

大功率高速同步电机暖机进程及顶升油泵系统测试分析

蒲 斌, 王洪健

(中国石油西部管道公司, 新疆 乌鲁木齐 830013)

摘 要: 根据长输管道大功率高速同步电机暖机进程及顶升油泵系统现状, 对机组暖机进程进行测试并跟踪分析, 发现暖机进程与同步电机过临界转速时振动值的相关度不高, 暖机时间可以进行减少或取消。对同步电机顶升油泵系统进行测试, 分析取消顶升油泵时同步电机振动、温度、起停机时间等的变化情况。试验结果表明, 可降低顶升油泵联锁停泵转速。

关键词: 同步电机; 顶升油泵; 临界转速; 振动; 暖机

中图分类号: TM 34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)10-0072-05

Test and Analysis for Warmup Process and Jacking Oil Pump System of High-Power High-Speed Synchronous Motor

PU Bin, WANG Hongjian

(Petro China West Pipeline Company, Urumqi 830013, China)

Abstract: According to the warmup process and jacking oil pump system of high-power high-speed synchronous motor in long-distance pipeline, the unit warmup process was tested and analyzed. The warmup process was not highly correlated with the vibration value of the synchronous motor near the critical speed point, and the warmup time could be reduced or cancelled. The synchronous motor jacking oil pump system was tested, and the changes of the synchronous motor vibration, temperature, start-stop time, etc. when the jacking pump was cancelled were analyzed. The results showed that the chain stop pump speed of the jacking oil pump could be reduced.

Key words: synchronous motor; jacking oil pump; critical speed; vibration; warmup

0 引 言

长输管道天然气压缩机按驱动方式分为燃驱和电驱。电驱机组效率高、运行维护成本低, 其中大功率高速同步电机, 功率因数高、转速调节范围广, 应用逐渐增加。长输管道大功率防爆高速同步电机长时间被西门子、ABB、TMEIC 等国外电机巨头垄断^[1], 国内的设计制造及运行积累不足, 应用不够成熟。目前, 除 TMEIC 电机外, 其余大功率高速同步电机均设置了较长的暖机时间, 同时设计了顶升油泵系统, 但是对于暖机及顶升油泵系统的运行无相关规范及参考标准, 仅凭经验及

感觉进行设计运行, 造成机组不能快速起动。在管线运行压力过高时, 较长的暖机时间造成本站机组起动过慢, 上游管线压力上升超过管线设计压力, 引起干线管线及附属设备损坏或天然气大量泄漏, 造成不可估量的损失。

本文通过对大功率高速同步电机进行暖机功能起、停机测试, 分析了暖机转速和暖机时间与机组运行的相关性, 优化了暖机转速和时间设置, 使机组可以快速起动。同时对同步电机顶升油泵运行进行测试, 分析了顶升油泵与转速、轴承油膜之间的运行关系, 优化了顶升油泵设置与控制联锁, 对机组的平稳运行具有重要意义。

作者简介: 蒲 斌(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为设备管理。

1 同步电机暖机及顶升油泵系统概述

1.1 同步电机暖机概述

长输管道天然气压缩机组运行转速在机组一阶临界转速^[2-3]之上、二阶临界转速之下,压缩机的驱动机高速同步电机有其各自的临界转速,因此机组由起动至最小工作转速时要经过各自的临界转速,转子在经过临界转速时将产生剧烈振动^[4],称为过临界振动。为了确保机组正常运行,要控制机组的过临界振动,防止造成机组损坏。

同步电机均采用两级转子的三轴承支撑结构,主转子和励磁转子均存在一个一阶临界转速^[5-6]。由于转子刚度存在一个范围,故临界转速运行过程也存在一个范围^[5]。为了降低过临界转速时的振动值,部分同步电机在起机过程中增加了暖机进程。暖机的目的是使各部件均匀受热,减少热应力,主要用于汽轮机起动过程。在西气东输一线玉门、蒲县、郑州、淮阳站西门子同步电机投产调试中,为了防止电机过临界转速时振动值超限引起停机,增加了暖机这一过程。上电、哈电的高速同步电机在起机时同样增加了暖机过程,但机组的暖机转速与暖机时间设计均不同。日本的 TMEIC 机组则无暖机过程。

1.2 同步电机顶升油泵系统概述

大功率高速同步电机转子质量表如表 1 所示。

表 1 大功率高速同步电机转子质量表

厂家	哈电	上电	TMEIC	西门子
功率/MW	13 20	20	18	22
转子质量/t	7.3 8.2	8.5	8.1	9.72(含励磁机)

因为转子较重,造成主电机轴承承载较重,不易建立稳定润滑条件,所以为了减少盘车力矩、便于机组起动和保护轴瓦^[7],西门子、哈电、上电在主电机的驱动端及非驱动端轴承处均设置了顶升油泵系统^[8]。顶升油泵系统常见于汽轮机组,各厂家对于轴承需要建立稳定润滑的油膜厚度要求不同,设计的顶升油泵的联锁停机转速均不同。主要包括顶起高度应大于 0.02 m、0.05 ~ 0.10 mm^[8-9]、0.08~0.15 mm^[10],联锁停机的转速范围为 500~2 500 r/min,范围较大。对于使用可倾瓦轴承的部分机组,没有设计顶升油泵系统^[11],如东芝的 600 MW 亚临界汽轮机^[9]以及

TMEIC 的大功率高速同步电机。

2 同步电机暖机测试及分析

2.1 暖机测试

为了确定暖机时间与暖机转速对机组过临界振动值的影响,对西二线某站 13 MW 哈电高速同步电机进行测试。由于转子温度无法直接进行测量,选用定子温度作为参考。1 号机组暖机时间如表 2 所示。该机组采用的振动监测系统为本特利 3500 系统,通过 SYSTEM1 软件内的趋势图查看同步电机过临界振动时各振动传感器的振动峰值,对应表 2 暖机时间,记录 1 号机组 7 次不同暖机时间后的同步电机过临界振动峰值并绘制曲线,如图 1 所示。其中第 3 次起机与停机过程中未起动顶升油泵。

表 2 1 号压缩机组暖机时间表

起机次数	1	2	3	4	5	6	7
暖机转速/(r·min ⁻¹)	800	800	1 500	800	800	800	800
暖机时间/min	30	60	60	34	10	15	5
起机前定子温度/℃	18	13	13	13	22	28	36
暖机前定子温度/℃	20	17	16	16	22	28	37
暖机后定子温度/℃	32	36	40	28	26	33	37

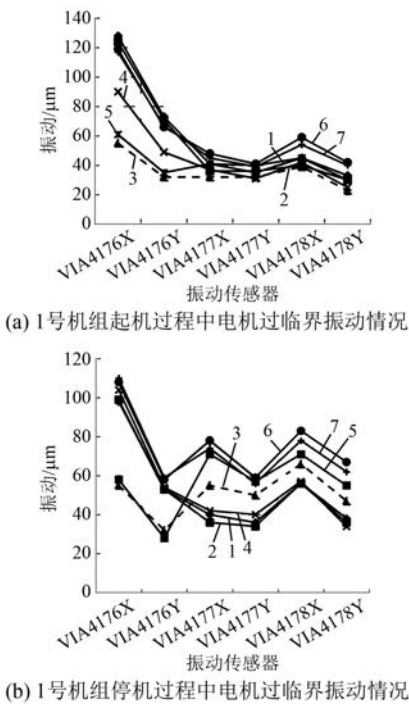


图 1 1 号机组起、停机过程中电机过临界振动情况

2 号机组暖机时间如表 3 所示。通过 SYSTEM1 软件内的趋势图查看同步电机过临界振动时各振动传感器的振动峰值, 对应表 3 的暖机时间, 记录 2 号机组 8 次不同暖机时间后的同步电机过临界振动峰值并绘制曲线, 如图 2 所示。其中, 第 8 次起机与停机过程中未启动顶升油泵。

表 3 2 号压缩机组暖机时间表

起机次数	1	2	3	4	5	6	7	8
暖机转速/($r \cdot \min^{-1}$)	800	800	800	800	800	800	800	1 500
暖机时间/min	1	10	5	10	10	5	5	30
起机前定子温度/ $^{\circ}\text{C}$	64	64	15	20	24	37	41	41
暖机前定子温度/ $^{\circ}\text{C}$	62	62	16	22	26	38	41	41
暖机后定子温度/ $^{\circ}\text{C}$	61	61	18	25	27	39	42	45

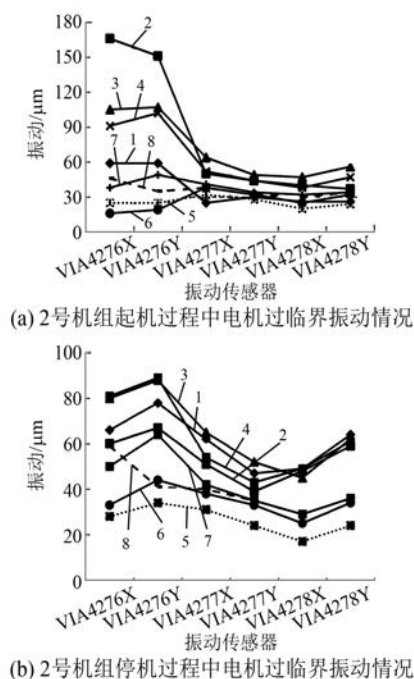


图 2 2 号机组起、停机过程中电机过临界振动情况

图 1、图 2 中, 4176X/Y、4276X/Y 为电机驱动端振动传感器, 4177X/Y、4277X/Y 为电机非驱动端振动传感器, 4178X/Y、4278X/Y 为电机励磁机振动传感器, X、Y 为同一轴承位置的 2 个相互垂直的电涡流振动传感器。

由图 1、图 2 结合表 2、表 3 可知, 1 号、2 号机组经过不同的暖机时间后, 环境温度不同、定子温升不同, 并且有机组停机后不久重新起机的, 得出以下结论:

(1) 1 500 $r/\min$ 的暖机转速时定子温升值比 800 $r/\min$ 的暖机转速时高。当定子温度本身较高时, 暖机对定子温升的影响不明显。

(2) 哈电 13 MW 的同步电机暖机时间与起机过程中过临界振动值相关性较小, 较长的暖机时间并未降低电机过临界振动值。

(3) 在相同定子温度时, 过临界振动的差异也较大, 定子温度相差较小时, 过临界振动也存在较大差异。

(4) 机组起机时过临界振动较高, 停机时过临界振动值均偏高; 起机时过临界振动值偏低, 停机时过临界振动值均偏低。

(5) 2 号机组 VIA4276X/Y 2 个点在第 2 次起、停机过程中偏差较大, 其余轴承振动在起、停机过程中相差较小。

2.2 分析

查询历史记录, 1 号压缩机组在投产初期, 存在过临界振动高, 导致机组起机失败的情况; 经过对电机转子进行现场动平衡后, 过临界振动值明显降低。电机过临界的异常振动通常都是由转子动不平衡所引起^[12-13]。为了有效降低转子过临界振动, 最有效的方式是调整转子的动平衡。同步电机采用两级转子, 电机动平衡时加减配重有 4 个选择。不合适的加减配重会造成正常运行时转子振动正常, 但是在过临界时振动过高。

通过对机组的暖机测试结果进行分析, 压缩机组起机过程中的暖机时间可以进行缩短或取消, 以加快机组起机时间。当同步电机的过临界振动值较高时, 建议对电机进行现场检查或者进行现场动平衡。保留机组暖机功能时, 宜适当提高暖机转速至机组一阶临界转速之下, 以提升暖机效果。

由此可知, 大功率高速同步电机起机过程中的暖机时间可以根据需要进行减少或者取消, 能够加快机组起机进程。

3 顶升油泵系统

3.1 转子顶升高度测试

哈电 13 MW 高速同步电机主轴转子采用 RENK 的四瓦块可倾瓦轴承, 具有良好的稳定性和抗振性^[14]。设计有顶升油泵系统, 电机转速在

2 500 r/min 时联锁停顶升油泵, 出厂说明书要求顶升高度在 0.05~0.10 mm。机组的振动监测系统采用本特利 3500 系统, 可以通过 SYSTEM1 软件内的轴线图观测转子的位置变化情况。轴线图由一组 2 个垂直于轴的传感器的平均间隙电压生成, 由于传感器固定在轴承箱上, 间隙电压的变化即转子轴相对轴承箱的变化, 显示的是转子轴中心线的变化情况, 转子轴中心线的变化情况为转子的上升高度变化情况。因为轴承油膜无法直接测量, 机组由停止到运行过程中, 可倾瓦轴承下瓦块底部会稍微升高, 下瓦块顶部进油部分间隙增大, 下瓦底部油膜厚度略小于转子上升的高度, 转子上升高度略小于下瓦平均油膜厚度, 所以采用转子上升高度等于轴瓦油膜厚度来间接观测轴承油膜厚度。

起动过程中, 不起动顶升油泵直接将电机升速。根据主电机驱动端与非驱动端转子轴中心线图的高度与转速的数据, 可得哈电 13 MW 高速同步电机转子 0~1 500 r/min 时转速与转子上升高度的关系, 变化趋势如图 3 所示。

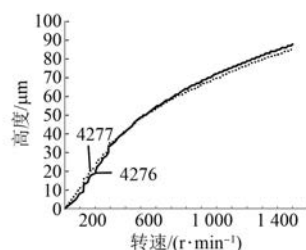


图3 电机转子转速与转子上升高度变化趋势图

由图3可知:(1)相同转速下, 主电机驱动端(4276)与非驱动端(4277)转子上升高度同步, 上升高度基本相同。(2)由转子上升高度间接观测轴承油膜厚度, 转子转速在 70 r/min 时轴承建立约 10 μm 油膜, 在 500 r/min 时建立约 50 μm 油膜, 1 500 r/min 时建立约 87 μm 油膜。西门子电机在转速大于 550 r/min 时停止顶升油泵, 此时油膜厚度约 50 μm 。(3)转子上升高度呈现先快速上升后变缓的趋势。

3.2 机组起停机测试

停止顶升油泵对机组进行起、停机测试, 查看同步电机转子轴承温度、振动情况。起机升速至 1 500 r/min 后保持不变, 起、停顶升油泵查看温

度、振动变化情况, 随后升速至最小转速; 停机过程中当转速下降至 800 r/min 后, 再次起、停顶升油泵查看温度、振动变化情况, 最后停机, 如图4所示。

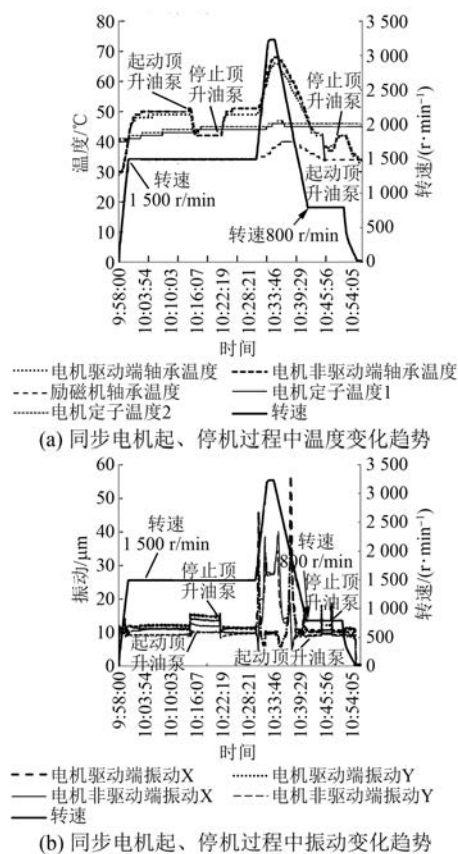


图4 同步电机起停机过程中温度、振动变化趋势图

由图4(a)可知:(1)未起动顶升油泵时, 起机过程中, 电机驱动端及非驱动端轴承温度呈现稳步上升趋势, 并未出现异常的下降或上升; 停机过程中, 电机驱动端及非驱动端轴承温度呈现稳步下降趋势, 并未出现异常的下降或上升。(2)在 1 500 r/min 转速暖机时, 电机驱动端与非驱动端轴承温度基本稳定不变。起动顶升油泵后, 电机两端轴承温度均出现下降后保持稳定不变; 停止顶升油泵后, 电机两端轴承温度均开始上升并保持稳定不变。两者温差约为 6 K。(3)停机时, 电机保持在 800 r/min 时, 电机驱动端与非驱动端轴承温度基本稳定不变。起动顶升油泵后, 电机两端轴承温度均出现先下降后保持稳定不变; 停止顶升油泵后, 电机两端轴承温度均开始上升并保持稳定不变。两者温差约为 6 K。顶升油泵系统的主要作用之一是保护轴承, 轴承未建立稳定润

滑时易造成轴承的异常磨损,且这种情况往往发生在低速时。发生低速碾瓦的一个主要现象就是轴瓦温度的异常升高^[15-16]。在停止顶升油泵起、停机过程中,未发生轴承温度的异常变化,未对轴承产生异常破坏,并且起、停机阶段轴承温升相差约为 6 K,温差较小。轴承的表面材料一般为巴氏合金,在润滑未建立时允许一定程度的干磨及发热^[17]。

由图 4(b)可知:(1)未起动顶升油泵时,起、停机过程中,除电机过临界转速时驱动端及非驱动端轴承过临界振动异常较高外,其余时间基本保持平稳,并未出现异常的下降或上升。(2)起机在 1 500 r/min 转速暖机及停机过程中转速保持在 800 r/min 时,起动顶升油泵后,电机驱动端与非驱动端轴承振动均出现升高;停止顶升油泵后,两端轴承振动值均出现下降。(3)结合图 2 中第 8 次起、停机曲线,停止顶升油泵后,起、停机阶段过临界振动数值水平较低。未起顶升油泵时,起、停机过程中无异常振动,振动较平稳。该电机起动顶升油泵后顶起高度约为 0.1 mm,大于 800 r/min 及 1 500 r/min 时轴承动压效应产生的油膜厚度,造成起动顶升油泵后振动值稍高于停止顶升油泵时的振动值,同时造成电机驱动端轴承 4276X/Y 在一阶临界振动(约 1 800 r/min)时,起动顶升油泵振动的数值均较高。

3.3 机组起、停机速率变化

查看起、停顶升油泵时机组的升、降速率变化情况,压缩机组升、降速率变化统计表如表 4 所示。由表 4 可知,起机及升速阶段,时间及速率差

别较小。未起动顶升油泵时,机组未出现起动困难的情况;升速过程两者速率差别也较小。停机过程中,未起动顶升油泵时,可以较快速地停机。原因是,当机组转速过小时,变频器停止输出,轴承油膜较薄,转子较快实现了制动;起动顶升油泵时,轴承油膜较厚,转子较大的旋转惯性使停止时间较长。

3.4 结 果

经过对同步电机的顶升油泵测试结果分析,对于已经配套顶升油泵系统的机组,建议:降低顶升油泵的联锁停泵转速至一阶临界转速之下;可以将顶升油泵系统的报警级别降低,以便于起机。新设计同步电机时,可以取消顶升油泵系统,选用无顶升系统的可倾瓦轴承。

4 结 语

对哈电 13 MW 大功率高速同步电机进行多次起、停机跟踪测试,分析暖机进程和顶升油泵系统相关数据,得出如下结论:

- (1) 通过高质量的转子动平衡降低机组过临界振动值,可以在起机过程中减少或取消暖机过程。
- (2) 保留暖机过程时,宜提高暖机转速至一阶临界转速之下。
- (3) 已经配套顶升油泵系统的机组,宜降低顶升油泵的联锁停泵转速至一阶临界转速之下。
- (4) 可以将顶升油泵系统的报警级别降低,以便于起机。
- (5) 新设计大功率高速同步电机时,可以取消顶升油泵系统。

【参考文献】

[1] 张文.15 MW 正压型电机的设计与研制[D].上海:上海交通大学,2014.

[2] American Petroleum Institute. Axial and centrifugal compressors and expander-compressor: API STD 617-2014[S].8th ed.Washington:API,2014.

[3] American Petroleum Institute. Brushless synchronous machines: 500 kVA and larger: API STD 546-2018 [S].3rd ed.Washington:AP2,2008.

[4] 朱常兴,王殿友.两极电机转子临界转速计算[J].电机与控制应用,2014,41(6): 33.

(下转第 110 页)

表 4 压缩机组升降速率变化统计表

内容	转速/(r·min ⁻¹)	时间/s	加速度/(r·s ⁻²)
未起动顶升	0~797	58	0.23
	797~1 494	63	0.19
	1 494~3 203	150	0.19
	3 230~797	345	0.12
	793~0	182	0.07
起动顶升	0~797	61	0.22
	797~1 494	61	0.19
	1 494~3 203	158	0.18
	3 230~797	351	0.12
	793~0	223	0.06