

无刷直流电动机在机械操作性能 试验装置上的应用研究

骆富保¹ 王小强²

(1. 甘肃电器科学研究院 2. 兰州城市学院)

摘要：低压开关设备和控制设备的机械操作性能试验对接通和分断动作的循环次数以及操作速度有着严格的规定，要求有关人力操作的断路器在操作时速度应为 $0.1\text{m/s} \pm 25\%$ ，这对试验辅助装置的准确性提出了要求。探讨引入无刷直流电动机可以解决困扰机械操作试验多循环次数下的时间间隔问题，极大地提高电寿命试验的自动化程度和准确可重复性。

关键词：无刷直流电动机；机械操作；试验辅助装置；无级调速

0 引言

低压开关设备和控制设备的基本性能要求对断路器机械开关进行机械操作试验以验证其满足正常使用寿命要求。对于电器机械操作性能试验来说需要进行多次的重复操作，每个操作包括不同电流的操作性能试验，闭合操作后接着断开操作，或通电流的操作性能试验，接通操作后接着分断操作。如何使接通和分断操作变得安全高效、重复间隔和次数变得可控是机械操作性能试验主回路之外辅助装置的研究重点。

直流电动机因为电刷存在换向火花使其寿命缩短，产生噪声和电磁干扰而被变频调速的异步电机取代，当今电力电子技术迅猛发展，以及数字信号控制器出现，使得电子换向取代换向器和电刷成为可能。无刷电机有着广阔的市场，其相应的控制器也总需要更新换代，无刷电机的应用不仅仅在交通工具上，还在电力传动领域、数控设备、家用电器、工业生产上^[1]。变压调速的旋转磁场直流电动机比变频器实现起来简易

可靠，其优越的转矩性能和调速性能，又是变频控制无法比拟的。无刷电机的换向、驱动使其在运转中平稳可靠，可以很好地应用于机械操作性能试验装置。

1 无刷直流电动机的发展历程及在国内外的应用现状

在国外，电机大致沿着 AC 交流异步电机、直流无刷电机、步进电机、伺服电机这样的演变流程在发展。各种类型电动机的选择，往往是根据其具体的工作状况和要求的设计性能来进行选型^[2]。改革开放以来，我国各行各业得到了很快的发展，毫无疑问，工业自动化也迎来了其飞速发展的时代。20 世纪 90 年代，我国就已经引进了伺服电动机，由于伺服电机的引进，国内自动控制人士才接触到了当时最先进的电机类型。而在这以前，国内大部分工程师都比较倾向于使用 AC 交流异步电机^[3]。相比于马达，由于其类型单一，使用范围也比较小。纵观我国电动机的发展使用历程，其相比于国外出现了跳级的现象，即由

AC 交流异步电动机直接跳到了最高端的伺服电机，而跳过了中间类型的步进电机和直流无刷电机。而在实际工况中，很多情况下使用直流无刷电机不仅可以降低成本，其控制也比伺服电机简单^[4]。

直流无刷电机，顾名思义就是没有“碳刷”的电动机。碳刷是在一些电动机的固定部分与旋转部分做信号或能量传递的装置，碳刷在电机的运动部件之间传导电流，能够将电流从固定端传递到发电机或电动机的旋转部分。早期的直流电机都是带有“碳刷”的。然而其缺点也是较为突出。磨损问题：由于有刷电机的电刷与电机换向环（集电环）之间相互磨损，导致电刷会逐渐磨损损坏，需要定期更换；噪音问题：有刷电机在运转时会产生明显的刷声，随着电刷与换向环磨损加剧，噪音会越来越大；发热问题：由于电刷在与换向环接触时会产生摩擦发热，再加上电刷与换向环之间的接触电阻，有刷电机的效率会受到影响，甚至会发热；寿命问题：有刷电机的寿命比较短，通常只能使用几千小时就需要更换电刷，更换电刷也需要专业技术，不能自行更换；容易出现火花：在低压条件下，有刷电机容易出现火花现象，影响电机的正常运行，甚至会引起火灾等危险。

2 无刷直流电动机简介

直流无刷电动机（BLDC）是一种采用电子换相技术，没有机械换向器的电动机。它的结构与传统的直流电动机类似，由转子、定子和磁铁等组成，但它采用了新型控制器、感应器和自动化系统来驱动电机^[5]。BLDC 的电子控制器可以实现高精度的电能转换。由于直流无刷电机本质上属于同步电机，那么其电机定子旋转磁场的速度以及转子极数就会影响电机转子的转速。由公式： $N=120 \times f/P$ （ N 为级数）可知，如果转子极数 P 固定不变，只需要改变定子旋转磁场的频率 f 就可以达到改变转子的转速目的。

无刷直流电动机可以实现无级变速，BLDC 电机的控制方式主要有电势控制和矢量控制两种。电势控制简单易懂，但调速控制精度不高；矢量控制具有精细的调速控制，但需要更复杂的控制电路。因此，选择适合的控制方式是 BLDC 电机应用中必须考虑的重要问题。

3 无刷直流电动机的构造

BLDC 的构造与传统的直流电动机类似，由定子、转子和磁铁组成^[6]。但 BLDC 电机没有机械换向器，而是采用电子控制器来驱动电机。定子：BLDC 电机的定子通常采用三相绕组，每个绕组与其相邻两个的绕组之间相位差 120° 。绕组的铜线通常绕在硅钢板上，以增强磁场，提高效率。转子：BLDC 电机的转子通常采用永磁体材料，如 NdFeB 等，这样可以提供强大的磁场，保证电机具有高转矩和高效率。另外，转子上的磁铁通常以特定的方式排列（如平行排列、交错排列等），以提高电机的运行效果。传感器：BLDC 电机的传感器可用于检测电流、速度、位置和加速度等参数，以帮助电子控制器根据不同的运行条件来控制电机运行^[7]。磁气元件霍尔 IC 固定在定子的内侧，一般安装有 3 个，转子转动时，即从霍尔 IC 输出数字信号。

外形及内部构造如图 1、图 2 所示，构造及霍尔 IC 内部图如图 3 所示。



图 1 电机剖视图

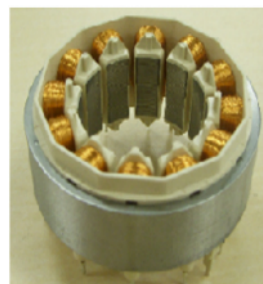


图 2 绕组构造

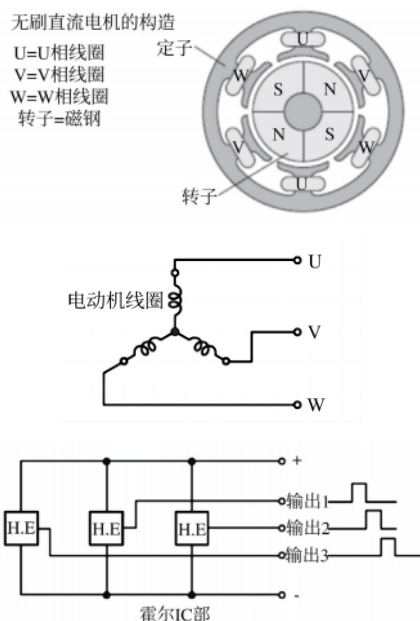


图3 无刷直流电动机的构造及霍尔IC内部

4 直流无刷电动机的特点

无刷直流电动机是一种新型的电动机，与传统的有刷直流电动机相比较，直流无刷电机具有很多优点。无刷直流电动机采用电子换向器代替了传统的机械换向器，具有更高的可靠性和更长的使用寿命。无刷直流电动机的效率更高，能耗更低，可以满足更高的性能要求。无刷直流电动机噪音更低，振动更小，工作更稳定，对机械操作性能试验装置的影响更小，具有刹车、双转向功能。无刷直流电动机具有自动控制和保护功能，可以通过编程实现不同的控制方式，实现更高的自动化程度。

5 无刷直流电动机在机械操作性能试验装置中的应用

无刷直流电动机基于其构造特点和功能，其在机械操作性能试验装置中的应用也很广泛^[8]。第一，无刷直流电动机可用于驱动负载模拟器，模拟不同负载下的性能参数；第二，无刷直流电动机可用于驱动传动系统，测试传动系数和传动效率；第三，无刷直

流电动机可用于驱动加载装置，模拟加荷状态下机械部件性能的变化；第四，无刷直流电动机可用于驱动转台，测试机械部件在旋转状态下的性能参数。对于机械操作性能试验辅助装置的执行机构，选用无刷直流电机具有非常大的优势。总之，无刷直流电动机在机械操作性能试验装置中具有广泛的应用前景，可实现更高的自动化和智能化程度，为机械制造业的发展提供有力的支撑。

6 选用无刷电动机的原因

区别于有刷直流电机，无刷直流电机以霍尔传感器取代碳刷换向器，以钕铁硼作为转子的永磁材料。用方波自控式永磁同步电机代替了传统的机械电刷装置。性能上相较一般的传统直流电机有很大优势，是当今最理想的调速电机。它的优势在于高效率、低能耗、低噪音、超长寿命、高可靠性、可伺服控制、无级变频调速、相对低成本且简单易用。

电动机的启动电流一般为额定电流的4~7倍，无刷直流电动机最大启动电流为3A，而变频器控制异步电动机的启动电流最大可以达到7A。无刷直流电动机最大启动电流的2倍多。变频器控制异步电动机与无刷直流电动机的最大启动电流还是相差较大。如果启动电流太大，这在数量较多的电动机启动时对电源容量的要求就非常高，为了保证电动机的正常启动电流，就要求电源设备大容量化。从这个角度看无刷直流电动机更加具有优势。

无刷直流电动机的定子绕组大多采用三相对称星形连接，与三相异步电动机非常相似。电机的转子上装有磁化的永磁体。为了检测电机转子的极性，在电机中安装了位置传感器。驱动器由电力电子器件和集成电路组成。它的作用是接收电机的启动、停止和制动信号，控制电机的启动、停止和制动。接收位置传感器信号和正负信号，控制逆变电桥各功率管的

通断，产生连续转矩；接收速度指令和速度反馈信号，用于控制和调节速度；提供保护、显示等。对于无刷直流电动机不能用于大功率发动机的缺点，试运转装置所需转矩小，可以很好地满足设计要求，可以忽略。

7 结束语

机械开关电器若依赖人力操作，操作的速度和操作力都取决于操作者，机械操作性能的试验对操作过程的连续性也有着严苛的要求，有关人力操作的断路器在操作时速度应为 $0.1\text{m/s} \pm 25\%$ ，在试验装置的末端碰触到断路器操动装置时进行测量^[9]。无刷直流电动机可以在作为执行机构的电动机拖动工作机械过程调节速度时，使其转速均匀平滑变化，实现操作辅助装置的无级调速，达到试验的操作速度要求。使得机械操作试验大大地提高了准确度和可重复性。

参考文献

[1] 贡俊，陆国林. 无刷直流电机在工业中的应用

和发展 [J]. 微特电机，2000（5）：15-19.

[2] 程武山. 低压电器智能测试技术研究 [J]. 低压电器，2010（21）：41-45.

[3] 牛海清，谢运祥. 无刷直流电动机及其控制技术的发展 [J]. 微电机（伺服技术），2002（5）：36-38.

[4] 金如麟，谭蒹娃. 永磁同步电动机的应用前景 [J]. 上海大中型电机，2001（3）：9-13，31.

[5] 石坚，李铁才. 一种消除无刷直流电动机换相转矩脉动的 PWM 调制策略 [J]. 中国电机工程学报，2012（24）：110-116，18.

[6] 邕峰. 小型断路器可靠性试验系统的研究 [D]. 天津：河北工业大学，2007.

[7] 李强. 无位置传感器无刷直流电动机运行理论和控制研究 [D]. 南京：东南大学，2005.

[8] GB/T 10233—2016 低压成套开关设备和电控设备基本试验方法 [S]. 2016.

[9] GB/T 14048.1—2012 低压开关设备和控制设备第 1 部分：总则 [S]. 2012.