文章编号：1001－9006(2005)03－0117－06

东汽第 8 代 300 MW 汽轮机设计技术特点

王建伟，王建录

(东方汽轮机厂，四川 德阳 618000)

摘　要：东方汽轮机厂第 8 代 300 MW 汽轮机在消化吸收国外先进技术的基础上，采用当代先进的通流技术和结构设计技术，通过理论分析和试验研究，解决了原机组存在的问题，提高了机组的经济性、可靠性和安全性。文章详细介绍了东汽第 8 代 300 MW 汽轮机的设计技术特点。表 3

关键词：300 MW 汽轮机；设计特点；优化设计

中图分类号：TK262　　**文献标识码**：A

1　前言

我国火电装机容量中，300 MW 等级机组约占 30% 的比重。目前新开工的发电项目一般都安装 300 MW 及以上机组。由于 300 MW 机组容量适中，调峰灵活，在今后相当长一段时期内仍将是国内发电市场的主力机组之一。

东汽厂 300 MW 机组经过 30 余年的发展，其间经历了计划经济向市场经济转型，经历了初期试制、投运及不断改进、完善，现开发到第 8 代产品。

第 8 代 300 MW 汽轮机是采用全三维技术设计的冲动式机组，主要在提高机组的经济性和可靠性 2 个方面进行了优化设计。在提高经济性方面主要采用了斜置调节级喷嘴、优化可控涡、层流叶型、带冠弯曲静叶、平衡扭曲动叶、薄出汽边等先进的通流技术；在提高可靠性方面采用整体焊接式喷嘴、可倾瓦轴承、应急排放阀(BDV)、汽缸中分面法兰内流冷却技术、“H”型定中心梁推拉装置、装配式进汽室低压内缸、刚性连接主油泵、联轴器带止口、钢、台板等先进的结构技术。

第 8 代 300 MW 汽轮机设计热耗与第 1 代相比，在同等背压下降 322 kJ/kW·h，处于国内先进水平，接近世界先进水平。

第 8 代 300 MW 汽轮机共有 2 种机型：二缸二排汽凝汽式汽轮机(厂内代号 D300N)和二缸二排汽抽汽供热凝汽式汽轮机(厂内代号 D300P)。

2　东汽厂 300 MW 机组设计开发历程

东汽厂从自行开发出高中压合缸、二缸二排汽、1 m 长末级动叶的凝汽式第 1 代 300 MW 汽轮机至今已有 30 余年的历程。早期汽轮机的设计技术来源于前苏联，在苏联 200 MW 汽轮机型的基础上，通过自主试验、研究，于 1974 年开发出第 1 代 300 MW 汽轮机。该机型设计特点是：高中压合缸、二缸二排汽、1 m 长末级动叶、节流配汽、全液压调节系统。工厂代号 D06，安装在黄台电厂。

第 2 代 300 MW 机组设计于 1986 年。该机型吸收了西屋公司和 GE 公司先进技术，末级动叶长为 851 mm，喷嘴配汽，电液并存调节系统。设计热耗与第 1 代相比下降了 180 kJ/kW·h。工厂代号 D42。

第 3 代 300 MW 机组设计于 1990 年。主要对该机型设计投运中发生的故障进行改进，同时为缩小再热冷段及再热段管道尺寸、降低电厂造价，采取提高高排分缸压力措施。工厂代号 D42－1。

收稿日期：2005－03－31

作者简介：王建伟(1956—)，男，副主任设计师，高级工程师，从事汽轮机开发设计工作。
王建录(1961—)，男，毕业于西安交通大学涡轮机专业，副总工程师，高级工程师，从事汽轮机设计、试验研究工作。

万方数据

第4代300MW机组设计于1992年。随着电子技术和汽轮机自动化控制技术的发展，为适应用户要求，该机型改进为全电调控制系统，采用美国贝利ETSI公司INF190，实现了汽轮机启动、升速、带负荷及日常运行自动化；同时为方便检修，高压主汽调节阀由布置在汽轮机高压缸两侧改为布置在机头运行层下。工厂代号D300H。

第5代300MW机组设计于1996年。为了减少静叶的尾迹损失，提高机组经济性，采取了薄出汽边技术，由原出汽边厚度1mm减薄到0.38mm；同时，对低压缸次末级、次次末级由原仅有叶根而无叶身的销口叶片改进为钛合金销口叶片。设计热耗与第2代相比下降了21kJ/kW·h。工厂代号D300H-1。

第6代300MW机组设计于1997年。该机型在消化吸收国外先进通流技术和工厂试验研究的基础上，主要对高中压通流结构进行了优化设计，调整了高中压缸通流根径，高压缸级数由原10级改为9级，使各级U/Co接近效率最佳值；1#、2#轴承采用可倾瓦轴承；采用整体焊接式喷嘴。设计热耗与第5代相比下降了50.2kJ/kW·h。工厂代号D300K。

第7代300MW机组设计于1998年。对该机型低压部分采用国外先进的通流设计技术进行优化设计，进一步提高机组经济性。设计热耗与第6代相比下降了37.7kJ/kW·h。工厂代号D300L。

受国家宏观经济调控影响，从1998年开始，电力开工建设项目减少，汽轮机市场竞争激烈，用户对汽轮机的经济性和可靠性提出了更高的要求，在这种情况下，东汽厂进行了第8代300MW汽轮机技术开发。工厂代号D300N，D300P。开发设计的重点主要集中在经济性和可靠性方面。在经济性方面，该机型全面采用了经消化吸收的引进技术，包括通流设计、高中压缸排汽涡壳设计、低压排汽缸气动设计、低压进汽口气动设计、中低压间连通管气动设计；在可靠性方面，主要针对前七代汽轮机在电厂运行中存在的1#轴振动大、汽缸中分面漏汽、汽缸膨胀不畅等问题，采用国外先进结构技术对高中压汽缸结构、主油泵与高压转子连接方式、台板的结构形式、低压缸进汽部分结构形式进行了全面的优化设计。设计热耗与第7代相比下降了33.5kJ/kW·h。

3 第8代300MW汽轮机主要设计技术特点

3.1 主要技术规范

3.1.1 纯冷凝机型(D300N)

型号 N3000-16.7/537/537-8型(合缸)

型式 亚临界中间再热二缸二排汽凝汽式汽轮机

额定功率/MW(ECR工况) 300

最大功率/MW(VWO工况) 330

额定蒸汽参数/(MPa/℃)

新蒸汽 (高压主汽阀前)16.7/537

再热蒸汽 (中压联合汽阀前)3.121/537

背压 4.9~5.2kPa(设计冷却水温20~22.5℃)

额定新汽流量/$t\cdot h^{-1}$ 899.6

最大新汽流量/$t\cdot h^{-1}$ 1025

配汽方式 全电调(阀门管理)

通流级数共27级，其中

高压缸 1调节级+8压力级

中压缸 6压力级

低压缸 2×6压力级

给水回热系统 3高加+1除氧+4低加(除氧器采用滑压运行)

汽封系统 自密封系统(SSR)

3.1.2 供热抽汽冷凝机型(D300P)

型号 C300/220-16.7/0.3/537/537型(合缸)

表1 东汽厂300MW高中压合缸机组设计开发历程

改型代号	机组编号	末叶高度/mm	改型原因	热耗下降值/kJ(kW·h)$^{-1}$	开发年份	首台投运
第1代	D06	1000	自行开发第1代	基准热耗	1974	1987年黄台电厂
第2代	D42	851	80年代先进通流技术优化	180	1986	1989年黄台电厂
第3代	D42-1	851	解决早期故障及高排压力提高	0	1990	1993年潍坊电厂
第4代	D300H	851	改为全电调、自动化升档	0	1992	1996年阳泉电厂
第5代	D300H-1	851	静叶出汽边减薄,低压次末级和次次末末级销口叶片改进	21	1996	1998年沙岭子电厂
第6代	D300K	851	采用国外先进技术对高中压缸通流优化	50.2	1997	2000年宣威电厂
第7代	D300L	851	采用三维设计对低压缸进行通流优化	37.7	1998	2002年莱阳电厂
第8代	D300N D300P	851	全面引进通流和结构技术优化设计	33.5	2001	2003年安顺电厂 2004年胜利电厂

万方数据

型式	亚临界中间再热二缸二排汽凝汽式汽轮机
额定功率/MW(ECR 工况)	300
最大功率/330 MW(VWO 工况)	330
额定蒸汽参数/(MPa/℃)	
新蒸汽	(高压主汽阀前)16.7/537
再热蒸汽	(中压联合汽阀前)3.12/537
背压	4.9～5.2 kPa(设计冷却水温 20～22.5℃)
额定新汽流量/$t \cdot h^{-1}$	894.43
最大新汽流量/$t \cdot h^{-1}$	1 025
采暖抽汽压力范围/MPa	0.2～0.55
配汽方式	全电调(阀门管理)
额定供热工况	
主蒸汽流量/$t \cdot h^{-1}$	894.43
供热压力/MPa	0.3
供热流量/$t \cdot h^{-1}$	550
电机功率/MW	220.89
最大供热工况	
主蒸汽流量/$t \cdot h^{-1}$	894.43
供热压力/MPa	0.3
供热流量/$t \cdot h^{-1}$	580
电机功率/MW	218.37
通流级共 26 级，其中	
高压缸	1 调节级 + 8 压力级
中压缸	7 压力级
低压缸	2×5 压力级
给水回热系统	3 高加 + 1 除氧 + 4 低加(除氧器采用滑压运行)
汽封系统	自密封系统(SSR)

3.2　通流设计技术特点

第 8 代 300 MW 汽轮机通流设计是在消化吸收引进国外先进技术，并结合工厂试验研究成果的基础上进行开发设计的，主要先进技术包括：

(1)调节级动静叶型采用新型优化叶型，喷嘴为小负荷密叶喷嘴，动叶为具有“K”型通道的层流叶型。

(2)高压 2～9 级动叶采用平衡扭曲自带冠动叶，多齿径向汽封。

(3)高压 2～9 级静叶采用小型损层流叶型，静叶出汽边厚 0.38 mm；高压 2～9 级隔板为分流叶栅；高压 6～5 级隔板为弯曲自带冠静叶叶栅。

(4)中压 1～6 级动叶采用平衡扭曲自带冠动叶，多齿径向汽封。

(5)中压 1～6 级静叶采用小型损层流叶型，弯曲自带冠静叶栅，静叶出汽边厚 0.38 mm。

(6)低压 1～5 级动叶采用高效扭曲动叶型，低压末级采用高效 851 叶型，低压末级动叶采用等离子淬火防止叶片水蚀。动叶采取自主研发的阻尼摩擦减振自带冠叶片以改良动叶片的振动特性，这种结构使叶顶有条件做成外平内斜，又使通流子午流道更为光滑。

(7)低压 1～3 级静叶采用弯曲自带冠静叶栅，低压 4～6 级为弯扭静叶栅。

3.3　结构设计技术特点

该机组为冲动式、一次中间再热、高中压合缸二缸二排汽全电调凝汽式汽轮机，机组总长 18 m。

高压缸为 2 层缸，低压缸为 3 层缸。汽轮机设置 2 个绝对死点，高压部分的绝对死点在中低压轴承箱基架上，低压部分的绝对死点在低压进汽中心线附近，动、静部分相对死点——推力轴承设在中低压轴承箱内。

高压主汽调节阀布置在机头运行层下，采用刚性吊架支承。中压联合汽阀布置在机组两侧并座落在高中压基础框架之内，采用浮动支承。

汽轮机共设有 4 个轴承，其中 1#、2#轴承为可倾瓦轴承，3#、4#轴承为椭圆轴承。

3.3.1　汽缸设计特点

(1)高中压内外缸

高中压内外缸为全新设计，借鉴引进技术，高压内缸改为整体内缸，取消了 1#隔板套，在内外缸之间设置一抽汽管作为高压第 6 级后抽汽。采用整体高压内缸后，高中压内外缸夹层温度、压力由原第 6 级后参数降至为高压第 9 级后参数。由于降低了高中压外缸的内压力，这样有助于高中压外缸中分面的密封性，但同时也提高了高压内缸的内外压差，使内缸壁及内缸螺栓应力增大，经汽缸强度计算后调整结构尺寸使汽缸和螺栓应力保持在许可范围内。另外，夹层温度也有所降低，对内外汽缸的温度分布有一定影响，经计算分析后调整遮热环位置，使汽缸内外壁温差及绝对膨胀量满足设计运行要求。

高中压外缸采用锥筒设计。中分面法兰为等高结构，避免中分面法兰高度剧烈变化对汽缸刚性产生影响。汽缸支承方式仍为下半汽缸猫爪中分面支撑方式，有助于减小汽缸螺栓受力，防止汽缸中分面张口，同时方便安装和维护。

高中压内外缸法兰采用窄高斜法兰及内流蒸汽加热或冷却螺栓设计技术。窄高斜法兰是在保持窄高法兰的前提下，适当增加法兰下底外承压面宽度来降低螺栓密封应力。采用这种设计方法，螺栓密

万方数据

封应力由原2 327 kg/cm² 降为1 281 kg/cm²。

法兰内流蒸汽加热或冷却螺栓技术是利用内部蒸汽加热或冷却螺栓，蒸汽从汽缸高压低温处螺栓引入，经各螺栓孔后，排入低压较高温度区。采用这种设计在启动时加热螺栓，在正常运行时冷却螺栓，使螺栓温度始终能够与法兰温度匹配，从而改善螺栓温度应力，避免法兰及螺栓的塑性变形，保证螺栓应力在设计范围内。为了避免蒸汽从内承压面的某薄弱环节漏入卸载槽，再从某一外承压面间隙处漏出，同时也为了内流蒸汽技术的实现，汽缸中分面取消了卸载槽。

高中压内外缸材料采用高温性能更好地合金钢材料ZG15cr1Mo1。该钢是一种具有良好综合性能的低合金热强铸钢，可在540 ℃以下长期工作，钢中Cr，Mo元素可提高淬透性，增强综合机械性能，强度等级为345 MPa($\sigma_{0.02}$)。该钢的热强性能虽不如ZG15Cr1Mo1V，但因不采用Al作为脱氧剂，可提高其高温蠕变和持久性能，铸造工艺性能良好，热裂倾向小，对热处理冷却速度的敏感性比Cr-Mo-V铸钢小，回火脆性不敏感。

高中压内外缸大螺栓仍采用高温强度高、持久性能和抗松驰性能良好地20Cr1Mo1VNbTiB材料。

(2)低压内外缸

低压内外缸为钢板焊接结构，低压外缸由前、中、后三段组成，采用纵向、横向筋板及撑管组成全封闭框架承力结构，采用PHOENICS软件计算分析及正交试验法对低压缸扩管和排汽缸进行吹风试验。新设计的低压排汽缸上半后壁板由斜板(15°)改为直板，以增加上半扩压管的轴向长度。试验表明，损失系数下降11%。为了实现不揭缸对低压转子加配重，及进入低压缸做内部检查，在低压外缸上半前后端设置了加配重用的手孔和进汽缸用的人孔。

针对低压内缸中分面张口问题，第8代300 MW汽轮机低压内缸改为装配式进汽室低压内缸结构，即3层缸结构。因为原300 MW汽轮机低压内缸进汽室为焊接式结构，由于进汽室内外壁温差较大，进汽室部分热应力较大，容易产生进汽室及内缸变形。低压内缸进汽部分由焊接结构改为装配结构后，由于采用了导向键连接型式，进汽室在受热时即保证其中心不变，又可沿径向自由膨胀，不会由于膨胀约束而产生过大的热应力和热变形。低压内缸中分面螺栓也采用自流加热螺栓孔，机组运行时，汽流通过进汽口处水平法兰进入螺栓孔，然后在交错布置的上下法半的加热孔内流动，对中分面螺栓进行加热，最后在第4级位置处流入汽缸，以减小法兰与内缸壁及法兰与螺栓的温差。

3.3.2 轴系设计特点

机组轴系由高中压转子、低压转子、发电机转子构成。

中压转子与低压转子、低压转子与发电机转子均采用刚性靠背轮连接。主油泵采用刚性主油泵。1#、2#轴承为非对称五瓦块可倾瓦轴承，该轴承具有抗干挠能力强、对数衰减率大、失稳转速高、对抑制转子的低频涡动具有更大的阻尼等特点。3#、4#轴承采用承载能力大、稳定性好的椭圆轴承。转子、轴承基本参数见表2、表3。

高中压与低压、低压与电机间联轴采用过盈止口及螺栓露头式结构，止口长13 mm，过盈量0.02～0.07 mm。止口过盈连接可以有效增加转子连接刚度，避免联轴器螺栓故障导致转子相对滑移诱发振动。联轴器螺栓露头式结构可以方便拧紧螺栓，有效控制螺栓紧力，可以加大螺栓直径增加转子间螺栓联接紧力。

表2 转子基本参数(D300N)

转 子	高中压转子	低压转子	电机转子
转子重量/kg	22 339	57 129	51 644
支承跨距/mm	5 851	6 050	8 000

表3 轴承基本参数

轴承号	1#	2#	3#	4#	5#	6#
轴径/mm	360	360	480	480	450	450
宽度/mm	230	270	336	336	320	320
轴承型式	可倾瓦	可倾瓦	椭圆瓦	椭圆瓦	椭圆瓦	椭圆瓦

前七代300 MW汽轮机高中压转子与主油泵之间采用齿形联轴器挠性连接。采用挠性连接容易产生主油泵转子与高中压转子找中困难，很难保证运行时主油泵转子适应高中压转子中心标高的变化，造成高中压转子向机头侧膨胀附加力使主油泵推力瓦磨损，主油泵工作恶化；同时，主油泵转子不能与高中压转子一起进行高速动平衡，使自身不平衡产生的振动传到高中压转子。第8代300 MW汽轮机主油泵采用刚性连接，主油泵与高中压转子一起作高速动平衡以保证1#瓦轴振合格，主油泵前端采用阻尼支承，两端采用浮动密封结构使主油泵适应高压转子的标高变化。刚性主油泵不设置主油泵推力瓦，没有主油泵推力瓦磨损问题。

3.3.3 轴承箱、推拉装置设计技术

轴承箱为焊接轴承箱。为了确保轴承箱刚性，结构设计中确定合适的筋板和箱壁厚度。

前轴承箱为滑动轴承箱。为了减小前轴承箱膨

万方数据

胀阻力，在前轴承箱滑动面上施加双滑块，即在滑块金属基体内镶嵌固体膨胀石墨。双滑块布置原则是：轴承箱底部采用上滑块尺寸不小于基架上相应的下滑块尺寸；在膨胀过程中，上滑块始终能完全盖住下滑块，且有 3 mm 过盖量，防止下滑块表面积有脏物；上滑块采用 20 mm 厚不锈钢钢板，下滑块用石墨合金滑块，由于石墨合金表面与不锈钢表面接触，不再需要另加润滑脂，自润滑滑块摩擦系数为 0.1，可大大降低摩擦阻力。

前轴承箱与高中压外缸之间采用“H”型定中心梁推拉结构。“H”梁采用高温材料 34CrNi3Mo，经 ANSYS 结构分析软件计算，“H”梁的温度应力占应力 80% 以上。为减小“H”梁的热变形，降低其温度应力，安装时“H”梁预变形 1 mm。采用“H”梁推拉机构可以增加前轴承箱与高中压外缸的连接刚度，防止汽缸跑偏，利于汽缸膨胀。

原盘车箱与低压外缸采用螺栓连接，低压外缸在真空力作用下及自身热膨胀容易引起盘车箱与台板脱空，影响 4#轴承运行。现盘车箱改为与低压外缸开的结构形式来保证盘车箱与台板不脱空。

中低压轴承箱与低压前轴箱共用一个台板。为了满足轴承箱标高要求，以往在低压前轴承箱下加斜垫片，由于操作困难，施加的斜垫片接触质量难以保证，容易造成低压前轴箱与台板脱空，影响 3#轴承箱运行。现低压前轴承箱直接座落在台板上，不发生脱空问题，而在中低压轴承箱下施加钢垫片来调整轴承箱的标高。

各轴承箱及低压外缸支承台板由铸造基架改为钢台板水泥垫块结构，采用钢台板水泥垫块结构使台板与基础的接触面积增大 2～3 倍，提高了机组的整体支撑刚性，避免了接触不实诱发机组的振动。

3.3.4　阀门、BDV 阀设计特点

高压主汽调节阀采用引进阀门模化设计，2 个高压主汽阀与一个腔室的 4 个调节阀焊为一体，能够适应单一主汽阀门的在线活动试验的要求。高压主汽调节阀经吹风试验研究，其压损小、流量系数大、稳定性好。为防止阀座下沉，调节阀采用过盈、打固定销、大支承台阶面积等措施。

中压阀门采用联合阀门，利用引进阀门技术模化设计，调节阀与主汽阀共用一个阀座，压损小。为了适应中压缸启动要求，中压调节阀的预启阀具有调节功能。

阀门的密封面堆焊有司太立合金，阀杆全开时具有锥面密封结构密封阀杆漏汽。

阀门具有独立操纵油动机实现全电调阀门管理。

为了防止高中压间轴封齿间隙增大后，机组甩负荷时高压缸内蒸汽由外窜入中压缸造成汽轮机超速，在本机组高中压轴封处增设了应急排放阀即 BDV 阀，在机组跳闸时，BDV 阀快速开启，将轴封漏汽排向凝汽器。

3.3.5　汽封设计技术

高中压隔板汽封及端部汽封采用铁素体(0Cr15Mo)镶片式汽封，该汽封片材料很软，可以在小间隙下运行，即使碰磨也不淬硬。低压隔板汽封及端汽封采用铜汽封，齿形为锥形锥，具有较好地节流密封效果。根部汽封直接从隔板体上车出汽封齿，安全可靠性高。

4　机组运行状况

第 8 代 300 MW 汽轮机首台机组安装在安顺电厂(3#)，于 2003 年 3 月投运，机组运行平稳，膨胀通畅，轴承温度、振动符合设计要求。黔北 3#机从首次启动到过完 168 h 商业运行仅用 10.5 天，创造国内 300 MW 机组投运最新记录。投运的 13 台机组轴振动均达到优秀(≤76 μm)，汽缸漏汽得到根本解决。安顺电厂 3#热力性能试验表明，机组的经济性达到设计保证值，最大连续出力达到或超过设计值，在 30% ～100% 负荷范围运行热耗下降平稳，相差仅 10%，具有良好的变负荷性能。

5　结束语

(1)300 MW 机组，目前乃至今后一段时间仍是我国电网中的主力机组之一，采用现代最先进的通流技术和结构设计技术优化 300 MW 机组，对于提高经济性、运行的安全可靠性、节能和环保都有十分重要意义。

(2)东汽第 8 代 300 MW 汽轮机在消化、吸收国外先进技术的基础上，通过大量的理论分析和试验研究，创新开发出了具有自主知识产权的新技术，成功解决了原机组投运中存在的问题，使机组的经济性、可靠性处于国内先进水平，接近国际先进水平。

万方数据

Technique-characteristic in Design of Dongfang Steam Turbine Works' Weighth Era 300MW Turbine

WANG Jian-wei, *WANG Jian-lu*

(Dongfang Steam Turbine Works, Deyang Sichuan 618000)

Abstract: The DFSTW's eighth era 300MW turbine is based upon digesting and absorbing overseas advanced technique, and the current advanced flow technique and structure-design technique are adopted. By theoretic-analysing and test-reseaching, the problem consisting in former sets is resolved, accordingly improving cost save, reliability and security. It introduces the technique-characteristics in design of the DFSTW's eighth era 300MW turbine in detail.

Key words: 300MW Turbine; Technique-characteristics; Design

(上接第116页)

Development of 40MW Bulb-type Hydraulic Generating Sets for Tongzihao Power Station

ZENG Ming-fu, *QIAN Chang-yan*, *SUN Yuan-yuan*

(Dongfang Electrical Machinery Co., Ltd, Deyang, Sichuan, 618000)

Abstract: In recent years, Dongfang Electrical Machinery Co., ltd. has successfully developed 40 MW bulb-type hydraulic generating set on basis of 30 MW bulb-type hydraulic generating sets. This is the largest bulb-type hydraulic generating set. Some technology adopted supply more advantages for developing larger bulb-type hydraulic generating sets in the future.

This article describes the main achievements of development, technology, calculation and operating in Tongzihao Power Station.

Key words: 40MW Bulb-type; Hydraulic Generating Set; Developmet; Tongzihao Power Station

征 订 通 知

本刊2006年征订工作已经开始，欢迎新老读者踊跃订阅。本刊为季刊，每季末出刊。每期5.00元，全年订价20.00元（均含邮费）。在当地邮局征订，邮发代号：62-187。

万方数据