是容积调速的闭式系统，采用变量泵—定量马达，也可以采用变量泵—变量马达，后者的调速范围宽。HST 被广泛

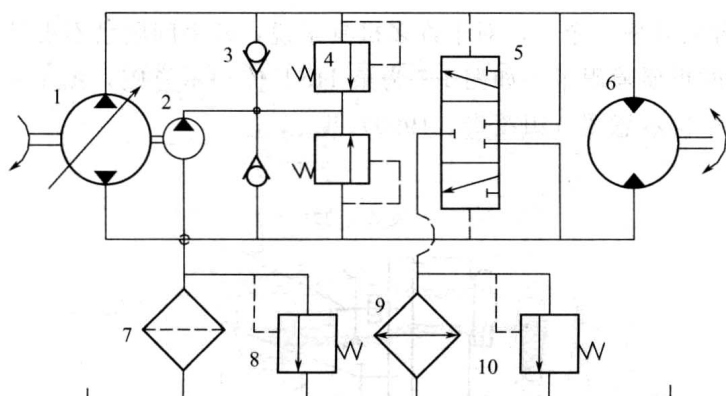


图 1-6 HST 的系统图

- 1—双向变量泵；2—补油泵；3—单向阀；4—高压溢流阀；5—梭阀；
6—双向定量马达；7—过滤器；8—溢流阀；9—冷却器；10—旁路溢流阀

的应用于履带式车辆中采用离合器和制动器转向的情况，属于离合器和制动器转向，具有左右履带不能反向转动，转弯半径较大，靠离合器和制动器的摩擦元件之间的滑磨来实现转向，存在制动功率损失等缺点。

效率较低曾被认为是 HST 的主要缺点之一，就传动装置本身而论，HST 的“稳态效率”确实不如传统的机械变速器，但是一台行走机械的总能耗不仅取决于变速装置的效率，而且还与原动机的负荷匹配情况有很大关系。对于工况多变的设备和机具，人们可以利用 HST 的无级调速性能，使整个动力传动装置经常处于最经济的运行状态，从而使总能耗降到最低。而有级变速的机械变速器虽然自身效率较高，却难以使原动机经常达到最佳的负荷匹配；加之运行时还常有因换挡而中断动力的无效时间，在效率方面的优势就更要打折扣了。对于那些需要经常变换行驶速度和进退方向的机具来说尤其如此。另一方面，HST 的总效率并非仅由组件决定，人们在努力提高液压泵和马达这些组件本身的效率，特别是扩大高