



抽水蓄能机组过渡过程

杨建东 编著



科学出版社

抽水蓄能机组过渡过程

杨建东 编著

科学出版社

北京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书全面系统地介绍抽水蓄能机组过渡过程的基本理论、数值模拟、模型试验和原型观测,并列出我国数十台不同比转速水泵水轮机全特性曲线和数座抽水蓄能电站的基本资料、实测数据与模拟结果。全书分为12章,从水泵水轮机全特性空间曲面的构建与变化规律、基于水泵水轮机全特性空间曲面的过渡过程数值模拟与分析、基于水泵水轮机反S特性及脉动特性的导叶关闭规律优化、抽水蓄能电站调压室设置条件与输水管道系统布置准则、抽水蓄能机组过渡过程模型试验与实测反演分析五个方面进行深入浅出地论述,绝大多数内容是武汉大学“水电站过渡过程与控制”课题组近年的研究成果,为解决抽水蓄能机组过渡过程设计和运行面临的主要难题提供理论依据、分析手段和工程措施。

本书可供从事抽水蓄能建设设计、运行、科研和技术管理等方面工作的专业人员阅读,也可作为高等学校研究生和本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

抽水蓄能机组过渡过程/杨建东编著. —北京:科学出版社,2017.6

ISBN 978-7-03-053888-8

I. ①抽… II. ①杨… III. ①抽水蓄能水电站-单元机组-研究 IV. ①TV743

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第142249号

责任编辑:杨光华/责任校对:湛 莉

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉中科兴业印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2017年6月第一版 印张:20 3/4

2017年6月第一次印刷 字数:531 200

定价:198.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

抽水蓄能机组利用电力负荷低谷电能抽水至上水库,储蓄位能,在电力负荷高峰输水发电至下水库。迄今为止,抽水蓄能机组是电力系统中最可靠、最经济、寿命周期长、容量大、技术最成熟的储能装置,是能源生产的重要组成部分。通过配套建设抽水蓄能电站,可提高系统中火电站和核电站运行效率、延长机组寿命、降低维护费用;能有效减少风电场并网运行对电网的冲击,提高风电场和电网运行的协调性;能发挥调频调相、旋转备用、黑启动多重功能,可提高电网供电质量和电网灵活性及可靠性,在特高压、智能电网的发展中起着无可替代的作用。

抽水蓄能电站的出现已有 100 多年的历史。西方国家抽水蓄能起步早,规模大,装机占比在 5%~10%,其中日本早在 2006 年就超过 10%。截至 2016 年,全球抽水蓄能电站总装机容量约 1.4 亿 kW,日本、美国和欧洲诸国的抽水蓄能电站装机容量占全球的 80% 以上。我国抽水蓄能电站装机容量 2 303 万 kW,占全国电力总装机容量的 1.5%,其比重明显偏低。为此,我国制定“十三五”期间抽水蓄能发展目标是:全国新开工抽水蓄能电站 6 000 万 kW,2020 年抽水蓄能总装机容量达到 4 000 万 kW,2025 年达到 9 000 万 kW,以适应新能源大规模开发及保障电力系统安全运行的重大需求。由此可见,今后我国建设抽水蓄能电站的任务相当繁重,发展潜力巨大。

尽管我国抽水蓄能电站建设起步晚,但后发效应明显,起点较高,其中若干座大型抽水蓄能电站已处于世界先进水平。例如,广州、惠州抽水蓄能电站总装机容量 2 400 MW,为世界上最大的抽水蓄能电站;天荒坪等一批抽水蓄能电站单机容量 300 MW,额定水头在 500 m 左右,已达到单级可逆式水泵水轮机世界先进水平;西龙池抽水蓄能电站单级可逆式水泵水轮机组最大扬程 704 m,仅次于日本葛野川和神流川抽水蓄能电站机组。目前正在设计的绩溪、敦煌、阳江抽水蓄能电站,额定水头均超过 700 m,单机容量分别为 350 MW 和 400 MW,标志着我国抽水蓄能建设更新发展和抽水蓄能技术全面提升。

抽水蓄能电站在电力系统发挥的作用越巨大,必然使得机组启停、工况转换越频繁,过渡过程引发的安全隐患越多。据国外的统计,抽水蓄能机组过渡工况平均每小时 0.22~0.25 次;如此繁复的过渡过程,使得抽水蓄能电站输水系统、机组、电气处在急剧变化之中,如果设计缺陷或者控制不当,均有可能引起严重的事故。据不完全统计,我国发生的抽水蓄能电站的事故均与过渡过程有关。这不仅危及电站和机组自身安全,甚至影响电力系统安全。因此,抽水蓄能机组过渡过程成为设计与运行中关键技术问题。该问题主要体现在如下五个方面。

(1) 抽水蓄能机组调节保证不同于常规的水轮发电机组,受水泵水轮机全特性的影响,尤其是反 S 区特性的影响较大,而常规的水轮发电机组调节保证,主要取决于输水管道系统的水流惯量和机组转动惯量。因此,设计阶段套用水头、单机容量、比转速接近水泵水轮机全特性曲线,与机组招标后真机全特性曲线可能存在一定的差异,若两者反 S 区

域差异明显,其调节保证极值将有较大差别,就有可能给机组运行带来安全隐患,也有可能造成工程投资的浪费。

(2) 抽水蓄能机组运行稳定性与调节也不同于常规的水轮发电机组。受水泵水轮机全特性的影响,尤其是反 S 区特性的影响,低水头下抽水蓄能机组空载稳定性一直困扰设计与运行,并且为了满足水轮机工况区运行稳定性及良好的调节品质,也需要划分若干个区间整定调速器参数,但划分的标准缺乏理论依据。

(3) 由于水泵水轮机转轮径向流道较长,反 S 区域不仅对水击压强的作用格外显著,而且导致过渡过程中脉动压强较大,与常规的水轮发电机组有明显的差别。而设计中缺少合适的方法计入脉动压强,仅按经验取值,并且导叶关闭规律选取也缺乏理论依据。因此,设计中难以实现同时减轻水击压强和脉动压强的优化目标。

(4) 由于水泵水轮机在甩负荷中的过机流量呈多峰性,流量由初始值减为零的时间远小于导叶关闭时间,因此常规水电站调压室设置条件不适用于抽水蓄能电站。另外,抽水蓄能电站输水系统布置比常规水电站更为复杂,通常有树状布置和环状布置两种方式。尤其在相继甩负荷、水力干扰等过渡过程中,两者对调节保证极值、机组超出力存在较大的差异。由于缺少对抽水蓄能机组与输水管道系统匹配性的认知,导致工程设计缺乏方向性的引导。

(5) 从抽水蓄能机组过渡过程数值模拟的角度来看,水泵水轮机全特性曲线平面表达方式存在的多值性和对应性问题,即开度线交叉、聚集、扭卷等现象常常导致迭代计算无法收敛,继而造成数值计算结果的异常波动;并且复杂的机组边界条件因求解方法不当,也可能导致无解或错解。

为了解决抽水蓄能电站设计和运行中存在的困惑,促进其过渡过程理论与关键技术的发展,本书从以下五个方面对水泵水轮机全特性与抽水蓄能机组过渡过程进行较系统全面的论述。

(1) 水泵水轮机全特性空间曲面的构建与变化规律,包括第 1~第 3 章。其目的是寻找水泵水轮机全特性更适宜的表征方法,深入了解水泵水轮机流量特性、力矩特性以及流量力矩特性随比转速的变化规律,为探索抽水蓄能机组过渡过程内在机理,指导工程设计和运行奠定基础。

(2) 基于水泵水轮机全特性空间曲面的过渡过程数值模拟与分析,包括第 4~第 6 章。其目的是在建立完整的抽水蓄能机组过渡过程数学模型的基础上,证明机组方程组唯一解,提高大波动、小波动及水力干扰等过渡过程的模拟精度;且建立反 S 特性与机组甩负荷水击压强的内在联系,以及与飞逸稳定性、空载稳定性、运行稳定性及调节品质的内在联系,为优化导叶关闭规律及整定调速器参数奠定基础。

(3) 基于水泵水轮机反 S 特性及脉动特性的导叶关闭规律优化,包括第 7~第 8 章。其目的是寻找抽水蓄能机组甩负荷过渡过程脉动压强的模拟方法,探索水泵水轮机反 S 特性和脉动特性随导叶开度及工况点的变化规律,探讨反 S 特性和脉动特性与调节保证极值的关联性,为导叶关闭规律选取、优化提供科学的依据。

(4) 抽水蓄能电站调压室设置条件与输水管道系统布置准则,包括第 9~第 10 章。其目的是合理地推导抽水蓄能电站上游调压室、下游调压室设置条件,探讨输水管道系统布置

形式、各部分的水流惯性加速时间 T_w 对调节保证、受干扰机组超出力的作用,尤其是极端工况——机组相继甩负荷。确定输水管道系统布置准则,为工程设计提供理论依据。

(5) 抽水蓄能机组过渡过程模型试验与实测反演分析,包括第 11~第 12 章。其目的是通过模型试验与原型实测,了解过渡过程常规工况和极端工况时程变化和脉动压强的频谱特性,发现未知的特征及规律,剖析影响调节保证极值的各种因素及内在的关联,为发展抽水蓄能机组过渡过程理论、改进完善计算分析软件、提高抽水蓄能电站设计和运行水平提供有力支撑。

本书的撰写出版得到过许多支持。由衷地感谢国家自然科学基金重点项目“基于空间曲面的水泵水轮机全特性及过渡过程研究”(51039005)的资助和参与项目的程永光教授和邹秀芬教授等;感谢武汉大学“985 工程”建设抽水蓄能过渡过程实验场;感谢国网新源控股有限公司、南方电网调峰调频发电公司、广东省水利电力勘测设计研究院、中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司近 20 年的科研合作,以及为本书提供大量的设计运行资料及工程需求;感谢历届参与该课题的研究生,尤其是杨桀彬、曾威、郭文成、鲍海艳、付亮、王超、李玲、刘艳娜、丁景焕、曾艳梅、谢为成等,以及在读的研究生胡金弘、唐韧博等,他们辛勤的努力和丰富的成果(见各章有关的参考文献)为本书的撰写奠定了基础,也让我们共同参与并见证了我国抽水蓄能建设的发展进程。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

杨建东

2016 年 12 月 21 日

于武汉大学水利水电学院

目 录

第 1 章 水泵水轮机全特性空间曲面表征与构建	1
1.1 水泵水轮机全特性的表征方式	1
1.1.1 四象限全特性平面表征方式	1
1.1.2 单位参数为纵横坐标的全特性平面表征方式	4
1.1.3 全特性空间曲面的表征方式	4
1.2 全特性 NURBS 曲面重建与外延理论	5
1.2.1 曲线与曲面的参数表达	5
1.2.2 NURBS 基本概念	6
1.2.3 曲面拟合参数优化算法	8
1.2.4 全特性曲面开度内插	12
1.2.5 全特性曲面开度线外延	12
1.3 实例分析	17
1.3.1 重构曲面对原始数据点逼近精度分析	21
1.3.2 重构曲面内插开度线精度分析	23
1.3.3 重构曲面外延开度线精度分析	26
参考文献	29
符号说明	30
第 2 章 水泵水轮机全特性变化规律	34
2.1 全特性曲线数据库建立	34
2.1.1 水泵水轮机特征参数标准化	34
2.1.2 数据库建立	35
2.2 全特性曲线特征点的变化规律	37
2.2.1 全特性曲线特征点与比转速	37
2.2.2 回归分析基本理论	37
2.2.3 高效点单位参数与比转速的统计性分析	38
2.2.4 坐标交点单位参数与比转速的统计性分析	40
2.3 全特性空间曲面特征交线的变化规律	41
2.3.1 特征交线定义与提取	41
2.3.2 特征交线理论公式推导和理想化处理	44
2.3.3 任意比转速特征交线构造	50

2.3.4 特征交线变化规律	54
参考文献	54
符号说明	55
第3章 任意比转速水泵水轮机全特性曲线构造	59
3.1 全特性多区间的空间变换	60
3.1.1 全特性曲线分区与标准化	60
3.1.2 全特性曲线的空间变换	61
3.2 任意比转速全特性曲线的构造方法	64
3.2.1 四维数据建立与插值	64
3.2.2 全特性曲线的逆变换与构造结果	65
3.2.3 反 S 曲线处理	67
3.3 基于 Java 与 Matlab 混合编程实现全特性曲线的构造	69
3.3.1 Java 和 Matlab 混合编程原理	69
3.3.2 全特性构造系统的设计	69
参考文献	71
符号说明	72
第4章 基于全特性空间曲面过渡过程的数学模型	74
4.1 基于空间曲面的水轮发电机组过渡过程的数学模型	75
4.1.1 有压管道非恒定流方程	75
4.1.2 发电机一阶方程	76
4.1.3 导叶运动方程或调速器方程	76
4.1.4 水轮机特性方程	79
4.2 基于转速偏差函数且给定导叶开度的机组边界条件求解	80
4.2.1 求解流程	80
4.2.2 Ω 的单调性及在搜索边界的符号判别	81
4.3 实例分析	86
参考文献	88
符号说明	89
第5章 水泵水轮机反 S 特性与机组过渡过程	93
5.1 水泵水轮机反 S 特性形成机理与测量	93
5.1.1 反 S 特性形成机理	93
5.1.2 反 S 特性曲线测量	99
5.2 反 S 特性与飞逸稳定性的内在联系	101
5.2.1 数学模型	101
5.2.2 波动解析分解	102

5.2.3 飞逸稳定性及影响因素	104
5.2.4 模型试验及与数值模拟的对比	107
5.2.5 小结	108
5.3 反 S 特性与甩负荷水击压强的内在联系	108
5.3.1 数学模型	109
5.3.2 反 S 区过渡过程特性	111
5.3.3 反 S 特性与水击压强关联性	112
5.3.4 小结	114
参考文献	114
符号说明	116
第 6 章 基于反 S 特性的运行稳定性及调节品质	119
6.1 水泵水轮机调节系统的线性数学模型	119
6.1.1 输水管道子系统的水击模型	119
6.1.2 水轮机模型	123
6.1.3 调速器模型	126
6.1.4 发电机-负荷模型	128
6.2 水轮机工作区域的稳定性	129
6.2.1 依据林纳德-奇帕特判据的稳定性分析	129
6.2.2 采用非线性数学模型进行稳定性验证及调节品质分析	131
6.3 水泵水轮机空载稳定性	137
6.3.1 空载点的水轮机调节系统数学模型	137
6.3.2 空载工况波动特性分析	139
6.3.3 空载扰动数值仿真	141
参考文献	142
符号说明	143
第 7 章 水泵水轮机过渡过程中脉动压强的数值模拟	146
7.1 实测压强波动信号的时频和频域分析	147
7.1.1 实测压强波动信号的时域分析	147
7.1.2 实测压强波动信号的频域分析	151
7.2 利用水泵水轮机模型试验脉动压强等值线图的脉动压强的模拟方法	152
7.2.1 脉动压强等值线的分布特点及外延	153
7.2.2 脉动压强等值线的内插算法	154
7.3 实例分析及对过渡过程中脉动压强的几点认识	157
参考文献	164
符号说明	165

第 8 章 基于反 S 特性及脉动压强的导叶关闭规律优化	168
8.1 基于反 S 特性与脉动压强的水轮机甩负荷工况导叶关闭规律优化理论	168
8.1.1 时间步长内水头平方根 X 的变化规律的理论分析	169
8.1.2 时间步长内工况点移动有向线段的分类及 ΔX 符号变化	171
8.1.3 机组甩负荷导叶拒动工况轨迹线分区与 X 变化分析	173
8.1.4 机组甩负荷导叶关闭条件下轨迹线夹角变化对各分区 ΔX 的影响	174
8.1.5 基于反 S 特性的导叶关闭规律的优化原则	176
8.2 各种导叶关闭规律的对比分析	183
8.2.1 直线关闭规律与先快后慢的两段折线关闭规律	183
8.2.2 延时+快关及先慢后快两段折线关闭规律、快关+延时+快关的三段折线关闭规律	186
8.2.3 球阀与导叶联动的关闭规律	187
8.2.4 导叶不同步装置及关闭规律	189
8.2.5 水轮机工况各种导叶关闭规律的应用情况	192
8.3 水泵断电工况特点及导叶关闭规律优化	193
8.3.1 水泵工况初始开度的选择	193
8.3.2 水泵断电工况过渡过程的轨迹线与导叶关闭规律的优化	194
8.3.3 水泵断电工况导叶关闭规律的应用情况	196
参考文献	196
符号说明	197
第 9 章 抽水蓄能机组水力干扰与相继甩负荷	200
9.1 水力干扰过渡过程	200
9.1.1 水力干扰数学模型	200
9.1.2 水力干扰模拟与分析	205
9.1.3 原型试验验证	214
9.1.4 小结	216
9.2 抽水蓄能机组相继甩负荷	217
9.2.1 数学模型	217
9.2.2 相继甩水击压强上升机理	221
9.2.3 验证与工程措施	223
9.2.4 小结	225
参考文献	226
符号说明	227
第 10 章 抽水蓄能电站调压室水力设计	231
10.1 基于调节保证控制的抽水蓄能电站调压室设置条件	231

10.1.1	抽水蓄能机组过流特性	231
10.1.2	快速减小段流量变化过程的模拟及流量有效减小时间 T_e 的推导	232
10.1.3	上游调压室设置条件及工程实例	236
10.1.4	下游调压室设置条件及工程实例	240
10.2	“引水道-上下游双调压室”系统的运行稳定性	242
10.2.1	基本方程与波动稳定条件	242
10.2.2	稳定域变化的一般规律	243
10.2.3	稳定断面的设计准则与要点	247
10.3	连接管对“引水道-调压室”系统运行稳定性的影响	248
10.3.1	长连接管调压室稳定断面的推导	248
10.3.2	动态调节品质分析	252
	参考文献	254
	符号说明	256
第 11 章	抽水蓄能机组过渡过程模型试验	262
11.1	模型试验设计	262
11.1.1	输水管道系统模型相似率	262
11.1.2	调压室模型相似率	264
11.1.3	水泵水轮机模型相似率	265
11.1.4	调速器模型相似率	266
11.1.5	发电机电动机模型相似率	268
11.1.6	正态模型相似率与变态模型相似率	269
11.2	模型试验装置	270
11.2.1	模型管道与循环水道设计	271
11.2.2	模型抽水蓄能机组	272
11.2.3	电气与控制系统	274
11.2.4	量测系统	275
11.3	模型试验结果	277
11.3.1	水泵水轮机反 S 特性的动态测试	277
11.3.2	飞逸稳定性试验	278
11.3.3	机组甩负荷试验	280
11.3.4	两台机组相继甩负荷试验	281
11.3.5	导叶关闭规律试验	282
	参考文献	283
	符号说明	284

第 12 章 抽水蓄能机组调试试验与反演预测分析	288
12.1 调试试验与反演预测分析的基本要求	288
12.1.1 测试的物理量及相应测点的布置	288
12.1.2 传感器的类型、精度、量程与频率的选取	290
12.1.3 数据采集	292
12.2 反演及预测计算分析	293
12.2.1 反演预测计算所需资料	293
12.2.2 反演计算分析	301
12.2.3 预测计算分析	303
12.3 工程实例分析	305
12.3.1 黑麋峰抽水蓄能电站调试试验结果的时频分析	305
12.3.2 洪屏抽水蓄能电站调试试验反演及预测分析	311
参考文献	319
符号说明	320

第 1 章 水泵水轮机全特性空间曲面表征与构建

水泵水轮机全特性通常由转轮模型实验获得,该全特性曲线在抽水蓄能电站设计和运行中起着关键性的作用,尤其在过渡过程中。例如,水泵断电工况,在失去动力之后,管道中水流在其自重的作用下迅速减速,出现反向流动,从水泵工况区跨越到水泵制动工况区;若导叶关闭较慢或者拒动,则转轮在反向水流作用下,机组转速逐渐下降至零,并向相反的方向转动,此时水流方向和机组转动方向均与水轮机工况相同,即进入了水轮机工况区。若导叶拒动,则机组转速达到飞逸点,进入水轮机制动工况区,甚至进入反水泵工况区。上述整个过程经历了水泵工况区、水泵制动工况区、水轮机工况区、水轮机制动工况区与反水泵工况区 5 个区域。为了正确方便地研究水泵水轮机全特性对水泵水轮机转轮水力设计、抽水蓄能电站输水系统设计、调节保证设计、机组运行(机组启动、工况转换、过渡过程等)的作用,有必要对水泵水轮机全特性进行精细化的数值处理与表达。为此,本章首先对传统的水泵水轮机全特性表征方式予以介绍,指出其问题所在;其次提出水泵水轮机全特性空间曲面的表征方式及曲面构建、内插、外延的理论与方法;最后通过水泵水轮机全特性实例,讨论重构曲面的精度。

1.1 水泵水轮机全特性的表征方式

1.1.1 四象限全特性平面表征方式

20 世纪 30 年代,苏联的沙波夫将水力机械全特性实验得到的各种工作状态下的特性综合地用一簇射线来表示,即称为水力机械的全特性。它是在固定水轮机转轮直径 D_1 和导叶开度 α 的前提下,以横坐标表示流量,纵坐标表示转速,在坐标平面上划分水力机械不同的工作状态区域。图 1.1 即为该表征方式下的反击式水力机械四象限特性图。

图 1.1 根据流量 Q 、转速 n 、水头 H 与力矩 M (或者效率 η)的正、负、零,将水力机械的工作状态划分为 8 个区域,按顺序用罗马数字 I~VIII 表示,其中 I 为正向水轮机工况区;V 为反向水轮机工况区;VII 为正向水泵工况区;III 为反向水泵工况区;II、IV、VI、VIII 均为制动工况区。制动工况区总是介于水轮机和水泵工况区之间,是它们的过渡工况。各区域水力机械的工作参数的变化汇总于表 1.1。

装有可逆式水泵水轮机的抽水蓄能机组,其正常工况处于 I 区和 VII 区;但对于过渡过程,如水泵断电,机组有可能经过 VII、VIII、I、II 及 III 5 个区域。

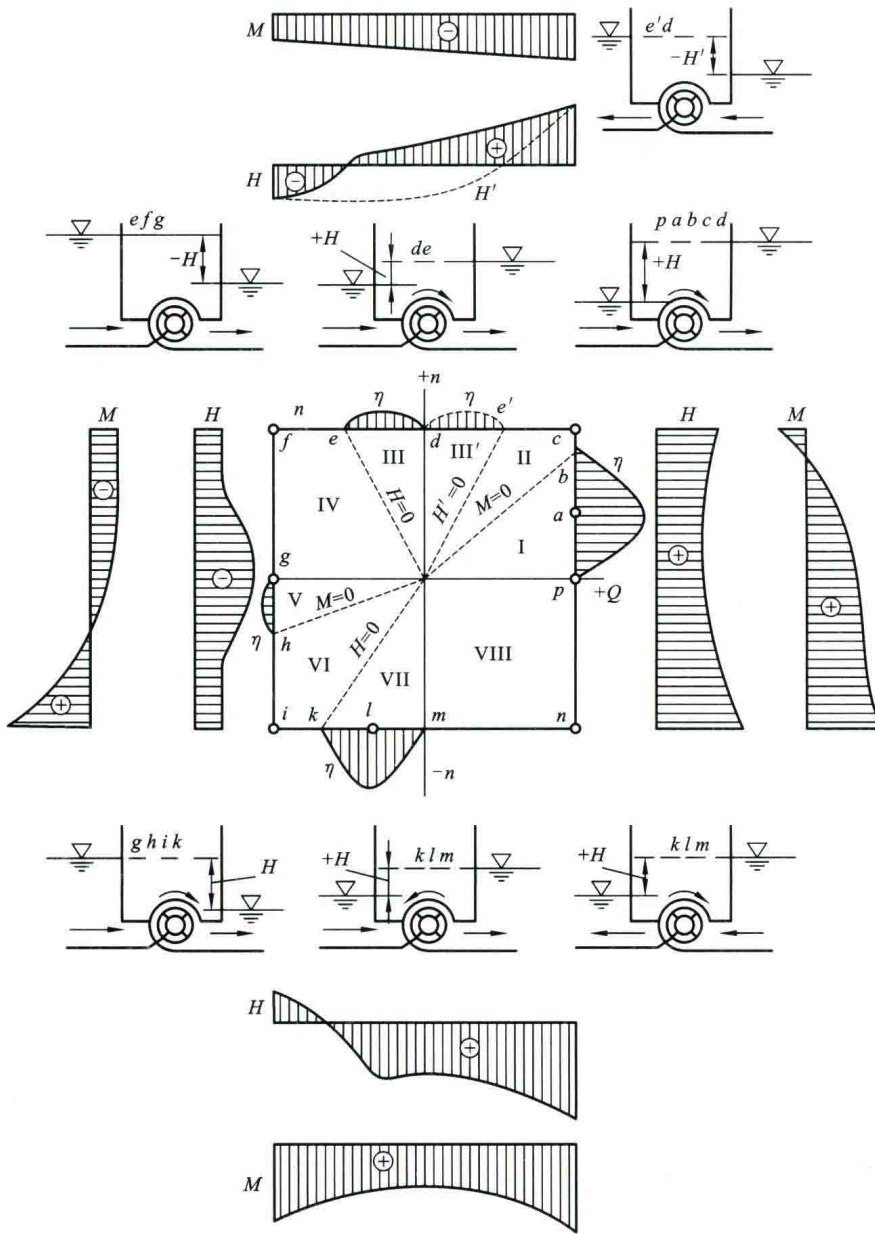


图 1.1 反击式水力机械四象限特性^[1]

表 1.1 四象限每个工况区域的工作参数和每条分界线的特征

序号	区域	范围	分界线特征							
			$\eta=0$	Q	n	H	η	M	M_n	E_{in}/E_{out}
I	水轮机工况区	pab	$n=0$	+	+	+	+	+	>0	>1
II	水轮机制动工况区	bcd	$M=0$	+	+	+	-	-	<0	>1
III	反水泵工况区	de	$Q=0$	-	+	+	+	-	<0	<1
IV	反水泵制动工况区	efg	$H=0$	-	+	-	-	-	<0	>1
V	反水轮机工况区	gh	$n=0$	-	-	-	+	-	>0	>1
VI	反水轮机制动工况区	hik	$M=0$	-	-	-	-	+	<0	>1

续表

序号	区域	范围	分界线特征 $\eta=0$	Q	n	H	η	M	M_n	E_{in}/E_{out}
VII	水泵工况区	klm	$H=0$	-	-	+	+	+	<0	<1
VIII	水泵制动工况区	mnp	$Q=0$	+	-	+	-	+	<0	>1

注:沿水流流动方向,将流进水力机械的水流单位能量定义为进口处水流能量 E_{in} , 流出水力机械的水流单位能量定义为出口处水流能量 E_{out}

图 1.2 给出了混流式水力机械的四象限特性。该图中实线表示水头,虚线表示力矩,清晰地显示了反击式水力机械四象限八工况区域的全特性。但一张图只能表示固定直径与导叶开度(若转桨式水轮机,桨叶转角也是固定的)下的参数与特性之间的变化规律。若直径与开度是变化的,则应用起来就很不方便。因此,采用以单位转速 n_1' 和单位流量 Q_1' 为纵横坐标的综合特性曲线形式来描述反击式水力机械全特性变化规律是更为合适的。

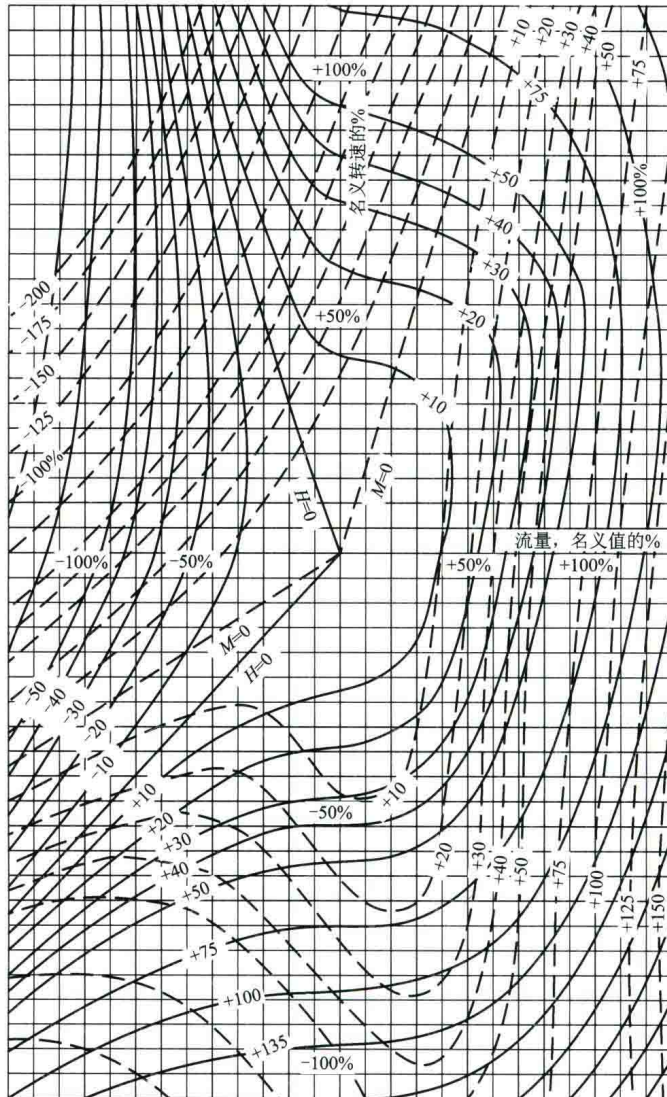


图 1.2 混流式水力机械的四象限特性^[1]

1.1.2 单位参数为纵横坐标的全特性平面表征方式

水泵水轮机通常分别采用 $Q'_1 \sim n'_1$ 和 $M'_1 \sim n'_1$ 为纵横坐标, 以导叶开度 α 为参变量来描述其流量特性曲线和力矩特性曲线, 即水泵水轮机全特性曲线, 如图 1.3 所示。

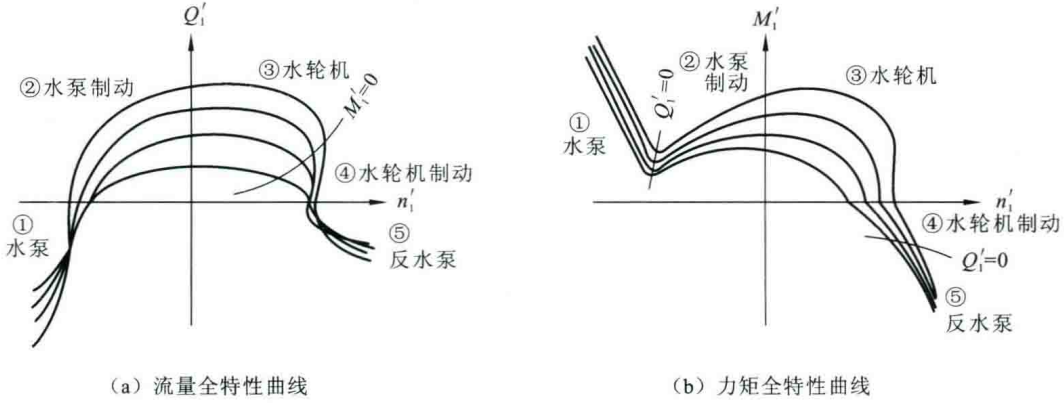


图 1.3 水泵水轮机全特性曲线^[2]

抽水蓄能电站有着固定的上、下游水位关系, 所以工况点变动范围在水泵水轮机全特性曲线中只占据 5 个工况区域。对于流量全特性曲线, 在第一象限中以 $M'_1=0$ 为界, 分为水轮机工况区和水轮机制动工况区, 第二象限为水泵制动工况区, 第三象限为水泵工况区, 第四象限为反水泵工况区; 对于力矩全特性曲线, 第一象限为正向水轮机工况区, 第二象限以 $Q'_1=0$ 为界, 分为水泵制动工况区和水泵工况区, 第四象限以 $Q'_1=0$ 为界, 分为水轮机制动工况区和反水泵工况区。

由图 1.3 可知, 水泵水轮机流量特性和力矩特性随导叶开度、单位转速呈强烈的非线性变化, 尤其在水泵工况区、水泵制动工况区之间, 以及在水轮机工况区、水轮机制动工况区及反水泵工况区之间均出现了开度线交叉、聚集、扭卷等现象, 并且曲线在这两个区间范围内呈反“S”形, 即出现了对应于同一开度 α 和单位转速 n'_1 , 有着两个不同的单位流量 Q'_1 或单位力矩 M'_1 的多值现象。这两个区间范围分别被称为全特性曲线的驼峰区和反 S 区, 它们是造成机组启动并网困难、功率频率调节难以满足要求、过渡过程中脉动压强巨大和水力振动异常剧烈等问题的根源所在。然而传统的平面曲线表达方式无法研究和破解全特性开度线交叉、聚集、扭卷等强烈非线性现象, 而且由于插值的误差, 由导叶开度和单位转速 n'_1 分别建立计算式求得的单位流量 Q'_1 和单位力矩 M'_1 , 有可能并没有完全对应于同一工况点。因此, 多值的问题与对应的问题有可能导致迭代计算无法收敛, 继而造成数值计算结果的异常波动。

1.1.3 全特性空间曲面的表征方式

由于水泵水轮机全特性可以表示为上述 4 个参数连续变化的非线性函数, 因此可将水泵水轮机全特性表征为空间坐标系 $On'_1Q'_1M'_1$ 下以开度 α 为参变量的空间曲面。在微分几何的计算机辅助几何设计 (computer aided geometric design, CAGD)^[3] 中, 描述空间曲线曲面的数学模型不胜枚举, 具有代表意义的如弗格森 (Ferguson) 参数曲线曲面、孔斯

(Coons)双三次样条曲面、贝齐尔(Bézier)曲线曲面、B样条曲线曲面、非均匀有理B样条曲线曲面等。无论采用哪种数学模型来表达,其都采用参数曲面的表示法,且曲面的表达式均为基函数与系数矢量乘积再求和的形式。该表达方式可有效地解决上述全特性传统处理方法中存在的两个问题:①参数方程表示的曲线曲面很容易处理多值问题,只要参数选取得当,多值的问题将不复存在;②基函数决定了曲线曲面的基本性质,系数矢量的三个分量表达了空间点的三个坐标,而且同一点三个坐标分量的基函数相同,于是有助于解决对应的问题。另外,由于非均匀有理B样条^[4](non-uniform rational B-spline, NURBS)是用于曲线曲面描述的最广为流行的数学方法,因此本章选择 NURBS 曲线曲面作为水泵水轮机全特性空间曲线曲面的数学模型。

1.2 全特性 NURBS 曲面重建与外延理论

1.2.1 曲线与曲面的参数表达

曲线与曲面的表达方法可分为参数表达与非参数表达两种。非参数表达方法又分为显式与隐式两种。

对于一平面曲线,式(1.1)和式(1.2)均为其直角坐标下非参数表达方法,其中,式(1.1)为显式方程,式(1.2)为隐式方程。

$$y=f(x) \quad (1.1)$$

$$F(x, y)=0 \quad (1.2)$$

但是,所有非参数方程(无论显式还是隐式)均存在以下问题^[5]:①与坐标轴相关;②不易处理无穷大斜率;③对于空间曲线、曲面难以用常系数的非参数化函数表示;④不易处理多值问题;⑤不易计算曲线、曲面上的点及其他信息,如采用隐式方程表达时,计算曲线或曲面上一点需求解一个非线性方程组;⑥不便于曲线、曲面的分段、分片描述;⑦不易于解决高维问题等。而参数方程表达的曲线曲面,就能够解决上述问题。

在参数表达方法中,空间曲线上的一点 p 的 3 个坐标都可写成某个独立参数 u 的标量函数,即

$$x=x(u), \quad y=y(u), \quad z=z(u) \quad (1.3)$$

式(1.3)还有另一种表达方法^[5],即

$$\mathbf{p}=\mathbf{p}(u) \quad (1.4)$$

式(1.4)的左边为该点位置矢量 $\mathbf{p}=[x \quad y \quad z]$,右边 $\mathbf{p}(u)=[x(u) \quad y(u) \quad z(u)]$ 表示 \mathbf{p} 是参数 u 的矢函数。如果用基函数形式来表达曲线,则有

$$\mathbf{p}=\mathbf{p}(u)=\sum_{i=0}^n \mathbf{a}_i \varphi_i(u) \quad (1.5)$$

式中, $\varphi_i(u)$ ($i=0, 1, \dots, n$) 为基函数,决定了曲线的整体性质; \mathbf{a}_i ($i=0, 1, \dots, n$) 称为系数矢量。

曲面表达方法与曲线类似,它通常被表示成双参数 u 和 v 的矢函数^[5]:

$$\mathbf{p}=\mathbf{p}(u, v) \quad (1.6)$$

相应地以基函数形式来表达曲面,则有