

# WindageLoss

Xie Yu

## 1 介绍

WindageLoss用于计算电机的风摩损耗。

## 2 原理

在高速电机中，总的风摩损耗如下：

$$P_{wind} = P_a + P_{ad} + P_c \quad (1)$$

风摩损耗有以下三个部分组成： $P_a$ 为气隙中抵抗阻力力矩损耗； $P_{ad}$ 为转子表面抵抗阻力力矩产生的损耗； $P_c$ 为气隙中冷却介质轴向流动的损耗。

### 2.1 气隙中的损耗

气隙中抵抗阻力力矩的损耗为：

$$P_a = \pi c_f \rho \Omega^3 \frac{D_{2out}^4}{16} L_i \quad (2)$$

其中摩擦系数,当 $Re < 10000$

$$c_f = 0.515 \frac{[2(g - d_{sl})/D_{2out}]^{0.3}}{Re^{0.5}} \quad (3)$$

当 $Re > 10000$

$$c_f = 0.0325 \frac{[2(g - d_{sl})/D_{2out}]^{0.3}}{Re^{0.2}} \quad (4)$$

$g$ 为气隙， $d_{sl}$ 为保护套的厚度，没有护套时取0。 $D_{2out}$ 为内转子外径， $L_i$ 为电枢的有效长度。 $\rho$ 为空气密度。

气隙的雷诺数 $Re$ 可由下式计算：

$$Re = \frac{\rho \Omega (g - d_{sl}) D_{2out}}{2\mu_{dyn}} \quad (5)$$

式中 $\mu_{dyn}$ 为空气的动力粘度。

### 2.2 转子表面的损耗

转子表面的损耗可由下式表示：

$$P_{ad} = \frac{1}{64} c_{fd} \rho \Omega^3 (D_{2out}^5 - d_{sh}^5) \quad (6)$$

摩擦系数当 $Re_d < 3e5$ 时：

$$c_{fd} = \frac{3.87}{Re_d^{0.5}} \quad (7)$$

当 $Re_d > 3e5$

$$c_{fd} = \frac{0.146}{Re_d^{0.2}} \quad (8)$$

$$R_{ed} = \frac{\rho \Omega D_{2out}^2}{4 \mu_{dyn}} \tag{9}$$

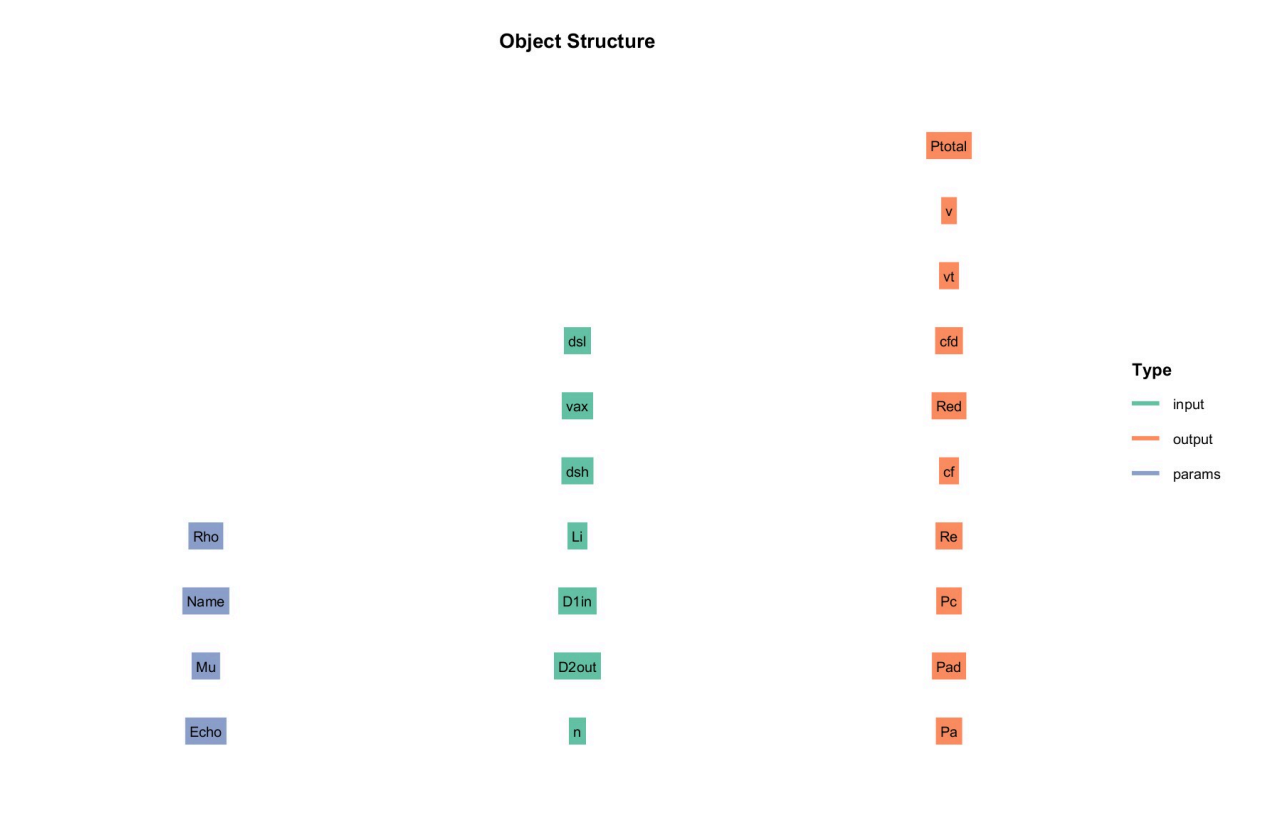
## 2.3 轴向冷却气体损耗

轴向冷却气体损耗为：

$$P_c = \frac{2}{3} \pi v_t v_{ax} \Omega [(0.5 D_{1in})^3 - (0.5 D_{2out})^3] \tag{10}$$

式中  $D_{1in}$ 为定子内径， $v_t$ 是转子旋转引起的冷却介质的平均切向线速度，可取0.5倍的转子表面线速度， $v_{ax}$ 为冷却介质轴向线速度。

## 3 类结构



输入 input:

- dsl : 保护套厚度
- vax: 轴向冷却介质线速度
- dsh : 轴直径
- D1in : 定子内径
- D2out : 转子外径
- n : 转速

参数 params:

- Rho : 空气密度
- Name : 名称

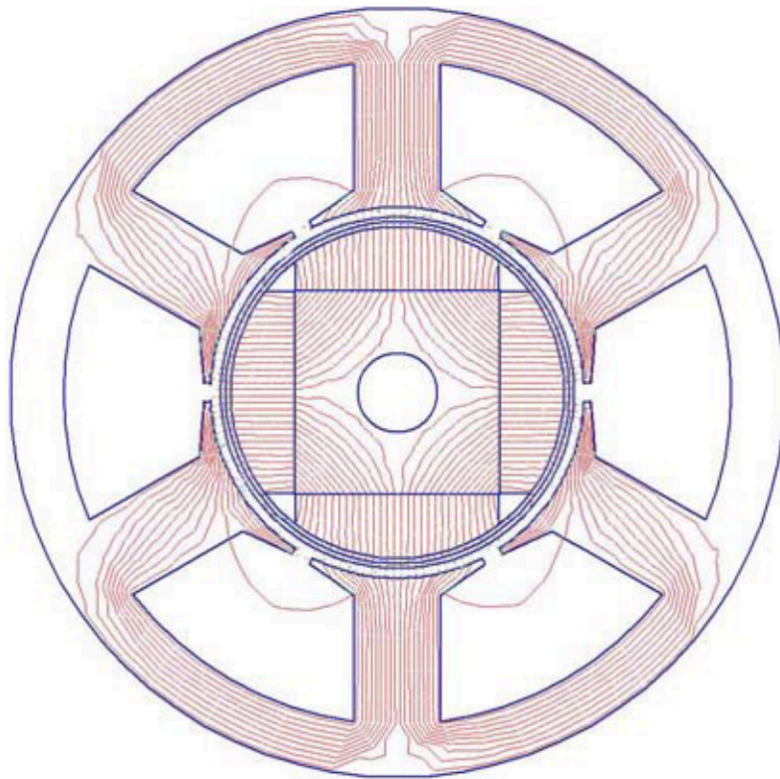
- Mu: 空气动力粘度

输出 output :

- Ptotal : 总风摩擦损耗
- v : 转子线速度
- vt: 冷却介质切向线速度
- cfd : 转子表面摩擦系数
- Re : 气隙雷诺数
- Red : 转子雷诺数
- cf : 气隙摩擦系数
- Pa : 气隙中的损耗
- Pad : 转子表面损耗
- Pc : 轴向冷却气体损耗

## 4 案例

图中为10kw，4极、40000r/min高速永磁无刷电机，在温度为100°C下求风摩擦损耗。该电机尺寸如下：转子外径 $D_{2out}$ =50mm，轴直径 $d_{sh}$ =12mm，叠片长度 $L_i$ =50mm，气隙 $g$ =3mm，护套厚度 $d_{st}$ =1.8mm，冷却空气的轴向速度 $v_{ax}$ =10m/s。



```

1 inputStruct1.t=100;
2 paramsStruct1=struct();
3 Air=method.AirProperty(paramsStruct1, inputStruct1);
4 Air=Air.solve();
5 disp(Air.output)
6 inputStruct2.Li=0.05;
7 inputStruct2.dsh=0.012;
8 inputStruct2.D2out=0.05;
9 inputStruct2.D1in=0.056;

```

```

10 inputStruct2.dsl=0.0018;
11 inputStruct2.n=40000;
12 inputStruct2.vax=10;
13 paramsStruct2.Rho=Air.output.rho;
14 paramsStruct2.Mu=Air.output.mu;
15 Loss=method.Loss.WindageLoss(paramsStruct2, inputStruct2);
16 Loss=Loss.solve();
17 disp(Loss.output)

```

首先可以利用Buffalo中的AirProperty模块计算空气在100°C下的属性：

Successfully calculate air property ! .

```

rho: 0.9460
mu: 2.1809e-05
k: 0.0312
c_p: 1.0129e+03
c_v: 725.8397
gamma: 1.3955
c: 386.6153
nu: 2.3055e-05
alpha: 3.2598e-05
Pr: 0.7073
M: 0.0290
R: 287.0478

```

得到空气密度和动力粘度带入到公式中：

Successfully calculate windage loss .

```

Pa: 11.9669
Pad: 3.8956
Pc: 27.4930
Re: 5.4506e+03
cf: 0.0028
Red: 1.1355e+05
cfd: 0.0115
vt: 52.3599
v: 104.7198
Ptotal: 43.3556

```

可以得到最终总的损耗约为43.36 w。

## 5 参考文献

[1] Permanent magnet motor technology : design and applications