

高等学校教学参考书

水电站水库调度

張 勇 傳 編 著



中国工业出版社

前 言

近年来，作者在教学工作中及同生产部门工作的同志的接触中，都感到关于制定水电站最优运行方式，研究最有效最充分利用水能方面的书籍和资料太少，与教学生产的需要不相适应。这本书是作者根据在教学和科研工作中所编写的一些资料（第三章和第七章中的一部分是瞿继恂同志编写的）整理而成，以期在这方面能起一点作用。

关于书的内容需作如下几点说明：第一、这本书的主要内容是已投入运行的混合电力系统中水电站的最优长期调度，对于设计问题及短期最优运行问题的研究则较少。第二、在内容安排方面，主要是从动力观点（发电）进行研究，水利综合利用要求是作为对水电站运行方式的限制条件来处理的，虽然，正如书中强调指出的，这样做并不是忽略综合利用的重要性，但毕竟不如直接以综合利用效益最大为准则研究水电站调度更合理一些，不过后者在目前还有一定困难。第三、书中使用的数学工具主要为变分学和概率论。由于水电站最优调度有这样的特点：无法用试验方法判明某一运行方式的优劣，因而本书比较注意理论分析，但为节省篇幅，理论分析的严谨程度和计算方法的准确程度则以工程应用的实际需要为限。第四、本书部分内容取自国内外书籍和杂志，其余主要是华中工学院水力发电厂教学研究室的科学研究成果，也包括作者的一些研究心得。由于我国水电站最优调度工作开展不久，这些内容大都没有经过我国生产实践的考验，因而在生产中使用这些内容时，对实际问题的具体情况、特点和应用条件加以分析是特别重要的。

本书初稿于1960年12月完成，1961年7、8月间修改了一次，1962年7月又作了些整理和补充。

在此，仅向作者的老师Д.О.謝福拉专家、李子祥教授、黎献勇教授及华中工学院水力发电厂教学研究室的全体同志表示感谢，感谢他们的辛勤教导、鼓励、帮助和支持。本书曾经李子祥教授和长江流域规划办公室水文水利计算研究室方子云工程师审阅，作者向他们表示衷心的感谢，他们对书稿的很多宝贵意见，在修改时都已考虑采纳。本书在编辑加工工作中，水利电力部办公厅图书编辑部尚忠昌同志曾大力协助，在此表示感谢。

由于作者的思想水平和业务水平都很低，书中错误或不妥之处一定很多，希望读者给以批评，对本书的意见请寄武昌华中工学院水力发电厂教研室。

作 者

目 录

前 言	1
第一章 緒論	5
§1-1 电力系统对水电站运行的要求	5
§1-2 水电站的特点	5
§1-3 制定水电站最优运行方式的意义	8
§1-4 水电站最优运行准则	9
§1-5 水电站最优运行方式的分类	11
§1-6 电力系统电力电量平衡中水电站的位置	12
§1-7 调节效益与调节损失	14
第二章 最优调度綫	20
§2-1 电站間負荷的最有利分配	21
§2-2 并列运行水电站間供水期的放水方式	23
§2-3 并列运行水电站間蓄水期的蓄水程序	31
§2-4 对判別式方法的討論	34
§2-5 最优调度綫的等相对増率原則	37
§2-6 梯級水电站的等相对増率原則	45
§2-7 q 、 K_c 、 K_x 和 ξ 的关系及适用条件	48
§2-8 水电站水头預想出力对最优运行方式的影响	53
§2-9 多年调节水电站的年调度	56
§2-10 純水电站并列运行	56
第三章 调度綫的一般理論	58
§3-1 相对増率 ξ 与微増量 E	58
§3-2 极值调度綫場, 最优调度綫的性质	60
§3-3 水电站群极值调度綫場	63
§3-4 折綫形式的最优调度綫	66
§3-5 最优调度綫的区域限制	71
§3-6 設備容量限制下水电站最优调度	76
§3-7 綜合利用限制下水电站最优调度	80
§3-8 关于各种限制条件下最优调度問題的补充意見	87
§3-9 水电站调度特性	90
§3-10 計入各种限制的水电站调度特性	94
§3-11 可逆工作式水电站的调度特性	98
§3-12 最优调度綫的性质	99
§3-13 不連續的最优调度綫(1)	102

§3-14 不連續的最优調度綫(2).....	106
§3-15 調节周期与始末时刻水电站工作状态.....	108
§3-16 多年調节水电站的年調度.....	112
§3-17 扩大再生产效益对最优調度原則的影响.....	113
§3-18 水庫水量損失对最优調度原則的影响.....	113
§3-19 流达時間对梯級水电站最优調度的影响.....	116
§3-20 复杂水力及电力联系的情况.....	119
第四章 調度綫的繪制.....	120
§4-1 插入法.....	120
§4-2 最速下降法.....	124
§4-3 近似分析方法.....	130
§4-4 水电站群最优調度綫的繪制.....	133
§4-5 三种方法比較及适用場合.....	141
§4-6 联合电力系统与地区电力系统.....	142
§4-7 調度綫繪制的准备工作.....	144
§4-8 調度綫繪制的一般程序.....	152
第五章 考虑徑流随机性的調度綫.....	156
§5-1 径流过程的描述.....	156
§5-2 考虑径流随机波动时最优調度綫滿足的原則.....	159
§5-3 考虑径流随机波动时最优調度綫繪制.....	163
§5-4 最优調度綫的运用.....	169
§5-5 防洪控制綫及防洪控制总图.....	171
§5-6 防洪控制綫的不断修正.....	177
§5-7 防破坏控制綫及防破坏控制总图.....	179
§5-8 防破坏控制总图的运用.....	181
§5-9 补充說明.....	182
第六章 最优調度面.....	184
§6-1 調度綫理論的基本問題.....	185
§6-2 径流过程的描述.....	190
§6-3 水电站調度面及最优調度面遵守的原則.....	197
§6-4 标准形最优調度面.....	205
§6-5 水电站最优調度面的繪制.....	207
§6-6 最优調度面的性质.....	211
§6-7 計算时期末的水庫存水量, 多年調节問題.....	212
§6-8 防洪保証率与防破坏保証率.....	216
§6-9 最优調度面的运用.....	219
§6-10 几点补充說明.....	224
第七章 計算例.....	225
§7-1 最优調度綫計算例.....	225

501	S7-2 单一水电站最优调度面运用计算例.....	229
502	S7-3 梯级水电站最优调度面运用计算例.....	234
503	結束語.....	240
504	参考书目.....	242
505	主要符号注释.....	243

506	.....	244
507	.....	245
508	.....	246
509	.....	247
510	.....	248
511	.....	249
512	.....	250
513	.....	251
514	.....	252
515	.....	253
516	.....	254
517	.....	255
518	.....	256
519	.....	257
520	.....	258
521	.....	259
522	.....	260
523	.....	261
524	.....	262
525	.....	263
526	.....	264
527	.....	265
528	.....	266
529	.....	267
530	.....	268
531	.....	269
532	.....	270
533	.....	271
534	.....	272
535	.....	273
536	.....	274
537	.....	275
538	.....	276
539	.....	277
540	.....	278
541	.....	279
542	.....	280
543	.....	281
544	.....	282
545	.....	283
546	.....	284
547	.....	285
548	.....	286
549	.....	287
550	.....	288
551	.....	289
552	.....	290
553	.....	291
554	.....	292
555	.....	293
556	.....	294
557	.....	295
558	.....	296
559	.....	297
560	.....	298
561	.....	299
562	.....	300
563	.....	301
564	.....	302
565	.....	303
566	.....	304
567	.....	305
568	.....	306
569	.....	307
570	.....	308
571	.....	309
572	.....	310
573	.....	311
574	.....	312
575	.....	313
576	.....	314
577	.....	315
578	.....	316
579	.....	317
580	.....	318
581	.....	319
582	.....	320
583	.....	321
584	.....	322
585	.....	323
586	.....	324
587	.....	325
588	.....	326
589	.....	327
590	.....	328
591	.....	329
592	.....	330
593	.....	331
594	.....	332
595	.....	333
596	.....	334
597	.....	335
598	.....	336
599	.....	337
600	.....	338
601	.....	339
602	.....	340
603	.....	341
604	.....	342
605	.....	343
606	.....	344
607	.....	345
608	.....	346
609	.....	347
610	.....	348
611	.....	349
612	.....	350
613	.....	351
614	.....	352
615	.....	353
616	.....	354
617	.....	355
618	.....	356
619	.....	357
620	.....	358
621	.....	359
622	.....	360
623	.....	361
624	.....	362
625	.....	363
626	.....	364
627	.....	365
628	.....	366
629	.....	367
630	.....	368
631	.....	369
632	.....	370
633	.....	371
634	.....	372
635	.....	373
636	.....	374
637	.....	375
638	.....	376
639	.....	377
640	.....	378
641	.....	379
642	.....	380
643	.....	381
644	.....	382
645	.....	383
646	.....	384
647	.....	385
648	.....	386
649	.....	387
650	.....	388
651	.....	389
652	.....	390
653	.....	391
654	.....	392
655	.....	393
656	.....	394
657	.....	395
658	.....	396
659	.....	397
660	.....	398
661	.....	399
662	.....	400
663	.....	401
664	.....	402
665	.....	403
666	.....	404
667	.....	405
668	.....	406
669	.....	407
670	.....	408
671	.....	409
672	.....	410
673	.....	411
674	.....	412
675	.....	413
676	.....	414
677	.....	415
678	.....	416
679	.....	417
680	.....	418
681	.....	419
682	.....	420
683	.....	421
684	.....	422
685	.....	423
686	.....	424
687	.....	425
688	.....	426
689	.....	427
690	.....	428
691	.....	429
692	.....	430
693	.....	431
694	.....	432
695	.....	433
696	.....	434
697	.....	435
698	.....	436
699	.....	437
700	.....	438
701	.....	439
702	.....	440
703	.....	441
704	.....	442
705	.....	443
706	.....	444
707	.....	445
708	.....	446
709	.....	447
710	.....	448
711	.....	449
712	.....	450
713	.....	451
714	.....	452
715	.....	453
716	.....	454
717	.....	455
718	.....	456
719	.....	457
720	.....	458
721	.....	459
722	.....	460
723	.....	461
724	.....	462
725	.....	463
726	.....	464
727	.....	465
728	.....	466
729	.....	467
730	.....	468
731	.....	469
732	.....	470
733	.....	471
734	.....	472
735	.....	473
736	.....	474
737	.....	475
738	.....	476
739	.....	477
740	.....	478
741	.....	479
742	.....	480
743	.....	481
744	.....	482
745	.....	483
746	.....	484
747	.....	485
748	.....	486
749	.....	487
750	.....	488
751	.....	489
752	.....	490
753	.....	491
754	.....	492
755	.....	493
756	.....	494
757	.....	495
758	.....	496
759	.....	497
760	.....	498
761	.....	499
762	.....	500
763	.....	501
764	.....	502
765	.....	503
766	.....	504
767	.....	505
768	.....	506
769	.....	507
770	.....	508
771	.....	509
772	.....	510
773	.....	511
774	.....	512
775	.....	513
776	.....	514
777	.....	515
778	.....	516
779	.....	517
780	.....	518
781	.....	519
782	.....	520
783	.....	521
784	.....	522
785	.....	523
786	.....	524
787	.....	525
788	.....	526
789	.....	527
790	.....	528
791	.....	529
792	.....	530
793	.....	531
794	.....	532
795	.....	533
796	.....	534
797	.....	535
798	.....	536
799	.....	537
800	.....	538
801	.....	539
802	.....	540
803	.....	541
804	.....	542
805	.....	543
806	.....	544
807	.....	545
808	.....	546
809	.....	547
810	.....	548
811	.....	549
812	.....	550
813	.....	551
814	.....	552
815	.....	553
816	.....	554
817	.....	555
818	.....	556
819	.....	557
820	.....	558
821	.....	559
822	.....	560
823	.....	561
824	.....	562
825	.....	563
826	.....	564
827	.....	565
828	.....	566
829	.....	567
830	.....	568
831	.....	569
832	.....	570
833	.....	571
834	.....	572
835	.....	573
836	.....	574
837	.....	575
838	.....	576
839	.....	577
840	.....	578
841	.....	579
842	.....	580
843	.....	581
844	.....	582
845	.....	583
846	.....	584
847	.....	585
848	.....	586
849	.....	587
850	.....	588
851	.....	589
852	.....	590
853	.....	591
854	.....	592
855	.....	593
856	.....	594
857	.....	595
858	.....	596
859	.....	597
860	.....	598
861	.....	599
862	.....	600
863	.....	601
864	.....	602
865	.....	603
866	.....	604
867	.....	605
868	.....	606
869	.....	607
870	.....	608
871	.....	609
872	.....	610
873	.....	611
874	.....	612
875	.....	613
876	.....	614
877	.....	615
878	.....	616
879	.....	617
880	.....	618
881	.....	619
882	.....	620
883	.....	621

第一章 緒 論

§1-1 電力系統對水電站運行的要求

隨着國民經濟的發展，各部門不斷地提出新的動力要求，因而除了開發新的能源，建設新的電站外，正確組織已投入生產的水電站的運行，挖掘設備潛力，改善設備性能，研究最有效的運行方式具有重要意義。

為了正確解決水電站運行問題，必須了解電力系統對水電站運行的基本要求。我們知道，基本要求可表述為如下三點：1.保證隨時間變化的用戶所需要的電能數量。2.保證電能的質量，即滿足規定的電壓和頻率的要求。3.保證電能供應的可靠性。

第一個要求也就是在每一個時刻電站所發的電能等於用戶所需要的電能，連同第二個及第三個要求一起就是說水電站應按一定的質量要求可靠地供給用戶所需要的電能。

這些要求之所以稱為基本要求，在於電力系統可以用完全不同的方式：包括水電站羣調度方式、梯級水電站補償方式、火電廠運轉方式、電力網的接綫和潮流分布方式、有功負荷和無功負荷在各電站間的分配方式、備用容量的接入方式以及檢修計劃安排方式等，同樣滿足上述要求。對於電力系統運行來說，只滿足上述基本要求是不夠的。電力系統的運行還應在滿足上述基本要求的前提下，選擇出最好的運行方式，使用同樣的支出費用，最大限度的獲得高質量的電能，最大限度地滿足用戶的需要。

換句話說，電力系統對水電站運行的要求在於最大限度地提高水電站的運行水平，使整個電力系統的工作具有最大的經濟性、穩定性和可靠性。考慮到工作人員和設備的安全，這些要求就可進一步歸結為安全、經濟、穩定和可靠等四個方面。

§1-2 水電站的特點

與火電廠相比，水電站在技術上有一系列優點，例如水力機組可以迅速的起動和停機；水力發電機可以迅速的從發電到調相，或相反的從調相到發電而進行運行方式的轉換；當負荷改變時其附加損失比較小；廠用電亦較少；在機組停止工作的狀態中不消耗額外的能量；運行操作比較簡單，有較高的自動化程度；生產率高等等。依靠水電站的這些優點，可以大大改善電力系統的工作。例如在水火電站並列運行時水電站承擔變動的負荷，以減少火電站運行方式的變化；系統的備用容量讓水電站擔任，可以避免火電廠擔任備用時產生附加的損耗。

除了上述技術上的優點外，從運行的觀點來看，水電站還有一些很重要的特點。

1. 水電站的運行與水利資源綜合利用有密切關係。

水電站不僅作為電力生產的企業，而且水電站及其水庫同時為很多水利事業部門服務。這些水利事業部門包括有防洪、灌溉、航運、城市給水、工業用水、漁業、有時還有衛生事業、改良氣候等。各水利事業部門具有不同的用水要求，在用水量的多少方面，在用水時間的先後方面，一般是不同的。一些用水部門的用水，在其使用後仍然返還給水庫或河

道，再为另一些用水部門使用，另一些用水部門(有时称耗水部門)的用水，就不能再为其他用水部門使用；一些用水部門的用水，在一定条件下可以和另一些用水部門的用水完全結合起来，而在另一些情况下，它們是完全矛盾的。

研究綜合利用的水电站最优运行方式是个十分重要、十分复杂、十分有意义的問題。順便說明，虽然本书着重研究作为电力系统組成部分的水电站的运行問題(即主要研究发电)，对涉及其他綜合利用問題时只加以一般的說明，但并不意味着水电站在电力系统中的最优运行可以代替考虑水利資源綜合利用时水电站的綜合的全面的最优运行，而且正好相反。

2. 水电站的水能可以不断的循环、恢复和轉換，水电站生产有周期性。

我們知道，由于自然界中水的循环，河流中的水每年得到恢复，从而水电站每年都能得到恢复的流量。通过水工結構物产生水头(集中水头)以后取得了水能。对于潮汐水电站也有同样的情形，不过在潮汐的情况下循环期只有半天，引起循环的原因是海水受月球太阳的引力作用形成周期的漲潮与落潮，而且与前者不同的还有在潮汐的情形下，首先恢复的是水头(潮差)，流量則由水工結構物利用潮差拦蓄海水而形成。

3. 水电站工作情况的多变性和不重复性。

水电站工作情况的多变性是由于天然水能資源的多变性所决定的。由河川徑流的特性所决定的。

水电站供給电力系统的电能和出力，主要取决于时刻变化着的天然徑流，因而河川徑流的多变性，不仅影响了水电站的工作情况，而且还影响和决定了电力系统中作为水电站补充能源的火电厂的工作情况。

河川流量不仅是时刻在变化，而且常常是在很大的范围内变化，在某些时期里，天然流量很小，以致使水电站的出力降低到电力系统正常工作所需的最小出力以下，此时，用戶便不能得到需要的电能。而另一些时期里，天然流量很大，以致水电站不能将这些流量全部用掉或按設備能力生产的电能超过了用戶的需要。

河川徑流的多变性与其不重复性有关，例如，在同一河流上可能不止一次观测到某个流量值，如在一年或几年内观测到好几次，但是在某一水文年或水文季节里，所观测到的一定次序的各个不同数值的流量，决不会在其他年份或季节里完全一样的出现。再如，尽管在每年中都有洪水和枯水、流量从大到小再从小到大的变化，但各年中流量变化的数量以及時間上的起止都是不会相同的。

由于近代水文科学发展水平还不能在較長時間以前，为了实用目的相当准确的預报出河流中的徑流情况，因而徑流的多变性和不重复性就增加了水电站及电力系统的管理工作的困难。

4. 水电站工作情况的規律性。

水电站工作情况的多变性和不重复性，只是水电站工作情况的一个侧面，还有对水电站运行有着很重要意义的另一个侧面，即水电站工作情况的規律性。

和水电站的多变性及不重复性相似，水电站工作的規律性也是由河川徑流的規律性决定的，所以关于水电站工作情况規律性的討論，实际上可代以徑流情况規律性的討論。

这种規律性的存在是很明显的，我們知道，每一条河流中的流量一方面处在經常不断的变化过程中，时而大时而小，但就总体来看，在每个水文年中都可以区分为洪水期和枯

水期，天然流量的变化一般总是从大到小再从小到大，每年中都有洪水到来，而且在多数情况下，历年洪水总是开始于一个变化不大的日期，这些都表现出明显的周期性。从成因上看这种周期性是由水的循环周期性决定的。其次，如果我们取历年中某一固定日期（或时段）的流量来考虑，在已知的资料有限时，有二个或二个以上的流量完全相同的可能很少，但互相接近于其平均值的较之离开其平均值的流量要多一些，而且在适当选择频率格纸后能描出相当好的图形。

此外，径流的规律性有时还可由相关关系看出来，在同一时间里，对不同的河流进行观测时，常常看到不同的河流中的流量具有相关关系，特别是那些位于同一水文区域内的河流，如果在一条河流上观测到较往年比较大的流量，那么在相邻的河流上一般亦将观测到较往年为大的流量，反之如果在一条河流上观测到较小的流量，那么在相邻河流上一般将观测到较小的流量。这种流量的相关也发生在同一河流的流量之间。例如，若我们在某一河流的某断面上进行观测，并对观测到的依次发生的流量进行考察，就会发现类似的相关关系。一般说来，在连续发生较大的流量之后继续发生较大流量的场合，较发生较小流量的场合要多些，同样在连续发生较小流量之后继续发生较小流量的场合，要比发生较大流量的场合多些。特别是在枯水期或相邻流量值的时间间隔较短时，这种相关联系就越加明显。

以上谈的径流的规律性，是在流量值的依时间变化中或流量值之间的连系中表现出来的。在更多的场合，径流的规律性表现在它与其他物理因素的相关上。例如：流量与河流流域内的土壤含水率、流量与降雨、流量与冬季积雪、流量与大区域内的一些控制性天气和气象因素、与太阳中黑子的变化等一般都有着或多或少的相关联系。

所有这些以相关关系反映出来的径流规律性，通常称为统计规律性。如果具有足够多的观测资料，可以运用统计方法和最近发展起来的随机过程理论，最充分的对这种规律性进行研究，并以最完善的形式表示出来。

必须指出，由相关联系表现出来的径流规律性，是有一定的物理成因为根据的，由相关关系表现出来的径流统计规律性和其内在成因相统一，正象任何事物的形式与内容一样，内容决定形式，形式反映着内容。

5. 水电站的输入能量为常数。

可以把水电站看做生产企业，其生产过程为：利用水工建筑物集中水头，利用水库调节径流，由水轮发电机把水能转换为机械能并转换为电能。输入水能，输出电能。由于水能的循环和恢复是由自然界中水的循环所决定的，所以能够用作转换的水能，每年有一个确定的数值，既不能增加，也不能减少。

从这个特点，我们可以看出水电站最优运行的重要性。水电站输入能量有限，决定了水电站与火电厂并列运行时能量平衡的顺序，在某一定时期内，水电站有一个有限的输入能量 $\mathcal{Q}_1^*$ ，从这个能量中减去由水能调节输送和能量转换过程中的能量损失 $\Delta\mathcal{Q}_1$ ，得出水电站的输出能量 $\mathcal{Q}_2$ 。第二步是从电力系统要求的总发电量 $\mathcal{Q}_0$ 中，扣除水电站的输出能量得出所需火电厂的发电量 $\mathcal{Q}_T$ 。第三步，由系统需要火电厂的发电量，加上火电厂为生产这部分电量不可避免的附加损失，最后得出火电厂的输入能量 $\mathcal{Q}_1^*$ 。电力系统的输入能量即水火电站输入能量之和 $\Sigma\mathcal{Q}^* = \mathcal{Q}_1^* + \mathcal{Q}_T^*$ (图1-1)。

我们知道，电力系统运行情况的好坏，可用电力系统的总效率高低表示。因为水电站

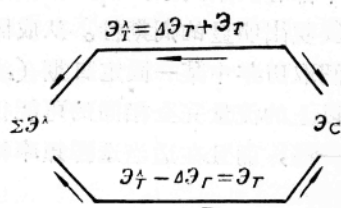


图 1-1

具有很高的生产效率(近代大型水电站的效率常达 90% 以上), 所以如果水电站能量损失增加一个单位, 水电站的输出能量就要减少差不多一个单位, 此时火电厂就要增加一个单位的输出能量来维持系统的能量平衡, 由于一般火电厂的平均效率很低(一般火电厂的平均效率近于 25~28%), 这样火电厂的输入能量就要差不多增加四个单位。总的来说就是水电站能量损失的增加导致火电厂的输入能量以四倍于这个损失的增加。

水电站输入能量有限这个特点, 除了对电力系统的运行经济性有很大影响之外, 在某些情况下, 还影响到电力系统工作的可靠性, 这一点在运行时也是很重要的。

6. 水电站运行方式十分灵活, 水电站间的水力联系, 水电站的生产效率与能量储备有关。

水电站的运行方式是十分灵活的, 特别是当水电站具有调节能力良好的水库时。

电能的生产、输送和消费是同时进行的。电能是无法储蓄的, 所以要求发电和用电必须随时保持平衡, 水电站生产的电能不论大于或小于需要的电能都影响电力系统的正常工作。因而为了协调发电和用电的矛盾, 改善电站的工作条件和达到充分利用能源的目的, 便必须解决蓄能问题。这个问题的研究已经很久了, 但到目前为止, 所提出的蓄能方式中, 不是蓄能数量很少, 就是需要大量的设备。利用水电站的水库可以部分解决这一问题。即水库先把输入能量储蓄起来, 然后按照系统的需要供给水电厂使用, 达到协调发电和用户之间矛盾的目的。显然这只有在具有足够大的水库时才有可能, 而且蓄能作用仅对水电站有效。当然具有可逆能量转换装置的水电站不受这个限制, 依靠这种装置, 即水力蓄能装置, 可以根据需要把水能变为电能, 又可以根据相反的需要再把电能转换为水能。

水电站运行的灵活性, 是与水电站间可能的水力联系有关的。梯级水电站之间, 依靠其间的电力联系和水利联系(水头联系和流量联系), 依靠其间工作情况的互相补偿, 大大的增加了这种灵活性。

即使在非梯级情况下, 并列运行水电站间的上述联系也是可能存在的, 只是性质上稍有不同而已。

水电站间的这些联系与影响, 以及由这些联系引起的各种各样的运行调度问题, 在火电厂间是不存在的。所以一方面, 这使得水电站的最优运行较之火电厂大为复杂; 另一方面, 由于这些联系和影响, 大大增加了水电站运行方式的灵活性, 从而给水电站的设计运行工作者、电力系统的水能工作者和运行调度工作者以广阔活动的场地, 依靠他们创造性的工作, 正确的选择水电站的运行方式, 正确的组织水电站的最优运行, 以最大限度地满足国民经济中水利资源综合利用和电力系统的需要, 获取巨大的物质财富。

7. 水电站运行情况的特点除了上述几点之外, 还有一些也值得注意, 例如水能不需运输, 单位带能体带能较少, 水电站上下游的水力不稳定流动(对短期运行方式来说这个特点是很重要的), 冬季结冰情况等。

§1-3 制定水电站最优运行方式的意义

当我们分析了水电站运行情况的特点之后, 已可了解水电站在电力系统中运行的大致

輪廓，了解水电站的最优运行方式对整个电力系统的运行情况、电力电量平衡、运行的可靠性与经济性等具有如何巨大的作用。可以毫不夸大的說，在制定电力系统的运行方式时，水电站是其中最能动最活跃的因素。根据不同的情况合理的安排水电站的运行方式，可以有效的改善火电厂及整个电力系统的运行。当然反过来说，只有在混合电力系统中，水电站运行的灵活性机动性才能充分地表现出来。

电力系统运行与其中水电站运行方式的紧密关系还可由下述理由看出：由于水电建设受地形地质条件的限制，大部分水电站与用户相距很远，所以巨型水电站总是和远距离高压输电綫相連系。这一点火电厂不一定是必要的，因为火电厂的建造几乎不受地形及地理位置的限制。同时煤的综合利用要求（例如除发电外还要求供热），也希望火电厂建造在距用户較近的地方。此外我們也知道电力系统的联結与扩大，把地区电力系统連接为联合电力系统，不仅是为了提高系统运行的可靠性、节约备用容量、取得負荷地理补偿效益等，而且常常主要是为了取得跨流域徑流电力补偿效益（补偿效益是依靠不同流域的水文不同步，和利用調节性能好的电站对調节性能差补偿而取得的）。上述原因导致了这样的情况，即电力綫路上輸送的能量主要部分是由水电站生产的，并且在一定程度上，可以根据电力系统的实际运行是否合乎这种情况，以检查电力系统运行方式的合理性、电力系统的結綫方式及火电厂布置的合理性。

§1-4 水电站最优运行准则

虽然在一般情况下，确定最优运行方式的准则，原则上是明确的，但就一些情况来看下面再討論一下也还是有益的。

我們知道，从实践获得知識，从感性認識到理性認識，从不了解到了解，由初步的片面的了解到全面的深刻的正确的了解，这是一个反复的螺旋上升的过程。人們对任何事物的認識过程都是这样的。对水电站最优运行准则的認識也不例外。最初只看到和水电站并列工作的火电厂消耗大量的煤，为保证火电厂的正常生产，不得不花相当大的精力去組織和保证煤的計劃供应，而水电站却是毫不費力的从自然界取得水，因而用水多少无所谓。后来，从运行实践中知道了用水的問題并非那样简单，实际上水对水电站和煤对火电厂同样重要，沒有煤火电厂发不出电，沒有水水輪机就不能轉动。水是水电站的燃料，因而具有一定能量的用来发电的水也是值錢的。因为要使水能够用来发电需要建設坝、厂房及装設机电设备等，这些都应算在水的帳上。正如天然状态的空气是不值錢的，但如果将其加工成为压缩空气时它就值錢了。因而开始注意合理利用水，使一定量的水能生产出最多的电能来，此即所謂制定最优运行方式的最大发电量准则。

但是使水电站发出最多电能的准则，对电力系统来说并不是最有利的。如前所述在电能尚无法大量貯存的条件下，电力系统的发电和用电需要随时平衡，如果水电站只由发电量最大来决定其运行方式，就可能使得火电厂处于不利的运行状态，以致增加了煤耗，这部分附加煤耗往往抵消了水电站按最大发电量方式运行所得到的电能效益，甚至全部抵消或超过。

一方面水电站要求按最大发电量方式运行，另一方面火电厂要求以最低煤耗量方式运行，水火电站都要在負荷图上选择自己适合的位置，結果便产生了矛盾。解决这个矛盾的途徑是建立这样的准则，电力系统計算支出最小的准则，即从整个电力系统出发，找出一

个这样的运行方式，使水电站按这个方式运行的结果使电力系统的总计算支出最小。

如果除去计算支出中与运行方式无关的部分(工资、折旧等费用)，且各火电厂的耗煤都折合为标准煤时，电力系统总计算支出最小的准则可用电力系统总耗煤量最小的准则来代替。目前，不少电力系统都采用这个准则。对水电站来说，又常称为替代火电厂煤耗量最大准则。

替代煤耗量最大的运行准则，还不能认为是一般性的，例如在供电比较紧张或是在特殊枯水年份情况下，这个准则就不能全面的反映出整个国民经济效益。因为在这种情况下，水电站运行方式的好坏，不仅仅关系到电力系统供电的经济性(这是十分重要的一个方面)，而且还关系到电力系统工作的可靠性，关系到用电部门的正常生产。

计入可靠性影响时，水电站运行方式的好坏，可从整个国民经济来衡量，即是否导致最大的国民经济效益，也就是最大国民经济效益准则，这个准则是普遍性的，包括了上述各项准则。

上述各项准则，一方面反映了人们对于水电站最优运行方式的认知过程，另一方面也说明了各准则的关系，并要求我们在处理和解决这一问题时，不要把认知再停留在以往的水平。

需要指出，虽然国民经济最大效益准则是一般性的，并包括了其他各项准则，但并不意味着其他准则没有实用价值，实际上在绝大多数情况下，只要对问题的条件进行具体研究和分析(把国民经济最大效益准则具体化)，采用其他准则完全能够得出正确的结果。

导致最大限度的国民经济效益和在满足国民经济需要的前提下具有最少计算支出费用是一致的，于是可以把国民经济最大效益准则代之以总的计算运行费用最小准则。总费用中除了与运行方式无关的部分外尚由两部分组成：其一、正常情况下火电厂的燃料费用(如果在保证综合利用要求的前提下，运行方式影响综合效益时，还应考虑这部分效益的相应费用)，其二、正常运行破坏情况下，电能不足所造成的损失费用和水利资源综合利用部门的要求得不到满足所导致的损失费用。现时还没有一个十分令人满意的方法，用来估计水电站正常工作遭受破坏所造成的损失，而且即使可以粗劣的建立用量的方式表示不同破坏深度和破坏历时的经济损失，也无法总括那些由于破坏带来的生产不足和生产消费计划平衡的破坏以及精神方面等的影响。所以一种常用的作法是把燃料费用与经济性连系起来，而把损失和可靠性连系起来。此时水电站最优运行准则便表示为：满足正常工作可靠性要求的前提下(这里正常工作可靠性要求是指电力系统和综合利用各部门的用电用水要求在质与量方面都得到满足)，电力系统的燃料费用最小，或要求煤耗量最小。

事实上只在能够对未来时间内的径流十分准确的预知或起码能较为准确的预知时，上述准则才能应用，而在未来径流只是统计意义的确定情况下，以满足可靠性要求为前提是无法做到的，因而可靠性要求中和经济性条件中都必须引进概率概念。引入概率概念的最优运行准则可表述如下：

1. 可靠性要求：水电站运行的计算时期内(一般取为调度周期)，水电站正常工作不破坏概率不低于某一规定数值(保证率)，当这个要求不能达到时应使这个概率达到最大值。
2. 经济性要求：在水电站正常工作概率大于或等于规定值的条件下，使计算时期内电力系统燃料消耗的数学期望值最小。

最优运行准则的上述表示可称为保证率分界法，因为规定的某一个保证率，也就是选

用可靠性或經濟性条件作为确定水电站运行方式的分界綫。当实际保証率小于这个規定值时，运行方式由可靠性条件决定；当实际保証率大于这个規定值时，运行方式在保持实际保証率大于規定值的前提下由經濟性条件决定。

应该指出，通过保証率分界法把运行經濟性及可靠性統一起来，并不是唯一可行的办法，特别是在使用方面这种方法没有什么特别的优点。在以下各章中我們將通过引进水电站及火电厂調度特性的概念，把水电站最优运行准则表示得更簡捷一些。

§1-5 水电站最优运行方式的分类

水电站的运行方式是电力系统总方式的一个部分，电力系统的总方式可分作設計方式与运行方式；运行方式又可分为厂内方式和厂間方式，或按時間分为：年度方式、季度方式、月份方式和昼夜方式。

不过从最优运行角度出发按下述方法将电力系统的运行方式分为三类較為方便，①厂内运行方式；②短期最优运行調度方式；③长期最优运行調度方式。

水电站的厂内运行方式主要是研究水电站的出力平衡、流量平衡和水头平衡；水电站的运行动力特性；各种动力指标；各种动力布置方式的最优运行；并列工作的动力单元間合理分配有功負荷和无功負荷的方法；最合理的分配备用負荷的方法；最合理的工作单元数的确定和机組的起停次序；主結綫运行方式；厂用水及厂用电接入方式；水力机組的最合理調节程序以及电能生产的质量控制等。

短期最优运行方式的短期是就日、周这样长的時間而言。其研究和解决的主要問題是电力系统的电力和电量平衡；輸电綫路結綫方式；潮流分布方式；調頻調压方式；梯級水电站間、跨流域水电站間、水火电站間有功負荷和无功負荷的合理分配；各电站間冷备用与热备用的合理接入方式；水电站及梯級水电站的日調节和周調节；水电站上下游不稳定流动对运行方式的影响及对水利資源綜合利用的影响；水力蓄能发电站的合理运行方式；合理蓄能数量及蓄能方式；潮汐水电站的最优运行；潮汐水电站在混合电力系统中的最有效运转；抽水方式及循环調节等。

长期最优运行方式是指周、月以上較长时期的运行方式，季度方式、年运行方式和多年运行方式。具体內容有：电力系统的电力和电量平衡方式；檢修方式；备用方式；单一水电站調度方式；梯級水电站羣調度方式；跨流域徑流电力补偿方式；水电站羣防洪統一調度方式；水电站在混合电力系统、純水电电力系统和水利綜合利用系统中的最优运行方式等。

三种方式所研究的問題紧密相連系，一种方式的合理制定与別种方式的合理制定有关。在研究水电站最优調度的基本理論，分析最优运行方式所遵守的原則或所具备的特征时，应首先解决厂内最优运行方式問題。在解决厂内最优运行方式問題的基础上，进而研究短期最优运行方式，再进而研究和解决长期最优运行方式。在研究短期运行方式时，认为厂内的运行是按最优方式进行，相应水电站的特性，是在厂内最优运行时所具有的。在研究长期运行方式时，则认为厂内和短期已都按最优运行方式运行，此时，电站特性和系統特性以及短期內系統和电站所具有的平均特性，亦都为相应的最优的运行方式所确定。在实际制定电力系统的运行方式用以指导运行时，則依上述正好相反的順序进行，即先制定长期方式，其次制定短期方式，最后制定厂内方式。长期运行方式的基本任务是把手电

站的規定的有限輸入能量按最優的原則分配給各个時間段(時段或短期)，短期方式則把分配的輸入能量在短期期間合理使用，確定各電站的逐時運行狀態和負荷在各電站間的分配，廠內運行方式則根據短期運行方式分配的水電站應擔負的負荷(有功負荷，無功負荷)及水利資源綜合利用任務，組織廠內動力設備的最優運行。

目前，對制定最優的三種方式的研究，比較起來，以第三種研究得較少，而生產實踐中存在問題的也以第三種較多，因而不從理論上看，或是從生產實踐的需要看，對長期運行調度問題加以研究，顯得更為迫切一些。本書以下只討論水電站的長期最優運行問題。

§1-6 電力系統電力電量平衡中水電站的位置

如上所述，制定水電站長期最優運行方式的主要內容，就是要在計算時期內合理的分配和使用水電站的有效輸入能量。或者說，就是要在電力系統的年負荷圖上正確的決定水電站的工作位置。水電站在年負荷圖上的工作位置一旦被決定，水電站的運行方式、水電站的逐月發電量及其水庫的消落及充蓄曲線即水電站調度線就相應的唯一的決定了。於是，制定水電站長期最優運行方式還可使用另一種提法：合理制定水電站的調度線。實用時則根據需要和計算方便，選擇採用某一提法。

在電力系統負荷圖上確定水電站合理工作位置，要解決二個問題。其一，在電力系統的日平均負荷曲線上確定水電站的工作位置，即在電力系統的年電能平衡中確定水電站的逐月發電量。其二，在電力系統的日最大負荷曲線上確定水電站的工作位置，即在電力系統的容量平衡中確定水電站的負荷位置。

這兩個問題也是連系在一起的，而且當一個問題徹底解決之後，解決另一個問題，原則上就不成問題了。下面簡略的談一下電力系統的電力電量平衡問題。

電力系統的電力能否平衡取決於各電站的可用容量在最大負荷時是否夠用。所指各電站的可用容量乃是除去因不同原因而受阻的容量後所有電站容量的總和。可用容量在最大負荷時是否夠用，乃指除了可用容量不小於最大負荷之外，是否還有多餘以作備用之用。

水電站的容量受阻，取決於水電站設備的特性以及運行時的水頭流量條件和檢修計劃的安排。檢修週期的長短和每次檢修的時間又由電站設備特性、運行時的維護情況、檢修技術及有關組織工作等因素決定。當安排水電站機組的檢修計劃時，要考慮以下幾個方面：①電力系統的容量平衡條件；②檢修週期的長短；③由於檢修導致電站經濟特性改變所造成的對電力系統運行經濟性的影響；④檢修工作的組織、檢修設備最有利的使用等。

備用容量按其作用可分為：①負荷備用，用以穩定電力系統的頻率；②事故備用，用以應付機組偶然發生事故和故障；③國民經濟備用，用以保證生產部門超額完成生產計劃所需要的動力供應。備用容量可以集中在一個電站或分散在各電站，可以集中在不帶負荷的機組上，也可以分布在工作着的機組上。

合理的決定備用容量是一個很重要的問題。電力系統的实际運行經驗和根據運行記錄所作的數值分析都証明了負荷波動具有隨机的性質，並具備高斯分布的特徵。目前確定負荷備用與事故備用時大都採用概率方法。

水力機組可以承受變動的負荷，並且具有良好的調節特性，所以總是由水電站擔負負荷備用，只在洪水期有多餘水量時，負荷備用才由大容量的火電廠擔任。在一般情況下，

事故备用也是由水电站担任，由于水力机组的起动十分迅速，而且在停机待用时不象火电厂那样，需要附加的燃料消耗。

确定国民经济备用是一个新问题，我们知道，作为国家主人的我国人民，具有高度的觉悟和生产热情，由于他们创造性的忘我劳动、不断的技术改革，生产计划总是提前和超额完成。因而在制定电力系统运行方式时，就必须考虑在生产部门超额完成计划时，保证给以一定数量的能量供应。

国民经济备用，不仅要求一定的容量，而且要求储备一定的能量，储备一定的水量或燃料。原则上这种备用放在水电站或火电厂都可以，不过在水电站上设置这种备用时，由于占用一部分水库容积而影响水库的调节能力，并且由于水文情况的多变，有时可能引起部分弃水，所以，在大多数情况下，这部分容量都放在火电厂，或安排在新电站（或新机组）投入计划中。

关于电力系统的电量平衡。

电量平衡决定于水电站和火电厂是否具有足够的水量和燃料，以保证按负荷图规定的发电量进行生产。

水电站的可能发电量是由水电站的平均天然流量、平均水头、和动力设备的效率决定的。考虑到水库具有调节能力，还应在流量中加入从水库取得的水量。决定了系统中全部水电站的可能发电量之后，就可由系统的负荷图决定出应由火电厂担负的负荷。如果这种分担负荷方式是可行的，则电量平衡便成立了，并可用电量平衡图表示出来。

保证电量平衡的运行方式，原则上有无限多个，而其中最好的只有一个。为了一般的表示不同水电站在电能平衡图上应具有的位置，下面对各种电站承担负荷的条件进行简略分析。

在一年的不同时期，水电站与火电厂参与电力系统的工作方式不同。在枯水期，水电站只有少数能量，为了能充分利用水电站的动力设备，故应在负荷图的峰部工作，基荷部分由火电厂担任。在丰水期，情况则相反，水电站的电能很多，故基荷应转由水电站担任。这种情况又与水电站的调节能力有关。对于无调节水电站，其任何时刻的可能发电量，由当时河流中的天然流量所决定，如果让其担负的发电量比其可能发电量还少，就会在溢洪道上发生弃水，从而减少了发电量（顺便指出，不能把无调节水电站与火电厂相比，因为把火电厂的发电量减少到比其可能发电量还少时，虽然可能因此降低了火电厂的效率，但总的说由于减少了负荷还是会节省耗煤量的，同时节省的燃料可以储备起来），所以在电量平衡中决定无调节水电站的位置十分简单，它总按照天然来水和设备容量的大小担任基荷。

对于有调节能力的水电站，根据天然来水量可以定出水电站在某一时期（调节周期）内的发电量。但这部分发电量在供水期和蓄水期之间的分配并不由（或并不全由）天然来水量的分布确定。有调节能力的水电站，其在负荷图上的位置与其调节周期长短和与其并列工作的水电站的调节能力有关。日调节水电站具有在一天之内重新分配日发电量的能力，当与火电厂并列运行且电力系统中又无调节能力更好的水电站时，日调节水电站应担负峰荷（在洪水期则担负基荷，因此时已转化为无调节水电站）。当系统中具有更大调节能力的水电站时，由于日调节水电站的调节损失一般较大（较之调节能力很大的长期调节水电站进行日调节），所以一般的应把峰荷让给调节能力更好的水电站担负。几个水电站并列运行

时,各电站在负荷图上的位置根据各电站的特性和调节性能,通过调节损失大小的分析确定。

在进行长期电量平衡时,由于日调节水电站只能在一天内重新分配使用发电量,故和无调节水电站一样,在一年的每个计算时段中,发电量的大小及其在平衡图上的位置即由天然流量的大小确定。

年调节及多年调节水电站具有在年及多年间重新分配发电量的能力,因而在相应时期里,水电站的发电量与天然流量过程之间并无固定的联系。水能资源保证的不再是可用容量,而是调节周期内的平均出力。水电站参加电力系统的电量平衡也不独与该时段内水电站的逐时可用容量有关,而且主要是与该时期内水电站所能生产的总电能有关。由于年调节及多年调节水电站在能量平衡中的这种特点,正确确定其在长期电量平衡图上的位置,就需要进行更为深入的分析。

在电量平衡图上,无调节水电站放在最下部,火电厂放在无调节水电站的上面,再上面是日调节水电站,最尖峰是长期调节水电站。这种布置只是大致的趋势,因为这种布置的根据是:长期调节水电站的日调节损失最小,日调节水电站的调节损失数之火电厂进行日调节的损失又较小,但并非绝对如此,事实上多数计算结果表明,让具有设备性能良好的火电厂担负部分尖峰负荷是有利的。

此外,在电量平衡图上确定各类电站位置时还需考虑下列因素的影响:具有供热任务的热电厂在热力系统中的平衡;火电厂设备的技术最小出力限制及起动停机损失;水电站的冬季条件;水电站有综合利用任务时,综合利用的要求等。

§1-7 调节效益与调节损失

以下的讨论中,我们把径流看做确定过程,而把径流作为随机过程则在第五、六章再专门讨论。这样做,可以使问题的处理简易一些,且前者也是后者的基础。在使用上,相应确定径流过程得出的结论,可以在具有很好的水文规律或具有准确的水文预报的条件下使用。

调节效益和调节损失,在水电站调节计算中,是二个重要的概念。

年调节水电站的工作,在一个完全年循环之中,可分为四个不同的时期,供水期,蓄水期,弃水期和不蓄出力期。在供水期里,水电站用以发电的流量,除了天然流量之外还有从水库取出的流量,水电站的工作水头随着供水而逐渐降低。从能量观点看,这个时期的特征是天然来水量所发的能量(不蓄能量)不足以维持电力系统对水电站的能量要求,水电站借助于从水库放出能量(水库能量)以补足其差额部分。从水库中放出能量的多少取决于电力系统要求与不蓄能量差额,差得多就多放,差得少就少放一些。不过有时不一定能做到,原因有二个方面。一是由于水库的容积有限。一是由于水库不断放出能量的结果,水电站的水头降低了,同样数量的天然来水量,其相应的不蓄能量减少了,以致在水库供水达到某一限度后,增加水库的供水量并不能使水电站的总电能增加。

在蓄水期里,水电站只使用天然流量的一部分用来发电,而将其余部分不断的蓄入水库,到蓄水期结束,水库即被蓄满。在天然来水流量很大而水库容积又较小的情况下,即令水轮发电机组一直以极限容量运行,水库常常还是很快的蓄满。此后,如果天然流量仍不减小,则不可避免的发生弃水,水电站的运行便进入弃水期。若水库的相对容积很大或设

备容量相对的足够大，则弃水就可以避免，便没有弃水期，只当水电站的运行方式制定错误时，才可能出现弃水。

在弃水期里，水电站的运行方式十分简单(就长期方式而言)，各机组都以极限出力工作，用不完的水量经由水工建筑物流入下游。其后，随着天然流量逐渐减少，弃水量亦逐渐减少，最后当天然流量和机组最大过水能力相同时，弃水期便结束。

弃水期结束后，水电站进入不蓄出力期，此时水库处于库满状态，水电站的出力完全由天然流量决定，直到随着天然流量减少，水电站为发出系统要求的出力，必须从水库中取水以补足天然流量之不足之前，水库水位一直不变，然后又开始新的年调节循环。

由于四个时期中弃水期和不蓄出力期，不是所有情况下都出现的，所以只把调节周期按天然流量情况分为二个时期，即丰水期和枯水期更方便一些。与四个时期的分法相比，丰水期与蓄水期、弃水期、不蓄出力期三者相应，枯水期与供水期相应。在丰水期里，天然流量足够大，水电站在满足电力系统必需要求之后还有多余，在枯水期里，天然流量很小，水电站只靠天然流量生产出的电能不足以满足电力系统的要求，需要从水库中取用储备的水能来补足。

从能量平衡观点看，枯水期中，水电站从水库中取用的水能(水量)和丰水期中水电站蓄入水库中的水能(水量)在数量上应完全相同(不考虑水量损失)，以保证下一个年调节循环的正常进行。能量使用的这种时间上的移动产生二个有益的结果。其一，使水电站生产的电能，数量上较为均匀以更好的满足电力系统用电的要求。其二，由于丰水期间，水电站利用其设备尽量的发电，同时把多余的水能蓄入水库，从而避免或拖延了弃水期的发生或开始时间，提高了水能的有效利用程度。这二个结果合称为调节效益。第一个总是存在的，并可用水电站保证出力的提高或保证发电量的提高来表示。第二个只在水电站不进行调节就有弃水发生时才存在，可用年发电量的增加来表示。

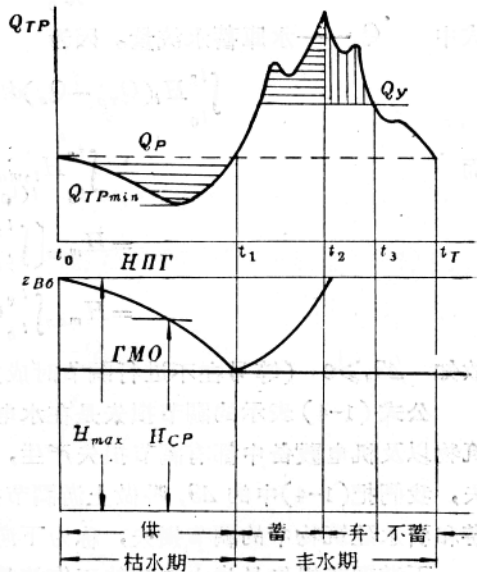


图 1-2

在图 1-2 中表示了年调节水电站在一个年调节循环中的工作情况，从 t_0 到 t_1 为供水期，亦即枯水期，从 t_1 到 t_T 为丰水期，其中包括：蓄水期 (t_1 到 t_2)，弃水期 (t_2 到 t_3)，和不蓄出力期 (t_3 到 t_T)。在图示情况下，调节效益(以保证出力的提高表示)可用下式计算。

$$\Delta N_z = N_{z1} - N_{z,TP} \quad (1-1)$$

式中 ΔN_z 表示保证出力提高； N_{z1} 和 $N_{z,TP}$ 由下式计算： $N_{z1} = AH_{cp}Q_p$ ， $N_{z,TP} = AH_{max}Q_{TP,min}$ ；其中 $N_{z,TP}$ 为调节前的保证出力； N_{z1} 为调节后的保证出力； H_{cp} 和 Q_p 为调节后的平均水头和调节流量； A 为系数； H_{max} 表相应于正常高水位的最大水头； $Q_{TP,min}$ 表示最小天然流量。

用保证发电量表示调节效益时，保证发电量的提高为

$$\begin{aligned}\Delta\vartheta_z &= \vartheta_{z,1} - \vartheta_{z,TP} = \int_{t_0}^{t_1} AH_t Q_p dt - \int_{t_0}^{t_1} AH_{max} Q_{TP} dt \\ &= AH_{cp} Q_p t_1 - AH_{max} Q_{TP, cp} t_1\end{aligned}\quad (1-2)$$

式中 $\Delta\vartheta_z$ ——保证发电量的增加;

$Q_{TP, cp}$ ——供水期天然流量平均值。

年发电量的增加为

$$\Delta\vartheta = AH_{max} \left[\int_{t_1}^{t_2} (Q_{TP} - Q_y) dt \right] \quad (1-3)$$

式中 Q_y ——水电站以装机容量工作时的的工作流量;

$\Delta\vartheta$ ——年发电量的增加。

在另一方面,如果水电站不进行调节,则水电站可以总处在最大水头状态下运行,而在进行调节之后不管在供水期和蓄水期,水电站的水头总要比最大水头为低,于是使得天然流量得不到极限充分的利用(在最高水头下利用),即由调节而产生损失,这部分损失称为调节损失。

在图1-2所示的情况下,调节损失可由下式算出

$$\begin{aligned}\Delta\vartheta_s &= \vartheta_{TP} - \vartheta_1 \\ &= AH_{max} \int_{t_0}^{t_2} Q_{TP} dt - A \int_{t_0}^{t_2} H_t (Q_{TP} - Q_s) dt\end{aligned}\quad (1-4)$$

式中 Q_s ——水库蓄水流量。因为

$$\int_{t_0}^{t_2} H_t (Q_{TP} - Q_s) dt \leq \int_{t_0}^{t_2} H_{t, max} (Q_{TP} - Q_s) dt$$

而

$$\begin{aligned}& \int_{t_0}^{t_2} H_{t, max} (Q_{TP} - Q_s) dt \\ &= H_{max} \left[\int_{t_0}^{t_2} Q_{TP} dt - \int_{t_0}^{t_2} Q_s dt \right] \\ &= H_{max} \int_{t_0}^{t_2} Q_{TP} dt, \quad \left(\text{因为} \int_{t_0}^{t_2} Q_s dt = 0 \right)\end{aligned}$$

故知 $\Delta\vartheta_s \geq 0$ (等号在不进行调节时成立)

公式(1-4)表示的调节损失是在水电站的上游造成的,其实,在水电站下游、水工建筑物以及机电设备中都有调节损失产生,下面分别进行讨论。为了区别不同因素造成的损失,我们把(1-4)中的 $\Delta\vartheta_s$ 叫做上游调节损失,并用 $\Delta\vartheta_u$, $\Delta\vartheta_{copp}$ 等分别表示发生在水电下游和引水建筑物中的调节损失,称为下游调节损失、引水建筑物调节损失等。

下游调节损失是当水电站的工作流量变动时,下游水位变动引起水头变化造成的。水电站下游水位和工作流量的关系一般可用近似分析式表示为

$$Z_{u\delta} = Z_{u\delta 0} + \alpha_1 Q_{p\delta}^{m_1}$$

式中 $Z_{u\delta 0}$ ——常数,相应于水电站不工作时的下游水位;

α_1 和 m_1 ——常数,由水电站下游河床特性和气候条件等因素决定;

$Q_{p\delta}$ ——水电站的工作流量。

当适当选择水位位标高程的零点时,可以使 $Z_{u\delta 0}$ 为零,则上式可写做

$$Z_{u\delta} = \alpha_1 Q_{p\delta}^{m_1}$$

我们来研究这样的具体情况:在某一调节周期内(从 t_0 到 t_r),天然流量为 Q_{TP} ,为了满