

# 内置式永磁交流伺服电动机弱磁最大转速到的计算

## Permanent magnet AC servo motor maximum speed to calculate the weak magnetic

王雪

大连光洋科技工程有限公司

**摘 要:** 内置式永磁交流伺服电动机由于其磁路结构,使 d 轴与 q 轴电感有较大差异,可以在控制时充分利用其磁阻转矩。基于其使 d 轴与 q 轴电感数值上的差异,通过弱磁控制可使其运行在较高转速。本文通过永磁交流伺服电动机的电压极限椭圆与电流极限圆的计算,提供了一个简易方法计算出弱磁控制最高转速,并采用 JMAG 软件进行了电感参数计算的校核,与实测值相比较,得到了较为准确的结论。

**关键词:** 内置式永磁交流伺服电动机、弱磁、最大转速、有限元分析

**Abstract:** Permanent magnet AC servo motor because of the magnetic circuit structure, the d axis and q axis inductance is different, can make full use of the reluctance torque control. The d axis and q axis inductance difference based on, through weak magnetic control can make the operation at high speed. According to the calculation of the voltage limited ellipse and the current limit of permanent magnet AC servo motor circle, provides a simple method to calculate the flux weakening control maximum speed, and checked the inductance parameter calculation by JMAG software, compared with the measured values, obtained a more accurate conclusion.

**Key words:** Analysis of permanent magnet AC servo motor, the weak magnetism, maximum speed, finite element

## 1 引言

内置式永磁交流伺服电动机(以下简称 PMSM)由于其具有高功率密度、高精度、高效率及其高速度广泛应用于机床、机器人及电动汽车行业<sup>[1]</sup>。在很多用途中,通常在短时需要将其转速运行于 3~5 倍额定转速运行,使被其驱动装置拥有更高的工作效率。然而,受逆变器直流侧最大电压和输出电流能力的限制,电动机的定子电压和电流存在极限值,影响了电机驱动系统在恒转矩工作时的最大转速及输出转矩范围。

本文研究在逆变器最大电压和电流控制下，如何使永磁交流伺服电动机在额定功率运行时提供最高转速并给出了最高转速的简易计算方法，并采用 JMAG 软件进行相关验算，与实测值相比较得出了结果。

## 2 弱磁控制基本理论

由于逆变器直流侧电压达到最大值后会引发电流调节器的饱和，为了获得较宽的调速范围，在基速以上高速运行时实现恒功率调速，需要对电动机进行弱磁控制。PMSM 弱磁控制的思想源自他励直流电动机的调磁控制，当他励直流电动机端电压达到最大电压时，只能通过降低电动机的励磁电流，改变励磁磁通，在保证电压平衡的条件下，使电动机能恒功率运行于更高的转速。也就是说，他励直流电动机可以通过降低励磁电流达到弱磁扩速的目的。对于 PMSM 而言，励磁磁动势因永磁体产生而无法调节，只能通过调节定子电流，即增加定子直轴去磁电流分量来维持高速运行时电压的平衡，达到弱磁扩速的目的。<sup>[2]</sup>

### 2.1 永磁同步电动机矢量控制的电压、电流轨迹分析

在弱磁高性能调速时，在不同的工作区域内，由于控制规律的不同，为了获得最优的控制效果，通常会选择不同的电流、电压矢量轨迹，因此，非常有必要去分析了解此时的电流、电压矢量轨迹。

#### 2.1.1. 电压极限椭圆

受逆变器输出电压的限制，PMSM 稳定运行时，电压矢量幅值为<sup>[1]</sup>：

$$u_s^2 = u_d^2 + u_q^2 \leq u_{\lim}^2 \quad (1-1)$$

又知当 PMSM 稳定运行时，且忽略定子电阻压降的情况下，电压方程可以化简为：

$$\begin{cases} u_d = -\omega_e L_q i_q \\ u_q = -\omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (1-2)$$

将式1-2代入式1-1 中可得：

$$(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_f)^2 = (u_{\lim} / \omega)^2 \quad (1-3)$$

式中  $u_{\lim} = u_{dc} / \sqrt{3}$  是定子端相电压， $u_{dc}$  为直流母线电压。当  $L_d \neq L_q$  时，为一椭圆方程。而

当  $L_d = L_q$  时，式1-2 可化简得圆心在  $(-\psi_f / L_d, 0)$  半径为  $u_{\lim} / (L_0 \omega)$  的圆方程：

$$i_q^2 + (i_d + \psi_f / L_0)^2 = [u_{\lim} / (L_0 \omega)]^2 \quad (1-4)$$

以椭圆方程为例，当电流调节器饱和后，定子端相电压为  $u_{\lim} = u_s$ ，此时转速  $\omega$  下对应的运行轨迹为式1-3 示  $dq$  坐标系下的椭圆，并称其为转速  $\omega$  下的电压极限椭圆。易知在一

定转速 $\omega$ 下，定子电流只能运行于该椭圆轨迹内。且随着转速 $\omega$ 的增大，电压极限椭圆会逐渐缩小<sup>[1]</sup>。

### 2.1.2. 电流极限圆

受逆变器输出电流和电机本身额定电流的限制，PMSM 稳定运行时，电流矢量幅值为：

$$i_s^2 = i_d^2 + i_q^2 \leq i_{\lim}^2 \quad (1-5)$$

由上式可以看出，电流矢量轨迹在dq坐标系下是以原点为圆心的圆，并称该圆为电流极限圆，如图 1-1 所示。电动机稳定运行时，定子电流矢量既不能超过电压极限椭圆，也不能超出电流极限圆，一定要在电压极限椭圆和电流极限圆内。如 $\omega_0 = \omega$ 时，电流矢量 $i_s$ 的范围被限制在阴影区域内。

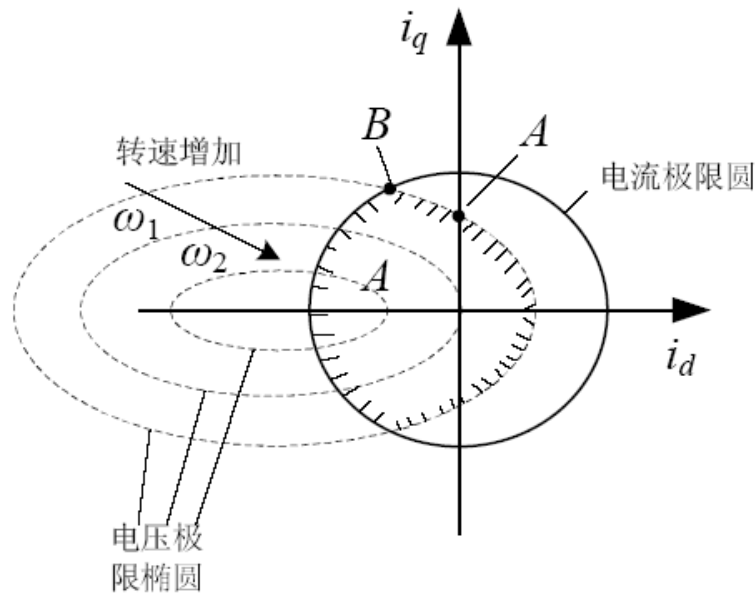


图 1-1 电压极限椭圆与电流极限圆

## 3 电机可达到的最大转速

当电动机运行于某一转速 $\omega_e$ 时，由电压平衡方程<sup>[1]</sup>：

$$u_s = \omega_e \sqrt{(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_f)^2} \quad (1-6)$$

可得到弱磁控制电流矢量轨迹<sup>[1]</sup>：

$$i_d = -\frac{\psi_f}{L_d} + \frac{1}{L_d} \sqrt{\frac{u_{\lim}^2}{\omega_e^2} - (L_q i_q)^2} \quad (1-7)$$

由式1-7可得到转速表达式为<sup>[1]</sup>：

$$\Omega = \frac{U_{\lim}^2}{p \sqrt{(\psi_f + L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2}} \quad (1-8)$$

## 4 最大转速计算

由以上分析可知，随着电机转速  $\omega$  的增加，电压极限椭圆会逐渐变小，极限情况下会变成一个点。此点的坐标为  $(-\psi_f / L_d, 0)$ 。电流极限圆的大小取决于电机的允许运行最大电流  $i_{\lim}$ ，当  $i_d = i_{\lim}$  且  $i_q = 0$  时，弱磁电流达到最大，永磁体将受到最大去磁，电动机达到最大转速  $n_{\max}$ 。

所以得出以下算法：

令  $i_d = -\psi_f / L_d$  且  $i_q = 0$ ，求得  $i_d$

$\psi_f$ ---永磁体产生的磁链  $L_d$ ---D 轴电感

得到  $\Omega$  的值。

例如： $\psi_f = 0.363$  采用 JMAG 软件计算得到  $L_d = 0.0027$  根据电机极限电压  $U_{\lim}$  用式 (1-8) 求得  $n_{\max} = 15300 \text{rpm}$

经过对该电机的试验，电机最大弱磁转速  $n_{\max} = 18000 \text{rpm}$ ，结果相差 15%。

## 6 结论

本文根据弱磁控制的基本理论，将内置式永磁交流伺服电动机的最大转速计算方法得出了简易计算方法，由于电感值计算的差异，导致最大转速计算有 15% 的差别，但能够满足生产应用的需要。

## 7 参考文献

- [1] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计. 北京: 机械工业出版社。
- [2] R. Krishnan. Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC motor Drives.