

基于增材制造的 $\pm 800\text{kV}$ 直流换流站金具拓扑优化设计与力学性能研究

陈勇

中国电建集团四平线路器材有限公司, 吉林 四平 136001

DOI:10.61369/EPTSM.2025060001

摘 要 : 随着能源结构的转变及电力工业的迅猛发展, 超高压直流因其具有容量大、损耗低、距离远等明显优点, 已成为国家能源互联网的重要支持力量。本文以增材制造技术为基础, 开展 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电线路金具的拓扑优化及力学特性研究, 对特高压直流输电技术的发展方向和 800kV 直流换流站的核心位置进行说明, 探讨其在该系统中的应用。

关 键 词 : $\pm 800\text{kV}$ 直流换流站; 金具; 拓扑优化; 增材制造; 力学性能

Research on Topology Optimization Design and Mechanical Performance of $\pm 800\text{kV}$ DC Converter Station Hardware Based on Additive Manufacturing

Chen Yong

PowerChina Siping Line Equipment Co., Ltd., Siping, Jilin 136001

Abstract : With the transformation of structure and the rapid development of the power industry, ultra-high voltage direct current has become an important support force for the national energy Internet because of its obvious advantages such as large capacity low loss and long distance. Based on additive manufacturing technology, this paper carries out topology optimization and mechanical characteristics research of DC transmission line hardware, explains the development direction of ultra-high DC transmission technology and the core position of 800kV DC converter station, and discusses its application in this system.

Keywords : $\pm 800\text{kV}$ converter station; hardware; topology optimization; additive manufacturing; mechanical performance

一、绪论

传统的金具设计方法是以经验类推的方法进行的, 存在着结构冗余和材料利用率不高的缺点, 而铸造、锻造等传统加工方法对复杂构件的成形有一定的限制, 很难实现金具的轻量化与高性能化。增材制造是一种新型的金属件成形方法, 它可以在短时间内完成复杂构件的成形, 为金属件的创新设计创造条件。拓扑优化是指在有限的空间中, 依据所受的荷载与约束, 寻求最佳的材料配置方式, 从而达到轻量化与性能最优的目的。本文以 $\pm 800\text{kV}$ 直流换流站金具为研究对象, 采用了拓扑优化和增材制造技术相结合的方法, 对于提升金具的力学性能、降低成本、提高换流站运行可靠性具有重要的理论意义和工程应用价值。

二、 $\pm 800\text{kV}$ 直流换流站金具结构与工况分析

(一) 金具类型与结构特点

在 $\pm 800\text{kV}$ 直流换流站中, 各种金具按各自的作用可以分为联接金具、保护金具和固定金具。球头挂环、碗头挂环等连接金属件是用来连接各种电器、电线的, 为了确保连接的可靠与稳

定, 一般都设有连接界面。其中防振锤、均压环等防护金属件起着重要的作用, 防振锤可以减小风致振动对金属丝的疲劳破坏, 均压环可以改善金属表面的电场分布, 减小电晕放电。固定金具是指用于将导线、绝缘子等固定在支撑或铁塔上的设备, 如悬挂线夹、耐张线夹等, 要求有较高的强度、刚度, 以抵抗导线的张力等荷载。

另外, 换流站的设备布置和电气参数的选择与其选型有着密切的关系, 如均压环的结构尺寸及外形要与绝缘子的布局及电压水平相适应, 才能保证系统内的场强分布。耐张线夹的构造要求与其规格、断面相匹配, 以确保其牢固地固定, 并能顺畅地输送电流。

(二) 工作环境与载荷工况

$\pm 800\text{kV}$ 直流换流站运行工况复杂多变, 金具需经受多工况工况的影响, 从电角度看, 金具工作在高压大电流环境下, 将受到电场力和电场力的影响。当电流通过金具时形成的磁场交互作用, 在发生短路故障时, 其电磁力会迅速增加, 这对金具的结构强度有极高的要求^[1]。

从力学角度看, 金具要经受住导线的拉力、自重、风荷载和地震等荷载, 导线的张力是导线所能承受的最大荷载, 其值与导

线型号、跨距、张力等因素密切相关。风载将引起金具的振动与弯曲,在长时间的使用下会造成金具的疲劳损伤。而地震荷载又是一种突然而又确定的荷载,它将对金具的连接可靠度及结构的稳定产生重要影响。

另外,由于换流站内温度和湿度的剧烈波动,使金具的材质发生膨胀和收缩,从而导致设备的温度应力。同时大气中的污染物也会对金具产生侵蚀,从而降低其使用寿命,在不同的工作条件下,这些负载将以多种形式同时作用于金具,如在正常情况下,其承受的荷载主要为导线拉力、自重以及较低的风荷载,但在极端情况下,如断流、地震等极端情况下,负荷将大幅增加。

（三）现有金具性能问题

采用常规加工方法生产的金具,在使用过程中,存在着许多问题,从机械特性上看,金具受设计方法限制,常会出现应力集中,在荷载作用下易发生断裂,从而缩短其疲劳寿命。在金具的连接部位和角部等部位,存在着较大的应力集中现象,在长时间的运行中,易发生断裂等失效现象。

从电气特性上看,由于其结构设计不当,会造成金具内部的电场不均匀,引起金具的电晕放电。因此电晕放电除了造成电能损失外,还可能释放出大量的电磁干扰、臭氧等有害物质,对金具及周边设备造成腐蚀,对换流站的安全、稳定运行构成严重威胁;在金具的尖角处,存在着高电场,易产生电晕放电等现象。

这些性能问题严重影响了换流站的安全、稳定运行,而金具损伤会引起导线脱落、设备失效等重大事故,导致大范围停电,对社会和经济造成重大损失。为此,需要优化 $\pm 800\text{kV}$ 直流换流站金具,提高其综合性能。

三、金具拓扑优化设计理论与方法

（一）拓扑优化基本原理

拓扑优化是一种在给定设计空间、载荷条件和约束条件下,寻找材料最优分布的优化方法,其核心思想是通过数学模型和优化算法,在设计域内确定材料的存在与否,以实现特定的优化目标,如最小化结构重量、最大化刚度等。常见的拓扑优化方法包括变密度法、水平集法等,其中变密度法将设计区域离散为有限个单元,每个单元赋予一个密度变量,通过优化密度变量的取值(在0到1之间)来表示单元材料的有无,密度为1表示单元存在,密度为0表示单元不存在。在此基础上,该方法采用一种新的层次集合函数并对其进行改进。

在进行拓扑优化时,必须综合考虑应力约束和位移约束等多种约束,才能保证所设计的结构能够满足服役要求。采用拓扑优化方法,可在不影响结构性能的同时,有效地利用材料,减轻其质量并且改善其力学性能^[9]。

（二）金具拓扑优化数学模型建立

金具拓扑优化问题的数学模型可表述为:在满足多种约束的情况下,对设计变量进行优化,使得目标函数最大。考虑到 $\pm 800\text{kV}$ 直流换流站金具的特性,对其进行拓扑优化建模,确定设计变量、目标函数及约束条件,在此基础上,以元件密度为变量对其进行优化。

在满足金具轻量化要求的前提下,以最大限度地减重为目标,对其进行优化设计,在约束条件上,要综合考虑电性能、机

械性能、加工工艺等约束。而电性能限制主要是对金具的电场强度进行限制,以保证金具表面的场强不超出容许范围,防止电晕放电。其机械性能限制分为应力限制和变形限制两种,当其承载荷载时,其应力不得超出材料的允许应力,位移在允许范围内。制造工艺约束则需要考虑增材制造工艺的特点,如最小特征尺寸、表面粗糙度等,确保优化后的结构能够通过增材制造工艺顺利成型。

（三）优化算法选择与求解策略

遗传算法是一种以自然选择为基础的随机优化方法,它能够很好地解决复杂的非线性问题,但是它的求解效率比较低。在此基础上,提出一种确定的求解方法,该方法在一定程度上满足工程实际中的要求,具有较高的计算效率,但易陷入局部极值。由此针对 $\pm 800\text{kV}$ 直流换流站金具拓扑优化问题,针对金具结构复杂、约束多等特点,采用遗传算法进行优化,并将其应用于实际工程,通过引入自适应杂交、突变等方法,对遗传算法进行改进,以提高寻优效率^[9]。

在求解策略上,对群体规模、交叉概率和变异概率等参数进行合理的选择,在迭代过程中,通过对群体的持续更新,对各个体的目标函数及约束条件进行求解,剔除不符合限制或目标函数值低的个体,只保留最优个体用于遗传运算。即在给定的条件下,目标函数的变动量比一定的门限小,或者迭代的次数接近预定值,采用合适的参数设定与迭代策略,保证优化的精度与效率。

四、基于增材制造的金具拓扑优化设计实现

（一）金具初始模型构建

采用 SolidWorks、UG 等三维造型软件,针对某一 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电线路金具的具体尺寸及结构特征,建立其初始几何模型。为确保模型的真实、准确,在建立金具的连接界面、关键尺寸等方面,必须精确地反映出金具的特性。在此基础上,结合增材制造支撑结构的特点,对其进行预处理,在印刷时,为了避免在印刷时出现变形和塌陷,必须增加支撑结构,支撑结构的设计要在保证金具特性不受影响的前提下,使其易于拆卸^[9]。由此利用 3D 造型软件建立的初步模型,为后续的拓扑优化工作提供精确的初始构形,从而保证拓扑优化的顺利开展。

（二）拓扑优化过程与结果分析

将建立的金具拓扑优化数学模型导入优化软件(如 OptiStruct、ANSYS 等),将选择的遗传算法应用于结构优化的计算中,对设计变量、目标函数和约束条件进行实时监控。工作人员需要根据实际情况,对设计变量(网格密度)进行调节,使其趋向于最优分布,基于有限元方法的非线性优化设计方法,通过优化设计,使其具有更高的效率和更高的效率^[9]。

计算得到金属件的材质分布曲线图,并对其进行优化设计,物料分配云图清楚地显示物料在设计区域的分布状况,其中稠密的区域代表物料必须被保存,稀疏的区域则代表物料可被移除。对优化结果进行分析,发现优化后的金具结构能够在满足一定限制的情况下,进行材料的合理分配,剔除多余的材料,达到轻量化的目的。由此通过对其进行优化设计,使其具有更好的受力特性和更好的受力状态,从而减少金具的应力集中,改善金具的机

械性能^[6]。

（三）优化后金具模型修正与完善

根据拓扑优化结果以及增材制造技术的需求，修改和完善金具模型，在增材制造过程中，由于增材制造技术的局限性，在优化设计过程中，某些精细结构或尖锐部分可能不能精确成形，需对其进行相应的简化与修改，使其达到最小特征尺寸。

同时通过对模型的平滑处理，消除模型表面的毛刺、棱角，改善金具的平滑程度，降低金属构件的应力集中，对需增设支承结构的部分进一步的优化，以保证支承结构既能有效地支承金具，又能方便地拆除^[7]。

在此基础上，进一步改进和改进现有的金属结构模型，使得该结构能够同时满足结构设计和制造过程的需求，为后续增材制造打下坚实的基础。

五、增材制造工艺对金具力学性能影响

（一）金具增材制造工艺选择与参数确定

激光选区熔化和电子束熔凝是目前最常见的一种增材制造方法，它们都有各自的优势和不足，激光选区熔融成形技术的成形精度高，表面质量好，但是成形速度比较慢，不适用于结构复杂的高精度金属件的制造。而电子束焊接技术的打印速度快，能量密度高，适用于大尺寸厚壁金具的制造，但成形精度不高。

针对 ±800kV 直流换流站金具材质（铝合金、钢材等）及结构复杂性，选用适当的增材制备技术；对于结构复杂和精度要求较高的金属件，宜采用激光选区熔融法；对于大型厚壁金具，采用电子束熔接方法是可行的。而铺粉的厚度对成形的效果及表面质量有很大的影响，采用试验与数值仿真相结合的方法，研究合理的工艺参数。比如在激光选区熔融过程中，较高的激光功率会引起材料的过热和孔洞等缺陷；如果功率太小，就会造成熔接问题^[8]。但是如果扫速太快，则无法及时融化，从而影响成形质量；太慢的话，印刷的效率就会下降。

（二）增材制造过程数值模拟

采用 ABAQUS、MSCMarc 等有限元分析软件，可以对金

具的增材制作仿真研究，温度场的仿真主要是对激光、电子束辐照后的熔池温度分布、熔池尺寸及形态进行研究。在此基础上，建立基于有限元模型的三维有限元模型，通过应力场仿真，研究增材制造过程中因温度梯度而导致的热应力、组织变形及残余应力^[9]。其中残余应力对金具的强度和疲劳寿命等机械性能有很大的影响，通过应力场仿真，可以对可能产生的裂纹、变形等缺陷进行预测，并采取相应的措施减少缺陷的产生，如优化扫描路径、调整工艺参数等。

（三）增材制造金具力学性能实验测试

根据有关规范，研制出增材制造金属材料样品，并对其进行拉伸、压缩、弯曲、疲劳等力学性能测试，通过拉伸测试，获得金具的抗拉强度、屈服强度和延伸率；压缩测试是对材料压缩特性的评价；弯曲实验能检测出材料的抗弯、抗折强度；采用疲劳实验方法，对金具进行疲劳寿命的研究^[10]。

通过与试验测量结果的比较，检验数值计算的精度，分析增材制造过程中金具机械性能的差别。主要包括增材加工时产生的孔洞、裂纹等缺陷，使金具的机械性能下降；而快速凝固形成的细小晶粒则可能提高金具的强度和硬度。通过实验测试和分析，为优化增材制造工艺参数、提高金具力学性能提供依据。

六、结语

本项目以特高压直流换流站为研究对象，以“增材制造 +800kV”金具为研究对象，通过分析金具的结构和工作状态，构建其拓扑优化数学模型，选取适当的优化算法求解，实现金具的增材制造，并探索其对其机械性能的影响规律。在此基础上，提出基于增材制造技术的拓扑优化设计方法，提高金具的力学性能，以满足换流站的安全、稳定运行需求。本项目的研究成果将为特高压直流换流站金具结构的轻量化提供新的思路，并对其机械、电学性能进行提升。但是该方法也有一定的局限性，因此通过本项目的研究，将为多场耦合作用下金具结构的优化设计提供理论依据，并为增材制造技术的优化提供理论依据，对金具的长周期工作特性进行深入研究，为其在工程上的应用奠定基础。

参考文献

[1]李良浩.用于集成车载电源的高性能 SiC DC-DC 的多域建模与优化设计研究 [D].浙江省：浙江大学，2022.DOI:10.27461/d.cnki.gzjdx.2022.002233.
[2]张炜，杨国华，李勇杰，等.高海拔地区特高压换流站典型电极起晕特性与均压屏蔽电极设计 [J].高压电器，2022,58(04):124-130.
[3]牛海军，司徒钧，周立宪，等.特高压输电线路悬垂串金具优化研究 [J].中国电力，2019,52(03):95-101.
[4]李金洋.基于多端 MMC 直流配电系统的协调控制策略研究 [D].辽宁省：沈阳工业大学，2024.
[5]顾佳.并联 DC-DC 变换器的 S 型函数建模及动力学行为研究 [D].广西壮族自治区：广西大学，2024.
[6]陆佩佩.钛合金选区激光熔化工艺调控及多孔结构性能优化研究 [D].江苏省：江南大学，2023.
[7]张杰.直流降压变换器分数阶复合控制的设计与实现 [D].江苏省：扬州大学，2023.
[8]朱新宇.快速直流脱扣器的电磁—机械特性仿真及优化研究 [D].福建省：厦门理工学院，2023.
[9]李旭.液压驱动轮腿机器人设计与跳跃控制研究 [D].黑龙江省：哈尔滨工业大学，2022.
[10]王玉婷.多环境约束下铝液精炼作业机械臂设计、规划与控制研究 [D].黑龙江省：哈尔滨工业大学，2022.