

# 直流电机无槽电枢绕组设计方法分析

胡建华 童春辉 杨 铮

(电气工程系)

## 摘 要

本文在阐述无槽直流电机的特点基础上,通过与有槽电机对比方法,论述了无槽直流电机电枢绕组设计方法.

关键词:直流;电机;无槽电枢

## 0 引 言

直流无槽电机的特点是电枢绕组均匀嵌放在预制的绝缘电枢表面上,这种电机结构,其电感和电抗电势比普通电机小得多,故为换向提供了有利的电磁条件.另外,这种结构的电机气隙和气隙磁势较大,成为一种低磁密电机,故具有较软的机械——电气特性,在高速运行和自动调节的工作区内,这种特性对电机功率利用极为有利,而且,这种电机的稳定性和过载能力都比带补偿绕组的有槽电机大得多.因此,直流无槽电机用作牵引电机是一种有发展前途的牵引电动机.

设计无槽电机与有槽电机最主要的区别在于电枢绕组的设计,本文拟从无槽与有槽电机对比的角度谈谈无槽电机绕组的设计方法.

## 1 无槽电机绕组设计中的主要问题

普通直流电机的电枢绕组是嵌放在槽内的,绕组的设计涉及到匝数、导线的截面积、电流密度、电阻、电抗等.槽外齿部为磁路,槽形尺寸的高宽比影响磁密的分布和槽漏抗等,电机设计就是妥善解决绕组和槽的相互关系又相互制约的矛盾.

无槽电机由于取消了齿和槽,设计者在电枢绕组结构以及电磁负载主要尺寸等方面有较大的自由度和灵活性,电枢绕组结构直接影响电机尺寸、电气特性及工艺,与有槽电机相比有明显区别.

### 1.1 与选择电机主要尺寸的关系

有槽电机电磁设计首先确定主要尺寸,电枢绕组设计时,调整导体尺寸,一般仅影响槽形.

本文于1993年10月4日收到

不直接影响主要尺寸,无槽电机的设计,主要尺寸确定原则上可以仿照有槽电机进行.但电枢绕组导体尺寸的选择会直接影响电机主要尺寸.

无槽电机从没有绝缘的光滑铁心算起,由绝缘导线和绑扎带沿径向所占空间为绕组带,也称为非磁性层,其高度比有槽电机的气隙大得多,绕组带的高度又取决于导线的截面积大小、长宽比例以及导线数.绕组带的高度还直接影响电机定子直径等外形尺寸,设计时要选择电枢直径  $D$ . 尽量使绕组在电枢圆周上排满.

因此,要选择好导线的面积、并绕根数、导线长宽比例以及绕组的型式,以尽量减小电机绕组带高度,减小非磁性层高度就可直接减少励磁安匝数,减少安匝数也是无槽电机设计必须解决的问题之一(见图 1).

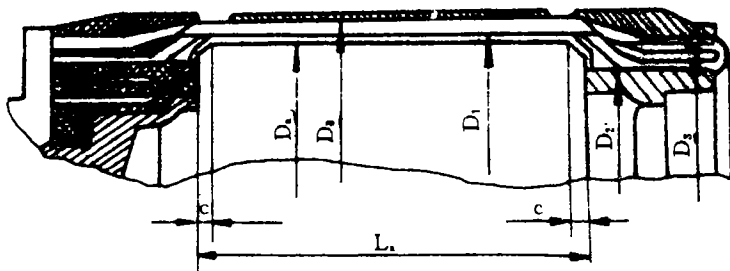


图 1

设计时可根据电枢铁心直径  $D_s$  的选择方法预选一个  $D_s'$ , 然后, 根据  $D_s'$  决定电枢上排满单元导体时导体沿宽度方向将要占有的空间, 导体宽度  $b_m$  计算公式为

$$b_m = \frac{\pi(D_s' + 2b_1) - 2Z(b_2 + e)}{2ZU_{\kappa}n}, \quad (1)$$

式中

$b_1$  为对地绝缘厚度;

$b_2$  为绕组导体的匝间绝缘厚度;

$e$  为绕组间隙;

$Z$  为假想槽数;

$U_{\kappa}$  为换向片数;

$n$  为宽度方向并绕根数.

根据上式求得  $b_m$  并查找靠近的标准导线尺寸  $b$ , 然后, 根据与标准导线的差额  $\Delta b$  求得电枢直径调整量  $\Delta D$ .

$$\Delta D = \frac{2\Delta b Z U_{\kappa} n}{\pi}, \quad (2)$$

最后,将预选的电枢直径加上调整量即得电枢直径  $D_a = D_a' + \Delta D$ . (3)

在导体数  $n$  和导线面积相同的条件下,选择不同电枢直径,又会影响导体高度  $h$ ,  $D_a$  越大导线宽度  $b$  可以选择大些,以使  $h$  减小.

绕组的长度是由电枢铁心的长度决定的,而电枢长度根据无槽电机非磁性层比有槽电机大得多的特点,电枢往往适当延长. 因为,减少无槽电枢电机主极磁势,并使它尽可能接近有槽电枢电机磁势,有利于电机性能,在已选定计算极弧条件下,主要通过加长电枢铁心办法解决;而在保持电机总长不变的条件下,只有缩短电枢绕组的端部,才能达到延长电枢铁心的目的.

电枢直径确定后,线圈端部延伸长度与极对数成反比. 即

$$H_e = \frac{0.5\pi D_a \cdot 1}{\sqrt{1 - (\frac{D_a}{D_1})^2} \cdot P} = K \cdot \frac{1}{P}, \quad (4)$$

电枢端部是由鼻部、直线、倾斜三部分组成. 端部的作用是完成线圈边的连续过渡;采用多层端部,可减少端部伸出部分尺寸(见图 2,3),可得伸出部分长度和端部层的关系:

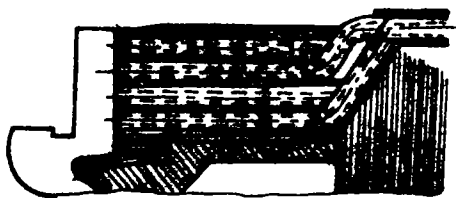


图 2

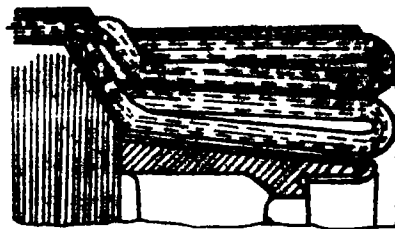


图 3

$$H_e = \frac{0.5bY_z}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha} \frac{1}{h^2}}, \quad (5)$$

式中

$Y_z$  为绕组节距;

$b$  为绕组线宽度;

$\alpha$  为线圈边倾斜角.

把端部做成四层与普通方法比较,电枢端部伸长由原来的 162mm 减少到 131mm,这样,铁心长度可由原来的 175mm 延长到 205mm. 若保持磁通  $\Phi$  不变的情况下,主极匝数可近似认为与长度  $l$  成反比. 即

$$W' = W \frac{l_0}{l_0 + \Delta l_0} \quad (6)$$

采用以上方法,使每边端部减少 15mm 左右,铁心长度相对加长 30mm,有效地将主极线圈匝数减少 15%—25%.

另外,为了在电枢绕组的端部建立有效转矩,可在结构上采用适当的措施,即把主极铁心加长到端部区域内.

## 1.2 绕组参数选择原则

电枢绕组主要由绕组的形式、三个主要节距、换向片数等来决定.无槽电枢绕组型式与有槽电机一样分为波绕和叠绕,但结构上有单层和双层两类(见图 4).单层绕组的有效部分沿铁心圆周表面依次紧凑嵌放成单层,绕组线圈端部做成双层.双层绕组类似有槽双层,端部为了便于固定和减少端部长度制成四层.双层绕组由于绝缘要求高,填充系数小于单层 23%~30%,从而使非磁性层增大;另外绝缘材料和绑扎都较单层困难,故无槽电机多采用单层绕组.无论采用哪一种绕组,绕组分布时都要保证电机电磁的对称条件.

双层绕组与有槽电机电枢双层绕组相似,上下两元件边组成一“槽”,相互交替,其计算方法与有槽电枢绕组的概念一样.但无槽电枢单层绕组与有槽不同,线圈是一个挨着一个排列铺成一层.为了引用有槽电枢绕组的概念,可以假定每两个并肩平放的线圈组成一个“假想槽”,以朝某一个方向记数,奇数为上层边,偶数为下层边,单层绕组上下两个边铺在电枢上它是槽数的两倍,一定为偶数.在设计中选择槽数时,要保证绕组的对称性,同时也要做到这种单层结构排列的可行性,这样必须使  $Z/p + \epsilon$  为奇数.

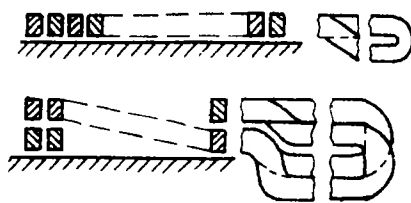


图 4

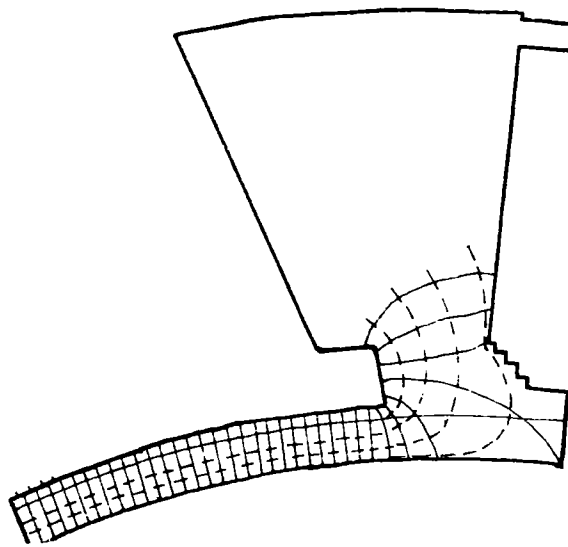


图 5

单层绕组引用槽数计算节距的方法相同,采用线圈边节距,其大小等于两倍的槽节距.采用单层短距绕组时,对换向的影响比有槽电枢小,因为,在有槽结构中,只考虑同一槽内同时换向元件的影响.位于不同的槽中,而不同时换向的元件,因为它们不产生互感而不予考虑.当无槽电机为单层时,所有同时换向元件都产生互感,它与元件是否属于不同的线圈并无关系.因此,无槽电机要做到充分利用电机内部空间则应采用全节距.

## 1.3 绕组导线尺寸对电机损耗的影响

选择导体面积  $S$ ,导体长  $a$  宽  $b$  尺寸,是立放还是平放,不仅要考虑电流密度和对励磁安匝的影响,而且要考虑导体中涡流损耗的大小.无槽电机主极磁场分布如图 5,由于磁密极弧

分布不均匀,故在无槽电机电枢导体中出现由涡流产生的损耗.要计算分析这部分损耗,涉及到导体在变化磁场中导体内部磁场计算问题,比较困难.若分别对磁场分解为法向分量和切向分量,进行损耗计算,可使问题简化.将主极下实际磁感应强度曲线分解为傅立叶级数,对每一次电磁谐波求出它的损耗,然后,求出总和,即为导体的涡流之和.根据文献介绍,可由直线段和正弦曲线组成的近似曲线代替(见图6.7).沿电枢圈周分布的法向和切向分量的实际曲线计算,按照这种方法计算单位长度平均法向分量的涡流损耗.

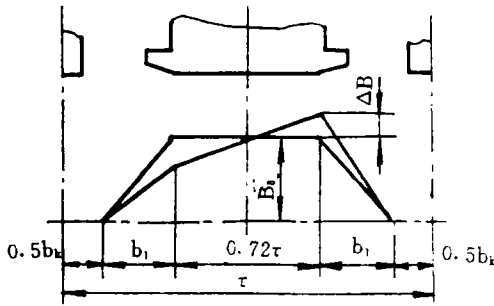


图6

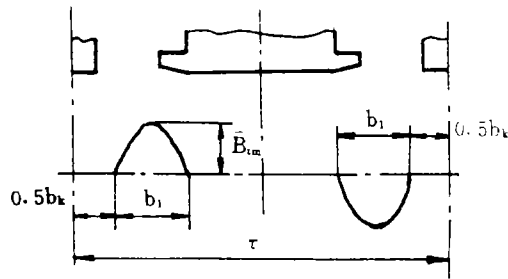


图7

$$P_h = \frac{\pi^2}{6f_z^2} N (h_m f_y) (b_m f_z)^3 \sigma (K_1, B_o)^2 f^2 l_a \quad (7)$$

式中

$N$  为电枢导体根数;

$B_o$  为主极下的气隙磁密;

$f_z$  为沿导线宽度方向并绕根数;

$f$  为稳态电流频率;

$K_1$  为主极中心最大磁密等效增大系数;

$b_m$  为导体宽度.

按正弦分布的切线磁密所引起的涡流损耗为

$$P_1 = P_{e1} n \frac{2b_1}{\tau} \quad (8)$$

$$P_{e1} = \frac{1}{96} \sigma l_a (f_y h_m)^3 b_m f_z C \left( \frac{\pi}{b_1} B_{im} \right)^2 V_a^2 K_2 \quad (9)$$

$$C = \frac{1}{3} \left[ 1 + \frac{h_o}{h_m} - \frac{h_o^3}{h_m (h_m + h_o)^2} \right] \quad (10)$$

式中

$h_0$  为铁芯与电枢铜底的高度;

$h_m$  为线圈铜高;

$B_{im} = K_f B_0$ ; 一般为  $B_0$  的 12% 左右;

$K_f$  为阳尼系数.

由以上分析可见,为了减少电枢体中的附加损耗,在满足电流密度的条件下,选择导体的长和宽对于导线中的损耗有很大的影响.通过计算对照,导体一般要立放,同样面积的导体,立放比平放可使附加损耗减少一半.

#### 1.4 绕组机械计算及固定方法

与有槽电机不同,无槽电机电枢绕组设计时,要特别重视对绑扎带进行机械强度计算,计算电枢表面导体和绝缘物体在 1.35 倍的最高转速时所产生的离心力的大小,根据选用的绑扎材料承受的离心应力,进行机械强度的计算来确定绑扎带的厚度和电枢上的绑扎面积.

无槽电机绕组因为无齿部的固定作用,绕组固定是一个不可忽视的问题.一般的结构是叠片铁心—对地绝缘—绕组—绑扎带,要保证电枢在结构上的整体性,才能维持电机运行上的可靠.电枢用的绝缘材料要求有较好的粘合性能,同时电机成型后浸渍要进行整体固化工艺处理.

## 2 无槽电机的特点及应用

无槽电枢绕组设计是无槽电机与有槽电机设计的主要区别,电枢绕组与电机性能、体积、价格有着直接关联.设计中比有槽电机具有更大的灵活性,可变参量调节余地大,原始数据和计算结果相互关系十分复杂,必须用多个方案进行计算分析才能确定最后方案,适宜用计算机进行辅助设计.

根据以上分析,我们在原来直流电动机设计程序基础上,编制了无槽电机计算机辅助设计程序,对 30kw 的直流牵引电机进行电磁设计计算分析,对设计方案进行了比较,取得了较好的预期效果.

无槽电机具有改善换向、稳定性好、电机设计利用率高等牵引性能好的特点.但电机励磁安匝比较大,如果采用超导做成励磁绕组,电机励磁安匝则可以大为加强,损耗也减少,电机可提高磁密.这点对有槽电机则不然,即使有槽电机采用超导可提高磁势,但齿部大为饱和,电机性能变坏,还不如取消齿槽,采用无槽电机结构为好.笔者认为,无槽电机也将在超导电机中得到推广应用.

参 考 文 献

[1] M. 纳霍德金编,李忠武译. 牵引电机设计. 北京:中国铁道出版社,1983  
[2] 许实章. 电机学.再版. 北京:机械工业出版社,1988

DC Motor Slotless Armature Winding Design Procedure

Hu Jianhua Tong Chunhui Yang Zheng

ABSTRACT

The article describes slotless DC motor the function advantages, and discusses the design procedure of slotless DC motor armature winding by contrasling the slotless armature with the slot armature.

**Key words;**Motor;DC; Slotless armature