

无刷电机定转子外径对电动工具输出扭力的影响研究

李孝忠

宁波汉浦工具有限公司 浙江 宁波 315100

摘要: 本文围绕无刷电机定转子外径对电动工具输出扭力的影响展开,通过对电机工作原理及定转子结构特性的分析,弄清楚外径变化对电磁及机械性能的作用机制,定转子外径大小及其搭配关系对扭力输出影响显著,优化策略在各种不同工况下有区别,给出依据扭力需求的设计原则及成本效率平衡手段,为电动工具电机设计提供理论依据与实践方面借鉴。

关键词: 无刷电机;定转子外径;电动工具;输出扭力;设计优化

引言:电动工具性能的进步依赖核心动力部件优化,无刷电机定转子外径设计和扭力输出效果有着直接的关联^[1],伴随工具应用场景的复杂化,对电机表现高扭力、高效率的需求愈发急切了,定转子外径参数和扭力输出间的内在关联未得到充分探讨,本文以此为基础开展系统分析,探寻优化设计的途径,目的是带动电动工具技术前进。

1 无刷电机定转子结构与扭力输出理论基础

1.1 无刷电机工作原理

无刷电机充当电动工具的核心动力部分,其工作时的本质就是电能高效转化成机械能的一个过程,该电机主要由定子、转子、位置传感器和驱动电路组合而成^[2],定子部分缠有三相绕组,转子一般采用的是永磁体材料,当驱动电路向定子绕组输送按特定顺序调整的三相交流电时,在定子内部空间中形成旋转磁场,此旋转磁场跟转子永磁体产生的恒定磁场相互影响,按照电磁感应定律以及安培力原理,转子在磁场力的驱动下开始转动。

跟传统有刷电机存在差异,无刷电机借助位置传感器实时判别转子的位置,驱动电路凭借检测信号精准地调控三相电流的相位和大小,实现电子的换向功能,这种非接触型的换向手段,有效躲开了碳刷磨损造成的能量损耗与维护相关问题,让电机在复杂的工况条件下稳定运行,在电动工具运转期间,电机的定子跟转子协同配合,借助磁场耦合不断输出扭矩,推动工具去完成各类机械加工工作,其工作性能对电动工具的作业效率和使用年限有直接影响。

1.2 定转子外径与电磁性能关系

无刷电机的电磁性能跟定转子外径尺寸关联紧密,核心是外径尺寸对磁路与电磁力起到的影响,定子外径增大的时候,可容纳更多绕组的匝数,当通入一样大小的电流,较多的绕组匝数可产生更强的磁场强度,进而

让电磁转矩得到提高^[3],而转子外径若改变,会直接影响气隙长度,气隙是定、转子磁场彼此相互作用的关键区域,气隙长度的变化会极大地影响磁场分布与磁通量,在特定范围里,较短的气隙长度可降低磁阻,让磁场更有效地跨过气隙,加大定转子之间的磁场耦合强度,由此增强电磁力,给电动工具赋予更大的输出扭力。

1.3 定转子外径与机械性能关系

无刷电机定子与转子外径尺寸的设定,直接对电机整体机械性能的表现起到作用,定子的外径变大,暗示电机壳体尺寸要跟着变大,能给内部结构搭建更稳定的支撑体系,有利于减少电机运转时因震动造成的机械损耗,增加运行进程的平稳水平,更大的外径也会引起电机整体重量的增长,对电动工具的便携性及操作灵活性产生影响,在要手持操作的电动工具应用情形里,这种影响尤为凸显。

转子外径起变化同样会对机械性能产生重要效应,加大转子的外径会引起转子转动惯量变化,转动惯量增加后,转子在启动与制动过程中要更大扭矩克服惯性,影响到电机的动态响应表现;较大转动惯量在一定程度上同样能提升电机运行的平稳性,减小负载突变致使的转速波动^[4]。

1.4 电动工具扭力需求特性

电动工具因为应用场景跟作业对象的差别,对输出扭力展现出多样化的需求特质,处于金属加工范畴中,诸如角磨机、电钻等一类工具,要面对高强度材料的切削或钻孔活儿,要求电机在开始启动瞬间便输出足够大的扭矩,以便迅速克服材料的初始阻力,且在持续开展加工时维持稳定的高扭力输出,防止因扭矩不足致使工具卡顿或加工效率下降^[5]。于木材加工的实际场景中,诸如电锯这类工具,即便对瞬间产生的爆发力量要求相对没那么高,但由于切割距离较长、材料特性存在不均,

需要电机具备不错的扭力调节本事,遇到如木材节疤这类阻力变化情况时,可迅速对扭力输出进行调整,保障切割过程平稳顺利。

就手持类的电动工具而言,诸如电动螺丝扳手,既要顾及使用者长时间操作的舒适程度,限定工具整体的重量及尺寸,又要达到不同规格螺丝拧紧和拆卸的扭力要求,这类工具一般要求电机在紧凑的结构里,实现精准的扭力管理,防止因扭力过火把螺丝或部件弄坏,若扭力过小,紧固任务便无法达成。

2 无刷电机定转子外径变化对电动工具输出扭力的具体影响

2.1 定子外径变化对扭力的影响

定子外径尺寸变动直接对无刷电机的扭力输出性能起到作用,若定子外径有所增大,电机内部可供绕组放置的空间也跟着增大,可绕上更多匝数的导线,处于相同的电流输入条件时,较多绕组匝数可产生更强的磁场强度,依照电磁感应这一原理,磁场强度增强让转子受到的电磁力变高,由此直接增强电动工具输出的扭力,在金属切削类的电动工具里,更大外径的定子凭借增强的磁场驱动着转子,可以更顺畅地冲破材料的初始阻力,实现高效率的加工。

定子外径并非越大就越恰当,过量增大外径尺寸会衍生一系列问题,尺寸的增大直接让电机整体重量升高,就需要手持操作的电动工具方面而言,这无疑减低了工具的便携性和操作的灵活性,外径过大将拉长电机内部的散热通道长度,让热量散发的难度增大,散热效率变低。长期散热不良会引起绕组温度持续上扬,进而影响电机正常性能的发挥水平,最终引起电动工具持续扭力输出能力的减弱,在确定定子外径尺寸的时候,务必要以契合实际扭力需求为根基,综合考量电机的各项性能指标,进行全面评估^[6]。

2.2 转子外径变化对扭力的影响

对转子外径尺寸加以调整,会从多个维度改变无刷电机输出扭力特性,若转子外径出现增大现象,最直接的影响就体现在气隙长度的改变上,更小的气隙间距让定转子之间的磁场耦合更为紧密,磁力线穿透面临的阻力减小,依照电磁力作用原理,转子承受的电磁驱动力量跟着变大,由此提高电动工具瞬间的输出扭矩,好比在重型电动扳手开展工作时,把转子外径增大能有效增添拧紧高强度螺栓时的扭矩输出,提升工作成效。

转子外径的增大也会引起其他效应,伴随外径的增加,转子自身质量与转动惯量急剧上升,这造成电机启动和换向过程中需要去克服更大的惯性阻力,引起动态

响应速度的下降,在电动工具应用中,存在频繁启停的需求时,好比手持电钻重复开展钻孔操作,较大转动惯量会让电机无法及时调整其转速和扭矩,损害操作的灵活性。

2.3 定转子外径匹配关系分析

无刷电机定转子外径的适配程度直接决定电动工具扭力输出的综合能力,两者尺寸配合要同时顾及电磁性能与机械结构的双重需求:若定子的外径过大,而转子的外径过小,会引起气隙宽度显著增长,引发磁阻加大、磁场耦合效率变差,即便定子绕组有能力产生强磁场,也不易有效驱动转子转动,引起扭力输出的损耗,当转子外径过分贴近定子内径,虽能起到增强电磁力的效果,但会压缩散热的空间范围,加剧绕组的温度升高,同时让装配的难度以及机械碰撞风险加大。

于实际的设计操作里,需把气隙长度当作核心参数构建匹配关系,合乎要求的气隙可保证磁场高效传递,又可以留出机械缓冲空间,比方在高转速电动工具这个情境中,要适度把气隙增大,避免定转子出现摩擦,这时需借助优化定子绕组匝数与电流密度来弥补磁路损耗;而针对低转速且大扭矩的工具,便可以缩小气隙进而提升电磁力。

2.4 不同工况下的外径影响差异

因电动工具工况不同,无刷电机定转子外径对扭力的作用效果有明显分化,处于高负载维持恒速的工作状态下,诸如金属切削类工具一直作业时,定子外径增大带来的绕组匝数增多优势愈发突出,较强的磁场强度可实现稳定的高扭力输出,填补材料阻力引起的转速衰减,这时若对转子外径进行同步优化以缩小气隙,会进一步强化磁场的耦合,防止长时间高负荷运行时出现的扭力波动现象。

在频繁进行启停操作的脉冲工况里,仿佛电动螺丝刀交替着拧紧不同规格螺丝,转子外径过大引起的转动惯量增大问题会被进一步放大,较大惯性导致电机难以迅速对负载变化做出响应,引发启动时扭力跟不上、制动时出现过冲情况,造成操作精准度的下降,处于该工况,更需对转子外径和动态响应需求进行平衡,甚至可恰当减小转子外径以改善启停效率,采用优化控制算法的方式补偿静态扭力损失。

就变负载冲击工况而言,好比电锤在混凝土钻孔作业时遇到的突发阻力,定转子外径匹配的重要性大幅上扬,气隙长度若未按工况进行调整,也许在冲击瞬间,磁路突变会引发扭力快速下降或过载,较小的气隙在冲击作用下,易因机械形变引发定转子擦碰,而较大的气

隙虽可使定转子不发生碰撞,但磁阻增大可造成瞬时扭力输出的削弱,应针对该类工况设计可自适应调控的外径参数,或借助弹性支撑结构减轻冲击对定转子相对位置造成的影响,保证扭力输出的持续与可靠。

不同工况下的实践操作表明,定转子外径所造成的影响并非单一维度线性关联,而是电磁特性、机械惯性跟负载特性相互配合的结果,只有与具体作业场景的动力学特征相结合,动态更改外径参数及其匹配关联,才能让电机扭力输出与工具工况需求实现深度匹配。

3 定转子外径设计优化策略

3.1 基于扭力需求的尺寸设计原则

电动工具定转子外径设计需以实际扭力需求作为指引方向,创建系统性设计准则,首先应精准厘清工具的负载特性,针对需实现高扭矩输出的重型作业设备,好比工业范畴的角磨机,可恰当增大定子外径以增多绕组匝数,同时合理把转子外径缩小以减少气隙,强化磁场耦合状况以提升瞬时扭力;而针对在乎操作灵活性的小型工具,类似家用电动螺丝刀的,则得控制整体的尺寸规格,在有限空间里优化定转子的配合,采用精确核算绕组排列与磁路架构,平衡好扭力输出跟体积重量的联系。

动态响应需求是核心考量方面,当面临频繁启停、变负载的工况条件,应杜绝因转子外径过大让转动惯量超过标准值,采用优化外径尺寸参数的办法,保证电机在负载突然变化时可迅速调节扭力输出。

3.2 尺寸优化与成本、效率的平衡

定转子外径的优化应在成本控制跟效率提升之间找平衡点,就材料成本这一角度而言,为提升扭力而增大定子外径可增强性能,但会造成硅钢片和绕组线材的用量出现增长,引起原材料成本上升,实际设计操作中可采用高磁导率硅钢片代替常规材料,在维持外径尺寸恒定的状态下提高磁场性能,降低材料花销。就加工工艺而言,极为精密的定转子尺寸对制造精度要求比较高,过度追求极小气隙或复杂外径结构,会极大地增加加工难度,同时引起良品率损耗加剧,借助优化模具设计以及采用先进的冲压、绕线工艺,能在保障尺寸精度的情形下提高生产效率,减少单位产品的加工成本额。

虽说大尺寸定转子可提升扭力,但有可能因重量增

大、散热情况不好,让工具体效率降低,可以采用优化散热结构设计这一办法,好比增加散热鳍片或者采用新型的导热材质,在外径尺寸不变的前提下增强散热效率,保证电机长时间稳定地运行。

3.3 未来设计发展趋势

制造工艺层面,3D打印与精密微加工技术的普及,使复杂结构的定转子制造成为可能。通过定制化设计气隙形状和绕组布局,可突破传统尺寸限制,实现更高效的磁场耦合。智能化设计趋势下,引入传感器与自适应控制系统,能实时监测电机工况并动态调整定转子参数,如通过智能调节气隙长度补偿磨损,保障不同工况下的扭力稳定性。

结论

本研究明确无刷电机定转子外径通过电磁与机械性能双重路径影响电动工具扭力输出。不同工况下,需依据负载特性调整外径参数及其匹配关系。提出的设计优化策略实现了性能、成本与效率的平衡。研究成果为电动工具电机精细化设计提供重要指导,对行业技术升级具有积极促进作用。

参考文献

- [1]温俊杰,胡煜.直流无刷电机控制系统输出效率优化方法研究[J].科技视界,2025,15(06):27-29.
- [2]李想,乔伟,刘丙森,等.永磁直流无刷电机电磁设计与性能分析[J].高原农业,2025,9(01):86-99.
- [3]张康军,任宏喜,陈影,等.基于Ansoft的绕组对无刷电机机械特性影响分析[J].自动化与仪器仪表,2024,(12):104-106.
- [4]万筱剑,万昭莹,蔡林峰.基于STM32的无位置传感器无刷电机控制系统[J].机电工程技术,2024,53(12):249-252+317.
- [5]关珊珊,黄兴国,薛涛,等.可编程无刷电机控制实验系统及编程软件设计[J].吉林大学学报(信息科学版),2024,42(06):1130-1135.
- [6]邱亿龙,凌子强,罗宇浩,等.基于无感FOC的一体式无刷电机控制驱动器的电路系统[J].工业控制计算机,2024,37(10):129-131.