

# 抽凝式汽轮机启动及运行过程中低真空的分析与处理

徐建

华电浙江龙游热电有限公司

**摘要:** 抽凝式汽轮机作为电力生产中的关键设备,其稳定运行对于整个电站的安全和效率至关重要,本文针对抽凝式汽轮机在启动和运行过程中出现的低真空现象进行深入分析,并探讨了该现象对汽轮机性能及安全性的影响,通过分析低真空的成因,如抽气系统设计缺陷、冷却水温度异常、真空泵性能衰减以及系统泄漏等,本文揭示了低真空对汽轮机热效率、叶片振动、排汽温度以及辅助设备负荷的具体影响。在此基础上,提出了相应的故障检测与处理策略,包括应用先进的监测技术、执行紧急操作预案、维护真空泵性能及系统优化建议。这些措施旨在为9E燃机和汽轮机的稳定运行提供专业的技术支持,确保电力生产的安全性和稳定性。

**关键词:** 抽凝式汽轮机;低真空;启动过程;运行分析;故障处理

【DOI】10.12252/j.issn.2096-627X.2022.09.099

## 引言

在实际操作中,该类汽轮机可能会遭遇低真空状况,这严重影响了机组的正常运行和发电效率,低真空不仅增加了设备的运行风险,还可能导致能源利用效率的大幅下降。尽管现有的研究对此问题有所关注,但关于低真空现象的系统性分析和综合性处理措施仍然缺乏。鉴于此,本文将综合工程技术理论与现场实践经验,对抽凝式汽轮机低真空现象进行全面诊断和策略制定,通过分析低真空的成因、评估其对汽轮机运行的具体影响,并结合现代故障检测技术,本文意在提出有效的预防和应对措施,以指导工程技术人员解决类似问题,优化汽轮机的运行管理。

## 一、抽凝式汽轮机低真空现象的原因分析

### 1. 抽气系统设计缺陷及其影响

抽气系统是确保汽轮机内部保持适当真空度的关键部分,如果该系统存在设计上的缺陷,比如管道尺寸不匹配、阀门选型不当或布置不合理等,都可能导致抽气效率下降,这种设计上的不足会使得气体无法被有效抽出,从而影响整个系统的真空度。例如,如果管道尺寸过小,那么即使泵的性能良好,也会因为管道的限制而无法达到预期的抽气效果,同样如果阀门选型不当,可能会导致抽气速率不稳定,进而影响到系统的真空度。因此抽气系统的设计对于维持汽轮机的正常运行至关重要。

### 2. 冷却水温度高或流量不足引起的冷凝压力升高

冷凝器是抽凝式汽轮机中用于冷却和凝结排出的蒸汽的设备,如果冷却水的温度过高或者流量不足,冷凝器的热交换效率就会降低,这会导致冷凝压力升高,进而影响到汽轮机的真空度,因为增加的压力需要更多的能量来维持相同的抽气速率。例如,当冷却水温度过高时,冷凝器的散热能力会降低,导致蒸汽无法迅速凝结

成水,从而增加了系统的背压。同样如果冷却水流量不足,也会导致热交换效率降低,进而影响到系统的真空度。

### 3. 真空泵性能下降导致的抽气能力降低

作为抽气系统的核心部件,真空泵负责从汽轮机内部抽取空气和其他气体,随着时间的推移,真空泵可能会由于磨损、老化或维护不当等原因导致其性能下降,一旦泵的抽气能力降低,汽轮机内部的真空度自然也会受到影响。例如当泵的磨损严重时,其抽气效率会明显下降,导致无法及时将汽轮机内部的气体抽出,此外如果泵的维护不当,可能会导致内部零件损坏或堵塞,进而影响到其性能。

### 4. 系统泄漏与密封不良造成空气侵入

抽凝式汽轮机在运行规程中,如果系统中存在泄漏点,比如管道接缝、阀门连接处或其他密封部位的损坏,外部空气就会侵入系统内部,这种不必要的空气进入会增加抽气系统的负担,并进一步降低系统的真空度。例如当管道接缝处存在泄漏时,外部空气会通过这些泄漏点进入系统内部,导致真空度下降,同样如果阀门连接处或其他密封部位损坏,也会导致空气泄漏进入系统内部。

## 二、低真空对汽轮机运行的影响评估

### 1. 机组热效率的降低与能耗增加

真空度是影响汽轮机热效率的关键参数之一,理想状况下,汽轮机的排汽压力越低,蒸汽在汽轮机内做功后所剩余的热量就越小,能量转化效率越高,然而一旦出现低真空情况,排汽压力升高,蒸汽在做功后未能充分释放热量,仍残留较多的未利用热量,导致热效率下降。具体来说,低真空意味着排气端压力升高,蒸汽在汽轮机内部做功后的余热无法完全释放,部分热量被压缩回循环系统,这样一来,相同质量的蒸汽在汽轮机内

所能做的有效功就会减少，整个热力循环的热效率自然也会降低。

除了直接影响热效率，低真空还会导致能源消耗增加，为了满足给定的负荷需求，在排气压力升高的情况下，就需要增加蒸汽流量来补充损失的功率，而增加蒸汽流量，必然会导致锅炉的燃料消耗增加，从而降低了整个系统的能源利用率。低真空还会给汽轮机的各个部件增加额外的热负荷，如果持续运行在这种状态下，将加速设备的磨损，缩短使用寿命，从而间接增加维护和更新成本。因此，从热效率、能耗和设备寿命等多个角度来看，保持良好的真空度对于提高发电效率、节约运行成本都至关重要。

### 2. 叶片受力不均与振动问题的出现

汽轮机内部的蒸汽流动是一个复杂的过程，需要严格控制各个流道的压力分布，以确保流场的稳定性，一旦出现低真空情况，整个流场的压力分布就会被打乱，造成叶片受力的不均匀，从而引发严重的振动问题。具体来说，低真空条件下，气体流动过程中的摩擦损失会加大，导致蒸汽在不同流道中的压力分布失去均匀性，这种压力分布的不均匀性会使得叶片所受到的气动力也失去平衡，产生扭曲变形，激发出严重的振动；另一方面，低真空状态下，排气压力升高会增加蒸汽在转子表面的冲刷作用，从而进一步加剧转子的振动，如果振动超出了正常范围，不仅会降低机组的运行效率，还可能损坏叶片，缩短设备使用寿命。

值得注意的是，叶片振动是一个极为复杂的动力学问题，往往存在共振等危险情况，一旦振动频率接近或达到叶片的固有频率，就会激发共振，使振动迅速增大，造成不可逆性损坏，对于汽轮机而言，控制好真空度，避免低真空引发的振动问题，是确保设备安全可靠运行的前提条件。

### 3. 排汽温度上升对下游设备的安全风险

汽轮机的低真空运行不仅会影响自身，对下游设备如空冷器、冷凝器等也会带来严重的安全隐患，主要是由于排汽温度的升高所致，在正常工况下，蒸汽在汽轮机内做功后，大部分热量会被释放，排出的汽体温度较低，然而一旦出现低真空情况，由于排气压力升高，蒸汽在汽轮机内无法完全做功，剩余的热量无法释放，导致排汽温度明显升高。

过高的排汽温度会给下游设备带来诸多风险，首当其冲的就是过热问题，高温排汽可能会使管道、设备外壳等金属部件过热，造成热胀冷缩循环加剧金属疲劳，甚至直接导致材料强度下降、变形等。同时，高温也会加速这些部件的腐蚀，缩短使用寿命。排汽温度的升高

还会直接影响到冷凝器和空冷器的冷却效果，如果冷凝不彻底，会影响循环水的温度，进而影响整个发电系统的热效率，在极端情况下，高温排汽还可能损坏这些设备的绝热层和其他部件，造成永久性损坏。从确保下游设备安全运行的角度出发，控制好排汽温度、维持良好的真空度是至关重要的，只有真空度保持在正常水平，才能避免由于背压升高而带来的一系列安全隐患。

### 4. 辅助设备负荷增加与维护成本上升

在正常真空度下，汽轮机组能高效顺畅地运转，辅助设备的负荷较低。但一旦出现低真空情况，为了维持正常运行，必须通过增大辅助设备的负荷来弥补低真空带来的影响，从而导致功耗增加、维护成本上升，以抽气蒸汽喷射冷凝器为例，在低真空工况下，为了保证冷凝器的冷凝效果，不得不增大喷淋水量和抽气蒸汽量，从而增加了循环水泵和抽气泵的负荷，与此同时，空冷器的冷却风扇功率也需要适当提高，以满足对空冷量的需求。

辅助设备负荷的增加不仅直接导致电耗的增加，也加速了设备的磨损和老化，由于经常处于高负荷工况，电机绕组、轴承等易损件的使用寿命将大幅缩短，检修更换周期也将相应缩短，频繁的检修不仅增加了维护成本的直接支出，更为严重的是将导致机组的停运时间延长，发电量降低，从而影响经济收益。在低真空的恶劣环境下运行，辅助设备也更容易出现其他故障，如泵体磨损加剧、管路结垢阻塞等，从而进一步增加维护工作量和成本支出。因此，从节约运营成本的角度出发，企业应当重视真空度控制，尽量避免长时间处于低真空状态，以减轻辅助设备的负担，延长检修周期，降低维护成本。

## 三、低真空故障的检测与处理方法

### 1. 故障检测技术与监测系统的应用

对于低真空故障的检测，安装先进的真空度监测系统显得尤为重要。这种系统通过布置在关键位置的传感器，实时采集真空度等关键参数的数据，并通过数据分析来判断真空度变化趋势。数据监测不仅可以帮助发现突发性故障，更重要的是能够捕捉到缓慢发展的趋势性故障，为预防措施的采取提供时间窗口。除了数据监测，现代化智能监控系统还能够整合多种检测手段，提高故障识别的准确性。比如，可以结合红外热像仪等视觉检测设备，及时发现由于真空度下降导致的异常热点，从而确认故障位置。此外，振动监测、声发射检测等非破坏性检测技术也可以被纳入监控系统，多维度、全方位地监控设备运行状态。

当前，大数据分析和人工智能算法在设备故障预警

领域的应用越来越广泛。智能监控系统能够基于海量历史数据，学习正常工况下的参数模式，从而及时识别偏离该模式的数据，进行故障预警。同时通过机器学习算法对检测数据进行智能分析，可以探索影响故障的深层次因素，从根源上预防故障发生。总的来说，借助先进的监测和分析技术，运维人员将能够尽早获知故障征兆，赢得宝贵的检修时间。

### 2. 紧急停机与低真空状态下的操作预防措施

一旦发生低真空故障，操作人员需要根据具体情况立即采取应对措施，如果故障严重，不得进行紧急停机，则必须严格遵守操作规程，确保设备安全有序停运。首先要注意逐步卸载，避免突然停机对设备造成冲击，要按照规定程序切断各种介质的供给，随后再依次停止各个辅助系统。最后方可停止主系统运转，并完成机组的冷却和防护工作。如果低真空情况没有到达紧急停机的程度，操作人员应优先考虑调节抽气蒸汽喷射冷凝器等辅助设备的运行状态，以降低对主设备的影响。具体来说，可以通过调节抽气蒸汽量、喷淋水量等参数，来维持主设备的正常运行条件。与此同时，必须及时减载或调整负荷，避免机组进一步超负荷运转，加剧故障程度。

在整个应对过程中，操作人员需要时刻注意观察各参数变化，随时准备应对突发状况，必要时要及时请求支援，启动应急预案，同时要准确地记录故障发生的全过程，包括运行数据、操作记录等，为后续的故障分析和总结提供第一手资料。一旦故障排除，也要认真检查设备，确认各部分无残留隐患后再投入运行。

### 3. 真空泵维护与性能恢复的策略

真空泵是保持真空度的关键设备，其性能的好坏直接影响整个汽轮机组的运行效率。因此，对真空泵进行定期全面的维护保养十分必要。具体来说，应根据使用环境、工况及运行时数等因素，制定合理的维护计划。对于泵体内部，需要定期进行彻底的清理和清洗，清除残留的杂质和积垢，防止堵塞和磨损。对于密封部件如密封环、轴承等，要及时检查磨损情况，并按期进行更换。对于性能下降的真空泵，可以尝试一些恢复措施，延长其使用寿命。比如更换新的高质量润滑油、优化冷却系统的冷却效果等，有助于恢复泵的效率。如果通过这些手段无法彻底修复，则需要考虑更换全新的真空泵。在更换过程中，要严格按照规范的拆装步骤操作，避免将杂质带入真空系统中，影响真空度。

除了对真空泵本身的检修，对于真空系统的其他部件如管线、阀门等也要进行全面检查，确保整个系统的完整性和密闭性，一旦发现渗漏等问题，要及时排查原

因并加以修复。通过对真空泵和整个真空系统的全面检修，必能最大限度地恢复和保持理想的真空水平，确保设备的高效运行。

### 4. 系统优化与改进措施的提出

虽然及时采取检修等应对措施可以缓解低真空故障的影响，但从根本上解决这一问题仍需要对整个系统进行优化和改进，首先可以考虑在关键部位增加真空度在线监测点，提高监测精度和覆盖范围，消除监测盲区。对于真空泵，要优化其布置位置和数量，增强整体抽空能力，尽量避免局部真空度不足，同时要完善真空管网的布置，消除死角和漏点，防止气体残留。对于一些辅助设备如抽气冷凝器等也需要进行技术改造，提升其运行效率，为维持良好真空度提供支持，比如可以采用新型高效的冷凝器材料和设计，提高蒸汽冷凝效率；或者优化水循环系统，改善冷却效果。通过对这些辅助设备的改造升级，可以有效降低其运行负荷和能耗，延长使用寿命。

从整体上看，建立完善的故障预警体系和应急响应机制也是必要的，要利用现代信息技术，打造集故障预警、故障诊断和应急指令于一体的智能化管控平台，同时，完善应急预案和多部门联动机制，确保故障发生时快速、高效的响应，长期来看，企业还要持续改进工艺流程，优化系统设计理念，不断消除影响真空度的根源隐患，从而有利于从根源上解决低真空问题。

### 结束语

通过上述分析，本文总结了抽凝式汽轮机在启动及运行过程中低真空现象的成因、影响及处理方法，针对9E燃机和汽轮机的运行特点，提出了一系列有效的故障诊断与处理策略，旨在提升机组的运行效率和可靠性，确保电力生产的安全稳定。未来的工作将集中在智能化故障诊断技术的进一步开发与应用，以及系统设计的持续优化，从而更好地应对低真空等复杂工况。

### 参考文献

- [1] 王晓辉, 刘广于, 杨会永, 等. 汽轮机真空低原因分析及对策[J]. 机电信息. 2022, (15).
- [2] 伍赛特. 燃气-蒸汽联合动力装置在水面舰船领域的应用与发展[J]. 上海节能. 2021, (10).
- [3] 马壮, 吕泰萍, 滕九洋. 抽凝式汽轮机启动及运行过程中低真空的分析与处理[J]. 现代工业经济和信息化. 2021, 11(11).
- [4] 刘传亮, 郝宁, 江路毅. 抽凝式汽轮机推力轴瓦超温与通流异常的分析处理[J]. 汽轮机技术, 2022, 64(05): 381-384.