

船舶电力系统暂态过程 研究的理论与方法

〔苏〕П. П. 维列捷尼柯夫 著

章以刚 译 耿惠彬 校

国防工业出版社

船舶电力系统暂态过程 研究的理论与方法

〔苏〕Л. П. 维列捷尼柯夫 著

章以刚 译 耿惠彬 校

国防工业出版社

07/30/3274
内 容 简 介

本书阐述了船舶电力系统状态的数学理论、船舶电力系统方程式的求解和暂态过程研究的现代方法。

第一篇研究了船舶电力系统状态的理论基础，包括系统元件的方程式及其变换方法与合理书写一般方程组的论证，并研究了元件的等效问题。第二篇引用了以相似理论为基础的在船舶电力系统暂态过程研究实践中得到公认的动态模型的知识以及应用模拟计算机的主要原则。第三篇阐明了船舶电力系统暂态过程的算法特征，针对一台发电机和两台以上发电机的船舶电力系统研究了特殊算法与一般算法。第四篇研究了船舶电力系统机电暂态过程和电磁暂态过程的简化算法。第五篇讨论了暂态过程计算与模拟的精度问题，即统计实验的准则和起始信息的精度。

本书可供大专院校船电专业的师生教学参考，也可供从事船电和电力系统专业科研、设计的工程技术人员参阅。

Исследование процессов в судовых электроэнергетических системах. Теория и методы.

Л. П. Веретенников

Издательство «Судостроение» 1975

船舶电力系统暂态过程

研究的理论与方法

〔苏〕Л. П. 维列捷尼柯夫 著

章以刚 译 耿惠彬 校

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

房山南召印刷厂印装

850×1168 $1/32$ 印张 $12\frac{3}{4}$ 337千字

1984年12月第一版 1984年12月第一次印刷 印数：0,001—0,960册

统一书号：15034·2709 定价：1.90元

目 录

引言	1
第一篇 船舶电力系统暂态过程的数学理论基础	11
第一章 船舶电力系统元件的暂态过程方程式	12
§ 1.1 同步电机方程式	12
§ 1.2 标么单位表示的同步电机方程式	27
§ 1.3 高列夫-派克变换的广义矩阵及变换方程式的各种写法	37
§ 1.4 异步电机方程式	46
§ 1.5 计及电机磁路饱和的微分方程式	58
§ 1.6 联接线参数的考虑与静负载方程式	64
§ 1.7 同步电机的励磁调节方程式	67
§ 1.8 原动机的调节方程式	76
第二章 系统暂态过程的方程式	82
§ 2.1 组成船舶电力系统方程式的方法	82
§ 2.2 一般方程组	85
§ 2.3 系统的线性化方程式	92
§ 2.4 实例	95
第三章 船舶电力系统的稳态	98
§ 3.1 系统的稳态方程式与系统元件的矢量图	98
§ 3.2 系统起始状态的算法	105
§ 3.3 系统坐标与角 θ_{12} 的关系	116
§ 3.4 发电机之间的功率分配	126
§ 3.5 带有可逆换流机系统的稳态特征	133
§ 3.6 实例	142
第四章 船舶电力系统元件的等效	145
§ 4.1 船舶电力系统元件等效的一般原则	145
§ 4.2 发电机等效	146
§ 4.3 船舶电网的等效	154

§ 4.4	负载等效	163
§ 4.5	实例	170
第二篇	应用相似理论研究船舶电力系统暂态过程	174
第五章	船舶电力系统通用动态模型的应用	176
§ 5.1	实物试验与动态模型的试验	176
§ 5.2	相似理论的主要原理对随机确定性系统的推广	180
§ 5.3	船舶电力系统元件的相似准则及其在动态模型上的实现	186
§ 5.4	船舶电力系统模型参数的计算方法和计算实例	199
第六章	应用模拟计算机的主要原则	206
§ 6.1	结构模拟的原则	206
§ 6.2	系统模拟的特征	208
§ 6.3	船舶电力系统的专用模拟计算机	215
§ 6.4	实例	226
第三篇	船舶电力系统暂态过程的算法及其实现	235
第七章	船舶电力系统暂态过程的算法特征	236
§ 7.1	关于数字模拟	236
§ 7.2	船舶电力系统暂态过程算法的一般原则与特殊原则	238
第八章	一台发电机的船舶电力系统暂态过程的 算法及其实现	248
§ 8.1	短路电流的算法	248
§ 8.2	一台发电机的系统中暂态过程的特殊算法与一般算法	263
§ 8.3	实例	280
第九章	两台及两台以上发电机的 船舶电力系统暂态过程的算法	283
§ 9.1	复杂结构系统的耦合方程式	283
§ 9.2	发电机并联运行的暂态过程算法	296
§ 9.3	两台发电机与三级配电的系统中暂态过程的算法	301
§ 9.4	暂态过程的一般算法	302
§ 9.5	船舶电力系统不对称状态的算法	306
§ 9.6	实例	310
第四篇	船舶电力系统暂态过程的简化算法及其实现	315
第十章	机电暂态过程的简化算法及其实现	316

§ 10.1	简化算法	316
§ 10.2	机电暂态过程的简化算法与稳态算法的实现	333
§ 10.3	实例	336
第十一章	短路电流的简化算法及其实现	339
§ 11.1	问题的提出	339
§ 11.2	可能的假设	340
§ 11.3	短路电流的计算曲线法	343
§ 11.4	短路电流的特殊算法	350
§ 11.5	短路电流计算的补充方法	352
第五篇	船舶电力系统暂态过程计算与模拟的精度问题	355
第十二章	统计实验——估计数学模型精度的准则	356
§ 12.1	关于统计实验与模拟	356
§ 12.2	方法实现的主要阶段	358
§ 12.3	关于方法的误差	362
§ 12.4	统计估计数学模型精度的实例	363
第十三章	起始信息的精度	369
§ 13.1	概述	369
§ 13.2	确定参数平均统计值的方法和参数分析的结果	369
§ 13.3	发电机的平均统计特性	381
结论		385
附录		387
文献索引		398

引 言

电力系统是指电源、变换器、配电与调整（控制）装置、输电联接线和用电设备的总称。

电力系统的特点是它的结构极其多样，因而稳态和暂态时所发生的过程也五花八门。但是可以将它们分成两大类：一类是陆上大系统，它将全国或一地区的很多水电站、热电站以及核电站联接起来；另一类是独立系统，它的特点是发电机功率与负载功率可相比拟，同时在一定程度上功率是有限的。所有的运输装置（船舶、舰艇、飞机、铁路等）、工厂、农村等的电力系统均属于后一大类。

任何独立的电力系统，其中包括船舶电力系统，它的任务是：

——提供一定数量与质量的电能；

——保证以一定质量与所要求数量的电能连续供电给用电设备；

——保证用电设备有可能按照其用途投入运行。

在电力系统的所有可能状态下应完成这些功能。

状态应理解为受限于各种过程的集合并取决于系统元件联接线路图的系统状况。例如对于船舶电力系统来说，停泊状态、航行状态等就是特征状态。

每一种状态由朝向用电设备的功率流、节点的电压值、各种元件的电流值来表征。这些系统的工作参数称为电力系统的状态参数（或系统坐标），而表征系统元件的参数——电阻、电导、惯性常数等称为系统参数（或系统元件参数）。

对于任何电力系统，必定有稳态与暂态存在。

稳态（正常的、事故的、事故后的稳态）的特征是状态参数连续变化，但变化很小，实际上通常可予以忽略。所以在这种情况

下，状态参数认为是稳定不变的。

由系统的一个稳态（例如起始稳态）到另一个稳态的中间阶段称为暂态。文献中“暂态”和“暂态过程”（中间阶段）两个概念往往是同义的。但是应该牢记的是，“状态”比“过程”的意义更广泛，状态包括过程的集合。

通常，系统参数的变化是暂态过程的原因，从而引起状态参数的变化。例如，短路（к. з.）是由发电机工作回路中阻抗的突然减小，即系统参数发生变化而引起的。

也就是短路的结果是船舶电力系统状态参数——电流和电压的突然变化。

暂态过程有正常的、事故的与事故后的三种。正常的暂态过程是指在一般日常状态中发生的电动机起动或跳闸、发电机开始送电或切断等过程。在这些情况下，状态参数的偏离限度应能保证工作着的机械与仪表有正常的功能。事故的暂态过程是指从起始稳态到事故状态（发电机的短路、突然跳闸等）的中间阶段，伴随着系统参数的突然变化。事故后的暂态过程是从事故状态到事故后稳态的中间阶段。

从一个状态到另一个状态的暂态过程称为简单暂态（例如，从起始状态到事故状态或者从事故状态到事故后状态）。包括两个以上状态的暂态过程称为复杂暂态。例如，从起始状态到事故状态，然后到事故后状态。

暂态过程的研究即使仅仅取电力系统的元件——发电机、拖动装置等作为例子，已经困难很大了，因为通常必须解非线性微分方程式。

在将系统中的元件结合在一起时，就更加困难了。系统中的个别元件获得新的性质，而整个船舶电力系统所发生的过程本质上与孤立元件中所研究的过程有所不同。例如，只要在并联运行发电机的定子回路中接入大的线路电阻，系统就有稳态自振荡的性质，发电机短路时就有负滑率；调压器与调速器的加入不仅显著地改变过程的定量关系，而且显著地改变其定性关系；每接入

一个新元件就赋予系统另一种特性。所以在研究船舶电力系统状态应用个别元件的暂态过程知识时，应将主要的注意力集中在考虑系统元件的相互作用和相互影响的电磁暂态过程与机电暂态过程的研究上。

电磁暂态过程应理解为系统元件中磁链、电压、电流同时发生变化的过程。机电暂态过程伴随有状态的机械参数——机组的角速度、角加速度与角 θ 等的变化。

苏联学者 A. C. 列别捷夫、A. A. 高列夫、П. C. 日丹诺夫、M. П. 柯斯琴科、P. A. 柳捷尔、Л. H. 格鲁佐夫、B. A. 维尼科夫、Л. A. 高罗茨基、И. A. 塞罗米亚特尼科夫、Л. B. 楚凯尔尼克等全面深入地研究了适用于陆上系统的暂态过程。这里应该提到的外国学者有 P. X. 派克、Ч. 康柯蒂亚、Э. B. 金巴尔克、P. 留登别尔格、T. 拉依勃利等。

独立电力系统，其中包括船舶电力系统，有其特征，因此不允许将陆上系统中暂态过程的研究结论完全照搬到船舶系统中去。

船舶系统中影响暂态过程的特征是：

——电网功率不大，因而在突加负载与事故情况下电网电压值与电流频率有急剧的变化；

——线路短，与此相关的是线路电抗不大，同时在定子回路中有比较大的电阻存在；

——系统电气回路有很小的时间常数，与此相关的是电磁暂态过程进行的速度较快；

——柴油发电机组的惯性常数很小，汽轮发电机组和燃气轮机发电机组的惯性常数很大，而不同型式原动机的发电机有并联运行的可能性，与此相关的是系统中机械暂态过程的速度较快；

——发电机与拖动装置的功率可相比拟，与此相关的是在事故情况下有较严重的暂态过程；

——严重事故条件；

——原动机调速器的反应速度很快，特性的差率很小；

——有可能采用自励、自动调节的无刷同步发电机，它们具有很大的励磁电流上升速度与一系列特殊的工作特征；

——发电机有单独运行在功率可相比拟的异步负载上的可能性。

上述特征不仅要求对船舶电力系统有专门的研究，而且要求全面地分析这种研究方法。

分析所表明，船舶电力系统暂态过程的研究与计算只要针对

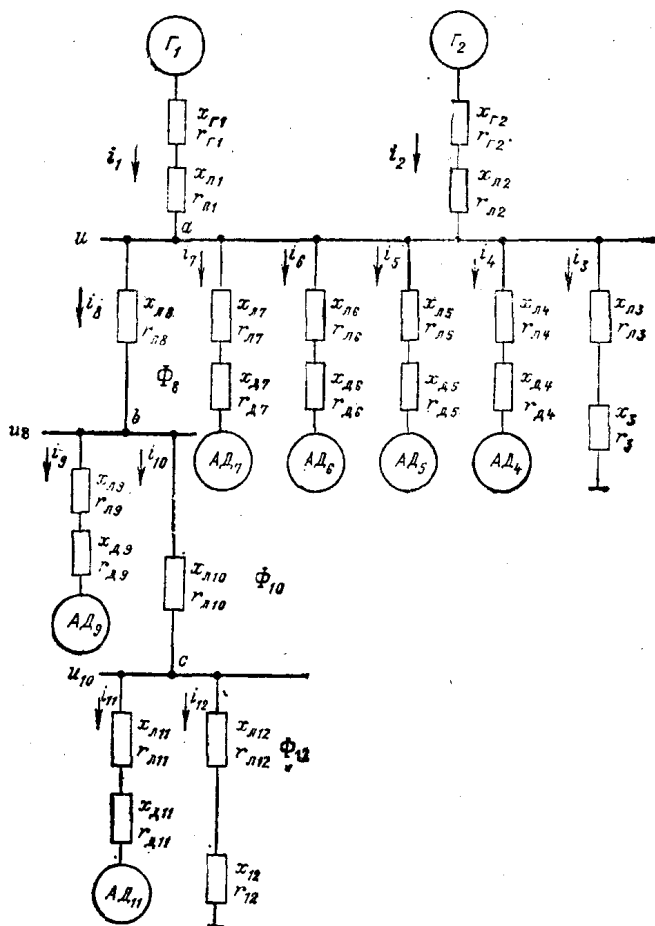


图 B-1 船舶电力系统的典型线路图

有相应的三级配电电网的一个船舶电站即可。这些系统的线路图表示在图 B-1, 称它为船舶电力系统的典型线路图。

将来有可能需要研究结构较复杂的电力系统, 例如由几个船舶电站合并而成的整体。这种线路图见图 B-2。

现已有不少文献论述独立交流电力系统的暂态过程的研究。在许多著作中, 已研究了独立交流系统中的暂态过程, 得到了它们的定量与定性特征, 指出了系统个别参数对暂态过程的影响, 深入研究了暂态过程的计算与研究方法。

船舶电力系统暂态过程的初期研究是在1944~1946年, 专门试验检验船上发电机的并联运行稳定性。然后, 紧接着在建立模型与方法、研究与计算船舶电力系统暂态过程方面, 就发展理论、解决实际问题有目的地进行了工作。进一步发展与推广了同步电机和独立电力系统的数学理论, 建立了船舶电力系统的不对称过程理论, 深入研究了船舶电力系统物理模拟的一些理论问题, 见文献[6、26、27、28、34、65、95]。基本上完成建立船舶电力系统确定性暂态过程计算的应用算法理论, 深入研究了船舶电力系统模拟过程的理论。开始了在建立计算随机过程的实用算法理论和解决模拟与计算精度的理论问题方面的工作, 见文献[27、30、31、32、33、91、98]。

在建立模型及计算与研究方法的领域内, 在作出编制原则以及建立船舶电力系统动态模型^[27,28,28,76]、船舶电力系统静态模型、专门的模拟计算机方面已完成了大量工作。

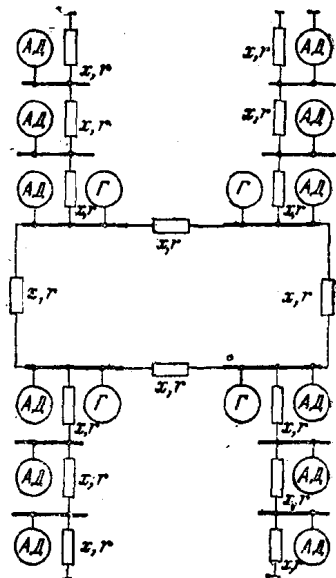


图 B-2 复杂结构的系统线路图

船舶电力系统各种暂态过程的研究提供了船舶电力系统运行与设计的定量与定性的估计及建议,同时新确立或修正了下列课题的计算方法,诸如:短路电流、电网电压变化、负载稳定性、整步、静稳定、发电机失磁过程、船舶电力系统的元件等效、船舶电力系统的动稳定以及带有复杂配电的船舶电力系统暂态过程,见文献[27、28、34、65、91、95]。在计算船舶电力系统暂态过程的简化方法的系统化方面已完成了大量工作^[78]。

近几年来建立了用 ALGOL 语言计算暂态过程的研究性程序与工作程序(B. M. 谢久列夫、B. П. 雅柯夫列夫、B. A. 采列梅茨基、B. И. 费那金、Л. H. 托卡列夫、O. H. 克里马诺夫等)。

不久以前船舶电力系统稳态与暂态过程的研究,总是尽可能借助于实物试验以及用费力的计算来实现的,一般这些计算接近似法进行,它们最多不过实现初步的机械化。

现在情况就不同了,船舶电力系统状态的研究有可能在系统暂态过程研究的一般方法基础上进行,从而为工程师展现了广阔的前景。

暂态过程研究的一般方法是以船舶电力系统状态数学理论、船舶电力系统暂态过程方程式的现代解法与高速发展的研究规划(实验规划)理论为基础的。

船舶电力系统状态的数学理论研究系统元件的方程式、它们的变换方法以及书写一般方程组的论证。利用现代的数学工具,已经可以针对极其复杂的电力系统进行理论研究,直至导出将各种系统参数与状态参数(系统坐标)彼此联系在一起的规律。针对船舶电力系统而言,这些规律可表达成代数的、微分的、积分的以及其它的方程式。

在交流电机中发生的过程可用众所周知的高列夫-派克方程式来描述。根据自动调节理论的知识可以找出发电机励磁与原动机转矩的调节规律。船舶电力系统的一般方程式应该这样书写和变换,以使得随后应用它们在求解各种问题的时候,暂态过程的

数学描述是最简单的。

虽然，所指出的船舶电力系统方程式可以有足够理由予以组成与变换，自然随着系统中新元件的出现，它们需要更详细的说明与进一步的发展。但是，组成方程式并不是研究系统状态课题的结束，工程师感兴趣的是使问题得到数值结果，于是有时竟然比组成方程式的问题更加困难。这里应该注意，船舶电力系统暂态过程的微分方程式是非线性的，它们的阶数达50~70。甚至对于最简单的系统在很多假定条件下，求解所指出的方程式也是困难很大的。但是模拟手段与计算技术（CM与BT）可提供方便，用模拟手段与计算技术建立了研究船舶电力系统状态的新方法。

船舶电力系统的方程式求解与暂态过程研究的现代方法包括以采用相似理论为基础的方法和以暂态过程算法理论为基础的方法。

物理现象的相似理论，研究相似现象的特性，使得有可能定出与系统原型有相同过程的系统模型的要求。

暂态过程的算法理论介绍组成船舶电力系统状态算法的最一般原则。针对确定的船舶电力系统的典型线路图或者任何一种结构的线路图，选择便于求解算题的方程式与变量，以及选择数值解法。

应用相似理论的方法是借助于各种模型来实现的。应用暂态过程的算法是用计算手段——从计算尺到快速数字计算机予以实现的。

在船舶电力工程中所采用的模拟与计算技术手段，包括船舶电力系统的动态模型（ЭДМ）、模拟计算机（АВМ）、直流与交流的静态模型（计算台）（СТМ）和数字计算机（ЦВМ），也可以有两种或几种上述手段所组成的复合装置（混合装置）。

上述手段中有一些属于模型，另外一些直接属于计算技术，然而，它们之中有一些还可既属于模型又属于计算装置的。

以相似理论与算法理论为基础的应用物理模拟与相似模拟、模拟计算机与数字计算机的方法成为分析船舶电力系统任何暂态

过程最普遍的方法，它们从根本上改变了我们在这个领域内的条件。

目前在研究船舶电力系统状态时，所指出的这些方法的相互关系可以用图示形式来表示（图 B-3）。

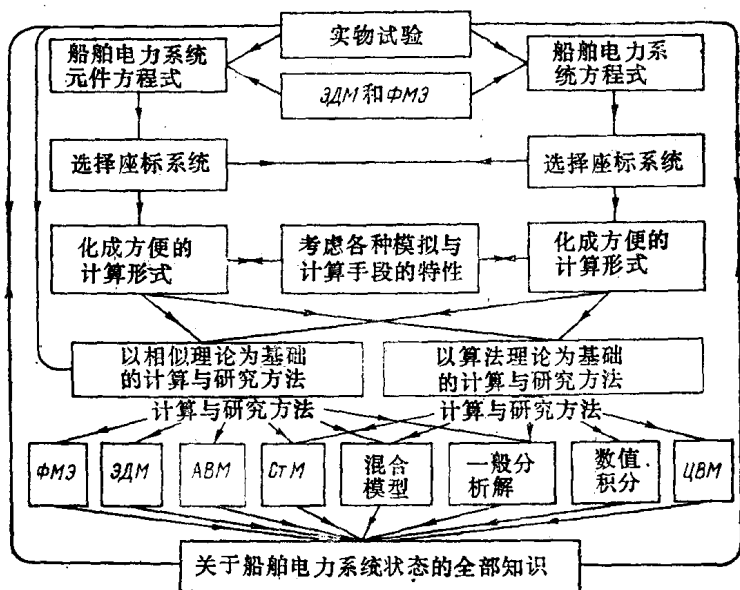


图 B-3 船舶电力系统暂态过程研究方法的相互联系图

3DM—系统的动态模型；ΦM3—元件的物理模型；ABM—模拟计算机；
GM—静态模型；ЦБМ—数字计算机。

为了组成系统个别元件与整个系统的方程式，不仅要应用实物试验，而且要应用元件的物理模型与系统的动态模型。为了更准确地确定某些系数，可以应用与实物试验和物理模型相结合的模拟计算机与相似模型。在选择坐标系、组成系统方程式与将它们化成方便的计算形式之后，就可借助于不用机械手段的数值积分、相似模型（静态模型——CTM）、数字计算机（ЦБМ）、模拟计算机（ABM）、系统元件的物理模型（ΦM3）或者系统的动态模型（3DM），以及在某些情况下的一般分析式予以解出。

由图 B-3 可以得出，元件的物理模型、系统的动态模型与模

拟计算机是属于以相似理论为基础的手段；数值积分与数字计算机上计算是属于以暂态过程的算法理论为基础的方法；对于静态模型、混合模型上的计算以及一般的分析解，既能够应用相似理论又能够应用暂态过程的算法理论。例如静态模型是按相似模型设计的，但计算可按暂态过程的算法来进行。一般分析解是求解各种问题的算法。通常，这种求解可以借助于相似理论来获得。

在选择计算手段时，不仅必须考虑问题的特点，而且也必须考虑各种模拟手段与计算技术的特征。

在物理模型与静态模型、模拟机与计算机的适当配合下，也就是在综合应用模拟手段与计算技术（综合模拟法）时，能够获得对船舶电力系统最有效的研究与计算。

目前，混合模拟法已经获得普遍承认。这种方法要求合理地应用模拟手段与计算技术，而不希望机械地应用所有手段去解同一个问题。该方法本质上并未将一种手段与另一种手段对立起来。各种模拟手段与计算技术在它们占优势的领域内、在合理的配合下与适当的方法中得到应用。这就有可能显著地提高效率、扩大范围和改善计算与研究工作的质量。

考虑到模拟手段与计算技术的特征、船舶电力系统状态计算与研究课题的特点以及近几年所积累的经验，可以认为模拟手段与计算技术可优先采用于下列领域：

船舶电力系统动态模型——用于修正与校核问题的数学表达，获得系统最复杂过程的定量数据；

船舶电力系统静态模型——用于稳态计算、近似计算；

专用的模拟计算机——用于研究船舶电力系统内机数有限（四至五台）时的暂态过程；

数字计算机——用于进行高精度计算、计算最复杂的过程、制作暂态过程图集与进行船舶电力系统的综合；

数字-模拟与数字-动态混合法——用于船舶电力系统的综合。

在混合应用模拟手段与计算技术时，一般用昂贵而难以组织

的实物试验去检验所制作的动态模型，也主要靠动态模型来检验理论。此时为了提高应用动态模型的效率，必须科学地组织试验，并提高试验及其数据处理的自动化程度。

不论模拟手段与计算技术如何广泛采用，并不排除采用较简单的计算手段与简化方法。

这些方法按照所采取的假定可以分成三组^[14]：

a) 假定发电机角速度变化很小时，状态参数变化很大。属于这组的有求解动稳定、准整步、发电机转子的大振荡、短路电流与电压跌落之类问题。这里对于定子方程式假定 $s = 0$ ；

6) 假定发电机转子偏离很小时，状态参数变化很小。与此相联系的是求解静稳定问题与研究系统中的自动电压调节器 (APH)；

b) 假定机组速度变化很大时，状态参数变化也很大。属于这组的有机组的起动与加速、同步电机的异步运行与它们的整步、自动整步、非同步合闸与自动重合闸所表征的过程。

灵活应用模拟手段、计算技术与近似方法可以在计算与研究船舶电力系统暂态过程时获得最好的工作效果，以最快的速度求得船舶电力系统设计与运行所必需的结果。

第一篇 船舶电力系统暂态过程

的数学理论基础

船舶电力系统发生的暂态过程可由一系列的方程式来描绘,其中包括同步电机、异步拖动装置、静负载、励磁调节、发电机之间有功功率与无功功率的自动分配、发电机组的原动机调节、联接线路以及耦合等方程式。

在研究船舶电力系统暂态过程时,首先应针对图 B-1 与图 B-2 中给出的等效电路列出上述方程式。

在列出元件方程式之后,应予变换,使待用的一般方程组中具有最少数目的周期性系数与非线性。此时,系统个别元件的方程式可能比原来的还要复杂,但是就整个船舶电力系统来说,方程组的求解却简单多了。

由文献[6、41]可知,电机方程式可用矢量法来变换。本书中方程式的主要变换是借助于矩阵来实现的。通常,矩阵演算可保证推导的书写较短。在数字计算机上计算时,矩阵简直是必不可少的。

值得指出,上述替代线路是以电力系统元件有一定的等价性为前提的。这是因为船舶电力系统暂态过程计算与研究的方法虽然有很大的潜力,但是在探讨系统中所发生的过程时,将系统的全部元件毫无例外地加以复制是不可能的,在大多数情况下也是不合理的。发电机、电网与负载的这种等价性不仅以确定法为基础,而且还以统计法为基础。

下面介绍船舶电力系统状态的数学理论基础,其中假定电机空载特性是线性的,同时按高列夫方法考虑电机饱和及借助于近似空载特性。