

装甲车辆混合动力 电传动技术

Technologies for the Hybrid Electric Drive System
of Armored Vehicle

孙逢春 张承宁 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

装甲车辆混合动力电传动技术 / 孙逢春, 张承宁著. —北京:
国防工业出版社, 2008. 11

ISBN 978 - 7 - 118 - 06026 - 3

I. 装... II. ①孙...②张... III. 装甲车: 混合动力汽车—电力传动 IV. TJ811

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 170588 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 25½ 字数 427 千字

2008 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

序

坦克是集强大火力、快速机动与坚固防护于一身的武器装备。现阶段由于综合电子技术 in 坦克上的应用,坦克车内的信息化和车际信息化能力有了重大突破,而转型为典型的机械化、数字化武器装备。坦克是过去、现在和未来战场上地面战斗力的基础,在突破敌人预有准备的防御和建立我军稳固机动防御的战斗中,其综合防护力、快速机动力、强大的攻击力和指挥控制力都具有机动突出作战效能和战场生存能力,在捍卫国土安全和保卫政权稳固的战斗中,其地位和作用是其它武器装备不可替代的。

我国坦克装甲车辆的研制,经历了半个多世纪几代人百折不挠的艰苦努力,从仿制、仿改到 20 世纪末我国工程科技人员以创新的思路研制出符合国情、军情,具有国际先进水平的第三代主战坦克,使我国主战坦克研制水平跻身国际先进行列。

面对世界新军事变革和中国特色军事变革的形势需求,为进一步拓展和提高我国坦克装甲车辆技术水平,我们注意到了全电武器装备机动平台已逐渐被认为是未来军事机动装备的重要研究发展方向。混合动力电传动是坦克装甲车辆技术发展的重要领域,也是全电战斗车辆的基础,它利用内燃机—发电机组和电池组供电,驱动牵引电机完成车辆行驶时的功率传递,实现车辆战术机动性过程中所涉及的各项功能和性能。相比于传统的机械传动系统,电传动系统有诸多优越性:首先采用内燃机—发电机组和电池组混合供电驱动牵引电机,机动性能大为改善;其次是电力系统全电化提高了武器机动平台与未来高能武器的集成能力,如为电磁武器、电热化学武器、高能激光武器和新型武器的应用,提供能源创造了条件;第三是充足的电能可解决电磁装甲、主动防护和光电对抗装置与车辆静音行驶的能源问题,并在一定程度上提高了对红外、声响的隐身性能;第四是混合动力电传动,内燃机在额定工况运转,车辆具有再生制动和能量回收功能,从而降低油耗,增加机动武器平台作战半径;第五是有利于总体布置与系统集成,电传动系统动力由电缆柔性传递,部件组合灵活,优化和节省车内空间。

电传动系统的关键技术主要有系统总体集成技术、综合控制技术、系统仿真分析技术、内燃机—发电机组及其控制技术、一体化系统集成电源平台、高效高功率密度驱动系统及控制技术、动力分配与能量管理技术、整车综合冷却技术、网络化管理与电动化辅助系统技术等。

孙逢春教授长期从事电动车辆、混合动力电传动履带装甲车辆领域理论研究、技术开发和工程应用的工作,他以创新思路主持了我国混合动力电传动装甲车辆总体及关键技术研究开发工作,将电传动装甲车辆的发展趋势、前沿技术,结合我国混合动力电传动装甲车辆研究开发的创新实践成果集成于此专著之中,是我国第一部从理论和实践上系统论述混合动力电传动装甲车辆的著作,它的出版必将有力推动我国在该领域的技术进步和发展。



2008年10月27日

前 言

世界军事风起云涌,陆战之王——坦克革故鼎新、历经百年沧桑,机械时代的最先进技术产品的应用铸就了坦克的陆战辉煌,机械化坦克的发展潜力已经接近极限。在寻求突破的过程中,随着各种高电能武器的发展,各国的坦克装甲车辆设计师们不约而同地想到了激光武器、微波武器、电磁炮、电热炮、电传动和全电坦克……。作为未来战斗车辆的发展模式之一,由机械化到电气化,电传动车辆显示出了蓬勃的生机。

电传动技术指利用内燃机—发电机组和电池组供电,牵引电机驱动系统完成车辆行驶时的功率传递、实现车辆战术机动性过程中所涉及的各项功能的技术。相比于传统的机械传动系统,电传动系统有诸多优越性。

第一是车辆机动性优良:电传动履带车辆由内燃机—发电机组和电池组混合供电驱动牵引电机,响应速度快、加速性能好,可以实现快速启动;运用车辆动力电池可以完成车辆冷启动;在江河、湖泊、海滩可以实现潜渡;在道路狭窄地段和桥梁上能实现原地转向;可以进行静音行驶,增强车辆隐蔽性;双能源结构,可过载行驶,极大提高了车辆机动性。同时,电传动系统易于实现无级变速,控制器可对驱动电机的转矩/转速进行分别控制,使控制准确,动态响应快。

第二是武器火力配备空间加大:发电机产生的电能除用来驱动车辆行驶外,也可为其他车载武器、设备提供电源,从而提高了与未来高能武器的集成能力,例如,电磁武器、电热化学武器、激光武器、导航系统、控制与诊断系统等武器、设备,增强机动武器火力。

第三是自身防护性能加强:发电机和电池组提供的电能也为电磁主动装甲的安装奠定了基础,同时,车辆静音行驶可以隐声、隐红外制导武器,在近海可以潜渡,隐蔽性增强,提高了车辆的主动防护能力。

第四是能源利用效率高:车辆具有混合动力和再生制动能量回收功能,用动力电池组或其他储能元件回收再生能量,特别是在再生制动转向时,内侧履带制动再生功率可传给外侧履带,提高能量的利用率;由于双源供电,可以降低内

燃机功率,实现按最低油耗控制或最大效率控制,从而降低油耗,提高效率,增加机动武器平台作战半径。

第五是便于总体布置与系统集成:电传动部件组合灵活,电缆柔性连接,电机、驱动电机和控制器部件可以灵活布置,优化和节省车内空间,便于模块的结构和灵活的布置,系统维修保养简单,可靠性和寿命较高。

电传动坦克装甲车辆是一个非常复杂的系统,是全电战斗车辆的基础。电传动系统的关键技术主要包括:整车综合控制技术、系统仿真分析、内燃机—发电机组及其控制技术、一体化系统集成电源平台、驱动系统及控制、动力分配与能量管理技术、整车综合冷却技术、网络化管理、电动化辅助系统等。

整车综合控制技术:整车综合控制技术根据驾驶员操纵指令、战技指标要求、车辆各动力单元的运行状态和能量管理系统的反馈信息等,根据需要实时地向内燃机—发电机控制系统、车辆推进系统、冷却系统、低压电器系统、储能系统和武器系统等提供有效和合理的电能分配与控制,实现协调综合控制和动力分配与能量管理,并完成各控制子系统状态信息的综合监视和故障诊断。

系统仿真分析技术:形成适用于电传动履带车辆的机械、电气与控制多学科高综合性和高集成化的系统仿真基础理论及其应用平台技术;建立履带装甲车辆电传动系统动力学、电气驱动及控制方案的全系统实时数学模型,开展动力学、电气及控制的多学科系统仿真与优化,实现电传动全系统参数设计、性能优化和预测仿真一体化;通过对虚拟样机、实时控制、半实物仿真技术的综合运用,形成以协同仿真、实时仿真和多学科优化为主的集成仿真技术及其应用平台。

内燃机—发电机组及其控制技术:内燃机—发电机组是整个电传动系统中的主动力源,发电机组控制是实现能量及时供给与分配的关键。根据车辆在动力源形式上的区别,内燃机的控制模式可分为两种,即单点恒功率运行和沿最低燃油消耗曲线工作。影响内燃机燃油消耗率的因素主要有工作转速和负荷率,适当调节内燃机的转速,可以保证内燃机一直工作在最佳燃油消耗状态。

一体化集成控制电源平台:未来全电坦克装甲车辆所有的驱动系统、辅助动力系统、控制系统、武器系统均需要电力供应,因此,集成多个电源的一体化电源平台便成为电传动履带车辆的一项关键技术。

驱动系统及控制技术:复杂多变的车辆行驶工况对驱动电机及其控制提出

了非常苛刻的要求。驱动电机既要在恒转矩区又要在恒功率区工作,起动、爬坡、转向时要求低速大转矩,机动时需要调速范围宽广。驱动系统及控制研究的目的在于协调两侧电机的工作,从而有效保证电传动履带车辆直驶的稳定性、转向的可操纵性,这是国际公认的技术难题。目前,驱动电机以高效、高紧凑、高速感应电机和永磁同步电机为主。高速感应电机控制上比较复杂,效率和功率密度不如永磁同步电机,但其本身的制造技术和控制技术都很成熟。永磁同步电机体积小、重量轻,效率和功率密度等性能明显高于感应电机,是未来技术发展的方向。

动力分配与能量管理技术:动力分配与能量管理技术主要是根据车辆行驶和作战状态,根据需求优先原则向车辆动力各系统分配动力和回收能量。随着车辆用电设备的增多和用电量的增加,特别是电磁、激光和电热化学武器等定向高能武器在装甲车辆上的使用,所需电能越来越多,动力分配与能量管理技术要对车载能源有效调配和使用。

整车综合冷却技术:由于电传动系统具有像内燃机那样的高温工作系统,也有像驱动电机控制这样的低温工作系统,而且要同舱工作。因此冷却系统主要包括同舱工作的高温循环回路和低温循环回路,电动化和智能化冷却系统将是未来冷却系统的发展方向。

网络化控制技术:由于计算机与通信控制技术的飞速发展,电传动车辆使用高达数十乃至数百个计算机进行控制,要对每一个子系统甚至元器件实施有效精准的控制,只有借助总线网络控制系统。总线控制技术使得车辆控制系统线束长度和重量大幅降低,控制和故障诊断深入到部件和元器件层,使得车辆控制、驾驶、故障诊断和维修保养高度智能化。目前,基于总线的网络化控制系统仍然在飞速发展之中。

电动化辅助系统技术:电传动车辆的发展趋势是全电化战斗车辆。电传动系统不仅为驱动系统提供动力,同时也可以为其他辅助系统提供能量,例如,制动系统、悬架系统、冷却系统。电动化辅助系统可以取代现有的液压系统、气压系统。

尽管电传动坦克装甲车辆的研究开发取得了长足的进展,与传统液力机械动力系统相比已显示出无可比拟的优越性,但目前也存在一些需要进一步解决的技术问题,主要是结构轻量化、能源利用高效化、电磁兼容、可靠性和耐久性等。

电传动坦克装甲车辆技术方兴未艾,混合动力电传动车辆未来趋势及发展

方向可以概括为：总体“大四化”——系统集成一体化、主辅系统全电化、整车操控智能化、能源利用高效化；部件“小四化”——核心部件轻量化、综合控制网络化、驱动/电源平台化、操纵控制线控化。我们可以满怀信心地期待，混合动力电传动技术将为未来地面机动武器的发展树起一座丰碑。

作者力图将该领域国内外最新的研究开发成果，以及北京理工大学团队的研究成果与心得体会奉献给同仁和读者，以助我国在该领域的创新与进步一臂之力，但多次易稿和修改，仍然难如人意。主要原因是有些工作仍然没有结束，有些理论与技术仍在探讨，谬误也难以避免。望读者体谅作者初衷，欢迎提出批评与斧正意见，共同推动我国混合动力坦克装甲车辆电传动的研究与开发工作快速向前发展。

作为一本专著，本书是北京理工大学电动车辆国家工程实验室全体教师、研究生在坦克装甲车辆电传动领域研究开发智慧的结晶，也是十多年科技成果的集中体现。参加本书资料整理和部分撰写的有何洪文副教授、李军求博士、谷中丽副教授、黄英副教授、王义春副教授、邹渊副教授、翟丽博士、王震坡副教授、宋强副教授、郭伟博士、王志福老师和董玉刚老师等。

王哲荣院士一直支持、指导、帮助和关心装甲车辆混合动力电传动系统总体和关键技术的研究和开发工作，更是在百忙之中抽空仔细审改本书的内容，并欣然为本书作序，在此深表感谢！

感谢“高等学科科研创新引智计划”基金对本书出版的资助。

孙逢春 张承宁

2008 年秋于电动车辆国家工程实验室

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 电传动装甲车辆发展简史	1
1.1.1 早期的电传动装甲车辆	1
1.1.2 电传动装甲车辆的冬眠期	2
1.1.3 20 世纪末期的电传动装甲车辆	3
1.1.4 电传动装甲车辆的最新发展	6
1.1.5 我国电传动装甲车辆的发展状况	10
1.2 电传动装甲车辆的发展背景	11
1.2.1 高能武器的应用	11
1.2.2 电子对抗与攻防转换	12
1.2.3 节能减排与增大作战半径	12
1.2.4 现代战争发展的需求	13
1.3 装甲车辆电传动系统结构与工作原理	15
1.3.1 电传动系统结构分类	15
1.3.2 混合动力电传动系统结构	16
1.3.3 混合驱动电传动系统结构	23
1.4 装甲车辆电传动关键技术	25
1.5 装甲车辆电传动发展趋势展望	27

参考文献	29
第2章 电传动装甲车辆纵向动力学	30
2.1 纵向动力学	30
2.1.1 行驶阻力	30
2.1.2 驱动力	32
2.1.3 直线行驶运动方程	33
2.2 动力性能	34
2.3 制动性能	35
2.3.1 制动要求	35
2.3.2 最大制动力矩(功率)计算	36
2.3.3 电制动与机械制动分配原则	36
2.3.4 电制动分析计算	37
2.3.5 机械制动的分析计算	37
2.4 电传动系统效率分析	38
2.4.1 电传动系统功率流	38
2.4.2 内燃机—发电机组效率	38
2.4.3 动力电池组效率	39
2.4.4 电机驱动系统效率	40
2.4.5 机械传动系统效率	42
2.4.6 电传动系统总效率	42
参考文献	43
第3章 电传动履带车辆转向动力学与控制	44
3.1 转向原理与转向动力学	45
3.1.1 转向原理	45
3.1.2 原地正反转向	48
3.1.3 $B/2$ 转向	49
3.1.4 小半径行进中转向	49
3.1.5 大半径修正转向	49
3.1.6 斜坡转向分析	49
3.1.7 转向控制策略	53
3.2 极限转向原理与控制	55

3.3	转速控制	60
3.3.1	控制任务及难点	60
3.3.2	驾驶员输入的定义与解释	61
3.3.3	转速调节控制策略	62
3.4	转矩控制	65
3.4.1	控制理论基础及可行性	65
3.4.2	驾驶员输入定义	66
3.4.3	转矩调节控制策略	67
	参考文献	70
第4章	内燃机—发电机组匹配与控制	71
4.1	电传动系统的动力源技术	71
4.2	IGPU 系统及其组成	72
4.3	IGPU 系统性能匹配设计	74
4.3.1	电传动系统能量传递的特点	74
4.3.2	内燃机工作特性	75
4.3.3	发电机工作特性	75
4.3.4	内燃机—发电机组的工作范围的确定	77
4.4	IGPU 系统控制策略	78
4.4.1	内燃机—发电机组功率跟踪工作模式设计	78
4.4.2	IGPU 系统功率跟随控制策略仿真分析	79
4.4.3	基于功率的前后功率链协调控制	82
4.4.4	无电池参与的前后功率链协调控制仿真研究	84
4.4.5	电池参与的前后功率链协调控制仿真研究	88
4.5	IGPU 系统反拖控制	89
4.5.1	模拟传统起动电机方式起动内燃机	90
4.5.2	电机高拖动转速方式起动内燃机试验	92
	参考文献	93
第5章	驱动电机及其控制系统	94
5.1	电传动车辆的几种驱动电机及其控制系统	94
5.1.1	几种驱动电机及其控制系统	94
5.1.2	电机及其控制系统中的功率器件	95

5.2	驱动电机及其控制系统的控制原理	96
5.2.1	直流驱动电机及其控制系统的控制原理	96
5.2.2	三相感应电机及其控制系统的控制原理	98
5.2.3	永磁同步电机及其控制系统的控制原理	100
5.2.4	续流增磁电机及其控制系统的控制原理	101
5.3	交流感应电机及其控制系统控制算法	105
5.3.1	交流感应电机 $d-q$ 参考坐标系数学建模	105
5.3.2	交流感应电机 VVVF 控制	106
5.3.3	交流感应电机矢量控制	107
5.3.4	速度控制算法	116
5.3.5	效率最大化控制算法	118
5.4	永磁同步电机及其控制系统	119
5.4.1	永磁同步电机的矢量控制	119
5.4.2	永磁同步电机的直接转矩控制	124
5.5	续流增磁电机及其控制系统建模与控制	127
5.5.1	续流增磁驱动电机及其控制系统驱动特性	127
5.5.2	驱动电机励磁磁场饱和状态分析	128
5.5.3	电机驱动转矩—转速特性计算分析	129
5.5.4	驱动时电机增磁绕组励磁电流—转速特性	134
5.5.5	驱动时电源电流与电机转速关系	136
5.5.6	最大驱动转矩 T_{emax} 和最大驱动功率 P_{max} 输出特性	138
5.5.7	续流增磁驱动电机及其控制系统特性分析	138
	参考文献	145
第6章	综合冷却系统	146
6.1	电传动综合冷却系统特征	146
6.2	综合冷却系统的分类及构成	148
6.3	闭式高温冷却水系	152
6.4	综合冷却系统传热与流动分析	154
6.4.1	冷却系统散热量	155
6.4.2	循环水流量及流动阻力	156

6.4.3	冷却风道设计	157
6.5	综合冷却系统调节技术	160
6.5.1	冷却系统调节的必要性	160
6.5.2	节温调节技术	161
6.5.3	风量调节技术	164
6.6	综合冷却系统评价	171
	参考文献	173
第7章	电传动系统综合控制与能量管理技术	175
7.1	电传动综合控制和能量管理技术特点	175
7.2	电传动综合控制系统	176
7.2.1	控制系统结构	176
7.2.2	电传动综合控制器功能	177
7.2.3	电传动综合控制器开发	178
7.3	一体化电源系统	181
7.3.1	装甲车辆电传动系统供电特点	181
7.3.2	电传动系统电源变换类型	182
7.3.3	一体化电源系统结构及工作原理	182
7.3.4	一体化电源系统控制逻辑	185
7.4	动力源构型分析与匹配	185
7.4.1	动力源构型	185
7.4.2	动力电池组参数匹配	187
7.5	电传动系统能量管理技术	190
7.5.1	“IGPU_AC/DC + B”构型能量管理策略	190
7.5.2	“IGPU_AC/DC + B_DC/DC”构型能量管理策略	203
7.6	“IGPU_AC/DC + B”构型能量管理策略仿真	208
7.6.1	确定仿真工况和基本参数	208
7.6.2	能量管理策略仿真结果	209
7.7	“IGPU_AC/DC + B_DC/DC”构型能量管理策略仿真	216
7.7.1	仿真方法	216
7.7.2	仿真结果	216
	参考文献	219

第 8 章 电池成组应用与管理	220
8.1 动力电池技术现状	220
8.2 动力电池基本参数	222
8.3 动力电池主要种类及特性	224
8.3.1 铅酸电池	224
8.3.2 锂离子电池	229
8.3.3 镍氢电池	235
8.4 电动车辆对电池性能要求	238
8.4.1 纯电动模式下电池性能要求	238
8.4.2 混合驱动模式下电池性能要求	239
8.4.3 动力电池性能要求举例	239
8.5 动力电池组不一致性	240
8.5.1 电池组不一致性表现形式	240
8.5.2 电池组电压不一致性统计规律	243
8.5.3 电池组电压不一致性建模	244
8.5.4 电池组电压不一致性评价	246
8.5.5 提高电池组一致性的措施	248
8.6 电池组寿命预估分析	249
8.6.1 电池组使用寿命定义	249
8.6.2 电池组使用寿命预估	249
8.7 电池组管理系统	252
8.7.1 电池管理系统方案	252
8.7.2 电池管理系统基本功能	253
8.7.3 电池电压采集方法	255
8.7.4 电池温度采集方法	258
8.7.5 电池管理系统设计举例	259
8.8 电池组管理的关键技术	262
8.8.1 电池性能建模	262
8.8.2 电池 SOC 预测	265
8.8.3 电池组峰值功率预测	270
8.8.4 电池组热管理	278

8.8.5	电池组故障诊断	282
	参考文献	285
第9章	电传动履带装甲车辆系统仿真技术	288
9.1	系统仿真的意义与作用	288
9.2	电传动系统关键部件及整车建模	290
9.2.1	内燃机—发电机组建模	290
9.2.2	动力电池组建模	293
9.2.3	电机驱动系统建模	294
9.2.4	电池组 DC/DC 变换器建模	296
9.2.5	履带车辆动力学建模	297
9.2.6	整车控制策略建模及整车模型集成	301
9.3	电传动履带车辆关键工况仿真	303
9.3.1	最大车速行驶工况	303
9.3.2	越野行驶工况	304
9.3.3	大半径修正转向	304
9.3.4	小半径行进中转向工况	305
9.3.5	中心转向工况	306
9.4	电传动履带车辆实时仿真技术	307
9.4.1	电传动履带车辆双侧电机驱动快速控制原型开发	307
9.4.2	“驾驶员—控制器”在环的双侧驱动控制实时仿真	314
9.4.3	电传动履带车辆综合控制实时仿真	320
	参考文献	324
第10章	装甲车辆混合动力电传动系统试验技术	326
10.1	电传动部件及子系统试验技术	326
10.1.1	内燃机—发电机组试验	326
10.1.2	动力电池组及管理系统试验	334
10.1.3	驱动电机及其控制系统试验	343
10.1.4	综合冷却系统试验	351
10.1.5	电控部件电磁兼容性试验	357
10.2	电传动系统台架综合联调试验技术	362
10.2.1	电传动系统台架联调试验设计	363

10.2.2 电传动系统通信联调试验	367
10.2.3 电传动系统性能模拟试验	368
10.3 电传动系统车载电磁兼容性试验技术	373
10.4 电传动车辆静音行驶性能试验	374
参考文献	376
后记	377