

阀控密封铅酸

蓄 电 池

王德志 范孝铨 李兰宁

FAKONG MIFENG
QIANSUAN XUDIANCHI



中国铁道出版社

阀控密封铅酸蓄电池

王德志 范孝铨 李兰宁

中 国 铁 道 出 版 社

2 0 0 1 年 · 北 京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书是作者在多次实验基础上总结的阀控铅酸蓄电池的特点和规律,有详实的数据和自己的独到见解。书中也介绍了阀控铅酸蓄电池的原理、结构和典型故障与维修要领。

图书在版编目(CIP)数据

阀控密封铅酸蓄电池/王德志,范孝铨,李兰宁编著.
北京:中国铁道出版社,2001.2
ISBN 7-113-04015-2

I. 阀… II. ①王…②范…③李… III. 密封式
蓄电池:铅蓄电池 IV. TM912

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 86133 号

书 名 阀控密封铅酸蓄电池

作 者 王德志 范孝铨

出版发行:中国铁道出版社 (100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:薛 淳

封面设计:姜 明

印 刷:北京市彩桥印刷厂

开 本:850×1168 1/32 印张:6.125 插页:6 字数:160千

版 本:2001年4月第1版 2001年4月第1次印刷

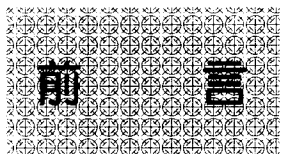
印 数:1~4000册

书 号:ISBN 7-113-04015-2/TM·61

定 价:17.50元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。



阀控密封铅酸蓄电池自 20 世纪 80 年代进入中国市场, 优先介入电子技术和通信领域, 然后, 在邮电和电力等固定电池领域得到发展, 1995 年铁路用户开始尝试将 NM500 型电池移植到铁道内燃机车上, 前后经历了 5 个春秋, 获得了成功, 并取得了丰硕的学术成果。实践表明, 阀控密封铅酸蓄电池(以下简称阀控电池)有着许多不同于开口铅酸蓄电池的独特规律, 因此, 随着阀控电池的大面积应用, 广大用户急需阀控电池方面的专业书籍, 本书的编写, 就是试图在此领域做点具体工作。

铅酸蓄电池领域著述众多, 为使本书具有新意, 编写内容本着“凡是民族的, 就是世界的”原则取舍, 形成了如下突出特点, 可以预料这些内容将会对阀控电池的普及和应用产生有益影响。

本书的编写以上述学术成果为基础, 将阀控电池试验过程中新获得的认识做为主线, 通过系统地分析和归纳, 对阀控密封铅酸蓄电池的特殊规律尽量做出定量阐述, 力求为读者提供 NM450 型阀控电池的具体规律, 同时, 也为其他型号阀控电池的应用, 提供了详尽的技术参考。

已出版的铅酸蓄电池书籍很多, 已普及的基础知识也不宜重复。为此, 本书从拓宽必备基础知识的角度, 重点补充了与铅酸蓄电池相关的一些基础知识。

离开必要的运行环境条件支持, 阀控电池的固有性能难以充分发挥。因此, 本书就阀控电池在铁道机车上正常运用时所必须创造的基本运行环境条件, 做了系统的理论分析, 并提出了具体的运行环境条件要求。同时, 对加装阀控电池智能保护器, 以满足阀控

电池运行环境条件要求的宝贵实践,也做了经验总结和技术归纳。

机车用阀控电池属于长寿命、少维修电池,有关的维修内容,也做了有针对性的交代。

阀控电池移植到铁道内燃机车的学术成果,是本书编写的基础资料,它出自铁道部科学研究院机辆所范孝铨、徐宝堂、张晓波等同志负责的课题鉴定资料,出自机械科学院北京机电研究所钱良国、李庆祥负责的智能保护器分课题的鉴定资料,这些资料的形成是他们五年来辛勤工作的结晶,当然,还凝结着参与试验工作的郑州、沈阳、成都等铁路局(特别是武昌南、长春、峨嵋等机务段)、各个参加试验的阀控电池生产厂家,以及铁道部运输局业务主管部门等众多人员的劳动和心血。在此,对上述人员,特别是大家给予作者的无私帮助深表敬意。书籍编辑过程中,还查阅并引用了一些国外资料和国内著述的内容(其中,主要引用资料和著述已经列附于书后),在此,也对有关专家、学者、作者表示敬意。

书稿由北京大学教授杨文治先生审阅、补正,在此深表感谢。

书中新的内容和提法较多,而阀控电池技术还在发展之中,受到现有认识水平和作者知识面的限制,错误与不妥之处在所难免,衷心希望读者批评指正。

作者

2000年3月5日

目 录

第一章 概 论	1
第一节 阀控电池向机车领域的移植.....	3
第二节 内燃机车的柴油机起动	10
第三节 内燃机车需要什么样的阀控电池产品	16
第二章 原理与结构	20
第一节 化学键与水	20
第二节 阀控密封蓄电池原理	24
第三节 结构与特性	34
第三章 机车阀控电池标准与特色	43
第一节 以起动电流为基调	44
第二节 现场试验纳入标准	45
第三节 提高安全阀压力规定	47
第四节 标注单节电池质量(kg)	49
第四章 平台试验	51
第一节 阀控电池的起动能力	51
第二节 起动性能与解剖分析	59
第三节 氧复合与效率	66
第四节 阴极吸收与安全阀性能	73
第五节 放电率与容量关系	76
第六节 放电率与内阻的量化关系	86
第七节 放电率与放电功率关系	91

第八节	传统试验项目与失效情况	92
第五章	现场运行试验与蓄电池运行环境	95
第一节	现场运行试验综述	95
第二节	容量衰减规律与预期寿命推算	99
第三节	故障与蓄电池运行环境	105
第六章	典型故障与维修要领	111
第一节	阀控电池的典型故障	111
第二节	水损失理论与管理标准	120
第三节	运用过程的充电特征与状态检测	129
第四节	故障处理与质量改进	143
第七章	智能保护器与维修制度	148
第一节	阀控电池对智能保护器功能的基本要求	149
第二节	诊断参数与智能保护器技术条件	154
第三节	阀控电池状态诊断与功能设计	159
第四节	阀控电池的地面维修制度	167
第八章	阀控电池改进与展望	173
第一节	寿命与目标	173
第二节	结构更新与免维护方向	177
第三节	缺憾与前景	183

第一章 概 论

铅酸蓄电池自 1859 年发明以来,至今已经 140 余年历史,由于它的性能良好,原材料丰富,价格低廉,经过不断的技术改进,长期在蓄电池行业中独占鳌头。但在 20 世纪 40 年代以后,其市场一直在不断萎缩,根本原因在于开口电池存在三大缺陷:一是充电时,水分解为氢气和氧气逸出,失水失容,维修作业量大;二是板栅腐蚀,寿命太短(甚至被迫选用起动性能较差的管式电池);三是容易漾漏,酸雾弥漫,故障率高,且污染环境。其中,失水失容,维修作业量大,最令人头痛,用户一直在呼唤“长寿命、少维护、高性能、不污染”的换代产品。长期以来,铅酸蓄电池行业为了克服三大缺陷,进行了广泛的研究,一直试图将铅酸蓄电池密封起来,使之免维护化,这就是阀控密封蓄电池应运而生的根本原因。而 1938 年氧复合理论的提出,20 世纪 40 年代率先在碱性蓄电池领域取得突破,从而对铅酸蓄电池的霸主地位发起了强有力的挑战(见表 1-1),铅酸蓄电池市场也出现明显萎缩,正是这种挑战,客观地加快了阀控密封蓄电池问世的历史性进程。

铅酸蓄电池在经历了 1957 年凝胶电池等曲折历程之后,1971 年,美国盖次公司终于推出阀控铅酸蓄电池(VRLA,以下简称阀控电池)产品,它以超细玻璃丝纤维建立气体通道,实现了历史性技术突破。

在工作环境要求严苛的数字通信设备领域,阀控电池首先打开局面。20 世纪 80 年代初,大容量阀控电池的生产和应用,标志着这项面向 21 世纪的高新技术业已成熟,从此,阀控电池迅速进入固定型电源、汽车、摩托车、动力牵引以及铁路机车(见表 1-1)

等领域,并已在某些领域取代干电池和碱性蓄电池。阀控电池于 20 世纪 90 年代初开始大量生产,到 20 世纪 90 年代中期,阀控电池的销量已经占据行业主导地位。

表 1-1 内燃机车用蓄电池产品性能比较

类别	项 目	普通铅酸蓄电池	碱性镉/镍蓄电池	阀控密封铅酸蓄电池
主要性能	比能量	体积小,重量相当	体积大,重量相当	体积减小 20%,重量低 10%
	电动势 (V)	2.1	1.30	2.1
	内阻 (Ω)	0.005~0.01	0.02~0.06	0.003~0.008
	寿命 (年)	3~4(固定式 12)	10(固定式 15)	6~10(固定式 20)
	超高倍率放电	好	可(有记忆效应)	好
	自放电与储存	小,放电态不行	大,放电态也行	更小,放电态不行
	电量效率	70%~80%	60%~70%	70%~80%
	安装	不可水平放置	不可水平放置	可水平放置
维修与环境	维护工作量	繁	简单(定期换液)	很小(仅需检测、换件)
	工作环境	污染	无污染,Co 需回收	无污染,Pb 便于回收
	对浮充电路要求	现状即可	有“热失控”保护	有充电电压、过热保护
制造与价格	原料(万元/吨)	丰富,0.7	不丰富,6.0	丰富,0.7
	制造工艺	简单	复杂	较简单
	价格(万元/台份)	2	约 10(估算值)	5
综合成本	机务段购置、运用维修等	100%	约 120%	80%~90%
注	装车实例与年份	国产内燃机车, N462 电池, 1959	进口 ND ₁ 型机车, SiC310 电池, 1958	DF ₄ 型机车, NM450 电池, 1995

控制副反应达到工业化途径的历史,是一个从原理向工业化生产手段转化的艰苦过程,是一项经历 40 余年开发过程,才终于

获得变“开口”结构为“阀控密封”结构的重大技术突破。因此,阀控密封铅酸蓄电池是铅酸类蓄电池技术的重大进步,有效解决了普通开口式铅酸蓄电池维护工作量大、使用寿命短、可靠性差、污染严重、腐蚀设备等弊端,为陷入困境的铅酸蓄电池产业带来了新的生机。

我国研制、生产阀控电池(VRLA)始于20世纪80年代,90年代中期阀控电池已在通讯、电力、汽车等部门铺开,生产和使用都有了相当的规模,也为铁路部门展现了明朗的运用前景。1995年11月铁路机务部门召开了可行性研讨会,拉开了阀控电池开辟新领域的序幕。五年来的科学实践证明,内燃机车使用工况苛刻,它对阀控电池提出了不少新要求,进而有力地推动了我国阀控电池的技术进步。

第一节 阀控电池向机车领域的移植

我国内燃机车的起动用铅酸蓄电池,沿用开口式铅酸蓄电池的历史至今已经40年了。初期为涂膏式开口电池,由于故障多、寿命短,经常影响铁路通过能力。1973年5月,苏州蓄电池统一设计会议上,运用部门一致否定涂膏式蓄电池,从此,内燃机车一直采用管式开口电池作为柴油机的起动电源。

1995年5月第二届国际蓄电池博览会上接触到国外已有将阀控电池用于内燃机车领域的先例(1988年日本铁路公司,1994年英国铁路等),那么,我国铁路能否率先将这项高新技术作为管式开口电池的替代产品呢?随即进行的调研工作坚定了我们的信心,1995年11月,北京“密封蓄电池在内燃、电力机车上应用的可行性研讨会”的召开,标志着阀控电池向内燃机车上的移植研究工作的真正起步,会上通过的“内燃机车用阀控电池技术要求和实验方法”,成为研究工作起步的标志。1996年铁道部以96J93号课题下达,由铁道部科学研究院车辆所承担该项试验任务。

对于起动性能而言,涂膏式电池的优越性,无疑远高于管式电

池。因此,铁路机务部门曾组织过较大规模的涂膏式硅胶蓄电池装车试验,但由于脱粉沉淀失效问题没能解决,试验没有成功。鉴于阀控池已经不存在脱粉失效问题,因此,敢于安排更大规模的装车试验,这也是铁路机务部门主动采用最新技术,吸取涂膏式池优越起动性能的又一次尝试。

自1995年底至2000年1月课题鉴定,经历五年时间,不但成功地解决了“能不能用”的问题,同时找到了“兑现较长寿命”的途径,取得了丰硕成果,分述于下。

一、研究目标

移植通讯部门的GFM-500型固定式阀控密封铅酸蓄电池技术,使之成为内燃机车的柴油机起动力源。

二、主要研究内容

鉴于通讯部门的GFM-500型固定式阀控密封铅酸蓄电池,存在若干不能适应内燃机车的柴油机起动力源的技术缺陷,为此,我们提出了产品移植的主要技术要求(同时,制定了相应的试验方法),并以此作为项目的研究内容,主要有:

1. 起动力循环耐久能力试验

以2100 A放电80 s(相当柴油机起动力十次时间),再以2.4 V充电1 h作为一个循环。每100个循环,组成1个单元,并进行一次容量检查。经过10个单元共1000次循环,检查蓄电池容量,应不低于85% C_5 。

2. 常温、低温起动力性能试验

蓄电池在常温(25℃)环境中,以2100 A放电,终止电压为1.0 V时,持续时间不少于110 s,且部件应能适应2100 A起动力能力;蓄电池在低温(-40℃)环境中保温8 h,以1700 A放电,终止电压为0.6 V时,持续时间不少于50 s。

3. 现场装车运行试验

蓄电池装车运行20万公里,以其容量下降率测算,预期使用

寿命不少于 5 年或运行 80 万公里。

三、完成的主要研究工作任务

1. 平台试验。自 1996 年 5 月起,按照“内燃机车用阀控电池技术要求和实验方法”,完成深圳华达等 22 个品牌蓄电池的“2100A 起动能力”等 18 项性能试验。

2. 解剖分析。1997 年 6 月,对第一批通过 1 千次充放电循环模拟寿命试验的 11 家电池,进行了解剖分析。

3. 现场运行试验。1997 年 1 月至 2000 年 1 月,安排 19 家产品(含自行装车的四家),共计 21 台份电池,参加现场运行试验。装车试验集中安排在武昌南、长春机务段,这些电池在装车之前,以及运行 1 年、2 年后,均组织了蓄电池保有容量的检测工作。

4. 密封电池析气压力-氧复合效率的研究性试验,于 1998 年 7~8 月进行。

5. 内燃机车用阀控密封式铅酸蓄电池国家标准,1999 年 5 月正式上报。

6. 内燃机车用阀控电池“智能保护器”。1998 年 7 月至 1999 年 5 月,与北京机电研究所合作研制成功。

7. 总结、编制阀控电池维修要领,于 1999 年 6 月提出。

四、取得的主要研究成果

完成上述试验任务的过程相当漫长,收获也相当丰厚,我国南方(武昌、成都)和北方(长春、塔河)装车的 18 台份蓄电池,已经运行 2~5 年,经过走行 30 万~70 万公里的考核,已经证明阀控密封铅酸蓄电池,具有兑现 80 万公里预期寿命的能力。目前,各铁路局、机车造、修工厂,在内燃、电力机车上自发装车 800 多台份,大大超过了课题预定的移植研究目标,跨入了世界先进行列,同时,还写出了三个方面,共九项具有实用价值的研究报告,这些报告成为本书的主要素材来源,使本书具有实践性很强的著述特点:

1. 课题确定任务:现场试验报告、平台试验报告、内燃机车采用阀控电池的经济效益分析报告、电池智能保护器研制报告;
2. 专题分析报告:阴极吸收和密封性能试验报告、2100A 放电实测报告、11 家电池解剖与起动循环耐久能力相关分析报告;
3. 延伸专题研究报告:密封电池析气压力-氧复合效率试验报告、NM450 电池容量关系与内阻变化验证报告等。

阀控电池现场装车试验的目的,不仅在于评定优劣,更在于暴露问题,进行改进,特别是那些显而易见的早期故障。试验过程中,气候炎热的武昌南、峨嵋机务段所发生的故障,明显高于长春机务段,使我们以及制造厂家对阀控电池的固有缺陷和不足,有了较为全面和深刻的认识,不仅获得了较为系统的质量改进意见,而且更使人们保持一份必要的清醒。

尽管阀控电池的移植工作,取得了成功,而且初步打开了局面,但从取代管式电池的整个历史进程看,这仅仅是开始,面前的问题,特别是密封电池全面推广后,还会出现一些新课题,都需要人们继续努力,做好今后的工作。

首当其冲的是迅速推广智能保护器,同时,完成保护功能整定值和门坎值的合理化工作,尽快为阀控电池建立起必要的运行环境;阀控电池的标准化设计;完成后期现场运行试验工作(已经安排的现场试验规模和持续时间,尚需再用 2~4 年时间,以取得完整的权威性试验资料,目前,尚未见到国际上的类似报告),以及电池单节容量智能检测仪、现有充电设备的电压守护器等配套技术的开发等。

在阀控电池向内燃机车上移植课题展开的同时,阀控电池向电力机车上移植,用来替代碱性蓄电池的研究,也同时起步。四年来的装车实践表明,无论是对机车泵风升弓的主要使用工况,还是进一步减少维修工作量,都取得了公认的良好业绩,移植情况是顺利的,所余的只是保证使用寿命 10 年,尚需一段考验时间,才能作出正确结论(不过从经济分析匡算看,即使 6 年进行更换,对机务段而言也是合算的)。

五、采用阀控电池的综合经济效益

阀控电池用于内燃机车,在经济上究竟合不合算?身居不同管理层次,特别是不少决策层次的业务或经营主管人员,自然十分关心。采用阀控电池的综合经济效益,分为两个部分,一部分是可计算的实际效益;另一部分是难以计算,但确实存在的潜在效益。

目前,阀控电池的价格是管式电池的 2.5 倍,而管式电池统计寿命为 1.8 至 3 年,平均为 2.4 年;阀控电池寿命,仍取研究目标 5 年(从已有装车实践趋势推算,可以正常运行 80 万~90 万公里,相应时间约为 5 至 6 年,按下限测算留有余地更大)。选取长春机务段为例,仅对可计算的实际效益进行测算,结果表明,采用阀控电池的综合经济效益十分明显。

1. 平均每年多投入费用,同每年节约费用比较,效应是明显的;

2. 一次性多投入费用,同每年节约费用比较,需要 1.43 年,即可收回投资。

这是机务段运用、检修部门之所以持积极态度的内在动因,也是决定新产品能否顺利进入机车市场的根本因素(见表 1-2a)。

表 1-2a 中的潜在效益,铁路局和铁路运输的大账占主导地位,其经济价值远比阀控电池购置费要大,再加上可计算的实际效益也很明显,这些就是铁路局业务主管部门持积极态度的内在动因,也是决定新产品能否顺利进入机车市场的又一根本因素。

综上所述,采用阀控密封铅酸蓄电池产品,使机车蓄电池率先进入“换件修”制度,就机务段成本角度而言,即使按照一次更换多投入费用计算,它不但低于一年半的可计算实际效益(含电池维修、机车运用成本等的费用节约),还明显减少了影响运输秩序的机车机破发生,降低了工人的劳动强度,把工作者从酸雾环境中解放了出来,因此,深受机务部门的欢迎,具有广阔的市场前景。

表 1-2a 长春机务段采用阀控电池经济效益测算

分类	项 目	每年节约费用	计算依据	投入或比较结论
可计算的 实际效益*	地面充电用电量	122766 元	充电功率 20 kW, 充电时间小, 辅修 * * 为 12 h, 中修为 36 h, 电价 0.7 元/度	1. 平均每年多投入费用 (50000/5 - 417 × 48/2.4) × 117 = 194220(元)
	充电人员工资	134400 元	设剩余工作量的维修费用, 同机车中修的充电人员工资节约相当, 则: 充电组 16 人, 留下 2 人, 年均工资 0.96 万元/人	2. 平均每年多投入费用同每年节约费用比较 $K_1 = 194220/2447996 = 7.9\%$
	机车少支出的机车运用成本	1996000 元 (表 1-3)	按机车小、辅修缩短停时 10h 计算	3. 一次改型更换多投入费用 (50000 - 417 × 48) × 117 = 3508128(元)
	维修保养费用	194830 元		4. 一次更换多投入费用同每年节约费用比较, 需要 1.43 年, 即可收回投资
	其中: 更换单节	183480 元	全年更换电池 440 节, 单价 417 元/节	$K_2 = 3508128/2447996 = 1.43$
	用酸 用碱	3750 元 7600 元	补充电解液用酸 1.5t 清洗、中和用碱 2t	
	合计	2447996 元		
潜在 效益	铁路局购车	296 万元	0.998 台(见表 1-3)	具有减少购置机车台数的可能
	铁路局运输收益	约 600 万元/年	0.998 台, 按单台机车完成运输量计算	系各部门共同完成, 但比支出高
	铁路运输秩序	减少机破	减少了干扰运输秩序造成的经济损失	电池失容不能起机, 接地故障引起
	减少机车库停时间	5950h	仅按每个机车小修、辅修缩短停时 10 h 计算, 忽略临修、碎修所占库停时间	(由于机务段总体检修能力过剩, 这一项效益不再计算)
	附加检修		腐蚀蓄电池箱, 引起火灾等	均发生检修费用
	工作环境改善		酸雾影响人员健康	

* 研制报告载明, 1997 年长春机务段配属机车 117 台(DF₄型 71 台; DF₃型 31 台; DF₂型 14 台; DF₁型 1 台), 完成的运输生产任务为总周销量 190 亿吨公里, 完成的机车修理任务为小、辅修 595 台(对应发生机车中修 31 台, 大修 15 台)。

* * 为便于阅读, 顺将本章所用的主要机车专业词汇, 一并释于表 1-2b 中。

表 1-2b 机车专业相关词汇涵义

序	专业词汇	涵 义	注
1	机务段	配属机车,负责机车运用、检修等业务的基层单位	归属铁路局、铁路分局管理
2	内、电机车	以柴油机、电网电力为动力能源的机车	铁路运输动力
3	台份	一台机车上,装有该部件的总数量	每台份阀控电池为 48 节
4	机破	机车出现故障,影响铁路运输正常进行	
5	临修 *	机车出现故障,需在机务段内安排临时修理	未影响铁路运输正常进行
6	小、辅修 *	机车小修、辅修,是范围较小的机车检查修程	周期分别为 6 万和 2 万公里
7	中修 *	中等范围的机车检修修程	周期为 30 万公里(内)、45 万公里(电)
8	大修(厂修)	机车性能的恢复性检修修程	周期为 80 万公里(内)、140 万公里(电)
9	状态修 *	按机车状态修理	据诊断或专职人员检查结论
10	段备	段备机车,在机务段内备用的良好机车	主要是受运输用车影响
11	地面充电	利用地面设备,向装于机车上的阀控电池充电	
12	整组电池分 组电池	每台份阀控电池为 48 节(96 V),称为整组电池,机车两侧各装一半,相应称为分组电池	一些机车的分组电池,有向外电路供电的 24 V 中间抽头
13	走行公里	机车运行里程	以走行公里计算
14	全周转时间	从机车出机务段运行,到回机务段的周转时间	含运行、站停、临时停车等

* 统称段修(在机务段进行的修理作业)

表 1-3 折合节省机车的成本计算

机 车 型 号	客运 DF ₄	货运 DF ₄	DFH ₄	DF ₅	折合每年
10 h 以内机车运用(趟、班数)	2	1	1	1	
该型机车全年小辅修 (台)	114	281	61	135	
可多投用 (趟、班数)	228	281	61	135	
每台机车的年投用 (趟、班数)	864	672	504	696	
折合节省机车 (台/年)	0.263	0.42	0.12	0.195	0.998
每台机车年均费用支出(万元/年)					200
相当全段全年节约开支(万元/年)					199.6

第二节 内燃机车的柴油机起动

内燃机车阀控电池的主功能是起动柴油机,蓄电池产品的起动能力将是最为根本的取舍因素,只有清楚了解柴油机起动的情形,才能造好、用好、管好阀控电池,现从四个方面加以分析。

一、柴油机起动特性

柴油机是内燃机车的原动机,柴油机从停机到运转,称为柴油机起动过程。国产机车的柴油机起动过程,是用蓄电池作为起动电源,向起动电动机供电,通过变速箱直接拖动柴油机旋转部件,一要克服静摩擦阻力使机组转动起来,二要克服系统的飞轮矩,不断提升柴油机转速,持续向燃烧室内的空气作功,使其温度以及压力急剧上升,一旦达到柴油自燃温度,柴油便开始燃烧、爆发,到了无须再由蓄电池提供能源,柴油机也能自行维持旋转之时,从理论上讲,起动过程已经完成。当然,从实际操作而言,供电时间总要比理论时间略微拖长一点,以便确保起动过程的可靠完成。内燃机车柴油机起动过程中,部件运动的数学关系列于表 1-4。