

电站汽轮机 数字式电液控制系统——DEH

上海新华控制技术（集团）有限公司 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



ISBN 7-5083-2636-9



9 787508 326368 >

定价: 48.00 元

销售分类建议: 电力工程/火力发电

电站汽轮机 数字式电液控制系统——DEH

上海新华控制技术（集团）有限公司 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书系统地介绍了汽轮机数字式电液控制系统 DEH 的概念、发展过程、系统结构和实际应用系统的设计,以及仿真的方法。本书力图从计算机控制系统 DEH 和高压抗燃油液压控制系统 EH 的实际应用和设计出发,重点阐述了计算机系统的硬件、软件,以及液压系统的实现方法及可靠性设计的概念和 DEH 系统可靠性工程化设计方法,也对几种进口的 DEH 系统做了简要的介绍。本书提出了汽轮机岛控制系统的新概念,并简要介绍了 DEH 与 DCS 一体化的控制系统。

本书共分十三章,分别为概论、电液调节系统、数字式电液控制系统、高压抗燃油 EH 液压系统、低压透平油纯电调液压系统、危急遮断系统 ETS、可靠性设计、DEH 系统仿真、汽轮机数字式电液控制系统 DEH-ⅢA、调试、典型汽轮机电液控制系统、汽轮机岛控制系统、电站机、炉、电一体化控制系统。

本书是由一批从事 DEH 与 EH 的开发和应用的一线工程师合著而成,其内容是他们多年从事 DEH 与 EH 开发和应用经验的结晶,具有较强的实际指导价值。

本书可供从事 DEH 应用和电厂自动化及电厂 DCS 系统设计人员和工程技术人员、电厂运行人员作为学习参考,也可作为从事汽轮机控制专业的大学生、研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

电站汽轮机数字式电液控制系统—DEH/上海新华控制技术(集团)有限公司编著. —北京:中国电力出版社, 2005

ISBN 7-5083-2636-9

I. 电… II. 上… III. 火电厂—蒸汽透平—液压控制—控制系统 IV. TM621.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 116291 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经销

*

2005 年 5 月第一版 2005 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 31 印张 781 千字

印数 0001—3400 册 定价 48.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

序 言

汽轮机控制系统经历了机械液压调速、电气—机械液压调速和纯电液调节系统三个阶段。调节型式有电液并存切换型和采用高压抗燃油的纯电调型两种。而电液调节系统的电气部分则随着电子元器件的进步逐步前进，最初采用的是晶体管式专用电路组成电液调节系统的电气部分；后来随着集成电路的发展，其电气部分采用运算放大器组件组装仪表组成的模拟式电液调节系统；随着计算机数字技术的发展，汽轮机调节系统已采用计算机控制的数字式电液调节系统。DEH系统随着计算机技术的发展和电站对控制设备要求的提高而在不断发展进步，至90年代末期，开始采用分散控制系统的设计理念，组成汽轮机分散型控制系统。在大型汽轮机普遍采用DEH系统的同时，将300、600MW机组汽轮机DEH控制系统成功的经验与技术应用到200、125、100MW中间再热机组或抽汽机组的汽轮机调节，推动了我国汽轮机调节系统的改造。

我国的汽轮机电液调节技术的开发工作基本和欧美等国家同步。1966年低压透平油的电液调节系统到1976年高压抗燃油的电液调节系统(AEH)投入运行，1990年1月我国第一套全功能的数字式电液控制系统DEH-III系统在汉川电厂投入使用。汽轮机控制和锅炉DCS系统不同的地方是汽轮机控制一般都采用专用的控制系统，且跟随汽轮机的控制要求而不断发展。我国的汽轮机DEH控制系统在电站应用DCS系统之前，就已形成了配套产品。由于DCS制造厂家的传统性与局限性，故没有相应的技术设计DEH系统，所以20世纪90年代，在我国电站DCS系统中进口DCS占绝对优势的形势下，只能由DCS和国产DEH组成单元机组热工自动化系统。

今天，我国汽轮机控制技术已经有了长足发展，汽轮机控制系统的国产化工作也已经取得了显著的成绩。我国最大的汽轮机控制系统生产基地，位于上海闵行开发区的新华控制工程有限公司大中型汽轮机控制系统的年生产能力已突破200套，成为世界上最大最强的汽轮机控制系统生产基地之一。20世纪80年代中期我们组建中国唯一一家汽轮机控制系统国产化研发中心时，国内汽轮机数字式电液控制系统依赖进口，当时进口一套300MW汽轮机控制系统要花费大约120万美元。而现在，性能更优、更符合中国国情的国产化DEH只有400万元人民币。截至到2003年12月，仅300/600MW机组国产化DEH一项，这个

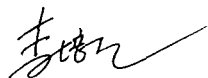
生产基地就为国家创汇节汇 2 亿多美元。DEH 的国产化，也因此被认为是高新技术成果产业化的一个成功范例。

本书终于要出版了，如此系统、全面反映我国汽轮机控制技术、集中体现我国汽轮机控制领域的专家近年来研究成果和工程应用经验的学术性、应用性并重的专著，尚属鲜见。

本书的作者们均为这个领域的专家，而且长期从事汽轮机控制系统国产化的应用推广工作，这一优势，形成了本书一个鲜明的特色，就是这本书既在汽轮机控制系统理论的阐述上兼顾系统性、全面性，不失深度和广度，又“以人为本”，一切从汽轮机控制系统设计者、使用者的实际需求出发。因此，本书还花费了大量篇幅介绍可靠性设计、系统仿真、系统调试等内容。更需特别指出的是，本书对西屋公司、ABB 公司、西门子公司、GE 公司、日立公司、三菱重工公司、阿尔斯通公司的几种汽轮机控制系统进行了介绍，以方便人们对全球范围内汽轮机控制系统现状的总体把握，为汽轮机控制系统的选型提供了一个参考。

相信本书对于汽轮机控制系统的研究者、设计人员、发电厂工程应用人员以及汽轮机控制专业的师生和有志于将来从事汽轮机控制专业的人士都有实际的指导意义，一定能使广大读者获益匪浅。

上海新华控制技术集团有限公司董事长兼总裁
教授级高级工程师



二〇〇四年九月

前言

汽轮机转速调节采用机械离心飞锤式调速器至今已有一百多年的历史，随着液压技术、电子技术和计算机技术的发展，又推出了液压式调节系统、模拟式电液调节系统 AEH 和数字式电液调节系统 DEH，这些系统相继广泛应用于各类汽轮机中。随着动力工业中汽轮发电机组单机功率的不断增大和参数的提高，运行于大电网中的汽轮发电机组要求自动化控制的水平也愈来愈高。目前 300MW/600MW 汽轮机组都已采用了数字式电液控制系统 DEH，使汽轮机控制系统已成为电站分散控制系统 DCS 的一个站。在大型汽轮机普遍采用数字式电液调节系统 DEH 的同时，200、125、100、50MW 中间再热机组或抽汽机组也都使用了 DEH 控制技术。这类机组装备了 DEH 系统以后，提高了机组的自动化水平和运行效率。为此许多动力工业的技术人员和电厂的热工技术人员以及运行人员迫切需要了解这方面的新技术。过去汽轮机自动调节方面的专业书籍虽已出版了不少，但是，缺乏介绍汽轮机数字式电液调节系统 DEH 的书籍。为弥补这一空白，作者特编著此书，期望对从事自动控制的专业人员有所启发和帮助。

随着汽轮机数字式电液调节的日益广泛应用，不仅设计制造人员需要掌握控制对象、液压技术、电子技术、计算机技术等方面的知识，而且电厂热工检修维护和运行人员也要掌握液压系统、计算机系统方面的知识。更为重要的是，过去通常分别控制的汽轮机调节已融入到机炉电一体化的 DCS 系统中，改变了以往汽轮机调节仅是汽轮机检修人员的职责范围，由热工检修人员参予维护和检修。考虑到上述情况，本书对数字式电液调节系统进行了由浅入深的分析。在第一章，概括地介绍汽轮机调节的基本概念、调节原理、动态特性、静态特性，并简要介绍汽轮机调节的发展过程。第二章介绍电液调节系统。在第一、二章的基础上，第三章主要介绍数字式电液调节系统。第四、第五、第六章介绍高压抗燃油液压系统、低压透平油液压系统以及危急遮断系统。第七章介绍 DEH 系统的可靠性设计。第八章介绍 DEH 系统仿真试验。第九、第十章介绍了典型的汽轮机数字式电液调节系统——DEH-ⅢA，以及系统调试。第十一章对几种国外进口的典型的汽轮机调节系统进行了比较。第十二章提出了汽轮机岛控制系统的新概念。第十三章简要介绍电站机炉电一体化控制系统，以供读者参考。

汽轮机数字式电液调节系统 DEH 是一个涉及计算机控制系统和高压抗燃油液压控制系统的综合控制系统, 又是电厂 DCS 系统中的汽轮机控制分系统, 因此, 本书不可能对其进行非常详细的论述。本书作者试图不以讨论理论知识为重点, 而主要着眼于解决实际问题的需要。它不同于一般的教科书, 而是主要着重介绍 DEH 的系统结构和功能, 并突出其实用性和工程性, 力求本书具有较强的实际指导价值。

本书的作者是在第一线从事 DEH、EH 开发和应用的中高级技术人员。本书内容是作者们从事具体的 DEH 开发和应用的经验总结和写照。相信本书对真正从事 DEH 开发和推广应用的技术人员会有实际的指导意义。

本书可以作为汽轮机专业和其他动力机械、能源、自动控制等专业的技术人员及从事电厂自动化设计的专业技术人员和电厂运行人员的参考书籍, 也可作为大专院校汽轮机专业、发电厂自动化专业的教材。

各章的主要撰写人为: 第一章李培植、廉宏伟; 第二章、第七章李培植、朱庆明; 第三章、第六章、第十二章廉宏伟; 第四章许军、许佐源; 第五章闵为进; 第八章蔡明忠; 第九章由商勇志完成, 张家隆、周宇阳参与了 ATC 部分的编写; 第十章商勇志、许军、许佐源、闵为进; 第十一章朱庆明; 第十三章由朱庆明完成, 陈光远、虞茂盛参与了 DCS、SIS 部分的编写。全书由朱庆明统稿和集成。

作者在编写过程中, 参考了中国电机工程学会过程自动化技术交流中心, 中国电力出版社, 以及新华控制工程有限公司、上海汽轮机厂、哈尔滨汽轮机厂、东方汽轮机厂、北京重型电机厂、GE、西屋、ABB、西门子、三菱重工、阿尔斯通、日立等公司及有关的电厂用户提供和发表的资料。作者对他们所给予的支持和帮助表示深深的谢意。

本书的撰稿者在百忙之中抽出时间将他们在 DEH、EH 开发与应用中的宝贵经验的知识奉献给读者, 对本书的编著给予极大的支持; 新华控制工程有限公司印之瑜、赵月红、王璐、牛晓梅等打印了大量的稿件和 CAD 绘图, 付出了辛勤的劳动, 在此, 我们表示衷心的感谢。

作者特别感谢中国电机工程学会过程自动化技术交流中心主任、教授级高级工程师、本书编著的顾问李子连先生, 他在百忙之中审阅了书稿, 并提出了十分宝贵的修改意见。

由于本书是由多位工作在 DEH、EH 开发、应用和工程第一线的技术人员, 利用业余时间, 在有限的时间内作出的一种新的尝试, 再加上汽轮机 DEH 系统和分散控制系统 DCS 的发展很快, 使得书中难免会有一些缺点和不足之处, 恳请广大专家和读者批评、指正。

编 者

2004 年 8 月

电站汽轮机数字式电液控制系统——DEH

目 录

序言

前言

第一章 概论	1
第一节 汽轮机控制系统概述	1
第二节 汽轮机调节系统的发展过程	3
第三节 汽轮机调节系统的基本原理	10
第四节 汽轮机调节系统的静特性	11
第五节 汽轮机的运行方式与负荷分配	14
第六节 静特性的平移与同步器	17
第七节 对静特性曲线的要求	21
第二章 电液调节系统	24
第一节 概述	24
第二节 电液调节系统的原理	25
第三节 电液调节系统基本部件	29
第四节 电液调节系统与机、炉协调控制	35
第三章 数字式电液控制系统	46
第一节 数字式电液控制系统的基本概念	46
第二节 计算机控制系统中的信号采样	46
第三节 模拟量与数字量的转换	53
第四节 数字控制器的设计	58
第五节 计算机控制系统的设计	64
第六节 数字式电液调节系统中电液转换部件	68
第四章 高压抗燃油 EH 液压系统	81
第一节 概述	81
第二节 供油系统	81
第三节 执行机构	94
第四节 危急遮断系统中的液压控制系统	102
第五节 应用举例	105
第五章 低压透平油纯电调液压系统	110
第一节 概述	110
第二节 低压透平油纯电调液压系统	111
第三节 采用 DDV 阀的低压透平油纯电调液压系统	119
第四节 低压透平油纯电调液压系统的基本部套	122
第五节 采用 DDV 阀的低压透平油纯电调液压系统的基本部套	128

第六章 危急遮断系统 ETS	132
第一节 危急遮断系统概述	132
第二节 汽轮机超速保护	134
第三节 汽轮机轴向位移保护	143
第四节 EH 油压低、轴承油压低、真空低保护	145
第五节 其他保护功能	146
第六节 ETS 遮断逻辑	146
第七节 ETS 系统的主要信号	147
第八节 高压抗燃油危急遮断系统	148
第九节 OPC 与 ETS	150
第七章 可靠性设计	152
第一节 可靠性的基本概念	152
第二节 电液调节系统的可靠性分析	155
第三节 DEH 系统可靠性设计	160
第四节 隔离、屏蔽与接地	165
第五节 DEH 软件的可靠性设计	167
第六节 DEH 系统的实际的可靠性设计	169
第七节 DEH 的可靠性评估	172
第八章 DEH 系统仿真	174
第一节 概述	174
第二节 DEH 控制对象的数学模型	176
第三节 仿真装置及其仿真系统	194
第四节 DEH 系统仿真试验	199
第九章 汽轮机数字式电液控制系统 DEH - III A	204
第一节 概述	204
第二节 DEH - III A 的特点	204
第三节 DEH - III A 的主要功能及运行方式	206
第四节 DEH - III A 的可靠性	207
第五节 DEH - III A 主要回路工作	
第六节 DEH - III A 的原理	208
第七节 DEH - III A 的硬件系统	218
第八节 DEH - III A 的软件系统	238
第九节 DEH - III A 的 ATC 自动控制与监视	257
第十节 DEH - III A 的典型应用	266
第十章 调试	276
第一节 DEH - III A 计算机部分现场安装调试	276
第二节 高压抗燃油液压控制系统 EH 调试	281
第三节 DEH 与 EH 系统的联调试验	295
第四节 低压透平油液压系统的调试	299
第十一章 典型汽轮机电液控制系统	302
第一节 GE MKV 数字式电液调节系统	303
第二节 西屋 DEH - III 数字式电液控制系统	315
第三节 ABB 公司的 ETSI 汽轮机控制系统	327
第四节 TELEPERM XP DEH 数字电液控制系统	341
第五节 三菱重工数字电液控制系统	356
第六节 Alstom Microrec 电液控制系统	360
第七节 日立公司 D - EHG/HITASS 汽轮机数字电液控制系统	371

第十二章 汽轮机岛控制系统	379
第一节 概述	379
第二节 给水泵汽轮机数字式电液调节系统 MEH	382
第三节 旁路阀门电液控制系统	397
第四节 汽轮机辅机程控和保护	412
第五节 汽轮机监测仪表系统 TSI	422
第十三章 电站机、炉、电一体化控制系统	429
第一节 机、炉、电机组级控制概述 ...	429
第二节 典型的机组级一体化控制系统	429
第三节 机组级控制 DCS 与全厂监控信息系统 SIS	456
附录	469
参考文献	484

第一章

概 论

第一节 汽轮机控制系统概述

从能量转换的角度而言,汽轮机是将蒸汽的热能转换成旋转机械的动能的设备。这些蒸汽可能来自锅炉燃料燃烧,加热给水产生的,也可能是其他高温、高压的蒸汽发生设备产生的。汽轮机输出的动能驱动发电机,进一步将动能转变为电能,供给工业生产和生活需要。汽轮机与其他热力发动机,如燃气轮机、内燃机一样,是目前世界上最重要的原动机之一。汽轮机在国民经济中,起着举足轻重的作用,在各个领域有着广泛的应用。可以用来驱动发电机、高炉鼓风机、压缩机、船舶及各种泵等。除了作为原动机输出动力外,汽轮机还可为其他工业过程提供工业用蒸汽,如化工、纺织、锻压、电解等,以及为居民提供生活采暖用蒸汽。

汽轮机控制系统可分为以下几个方面。

一、调节系统

不同的用途对汽轮机提出了不同的要求。作为发电用汽轮机,由于电能不能大量储存,电力用户的耗电量又是不断变化的。因此,必须根据电网负荷的变化,及时调整汽轮机的出力,使之与需要的电量相适应。

电能用户对电力的要求主要为电压、电流和频率。其中发电机电压除了与转速有关外,主要是通过励磁调节系统调整励磁电流来调节的;在电压一定的情况下,对发电机电流的要求表现为对功率的要求,即汽轮机必须具有负荷调节的手段。

绝大多数汽轮发电机都是并网运行的,电网的频率是由电网中的所有机组共同维持的,当电网中的用户耗电量增加时,电网频率将下降,当电网中的用户耗电量减少时,电网频率将上升。作为工业用汽轮机,其驱动的风机、泵等的出口压力必须满足工艺要求。而这些设备的出口压力是与汽轮机的转速有关的。另外,在机组启动冲转过程中,以及作为孤立机组,单机运行的情况下,都必须具有转速调节的能力。

供热用汽轮机必须保证提供的蒸汽参数满足用户要求,这要求汽轮机具有压力调节的功能。

这些都要求汽轮机配备良好的调节系统。从上述应用可以看出,汽轮机的主要调节参数是:功率、转速和压力。在不同的运行方式下,这些参数之间可能互相制约,互相影响。同时,为了满足汽轮发电机安全、稳定、经济运行的需要,还需要对汽轮机的其他参数、其他设备进行调节和控制,使各种参数维持在规定的范围内。

二、监测仪表系统

除了控制汽轮机正常运行,完成发电、供热、驱动功能外,还必须保证汽轮机及其辅助

设备的安全稳定运行，这就要求对汽轮机的主要参数进行监测。完成这一功能的系统一般称为汽轮机监测仪表 TSI (Turbine Supervisory Instrument)。随着汽轮机技术的不断发展，机组参数不断提高，容量不断增大，需要监测的过程量也越来越多，相应的检测技术也在不断更新。

目前，汽轮机的主要监测项目包括：

- (1) 汽轮机振动。
- (2) 转子轴向位移（推力瓦磨损）。
- (3) 转子与汽缸相对胀差。
- (4) 汽缸热膨胀。
- (5) 转子偏心（挠度）。
- (6) 键相。
- (7) 零转速。
- (8) 转速。

TSI 系统除在线监测外，同时提供信号输出，供计算机系统采集、记录。当信号超过设定值时，TSI 提供报警、跳机输出。

随着计算机技术的发展，计算机软件功能的增强，以及用户对计算机系统一体化的要求，较多原来由专用的 TSI 系统采集、处理的信号，已经由 DEH 等系统完成。在 DEH 系统中，除可以显示这些重要信号的实时变化之外，还可以对其进行实时趋势、历史趋势、棒状图、事故追忆等。

三、保护系统

在机组正常运行的情况下，由调节系统对汽轮机的各项参数进行调节，使机组的各项指标在允许的范围以内。但是当这些参数，超过调节系统能够控制的范围而危及机组安全时，必须紧急停止汽轮机的运行。因此为了确保汽轮机的安全，防止设备损坏事故的发生，还必须配备必要的保护系统。一般将保护系统称为 ETS (Emergency Trip System)。

保护系统的项目因机组容量大小而不同，一般包括：

(1) 汽轮机转动部件异常，包括：

- 1) 轴承振动大。
- 2) 瓦盖振动大。
- 3) 汽轮机超速。
- 4) 润滑油压低。
- 5) 轴承温度高。
- 6) 轴承回油温度高。

(2) 动静部件异常，包括：

- 1) 转子轴向位移大（推力瓦磨损）。
- 2) 转子与汽缸相对胀差大。

(3) 汽轮机本体异常，包括：

- 1) 汽缸压比低。
- 2) 排汽温度高。
- 3) 汽缸膨胀大。
- 4) 冷凝器真空低。

(4) 锅炉系统异常, 如总燃料跳闸 (MFT)。

(5) 发电机系统异常, 如发电机故障等。

保护系统按照形式可划分为电子和机械(液压)两部分, 由检测、放大、执行机构等组成。检测元件随着被检测量的不同而不同。保护动作的结果都是通过紧急关闭主汽门, 实现机组停车。

四、程序控制系统

传统方式下, 汽轮机的启动、停机过程是由运行人员按照运行规程, 通过人为设定转速、负荷、压力等目标值和变化速率来完成的。这种启动方式过多依赖于运行人员的经验。随着计算机技术的发展, 可以通过设计程序控制系统(一般称为 SCS: Sequence Control System)模仿运行人员的启动过程, 按照事先设定好的步骤, 自动完成各项操作, 根据需要自动启停相关设备。容量较小的机组一般主要依据机组运行规程进行启停, 对于大型机组, 还必须对大型金属部件, 如转子、汽缸、蒸汽室等进行热应力计算, 修正机组的升降速率和升降负荷率。

有了程序控制系统, 可以减轻运行人员的劳动强度, 提高劳动生产率; 完善的程序控制逻辑, 可以防止人为的错误操作, 有利于机组的安全运行; 同时, 程序控制还可以缩短启动时间, 提高机组运行的经济性。

五、先进汽轮机管理系统

我国电力工业的高速发展, 结束了持续 20 多年的全国性缺电局面, 实现了电力供需的基本平衡, 缺电矛盾得到缓解。以往因缺电而拉闸限电的现象基本解决了。虽然前两年出现了一段时间的用电紧张局面, 但毕竟是暂时的。电力市场已经逐渐进入了卖方向买方的过渡。随着电力系统改革的不断深入, “厂网分开、竞价上网, 建立竞争机制”的格局要求电力生产企业, 必须保证电力的充足、稳定供应, 在企业内部进一步降低发电成本, 提高机组的可利用率。

随着计算机技术和控制理论的飞速发展, 汽轮机监视、控制、保护功能不断完善, 目前汽轮发电机组的各项控制指标已经能够满足当前电力用户的基本要求。如何提高经济效益成为当前最紧迫和最直接的问题。国内各大专院校、研究所及相关企业已经开始这方面的探索 and 开发。研究基本上是以锅炉燃烧优化和先进汽轮机管理两个中心来进行的。其中先进汽轮机管理系统的概念首先是由新华控制工程有限公司提出并开发的。它围绕汽轮机的安全、稳定、高效运行, 覆盖了汽轮机热应力计算与寿命管理、机组实时状态仿真、设备故障诊断与状态检修、热力性能计算、分析与优化四个方面。

上述汽轮机控制系统的五个部分, 是相互关联, 相互作用的。它们从调节、监测、保护、启停、优化五个不同的角度对机组施加影响, 共同完成机组的安全稳定运行的任务。

第二节 汽轮机调节系统的发展过程

一、发展初期——机械液压式调速系统

汽轮机控制系统的必要性在蒸汽机一开始出现就产生了。

18 世纪中叶, 英国工程师詹姆斯·瓦特发明的蒸汽机就已经采用了自动调节器, 也是

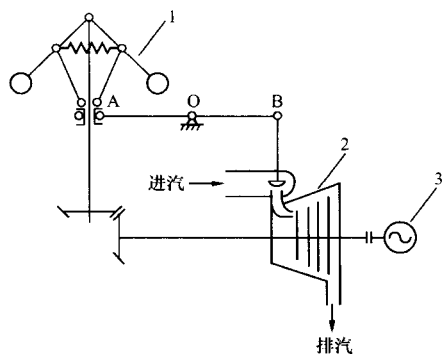


图 1-1 直接调节系统

1—离心调速器；2—汽轮机；3—发电机

世界上最早在技术上应用的自动控制器。1784 年，瓦特（1736—1819）应用离心式直接作用调速器（图 1-1）控制蒸汽机。当转速升高时，重锤在离心力的作用下向外张开，使滑环向上移动，通过刚性的杠杆关小调节汽阀，使转速下降；当转速降低时，动作过程相反。在这种情况下，调节的任务就在于：随着机组角速度的变化，来增加或减少蒸汽流量，以此来保持能量平衡。直接调节系统的控制方框图如图 1-2 所示。作为调节回转设备转速变化的瓦特调节器的基本作用原理一直应用到今天。由于采用调速器直接带动阀门，所以称为直接调节。实际上，由于这种调速器的能量太小，只能应用在功率较小的汽轮机上。

在瓦特调节器中，调速器滑环的位置与汽轮机的阀门位置是一个固定的对应关系。也就是说一定的汽轮机转速与汽轮机的功率是一一对应的。因此就产生了一定的不均匀度。这表现为虽然采用了调速器，但只能维持转速在一定的范围内，而不能保证转速的恒定。为了减少这种不均匀度，做了很多尝试，但都使系统产生振动。

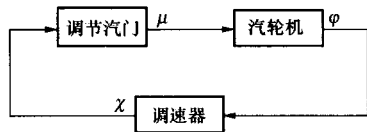


图 1-2 直接调节系统方块图

英国天文学家和发明家爱里（George Biddell Airy, 1801—1892）在研究天文时采用的天文管，其制动采用了瓦特调节器的重锤。1856 年，他经过研究后发现，如果在调节器的滑环上连接一个水阻尼器就可能防止有害的振动现象。

1868 年，英国克姆勃利德学院物理学家德日姆斯·麦克斯韦在他的“论调节器”一书中，第一个系统研究了机器—调节器运动稳定性问题。指出调节系统的稳定性取决于调节系统微分方程的特征根。当特征根的实部为负值时，调节系统才能稳定。

1876 年，俄国彼得堡工业学院教授伊万·阿历克塞耶维奇·魏茨涅格拉斯基发表“论直接作用的调速器”的著作，从理论上分析了直接作用调速器的工作原理。但他仍然相信，调速器系统中必须具有阻尼器才能稳定工作。

1899 年，求里赫斯基工业学院教授乌列里·斯托端拉把魏茨涅格拉斯基直接作用调速器的理论应用到间接作用调节系统中。

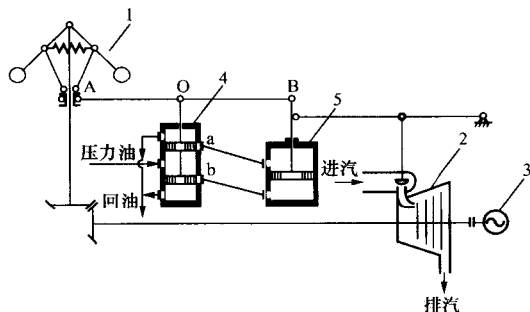


图 1-3 间接调节系统

1—离心调速器；2—汽轮机；3—发电机；
4—滑阀；5—油动机

图 1-3 所示为带有一级放大的间接调节系统。在调速器和汽轮机阀门之间增加了用于放大的油动机滑阀 4，此时调速器带动的是油动机滑阀，而由压力油来驱动阀门。当转速升高时，滑环向上移动，通过刚性的杠杆带动油动机滑阀向上移动，油口 a 打开，压力油进入油动机上部，同时油口 b 打开，油动机下部的油排回油，油动机活塞向下移动，关小调节汽阀，使转速下降。同时反过来，油动机活塞向下移动带动滑阀 4 向下移动，当油动机滑阀 4 回到原来的中间位置时，油口

a、b 关闭, 油动机恢复到静止状态; 当转速降低时, 动作过程相反。

在间接调节系统中, 调速器带动的不是阀门, 而是一个断流式的滑阀, 而由油动机活塞上下的压差来驱动阀门, 因此, 可以通过增大油动机的活塞面积或供油压力, 以产生足够的力来带动阀门运动。

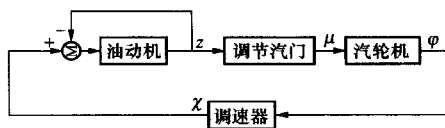


图 1-4 间接调节系统方块图

随着对调节器系统研究的深入, 描述系统运动微分方程阶次的提高, 求取系统运动过渡过程的计算越来越复杂, 确定高次方程的根在当时几乎是不可能的, 同时考虑各种初始条件及其积分常数也十分复杂。因此就提出了在不求出系统运动曲线的情况下, 能否判断系统稳定性的问题。劳斯 (Routh) 和赫尔维茨 (Hurwitz) 两人分别于 1877 年和 1895 年独立地完成了这项工作。即通过研究微分方程的系数及其关系, 就可判断微分方程根的实部是否为负数, 从而确定系统的稳定性。这一成果被称为代数准则或劳斯 - 赫尔维茨准则。

进入 20 世纪以后, 自动控制的原理在各种装置中得到广泛应用, 自动控制逐渐发展成为一门独立的学科。其理论和方法越来越丰富。1932 年, 贝尔电话研究所的乃奎斯特 (Nyquist) 在研究通信问题时, 提出了稳定判据和稳定裕度的概念, 创立了用频率特性来分析负反馈放大器的稳定性理论。在此基础上, 伯德于 1945 年, 发明了对数频率特性图 (伯德图), 可以用图解法分析系统运动。自动控制系统的研究为汽轮机调速系统的设计和分析提供了有力工具。

二、全液压式调速系统

上述两种调节系统属于机械液压调节系统, 其特点是采用了机械式离心调速器。机械式调速器由于摩擦和铰链较多, 在经过一段时间的运行后, 零件发生磨损, 同时由于机械连接较多, 不可避免的存在间隙和死区, 而机械零件长时间的运动, 也会产生疲劳断裂, 从而影响了调速器的性能和可靠性。

为了克服机械式调速系统的缺点, 人们开始研究无铰链的调速系统。采用脉动油泵作为转速信号的发送器成为首选。1934 年苏联基洛夫工厂开始设计和试验这种系统。1936 年苏联全苏热工研究所也开始了液动调速系统的研制工作。1938 年, 液压调速系统的试验性样品被安装在 BBC 工厂生产的 10MW 汽轮机上。1944 年, 苏联的首台液动调速系统在斯大林金属工厂生产的 AK-25-1 型汽轮机上开始投入运行。在同一时期, 欧洲、美国等国家也开始了液动调速系统的研制生产工作。

20 世纪 50 年代初, 我国汽轮机全部进口, 由外国专家调试相应的调节系统, 中国工程师、技术员无权改动整定的调节参数。

1956 年, 我国从捷克引进技术, 生产了第一台 6MW 汽轮机, 调节系统由外国专家指导及调试。

1958 年大跃进年代, 上海汽轮机厂按旧中国留下的美国西屋公司资料生产 12MW 汽轮机及 25MW 汽轮机。当时的液压调节系统完全按西屋图纸生产, 由于资料不全及没有计算资料, 机组投运后负荷大幅度摆动。与此同时, 在原苏联援助下建立了哈尔滨汽轮机厂, 按苏联图纸生产 25、50、100MW 汽轮机, 当时该类机组调节系统也是在苏联专家指导下生产及调试的。

20 世纪 60 年代初, 中国人开始自行研究汽轮机调节系统。为了解决调节系统不稳定, 1961 年, 在第一机械工业部 (以下简称一机部) 汽轮机锅炉研究所 (上海发电设备成套设计研究所) 建立了调节试验室, 专门研究液压调节系统。在汽轮机锅炉研究所及上海汽轮机厂技术人员合作下, 到 1962 年底中国人已完全掌握了西屋型液压调节系统, 解决了负荷摆动问题, 使上汽厂当时生产的 12MW 及 25MW 机组得以稳定运行。

哈尔滨汽轮机厂 (以下简称哈汽厂) 生产的调节系统如图 1-5 所示, 由高速弹性调速器 1、随动滑阀 2、分配滑阀 3、油动机滑阀 4、反馈滑阀 5、油动机 6、同步器 7 等组成。其特点是采用由汽轮机主轴直接带动的无铰链的调速器, 将转速的变化转换为挡油板的位移, 取消了原来离心式调速器的铰链机构, 减小了摩擦和卡涩, 具有较高的灵敏度。为进一步提高灵敏度, 减少主油泵出口压力波动的影响, 一般取脉动油压力为主油压力的一半。在哈汽厂调速系统中, 不等率是通过调整油动机活塞杆上的斜铁角度来实现的。

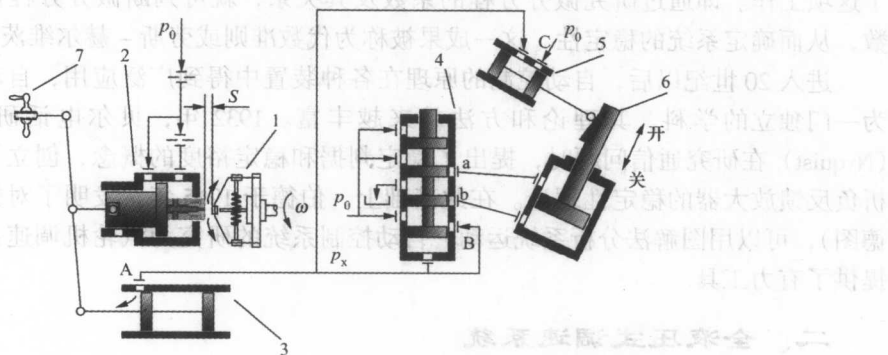


图 1-5 哈汽厂生产的机械液压调速系统

- 1—高速弹性调速器；2—随动滑阀；3—分配滑阀；4—油动机滑阀；5—反馈滑阀；
6—油动机；7—同步器

上海汽轮机厂 (以下简称上汽厂) 生产的调节系统如图 1-6 所示, 由主油泵 1、旋转阻尼 2、放大器 3、错油门 4、继动器 5、油动机 6 等组成。其特点是采用了旋转阻尼和蝶阀式放大器。旋转阻尼的出口油压可近似看作与转速的平方成正比, 其转速的测量无机械移动部件, 可靠性较高。蝶阀式放大器比滑阀式放大器更不易卡涩。

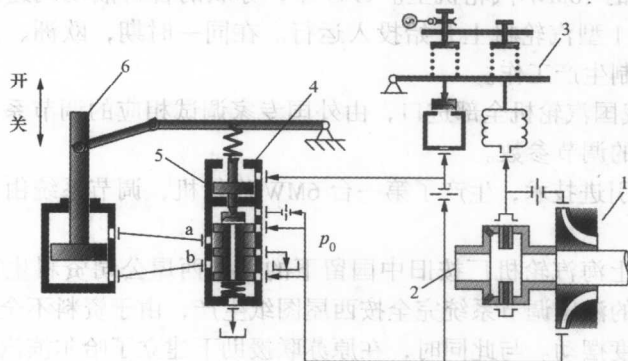


图 1-6 上汽厂生产的全液压调速系统

- 1—主油泵；2—旋转阻尼；3—放大器；4—错油门；5—继动器；6—油动机