



交流传动电动轮自卸车 结构与设计

Structures and Design for Off-Highway Motorized
Wheel Dump Trucks with AC Electric Drive System

赵波 等 © 编著

铁路科技图书出版基金资助出版

交流传动电动轮自卸车 结构与设计

Structures and Design for Off-Highway Motorized
Wheel Dump Trucks with AC Electric Drive System

赵 波 等◎编著

中国铁道出版社

2013年·北京

内 容 简 介

非公路电动轮自卸车是指在露天矿山或大型土建工地等专用道路上,为完成岩石土方剥离与矿石运输任务而使用的,以直流电传动或交流电传动方式,进行短距离运输的专用载重车辆。本书主要阐述了电动轮自卸车各系统的结构组成、工作原理、参数确定及相关设计计算方法,目的在于推动交流传动电动轮自卸车技术的快速发展。

全书共分12章:第1章简单介绍了电动轮自卸车的研究意义、工作原理、组成和特点;第2章重点阐述了交流传动电动轮自卸车的总体设计,包括总体布置、总体设计方法、关键参数确定、整车行驶性能和制动性能计算等;第3章主要介绍了柴油机、发电机和电动机等动力系统,冷却系统和燃油供给系统;第4章着重论述了电气和电子控制系统,包括直流电传动系统和交流电传动系统设计,并侧重介绍了交流控制策略和电阻制动原理及其设计公式;第5章侧重讲述行驶系统,包括前桥、后桥及轮边减速器、转向系统和悬架系统;第6章主要介绍了车架结构、特点、所受载荷、纵梁强度及刚度解析设计方法;第7章重点叙述了货箱;第8章主要讨论了液压系统,包括液压举升、液压动力转向和液压制动系统;第9章介绍了驾驶室及ROPS和FOPS装置;第10章分别讲述了润滑系统和灭火系统;第11章简介了走台及附属装置;第12章对车架结构轻量化设计进行了述评。

本书适用于从事电传动自卸车设计研发的设计师、工程师,制造生产自卸车的工程技术人员,使用、维修自卸车的矿山用户,也可供高校和科研院所相关专业领域的教师、研究生和科研人员参考;对从事机械传动矿用自卸车和非公路宽体自卸车相关工作的专业人员,也具有很好的借鉴作用。

图书在版编目(CIP)数据

交流传动电动轮自卸车结构与/赵波等编著. —北京:
中国铁道出版社,2013. 12
ISBN 978-7-113-17798-0

I. ①交… II. ①赵… III. ①交流电传动—电动轮—
自卸车—结构 ②交流电传动—电动轮—自卸车—设计
IV. ①U469.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第291692号

书 名:交流传动电动轮自卸车结构与/设计
作 者:赵 波 等◎编著

责任编辑:黄 璐 编辑部电话:010-51873138 电子信箱:tdpress@126.com
封面设计:崔 欣
责任校对:孙 玫
责任印制:陆 宁

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:北京米开朗优威印刷有限责任公司

版 次:2013年12月第1版 2013年12月第1次印刷

开 本:700mm×1000mm 1/16 印张:24.5 字数:459千

印 数:1~2000册

书 号:ISBN 978-7-113-17798-0

定 价:96.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)
打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

前 言

非公路电动轮自卸车是大型露天矿的主要运输工具,它结构复杂、吨位大、使用条件苛刻、技术含量高,与牙轮钻机、电铲并称矿山三大标志性装备。

目前,交流传动电动轮自卸车结构和设计技术主要掌握在卡特彼勒/尤尼特瑞格、小松、利勃海尔、日立建机、别拉斯等几家国外矿车巨头手中,其中的核心交流电传动技术几乎全部为通用电气和西门子所垄断。出于市场竞争和技术封锁的需要,并考虑到可能应用于军用大型车辆,任何相关的电动轮自卸车技术都被严格保密。基于此,我国矿山使用的电动轮自卸车绝大部分仍需依赖进口,国内的整车制造商则不同程度存在着核心技术依赖国外和产品利润率低等问题。造成这种不利局面的一个最主要原因是一直以来我国尚未完全掌握电动轮自卸车最核心的关键技术——交流电传动技术。

为适合装备制造产业结构调整,发展我国大型电动轮自卸车产业,2009年国务院《装备制造业调整和振兴规划》中明确要求将大型矿用电动轮自卸车国产化作为振兴我国装备制造业的任务之一。为此,作为全球最大的轨道交通装备制造厂商,中国北车股份有限公司(简称北车,CNR)充分利用高速铁路机车技术,在国内首先自主开发出电动轮自卸车直流电传动系统,随后又成功开发出交流电传动系统。在此基础上,2012年北车又自主研发成功EQ190AC型交流传动电动轮自卸车,同时获得了北京市科学技术委员会对大型电动轮自卸车产业化和国产化的资金支持,这标志着中国北车成为目前世界上首家拥有交流电传动技术完全自主知识产权的整车制造商。

与国外50多年电动轮自卸车研制的历史相比,我国的相关设计、研究工作起步较晚。本书的主要目的是力求打破国外的技术垄断和封锁,探索推动我国大型电动轮自卸车技术的快速发展,尝试满足国内相关设计、科研、制造、使用和维修等方面的迫切需求,努力促进交

流电传动等关键技术在矿山机械、铁路、汽车、坦克和轮式装甲车辆、舰船等领域的工程应用。

作者力图将该领域国内外最新的研究成果和中国北车研发团队的研制成果,全面、系统地奉献给读者,期望从中有所裨益和帮助。由于一些研制工作尚未结束,加之核心参考文献相对较少,全书内容以交流传动电动轮自卸车结构介绍为主,兼顾设计技术。

本书具有“新”、“信”、“多”三个特点:“新”指主要内容均是所能获得的国内外最新研究成果,和作者最新的研究结论,一些关键设计公式系首次给出;“信”指每章内容均经过结构设计、图纸生成、施工评审、试制生产和工业运行试验考核验证;“多”则指阐述电动轮自卸车结构的插图较多。

本书是作者在设计研制新型电动轮自卸车基础上,并参阅一些专家、学者的有关著作、论文及研究成果撰写的,部分插图引自卡特彼勒、小松、利勃海尔、日立建机、尤尼特瑞格、别拉斯、通用电气、康明斯公司的产品资料和北京科技大学,谨致谢忱。

本书各章的主要分工如下:第1章由赵波执笔;第2章由赵波、赵彦平、李婧撰写;第3章由任伯涛、王宁、王春柳、赵彦平撰写;第4章由李伟、赵波、张利芳、李晓群、孙博、王春柳撰写;第5章由刘少权、孙冰慧、吴勇、董伯男、李晓琨撰写;第6章由金俊权、唐倩、崔志英、赵波撰写;第7章由王家兵执笔;第8章由段立军、张显锋、李婧、李晓琨、赵彦平撰写;第9章由贾雯雅执笔;第10章由赵彦平、王宁撰写;第11章由袁阳、崔志英、唐倩撰写;第12章由陈娜娜执笔。全书由赵波主持编著并统稿。

本书的问世首先应该感谢北京科技大学张文明教授的悉心指导和热情帮助。感谢中国航天科工集团于本水院士、北京理工大学副校长孙逢春教授、北京交通大学姚燕安教授对全书进行评阅和提出的宝贵意见。中国北车股份有限公司工程机械研发中心戴明高工、王冠英高工、吴敬勋高工、邢茂高工和北京二七轨道交通装备有限责任公司王文胜高工审阅了部分或全部书稿,在此一并致谢。本书撰写过程中,还得到中国北车股份有限公司北京二七轨道交通装备有限责任公司领导杨永林教授、马建勋高工、乔红波高工以及中国北车股份有限公司工程机械研发中心封全保高工、孙青高工的有力支持和热情鼓励。感谢北京市科学技术委员会的关怀和中国汽车工程学会矿用汽

车分会、中国工程机械工业协会工程运输机械分会的指导帮助。最后,承蒙铁路科技图书出版基金的资助、中国铁道出版社的帮助和评审委员会专家的辛勤评议,谨致谢忱。特殊鸣谢中国铁道出版社王风雨主任和责任编辑黄璐在本书出版过程中的努力和付出。

本书的编著出版,是我们的一种大胆尝试,由于作者学术水平有限,难免有不当之处甚至错误,衷心期望能得到读者的批评指正。

作 者

二〇一三年十二月

目 录

1 绪 论	1
1.1 概 述	1
1.2 任务和作用	3
1.3 工作原理	4
1.4 组成和特点	7
1.4.1 系统组成	7
1.4.2 制造特点	8
1.4.3 结构特点	8
1.4.4 使用特点	11
1.5 发展历史	12
1.6 矿用自卸车的分类	21
1.7 机械传动和电传动	23
1.7.1 机电之争	23
1.7.2 电力传动	24
1.7.3 机电比较	28
1.8 型号编制规则	31
1.9 部分专业术语	32
参考文献	38
2 总体设计	40
2.1 电动轮自卸车的工程哲学	40
2.2 总体结构布置	41
2.2.1 电驱动的结构形式	42
2.2.2 工作模式控制	45
2.2.3 带电子差速器的双电动机驱动	46
2.3 典型道路工况和性能指标	47
2.4 质量和质心位置	49
2.4.1 电动轮自卸车的质量	49
2.4.2 质心位置和轴荷分布	51

2.5 主要设计方法和参数确定	53
2.5.1 设计步骤和设计流程	53
2.5.2 柴油机功率确定	56
2.5.3 轮胎型号选择	57
2.5.4 牵引电动机的选择和参数确定	60
2.5.5 轮边减速器传动比确定	62
2.5.6 主发电机的选择和参数确定	63
2.6 电动轮设计的主要目标	64
2.7 电动轮自卸车的行驶性能	64
2.7.1 驱动力和行驶阻力	64
2.7.2 电动轮自卸车行驶的驱动力和行驶阻力平衡	76
2.7.3 电动轮自卸车的功率平衡方程	78
2.8 电动轮自卸车的制动性能	80
2.8.1 制动性的评价指标和设计要求	80
2.8.2 制动时车轮的受力	81
2.8.3 自卸车的制动效能与恒速下坡	83
2.8.4 行车制动器的选择和设计计算	88
2.8.5 停车制动器的选择和设计计算	91
2.9 举升液压缸的布置和级数选择	93
2.9.1 举升液压缸的总体布置	93
2.9.2 举升液压缸级数的选择	95
2.10 整车总体尺寸的确定	96
参考文献	97
3 动力系统	99
3.1 概 述	99
3.1.1 组成和功能	99
3.1.2 柴油机与主发电机的连接	100
3.1.3 动力系统与车架的连接	101
3.2 柴 油 机	101
3.2.1 工作原理	101
3.2.2 结构组成	102
3.2.3 柴油机特性	104
3.3 进、排气系统	104
3.3.1 概 述	104
3.3.2 空气滤清器	104

3.3.3 进、排气管道	106
3.3.4 消音器	107
3.4 冷却系统	108
3.4.1 柴油机冷却系统的类型和工作原理	108
3.4.2 柴油机冷却系统的结构组成	109
3.4.3 电传动冷却系统	113
3.5 燃油供给系统	115
3.5.1 系统组成和功能	115
3.5.2 燃油箱	116
3.5.3 燃油成本和燃油消耗率	118
3.6 发电机	119
3.6.1 功能和分类	119
3.6.2 交流发电机的优点	120
3.6.3 交流发电机的工作原理	120
3.6.4 交流发电机的主要结构	121
3.7 牵引电动机	122
3.7.1 功能和分类	122
3.7.2 工作特点	124
3.7.3 工作原理	125
3.7.4 主要结构	126
参考文献	128
4 电气和电子控制系统	129
4.1 概 述	129
4.2 组成和原理	129
4.2.1 交一直电传动系统	130
4.2.2 交一直—交电传动系统	131
4.3 交流系统的主要参数选择	132
4.3.1 中间直流电压的确定	132
4.3.2 三相异步牵引电机的参数确定	132
4.3.3 逆变器参数确定	133
4.3.4 整流器参数确定	133
4.3.5 发电机参数确定	133
4.4 直流电动机的调速控制	134
4.5 交一直—交系统的控制方案	136
4.5.1 主发电机励磁的控制	136

4.5.2	交流异步电动机的控制	137
4.5.3	逆变器的控制策略	144
4.5.4	矢量控制技术	145
4.6	主电路构成原理	149
4.6.1	交一直电传动系统	149
4.6.2	交一直—交电传动系统	150
4.7	电 控 柜	152
4.8	整 流 器	153
4.9	逆 变 器	154
4.9.1	逆变器模块的电气参数	155
4.9.2	机械结构	155
4.10	电阻制动	156
4.10.1	交一直系统的电阻制动特性	156
4.10.2	交一直—交系统的电阻制动控制	162
4.10.3	制动电阻栅	165
4.11	辅助电气系统	167
4.11.1	驾 驶 室	167
4.11.2	蓄电池电路	167
4.11.3	柴油机电路	168
4.11.4	液压系统控制电路	169
4.11.5	空调电路	170
4.11.6	雨刷电路	170
4.11.7	照明电路	170
4.11.8	仪表电路	170
4.11.9	报警及显示电路	171
参考文献		171
5	行 驶 系 统	172
5.1	概 述	172
5.2	前 桥	173
5.2.1	概 述	173
5.2.2	结构组成	174
5.2.3	前桥工作原理及设计要求	176
5.2.4	前轮定位参数	176
5.3	转 向 系 统	178
5.3.1	转向梯形机构	178

5.3.2 转向机构原理	180
5.4 后 桥	180
5.4.1 概 述	180
5.4.2 轮边减速器原理和结构	183
5.4.3 轮边减速器设计中的几个问题	187
5.4.4 后桥壳总成	191
5.5 轮胎和轮辋	193
5.5.1 概 述	193
5.5.2 轮 胎	194
5.5.3 轮 辋	198
5.6 悬 架	201
5.6.1 概 述	201
5.6.2 油气悬架的分类	203
5.6.3 油气弹簧	206
参考文献	210
6 车 架	212
6.1 车架载荷和车轮载荷分析	212
6.2 车架的结构组成	219
6.2.1 结构特点	219
6.2.2 纵 梁	220
6.2.3 保险杠和前端梁	221
6.2.4 龙 门 梁	221
6.2.5 牵 引 梁	223
6.2.6 后 端 梁	224
6.2.7 其他悬置件支座	225
6.3 典型车架的对比和分类	226
6.3.1 几种典型车架	226
6.3.2 车架的分类	230
6.4 车架的整体布置	230
6.4.1 与车架相连接的主要结构	230
6.4.2 车架结构的整体布置	231
6.4.3 其他连接总成结构对车架布置的影响	232
6.5 车架外形尺寸的确定	234
6.5.1 车架宽度	235
6.5.2 车架长度	236

6.5.3 车架高度	237
6.6 车架纵梁的设计计算	237
6.6.1 基本分析假设	237
6.6.2 货箱质量对车架的作用载荷	240
6.6.3 有效装载质量对车架的作用载荷	240
6.6.4 纵梁的剪力和弯矩	242
6.6.5 纵梁的弯曲应力和强度校核	245
6.6.6 纵梁的弯曲刚度	247
6.6.7 有限元分析	248
6.7 车架的焊接工艺分析	248
6.7.1 材料的选择	249
6.7.2 焊材的选择	249
6.7.3 焊接工艺方法	249
6.7.4 焊前预热与焊后保温	250
6.7.5 焊接应力的消除	251
参考文献	251
7 货 箱	252
7.1 概 述	252
7.2 货箱的分类和特点	253
7.3 货箱的结构组成	255
7.3.1 底 板	255
7.3.2 侧 板	257
7.3.3 前 板	257
7.3.4 护 板	258
7.3.5 耐 磨 板	258
7.3.6 其他部件	259
参考文献	261
8 液压系统	262
8.1 概 述	262
8.2 液压举升系统	264
8.2.1 举升系统的性能及初步设计	265
8.2.2 举升系统的工作原理	268
8.2.3 举升液压缸的工作原理和结构	270
8.2.4 举升液压缸的设计原则和设计流程	274

8.3 液压制动系统	275
8.3.1 工作原理	275
8.3.2 后桥制动器装配	277
8.3.3 液压盘式制动器的标准和分类	280
8.4 液压转向系统	286
8.4.1 系统组成和工作原理	286
8.4.2 转向液压缸的组成	287
8.4.3 转向液压缸的结构设计	289
8.5 液压辅助元件	292
8.5.1 液压油箱	293
8.5.2 蓄能器	295
8.5.3 过滤器	297
8.5.4 冷却器	298
8.5.5 加热器	302
8.5.6 胶管	302
参考文献	303
9 驾驶室	305
9.1 概 述	305
9.2 结构组成	306
9.3 总体布置设计	309
9.3.1 骨架布置	309
9.3.2 转向操纵机构的连接	310
9.3.3 外覆盖件和内饰件	311
9.3.4 仪表台	312
9.3.5 视野特征	314
9.4 座 椅	319
9.4.1 结构组成	319
9.4.2 司机座椅的相关标准	319
9.5 安全保护结构的试验方法和有限元分析	320
9.5.1 安全保护结构标准	320
9.5.2 ROPS 和 FOPS 的试验方法	323
9.5.3 ROPS 和 FOPS 的有限元分析	326
参考文献	332

10 润滑与灭火系统	334
10.1 润滑系统概述	334
10.2 润滑系统的要求和分类	335
10.2.1 矿用自卸车对润滑系统的要求	335
10.2.2 润滑系统的分类	336
10.3 干油集中润滑系统	336
10.3.1 优点	336
10.3.2 原理和组成	337
10.3.3 选择计算及安装	340
10.3.4 缺点和应用趋势	341
10.4 灭火系统	342
10.4.1 概述	342
10.4.2 矿车起火的常见原因	344
10.4.3 着火多发位置	344
10.4.4 灭火系统的组成和工作原理	345
参考文献	348
11 走台及附属结构	349
11.1 概述	349
11.2 走台	349
11.2.1 功能作用	349
11.2.2 结构组成	350
11.3 支撑结构及屈曲校核	352
11.4 扶梯	354
11.4.1 结构组成	354
11.4.2 扶梯种类	356
11.5 护栏	357
11.6 其他附件	358
11.6.1 散热器罩	358
11.6.2 空滤器支架	359
11.6.3 后视镜及支架	359
参考文献	360
12 车架的轻量化设计分析	361
12.1 概述	361

12.2 车架的有限元建模·····	362
12.2.1 有限元分析简述·····	362
12.2.2 大型自卸车车架的有限元模型·····	362
12.2.3 铸件结构的有限元建模·····	363
12.2.4 车架焊缝的有限元模拟·····	363
12.2.5 典型载荷工况及边界条件·····	365
12.3 车架的轻量化设计·····	367
12.3.1 概 述·····	367
12.3.2 结构轻量化方法·····	367
12.3.3 车架的结构轻量化分析·····	369
12.3.4 车架的结构强度和刚度分析评价·····	369
参考文献·····	371
附录 典型电动轮自卸车型号的主要参数·····	372
1. 卡特彼勒·····	372
2. 小 松·····	372
3. 利勃海尔·····	373
4. 日立建机·····	374
5. 尤尼特瑞格·····	374
6. 别拉斯·····	375

1 绪 论

1.1 概 述

我国是世界最大的煤、铁、有色金属及稀土生产国之一,对矿山机械有着巨大的需求,非公路矿用自卸车是露天开采中的主要运输设备。矿山开采(包括煤、铁、铜、稀土、钻石矿等)包括地下开采和露天开采两种工艺。全世界 40% 的煤矿和 80% 的铁矿都采用露天方式开采。

露天采矿是一个移走矿体上的覆盖物,得到所需矿物的过程。开采矿物前,矿体上覆盖着几十米厚的土壤和岩石,总量多达数千万乃至上亿吨,需要用炸药对覆盖层进行爆破,使之松动碎裂,然后用电铲等挖掘机械,将剥离土方挖掘至运输车辆上,由自卸车将渣土倾倒入排土场。巨型电铲平均每分钟可以挖起近百吨重的土石方,每天挖掘量多达数万吨,普通载重货车根本无法与之配合作业。为此,工程机械厂商研制造出了世界最大、最昂贵的专用载重车辆——矿用电动轮自卸车(图 1.1)。



图 1.1 大吨位交流传动电动轮自卸车

载货汽车主要用于运送各种货物,为了便于倾卸散装物料,提高运输生产率,将货箱做成可倾卸的,称作自卸汽车。具体地,自卸汽车是指利用发动机动力驱动液压举升机构,将货箱倾斜一定角度卸货,然后依靠货箱自重使其复位的专用汽车。电传动自卸汽车是一种传动系统由发动机拖动直流或交流发电机,并由电动机驱动车轮的自卸汽车。

非公路矿用自卸车(off-highway mining dump trucks)是指在露天矿山或大型土建工地等专用道路上,为完成岩石土方剥离与矿石运输任务而使用的,作短距离运输的一种专用载重车辆。该车工作特点是运程短,承载重,频繁上下坡,往返于采掘点和卸矿点,常与大型挖掘机(一般是电铲)、装载机、带式输送机等联合作业,构成装、运、卸生产线,进行矿石、土方或散料的装卸运输工作。这里称“非公路”是因为其外形超限、质量超重,不允许在公路上行驶而得名。如无特别说明,本书中论述的矿用自卸汽车均指这种非公路型矿用自卸车。

非公路矿用自卸车广泛应用到各类露天矿山、水电工程、铁路和公路建设工程及大型建筑工程中,作为特种工程车辆,它结构复杂、技术含量高、价格昂贵,由于整车超宽、超高,它们只能以散件形式运至矿区,组装后在矿区专用道路上行驶,见图 1.2。



图 1.2 矿用自卸车在专用道路上短距离折返运输

矿用自卸车要适应极端恶劣的环境。我国北方地区的煤田、加拿大北部冻土地带的油砂矿,冬季气温都在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,俄罗斯北极圈内的矿区最低作业温度甚至达到 $-50\sim -60\text{ }^{\circ}\text{C}$;而澳大利亚的铁矿、南非的金矿,常年处于炎热气候,有时达到 $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。在这样的极端环境下,一台妥善维护的矿用车,工作寿命要达到 $60\,000\sim 70\,000\text{ h}$ 以上(约合 $8\sim 10$ 年),每年要运输上百万吨的矿石或剥离土方。这些对矿用车的可靠性、安全性、经济性提出了极高的要求,其研制过程涉及结构设计、铸焊冶金、大型金属件机械加工、齿轮传动、电气控制、液压技术、综合冷却技术、巨型轮胎、新材料应用等诸多领域,堪称现代工业技术的精华。

非公路矿用自卸车有效装载质量(俗称吨位)一般在 $20\sim 363\text{ t}$ 之间,而公