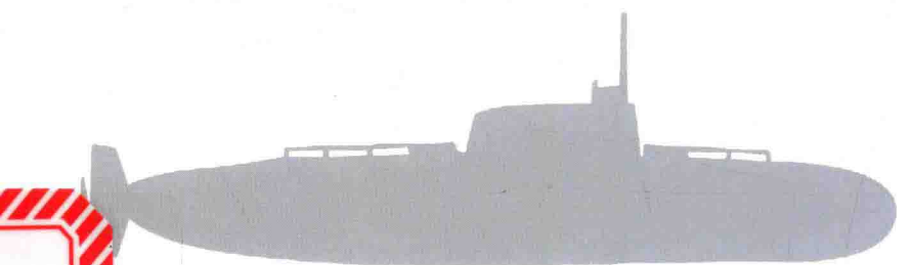


高等学校教材 · 航空、航天、航海系列
TEXTBOOKS FOR HIGHER EDUCATION



鱼雷电动力技术

党建军 李代金 黄 闯 编著



西北工业大学出版社

YULEI DIANDONGLI JISHU

鱼雷电力技术

党建军 李代金 黄 闯 编著



西北工业大学出版社

【内容简介】 全书共6章,其中第0章绪论主要介绍了电动力推进系统的发展、系统性能指标论证及设计特点等;第1章动力电池分别介绍了传统电池、新型电池及潜力电池的工作原理、基本结构及其性能特点等;第2,3,4章分别介绍了鱼雷用直流串激电动机、永磁直流电动机、永磁同步电动机的工作原理和设计要点;第5章简要介绍了直流电机的变流器和PWM控制技术。

本书可作为鱼雷动力专业本科生和研究生的教材,也可供从事相关专业的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

鱼雷电动力技术/党建军,李代金,黄闯编著. —西安:西北工业大学出版社,2015.8
ISBN 978-7-5612-4589-7

I. ①鱼… II. ①党…②李…③黄… III. ①鱼雷—电动力学 IV. ①TJ63

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第211893号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路127号 邮编:710072

电话:(029)88493844 88491757

网址:<http://www.nwpu.com>

印刷者:陕西丰源印务有限公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:5.875

字数:136千字

版次:2015年8月第1版

2015年8月第1次印刷

定价:20.00元

前 言

随着我国海军的战略转型,水下作战的任务、环境和对象都发生了重大变化,迫切需要加快实现武器装备的跨代发展,同时也对于鱼雷动力的支撑能力提出了更高的要求。未来水中兵器需要达到如下作战能力:重型鱼雷航程 100km,远程巡航鱼雷航程 1 000km,战役型武器 UUV 航程 2 000km;鱼雷最大航深 900~1 000m;提高攻击的隐蔽性,保证发射平台的安全。达成上述作战能力电动力系统具有优势,因此近年来鱼雷电动力技术得到了快速发展。

西北工业大学航海学院是国内普通高校中唯一定点设置水中兵器及水下动力学科专业的院校。《鱼雷电动力技术》是西北工业大学规划教材,总结和整理了多年来国内外鱼雷电动力领域相关研究成果,汲取了笔者多年教学和科研实践的成果。

本书力求具有先进性、系统性及实用性,希望在传授知识的同时兼具学生创新意识和创新能力的培养,使学生在掌握基本理论与方法的同时兼具动力技术工程能力。

全书共 6 章,其中第 1 章绪论主要介绍了电动力推进系统的发展、系统性能指标论证及设计特点等;第 1 章动力电池分别介绍了传统电池、新型电池及潜力电池的工作原理、基本结构及其性能特点等;第 2,3,4 章分别介绍了鱼雷用直流串激电动机、永磁直流电动机、永磁同步电动机的工作原理和设计要点;第 5 章简要介绍了直流电机的变流器和 PWM 控制技术。本书编写分工:第 0 章由党建军教授编写,第 2,3,4 章由李代金副教授编写,第 1,5 章由黄闯博士编写。

本书在立项及编写过程中,得到了西北工业大学教务处和出版社的大力支持,得到了航海学院领导的鼓励和帮助,罗凯教授对本书进行了全面审阅,提出了许多宝贵意见,借此一并表示诚挚的谢意!

由于教材内容广泛,加之水平有限,书中肯定存在不足之处,恳请读者予以批评指正。

编 者
2015 年 7 月

目 录

第 0 章 绪论	1
0.1 鱼雷电力推进系统的发展	1
0.2 鱼雷电力推进系统的性能指标论证	3
0.3 鱼雷电力推进系统的设计特点	4
0.4 鱼雷电力系统技术指标的确定	9
第 1 章 动力电池	14
1.1 引言	14
1.2 铅酸蓄电池	16
1.3 银锌电池	23
1.4 铝/氧化银电池	29
1.5 锂电池	32
1.6 燃料电池	40
第 2 章 直流串激电动机	45
2.1 直流串激电动机基本原理	45
2.2 直流串激电动机设计的基本关系	47
2.3 鱼雷串激推进电动机额定参数的确定	49
2.4 电磁负荷的选择与分析	51
2.5 鱼雷推进电动机过载能力分析	52
2.6 极对数和极弧计算系数的选择	54
2.7 电动机主要尺寸的确定	55
第 3 章 永磁直流电动机	58
3.1 永磁电动机的发展	58
3.2 永磁材料的性能和选用	60
3.3 永磁直流电动机基本原理	65
3.4 永磁直流电动机的设计特点	66

第 4 章 永磁同步电动机	70
4.1 永磁同步电动机基本理论	70
4.2 调速永磁同步电动机基本理论	74
第 5 章 变流器	82
5.1 DC-DC 变流器	82
5.2 脉冲宽度调制(PWM)技术	84
5.3 PWM DC-AC 逆变器	85
参考文献	87

第 0 章 绪 论

第二次世界大战后,鉴于鱼雷在反潜战、歼灭敌舰艇、破坏敌海上交通线及袭击敌水下设施等方面所起的重大作用,特别是在现代海战中,潜艇成为制海权的最大威胁,各国都在发展适应于不同任务的新型鱼雷。为了满足对于新型鱼雷不断提高的性能要求,各国都在探求鱼雷的各种新型动力装置,但其总的发展方向还是沿着热动力和电动力两种途径,其中电动力推进是使用电池组和电动机来实现的。

0.1 鱼雷电动力推进系统的发展

鱼雷电动力推进系统由电池组、推进电动机、电路控制装置,连接电缆、推进轴、推进器等部件组成。电池组将化学能转变为电能,电路控制装置按一定的要求接通电路,将电池组电能提供给推进电动机,电动机将电能转变为机械能,再通过传动装置带动对转螺旋桨或泵喷射推进器产生推力,使得鱼雷在水中航行。

电动力推进系统与热动力推进系统相比较有许多战术优点:

- (1)电动力推进系统在航行时不排出废气,因而鱼雷无航迹、隐蔽性好;
- (2)电动力推进系统的输出功率不受海水背压的影响,保证了鱼雷在任何深度上航速、航程恒定,便于大深度发射以及攻击隐藏于大深度上的潜艇;
- (3)电动力推进系统自噪声较小,有利于声制导装置的工作;
- (4)电动力推进系统在航行中没有燃料的消耗,在航行过程中的鱼雷总质量不变,使得鱼雷在航行中稳定性较好;
- (5)动力电池电源还可以对鱼雷其他用电系统供电。

电动力推进系统的这些战术优点,使得其一度发展较快,成为攻击柴电潜艇的有效武器。但是电动力鱼雷的某些战术技术(简称战技)指标,尤其是其单位质量与体积发出的功率低、动力电池容量有限,使得鱼雷的速度、航程受到限制,难以对高速目标发动有效的攻击。例如,某型鱼雷电动机单位功率质量比为 1.35 kg/kW ,而早于该型号开发的某型热动力鱼雷发动机的单位功率质量比则为 0.64 kg/kW ,为了提高航速,电动机的质量将相当可观,而更重要的是动力电池组的质量、体积会更大。

鱼雷的性能主要取决于它的航速、航程、装药量、航深及水下搜索弹道的方式,还取决于自导、引信、控制装置的性能、导引精度等诸多因素。在这些因素中,航速、航程是直接影响鱼雷命中概率的主要因素,对于电动力推进系统,要求能够尽量提高鱼雷的航速、航程等战技指标。

由于电动力系统较之热动力系统有许多优点,因此早在第一次世界大战时期就已经开始研究。但因为当时难以找到高比能的动力电池,航行性能远比不上热动力鱼雷,所以许多国家于 1930 年就放弃了该研究工作。由于德国坚持了研制工作,并且首先在第二次世界大战期间研制成功 G_7 型鱼雷,因此这是世界上第一条电动力鱼雷。随后苏联和美国于 1942 年,也先

后仿制成功了电力鱼雷。到第二次世界大战末期,电力鱼雷的使用量已超过了热力鱼雷,至 20 世纪 50 年代,电力推进系统成了反潜鱼雷的唯一动力装置。

随着科学技术的发展,潜艇的潜航深度由第二次世界大战时的 100 m 增加到战后的 200 m,在 20 世纪 60 年代潜航深度增加到 300 m,其后更向大深度发展。潜艇对鱼雷武器携带者的抗御能力不断增强,迫使鱼雷必须加大航程,提高潜航深度。对于普遍使用的开式循环鱼雷热力系统而言,其经济性指标受下潜深度的影响较大。例如,早期的 53-66 型热力活塞发动机鱼雷,当低速(40 kn^①)航程 8 000 m 工况时,航行深度增加 50 m,输出功率下降约 24%,航速减少约 3 kn。为了补偿排气背压的影响,必须随航深增加而相应地提高进气压强。电力鱼雷不受潜航深度影响的优点,成了当时发展电力鱼雷的主要原因,于是促进了电力系统的进一步发展,特别是在银锌电池和氯化银海水电池的成功应用之后,电力鱼雷性能有了很大提高。例如,使用氯化银海水电池的美制 MK-44 型鱼雷,成为当时攻击柴电潜艇的有效武器。

在推进电动机方面,各国在提高推进电动机的性能指标上所采取的措施并不完全一样。美国的发展方向是提高推进电动机的转速,增大电压,减少电流。例如,美国第二型电力鱼雷 MK-19,其推进电动机的转速高达 18 000 r/min,然后再用减速齿轮变成螺旋桨所需要的转速。又如 MK-44-0 型鱼雷,其推进电动机的转速在启动 20 s 左右后为 7 100 r/min,末速为 7 000 r/min。在美国的推进电动机发展中,通常用使用减速机械提高推进电动机的转速的方法减轻系统质量。

法国也是以提高电动机转速来减轻质量的。例如,E14,E15,L3 等鱼雷均采用转速为 8 500 r/min 的单转高速电动机,再用行星差动齿轮减速。

苏联却偏好于使用双转低速推进电动机,其研制的多个大型和小型鱼雷,均采用双转推进电动机,直接与螺旋桨耦合,电动机相对转速不高,都不超过 4 000 r/min。

英国也多采用双转推进电动机,如先进的“鳐鱼(StingRay)”鱼雷,其推进电动机的内、外转速均为 2 600 r/min。

在我国,从 20 世纪 60 年代初开始了鱼雷推进电动机的研制工作,首先仿制了苏制产品,从 60 年代中期,推进电动机开始走向自行研发的道路。

从以上典型鱼雷生产国的情况看,已经成功应用的鱼雷推进电动机是单转和双转两种类型的电动机。随着高效永磁电动机技术的不断成熟,高速、单转、高效率、小体积的永磁电动机必将取代电励磁电动机而成为将来发展的方向。

按照励磁绕组和电枢绕组的连接方式,传统的电励磁直流电动机可分为他激、并激、串激和复激四大类。根据战术技术要求,鱼雷要求电动机有最小的启动和达到额定转速的时间。如果直流电动机在额定电压下直接启动,其启动电流会很大。对于串激电动机而言,由于励磁电流就是电枢电流,所以在启动瞬间,串激绕组产生的主磁通很大,而并激电动机励磁绕组产生的主磁通几乎不变,因此在同样的启动电流下,串激电动机能够比并激电动机产生大得多的启动转矩。由于串激电动机这个突出的优点,用在无变阻器启动的鱼雷上,启动转矩会大大超过额定值,可以使得鱼雷缩短达到稳定航速的时间,因此,对于电励磁直流电动机而言,串激或复激是比较适合电力鱼雷使用的形式。

① 1 kn=1 n mile/h=(1 852/3 600) m/s。

对于我国的潜艇鱼雷发射器来说,鱼雷离开发射管的时间为 $0.5\sim 0.8\text{ s}$ 。鱼雷用串激电动机的启动过程在鱼雷离开发射管前就已经结束,因而启动过程对鱼雷的航行性能没有影响。

由于复激电动机兼具串、并激电动机的特点,因此有的鱼雷推进电动机也采用复激形式。

在永磁电动机方面,尽管其启动转矩相对较小,但是其他的主要性能均优越于电励磁电动机,其中永磁直流电动机的驱动电路相对简单,占用空间较小;而同步电动机则实现了无刷化。它们可以达到更高的效率和更小的体积,对于单转电动机而言,可以达到更高的转速。

0.2 鱼雷电动力推进系统的性能指标论证

现役的某小型鱼雷的质量和体积允许配装的动力电池的能量可以使得鱼雷以大于 30 kn 的速度航行 $6\sim 7\text{ min}$ 。现在优良的柴电潜艇最高速度可达 20 kn 以上,新型核动力潜艇速度可达 35 kn 左右。该鱼雷和柴电潜艇的最大速度差约为 10 kn ,假设鱼雷在 $1\,828\text{ m}$ 处发现目标,自导装置开始跟踪,根据鱼雷与目标的速度差不难算出,鱼雷要用 356 s 的时间才能追上目标,设鱼雷全航程为 400 s ,自导装置搜索阶段就只剩下 44 s ,对于运动规避的目标来讲,这个时间就太短了。如果自导装置在更远的距离上发现目标,或敌潜艇的速度更快一些,搜索时间就几乎为零。另外,在电池放电过程中,由于电压将随着工作时间的持续而降低,所以搜索目标阶段鱼雷的速度大,而攻击目标时速度却小,因此电动力小型鱼雷打击相当远或速度相当快的目标是很困难的。

为了适应现代海战的需要,各国又大力研究能适应大深度航行的热动力鱼雷,美国首先于1968年装备了性能优良的MK-46型热动力鱼雷,在 450 m 以内的深度范围内航速为 $43\sim 45\text{ kn}$,航程为 $9\,500\text{ m}$,将反潜小型鱼雷的性能提高到了一个新水平。然而各国对电动力鱼雷也在大力研究,例如英国的“鲷鱼”电动力小型鱼雷的航速达到了与MK-46相当的水平,大大提高了打击敌潜艇的命中概率。

目前配装有海水电池的大型鱼雷,它的空间和质量允许携带的电池的能量可以使得鱼雷达到 40 kn 以上的航速,当攻击最高速度为 20 kn 的目标时,目标和鱼雷之间的速度差为 20 kn ,如果自导装置发现目标的距离为 $2\,742\text{ m}$,只要 267 s 时间就能追上目标,如果鱼雷全航程为 840 s ,这样就剩下 573 s 的时间用于追踪和搜索,这段时间可使鱼雷航行近 $12\,000\text{ m}$ 的距离,这些指标解决了许多战术问题。

但是大型鱼雷只能从舰艇上或潜艇上发射,而不适于空投。随着各国海军不断完善和发展反潜武器系统,潜艇接近被攻击的目标舰艇就成了艰巨的任务。为了保证发射艇的安全,迫使舰艇在远距离发射鱼雷,这就要求鱼雷拥有更高的航速和航程。当发射距离为 6 n mile ^①时,在不同的敌舷角及自导作用距离变化不大的情况下,为打击速度为 24 kn 的水面舰艇,通过计算知,当鱼雷的速度为 50 kn 时,发现概率为 $0.78\sim 0.88$ 。鱼雷的发现概率是随着鱼雷速度的增加而增加的,从现代战术观点考虑,鱼雷的航速应不低于 50 kn ,如果以航母为打击目标,则航程应大于 50 km 。

对既定的鱼雷、既定的动力装置及航行环境,提高速度会缩短鱼雷接近目标的时间,从而提高了鱼雷命中概率,但问题的另一方面是,当速度提高不多时,航程下降却极为明显。例如,

① $1\text{ n mile}=1\,852\text{ m}$ 。

航速为 33 kn 时,航程为 11 000 m,而若航速为 40 kn 时,则航程仅为 7 500 m,这样短的航程不能保证在敌防护严密而必须远距离发射情况下必需的航程。因此,为保证足够的航程,速度也不可取得过高,特别是对于声自导鱼雷来说,速度的选取还要充分考虑鱼雷本身的噪声,不管是主动、被动还是主、被动联合,其自导作用距离都程度不同地受到鱼雷自身噪声的影响。例如,对于某被动声自导鱼雷,其自导作用距离在目标噪声级、水文传播条件及自导接收机的处理增益一定的情况下,由被动声呐方程可以看出,如果鱼雷的自噪声增加,则作用距离就减少。对同一条鱼雷(结构、电动力系统、螺旋桨均已确定),如果航速增加则自噪声增加。对于某型电力鱼雷,其自导换能器通频带为 1.8 kHz 时,自噪声声压可按下式计算:

$$p_c = \frac{2.63 \times 10^{-4} v^{4/8}}{y^{1.75} f} \quad (0-1)$$

式中, p_c 为自噪声声压; v 为鱼雷航速; f 为频率; y 为鱼雷航行深度。

由式(0-1)可以看出,随着鱼雷速度的提高,自导装置受到鱼雷本身的干扰噪声将增加。例如,某型电力鱼雷的噪声临界速度约为 38 kn,故在没有噪声有效抑制措施的情况下,速度不能选得太高,否则高速不但明显地降低了航程,而且由于自导作用距离的降低,命中概率也受到影响。对于自导鱼雷,最好采用变速制,即低速搜索,发现概率高;高速追踪,自导发现至鱼雷命中目标的时间短,目标机动的可能性小,于是可显著提高命中概率。但变速制给动力系统的设计带来了一定的复杂性。

对于某型电力鱼雷,由于自身噪声对自导作用距离的影响,因此在目标声源强度为 82 dB、鱼雷航深不小于 30 m、水文条件中等、弱负梯度层的情况下,当航速为 33 kn 时,自导作用距离为 700 m;而当航速为 19 kn 时,自导作用距离可高达 1 300 m 以上。可见鱼雷航速对自导作用距离有相当的影响。当鱼雷航速为 40~45 kn 时,只有装配对自噪声有抑制的自导装置,其作用距离才可能达到较好的水平。因此,只有自导作用距离远、本身速度高,而机动性又好的鱼雷,才具有较高的命中概率。

对电力鱼雷来说,要达到上述指标,关键问题是研制新型动力电源,研制能够采用这种能源的电动机及研制先进的自导装置。尽管目前电力鱼雷的航速、航程并不适应现代战术的要求,但电力鱼雷确实有着超越热动力鱼雷的一些优点,并且目前世界各国仍拥有大量的非核动力潜艇及舰船,电力鱼雷仍具有较强的攻击能力,故应不断加以改进和完善。

0.3 鱼雷电力推进系统的设计特点

在鱼雷上的一切装置,都要求质量轻、体积小、工作可靠、性能良好、使用方便,这些要求使得电力装置的设计具有自身的特点,而不同于一般的电力拖动系统,这些特点主要表现在以下几个方面。

0.3.1 短时工作制、短寿命

鱼雷的设计、制造或使用都不是作为一次发射使用的,目前各国服役的电力鱼雷从出厂经部队训练后列为战雷,其试验、使用次数一般为 10~40 次。电动力系统的使用次数主要取决于电池的寿命,目前的蓄电池一般可以满足以上要求,而一次电池当然只能使用一次。每次使用的时间则取决于电池的性能、鱼雷的类型、使用的目的等方面。一般电力装置的累计工

作时间不超过 10 h。

因为鱼雷电动力装置属短时工作制、短寿命,所以装置容许有较高的电、热及机械负荷,使得鱼雷电动力装置的相对质量比地面装置上的轻得多。例如,某现役鱼雷上推进电动机的相对质量比为 $1.3 \sim 1.7 \text{ kg/kW}$ ，“鲋鱼”电动机的相对质量比为 0.25 kg/kW ,而普通 Z2 系列直流电动机的相对质量比约为 13 kg/kW 。

根据现役鱼雷的情况,电动力推进系统的质量和体积(包括电池架、电池、推进电动机、螺旋桨、轴承、控制部件及电缆等)占全雷质量和体积的 $40\% \sim 50\%$,因此提高质量比功率是鱼雷电动力推进系统研究的首要任务。

0.3.2 大的瞬时电流、动力负载

现役鱼雷以使用直流串激电动机为最多,并以电压平稳的电池组为能源,电池组直接连接到电动机上,但对二次电池组来说要通过接触器来接通,此类型的电动机在启动时的冲击电流可达到稳态工作电流的 $4 \sim 6$ 倍。

为了尽量减少电动力推进系统的质量和体积,不希望在系统中附加电动机的启动电路,而是直接从冷态下启动,因此有必要提供电动机的启动安全极限。根据经验,当功率在 180 kW 以下、稳态工作电流在 1000 A 以下时,从冷态直接启动,电动机能够承受 $4 \sim 6$ 倍的稳态工作电流,在此瞬时电负载下电动力装置是安全的。当选择推进电动机额定电流时,必须考虑到启动电流的大小,对全额直接启动的推进电动机额定电流一般确定在 1300 A 以下。当应用一次电池组作为能源时,最好一次电池组开始工作的时间和电动机的加速时间相一致,通常的做法是用电解液灌注系统来控制一次电池的激活时间。在国外,启动鱼雷推进电动机大约是在 15 s 的瞬态时间内用 2 倍左右的额定电流,这种情况下可选择额定电流大一些。我国某型鱼雷一次电池组激活时间为 $7 \sim 8 \text{ s}$,这样有利于控制推进电动机的启动电流。

电动力装置在发射时还要经受其他动力负载,例如潜、舰发射的鱼雷,它在发射管内以 $8g \sim 10g$ 的加速度运动。用飞机或其他运载工具发射小型鱼雷时,一般规定入水冲击加速度为 $60g \sim 80g$ 。电动力鱼雷动力装置在经受发射的动力负载时,必须保证启动时还能够经受住所要求的电负载。

鱼雷推进电动机的启动电流虽然很大,但是推进器的转矩特性属于泵类负载特性,因此电动机出现峰值的时间一般为 $20 \sim 30 \text{ ms}$,达到稳态电流时也不过 $0.3 \sim 0.8 \text{ s}$,因为启动时间极短,故在启动电流很大的情况下,绕组发热也不高,不会受到热的任何损伤。至于启动时发生的机械冲击,尽管从理论上讲,启动转矩应随电流的二次方而上升,但实际上由于磁路饱和,主磁通不可能随电流无限上升,因而其最大启动转矩约为额定转矩的 6 倍,只要在结构强度上适当给予考虑,一般结构不会发生问题。但是,由于启动电流很大,可能在换向器与电刷附近发生强烈的电弧,这是应当注意的。

0.3.3 影响鱼雷航速偏差的因素

如前所述,航速是鱼雷的主要战术指标。从战术上来看,当鱼雷的航速恒定时,鱼雷的命中概率较高,但按鱼雷射击理论分析和计算表明,当鱼雷的速度偏差为 $\pm 1 \text{ kn}$ 时,对鱼雷的射击命中概率影响不大,对于传统开环控制方式的系统,尽管在设计上保证鱼雷航速偏差在 $\pm 1 \text{ kn}$ 以内是困难的,但是应该尽量满足此要求。影响鱼雷航速偏差的因素很多,一般可分

两大因素:一是鱼雷本身的因素,例如推进电动机的制造偏差、电池组电压的波动、螺旋桨的制造偏差、传动轴系的摩擦、鱼雷线型的变化、雷壳表面粗糙度等都属于鱼雷本身的因素;二是鱼雷使用环境的因素,当鱼雷在淡水靶场的试验以及在不同盐度海水中的使用时,水温的变化等则都属于鱼雷使用环境的因素。

由于鱼雷在不同时间、不同海域使用,因此其环境温度不同,电池组的电压将发生变化,Ag-1.5 电池组技术条件规定,电解液温度为 35℃ 时放电与 0~15℃ 时放电电压差约为 6.5%。美国 MK66-θ 型 Zn/AgO 二次蓄电池组电压变化范围为 232~253 V,所引起的航速变化约为 1.6 kn。Mg/AgCl 海水电池组的电压受海水温度和盐度的影响更大,所引起的航速偏差也更大。

由于电池的制造因素,同类型的电池组工作电压也是有差别的。另外,电池在放电过程中的电压也是变化的,因此鱼雷在航行过程中的不同时间其速度也不尽相同。

通过上述分析,为了减少鱼雷航速偏差,在设计鱼雷用电池时需考虑到电池电压的波动对航速的影响,应尽量选择放电电压平稳的电池作为鱼雷使用的动力电池。

鱼雷推进电动机为短时工作制,电动机在工作中并没有达到真正的稳定运行,这样电枢电流可能由于电动机内部的各种损耗而变化,也可能由于拖动负载因受外界条件变化而相应地发生变化,这样就造成了同一台电动机的输出功率发生变化,从而引起鱼雷航速的变化。对于某型鱼雷推进电动机,同一航次中航速变动量约为 0.47 kn。

尽管鱼雷推进电动机的电负荷比一般民用电动机高得多,造成电枢绕组温度在工作结束时高达 250℃ 左右,但对串激电动机来说,电枢回路电阻由于温度的升高而增加,而在电压不变的情况下,电枢电流降低造成主磁通也略低,因而温度对转速的影响可以忽略不计。影响鱼雷航速偏差的主要因素是电池组的输出电压变化。

0.3.4 辅助用电

控制、制导、引信等其他电子设备所使用的电源通称为辅助用电。现役电动鱼雷的辅助用电大多数是由动力电池组的分压供给的,少数的由单独的一组电池供电,也有的从推进电动机电枢绕组中直接引出单相交流电供自导装置等用电。这样在需要交流电源的电子设备中就省略了专用变流装置,但推进电动机的设计就增加了产生单向交流电的电枢绕组及滑环等零部件。

由动力电池组分压供给换流器和电子系统以满足鱼雷电子系统对交流电和直流电的需要是较好的方案。在此供电方案中,电池组的负荷电流为电动机及电子系统负荷电流之和,但必须注意供电系统中的相互干扰问题。由于所有辅助用电都由动力电池组按一定要求统一供电,为简化供电系统必须对电压品种进行统一管理,并注意系统间的互相干扰及影响,否则将造成单一工作系统正常,可以达到技术指标要求,而当全雷各系统同时工作时则不正常的现象。

0.3.5 安全措施

在目前应用的鱼雷电池中,在鱼雷储藏和工作中均能析出氢气和氧气,这样就存在着起火和爆炸的危险,为了根除这种危险,必须在设计时注意该问题。

爆炸形成的原因是氢、氧化合反应时放出热量(氢、氧合成 1 mol 水时产生的热量为 134 kcal^①)使反应产生的水蒸气极度膨胀而形成的。但在普通温度下氢、氧并不化合,当温度为 300℃时,经过数天才产生一些水迹,当 518℃时,氢、氧化合需要数小时,而当温度为 700℃时化合只需要一瞬间。另外,氢、氧容器壁内的自然条件及混合气体中水蒸气的多少,对氢氧混合气体的化合速度也有相当的影响,如干燥的氢氧混合气体在 960℃时不会爆炸,而当空气中氢含量占 4%以上时,则形成一种易爆炸的混合气体,遇到温度为 500~700℃的灼热体或受到电火花的激发便会爆炸。

为防止爆炸,必须采取限温、限量、限水蒸气等安全措施。例如,清除鱼雷内的空气代之以充满氮气,用耐压壁隔开电池仓,控制电池组的温度,限制电池仓内的氢氧含量,防止电动机火花,控制火花与氢氧混合气体接触,防止电动力装置内部短路等。

在用一次激活电池作为鱼雷用电源时,为了保证发射安全,还必须考虑到一次电池的激活时间,若激活时间过长,可使电池组因电压上升迟缓而影响控制系统及电动力推进系统的工作,从而引起鱼雷出口弹道的反常,产生威胁发射艇安全的可能性。

在鱼雷收回和工作结束后的维护期间,为了消除危险,电池仓内由电池工作帽或气塞透气口放出的氢气必须排除,为此可在电池仓上安装安全阀和通风装置。一般当排气压力为 0.5 bar^②时,安全阀自动打开,通风装置则根据情况而用。对于一次电池组还要应用另一项安全措施,一般情况下,鱼雷航行的时间要比电池组的极限工作时间短一些。对于大功率的一次电池,在全航程试验完成以后剩余的小部分容量在短路的情况下也可能发生起火的危险。为了防止这种情况发生,必须使电池组完全放电,因此需要连接一个分泄电阻,使电池组剩余的电能通过分泄电阻变成热能而散失掉。

为了防止电解液溢出而腐蚀雷壳及其他部件,设计电池组时,必须采取相应的结构,使电池组在鱼雷航行中、航行结束漂浮后电解液不能溢出或溢出量限制在极小的范围内。

只要在鱼雷的设计和使用中采取相应的措施,产生危险的根源是能够消除的,安全是有保证的。

0.3.6 电动力装置设计中温度必须加以限制

鱼雷电动力装置在能量转换过程中,一部分变成有用的能量,其余的则变成为热能;电路中的通断控制部件及电缆在大电流的情况下也会产生高温。尽管海洋是理想的散热体,同时以鱼雷的金属外壳传热到海洋里也是很优越的,但在电动力装置与壳体之间的介质仍为气体,而气体的导热系数很低,尤其对短时工作的电动力装置,在散热不良的情况下,热量基本上被装置本身所吸收,因而造成不少装置在高温下工作。

对于电池组而言,电池组的化学能在能量转换中有一部分变成有用的电能供推进电动机使用,而另一部分则变成热能。对于以鱼雷壳体作为电池组外壳的堆式电池(一次电池),可认为向海洋的传热形式以对流换热为主,而对于具有电池仓,即电池组安装于鱼雷电池仓内的电池组,则可认为热主要以热传导的方式散发。不管以鱼雷壳体作为电池组壳体还是以鱼雷壳体做电池仓,电池组与海洋之间的温差主要取决于电池组的平均比热容和以热的形式消耗的

① 1 cal=4.184 J, 1 kcal=4.184 kJ。

② 1 bar=10⁵ Pa。

能量。为了提高鱼雷的战术性能,在限质量、限体积的情况下,总是试图提高单位质量能量,于是电池的温升会很高,因此在选择高比能电池时必须将其温升限制在许可的范围,在必要的情况下还要采取控制电池温升的措施,如选用导热系数大的惰性气体充入电池仓、减少电池组壳体与鱼雷壳体之间的距离等。对于鱼雷推进电动机,采取上述的措施同样可以减小电动机的温升。

当设计控制装置和电缆时,也必须控制其所容许的温度。例如,当断开和接通电动机电路的气动式接触器的触头材料为紫铜,通过的电流为 830 A 以下时,其寿命只有 1~2 次;当电流达到 890 A 以上时,每次通断触头都要熔焊,如果将触头材料改为银石墨和银镍等耐高温且导电性又好的材料,就可以解决熔焊问题,寿命可达 10 次以上。

当设计电力系统时,温度极限是与电负荷密切相关的,选择电负荷时必须注意温度,而结构、材料应保证各装置在此温度下可靠工作。

0.3.7 双转系统

由于电力鱼雷的航速一般较热动力鱼雷低,所以对转螺旋桨的使用较泵喷射推进器更为普遍,无论鱼雷推进电动机采用单转(只是电枢旋转)还是双转(电枢、磁轭同时反向旋转)的形式,都要实现它所驱动的螺旋桨按相反的两个方向旋转。这两种电力拖动系统各有优缺点。

为了驱动螺旋桨双转,单转高速推进电动机必须采用差速减速器,以实现分速和减速,一般采用单列 2K-H(2K 代表轮系中有两个中心轮,H 代表转臂)差动行星轮系。这种轮系具有结构紧凑、体积小、质量轻、效率高、制造和安装较为简单的优点,符合鱼雷对动力装置的要求。这种轮系的效率较高,一般为 0.97~0.99。

根据作用与反作用定律,因为电动机定子也受到一个与转子电磁力矩大小相等而方向相反的力矩,所以双转鱼雷推进电动机就不需要上述差速变速机构,它的旋转电枢与磁轭可以直接同内、外螺旋桨轴相连,因此这种电力装置简化了结构,同时消除了差速变速器的噪声,对声自导装置的工作有利。

在单转高速鱼雷推进电动机中,由于定子是固定在鱼雷壳体上的,这样作用在鱼雷壳体上就有两个力:一个是螺旋桨产生的推力,作用于壳体使鱼雷克服航行阻力而前进;另一个是由电磁力矩作用产生的反力矩。为了消除鱼雷的横滚,在总体设计中必须采取相应的措施来抵消该反力矩。

为了缩小电动机的尺寸,单转鱼雷推进电动机转速可高达 10 000 r/min,由于高速旋转体的陀螺效应,当鱼雷回旋时将产生陀螺力矩。当鱼雷在水平面回旋时,该陀螺力矩使鱼雷下潜或上浮;而当鱼雷在垂直面回旋时,该力矩使鱼雷向左或向右偏离航向。但一般鱼雷推进电动机电枢的转动惯量不大,鱼雷旋回时的角速度也不高,因此产生的陀螺力矩可以通过控制系统自动操舵来平衡,无须采用专门的措施。

为了保证电动机的电刷和磁极相对静止,双转电动机的电刷机构必须随着磁系统以同样的速度旋转,因此双转电动机比单转电动机结构稍微复杂。

虽然双转和单转电动机各有优缺点,但鱼雷上应用哪一种,要根据具体的要求而定,在主要生产电力鱼雷的国家里,这两种系统的电动机都存在。对于串激电动机,只有当电枢转速超过 8 000 r/min 时,高速单转电动机的优越性才能得到有效的发挥。

0.3.8 变速

为了使鱼雷适应使用目的,有时一种鱼雷采用多个速制,改变鱼雷推进电动机转速的途径只能是改变输入电压和改变激磁磁通,但现役鱼雷推进电动机一般为直流串激电动机或永磁电动机,特别是对于磁轭和电枢相对旋转的电动机,要实现改变激磁的困难较大,而用改变电压的方法达到改变速制的目的则较为简单,并且工作可靠。

同一组电池,高速、低速工作时由于放电电流不同,可造成高速、低速时电池的平均电压不同。如果辅助用电都按电压要求由电池组供电,则单体电池电压改变,必然影响串联单体电池数目不变的辅助用电电压,这样就会影响辅助用电仪器的工作性能,这一问题需要重视。

0.3.9 使用环境

现代鱼雷的运动范围不只在水中,随着鱼雷携带者和发射器的不断更新,它已发展到空中(直升机、火箭助飞)、水面(水面舰艇)和水下(潜艇)发射,再加上各地的自然条件不同,鱼雷的使用环境非常复杂。为了适应多变、复杂的自然环境,设计时必须加以考虑。

鱼雷有可能在热带烈日下,暴露在舰艇的甲板上,又有可能在寒冷的海面及高空中出现,因此对系统的环境试验条件要根据不同的携带者所处的环境作出规定。例如,规定鱼雷的环境温度应高温为 $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$,低温为 $-40 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 。在这样的环境条件下,电动力系统性能应可靠。

热带地区雨季的相对湿度可达95%以上,在“湿、热”同时具备的条件下,对电动机或其他电动力装置的绝缘性能是一个考验,因此在绝缘结构设计和绝缘工艺处理上应多加考虑。按试验条件规定,湿度应为 $95\% \pm 3\%$ 。

湿热带型气候是发生霉菌的主要外界因素,在海洋和沿海地区工作,盐雾的侵入也是不可避免的。因此,电动力系统环境试验中也应考虑盐雾、霉菌试验。

鱼雷不可避免地随着携带者的振动而振动,即使当鱼雷进入自航阶段时,也由于鱼雷电动机的运转而振动,因此设计时,应使电动机转速尽量避开共振点,并且在所有电动力系统结构设计上,所有连接零件应加上锁紧装置。另外,还应考虑鱼雷在横滚、纵倾、摇摆过程中电动力系统是否能可靠工作。

在进行部件设计时,必须综合考虑这些问题,否则可能造成部件性能合格而系统工作不合格,或动力系统不能适应鱼雷要求的情况。

0.4 鱼雷电动力系统技术指标的确定

0.4.1 技术任务书的制定

当设计、制造新型产品时,必须先制定技术任务书,它是设计新产品的技术文件。鱼雷电动力装置技术任务书的制定必须以鱼雷战术任务书为依据,而鱼雷战术技术任务书的制定应根据海军作战任务对鱼雷提出的要求、鱼雷在战争及平时训练期间的使用经验、现有鱼雷中已经采用或已经进行过研究试验的新成就,还有研究和分析与鱼雷制造方面相接近的科学技术以便在新产品设计中应用,以及实现这些新技术的工艺可能性。根据上述各要点制定的鱼雷战术技术任务书确定后,鱼雷电动力装置技术任务书应以此为依据,并进行初步计算和分析,

以便确定电动力系统的实现可能性,在此基础上进行大量试验和专题研究,最后进行正式设计和试生产,经海试完全合格之后才能定型量产。

鱼雷电动力装置技术任务书主要包括能源容量、额定电压、工作时间、外形尺寸及在鱼雷上的安装、质量、速率及效率、环境条件(温度、冲击、振动等)、寿命等内容,且应根据不同使用要求而提出的其他特殊要求来制定。

0.4.2 航行阻力的估算

鱼雷的战术技术要求已经确定了鱼雷应达到的速度及其对应的航程,对应于一定的航速,鱼雷航行阻力可以按照下式进行估计:

$$R_x = C_x \frac{\rho v^2}{2} \Omega \quad (0-2)$$

式中, R_x 为鱼雷航行阻力; v 为鱼雷航速; ρ 为海水密度; Ω 为鱼雷沾湿面积; C_x 为航行阻力因数,可以表述为摩擦阻力因数 C_f 和涡阻因数 C_w 之和。其中,摩擦阻力因数可以按照下式进行估算:

$$C_f = \frac{0.455}{(\lg Re)^{2.58}} \quad (0-3)$$

其中,雷诺数为

$$Re = \frac{vL}{\nu} \quad (0-4)$$

式中, L 为鱼雷长度; ν 为海水运动黏度。

而涡阻因数则可按照下式进行估算:

$$C_w = 0.09 \frac{S}{\Omega_i} \sqrt{\frac{S}{2L_i}} \quad (0-5)$$

式中, S 为鱼雷横截面积; Ω_i 为无鳍舵雷体沾湿面积; L_i 为雷尾尖削长度。

按式(0-5)计算的涡阻因数数值一般比鱼雷实际的涡阻因数大一些,但是鱼雷实航时是借着操纵仪器自动控制舵角来实现航行的,处在一种动平衡状态,而水池的拖曳试验是稳定的直线航行。此外,雷体表面并不是完全光顺的,还有一些对流体运动性能有影响的结构。因此,当计算实际雷体阻力时,要增加一个阻力因数补贴,通常取为按水池试验数据计算的总阻力因数的 10% 左右。因此,航行阻力因数可以估计为

$$C_x = 1.1(C_f + C_w) \quad (0-6)$$

需要指出的是,鱼雷在不同海水温度下航行时,由于海水密度、黏度的变化,其所受的阻力也稍有不同。

0.4.3 螺旋桨特性估计

就动力装置而言,螺旋桨的高速转动、电动机和传动装置的电磁及机械振动等均会产生鱼雷噪声,其中以螺旋桨发出的噪声最大,其频率分布也很宽,在不同方向上的传播强度与潜艇噪声相似,因而对自导作用距离的影响也很大。根据螺旋桨理论,当螺旋桨转速超过在规定正常工作条件下的临界转速时就会产生大量空泡,不但使螺旋桨的推力和效率下降,同时还将产生强空泡噪声,使自导作用距离降低,因而在满足总体战术技术要求的情况下,螺旋桨的转速不能高于其临界空泡转速。根据经验,航速在 50 kn 以下的鱼雷,螺旋桨的转速应控制在

2 000 r/min 以内,一般其推进效率可达 83%。

工作于雷体后面的螺旋桨将产生附加阻力,在雷-螺旋桨系统中,该阻力被螺旋桨所产生的部分推力所平衡,因此螺旋桨的总推力中,一部分消耗于克服鱼雷航行阻力 R_x ,另一部分消耗于克服称之为推力减额的附加阻力 ΔT ,即

$$T = R_x + \Delta T \quad (0-7)$$

式中, T 为螺旋桨的总推力。

推力中用来克服鱼雷运动阻力的部分称为螺旋桨的有效推力,而用推力减额因数来描述推力减额值:

$$t = \frac{\Delta T}{T} \quad (0-8)$$

式中, t 为推力减额因数。

则螺旋桨总推力需求值为

$$T = \frac{R_x}{1-t} \quad (0-9)$$

推力减额因数可由经验公式进行估算,其值为 0.15 ~ 0.27。

当螺旋桨和鱼雷在实际流体中运动时,鱼雷的前进速度和螺旋桨在敞水中的轴向速度之差称为雷体的伴流速度,两者的关系可由下式描述:

$$v_p = v(1-\omega) \quad (0-10)$$

式中, v_p 为螺旋桨在敞水中的轴向速度; ω 为雷体伴流因数,一般取值为 0.18 ~ 0.23,需要注意的是 ω 沿桨叶半径而变化,桨叶的梢部小,而根部最大,估算时可取等效值。

由空泡理论可知,鱼雷航行深度越大,同一个螺旋桨的临界转速越大,即越不易产生空泡,因而为了限定临界转速的最小值,对同一个螺旋桨要限定最小沉深,此深度即为鱼雷航行的最浅深度。

应对新设计的螺旋桨进行水池拖曳敞水试验及空泡试验并取得敞水试验曲线,敞水试验曲线一般描述以相对进程为自变量,螺旋桨效率、推力因数、力矩因数为因变量的函数关系。

相对进程定义为

$$\lambda_p = \frac{v_p}{nD} \quad (0-11)$$

式中, λ_p 为相对进程; D 为前桨直径; n 为桨转速。

推力因数定义为

$$K_T = \frac{T}{\rho D^4 n^2} \quad (0-12)$$

式中, K_T 为螺旋桨的推力因数。

力矩因数定义为

$$K_M = \frac{M}{\rho D^5 n^2} \quad (0-13)$$

式中, K_M 为螺旋桨的力矩因数; M 为螺旋桨吸收的转矩。

螺旋桨的敞水效率等于有效功率和消耗功率之比,即

$$\eta_p = \frac{T v_p}{M 2\pi n} = \frac{\lambda_p K_T}{2\pi K_M} \quad (0-14)$$