某车用永磁同步电机退磁问题的分析与优化

杨洪震　李晶晶

安徽江淮汽车集团股份有限公司

摘要：通过对某车用永磁同步电机退磁案例的分析，将造成电机转子退磁问题的原因大概分为硬件方面、测试方面和控制方面，并逐个分解和制定相应的验证计划，排查造成该车用永磁同步电机退磁故障的关键因素，针对这些因素提出优化改善的研究方向，为永磁同步电机退磁问题的分析提供理论支持和案例依据。

关键词：永磁同步电机；退磁故障；验证分析；优化改善

1　永磁电机现状分析

1.1　永磁电机的发展与应用

随着现代工业技术的不断进步，电机作为能量转换的关键设备，在各个领域得到了广泛应用。永磁电机由于采用永磁材料提供磁场，与传统的电励磁电机相比，具有结构简单、体积小、重量轻、效率高、功率密度大以及电机尺寸形状灵活多样等显著优点。在新能源汽车、风力发电和工业自动化等领域，永磁电机发挥着越来越重要的作用。如在新能源汽车中，永磁同步电机被广泛应用于驱动系统，为车辆提供高效的动力输出。

1.2　永磁电机退磁问题的现状与研究意义

永磁同步电机在永磁体的加成下，输出特性相比感应异步电机有明显提升，获得了高功率及高转矩的性能优势，然而，永磁电机在实际运行过程中，永磁体可能会出现不可逆退磁现象。

在电机性能方面，退磁会导致电机的性能下降，如输出功率降低、效率下降和电流增大等，严重时甚至会使电机完全失去驱动能力，影响整个系统的正常运行。以新能源汽车为例，若驱动电机发生退磁故障，可能会导致车辆动力不足、续驶里程缩短，甚至引发安全事故。在电机成本方面，永磁体在永磁电机中的占比很大，转子一旦发生退磁无法返修，只能报废处理，从而会提高电机的研发和使用成本。

因此，深入研究永磁电机的退磁问题，分析电机退磁原因，对于找到有效的预防电机退磁方法和检测手段，从而提高永磁电机的可靠性和稳定性，保障相关工业系统的安全运行具有重要的现实意义。

2　永磁体的退磁机制

在经过外部磁场饱和充磁以后，永磁体内磁畴的磁矩转向外磁场方向，永磁体显示出较强的磁性，当外部退磁磁场达到一定值后，永磁体内的磁畴将发生畴壁位移，磁畴的磁矩转动到反磁化场方向，形成不可逆的转动，即使退磁磁场消失，永磁体内的磁畴磁矩也不可能回到原来磁矩的方向，即永磁体产生不可逆退磁。

3　某规格电动车用永磁同步电机异常退磁的情况调查

某规格电动车用电机基本参数见表 1。

表 1　某规格电动车用电机基本参数

峰值功率 /kW	250	峰值转速 /(r/min)	20000
峰值转矩 /N · m	350	槽极比	848
额定工作电压 /V	720	最大相电流 /A	400
定子外径 /mm	220	铁心长度 /mm	150

3.1　退磁故障案例一

单电机开展发电和低压标定后，进行反电动势检测，反电动势由初始的 49.56V，1000 r/min 降至 43.4 V（冷态），确认发生退磁，转子表磁检测与正常样机相比，表磁数据降低约 5%。

3.2　退磁故障案例二

单电机测试工况为发电状态弱磁标定，最高绕组

温度约 122℃，初始状态空载反电动势值约 47.5 V，试验前后反电动势下降 0.8 V，理论上低温下温度升高 10℃，反电动势下降 0.7 V，但实际中测量反电动势也都是在冷态，温差很小，所以同样确认发生退磁。

3.3 退磁故障案例三

该车用三合一电驱动总成在进行旋变标定后，进行 20000 r/min 转速波动验证，转矩升至 70 N · m 后发生通信故障，导致转矩失控无法至 0，持续 80 s，后续台架降低转速过程中温度持续上升，控制器进入 ASC 保护后至 0，再起动试验请求转矩 300 N · m，实际转矩仅 225 N · m 左右，冷态反电动势 28 V，相比正常 48 V 存在大幅度退磁现象。该三合一电驱动总成标定数据如图 1 所示。

3.4 退磁故障案例四

单电机按照常规工况进行验证，初始冷态反电动势 48.25 V，在验证工况后反电动势 46.2 V，确认该电机在常规测试验证环境下也存在退磁问题，该电机的测试工况见表 2。

表 2 单电机测试工况

额定工作电压 /V	冷却液温度 /℃	起始油温 /℃	电子油泵转速 /（r/min）	电机转速 /（r/min）	功率 /kW	运行时间 /min
720	65±5	65±5	4500	10000	100	30
720	65±5	65±5	4500	16000	100	30
720	65±5	65±5	4500	18000	100	30
720	65±5	65±5	3000	10000	100	30
720	65±5	65±5	3000	16000	100	30
720	65±5	65±5	3000	18000	100	30

4 永磁电机退磁的原因分析

造成电机转子退磁问题的原因大概可以分为硬件方面、测试方面和控制方面，分析树如图 2 所示，其中比较常见和关键的有以下几个。

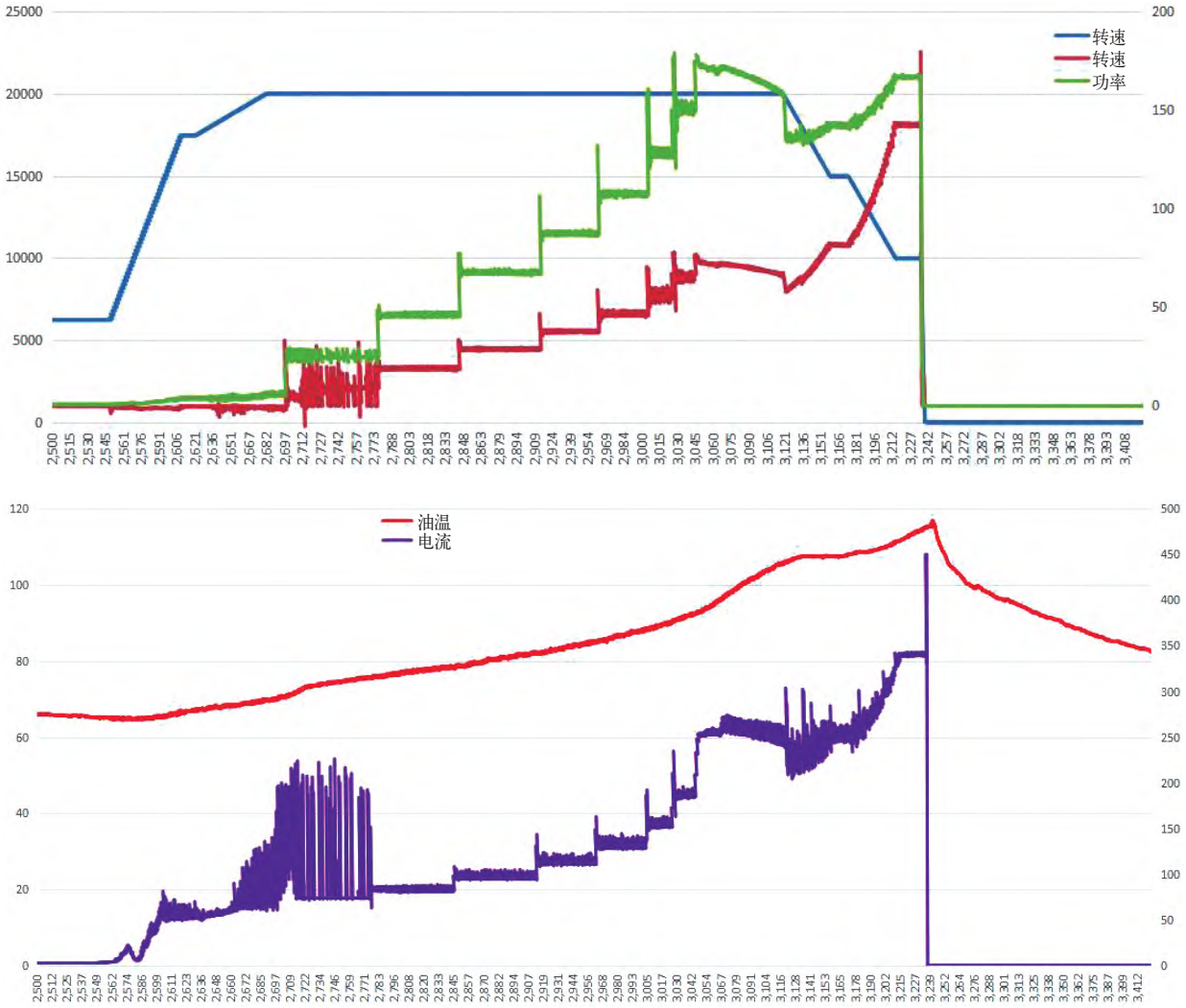

图 1 三合一电驱动总成标定数据

（1）永磁体自身的原因。永磁体在制造过程中，由于制造工艺的原因造成裂缝、形状尺寸不符合要求等质量问题直接导致磁钢性能不合格。另外不同材质的永磁体保持磁性的寿命也有一定限制，到达一定年限以后，永磁体会逐渐老化，磁性能下降，从而出现失磁现象，这也是有可能的。

（2）高温导致退磁。铁磁物质被磁化后具有很强的磁性，随着温度的升高，金属点阵热运动加剧，会影响磁畴磁矩的有序排列，当温度达到居里温度时，足以破坏磁畴磁矩的整齐排列，此时磁畴会被瓦解，平均磁矩变成零，铁磁物质的磁性消失，变为顺磁物质，与磁畴相联系的一系列铁磁性质（如高磁导率、磁滞回线等）全部消失，相应铁磁物质的磁导率转化为顺磁物质的磁导率，导致永磁体发生退磁。

（3）撞击和振动导致退磁。烧结永磁体钕铁硼具有容易破碎的特质，电机在运行过程中，永磁体容易发生剧烈振动导致永磁体损坏，产生不可逆退磁。

（4）测试工况设计不合理导致退磁。为了使电机产生满足要求的转矩，测试工况增加电机的电流，铜损增大，永磁体的温度上升，永磁体产生不可逆的退磁。

（5）冷却流量设计不合理或者控制发生错误，导致转子在工作过程中无法得到足量的冷却液，转子产生的热量不能及时被带走在转子内部积聚，从而导致永磁体因高温产生不可逆退磁。

（6）控制层面导致退磁。不同的控制器、控制策略以及软件的匹配等可能会造成电流的谐波含量过高、弱磁电流过大，保护策略不合理、温度保护限值过高等问题，不仅电机的 NVH 性能变差，还会形成超过永磁体承受的退磁磁场，造成永磁体不可逆退磁。

通过以上分析可以看出来，导致永磁体退磁的主要原因有两点：一是高温，电机在运行过程中由于各种原因造成的温度过高，超过永磁体可以承受的居里温度导致退磁；二是定转子合成的退磁磁场，这些都可能造成永磁体的不可逆退磁。当然导致永磁体退磁的具体原因一般也不是单一的，而是由多种因素共同作用的结果，

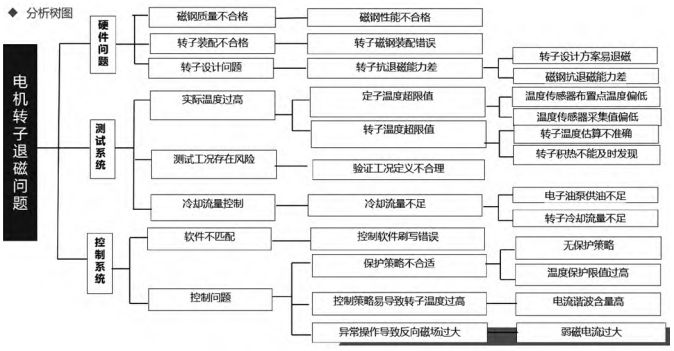

图 2　永磁电机退磁原因分析树

5　试验与对策

基于以上永磁体实际退磁案例，笔者根据永磁体退磁的原因分析树图，进行一一排查，最终推测造成退磁的原因可能有以下几个。

（1）定子端部温度传感器布置位置不合理会导致测得的温度偏低，通过试验温度传感器测得温度数据见表 3，定子端部温度传感器布置位置如图 3 所示，由于电机实际温度保护是按照 160℃设置的，所以定子端部存在

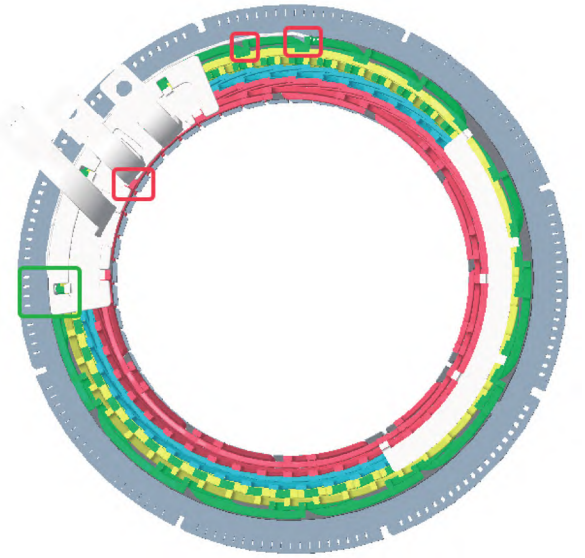

图 3　定子端部温度传感器布置位置

超过 180℃的风险，这可能是一个潜在的风险因素。

（2）转子积热。由于转子是旋转件，转子的温度很难实时进行监测，在应用过程中只能借助绕组端部温度进行间接判断，在实际工作过程中，在给定子瞬时大电流情况下，定子温度会急剧上升，但转子的温度上升幅度并不大，并不能通过定子的温度去判断转子的温度，虽然可能通过反电动势的变化反推转子温度，但这种方法的操作便利性和准确性都不够，故转子内部可能存在积热。

（3）验证工况设计不合理。基于已发生的退磁案例，分别通过小流量低转速的持续功率工况、小流量高转速点持续工作工况、大流量高转速点外特性工况、弱磁电流标定工况以及高速连续标定工况进行验证，验证工况检测结果。

表 3　温度传感器测得温度数据

转速 /（r/min）	冷却油流量 /（L/min）	电机自带温度 /℃	传感器位置（槽内）	传感器数值 /℃	传感器位置（非槽内）	传感器数值 /℃	温差（槽内最高 - 绕组）/℃	温差（非槽内最高 - 绕组）/℃
9000	5.7	78	T24（槽内 -44）	92.5	T36（内 -44）	83.8	14.5	5.8
	4.3	81	T24（槽内 -44）	96.0	T31（外 -46）	90.4	15.0	9.4
	13.8	84	T24（槽内 -44）	103.2	T25（外 -46）	95.0	19.2	11.0
	11.1	88	T24（槽内 -44）	106.0	T25（外 -46）	98.4	18.0	10.4
	7.1	91	T24（槽内 -44）	108.0	T25（外 -46）	100.0	17.0	9.0
	5.7	90	T24（槽内 -44）	107.0	T25（外 -46）	99.8	17.0	9.8
	4.3	93	T31(槽内 -44)	110.0	T24（槽内 -44）	109.6	17.0	16.6
	13.8	109	T23（槽内 -27）	140.0	T49（横 -3）	136.2	31.0	27.2
	11.1	109	T23(槽内 -27)	140.0	T54（横 -7）	130.3	31.0	21.3
	7.1	105	T23（槽内 -27）	140.0	T36（内 -44）	128.8	35.0	23.8
	5.7	107	T23（槽内 -27）	140.0	T49（横 -3）	128.4	33.0	21.4
	4.3	113	T23（槽内 -27）	141.0	T54（横 -7）	137.4	28.0	24.4
12000	13.8	76	T24（槽内 -44）	96.2	T36（内 -44）	84.4	20.2	8.4
	11.1	77	T24（槽内 -44）	96.3	T36（内 -44）	86.8	19.3	9.8
	7.1	78	T24（槽内 -44）	97.0	T36（内 -44）	87.9	19.0	9.9
	5.7	78	T24（槽内 -44）	97.0	T36（内 -44）	86.5	19.0	8.5
	4.3	80	T24（槽内 -44）	88.7	T25（外 -46）	89.3	8.7	9.3
	13.8	88	T24（槽内 -44）	109.3	T26（外 -46）	96.0	21.3	8.0
	11.1	90	T24（槽内 -44）	111.9	T36（内 -44）	101.9	21.9	11.9
	7.1	90	T24（槽内 -44）	111.0	T36（内 -44）	101.8	21.0	11.8
	5.7	90	T24（槽内 -44）	113.0	T26（外 -46）	102.3	23.0	12.3
	4.3	93	T24（槽内 -44）	114.2	T37（外 -46）	112.3	21.2	19.3
	11.1	100	T23(槽内 -27)	137.4	T36（内 -44）	119.9	37.4	19.9
	11.1	97	T23(槽内 -27)	137.4	T36（内 -44）	123.7	40.4	26.7
	7.1	97	T23（槽内 -27）	138.1	T36（内 -44）	126.6	41.1	29.6
	5.7	98	T23（槽内 -27）	140.0	T36（内 -44）	124.7	42.0	26.7
	4.3	104	T23（槽内 -27）	140.0	T36（内 -44）	123.5	36.0	19.5
16000	13.8	82	T24（槽内 -44）	108.4	T36（内 -44）	94.2	26.4	12.2
	11.1	83	T24（槽内 -44）	112.0	T36（内 -44）	101.5	29.0	18.5
	7.1	82	T24（槽内 -44）	110.0	T36（内 -44）	96.8	28.0	14.8
	5.7	82	T24（槽内 -44）	110.6	T36（内 -44）	97.5	28.6	15.5
	4.3	87	T24（槽内 -44）	114.0	T36、T25	100.1	27.0	13.1
	13.8	92	T24（槽内 -44）	125.2	T36（内 -44）	109.8	33.2	17.8
	11.1	98	T24（槽内 -44）	129.4	T36（内 -44）	118.5	31.4	20.5
	7.1	94	T24（槽内 -44）	128.8	T36（内 -44）	115.8	34.8	21.8
	5.7	94	T24（槽内 -44）	129.4	T36（内 -44）	115.8	35.4	21.8
	4.3	101	T23（槽内 -27）	134.3	T50（横 -5）	125.0	33.3	24
	13.8	86	T23（槽内 -27）	140.0	T36（内 -44）	123.7	54.0	37.7
	11.1	86	T23（槽内 -27）	140.0	T36（内 -44）	126.8	54.0	40.8
	7.1	88	T23（槽内 -27）	140.0	T36（内 -44）	124.4	52.0	36.4

小流量高转速的工况，控制器输入的电压电流谐波含量较高，在此工况下持续工作，冷却不足，转子积热无法快速散除，经过试验，在转子转速 16000 ~ 18000 r/min，油泵转速较低时会产生较大的热量，永磁体温度很高，有退磁风险，具体工况见表 4。

小流量低转速工况，将电机低转速持续功率运行达到热平衡，可以看出，哪怕冷却液流量最小的情况下，转子永磁体温度也没有超过风险值，所以这个工况下的电机基本没有退磁风险，具体工况见表 5。

弱磁标定工况，正常低速达到热平衡工况，弱磁

表 4　小流量高转速工况

冷却液温度 /℃	反电动势 /V	转速工况 /（r/min）	油泵转速 /(r/min)	预估磁钢温度 /℃	验证方法
63.7	46.0964	5026	4500	59	起始油温 65℃，油泵 4500 r/min；转速 10000/16000/18000 r/min@100 kW 运转 30min。对比前后空载反电动势值
81.9	42.9373	10000	4500	104	
90.6	41.0179	16000	4500	131	
88.0	40.3293	18000	4500	141	
冷却 10 ～ 20min					
74.7	43.0279	5026	3000	103	油泵 3000 r/min；转速 10000/16000/18000 r/min@100kw 运转 30 min。对比前后空载反电动势值
83.6	42.6454	10000	3000	108	
93.5	40.4026	16000	3000	140	
92.2	39.3481	18000	3000	151	
冷却 10 ～ 20min					
66.4	44.6611	5026	2000	79	油泵 2000 r/min；转速 10000/16000/18000 r/min@100 kW 运转 30 min。对比前后空载反电动势值
91.4	42.1136	10000	2000	116	
104.7	39.3633	16000	2000	155	
105.1	38.3372	18000	2000	170	
冷却 10 ～ 20min					
90.6	39.7734	5026	1000	149	油泵 1000 r/min；转速 10000/16000/18000 r/min@100 kW 运转 30 min。对比前后空载反电动势值
91.5	41.4501	10000	1000	125	
96.9	40.9559	16000	1000	132	
99.3	40.4634	18000	1000	139	

表 5　小流量低转速工况

反电动势 /V	转速 /(r/min)/ 功率 /kW	油泵转速 /（r/min）	预估磁钢温度 /℃	测试工况
40.7634	5026/100	1000	135	冷却流量最大，5000 r/min，100 kW 持续达到热平衡状态，测反电动势确认转子温度
41.1769	5026/100	2000	129	
41.5257	5026/100	3000	124	降低冷却流量（电子泵不同转速），使热平衡值达到不同的温度状态（定子绕组温度不超过 120℃），重复测试
42.6848	5026/100	4500	108	

表 6　弱磁标定工况

反电动势 /V	绕组温度 /℃	油泵转速 /（r/min）	预估磁钢温度 /℃	测试工况
39.38	80	4500	116	电机转速 5026 r/min，功率 100 kW 持续达到热平衡状态后；1.Id 电流设定为 -500 A 运行 2 s；2.Id 电流设定为 -565 A
40.63	75	4500	98	
41.64	78	3000	84	
41.89	74	3000	80	
42.25	73	2000	75	
42.44	72	2000	72	

电流不超过电流限值无退磁风险，具体工况见表 6。

大流量高转速工况，在 20000 r/min 时永磁体退磁，所以在该工况下永磁体退磁风险很大，需要特殊关注，寻找解决措施，具体工况见表 7。

高速连续标定工况，转子转速达到 15000 r/min 以后，永磁体的温度已经接近临界值，所以可以看出在 20000 r/min 时，转子永磁体退磁的风险还是很大的，具体工况见表 8。

通过以上试验，可以确认影响该车用电机永磁体退磁的关键因素为温度传感器布置不合理、控制器部分温度保护限值过高、试验工况设计不合理，尤其是高速工况、电流谐波含量大、弱磁电流过大导致的转子积热。

针对以上问题，分别制定对策解决对应的问题。

（1）温度传感器布置不合理的问题，在淋油环增加周向限位，温度传感器避开淋油环油孔位置，并增加传感器数量，将传感器布置在温度较高的地方，提升温度传感器监测温度的准确性。

（2）试验工况设计不合理的问题，在高风险工况

表 7　外特性工况

反电动势 /V	功率 /kW	转速 /（r/min）	水温 /℃	预估磁钢温度 /℃	测试方法
40.1620	99.00	5026	64.9	144	1. 冷却流量最大 5000 r/min，100 kW 持续达到热平衡状态，测反电动势值确认转子温度 2. 最大功率点持续运行 30 s，确认反电动势，回复初始热平衡状态 3. 15000 r/min 峰值特性运行 30 s，确认反电动势，回复初始热平衡状态 4. 20000 r/min 峰值特性运行 30 s，确认反电动势，回复初始热平衡状态
39.3768	103.86	7500	63.8	155	
39.3437	102.29	15000	64.1	155	
37.1636	101.93	20000	64.5	186	

表 8　高转速连续标定工况

	反电动势 /V	绕组温度 /℃	绕组温度 /℃	预估磁钢温度 /℃	验证方法
8000/r/min 热平衡后			115		1. 8000 r/min 转矩 0 ~ max（step 间隔 10 N · m，每个转矩持续 10 s），最大后降为 0，确认反电动势，回复初始热平衡状态
反电动势测试	38.31	95		135	
标定过程结束			140		
反电动势测试	39.45	101		119	
10000/r/min 热平衡后			107		2. 10000 r/min 转矩 0 ~ max（step 间隔 10 N · m，每个转矩持续 10 s），最大后降为 0，确认反电动势，回复初始热平衡状态
反电动势测试	39.87	90		113	
标定过程结束			135		
反电动势测试	39.89	97		113	
12000/r/min 热平衡后			117		3. 12000 r/min 扭矩 0 ~ max（step 间隔 10 N · m，每个扭矩持续 10 s），最大后降为 0，确认反电动势，回复初始热平衡状态
反电动势测试	38.54	97		132	
标定过程结束			135		
反电动势测试	39.18	93		123	
15000/r/min 热平衡后			118		4. 15000 r/min 转矩 0-max（step 间隔 10 N · m，每个转矩持续 10 s），最大后降为 0，确认反电动势，回复初始热平衡状态
反电动势测试	38.29	96		136	
标定过程结束			144		
反电动势测试	38.63	95		131	

点增大冷却流量，利用反电动势的监测规避风险，避免转子温度高于 130℃。

（3）控制器方面的问题则对软件进行优化。

6　结语

本文对永磁同步电机退磁故障的原因结论如下：

（1）永磁同步电机永磁体退磁的基本原理，分析了温度、电流和外部磁场等因素导致退磁的原因，为研究提供了理论基础。

（2）研究了永磁同步电机的温度传感器布置、反电动势、短路电流值、电流谐波含量和温度保护限值等因素对于电机的影响程度，明确了不同工况下电机退磁的变化特征。

下一步计划优化温度传感器位置、增加温度传感器数量、修改软件保护限值确保最高温度值不超过 160℃，限制弱磁电流值不超过 564 A，降低电流谐波含量，风险试验工况利用反电动势规避风险，避免转子温度高于 130℃，提供足够的冷却液，避免转子积热导致永磁体退磁，进一步深化研究永磁同步电机退磁的微观机理，考虑更多的影响因素，如材料的微观结构变化、应力场与磁场的耦合作用等，为退磁故障的分析和诊断提供更深入的理论支持。

参考文献

[1] 王秀和，等 . 永磁电机 [M]. 北京：中国电力出版社，2021.