



常兆堂 姜之琦 陈仲华 编著

水轮机调节系统 原理 试验与 故障处理

中国电力出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

水轮机调节系统原理、试验及故障处理/常兆堂等编
著. -北京: 中国电力出版社, 1995

ISBN 7-80125-008-7

I. 水… II. 常… III. 水轮机-调节系统-试验-
故障修复 IV. TK730

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 05686 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京地矿局印刷厂印刷

各地新华书店经售

1995 年 9 月第一版 1995 年 9 月北京第一次印刷

850×1168 毫米 32 开本 11.75 印张 310 千字 1 插页

印数 0001—3010 册 定价 20.90 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

序

《水轮机调节系统原理、试验与故障处理》一书是水轮机调节方面的一本科技专著。它集中反映了当前我国水轮机调节技术方面的水平、现状和发展趋势。书中既有系统原理的阐述,又有实际经验的总结,还有典型产品的介绍,涵盖颇广,有较高的实用价值。

第三章中,作者全面介绍了微机调速器,内容包括:①国内外发展动态;②以国产 SJ-100 系列微机调速器为例全面介绍微机调速器的基本工作原理、系统结构、技术参数、主要功能和硬软件配置等;③对 1990 年国家级新产品的 WDT-A 系列水轮机双微机调速器作了较为详尽的介绍。内容丰富,数据翔实。

第四章介绍数字仿真系统及其在水轮机调节系统方面的应用。作者详细地阐述了数字仿真的原理和方法。在应用实例中,列举了“调节对象实时仿真系统”,“水轮机调节系统实时仿真”和“适应式变参数 PID 微机调速器参数寻优仿真”等三种仿真应用。内容全面、丰富。

第五章关于现场测试技术。作者对动态过程现场试验的要求、实际做法以及所使用的传感器和仪器都做了详细介绍。毫无疑问,其内容对现场试验有指导意义。

第六章是有关技术规程的介绍。作者着重介绍了我国国家标准和对水轮机调速器的技术要求。分为“部件和整机静态特性及死区的测定”、“缓冲装置试验”、“暂态转差系数 b_t 的测试和刻度检验”、“接力器时间常数 T_y 的测定”、“速动时间常数 T_x 的测定”、“加速时间常数 T_a 的标定和测量”和“主接力器开启和关闭时间的测量和整定”等 7 个部分详细介绍了各种参数的测量和整定方法。

第七章收纳了我国 80 年代至 90 年代初期,对运行中的水电

厂调速系统三次大规模调查的总结内容。作者详尽地分析了各种故障的成因，并逐一提出了改进措施和解决问题的方法。这三次调查总结，对提高我国水轮机调速器的制造质量，提高水轮发电机组安全运行水平有其不可低估的意义。对今后我国水轮机调速系统的发展也会有一定的影响。

上举数端，足以说明本书富有从实践中提炼出来的知识内容。在第一章和第二章中，作者对水轮机调速器的理论基础和技术基础作了系统阐述。它也是本书不可缺少的部分。

本书作者都是从事水轮机调节系统行业工作数十年的专家。本书是他们理论素养和几十年实践经验的结晶，是一笔宝贵的财富。希望读者能喜爱它，并能从中获得收益。

杨德晔

1995年7月8日

前 言

本书是在全国调速器学习班多次使用的教材的基础上,经过广泛征求意见,几经修改、补充、编写而成的。

水利水电科学研究院机电所早在 60 年代就举办过多次 T 型调速器运行技术学习班,学习班使用教材《T 型调速器运行技术学习班讲义》虽经多次重印,但数量仍不足使用。1981 年水利水电建设总局委托水电部第十二工程局在富春江先后举办过两期电液调速器学习班;1983 年在北京电机工程学会的支持下,水科院自动化所在北京举办了全国调速器学习班,所用教材《水轮机自动调节及测试技术》很受欢迎。再版后,次年在新疆又举办了一次全国调速器学习班。作为 T 型和电液调速器学习班教材编写人之一和北京、新疆调速器学习班教材编写人和组织者,积多年之经验,深感这些印数不多而又颇受欢迎的教材很有正式出版的必要。

在正式出版稿编写、整理之前曾大量征求了部里的意见,在内容取舍和章节安排上做了必要的调整。经与另外两位原作者——清华大学姜之琦和水利水电科学研究院自动化所孔昭年共同研究决定,正式出版时书名改为《水轮机调节系统原理、结构与试验》。书稿完成后,河海大学沈祖诒教授审阅了全书。遗憾的是,由于受到出版经费的困扰,一直未能付印。1992 年 11 月,本书得到了电力科技专著出版基金的支持,才有了重新出版的机会。

由于微机技术的飞速发展,调速技术的不断更新、进步,为反映现代最新成果,对书稿又做了大量删节和补充。删去的章节有:机械液压调速器;电液调速器部分节段,调节保证计算一章。新补充的内容有:数字式微机调速器;数字仿真系统及其应用;调速系统故障处理等。另外,对原有章节也作了一些修改,书名也相应改为《水轮机调节系统原理、试验与故障处理》。

全书共分七章,第一章、第六章、第七章由常兆堂编写;第

二章由清华大学姜之琦教授、南京自动化研究所陈仲华高级工程师和常兆堂共同编写；第三章主要由陈仲华高工执笔，其中第一节由华中理工大学研究生院院长叶鲁卿教授撰写，第六节由常兆堂编写；第四章、第五章由姜之琦教授编写。附录一、二、三由常兆堂整理汇编。经征得有关单位同意，将GB10967作为附录四转载与此，以方便使用。全书由常兆堂统稿。受原水利电力出版社委托，叶鲁卿教授仔细审核、校阅了书稿，承蒙提出许多宝贵意见，在此深表谢意。

在本书编写和出版过程中，得到不少有关领导的关心以及许多同行专家的大力支持。特别是得到中国科学院院士、工程院副院长电力工业部潘家铮总工的热情鼓励；还得到电力工业部科技司邴凤山副司长、江哲生处长，中电联辛德培副主任，以及水利部信息中心杨德晔主任、三峡重大办沙锡林主任等领导同志的多方关心和支持。还有不少调速设备生产研制单位的同行专家提供了丰富的技术资料、信息和其他方面的帮助与支援，如富春江水电设备总厂俞振甫总工、钱君佐总工；武汉水电控制设备公司陈杏君总工；湖南新特自控设备公司周泰经总经理；南京自动化所顾煜麟所长、陈仲华高工、曾继伦总工；长江控制设备研究所吴应文所长、郭建业总工等，在此谨一并向他们致以诚挚的谢意！

本书既有系统的理论知识，又有丰富的实践经验总结，因此实用性很强。书中还包含了最新的微机调速器设计、制造和测试内容。不仅适合于生产制造、设计科研、安装方面的工程技术人员使用，也可供电站运行、维修、调试人员使用，大专院校师生也可作为专业参考书。

由于作者们水平所限以及掌握的技术资料有一定局限性，书中难免有一些不足之处甚至错误和疏漏。敬请同行专家和广大读者不吝赐教指正，不胜感激。

常兆堂

1994年6月

目 录

序

前 言

第一章 水轮机调速器概述和理论基础	1
第一节 水轮机调速器的技术进步.....	1
第二节 国产调速器产品系列简介.....	5
第三节 调速器的功能和技术要求.....	7
第四节 水轮机调速器的环节特性.....	9
第五节 传递函数简介	23
第六节 调速器的传递函数	40
第七节 频率特性简介	48
第八节 水轮机调速系统的对数频率特性	55
第九节 调速器的动态特性分析	62
参考文献	68
第二章 现代水轮机电液调速器	70
第一节 概述	70
第二节 电气控制单元	72
第三节 电液随动系统	78
第四节 位电转换器	99
第五节 选择调速器应考虑的主要因素.....	102
第六节 模拟式电液调速器实例.....	109
第七节 电液调速器现阶段发展概况.....	119
参考文献.....	128
第三章 数字式微机调速器	130
第一节 微机调速器国内外发展现状及趋势.....	130
第二节 微机调速器的系统结构与组成.....	139
第三节 主要功能及辅助功能.....	149

第四节	基本工作原理	153
第五节	软件说明	164
第六节	WDT—A 系列微机调速器	174
	参考文献	183
第四章	数字仿真系统及其应用	186
第一节	概述	186
第二节	计算机仿真方法	192
第三节	数字仿真应用实例	211
	参考文献	220
第五章	现场试验与量测技术	221
第一节	概述	221
第二节	传感器	223
第三节	常用仪器	227
第四节	水轮机调节系统动态过程现场试验	235
第五节	目前现场试验的状况及发展趋势	241
	参考文献	245
第六章	水轮机调速器的技术规程	246
第一节	调速器技术规程简介	246
第二节	对水轮机调速器的技术要求	251
第三节	对调速器各机构的要求	253
第四节	部件和整机静态特性及死区的测定	255
第五节	缓冲装置试验	257
第六节	暂态转差系数 b_t 的测试和刻度检验	261
第七节	接力器时间常数 T_r 的测定	263
第八节	速动时间常数 T_x 的测定	264
第九节	加速时间常数 T_a 的标定和测量	267
第十节	主接力器开启和关闭时间的测量和整定	269
	参考文献	272
第七章	水轮机调速系统故障处理	273
第一节	调速设备质量及故障调查	273

第二节	电液转换器故障及其处理·····	285
第三节	液压平衡的蠕变 (DT、DST 系列大型电调) ·····	293
第四节	缓冲电容漏电及接力器抽动·····	297
第五节	主配压阀大幅度跳动及其处理·····	302
第六节	水轮机调节系统的摆动·····	305
第七节	安全阀常见故障及其处理·····	315
参考文献	·····	323
附录一	部分厂家、研制生产单位微机 调速器品种介绍·····	325
附录二	调速器单元部件及自动化装置、仪表简介·····	328
附录三	部分微机调速器运行电站统计·····	330
附录四	水轮机调速器与油压装置术语 (GB 10967-89) ·····	335

第一章 水轮机调速器概述和 理 论 基 础

第一节 水轮机调速器的技术进步

水轮机调速器在水电厂中的应用有很长的历史了。早在 1901 年以前就有用皮带作为放大环节的机械离心飞摆式调速器问世。以后又发展成为水压放大、油压放大式的机械调速器。机械调速器在本世纪 50 年代末达到全盛时期。瑞典在 1944 年就生产了电液调速器。50 年代末和 60 年代是电液调速器大规模迅速发展的时期，至今代表当代水平的电调已达到相当完善的程度。

电调的发展大致经历了这样几个阶段：起初是电子管式的，也就是用电子管做成电气放大器，以电气测频回路代替了机械式离心飞摆；后来晶体管代替了电子管，因此又出现了晶体管式电液调速器；70 年代大规模集成电路技术发展迅速，集成电路运算放大器应用于水轮机调速器，于是电液调速器也就逐渐由分离元件发展成集成电路结构。

从调速器所形成的控制规律来看，调速器的发展也很迅速。最早的调速器是个比例环节，即形成比例控制规律，用符号 P 表示。后来绝大多数调速器都设计成具有比例积分式的控制规律，即 PI 型调速器， I 表示积分作用。到 50 年代末和 60 年代初，由于采用按加速度调节作用，于是具有 $P-I-D$ 控制规律的调速器相继问世，此处 D 表示微分控制作用。如瑞典 ASEA 公司出产的 FRVV-103 型电液调速器；法国 NEYRPIC 公司生产的 RAPID 型电液调速器，都具有 $P-I-D$ 控制规律。70 年代中期， PID 调节器直接应用到了水轮机调速器上，出现了 PID 型，也就是比例 (P)、积分 (I)、微分 (D) 环节并联的新式调速器。其积分作用也是靠电气环节产生的，这与前述 $P-I-D$ 调速器中积分作用靠油压接力器来产生是

一个明显的区别。这种 PID 型调速器静态质量好，动态性能指标也好，是当前世界上较为先进的电液调速器之一（以后为了叙述方便，用符号 P-I-D 代表具有 P、I、D 控制规律的电调，其中包括 P-I-D-1 型加速度式调速器；而用符号 PID 代表 P、I、D 环节并联的具有 P、I、D 控制规律的电调）。

我国的电气液压式调速器早在 50 年代末就开始研制了。1961 年我国自己制造的第一台电调在流溪河电厂投入运行。此后又试制了电子管式 DT 型电调。60~70 年代中期，我国电调的发展十分迅速，差不多各厂各单位都能试制晶体管式电调，品种繁多，规格不一。1978 年纳入调速器系列型谱的电调只有两种：一种是金城江水电设备厂生产的 YDT-1800 型中型电调；一种是长江水利委员会设计由武汉热工仪表厂生产制造的 DST-100 型大型双调整式电液调速器。

世界上第一台数字调速器是加拿大在 70 年代初期研制成功的；1976 年加拿大又研制出了实时数字式调速器；1981 年他们又发表了自适应式数字调速器的试验结果。瑞典于 1978 年制成了适用于卡普兰式机组的数控协联装置，它还有开、停机变动负荷等其他功能。该装置已用于 Bagede 电站的机组控制。

英国格勒斯哥大学和苏格兰水电局合作从 1975 年开始研究微处理机数字调速器。起先用的是 Intel 公司的 8008 处理器，使用汇编语言编写程序；后来改进为 Intel 8080 微处理器，并使用高级语言——FORTRAN 来开发。70 年代末他们研制出了以微处理机为基础的自适应式水轮机调速器。这种调速器已在苏格兰的斯劳伊（SLOY）电厂的 32.5MW 的水轮发电机组上进行了现场试验。该调速器并网运行时，对频率阶跃扰动的暂态响应是令人满意的。从图 1-1 可以看出，其响应速度最快。

所谓自适应是指这样的涵义：当调节对象或其他条件改变时，调节器能够自动调整其参数以持续保证调节系统处于最佳状态。从更广泛的意义上解释就是凡能自动调整控制系统中调节器参数或控制规律的统称为自适应系统。大家知道，水轮机所处工况

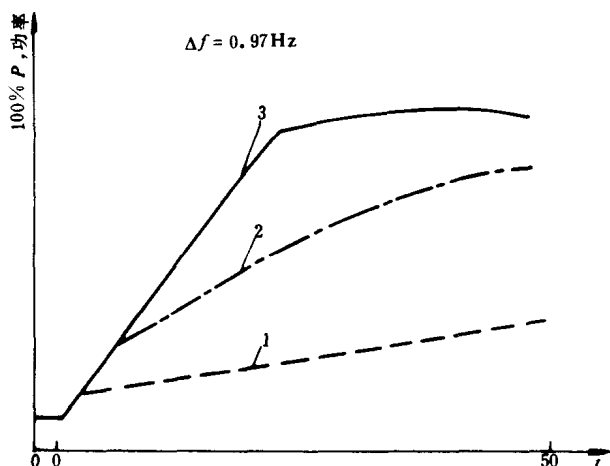


图 1-1 几种调速器负荷响应比较

频率变化: $\Delta f = 0.97 \text{ Hz}$;

1—P-I 型调速器, $T_L = T_y / b_P = 160 \text{ s}$;

2—P-I-D-2 型模拟式电调, $T_L = 33 \text{ s}$;

3—自适应式 (二次微分型) 数字调速器

不同, 其动态特性也不同, 空载工况与带负荷工况不同, 不同负荷、不同水头时动态特性也不一样, 孤立运行和并网运行时差异更大。要想使现代通用的模拟式电调随上述工况改变调速器参数是困难的, 但数字式自适应水轮机调速器可以轻而易举地实现上述功能。格勒斯哥大学等单位的自适应方式是根据负荷大小分三个区域切换不同的参数组合 (详见表 1-1)。表中 P-I 型即代表常规的缓冲式调速器; P-I-D-2 代表二次微分式调速器; K_1 、 K_2 为一次和二次微分系数; T_1 、 T_2 和 T_y 为时间常数; b_P 为永态转差系数; T_L 为负荷响应时间常数。按负荷大小分三档切换参数。每档的参数组合均由计算机仿真事先给出。它既可保证带孤立负荷运行时的稳定性, 又能保证并网运行时功率扰动的快速响应。

表 1-1

P-I 和 P-I-D-2 型结构参数组合

	类 型	K_1	K_2	T_1	T_2	T_y	b_P	$T_L = T_y/b_P$
1	P-I 型	14.44	0	1.01	0	4.75	0.03	158.3
2	P-I-D-2 型	3.5	3.5	0.20	0.20	1.00	0.03	33.3
3	自适应式	0~40%	0.8	2.0	0.20	0.20	0.30	10.0
		40%~70%	2.0	3.0	0.20	0.20	0.60	20.0
		70%~100%	3.0	2.8	0.20	0.20	1.00	33.3

加拿大 G. S. 厚甫 (G. S. Hope) 等人研制的数字式自适应调速装置更为复杂一些。其原理基于模型参考自适应, 其原理图如图 1-2 所示。输入信号进入真实的调节系统, 另一路进入所选定的“模型”, “模型”的输出为预期的效果, 它将和真实系统输出进行比较, 决策器根据比较的差异进行计算作出“决策”, 改变调节器的参数或结构, 以期达到最佳状态, 使输出和预期要求一致。G. S. 厚甫等人所研究的数字式自适应调速装置的参考模型借助于一个低阶线性离散模型来实现。该模型有跟踪系统动态过程的功能, 因此, 虽然是一个通常的低阶模型, 却能够以足够的精确度去描述一个非线性系统。比较器将实际系统的输出与模型输出进行比较, 决策器控制可变调节器, 使上述误差的平方为最小。

日本近来也试制出了一种适用于调速系统的微型计算机, 该装置的主要部件是一个数字控制器。调速器的主要功能通过软件来实现。

我国开始研制数字式调速器是在 80 年代初。华中理工大学研制的“水轮发电机组的适应式变参数 PID 微处理机调速器”, 经过了试验室样机试验阶段, 已在欧阳海水电站进行了现场试验和运行。该调速器的 PID 参数随机组运行工况 (水头和开度) 自动变化, 故属自适应式调速器。南京自动化所研制的微机式调速器, 其协联部分能实现实时在线量测, 可寻求真机的最高效率以确定理想的协联关系。该调速器通过微处理机的 ROM 程序来实现 PID 控制规律。水利水电科学院自动化所于 1984 年研制出了数字式电

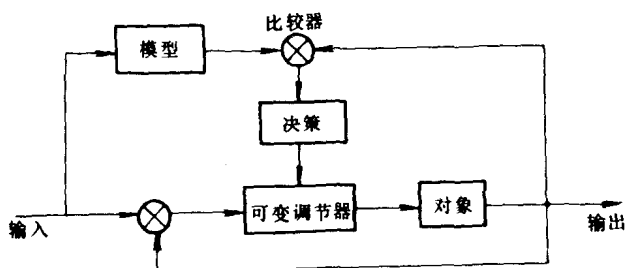


图 1-2 模型参考自适应系统

气协联装置，并完成了实验室的模拟试验。这一成果已转让给制造厂家。水科院自动化所还研制出一种水轮机调速器微机动态测试仪，并于 1987 年进行鉴定，不少使用单位反映性能良好。近十年来微机电调在国内外发展十分迅速，本书将在第三章详细介绍。

第二节 国产调速器产品系列简介

我国水电厂用的水轮机调速器，建国初多半是购买国外成品，其中用的最多的是瑞士爱舍尔维斯厂（ESCHER WYSS）生产的 S-38 型机械液压型调速器。稍后，我们大都是仿制国外产品，如 W-900、T-100、P0-40 等产品。60~70 年代是电调大发展的时期，产品花样繁多，规格不一。同一时期有相同容量但结构迥异的不同类型调速器出现。在这样的情况下，有必要搞好产品的标准化、系列化和通用化，以避免产品缺少某些规格而另外一些规格又有重复的不合理现象。另外，产品的标准化和通用化也有利于用户维修和备品备件的更换。为此机械部颁发了“反击式水轮机调速器与油压装置系列型谱”及“水轮机调速器与油压装置技术条件”。1978 年上述文件经机械、水电两部代表讨论通过时，对已有

的技术性能较好的八种产品纳入了型谱；另外八种产品，技术性能指标稍差，但为了满足生产上的需要，列为代用产品。全国水轮机调速器与油压装置系列型谱审查会建议：已纳入型谱的产品可优先批量生产，代用产品应有限制地生产，有关单位要努力搞好产品设计和制造，争取早日达到新的技术要求，成为纳入型谱的产品。对于基本达不到技术要求的产品，应停止生产进行整顿，待鉴定合格后才能生产。各厂研制的新产品，应经过有关部门鉴定合格后方能投入生产。

到1984年10月为止，已有7个系列的15种调速器入谱，代用产品共有8种。1982年以后入谱的调速器有：金城江水电设备厂生产的YDT-18000A型中型电调，它是我国自己设计制造的第一台具有P-I-D控制规律的入谱产品，其鉴定试验是1982年10月完成的。该系列共有三个容量等级，即10000、18000、30000N·m三种规格。另一个入谱的系列产品是天津传动研究所和天津水控厂联合研制的YTT系列特小型机械调速器。该系列是1983年通过鉴定入谱的，共有350、750、1500、3000N·m4个品种。

关于调速器的型谱系列，入谱及代用产品详见表1-2。

从表1-2可以看出，至今多数代用产品仍停留在代用阶段，未达到入谱的水平，尤其大型调速器为最多；小型调速器品种则有重复，如3000N·m的调速器就有TT、YTT和YT三个系列的产品；另一方面某些大型和中型交界的品种又有空白。可见提高产品技术指标，填补空白仍是调速器生产中急需解决的问题。

表 1-2

国产调速器系列品种

型式	类	别	容量	序号	型谱系列	入谱产品	代用产品
通流式	机	单调整式	特小型	1 2 3 4	TT-350 TT-750 TT-1500 TT-3000	TT-350 YTT-350 YTT-750 YTT-1500 YTT-3000 TT-1500 TT-3000	TT-750

续表

型式	类别	容量	序号	型谱系列	入谱产品	代用产品
压 力 油 罐 式	机 调	单 调 整 式	小型 5 6 7	YT-3000 YT-6000 YT-10000	YT-3000 YT-6000 YT-10000	
			中型 8 9	YT-18000 YT-30000		GT-15000 CT-40
			大型 10 11	T-80 T-100	T-100	
	电 调	单 调 整 式	中型 12 13	YDT-18000 YDT-30000	YDT-10000A YDT-30000A YDT-18000A	
			大型 14 15 16	DT-80 DT-100 DT-150		DT-100, 150
	机 调	双 调 整 式	大型 17 18 19	ST-80 ST-100 ST-150		ST-100, 150
	电 调	双 调 整 式	大型 20 21 22 23	DST-80 DST-100 DST-150 DST-200	DST-100	DST-150

第三节 调速器的功能和技术要求

调速器是水电厂的一个重要控制设备。按国际电工委员会水轮机转速调节系统试验的国际规程，调速系统的定义是：用来检测转速偏差 x ，并将它按一定特性转换成为主接力器行程偏差 y 的一些装置和机构的组合体。大家知道， y 的变化也就是导水叶开度（对于双重调整机构还引起桨叶角度的改变）的变化，从而调整了流入水轮机的流量 Q ，改变了水轮机的主动力矩 M ，力图减小或消除转速偏差 x ，也就是保持机组转速恒定或在一定的允

许范围之内。这是带孤立负荷机组调速器的基本任务之一。但调速器不仅维持机组转速不变,而且还是机组主要控制设备之一。机组的启动、停机、并网和加减负荷等操作也是调速器的主要功能。近代大型电液调速器,又有许多附加功能,如:有功功率的成组调节,按有差特性分配各机组之间的负荷,按水位调节,按开度调节以及卡普兰机组的波动控制等。水轮机调速器同时还是安全监控系统的执行部分之一,当发生电气事故发电机突然跳闸以后,调速器可以及时地将水轮机关闭,防止事态扩大。一旦事故消除,调速器又能迅速起动机组,增加了备用机组快速投入的灵活性。

尽管调速器所完成的功能很多,调速器的类型也很多,但我们仍可以提出一些共同性的技术要求。衡量一台调速器好坏的技术标准,可以从它的静态质量指标和动态特性的优劣来分析。静态质量指标主要指的是调速器的转速死区 i_r , 双调整调速器随动系统的不准确度 i_d , 调速器静态特性的非线性度等。动态特性指的是调节过程的快速衰减和良好的稳定性。评价过渡过程的好坏也有一系列技术指标,如超调量、超调次数、调整时间和衰减率等,这些相应的指标都要满足技术条件的有关规定。关于这些品质指标的定义、测试方法、允许范围等,在以后各章要陆续介绍。

简要地说,评价一台调速器质量的优劣,主要看其各项技术指标是否满足有关规程的要求。也就是说,稳态运行时应能维持一定的静态准确度,并能稳定地运行。在各种扰动信号作用下,应能达到快速收敛,满足过渡过程品质各项指标。尤其甩负荷工况,应能确保机组安全,使大波动过渡过程品质也符合要求。通常以下技术要求是特别重要的:

1) 空载稳定运行时,维持频率的精确度。例如,机组空载自动运行时,机组电流频率或机组转速波动值不得超过 0.3% ,也就是不大于 $\pm 0.15\%$ 。

2) 稳态运行时机组功率亦应维持在一定的准确度内。例如波动值不大于 0.4% 。