

汽輪机的調节和保护

望亭发电厂 汪祖鑫

水利电力出版社

内 容 提 要

本书用比較浅近的道理，介绍了汽輪机的调速、保护和油系統的作用原理、结构和运行技术知識；对于运行和检修中的問題和处理方法，也作了較多的介绍。

本书所举的实例都以国产机组为主，适当地介绍了一些国内常見的国外机组。

本书主要供发电厂具有初中文化程度的汽輪机司机、值班长、从事调速专业的检修工人和汽輪機車間的干部閱讀，也可供技工学校本专业学生、专业学校刚毕业的技术人員在学习和工作中参考之用。

汽輪机的调节和保护

望亭发电厂 汪祖鑫

*

水利电力出版社出版

(北京德胜門外六鋪炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷

*

1974年7月北京第一版

1974年7月北京第一次印刷

印数 00001—27750 册 每册 0.65 元

书号 15143·3085

TK262.7
3185
97-60
06

前 言

在毛主席的无产阶级革命路线指引下，在无产阶级文化大革命和批林整风运动的推动下，我们电力工业正在迅速发展，一个个新电厂多快好省地建成，成批的新机组相继投入生产。随着电力工业的发展，大量新人员担负起汽轮机组的运行和检修工作。为了确保机组的安全经济运行，迫切需要本专业的同志共同总结经验，进一步掌握专业知识。

汽轮机的自动调节系统是汽轮机组的重要组成部分。它根据运行要求具体执行汽轮机组的调速和保护任务，使机组能随时适应电力负荷变化的需要，和保证机组安全运行。当然，这套自动调节系统只有在设计规定的条件下才能正确动作，否则，动作就会失灵。根据统计，调速、保护和油系统的故障，约占汽轮机组故障总数的三分之一，许多汽轮机组的严重事故，都是由这些故障引起或扩大而造成的。因此，让所有汽机工作人员都能掌握这个系统的特性，是确保它正确及时地发挥作用的重要条件之一。

由于上述两个原因的推动，我编写了《汽轮机的调节和保护》一书，作为为电业工人特别是汽机专业同志们服务的一个尝试。

本书以汽轮机司机和调速系统的检修人员作为主要对象。在编写时，尽量少用数学公式，多采用曲线来说明各种现象，并尽可能地同电厂的生产实际相结合。但是，由于我的水平和实践范围的限制，本书只着重写31-6、上汽31-25和哈汽31-25-2型各类机组的调速系统，以及比比西型机组的调速系统。出版前，虽然补写了供热抽汽式和十二万五千瓩机组的调速系统，但比较简单。欢迎读者提出批评和意见，以便改正。

在编写过程中，我厂领导始终给予热情鼓励和各方面的支持。

本书编写时，承西安热工研究所、石景山发电厂、下关发电厂和西安电力学校等单位，以及我厂张书华、华盘兴、李高华、徐国元、窦书年等同志给予不少具体帮助，特此表示谢意。

汪祖鑫 1973年11月

目 录

前 言

第一章 汽轮机调速系统的作用原理和工作要求	(1)
第一节 汽轮机为什么要设置调速系统.....	(1)
第二节 最简单的调速系统.....	(3)
第三节 电网对调速系统的工作要求.....	(4)
第二章 几种典型的调速系统的结构说明	(6)
第一节 调速系统各部分的结构.....	(6)
第二节 31-6型机组调速系统说明.....	(22)
第三节 比比西型机组调速系统说明.....	(24)
第四节 上汽 31-25 型机组调速系统说明.....	(28)
第五节 哈汽 31-25-2 型机组调速系统说明.....	(30)
第三章 调速系统的特性	(32)
第一节 调速系统的静态特性.....	(32)
第二节 同步器.....	(39)
第三节 对调速系统静态特性的要求.....	(43)
第四节 调速系统的动态特性.....	(43)
第四章 调速系统的运行	(46)
第一节 起动过程中的调速系统.....	(46)
第二节 并列时的调速系统.....	(50)
第三节 正常运行时的调速系统.....	(51)
第四节 特殊方式运行时的调速系统.....	(55)
第五章 调速系统的试验和调整	(59)
第一节 静态特性曲线的实际测绘.....	(59)
第二节 静态特性的分析和调整.....	(66)
第三节 调速系统的动态特性试验.....	(73)
第四节 动态特性的分析和改进.....	(76)
第六章 调速系统的检修	(86)

第一节	调速系统检修的任务	(86)
第二节	检修调速系统的几个问题	(89)
第三节	调速系统的故障及其原因分析	(100)
第七章	汽轮机的油系统	(119)
第一节	汽轮机油系统的任务	(119)
第二节	两种典型的油系统	(120)
第三节	油系统各部件的结构和工作原理	(123)
第四节	油系统的运行和调整	(135)
第五节	油系统的检修和故障消除	(141)
第六节	如何消除油系统漏油	(155)
第八章	汽轮机的保护装置	(162)
第一节	保护装置的任务和结构	(162)
第二节	保护装置的运行和校验	(179)
第三节	保护装置的故障及其防止措施	(184)
第九章	油质对调速、保护系统的影响	(194)
第一节	怎样判断透平油的质量	(194)
第二节	油质劣化的原因和它的危害性	(195)
第三节	保持油质良好的措施	(198)
第四节	怎样消除油中有水	(202)
第十章	非凝汽式机组的调节系统和调节系统的发展	(208)
第一节	背压式汽轮机的调节系统	(208)
第二节	调整抽汽式汽轮机的调节系统	(219)
第三节	单元中间再热式汽轮机的调节系统	(229)
第四节	调速、保护和油系统的发展	(236)
附 录		
附录一	怎样看曲线	(238)
附录二	比色探伤法	(239)
附录三	调速系统技术数据记录图表	(241)
附录四	调速、保护和油系统的主要零件 使用材料一览表	(243)

第 一 章

汽轮机调速系统的作用原理和工作要求

第一节 汽轮机为什么要设置调速系统

我们日常遇到的汽轮机，都装有调速系统。如果有一台汽轮机不装调速系统，那又会发生什么现象呢？平时我们对一些发动机都有这样的认识：“拖得重了，车头慢了”。汽轮机也是如此，假如保持通过汽轮机的蒸汽量和进汽参数不变，那末拖的发电机愈重，即转矩愈大，转速就愈低；相反拖的发电机愈轻，即转矩愈小，转速就愈高，如图 1 所示。换句话说：汽轮机由于负荷变化而使转矩有了变化时，汽轮机自己能从一个转速过渡到另一个转速，使转矩和负荷相适应。这就是汽轮机的自调节。反之，假如汽轮机的负荷大了，而又要求它的转速仍保持原有的数值，则必须增加汽轮机的进汽量，以达到新的平衡。

既然汽轮机能自调节，那末为什么还要装调速系统呢？因为在自调节的过程中，汽轮机的转速变化很大。对于一台汽轮发电机，功率最少也有几百瓩，大的到几十万瓩，上百万瓩；它供给许多工厂用电，负荷的变化往往很大。例如中午休息时间，一下子许多工厂的机器停

止了转动，负荷将下降许多；而午休后，负荷会突然上升许多。如果依靠自调节，则汽轮机的转速变化很大，将无法保证发电机的电压和频率。又如发电机由于出线故障而一下子失去全部负荷，则汽轮机将产生极大的转速飞升，造成汽轮机的损坏事故。

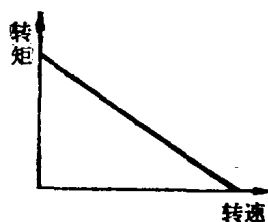


图 1 汽轮机转矩和转速的关系图

靠汽轮机的自调节运行，一定会引起转速很大的波动。这就同汽轮发电机运行的客观要求发生了矛盾。

汽轮机带动发电机在电网中运行，将电力送到各种不同的用户。它们的电机和电器，输电线路和电讯设备，都是根据一定的电压和频率设计的。因此必须保证电压和频率的质量，即保持一定的数值。否则电动机的转速将变快变慢、电钟将走的不准、电台的频率将不能稳定……，就会引起一系列的故障和严重的后果。而电压和频率都直接同汽轮发电机的转速有关，转速高，电压和频率就高；转速低，电压和频率就低。通常规定电网的频率应经常保持在50周/秒，允许误差为 ± 0.2 周，也就是对于额定转速为3000转/分的汽轮机来说，允许的转速误差为 ± 6 转/分；电压变动范围不得超过 $\pm 5\%$ 。

在电网中，发电机都是并列运行的。它要求各台发电机的转速完全一样。如果靠汽轮机自调节的话，转速波动很大，使并列变得非常困难，甚至引起发电机非同期并列而损坏。同时在并列之后，自调节使得负荷分配无法控制，结果造成有的发电机严重过负荷而烧毁，有的却失去负荷。所以不能依靠自调节运行。

目前发电厂绝大部分都是用汽轮机作为原动机。随着社会主义建设的发展，电力负荷愈来愈大。因此提高和保证汽轮机效率达到最高水平，就可以大大地降低煤耗，对整个国民经济建设有很大意义。汽轮机的效率都是根据在一定转速（通常是3000转/分）下进行设计的，当转速变化很大时，就会使汽轮机严重地离开了设计工况，使效率降低。所以自调节无法满足汽轮机运行中的客观需要。

装置调速系统的目的是为了解决这些矛盾。它根据汽轮机的转矩和转速相应变化的关系，利用转速变化作为讯号来进行调节。当转速有一个很小的变化时，调速系统能自动地改变汽轮机的进汽量，使汽轮机的功率和负荷相适应，从而使转速不发生很大的变化。

所以调速系统是依靠转速变化而动作的。如果转速没有变

化，就没有讯号，调节动作也就不可能发生。只有当转速有了变化，产生了讯号，才有调节动作。转速究竟要变多少，这要由设计决定。通常采用当变化全部负荷时，转速变化为额定转速的 $4 \sim 5\%$ ，已能满足客观的需要。

在正常运行时，汽轮机的进汽所能作的功同发电机所带的负荷保持平衡，汽轮发电机就稳定地保持一定的转速。每当电网中增加和减少负荷，或者蒸汽的汽压、汽温发生了变化的时候，原先保持的平衡就破坏了，机组就产生转速变化。这个变化通过调速系统的作用改变汽轮机的进汽量，使汽轮机和发电机之间重新达到平衡。由于汽轮机已经产生了转速变化，所以重新稳定在另一个转速上，它比原来的转速要低一些或高一些。

因此，调速系统的任务决定了它必须包括三个部分。第一部分是能够测得转速变化的机构，它能把微小的转速变化变为我们所需要的另一种变化，例如连杆位置的变化，油门窗口的变化，感应电压的变化等。第二部分是能够改变汽轮机进汽量或进汽参数的机构，以调节汽轮机的功率。为此，有的是装有多个汽门，不同功率就开启不同数量的汽门；也有只有一个或几个汽门，它改变汽门的开度，使新蒸汽发生节流作用，使同样一公斤蒸汽能作功的能量发生变化。这部分机构必须能够接受第一部分送来的讯号而改变自己的开度。第三部分是第一部分和第二部分之间的联系系统，没有这部分，第一部分感受的转速变化就不能传递到第二部分，从而改变第二部分。有时改变第二部分需要很大的功率，由第一部分传来的讯号无法直接完成这个任务时，就需要在联系系统中加入放大传动装置。

第二节 最简单的调速系统

图 2 表示最简单的调速系统原理图。图的左边为系统的第一部分，也就是调速器，它由汽轮机轴传动。当转速变化时使 A 点上下移动，A 点移动就是讯号。图的右边是控制进汽量的调速汽

门，也就是调速系统中的第二部分。这里是单个汽门，它的开度大小改变着进入汽轮机的蒸汽量，使汽轮机的转矩保持在各个不同的水平上。它和调速器之间通过连杆 ACB 互相联系，连杆 ACB 就是调速系统中的第三部分。连杆的左端 A 与调速器相连接，中间有固定支点 C ，另一端 B 与调速汽门相连。

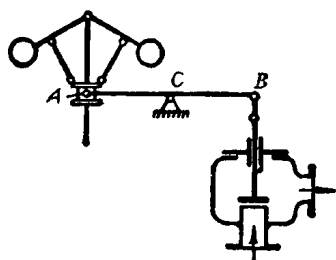


图 2 最简单的调速系统原理图

当汽轮发电机的负荷变小了，则汽轮机的转矩大于发电机的转矩，使汽轮发电机的转速上升。这时调速器的转速也加快，使 A 点向上移动，通过连杆的作用， B 点就向下移动使调速汽门关小，从而使汽轮机的转矩和发电机的转矩重新

达到平衡为止。这时，机组的稳定转速比之负荷变小之前要高一些。相反，如果负荷上升，通过调速系统的作用，将使转速稳定在一个较低的水平上。这就是调速系统起自动调节作用的最简单和最基本的原理。

第三节 电网对调速系统的工作要求

电网对于汽轮机调速系统的工作要求，可以概括地分成下列几点。

1. 当主汽门完全开启时，调速系统应能维持汽轮机的空负荷运行，也就是说，调速系统能保持汽轮机以 3000 转/分运行。在空负荷时，汽轮机的功率最小，它同电网没有并列，蒸汽量、蒸汽参数和背压稍有波动，就会使转速发生上下摆动；因此空负荷运行是最难保持稳定的区域。在电厂的运行中，有许多调速系统不能维持空负荷运行的实例。例如有些汽轮机在启动到额定转速时，将主汽门开足，就发现汽轮机的转速不定地上下摆动着，或者转速继续上升到 3000 转/分以上，使并列非常困难，不得不采

用降低真空（使蒸汽的作用减弱）或用主汽门维持转速等临时措施才勉强能并列。这样就延长了启动时间，使机组不能及时满足电网调度上的需要，更重要的是根本无法满足下面第2点的要求。

2.如遇到汽轮机由全负荷突然降到空负荷时，即用全负荷时，调速系统应将汽轮机的转速保持在危急保安器动作转数以下。举一台25000瓩的汽轮机来说，如果原来带25000瓩，突然负荷没有了，汽轮机的转速立即上升，这是调速系统遇到的最大的调节任务，需要调节的数量最大。电网要求在这种情况下，汽轮机的转速仍在3300转/分（指汽轮机危急保安器的动作转数）以下，否则危急保安器动作了，将迫使汽轮机停下。假如这时电网已恢复正常，则这台汽轮机就无法立即恢复负荷，必须再增速到额定转速才能并列，从而使事故扩大了。更危险的情况是万一危急保安器不动作，转速将要达到汽轮机设计所不允许的程度，可能引起飞车事故，造成整台汽轮机损坏。所以调速系统除了起自动调整的作用外，还是一个非常重要的保护装置。

3.当负荷增大或减小时，不论在空负荷到全负荷的任何一段范围内，都应非常稳定，不允许负荷有摆动和突然变高变低的现象。这就要求调速系统在它全部调节范围内都是稳定的，没有严重的滞缓现象。在电网中，负荷摆动和突变会使电压和频率波动，使用户发生困难和故障。严重的会造成整个电力系统发生振荡，甚至瓦解。

汽轮机的调速系统是一种自动调节装置。从上面的要求说明，在它调节的整个过程内，在具有最大调节量的时候，或者在最难调节的区域，都要求它既稳定又灵敏。所以它同其他自动调节装置一样，稳定和灵敏是始终要考虑的两大问题。

第 二 章

几种典型的调速系统的结构说明

第一节 调速系统各部分的结构

在第一章里，我们看到了最简单的调速系统，见图 2。它由调速器、调速汽门和连杆三部分组成。这种系统只能在极小的汽轮机上应用。调速器直接通过连杆改变调速汽门的开度，通常称为直接调节。由于调速器的能力很小，在大型汽轮机里，调速器无法直接带动调速汽门，因此就需要在调速器和调速汽门之间装有放大传动装置。这通常称为间接调节。图 3 就是这种具有放大传动装置的最简单的调速系统。间接调节根据放大传动装置的多少又可以分为一级放大和二级放大等。

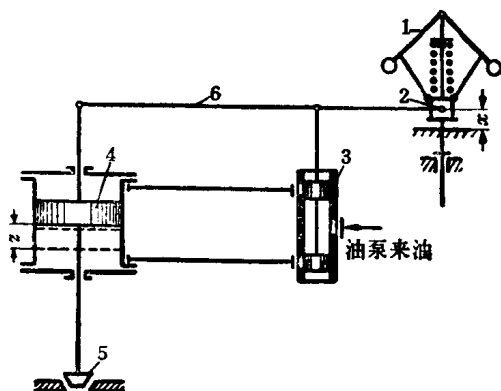


图 3 具有一级放大装置的调速系统简图

- 1—离心调速器；2—调速器滑环；3—断流式错油门；4—油动机；
5—调速汽门；6—反馈杠杆

下面详细讨论一下这个系统的各部分。

1. 调速器 它的作用是感受转速变化的讯号。图 3 所示的是离心重锤式调速器，由两个绕调速器轴旋转的重锤和主弹簧组成。它通过一组减速齿轮或蜗母轮组由汽轮机主轴带动。汽轮机转动后，调速器跟着一起转动。重锤由于绕调速器轴旋转而产生离心力，离心力的大小和它的旋转半径成正比，又和它的转速平方成正比。当汽轮机在某一转速稳定运行时，重锤由于离心力飞出到一定位置，刚好使离心力同主弹簧的收缩力以及滑环套筒等的总重量相平衡。当汽轮机转速有了变化时，假如变高了，离心力就增加了，超过主弹簧的收缩力，使重锤又飞出了一些，在新的位置上重新平衡。这样我们可以知道，汽轮机每一个不同的转速，调速器的重锤就相应地有一个不同的位置。重锤的位置由滑环变成调速头的行程，再同连杆连接在一起。

图 4 是具有纵向弹簧的离心重锤式调速器，它的主弹簧同调速器轴是同向的。

图中的 1 是重锤，转动的重锤以支棱垫 7 为支点，向外侧飞出，同时又将支棱 10 拉向下方，使主弹簧 14 拉长。和连杆相接的调速头 5（即行程指示器）也因此而移向下方。整个调速器装在杯形壳子 2 内，通过套筒 6 上的联轴节由汽轮机带动。

在一些老式的汽轮机上，调速器设计得很大，如奇异、茂伟、爱益奇等机组。这样就会经常消耗很大的功率，并且使得传动齿轮或蜗母轮组也必须很大，从而增加了制造上的困难和材料的消耗。随着汽轮机容量的增加，进汽参数的提高，即使很大的调速器也无法开关调速汽门。于是就发展成为间接调节。在调速器之后加了放大装置，有的采用多级放大，使得调速器可以设计得很灵巧。

离心调速器是调速系统的重要元件，不允许内部结构存在任何松动现象。可是离心调速器都是靠机械运动作用的，各个零件都有相对的摩擦运动，日久之后必然会产生磨损。这个缺点使离心调速器很难经常保持工作正常，并且大大地增加了维修工作量。

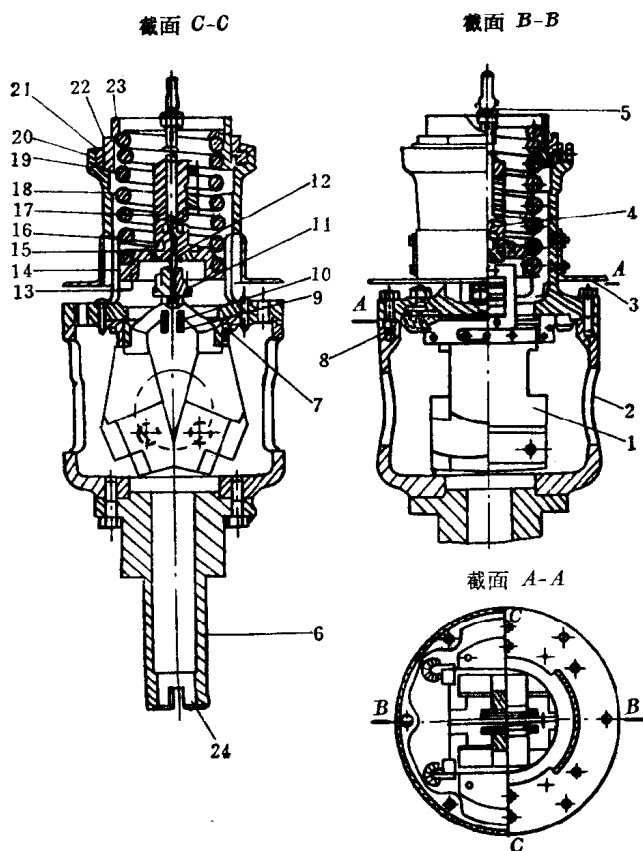


图 4 具有纵向弹簧的离心重锤式调速器

1—重锤；2—杯形壳子；3—油转向器；4—短轴；5—调速头；6—支撑调速器的套筒；7—支棱垫；8—限制器；9—夹圈；10—支棱；11—支座；12—止推轴承；13—主弹簧夹子；14—主弹簧；15—支座销；16、18—铰链弹簧夹子；17—铰链弹簧；19—导键；20—调节圈；21—支撑圈；22—调节螺帽；23—主弹簧夹子；24—联轴节

图 5 是一种高速弹性钢带调速器。在汽轮机轴上装上调速器横架 4，架上夹住由整条薄钢片做成弹性钢带 3，重锤 1 固定在钢带的两端，两块重锤用主弹簧 2 拉紧。转速升高时，重锤产生的离心力将主弹簧拉长，引起钢带 3 变形使钢带中心的挡油板 5

移向右边，因此开大了泄油间隙 A ，差动活塞 $\bullet d$ 右边的油室 8 内的油压便降低，使差动活塞也移向右边。挡油板和差动活塞的移动是相等的。这种调速器结构简单，几乎没有磨损。

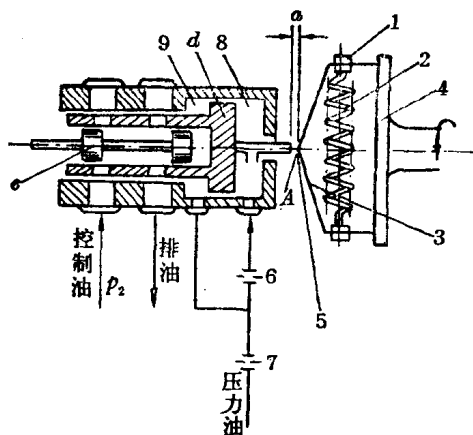


图 5 高速弹性钢带调速器

- 1—重锤；2—主弹簧；3—钢带；4—横架；5—挡油板；
6、7—进油节流孔板；8、9—油室

近年来，离心调速器已经逐渐被液压调速器所代替。液压调速器的作用仍是感受转速变化的讯号，不同的是它将转速的变化直接变成油压的变化，传送到放大机构去。这样就消除了离心调速器的缺点，因此大大地提高了灵敏度。

液压调速器通常用一只离心泵作为调速器。由于离心泵的压力和转速的平方成正比特性，所以每一不同的转速就有一个相应的压力。图 6 是这种调速器的简单示意图。

- 差动活塞是一种常见的油动机，又称液压随动机构，它的结构都类似图 5 那样。在油动机活塞的两侧都充满压力油，活塞两侧的作用面积是不相等的，面积大的一边（即室 8）有个泄油孔泄掉一部分油，使油压低于另一侧（即室 9），以保持活塞平衡。泄油孔的开度由另一元件来保持，如图 5 中的挡油板 5。当元件变动时，活塞两侧的油压就不平衡，活塞就跟踪移动到恢复原来的泄油间隙为止。这种结构已经广泛地运用在自动控制系统中，使功率很小的变化，变为功率较大的变化。

图 6 中的离心油泵 3 就是调速器，转速变化使油泵 3 的出口油压也随着变化，油压变化又使得调速器活塞 1 的位置也随着变化，从而带动了放大装置。

除了用离心泵作为调速器外，还有一种具有旋转阻尼的液压调速器，图 7 就是它的示意图。旋转阻尼 3 是一只带有多个泄油管的旋转环（详见图 8 所示）。它的外侧充满主油泵 2 来的动力油，中间有泄油口。旋转时作用于调速器活塞 1 内的油压通过它泄去一部分。当转速增加时，旋转阻尼泄油管中的阻尼作用因为离心力而增加，使泄去的油量减少，油压就上升，相反就下降。

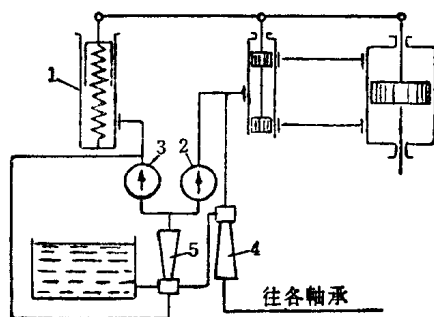


图 6 液压式调速系统示意图

1—调速器活塞；2、3—油泵；4—减压装置；5—射油器

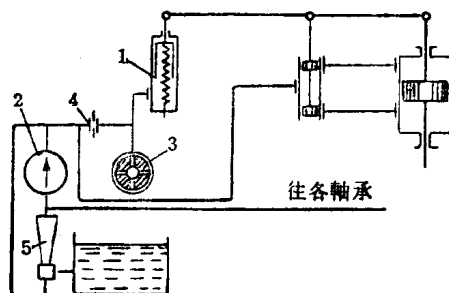


图 7 具有旋转阻尼的液压式调速系统简图

1—调速器活塞；2—油泵；3—旋转阻尼；4—节流门；5—射油器

这样使油压和转速建立了对应关系。旋转阻尼的优点是使调速油压不受主油泵油量波动的干扰。

调速器的构造型式还有许多，如果我们掌握了它的作用原理，则对于任何一种型式的调速器就不难懂了。

2. 调速汽门 调速汽

门是根据调速器的命令改变汽轮机进汽量的机构。它具体地平衡汽轮机转矩和发电机负荷之间的差距，使汽轮机保持一定的转速。

通过调速汽门的蒸汽量和它的通流面积成正比，和汽门前后压力比（门后汽压/门前汽压）成反比。所以改变调速汽门的通流面积就可改变进汽量。

根据调速汽门控制汽轮机进汽量的方式可以分成下列三种。

（1）节流调节 它只有一个调速汽门，见图9。进汽量的变化完全依靠改变这个唯一的调速汽门的通流截面积和汽门前

后压力比来达到。在负荷小时，汽门开度很小，使一部分蒸汽的能量消耗在汽门的通道上。因此流过汽门后的蒸汽压力比新蒸汽压力降低很多，使汽轮机的效率降低，这是它的主要缺点。另外由于在整个圆周上只有一个汽门，使汽轮机前端在圆周方向上发

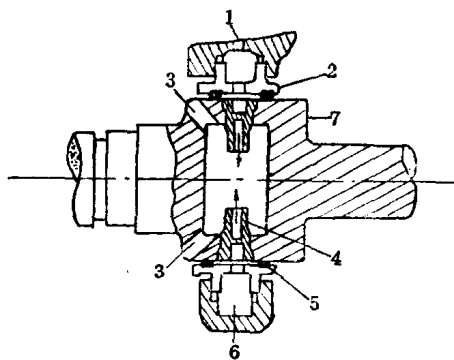


图8 旋转阻尼结构图

- 1—压力油进口；2—稳压器；3—泄油口；
4—泄油管；5—挡油环；6——次油压室；
7—旋转环

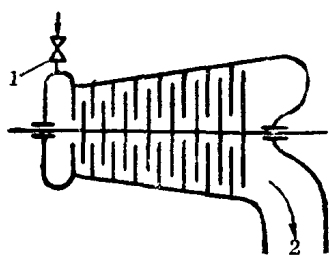


图9 节流调节示意图

- 1—调速汽门；2—排汽口

生很大的温度差，从而使汽缸壁产生较大的热应力和不均匀的热膨胀，造成汽轮机通汽部分的损坏，特别当新蒸汽参数愈高时愈加严重。它的优点是构造简单。由于这些原因，节流调节近来已较少采用。

(2) 喷嘴调节，又称断流调节 大部分汽轮机的调速汽门都不止一个，这种由几个调速汽门共同改变进汽量的方法称为喷嘴调节，见图10。每个调速汽门分别控制一组喷嘴。喷嘴调节有的是当第一个调速汽门开足后第二个才开启，这样依次下去；有的是前一个开到一定开度后，后一个就开启的。这样或那样的开启方法，都是为了使汽门开度和总的进汽量的变化关系能符合整个调速系统的设计要求。

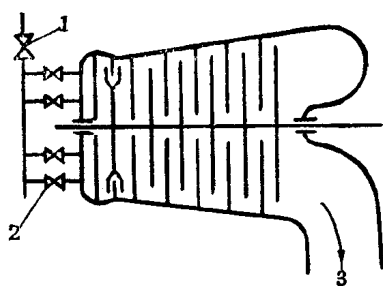


图 10 喷嘴调节示意图

1—主汽门；2—调速汽门；3—排汽口

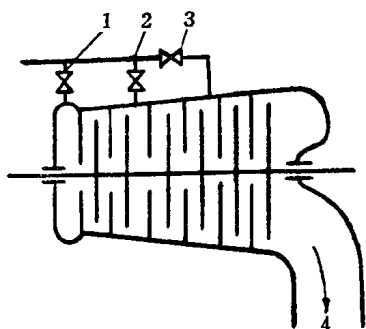


图 11 旁路调节示意图

1—调速汽门；2、3—旁路汽门；4—排汽口

(3) 旁路调节 在一些老式汽轮机里，常备有一个或数个旁路汽门，将蒸汽引到汽轮机的中间级，如图11所示。当调速汽门开足后，还可以将此旁路汽门打开，继续增大负荷。很显然将新蒸汽引入中间级是不经济的，同时在新汽参数很高时，也增加了制造上的困难，所以目前很少采用。

调速汽门的结构型式有许多种类。

图12是单座式碟型阀门。这种阀门最简单，一般只有在小功率汽轮机上采用。它的缺点是作用在汽门上的力很大，开启困难。