基于 Jmag 的汽车驱动电机退磁特性分析

The Demagnetization Analysis of Vehicle Drive Motor Based on Jmag

林展汐 曾金玲 杨静参 郭守仑 王金昊
中国第一汽车股份有限公司新能源开发院，长春，130011

摘 要： 以一款电动汽车驱动用表贴式永磁同步电机作为研究对象，运用数值分析方法对其退磁特性进行分析。此外，提出了基于 Jmag 软件的永磁体退磁评价参数，并借助评价参数，考核不同工况下该驱动电机永磁体退磁情况。最后，本文论述了永磁体发生退磁的主要影响因素，并以此作为电动汽车驱动用表贴式永磁同步电机的设计依据。

关键词： 表贴式永磁同步电机；解析分析；退磁分析；退磁影响因素

Abstract: Analytical models of a kind of electric vehicle drive surface-mounted permanent-magnet synchronous motor (SPM) are built in this paper. Firstly, the demagnetization performance of the motor is analyzed by means of analytical. Secondly, the evaluation parameters of demagnetization based on Jmag Designer are proposed. Meanwhile, the demagnetization situations of the permanent magnet under different working conditions are evaluated by these parameters. Finally, in this paper, the main demagnetization factors are discussed and regarded as the reference for the design of SPM.

Key words: SPM, Analytical analysis, Demagnetization analysis, Demagnetization factors

1. 引言

表贴式永磁同步电机因其高功率密度、高效率、调速范围大等优势广泛应用在电动汽车驱动电机领域。但是由于电动汽车恶劣工况，其永磁体会因受到高温和退磁磁场作用发生不可逆退磁，严重降低永磁体性能进而使得电机转矩性能变差，甚至会造成电机报废等严重后果。不可逆退磁会大大影响永磁同步电机的可靠性。此外，表贴式永磁同步电机因其永磁体直接受到气隙磁场作用，更容易发生不可逆退磁。因此，伴随着电动汽车驱动电机的大量应用，运用有限元方法评价永磁体退磁情况非常重要。如何探究永磁体退磁影响因素进而将此作为永磁同步电机设计依据成为研究的热点。

相比于其它的电机电磁 CAE 软件，Jmag Designer 软件中永磁体材料退磁曲线数据齐全，并且可以精确计算在磁场作用下永磁体内部多种参数。此外，考虑温度、退磁磁场作用，结合永磁材料退磁曲线，可以模拟出永磁同步电机在退磁前后的工作特性。因此，一方面通过 Jmag 软件建立电机模型，结合电动汽车实际环境与工况，对永磁体进行退磁校核；另一方面，设定温度、绕组电流幅值以及相位等，模拟出永磁体退磁情况，进而为永磁体设计提供依据。由于退磁试验的特殊性，可以通过 Jmag 软件进行 CAE 分析实现试验成本的降低与周期的缩短，为汽车驱动电机退磁特性分析提供技术支撑。

2. 驱动电机用永磁体材料特性分析

钕铁硼永磁材料具有高剩磁密度、高磁能积、高矫顽力的特点，凭借优良的磁性能被广泛应用于电动汽车驱动电机。但是其不足之处在于居里温度较低，高温情况下受到强退磁磁场作用会发生不可逆退磁。

钕铁硼永磁材料受到磁化之后即可保持恒定磁性，其中磁感应强度 B 和磁场强度 H 为表征永磁材料磁性能的重要参数，两者之间的关系可以用 $B=\mu H$ 表示。将铁磁材料循环磁化，可以得到一个闭合回线 $B=f(H)$。这个闭合回线中，B 的变化滞后于 H 的变化，称为磁滞回线。对于永磁材料，退磁曲线为磁滞回线位于第二象限中的曲线部分，用于描述其退磁特性如图 1。从图中可以看出，当磁场强度为 0 时，磁感应强度不为 0，此时 $B=B_r$ 称为剩余磁感应强度，单位 T。当磁感应强度为 0 时，磁场强度为一负值，此时 $H=-H_c$ 称为矫顽力，单位 A/m，说明需要对永磁材料施加一反向磁场才能使 B=0。其中，退磁曲线中会存在一膝点，称为退磁拐点。退磁拐点上方区域，回复曲线与退磁曲线 $B=B_r+\mu_0\mu_r H$ 重合，μ_r 为相对回复磁导率；退磁拐点下方区域，退磁曲线为 $B=B_r'+\mu_0\mu_g H$，μ_g 为下垂磁导率，新的回复曲线与原退磁曲线不重合，其中 μ_g 远大于 μ_r，永磁体性能下降，剩余磁感应强度降低。此外，退磁曲线中还有表征膝点位置弧度的参数。因此，只要可以准确得到上述参数，在 Jmag 软件中就可以准确得到永磁材料退磁曲线，进而对永磁材料的退磁特性进行分析。

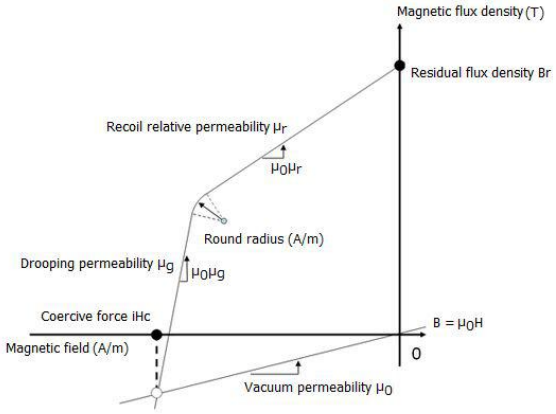
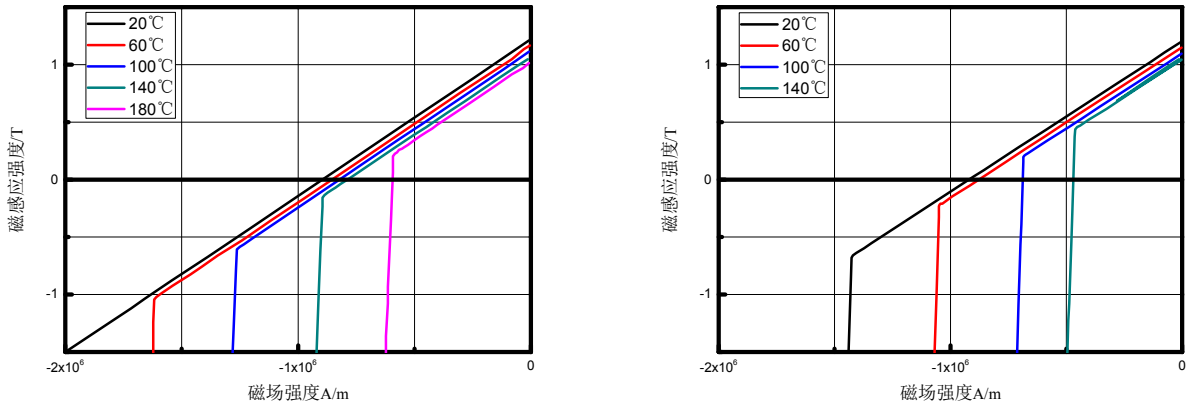


图 1 永磁体材料退磁曲线示意图

退磁曲线的各参数主要与永磁材料牌号和温度有关系，图 2 为 NEOMAX-35EH 和 NEOMAX-35H 各温度下的退磁曲线。同一材料，随着温度的升高永磁材料更容易发生不可逆退磁，其退磁拐点上移。高温情况下由于 35EH 的矫顽力大于 35H，其抗退磁能力也更强，因此同一温度下，其退磁拐点的磁场强度的绝对值更大，这说明 35EH 需要施加更大的退磁磁场才能使永磁体发生退磁。



(a) NEOMAX-35EH 各温度退磁曲线　　(b) NEOMAX-35H 各温度退磁曲线

图 2 永磁体材料退磁曲线

退磁曲线和回复线表征的是永磁体自身特性，通过解析方法可以计算外磁路的合成比磁导线，两种曲线的交点则为永磁体工作点。因此，计算退磁拐点比磁导值，将其作为永磁体退磁临界值，若比磁导小于临界值说明工作点位于退磁拐点以下，永磁体已发生退磁。基于此原理，比磁导值是衡量永磁体是否发生退磁的重要依据。

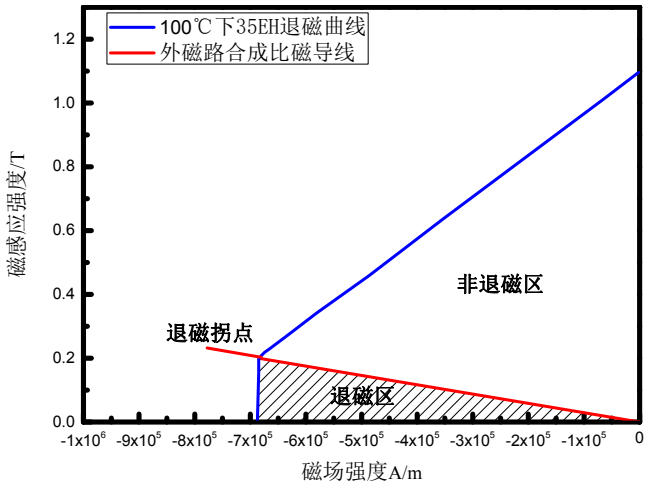


图 3 永磁材料比磁导曲线

3. 某电机永磁体退磁情况分析

运用 Jmag 软件建立某驱动电机有限元模型，永磁材料选取 NEOMAX-35H，永磁体工作温度为 100℃。通过控制三相绕组线圈图中的 S1-S6 开关将电机运行周期分成三个阶段：第 I 阶段：通入正常工作电流，持续 1 个电周期；第 II 阶段：通入 1.2 倍退磁电流，持续 1 个电周期；第 III 阶段：恢复正常工作电流，持续 1 个电周期。

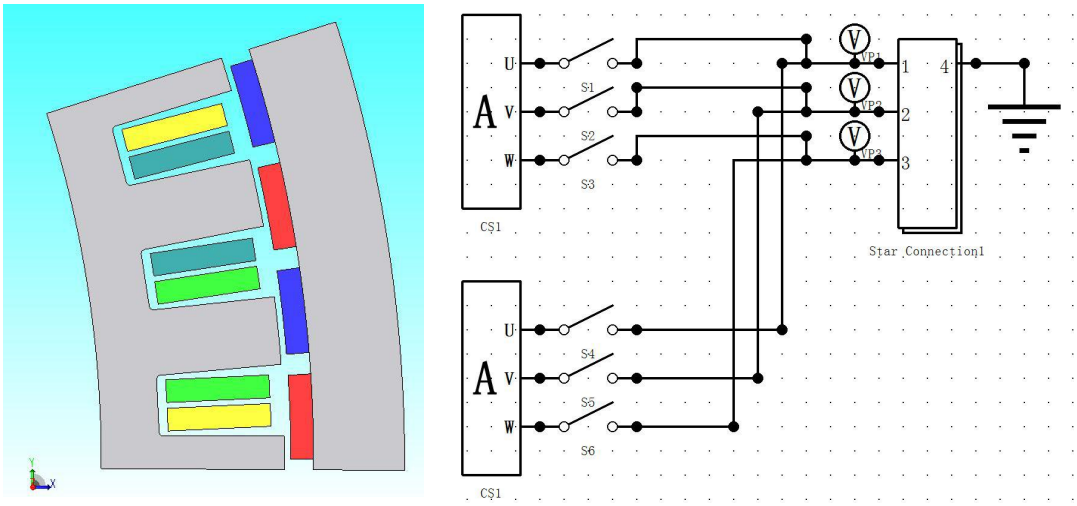
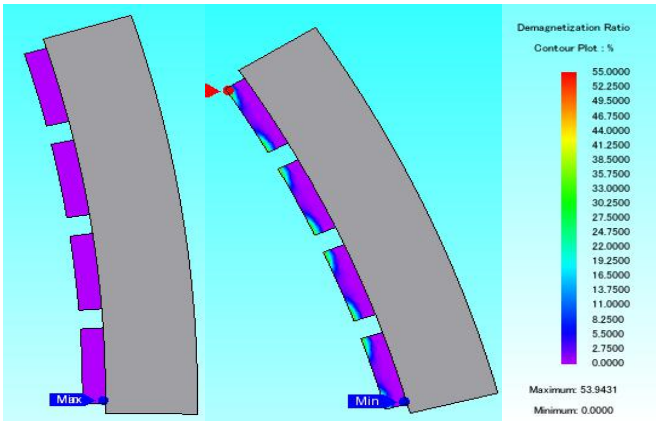


图 4 电机全模型图及三相绕组线圈图

3.1 退磁评价参数 1——退磁率

退磁率是 Jmag 软件中评价永磁材料是否退磁最直观的参数，通过观测退磁率云图可以看出永磁材料发生退磁的区域和退磁程度，由图中可以看出 I 阶段，永磁体全区域的退磁率均为 0，说明电机

在正常工作电流作用下没有发生退磁。在 II 阶段，可以看出永磁体区域有部分区域发生退磁，靠近气隙以及永磁体两侧发生退磁更加严重。



(a) I 阶段　　(b) II 阶段

图 5 永磁体退磁率云图

3.2 退磁评价参数 2——转矩波形

当永磁体发生退磁后，其磁性能会降低，进而造成输出转矩的下降以及稳定性，因此通过比较前后的输出转矩波形，就可以评价永磁体是否发生退磁。

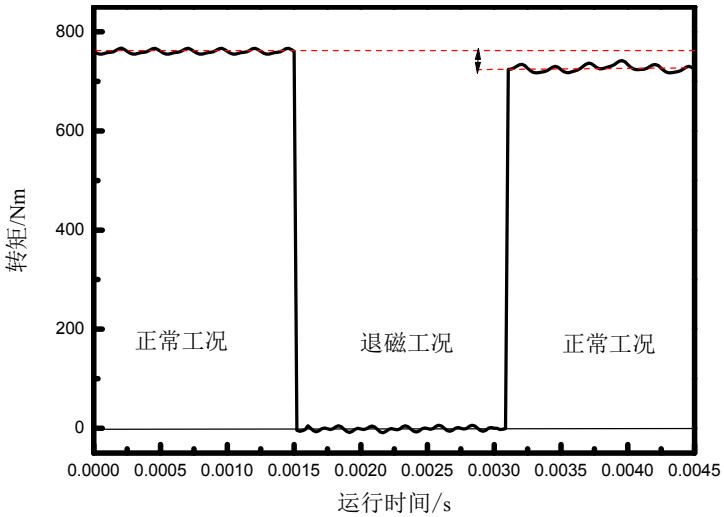


图 6 三个阶段转矩波形

由图中可以看出，I 阶段转矩平均值为 759.7Nm，III 阶段转矩平均值为 753.8Nm，转矩下降了 5.9Nm，说明永磁体已发生退磁。

3.3 退磁评价参数 3——空载反电势

根据空载反电势计算公式：

$$E_0=4.44fK_{dp}N\Phi_{\delta 0}K_{\phi} \quad (3\text{-}1)$$

式中电机转动频率 f、绕组因数 Kdp、电机绕组匝数 N、气隙磁通波形系数 KΦ均与电机参数有关，E0 正比于空载主磁通 Φδ0。永磁体发生退磁后，其工作点会发生偏移，因此其产生的空载主磁通 Φδ0 也会发生变化，进而影响空载反电势 E0，因此，通过评价前后的空载反电势，可以间接的评价永磁体退磁情况。

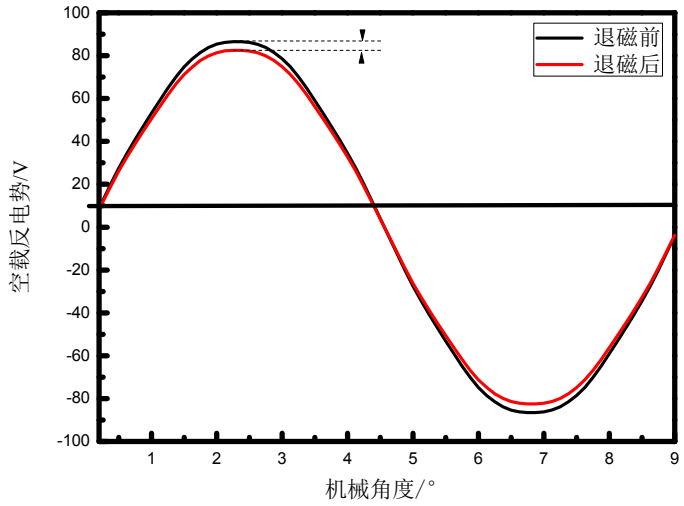


图 7 退磁前后的空载反电势波形

由图 7 可以看出，通过判断退磁前后空载反电势波形的不一致，可以确定永磁体发生了不可逆退磁。

3.4 退磁评价参数 4——比磁导

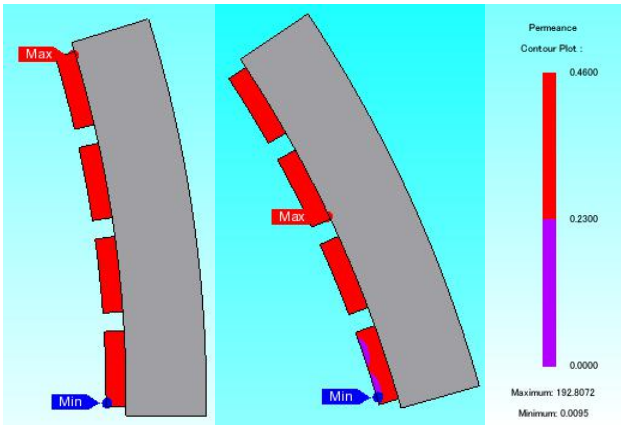
根据等效磁路分析可知，永磁体外界磁路的比磁导计算公式为

$$P_n=\frac{Bm}{Hm} \qquad (3\text{-}2)$$

其中 Bm 和 Hm 分别为退磁拐点处的磁感应强度和磁场强度。由于 Jmag 软件中的比磁导系数采用的是高斯单位制，需要将式 3-2 进行修正，得到式 3-3。

$$P_n=\frac{1}{\mu_0}*\frac{Bm}{Hm} \qquad (3\text{-}3)$$

通过以上公式计算工作点位于退磁拐点时的临界比磁导值，当比磁导小于临界值时说明该区域发生退磁，由图 8 可以看出 II 阶段永磁体靠近气隙附近发生了退磁。



(a) I 阶段　　(b) II 阶段

图 8 永磁体比磁导云图

3.5 退磁评价参数 5——永磁体工作点

永磁体工作点代表永磁体在退磁曲线中的位置，通过判断工作点与退磁拐点位置和回复线的位置相对关系，可以评价永磁体退磁情况。分别在永磁体靠近气隙和远离气隙的位置选取典型点 1 和典型点 2。

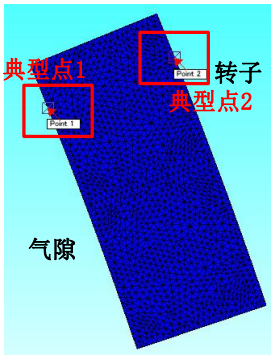
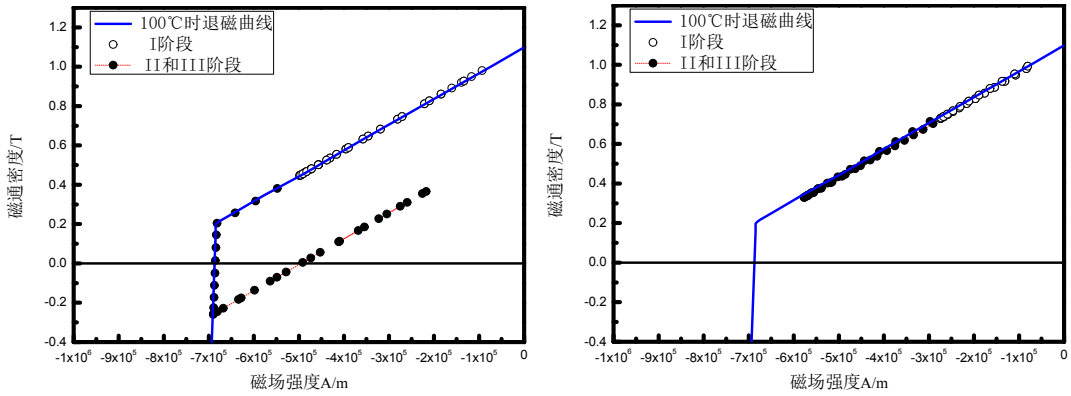


图 9 永磁体比磁导云图

由图 10(a)可以看出，永磁体经过退磁磁场作用之后，典型点 1 的工作点并没有与原回复线重合，而是沿着新的一条退磁线分布，说明典型点 1 发生不可逆退磁。反观图 10(b)，三个阶段的的工作点集中在同一条退磁线，且最低工作点没有低于退磁拐点，说明典型点 2 没有发生不可逆退磁。



(a) 典型点 1　　(b) 典型点 2

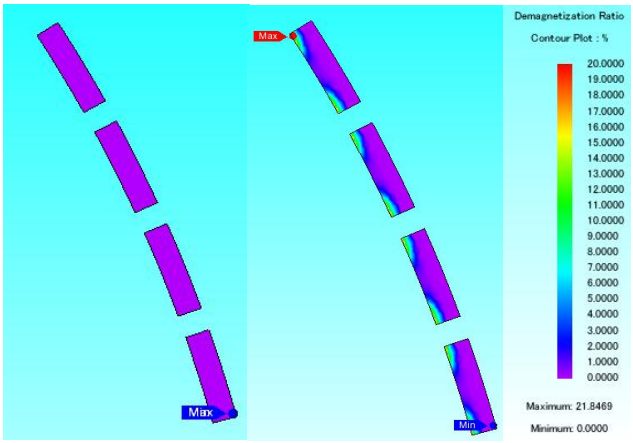
图 10 永磁体退磁曲线和典型点工作曲线

4. 某电机退磁影响因素分析

永磁体是否发生退磁，最直接的决定因素就是最低工作点与退磁拐点之间的相对位置。因此，从影响工作点位置与退磁拐点位置出发，就可以将退磁影响因素逐层分解。影响永磁体退磁拐点位置的因素包括永磁体牌号和永磁体工作温度。影响永磁体工作点位置的因素分为退磁磁场作用和永磁体自身尺寸。

4.1 永磁体牌号

表征永磁材料内在磁性能的曲线称为内禀磁化曲线。内禀磁感应强度 Bi 与磁场强度 H 之间的关系 Bi=f(H)。其中当 Bi 为 0 时，H=Hci 称为内禀矫顽力。Hci 的值反映永磁材料抗去磁能力。不同永磁体牌号对应的内禀矫顽力不同，其抗退磁能力也不同。将驱动电机中的永磁材料由 NEOMAX-35H 换成 NEOMAX35-EH，施加相同退磁磁场作用，对电机退磁性能进行分析。



(a) NEOMAX-35EH　　(b) NEOMAX-35H

图 11　同一时刻不同牌号永磁体退磁率云图

由图 11 可以看出，NEOMAX-35H 永磁体边角部分发生了退磁，而 35EH 永磁体没有发生退磁，说明提高了牌号，提高了永磁体内禀矫顽力，增强了永磁体抗退磁能力，提高了永磁体退磁拐点临界值，在相同退磁磁场作用下，规避了永磁体退磁风险。从三个阶段的转矩波形也可以看出，退磁前后转矩的平均值均为 767Nm，NEOMAX-35EH 没有发生不可逆退磁。

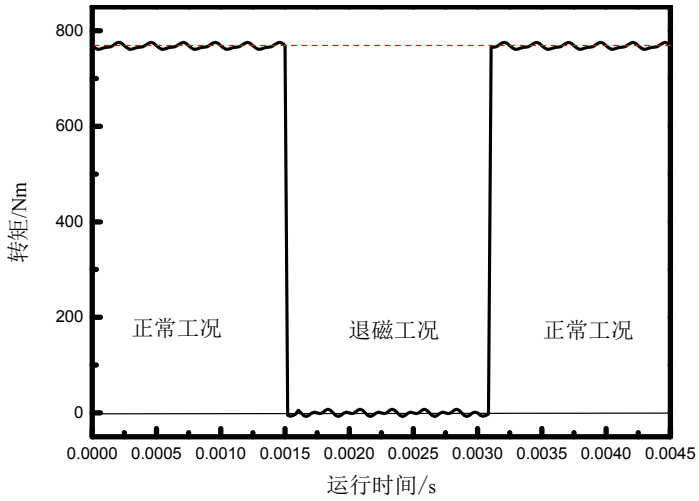
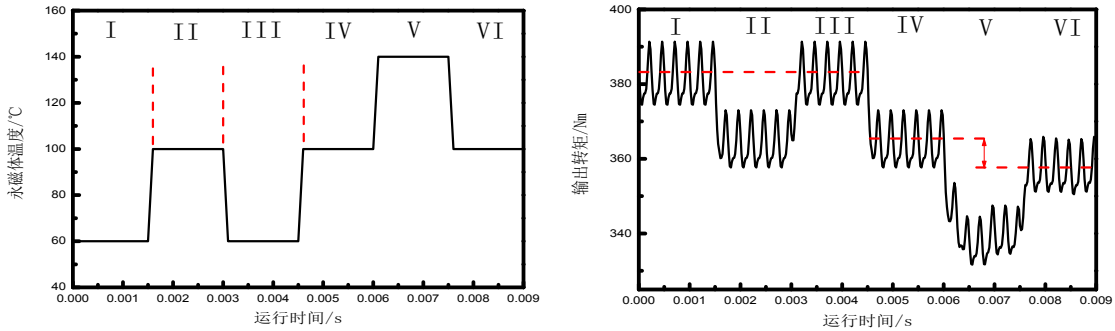


图 12　三个阶段转矩波形

4.2 永磁体工作温度

随着永磁体工作温度的升高，磁性能逐步降低，升至某一温度时，磁化强度消失，该温度称为该永磁材料的居里温度。钕铁硼永磁材料居里温度低，随着工作温度的升高，其抗退磁能力也会大大降低，永磁体容易发生不可逆退磁。

本文基于 Jmag 有限元分析模型，在电机输入电流为 300A 情况下，在六个电周期内分别加载不同的永磁体工作温度，如图 13 所示。在整个变化周期，I 阶段和 III 阶段转矩平均值没有发生变化，说明永磁体经过 100℃工作温度后，没有发生不可逆退磁。IV 阶段输出转矩平均值 365Nm，V 阶段工作温度上升至 140℃，VI 阶段工作温度回到 100℃，其输出转矩平均值下降到 355Nm，下降了 3%，说明此时永磁体已经发生了不可逆退磁。



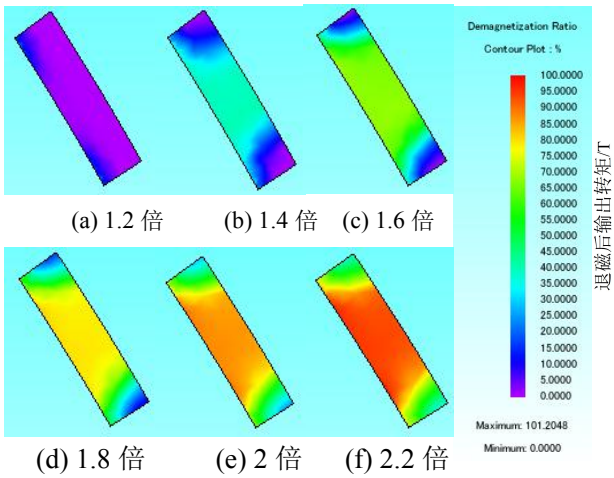
(a) 驱动电机永磁体工作温度变化曲线　　(b) 驱动电机输出转矩变化曲线

图 13 驱动电机输出转矩随温度变化曲线

4.3 退磁磁场

永磁体退磁与否与退磁磁场的大小和方向息息相关，而退磁磁场除了与定子绕组匝数相关以外，还与退磁电流的幅值和相位有关。

将电流相位调整至 90°，分别通入 1.2 倍、1.4 倍、1.6 倍、1.8 倍、2 倍、2.2 倍退磁电流，分析永磁体退磁情况。



(a) 1.2 倍　(b) 1.4 倍　(c) 1.6 倍

(d) 1.8 倍　(e) 2 倍　(f) 2.2 倍

图 14 不同退磁电流下退磁率云图

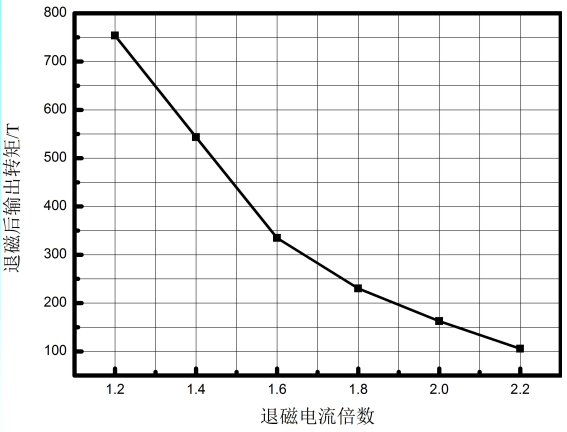
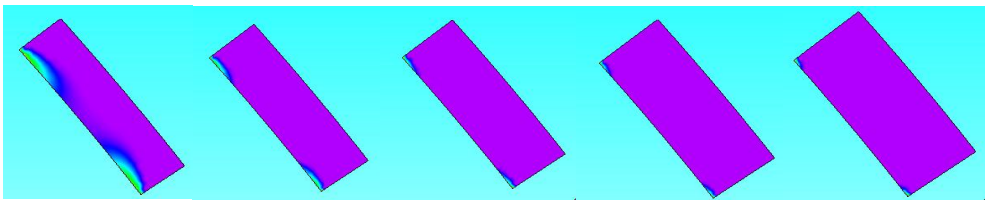


图 15 退磁转矩随电流变化曲线

由图 14、15 可以看出，随着退磁电流的增加，永磁体退磁面积与退磁程度也随之增加。退磁后的输出转矩也随着退磁电流的增加而减小，电机的电磁性能也随之降低。

4.4 永磁体自身尺寸

永磁体的厚度影响电机直轴方向的磁路结构，改变外磁路和永磁体工作点位置，进而导致永磁体发生不可逆退磁。相同温度、相同退磁磁场作用下，改变磁钢厚度，对驱动电机的退磁特性进行分析。



(a) 3mm (b) 3.5mm (c) 4mm (d) 4.5mm (e) 5mm

图 16 退磁率分布云图随磁极厚度变化曲线

由图 16、图 17 可以看出，随着磁极厚度的增加，永磁体区域内的退磁区域在减小，其退磁前后输出转矩的差值也在减小。当磁极厚度低于 4mm 时，根据上述结果可以看出，永磁体发生了不可逆退磁。磁极厚度为 4mm 时，两者的差值可以忽略不计，永磁体发生不可逆退磁风险较小，建议将 4mm 及以上作为磁极厚度设计值。

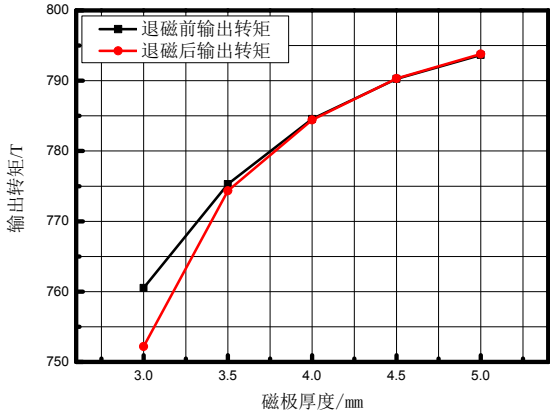


图 17 退磁前后输出转矩随磁极厚度变化曲线

在设计永磁体时，要充分考虑永磁体退磁情况。当工作温度与退磁磁场确定之后，如果永磁体厚度过薄会有永磁体退磁的风险，如果过厚，会造成材料的浪费以及扩速能力的削弱。因此，借助 Jmag 有限元软件可以很好地找到永磁体厚度的最优值，为电机设计提供理论指导。

5 结论

本文以电动汽车用驱动电机为例，采用解析方法辅助分析相关参数，利用 Jmag Designer 建立表贴式永磁同步电机有限元模型，先后分析得到了基于 Jmag 的汽车驱动电机的退磁评价参数。最后，借助 Jmag 软件分析结果，提出了永磁体退磁的影响因素，并为电机永磁体设计提供理论帮助。

6 参考文献

[1] 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.
[2] 汤蕴璆. 电机学[M]. 北京：机械工业出版社, 2011.
[3] 曾金玲. 电动汽车用永磁同步电动机的退磁特性分析研究[J]. 汽车技术 2012.
[4] 范国栋. 永磁同步电机内永磁体退磁研究[D]. 山东大学. 2013.