

永磁同步牵引电机反电势问题的研究

崔玲 林科振 胡太元 袁倩

(北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

摘要: 永磁同步电机因其效率高、调速范围宽等优势而在轨道交通应用得到日益广泛的应用。本文介绍永磁电机在轨道交通方面的应用情况,应用于列车上需要解决的问题,并特别对高反电势问题,进行了详细的说明。针对反电势问题,分析了目前相应的两种解决方法。最后从反电势对电机性能影响的角度,说明了不同反电势大小的永磁同步电机在轨道交通上的适用场合。

关键词: 永磁同步电机 轨道交通 反电势 惰行 电机性能 接触器 弱磁

1 永磁同步电机在轨道交通领域的应用

轨道交通上应用的牵引电机,已由最初的直流电机逐渐过渡到现在普遍应用的交流异步电机。近年来,随着永磁材料的发展,永磁同步电机在众多领域中得到广泛应用^[1]。因为不需要转子励磁,相比于异步电机来说,永磁电机重量更轻、体积更小、效率更高,且可以实现直接驱动与全封闭结构。

自上个世纪 80 年代以来,日本、欧洲等就开始了永磁同步电机在轨道交通中的应用研究。2007 年 4 月,法国阿尔斯通公司的 AGV 列车曾创下 574.8 km/h 的世界最高速,其中部分牵引电机即为功率等级 1000kW 的永磁同步电机。我国在这方面的研究起步较晚,但是近两年来已有所突破。中国南车、中国北车等单位已经开始永磁同步电机在城市轨道交通列车、高速列车、燃料电池列车等方面的应用,并研制出部分样车^{[2][3]}。

对于永磁牵引电机在轨道交通中的应用,尚有许多问题值得探讨。其中,永磁电机的反电势,尤其是惰行时候反电势问题尤为突出。本文详细分析了惰行时永磁同步牵引电机反电势会带来问题,论述了几种解决方案,同时讨论了永磁电机反电势对电机其他性能的影响,并针对适用于轨道交通不同应用场合的电机反电势选择进行了讨论。

2 惰行时永磁牵引电机高反电势的问题

对于列车来说,惰行是经常出现的一种运行工况。由于永磁体的存在,即使电机处于惰行情况下,永磁

体转子旋转磁场仍然会在定子绕组中感应出电动势,这个电动势就是我们所说的反电势。

其计算公式如下:

$$E_0 = n_p \omega_m \psi_f \quad (1)$$

上式中, E_0 、 n_p 、 ω_m 、 ψ_f 分别为电机反电势、极对数、机械角速度、转子磁链。反电势与电机转子磁链、机械角速度成正比。因而与永磁电机反电势直接相关的,就是转子磁链。在下面的讨论中,都通过分析永磁体转子磁链的影响,来反应永磁电机反电势的影响。

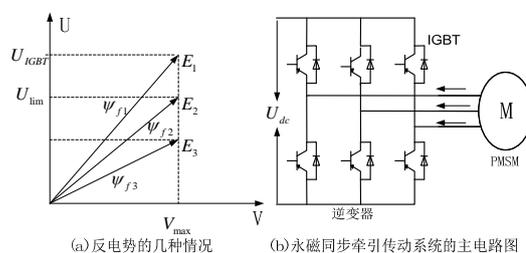


图 1 高反电势带来的问题

如图 1(a)所示,反电势随电机转速增大而增大,且不同磁链大小的电机反电势不同。 U_{IGBT} 、 U_{dc} 、 U_{lim} 分别代表逆变器元件的耐压值、逆变器直流侧电压、电压极限值; E_1 、 E_2 、 E_3 为大小值依次递减的反电势; ψ_{f1} 、 ψ_{f2} 、 ψ_{f3} 分别为三个反电势所对应的电机转子磁链值。惰行时,电流方向为永磁同步电机侧流向逆变器侧,如图 1(b)所示:

(1) 惰行时如果反电势为 E_1 , 大于 IGBT 的耐压值 U_{IGBT} , 那么 IGBT 将被烧毁;

(2) 如果电机反电势为 E_2 , 即大于电压限制 U_{lim} , 那么电流经逆变器的反并联二极管导通,将产生再生制动,这也是实际情况中所不允许的;

(3) 电机反电势为 E_3 时,不会出现上面的问题,

但是此时电机转矩不足,需要通过其他方法比如增大电机凸极率来满足转矩的要求。

3 惰行时反电势过高问题的解决方法

针对反电势的问题,现有两种解决思路:1、从永磁同步牵引电机设计的角度,根本上解决反电势的问题,主要以日本为代表。其策略是,在设计永磁电机之初,就降低电机反电势;2、从电机控制的角度,在电机运行过程解决高反电势的问题,主要以欧洲国家为代表。其策略是,通过在电机运行过程中的控制方法,来减小或者避免高反电势带来的不利^[1]。

3.1 从电机设计角度降低反电势

主要就是磁链设计的大小。磁链的设计宗旨为:

$$\psi_f \leq E_{m\max} / (n_p \omega_{m\max}) = U_{dc} / (\sqrt{3} n_p \omega_{m\max}) \quad (2)$$

上式中, $E_{m\max}$ 为永磁电机的反电势允许达到的最大值, $\omega_{m\max}$ 为电机最大机械角速度。

永磁同步电机的转矩公式为

$$T_e = n_p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

根据电机的转矩公式(3),永磁体磁链的减小,必然引起公式中的第一项,励磁转矩的减小。减小的这一部分电磁转矩,需要通过公式中的第二部分,也就是磁阻转矩来补偿。因而永磁体磁链较小的永磁电机,需要增加凸极率,来保证电磁转矩的大小,因而需要采用凸极率较高的内置式永磁同步电机^[1]。

3.2 从电机控制角度降低反电势或避免其影响

惰行时,若反电势过高,或者采取弱磁来降低反电势,或者加入接触器,防止过高反电势带来的不利影响。对于这两种方法,国内外的一些文献中,已对这个问题做过阐述。文献[5]中提到了当内埋永久磁铁时,惰行中会在磁场线圈上产生电压,所以,必须在磁回路中设置断路器;同样,文献[6]中也讲到,惰行时牵引电动机两段存在电压,故而当逆变器出现相间短路等故障需把列车送回时,可以在逆变器与牵引电动机之间设有接触器(称之为负载接触器),可以断开牵引电动机^[1];文献[7]中则提到了几种处理方法:既可以施加直轴去磁电流,降低转子磁场,从而减小惰行时的感应电压,使其低于逆变器直流侧电压;也可以在逆变器与永磁电机之间加接触器,起到隔离作用,防止产生再生制动;最简单的方法,是在电机设计之初就控制转子磁链值,使其惰行时不会产生危害^[1];

文献[8]也提到了通过施加直轴去磁电流的弱磁控制方法来降低惰行时的反电势的方法^[1]。上述文献只是简单的提解决方法,但是对于具体如何实施,却没有介绍。

3.3 永磁电机惰行时接触器闭合的带速重投问题

对于加接触器这种方法,必须考虑的一个问题是当需要重新牵引时,电机仍然具有一定的初速度,这个初速度对应一个反电势,因而闭合时,逆变器的输出电压必须考虑反电势的大小及相位问题。若是直接闭合,在闭合瞬间,逆变器输出的电压是配合给定的速度的电压,而实际的电机转速比给定的转速要小,这样,实际的反电势值也要比给定转速下的反电势值要小,根据电机的电压公式得出:

$$U - E_0 = \omega L_d i_d + \omega L_q i_q + i_s R_s \quad (4)$$

如果逆变器输出电压的相位和频率与当前反电势 E_0 的相位和频率不一致,那么因为电流突变而造成的电流冲击,会对逆变器与电机不利。因此,要保证系统安全、电流冲击最小,必须保证逆变器输出电压与反电势的对应关系,而且施加逆变器输出电压时,要注意电压必须缓慢增加,不能突变,否则仍然会引起电流突变。

根据接触器闭合瞬间的电机转速高低,可以分为两种情况来讨论:

(1)、闭合瞬间电机转速小于恒转矩区结束点的电机转速,即电机还没有进弱磁区,不需要进行弱磁控制;

(2)、闭合瞬间电机转速较高,仍然需要进行弱磁控制。

对于(1),只要解决接触器闭合瞬间逆变器的输出电压与当前电机反电势相位频率一致这个问题,就可以避免电流冲击;对于(2)这种情况,因为接触器闭合瞬间,电机转速仍然比较高,因而电机反电势也很大,而且反电势值超过了逆变器输出电压限值。此时若要闭合接触器,无法做到逆变器输出电压相位幅值与反电势的相位和幅值一致,或者只能做到逆变器输出电压的相位与反电势一致。

目前,对于永磁同步电机的带速重投问题,研究的文章比较少。虽然可以借鉴比较成熟的异步电机带速重投方法,但是异步电机不存在反电势的问题,因而永磁同步电机的带速重投,需要重新考虑。所以,研究永磁同步电机反电势的选择以及解决惰行时过高反电势带来的影响,就很有必要。

4 其他情况下永磁电机反电势的影响

反电势不仅仅在惰行时会对牵引传动系统产生影响，对电机的其他性能，比如电机功率因数，转折电流，弱磁控制等也有影响。因而在选择一台电机的时候，我们需要针对不同的适用条件，选择不同反电势的永磁电机，以达到更好的效果。具体到列车，则分为两种情况：一种是城市轨道交通，其运行速度不高，电机启停频繁；另一种是高速列车，电机需长时间运行于弱磁扩速区，启动与制动时间较少。因而我们分析不同反电势情况下的电机加速、匀速、制动时的能量消耗，从而为反电势的选择提供参考。

在分析之前，首先进行情况说明。电机加速时，运行于恒转矩区，采用最大转矩电流比控制；恒功率区，采用弱磁控制方法加速到运行速度，再匀速运行；减速有两种方式，惰行减速和制动减速。具体分析如下：

4.1 反电势对电机电流的影响

(1) 恒转矩加速区电流

列车上的牵引电机，全部采用转矩控制方式。若在电机恒转矩加速区，采取最大转矩电流比控制^[4]。

永磁同步电机的转矩公式为

$$T_e = n_p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (5)$$

$$\text{定子电流公式: } i_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (6)$$

根据上面两个公式，为求电流与转矩的关系，我们可以构造拉格朗日函数如下：

$$F = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} + \lambda \{ T_e - n_p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \} \quad (7)$$

由偏导数为零可以求出：

$$\begin{cases} T_e = n_p \left[0.5\psi_f i_q + i_q \sqrt{\psi_f^2 + 4i_q^2 (L_d - L_q)^2} \right] \\ i_q = \sqrt{\psi_f i_d / L_d - L_q + i_d^2} \end{cases} \quad (8)$$

已知一台永磁牵引电机，其额定功率为 15kW，额定频率 50Hz，额定电流 25A，额定转矩 95N.m，极对数 2，交直轴电感分别为 0.0085H 和 0.0025 H，额定磁链 0.69Wb。在牵引电机转矩恒定为额定转矩的情况下，不同磁链情况下的电流如下图 2 所示。可见，在恒转矩加速区，磁链越大，此区间电流越小。

对于列车来说，在制动减速区采用的是转矩控制方式，电机的电流因磁链不同而变化的情况，与恒转

矩区类似：即电流随磁链增大而减小。

(2) 恒功率弱磁区电流

恒功率区，电机转速较高，要在电压允许的范围

内达到较高转速，就需要进行弱磁扩速。

根据永磁同步电机的电压方程式

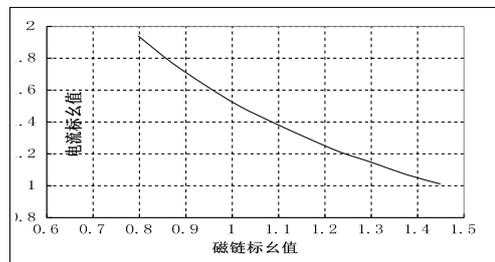


图 2 恒转矩区磁链与交轴电流的关系曲线

$$u = \omega \sqrt{(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_f)^2} \quad (9)$$

可得，当电压达到极限电压时，弱磁控制时候的电流矢量轨迹为

$$\begin{cases} (i_d + \psi_f / L_d)^2 + i_q^2 = (U_{lim} / L_d \omega)^2 \\ n_p \psi_f i_q + n_p (L_d - L_q) i_d i_q = P_e / \omega \end{cases} \quad (10)$$

根据公式 (10)，下图 3 为功率恒定为额定功率时，额定转速下的电机磁链与电机电流的关系。磁链越大，电机定子电流越大。可知，在转子磁链越小，所需要施加的直轴去磁电流就小，虽然此时交轴电流增大，但其增大程度要弱于直轴去磁电流的增大程度，因而电流仍然减小，所以电机的弱磁压力就小。转子磁链的大小，对弱磁控制影响较为直接^[1]。

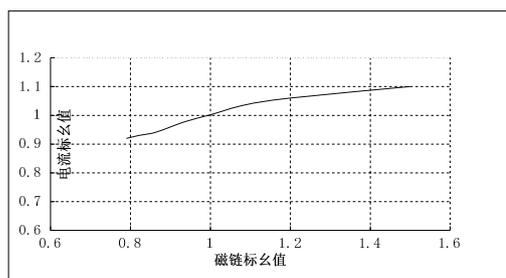


图 3 恒功率区磁链与电流的关系曲线

(3) 惰行减速区电流

惰行区分两种情况：惰行时反电势低于直流母线电压，高于直流母线电压。

若低于直流母线电压，则惰行时反电势对电流没有影响；

若高于直流母线电压，则需要施加负向直轴去磁电流来减小反电势。惰行时，所允许的最大反电势，必须要小于逆变器直流侧电压，因而

$$E_0 = n_p \omega_m \psi_f < U_{dc} \quad (11)$$

设施加的直轴去磁电流为 i_d' ，则

$$\begin{aligned} \omega(\psi_f - L_d i_d') < U_{dc} \\ i_{d\min}' = (U_{dc} - \omega\psi_f) / \omega L_d \end{aligned} \quad (12)$$

惰行区减速时，不同反电势在不同速度时需要施加的去磁电流大小如图4所示。

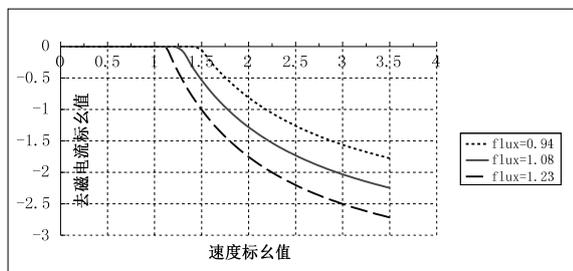


图4 惰行时不同磁链下施加的最小直轴去磁电流大小与转速的关系

4.2 永磁同步电机的损耗

永磁同步电动机损耗主要由定子铁耗 P_{fe} 、定子铜耗 P_{cu} 、杂散损耗 P_s 和机械损耗 P_{fw} 四个部分组成^[1]。因为电机的电流发生变化，因而相应与电流有关的损耗也要变化。

(1) 杂散损耗 P_s

$$P_s = (i_s / I_N)^2 p_{sN}^* P_N \times 10^3 \quad (13)$$

其中 p_{sN}^* 为电机的杂散损耗系数，可参考试验值或凭经验给定。

(2) 定子铜耗 P_{cu}

$$P_{cu} = m i_s^2 R_s \quad (14)$$

(3) 机械损耗 P_{fw} 参考同规格感应电动机的机械损耗，与电机的电流或者转子磁链 ψ_f 没有必然联系。

(4) 以硅钢片为例，按照 Bertotti 铁耗分立计算模型，不考虑集肤效应时，铁芯损耗可以用下式表达：

$$P_{fe} = P_h + P_{ec} + P_e = a f B_m^x + b f^2 B_m^2 + e f^{1.5} B_m^{1.5}$$

式中， P_{fe} 为铁耗[W/kg]； P_h 为磁滞损耗[W/kg]； P_{ec} 为经典涡流损耗[W/kg]； P_e 为附加损耗[W/kg]； f 为频率[Hz]； B_m 为磁密幅值[T]。

根据参考文献[11]中所得出的结论，一般情况下，单位铁损耗为^[5]：

$$\begin{aligned} p_{fe} = 0.0319 f B_m^{1.682} + \\ 1.494^{-4} f^2 B_m^2 + 1.435^{-8} f^{1.5} B_m^{1.5} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{而 } B_m = \text{const } E_s / f \quad (16)$$

$$E_s = \sqrt{(n_p \omega_m \psi_f - i_d \omega L_d)^2 + (i_q \omega L_q)^2}$$

综合上面式子可得，

$$P_h = f_1 (B_m^{1.682}) = f_2 (\psi_f^{1.682})^{[11]} \quad (17)$$

$$P_{ec} = f_3 (B_m^2) = f_4 (\psi_f^2) \quad (18)$$

永磁同步电机一般只考虑定子铁耗。当电机铁心中磁场交变频率较小时，铁心损耗的大部分由磁滞损耗所引起。随着磁场交变频率的增加，铁心涡流损耗的数值增加较快。当频率较高时，涡流损耗是电机铁心损耗的主要部分。计算铁耗时，简化和忽略了温度的影响。

4.3 反电势对电机损耗的影响

综上所述，在永磁电机的四类损耗中，杂散损耗，铜耗，铁心损耗三者，会受到永磁体磁链的影响。其中，杂散损耗以及铜耗，是永磁体磁链的二次方函数。

(1) 在恒转矩区，因为电机转速较小，频率较低，因而定子铜耗与杂散损耗成为损耗的主要部分，由上面的分析指导，电流随反电势增大而减小，因此可以得出结论，在恒转矩区，永磁体磁链越大，即反电势越大，电机损耗越小。虽然铁心损耗会随反电势增大而增大，但铁心损耗此时所占部分较小，同时，铁心损耗主要部分为磁滞损耗，由铁心损耗分离理论可知以及式(15)可知，磁滞损耗是电机磁密幅值的1.68次方函数，所以铁心损耗的增长明显低于前者；

(2) 在恒功率区，采用弱磁控制方式，永磁体磁链越大，所需要的弱磁控制电流越大，因而杂散损耗与铜耗都会更大，而铁心损耗在基速以上时，涡流损耗占主要部分，而涡流损耗则是电机磁密幅值的二次方函数，因而涡流损耗也随之增大，总结分析得出，恒功率弱磁区，永磁体磁链越大，反电势越大，电机损耗越大^[6]；

(3) 在惰行减速区，若惰行时反电势过高，则需施加直轴去磁电流来弱磁，因而损耗增大，若反电势较低，则不需要弱磁，电机只有机械损耗；

(4) 在制动减速区，情况与恒转矩区类似。结果与恒转矩区一致：即永磁体磁链越大，所需制动电流越小，制动过程中的能耗就越小。

4.4 反电势对电机转折速度的影响

根据电压公式

$$u = \omega \sqrt{(L_d i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_f)^2} \quad (19)$$

可得出,当电动机电压达到逆变器所能输出的电压极限时,即当 $u = u_{lim}$ 时,这便是恒转矩区的结束点速度,也就是转折速度

$$\begin{aligned} \omega &= u_{lim} / \sqrt{(L_d i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_f)^2} \\ &= u_{lim} / \sqrt{(L_d i_q)^2 + \psi_f^2} \quad (i_d = 0 \text{时}) \end{aligned} \quad (20)$$

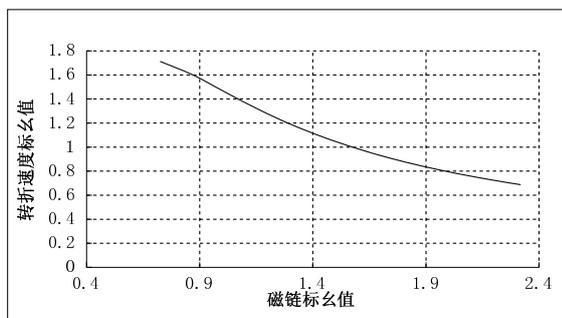


图5 恒转矩区磁链与转折速度的关系曲线

上图为电机负载转矩为额定转矩,电机直流侧电压恒定情况下的电机磁链变化对电机恒转矩区与恒功率区速度转折点的影响曲线。可知转子磁链越大,电机转折速度越

5 不同反电势永磁同步电机的适用场合

5.1 城市轨道交通列车

(1) 从惰行时反电势的影响考虑

城市轨道交通列车一般车速不高,因而惰行时电机的反电势不会超过逆变器元件的耐压值或者直流侧电压,不需要采取加接触器或者弱磁降压的方式,所以可以选择较高反电势的永磁电机;

(2) 从电机损耗角度考虑

对于城市轨道交通列车来说,其需要运行的速度并不大,而且针对城轨启停频繁的特殊情况,永磁电机运行于加速与减速的时间较高速列车更多,而反电势越大,启停过程中的能耗就越小,因此城轨车辆的永磁牵引电机,反电势尽量大一些;

(3) 从电机转折速度角度考虑

在轨道交通中,列车的牵引特性区间有恒转矩区与恒功率区。在这里,我们假设恒转矩区和恒功率区结束点的列车速度分别为 v_1 、 v_2 ,电机的弱磁区开始速度为 v_0 ,也就是电机的转折速度。当列车的牵引特性曲线不变时,电机弱磁区起始速度的高低,会对整个牵引传动系统产生影响。一般情况下,电机弱磁区起始速度越大,也就是牵引电机的反电势越大,牵引电机的质量就越小;但是此时,恒转矩区电流也会增大,这对主电路中变流器的要求更加严格^[6]。

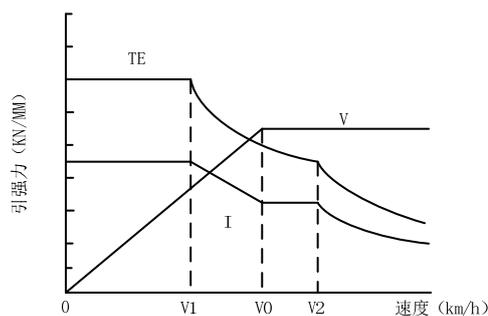


图6 列车牵引特性曲线

对于城市轨道交通列车,可以选择反电势较大,即转折速度较小的永磁电机,启动电流较小,因而电机的转矩裕量更大,适合于城市轨道交通需要灵活频繁启停的特点。

5.2 干线高速列车

(1) 从惰行时反电势的影响考虑

干线高速列车在惰行时,电机转速仍然较高,此时若电机转子磁链仍然较大,则反电势过高,会对主电路带来不利影响;即便此时采取弱磁方法降低反电势或者加接触器隔离逆变器与牵引电机,前者会降低系统效率,后者则影响系统安全性与可靠性,且增加牵引传动系统重量。因而一般选择反电势较低的永磁同步电机;

(2) 从电机损耗角度考虑

对于高速列车来说,列车需要长期运行较快速度,于此对应的永磁同步电机需要运行于弱磁区域。由上面的结论可知,永磁体磁链越大,电机的弱磁压力越大,所需要的去磁电流越大,能量消耗越大。因此应用于高速列车上的永磁牵引电机,永磁体反电势选择小一点更好;

(3) 从电机转折速度角度考虑

由5.1中对转折速度的分析可知,对于高速列车,可以选择反电势较小,转折速度稍大的永磁同步电机,可以减小电机质量,从而使列车整体的质量降低。

根据上面的分析,可以得出结论,城轨交通选择反电势较高的永磁电机,高速列车选择反电势较低的永磁电机。

6 结论

综上所述,在实际应用过程中,需要综合考虑永磁电机本身特点及所应用的场合,做出合理的选择,使永磁同步电机能够最大的发挥其优势。同时,我们应该加快永磁同步牵引传动系统研究的脚步,以使永磁同步电机这种高效节能的电机能尽快在轨道交通中

得到广泛应用。

参考文献

- [1] Koichi Matsuoka. Development Trend of the Permanent Magnet Synchronous Motor for Railway Traction [J], IEEE Trans 2007; 2: 154-161.
- [2] 许峻峰,冯江华.永磁同步传动系统的应用概况.大功率变流技术[J],2010;1:38-43.
- [3] 锥焕骥,李伟宏,李向庆.XQG45-600P 新能源燃料电池轻轨车.铁道机车车辆[J],2011,31(1):53-55.
- [4] 冯江华.轨道交通永磁同步牵引系统研究.机车电传动[J],2010(5):15-21.
- [5] T Klockow 等.永久磁铁励磁的牵引电动机,变流技术与电力牵引[J], 2003(5):37-44.
- [6] 近藤稔,永磁同步电动机在铁道机车动车上的应用.变流技术与电力牵引[J],2003(1):1-5.
- [7] 柯以诺.永磁同步电机传动系统在电动车辆上的应用.大功率变流技术[J],2009(5):31-37.
- [8] 冯江华,桂卫华,符敏利等.铁道车辆牵引系统用永磁同步电机比较.铁道学报[J], 2007(10): 111-117.
- [9] 陈荣.永磁同步电机控制系统[M].北京:中国水利水电出版社,2009年.
- [10] 张鹏.永磁同步电动机弱磁调速控制方法的研究.[博士学位论文],天津:天津大学,2007.
- [11] 唐任远.现代永磁电机——理论与设计[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [12] 崔杨,胡虔生,黄允凯.任意频率正弦波条件下铁磁材料损耗的计算.微电机[J],1-3.
- [13] 郭伟,张承宁,车用永磁同步电机的铁耗与瞬态温升分析,电机与控制学报[J],2009(1):83-87.
- [14] 丁荣军.交流传动机车牵引特性曲线与变流器——牵引电机系统的匹配.机车电传动.1[J],1999(6).