

文章编号: 2095-2163(2021)08-0121-05

中图分类号: TM351

文献标志码: A

基于 Flux 的故障 IPMSM 仿真系统研究

柳波海, 吴钦木, 李志远

(贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 针对 IPMSM 故障诊断实物平台搭建成本较高的情况, 本文基于数字仿真, 对电动车用电机故障仿真系统进行研究。该方法首先分析了基于改进绕组函数法、等效磁路法和有限元法建模的区别和特点; 而后选用有限元法建立 IPMSM 的偏心、退磁故障模型; 再将 Flux 建立的 IPMSM 有限元模型嵌入到 MATLAB-Simulink 环境中的矢量控制系统进行实时仿真; 最后分析各个电机模型的仿真数据。仿真实验表明, 当电流幅值减小时, 永磁体退磁程度越大, 电流达到稳定所需时间越长; 而偏心故障在时域上电机相电流与正常电机相差较小。

关键词: IPMSM; 故障诊断; 有限元; 退磁故障; 偏心故障

Research on faulty IPMSM simulation system based on flux

LIU Bohai, WU Qinmu, LI Zhiyuan

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

[Abstract] Aiming at the high cost of building a physical platform for fault diagnosis of IPMSM, this paper studies the motor fault simulation system for electric vehicles based on digital simulation. This method first analyzes the differences and characteristics of modeling based on improved winding function method, equivalent magnetic circuit method and finite element method; then selects the finite element method to establish the eccentricity and demagnetization fault model of IPMSM; then establishes the IPMSM finite element model by Flux. The vector control system embedded in the MATLAB-Simulink environment performs real-time simulation; finally, the simulation data of each motor model is analyzed. The simulation experiment shows that when the current amplitude decreases, the greater the demagnetization degree of the permanent magnet, the longer it takes for the current to stabilize; and the eccentric fault has a smaller difference between the motor phase current and the normal motor in the time domain.

[Key words] IPMSM; fault diagnosis; finite element; demagnetization failure; eccentricity failure

0 引言

近年来随着电动车使用的增多, 由其引发的交通安全问题也随之增多, 而车用电机故障是造成电动车安全隐患的一个重要因素。据 IEEE 工业应用协会关于电机可靠性调查结果^[1]显示, 每年电机的平均故障时间为几十到上百小时, 严重影响了人们的正常生活和工作, 因此对电机的故障诊断极其必要。目前, 电动车的电机广泛使用内置式永磁同步电动机(IPMSM), 其具有高效、高功率稠密、高可靠性和方便维护等优点^[2]。IPMSM 进行故障建模时, 其实物平台搭建成本较高, 而改进绕组函数法^[3]、等效磁路法^[4]和有限元法^[5]为主的电机建模方法成本较低且方便实现。

改进绕组函数法是一种电机电感的计算方法, 该方法能考虑绕组参数及气隙数据的影响。文献[6]中对绕组函数进行理论推导, 证明所提方法用

于计算偏心电感的可行性; 文献[7]提出了一种基于绕组函数理论(WFM)的电机建模方法。WFM 通过有限元方法(FEM)进行了改进, 这种新方法具有良好的准确性且缩短了计算时间。但改进绕组函数法在建立电机模型时, 需要忽略高倍频谐波及一些非线性因素的影响。等效磁路(MEC)就是将磁通在磁导体里通过的路径用磁路近似出来; 文献[8]利用指数方程来考虑磁导率的非线性, 磁极正对处的气隙磁通密度与有限元仿真结果相比误差较小; 文献[9]使用磁通线创建了包括非线性磁阻的 dq 轴 MEC。但在等效磁路电机模型中, 需要考虑电机定子、转子和气隙的各部分磁路。如定子中齿和槽的磁路, 绕组的磁路以及绕组周围空隙部分的漏磁路, 转子中铁芯的磁路等。FEM 作为一种高精度的建模方法, 常用于多物理量耦合场的分析计算; 文献[10]中, 基于 FEM 分析了匝间短路(ITSC)故障对电磁参数的影响, 分析结果可为 DTP-PMSM 的

作者简介: 柳波海(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电机故障诊断、人工智能; 吴钦木(1975-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 控制理论与应用、网络控制、电动汽车传动控制等; 李志远(1993-), 男, 硕士, 主要研究方向: PMSM 的自动控制、深度学习和故障诊断。

通讯作者: 吴钦木 Email: 505953130@qq.com

收稿日期: 2021-04-30

ITSC 故障诊断提供参考;文献[11]提出 PWM 逆变器馈电式永磁同步电动机的有限元分析(FEA),研究了匝数故障对机器参数的影响。

综上所述,为了方便计算,基于改进绕组函数和基于等效磁路的电机建模方法都需要一定程度地忽略掉齿槽效应、磁饱和等非线性因素的影响,从而降低了模型的精确度。而 FEM 不仅不用忽略这类影响,还能考虑其他现实工况的影响,建立更精确的电机模型。因此,本文基于有限元法,对电机进行故障建模,并对电机驱动仿真系统进行研究,为电动车用电机故障诊断奠定数据基础。

1 Flux 故障电机建模

Flux 是一个有限元建模软件,常用于磁、电、热场的建模和仿真。Flux 广泛用于电机设计领域,如直流电机、感应电机、同步电机等。此外,Flux 的管理器中还集成了材料管理器、单位管理器和一些系统常用选项。使用 Flux 建立电机模型的过程如下:

- (1) 建立电机几何模型;
- (2) 设置物理属性,其中包括材料设置、外部电路设计和机械属性设置;
- (3) 设置求解参数,对模型进行求解;
- (4) 处理求解结果。Flux 对每一步求解状态都保存了一个相应的文件,若要获取各个参数的求解结果,需执行“后处理”对结果进行可视化或保存。

电机故障主要分为 3 类^[12]:电气故障、机械故障及磁故障。本文以偏心故障和退磁故障为例,研究电动车用电机仿真系统。

1.1 静态偏心故障电机建模

由于偏心故障电机是一种非对称结构,因此,在 Flux 中建立带偏心故障的电机时,需要设计电机机体的完整几何结构。如图 1 所示,在建立 IPMSM 几何模型时,需要在气隙设置时选择“With Eccentricity”。在机械属性中可设置 IPMSM 转子的旋转中心,进一步确定 IPMSM 的偏心故障类型。

通过改变电机定子中心坐标,本文分别建立带有 10% 和 20% 的静态偏心故障的 IPMSM。将 10% 偏心 IPMSM 的定子中心坐标 O_r 、转子轴心坐标 O_s 设置为 $(0.06, 0)$ 和 $(0, 0)$,使得 $|O_s O_r|$ 为 0.06 mm (均匀气隙长度 g_0 为 0.6 mm);将 20% 偏心 IPMSM 的定、转子轴心分别设置为 $(0.12, 0)$ 和 $(0, 0)$,使得 $|O_s O_r|$ 为 0.12 mm。然后在机械属性中,将转子旋转中心设置为 $(0, 0)$,使得转子旋转中心和转子轴心重合。

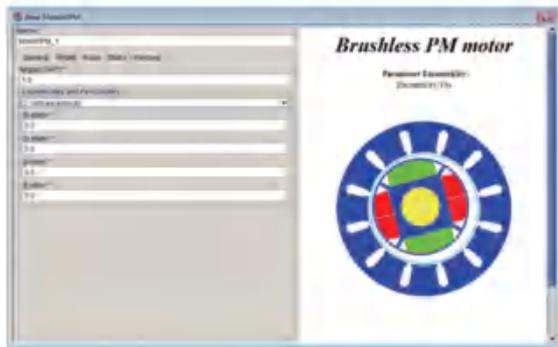


图 1 Flux 中偏心故障电机设置界面

Fig. 1 Setting interface of eccentric fault motor in Flux

1.2 退磁故障 IPMSM 建模

电动车用 IPMSM 经常工作在空间狭小的高温环境中,且内嵌式的安装方式使得永磁体不易受车辆抖动而受损。因此,在电动车工况下,永磁体的退磁为均匀退磁居多,本文主要分析 IPMSM 的均匀退磁故障。

在 Flux 中,可通过“Linear magnetic described by the B_r module”定义 NdFeB 类永磁体。如图 2 所示,设置“Remanent flux density”中的值,可定义永磁材料的剩磁 B_r ;设置“Relative permeability”可定义磁性曲线的斜率。为了建立一个极对上永磁体带不同程度退磁故障的 IPMSM 模型,本文定义 3 条磁性曲线,分别为正常、25% 和 50% 退磁材料的磁性曲线,如图 3 所示。将正常永磁体的剩磁 B_r 设定为 1.2T,磁导率设定为 1.05;25% 和 50% 退磁的永磁体的剩磁 B_r 分别设定为 0.9T 和 0.6T,而磁导率不变,矫顽力也相应变大。

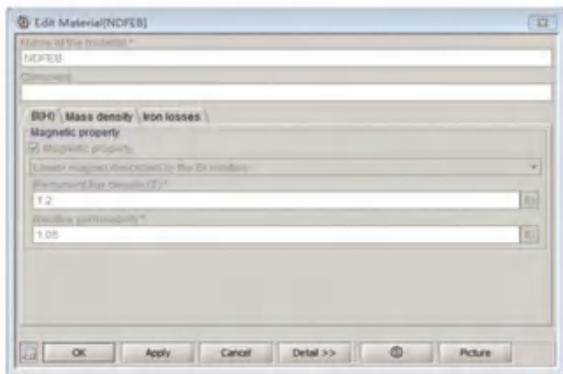


图 2 Flux 中线性特性的永磁体材料定义界面

Fig. 2 Permanent magnet material definition interface with linear characteristics in Flux

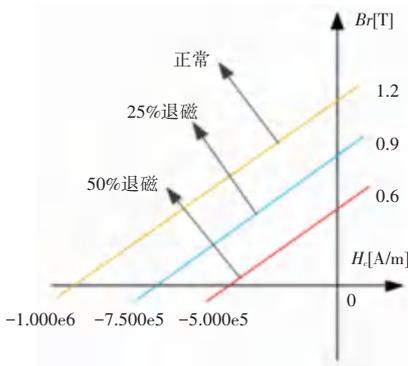


图 3 NdFeB 材料及其退磁材料的磁性曲线

Fig. 3 Magnetic curve of NdFeB material and its demagnetization material

2 基于 Flux 和 MATLAB 的故障 IPMSM 仿真系统建立

本文利用有限元模型的精度和 MATLAB 控制

算法的便利性优势, 将 Flux 建立的 IPMSM 有限元模型嵌入到 MATLAB-Simulink 环境中的矢量控制系统中进行在环实时分析。矢量控制系统中电流策略采用 $i_d = 0$, 并且使用空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 算法调制电机供电电压矢量, 控制系统框图如图 4 所示。Flux 和 MATLAB-Simulink 联合仿真的 IPMSM 有限元模型在环仿真系统结构框架如图 5 所示。

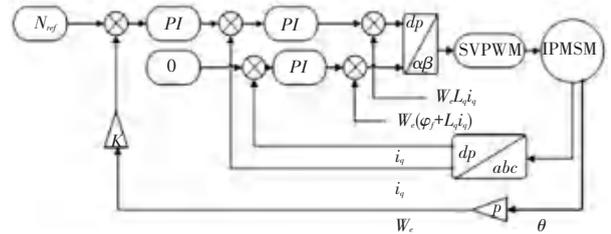


图 4 矢量控制框图

Fig. 4 Vector control block diagram

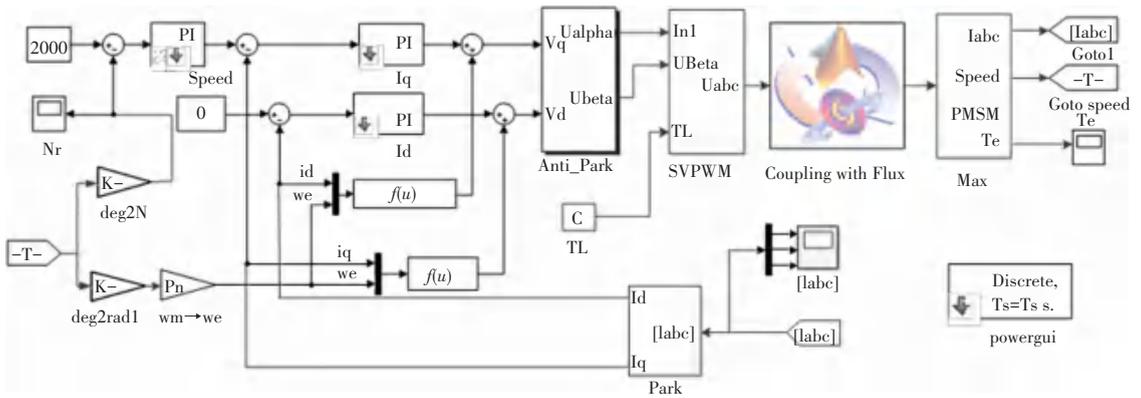


图 5 Flux 和 MATLAB-Simulink 的联合仿真系统图

Fig. 5 Co-simulation system diagram of Flux and MATLAB-Simulink

3 仿真结果分析

3.1 正常 IPMSM 的联合仿真结果

取仿真步长 $a = 1e-5$, 使用 MATLAB 求解器 FixedStepDiscrete, 求解系统的控制部分。与此同时, 将调制的 SVPWM 信号输入到 IPMSM 的有限元模型中, 由 Flux 迭代求解出电机状态并输出到 Simulink 中, 然后反馈到 PI 控制器中形成闭环。为方便对比分析, 对正常 IPMSM 进行仿真, 转速从 0~3 000 rpm (空载), 将不同转速对应的电流分别截取片段, 如图 6 所示。其中包含: 电机转速从 1 000 rpm 增加到 2 000 rpm; 转速从 2 000 rpm 增加到 3 000 rpm; 转速从 3 000 rpm 上升到 3 060 rpm, 再下降到 3 000 rpm; 以及稳定转速 3 000 rpm 的运行状态。

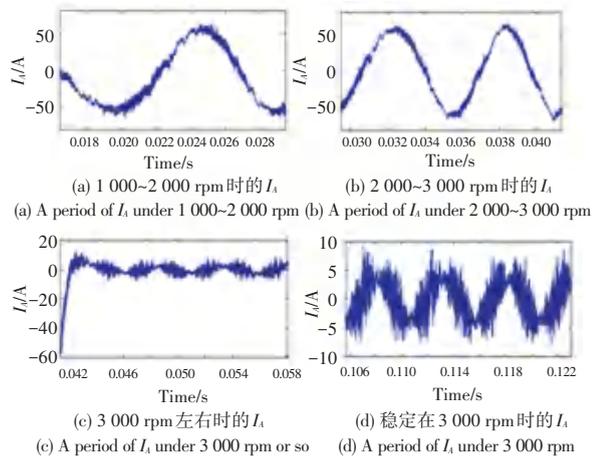


图 6 正常 IPMSM 在不同运行状态下的相电流波形

Fig. 6 Phase current waveforms of normal IPMSM in different operating states

3.2 退磁 IPMSM 的联合仿真结果

遵从单一变量的法则,将一对极永磁体带有退磁故障的 IPMSM 模型嵌入矢量控制系统中进行仿真分析。

采用同样的步长和初始状态,将带有 25%退磁的 IPMSM 嵌入矢量控制系统进行仿真分析。图 7 展示了 25%退磁 IPMSM 在不同运行状态下的相电流波形。

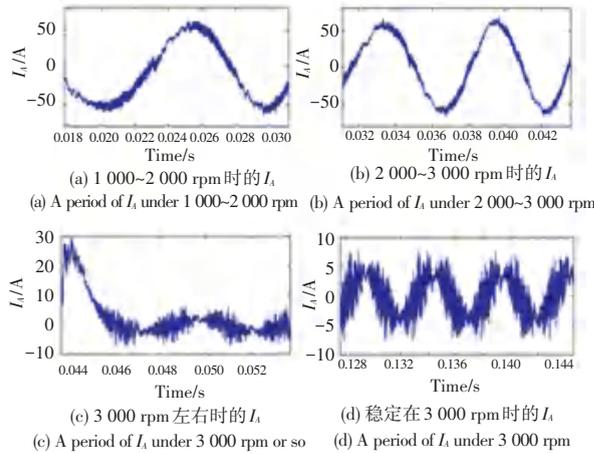


图 7 25%退磁 IPMSM 不同运行状态相电流波形

Fig. 7 25% demagnetization IPMSM phase current waveforms in different operating states

以同样的方法将 50%退磁 IPMSM 模型嵌入矢量控制系统中进行仿真分析,不同运行状态下的电流波形如图 8 所示。

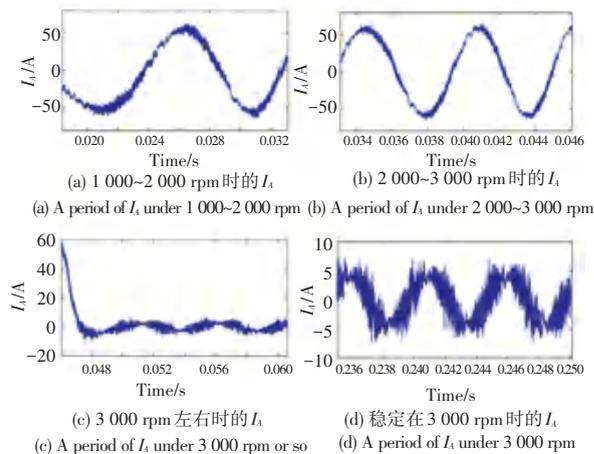


图 8 50%退磁 IPMSM 不同运行状态相电流波形

Fig. 8 50% demagnetization IPMSM phase current waveforms in different operating states

对比两种不同程度的退磁故障,由 IPMSM 的相电流和正常 IPMSM 的相电流可知,相同运行状态下,仅从波形形状上观察,两种故障电机的相电流与正常电机几乎没有差别。但从电流幅值减小的过程来看,退磁故障电机的电流幅值达到稳定的时间比

正常电机更长。正常电机在仿真时间为 0.042 s 时电流幅值已经下降至 0 附近,而存在 25%退磁故障的 IPMSM 电流,在 0.046 s 下降到 0 幅值附近,含 50%退磁故障的 IPMSM 需要 0.048 s 下降到 0 幅值附近。由此可知,退磁故障降低了电机的输出转矩,相当于增加了电机负载,因此使得电机转速从启动到稳定时的时间增加。

3.3 静态偏心 IPMSM 的联合仿真结果

同样遵从单一变量的法则,分别将 10%和 20%静态偏心故障电机模型导入 MATLAB-Simulink 中的矢量控制系统,采用同样的仿真步长及初始状态进行仿真分析。图 9 和图 10 分别展示了含 10%偏心故障 IPMSM 及含 20%偏心故障 IPMSM 在不同运行状态下的电流波形。

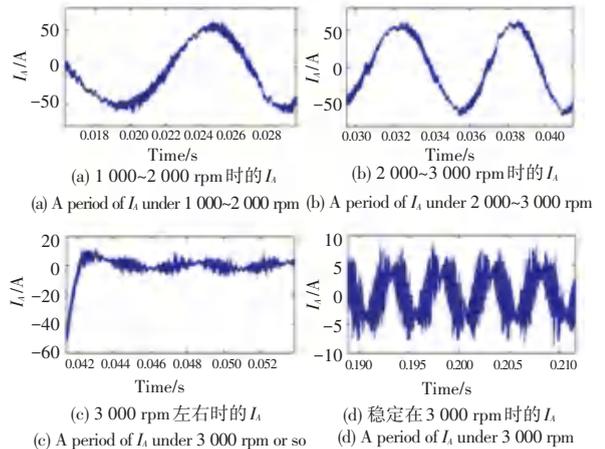


图 9 10%偏心 IPMSM 不同运行状态相电流波形

Fig. 9 10% eccentric IPMSM phase current waveforms in different operating states

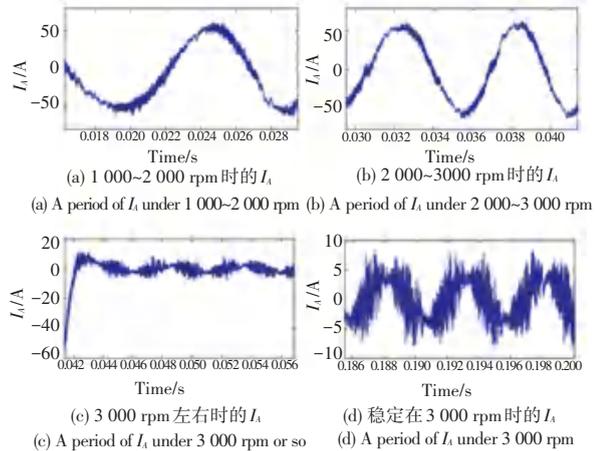


图 10 20%偏心 IPMSM 不同运行状态相电流波形

Fig. 10 20% eccentric IPMSM phase current waveforms in different operating states

对比图 9、图 10 和图 6 可知:在时域上,纯静态偏心故障对电机相电流影响较小。

4 结束语

本文研究了一种基于有限元软件 Flux 和 MATLAB-simulink 的电动车用电动机联合仿真系统,将各种 IPMSM 有限元模型嵌入到 MATLAB-Simulink 的矢量控制系统中,对各个 IPMSM 模型进行联合仿真,仿真结果表明:与正常电机相比,当电流幅值减少时,永磁体退磁程度越大,电流达到稳定所需的时间就越长;但对于电机含有偏心故障,对电机相电流的影响非常小,转速达到稳定所需的时间相差较小。根据以上电机的数据,能为电机的故障诊断奠定数据基础。

参考文献

[1] Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part II [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1985, 21(4): 865-872.

[2] 吴钦木,安林杰,李叶松,等. 电动车用 IPMSM 损耗最小化电流求解方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 128-132.

[3] 林鹏,戈宝军,陶大军,等. 多相电机定子绕组改进绕组函数的有限元分析[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(2): 53-59.

[4] 宋双利,李晨曦. 直线开关磁阻电动机等效磁路法分析[J]. 煤

矿机电, 2019, 40(5): 78-80.

[5] 陈亮亮,祝长生,陈波,等. 定子永磁型高速电机凸极转子强度分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(7): 222-230.

[6] 鲍晓华,程志恒,王汉丰,等. 基于改进绕组函数法的感应电机偏心电感参数计算[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 13-20.

[7] M. N., M. K., K. A. Accurate modeling of switched reluctance motor by using improved winding function method [C]//2014 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2014: 793-797.

[8] 叶品州,李红伟,于文涛,等. 考虑材料非线性及涡流影响的径向电磁轴承等效磁路建模[J]. 电工技术学报, 2020, 35(9): 1858-1867.

[9] K. L., J. L., H. L. Inductance Calculation of Flux Concentrating Permanent Magnet Motor through Nonlinear Magnetic Equivalent Circuit[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 1-4.

[10] W. S., J. H., S. D., et al. Electromagnetic Parameters Analysis of Inter-Turn Short Circuit Fault in DTP-PMSM Based on Finite Element Method; 2020 8th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA) [C], 2020: 1-4.

[11] M. F., Y. B., M. N. A. Analysis and co-simulation of permanent magnet synchronous motor with short-circuit fault by finite element method; 2016 13th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD) [C], 2016: 472-477.

[12] EKER M., AKAR M. Eccentricity fault diagnosis in a permanent magnet synchronous motor under nonstationary speed conditions [J]. Turkish Journal of Electrical Engineering And Computer Scienc ES, 2017, 25(3): 1881-1893.

(上接第 120 页)

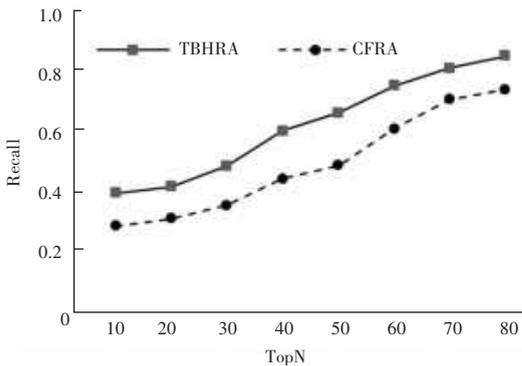


图 4 推荐算法 recall 比较

Fig. 4 Comparison of recommended algorithms recall

3 结束语

推荐系统已经成为有效解决信息严重过载问题的工具,而每种推荐方法各有优缺点,将多种方法综合起来使用,是推荐在线学习资源的一条有效的途径。本文提出了一种基于标签内容的推荐算法,采

用 TF-IDF 平衡热门标签的权重,采用修正的余弦函数的弦相似性计算用户与用户之间的相似性、资源与资源之间的相似性,结合知识图谱技术让推荐结果在相似的基础上增加扩展性,满足进阶学习特点,使其在准确率和推荐效率上优于传统的协同过滤推荐算法,为解决同类问题提供了较强的参考意义。复杂网络理论同协同推荐存在契合点,利用复杂网络理论进行推荐也是进一步研究的方向。

参考文献

[1] 李思男,李宁,李战怀. 多标签数据挖掘技术:研究综述[J]. 计算机科学, 2013, 40(4): 14-21.

[2] 程高伟. 基于标签的学习资源推荐系统[D]. 西安: 陕西师范大学, 2015.

[3] 王国霞,刘贺平. 个性化推荐系统综述[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(7): 66-76.

[4] 郭芳. 基于众包的教育知识图谱构建与研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.

[5] 刘辉,郭梦梦,潘伟强. 个性化推荐系统综述[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2017, 29(3): 51-59.