

高等学校教学用书

船舶汽轮机原理与热计算

上海交通大学 王希季 编
鍾芳源



北京科学教育編輯室

18513

高等学校教学用书



船舶汽轮机原理与热计算

上海交通大学 王希季 编
鍾芳源



北京科学教育编辑室

61621

本書是根據編著者在上海交通大學講授“船舶汽輪機原理及熱計算”課程用的講義整理而成。

全書共分兩部分。第一部分，第一章至第十章敘述船舶汽輪機的一般原理——般的理論，船舶汽輪機中損失以及變工況性能與功率調節方法等。第二部分，第十一章至第十三章，敘述船舶汽輪機熱計算的原則，方法及有關數據。

本書可以作為船舶汽輪機專業“船舶汽輪機原理及熱計算”課程的教材。在增添一些必要的補充資料後，本書還可以作為船舶渦輪機（蒸汽及燃氣輪機）專業學生的私學參考書。此外，本書也可供設計船舶汽輪機的工程技術人員使用。



船舶汽輪機原理與熱計算

上海交通大學 王希季 編
鍾芳源

北京科學教育編輯室出版
上海市紡織工業局印刷所印刷
新華書店上海發行所發行

開本：850×1168 1/32 印張：17 7/16 字數：416,000

印數：651-1950

1961年9月第1版 1962年1月上海第2次印刷

定價：2.47元

前 言

本书是根据“船舶蒸汽发动机及装置”专业中“船舶汽轮机原理及热计算”课程教学大纲(约100学时)要求编写的。在补充一些资料(如计算方法,数据以及变工况特性曲线等)后,本书还可作为“船舶涡轮机”专业中“船舶涡轮机原理及热计算”课程的讲义用。

学生在学习本课程时,应该已学完热力学,流体力学及气体动力学等基础课程,并对船舶汽轮机的结构已有一般性的了解。

本书除绪论,附录外,共分十三章:

第一、二、三章分别讨论气体流动基本方程,气体在喷嘴槽道中的流动(一元流动)和气体在叶栅中的流动(二元、三元流动)。某些内容大都在热力学和气体动力学课程已有详细叙述,因此我们仅作一些简要的说明。

第四、五、六章分别讨论简单压力级,速度多级和压力多级的理论,已括级主要参数间的关系式及级主要参数和主要尺寸的确定等内容。这部分是本书的主要理论基础。

第七、八章集中讨论级,汽轮机和船舶汽轮一齿轮联合机组的各种损失的形成,计算公式以及改进措施。通过本章讨论,提出了合理设计汽轮机结构以提高其本身效率的途径和理论根据。

第九、十章讨论船舶汽轮机变工况性能及计算,功率调节方法以及提高舰船汽轮机在低负荷的经济性的措施等内容。在本两章中示出船舶汽轮机不同于其他用途汽轮机的一些重要特点。

第十一章是在综合前几章内容,并根据船舶动力装置对汽轮

机提出的要求,討論船舶汽輪机机組型式的選擇,主要参数的確定以及估計主要尺寸的方法——預算。本章包括了机組設計的最主要内容,因而称“設計基础”。

第十二章介紹船舶汽輪机詳細热計算方法、步驟及数据。考虑到为学生在作課程設計,毕业設計参考用,在本章中較詳細地分別地介紹了調節級和非調節級、高压和低压汽輪机、冲动式和反动式汽輪机的詳細热計算。在讲授本章課程时,可作大量刪減,或在設計时供同学自学用。

第十三章討論了船舶輔助汽輪机的設計要求、方法、步驟以及一般数据。

附录中七个計算例題和表格是編著者根据本校学生的习題、課程設計和毕业設計等作业整理而成的。由于時間和人力的限制,未能对这些例題作仔細的修改,因此無論在計算方法,或者是参数選擇等方面还存在不少問題,只能供設計参考用。

本书是編著者在1956年开始編写的,1957年完成初稿,1958年修改后正式作讲义用。在編写中,編著者参考了国内外有关渦輪机資料以及編著者在上海交通大学讲授“船舶汽輪机原理及热計算”的教学經驗,并得到教研組同志們的大力帮助。但是,由于編著者的学識水平有限,在本书中定有不少錯誤和缺点,希同志們多多批評和指正。

目 录

前言

緒論	1
----	---

第一章 气体流动的基本方程式	11
----------------	----

1-1 气体状态方程	13
1-2 連續流动方程	14
1-3 能量守恒方程	16
1-4 伯努利方程	20
1-5 欧拉方程——动量及动量矩方程	21
1-6 气流特性值	23

第二章 气体在噴嘴槽道中的流动	28
-----------------	----

2-1 气体在噴嘴槽道中的等熵膨胀过程	28
2-2 气体在噴嘴槽道中的实际膨胀过程	37
2-3 气体在噴嘴斜切口内的膨胀	40
2-4 变更工况时噴嘴的工作	60

第三章 气体在汽轮机叶栅中的流动	75
------------------	----

3-1 叶栅和叶型的构造特性	75
3-2 作用在叶栅上的力	78
3-3 叶栅的空气动力学特性、叶栅损失的分类	85
3-4 叶栅中的叶型损失	91
3-5 叶栅頂底端部的损失	104
3-6 流速对叶栅损失的影响、波动损失	110

第四章 简单压力级的理論	117
--------------	-----

4-1 简单压力级的工作过程	117
4-2 压力级的輪周功	124
4-3 压力级的輪周效率	129
4-4 中間级的工作过程、叶片效率	130
4-5 压力级主要尺寸的决定	142
4-6 气流系数沿叶片高度上的变化、扭轉叶片	151

第五章 速度级的理論	172
------------	-----

5-1 速度級的工作过程	172
5-2 速度級主要尺寸的決定	182
5-3 單獨速度級	189
第六章 多級汽輪机	193
6-1 多級汽輪机的工作过程	193
6-2 多級汽輪机的重热系数	201
6-3 多級汽輪机的特性比	209
6-4 汽輪机的軸向推力及其平衡法	212
第七章 船舶汽輪机組的内部損失	221
7-1 船舶汽輪机組損失的分类	221
7-2 流动損失(計算实际輪周效率的損失)	223
7-3 摩擦及鼓風損失	231
7-4 汽輪机端部密封損失	238
7-5 工质的节流損失	272
7-6 流出动能損失及其他内部損失	275
7-7 内部焓降、内部效率	277
第八章 船舶汽輪机組的外部損失、有效效率和蒸汽消耗量	289
8-1 汽輪机的机械損失	289
8-2 齒輪傳动机构的机械損失	295
8-3 軸系的机械損失	297
8-4 蒸汽消耗量和效率	299
第九章 船舶汽輪机变更工况时的工作	303
9-1 变更工况时压力級的工作	304
9-2 船舶汽輪机变工况时蒸汽流量变化引起的压力分配的改变	314
9-3 变更工况时船舶汽輪机各級的工况	320
9-4 变更工况时船舶汽輪机和汽輪机級的效率变化	327
9-5 船舶汽輪机变工况时的計算	339
第十章 船舶汽輪机的調节, 低負荷时提高船舶汽輪机效率的方法	351
10-1 船舶汽輪机的調节	351
10-2 低負荷时提高船舶汽輪机效率的方法	364
第十一章 船舶汽輪机組的設計基础	375
11-1 船舶汽輪机組初始及終了参数的選擇	375
11-2 船舶汽輪机組型式的选择	388
11-3 决定船舶主汽輪机的主要参数、内焓降及內功率	396

11-4 决定船舶主汽轮机的蒸汽流量,分配各汽缸的功率和焓降	400
11-5 汽轮机组在 $i-s$ 图上的近似膨胀过程曲线的绘制	406
11-6 决定汽轮机的转速	410
11-7 倒航汽轮机主要参数的决定和近似膨胀过程曲线的绘制	413
11-8 慢速级组的预先估算	418
第十二章 船舶主汽轮机的热计算	424
12-1 计算流通部份中实际的蒸汽流量	425
12-2 调节级的热计算	428
12-3 冲动式船舶主汽轮机的热计算	436
12-4 反动式船舶主汽轮机的热计算	455
第十三章 船舶辅助汽轮机的热计算	474
13-1 船舶辅助汽轮机的概述	474
13-2 船舶辅助汽轮机主要参数的决定	476
13-3 船舶辅助汽轮机的热计算	478
附录 I 计算实例与表格	482
I-1 收缩喷嘴斜切口膨胀的计算	482
I-2 简单压力级主要尺寸的确定	483
I-3 气流参数沿叶片高度变化(扭叶片)的计算	485
I-4 速度分级(调节级)尺寸的确定	483
I-5 冲动式船舶主汽轮机的热计算	492
I-6 反动式船舶主汽轮机的热计算	504
I-7 船舶辅助(单级)汽轮机的热计算	518
附录 II 主要符号的说明	546
附录 III 参考文献	549

緒 論

1. 船舶汽輪機是現代最主要的船用發動機

船舶必須具有能夠在水上或水下行動的特性。使船舶能按一定的速度航行的綜合設備稱為船舶動力裝置。除了這個最主要的任務外，船舶動力裝置還供應船舶所需的一切能量（電能、熱能、機械能），以保證船舶上各方面的需用以及一切機械化的操作，例如：船舶駕駛、裝貨、卸貨等。所以，船舶動力裝置有“船舶心臟”之稱。

船舶上最大的能量消耗者是推進船舶航行的推進器，它消耗船舶動力裝置所產生的絕大部分的能量。船舶動力裝置中帶動推進器的發動機稱為主發動機簡稱主機，帶動其餘機器及機械的發動機稱為輔發動機簡稱輔機。現在最主要的船舶發動機有：船舶汽輪機、船舶蒸汽機、船舶內燃機及船舶燃氣輪機。

無論作為主發動機或輔發動機，船舶汽輪機都是一種最主要的船用發動機。由於汽輪機本身具有很多獨特的優點，因此不論在陸地上或在船舶上，應用汽輪機的地方愈來愈多。在和平利用原子能方面，汽輪機已被證明為優良的原子能發動機。

船舶汽輪機以蒸汽為工質，它將工質中的熱能有效地轉換為船舶所需要的功。蒸汽是由動力裝置中的另一重要組成部分——鍋爐供應，在船舶原子動力裝置中則為原子反應堆及蒸汽發生器。

研究一下以船舶汽輪機為主機的船舶蒸汽動力裝置（船舶汽輪機動力裝置）的熱綫圖，將有助於我們了解動力裝置中各個部件

之間的关系,及船用发动机在船舶动力装置中的地位。

图 1 示某船舶汽輪機动力装置的热綫圖。主汽輪機由高压汽輪機 1 及低压汽輪機 2 所組成。新鮮蒸汽由主管路經過主操縱閥 3 进入高压汽輪機膨脹作功,之后經連接高低压汽輪機的容汽管 4 引入低压汽輪機繼續膨脹至排汽管压力。低压汽輪機的乏汽引入主凝汽器 5。凝汽器維持主发动机所要求的真空度,并将乏汽凝結。由乏汽凝結成之水用凝水泵及給水泵經過各級給水預热器打回鍋爐。主发动机产生的机械功經齒輪傳動机构(齒輪減速器) 6 及主軸系傳至推進器。

主汽輪機、主凝汽器及齒輪減速器的工作及它們的結構相互之間有不可分割的密切关系,一般习惯把他們合称为主汽輪齒輪機組①。

該船舶所需的电力由一部汽輪機电机供給,这部汽輪发电机的功率为 200 千瓦。此外还有一部备用的功率相同的汽輪发电机。每一部汽輪发电机均有其独立的凝汽系統。

所有的新鮮蒸汽均由主鍋爐供給。給水在进入鍋爐之前經過兩級預热器預热至 150°C 。第一級預热器除了加热給水之外还兼有除掉給水中的空气的作用。它的加热蒸汽是从主汽輪機容汽管中撤出,压力为 2.5 公斤/厘米²。第二級給水預热器为表面式,加热蒸汽为主汽輪機的高压撤汽,撤汽压力为 6.9 公斤/厘米²。蒸餾器的加热蒸汽也是由主汽輪機容汽管中撤出的。

减压减热蒸汽系統供应主、輔凝汽器的噴汽抽气器的用汽,船舶暖汽及日用热交换器的用汽。在操縱及低負荷情况下,主汽輪機的撤汽压力改变时,也利用这个系統中的蒸汽代替撤汽加热給水。

① 图 1 所示的是船舶上最广泛采用的齒輪傳动的动力装置。在电力傳动的情况下主汽輪機带动主发电机,沒有齒輪減速器,主汽輪機也往往做成一单汽缸。

图1中表示出蒸汽-凝水流动的线路及各主要部分上的蒸汽参数。从图中可以看出锅炉的总蒸发量为20240公斤/小时,其中有17190公斤/小时消耗于主汽轮机,占84.9%;有1440公斤/小时,消耗于带动发电机的辅汽轮机,占7.1%。总计整个船舶动力装置所产生的蒸汽有92%消耗于船舶汽轮机中。由此可见,船舶汽轮机的性能、经济性、结构、重量及尺寸等因素严重地影响船舶动力装置各方面的指标。

2. 船舶汽轮机的特点

汽轮机是以蒸汽为工质的转动式叶轮机(涡轮机)。叶轮机发动机的作功机件是周缘装有工作叶片的叶轮,叶轮连同其机轴称为转子。汽轮机的工作叶片从不断流过它们的蒸汽中获得能量,并且通过转子将能量传给机轴,再从机轴传到使用部分(例如推进器)。将工质引导至工作叶片去的机件称为导向(导汽)机件,蒸汽汽流通过导向机件时获得有一定大小与方向的速度。

图2示一最简单的汽轮机,它具有如下的机件:机轴1、叶轮2、工作叶片3、导向机件在这里称为喷嘴4,汽缸5和排汽管6。这里在工作叶片中只发生蒸汽动能转换为机械功的过程,蒸汽的位能(压力)在工作叶片中不发生变化。这样的能量转换方式称为冲动式。如

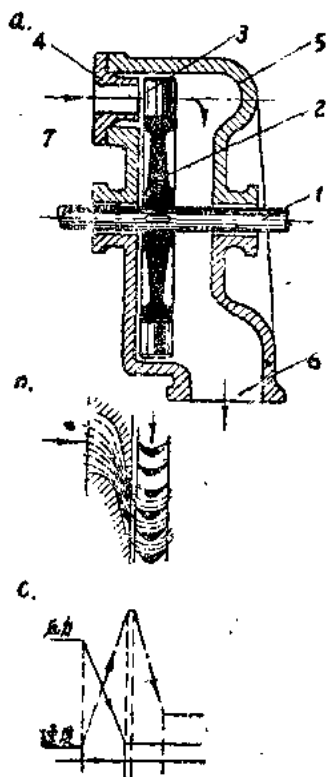


图2 最简单的冲动式汽轮机简图
(a)汽轮机简图; (b)喷嘴及叶片剖面展开图; (c)工质状态变化图。

果工作叶片的槽道亦做成和喷嘴类似的形状,使工质在其中也象在喷嘴中一样发生膨胀。那末在工作叶片中就会同时发生蒸汽动能及位能转换为机械功的过程。按这样的能量转换方式工作的汽轮机称为反动式汽轮机。在反动式汽轮机中导向机件做成固定叶片的形式,因此称为导向叶片。最简单的反动式汽轮机如图3所示。

我们把一系列导向机件和一系列工作叶片合并起来叫做一个汽轮

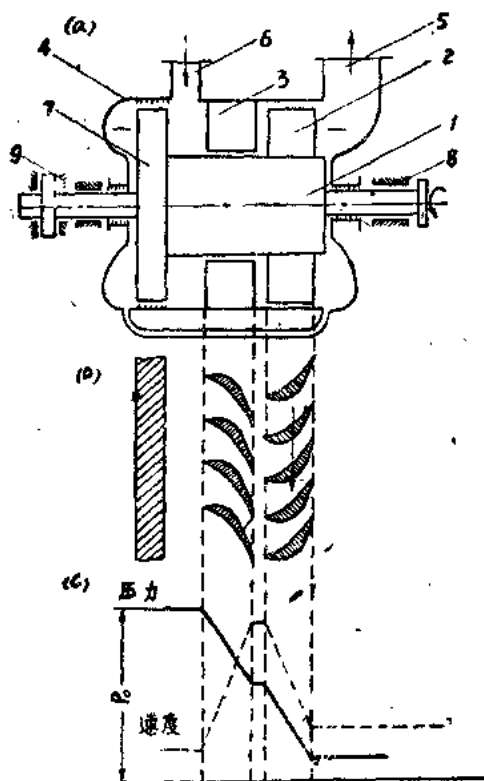


图3 最简单的反动式简图

(a)汽轮机简图; (b)叶片剖面展开图; (c)工质状态变化图。

1—转鼓形转子; 2—工作叶片; 3—导向叶片; 4—汽缸; 5—排汽管;

6—进汽管; 7—平衡活塞; 8—支持轴承和 9—推力轴承

机級。如果在汽轮机級中完成了将蒸汽位能轉換机械功的过程，那末这种級就称为压力級。除压力級之外还有另一种汽轮机級，在这种級中将蒸汽在喷嘴（导向机件）中获得的动能，逐次地在几列工作叶片中轉換为机械功。这样，在第二列及其以后各列工作叶片和它們的导向机件所組成的級中，只进行蒸汽的动能轉換为机械功的过程。这样的汽轮机級称为速度級。

图4示一带有两級速度級的汽轮机，在第二列导向叶片中只有汽流方向的改变，而沒有能量轉換的过程。

只有一个級的汽轮机称为单級汽轮机（图2及图3）。这种汽轮机的经济性不佳，功率也很小，用途也很有限的。如汽轮机中有若干个順次排列的級，那末这种汽轮机就称为多級汽轮机。船舶主汽轮机及大多数輔助汽轮机都是多級汽轮机。

在汽轮机中有两次能量轉換的过程。这两次能量轉換过程是：工质的位能轉換为工质的动能和工质的动能轉換为工作机件的机械功的过程。这与在汽缸内直接将工质的位能轉換为做功机件（活塞）机械功的活塞式发动机的工作情况完全不同。工质动能轉換为机械功的过程說明在轉动式叶輪发动机中工质必須具有相当高的速度（动能）。这是这类发动机的一个很突出的特点，相对于活塞式发动机而言，可以把这个特点称为工质的高速性。我們

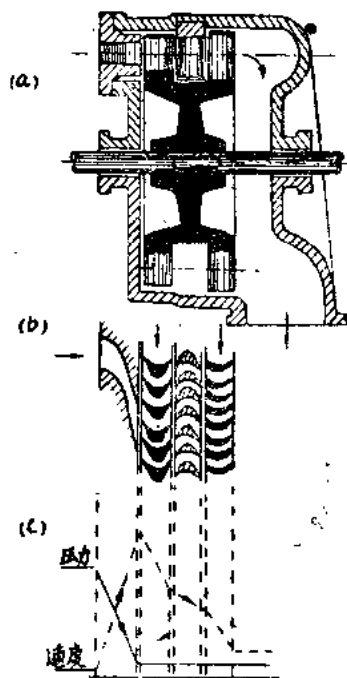


图4 具有兩級速度級的汽轮机

知道任何一类发动机的功率大小均与工质的消耗量成正比。工质的高速性使汽輪机能在較小的通道中流过大量的工质，因此汽輪机的单位功率(每一部机器所发生的功率)远比一切活塞式发动机为大。活塞式发动机由于机器尺寸及重量按功率的比例增长，因此增大单位功率实际上有很大的困难。現在一般船用活塞式发动机的最大单位功率約为 10000 馬力左右(固定式活塞发动机还要小)。而船用汽輪机的最大单位功率則可达 100000 馬力(固定式电站汽輪机的单位功率則可达几十万千瓦以上)。在大功率范围之內、无異議地，汽輪机占有絕對的优势。几千馬力以下的中、小功率的船舶汽輪机装置在經濟性方面还没有超过活塞式发动机装置。但是小功率汽輪机装置的使用范围也在日益增强。除了整个蒸汽动力装置的效率，包括汽輪机效率，正在日益提高之外，在很多情况下燃料价格及运轉費用之間的差別等会造成效率較低的汽輪机装置比效率較高的柴油机装置更为經濟和有利的情況。目前我国固体燃料与液体燃料之間价格悬殊，因此利用固体燃料的中、小功率的船舶汽輪机装置必然会得到很大的发展。

工质的高速性使汽輪机可以最大限度地利用工质的膨脹能力。汽輪机可以工作于很高的初始参数及很低的背压(很高的真空度)之下。汽輪机所能利用的高膨脹度(以体积增加倍数計可达 250—300 倍)及工质的大配置焓降(可达 200—350 千卡/公斤)是一切其它发动机所不能比拟的。所有这些都使汽輪机能获得热力学上的利益，因而使其具有良好的經濟性能。

汽輪机的另一特点是工作机件的高速性。以后我們会討論到只有将汽輪机工质的絕對速度与工作叶輪的圓周速度之比值維持在一定范围之內，才能保証汽輪机的效率。汽輪机工质的高速性亦必須使工作叶輪具有高圓周速度。可以用大直徑低轉速，或小直徑高轉速两种不同的方法来得到所需的高叶輪圓周速度。显

然,工程上总是选用第二种方法,而轉动机的特点——作功机件无直接摩擦部分及轉子的均衡性——正好又是采用高轉数的良好条件。因此,汽輪机总是做成高轉速的,工作机件的高速性就成为汽輪机本身的固有特点。机件的高速性不仅使汽輪机的尺寸及重量小巧,而且还能使机器获得高的經濟性。带发电机的电站汽輪机的轉数,由于受到电流周波的限制,一般轉数为 1500 或 3000 轉/分。船舶汽輪机則可以将轉数提高到最大限度,俾便能更有效地利用高速性的利益。

汽輪机第三方面的特点是工作的連續性及固定的热現象,在一定工况之下机器上各点的参数保持不变。这就可以按照一定的要求設計机件,并能最合理地使用材料。

汽輪机第四方面的特点可以归結为结构的简单性。在汽輪机中只有一个圍繞机軸轉动的运动部件——轉子。汽輪机的潤滑条件也特別简单,没有与工质直接接触的潤滑部件。这些都使汽輪机的維護和運轉簡便,費用低廉。

3. 船舶汽輪机发展史簡述

虽然人类在很早以前就知道轉动式叶輪机的概念,但是工业上及运输上应用汽輪机才不过是近五、六十年的事。早在紀元前二世紀亚历山大里亚的希罗(Hero)就描述过古代埃及祭司所用的轉动仪器,它被认为是第一个反动式汽輪机的雛型。早在后汉时候(一千八百多年以前)我国已应用水輪发动机带动磨和碓。在其他国家中水輪机产生也先于汽輪机、这是因为水輪发动机(磨房水輪)的速度低,因此即使在当时机械制造技术水平的条件下也能制造出来。但是热力叶輪机在科学技术水平低劣的时候是不具备順利发展条件的。

宋以前(距今 800 多年前)我国就有以燃气为工质的带动走馬

可行的纸质叶轮机,这种叶轮机可以算做燃气轮机的最初雏型。但是直到1629年意大利人德诺万尼·布兰卡(Giavanni de Branca)才试制了一个带动纺织机用的冲动式汽轮机。由于当时工业技术水平的限制,布兰卡的汽轮机没有实际的用途。

根据刘仙洲教授的考据,清康熙17年至18年(1678—1679年)比利时传教士南怀仁曾在北京作过将布兰卡的冲动式汽轮机作为船舶推进主机的尝试。这可算是世界上第一次将汽轮机应用于船舶上的试验。虽然试验的结果不详,但可以说明将汽轮机用于船上的想法远在汽轮机获得实际应用之先就出现了。

根据俄国技术史的记载,在1806—1813年俄国阿尔泰的苏山斯基工厂曾制造了俄国发明家波利卡尔·沙烈索夫(Поликарп Залесов)的汽轮机模型。但由于沙俄时代的条件,这个发明和其他发明一样,没有得到发展。

在十九世纪末叶,一方面由于工业对于新型的大功率发动机的迫切要求,另一方面机器制造的技术水平已达相当高度,因此出现了第一个有工业用途并获得发展的汽轮机。这个汽轮机是瑞典工程师拉瓦尔(De Laval)于1883年发明的。拉瓦尔汽轮机是单级冲动式的,其突出的特点是高转速,达25000—30000转/分。1884年英国工程师派逊氏(Charles Algernon Parsons)制造出第一个多级反动式汽轮机。1896年美国工程师寇蒂斯(Curtis)发明了速度级汽轮机。

在十九世纪的末叶1896年派逊氏成功地实现了在船舶上采用汽轮机作为主机的想法。第一艘汽轮机船是透平尼亚(Turbinia)号,装有派逊氏汽轮机,船舶速度到32海里/小时。随后于1901年派逊氏又为英国海军部制造了两艘最先装备船舶汽轮机装置的驱逐舰维倍尔(Viper)和考白拉(Cobra)号。这两艘军舰航速达34海里/小时,试航情况良好。但维倍尔号在1901年因触到岸上而

損壞；考白拉號 1901 年在半途沉沒。這兩艘軍艦損壞的原因最初猜想是由于派遜氏初期的汽輪機不完善所引起的。後來經法庭調查結果證明是由于船體結構太弱所致。這兩艘汽輪機軍艦的結局對於船用汽輪機的發展多少起了一些不利的影響。但是由於汽輪機所固有的優越性及它在另外一些軍艦及船舶上所顯示出的良好性能，從那個時候起，船舶汽輪機就開始順利地發展了。世界各國均越來越多地採用汽輪機作為船舶及軍艦的主機。據統計 1907 年世界上船用汽輪機的總功率僅為 400000 馬力，到 1919 年則達 35000000 馬力，發展之迅速由此可見。

初期裝置汽輪機的船舶，由於工業技術水平所限不能夠做出可靠的，傳動大功率的高效率的傳動機構，因此主汽輪機是做成與推進器直接連接的。我們知道推進器最有利的轉數很低，而汽輪機有利的情況却是高速。因此在直接連接的情況下不得不將汽輪機的轉速降得很低，而將推進器的轉速提得很高，使得彼此照顧以獲得最為有利的條件。在這樣的條件下主汽輪機的轉速約為 600—700 轉/分，汽輪機不得不做得很大和有很多的級數。雖然如此汽輪機的效率還是不高，同時推進器的效率也要降低。

船舶汽輪機的製造及設計者曾作過許多努力來改善這種情況。主要提出的有三種傳動機構，即水力、電力及齒輪傳動機構。最後，齒輪傳動機構由於其效率高、尺寸重量小、傳動比大、結構簡單而獲得絕對的優勢。傳動機構應用的成功就解決了汽輪機的高速性與推進器的低速性之間的不可調和的矛盾，直接連接的船舶汽輪機被排拆了。船舶汽輪機進入了新的，適合於其固有特性的發展階段。

在汽輪機船舶發展的初期（20 世界初）我國也有過為數甚少的汽輪機裝置的小軍艦及商船，但都是帝國主義為統治，剝削，掠奪和屠殺我國人民的工具。後來汽輪機船艦的數量雖然還有些增