

# 永磁牵引系统退磁故障自主延寿控制\*

牛刚, 刘森轶

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院 上海 201804)

**摘要:** 为了保障永磁牵引列车在退磁故障下的可靠性与安全性, 并缓解由此导致的逆变器损伤加剧问题。提出了一种在混合建模基础上的永磁牵引系统延寿控制方法。该方法在实时监测退磁程度的基础上, 提出通过控制率重构的方法, 适当降低退磁电机输入功率; 在估计退磁程度的同时, 将机电系统作为整体进行闭环控制, 从而有效地延长了逆变器系统的寿命。以西门子 Syntegra 永磁同步电机牵引系统为例, 对于多种工况下的退磁监测与延寿控制效果进行了仿真的验证, 实验结果表明该方法能够准确监测退磁程度, 在不影响系统服役性能的前提下, 延长逆变器系统的整体寿命。

**关键词:** 永磁同步电机; 预测与健康管理; 寿命预测; 混合建模

**中图分类号:** TH-39      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 580.30

## Autonomous life extending control for PMSM rail vehicles under demagnetizing fault

Niu Gang, Liu Senyi

(Institute of Rail Transit (IRT), Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** To relieve the increased damage of inverters and guarantee reliability and safety of PMSM-driven rail vehicles suffering demagnetization fault, this paper presents an advanced life-extending control strategy through hybrid model. The proposed strategy conducts online remaining flux estimation and offline control law reconfiguration, to decrease the input power of PMSM with demagnetization. It regards PMSMs-Inverter as a whole electromechanical system for closed loop control to autonomously extend the operation life of inverters. The feasibility and benefit of the life extending control strategy is validated through a simulated experiment of Syntegra PMSM rail vehicle. The simulation results show that accurate monitoring and damage prognosis of demagnetization can be , and the life of inverters is extended effectively without influencing operation performance.

**Keywords:** permanent magnet synchronous motor; prognosis and health management; lifetime predict; hybrid model

## 0 引言

为了提高现代装备系统的可靠性, 应对各类突发故障, 防止由于各个子系统之间耦合产生的二次故障发生, 预测与健康管理 (prognostics and health management, PHM) 的技术理念应运而生, 并在飞行器、舰船、高速列车等复杂装备领域得到了广泛的关注<sup>[1-2]</sup>。PHM 技术通过数据驱动, 基于建模等技术手段, 开展健康状态监测、故障诊断和剩余有用寿命预测, 基于这些分析结果来保障装备的运行安全, 并为基于状态的维修提供帮助。

近年来, 国内外学者在 PHM 技术的基础上, 进一步

提出了自愈控制、危机自主管理、故障容错控制等概念<sup>[3-5]</sup>。这些概念侧重于控制层面, 考虑了故障发生后对于系统的服役性能, 其他部件的影响, 希望通过重构控制的方式, 使系统的整体寿命得到延长。延寿控制, 是一种较为代表性的可重构控制思想, 已经广泛的应用于航空领域<sup>[6-7]</sup>。其主旨思想在于权衡系统的服役性能与剩余寿命的前提下, 通过适当地牺牲系统的服役性能, 使得系统的整体寿命得到延长。对于这类问题, 考虑单一故障对于其他子系统的影响以及故障传递机理, 是一个难点。

本文以永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM) 牵引列车为例, 针对永磁体退磁故障对逆变器产生不良影响的问题, 在对牵引系统混合建模的基

基础上,提出了一种延寿控制的策略,在保证牵引性能的前提下,使综合逆变器系统的寿命尽可能地延长。

## 1 永磁牵引系统机电混合建模与故障演化机理

### 1.1 机电混合模型组成

混合建模是将几种模型组合成为一个混合模型,通过模型间的互相配合,得到理想的输入输出关系,这种建模方式能够分析涉及到多种能量耦合转化的系统,被广泛的应用于电机牵引方面<sup>[8]</sup>。

本文通过转向架的动力学方程,永磁同步电机的  $d-q$  模型,逆变器中绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 元件的电热模型,与疲劳损伤理论,联合构建了永磁牵引系统的混合模型。永磁牵引混合模型中各个部分之间的配合如图 1 所示。

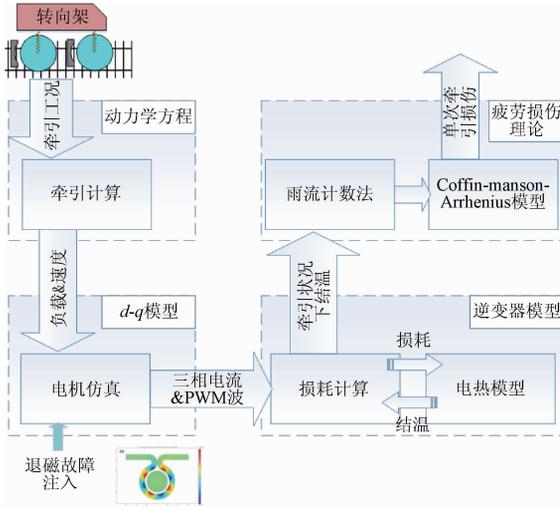


图1 混合模型构成

Fig. 1 Structure of hybrid model

其中总系统的输入是电机仿真模块的退磁故障注入与牵引工况,输出是单次牵引状况下 IGBT 的相对损伤。

### 1.2 动力学方程

列车的动力学系统可以看成是由转向架与两个轮对组成的动力系统,如图 2 所示,其方程如下:

$$\begin{cases} T_1 - F_{r1}r = J\alpha_1 \\ T_2 - F_{r2}r = J\alpha_2 \\ F_{r1} + F_{r2} - F_f = aM \\ F_f = Mg(av^2 + bv + c) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $T_1$  和  $T_2$  是轮对受到的电机驱动力,即是电机的输出转矩(单位为  $\text{N} \cdot \text{m}$ );  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  是轮对在牵引过程中的角加速度(单位为  $\text{rad/s}^2$ ),由于前后轮对采取了速度同步的控制方式,所以角加速度可以认为是一致的;  $a$  是整

体转向架在牵引过程中的加速度(单位为  $\text{m/s}^2$ ),是角加速度与轮对半径的乘积;  $F_{r1}$  与  $F_{r2}$  是轮对受到轨道的摩擦力(单位为  $\text{N}$ ),牵引整体转向架,同时也是电机的负载;  $F_f$  是列车受到的基本阻力(单位为  $\text{N}$ ),是一个关于速度的二次多项式。通过这些关系式,可以得到列车运行过程中,电机的负载状况与速度变化的关系。

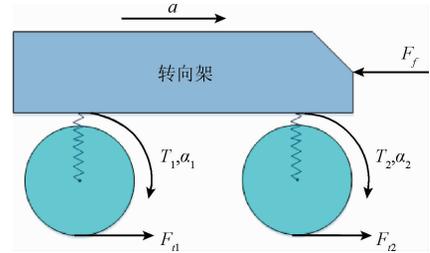


图2 动力学方程

Fig. 2 Dynamic equation

### 1.3 永磁同步电机 $d-q$ 模型

在永磁同步电机控制建模中,  $d-q$  模型是描述永磁同步电机最常用的模型,磁场定向控制 (field oriented control, FOC) 也是常用的电机控制方法,其原理是将电机的三相电流和电压转换成旋转的  $d-q$  坐标系上的直流量,通过控制  $q$  轴电流的大小来控制电机的输出转矩:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}u_d - \frac{R_s}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}n_p\omega_r i_q \\ \frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_q}u_q - \frac{R_s}{L_q}i_q - \frac{L_d}{L_q}n_p\omega_r i_d - \frac{n_p\omega_r}{L_d}\varphi_f \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $L_q$  和  $L_d$  为  $q$  轴和  $d$  轴上的电感(单位为  $\text{H}$ ),  $R_s$  为定子电阻(单位为  $\Omega$ );  $i_q$  和  $i_d$  为  $q$  轴和  $d$  轴上的电流(单位为  $\text{A}$ ),  $u_q$  和  $u_d$  为  $q$  轴和  $d$  轴上的电压(单位为  $\text{V}$ );  $\omega_r$  为转子角速度(单位为  $\text{rad/s}$ ),  $\varphi_f$  是永磁体所产生的磁通(单位为  $\text{Wb}$ );  $n_p$  是极对数。

永磁同步电机的输出转矩可表示为:

$$T_e = \frac{3}{2}n_p[\varphi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (3)$$

### 1.4 IGBT 累积损伤计算

本文对于逆变器系统的寿命评估采用薄弱的 IGBT 的损伤计算为标准,因为逆变器中二极管的损伤程度相对于 IGBT 来说非常小,文献[9]的实验结果表明,二极管的损伤远远小于的 IGBT 损伤。

IGBT 的损伤由其功率损耗导致的结温决定。文献[10]指出了 IGBT 损耗主要由开关损耗与通态损耗两部分组成。

$$\begin{cases} P_{\text{cond}} = V_{\text{CE(sat)}} I_C D_T \\ P_{\text{sw}} = f_{\text{PWM}} (E_{\text{on}} + E_{\text{off}}) \\ P_{\text{IGBT}} = P_{\text{cond}} + P_{\text{sw}} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_{\text{cond}}$  是 IGBT 的通态损耗(单位为  $\text{W}$ ),由 IGBT 的

饱和电压降  $V_{ce(sat)}$  (单位为 V)、峰值电流  $I_c$  (单位为 A) 和占空比  $D_T$  决定,  $P_{sw}$  是 IGBT 的开关损耗 (单位为 W), 由 PWM 波的频率  $f_{PWM}$ 、IGBT 的开通损耗  $E_{on}$  (单位为 W) 与关断损耗  $E_{off}$  (单位为 W) 决定, IGBT 总损耗是通态损耗与开关损耗的累积。

文献[11]给出了损耗与结温  $T_j$  的关系:

$$T_j = T_c + P_{IGBT} R_{th(j-c)} \quad (5)$$

式中:  $T_c$  是 IGBT 的基板温度 (单位为  $^{\circ}C$ ),  $R_{th(j-c)}$  是 IGBT 的结壳热阻 (单位为  $K/kW$ )。

文献[12]提出了 IGBT 在受到循环应力冲击下的寿命模型, 即 Coffin-Manson-Arrhenis 广延指数模型, 当 IGBT 的热阻增大 20% 且集电极发射极电压增加 5% 以上时, 被视为 IGBT 失效的标志。

$$N_f = A (\Delta T_j)^{\alpha} \exp(E_a \beta / k_B T_m) \quad (6)$$

式中:  $A$ ,  $\alpha$  是模型参数,  $\beta$  是用于修正  $T_m$  影响的系数。  $E_a$  为与材料有关的激活能,  $E_a = 9.89 \times 10^{-20} J$ ;  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $k_B = 1.38 \times 10^{-23} J/K$ 。

得到 IGBT 的寿命与结温的关系后, 通过 Miner 理论与雨流计数法来计算牵引过程中 IGBT 的总损耗。

根据 Miner 理论解释, 如果在当前循环载荷下部件的寿命为  $N$ , 那么当前载荷造成的损伤  $D$  为:

$$D = 1/N \quad (7)$$

变幅载荷下  $n$  个不同的循环造成的总损伤为:

$$D = \sum_{i=1}^n 1/N_i \quad (8)$$

式中:  $N_i$  是每个载荷水平对应的疲劳寿命, 当部件发生疲劳损伤的时候, 累积损伤  $D$  为 1。为了分解牵引过程中组成结温的各个变幅循环, 本文引入了雨流计数法。

雨流计数法是由 Matsuiski M 等人在考虑了应力应变行为特性的一种计数方法, 将整个载荷-时间曲线中出现的应力幅范围划分为若干个等差的应力幅级别, 并统计出各相应应力幅级别内的循环次数, 从而得到了载荷的统计结果, 为 Miner 理论中各载荷水平的疲劳寿命分析提供了基础<sup>[13]</sup>。

### 1.5 退磁故障传递对变流器影响机理分析

由于退磁故障会导致电机的输出转矩下降, 因此在输入功率不变的情况下, 电机的恒转矩阶段占整个牵引时间的比重上升。而恒转矩阶段在 FOC 控制算法中,  $q$  轴电流保持在最大值, IGBT 的功率损耗相比恒功率阶段来说较大。因此, 永磁电机退磁会导致 IGBT 的功率损耗上升。

图3所示为一台永磁同步电机在同一工况下, 退磁程度与单次牵引损伤的关系图。由图3中可以看出, 退磁会对损伤造成明显的影响, 退磁程度在 12% 左右时, 会造成损伤增加 25%。图4所示为退磁 12% 的程度下, IGBT 在牵引过程中受到的损伤分布变化。可以看出, 由于退磁导致的恒转矩阶段上升, IGBT 在低频循环阶段的损

伤明显上升了。为了减轻退磁故障导致的 IGBT 损伤上升, 本文提出了一种延寿控制策略, 通过降低退磁电机的输入功率, 即改变电机之间的功率分配, 延长最薄弱的 IGBT 元件寿命, 从而起到延长整体牵引系统寿命的作用。

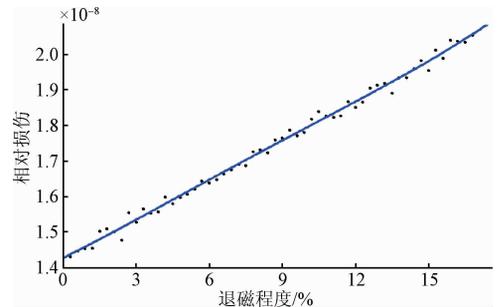
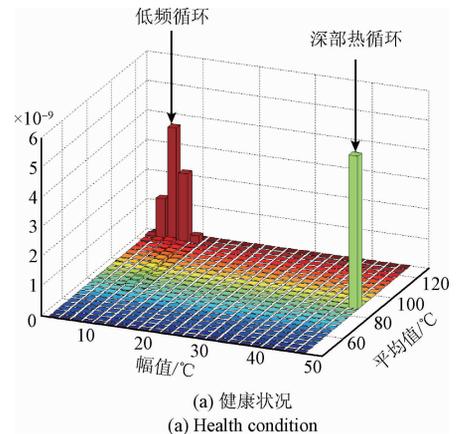
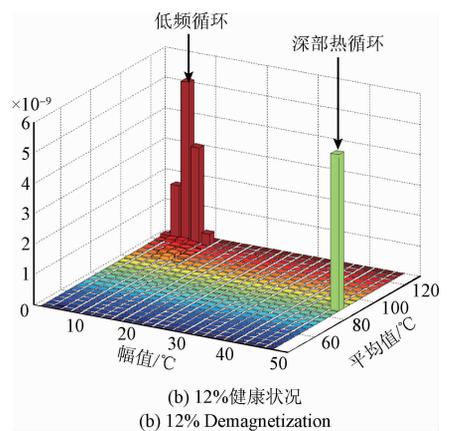


图3 损伤与退磁关系

Fig. 3 Relationship of damage and demagnetization



(a) 健康状况  
(a) Health condition



(b) 12%健康状况  
(b) 12% Demagnetization

图4 损伤分布变化

Fig. 4 Damage distribution with demagnetization

## 2 退磁故障下的自主延寿控制策略

### 2.1 基于相似度建模的退磁监测方法

第2节对于永磁牵引系统的混合建模做了阐述, 然

而电传动系统存在多变量、非线性、强耦合的特点,推导出具体的解析式难度很大,因此本文采用了数据驱动技术途径的非参数建模手段来监测退磁故障的程度。

文献[14]提出了基于相似度建模(similarity-based modeling, SBM)的非参数建模方法来监测退磁故障,通过监测参数向量并计算与历史状态矩阵的相似度,实现了对退磁程度的精准估计。相似度建模的基本原理如下。

定义  $\mathbf{y}(n_j)$  为状态  $n_j$  时的监测样本向量,包含了  $L$  个不同传感器的检测参数:

$$\mathbf{y}(n_j) = [y_1(n_j), y_2(n_j), y_3(n_j), \dots, y_L(n_j)]^T \quad (9)$$

选取  $Q$  种具有代表性的退化状况下的样本向量组成历史状态矩阵  $\mathbf{D}$ :

$$\mathbf{D} = [\mathbf{y}(n_1), \mathbf{y}(n_2), \mathbf{y}(n_3), \dots, \mathbf{y}(n_Q)] \quad (10)$$

定义  $\mathbf{y}_{in}$  为牵引系统运行时监测到的状态向量,通过与状态矩阵  $\mathbf{D}$  经过归一化后做相似度运算  $\otimes$ ,可以得到反应状态向量与历史数据相似度的权值矩阵  $\mathbf{w}$ :

$$\hat{\mathbf{w}} = (\mathbf{D}^T \otimes \mathbf{D})^{-1} \cdot (\mathbf{D}^T \otimes \mathbf{y}_{in}) = \mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{A} \quad (11)$$

$$\mathbf{w} = \frac{\hat{\mathbf{w}}}{\sum_{j=1}^N \hat{\mathbf{w}}(j)} \quad (12)$$

相似度运算  $\otimes$  的过程类似于矩阵的点乘。其中向量间的相似度计算采取了欧氏距离的相似度:

$$d(\mathbf{D}_i^T, \mathbf{y}_{in}) = \sqrt{\sum_{j=1}^L [\mathbf{D}_i^T(j) - \mathbf{y}_{in}(j)]^2} \quad (13)$$

得出权值矩阵  $\mathbf{w}$  的基础上,通过对于历史数据中各个状态对应的磁通量加权求和就可以得出退磁程度的估计值,这是整个延寿控制的基础。

$$\varphi_{\text{est}} = \Phi \cdot \mathbf{w} = [\varphi_{\beta_1}, \varphi_{\beta_2}, \dots, \varphi_{\beta_Q}] \cdot [w_1, w_2, \dots, w_Q]^T \quad (14)$$

本文后续部分将在 SBM 算法估计退磁状态的前提下开展进一步的延伸;即通过退磁状态的估计来计算降低退磁电机的功率分配系数,对逆变器系统的整体寿命进行优化控制。

## 2.2 闭环延寿控制策略

在准确监测电机退磁程度的基础上,本文设计了闭环的延寿控制策略,如图5所示。

该延寿控制策略在退磁监测的基础上,针对退磁故障造成 IGBT 损伤加剧问题,通过降低退磁电机输入功率的方式,使逆变器系统的整体寿命尽可能地延长。

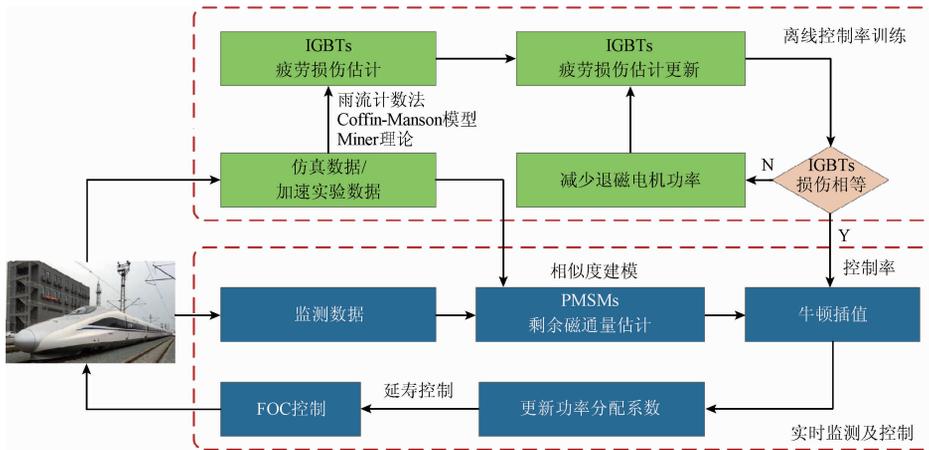


图5 延寿控制策略框架

Fig. 5 Infrastructure of Life-extending control

该控制策略可以分为离线控制率训练与实时监测控制两部分,同时又包括了基于相似度的退磁监测与自主延寿控制两个思路。

对于退磁监测方案,使用相似度建模的方式,在离线阶段,通过仿真数据或是历史运行数据,建立历史状态矩阵,并结合实时监测的运行数据,就可以得到退磁程度的估计值。

对于实时的自主延寿控制方面,本文采用了降低退磁电机输入功率的方式,降低 IGBT 的整体功率损伤,达到延长 IGBT 寿命的目的。为了定量地求解退磁程度与功率降低程度的关系,引入功率分配系数的概念,定义

为退磁后电机的输入功率与健康侧电机的输入功率比值。当延寿控制策略不介入整体的控制系统中时,退磁并不会影响电机的输入功率,功率分配系数恒为一。

在离线阶段,对控制率进行训练,即求解功率分配系数与退磁程度的关系。通过建模仿真或是加速寿命实验的方式,可以得到各种运行状况下的 IGBT 疲劳寿命。在此基础上定义若干个退磁状况:

$$\varphi = [\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \dots \quad \varphi_n] \quad (15)$$

对每一个退磁状况进行离线的功率分配估计,定义在  $\varphi_j$  退磁程度下,从小到大取若干功率分配系数,计算当前运行状况下两侧 IGBT 的损伤。当两侧 IGBT 损伤相等时,

此时的功率分配系数就是在  $\varphi_j$  退磁程度下的最佳功率分配系数  $\eta_j$ 。由此得到对应退磁状况的功率分配系数变化,  $\eta_j$  对应  $\varphi_j$  变化关系就是离线训练出的控制率。

$$\eta = [\eta_1 \quad \eta_2 \quad \dots \quad \eta_n] \quad (16)$$

实时控制过程中,SBM 算法能够快速对退磁情况开展实时估计,然后通过牛顿插值法的方式,参考控制率曲线,快速求得实时所需的功率分配系数,降低退磁电机的输入功率,延长综合逆变器系统整体寿命。

### 3 仿真实验结果

#### 3.1 仿真平台设计

本文基于 LabVIEW 电机仿真工具包以及 MATLAB 软件开发了永磁牵引系统延寿控制仿真实验平台,如图 6 所示。其中前面版可以对两台永磁同步电机的基本参数进行输入,并对速度、三相电流、牵引转矩等参数进行实时显示。

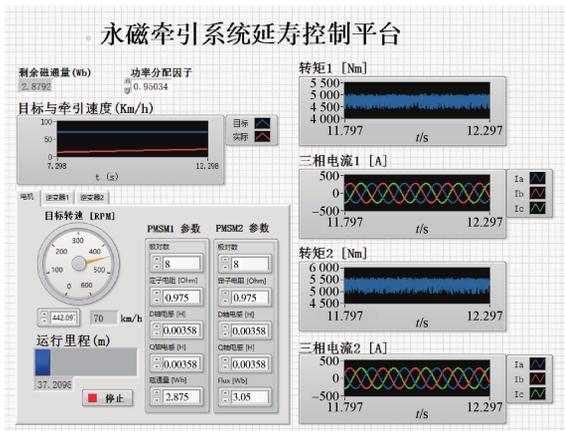


图 6 仿真平台前面板

Fig. 6 The panel of the simulation platform

仿真平台的具体程序包括了电机模型,健康监测与延寿控制的 3 个部分。其中电机模型参照第 2 节混合建模,包含了电机的  $d-q$  模型与磁场定向控制模块,是列车牵引调速的基础;健康监测通过 SBM 算法得到电机的磁通估计值;延寿控制在当前磁通估计的基础上,通过牛顿插值法快速生成最佳功率分配系数,对两台 PMSM 电机输入功率进行自适应自主调控,尽可能地延长逆变器系统的整体寿命。

#### 3.2 仿真参数设定

本文选取西门子 Syntegra<sup>[15]</sup> 的永磁直驱式牵引系统作为电机牵引系统的参考。文献[14]中对于仿真特性与实际参数做出了比较,仿真实验的转矩特性曲线与 Syntegra 的实际运行特性曲线在恒转矩、恒功率、电制动阶段能基本贴合,满足仿真验证的要求。其仿真参数如表 1 所示。

表 1 PMSM 仿真参数设定

Table 1 Parameters PMSM simulation

参量	数值
电机极对数 $n_p$	8
永磁体磁通 $\varphi_f/Wb$	3.05
定子电阻 $R_s/\Omega$	0.975
制动电阻 $R_{ks}/\Omega$	0.83
$d$ 轴电感 $L_d/mH$	3.58
$q$ 轴电感 $L_q/mH$	3.58
直流端电压 $U_{dc}/V$	750
转子转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	78
车轮半径 $r_w/m$	0.42

文献[12]中给出了高压环境下逆变器的寿命退化公式,此公式与加速寿命实验数据相比,90% 以上情况不存在较大误差,效果真实可信。

表 2 列出了用于相似度识别的参数及意义,表 3 给出了训练工况,包含了 6 种退磁状况与 4 种载荷状况。

表 2 相似度参数

Table 2 SBM Features

参数	符号	传感器
轴重	$M/n_m$	空气弹簧
恒转矩阶段加速度	$a_0$	速度传感器
牵引时间	$t$	速度传感器
$q$ 轴平均电流	$i_{q1}, i_{q2}$	霍尔传感器

表 3 训练工况

Table 3 Training conditions

	最大值	最小值	间隔	数量
载荷	AW3	AW0	-	4
磁通量	3.05 Wb	2.55 Wb	0.1 Wb	6

其中,AW0 ~ AW3 为列车标准载荷工况,分别对应空载(220 t)、座客(240.16 t)、满载(331.6 t)和超载(375.52 t)工况。仿真情景过程中,列车加速到 70 km/h,并牵引到 600 m 后完成仿真情景。

#### 3.3 仿真结果分析

通过退磁监测,离线的延寿控制估计,配合在线的功率分配延长整体逆变器寿命,图 7 所示为在 AW0 状况下,2.775 Wb 的磁通量状况下,本延寿控制策略分别对于退磁电机侧 IGBT 和健康电机侧 IGBT 的影响。

可以看到,退磁侧 IGBT 损伤的组成并没有发生明显的变化,但是由于降低了退磁电机的输出性能,整体损伤相对下降;而健康侧的 IGBT 并未受到明显的影响,但由于电机的输出性能进一步的下降,导致牵引时间略微延长,而健康侧电机的损伤也会略微上升。

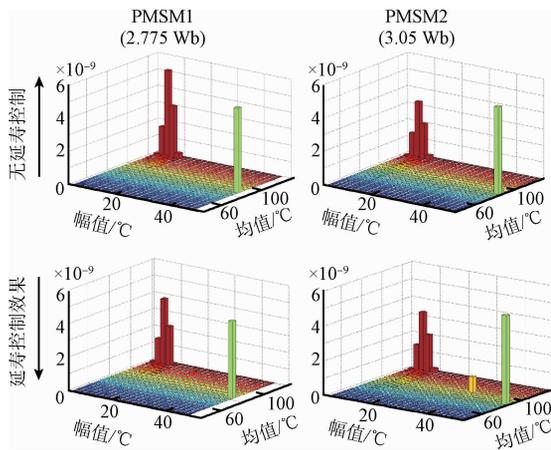


图7 优化前后 IGBT 损耗的对比

Fig. 7 Comparison of IGBT damage

定义延寿控制前的系统最大损伤  $D_1$  与延寿控制后

系统损伤  $D_2$  比值为控制效果  $\gamma$ :

$$\gamma = (D_1 - D_2) / D_1 \quad (17)$$

而 SBM 效果与延寿控制效果如表 4 所示,从表 4 可以看出,SBM 算法可以精确地对永磁体磁通进行估计,在训练工况和测试工况存在一定差异的情况下,最大估计误差仅为 0.50%,在控制率离线训练的基础上,实时控制过程中只需要对退磁估计过程进行矢量加权运算,仿真实验中该策略运算时间不到 5 ms,能够满足实时性要求。在退磁估计的基础上,参考控制率曲线获得实时最佳的功率分配因子,进行自主延寿控制,从而改善了故障侧电机逆变器的 IGBT 寿命,与未经优化的控制方案相比,整个逆变器系统寿命得到了有效的延长。在退磁量较大的情况下,寿命可以延长 12% 以上,可见本延寿控制方案在退磁故障较为严重的情况下可显著延长 IGBT 系统的可靠性,增加了故障平均间隔时间。

表 4 退磁估计与延寿控制结果

Table 4 Evaluation of demagnetization estimation and optimal control results

载荷	退磁估计				空气制动能优化分配			
	实际值 $\varphi_f / \text{Wb}$	估计值 $\varphi_{\text{est}} / \text{Wb}$	预测误差 Error/%	功率分配系数 $\eta$	退磁侧 IGBT 损伤 ( $\times 10^{-8}$ )	健康侧 IGBT 损伤 ( $\times 10^{-8}$ )	优化后损伤 ( $\times 10^{-8}$ )	延寿效果 $\gamma / \%$
AW0	2.975 0	2.978 1	0.10	0.967 3	1.49	1.43	1.44	3.36
	2.875 0	2.880 2	0.18	0.915 8	1.58	1.43	1.45	8.23
	2.775 0	2.775 6	0.10	0.872 2	1.68	1.44	1.47	12.50
AW1	2.975 0	2.968 2	0.23	0.967 0	1.64	1.57	1.58	3.66
	2.875 0	2.879 2	0.15	0.915 6	1.74	1.57	1.59	8.62
	2.775 0	2.778 2	0.12	0.872 1	1.85	1.58	1.61	12.97
AW2	2.975 0	2.985 0	0.34	0.966 3	2.24	2.15	2.16	3.57
	2.875 0	2.879 2	0.15	0.915 1	2.37	2.16	2.18	8.02
	2.775 0	2.761 2	0.50	0.871 8	2.52	2.16	2.21	12.30
AW3	2.975 0	2.982 2	0.24	0.965 8	2.55	2.45	2.46	3.53
	2.875 0	2.876 6	0.06	0.914 6	2.70	2.45	2.48	8.15
	2.775 0	2.776 8	0.06	0.871 2	2.87	2.46	2.51	12.54

同时,在自主执行延寿控制指令后,列车的牵引时间相对于没有延寿控制指令的情况下最大偏差发正在 AW3 工况,9% 的退磁情况下,牵引时间延长了 1.4 s,牵引距离延长了 3.9 m,牵引性能略有下降,但相对于实际运行数据来说可以忽略不计。牵引性能没有受到明显的影响,能够满足列车运营的要求。

## 5 结 论

本文针对永磁牵引列车电机退磁典型故障劣化及其对耦合逆变器系统电力电子关键部件的影响分析,提出了一种自主延寿控制策略。在准确估计退磁程度的基础上,闭环控制实现整个机电系统的寿命优化。

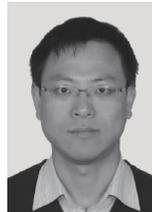
该策略分为离线功率分配控制率生成,以及在线监测与延寿控制两个部分。离线阶段通过牵引系统的混合建模,取得了功率分配与退磁程度的关系,得到相应的控制率曲线;在线监测通过监测数据与历史数据的相似度运算,估计出剩余磁通量并参考控制率曲线快速获取最佳的功率分配系数。该方法通过 Labview 仿真平台验证,在准确估计退磁程度的基础上,有效地延长了逆变器系统的整体寿命,同时对于牵引性能造成的影响不大,满足实际运营的需要。

## 参考文献

- [1] 裴大茗, 王建峰, 周鹏太, 等. 船舶 PHM 技术综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(9): 1289-1297.

- PEI D, WANG J F, ZHOU P T, et al. Survey on PHM technology in marine system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30 (9): 1289-1297.
- [2] 彭宇, 刘大同. 数据驱动故障预测和健康管理综述[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3):481-495.
- YU P, LIU D T. Data-driven prognostics and health management: A review of recent advances [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3):481-495.
- [3] 张程程, 班恬. SRAM型FPGA的可重构容错结构研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(11):41-45.
- ZHANG C C, BAN Y. Research on reconfigurable fault-tolerant architecture of SRAM-based FPGA [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39 (11): 41-45.
- [4] 祝伟佳, 马豪. 基于VxWork的高度容错技术的应用[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(2):89-92.
- ZHU W J, MA H. Application of highly fault tolerant technology on VxWork [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(2):89-92.
- [5] ALWI H, EDWARDS C. Fault detection and fault-tolerant control of a civil aircraft using a sliding-mode-based scheme [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(3):499-510.
- [6] LIU J, WU A. Life extending control for helicopter using robust dynamic inversion [C]. Control Conference IEEE, 2014:2005-2010.
- [7] SUN Y J, WANG Y L, LI M, et al. Performance assessment for life extending control of steam turbine based on polynomial method [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 108:1383-1389.
- [8] TUDORACHE T, TRIFU I. Permanent-magnet synchronous machine cogging torque reduction using a hybrid model [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(10):2627-2632.
- [9] DING J, ZHANG P, LI J. Fatigue life prediction of IGBT module for metro vehicle traction converter based on traction calculation [C]. IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems 2015: 1116-1121.
- [10] 洪峰, 单任仲, 王慧贞, 等. 一种逆变器损耗分析与计算的新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(15): 72-78.
- HONG F, SHAN R Z, WANG H Z, et al. Analysis and calculation of inverter power loss [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(15):72-78.
- [11] 何湘宁, 吴岩松, 罗皓泽, 等. 基于IGBT离线测试平台的功率逆变器损耗准在线建模方法 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 1-6.
- HE X N, WU Y S, LUO H Z, et al. QuasiOnline modeling method of the power inverter losses based on IGBT offline test platform [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 1-6.
- [12] 赖伟, 陈民铀, 冉立, 等. 老化实验条件下的IGBT寿命预测模型 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 173-180.
- LAI W, CHEN M Y, RAN L, et al. IGBT lifetime model based on aging experiment [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24):173-180.
- [13] 田军, 李强. 改进的雨流法实时计数模型 [J]. 北京交通大学学报, 2009(1):28-31.
- TIAN J, LI Q. Improved model of rain-flow real-time counting method [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2009(1):28-31.
- [14] 牛刚, 江俊杰. 基于相似度建模的永磁牵引列车健康优化控制 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2):210-216.
- NIU G, JIANG J J. Health-oriented control strategy for PMSM rail vehicles through similarity-based modeling [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2):210-216.
- [15] GERMISHUIZEN J, JÖCKEL A, HOFFMANN T, et al. SyntegraTM-next generation traction drive system, total integration of traction, bogie and braking technology [C]. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion IEEE, 2006:1073-1077.

## 作者简介



牛刚(通讯作者), 1999年于北京航空航天大学, 2007年和2009年韩国釜庆国立大学获得硕士和博士学位, 现为同济大学副研究员、博士生导师, 主要研究方向为复杂机电系统故障诊断、预测与健康管理、自主控制等。

E-mail: gniu@tongji.edu.cn

**Niu Gang** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beihang University in 1999, and M. Sc. and Ph. D. degrees both from Pukyong National University in South Korea in 2007 and 2009, respectively. Now he is an associate professor and supervisor for Ph. D. in Tongji University. His research interests fault diagnosis, prognostics and health management, and autonomous control for advanced complex systems.



刘森轶, 2015年于同济大学获得学士学位, 现为同济大学在读硕士研究生, 主要研究方向为轨道车辆牵引系统故障预测与智能控制。

E-mail: lsy930530@163.com

**Liu Senyi** received his B. Sc. degree from Tongji University in 2015. Now he is a M. Sc. candidate in Tongji University. His research interest fault prognosis and intelligent control of rail traction systems.