

高速磁浮列车变频器冷却系统原理及参数分析

张前锋

(上海磁浮交通发展有限公司, 201204, 上海//工程师)

摘要 依据上海高速磁浮列车牵引变频器冷却系统原理, 对其应用设计及冗余策略进行分析, 阐述了该冷却系统的分布结构、工作原理、参数配置接口功能及效率等, 并根据实际应用情况提出了改进设计的建议。

关键词 高速磁浮列车; 变频器; 冷却系统

中图分类号 U237

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.08.007

Principle and Parameter Analysis of the Frequency Converter Cooling System for High-speed Maglev Train

ZHANG Qianfeng

Abstract High-speed maglev train is a new mode of transportation. The main speed control system is the propulsion converter system. The converter will produce huge heat during the train operation. Benefit from its stable and reliable cooling system the converter can run smoothly. Based on the principle of Shanghai Maglev train converter cooling system, its application design and redundancy strategy are analyzed. The distributed structure, working principle, functions and efficiency of parameter configuration interfaces are elaborated, suggestions for improving the design according to the practical situations are put forward.

Key words high speed maglev train; frequency converter; cooling system

Author's address Shanghai Maglev Transportation Development Co., Ltd., 201204, Shanghai, China

高速磁浮列车牵引(驱动)技术原理是基于交流同步直线电机技术,变频器是其主要调速设备。高速磁浮列车的变频器在列车运行过程中会产生巨大热量,因此变频器需要稳定、高效的冷却系统来保障其正常工作。本文主要介绍上海高速磁浮列车变频器冷却系统的结构组成和工作原理,并对该系统设计进行研究和分析。

高速磁浮列车变频器冷却系统采用的冷却方式是水冷。每台冷却机组通过两套独立的水路循

环,将变频器工作时产生的巨大热量带到室外进行降温处理。高速磁浮列车共有高功率变频器12套、中功率变频器2套,14套变频器都使用了该冷却系统。

1 高速磁浮列车变频器冷却系统概述

高速磁浮列车变频器冷却系统有两套独立的水循环系统,分别为一次水循环和二次水循环。一次水使用高纯度水,用于变频器内部元器件冷却,一次水循环装置将变频器工作时产生的热量带出;二次水使用防冻水,通过热交换器将一次水的热量交换过来,并带到室外通过压缩机制冷机组进行降温。

一次水循环使用的冷却水要求纯度很高,电导率低于 $0.5 \mu\text{S}/\text{cm}$,水中杂质颗粒小于 $50 \mu\text{m}$;二次水循环使用的冷却水要求零下 20°C 不结冰。另外,变频器冷却系统必须采集的实时信号由传感器送入变频器冷却水控制子系统,由其控制冷却系统的自动运行。其核心设备是SIMATIC S7控制器,属于变频器控制系统的子系统之一。单套冷却系统的制冷容量为131 kW。

2 高速磁浮列车变频器冷却系统配置

高速磁浮列车变频器冷却系统主要配置设备有:一次\二次回路及水泵、一次\二次水箱、控制柜、热交换器、户外压缩机制冷机组、去离子装置、三位置阀、水温水压传感器等。

变频器冷却系统的主要相关设备分布:变频器、一次水箱位于设备楼一层;一/二次循环水泵、热交换器、去离子装置、二次水箱等位于设备楼地下室;二次水循环的制冷压缩机位于变频器设备楼屋顶。主要设备分布在上、中、下三层结构中。

3 高速磁浮列车变频器冷却系统运行原理

高速磁浮列车牵引变频器冷却系统检测及控

制原理图如图 1 所示。

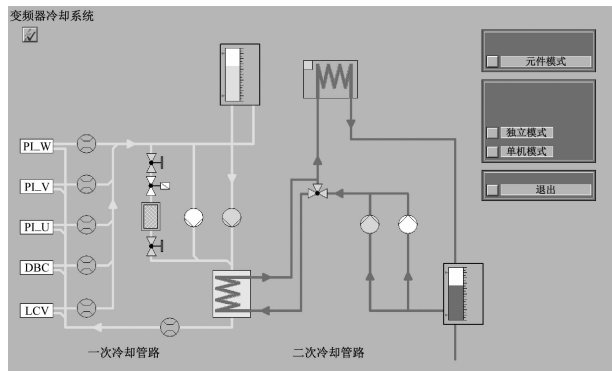


图 1 牵引变频器冷却系统检测及控制原理图

3.1 一次水循环系统

如图 1 左侧部分所示，一次水循环回路通过水泵驱动，经热交换器降温后，分别流经变频器的整流柜，制动斩波柜，以及 U、V、W 三相逆变柜，然后回到一次水箱，再次进入循环；循环其间若检测到一次水电导率高，则流经去离子装置的阀门打开，对一次水进行去离子。

对一次水去离子的原因：一次水进入变频器柜后经毛细管路直接通过变频器 GTO(门极可关断晶闸管)模块等的内部散热器如图 2 所示。这些金属散热器内层没有绝缘层，功率器件通过这些散热器和一次冷却水联系在一起，这就意味着冷却水的绝缘性能决定了这些功率器件之间的绝缘性能，所以变频器对于内循环的冷却水的纯度要求极高，冷却水电导率要求低于 0.5 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ，水中杂质颗粒小于 50 μm 。

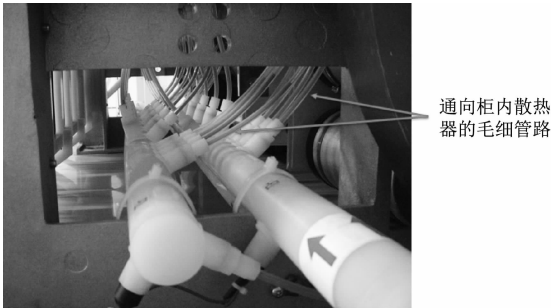


图 2 变频器内部冷却系统毛细管路

3.2 二次水循环系统

如图 1 右侧部分所示，二次循环水通过水泵驱动，进入室外的空调压缩机制冷机组；二次循环水在蒸发器中和压缩机中的低压、低温气液混合制冷剂进行热交换，二次水温得到降低。制冷剂吸热变为低压气体，经过压缩机绝热压缩变成高温高压气

态，送入冷凝器向环境放热后冷凝为高压液体，再经过膨胀阀节流后进入蒸发器，如此循环往复。

压缩机组不仅能够提高冷却效率，使得二次循环水温快速降低，而且能够准确控制二次水温。根据一次水温度的高低，二次水通过三位置阀(三通)控制进入热交换器水量，来控制一次水的温度。一次循环的水压须大于二次循环水压，避免热交换器有漏点时，二次水通过漏点污染一次水。

4 高速磁浮列车冷却系统主要参数分析

变频器冷却系统的控制部分是通过分布在管路和现场的传感器采集信号，由处理器对比各环节参数配置后，对各执行机构发出控制命令，使冷却系统一、二次水各参数在运行过程中符合要求，并最终达到为变频器发热元件进行冷却的目标。

4.1 变频器冷却系统温度控制范围

一次水温要高于变频器的环境温度 2 $^{\circ}\text{C}$ 以上，以防止因设备结露而降低绝缘性能。若一次水温度低于环境温度，则单独启动一个或两个一次水泵，通过水循环与管道壁的摩擦使得水温升高。

一次水温度高于 38 $^{\circ}\text{C}$ 时，冷却系统报警，高于 40 $^{\circ}\text{C}$ 时，变频器停止工作。

二次水温度控制低于一次水温。若二次水温度升高，则启动压缩机制冷机组，对二次水进行降温。

二次水温度高于 30 $^{\circ}\text{C}$ 时，冷却系统报警，报警后给一次水降温的效率下降，直到一次水温高于 40 $^{\circ}\text{C}$ 后变频器保护关断。

二次水温控制主要通过控制屋顶冷却装置的投入功率，对降温效率进行控制，如表 1 所示。

表 1 二次水温与压缩机投入功率控制表			
序号	设定温度/ $^{\circ}\text{C}$	1 号压缩机投入功率/%	2 号压缩机投入功率/%
1	>20.5	50	
2	>22.5	100	
3	>23.5	50	50
4	>24.0	100	50
5	>24.5	100	100

4.2 变频器冷却系统一次水电导率控制

变频器运行时一次水电导率控制在 0.4 ~ 0.5 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 之间，变频器停止运行时一次水电导率控制在 ≥ 0.6 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 。通过阀门控制一次水，通过去离

子装置时长来控制一次水电导率。

如果去离子装置的阀门打开连续工作 10 h 后仍未关闭,去离子装置自检系统会报警,提示去离子树脂失效,需更换去离子树脂。

两个传感器检测值差异即电导率检测差值大于 0.09 $\mu\text{s}/\text{cm}$,系统会报警,认为传感器精度有误,需校准或更换,以此方式保证电导率检测精度。

4.3 变频器冷却系统流量监测

一、二次水循环管路中存有空气或压力低等原因导致的流量低,报警超过设定时长,控制系统会发出报警;冷却系统整体故障,变频器保护关断。

4.3.1 水位监测

1) 一次水箱液位监测。当水箱水位低于最低水位时,冷却系统停止工作;当水箱水位低于正常水位时需要补水;当水箱水位超出最高水位:水会溢出。

2) 二次水箱液位监测。当水箱水位低于最低水位时,冷却系统停止工作,意味着二次水漏水;当水箱水位低于正常水位时,需要补水;当水箱水位高于最高水位时;表示一次水泄露进入二次水循环。

4.3.2 水压监测

一次水水压大于二次水水压,一次水压力约为 0.55 MPa,二次水压力约为 0.26 MPa;若热交换器有泄露时,可以避免一次水被污染。

另外,压缩机的自检及保护、传感器的自检、水泵控制系统的自检及保护、供电电源的监测及保护在系统设计中也均有考虑。

5 变频器冷却系统功能

冷却系统的设计主要有以下功能。

5.1 二次冷却及冗余功能

2 套独立的水循环系统能提高整个冷却系统效率和精度。冷却系统配置考虑到一定的冗余功能,如果部分关键设备或易损设备故障,不会导致冷却系统停机。冷却系统设备配置如表 2 所示。

5.2 接口信号

变频器启动前只须检测冷却系统工作状态;变频器运行过程中,若冷却系统整体故障、电导率和一次水温超限则变频器直接保护关断。其它冷却系统参数指标由冷却系统控制柜自动控制。

5.3 冷却系统开始工作条件及模式

变频器准备模式开启后即开始工作。冷却系统不具备条件则变频器不能启动或保护关断。冷

表 2 冷却系统关键运行设备或易故障设备配置表

序号	关键及易损坏设备名称	数量	属性
1	一次水泵	2	互为冗余
2	二次水泵	2	互为冗余
3	电导率计	2	互为比较
4	二次水压缩机	2	互为冗余
5	二次水散热器	2	互为冗余
6	屋顶冷却机组风扇	3	互为冗余

却系统工作模式为:

- 1) 联机模式:变频器运行时模式,冷却系统不可操作。
- 2) 独立模式:单独调试及试运行冷却系统。
- 3) 单机模式:单个设备运行或维护更换备件。

5.4 人机界面监控功能

通过 WinCC(视窗控制中心)冷却系统监控界面,冷却系统工作状态、温度、压力、流量、电导率、水箱水位等参数情况均一目了然,并能对冷却系统设备进行远程操作。

从变频器冷却系统的设计策略和现场应用来看:该系统冗余科学,系统在关键或易损坏设备故障时,不会导致冷却系统直接停止工作,维护人员可在列车停止运行后进行维护,冗余功能能够保障冷却系统的长期安全稳定运行;变频器冷却系统接口简洁,冷却系统与变频器相互较为独立,接口信号较少,对接方便,便于大型自动化项目系统集成;采用二次冷却,能提高整个冷却系统效率和精度;监控数据全面,运行人员能实时掌握设备运行状况和各项参数,为故障排除和系统维护提供参考依据;采用多种运行模式,便于联机、调试、隔离、维护等工作操作。总之,该变频器冷却系统设计科学,功能完备。

6 结论

从上海高速磁浮列车的运行来看,该冷却系统能满足带走磁浮列车在高速运行中变频器所产生的热量的需求,并能实现自身高效闭环调温、调压、调电导率等功能,保障磁浮列车的安全稳定运行。

通过长期运行和维护,在工作中发现,冷却系统的设计仍有以下几点可以进一步改进:

- 1) 静电干扰。由于冷却系统和变频器各子系统间的光纤通信采用的是外置式的光电转换模块,

(下转第 40 页)

易结露。

4) 通风。通风量越大的地下空间,空气湿度越低,相对不容易结露。

3 预防地铁地下车站结露的措施

预防结露的措施,一是提高物体表面温度,二是降低空气露点温度。针对第一种措施,鉴于电梯特种设备有较高规格标准,大部分不具备加热功能,因此提高物体表面温度的方法主要是在基坑侧壁增加隔热材料,提高与井道内空气接触的外边面温度。第二种措施主要是通过加装除湿机或者在基坑内放置干燥剂去除空气中的水分子,降低绝对湿度,降低露点温度^[1];或者增加通风强度,使室内整体湿度降低,壁面结露面积也会相应减小。

3.1 地铁车站设计阶段可采取的措施

在地铁车站设计阶段,需根据车站埋深考虑增强地铁出入口通风量,在电梯门上部增设通风百叶,增强垂梯井道与站厅的空气流动;条件允许情况下,对通道长度超过 6 m 的无障碍通道加设中央空调风机盘管或多联式空调系统(VRV)。

3.2 对地铁车站已出现结露现象建筑物的措施

1) 对于垂梯基坑已经出现冷凝问题的地下空间,在顶部增加竖向排风口,同时在顶部或者侧墙位置增加机械排风装置。

2) 为提高基坑内壁表面温度,可在内部表面涂刷隔潮剂或冷底子油,再增加一层挤塑板保温材料,以此来达到隔绝热交换的作用。

3) 上海部分地区率先采用了 L 型抗冷凝调整剂处理地下空间冷凝水。L 型抗冷凝调整剂作为一种新型建筑冷凝水防治材料,通过提高表面热阻,

阻断表面冷热交换,从而阻止结露,其效果已在多个工程实例中验证,相关城市地铁可以借鉴其经验,选取合适车站进行试点^[6]。

4) 根据 GB/T 10058—2009《电梯技术条件》^[7]的相关要求,电梯运行时的空气相对潮湿度在最高温度为 40 ℃ 时不超过 50%,在较低温度下可以有较高的湿度;最湿月的月平均最低温度不超过 25 ℃,该月的平均最大湿度不超过 90%。设备部门应对比现场实际情况,在井道壁有结露现象但温湿度符合标准情况下尽量保持电梯正常运行,其运行产生的活塞风能够一定程度上缓解潮湿现象。

5) 对于电梯轿厢顶部设备的防潮保护,可以在井道内加装除湿机,或者在轿厢顶部、配电柜内放置干燥剂或除湿器去除空气中的水分子,从而保护电气元件不受潮短路。

参考文献

- [1] 刘威,陈京龙,张峰,等. 某核电站常规岛地下空间防结露浅析[J]. 暖通空调,2016,46(8):98.
- [2] 卫万顺,郑桂森,栾英波,等. 常温层温度特征及浅层地热能成因机理研究[J]. 城市地质,2012,7(2):1.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑热工设计规范:GB 50176—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016:16.
- [4] 孙一坚. 简明通风设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [5] 周敏锐. 冷辐射围护结构表面结露特性与热环境研究[D]. 湖南:湖南大学,2010.
- [6] 邢娟娟. 建筑冷凝水防治材料的性能研究[J]. 中国建筑防水,2006(4):13.
- [7] 国家技术监督局. 电梯技术条件:GB/T 10058—2009[S]. 北京:中国标准出版社,2010:1.

(收稿日期:2018-12-30)

(上接第 36 页)

且控制柜布线较为紧凑,强电和弱电电缆间隔较近,光电转换模块工作在其间易受到干扰。在今后的设计中,建议将光电转换过程放在系统硬件内部完成,可以提高数据传输稳定性和抗干扰性。

2) 某些维护设备位置或选材不合理。一/二次水箱加水和放水龙头的位置设置不合理,且无锁闭装置。加、放水维护操作空间小,容易误动作。

3) 压缩机冷却装置的管道连接,弯角处未采用柔性连接,压缩机工作震动易引起管道破裂。

参考文献

- [1] SIEMENS. Propulsion System and Power SUPPLY; Converter cooling system control maintenance instructions[R]. 上海:上海磁浮交通发展有限公司,2003.
- [2] SIEMENS. Propulsion System Functional description for plant[R]. 上海:上海磁浮交通发展有限公司,2003.
- [3] SIEMENS. Propulsion System, Operation Manual[R]. 上海:上海磁浮交通发展有限公司,2007.
- [4] SIEMENS. Propulsion System, Maintenance Instruction[R]. 上海:上海磁浮交通发展有限公司,2007.

(收稿日期:2018-11-30)