

水力机械 过渡过程

常近时 著

机械工业出版社

本书主要讲述叶片式水力机械即水轮机、水泵及其装置的过渡过程，内容以作者多年来从事该领域科学研究与实践活动的成果为主。全书共分四章，分别阐述了水力机械过渡过程的基本理论，水轮机、水泵及其装置各种过渡过程的理论分析与计算方法。

本书读者对象为水力机械、水电站与水泵站动力设备等专业的科研人员、设计人员和高等学校师生。也可供这些专业的一般工程技术人员及相邻专业的科技人员参考。

水力机械过渡过程

常近时 著

责任编辑：范兴国 版式设计：吴静霞
封面设计：郭景云 责任校对：郝凤玲
责任印制：卢子祥

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $9^{3/4}$ ·字数255千字

1991年9月北京第一版·1991年9月北京第一次印刷

印数 001—870·定价：9.00元

ISBN 7-111-02669-1/TK·106

序

值《水力机械过渡过程》一书即将问世之际，在此回忆一下此课题的研究过程是十分有意义的。50年代，我们从事水电站水力机械设计，要进行调节保证计算时，是参照美国和苏联的一些方法进行设计，结果精度很低，内容不全。60年代初我和常近时同志等到北京水利水电学院执教，对水轮机调节保证计算进行了深入研究，提出了一些研究课题，其中以本书作者建立的水力机械广义方程为基础，对水轮机调节保证计算有了创新和改革，并对水轮机过渡过程的研究提出了一些新的观点。通过对转桨式水轮机和混流式水轮机进行的大量现场试验工作，比较和分析了计算与试验结果，发现了一些问题，针对水轮机动态工况进行理论推导，建立了许多十分重要的新概念。例如，将水头分为水轮机水头和装置水头；将流量、力矩、效率分为静态的和动态的等等。

通常，为了进行全过程计算，需要利用模型试验所得的完整综合特性曲线，但国内无一台水轮机具有这样的曲线。于是，作者开辟了新的途径，通过多次从实践到理论的尝试，终于创立了水轮机过渡过程基于内特性解析的理论以及计算方法的新体系，成功地解决了不依赖于模型静态特性曲线分析来求解水轮机装置各种过渡过程问题，为水力机械动力学研究开创了有价值的工作。

为了介绍作者的新成果，使大家熟悉这种内特性解法，曾组织过几次全国性学习班，效果是良好的。

这种内特性解析法，也充实了水轮机控制的研究内容。例如，下游调压井研究中，其中有小波动稳定性计算和大波动过渡过程计算，作者提出的导叶运动的合理控制方式，改善了调压井水位

波动的特性。又例如，迄今为止，国内外很少研究转桨式水轮机控制理论及最优控制的实施方案，因为转桨式水轮机特性曲线是空间的，不是一般平面方程能表达的。如果采用内特性法就不存在这方面的困难。由于有利于采用计算机控制和过渡过程控制器，以实现双调节优化控制，可保证水电站运行的可靠性、安全性和经济性。

希望本书出版后能有助于我国水电站的建设，以降低工程造价，缩短建设周期。同时引起水电界有关人士对水轮机过渡过程问题有足够的重视。

寿梅华

1990年6月20日

前 言

水力机械过渡过程，又称暂态过程，是以液体为工作介质的机械中重要的学科分支，它也是水力机械及其装置设计、运行中必然要涉及的工程技术问题。水力机械及其装置在过渡过程中的动态品质，直接影响它们的运行可靠性、灵活性、速动性和总体的经济性。因此，研究并解决水力机械过渡过程问题，具有重要的工程实际意义。

我国水力机械过渡过程的研究同国外先进国家相比，起步较晚。然而，由于我国近十余年来已建与正建的水电站、水泵站等工程宏大，水轮机、泵的单机容量与尺寸已达世界水平，这无疑对我国水力机械过渡过程的研究工作起了巨大的促进作用。因此，近10年来，我国在这一领域中取得了显著的成绩，为国外同行所瞩目。其中，作者创立的“水轮机过渡过程基于内特性解析的理论与计算方法”新体系，成功地解决了不依赖于水力机械模型静态全特性曲线，就可分析与求解水轮机、水泵与抽水蓄能水电站水泵水轮机的各种过渡过程问题。工程实用表明，这一理论具有严谨的科学性、较高的计算准确性与良好的工程实用性。它的推广应用，必将带来很大的经济效益。

本书将以这一理论为线索，阐述水轮机、水泵及其装置系统过渡过程的基本理论与实用的计算方法。为了使读者掌握全局，书中也介绍了国外一些传统的计算方法。希望这本书对我国水电站、水泵站、抽水蓄能水电站的建设与各类水力机械的发展，起到一些积极的作用。

液力传动装置隶属于水力机械领域，所以本书介绍的基本理论也适用于液力传动装置，只要根据具体情况加以应用，便可解决其过渡过程问题。

由于本书涉及的内容广泛，难免有疏漏与错误之处，请读者指正。

常近时

1989年10月于北京

目 录

第一章	绪论	1
第一节	水力机械的工作特点.....	1
第二节	水力机械过渡过程的主要类型与基本特征.....	5
第三节	研究水力机械过渡过程的技术经济意义.....	9
第四节	水力机械装置过渡过程研究的现状和研究方法.....	13
第二章	水力机械过渡过程的基本理论	18
第一节	叶片式水力机械的全特性曲线.....	18
第二节	叶片式水力机械各种过渡过程的历程分析.....	32
第三节	叶片式水力机械的广义基本方程式.....	39
第四节	轴流式水轮机动态轴向水推力的解析表达式.....	51
第五节	水力机组转动部分的运动方程式.....	54
第六节	水力机械装置水力系统中不稳定流动的基本方程.....	55
第七节	水轮机装置水力系统刚性理论水击的基础方程式.....	65
第八节	水力装置管道弹性理论水击的基础方程式.....	70
第九节	叶片式水力机械工况参数的相似换算.....	79
第十节	水力机械装置过渡过程的模拟.....	82
第十一节	水力机械装置过渡过程计算问题的提法.....	85
第三章	水轮机装置的过渡过程	86
第一节	水轮机装置过渡过程概述.....	86
第二节	水轮机装置过渡过程的计算方法.....	94
第三节	水轮机压力引水管道中水击的解析计算.....	96
第四节	水轮机甩负荷过渡过程及其解析计算方法.....	100
第五节	导叶分段关闭时水轮机甩负荷过渡过程转速瞬变规律的解析计算方法.....	121
第六节	水轮机装置甩负荷过渡过程基于水轮机外特性的数值计算方法.....	133
第七节	水轮机装置甩负荷过渡过程基于内特性解析的数值计算方法.....	145
第八节	水轮机装置甩负荷过渡过程基于内特性解析的特征线解法.....	158
第九节	轴流转桨式水轮机装置甩负荷过渡过程的合理控制	

方式	161
第十节 退出飞逸过渡过程计算及防飞逸保护措施	171
第十一节 突减与突增负荷过渡过程及其内特性解析的数值计算方法	180
第十二节 轴流转桨式水轮机发电转调相过渡过程及其内特性解析的数值计算方法	183
第十三节 零流量工况轴流转桨式水轮机的轴向水推力与轴力矩的计算方法	187
第十四节 轴流转桨式水轮机组转动部分上抬事故及其有关计算	195
第十五节 轴流转桨式水轮机组起动过渡过程及其计算	203
第十六节 抽水蓄能电站混流式水泵水轮机装置水轮机工况下的过渡过程问题	215
第十七节 水轮机装置过渡过程现场试验	220
第四章 叶片泵装置的过渡过程	233
第一节 叶片泵装置过渡过程的类型和主要研究对象	233
第二节 叶片泵不稳定工况的基本方程	235
第三节 叶片泵的运行工况点	238
第四节 水泵水轮机装置水泵工况下的起动过渡过程和起动方式	242
第五节 水泵水轮机组为改善泵工况起动特性的技术措施	249
第六节 泵机组起动过渡过程的计算	252
第七节 泵机组动力突然切断调节元件失控拒不关闭的过渡过程及其计算	260
第八节 泵机组动力突然切断调节元件受控关闭的过渡过程及其计算	268
第九节 水泵长压水管道末端阀关闭的水压计算	270
第十节 水体分离理论及其计算	273
第十一节 混流式水泵水轮机装置泵工况断电过渡过程的解析计算方法	278
第十二节 混流式水泵水轮机装置泵工况断电过渡过程基于内特性解析的特征线解法	289
参考文献	299

第一章 绪 论

第一节 水力机械的工作特点

水力机械是以水为工作介质的能量转换和能量传输机械。将水的能量转换成机器机械能的水力机械称为水力原动机；相反，将机器机械能转换成水的能量的水力机械，则称为水力工作机或泵；而通过水的能量来传递机械能的装置，则统称为液力传动装置。因此，按照传统，水力机械包括水力原动机、水力工作机与液力传动装置等三个组成部分。

按工作原理，可将水力机械划分为动力式与容积式两大类。

动力式水力机械通常又被称为叶片式水力机械或水轮机机械，其中用以实现能量转换的主要部件是具有叶片的转轮，它的工作原理是液体同转轮叶片系的动力学相互作用。动力式水力机械中的原动机称为水轮机，工作机称为叶片泵，液力传动装置则被称为动力式液力传动装置。图1-1示出了这三种动力式水力机械的简图。

动力式水力机械的一个重要特点是：其流量 Q 与能头 H 有关。图1-2示出了当转速 n 一定时，一台离心式水泵的工作特性曲线。可见，当系统的能头（扬程）变化时，泵的流量将随之变化。

容积式水力机械能量转换的主要部件中，均具有决定其排量大小的体积可变的工作腔体，它的工作原理是液体同能量转换主要部件的静力学相互作用。容积式水力机械中的原动机称为液压马达；工作机械称为液压泵；传动装置被称为容积式液压传动装置或称液压传动装置。液压马达、液压泵及液力传动装置的种类很多。图1-3示出了容积式水力机械简图，这里列出的只是这种

机械最简单最常见的两种。

容积式水力机械的一个重要特点是：当转速 n 一定时，理论上其流量 Q 与能头 H （或压力 p ）无关。图1-4示出了这一理论关系。

水力机械是流体机械的一种，它的液体工作介质压缩性很小。它与流体机械中的气体机械或称热力机械有所不同，在稳定工况

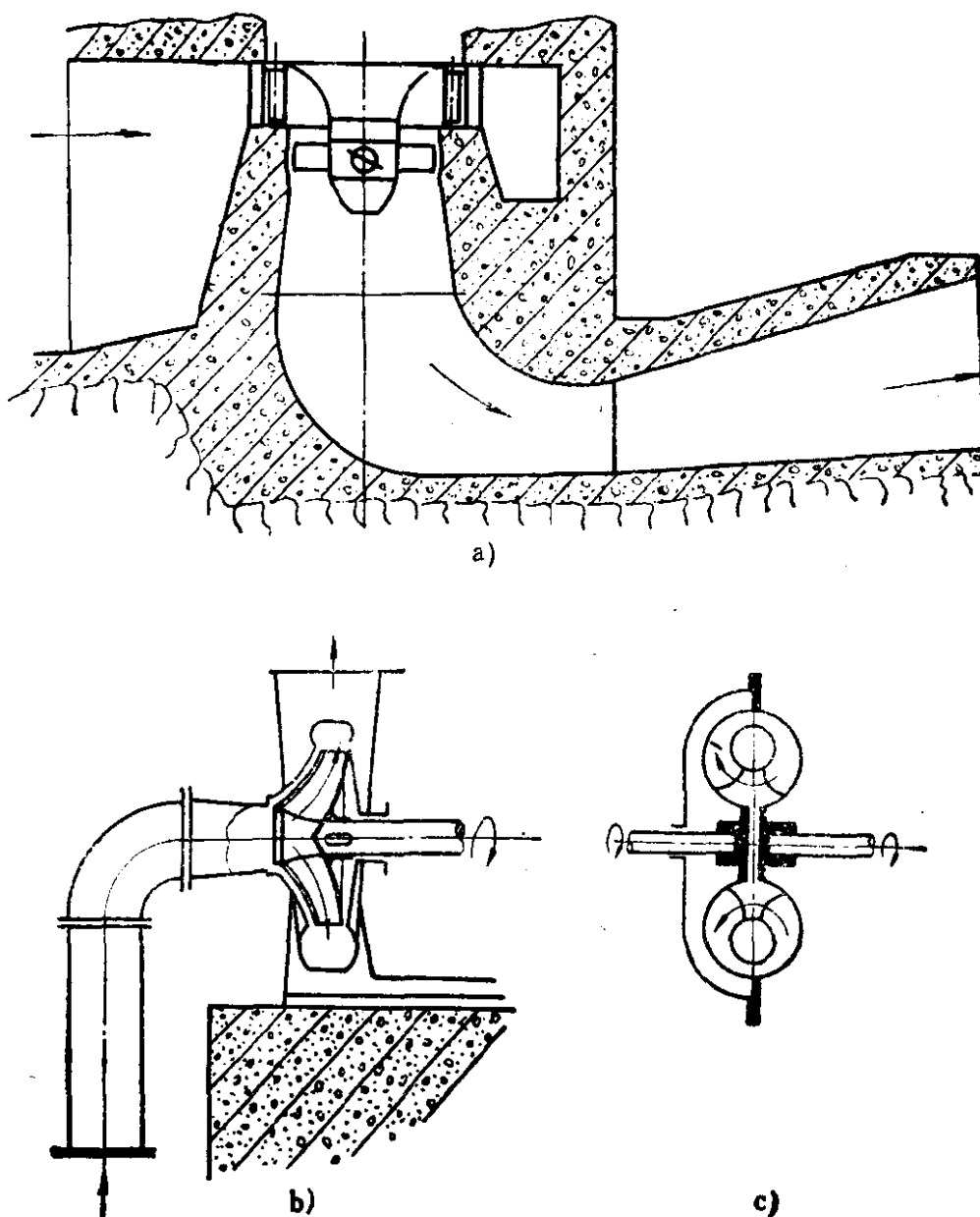


图1-1 动力式水力机械简图

a) 水轮机(轴流式) b) 叶片泵(离心式) c) 动力式液力传动装置(液力联轴器)

下的工作过程不涉及工作介质体积变化的影响。水力机械中液体能量的变化与热机（汽轮机、燃气轮机、压气机等）中气体能量的变化有相近之处，描述工作介质运动规律的基本方程有类似的地方，所以这些机械的通流元件的几何形状也很相近。但是，水力机械仍有自己的独特之处。

一般地说，气体的密度约比水小1000倍，因此，水力机械的功率密度比相应的热机大。例如，为了得到60万kW的轴功率，在汽轮机中工作介质需要连续通过60个级，且初始的压力为25MPa；而对于水轮机，只需初始压力为

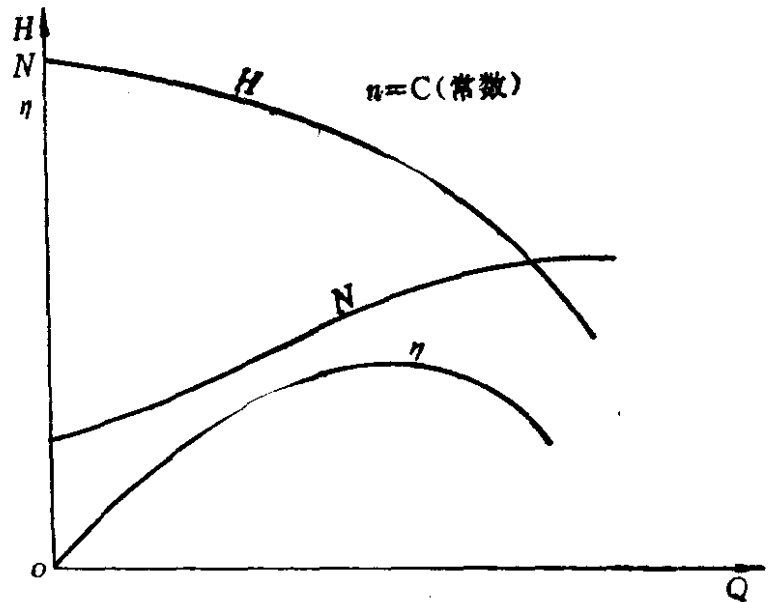


图1-2 离心泵的工作特性曲线
H—扬程 N—轴功率 η —效率

1~3MPa的工作介质，经过一级能量转换便可获得相同的功率。

水力机械的工作构件，特别是叶片式水力机械的转轮和容积式水力机械的工作腔体，承受很大的水动与水静力载荷，叶片根部与工作腔体壁内承受很大的应力。所以，水力机械的通流元件的结构与允许的工作参数，往往不得不根据强度条件选取。

水力机械的转速比热机要低得多，以避免液体通流元件中造成很大的圆盘摩擦损失和水力损失。此外，水力机械的转速有时还受汽蚀条件的限制，过高的转速将导致通流元件中低压区域出现深度真空，从而诱发汽蚀。

水力机械工作过程中发生的汽蚀，是工作介质发生的相变过程。汽蚀不仅能恶化水力机械的工作特性，而且还能导致通流元件表面的汽蚀破坏。汽蚀也是妨碍水力机械向较高参数发展的主

要因素之一。

由于液体的密度比气体大得多而可压缩性甚小，所以当水力机械处于不稳定工况运行时，工作介质运动速度的突然改变，将导致通流元件与引、排流系统中压力的突然变化，因而给水力机械的强度和控制带来一系列必须注意加以解决的问题。

水力机械一般均有可逆的工作特性，即水力工作机械可以做水力原动机运转。例如，叶片式水泵逆转逆向流动时，便可做水轮机运转；液压泵可以做液压马达使用。但是，对于一般的水力机械，如果设计时并没有要求兼顾两种相逆的工作状态，做可逆机使用时，逆向工作性能将远不如其正向工作性能好。

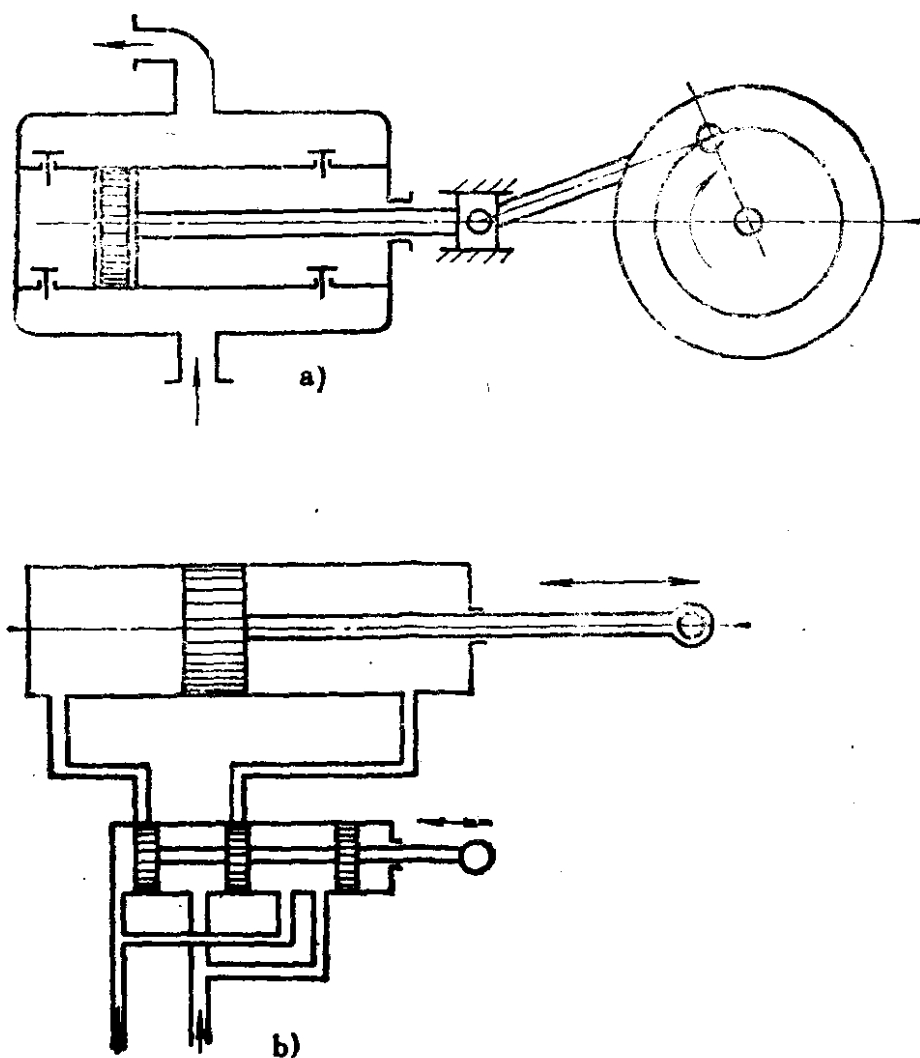


图1-3 容积式水力机械

a) 液压泵(活塞泵) b) 液压缸(液压马达)

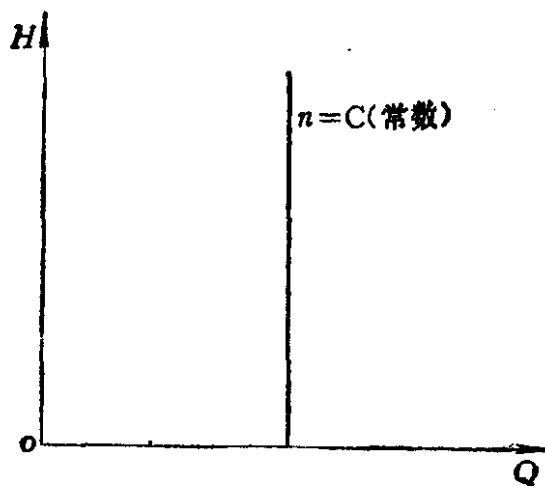


图1-4 活塞泵的理论工作特性

第二节 水力机械过渡过程的主要类型与基本特征

通常，描述水力机械工作状态与性能的基本数据，如流量 Q 、能头 H 、转速 n 、轴端力矩 M 、效率 η 、轴向水推力 S_z 以及通道中某些特征点的压力 p 等，被称为水力机械的工作参数或工况参数。其中，前四个为主要工况参数，它们可以确定水力机械的工况及其相应的特性，而其它工况参数将随主要工况参数的变化而变化。

对于某种水力机械来说，它的工况参数不仅可以有大小的变化，而且可以有方向即符号的改变。由四个主要工况参数正、负、零值的组合构成了叶片式水力机械不同性质的工况区域，即不同的工作状态。

水力机械在运行过程中，上述工况参数的大小与方向均不随时间变化时，称为稳定工况。此时有

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial M}{\partial t} = 0 \quad (1-1)$$

当上述工况参数的大小或方向随时间变化即是时间的函数时，则称为不稳定工况。

水力机械不稳定工况常发生在由某一稳定工况点向另一个稳定工况点的过渡过程中，此时式(1-1)的关系已不存在，从而带来一系列流体的和机械的动力学问题。

由于水流通道中产生旋涡和压力脉动等，水力机械不可能处于严格的稳定工况下运转。实际上，一般所说的稳定工况只是准稳定工况，即工况参数随时间有微小的变化，但其平均值是基本不变的。

由于水力机械总是在某一装置系统中工作的，例如水轮机在水电站，水泵在水泵站等装置系统中工作，因此对水力机械不稳定工况的特性，往往不能脱离它所在的系统单独加以研究。

水力机械装置系统是指由水力机械自身以及与之相联的电机、管道、阀门等的总体。图1-5分别示出了水轮机、水泵及液力传动装置系统的示意图。系统中的其它部分的性能对水力机械不稳定工况的特性有着十分重要的影响，因此研究水力机械的过渡过程问题，更确切的说是研究水力机械装置的过渡过程问题。

水力机械在系统中运行时，由于工作条件的经常变化，它总是处于不同工况点之间的过渡过程之中。此时，工况参数只发生小幅度的数值变化，而不发生大幅度乃至符号的变化，这种过渡过程可以泛称为小波动过渡过程。一般说来，它们不做为水力机械过渡过程的研究对象。而这里所说的水力机械过渡过程是指水力机械从一种工作状态向另一种工况性质不同的工作状态过渡的瞬变过程。此时，不仅工作参数的数值发生大幅度变化，而且有时符号也发生改变。主要工况参数符号的改变，意味着工作状态的根​​本变化。通常，将这类过渡过程泛称为大波动过渡过程。

在各种类型的水电站、水泵站和液力传动系统中，可能由于各种原因，特别是事先无法预料的原因导致水轮机、水泵、液力传动装置处于大波动过渡过程中运转。虽然过渡过程的历时短暂，但伴随着工况参数的大幅度的急剧变化，在系统中由水流惯性与机器运动惯性引起很大的动态附加载荷和一系列复杂的物理现象，对水电站、水泵站和液力传动装置系统运行的安全可靠性及运行质量有着极其重要的影响。在水电站、水泵站和液力传动装置系统的设计时，都必须进行相应的计算，以确定水力机械装置最重要的一些基本参数及相应的过渡过程动态品质。而为了改善

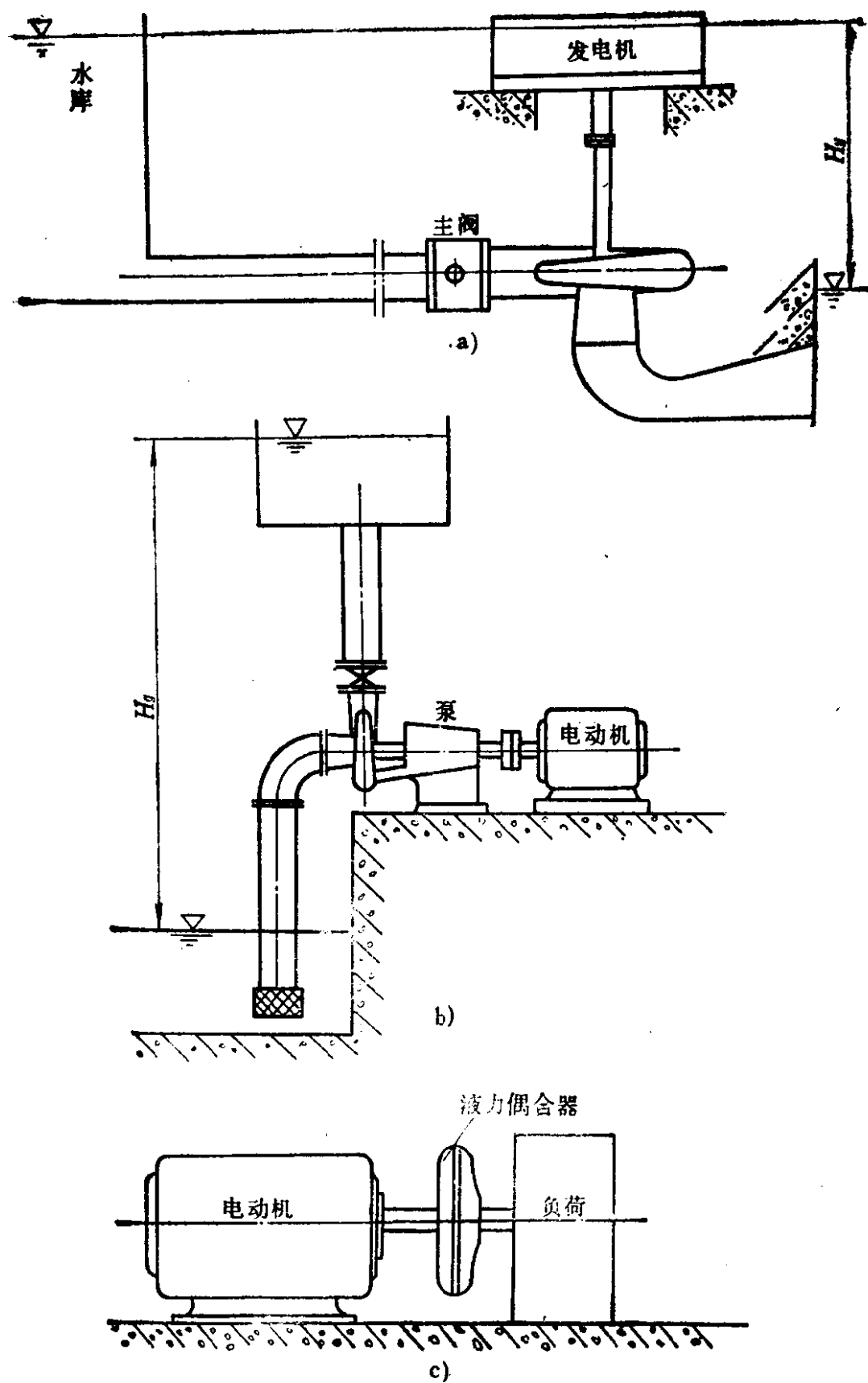


图1-5 水力机械装置系统

a) 水轮机装置系统 b) 水泵装置系统 c) 液力传动装置系统

动态品质,有时不得不将这些基本参数,如管道的壁厚、机组的尺寸与重量等增大;或者寻求良好的大波动过渡过程的控制方式与手段。因此,过渡过程的研究直接同提高水力机械装置系统的经济性有关;而过渡过程的计算,常被视作水电站、水泵站和设有液力传动装置的动力系统等的设计中最重要的技术方案决策过程之一。

水力机械的过渡过程总是同其自身和其所在系统的固有特性、工作职能与工作条件等有关。因此,各种类型的水力机械装置均有自己一些最主要的,特别影响其运行安全可靠性和系统经济性的过渡过程问题,需要着重加以研究。

在一般常规发电的水电站中,水轮机装置经常发生起动、停机、大幅度增负荷、突减负荷、事故甩负荷、紧急事故停机、调速系统与防飞逸设施失灵机组甩负荷后进入飞逸工作状态、退出飞逸、发电转调相等一系列过渡过程。研究这些过渡过程问题的目的在于:寻求合理的控制方式,以提高水电站与水轮机组运行的可靠性、速动性、灵活性,从总体上降低水电站与机组的造价,即提高它们的经济性。

在抽水蓄能水电站中,除上述各种过渡过程外,还将经历水泵工作状态下的起动、停机、动力突然切断调节元件不能关闭与迟缓关闭导致水泵水轮机倒流倒转等过渡过程。这些过渡过程,对抽水蓄能电站的安全运转和电力系统的稳定运行有着重要影响。

在一般的水泵站中,水泵装置除经历起动、停机、动力切断等过渡过程外,有时还发生由于供水管阀门突然动作引起的过渡过程及管道中汽水分离的过渡过程。它们可能引起管道中异常的压力升高或压力降低,从而危及设备的安全运行。

在动力式液力传动装置的动力系统中,从动轴的高速制动是最引人注目的过渡过程;在容积式液压传动装置的动力系统中,装置的起动、工作机构的高速制动、滑阀与转阀的迅速动作等,则被视为主要的过渡过程。在这些过渡过程中,均伴有系统压力与

轴端扭矩的突然升高，这是动力系统设计与运行时必须加以充分考虑的问题。

第三节 研究水力机械过渡过程的技术经济意义

研究水力机械过渡过程的目的是，在于揭示各种水力机械及其装置系统在可能经历的各种过渡过程中的动态特性，并寻求改善这些动态特性的合理控制方式和技术措施，以便提高水力机械装置运行的可靠性、速动性、灵活性与总体的经济性，即提高其技术经济水平。

过渡过程中的水力机械及其装置系统均将承受动载，在构件中引起动态附加应力。有时，由于过渡过程品质恶劣，导致很高的动态附加应力，致使这些构件破坏。表1-1示出了水轮机装置过渡过程的一些实际事故。

表1-1 水轮机装置过渡过程的一些事故实例

电站名称	国 别	时 间	水轮机型式	事 故 原 因	事 故 情 况	损 失
拉可-奴 阿尔	法国	1934	混流式 (HL)	控制规律不良， 发生直接水击	钢管末端爆破	厂 房 全 毁，死 9 人
阿 格 瓦	日本	1950	HL	错误操作蝶阀， 造成直接水击	钢管爆破	死伤 4 人
莱 昂	希腊	1955	HL	瞬间关闭闸门	闸门室突然出现 水击冲击波	厂房与闸 门室被毁
大 洪 河	中国	1962	HL	甩负荷后导叶关 闭规律不良，水压 上升过高	压力钢管爆破	
下 洞	中国	1964	HL	甩负荷后水压上 升过高	铸铁水管爆破一 段	
卡 霍 夫	苏联	1956	轴流转桨式 (ZZ)	甩负荷后控制规 律不良	发生反水锤，机 组转动部分上抬	转轮、导 叶、顶盖击 毁，厂房被 淹