背压式汽轮机出现正负胀差原因与控制措施分析

王福
（青海五彩碱业有限公司　青海　西宁　810003）

摘要：作为节能设备，背压式汽轮机在化工行业广泛应用，它是供热、发电的重要设备，其安全稳定运行影响重大。胀差是背压式汽轮机启动、停机、运行过程中需要严密监视的重要参数之一。本文分析了正、负胀差产生的原因以及出现相应胀差时的控制措施，保证汽轮机的安全运行。

关键词：背压式汽轮机；正胀差；负胀差；控制措施；安全运行

0　引言

某厂 25MW 背压式汽轮机型号为 B25-8.83/4.02，系青岛某公司生产的高背压式汽轮机，进汽压力 8.83MPa，进汽温度 535℃，设计最大进汽量 545t/h，转子的质量为 4.5t，汽缸质量为 40t。机组投运后在启机、停机或者加、减负荷变工况的过程中，部件的结构和所处的工作环境不同，各部件由于蒸汽的加热而引起的温度变化也不尽相同，从而导致各部件沿厚度、长度等方向产生温度差、热膨胀和热变形。当胀差值接近机组 TSI 安全监测系统设置值时，会发出报警，则影响开机升速、加负荷的时间；达到停机值时，则 ETS 系统（紧急停机系统）发出打闸信号，若控制不及时、胀差数值超过停机值，则将导致汽轮机动静部件摩擦，从而引起机组振动增大甚至机组损坏。

1　胀差的分类

背压式汽轮机汽缸和转子在被加热或冷却（加减负荷、启动、停机）时，由于汽轮机转子的质量仅是汽缸质量的 1/4 ～ 1/3，转子与蒸汽的接触面积大约是汽缸的 5 倍，两者的制造材质也不相同，故转子的温度变化比汽缸快。汽缸的温度变化滞后于转子，使转子的热膨胀（或收缩）比汽缸快。转子与汽缸的热膨胀（或收缩）差，称为相对胀差，简称胀差。

以某厂 25MW 背压式汽轮机为例（图 1），汽轮机的汽缸受热后以死点为起点向前膨胀（或冷却时向死点收缩），在滑销系统的作用下，保持中心不变，这时搭在前轴承箱上的猫爪，推动前轴承箱前移，轴承箱中的推力轴承被带着向前移动。而汽轮机转子以推力轴承为起点，在受热情况下向后膨胀（或冷拉时向前收缩），这样靠近汽缸死点处的胀差变送器，就发出转子与汽缸相对膨胀值的信号，然后在二次仪表上显示出转子与汽缸的相对膨胀值。如汽轮机的转子与汽缸的膨胀值相等，即胀差为零，汽轮机通流部分的轴向间隙可以维持不变。当转子的轴向热膨胀大于汽缸的轴向热膨胀时，称为正胀差；反之，当转子的轴向热膨胀小于汽缸的轴向热膨胀时，称为负胀差。

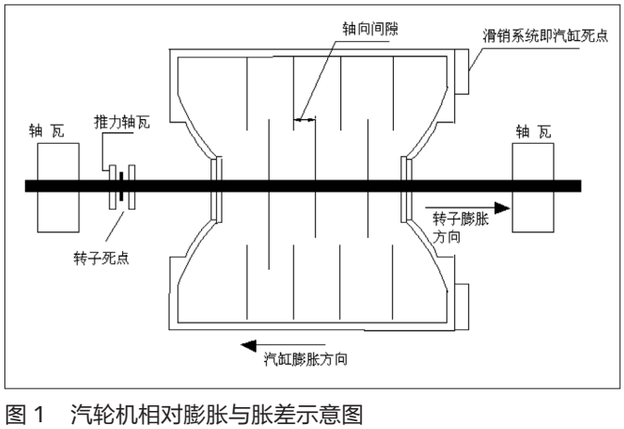

图 1　汽轮机相对膨胀与胀差示意图

1.1　正胀差产生的原因

背压式汽轮机在冷态启机或者运行机组增加电负荷或热负荷的过程中，转子受热的速度快、先膨胀，此时会出现正胀差。启动机组时，若选择的冲转参数不合理，比如进汽压力、温度、流量等参数过高或轴封供汽温度过高、供汽量大，将引起轴径膨胀伸长，此时背压式汽轮机就会出现正胀差。暖机过

23-55 机械制造与智能化 第18期 6月下 总603期.indd 32　　2023/8/15 13:28:23

程中，若汽轮机背压过高或者转子发生鼓风摩擦，也容易出现正胀差。除此之外，汽缸本体疏水不畅或调节不当，也会出现正胀差。

1.2 负胀差产生的原因

背压式汽轮机在热态启机或者运行机组减电负荷或热负荷的过程中，转子冷却的速度快、先收缩，而汽缸面积大、后收缩，此时会出现负胀差。当机组突然减负荷或甩负荷，进汽量减小或者汽轮机进汽温度下降，此时背压式汽轮机就会出现负胀差。热态启动时，若冲转参数选择不合理，比如进汽温度、压力低或者轴封供汽温度低、润滑油温度低等，都会出现负胀差。除此之外，当汽轮机由于各种原因发生水冲击现象时，也容易出现负胀差。

2 胀差的危害

汽轮机运行稳定时，汽缸和转子的膨胀值基本恒定，该工况下胀差也在一定范围内变化，但变化趋势很小。但在启机或停机操作、汽轮机运行状态发生变化时，由于转子和汽缸面积的不同，进而导致金属膨胀的速度不同，会直接影响胀差的变化。出现负胀差时，汽轮机动叶片蒸汽入口间隙变小，蒸汽出口间隙变大，汽轮机静止部分与转动部分间隙改变；如果胀差值超过了极限值，就会使动静间隙消失，发生动静碰磨，可能引起机组振动增大，甚至叶片脱落、断裂、大轴弯曲等事故 [1]。因此，在汽轮机启机、故障跳机、正常停机过程中应该严密监视胀差的变化，将胀差控制在规定的范围内。胀差作为背压式汽轮机启机、停机或者负荷变动时控制其操作速度的重要依据，是控制汽缸与转子的相对位置的重要参数，能够保证机组的安全稳定运行。

3 背压式汽轮机各种工况下的胀差趋势

3.1 冷态启动

在冲转、低转速暖机至高转速暖机阶段，背压式汽轮机汽缸与转子两者温度上升，两者都处于热膨胀阶段，转子比汽缸受热快，此时转子的热膨胀大于汽缸的热膨胀，胀差值基本上显示为正胀差。

3.2 热态启动

在热态启动过程中，转子冷却的速度快、先收缩，而汽缸面积大、后收缩，此时会出现负胀差。此时，汽缸的热膨胀大于转子的热膨胀，一般胀差向负值方向增长。

3.3 并网加负荷

背压式汽轮机动态试验结束或者并网带初负荷后，汽轮机进汽量增大，蒸汽与汽缸、转子进行热交换，正胀差变化加剧，此时正胀差的增长幅度与汽轮机的加负荷速度成正比。

3.4 减负荷和解列热网时

背压式汽轮机因故障需减负荷、解列热网时，汽轮机的进汽量减少，流过汽轮机的蒸汽温度低于金属温度，转子冷却后收缩的速度快于汽缸的速度，因此会出现负胀差。

3.5 停机过程中

背压式汽轮机打闸停机后，主汽门、调速汽门关闭，汽轮机转子从 3000r/min 降至零。在此期间没有蒸汽进入汽缸，叶片鼓风摩擦产生的热量使排汽温度上升，使转子的温度升高，使胀差向正胀差的方向增长。

3.6 停机后

机组停机后主汽门、调速汽门关闭，期间无蒸汽进入机组，汽轮机转子冷却的速率快于汽缸冷却的速率，此时胀差向负值方向增长。

4 胀差变化控制措施

背压式汽轮机胀差值的变化，影响机组的启机、停机、加负荷、减负荷等一系列操作，只有深入了解、掌握胀差的变换规律，才能在操作中控制好汽轮机胀差，保证机组的安全、稳定运行。

4.1 汽轮机胀差监测系统零位确定出现问题

如果汽轮机轴系机械定位零位和仪表监测保护系统的零位不精确，会导致胀差监测系统传感器的零位确定不当，使汽轮机 TSI 系统在机组启动后，测量误差变大，甚至无法正常监测。因此，胀差零位的确定是直接影响机组启动后胀差监测系统是否正确反映汽轮机动静间隙的关键因素 [2]。胀差监测系统是利用电涡流传感器的输出电压与被测金属表面间的垂直距离成正比的关系，将位移信号转化成电压信号送至监测系统。以某厂 25MW 背压汽轮机为例，胀差传感器固定在汽轮机轴承箱内，当电压信号传输到涡流传感器，胀差传感器的机械零位以汽轮机大轴推力盘靠在工作面为基准点，传感器在机械零位锁定后安装在基准电压 a=−7.08V、DC 处（图 2）。所以应在机组启机前精确定位胀差零位，在机组冷态时校验胀差测点零位，保证监测数据真实，减少

23-55 机械制造与智能化 第18期 6月下 总603期.indd 33 2023/8/15 13:28:23

数据误差，给予机组操作过程中有利的数据支撑和参考。

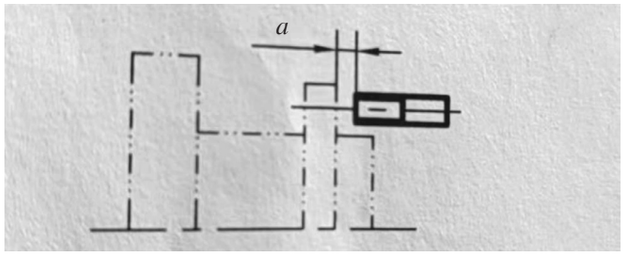

图 2　胀差传感器安装基准电压

4.2　汽轮机启机时

首先，严格控制金属的温升率，一般为 1.5 ～ 2℃ /min，若出现金属温升率超标，或者出现正胀差过大时，应立即通知锅炉运行人员停止对主蒸汽升温、升压操作，使机组在稳定的转速和负荷下停留暖机。因此，应严格控制主蒸汽的参数及汽轮机的金属温升率。汽轮机的进汽量可通过机组的升速率及机组的背压进行调整。在冲转过程中，胀差基本呈现持续上升趋势，此阶段通过主蒸汽参数、机组升速率进行控制。其次，选择正确的启动方式，按照机组排汽方式的不同，启动方式分为向空排汽启动和背压倒暖启动两种。一般机组采用背压倒暖启动方式，这种方式既可以节省启动暖机时间，还可以减少背压排汽切换操作。

某厂 25MW 背压式汽轮机采用背压倒暖和向空排汽法相结合的启动方式。首先采用背压倒暖的启动方式，汽轮机冲转后，全部蒸汽排往热网管路，热网管路的暖管与汽轮机暖机同时进行，当电动主闸阀前的主蒸汽管段暖好，启动高压油泵，盘车装置正常运行，关闭背压排空阀。根据汽轮机胀差变化，控制背压不大于 0.2MPa，暖机 30min，如果暖机前调节级上、下缸温度已达到 160 ～ 180℃，下汽缸温度高于 150℃，可以不进行低压暖机操作；再开大背压排汽总阀，将背压升至 0.45MPa，暖机 30min ；继续开大背压排汽总阀，使背压达到 0.85MPa，暖机 30min。背压暖机结束，关闭背压排汽总阀，逐渐开启向空排汽阀，然后按照向空排汽法启动机组。采用以上办法能使机组的胀差得到有效控制，达到快速暖机、启机的目的。

4.3　热态启动时

为了避免胀差向负值方向发展，采用提高进汽温度及压力的方法进行控制。主蒸汽温度应高于调节级上汽缸金属温度 50 ～ 80℃，保证主蒸汽经过汽轮机通流部分后，温度不低于调节级的上汽缸温度，以避免汽缸受冷而收缩，使负胀差增大。在热态启动中，从转子的冲转、升速至机组并电网、带负荷等各项操作，应尽可能快速完成，使机组尽快达到汽轮机调节级上汽缸金属温度所对应的工况。某厂 25MW 机组热态启动一般耗时 5 ～ 10min，可使转速达到 3000r/min，并以每分钟 3％～ 5％额定负荷的带负荷速度并网带负荷，避免汽轮机汽缸受冷收缩。同时利用轴封供汽温度和时间控制胀差，热态启机过程中，应使用温度较高的轴封汽源，防止向轴封供汽后出现负胀差。其次利用向空排汽阀的开度，调整汽轮机背压，以控制负胀差的增长速度。

4.4　机组停机时

背压式汽轮机停机过程中，应严格控制降温速度及蒸汽流量的变化速度，这是控制胀差最有效的办法。如果蒸汽的温降或流量变化速度大，那么汽缸与转子的温差也大，引起机组的胀差增大，因此，在汽轮机停机过程中，必须严格控制蒸汽温度与流量变化速度及减负荷的速率，达到控制负胀差的目的。

某厂工作人员处理 2 号发电机出口中性点 A 相电流互感器发热问题，需解列 2# 汽轮机电网。根据预定方案，2 号汽轮机电网解列后以定速 3000r/min 运行，解列后严密监视 2 号汽轮机各参数，发现 2 号机胀差变化较大，37min 后，胀差值达到 -2.1mm（胀差停机值为 -2mm），打闸停机。转速到零时，发现电动盘车盘不动，尝试手动盘车也盘不动，通知检修班处理，打开轴承箱盖，通过盘车齿轮盘动转子 180° 后故障解除。事故原因初步判断为：2# 汽轮发电机组在解列运行中，汽轮机转子受冷收缩，转子收缩速度快于汽缸，从而形成负胀差，使转子和汽缸发生碰磨，造成电动盘车不动。

4.5　机组停机后

采取“闷缸”处理措施来控制负胀差，即解列打闸后，关闭各类汽门，避免各路气源进入汽轮机，开排气管对地疏水，疏水完毕后关闭疏水门。某厂 25MW 背压汽轮机停机后胀差变化曲线如图 3 所示，采取“闷缸”处理措施后，负胀差得到了有效控制，盘车电流无明显变化。

4.6　控制转子的相对伸长突变

背压式汽轮机在启动升速、超速试验、打闸停机

23-55 机械制造与智能化 第18期 6月下 总603期.indd 34　　2023/8/15 13:28:23

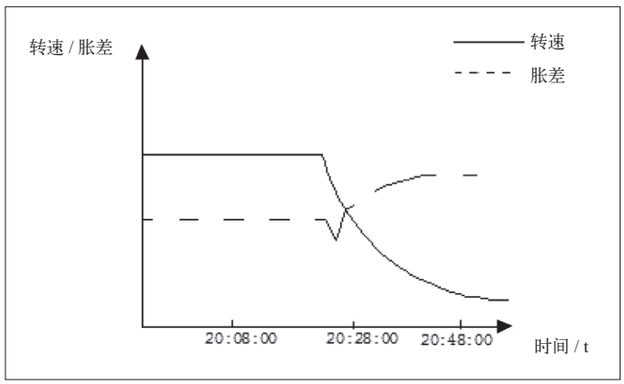

图 3　某厂 25MW 背压汽轮机停机后胀差变化曲线

降速的过程中，由于转子受离心力的作用，在短时间内的相对伸长量变化较大。这一现象在每台汽轮机上都有不同程度的体现，为了防止转子相对伸长突变引起机组胀差值超过极限值，从而造成机组内部磨损，在操作前应有预防措施。例如，机组启动升速过程应缓慢，尽量减少胀差的变化。停机、解列电网或热网时，应缓慢操作，待胀差稳定在安全值时再打闸停机。实践证明，这种操作方法是有效可行的。

5　结语

总之，汽轮机是高速旋转的热能设备，汽轮机的经济性在很大程度上依赖其运行的安全性。监视运行参数变化能够很大程度上防止或避免故障和事故的发生，这也是分析汽轮机正、负胀差产生的原因及控制措施的意义所在。所以运行人员应了解设备原理和掌握操作规程，按照操作规程进行操作，严密监视汽轮机各项参数变化，保证汽轮机组安全运行。

参考文献：

[1] 邵和春 . 汽轮机运行 [M]. 北京 : 中国电力出版社 ,2006:294-296.

[2] 肖凯 . 轴向位移监测系统安装调试及问题处理 [J]. 低碳世界 ,2014(7):34-35.

作者简介：王福（1987.07-），男，汉族，青海海东人，大专，助理工程师，研究方向：汽轮机运行与维护。

23-55 机械制造与智能化 第18期 6月下 总603期.indd 35　2023/8/15 13:28:23