



无刷直流电动机与 节能型风机盘管机组

上海新晃空调设备有限公司 郁惟昌[☆]

华东建筑设计研究院有限公司 胡仰耆 杨国荣

摘要 介绍了无刷直流电动机的特点和适配于风机盘管机组的现实性。通过对这一新型机组的性能测试并与常规机组进行比较,证明其节能效果显著。介绍了机组的控制模式,包括风量有级与无级控制。经济性分析表明,采用无刷直流电动机的机组运行费用及维护费用均较低。

关键词 无刷直流电动机 风机盘管机组 节能

Brushless DC motors and energy saving fan coil units

By Yu Weichang[★], Hu Yangqi and Yang Guorong

Abstract Presents characteristics of the brushless DC motor and the reality in matching with the fan coil unit. Compares this new unit with traditional unit based on performance test, the results show that it has obvious effects in energy saving. Indicates the control modes of the unit including step and stepless control, and the economic analysis results show the operating cost and maintenance cost of the new unit are lower.

Keywords brushless DC motor, fan coil unit, energy saving

★ Shanghai SINKO Air Conditioning Equipment Co., Ltd., Shanghai, China

①

0 引言

风机盘管机组是集中空调系统的主要末端设备之一,使用量大且面广。近 10 余年来,全国每年的销售总量在 80 万台以上,2005 年已超过 200 万台。若以其使用寿命不少于 10 年计,目前全国保有量已在 1 000 万台以上。

然而,从技术性能上看,该产品长期以来改进不大。主要表现在 3 个方面:1) 传热肋片的型式和性能似已定论,难有突破性进展。2) 对于与水系统密切相关的大温差机组,生产厂商重视不够。尽管从水系统节能角度要求机组有 6℃,7℃乃至 8℃的温差,但至今很少有厂商从水通路、肋片性能、噪声、风与水侧阻力等方面进行综合研究,向设计人员提供规格齐全、性能优良的产品。3) 单相交流异步电动机(简称 AC 电动机)由无刷直流电动机(简称 DC 电动机)替代的呼声时有,但真正应用到产品并推向市场,仍显步履缓慢。

现笔者根据近几年来在 DC 电动机创新应用于风机盘管机组方面的探讨作一介绍,期望这一技术成熟的产品能尽快得到推广,以取得良好的经济与社会效益。

1 DC 电动机

1.1 DC 电动机的组成与工作原理

DC 电动机与传统的 AC 电动机相比,本体结构简单、体积小、质量轻、损耗小、效率高,并可实施无级调速。

用于风机盘管机组的 DC 电动机主要由 3 部分组成:

1) 驱动电源。它包括电源转换器与变换器,其功能是将 220 V 的交流电转换成直流电。2) 电动机本体。它与交

①☆ 郁惟昌,男,1944 年 10 月生,大学,教授级高级工程师
200433 上海市淞沪路 518 号上海新晃空调设备有限公司
(0) 13701944690

收稿日期:2006-06-12

修回日期:2007-09-28

流电动机的不同之处主要是主转子用永久磁铁替代励磁绕组;用电子换向替代机械换向,取消了电刷。3) 无级调速温控器。

各制造厂的 DC 电动机在结构、技术参数方面各有特点。图 1 为某公司无级调速 DC 电动机系统示意图,其工作原理是:电源转换器将外接 220 V 交流电转换为直流电,作为电动机的驱动电源。同时,向电动机本体的控制部分和温控器提供控制电源,使它们可以根据房间实际温度与设定温度之差来控制电动机的转速。

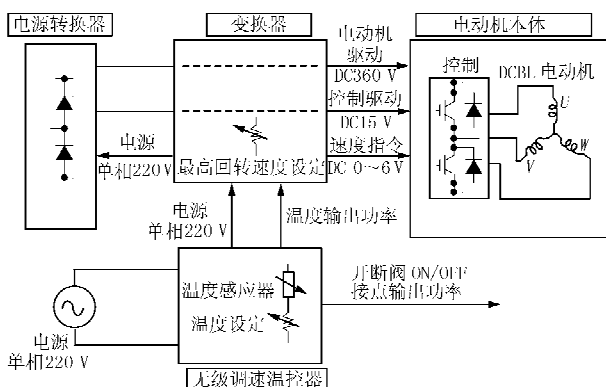


图 1 无级调速 DC 电动机系统示意

1.2 DC 电动机特点

1.2.1 节能性好

DC 电动机用于风机盘管机组有明显的节能效果,主要取决于电动机本体结构的改变与风机盘管机组的使用特点。

DC 电动机本体结构如图 2 所示。它由主转子、定子、位置传感器(传感器定子,传感器转子)以及电子开关和控制电路等组成^[1]。DC 电动机主转子采用永久磁铁不但使主转子的结构变得简单,同时具有永久磁铁产生的恒定励磁磁场,消除了由励磁绕组所带来的电损耗,从而提高了电

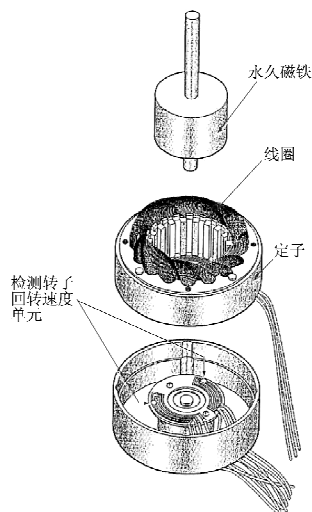


图 2 DC 电动机本体结构

动机的效率。

我国采用 50 Hz 交流电。传统风机盘管机组的电动机都为单相电容电动机,电动机的极数有 6 极与 4 极两种。4 极电动机的同步转速为 1 500 r/min;6 极电动机的同步转速为 1 000 r/min。AC 电动机的实际转速 n 一般是达不到它的同步转速 n_1 的。这就存在着电动机的转差率 S ,其表达式为

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} \times 100\% \quad (1)$$

转差率与转子铜耗 W_{Cu_2} 、输出功率 P_o 、机械损耗 W_m 有关,其关系式为

$$S = \frac{W_{Cu_2}}{P_o + W_{Cu_2} + W_m} \times 100\% \quad (2)$$

从式(2)可见,电动机输出功率发生变化时,转子的转差率随之发生变化。对于同一电动机,转速越低,转差率就越大。式(2)也反映了当转差率 S 增大时,转子铜耗 W_{Cu_2} 也增大,效率降低。由于 AC 电动机采用鼠笼型转子,在低转速时,电动机电流增大,使大部分能量损耗在电动机转子的铜耗与铁耗上。而 DC 电动机的转子是永久磁铁,在低转速时基本上无损耗,所以其效率相对于 AC 电动机高很多。反之,当电动机处于高转速时,AC 电动机的电流减小,相应的损耗也减少,使电动机的效率提高。此时,DC 电动机与 AC 电动机的效率差也就小了。图 3 为 AC 电动机与 DC 电动机在不同转速时的效率比较。

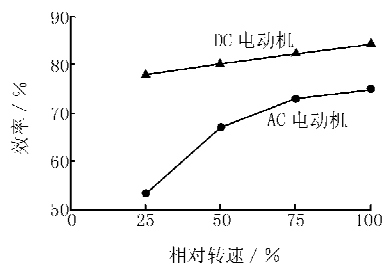


图 3 AC 电动机与 DC 电动机效率比较

评价风机盘管机组性能是否达标或比较产品的优劣,是以电动机高档转速下的性能为基础;选用风机盘管机组的规格则是以电动机中挡转速时的风量、冷量而定的。这分别是国内业界明文规定与不成文的约定。

由于风机盘管机组在实际使用时有 80% 以上的时间是在中、低挡转速,故 AC 电动机常处于低效率运行状态。用 DC 电动机替代后,其能耗总体下降达 50% 左右,有的规格达到 70% 以上。

DC 电动机要取得良好的节能率,除了取决于电动机本体结构外,还取决于驱动电源合理、良好的设计配置。试验说明,当同一电动机本体选用不同的驱动电源时,其节能效果并不一样。表 1 显示了驱动电源与能耗的关系。

表 1 不同驱动电源的能耗比较

风机盘管规格	风量与输出功率	出口静压 30 Pa		出口静压 12 Pa	
		驱动电源 A	驱动电源 B	驱动电源 A	驱动电源 B
FP-102	风量/(m ³ /h)	1 028	1 023.1	1038.5	1 023
	输入功率/W	86.6	78.2	82.9	61.5
	相对风量差/%		-0.48		-1.5
	节能率/%		-9.6		-25.8
FP-68	风量/(m ³ /h)	654	683	733.2	744
	输入功率/W	41.5	39.6	42.9	35
	相对风量差/%		+4.4		+1.5
	节能率/%		4.6		18.4

注:相对风量差和节能率均是驱动电源 B 相对于驱动电源 A 进行比较。

1.2.2 调速性能好

目前用于风机盘管机组的 AC 电动机,根据使用要求将电动机的绕组中间进行抽头,实现按挡调速,其电路如图 4 所示。

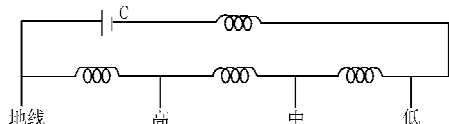


图 4 AC 电动机调速原理

使用时,在温控器上设定需要的风速档位。调速挡与风速取决于抽头的多寡与每一绕组线圈的多少。DC 电动机的调速原理完全不同于 AC 电动机,它是用改变磁极电流的换流装置和磁极位置检测元件来替代后者的换向片和炭刷。其工作原理如图 5 所示。

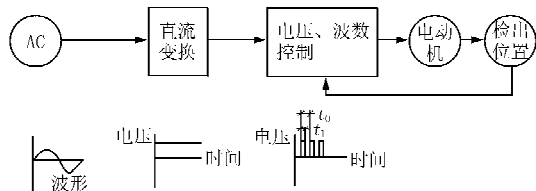


图 5 DC 电动机工作原理示意

DC 电动机的转速 n 与电枢电压 u 的关系为

$$n = f(u) \quad (3)$$

当电磁力矩(或负载力矩)恒定时,电动机的转速 n 随电枢电压 u 的增加而线性增加。而电枢电压 u 的变化是通过调节电枢电压的脉冲宽度来实现的。

$$u = Ku_A \quad (4)$$

$$K = \frac{t}{t_0} \quad (5)$$

式(3)~(5)中 u 为电枢电压,即单位时间内的平均电压值, V ; u_A 为电动机输入电压,即由交流电转变为直流电的幅值, V ; K 为占空比; t 为电枢导通时间, s ; t_0 为每两个相邻波峰间隔的时间, s 。

当电枢导通时间 t 由 t_1 改变为 t_2 后,占空比 K 也由 $K_1 = \frac{t_1}{t_0}$ 变化为 $K_2 = \frac{t_2}{t_0}$ 。由式(3),(4)得 $\frac{n_2}{n_1} = \frac{K_2}{K_1}$,由此

可得,转速随占空比增大而提高,随占空比减小而降低。

那么如何来改变占空比以达到电动机无级调速的目的呢?除了采用 DC 电动机本体与驱动电源外,还需要一个带有温度传感器的温控器。

DC 电动机无级调速的原理如图 6 所示。运行时,在配有温度传感器的温控器上设定所要求的房间温度后,房间温度与设定温度的差值随时转变为电流信号,通过占空比调节器(VCTL)来调整驱动芯片(IC)的占空比,改变电动机转速。与现有的单相 AC 电容电动机调速不同,DC 电动机在设定了所需房间温度后会自动进行调速。

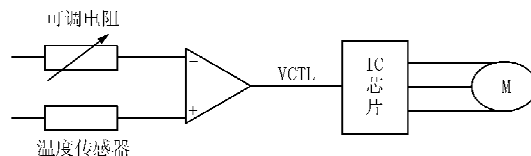


图 6 DC 电动机无级调速原理

不同系列、不同规格的风机盘管需要不同的最高转速,因而需要不同的 AC 电动机与之匹配。而同一种规格的 DC 电动机可按需提供若干种不同的最高转速,即一台电动机可与多种规格的风机盘管匹配,并在设定的最高转速与最低转速之间实现无级调速。

DC 电动机与风机盘管匹配的调速模式主要取决于用户需求。目前有两种模式:一种是无级调速。当使用者设定房间温度后,电动机能根据设定值与实际温度值的差值,自动提高或降低转速。另一种是具有高、中、低三挡调速功能,每挡转速值可由厂方按需预先设定。当使用者选择了某一挡风速后,机组就像配 AC 电动机一样,按该挡风量定风量运行,由温控器根据室温对机组进行启停控制。DC 电动机的调速模式见表 2。

表 2 DC 电动机的调速模式

类型	系统组成	可选调速模式
A	驱动电源、电动机本体	高、中、低三挡调速
B	驱动电源、电动机本体、温控器	无级调速

1.2.3 噪声低

将 DC 电动机与 AC 电动机分别安装在 FP-102 型风机盘管机组上进行 A 声级噪声测定,DC 电动机本体噪声比 AC 电动机低 5 dB 左右,测定结果详见表 3。电动机噪声的降低使风机盘管机组的整体噪声降低。

表 3 两种电动机噪声测定比较

电动机	A 声级噪声值(距电动机表面 150 mm)/dB				
	正面	右侧面	反面	左侧面	平均值
AC 电动机	43	46	43	51	45.75
DC 电动机	43	40	39	39	40.25

1.2.4 可靠性高

为保证 DC 电动机安全可靠地运行,采取了如下保护措施。

过电压:AC275 V 以上保护动作;低电压:AC165 V 以下保护动作;过电流:超过 1.6 A 保护动作;温度:超过 130℃保护动作;二次侧过电压:58 V 保护动作。

1.2.5 寿命长、体积小、发热量小

由于 DC 电动机具有以上一系列保护措施,再加上没有电刷,消除了故障隐患,因此使用寿命长。此外,DC 电动机的结构特点又使电动机的体积小、质量轻、发热量小。

2 DC 电动机与风机盘管匹配的节能性

风机盘管机组用 DC 电动机替代 AC 电动机后的节能效果,应着眼于 FP-102 机组(额定风量为 1 020 m³/h)所选用的电动机。这是因为风机盘管机组的结构设计特点决定了在 FP-102 及以下规格的机组中采用单电动机双风机(或单风机)形式,而 FP-136 以上机组,则采用双电动机四风机(或三风机)形式。于是,在同一电动机系列中,配置在 FP-

102 机组中的电动机转速最高。如果 FP-102 机组配置 DC 电动机后,有较好的节能效果,则其他规格的机组配置 DC 电动机,其节能效果更好。同理,若同一规格机组在高挡运行时节能效果不低于预期目标,那么,在中、低挡运行时节能效果一定更为显著。

多年来的试验还说明,将 DC 电动机用于风机盘管机组各个系列的关键是选择好高静压(如 50 Pa)时所配用的 DC 电动机。为此,笔者曾用某公司研制的 DC 电动机配置在 S 公司与 B 公司的产品上作了反复试验。实测数据如表 4、5 所示。从表 4 与表 5 可见,DC 电动机与 AC 电动机相比,高挡时的节能效果均在 25%以上,中挡时在 60%左右,而低挡时已接近 80%。因此,风机盘管机组采用 DC 电动机是技术上的一个重大突破,也是产品更新换代的最好体现之一。

表 4 FP-102 与 FP-68 机组性能实测

风机盘管规格		电动机	出口静压 50 Pa		出口静压 30 Pa		出口静压 12 Pa	
			S 公司	B 公司	S 公司	B 公司	S 公司	B 公司
FP-102	风量/(m ³ /h)	AC	1 060	1 055	972	1 049.9	1 017	1 033.9
		DC	1 023	1 023.1	1 023	1 023.1	1 023	1 023.1
	输入功率/W	AC	120.0	128.9	102	117.6	92.5	90.5
		DC	90.8	93.2	75.4	78.2	61.5	63.8
FP-68	风量/(m ³ /h)	AC	758	677.6	687	702.4	744	671.2
		DC	758	680.7	683	674.4	744	680.7
	输入功率/W	AC	77.5	81.7	63.9	72.2	57.6	59.2
		DC	57.6	55.4	39.6	39.7	35	30.3
FP-68	节能率/%		25.7	32.19	38	45	39.2	48.8

表 5 FP-102 与 FP-68 机组在出口静压 12 Pa 时高、中、低三挡风速性能实测

风机盘管规格		高档		中挡		低挡	
		AC	DC	AC	DC	AC	DC
FP-102	风量/(m ³ /h)	1 033	1 023	738	774	560	510
	输入功率/W	90.5	63.8	79.3	35	67.5	15.6
	节能率/%		29.5		55.9		76.9
FP-68	风量/(m ³ /h)	744	744	560	507.4	404	339
	输入功率/W	57.6	35	49.8	16.9	43.4	9.5
	节能率/%		39.2		66.06		78.3

此外,国外某公司推出新世纪 GSCR 系列风机盘管,还可以给我们一点启示。该暗装卧式标准风机盘管机组的

部分性能参数见表 6。

从性能数据来看,该产品的特点是在满足同一设计与

表 6 GSCR 系列风机盘管机组部分性能参数

	机组规格					
	GSCR-210	GSCR-310	GSCR-410	GSCR-610	GSCR-810	GSCR-1210
风量/(m ³ /h)	320	480	660	970	1 310	1 700
输入功率/W	26	35	53	72	110	145
A 声级噪声/dB	34	36	37	38	39	40
质量/kg	22	24	32.5	37.5	48.5	61.5
电源	单相 100 V, 50 Hz/60 Hz					
电动机	DC					

使用工况的前提下,实现了低噪声、低能耗,风量比国标低 3%~6%。目前国内许多风机盘管机组制造厂所提供的样本,机组风量一般都高于国标 5%~10%。

我国风机盘管制造厂为什么会牺牲能耗去加大风量呢?其原因是,目前评价一台机组能否合格的重要指标之一是风量、冷量不能低于国标规定的额定值的 95%。由于国内盘管大多采用廉价、未作亲水膜处理的肋片,在实际运行时,湿工况的风量通常只是干工况风量(额定)的 80%左右。若将干工况的风量(额定)确定为 100%或允许最低值 95%,则很难使湿工况时的供冷量达到国标规定值。而表 6 中的风机盘管机组的肋片经过了亲水膜处理,湿工况时的风量通常在干工况时的 90%以上。因此,尽管样本中的风量似乎较小,但在实际使用时,风量、冷量不会减小很多。这样的优异性能无疑是肋片优化和电动机革新的结果。

对于仅配置无级调速温控器的 DC 电动机风机盘管机组,机组在运行过程中会根据实际温度与设定值之差自动改变电动机的转速,即机组的送风量是变化的,始终能以最小的风量满足负荷的需要。伴随风量的降低,回水温度也同时降低,利于节能。其工况见表 7。

3 采用 DC 电动机的经济性分析

3.1 运行费用省

DC 电动机与 AC 电动机适配于风机盘管机组,从结构上说具有同一性。两者的基本结构如安装尺寸、中心高度、电动机轴径及长度等方面都相同,不存在因采用 DC 电动机而导致电动机与风机、电动机与机组在安装设计和加工

表 7 不同转速时的风机盘管机组性能

机组参数	高档	中挡	低挡
进风干球温度/℃	27	27	27
进风湿球温度/℃	19.5	19.5	19.5
出风干球温度/℃	13.50	12.69	12.08
出风湿球温度/℃	12.73	11.68	10.64
风量/(m ³ /h)	815	595	417
供冷量/W	4 505	3 710	2 884
水流量/(kg/h)	775	775	775
进水温度/℃	7.00	7.00	6.98
出水温度/℃	12.05	11.18	10.26
水温差/℃	5.05	4.18	3.28

注:表中数据为某公司用 DC 电动机风机盘管机组在 3 种不同转速情况下所作的热工性能测试结果。

方法上的改变。两者的差价主要在于 DC 电动机本体。据了解,配了 DC 电动机后,机组价格会增加 300 元左右。

以下是两种机组的年运行费用的粗略分析。计算的假设条件为:

1) DC 电动机较 AC 电动机平均贵 300 元/台;2) 机组各挡风量运行时间占全年运行时间的百分比分别为:高档 10%,中挡 50%,低挡 40%;3) 机组按全年 9.5 个月(290 d),每天 24 h 运行;4) 机组的输入功率取表 5 中的数值;5) 电价按 0.9 元/(kWh)计;6) 年耗电量 $Q=24 \text{ h/d} \times 290 \text{ d} \times (0.1A+0.5B+0.4C)/1\,000$,式中 A, B, C 分别为风机盘管机组高、中、低挡风量时的输入功率。

以 FP-102, FP-68 为代表的年耗电量、运行费用、初投资回收期见表 8。

表 8 两种风机盘管机组费用分析

机组规格	电动机形式	输入功率/W			年耗电量/(kWh)	年运行费用/元	年运行费用差/元	初投资回收期/a
		A	B	C				
FP-102	AC	90.5	79.3	67.5	526.9	474.2	285.6	1.05
	DC	63.8	35.0	15.6	209.6	188.6		
FP-68	AC	57.6	49.8	43.4	333.9	300.5	201.9	1.49
	DC	35.0	16.9	9.5	109.6	98.6		

由上述计算可见,尽管采用 DC 电动机提高了采购成本,但用户约需 1.5 a 的时间就可通过减少能耗费用收回。

3.2 维护费用省

DC 电动机的结构特点决定了它较 AC 电动机故障率低、维修简单、成本低。AC 电动机最常见的问题是因接线错误发生短路;或因电容质量差导致电动机烧毁;或因电压不正常又没有保护而造成电动机故障。更换电动机需要将风机盘管机组整体卸下,至少需将风机卸下。而 DC 电动机通常对驱动电源设置过电压、过电流、过热等保护措施。即使外接线路接错,也只涉及转向。如发生故障,也不会涉及电动机本体,只需将驱动电源拆下更换。电源与电动机本体的连接,电动机本体与室温控制器的连接均设有专用接口,连接或拆卸极为方便,减少了维护费用。

4 结语

近几年来,用于风机盘管机组的 DC 电动机,经过电动机制造厂与风机盘管制造厂等各方面的合作和开发,在电动机本体(含控制)、驱动电源、无级调速、电动机与风机匹配等多项技术上都趋于成熟。制造厂也在坚持产品高性能的前提下不断降低成本,力求用户在一年的时间内从运行费用的节省中获得价格差的补偿。采用 DC 电动机,改进原有部件设计方法,使风机与电动机合理匹配,使机组的制造技术有了新突破。现在,这一节能型产品可进入推广应用阶段,为实现空调产品技术进步作出贡献。

参考文献:

[1] 张琛. 直流无刷电机原理与应用[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2004