

MILITARY VEHICLES INTEGRATED
ELECTRONICS SYSTEMS
BUS NETWORKS

宋小庆 著

军用车辆 综合电子系统总线网络



国防工业出版社
National Defense Industry Press

军用车辆综合电子系统 总线网络

宋小庆 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

军用车辆综合电子系统总线网络/宋小庆著. —北京:
国防工业出版社, 2010. 9

ISBN 978-7-118-07082-8

I. ①军... II. ①宋... III. ①军用车辆—电子系统:
计算机控制系统—总线 IV. ①U469.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 183249 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)

北京嘉恒彩色印刷有限公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 16 字数 283 千字

2010 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 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

前 言

随着信息技术高速发展,一场以信息战为核心的新军事变革在全球范围内悄然兴起。未来陆军作战系统将是以后息系统为核心,综合集成各类武器平台及诸军兵种联合构成的网络化作战系统。所以,作为未来陆军综合作战系统的主要组成部分,军用车辆已经不再是未来军事战争中的一个孤立节点,而是网络化作战系统中一个极为重要的武器平台。为此,军用车辆综合电子系统的概念应运而生。军用车辆综合电子系统是以系统理论为指导,根据顶层设计思想,将车内乘员终端以及电气、武器、定位导航、敌我识别、指挥控制等各分系统以总线网络为核心进行有机连接,通过消息的综合实现功能综合,最终以提高车辆作战效能为目标的综合化系统。

1991 年的“海湾战争”,1998 年的“沙漠之狐”联合行动以及 2003 年的伊拉克战争等充分表明了综合电子系统是提高武器装备战斗力的“倍增器”,是信息化战争中网络协同作战的重要基石。近年来,世界各国对军用车辆综合电子系统的发展给予了高度重视,如在 M1A2SEP 坦克、勒克莱尔坦克、挑战者坦克以及其他战车等上面都开展了综合电子系统的研制和应用。从发展历程上看,已经从最初将电器与仪表通过总线相连接的局部探讨阶段,过渡到车辆内部全面改造阶段,并逐步发展到目前以系统工程为指导进行一体化设计的全面综合阶段。在这一发展变迁中,总线网络是军用车辆综合电子系统的核心技术,该总线网络不同于一般的计算机网络及其总线的概念,它是一个基于严格实时性和高度可靠性的分布式系统。总线网络的性能直接决定了车辆综合电子系统性能,从而影响了车辆的作战效能。尽管目前有很多如 1553B 等军用总线已经应用到装甲车辆之中,但就研究和应用情况来看,在其理论 and 设计方法研究上,尤其是对总线网络的实时性和可靠性等性能研究方面尚处于薄弱环节,而这一环节正是车辆作战效能能否充分发挥的重要保障。因此,从事和加强该方面的研究,对促进军用车辆综合电子系统的发展以及加快我国

陆军信息化建设具有重要推动作用。

就查阅的国内外资料来看,迄今为止,还没有一本系统研究关于军用车辆综合电子系统总线网络方面的著作。十多年来,作者一直密切结合军用车辆信息化发展的军事需求,紧密跟踪国际装甲车辆综合电子系统发展动态,及时将最新总线网络技术应用到军用车辆综合电子系统中,并取得了一定的研究成果。作者将这些成果进行了总结和提炼,从理论分析、总体设计方法、消息调度和信息流优化设计、总线网络实时性和可靠性分析等角度系统地、全面地开展研究,撰写了此书。具体来讲,主要体现在3个方面:其一,以系统论为指导,提出了对车辆综合电子总线网络这一复杂系统进行分析研究的理论框架和研究方法。其二,系统全面地开展了军用车辆综合电子系统总线网络的分析研究,针对总线网络自身特点分别提出了不同的调度策略。同时,首次在我国军用战车上开展了的新型 MilCAN 总线网络的研究,并将成果纳入到本书中,该总线网络对于实时性要求极高的车辆火控系统来讲,优势极为明显。其三,针对综合电子系统网络协议复杂、总线传输实时性强的特点,在深入研究总线消息传输控制规程的基础上,建立了基于高级 Petri 网架构的装甲车辆综合电子系统多种总线性能分析模型,以实现信息流的动态刻画与调度。同时,以复杂系统理论为指导,运用系统分析方法,结合功能完备性和动静态特性,从总线通信链路、网络结构复杂度及网络系统可用度等多个分析层面构建了系统可靠性的分析计算模型,提出了较为完备的建模方法,克服了以往仅从系统可用度角度对系统进行可靠性静态评估的分析方法所带来的局限性,为对系统可靠性全面深入的分析研究奠定了理论基础。

本书共分8章。第1章为军用车辆综合电子系统,主要从系统概念、结构组成、国内外发展动态等方面进行系统介绍。第2章描述分析了总线网络原理。第3章从系统论的角度分析和研究了总线网络总体设计的方法和理论。第4至8章内容,是根据作者科研成果、学术论文进行提炼和扩展而成的。其中,第4至7章分别对军用车辆上的1553B总线网络、CAN总线网络、MilCAN总线网络以及MIC总线网络进行了理论分析、信息流优化和实时调度研究。第8章根据不同总线网络的特性,分别运用高级Petri网理论对多种总线网络进行了分析与建模,并对总线网络传输的实时性和可靠性的重要指标进行了分析评估。

该书的内容反映了我国军用车辆综合电子系统总线网络技术在理论和实践方面的最新成就,对我国军用车辆综合电子系统的研发提供新思想和新方法,对从事军用车辆综合电子系统及相关专业的工程技术和科技人员、科研单位及高校相关专业的本科生和研究生具有重要学术意义和应用价值。

在本书的准备和撰写过程中,得到了装甲兵工程学院臧克茂院士的关心、指导以及大力支持和帮助,得到了装甲兵工程学院常天庆教授、刘德刚教授的支持和帮助,装甲兵技术研究所邵毅总工和中国兵器工业集团 201 所卢权华研究员给本书提出了非常宝贵的意见和建议,本书还得到了北京理工大学郑慕侨教授、项昌乐教授和闫清东教授的关心和帮助。在成稿过程中,装甲兵工程学院梁计春教授、单志伟教授、杨万利教授也提出了宝贵意见,装甲兵工程学院的朱昀熠、陈克伟等老师对整个书稿进行了校对,邹勇、吴松平、熊全谦、任维彬等研究生在资料整理和实验验证上给予了大力的协助。作者在此一并表示衷心感谢。

军用车辆综合电子系统总线网络涉及学科广,对该方面的研究是一项探索性工作,由于时间和作者学识水平的限制,难免有错误和不足之处,恳请专家和读者不吝指正。

宋小庆

2010 年 8 月

目 录

第1章 装甲车辆综合电子系统	1
1.1 基本概念	1
1.1.1 车辆电子学	1
1.1.2 战斗管理系统	2
1.1.3 装甲车辆综合电子系统	2
1.2 体系结构与组成	3
1.2.1 功能划分	3
1.2.2 体系结构	4
1.2.3 主要组成	4
1.3 发展概况及其关键技术	8
1.3.1 发展概况	8
1.3.2 关键技术	17
1.4 军事意义	20
1.5 发展趋势	23
第2章 总线网络原理	24
2.1 数据传输	24
2.1.1 基本概念	24
2.1.2 数据传输模型	25
2.1.3 多路传输技术	25
2.1.4 基带传输	28
2.2 总线网络	30
2.2.1 引言	30
2.2.2 军用总线	32
2.2.3 拓扑结构	33

2.2.4	协议体系结构	35
2.2.5	网络互连	36
2.2.6	性能评价	38
第3章	总线网络总体设计方法	44
3.1	系统工程理论	44
3.2	顶层设计思想	50
3.3	设计方法	52
3.3.1	设计思想及内容	52
3.3.2	体系结构	53
3.3.3	消息的综合	60
3.3.4	容错设计	71
第4章	1553B 总线网络	75
4.1	MIL-STD-1553B 总线协议分析	75
4.1.1	引言	75
4.1.2	拓扑结构	76
4.1.3	编码方式	77
4.1.4	同步	77
4.1.5	消息	78
4.1.6	实时性与可靠性分析	82
4.2	1553B 总线控制器	84
4.2.1	功用	84
4.2.2	BC 存储机制	84
4.2.3	RT 存储机制	92
4.2.4	MT 监视器存储机制	95
4.3	战车综合电子系统 1553B 总线网络构建	96
4.3.1	方案设计	96
4.3.2	消息传输规划	98
4.3.3	命令周期表设计	99
4.3.4	消息调度算法	101
4.3.5	错误管理策略	109

4.3.6	通信设计	110
第5章	CAN 总线网络	115
5.1	CAN 总线协议分析	115
5.1.1	总线分层	115
5.1.2	拓扑结构	116
5.1.3	编码方式	117
5.1.4	位定时与同步方法	117
5.1.5	报文规划	120
5.2	CAN 总线控制器	124
5.2.1	特点与结构	124
5.2.2	报文存储机制	125
5.2.3	报文通信方式	129
5.3	战车底盘综合电气系统 CAN 总线网络构建	130
5.3.1	方案设计	130
5.3.2	消息传输规划	133
5.3.3	通信模型	135
5.3.4	优先级分配策略	136
5.3.5	高层协议设计	137
5.3.6	通信设计	140
5.4	装甲车辆网络化在线故障诊断系统构建	142
5.4.1	方案设计	142
5.4.2	系统工作模式	143
5.4.3	数据通信阵列	144
5.4.4	通信速率确定方法	146
5.4.5	数据管理与调度模型	147
第6章	MilCAN 总线网络	148
6.1	MilCAN 总线分析	148
6.1.1	总线特点	148
6.1.2	帧格式定义	149
6.1.3	消息类型	149

6.1.4	优先级分配策略	150
6.1.5	同步帧消息	152
6.1.6	异步消息的触发	152
6.1.7	节点工作模式	153
6.2	战车火控系统 MilCAN 总线网络构建	154
6.2.1	方案设计	154
6.2.2	消息传输规划	156
6.2.3	总线节点设计	157
6.2.4	消息存储	160
6.2.5	消息调度与通信	162
第 7 章	MIC 总线网络	166
7.1	MIC 总线协议分析	166
7.1.1	总线特点	166
7.1.2	拓扑结构	167
7.1.3	消息	167
7.2	MIC 控制器	170
7.2.1	控制器组成与特点	170
7.2.2	操作模式	171
7.3	装甲车辆电源电气管理控制系统 MIC 总线网络构建	174
7.3.1	总体方案	174
7.3.2	控制策略	176
第 8 章	基于高级 Petri 网的总线网络性能分析	180
8.1	总线网络分析方法	180
8.1.1	分析目的	180
8.1.2	分析方法	180
8.2	Petri 网理论	181
8.2.1	基本概念	182
8.2.2	有色 Petri 网	185
8.2.3	随机 Petri 网	188
8.3	基于有色 Petri 网的 1553B 总线网络分析	190

8.3.1	网络结构	190
8.3.2	网络建模	190
8.3.3	模型实现	192
8.3.4	实验分析	195
8.4	基于有色 Petri 网的 MilCAN 总线分析	200
8.4.1	网络结构	200
8.4.2	网络建模	201
8.4.3	性能指标	205
8.4.4	实验分析	205
8.5	基于随机 Petri 网的 1553B 总线网络分析	207
8.5.1	网络结构	207
8.5.2	网络建模	208
8.5.3	性能指标	216
8.5.4	实验分析	217
8.6	基于随机 Petri 网的总线网络可靠性分析	220
8.6.1	总线通信链路可靠性分析	221
8.6.2	系统网络可靠性分析	225
8.6.3	系统可用度分析	236
参考文献		242

第 1 章 装甲车辆综合电子系统

在以信息控制技术为主导的高技术武器发展时代,信息是“坦克实现未来火力、机动、防护功能的基础”,信息本身“不仅是构成作战能力的基本要素之一,而且是火力、机动、防护三要素发生变革的推动因素”。综合电子系统是对信息的高度综合和应用,是未来坦克装甲车辆的关键技术,同时也是未来主战坦克作为新一代先进武器装备的重要标志。本章就装甲车辆综合电子系统的基本概念、军事需求、体系结构和相关技术以及国内外发展状况和发展趋势进行概念性介绍。

1.1 基本概念

1.1.1 车辆电子学

车辆电子学的概念是由美国首先提出来的。美军在研制 M1 坦克时,日益复杂的电子、电气系统使车内布线十分困难,设备的可靠性、维修性、可接近性等总体性能也因此而下降。为改变这种局面,美军装甲司令部借用民用电信业的多路传输技术和航空电子学的成功经验,在美国坦克机动车辆司令部(TACOM)主持下,于 1975 年开始以 M60 坦克为样车研制“电源管理、检测和分配系统的先进技术(ATEPS)”车载电子系统。其目的是运用多路传输技术进行电力分配、计算机辅助电源管理和控制、子系统(或传感器)之间的通信等。ATEPS 的研究结果表明:建立综合电子系统后,可以大大减少主战坦克的全寿命周期费用。1982 年 ATEPS 装备于部分 M1 坦克,此技术同时应用于步兵战车和自行火炮系统。可以说 ATEPS 是车内信息系统的早期形式,建立了充分利用多路传输、数据处理和综合控制、综合显示技术进行坦克系统设计的概念,这也是车辆电子学的开端。

1981 年,美国陆军总结了研制 ATEPS 的经验,参照航空电子学,正式提出了车辆电子学的概念,并产生了一个新词——VETRONICS(Vehicle Electronics 的合成)。

车辆电子学主要研究利用多路传输技术将车内众多的动力、数据传输线路综合起来,简化电气线路,优化和综合子系统,并在坦克装甲车辆与数字化战场之间保持信息交换。

和传统设计方法相比,运用多路传输技术综合的装甲车辆表现出如下明

显优势:

- (1) 简化各系统之间的连线,提高了车内空间的利用率。
- (2) 总线结构易于实现通用化、模块化设计,显著降低成本和后勤保障费用。
- (3) 由于资源和信息共享,各子系统可以互补工作,具有实时战斗能力,提高了生存能力。
- (4) 总线结构便于功能扩展。
- (5) 具有机内诊断和故障预测功能,提高了车辆的可靠性、维修性、保障性和测试性。

提高了战场管理能力。

车辆电子学作为一门学科技术的建立标志着地面车辆电子综合化的诞生。

1.1.2 战斗管理系统

1982年,美国陆军又提出“战斗管理系统”的概念,实际上就是将车辆电子学技术延伸到战场,替代战场上那些重复性的、耗时的人工作业,全面提高指挥控制、侦察、火力分配能力。实际上,战斗管理系统就是车际信息系统的雏型。因此可以说,“车辆电子学”和“战斗管理系统”概念的建立,正式启动了装甲车辆车内信息化和车际信息化的全面进程。美国陆军装甲战斗车辆的信息化建设正是对这两部分建设的完善和扩充。世界各国的陆军也都沿着这两个方向进行装甲车辆的信息化建设。

1.1.3 装甲车辆综合电子系统

装甲车辆综合电子系统是车辆电子学和战斗管理系统的综合。我国对装甲车辆综合电子系统有以下几种定义:

1. 定义一(从功能角度定义)

装甲车辆综合电子系统是以数据总线为核心,利用计算机控制、数字通信和总线等技术,把武器系统、推进系统、防护系统以及定位导航、电子对抗、战场管理等系统信息有机联系在一起的车辆电子系统。该系统具有良好的C⁴ISR接口,采用统一的标准软件,做到与友邻车辆、上级指挥机关和其他武器平台之间战场信息互连,实现信息资源共享,并使目标探测、火力控制、作战指挥、战场机动、综合防护和故障诊断等形成一体化的作战系统。其核心思想是通过消息综合达到功能综合,充分发挥各系统功能以提高整车作战效能。

2. 定义二(从组成角度定义)

《GJB 5206-2003 装甲车辆综合电子系统设计准则》中定义:根据需要,通

过多路传输数据总线将装甲车辆上电子设备及电子控制系统的信息综合起来,实现功能综合和信息共享的所有软件和硬件组合。

装甲车辆综合电子系统的发展目标是:使装甲车辆电子系统直接加入到数字化战场中,实现战场信息管理与装甲车辆控制、指挥相结合,以增强其在未来战场上的综合作战能力和生存能力。

1.2 体系结构与组成

1.2.1 功能划分

根据目前装甲车辆的战场需求及其作用,可以对装甲车辆综合电子系统功能进行大致划分,如图 1-1 所示。

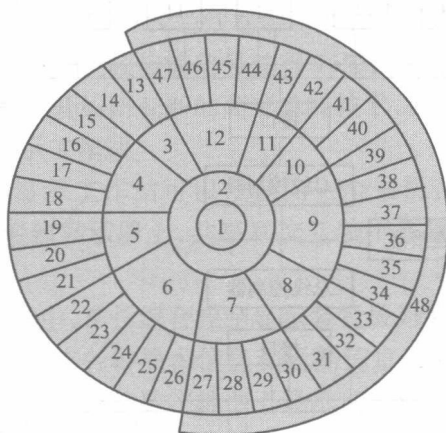


图 1-1 装甲车辆综合电子系统功能划分示意图

1—总线控制器(BC);2—数据总线;3—车辆控制(RT_1);4—电源管理(RT_2);5—诊断系统(RT_3);6—威胁的预警与对抗(RT_4);7—乘员的控制/显示(RT_5);8—通信系统(RT_6);9—定位与导航系统(RT_7);10—火力控制(RT_8);11—火炮控制(RT_9);12—目标观瞄系统(RT_{10});13—发动机控制;14—传动、转向和制动装置的控制;15—仪表控制;16—电源及电路的控制;17—模拟仪表输入;18—电力分配与保护;19—自动测试;20—故障隔离测试;21—故障的分析与处理;22—三防系统控制;23—火力压制系统控制;24—假目标设置控制;25—对抗措施设备控制;26—烟幕发射装置;27~30—各乘员接口(含指控系统的显示屏、军事数据库(如数字地图)、专家指挥决策系统等);31—通话器;32—语音无线电台;33—车际间数据无线通信;34—定位与导航控制;35—航向指示;36—目标位置计算与指示;37—目标空间方位角计算与指示;38—载体方向;39—载体位置;40—目标及战场的信息处理;41—射击诸元的解算;42—炮控传感器;43—火炮的控制与射击;44—瞄准镜(含瞄准线稳定陀螺和解算器等);45—目标自动跟踪器(VATT);46—测距仪(激光测距/毫米波雷达);47—热成像传感器;48—火控系统与指控系统的功能范围。

1.2.2 体系结构

装甲车辆综合电子系统的体系结构根据实际对象和需求的不同而有所区别,但它们都是以最简单的单层总线结构为基础的。这里先简单地给出一种单总线体系结构。其示意图如图 1-2 所示。

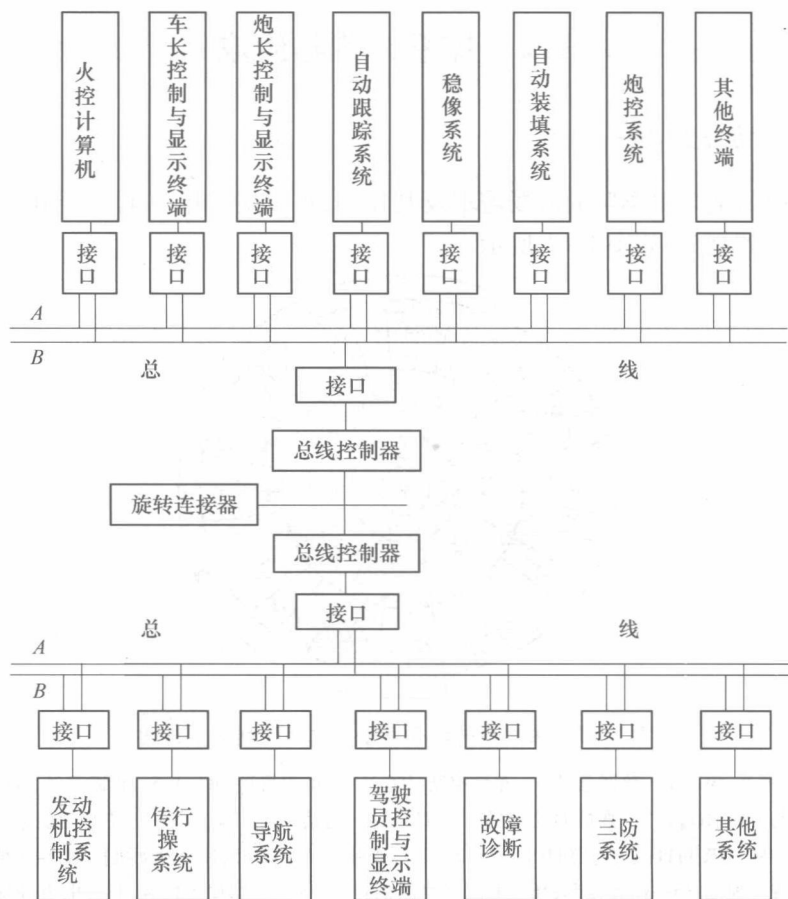


图 1-2 装甲车辆综合电子系统结构示意图

1.2.3 主要组成

从结构图中看出,目前的装甲车辆综合电子系统主要由以下部分组成:

1. 总线网络

总线网络是微型计算机系统所有硬件设备的接口,是微型计算机系统最重

要的一部分。在计算机系统中,有两类不同的总线:一类是微型计算机内部部件与部件之间进行通信的总线,称为内总线;一类是微型计算机和其他设备或控制对象之间(亦即系统之间)互相通信的总线,称为外总线。装甲车辆综合电子系统中所说数据总线指的是外总线。

多路传输数据总线在装甲车辆综合电子系统中起着纽带和桥梁的作用,利用它取代传统点与点之间复杂的导线连接,使布线大大简化,并使全车分散连接的各个电子分系统形成一个完整的信息网络,是实现车辆内外信息采集和进行战场信息实时管理的必备条件。多路传输数据总线具有足够的接口,完全可以满足装甲车辆电子系统挂接的需求,同时为以后增加新的电子系统、扩展系统功能留有充分的余地。

目前成熟的军用总线是 MIL - STD - 1553B 总线。该总线被广泛应用于航空、舰船和装甲车辆上,另外还有用于电源管理的 MIC 总线。由于这两种总线价格比较昂贵,我国正在探讨 CAN 总线在装甲车辆上的应用技术。随着装备上信息量的不断增多,尤其是视频传输信号使得 1553B 总线由于其带宽受限已不能满足要求。为此,人们开始研究新的高速总线技术,如光纤、高速以太网等。

2. 乘员控制与显示工作站

乘员通过控制及显示工作站可以使任何一个乘员都可以通过按钮(或按键)将所需的信息调用到显示屏上,共享和交互装甲车辆综合电子系统中任何设备的信息。

在乘员显控工作站中,车长综合控制显示装置最为重要,它通过数据总线和通信设备接口,使车长具有各种战术信息和后勤信息的处理、编制、控制和传输能力。例如,能在战术显示屏的数字地图上显示来自导航/定位系统的车辆方位和行使路线,并以这些信息为驾驶员导航;能接收来自上级指挥机关和友邻车辆发送的作战命令、敌方态势以及我方情况等信息,增强了战场的透明度;能及时向上级报告自身方位、后勤状态,进行火力呼唤和请求指示等,极大增加了车长在战斗中的指挥决策信息,为车长实施快速果断和正确的指挥决策创造了十分有利的条件。

3. 数字化子系统

1) 火控系统

火控系统是装甲车辆中重要的现代化电子系统之一,在综合电子系统中,它仍应是一个独立的并具有举足轻重作用的功能电子系统。火控系统分为两种:简易火控系统和具有稳像瞄准的火控系统。无论是在稳像工作状态还是在非稳像工作状态,炮长在瞄准目标后进行激光测距,并选择弹种。同时火控计算机接收各种传感器,并根据这些数据进行弹道解算输出高低向,赋予火炮高低向射角

和水平向方位角,在炮长的瞄准下实施射击或采用射击门自动射击。

在装甲车辆电子系统进行综合化的改造和设计时,火控系统将面临两方面的改变。一方面,要将过去集中式结构改造成集中分布式计算机网络式的系统结构。因此,装甲车辆火控系统在综合化的过程中需要进行系统结构的重新配置与设计。另一方面,火控系统的部分功能也将按信息共享和功能综合的原则进行某些方面的扩充与改进。例如火控系统的观瞄信息就应为其他功能系统所共享,而火控系统在搜索目标和跟踪目标的过程中还要服从其他系统关于目标排序、目标分配等原则的指挥。

2) 指控系统

指控系统,是继火控系统之后在现代装甲车辆上出现的又一重要的功能电子系统,也是 20 世纪 90 年代以来各先进装甲车辆进行技术改造的主要内容之一。法国的“莱克勒尔”和美国的 M1A2 等主战坦克的最大特色,就是在其综合电子系统中包含有类似于指控系统的系统,它们实际上是 C³I 系统在装甲车辆的实现。随着现代战争的发展,以及计算机技术、数字通信技术和信息工程的高度发展,在车辆上集中配置以 C³I 为主要内容的指挥控制系统已完全有必要和可能,并成为提高装甲车辆战斗力的重要手段。由于不同坦克上原有电子系统功能的不同,以及对 C³I 中各要素的不同侧重,已出现的属于指控系统性质的系统也就有了不同的名称,例如,“车际信息系统”、“战场管理系统”、“综合指挥与信息系统”、“战场信息与管理信息系统”等。

利用车内的电台加装适配器,再与车内的数据总线相连,从而使车内车际形成了一个数字化的信息网络,也使武器平台直接与战场 C⁴ISR 系统连到了一起。车辆的信息(状态信息、后勤保障信息、火力信息等)传输到指挥员,更能全面准确地了解战场态势,更好地利用战场资源,做出更科学的决策。

3) 数字式发动机自动控制系统

该系统由各种传感器、控制单元和执行机构组成,它可通过计算机对输入的转速信号(油门的踏板信号)、推动齿杆位移信号以及温度和机油油压等信号进行分析计算,对燃油喷射时机、喷射量、点火时间和怠速进行控制调节,也能在驾驶员综合显示器上显示动力传动装置的工况检查和功能故障等信息。该系统可保证发动机在各种环境条件下的性能与驾驶员的要求相适应,提高了发动机的性能和效率,降低了油耗。

4) 威胁预警、防护与对抗系统

此系统也称综合防护系统,它利用现代传感器技术构成一个对各种威胁敏感的传感器子系统。该系统将这些传感器的信息汇集起来,经过高速的信息处理,即可识别威胁并确定威胁源的位置,并可以向乘员报警,或启动装甲车辆的