

国外机械工业基本情况

# 工业汽轮机

杭州工业汽轮机研究所编

机械工业部科学技术情报研究所

一九八五年

内容简介 本资料为《国外机械工业基本情况》参考资料的“工业汽轮机”部分，主要内容是介绍国外工业汽轮机的现状和动向，着重叙述了美国、苏联、英国、联邦德国一些主要企业的产品及发展方面的情况，可供有关领导部门、工程技术人员和教学工作者参考。

## 工业汽轮机

杞州工业汽轮机研究所 编

\*

机械工业部科学技术科学情报研究所编辑出版

机械工业出版社发行·机械工业出版社经售

\*

1985年12月北京

代号：85—11

定价：0.98 元

## 出 版 说 明

机械工业肩负着为国民经济各部门提供技术装备的重任。为适应四化建设的需要，必须大力发展机械工业。上质量、上品种、上水平，提高经济效益，是今后一个时期机械工业的战略任务。为了借鉴国外机械工业的发展道路、措施方法和经验教训，了解国外机械工业的生产、技术和管理水平，以便探索我国机械工业具有自己特色的发展道路，我们组织编写了第三轮《国外机械工业基本情况》。这一轮是在前两轮的基础上，更全面、系统地介绍了国外机械工业的行业、企业、生产技术和科学研究等方面的综合情况，着重报道了国外机械工业七十年代末和八十年代初的水平以及本世纪末的发展趋向。

第三轮《国外机械工业基本情况》共一百余分册，参加组织编写的主编单位包括研究院所、工厂和高等院校共一百余个，编写人员计达一千余人。本书为《工业汽轮机》分册，主编单位为杭州工业汽轮机研究所。编写者王中森。责任编辑王觉、翟金荣。

机械工业部科学技术情报研究所

瑞士BBC、日本的东芝、三菱、富士、法国索盖特公司、民主德国的Bergmann-Borsig/Gör-litzer厂等，都不同程度地这样做了。看来“积木块”系统设计构造法是工业汽轮机三化发展发展到一定阶段必然要达到的新的阶段，也是长期实践的结晶。采用“积木块”系统可通过少数基本“积木块”构造出多种型号的、品种繁杂的工业汽轮机以满足不同用户的各种需要，因而能按功率大小把交货期缩短到8~18个月（如西门子公司）。又如瑞士BBC1975年采用“积木块”系统后，设计生产同样一台1.5万千瓦背压式汽轮机的工作量比1970年时减少1/3，费用减少35%。民主德国B.B/G厂采用“积木块”系统后，其生产的工业汽轮机的安装时间比传统的汽轮机缩短50%，金属用量可减少30%。

国外各主要工业汽轮机生产厂如美国GE公司、联邦德国西门子公司等都在提高设计水平和制造水平的同时，不断提高企业管理水平，使其产品的供货周期大大缩短，例如美国GE公司中型汽轮机都生产制造部的生产制造管理系统已发展得很完整，包括19个分系统，其中10个分系统是通过计算机进行管理的。仅林恩工厂就有90%的零件用计算机进行管理。该部还有一整套质量保证体系，有250多名质量管理专家从事这项工作。<sup>[4]</sup>日本各厂家也都具有很高的企业管理水平，实行全面质量管理，使产品质量高，供货周期短。

目前世界各国工业汽轮机仍然可归纳为两大体系：冲动式汽轮机和反动式汽轮机。生产冲动式汽轮机为主的厂家有美国GE公司（以及购买GE公司制造权的厂家日本东芝、日立等），德拉瓦公司、英国GEC及苏联列宁格勒金属工厂（JIM3）、乌拉尔涡轮发动机厂（YTM3）。法国的拉托厂（Rateau）、联邦德国MAN、AEG等厂原来也以生产冲动式汽轮机为主。制造反动式汽轮机为主的厂家有：英国派森斯公司、美国西屋公司、瑞士BBC（以及购买BBC制造权的Stal laval、三井等）、联邦德国西门子公司（以及购买西门子制造权的富士等）、以及捷克的两个工厂等。自出现第一台冲动式汽轮机和反动式汽轮机以来的一百年间，两种汽轮机体系互相竞争使这两种汽轮机体系都得到很大发展，他们各自都达到很高的效率，制成很大功率的机组。有些国家则根据具体条件运用冲动式和反动式两种型式以求产品的发展。例如西屋公司主要采用小反动度的反动式汽轮机，也采用冲动式汽轮机，其给水泵汽轮机就是冲动式的。

由于资本主义世界经济衰退的影响，国外各发达国家主要厂家的工业汽轮机虽然从质量上、品种上还在继续发展，但在生产和销售上在某种程度上仍呈现不景气现象。有些厂家生产任务不饱满，GE公司、西屋公司、埃利奥特公司、以及西门子公司等都先后涌向中国寻求更大的市场，力求与中国结成伙伴关系。又如1984年西屋公司、西门子公司的大批裁员也是一个例证。

近年来可控变速电动机驱动装置有了较大发展，应用也慢慢多起来<sup>[50]</sup>。看来不久的将来将成为工业汽轮机的竞争对手。例如，美国西屋公司1982年3月为西南电力公司提供了三台6000马力用于驱动引风机的变频同步电动机、二台3000马力用于驱动鼓风机的同步电动机；又如西门子公司已为欧洲75万千瓦常规火电站提供了二套世界上最大的变速电动机（同步无刷电机）用于驱动给水泵，其功率为16000马力（1.2万千瓦），转速为4500转/分。

## 二 各类工业汽轮机的现状

### (一) 驱动用工业汽轮机

目前这一类工业汽轮机在石油化工、化肥、冶金和电力工业中已得到广泛应用。在15万吨/年以上的大型合成氨厂、10万吨/年以上的大型乙烯厂、年处理原油250万吨以上的炼油厂、大型高炉和30~35万千瓦以上的大型火电站等处，驱动用工业汽轮机是关键的动力设备。这些工业汽轮机在上述大型装置中的使用，正是用其所长：如满足变速调节、防爆、防化学腐蚀等特殊要求等。为了适应工厂向大型化发展的趋势，驱动用工业汽轮机的单机功率逐年有所增大，同时有些机组也向高转速发展，因而使某些机组设计和生产的难度有所提高。以下分述各种领域中应用的驱动用工业汽轮机的现状。

#### 1. 合成氨厂和甲醇厂驱动用的工业汽轮机

一般大型合成氨厂中采用工业汽轮机20~30余台，总功率可达四万千瓦以上，其中四大机组——合成气压缩机、空气压缩机、氨压缩机和原料气压缩机，它们需要采用大型驱动用工业汽轮机作为动力，其功率约占全厂总功率的80%<sup>[2]</sup>，其余为驱动泵、风机用的工业汽轮机。合成氨厂<sup>[1]</sup>主要工业汽轮机的典型系统如图1所示，美国凯洛格公司承包的三十万吨合成氨厂就是一例。它采用的驱动工业汽轮机是由德拉瓦厂提供的，其中合成气压缩机是用双缸高速汽轮机同轴驱动的，高压缸是GJMV-DC型背压式汽轮机，它用作前置机；低压缸为

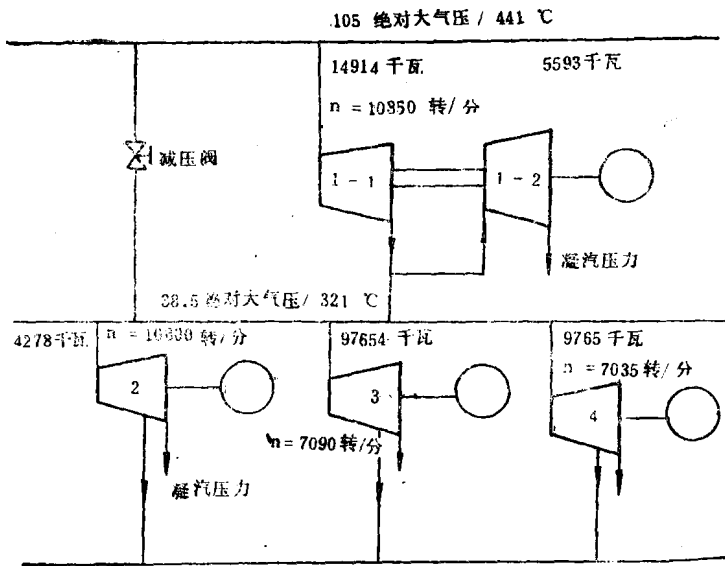


图1 典型合成氨厂主要工业汽轮机系统

- 1-1: GJMV-DC型 合成气压缩机驱动用工业汽轮机
- 1-2: GJMV型
- 2: GJSV型原料气压缩机驱动用工业汽轮机
- 3: KJWV-DF型空气压缩机驱动用工业汽轮机
- 4: KJDF型氨压缩机驱动用工业汽轮机

GJMV型凝汽式汽轮机，二者转速均为10850转/分，前者是大型合成氨厂中唯一的高压（高背压）汽轮机，其进汽参数为105绝对大气压/441°C，功率为14914千瓦，排汽压力为38.5绝对大气压。其余三大机组均用中压凝汽式汽轮机驱动。日本型三十万吨合成氨厂采用的工业汽轮机大致相似。

这类厂的大型驱动用工业汽轮机要用高速汽轮机，特别是合成气压缩机的驱动用工业汽轮机直到目前仍是工业汽轮机中技术难度最大的一种特种用途汽轮机。例如美国GE公司一台单缸高速、抽汽、三排汽口凝汽式汽轮机，转速为11000转/分，功率达35500千瓦，新汽参数为138绝对大气压/535°C，它装于杜邦公司得克萨斯州彼德蒙镇甲醇厂，用于驱动合成气压缩机，1981年交货时，是世界上功率最大的单缸抽汽凝汽式汽轮机<sup>[9]</sup>。日本三菱的广岛船厂已为石化工业研制出最大连续转速14500转/分，最大功率为14500千瓦的5CL-4B型单缸凝汽式汽轮机，同时还在研制转速达25000转/分的高速汽轮机<sup>[10]</sup>，为此在转子、叶片选材、轴承设计等方面采取措施以解决高速运转中振动问题。苏联涅瓦列宁工厂生产的II-30-100/41-1型双缸抽汽凝汽式汽轮机，转速为9300~10000转/分，进汽参数103绝对大气压/482°C，功率为29400千瓦，1977年起提供给合成氨厂作为驱动压缩机之用<sup>[27]</sup>，该机同时还可供一部分工业用汽。西门子公司也生产供合成氨厂用的驱动用工业汽轮机。

## 2.乙 厂用的驱动工业汽轮机

驱动乙烯厂压缩机的工业汽轮机为中速汽轮机。这类厂的典型工艺流程要用四种压缩机，即裂解气压缩机、丙烯冷冻压缩机、乙烯冷冻压缩机和原料气压缩机，因而需要用四种相应的驱动用汽轮机。这类厂利用内热裂解炉中的废热产生的蒸汽作为这些工业汽轮机的新汽。图2是美国GE公司提供的典型大型乙烯厂使用的主要几台工业汽轮机的系统情况。

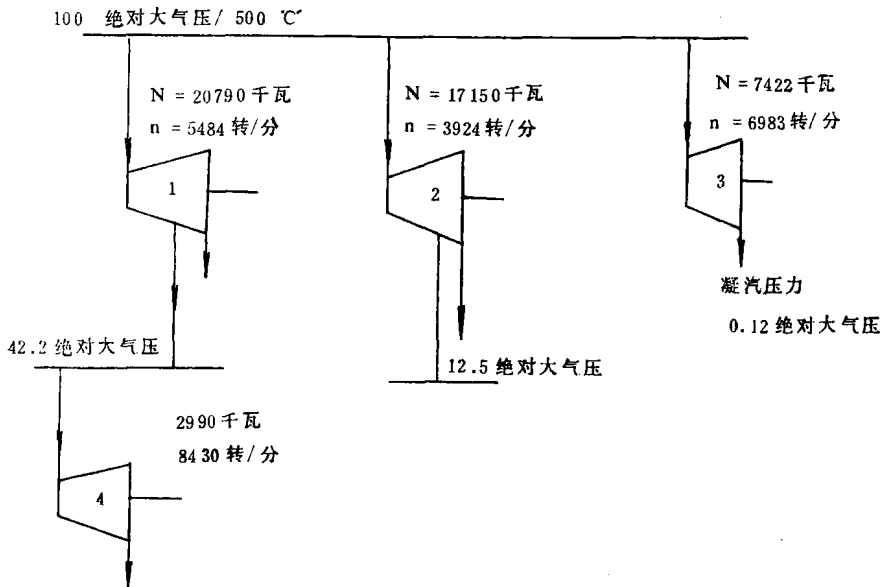


图2 典型的大型乙烯厂驱动压缩机的工业汽轮机

- 注：1.裂解气压缩机的驱动汽轮机  
 2.丙烯压缩机的驱动汽轮机  
 3.原料气压缩机的驱动汽轮机  
 4.乙烯压缩机的驱动汽轮机

由图2可知,裂解气压缩机是这类厂中功率最大的压缩机,其驱动用工业汽轮机是一台高压抽汽凝汽式汽轮机。随着装置容量增大,这种工业汽轮机的功率可高达45000千瓦,蒸汽流量可达375000公斤/时(例如GE公司机械驱动汽轮机部就生产这样大功率的机组)。美、日石化工业预料这个功率值还要增大。又如日本承包的30万吨乙烯厂中主要几台驱动工业汽轮机是日本三菱公司提供的。与之配套的还有10余台小工业汽轮机,它们多为单级背压式的。一种美国承包的装置其小型机由埃列奥特公司提供,另一种日本承包的则由新日本造机吴制作所提供。乙烯厂驱动用汽轮机的可靠性从70年代到80年代不断有所提高。据美国几个大型石化公司对所运行的71台日本产工业汽轮机1960~1970年期间的运行故障所作的统计<sup>[12]</sup>,平均每台每次起动间的故障为0.52次,此数后来已明显下降。此外对84台汽轮机所有零件平均运行时间所作的统计,时间最短的为冲动式动叶(2万小时)和反动或动叶(4万小时)。

### 3. 液化天然气驱动用的汽轮机

天然气液化需要用冷冻压缩机,其驱动用工业汽轮机属于大功率中速凝汽式汽轮机,其进汽参数一般为次高压,通常为60绝对大气压/440°C,这类厂一般有几套串列机组,每套有三台大型压缩机,均需采用转速和功率几乎相同的凝汽式汽轮机。规模大的液化天然气厂要求工业汽轮机单机功率超过4万千瓦。这种汽轮机在采用单缸结构时一般必须采取双分流排汽。例如美国GE公司机械驱动汽轮机部生产一台这种汽轮机,用于大不列颠石化公司大斯岛天然气厂第一套装置中。该机进汽参数为58.6绝对大气压/433.3°C,功率为45,000千瓦,转速为4757转/分,是当时世界上在运转中最大的变转速机械驱动用汽轮机。又如日本最大的天然气装置驱动用工业汽轮机为37,000千瓦机组,进汽参数为62.2绝对大气压/470°C(1982年数据)。

### 4. 合成燃料厂用汽轮机

煤的气化液化和合成燃料是发达国家重要的能源课题之一,在这种厂中使用工业汽轮机将越来越多。这类工业汽轮机可以用背压式也可用凝汽式,一般为中压中速机组。例如美国GE公司机械驱动汽轮机部和法国CNIM合作生产提供给南非Seconda煤气液化厂(这是当时世界上最大的煤气液化厂)的几台汽轮机中,有一台为背压式,进汽参数为37绝对大气压/420°C,功率为14,605马力,转速为7863转/分,背压为~10表压。

### 5. 锅炉给水泵汽轮机<sup>[16,17,30]</sup>

国外当一般电站主汽轮机容量在30万~40万千瓦以上时,其锅炉给水泵大多采用工业汽轮机来驱动。给水泵汽轮机的汽源大多采用主汽轮机的中压缸抽汽为主,在发展过程中曾有一段时间采用背压式和抽汽背压式汽轮机,其排汽排入低压加热器。经过实践,证明其主辅机和回热系统相互影响,启停运行均不方便。后来还是采用纯凝汽式,这样能保证机组的灵活性和整个动力装置的高经济性。这种汽轮机的进汽参数较低,一般为4~10绝对大气压,转速为5000~6000转/分,这些参数使效率高而价格不太贵,达到最佳状况。根据容积流量可采用单流和双分流两种排汽形式。其容量随电站主机容量而定,一般对常规再热式汽轮机来说,给水泵汽轮机的容量约为主机的4%。例如130万千瓦主机,其给水泵汽轮机功率约为5万千瓦。由于给水泵的效率比主机的负荷下降得快。因此一般主机在40%负荷以下,抽汽口来的蒸汽就不敷维持给水泵所需功率之用,这时就必须切换到第二汽源。这种汽源的切换有外切换和内切换等两种方式;美国和加拿大(如GE和西屋公司)一般采用新汽内切换,而西欧则以采用外切换方式为主(如英国),瑞士BBC则取50%作为切换点,采用高排内切换方式;西

门子公司则不采用内切换技术。苏联70年代中期还不能实现自动内切换，而采用旁通配汽方式的外切换。虽然由于高排内切换与新汽内切换相比在低负荷时有更好的经济性，但由于它一般不能全工况运行，至主机10%负荷时还需要再次切换至辅助蒸汽。当功率很大或主机抽汽点的正常抽汽压力较小时，要求低压喷嘴作全周进汽布置，因而就给高压喷嘴的布置造成困难，不得不改用外切换方式。此外，根据不同具体条件还可以采用各种混合切换系统。目前全世界约75%的给水泵汽轮机采用新汽内切换方式。

美国GE公司机械驱动汽轮机部于1957年首创用变转速工业汽轮机取代电动机来驱动给水泵<sup>[3]</sup>，其汽轮机的新汽内切换装置的高压进汽口能多年承受535°C、240绝对大气压的高温高压蒸汽作用。该部第一、第二代的给水泵汽轮机是背压式的，第三代典型的给水泵汽轮机则为纯凝汽式（单流），5600转/分，14000马力，直接排汽到主机凝汽器或独立的凝汽器，前者为最经济，目前多用此方式。美国正在运行的最大的给水泵汽轮机功率超过66,000马力（49200千瓦），用于130万千瓦机组。

英国的一台给水泵汽轮机为纯凝汽式，设计最大功率为22000千瓦（5000转/分时），额定功率17000千瓦，用主机中间抽汽供汽，参数为11绝对大气压/380°C。当主机负荷低于30~42%时，则由外切换装置切换到由副蒸汽管道供汽，参数为37绝对大气压/330°C<sup>[4]</sup>。

瑞士BBC的给水泵汽轮机是不带调节级的，以滑压方式运用。他们采用高排内切换方式。他们认为高压排汽点抽出蒸汽时其温度条件与正常抽汽点的温度条件相似，所以只需要一个减压阀，而采用新汽内切换则使汽轮机结构复杂化，而且在低负荷时得益少。苏联卡卢斯基涡轮厂1976年生产的OK-12II型凝汽式给水泵汽轮机用于发电站50万千瓦机组上。此外还有OK-18IIY型汽轮机，进汽参数为16.4绝对大气压/443°C，其转速为4650转/分，额定功率为15500千瓦，用于80万千瓦机组上。此机组降参数时也可用于50万千瓦机组。

总之，在给水泵汽轮机设计中要求有较强的系统整体性，它与主汽轮机、锅炉、给水泵等均有密切连系，与电站的设计布置也有一定关系。

## 6. 其他领域应用的驱动用汽轮机

其他驱动用工业汽轮机使用领域极为广泛，从钢铁工业的高炉鼓风机、各种工业的锅炉鼓风机和引风机、直到糖厂的切碎机、压榨机，造纸工业中的造纸机都大量地采用工业汽轮机来驱动。在钢铁工业中例如1977年美国钢铁公司在阿拉巴马州仙地（fairfield）厂安装的高炉鼓风机驱动机就是GE公司机械驱动汽轮机部制造的工业汽轮机，功率为32100千瓦（43600马力），转速为3938转/分，这是美国境内最大的一台高炉鼓风机驱动用工业汽轮机。又如我国武钢高炉鼓风机的驱动用汽轮机系瑞士所造的DSQ型，为单缸、双抽凝汽式（反动式）汽轮机，最大功率为29500千瓦，转速为3860转/分，进汽35绝对大气压/435°C，汽耗率为4.61公斤/千瓦·时。

锅炉鼓风机和引风机采用工业汽轮机驱动后可用风机效率提高，成本降低（引风机所需驱动功率比鼓风机所需驱动功率明显要大）。由于工业汽轮机具有较高的固有起动力矩（约为运行力矩的1.4倍），符合锅炉风机由于惯性大所提出的驱动要求。这种汽轮机可以是凝汽式（用主机中压抽汽），也可以是背压式（采用主机再热前的高压抽汽，排汽压力为3.5~10.5绝对大气压），这样就简化了设备组成，减少了投资，而且可达到双重功能：既满足了流程的蒸汽需要量（用于烟气再热和空气预热），又满足了风机驱动的要求。例如美国GE公司对某67万千瓦的火电站汽轮机作了研究，在75%负荷时用背压式工业汽轮机驱动



变速风机比用定速电动机驱动定速风机可节省功率约4400千瓦，约为电站净输出的1%，在某种条件下可使电站输出电力增加5万千瓦。

糖厂切碎机、压榨机所用的驱动汽轮机基本上都是些小型汽轮机。例如英国APE-Allen公司1981年为澳大利亚Farleigh制糖厂提供的一台Allen SLC-22型汽轮机供驱动世界上最大的一台甘蔗压榨机用<sup>[44]</sup>。这台汽轮机功率为6440马力(1~4800千瓦)，也是驱动甘糖压榨机的功率最大的工业汽轮机(1982年数据)。该机的联轴器和平行轴行星齿轮减速箱具有适应压糖机引起冲击载荷的能力，可靠性好。该型汽轮机最大进汽参数为31绝对大气压/400°C，排汽压力为4.15绝对大气压，最大功率可达6500千瓦，而这台的具体进汽参数要低一些(15.5绝对大气压/270°C)，功率也低一些，转速则由6000转/分减速到1000转/分。比SLC-22功率小的型号有：SLC-18，SLC-14等。SLC型多级汽轮机具有中等效率，但比单级汽轮机的效率则要高得多。而且费用较低。这类工业汽轮机难度不大，许多厂家也都可以生产。

驱动造纸机的工业汽轮机多为单级汽轮机，例如Allen厂提供的Allen/KKK单级背压式汽轮机，进汽参数为41.5绝对大气压/357°C，背压为13.3绝对大气压，供工艺流程驱动用的功率范围为500~2200马力。该型工业汽轮机的转速不等率为0.25%，由于实行驱动和供汽两用，使系统的总效率达~80%。

驱动各类工厂的各种泵用的工业汽轮机多为小型机，例如大型合成氨厂、乙烯厂中与泵和风机配套的汽轮机都采用小型工业汽轮机，美国埃列奥特(Elliott)的YR系列汽轮机、美国考比斯(Coppus)厂TF型汽轮机、新日本造机吴制作所的小汽轮机都是用得比较普遍的。

此外，海水淡化厂的海水输送泵、蒸馏水泵、海水循环泵也常用单级工业汽轮机驱动，一般为垂直安装，带减速箱。

## (二) 发电用工业汽轮机

发电用工业汽轮机也就是自备电站用工业汽轮机。采用发电工业汽轮机的主要工业部门为造纸、钢铁、和石油化工这三大工业；当然，其他工业如纺织、印染、制糖、建材、食品等工业也广泛采用发电用工业汽轮机，例如日本这三大工业所使用的发电工业汽轮机约占发电工业汽轮机使用总数的3/4。这类工业汽轮机中，除一部分为纯自备发电用以外，大部份为热电联产、余压发电和余热发电用工业汽轮机。随着工业技术进一步发展和节约能源政策的实施，必然会导致热电联产、余压、余热发电用汽轮机的使用量有较大的增长。例如日本在1957年以后工业部门热电联产、余热发电用工业汽轮机的使用量增加很快，一年可增加100万千瓦；60年代每年平均增加250万千瓦；70年代初年平均增长600万千瓦。从日本自备电站总装机容量分析：1956年约为1200万千瓦，每经六年至七年就翻了一番，到1975年共翻了三番，达到9600万千瓦。这与1971年日本政府发布关于促进自备发电进行能源开发的文件和其他有关能源政策是密切相关的。美国工业自备电站的发电量在50年代曾达到全国总发电量的15%，后来这个比例逐渐下降；到80年代初仅为4%左右。这主要是由于美国政府当时对自备发电没有恰当的政策。为此，美国政府在1980年颁布法令(Purpa)规定公用电力公司必须以公平合理的办法对待工业自备发电以促进自备电站的发展。此后美国工业自备电站有了发展，发电工业汽轮机的使用量有了较大增长。

如前所述,全世界40多家生产汽轮机的厂家一般都生产发电用工业汽轮机。例如美国GE公司的中型汽轮机部生产单级和多级冲动式各系列的发电工业汽轮机,其功率可达10~20万千瓦,进汽参数可达240巴/535°C。该部在1955年~1982年期间已生产单机功率5000千瓦以上热电联产汽轮机共391台,计740万千瓦。又如西门子公司威塞尔厂的三系列工业汽轮机可满足进汽参数140绝对大气压/540°C以下、功率10万千瓦以下的各种工业自备电站需要,为了满足工业电站更大的需求,甚至把工业汽轮机扩大到一般电站中,为此发展了四系列汽轮机。单缸机组功率可达6万千瓦以上,双缸机组可达17~20万千瓦。例如,该厂为挪威 $\phi$ ye冶炼厂余热发电站提供的一台1.4万千瓦双缸凝汽式汽轮机,1977年投运,投资几年就可回收。该厂为某海水淡化厂提供的一台四系列发电用汽轮机,进汽参数为80绝对大气压/520°C,功率为15万千瓦。日本富士、印度和我国分别购买了西门子公司威塞尔厂三系列汽轮机的制造权。BBC集团生产多级反动式汽轮机有JT和KT两个系列,其进汽参数为130绝对大气压/538°C以下,工业电站汽轮机的功率范围为0.2~15万千瓦。日本三井公司购买了这两个系列汽轮机的制造权。英国GEC生产各系列工业汽轮机,其进汽参数达116绝对大气压/510°C,功率范围为0.5~8万千瓦。该公司为石化厂设计制造的一台热电联产工业汽轮机为双抽-凝汽式,进汽参数为116绝对大气压/510°C,最大连续功率为3万千瓦。这是英国曾经生产过的最大的一台双抽凝片式汽轮机。

日本各公司除采用非再热发电用工业汽轮机外,还取用再热式机组以提高性能。例如,1988年在某工业自备电站投运的双抽汽再热凝汽式汽轮机,其进汽参数为140绝对大气压/538°C,再热温度430°C,功率达53000千瓦。更大的机组则有1974年在东洋曹达工业投运的再热式汽轮机,功率达116000千瓦。这两台汽轮机均为东芝公司产品。此外为了兼顾余热利用,日本等国有关公司还生产混压进汽式双抽凝汽式汽轮机,例如东芝公司为大昭和造纸公司提供的这种汽轮机除主要采用锅炉来的高压高温蒸汽(126绝对大气压/533°C)外,还加入造纸厂余热锅炉62绝对大气压/410°C的中压蒸汽,该机功率为6万千瓦,取用电液调节器。

### (三) 国外工业汽轮机的制造工艺

#### 1. 冷加工工艺

近十年来世界上各主要工业汽轮机生产厂的冷加工工艺水平有很大的提高。其重要的标志则是越来越多地采用数控机床,并进一步扩大为计算机辅助制造(CAM),再加上成组技术的应用,使单件、小批生产得到与大批生产相似的效益。例如,美国GE公司中型汽轮机部拥有1500多台加工机床,其中数控机床类占20%,并有越来越多的零件采用CAM方式进行加工,这样就能适应产品设计的不断变化,可提高加工精度,而且能保证重复加工精度,因而加工质量稳定,减少了大量工装,大大提高了劳动生产率,缩短交货周期。而西门子公司威塞尔厂数控机床只占机床总数量4.5%(1976年数据);美国德拉瓦厂则占8%;GE公司机械驱动汽轮机部的数控机床比例也较高。又如苏联各生产厂都不断更新机床设备,增加数控机床。列宁格勒金属工厂(JIM3)到1983年已彻底更新了机床设备,使特大型金属切削机床比1975年增加了30%,数控机床增加到180台;在叶片生产中,使用的专用机床和数控机床已占60%;在转子车间则按成组技术的原则进行转子加工和装配;焊接工作的机械化、自动化水平已提高到70.4%。苏联有些厂则采用多用途成组加工可变流水线对叶片进行

成组加工，他们利用成组技术使全部生产实现了“综合自动化”。他们认为：“成组技术不但对批量生产的中小件有效，就是对数量少的汽缸、转子等也是同样有效的。”此外，苏联有一种称为“自动化工艺综合机床”在加工汽缸等大型零件时得到很好的应用，并被认为有较大的发展前途。苏联还研制了HC—33Φ2型数控龙门式加工中心，它可按预定程序完成汽缸的全部精加工，提高了精度，而且使调整、测量的工作量减少2/3~4/5；有些厂采取这些措施后使加工周期缩短25~30%。此外，工业机械手在苏联工业汽轮机厂中得到广泛应用。

为了提高叶片、转子等零件(或其有关部位)的抗疲劳性能，英、苏等有关厂对叶片等零件采用喷丸强化处理(液压喷丸或其他喷丸)，使抗疲劳强度提高了25~42%。

此外，国外还采用无屑和少屑加工、刀具镀膜强化、电加工技术等等以提高金属利用率，节约原材料，降低成本，提高劳动生产率，提高零件质量。

## 2. 锻、铸毛坯的热工艺：

国外大多数工业汽轮机生产厂不设大型锻、铸车间，锻、铸件特别是大型锻、铸件由定点毛坯厂提供。生产厂和毛坯厂密切配合以解决关键的大型毛坯。

国外多数工业汽轮机厂家在汽轮机上采用整锻转子结构。他们认为，整锻转子的高温疲劳强度较高，可避免变工况下叶轮红套处应力大的缺点以及键槽处应力集中、应力腐蚀裂纹等问题。有些厂对整锻转子使用沿长度方向逐段热处理的新工艺，并采取措施进一步提高锻件材质的均匀性，减少材料的偏析区等。苏联有些厂采用电渣铸造法使零件的金属利用率提高25%以上。日本有些厂研究用小钢锭制造较大锻件问题，并解决转子锻件中心部位需提高强度和塑性等问题。也有些厂(如BBC)继续主张发展焊接转子，使锻造的难度大大降低。

### 三、国外工业汽轮机的发展动向

在大型电站近年来高速发展的情况下，发电用工业汽轮机在装机容量上仍在工业汽轮机中占较主要的地位，这说明工业汽轮机发电不能完全由一般电站发电来代替。第一类工业汽轮机发电是自备热电站，既供电又供热，其经济利益比向公共电网购电，同时自己供热的经济利益明显要大。即使苏联式的中心热电站在一定条件下其技术经济指标也不一定比自备热电站更有利（主要取决于远距输电和送汽投资太大）。第二类工业汽轮机发电是余热发电站。第三类工业汽轮机发电是利用生产过程中产生的废料（如蔗渣、刨花等）作为燃料的自备电站。这二、三类工业汽轮机电站综合经济效果更为明显，当然由电网输入电力的方法是不能得到的。第四类是中小型中心热电站，这是为该区域若干工业企业服务的，相当于几个企业的联合自备电站，其经济效果与第一类相似。有些厂家由于其工业汽轮机系列已能满足这类区域热电站的所有要求，其中包括工业汽轮机的功率已与一般热电站汽轮机的功率相近，因而把工业汽轮机扩大使用于中心热电站中。例如，联邦德国1970~71年在慕尼黑等热电站安装了一台2.7~3.6万千瓦的热电联产工业汽轮机。西门子公司在多年实践的基础上，1976年以后考虑把工业汽轮机扩大使用于一般电站，发展了四系列汽轮机，以解决生产不足问题。这些都说明近十年来发电用工业汽轮机有了明显发展，而且也看出发电工业汽轮机不但要继续存在下去，而且为适应能源紧张的形势，今后更会有所发展。而随着各类工业的进一步发展，各类驱动用工业汽轮机也将继续发展，特别对某些工业部门来说，一定时期内还是必不可少的。但对驱动用工业汽轮机来说，将来会遇到可控变速电动机的竞争，在同等功能情况下就取决于经济和可靠性等因素。下面分述主要发展动向。

#### （一）适当提高蒸汽进汽参数和单机容量，并保持原有进汽参数和容量的多样化

近年来大型电站汽轮机的进汽参数向超高温超高压发展：日本已达317绝对大气压/593°C，正在研究发展352绝对大气压/649°C的100万千瓦机组及361绝对大气压/566°C的机组。美国已有246绝对大气压/538°C的机组，正在发展317绝对大气压/593°C的82.4万千瓦的超临界机组。苏联也在大大提高机组的进汽参数和单机容量。据资料介绍，采用168绝对大气压/540°C/540°C的机组效率为35.5%，参数提高到316绝对大气压/650°C/600°C/656°C，效率可提高到39.5%（如联邦德国）；316绝对大气压/593°C的再热机组比246绝对大气压/538°C的再热机组汽轮机效率可提高6%（日本）。自备电站工业汽轮机的发展和上述有所不同，但为了提高性能，其进汽参数必然要有所提高。IEC和NEMA标准对工业汽轮机的蒸汽参数分别推荐某一个范围，例如IEC推荐为32~103绝对大气压/435~565°C~非再热汽轮机，而NEMA则推荐8.1~169.7绝对大气压/260~567°C。各国厂家在某些特殊的发电用工业汽轮机上也有大大超过上述范围的情况。例如GE公司有些机组进汽参数已高达240绝对大气压/535°C，西门子公司个别机组则高达300绝对大气压/650°C。

但从整个发电用工业汽轮机和驱动用工业汽轮机来看，其进汽参数是受工厂整个热力系统蒸汽平衡图的制约，而且与有关工业流程所需的蒸汽参数等密切相关。普遍认为进汽参数在140绝对大气压/540°C左右较为合适。因此今后的趋势将是继续保持进汽参数和容量的多样化，只有这样才能充分满足各种不同需求，并求得本工厂的生存发展。图3是工业汽轮机最高进汽参数随年代提高的情况<sup>[28]</sup>。图4是单机最大容量随年代增大的情况<sup>[31]</sup>。图5为典型小型

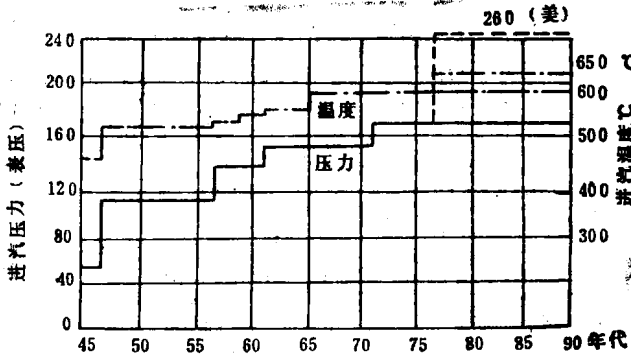


图3 工业汽轮机进汽参数的提高

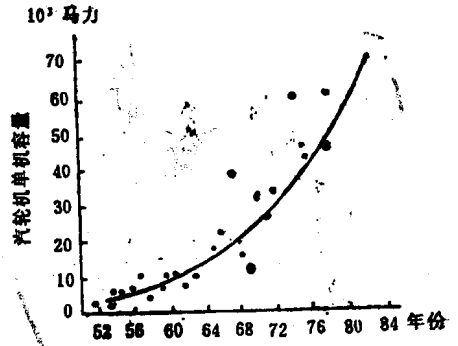


图4 工业汽轮机容量的增大

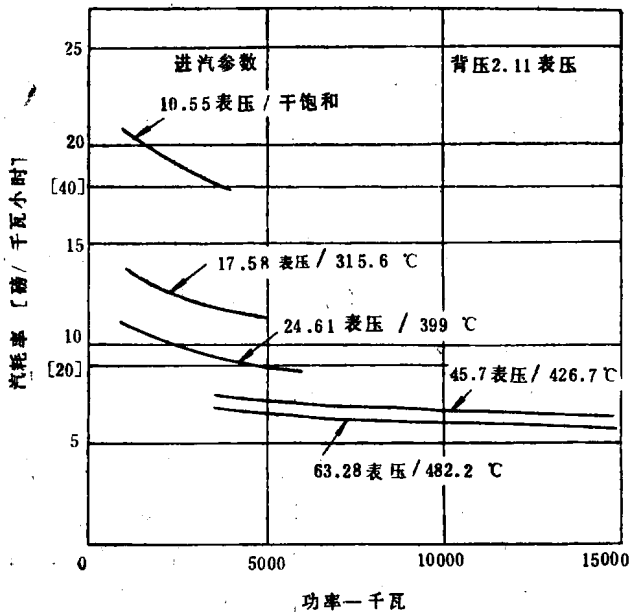


图5 小型背压式发电工业汽轮机的汽耗率

背压式发电工业汽轮机的汽耗率随进汽参数变化的情况<sup>[14]</sup>。此外，有些国家在工业发电汽轮机上采用再热方式以提高热效率，例如日本东芝公司，为东洋曹达工业公司提供的自备发电用工业汽轮机就采用一次再热双抽气凝汽式，最大的一台功率达11.6万千瓦。另一台向某公司提供的双缸再热双抽凝汽式汽轮机，其进汽参数为140绝对大气压/538°C，再热温度为

430°C。功率达63000千瓦。<sup>[28]</sup>

## (二) 不断提高效率, 努力提高转速

各种工业汽轮机都不断地提高效率, 转速也根据需要努力加以提高。特别是小型工业汽轮机更是向提高效率, 提高转速的方向发展。过去在小型汽轮机上的传统设计概念是“保证可靠性和成本低, 往往对效率有所牺牲”, 例如, 较小功率的单(双)级汽轮机一般效率为20~50%。而现今世界上由于能源紧张, 各国对几千千瓦以下的小型机都越来越重视, 提高小型机效率也越来越紧迫。许多厂商改变原来的传统做法转而研制高效率小汽轮机。例如1981年美国麦克格罗·爱迪生公司的“Turbodyne”汽轮机业务部在美国能源部赞助下成功地研制了EST高效率小汽轮机。根据报导, 其效率比常规小汽轮机要高, 可以达到70~75%。其做法是提高转速达2000转/分, 并使速比最优化, 采用两级冲动级而不用复速级等等。其功率范围为370~4500千瓦。进汽参数为49.2绝对大气压/399°C。用行星齿轮箱减速, 机组噪声约为85分贝。一台2250千瓦汽轮机的效率比常规机组提高了26%; 投资回收期不足一个月。

此外, 某些特殊用途驱动用工业汽轮机的转速也向高速化发展, 例如美国的高速驱动用汽轮机的转速向2万转/分以上发展, 日本的高速汽轮机向25000转/分以上发展, 这当然要解决某些关键问题(如强度等)。小汽轮机更是朝着提高转速的方向发展(发电用则加减速器), 据认为, 在材料强度许可的限度内提高转速后, 可提高汽轮机效率, 减少级数, 减小外廓尺寸, 降低价格和建设费用。

美国、联邦德国等一些公司认为200~3000千瓦左右的小汽轮机可用向心式结构代替轴流式以提高效率。例如美国Turbonetics Energy公司的高效向心式汽轮机的效率可达70~80%。瑞典的Stal Laval公司的辐流式汽轮机具有较高的效率, 在北欧各国工业中得到了广泛使用。

各厂家都千方百计地努力提高多级汽轮机的效率。例如美国GE公司进行大量试验研究以提高汽轮机的效率。又如西门子公司威塞尔厂与有关单位协作, 不断地努力, 尽量利用现有积木块系统以提高汽轮机的内效率, 其凝汽式工业汽轮机的高压段的效率已从七十年代的74%提高到1984年的80%。总的说来, 在目前基础上, 要花较大的代价才能使效率缓慢地有所提高。

国外厂家提高汽轮机的内效率主要采用以下方法, 实际上提高一般大型电站汽轮机效率的一些措施对中、小型工业汽轮机同样也是适用的, 现分述如下:

(1) 开发高效率的叶型以改善叶型的空气动力性能。如美国GE公司对高、中压叶片采用Schlicht叶型代替老式的由两个半径为主构成的叶型, 使效率有所提高。又如威塞尔厂八十年代采取一些措施, 减小了等截面叶片的叶型损失, 使效率提高了12%而达到93~94%。对凝汽式汽轮机的低压级由于流动的三元性已很明显, 所以各厂家大都进行三元流动计算精心地进行流型设计, 这样可提高效率。例如美国GE公司采用Schlicht自由涡旋叶片用电算机进行计算。日本一些厂家则用流线曲率法进行计算。

(2) 采用大尺寸的速关阀以减小节流损失, 进汽阀内的汽滤如改为单独的阀前滤网也可减小损失。

(3) 隔板汽道改为锥形壁以顺利引导汽流进入动叶和减小损失, GE公司、西门子公司都这样做。

(4) 在高压级动叶 部和顶部增加径向或轴向汽封片以减小漏汽损失。

(5) 改进排汽缸型线, 以改善流动性能, 例如美国GE公司在排汽缸设计中取消了内部的支撑棒, 采用流通面积较大的流线型通道以减小扰流和压降, 又如日本富士公司认为由于末级出口排汽速度高, 所含能量也大, 所以必须通过设计好的排汽缸把排汽能量一部份作为压力能加以回收。排汽缸按其功能可分为转折段和压力恢复段, 该公司通过大量模型试验获得高性能的排汽缸。图6示出了该公司所获得的排汽缸性能改善情况<sup>[7]</sup>。

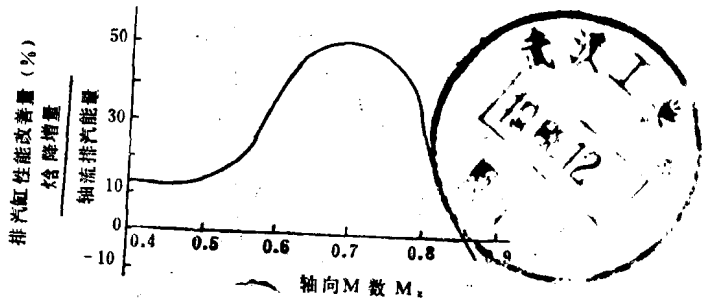


图6 低压排汽缸性能改善与轴向M数的关系

### (三) 继续提高可靠性

工业汽轮机的提高可靠性问题是一个极为重要的课题, 其中不但有与一般电站汽轮机相同的问题, 而且, 还有由于它运转转速范围广, 转速高, 变转速等与一般大型电站汽轮机不同的特殊问题。以下简述目前和以及要采取的几项提高可靠性的主要措施:

#### 1. 精心地进行转子的强度振动设计

众所周知, 汽轮机转子振动有两种类型: 一种是由于不平衡所引起的同步振动, 另一种是由于轴系不稳定性所引起的非同步振动。为了减小同步振动, 通常要使转子的临界转速远离工作转速。这要靠对转子本身的结构设计和支承系统的选择来保证。然而近年来驱动压缩机用的工业汽轮机得到越来越广泛的使用, 由于这类工业汽轮机运行转速范围宽以及其他因素, 转子的临界转速有可能落入工作转速范围内, 这样就促进了转子动力学的更大发展, 对挠性转子-支承系统的认识逐步深入, 认识到只探讨转子的临界转速问题是不够的, 不但要考虑轴承油膜、支承件和汽缸等等的阻力与弹性, 还提出另一个要求, 即转子受到外界某种不大的干扰力时, 转子应仍能维持稳定工作而不致产生过大的振动“增益”, 也就是转子-支承系统对外界干扰的响应应是不敏感的。每一个轴承只有在临界转速和振动不敏感性两个条件都具备时, 才容许在临界转速下运行。例如我国由国外进口的化工厂某型驱动工业汽轮机, 其工作转速( $n$ )为7100~12430转/分, 其一阶临界转速为6400转/分, 二阶临界转速为11600转/分, 均接近或落在实际工作转速范围内。用五倍 $U_r^*$ 作为试重对这些转子进行不敏感性试验, 证实转子在全部工作转速范围内运行平稳, 双振幅值远低于API-612的规定, 振动增量也低于规定值<sup>[16]</sup>。对于非同步振动应考虑轴承的稳定界限, 采用多圆弧轴承或可倾瓦轴承可保持转子在高速运行时的稳定性。为了减小振动, 一般必须对转子在全部工作转速范

\* $U_r$ ——最大允许剩余不平衡量。

围内进行高速动平衡。图7示出转子的不平衡响应曲线实例，由图可见，在整个工作转速范围内转子振幅比API—612的规定要低。而图8示出了转子经高速动平衡前、后和低速动平衡

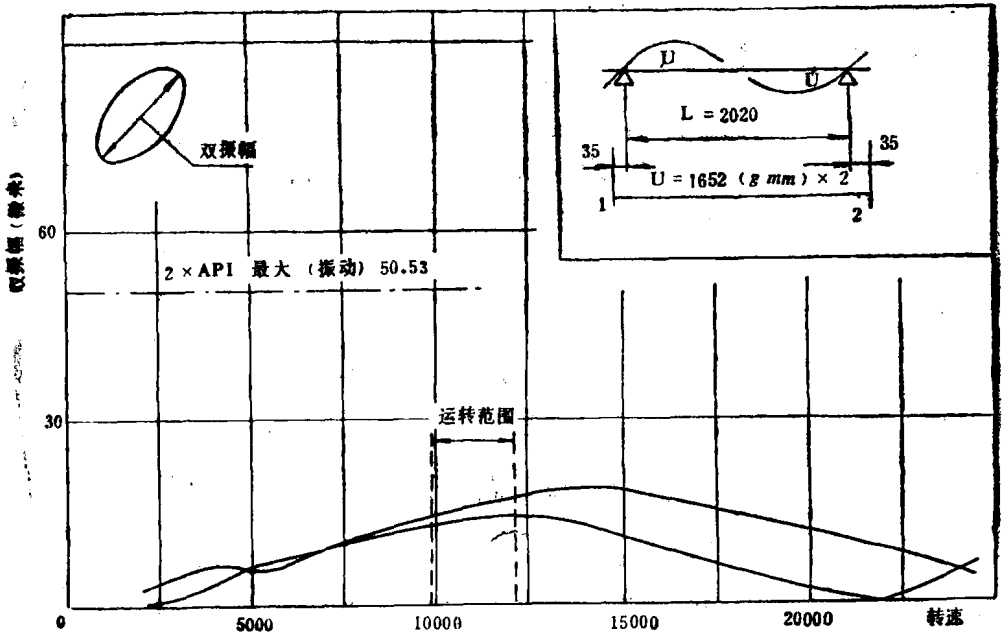


图7 转子不平衡响应曲线

后振幅值比较。可见经高速动平衡后在临界转速和其他常用工作转速下振动很小。这样就大大提高了工业汽轮机运行的可靠性。

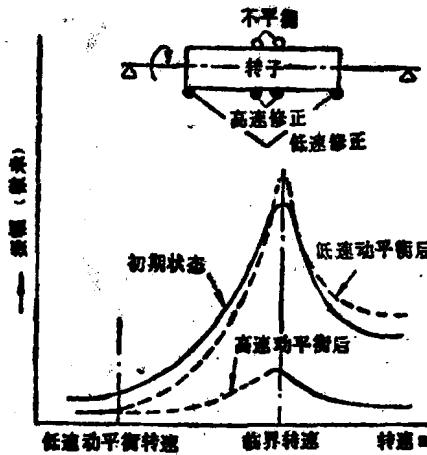


图8 各种动平衡对振动的影响

## 2. 进行叶片强度和振动设计

目前各主要厂家已广泛地通过大型电脑对叶片的静应力进行计算评价，在试验台上进行振动分析和调频，还在模型机和实际机组上用全息摄影法测量叶片振动并用应变片测量动应力。特别对于部份进汽的调节级叶片和抽汽压力调节级叶片更要降低其动应力。为了减小动应力，许多厂家都使用相邻两叶片之间的围带贴紧或将叶片用围带连成组。高速大功率工业汽轮机的调节级叶片有时还采用双层围带，采用较密的喷嘴节距以减小对叶片的激振力。对低压叶片则加阻尼拉筋等以抑制共振时的动应力在容许值以内，例如GE公司机械驱动



汽轮机部对低压静叶片在电子谐振检测器上进行试验，然后把测得的数据输入电脑进行谐振分析。但是某些驱动压缩机的工业汽轮机在其整个运动范围内不可能靠调频来避开共振，因此要由精确计算共振时的振动应力，并充分增大叶片在材料疲劳强度上的安全系数来加以解决。

### 3. 进行汽缸的强度设计

目前广泛采用有限元法进行计算，并在模型上进行承力试验或作三元光弹性试验以验证其强度是否足够，以便采取结构措施加以保证。

4. 对高温部件材料进行蠕变试验，对叶片进行材料疲劳试验等措施，都使汽轮机的可靠性得以提高。

## (四) 提高调节器的调节精度，并逐步采用电子液压调节器和微电脑运行控制器

工业汽轮机的调节器应符合 NEMA-SM23(D级) 的规定。其可调转速范围为最高连续转速的30%。近年来，随着某些工艺流程的复杂化，自备电站和驱动用途对双抽汽、三抽汽可调整抽汽汽轮机的需求增加了，这对工业汽轮机的转速和抽汽压力的调节也要求提高精度，因而工业汽轮机的调节系统也越来越趋复杂化，此外，在生产过程运行方面也试图通过某种方式把电子计算机运用于机组运行。为此，不但要求改进机械-液压式调节器，使其调节精度有所提高，而且早已开始并越来越多地采用电子-液压式调节器，预期电子-液压调节系统将会在未来的工业汽轮机的调节系统中居主导地位。美国的 Wood-ward 机械-液压调节器精度比较高，在国际市场上得到广泛采用，例如西德、日本一些厂家生产的工业汽轮机就是采用该种调节器。目前美国GE公司的电子-液压调节系统得到很大发展和广泛应用<sup>[3]</sup><sup>[4]</sup>，驱动汽轮机部的MDT-80调节器也已装于大庆乙烯厂的4台工业汽轮机上。此外该部还把MDT-80型调节器和MDT-100型微机监控系统配合使用于机组上，这就可以完全监控汽轮机的起动、运行、停车。中型汽轮机部的电液调节系统已发展到第四代产品。日本东芝公司认为各类调节器的使用有一条界线<sup>[28]</sup>，如图9所示，在此界限线以上应尽力采用电子-液

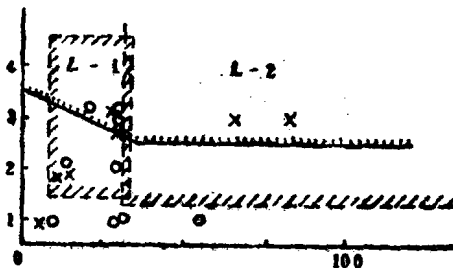


图9 工业汽轮机电-液调节器适用界限

- 属难度1级的：普通背压式和凝汽式汽轮机
- 属难度2级的：抽汽凝汽式和抽汽背压式汽轮机
- 属难度3级的：多级抽汽汽轮机
- 属难度4级的：运行特殊对调节精度有特殊要求的汽轮机