

表贴式永磁同步电机直接转矩控制 变幅值预测控制研究^{*}

李耀华, 任佳越, 师浩浩, 杨启东, 孟祥臻, 曲亚飞
(长安大学汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 基于以电压矢量幅值为变量的表贴式永磁同步电机 (SPMSM) 磁链和转矩方程, 采用预测控制计算得出施加不同电压矢量幅值的下一时刻磁链和转矩值, 选择使磁链和转矩误差目标函数最小的电压矢量幅值作为最优值, 从而确定下一时刻施加的电压矢量。仿真结果表明: 在电压矢量变幅值预测下, SPMSM 直接转矩控制 (DTC) 系统运行良好, 定子磁链轨迹为理想圆, 磁链和转矩均符合控制要求, 转速跟踪良好, 定子电流波形正弦。预测控制需要从备选电压矢量幅值集合中选择最优幅值。理论上, 备选电压矢量幅值个数越多, 系统优化效果越好, 但也带来更大的计算负担。研究了 9 种等分电压矢量情况下变幅值预测控制系统的控制效果。根据控制效果和计算负担, 提出变幅值预测控制将电压矢量幅值三等分较为理想。

关键词: 表贴式永磁同步电机; 直接转矩控制; 电压矢量选择; 预测控制

中图分类号: TM 341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)01-0009-06

Predictive Control with Variable Amplitude of Voltage Vector of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor Direct Torque Control System^{*}

LI Yaohua, REN Jiayue, SHI Haohao, YANG Qidong, MENG Xiangzhen, QU Yafei
(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Based on the expressions of flux and torque of surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM) direct torque control (DTC) system using the amplitude of applied voltage vector as the variable, the values of stator flux and torque at the next sampling point after applying voltage vector with different amplitude were given. The object function of flux error and torque error was proposed. The predictive control would select the optimal amplitude of voltage vector to minimize the object function. Simulation results showed that the PMSM DTC system under the control of proposed strategy worked properly. As the predictive control selected the optimal voltage vector from aggregate of voltage vectors, more voltage vectors would lead to better control performance, at the cost of heavier calculation burden. Control performances of SPMSM DTC system were given using 9 methods of dividing voltage vectors. According to control performance and calculation burden, dividing voltage vectors into three equal parts was an ideal way.

Key words: surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM); direct torque control (DTC); voltage vector selection; predictive control

0 引言

永磁同步电机 (PMSM) 直接转矩控制 (DTC)

技术具有动态性能好、系统鲁棒性强、结构简单等优点, 成为了学术界的研究热点^[1-5]。传统 DTC 技术基于开关表控制, 根据转矩和定子磁链幅值

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51207012); 陕西省工业科技攻关项目 (2016GY-069); 陕西省微特电机及驱动技术重点实验室开放基金项目 (2013SSJ2002); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (300102228201)

作者简介: 李耀华 (1980—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电机电控与新能源汽车技术。

任佳越 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机电控与新能源汽车技术。

误差信号及定子磁链角位置,按照开关表查表选择逆变器产生的基本电压矢量实现对转矩和磁链的增减控制要求。研究发现开关表选择的电压矢量不能同时始终满足磁链和转矩的控制要求,从而产生不合理转矩脉动,并进一步得出了 PMSM DTC 系统电压矢量选择区域^[6-8]。凡是相角位于选择区域的电压矢量均可实现对磁链和转矩的正确控制。文献[9]给出一种电压矢量选择方案,电压矢量相角位置为所在选择区域的角平分线,电压矢量幅值固定。该方法可有效消除因开关表失效引起的转矩脉动。电压矢量幅值越大,电压矢量对磁链和转矩的作用效果也越大。因此,可以将电压矢量幅值作为控制变量来提高系统性能。本文基于以电压矢量幅值为变量的表贴式永磁同步电机 (SPMSM) 磁链和转矩方程,采用预测控制计算得出施加不同电压矢量幅值的下一时刻磁链和转矩值,选择使磁链和转矩误差目标函数最小的电压矢量幅值作为最优值,从而确定下一时刻施加的电压矢量。进一步研究了 9 种等分电压矢量情况下变幅值预测控制系统的控制效果,给出了变幅值预测控制较理想的等分方式。

1 SPMSM DTC 变幅值预测控制

文献[8]指出 SPMSM DTC 系统电压矢量选择区域如图 1 所示。理论上,只要位于选择区域的电压矢量均可满足 DTC 系统对磁链和转矩的增减控制要求。为了选择最优幅值的电压矢量,需要定量分析不同幅值的电压矢量对定子磁链和转矩的影响^[10-12]。

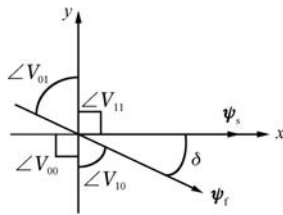


图 1 电压矢量选择区域

忽略定子电阻压降,施加电压矢量 Δt 时间后,定子磁链为

$$\psi_s(k+1) \approx \psi_s(k) + V_s(k) \cdot \Delta t \quad (1)$$

式中: $\psi_s(k)$ 、 $\psi_s(k+1)$ ——第 k 时刻和第 $k+1$ 时刻定子磁链;

$V_s(k)$ ——施加的电压矢量。

由式(1)可知,对 PMSM 施加电压矢量 Δt 时间后,定子磁链变化如图 2 所示。其中, α 为施加的电压矢量与定子磁链夹角, $\Delta\theta_s$ 为施加电压矢量引起的定子磁链角变化。

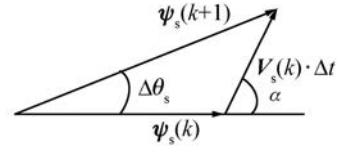


图 2 定子磁链变化

由图 2 可知,忽略转子运动引起的转矩角变化,在电压矢量 V_s 作用下,第 $k+1$ 时刻定子磁链幅值 $\psi_s(k+1)$ 和转矩角 $\delta(k+1)$ 分别如式(2)和式(3)所示:

$$\hat{\psi}_s(k+1) = \hat{\psi}_s(k) \sqrt{1 + q^2 + 2q\cos\alpha},$$

$$q = \hat{V}_s(k) \cdot \Delta t / \hat{\psi}_s(k) \quad (2)$$

$$\delta(k+1) \approx \delta(k) + \Delta\delta =$$

$$\delta(k) + \arcsin \frac{q \sin \alpha}{\sqrt{1 + q^2 + 2q\cos\alpha}} \quad (3)$$

式中: $\hat{\psi}_s(k)$ 、 $\delta(k)$ 、 $\hat{V}_s(k)$ ——第 k 时刻定子磁链幅值、转矩角和电压矢量幅值。

SPMSM 转矩方程为

$$T_e = \frac{3p}{2L_d} \hat{\psi}_s \psi_r \sin \delta \quad (4)$$

式中: T_e ——电磁转矩;

p ——电机极对数;

L_d ——直轴电感;

ψ_r ——转子磁链。

将式(2)、式(3)代入式(4),可得 SPMSM 在第 $k+1$ 时刻的电磁转矩为

$$T_e(k+1) = \frac{3p\psi_r \hat{\psi}_s(k)}{2L_d} \sqrt{1 + q^2 + 2q\cos\alpha} \cdot$$

$$\sin \left[\delta(k) + \arcsin \frac{q \sin \alpha}{\sqrt{1 + q^2 + 2q\cos\alpha}} \right] \quad (5)$$

定义 SPMSM DTC 系统转矩和磁链误差目标函数如式(6)所示:

$$g = \sqrt{\left[\frac{T_e^* - T_e(k+1)}{T_e^*} \right]^2 + \left[\frac{\hat{\psi}_s^* - \hat{\psi}_s(k+1)}{\hat{\psi}_s^*} \right]^2} \quad (6)$$

式中： T_e^* 、 $\hat{\psi}_s^*$ ——系统的参考转矩和定子磁链幅值。

由式(6)可知,当施加电压矢量相角固定时,目标函数值由所施加电压矢量的幅值唯一决定。

文献[9]给出一种施加电压矢量方案,电压矢量相角位置为所在选择区域的角平分线,电压矢量幅值固定为逆变器电压矢量六边形内切圆半径,大小为 $0.1 \times \frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}$,定义其为 V_s 。

令所施加的电压矢量位于所在选择区域的角平分线,电压矢量幅值为 n 个可选变量,则由式(2)和式(5)预测得出施加不同幅值电压矢量作用的下一时刻 SPMSM 定子磁链幅值和转矩。将其代入式(6),可得 n 个不同的目标函数值,并选择令目标函数值 g 最小的电压矢量幅值作为下一时刻施加的电压矢量幅值,即可确定下一时刻施加的电压矢量幅值 $\hat{V}_s(k+1)$ 。

基于预测控制的 SPMSM DTC 最优电压矢量幅值确定流程如图 3 所示。图 3 中 ϕ 和 τ 分别为磁链和转矩滞环控制信号, θ_s 为定子磁链角位置。

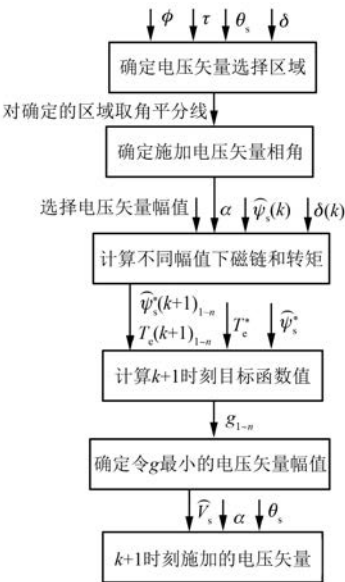


图 3 最优电压幅值选择策略流程图

基于 MATLAB/Simulink 建立 SPMSM DTC 变幅值预测控制系统仿真模型。仿真参数如下:系统采样周期为 5×10^{-5} s;参考转速为 60 r/min;参考转矩初始为 10 N·m,0.3s 时阶跃至 30 N·m;参

考定子磁链幅值为 0.3 Wb;转矩滞环宽度为 0.02 N·m;定子磁链幅值滞环宽度为 0.002 Wb。仿真用 SPMSM 参数如表 1 所示。

本文取电压矢量变幅值预测备选值为 $0.1V_s$ 、 $0.2V_s$ 、 $0.3V_s$ 、 $0.4V_s$ 、 $0.5V_s$ 、 $0.6V_s$ 、 $0.7V_s$ 、 $0.8V_s$ 、 $0.9V_s$ 、 V_s 10 个变量。在变幅值预测控制下,定子磁链轨迹、定子磁链幅值、电机转速、电机转矩和 A 相定子电流波形分别如图 4~图 8 所示。

表 1 仿真用 SPMSM 参数

参数名称	参数值
定子电阻 R_s/Ω	0.2
d 轴电感 L_d/H	0.008 5
q 轴电感 L_q/H	0.008 5
转子磁链 ψ_f/Wb	0.175
极对数 p	4
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.089
黏滞阻尼 $F/(N \cdot m \cdot s)$	0.005

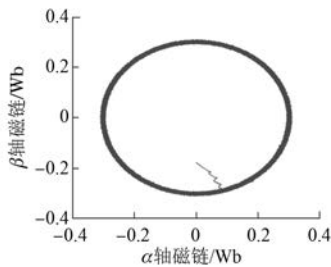


图 4 定子磁链轨迹

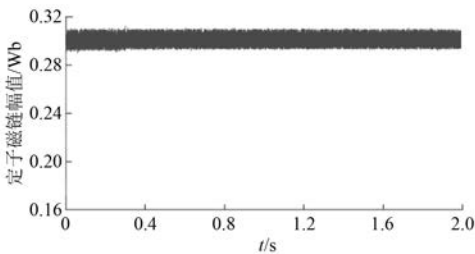


图 5 定子磁链幅值

图 4~图 8 表明,在电压矢量变幅值预测下,SPMSM DTC 系统运行良好,定子磁链轨迹为理想圆,磁链和转矩均符合控制要求,转速跟踪良好,定子电流波形正弦。

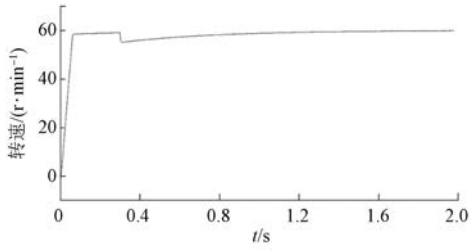


图6 电机转速

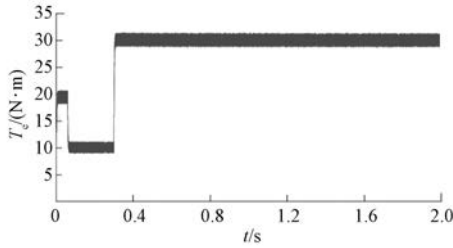


图7 电机转矩

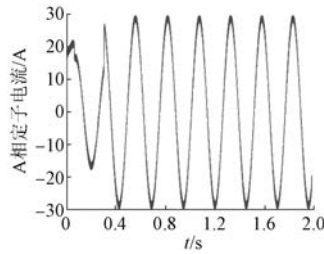


图8 A相定子电流

$$\psi_{rip_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\psi_s - \psi_s^*)^2}{n}} \quad (9)$$

式中： n ——样本数量。

下文给出备选电压矢量幅值为 $(0.1V_s, 0.2V_s, 0.3V_s, 0.4V_s, 0.5V_s, 0.6V_s, 0.7V_s, 0.8V_s, 0.9V_s, V_s)$ 十等分和 $(0.5V_s, V_s)$ 两等分两种情况下的目标函数、转矩脉动和磁链脉动波形,如图9~图14所示。十等分情况下目标函数平均值、转矩脉动均方根误差和磁链脉动均方根误差分别为0.006 9、0.813 3 N·m和0.005 3 Wb;两等分情况下目标函数平均值、转矩脉动均方根误差和磁链脉动均方根误差分别为0.011 5、0.890 4 N·m和0.005 6 Wb。仿真波形和评价指标计算结果表明:十等分时控制效果要优于两等分,但计算负担也更大。

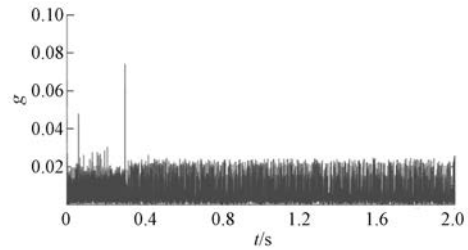


图9 十等分时目标函数值g波形

2 电压矢量幅值等分方式影响

上文所述控制效果是在10个备选电压矢量幅值条件下得到的。理论上,备选电压矢量数目越多,预测控制系统控制效果越好,但系统计算负担也越大。下文给出9种等分电压矢量幅值的仿真条件,分析在9种备选电压矢量数目下的预测控制效果。为了定量评价控制效果,本文使用目标函数平均值 g_{ave} 、转矩脉动均方根误差 T_{rip_RMSE} 和磁链脉动均方根误差 ψ_{rip_RMSE} 作为评价指标,分别如式(7)~式(9)所示:

$$g_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n g}{n} \quad (7)$$

$$T_{rip_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_e - T_e^*)^2}{n}} \quad (8)$$

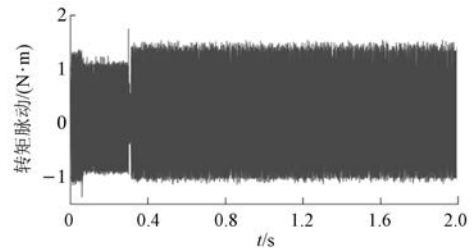


图10 十等分时转矩脉动

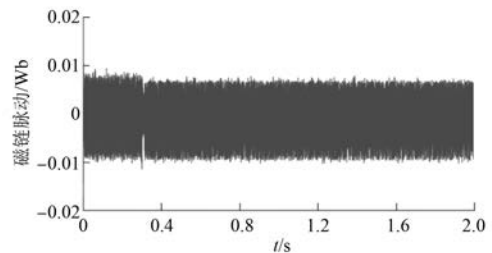


图11 十等分时磁链脉动

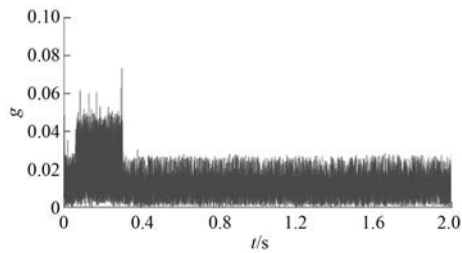


图 12 二等分时目标函数值 g 波形

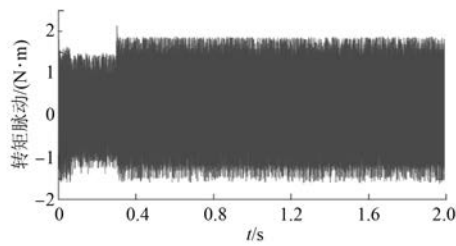


图 13 二等分时转矩脉动

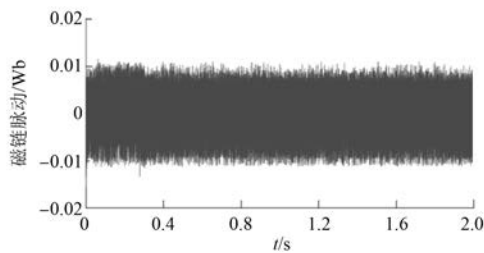


图 14 二等分时磁链脉动

9 种不同等分方式下,SPMSM DTC 变幅值预测控制系统的目标函数平均值、转矩脉动均方根误差和磁链脉动均方根误差如表 2 所示。

表 2 仿真计算结果

等分数	评价函数 平均值	转矩脉动均方根 误差/(N·m)	磁链脉动均 方根误差/Wb
2	0.011 5	0.890 4	0.005 6
3	0.007 3	0.742 8	0.004 9
4	0.007 6	0.801 0	0.005 2
5	0.007 5	0.821 1	0.005 3
6	0.007 6	0.799 8	0.005 2
7	0.007 5	0.822 7	0.005 4
8	0.007 6	0.814 9	0.005 3
9	0.007 3	0.822 8	0.005 4
10	0.006 9	0.813 3	0.005 3

目标函数平均值、转矩脉动均方根误差和磁链脉动均方根误差与等分数的关系波形如图 15~图 17 所示。

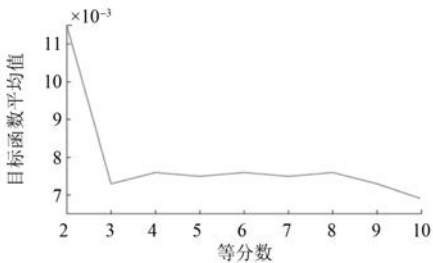


图 15 目标函数平均值

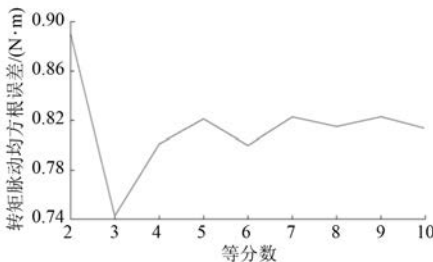


图 16 转矩脉动均方根误差

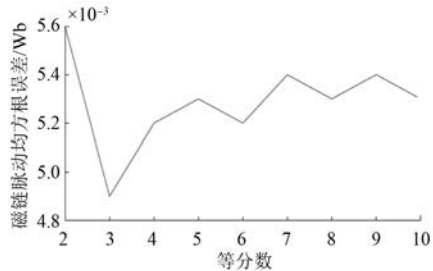


图 17 磁链脉动均方根误差

仿真计算结果表明:当电压矢量幅值等分数大于 3 以后,目标函数平均值、转矩脉动均方根误差和磁链脉动均方根误差趋于稳定。因此,考虑到减小计算负担,变幅值预测控制将电压矢量幅值三等分是较为理想的等分方式,此时备选电压幅值为 $(0.33V_s, 0.66V_s, V_s)$ 。

3 结 语

本文基于以电压矢量幅值为变量的 SPMSM 磁链和转矩方程,采用预测控制计算得出施加不同电压矢量幅值的下一时刻磁链和转矩值,选择使磁链和转矩误差目标函数最小的电压矢量幅值

作为最优值,从而确定下一时刻施加的电压矢量,实现 SPMSM DTC 变幅值预测控制,并研究了不同等分方式下预测控制的效果。得出结论如下。

(1) 在本文所提变幅值选择策略控制下,SPMSM DTC 系统运行理想,定子磁链轨迹为理想圆,磁链和转矩均符合控制要求,转速跟踪良好,定子电流波形正弦。

(2) 当等分数增大时,预测控制效果提升,计算负担也随之增大。当等分数大于 3 以后,目标函数平均值、转矩脉动均方根误差和磁链脉动均方根误差趋于稳定。综合考虑计算负担和控制效果,变幅值预测控制将电压矢量幅值三等分较为理想。

【参考文献】

- [1] 胡育文,高瑾,杨建飞,等.永磁同步电动机直接转矩控制系统[M].北京:机械工业出版社,2015.
- [2] ZHONG L, RAHMAN M F, HU W Y, et al. Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(3): 528.
- [3] RAHMAN M F, HAQUE M E, TANG L X. Problems associated with the direct torque control of an interior permanent-magnet synchronous motor drive and their remedies [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(4): 799.
- [4] 许家群,欧阳明高,唐任远.电动汽车用永磁同步牵引电动机直接转矩控制[J].电工技术学报, 2006, 21(7): 94.

- [5] 肖萌,史婷娜,王志强,等.基于多级滞环控制器的永磁同步电机直接转矩控制[J].中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4201.
- [6] 李耀华,刘卫国.永磁同步电机直接转矩控制不合理转矩脉动[J].电机与控制学报, 2007, 11(2): 148.
- [7] 李耀华,刘卫国.永磁同步电机直接转矩控制不合理转矩脉动抑制研究[J].西北工业大学学报, 2007, 37(5): 20.
- [8] 李耀华,马建.永磁同步电机直接转矩控制系统电压矢量选择区域[J].长安大学学报, 2012, 32(1): 95.
- [9] 李耀华,刘晶郁.电动汽车用 PMSM 直接转矩控制电压矢量选择策略[J].电气传动, 2012, 42(6): 1.
- [10] ALEXANDROU A D, ADAMOPOULOS N K, KLADAS A G. Development of a constant switching frequency deadbeat predictive control technique for field-oriented synchronous permanent-magnet motor drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(8): 5167.
- [11] ZHU H, XIAO X, LI Y. Torque ripple reduction of the torque predictive control scheme for permanent-magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 871.
- [12] CHO Y, LEE K B, SONG J H. Torque-ripple minimization and fast dynamic scheme for torque predictive control of permanent-magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4): 2182.

收稿日期: 2018-08-06

【期刊简介】

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发行,邮发

代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。