

电驱动矿用车辆全轮转向 控制理论与方法

董磊 著

 煤炭工业出版社

电驱动矿用车辆全轮转向 控制理论与方法

董 磊 著

煤 炭 工 业 出 版 社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

电驱动矿用车辆全轮转向控制理论与方法/董磊著. --北京:
煤炭工业出版社, 2017

ISBN 978 - 7 - 5020 - 6027 - 5

I. ①电… II. ①董… III. ①运煤车—全轮驱动—转向—
研究 IV. ①U272.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 176809 号

电驱动矿用车辆全轮转向控制理论与方法

著 者 董 磊
责任编辑 徐 武
编 辑 杜 秋
责任校对 尤 爽
封面设计 尚乃茹

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
电 话 010 - 84657898 (总编室)
010 - 64018321 (发行部) 010 - 84657880 (读者服务部)

电子信箱 cciph612@126.com

网 址 www.cciph.com.cn

印 刷 北京建宏印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 850mm × 1168mm^{1/32} 印张 5^{1/2} 字数 139 千字

版 次 2017 年 11 月第 1 版 2017 年 11 月第 1 次印刷

社内编号 8907 定价 26.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换,电话:010 - 84657880

内 容 提 要

本书基于车辆纵向动力学、车辆转向阻力模型 Magic Formula、Ackermann 转向定理和 Input Shaping Technique 控制策略等基础理论和方法,在建立的驾驶员模型和矢量变频电机模型的基础上,提出了双电机全轮驱动全轮转向车辆的双输入双输出动力学模型和考虑内外两侧轮胎转向瞬心的差速比计算公式,得到了转向系转矩传动比变化规律、约束条件下的最优结构装配尺寸及转向性能评价指标以及驱动和转向匹配策略的评价指标,为车辆更全面完整的动态特性分析提供了理论基础。地面和井下的实车试验结果验证了前述分析的正确性。

本书可对煤矿电驱动运输装备从业(操作、维护及管理)人员提供设备运行指导,也可为科研人员研究电驱动车辆转向控制问题提供思路及启发,还可作为普通高等院校煤矿机械类本科生及研究生的教学用书。

前 言

电驱动矿用运煤车是短壁机械化开采的重要装备,承担着在连续采煤机与給料破碎机之间转运煤炭的任务。电驱动运煤车作为矿用特种车辆,转向与驱动系统有独特的结构和特点,其转向系统采用空间连杆机构以及动力转向随动系统,驱动系统采用拖电缆式双变频电机驱动,省去了装有轮间差速器的驱动桥。

转向与驱动系统是车辆底盘的重要组成部分,是近年来学者们研究的热点,尤其在转向性能的优化以及驱动的匹配控制方面。只有动力系统与转向系统良好的匹配,才能使车辆行驶平稳、轮胎磨损减少以及行驶阻力减小。特殊工况与结构特点决定了其有别于其他车辆的设计方法和控制方式。

本书针对运煤车结构和控制的特殊设计,主要进行了以下几方面的工作:

首先,基于空间机构学理论提出了车辆空间连杆全轮转向机构的运动学及力学模型,导出了车辆转向油缸位移到轮胎转向角度的运动学传递方程以及转向油缸驱动力到轮胎转向阻力矩的力学传递方程。对转向机构进行了运动学特性分析和基于车辆转向阻力模型 Magic

Formula 的力学特性分析,揭示了车辆转向系角传动比和转矩传动比随着横向、纵向拉杆长度以及车辆转向半径变化的规律。提出了基于 Ackermann 转向定理以及特性分析的车辆转向性能评价指标。以转向机构结构尺寸作为设计变量,采用遗传算法对车辆进行了基于评价指标的转向性能多目标优化,优化后车辆转向性能显著提高。

其次,通过在转向系统中采用软轴结构,把转向控制机构与执行机构连接,实现了车辆转向控制系统的机液随动控制,控制系统稳定且响应快速性较好。

再次,基于车辆纵向动力学基本理论,提出了车辆双电机全轮驱动系统动力学模型,包括车辆运动微分方程、驾驶员输入模型以及电机矢量变频控制模型。设计了基于 Input Shaping Technique 的控制器,实现了电机输出转速的零振荡。提出了无差速器电驱动轮式车辆全轮反相位转向差速比计算方法。此方法考虑了轮胎的转向瞬心,使轮胎磨损和循环功率减少。依据动力学模型搭建的动力学仿真平台,对比分析了多种工况下转速输出和转矩输出两种匹配策略的系统响应,提出了评价两种匹配策略优劣的评价指标,确定了车辆在转向时外侧电机转速不变,内侧电机转速依据改进的差速比计算方法降低转速的匹配策略。通过车辆转向驱动系统匹配特性分析,揭示了车辆质心位置、转向角度及车速对电机输

出功率变化的规律并确定了车辆的通过性能基本参数。

最后,在实车满载路面条件下,通过车辆转向系统运动学和力学试验、转向机构瞬态动力学试验以及电机驱动系统匹配策略试验,验证了前述模型的正确性,同时解释了模型误差产生的原因以及模型的适用范围。经过地面和井下实际试验证明,车辆转向驱动匹配策略运行平稳可靠。

本书以运煤车转向及驱动系统为研究对象,理论分析和试验相结合,目的是通过对运煤车转向驱动系统的匹配研究,为运煤车的发展提供理论基础,同时也在转向驱动系统匹配研究领域,为低速重载矿用车辆及工程机械车辆提供一种新的设计思路和较为完整的评价体系。

本书在撰写过程中得到了中国煤炭科工集团太原研究院首席科学家王步康研究员和太原理工大学杨兆建教授的帮助与指导,同时还要感谢中国煤炭科工集团太原研究院的郭致富、康鹏、马凯、杨敬伟、张晓鸥、宋扬、杨韬仁、王腾等短壁装备研发中心的领导和同事以及太原科技大学张宏教授,合肥工业大学刘焜教授、刘小君教授提供的无私帮助;感谢中北大学机械工程学院的王俊元教授、杜文华教授、刘峰教授、曾志强副教授对本书的大力支持。

本书及相关研究工作得到了国家“十一五”科技支

撑计划项目——“中厚煤层短壁机械化开采成套技术与装备”(2007BAB13B02)、山西省基础研究项目青年基金——“矿用重型采掘装备振动信号特征提取与载荷识别技术研究”(2014021024-4)和中北大学自然科学基金——“基于社区结构拟态物理挖掘的旋转机械性能衰退评估方法研究”(XJJ2016004)的资助。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

著 者

2017年4月

目 次

1 绪论	1
1.1 车辆的特点及发展概况	2
1.2 车辆全轮转向技术	6
1.3 车辆全轮驱动技术	10
1.4 车辆转向与驱动系统匹配技术	11
1.5 主要研究内容	18
1.6 小结	20
2 车辆全轮转向全轮驱动系统数学模型	21
2.1 车辆全轮转向全轮驱动系统工作原理	21
2.2 全轮转向全轮驱动系统动力学模型	23
2.3 基于空间机构学的空间连杆全轮转向系统模型	32
2.4 小结	45
3 车辆全轮转向机构优化与性能评价研究	46
3.1 车辆转向系统运动特性分析	46
3.2 车辆转向系统动力特性分析	50
3.3 基于 Ackermann 定理的车辆转向性能评价及 优化设计	61
3.4 小结	74
4 车辆全轮转向全轮驱动匹配策略研究	75
4.1 转速输出匹配策略分析及评价	75

4.2	转矩输出匹配策略分析及评价	94
4.3	小结	101
5	车辆转向与驱动系统控制研究	103
5.1	全液压动力转向随动系统控制分析	103
5.2	基于 Input Shaping Technique 的车辆电机驱动 控制策略	113
5.3	小结	120
6	车辆全轮转向全轮驱动匹配特性分析	121
6.1	双电机全轮驱动系统匹配特性分析	121
6.2	负载对电机驱动系统的影响分析	128
6.3	小结	135
7	全轮转向全轮驱动系统试验研究	136
7.1	试验仪器与目的	136
7.2	车辆全轮转向系统运动学特性试验	137
7.3	车辆全轮转向系统力学特性试验	139
7.4	车辆全轮转向机构瞬态动力学试验	142
7.5	车辆全轮转向全轮驱动匹配策略试验	146
7.6	小结	154
	参考文献	155

1 绪 论

地下煤矿的开采方式主要有长壁机械化开采与短壁机械化开采两种。其中短壁机械化开采主要是指在较短的工作面使用连续采煤机对煤炭进行开采,包括房式、房柱式、条带式、短长壁和旺格维利等开采方式。房柱式开采具有机动性强、机械化程度高、回采工效高和安全性好等优点,是提高矿井整体效益和资源回收率的有效措施,在美国、英国、南非和澳大利亚等国家得到了广泛应用。其中,美国短壁机械化开采的实施较为普遍,在较大的 223 个矿井中,有 48% 采用连续采煤机房柱式开采^[1]。目前国内煤炭企业为了进行“三下”开采以及不适合长壁工作面的不规则块段、边角煤等区域的开采,在煤炭生产中越来越多地采用了连续采煤机房柱式开采工艺。

运煤车辆作为房柱式开采工艺中的主要运输设备,不仅可以用于房柱式机械化开采工作面,还可用于煤巷与半岩巷快速掘进工况中,其研制工作对促进我国短壁机械化技术进步和煤矿巷道掘进机械化有着非常重要的意义。

我国对运煤车辆的研究起步较晚,现有设备基本依赖进口,曾于 1979 年从美国引进 20 余套不同类型的连续采煤机和运煤车,20 世纪 80 年代中期又引进了 10 余套,近年来进口趋势有增无减。设备长期依靠进口带来了许多负面影响:首先,进一步扩大了我国在该技术方面与国外的差距;其次,由于配件供应不及时,服务严重滞后,给设备正常使用带来很多不便;再次,由于没有自己的产品和技术与其竞争,运煤车进口价格一直处于上升趋势,2005 年较之 2000 年价格提高了近 30%,配件价格提高了近 1 倍。我国作为采煤大国,技术装备的落后长期制约着我国

煤炭工业的发展,短壁机械化装备的国产化研制需求非常迫切。

经过科研人员的不断努力,目前我国除运煤车辆以外的房柱式机械化装备已经能够自主设计、生产,运煤车辆的研制成功将实现房柱式开采装备的全部国产化。这为我国中小煤矿企业机械化发展提供了有效途径,同时也为不适合长壁工作面机械化开采的煤矿在运输设备的选取上多了一种选择。

行驶是车辆最基本的功能,在车辆行驶系统中,输入量由驾驶员操纵转向机构、加速踏板和制动踏板等实现,相应的执行量是转向轮胎转角及作用在车轮上的驱动或制动力矩,而车辆的输出则表现为横摆、加减速、振动、侧倾等运动状态响应^[2]。因此,车辆的运动控制系统是一个多输入多输出的系统,其中车辆转向与驱动系统的匹配技术是车辆控制领域的基础,也是其最为重要的一个方面,是基于车辆动力、转向性能的一项关键控制技术^[3]。车辆的转向系统与驱动系统的匹配是车辆正常工作的前提,是车辆众多系统中最为重要的两个系统。

运煤车转向系统采用空间连杆执行机构和全液压动力转向控制机构,其结构和使用工况的特殊性决定了车辆转向机构的设计与评价不能简单地参考其他工程机械类车辆的标准,有必要对其转向系统结构及性能进行详细分析,综合考虑其特点总结出车辆转向系统的设计方法,提出有针对性的性能评价标准,为以后类似特种车辆转向机构评价指标的确立提供参考。在运煤车的驱动系统中,考虑到动力输出与使用环境等因素,车辆采用双电机全轮驱动,每个电机刚性驱动车辆一侧的两个轮胎,左右两侧轮胎在转向时角度呈非线性关系,这就对双电机的驱动匹配提出了更为严格的要求,因此对车辆转向与驱动系统进行匹配方面的研究是十分必要的。

1.1 车辆的特点及发展概况

运煤车是房柱式机械化开采中的重要配套设备。运煤车按动力形式分为拖电缆式(运煤车)、蓄电池式和内燃机式3种。蓄

电池式运煤车具有对井下工作环境无污染等优点；但整车造价高，同时还需配备电池和充电器，占用较多空间。内燃机式运煤车具有行走距离不受限制、机动性强的特点，但排出尾气污染环境且噪声大，工作环境要求巷道通风量大于 $250 \text{ m}^3/\text{min}$ 。运煤车因具有机动灵活、可靠性高、工作面停机时间短、适用范围广、运行维护费用低、初期投资小等优点，不仅在中厚煤层开采中占有很高份额，同时也被用于薄煤层开采工艺中，逐渐成为井下无轨运输的主流。目前国内矿井中所用运煤车全部从国外进口，主要由美国久益（JOY）公司、美国菲利普斯（PHILIPS）公司、奥地利山特维克（SANDVIK）公司设计制造。其中，美国久益公司自 1938 年研制出世界上第一辆运煤车以来，就以无可比拟的可靠性、低运行成本和高开机率等优势占领了井下无轨运输的大部分市场份额。

目前，全球各主要运煤车生产商生产的车辆外形及结构布置大同小异，随着新技术的应用这种差别在逐步减小。图 1-1 所示为久益公司生产的 10SC32-48C 型运煤车辆外观图，图 1-2 所示为奥地利山特维克公司生产的 TC790 型运煤车辆。



图 1-1 久益 10SC32-48C 型运煤车



图 1-2 山特维克 TC790 型运煤车

运煤车具有以下特性：

(1) 采用全轮驱动形式，动力分别由两台牵引电机提供，单台电机驱动同侧两个车轮，调速方式多采用变频调速技术。

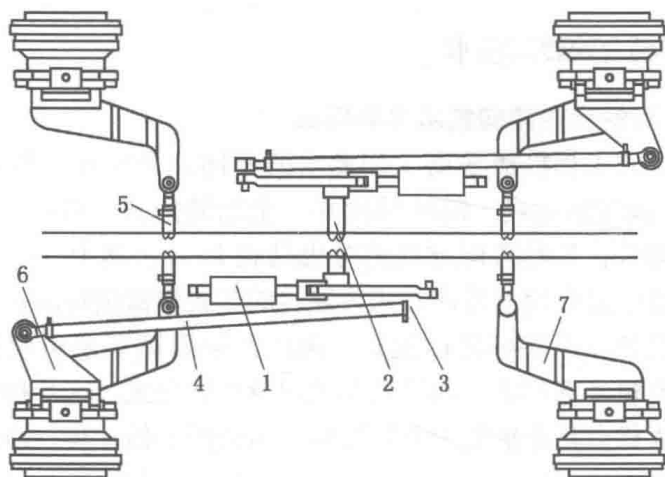
(2) 为了有效减小转弯半径，采用全轮转向形式。

(3) 卷电缆装置都采用液压马达驱动，由带有高低扭矩限压功能的卷缆控制阀自动调节以适应卷放缆工况。

但不同制造商的运煤车在局部结构上也有区别，如山特维克运煤车与久益运煤车的区别有以下几点：

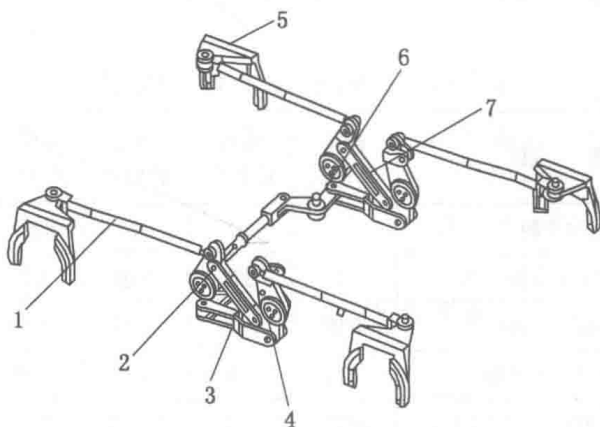
(1) 传动系统。山特维克运煤车在每个轮胎上都加了两个独立悬架，提高了整车的减震性能。

(2) 转向系统。久益运煤车转向机构为空间连杆中心对称机构，山特维克运煤车转向机构为空间连杆轴对称机构，如图 1-3 和图 1-4 所示。



1—转向油缸；2—同步轴；3—转向块；4—纵向拉杆；
5—横向拉杆；6—上转向臂；7—下转向臂

图 1-3 久益运煤车转向机构



1—方向杆；2—轨距杆；3—连接耦合杆；4—转向杆；
5—转向支撑；6—转向轴；7—连接耦合杆

图 1-4 山特维克运煤车转向机构

1.2 车辆全轮转向技术

1.2.1 车辆全轮转向技术发展概况

轮胎式工程机械根据工作要求的不同,主要有5种转向方式^[4,5]:偏转前轮式、偏转后轮式、全轮转向式、铰接转向式、滑移转向式,各种转向方式的对比见表1-1。其中,煤矿井下运输设备中最常用的转向方式为偏转前轮式和铰接转向式,如井下无轨胶轮车采用偏转前轮式,液压支架搬运车采用铰接转向式,还有极个别车辆,如顺槽车采用滑移转向式。这几种转向方式的最大优点是车辆便于避过障碍,司机便于估计运行路线。而全轮转向方式(Four-Wheel Steering, 4WS)车辆转向时前后轮同时偏转,转弯半径小、机动性好,但其动力系统、转向控制系统都较前两种方式复杂,一般用于机身较长、常在狭窄场地工作的机器,如大型轮胎式起重机等。运煤车车身长约10 m,采用全轮转向方式可以使其转向半径达到最小,以适应狭窄巷道的工作要求,是目前唯一采用全轮转向方式的煤矿运输装备。

表1-1 不同转向方式比较^[5]

项 目	偏转 前轮式	偏转 后轮式	全轮 转向式	铰接 转向式	滑移 转向式
转向半径	大	大	小	较小	最小
对准工作面	一般	方便	一般	方便	方便
驾驶路线判断	方便	较差	方便	方便	方便
转向时轮胎磨损	一般	一般	一般	较小	最大
结构复杂程度(全驱动时)	复杂	复杂	最复杂	简单	简单
转向系与传动系的关系	不相关	不相关	不相关	不相关	相关
整机纵向稳定性	良好	良好	良好	较差	差
整机横向稳定性	一般	一般	一般	较差	一般

除了能够使车辆转向半径较小以外,许多学者对全轮转向方式的优越性进行了详细阐述。K Watanabe 等人对比分析了前轮转向和全轮转向的转向半径,得出全轮转向半径较小的结论^[6],H Itoh 等通过试验对各种方式的转向能力进行分析,结果表明 4WS 较 2WS 系统转向更为平缓有效^[7]。同时, Maiti S 和 Chakraborty C 计算分析了全轮转向和部分轮转向的能量消耗,发现实现全轮转向需要更高的能量^[8]。另外,也有学者从理论与试验的角度证实全轮转向车辆在运动学和动力性能方面具有显著的优势。J C Gerdes^[9]以及 Tatsuro Muro^[10]通过试验获得了轮胎 3 个方向的受力情况,并计算了每个轮胎的受力矢量和,得出全轮转向的车辆轮胎受力更为均匀的结论。由此可见,全轮转向方式车辆的转向性能同样优于其他转向方式。

4WS 系统按其发展历程可以大致分为 3 个阶段:

(1) 20 世纪初至 80 年代^[11]。这一阶段主要是 4WS 系统的萌芽和初步应用。

(2) 20 世纪 80 年代后期至 90 年代。这一阶段主要是 4WS 系统的快速发展及应用时期。在此期间,各大汽车公司和科研院所依据当时的科技水平,就结构形式和匹配策略提出了形式多样的 4WS 系统,4WS 系统类型的划分也主要依据这一阶段的有关产品^[12,13]。

(3) 20 世纪 90 年代至今。该阶段主要是底盘集成控制的研究,当前仍在不断发展和完善中^[14,15]。其核心技术即为全轮转向、主动悬挂、驱动防滑和车辆稳定性等车辆动力学控制系统的协调与集成控制。

全轮转向系统的实现方式主要有^[16,17]机械式、液压式、电动式和复合式。按其实现方法可分为^[18]:

- (1) 定前后轮转向比全轮转向系统;
- (2) 前后轮转向比是车速函数的全轮转向系统;
- (3) 前后轮转向比是前轮转角函数的全轮转向系统;