



装甲车辆 电气与电子系统

主编 张豫南 谢永成
编写 刘家健 李年裕 李匡成 朱昀炤 李光升
主审 马晓军



国防工业出版社

National Defense Industry Press

<http://www.ndip.com.cn>

装甲车辆电气与电子系统

主编 张豫南 谢永成
编写 刘家健 李年裕 李匡成
 朱昀炤 李光升
主审 马晓军

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书以我军新式主战坦克的电气与电子系统为主,系统地阐述了它们的结构、工作原理,并进行了必要的理论分析。全书共分十章,第一章和第二章介绍电源系统,第三章至第六章讲述用电设备,第七章和第八章讲述装在坦克上的检测仪表,第九章和第十章阐述输配电系统和电子综合系统。

本书除了介绍新装备、新技术外,还对蓄电池进行了动态分析与建模,对发动机启动装置进行了启动过程的动态数值分析,增加发动机计算机控制系统和1553B总线等内容。考虑到部队装备的现实,保留部分现有装备和系统内容,体现装备技术发展规律,使原有课程体系得以延续和发展。

该书主要作为军队高等工科院校工程本科类和基础合训类的专业教科书,亦可供从事车辆工程和工业自动化各专业的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

装甲车辆电气与电子系统/张豫南,谢永成主编. —北京:
国防工业出版社,2003.2
ISBN 7-118-03096-1

I. 装... II. ①张...②谢... III. ①装甲车—电气设备
②装甲车—电子设备 IV. TJ811

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 005899 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 100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17 3/4 插页 1 406 千字

2003 年 2 月第 1 版 2003 年 2 月北京第 1 次印刷

印数:1—3000 册 定价:22.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

21 世纪,现代科学技术飞速发展,推动着军事装备领域产生变革,我军装备特别是装甲车辆的电气与电子系统也以惊人的速度向前发展。为适应新形势的要求,培养适应新时期军队建设和打赢高技术条件下局部战争的高素质人才,我们重新撰写了《装甲车辆电气与电子系统》教材,为从事军用车辆电气和电子系统教学、研究、管理、设计论证、装备监造和故障诊断的工程和管理人员提供基本的教材。

《装甲车辆电气与电子系统》主要阐述了装备的结构、原理,又对重点内容进行了必要的理论分析,在保留部分现装备内容的同时,立足新装备,体现了新内容、新技术。根据装甲兵工程学院《装甲车辆电气与电子系统》教学大纲所规定的教学目的、要求、课程内容和教学时数,在撰写过程中,内容力求完整、严谨,可供电气工程类和基础合训类本科生和部分硕士研究生使用,也可作为从事车辆工程和自动化专业教学、研制、论证和生产人员的参考书籍。

本书共十章,第一、二章由刘家健编写,绪论、第三、四章由张豫南编写,第五章由李年裕编写,第六章由李匡成编写,第七、八章由朱昀炤编写,第九、十章由李光升编写。

本教材的撰写,得到了总参军训部、总装备部、本院系领导和各级部门的大力支持和关怀,装甲兵技术研究所张化龙、耿荣茂、张立来高工,201 所田忠舜高工,本院臧克茂教授和部分专家给予了指导和帮助,特在此表示感谢!

由于我们水平有限和时间仓促,书中难免存在缺点和不当之处,恳切希望读者批评指正。

编著者

2002 年 10 月

目 录

绪论	1
第一章 铅蓄电池	5
第一节 铅蓄电池的基础知识	5
第二节 蓄电池特性的分析及其等效电路	8
第三节 铅蓄电池的电性能	17
第四节 铅蓄电池的充电	23
第五节 铅蓄电池的故障	27
第六节 铅蓄电池的检查使用与维护	29
第二章 发电机及其电压调节	33
第一节 坦克发电机的特点	33
第二节 发电机的结构	36
第三节 发电机特性	41
第四节 发电机电压调节的基本理论	45
第五节 TJY-1 调压器	48
第六节 可控硅电压调节器	56
第七节 LTD4 型电压调节器	61
第八节 发电机与蓄电池联合工作	65
第三章 发动机启动装置	68
第一节 启动电动机的启动特性与理论	68
第二节 ZDT24-15 启动电动机	75
第三节 QD24-15T 启动电动机	81
第四章 柴油发动机计算机控制系统	86
第一节 概述	86
第二节 柴油机的喷油控制系统	87
第三节 柴油机调速控制系统与现装备	91
第五章 防护系统	96
第一节 灭火系统概述	96
第二节 80 式灭火系统	98
第三节 85 式灭火系统	115
第四节 三防系统概述	131
第五节 三防系统的组成与结构	132
第六节 三防系统的性能与使用维护	139

第六章 坦克炮控系统	148
第一节 坦克炮控系统基本工作原理	148
第二节 96 式坦克炮控系统部件构造及功用	159
第三节 96 式坦克炮控系统的工作原理及过程	180
第七章 流比计型仪表	187
第一节 磁电式流比计	187
第二节 油压表	189
第三节 电阻式温度表	198
第四节 转速表	201
第五节 电流电压表	207
第六节 摩托小时表	208
第八章 电子动磁式仪表	211
第一节 概述	211
第二节 转速表及摩托小时计	211
第三节 车速里程表	216
第四节 温度表	220
第五节 油压表	224
第六节 电流电压及蓄电池容量表	227
第七节 逆变器	231
第九章 输电与配电系统	233
第一节 全车电路	233
第二节 一般电路的检查和故障排除	238
第三节 电磁干扰与电磁兼容性	241
第十章 电子综合化系统概论	244
第一节 概述	244
第二节 数据通信的基本原理	248
第三节 1553B 数据总线	252
参考文献	260

绪 论

一、电气与电子系统的作用

现代装甲车辆综合性能好、战斗力强、自动化程度高,这些都得益于电气与电子系统的迅速发展。如今,应用电能实现装甲车辆自动化和智能化的电气和电子系统,使集火力、机动和防护于一身的装甲车辆更具强大的战斗力。现代化装甲师在飞速变革的军事领域仍是一个国家的军事战略力量,毋庸置疑,电气与电子系统在现代装甲车辆中起着关键的作用。



图 0-1 美国 M1(Abrams)坦克



图 0-2 俄罗斯 T-90 坦克

美国 M1 系列主战坦克被美军称为“陆战之王”,可谓“全面电子化”。坦克上配有德国研制的 120mm 火炮,由精密的“猎杀”式火控系统控制,具有极高的首发命中率。坦克上装有克莱斯勒汽车公司研制的电控 1102kW(1500 hp)的燃气涡轮发动机和电液控制的六速(四个前进挡,两个倒挡)自动变速系统,使 M1 系列坦克重达 60t 的车身运动自如,机动性能良好。全车装有电子综合多路传输系统、联合 GPS、通信形成 C³I 战术作战系统。这些系统在海湾“沙漠军刀”作战中充分发挥了作用,战时被称为“上帝的咆哮”!

俄罗斯 T-90 坦克在继承 T-72 车身低矮、“小车大炮”、整车综合性能优良的基础上,电子化的进程大大加快。坦克上除装有数字式火控系统外,125mm 火炮还能发射激光制导导弹(AT- II Sniper),可准确攻击远距离目标。

装甲车辆的电气与电子系统在不断地发展、变化,它起的作用也越来越大。

二、电气与电子系统的基本组成和要求

装甲车辆电气与电子系统一般由电源系统、用电设备、检测仪表和输配电系统四部分组成,下面就我军现装备的主战坦克和装甲车辆进行简述。

1. 电源系统

电源系统主要由发电机、调压器和蓄电池组成,大部分是直流低压供电系统,现也有少部分装甲车辆装有交流高压供电系统。

2. 用电设备

装甲车辆上用电设备或装置很多,只要是消耗电能的均可称为用电设备,它们围绕着装甲车辆火力、机动、防护和指挥而展开。目的是控制过程的自动化,实现目标控制的最优化。

(1) 火力方面。火力方面最有代表性的是火力控制系统,它是捕捉、瞄准和发射攻击目标的控制系统,简称火控系统。它以火控计算机为中心,配有昼夜观察瞄准器、测距仪、火炮伺服(炮控)系统、自动或半自动装弹系统和修正射击诸元参量的传感器组成的综合系统。近来炮射导弹激光控制系统又成为火控系统的另一部分。火控系统是近期发展起来,且进展较快的学科,已形成独立的专业。

(2) 机动方面。发动机电子控制系统。它的目的是使发动机有更好的综合性能,是装甲车辆优良机动性能的基础与保障,目前我军第二代装甲车辆发动机上已装有电子调速系统。

启动装置——它是使装甲车辆发动机由静止进入工作的装置,目前应用较多的是启动电动机和压缩空气启动装置。

液压助力装置——它主要包括主离合器助力和转向助力装置,以减少驾驶员的体力消耗。

导航(定位)装置——目前只是短距离潜渡过河的定位装置,潜渡过河能达到战役或战术攻击的突然性。

(3) 防护方面。灭火设备和三防装置是防护方面的重要体现。灭火设备和三防装置都可用来改善战斗车辆的防护性能。灭火设备除了有灭火的功能外,要求装甲车辆乘员室(战斗室)的灭火系统还有抑制二次爆炸的功能。三防是对核、生物和化学武器袭击的防护。

(4) 指挥及管理系统。我军装甲车辆目前尚未全面建立指挥员进行作战指挥的管理系统——数字化部队,但作为作战指挥系统的一部分——通信系统早已存在。通信系统主要包括电台、车内通话器等,它能保持车内外的联络畅通,是指挥作战不可缺少的神经中枢系统。由于通信系统重要和突出的地位,它较早就成为了一个独立的专业。

除了上述主要用电设备和装置外,装甲车辆上还有一些辅助电器。装甲车辆内各种照明灯、加温保温装置、电除尘装置、灯光信号装置、电警报器和通风风扇等都是辅助电器。它们是车内不可缺少的用电装置。

3. 检测仪表

在装甲车辆上需要对运行或其他有关的状况及各系统故障进行检测或监测,以确保其战斗技术性能。目前我国装甲车辆检测仪表主要包括:电流电压表、温度表、油压表、转速表、里程表和摩托小时表等。

4. 输配电系统

输配电系统主要的作用是分配电能。

装甲车辆内采用分散式配电系统。电源的电能通过干线输送到各配电板,再由各配电板分出若干条导线通往用电设备。这种配电系统工作可靠性较高,检查方便,所需导线较少。过去汽车和装甲车辆采用集中配电系统,是因为那时车辆上用电装置不多,电能可以通过一个配电板来分配。

装甲车辆电源在分配电能时,采用单线制。在单线制线路中,电源部分仅有一根导线与用电装置相接,另一根导线则用车体代替。采用单线制不仅节省导线,减少铜耗,而且使线路简化,便于检修,同时,电气机件不需要与车体绝缘。单线制的缺点是易短路,但只要注意防止绝缘层损伤,勿使裸露的带电导线与车体接触,短路故障可大为减少。单线制

线路中与车体相接的导线称为搭铁线,正极搭铁或负极搭铁从原则上说可任意选择,装甲车辆上采用通用的负极搭铁。

电气电子系统越来越复杂,输配电系统逐渐成为信息和电源管理、分配的车辆网络。

装甲车辆电气与电子系统的四大部分是相互联系不可分割的有机体,随着装甲车辆电子综合系统的形成,它们将更一体化。

作为一线战斗的装甲车辆,对电气和电子系统要求较高,但基本技术要求是:满足并达到装甲车辆要求的战术技术指标,在各种条件下工作可靠,满足电磁兼容性的要求,经济性、通用性和互换性好,质量和尺寸小,消耗电能少,使用维护简便,安装拆卸容易,有足够的使用寿命。

三、电气与电子系统的发展过程和趋势

装甲车辆电气与电子系统经历了由简到繁、从低级到高级的发展过程,是从不断增加设备的量变,过渡到不断采用先进技术的质变过程。

20世纪30年代至40年代,只有电子管、电机和电磁控制等技术,因此,装甲车辆电气与电子系统很简单。它主要包括蓄电池、几千瓦的直流发电机、电磁振动式电压调节器、启动电动机、半自动灭火装置、照明、信号和简单的炮塔电传动装置,采用电子管的通信电台等,并装有几块简单的仪表。20世纪50年代至60年代,晶体管、红外夜视技术出现,自动控制技术的应用逐步广泛,装甲车辆电气与电子系统由此得到迅速发展。电源系统功率不断增大,以适应用电装置的增多;晶体管电压调节器代替了振动式电压调节器,其体积不断小型化;用电装置在原来的基础上又增加了驾驶员和车长夜视仪、火炮稳定器、火炮弹道解算器、自动灭火设备和三防装置等;检测仪表增多,全车电路日益复杂。20世纪70年代以后,微电子、激光、热成像等技术迅速发展,现代控制理论在计算机应用的基础上得以实施。先后出现了光电式、稳像式火控系统、导弹发射控制系统和热成像仪等,今后还要发展电传动系统,装甲车辆电气与电子系统不断膨胀、复杂,它的成本逐渐上升到整车的 $1/3 \sim 1/2$ 。

日趋复杂化的电气与电子系统与对它的基本要求相矛盾。第一,装甲车辆内部空间有限,不允许无限制增加设备;同时复杂的装置使故障率增高,可靠性下降,应有的战斗力难以发挥。第二,以硬件为主,为增加功能而罗列的设备(按组分类),往往自成体系,通用性差,成本高。第三,全车导线的总长度增加到极限,布局出现困难,易互相干扰。第四,复杂的电子装置在使用维护、安装拆卸和电能消耗方面都带来一系列的问题。

20世纪80年代以后,西方国家以高新技术对电气与电子系统进行整体优化设计,使其发生了根本性的变化。电气与电子系统成为了电子综合系统,它的质变产生了一个新学科——装甲车辆电子学,从根本上解决了电气与电子系统的发展途径和方向的问题。

电子综合系统实质就是一个将电气与电子分系统有机联系的一个共享串行总线的分布式计算机控制系统,它对电能进行管理和分配,对信息进行控制。装甲车辆电子综合系统在硬件上采用模块化设计,通用性强,维修、换件和保养方便。采用串行总线,不同信息可以在一条线上分时高速传送,使电网大为减化;从软件上来说,由于它本质是一个计算机系统,在执行软件的“支持”下,应用软件体现出极强的功能,系统在不增加硬件的情况下就能进行功能扩展。各系统均有自己的自检程序,从而给使用、故障诊断提供了方便。未来使装甲车辆全面自动化,满足其战术技术指标,集信息、控制、命令和指挥功能为一

体,具有全天候独立作战能力,便于整体更新换代的电子综合系统,是装甲车辆电气与电子系统发展的必然趋势。

四、本书的主要内容

本书的内容包括:电源系统,即铅蓄电池和发电机及其电压调节装置;用电设备,即发动机启动装置、发动机计算机控制系统、防护系统和炮控系统;检测系统,主要有流比计型仪表和电子动磁式仪表;车辆网络,即输配电系统和电子综合系统概论。其他内容可参阅相关专业的参考书。

第一章 铅蓄电池

第一节 铅蓄电池的基础知识

一、铅蓄电池的特点及作用

铅蓄电池经历了一百多年的变化和发展,在这期间,铅蓄电池的结构、生产工艺和材料都有了很大的改进,至今仍在二次电池的生产和应用中保持着领先地位。其主要特点是:

- (1) 具有宽广的使用温度和电流范围;
- (2) 能充、放电几百次,使用寿命较长;
- (3) 储存性能好,尤其适于干式荷电状态储存;
- (4) 测试其放电程度简单;
- (5) 原材料丰富而价廉,易加工。

坦克、装甲车等军用车辆目前大多采用蓄电池作为辅助电源,它与发电机并联连接,构成军用车辆电气系统的电源。它的主要作用有三个,一是在启动发动机时供给启动电动机电能;二是在车辆停放或发动机转速低至发电机不能向外供电时,蓄电池向全车用电设备供电;三是当发动机工作时,如果用电超过发电机额定功率,则由蓄电池和发电机共同供电。

根据启动电动机的要求,蓄电池必须具备能提供大电流和小内阻的特点,保证在大电流放电时,蓄电池内压降不致过大。例如启动电动机额定电压为 24V,要求工作电流在 800A 时的电压不低于 18V,则蓄电池内阻和连接导线电阻之和应不大于:

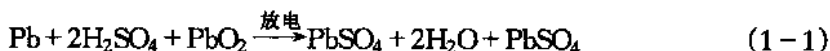
$$(24-18)V/800A \approx 7.5 \times 10^{-3} \Omega$$

目前,能满足上述要求的主要是启动型铅酸蓄电池。

二、铅蓄电池的构造

铅蓄电池包括正负极板、电解液和容器。铅蓄电池的电解液是浓度为 27%~37% 的硫酸(H_2SO_4)水溶液,即稀硫酸。充足电时,正极板的活性物质是二氧化铅(PbO_2),呈棕色;负极板的活性物质是海绵状铅(Pb),呈灰色;放完后正负极板的物质为硫酸铅($PbSO_4$);容器为橡胶、塑料或玻璃制成,具有耐酸性。

蓄电池充、放电化学反应方程式如下:



铅蓄电池由六个完全相同的单格电池用极柱连接板串联而成。装在一个箱体,极

柱连接板由铅锡合金铸成,其上的电压降低于 20 mV。

每个单格电池由极板、隔板、电解液和容器等主要部件及工作栓(注液口盖)、塑料夹边(卡条)、封口胶、密封胶圈、铅连接板、极柱、接线柱等辅助零部件组成。各零部件的构造及功用分别介绍如下。

1. 极板

铅酸蓄电池的极板一般采用涂膏极板。涂膏极板具有良好的多孔性,化学反应可以较好的深入到极板内部。

极板分正极板和负极板。极板上的作用物质与电解液起反应,在蓄电池两极之间产生电动势。极板由基板(又称板栅或基片)和涂压在基板上的活性物质组成。基板用铅锡合金浇铸而成,用以支撑活性物质起导电作用。活性物质敷在极板上,充足电后,正极板上的活性物质是深棕色二氧化铅,负极板上是青灰色海绵状铅。正极板因活性物质机械强度较差,电阻系数大,栅架要比负极板厚一些,格子也较密。在负极板中,为防活性物质收缩和硬化,在活性物质中必须加入膨胀剂,膨胀剂不参加化学反应。在负极板的活性物质中加入少量的乙强基二耐酸(简称乙二酸),以提高负极板的抗氧化能力。

极板通常以完全充电(干式荷电)极板、部分放电(保护放电)极板、完全放电极板三种形式存放。完全充电(干式荷电)极板和隔板一起装配成的蓄电池初充电所需时间短,通常注入电解液后只需充电 3 h~5 h。在紧急情况下可以不经初充电即可装车使用。部分放电极板是在极板生成后,经过少量放电,在极板表面形成硫酸铅保护层,使之机械强度较好,化学性能稳定。完全放电的极板以硫酸铅形式存放。

为增加蓄电池的容量往往采取增大极板面积的方法。为了增加极板面积将若干片正极板和若干片负极板分别焊接在一起组成正负极板组(又称极群)。然后再将正负极板组交错排列放置。栅架和极板组如图 1-1 所示。

一般蓄电池的负极板组比正极板组多一块极板,其原因是:

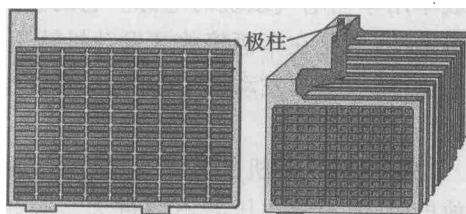


图 1-1 栅架和极板组

(1) 将正极板夹在中央,充分利用正极板的活性物质,使其两面都起化学反应,两侧放电均匀。

(2) 防止正极板在充放电时因体积膨胀而弯曲。正极板上的二氧化铅机械强度较差,如果膨胀不均而翘曲,易造成活性物质脱落。

每块负极板两侧各有一条聚氯乙烯制成的卡边卡在负极板及其相邻的两块隔板上以防短路。

2. 隔板

隔板是指正负极板之间的隔离物。隔板的作用是防止正负极板互相接触造成短路;把正负极板上发生的电化学反应分隔在两个区域进行;使电解液中的正负离子顺利通过,从而保证正负极板电化学反应;对正极板溶解下来的有害锑离子向负极板迁移起抑制作用,以降低对负极板的毒化;阻缓正负极板活性物质的脱落,防止正负极板因震动而损伤。要起到以上的作用隔板必须满足下列要求:

(1) 良好的导电性。隔板电阻是构成蓄电池内阻的重要组成部分,为了减少内阻,一

方面要求极板间的间距尽可能小些,即要求隔板尽可能薄些,同时又要求隔板有良好的多孔性,以保证电解液能顺利通过隔板与极板上的活性物质进行反应。

(2) 良好的耐酸性、耐热性和一定的机械强度。隔板浸在电解液中并且工作温度较高(有时可达 $60^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$),其膨胀和收缩比较厉害,如果耐酸性差、机械强度低,隔板将会很快损坏,缩短蓄电池的使用寿命。

(3) 不应含有对极板和电解液有害的物质,如有机酸、油脂和金属等。以免引起自放电降低蓄电池的容量。

目前隔板的种类很多,有经过化学处理的木质隔板和玻璃丝隔板,还有微孔橡胶隔板、微孔塑料隔板、复合隔板等。

木质隔板的缺点是耐酸性、耐热性和机械强度都很差,同时又易于裂不易保存;其优点是多孔性好成本低。微孔橡胶隔板、微孔塑料隔板在各方面的性能都比木隔板好,且使用寿命较长,但成本较高。

隔板一面平光,一面带有沟槽。装配时必须把有沟槽的一面对正正极板并且让沟槽直立放置,这样可以使正极板有较多的电解液与它起反应,同时在充电时正极板上产生的氧气可沿直槽上升顺利从电池内部析出。平光的一面对正负极板可以防止负极板绒状铅不均匀收缩。

隔板通过由聚氯乙烯塑料板压制成的卡条固定在负极板的两侧。

极板组与隔板组成极板体之后,上端放置一块多孔的聚氯乙烯保护网,用来保护极板体,防止比重计、量管插入时造成损坏;同时防止金属物质掉入蓄电池内部造成短路。

3. 电解液

铅蓄电池的电解液是由纯水(或蒸馏水)和纯净的蓄电池用专业浓硫酸配置而成。一方面起导电作用,另一方面参加化学反应。

电解液的密度应根据蓄电池厂的说明书的规定和所在地区及季节来确定。但是不管任何形式的铅蓄电池的电解液密度不得超过 1.30 g/cm^3 。因为电解液过浓会使极板加速硫化,蓄电池容量降低,极板寿命缩短。另外电解液必须纯净,如有杂质也会大大缩短蓄电池的使用寿命。电解液由纯 H_2SO_4 ($\rho = 1.84 \text{ g/cm}^3$) 和蒸馏水配制而成。完全充电后电解液密度为 $1.25 \text{ g/cm}^3 \sim 1.29 \text{ g/cm}^3$ (25°C)。

4. 容器

容器包括壳体、壳盖及密封物。容器的作用是盛装正负极板组和电解液。它由硬橡胶或塑料制成,具有良好的绝缘性能,耐酸、耐热、质量轻、强度高。目前的容器有两种结构,一种是整体橡胶槽;一种是在木箱内组装六只单体橡胶槽。

容器表面有纵横肋骨以增加槽的坚固性。槽底铸有极板鞍(即托条)以支撑极板,底部留出空隙,供存放极板组上脱落的反应物质,防止反应物质堆积造成短路。容器上部有容器盖,盖上有三个孔,中间为注液孔,两边为极柱引出孔。容器和盖之间用橡胶密封圈垫塞好,并用耐酸胶密封缝隙以防止电解液渗出。

工作栓(注液口盖)由橡胶或塑料制成,起密封作用防止电解液析出,且能保证气体顺利逸出。铅蓄电池的全貌如图 1-2 所示。

目前专供装甲车辆使用的铅蓄电池有以下几种型号:6-TK-140 又称 59 式蓄电池;6-TKA-140 又称 65 式蓄电池;6-TKA-155 又称 65-1 式蓄电池;6-TKA-180

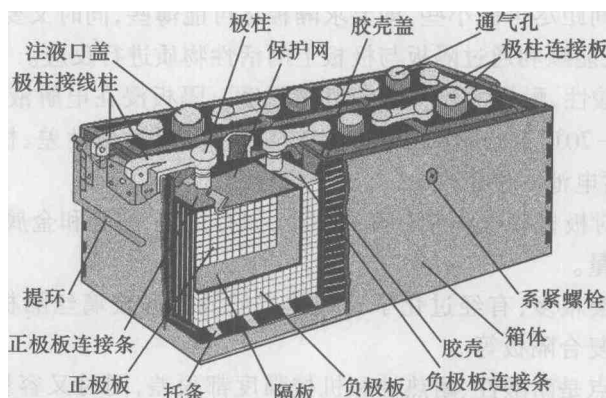


图 1-2 装甲车辆蓄电池的结构

又称 96 式蓄电池；12-TKA-50 和 12-TKA-110 等。

第二节 蓄电池特性的分析及其等效电路

蓄电池是装甲车辆电气系统的一个组成部分，其电特性对电气系统整体技术性能有很大的影响，为了分析装甲车辆电气系统的工作过程，我们把蓄电池看作一个电路元件，并建立相应的数学模型，然后进行特性分析。

一、蓄电池特性的分析

在研究蓄电池端电压随电流和时间变化的关系时，假设环境温度保持稳定不变。蓄电池端电压可认为是三部分电压之和：

$$u = e_b + e_p + iR_0 \quad (1-3)$$

式中 e_b ——平衡电动势（反电动势）；

e_p ——极化电动势；

i ——蓄电池电流；

R_0 ——蓄电池内电阻。

平衡电动势即静止电动势，取决于外电路无电流时蓄电池内部的过程，可由蓄电池电化学过程的热力学方程计算出来。在充电或放电时，原有的平衡被破坏，电化学反应将以一定的速度在某一方向上进行，蓄电池端电压随之发生变化。电压的变化有两项，一项是消耗在内电阻上的电压降 iR_0 ，充电时为正值，放电时为负值；另一项是极化电动势 e_p 。极化电动势是由于电流通过时电极电位发生变化而引起的电压变化，充电时端电压增大，放电时端电压减小。

1. 铅蓄电池的平衡电动势

铅蓄电池的平衡电动势按 Nernst 公式计算如下：

$$e_b = e^0 + \frac{R_A T}{F} \ln \frac{a_{H_2SO_4}}{a_{H_2O}} \quad (1-4)$$

式中 e^0 ——电动势标准值;

R_A ——气体通用常数;

T ——绝对温度;

F ——法拉第常数;

$a_{\text{H}_2\text{SO}_4}, a_{\text{H}_2\text{O}}$ ——硫酸和水的活度。

硫酸和水的活度取决于电解液中硫酸的浓度,因而平衡电动势随电解液中硫酸的浓度而变化,如图 1-3 所示。电解液浓度用硫酸的浓度 C_t (mol/L) 表示。

蓄电池工作时,随着电化学反应的进行,电解液硫酸浓度不断发生变化。硫酸浓度和电量间有一定的函数关系。因此,蓄电池的平衡电动势取决于化学反应中流过的电量。

电解液硫酸浓度与电量之间的关系可用下式表示:

$$C_t = \frac{10.2 P_{\text{H}_2\text{SO}_4}^0 + 37.3 \int_0^t i dt}{P_{\text{H}_2\text{O}}^0 - 0.67 \int_0^t i dt} \quad (1-5)$$

式中 C_t ——硫酸溶液的浓度 (mol/L);

$P_{\text{H}_2\text{SO}_4}^0, P_{\text{H}_2\text{O}}^0$ ——蓄电池开始工作前电解液中硫酸和水的含量 (mol/kg)。

根据蓄电池出厂说明书所注明的电解液体积和密度,借助于手册表格可以求出蓄电池电解液中硫酸和水的含量 $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}^0$ 和 $P_{\text{H}_2\text{O}}^0$ 。

蓄电池工作时流过的电量: $Q = \int_0^t i dt$

式中 i ——充电电流放电时电流反向, i 取负值。

对于各种不同容量的启动型蓄电池,可求出平衡电动势 e_b 与放出电量 Q 以及电解液密度 ρ 的关系,如图 1-4 所示,图中 Q_n 为蓄电池的额定容量。

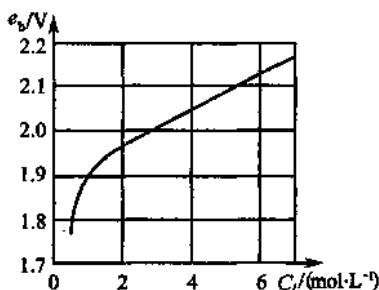


图 1-3 蓄电池的平衡电动势
与电解液浓度的关系

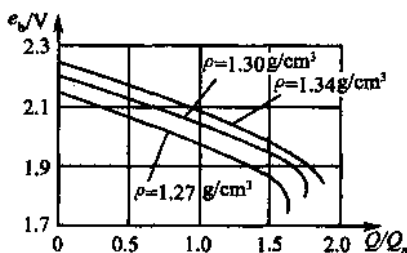


图 1-4 铅蓄电池放电时平衡
电动势与放电量的关系

由式(1-4),并根据电解液浓度与平衡电动势间的关系(图 1-3),对于任何容量的蓄电池,在蓄电池正常工作范围内,平衡电动势与流过电量有以下近似的线性关系:

$$e_b = e_0 + a_b \int_0^t i dt \quad (1-6)$$

式中 t ——工作时间;

e_0 —— $t = 0$ 时的平衡电动势;

a_b ——平衡电动势变化系数,即流过单位电量时电动势的变化值。充电时为正,放电时为负。

在密度 $1.2\text{g/cm}^3 \sim 1.34\text{g/cm}^3$ 时,电动势 e_0 与电解液密度有以下关系:

$$e_0 = 0.32 + 1.43\rho \quad (1-7)$$

式中 ρ ——电解液密度(g/cm^3)。

在实际使用中,常用下面的经验公式计算蓄电池的电动势:

$$e_0 = 0.845 + \rho \quad (1-8)$$

式(1-6)中的系数 a_b 取决于电解液体积和密度,但当密度为 $1.27\text{g/cm}^3 \sim 1.34\text{g/cm}^3$ 时,在放电工作范围内, a_b 实际上与电解液密度无关(见图 1-4 中的线性段互相平行,即斜率相同)。这样,系数 a_b 仅与电解液体积有关,即:

$$a_b = 2 \times 10^{-3} \frac{1}{V} \quad (1-9)$$

式中 V ——电解液体积(L)。

将式(1-8)和式(1-9)代入式(1-6)中,可得计算平衡电动势的公式:

$$e_b = N(0.32 + 1.43\rho_0 + \frac{2 \times 10^{-3}}{V} \int_0^t i dt) \quad (1-10)$$

式中 N ——蓄电池中串联的单体电池数;

ρ_0 ——电解液的初始密度。

2. 极化电动势

由蓄电池电极过程动力学的分析可以确定极化电动势。电极过程进行的各个阶段总是有延迟性,这是形成电极极化的原因。

在电极极化过程中,反应物质输送到电极和电解液的界面上。这一过程并不是瞬时完成的,而是具有延迟性。因此,在蓄电池工作时,电极近旁反应物质的浓度就将有所不同,充电时电极近旁硫酸浓度增大,放电时则减小,这就产生了浓度差。对于栅架型涂敷极板,活性物质具有多孔性,化学反应是在活性物质孔隙内进行,这种工作过程中的浓度差就表现为孔隙内外电解液的浓度差。由于电极电位是由极板与电解液接触界面处(即极板孔隙内)的电解液成分所决定,因此,蓄电池工作时电极近旁电解液浓度发生变化,就使电极电位也发生变化,即产生了电极极化。这种由浓度差引起的极化,称为浓差极化。

电极极化是一个复杂的过程,它与电极材料、电解液杂质、充电或放电以及电流大小等因素有关。在电解液温度不变,并且是在正常放电阶段(即线性段)工作时,电极极化主要表现为浓差极化,由电极极化引起的电动势变化量就是极化电动势值。

在只考虑浓差极化的情况下,蓄电池在有电流通过时,如果按电极近旁的电解液浓度来计算平衡电动势时,也就把极化电动势包括在内了。这样应用式(1-4)来计算平衡电动势时,必须注意到所用硫酸和水的活度是按电极近旁,亦即极板孔隙内的电解液来计算的。

将各常数值代入式(1-4),蓄电池工作时电动势 e_i 的计算式为:

$$e_i = 1.874 + 0.052C_i \quad (1-11)$$

式中 C_i 是通过电流时电极与电解液接触界面处的硫酸浓度。

如果以 C_{i0} 表示蓄电池电极表面在无电流通过,即无浓度差时电解液硫酸浓度,则蓄

电池放电时的极化电动势按下式计算：

$$e_p = e_b - e_i = 0.052(C_{i0} - C_i) \quad (1-12)$$

蓄电池工作过程中,电极界面处的硫酸浓度与工作时间有关,并与浓度差有关。当溶液中有浓度差出现时,溶质就将从浓度高处向浓度低处扩散。在有浓度差存在的情况下,蓄电池的极化电动势按下式计算：

$$e_p = 0.052 \sqrt{\frac{D}{\pi}} \int_0^t \frac{\Psi(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau \quad (1-13)$$

式中 D ——硫酸的扩散系数；

$\Psi(\tau)$ ——取决于电流和界面(电极和电解液接触界面处的密集)随时间的变化。

3. 内电阻

蓄电池内电阻可按图 1-5 所示的线路计算。如果蓄电池极板上一层的电解液电阻忽略不计,则内电阻为浸透电解液的隔板电阻 R_S 和极板电阻 R_P 构成,即：

$$R_0 = R_S + R_P \quad (1-14)$$

(1) 隔板电阻决定于隔板的数量和材料的多孔性。对于微孔塑料隔板,当浸透电解液时,其电阻为同样厚度和面积的纯电解液电阻的 4.5 倍。因此,具有微孔塑料隔板的蓄电池隔板电阻为：

$$R_S = 4.5 \frac{R_e}{n_S} \quad (1-15)$$

式中 R_e ——与隔板尺寸相同的纯电解液电阻；

n_S ——隔板数(为蓄电池正极板数的两倍)。

电解液电阻 R_e 按下式计算：

$$R_e = \frac{\delta_S}{g S_S} \quad (1-16)$$

式中 δ_S, S_S ——隔板的厚度和面积；

g ——电解液的比电导。

(2) 极板电阻决定于栅架、连条和其他金属件的电阻,与栅架的形状、尺寸以及电流分布等情况有关,并与蓄电池的充电程度有关,计算比较复杂。根据蓄电池的使用经验数据可知,蓄电池在充电状态时,其极板电阻与隔板电阻差不多相等,因此,有：

$$R_0 = 2R_S = \frac{9\delta_S}{n_S g S_S} \quad (1-17)$$

由此可以求出蓄电池内电阻与流过电量间的关系。

以额定容量 70 Ah 的启动型蓄电池为例,其内电阻与放电容量间的关系如图 1-6 所示,放电开始时电解液密度为 $\rho = 1.30 \text{ g/cm}^3$ 。由图 1-6 可知,在蓄电池正常放电工作范围内,内电阻变化不超过 5% ~ 6%。

实际上,蓄电池内电阻可按经验公式计算。当电解液温度为 20°C 时,完全充电的启动型蓄电池每一单格电池的内电阻为：

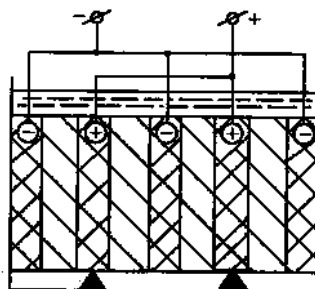


图 1-5 计算蓄电池内电阻的连接线路图

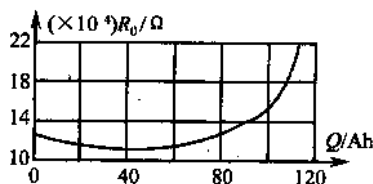


图 1-6 额定容量 70Ah 启动型铅蓄电池内电阻与放电容量间的关系