

高功率密度电机驱动器的热管理与散热技术研究

李汝河 王鹏飞*

青岛航天半导体研究所有限公司 山东 青岛 266000

摘要: 高功率密度电机驱动器在现代电力电子系统中至关重要,其高效功率转换与紧凑结构对散热技术提出更高要求。当前散热技术包括风冷、液冷、热管及相变材料散热等,各有优劣。为提升散热效率,混合散热技术、散热结构设计优化、高性能散热材料选用及散热系统智能控制成为关键策略。智能控制优化尤其重要,通过实时数据采集与智能算法分析,实现散热系统的自适应调控,提高能源利用率与设备可靠性。

关键词: 高功率密度电机驱动器; 散热技术; 智能控制优化

引言

随着电力电子技术的快速发展,高功率密度电机驱动器因其高效、紧凑的特点,在电动汽车、航空航天等领域得到广泛应用。然而,高功率密度带来的高热量集中问题,对散热技术提出了严峻挑战。传统的单一散热方式已难以满足现代电机驱动器的散热需求,因此,深入研究并优化散热技术,对于保障电机驱动器的稳定运行、提升系统性能具有重要意义。

1 高功率密度电机驱动器的重要性

高功率密度电机驱动器在现代电力电子系统中扮演着至关重要的角色,其重要性不言而喻。随着科技的飞速发展,对电机驱动器的性能要求日益提高,而高功率密度正是满足这一需求的关键特性。高功率密度电机驱动器意味着在更小的体积内能够输出更高的功率,这使得设备更加紧凑、轻便,还提高了功率转换效率。在电动汽车、航空航天、工业自动化等领域,高功率密度电机驱动器的应用极大地提升了系统的整体性能。在电动汽车中,高功率密度电机驱动器能够使得电机在有限的空间内发挥更大的功率,提高车辆的加速性能和续航里程,高功率密度电机驱动器还具有更高的可靠性和稳定性。由于功率密度高,电机驱动器内部的热量产生也相对集中,这就要求热管理系统必须更加高效、精确。通过优化散热设计,有效控制电机驱动器的温度,避免过热导致的性能下降或损坏,延长设备的使用寿命。高功率密度电机驱动器凭借其紧凑设计、高效转换及卓越可靠性,在电力电子领域占据核心地位。其优化了系统结构,还提升了能源利用效率。

2 现有散热技术及其特点

2.1 风冷散热

风冷散热凭借其简易的原理与构造,在电机驱动器散热领域广泛应用。其运作机制是借助风扇产生的强制

气流,使空气在电机驱动器的散热片表面高速流动。空气与散热片充分接触,吸收热量后被带走,实现热量的散发。这种散热方式结构极为简单,仅需风扇、散热片等基本组件,无需复杂的辅助设备,这使得风冷散热成本低廉,对于小功率、低发热量的电机驱动器而言,是一种经济实惠的选择。在一些小型工业电机驱动器中,风冷散热系统能够稳定运行,且维护极为方便,工作人员仅需定期清理风扇与散热片上的灰尘,就能确保其正常工作。然而,风冷散热存在显著的局限性。空气的比热容相对较小,散热能力有限,在面对高功率密度电机驱动器产生的大量热量时,难以迅速、高效地将热量带走。随着功率密度提升,发热元件温度急剧上升,风冷散热无法及时平衡产热与散热,导致电机驱动器工作温度过高,影响其性能与寿命。在高功率密度应用场景下,如电动汽车的电机驱动器,由于其产生的热量远超风冷散热的处理能力,单独采用风冷散热难以满足散热需求,需结合其他散热技术协同工作^[1]。

2.2 液冷散热

(1) 液冷散热技术凭借其高效的热传递特性,在高功率密度电机驱动器的散热领域展现出了显著优势。该技术以水、油等液体作为工质,通过循环泵的作用,驱使液体在电机驱动器的发热部位与散热器之间进行循环流动。在这一过程中,液体工质流经发热元件时,能够吸收大量热量,随后在散热器处将这些热量有效地传递给外界环境,完成散热循环。(2) 液冷散热技术的突出之处在于其极高的散热效率。由于液体的比热容较大,因此能携带更多的热量,相较于风冷散热方式,大幅降低电机驱动器的工作温度。液体在循环过程中能够较为均匀地吸收各发热元件的热量,使得电机驱动器的温度分布更加均匀,有效避免了局部过热现象的发生,保障了设备的稳定运行。(3) 尽管液冷散热技术具有诸多优

势,但其系统结构相对复杂,除了循环泵和散热器外,还需配备管道、阀门等一系列组件。这增加了系统的成本,还提高了安装与维护的难度。液冷系统还存在液体泄漏的风险,如果发生泄漏,冷却液可能会对电机驱动器的电子元件造成腐蚀,甚至引发短路等严重故障,危及设备的安全。

2.3 热管散热

热管作为一种创新性的高效传热元件,在高功率密度电机驱动器散热方面展现出独特优势。热管内部封装有特定的工质,当热源对热管的蒸发段加热时,工质迅速吸收热量并蒸发成气态,气态工质在微小的压力差驱动下,快速流向冷凝段。在冷凝段,工质向外界环境释放热量后重新凝结成液态,液态工质在毛细力作用下回流至蒸发段,如此循环往复,实现热量的快速传递。热管具有极高的导热性,其导热系数可比传统金属材料高出数倍甚至数十倍,能在极小的温差下传递大量热量,具备良好的等温性,确保热管表面温度均匀。不过,热管散热也面临一些挑战。热管的制造工艺较为复杂,需要精确控制内部工质的充装量、热管的真空度等参数,这对生产设备与技术要求较高,导致热管成本居高不下。在设计过程中,需要专业技术人员依据电机驱动器的发热特点、空间布局等因素,合理设计热管的尺寸、形状与安装位置,以充分发挥其散热性能。在一些高性能服务器的高功率密度电机驱动器散热设计中,虽采用热管散热可大幅提升散热效率,但高昂的成本与复杂的设计制造过程限制了其更广泛的应用^[2]。

2.4 相变材料散热

(1) 相变材料散热技术是一种创新的散热方法,它利用了相变材料在温度变化时发生物态转变并吸收或释放大量潜热的特性。当电机驱动器的工作温度升高时,相变材料会从固态转变为液态,在这个过程中吸收大量的热量,有效地抑制温度的快速上升,起到缓冲和降温的作用。相反,当温度降低时,相变材料又会从液态转变回固态,释放之前储存的热量,有助于维持电机驱动器温度的相对稳定。(2) 相变材料散热系统的结构相对简单,只需将相变材料合理地放置在电机驱动器的发热部位附近,无需复杂的辅助设备,使用起来非常方便。然而,相变材料也存在一些固有的缺陷,比如其导热系数相对较低,热量在相变材料内部的传递速度较慢。如果单独使用相变材料进行散热,可能难以满足高功率密度电机驱动器快速散热的需求,散热效果会受到一定限制。(3) 在实际应用中,相变材料通常会与其他散热方式协同工作,以发挥各自的优势。在一些笔记本电脑的

电机驱动器散热设计中,就将相变材料与风冷散热相结合,实现了在低负载和高负载下的有效散热,提升了整体的散热性能^[3]。

3 高功率密度电机驱动器散热技术的优化策略

3.1 采用混合散热技术

在高功率密度电机驱动器散热领域,单一散热方式往往难以满足日益严苛的散热需求,采用混合散热技术成为突破这一困境的有效途径。以风冷与液冷相结合为例,电机驱动器不同部位的发热特性存在差异,可在发热相对较低、空间开阔且便于安装风扇的部位,如驱动器外壳表面,设置风冷散热系统。风扇产生的强制气流能够快速带走部分热量,初步降低温度。而对于发热集中、热量产生速率高的关键功率器件,如IGBT模块,则采用液冷散热方式。通过在IGBT模块底部或周边设置微通道,冷却液在通道内循环流动,高效吸收并带走大量热量。这种组合充分发挥了风冷的低成本、易维护以及液冷的高散热效率优势,提升整体散热效果。热管与液冷结合的方案同样极具潜力。热管以其极高的导热性,能迅速将热源处的热量传递至远离热源的位置。在电机驱动器中,将热管的蒸发段贴近发热元件,如功率芯片,当芯片发热时,热管内工质迅速蒸发,携带热量快速流向冷凝段。而冷凝段与液冷系统相连,工质在冷凝段将热量传递给冷却液,冷却液再将热量传输至散热器散发出去。如此,利用热管的高效传热性能,快速将热量集中并导向液冷系统,实现了热量的高效转移与散发,大幅提升散热效率,有效应对高功率密度电机驱动器的散热难题。

3.2 优化散热结构设计

(1) 散热结构设计对于提升高功率密度电机驱动器的散热效率至关重要。在散热片的设计上,我们采用异形结构,如叉指状、针状或带有复杂鳍片的形状,这些设计相较于传统的平板式散热片,能够增大散热面积。同时精心布局散热片的位置和数量,确保热量能够均匀且迅速地传导到散热片表面,提高散热效率。(2) 在流体流动通道的设计上,我们需要运用先进的理念。对于风冷系统,设计具有特定角度和形状的风道,引导空气以更高的速度和更均匀的状态流经散热片,增强对流换热效果。而在液冷系统中,则应优化冷却液通道的几何形状和尺寸,例如采用螺旋形或波浪形通道,以提高冷却液在有限空间内的流动速度和扰动程度,提升换热效率。(3) 在热管的布局上,我们需要根据电机驱动器内部的热源分布,精确规划热管的安装位置,使热管能够准确地捕捉并传递热量。通过并联、串联或混合连接方

式,优化热管之间的热量传递路径,降低热阻,充分利用计算机辅助设计(CAD)技术和数值模拟技术,如计算流体动力学(CFD),对散热结构进行精确模拟和分析,不断调整优化设计方案,以减少实际试验次数,降低研发成本,实现散热结构的高效设计。

3.3 选用高性能散热材料

高性能散热材料的研发与应用是提升高功率密度电机驱动器散热效率的关键。在散热片材料选择上,铜因其卓越的导热系数,成为理想选择,能快速将热量从发热元件传导至散热片表面,加快热量散发速度。铝材料虽导热系数稍逊于铜,但具有密度低、成本相对较低的优势,在对重量和成本有严格要求的应用场景中广泛使用。对于绝缘层材料,具有良好导热性能与绝缘性能的陶瓷材料是优质之选。氮化铝陶瓷,能有效传导热量,降低热阻,还能提供可靠的电气绝缘,保障电机驱动器的电气安全,避免因散热过程中的电气短路引发故障。在相变材料方面,持续开发新型相变材料成为研究热点。通过调整材料的化学成分与微观结构,提高其相变温度,使其能够在电机驱动器工作温度范围内发生相变,吸收或释放潜热。同时,增强相变材料的潜热容量,使其在相变过程中能够携带更多热量,提升散热能力。在实际应用中,将相变材料与其他散热方式协同,如与风冷、液冷相结合,充分发挥其缓冲温度变化、稳定散热的作用,为高功率密度电机驱动器的散热提供更强大的支持^[4]。

3.4 散热系统智能控制优化

(1) 散热系统智能控制优化在高功率密度电机驱动器散热技术中占据核心地位。传统散热系统往往采用固定运行模式,缺乏根据电机驱动器实时工况灵活调整散热策略的能力,这既可能导致能源浪费,也可能造成散热不足。智能控制优化则利用先进控制技术,实现散热系统的自适应、精准调控,提高散热效率和能源利用率。(2) 智能控制优化依赖于传感器技术,在电机驱动器的关键发热部位,如功率模块、电容等,密集布置温度、湿度及功率传感器,实时采集设备运行数据。这些

数据被快速传输至中央控制器,控制器运用模糊逻辑控制、神经网络控制等智能算法进行深度分析。当电机驱动器轻载运行时,发热量较低,智能控制系统会自动降低风冷风扇转速,以减少能耗;而在高功率运行时,发热量大增,系统会立即启动液冷系统,并根据温度上升速率动态调整冷却液流量和温度,确保散热能力与产热速率精确匹配。模糊逻辑控制通过将温度、功率等参数划分为多个模糊子集,并构建模糊规则库,实现散热系统的平稳、高效运行。(3) 智能控制优化在实际应用中带来了明显优势。它减少了不必要的散热功耗,降低了能源消耗,符合绿色节能理念,而且在电动汽车电机驱动器中,还能有效延长电池续航里程。精准的散热调控确保电机驱动器始终处于适宜的工作温度范围,提高了设备的稳定性和可靠性,延长了其使用寿命。智能控制优化使散热系统从被动散热转变为主动、智能散热,为高功率密度电机驱动器的稳定运行提供了坚实保障。

结束语

高功率密度电机驱动器的散热技术是其发展的关键技术之一,直接影响到设备的性能、可靠性和使用寿命。通过混合散热技术、散热结构设计优化、高性能散热材料选用以及散热系统的智能控制优化,可以显著提升散热效率,确保电机驱动器在恶劣工况下的稳定运行。未来,随着新材料、新技术的不断涌现,高功率密度电机驱动器的散热技术将持续进步,为电力电子系统的进一步发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]王烟平.长沙地铁5号线永磁牵引电机应用分析[J].研究与交流,2022,14(5):40-46.
- [2]相阿峰.CR300AF标准动车组牵引电机概述[J].电力机车与城轨车辆,2022,45(3):11-18.
- [3]侯高林.电动汽车驱动电机温度场分析及热管理系统研究[D].吉林:吉林大学,2022(1):1-2.
- [4]杨素香,单鹏飞,郝叶,等.高功率密度无刷伺服电机多物理场综合设计[J].微特电机,2021,49(04):30-33+45.