

新能源汽车永磁同步电机系统标定方法及实现

赵飞翔, 王平来, 任 华, 赵 悦

(中国重型汽车集团有限公司汽车研究总院, 山东 济南 250000)

摘 要: 电机系统是新能源汽车的主要动力源, 电机系统性能直接影响整车经济性、驾驶感受等。扭矩的准确性以及系统效率的优化依赖于电机与电机控制器的准确标定, 通过分析电机控制器的扭矩控制框图, 针对标定过程中影响扭矩控制准确性及系统稳定性的因素进行了分析, 确定了电机控制器的标定内容和标定方法, 通过搭建的测试台架完成了电机与电机控制器的系统标定。通过不同转速及扭矩下的控制测试, 验证了标定方法的有效性。

关键词: 永磁同步电机系统; 新能源汽车; 台架标定; 扭矩控制

中图分类号: U 469.72 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)07-0068-06

doi: 10.12177/emca.2020.045

Calibration Method of Permanent Magnet Synchronous Motor System Used in New Energy Vehicles and Its Implementation

ZHAO Feixiang, WANG Pinglai, REN Hua, ZHAO Yue

(Automotive Research Institute, China National Heavy Duty Truck Group Co., Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: The electric drive system is the main power source of new energy vehicles. The performance of the electric drive system directly affects the vehicle's economy and driving experience. The optimization of torque control accuracy and system efficiency depends on the accurate calibration of the motor and the motor controller. The torque control block diagram of the motor controller is analyzed. The factors affecting the accuracy of the torque control and system stability during the calibration process are analyzed. The calibration content and calibration method of the motor controller are determined. The system calibration of the motor and the motor controller is completed through the built test bench. The effectiveness of the calibration method is verified by control tests at different speeds and torques.

Key words: permanent magnet synchronous motor system; new energy vehicle; bench calibration; torque control

0 引 言

电机系统是新能源车辆的重要动力来源。对于纯电车辆而言, 电机系统作为唯一的动力装置, 直接影响整车的动力性、经济性、NVH 性能等^[1-3]。电机系统主要包含驱动电机和电机控制器。驱动电机是机电转换装置, 将三相交流功率转换为机械功率输出, 一般采用同步电机或异步电机。同步电机以其高效率和高功率密度等特点在国内新能源车辆中应用广泛^[4-5]。电机控制器

采集电机转子位置和三相电流, 控制电机产生期望的 d 轴和 q 轴电流, 使电机输出期望扭矩的同时保证效率最优化和外特性曲线的输出^[4]。对于不同的电机, 不同转速、母线电压、期望扭矩条件下对应的 d 轴和 q 轴电流也不同, 为了保证扭矩输出准确性、系统效率和扩速区间满足要求, 电机系统产品释放之前, 需进行电机与控制器的匹配标定, 获取到电机、传感器特性或 MAP 后, 固化至控制器软件中, 满足规范要求及使用标准。

如果电机与控制器的标定不准确, 在弱磁区

收稿日期: 2020-03-23; 收到修改稿日期: 2020-04-24

作者简介: 赵飞翔(1987—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为新能源电机控制。

域时,在动力电池电压较低条件下电机无法满功率输出或降低峰值功率持续时间,影响了整车加速时间及最大爬坡度等动力性参数,同时在极限电压边界时易引起电流闭环系统稳定性变差,增加电流中的高次谐波成分,恶化系统 NVH 性能;在最大转矩电流比(MTPA)区域,则会使电机系统的效率偏低,整车应用时能耗升高,缩短了整车续航里程^[7]。因此,电机电控匹配标定的准确性对电机系统的台架及整车性能极为重要。

本文从车用永磁同步电机(PMSM)控制框架入手,通过分析电机在运行过程中的电流和电压限制条件,引入了电机机械特性点与 d 、 q 轴电流坐标点的对应关系,说明了电机系统的主要标定内容。通过分析电机系统标定中的电流采样延迟和电压执行延迟,说明了延迟补偿的必要性。逐一对电机电控的标定内容进行了原理和实现过程的详细阐述,并在测功机台架中进行了试验验证。结果表明,本文提出的标定方法可以对旋变零点

及电流特性进行准确标定,应用标定结果后,电机控制器可实现对电机输出扭矩的准确控制。

1 电机系统的标定内容

基于转子磁场定向的 PMSM 扭矩控制框图如图 1 所示^[1]。包含电流解析模块、电流调节模块、Park 变换、反 Park 变换、Clarke 变换、电压调制模块、旋变解析模块、转速计算模块等。其中,旋变解析模块的匹配多集中在硬件设计环节中。驱动电机与电机控制器的软件匹配标定的大部分工作集中在电流解析模块。电流解析模块根据扭矩指令、电机转速、母线电压的变化实时计算出 d 、 q 轴电流指令,计算过程可以使用基于电机特性参数的公式,也可以使用三维或二维 MAP。目前常用的方法是以扭矩指令、电机转速、母线电压为输入的三维 MAP。该 MAP 直接决定了电机的扭矩控制性能,也是电机与电机控制器的标定重点,需受到约束条件的限制。

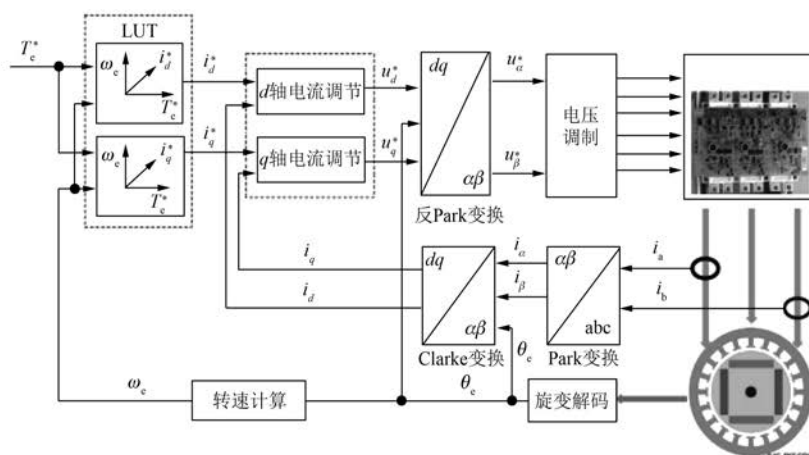


图 1 电机扭矩控制框图

1.1 电流限制

电机在设计过程中已定义电机最大电流及可持续的时间,工作电流过大导致电机过热,会对永磁体及定子绕组产生不可逆损害。控制器在开发过程中也会定义最大电流,以保证 IGBT、母线电容等关键功率器件的使用寿命。因此电机和控制器的电流会受到最大电流的约束,其数学表达式^[2]为

$$i_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq i_s^{\max} \quad (1)$$

d 、 q 坐标系下的电流矢量图如图 2 所示。当

d 、 q 轴电流满足约束关系时,定子电流矢量在 i_d - i_q 坐标系内的分布区域是以零点为圆心,以 $i_s^{\max}$ 为半径的圆,即图 2 中的电流限制圆曲线。电机的峰值扭矩一般出现在电流极限圆上,为图 2 中 E 点的位置。

1.2 电压限制

同步电机在转子磁场定向条件下的电压电流满足以下关系:

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \quad (2)$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e \psi_f + \omega_e L_d i_d \quad (3)$$

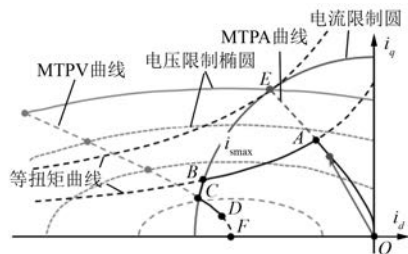


图2 dq坐标系下的电流矢量图

对于电机控制器而言,可输出的三相电压最大值受直流母线电压的影响,其数学表达式^[3]为

$$u_s^{\max} = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} < u_{DC} / \sqrt{3} \quad (4)$$

将式(2)和式(3)代入式(4),忽略稳态工况下的定子压降及电感压降,可得:

$$(i_d + \psi_f / L_d)^2 + (L_q / L_d)^2 i_q^2 = [u_{DC} / (L_d \omega_e \sqrt{3})]^2 \quad (5)$$

当直流母线电压固定, d 、 q 轴电流满足电压约束式(5)时,定子电流矢量在 i_d - i_q 坐标系中的轨迹是与转速相关的一簇同心椭圆。称之为电压限制椭圆,由图2可以看出转速越高,电压限制椭圆越小。当电机在高速条件下运行时,主要受到电压限制椭圆的影响。

综上所述,电机在不同工况点运行时,会受到电流极限圆和电压限制椭圆的同时影响,即在 d 、 q 坐标中,不同转矩和转速下的电流工况点在电流限制圆和电压限制椭圆的交集内,故电机标定的工作关键在于确定电流工况点,即定子电流矢量的幅值和角度。

图2的等转矩曲线中对应的 i_d 和 i_q 组合可以使电机产生相同的转矩,如果等转矩曲线满足电流极限圆和电压限制椭圆,表示该转速下的转矩可以控制实现。图2中, OAE 为MTPA曲线,当定子电流在该曲线上时,输出相同的转矩所需的定子电流最小,电机铜耗最小,效率最高; CF 为最大转矩电压比(MTPV)曲线,该曲线由等转矩曲线和电压限制椭圆的切点汇集而成,表示在某一电压和某一转速条件下的转矩最大值,即外特性点。

以0.6倍转矩基值为例说明随转速升高电流矢量的移动轨迹,其对应的机械特性曲线如图3所示。其中:图2中的电流零点 O 对应机械特性中 O_1O_2 段的任意一点,电流点 A 点对应机械特

性 A_1A_2 段的任意一点,电流点 E 点对应机械特性 E_1E_2 段的任意一点。当定子电流轨迹由 O 点移动至 A 点时,机械特性点沿 O_1O_2 段与 A_1A_2 段的任意两点连线移动。定子电流矢量到达 A 点后,如果当前转速与电流矢量满足电压约束,即 A 点在电压限制椭圆上,电流矢量随转速的升高沿恒转矩曲线 AB 移动,此时电机进行弱磁控制, d 轴电流绝对值增大, q 轴电流绝对值减小,电机输出转矩保持不变,对应机械特性曲线中的 A_2B 段。定子电流矢量到达 B 点后,受电流限制圆的影响,电流矢量沿 BC 段移动,电流幅值保持不变,但输出转矩减小,对应电机外特性曲线的 BC 段。到达 C 点后,如继续沿电流限制圆移动,则无法输出在当前转速下的最大扭矩,故电流矢量需沿 CF 段移动, F 点为特征电流点,对应的电压限制椭圆表征电机理论可以达到的最高转速,但电流矢量到达实际最高转速 D 点后无需继续移动。

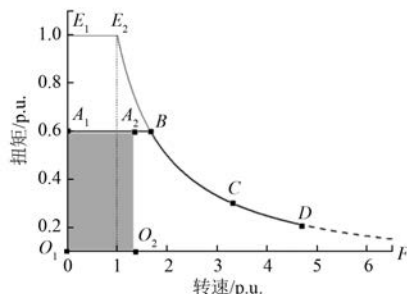


图3 恒转矩标定条件下的机械特性点

2 电机系统的标定准备

2.1 控制器采样延迟补偿

对于电机控制器软件来讲,电机转矩的准确实现依赖于 d 、 q 轴电流准确反馈和控制。 d 、 q 轴电流根据电机电流和转子位置进行Park变换,两者均通过传感器进行采集,电机电流经过硬件滤波延迟、AD采样延迟、软件滤波延迟等一系列环节后^[5],会产生电流信号的滞后。对于Park变换而言,电流采集和位置采集应同步进行,但目前单核MCU或DSP中的指令均为串行进行,会产生电流采样与位置采样存在时间延迟的问题,电流采样延迟和位置采样不同步均可等效为Park变换的角度误差。转子角度偏差对 d 、 q 轴电流的影响如图4所示。当Park变换所需的转子电角度

存在误差时, d 、 q 轴反馈电流与实际电流相差较大, 因此需要对电流滞后和不同步采样引起的转子位置误差进行补偿。

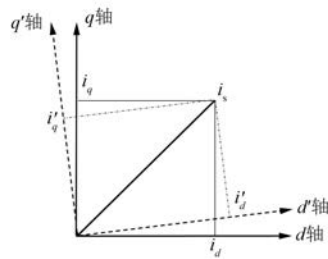


图 4 转子角度偏差对 d 、 q 轴电流的影响

2.2 反 Park 变换延迟补偿

电流调节算法根据 d 、 q 轴电流指令值及反馈值调节 d 、 q 电压, 通过电压调制算法和冲量相当的原则, 将 d 、 q 轴期望输出电压转换为三相脉宽调制(PWM)波形, 在电压调节器的输出和三相 PWM 波形实现之间存在较大延迟。图 5 中, 位置采样在 $t+t_p$ 时刻发生, 经过控制计算后, 在下一周期开始时 $t+T_s$ 时刻 PWM 寄存器重载, 并在 $t+t_a$ 处输出电压矢量, 其间至少经过了一个控制周期的延迟, 导致电压控制失准, 增大了系统闭环调节滞后, 会影响深度弱磁条件下的控制系统稳定性。

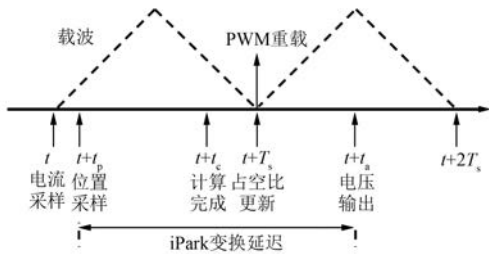


图 5 控制器采样及电压输出节拍

3 电机系统的标定流程

3.1 旋变零点标定

电机转子位置由旋变传感器获得, 旋变分定子和转子两部分, 分别与电机的定子和转子装配在一起, 电机旋转时, 旋变的转子与电机转子同步旋转。通常情况下, 旋变转子的零位与电机转子的零位不同, 二者相差一个固定角度, 故电机标定的首要工作是获取准确的旋变零位, 这是后期所有标定工作的基础。

旋变零点位置标定示意图如图 6 所示。图 6 中, 箭头方向表示电流流向, 通过三相桥向电机施加固定的电流矢量, 使电机转子与 d 轴位置对齐, 此时的旋变传感器读值即零点偏移角度。该标定方法可在台架或整车中进行, 标定时需保证电机空载或无机械连接, 一般情况下施加的电流矢量幅值为电机额定电流的 0.5~1.0 倍, 以保证电机有足够的扭矩克服摩擦或其他台架阻力转动到零点位置。

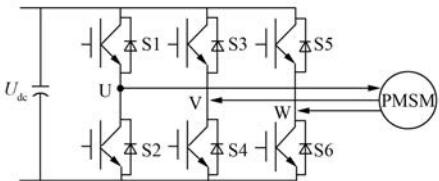


图 6 旋变零点位置标定示意图

3.2 MTPA 曲线标定

MTPA 曲线是电机在额定转速以下工作时的主要状态点^[6], 此时电机反电动势较低, 电压裕量较大, 电机控制器可按照效率最优的原则定义电机的电流矢量, 使电流矢量沿图 2 中的 OAE 段移动。

MTPA 曲线的标定需在测功机台架中进行。测功机工作于恒速模式用以保持被标定电机运行转速的恒定, 其标定流程如图 7 所示。电流矢量幅值从零开始, 等间距增长至电机最大电流, 每个电流幅值处, 电流矢量角度由上一时刻最优角度开始, 等幅值增加, 直至出现扭矩最大值, 记录该电流矢量幅值条件下的最优角度和最大扭矩。

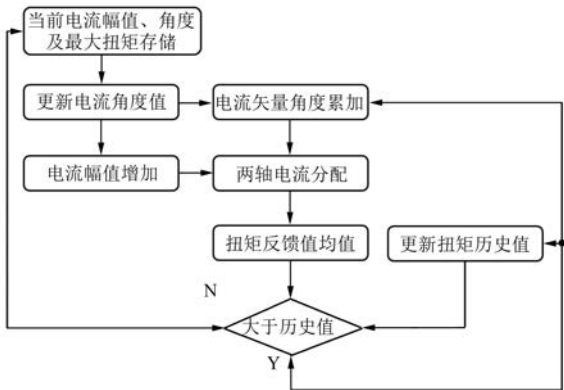


图 7 MTPA 曲线的标定流程

3.3 弱磁区域标定

弱磁区域主要在图 2 的 *OAEBCF* 区域内。弱磁区域的起始位置为 MPTA 曲线, *d* 轴电流给定采用基于电压闭环的反馈调节方法^[4], 标定部分的软件控制框图如图 8 所示。标定工作进行时, 测功机工作于恒速模式, 标定转速由电机基速开始按照固定步长递增至电机最高转速, 在某一固定转速条件下, 给定定子电流矢量后, 控制软件按照 MTPA 曲线确定定子电流初始角度, 即获取 i_d^* 、 i_q^* 的初始值。当电压裕量偏小时, 电压闭环反馈模块输出补偿电流 i_{d_com} 至两轴电流分配模块, 与 i_d^* 的初始值相加输出作为 *d* 轴电流指令值 i_d^* , 而 *q* 轴电流则在保证弱磁电流条件下以维持定子电流矢量幅值不变为原则计算得到^[7]。

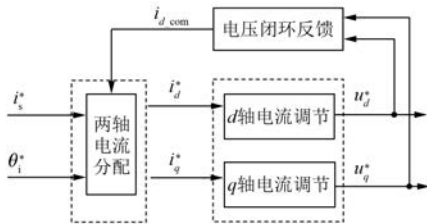


图 8 弱磁区域 *d*、*q* 轴电流指令软件控制框图

4 电机系统的台架标定试验

为了验证标定流程的可操作性及准确性, 在测功机台架中进行了电机控制器与电机的标定试验。标定电机参数如表 1 所示。标定试验台架如图 9 所示。试验台架测功机为西门子 PMSM, 功率为 500 kW, 峰值扭矩为 3 800 N·m, 峰值转速为 5 000 r/min。

表 1 被标定电机参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
电机类型	永磁同步	极对数	6
额定功率/kW	100	峰值功率/kW	200
额定转矩/(N·m)	1 500	最大转矩/(N·m)	2 800
额定转速/(r·min ⁻¹)	650	最高转速/(r·min ⁻¹)	3 000
额定电流/A	320	峰值电流/A	640

4.1 旋变零点标定

试验进行时, 断开电机与测功机的机械连接, 电机 *d* 轴电流指令为 400 A, *q* 轴电流指令为 0 A, 转子位置采用手动给定值, 电机转动一定角度后

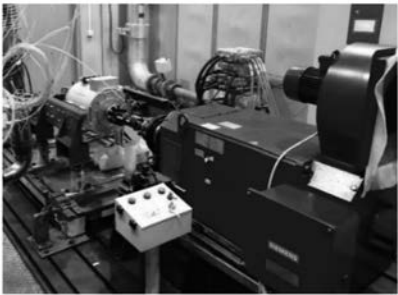


图 9 标定试验台架

稳定, 记录此时的旋变反馈角度, 测试结果如表 2 所示。旋变零点位置平均值为 175.7°。

表 2 旋变零点标定结果

测试编号	1	2	3	4
测试结果/(°)	175.9	175.8	175.8	175.7

旋变零点的标定是其余标定项目的基础, 零点标定完成后, 进行标定结果的验证。验证试验时, *d* 轴电流给定值为 -400 A, *q* 轴电流给定值为 0 A, 分别在 300、550、800 r/min 转速条件下, 测试电机在被控状态与非供电状态的扭矩输出偏差, 如偏差值在 0 N·m 附近波动, 则旋变零点标定精度满足要求。试验结果如表 3 所示。扭矩偏差范围在 -0.31~0.25 N·m 之间, 符合准确性的判断标准。

表 3 旋变零点标定结果

测试转速/(r·min ⁻¹)	300	550	800
扭矩偏差平均值/(N·m)	-0.31	-0.13	0.25

4.2 MTPA 曲线标定

被标定电机的额定转速为 650 r/min, 进行 MTPA 曲线标定的转速选为 500 r/min, 通过手动给定电流幅值和电流角度后, 获取到 MTPA 的离散点, 经过拟合和差值处理, 得到了 MTPA 曲线的标定结果, 如图 10 所示。随着电流幅值的增大, 最佳电流角度逐渐增大。

4.3 弱磁区域标定

弱磁区域的标定由转速 500 r/min 开始, 电流指令由零扭矩标定至当前转速下的外特性点为止, 标定完成后通过插值函数获取到等扭矩曲线, 在 i_d - i_q 坐标系中将各转速和扭矩点对应的电流状态点标出, 如图 11 所示。标定过程中并未完成所有电流分布点的标定, 原因是标定范围以满足功率需求为原则, 对于外特性范围之外的点不做考虑。

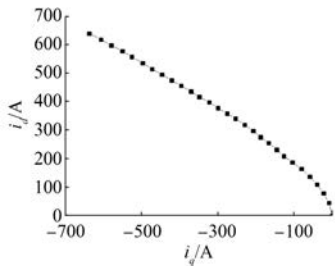


图 10 MTPA 曲线标定结果

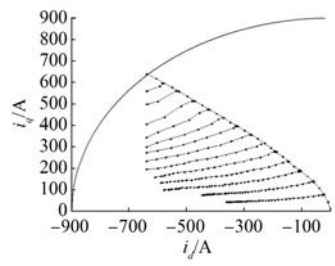


图 11 弱磁曲线标定结果

4.4 扭矩控制有效性的验证

完成 MTPA 及弱磁区域的电流标定后,将电流 MAP 固化至控制器中,按照图 1 的控制器功能框图进行扭矩控制。为了验证不同转速下扭矩控制的有效性,在不同转速、不同扭矩指令下对电机系统进行测试,扭矩控制的试验结果如表 4 所示。其中,电机转速范围为 500~3 000 r/min;扭矩指令范围为 100~2 800 N·m。

表 4 扭矩控制试验结果

$n/(r \cdot \min^{-1})$	500	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000
扭矩指令/(N·m)	输出扭矩/(N·m)					
100	104	103	101	98	99	95
200	202	205	202	200	197	196
300	297	304	310	299	291	285
500	503	524	515	520	497	483
600	609	610	615	600	591	589
800	809	815	804	798	-	-
1 000	1 008	1 004	993	-	-	-
1 500	1 493	1 522	-	-	-	-
2 000	1 996	-	-	-	-	-
2 500	2 487	-	-	-	-	-
2 800	2 824	-	-	-	-	-

表 4 中的输出扭矩数据为扭矩传感器测得。可以看出:在电机机械外特性范围内的各测试点,应用标定所得到的电机电流特性对电机进行扭矩控制的误差百分比最大值为 5%,最小误差为零,平均误差为 1.7%,可以对电机扭矩进行准确有效控制,满足了整车的扭矩控制精度需求。

5 结 语

本文以新能源主驱电机控制器为例,介绍了车用电机控制器的标定内容,针对扭矩控制架构、标定点在电流坐标系和机械外特性中的分布和移动原理进行了详细分析,确定了电机系统的台架主要标定内容。针对影响标定精度和稳定性的关键因素进行了阐述和分析,提出了 PMSM 控制器的标定流程。在台架环境中的实际标定及验证结果表明:该方法可以对旋变零点及电流特性进行准确标定,应用标定结果后,电机控制器可实现对电机输出扭矩的准确控制。

【参 考 文 献】

[1] HU D, XU L. Characterizing the torque lookup table of an IPM machine for automotive application[C]// 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014.

[2] 王成元,夏加宽,孙宜标. 现代电机控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2009:114-126.

[3] 张鹏. 永磁同步电动机弱磁调速控制方法的研究[D]. 天津:天津大学,2007.

[4] 王杰,谢源,谢涛. 基于电压闭环反馈的永磁同步电机弱磁调速研究[J]. 电机与控制应用,2018,45(4):27.

[5] 孙大南,刁利军,刘志刚. 交流传动矢量控制系统时延补偿[J]. 电工技术学报,2011,26(5):138.

[6] 陈起旭,邹忠月,曹秉刚,等. 纯电动汽车用内置式 PMSM 的 MTPA-FW 控制算法对比研究[J]. 微电机,2017,50(6):44.

[7] 张岳. 电动车用永磁电动机设计及弱磁控制[D]. 杭州:浙江大学,2014.