



★ ★ ★ ★  
★ “十三五” ★

国家重点出版物出版规划项目



国之重器出版工程

国防现代化建设

陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书

Mode Switch Control of  
Electromechanical Compound  
Transmission of Armored Vehicle:  
Theory and Methods

# 装甲车辆机电复合传动系统 模式切换控制理论与方法

项昌乐 马越 著

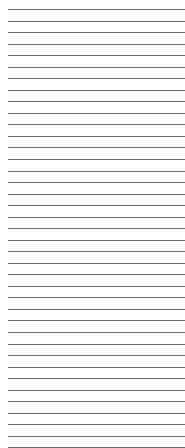


国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

★ ★ ★ ★  
★ “十三五” ★

国家重点出版物出版规划项目

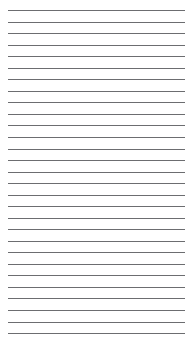
陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书



# 装甲车辆机电复合传动系统 模式切换控制理论与方法

Mode Switch Control of Electromechanical  
Compound Transmission of Armored Vehicle:  
Theory and Methods

项昌乐 马越 著



 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

新时期战争形态的演变,催生了以电能利用为基础的新一代坦克装甲车辆性能的变革。大功率机电复合传动可同时输出机械能和电能,是实现变革的核心关键。本书主要论述了下一代装甲车辆用机电复合传动技术所特有的模式切换规律和模式切换品质控制理论与技术,对多模式机电复合传动系统建模、兼顾经济性与动力性的模式切换规律、滞环修正策略、模式切换稳定性、模式切换品质和转矩主动补偿协调控制等理论与方法进行了详细论述。本书对于从事机电复合传动与混合动力车辆系统设计和控制策略研究的本科生、研究生以及广大工程技术人员具有参考意义。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

装甲车辆机电复合传动系统模式切换控制理论与方法 / 项昌乐, 马越著. —北京: 北京理工大学出版社, 2020.3

(陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书)

国家出版基金项目 “十三五”国家重点出版物出版规划项目 国之重器出版工程

ISBN 978-7-5682-8331-1

I. ①装… II. ①项… ②马… III. ①装甲车-机电系统-开关控制 IV. ①TJ811

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第054342号

---

出版社 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮编 / 100081

电话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经销 / 全国各地新华书店

印刷 / 北京捷迅佳彩印刷有限公司

开本 / 710毫米 × 1000毫米 1/16

印张 / 17

责任编辑 / 梁铜华

字数 / 300千字

文案编辑 / 梁铜华

版次 / 2020年3月第1版 2020年3月第1次印刷

责任校对 / 周瑞红

定价 / 86.00元

责任印制 / 王美丽

---

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

# 《国之重器出版工程》 编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	高延敏	何 琼	刁石京	谢少锋
闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生	赵永红
韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波	卢 山
徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁	张 炜
聂 宏	付梦印	季仲华		



## 专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- |     |                 |
|-----|-----------------|
| 于全  | 中国工程院院士         |
| 王越  | 中国科学院院士、中国工程院院士 |
| 王小谟 | 中国工程院院士         |
| 王少萍 | “长江学者奖励计划”特聘教授  |
| 王建民 | 清华大学软件学院院长      |
| 王哲荣 | 中国工程院院士         |
| 尤肖虎 | “长江学者奖励计划”特聘教授  |
| 邓玉林 | 国际宇航科学院院士       |
| 邓宗全 | 中国工程院院士         |
| 甘晓华 | 中国工程院院士         |
| 叶培建 | 人民科学家、中国科学院院士   |
| 朱英富 | 中国工程院院士         |
| 朵英贤 | 中国工程院院士         |
| 邬贺铨 | 中国工程院院士         |
| 刘大响 | 中国工程院院士         |
| 刘辛军 | “长江学者奖励计划”特聘教授  |
| 刘怡昕 | 中国工程院院士         |
| 刘韵洁 | 中国工程院院士         |
| 孙逢春 | 中国工程院院士         |
| 苏东林 | 中国工程院院士         |
| 苏彦庆 | “长江学者奖励计划”特聘教授  |
| 苏哲子 | 中国工程院院士         |
| 李寿平 | 国际宇航科学院院士       |



- 李伯虎** 中国工程院院士
- 李应红** 中国科学院院士
- 李春明** 中国兵器工业集团首席专家
- 李莹辉** 国际宇航科学院院士
- 李得天** 国际宇航科学院院士
- 李新亚** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、  
中国机械工业联合会副会长
- 杨绍卿** 中国工程院院士
- 杨德森** 中国工程院院士
- 吴伟仁** 中国工程院院士
- 宋爱国** 国家杰出青年科学基金获得者
- 张彦** 电气电子工程师学会会士、英国工程技术  
学会会士
- 张宏科** 北京交通大学下一代互联网互联设备国家  
工程实验室主任
- 陆军** 中国工程院院士
- 陆建勋** 中国工程院院士
- 陆燕荪** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、  
原机械工业部副部长
- 陈谋** 国家杰出青年科学基金获得者
- 陈一坚** 中国工程院院士
- 陈懋章** 中国工程院院士
- 金东寒** 中国工程院院士
- 周立伟** 中国工程院院士



- 郑纬民 中国工程院院士  
郑建华 中国科学院院士  
屈贤明 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任  
项昌乐 中国工程院院士  
赵沁平 中国工程院院士  
郝 跃 中国科学院院士  
柳百成 中国工程院院士  
段海滨 “长江学者奖励计划”特聘教授  
侯增广 国家杰出青年科学基金获得者  
闻雪友 中国工程院院士  
姜会林 中国工程院院士  
徐德民 中国工程院院士  
唐长红 中国工程院院士  
黄 维 中国科学院院士  
黄卫东 “长江学者奖励计划”特聘教授  
黄先祥 中国工程院院士  
康 锐 “长江学者奖励计划”特聘教授  
董景辰 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员  
焦宗夏 “长江学者奖励计划”特聘教授  
谭春林 航天系统开发总师

# 《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》

## 编写委员会

名誉主编：王哲荣 苏哲子

主 编：项昌乐 李春明 曹贺全 丛 华

执行主编：闫清东 刘 勇

编 委：（按姓氏笔画排序）

马 越 王伟达 王英胜 王钦钊 冯辅周

兰小平 刘 城 刘树林 刘 辉 刘瑞林

孙葆森 李玉兰 李宏才 李和言 李党武

李雪原 李惠彬 宋克岭 张相炎 陈 旺

陈 炜 郑长松 赵晓凡 胡纪滨 胡建军

徐保荣 董明明 韩立金 樊新海 魏 巍



## 编者序

坦克装甲车辆作为联合作战中基本的要素和重要的力量，是一种最具临场感、最实时、最基本的信息节点和武器装备，其技术的先进性代表了陆军装备现代化程度。

装甲车辆涉及的技术领域宽广，经过几十年的探索实践，我国坦克装甲车辆技术领域的专家积累了丰富的研究和开发经验，实现了我国坦克装甲车辆从引进到仿研仿制再到自主设计的一次又一次跨越。在车辆总体设计、综合电子系统设计、武器控制系统设计、新型防护技术、电子电气系统设计及嵌入式软件设计、数字化与虚拟仿真设计、环境适应性设计、故障预测与健康管理等新型工艺等方面取得了重要进展，有些理论与技术已经处于世界领先水平。随着我国陆战装备系统的理论与技术取得重要进展，亟需通过一套系统全面的图书来呈现这些成果，以适应坦克装甲车辆技术积淀与创新发展的需要，同时多年来我国坦克装甲车辆领域的研究人员一直缺乏一套具有系统性、学术性、先进性的丛书来指导科研实践。为了满足上述需求，《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》应运而生。

北京理工大学出版社联合中国北方车辆研究所、内蒙古金属材料研究所、北京理工大学、中国人民解放军陆军装甲兵学院、南京理工大学、中国人民解放军陆军军事交通学院和中国兵器科学研究院等单位一线的科研和工程领域专家及其团队，策划出版了本套反映坦克装甲车辆领域具有领先水平的学术著作。本套丛书结合国际坦克装甲车辆技术发展现状，凝聚了国内坦克装甲车辆技术领域的主要研究力量，立足于装甲车辆总体设计、底盘系统、火力系统、



防护系统、电气系统、电磁兼容、人机工程、质量与可靠性、仿真技术、协同作战辅助决策等方面，围绕装甲车辆“多功能、轻量化、网络化、信息化、全电化、智能化”的发展方向，剖析了装甲车辆的研究热点和技术难点，既体现了作者团队原创性科研成果，又面向未来、布局长远。为确保其科学性、准确性、权威性，丛书由我国装甲车辆领域的多位领军科学家、总设计师负责校审，最后形成了由24分册构成的《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》，具体名称如下：《装甲车辆概论》《装甲车辆构造与原理》《装甲车辆行驶原理》《装甲车辆设计》《新型坦克设计》《装甲车辆武器系统设计》《装甲车辆火控系统》《装甲防护技术研究》《装甲车辆机电复合传动系统模式切换控制理论与方法》《装甲车辆液力缓速制动技术》《装甲车辆悬挂系统设计》《坦克装甲车辆电气系统设计》《现代坦克装甲车辆电子综合系统》《装甲车辆嵌入式软件开发方法》《装甲车辆电磁兼容性设计与试验技术》《装甲车辆环境适应性研究》《装甲车辆人机工程》《装甲车辆制造工艺学》《坦克装甲车辆通用质量特性设计与评估技术》《装甲车辆仿真技术》《装甲车辆试验学》《装甲车辆动力传动系统试验技术》《装甲车辆故障诊断技术》《装甲车辆协同作战辅助决策技术》。

《陆战装备科学与技术·坦克装甲车辆系统丛书》内容涵盖多项装甲车辆领域关键技术工程应用成果，并入选“国家出版基金”项目、“‘十三五’国家重点出版物出版规划”项目和工信部“国之重器出版工程”项目。相信这套丛书的出版必将承载广大陆战装备技术工作者孜孜探索的累累硕果，帮助读者更加系统、全面地了解我国装甲车辆的发展现状和研究前沿，为推动我国陆战装备系统理论与技术的发展做出更大的贡献。

丛书编委会



## 前 言

陆军是以占领及控制人类赖以生存的陆地为目的的武装力量。诞生于“一战”烽火中的坦克装甲车辆具备强大的直射火力、高度越野机动性和强大的装甲防护力，是陆军实施战场突击、占领和控制等作战的核心装备和决胜力量，被誉为“陆战之王”。

进入 21 世纪后，体系化作战、信息化作战和多域作战等新的作战模式对坦克装甲车辆的全域作战能力提出更高的要求。新一代陆战装备平台，集火力、机动、防护和信息四位一体，具有强大近距离突击能力和中程超视距打击能力，高速平顺的越野机动能力，主、被动防护相结合的综合防护能力，指挥控制感知高度融合的电气化、网络化信息战能力。上述目标的实现，需要大功率电能作为支撑。传统的坦克装甲车辆传动系统仅具有机械能输出能力，无法满足新一代坦克装甲车辆更高机动性要求以及对大功率电能的全新需求。大功率机电复合传动可以同时输出机械能和电能，推动坦克实施以电能利用为核心的性能变革，实现全地域机动、高毁伤火力、强生存防护和智能网联信息等全新特征，从而颠覆现有作战模式，重塑未来陆战战场形态。

大功率机电复合传动是以多段行星变速技术为基础，通过行星机构和发电机、电动机的协调实现功率分流或汇流传递和换段调速，减小对电机功率的需求的同时获得大功率机电无级传动性能，为车辆提供理想的动力输出特性和发电特性，并且获得高功率密度和提高传动效率。机电复合传动技术的应用，为装备带来以下巨大优势：

### 1. 坦克装甲车辆全地域机动性能的大幅提高

通过机械、电能复合能源的支持和发动机、发电机及电动机等多动力的协



调控制, 坦克装甲车辆在平原、高原、山地与戈壁等全地域机动作战性能大幅提升, 战术机动性指标如加速性能、转向性能、最大爬坡度和制动性能等指标倍增, 全面超过现役第三代主战装备。

大功率供电不仅为武器和信息系统提供所需电能, 同时也可作为坦克的主动悬挂系统供电, 从而实现平均越野速度的提升, 坦克车辆遂行战役包围、机动迂回、纵深突击的快速性大幅度提高; 利用动力电池的负载均衡和储能功能, 通过机电多功率流的精确调控, 使得内燃机工作在最佳经济区, 并可有效回收车辆制动能量, 提升能量转换与传递效率, 发动机燃油经济性提高 20% 以上, 实现坦克装甲车辆作战半径的显著延长, 同时降低后勤补给压力和作战成本, 全面提高了坦克装甲车辆的战役机动性。

大功率机电复合传动通过提升输入转速和高紧凑机电融合设计, 可达到更高的体积功率密度, 从而为降低整车质量和体积做出贡献, 使陆军主战装备具有更优的全球战略投送能力, 实现战略机动性的跨越式提高。

### 2. 推动坦克装甲车辆火力性能的变革

机电复合传动提供的大功率电能使得电热化学炮、电磁炮等电能武器以及激光、微波等定向能武器的应用成为可能, 大幅提升武器的毁伤威力和精确可控程度, 推动下一代装甲装备火力性能的变革。

### 3. 提升坦克装甲车辆防护能力

大功率机电复合传动技术的应用, 使装备既能实现寒区快速起动, 又能在战场关闭发动机, 由电池供电完成战车静默值守、作战和行驶等各项任务, 降低车辆可见特征和红外特征, 提高全天候作战性能。此外, 机械动力设备的减少, 能够弱化作战平台的噪声特征, 有利于提高隐蔽性。同样, 大功率电能供给也为电磁防护技术的应用奠定了基础, 全面提升了坦克车辆的防护能力。

### 4. 提升坦克装甲车辆信息化、网络化和无人作战的能力

机电复合传动具有丰富的底层状态信息以及巨大的实时优化控制能力, 为车辆内部设备和车际信息共享、高可用性和高可靠性无人化平台自主运行控制、实现无人驾驶奠定了基础。机电复合传动目前正在成为信息化、网络化和无人作战装备的首选动力传动技术。

总之, 机电复合传动可实现大功率机电能量的高效转换与供给, 同时输出用于车辆驱动的机械能和武器、信息与防护所需电能, 从而成为新一代坦克装甲车辆的核心技术, 也是世界各坦克强国竞相角逐的前沿制高点。

模式切换是大功率机电复合传动所独有的核心特征。模式切换过程是由车辆综合控制系统通过操纵离合器、制动器等元件的结合、分离, 电机转矩、转速的调控以及发动机转速、转矩的调节来实现的, 完成换段、换挡、工况转换



(直驱驱动、转向、制动等)以及装备机电复合传动车辆的行驶状态改变,达到拓展车辆的行驶速度和驱动能力范围,使装甲车辆自动适应复杂路面载荷,优化发动机、电动机、发电机、动力电池组和机械系统的工作点等目的,对于车辆性能的改善提升意义至关重要。

本书重点针对大功率机电复合传动的模式切换规律和品质控制开展了以下内容的论述:

(1)采用实验建模和理论建模相结合的方法建立了关键部件的数学模型,分析了机电复合传动的机械点分布和不同速比情况下的功率流情况,提出了一种考虑功率分配装置机械损失、具有较高精度的机电复合传动综合效率分析模型。

(2)针对具有多个工作模式的机电复合传动,设计了以车速、电池许用功率为输入参数的动力性模式切换规则,基于等效燃油最小化优化算法设计了以车速、油门开度、等效因子为输入参数的经济性模式切换规则。在UDDS工况下,将所提出的模式切换规则嵌入ECMS架构中,进一步改善了原有单参数模式切换规则在燃油经济性方面的缺陷。

(3)提出了利用滞回修正系数、减少频繁模式切换的优化策略。在基于ECMS设计的经济性模式切换规则基础上,引入修正因子,在保证良好燃油经济性的前提下减少模式频繁切换现象的发生。

(4)在模式切换品质控制方面,分析了系统矩阵的特征值分布及其稳定性特征,机电驱动模式、机械驱动模式与纯电驱动模式间的模式切换可以实现平滑过渡,使得车辆在模式切换前后不发生失稳现象,同时保持良好的驱动性能。

(5)提出了一种基于模型参考自适应(MRAC)的转矩协调控制策略。该策略采用超稳定性理论方法分别设计了线性补偿器和自适应反馈控制器,能够有效地降低车辆冲击度和离合器滑摩功。

(6)通过分析离合器接合过程中的过驱动问题,借鉴参考模型的思想,通过模型预测控制方法处理了约束控制问题,并规划出最优虚拟控制量,然后基于控制量最小化的分配方法将最优虚拟控制量通过适当的加权分配到实际控制量。相比MRAC,仿真结果验证MPCA能够实现进一步提升离合器转矩补偿的效果,使得离合器滑摩响应速度更快、车辆冲击度更小、离合器的滑摩损失更低,显著地改善了离合器接合过程的切换品质。

上述结果经过了数字仿真、半实物仿真和台架测试验证,证明了所提出方法能够实现预期目标,具有良好的实用价值。

机电复合传动的模式切换规则和切换控制品质是混合动力坦克装甲车辆



动力性、燃油经济性以及作战性能的关键，是一个具有巨大发展潜力的新兴研究领域。作者力图将该领域国内外最新的研究成果和北京理工大学团队的相关成果与研究心得体会奉献给同仁和读者，以促进我国在该领域的技术创新和产品研发。受作者水平所限，而且机电复合传动技术仍在不断高速发展、快速迭代，本书虽经多次易稿修改，仍然难以尽如人意，谬误在所难免。望读者体谅作者初衷，欢迎提出批评和修改意见，共同推动我国坦克装甲车辆机电复合传动技术的研究与开发工作快速发展。

本书是车辆传动国防科技重点实验室北京理工大学分部动液组全体教师、研究生智慧的结晶。参加本书部分内容撰写和资料整理的有刘辉教授、王伟达副教授、韩立金副教授、何韡博士、黄琨博士、李奥同学和严琦同学。

项昌乐 马 越

2019 年于车辆传动国防科技重点实验室



# 目 录

第 1 章 绪论 .....	001
1.1 研究的背景及意义 .....	002
1.2 机电复合传动技术发展 .....	006
1.2.1 民用车辆的发展概况 .....	006
1.2.2 军用车辆的发展概况 .....	011
1.3 机电复合传动关键技术 .....	017
1.3.1 能量管理策略 .....	017
1.3.2 模式切换规则 .....	019
1.3.3 机电复合传动模式切换协调控制 .....	021
第 2 章 机电复合传动系统建模与特性分析 .....	027
2.1 机电复合传动系统建模 .....	028
2.1.1 发动机模型 .....	028
2.1.2 电机 / 发电机模型 .....	029
2.1.3 功率耦合机构模型 .....	031
2.1.4 储能系统模型 .....	032
2.1.5 车辆纵向动力学模型 .....	038
2.2 双模混联式混合动力车辆动力传动系统分析 .....	038
2.2.1 转速分析 .....	039
2.2.2 转矩分析 .....	040



2.2.3	机械点分析 .....	041
2.2.4	功率流分析 .....	042
2.2.5	功率分配机构效率研究 .....	045
2.3	本章小结 .....	054
<b>第3章</b>	<b>机电复合传动能量管理策略研究 .....</b>	<b>055</b>
3.1	最优控制问题的数学背景 .....	056
3.1.1	最优控制问题描述 .....	056
3.1.2	最优控制问题求解方法 .....	057
3.2	庞特里亚金最小值原理 .....	058
3.2.1	最小值原理 .....	058
3.2.2	混合动力车辆最优控制问题应用 .....	059
3.2.3	最小值原理的全局最优条件 .....	060
3.3	等效燃油消耗最小化策略 .....	063
3.3.1	燃油消耗 .....	063
3.3.2	等效燃油消耗最小化基本概念 .....	063
3.3.3	等效因子 .....	065
3.3.4	ECMS 与最小值原理的关系 .....	067
3.4	自适应等效燃油消耗最小化策略 .....	068
3.4.1	自适应调整方法 .....	068
3.4.2	双模混联式混合动力车辆自适应等效燃油最 小化控制策略 .....	071
3.5	能源效率最优化策略 .....	081
3.5.1	混联式混合动力车辆的能源效率 .....	081
3.5.2	能源效率最优化策略 .....	083
3.6	能源效率最优化策略与自适应等效燃油消耗最小化 策略的对比 .....	089
3.6.1	优化效率 .....	089
3.6.2	系统工作特性与燃油消耗 .....	090
3.7	本章小结 .....	094
<b>第4章</b>	<b>机电复合传动效率模型验证与能量管理策略试验研究 .....</b>	<b>095</b>
4.1	试验目的和内容 .....	096



4.1.1	试验目的 .....	096
4.1.2	试验内容 .....	096
4.2	试验平台 .....	096
4.3	能量管理策略台架试验 .....	100
4.3.1	自适应等效燃油消耗最小化 (A-ECMS) 试验 .....	100
4.3.2	能源效率最优化策略 (EEMS) 试验 .....	102
4.4	功率分配装置效率试验 .....	104
4.4.1	效率试验 (EEMS) .....	104
4.4.2	效率试验 (ECMS) .....	105
4.5	本章小结 .....	108
<b>第 5 章</b>	<b>机电复合传动换段规律研究 .....</b>	<b>109</b>
5.1	机电复合传动性能指标分析 .....	110
5.1.1	车辆的动力性分析 .....	110
5.1.2	燃油经济性分析 .....	112
5.2	机电复合传动动力性换段规律研究 .....	113
5.2.1	动力性优化目标 .....	113
5.2.2	约束 .....	113
5.2.3	优化计算流程 .....	114
5.2.4	动力性模式切换规则优化结果与分析 .....	115
5.3	机电复合传动经济性换段规律研究 .....	119
5.3.1	经济性优化目标 .....	119
5.3.2	约束 .....	119
5.3.3	优化计算流程 .....	120
5.3.4	经济性换段规律优化结果与分析 .....	121
5.3.5	换段规律的有效性 .....	124
5.3.6	换段规律的适应性 .....	127
5.3.7	换段规律与换挡规律的区别 .....	127
5.3.8	能量管理策略与换段规律关系 .....	128
5.4	本章小结 .....	128
<b>第 6 章</b>	<b>机电复合传动系统模式切换稳定性分析 .....</b>	<b>129</b>
6.1	引言 .....	130