[自控·检测]
DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.06.012

一种优化定子齿抑制 PMSM 转矩脉动方法

张高峰，朱一昕，钱　新

（江南大学 物联网工程学院，江苏 无锡　214122）

摘　要:针对永磁同步伺服电机转矩脉动直接影响轻工设备伺服系统的控制精度的问题,课题组提出了一种优化电机定子齿冠的方法来抑制电机转矩脉动。基于不等气隙长度的思想,该方法的宗旨是保持定子齿冠中间部分对应的气隙长度不变,而齿冠对称轴两边的气隙变长,通过合理选择电机定子齿冠的形状能够抑制电机转矩脉动。使用有限元软件搭建12槽8极永磁同步伺服电机样机进行仿真计算,通过对定子齿进行优化,电机电磁转矩脉动和齿槽转矩得到了抑制。研究表明采用课题组提出的方法能够优化电机转矩脉动,对设计高性能电机具有参考意义。

关　键　词:永磁同步伺服电机;定子齿冠;转矩脉动;齿槽转矩

中图分类号:TM341;TH113　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1005-2895(2019)06-0059-05

A Method of Optimizing Stator Tooth to Suppress PMSM Torque Ripple

ZHANG Gaofeng, ZHU Yixin, QIAN Xin

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous servo motor torque ripple directly affect light industrial equipment control accuracy of servo system. To solve the problems, an optimization of motor stator crown to reduce PMSM torque ripple was proposed by the research group. Based on the idea of unequal air gap length, the purpose of this method was to keep the air gap length of the middle part of the stator crown unchanged, while the air gap length of the two sides becomed longer, and by reasonably choosing stator tooth crown shape could inhibit the motor torque ripple. A 12-slot 8-pole PMSM prototype was built with finite element software, by optimizing the stator teeth, electromagnetic torque ripple and cogging torque were suppressed. The method can optimize torque ripple of PMSM, and it has great significant to design high performance motor.

Keywords: PMSM (permanent magnet synchronous motor); stator tooth; torque ripple; cogging torque

随着智能制造的发展,轻工制造业对工艺精度的要求越来越高,以永磁同步伺服电机作为执行元件的伺服控制系统得到了广泛的应用。永磁同步伺服电机转矩输出的平滑度成为衡量电机动态和稳态性能的重要指标,永磁同步伺服电机的转矩脉动问题一直是研究者的研究重点。文献[1]采用转子偏心结构,研究了转矩脉动随偏心距的变化规律,表明永磁体偏心可减小气隙磁密谐波分量,削弱电机转矩脉动。文献[2-3]总结了多种削弱转矩脉动的方法,得到的最优结构的永磁体磁化方向。文献[4]研究了极数和槽数组合、绕组分布以及磁路饱和等因素对转矩脉动的影响。文献[5]的研究采用了两种或者多种永磁材料组成的组合磁极削弱转矩脉动的方法,通过合理组合两种或两种以上永磁材料的极弧宽度,可减小反电动势的谐波,削弱转矩脉动。文献[6-7]通过优化永磁体形状和改变气隙充磁方向减小气隙磁密谐波分量,削弱电机转矩脉动。文献[8-9]提出采用永磁体削角抑制电机齿槽转矩从而降低电机转矩脉动。文献[10-12]通过改进永磁同步电机的控制算法来减小永磁同步电机转矩脉动。

收稿日期:2019-07-10;**修回日期**:2019-09-16

第一作者简介:张高峰(1994),男,湖北汉川人,硕士研究生,主要研究方向为伺服电机本体设计和运动控制。**通信作者**:朱一昕(1957),男,江苏无锡人,博士,江南大学物联网工程学院副教授,主要从事电力电子变流技术、运动控制系统的研究。E-mail:947815433@qq.com

较少学者提出通过优化定子齿冠来抑制表贴式永磁同步电机转矩脉动。因此,课题组对永磁同步伺服电机进行理论分析后,提出了优化定子齿冠以减小永磁同步伺服电机转矩脉动的方法,保持永磁电机定子齿冠对称轴线最小气隙不变,增加两侧定子齿的气隙长度。课题组首先比较了 3 种特殊定子齿冠下永磁同步电机特性,然后引入参数 β,由于电机定子齿冠结构随 β 按一定规律变化,通过选取合适的 β 对电机进行优化;根据有限元仿真计算得到永磁同步伺服电机特性随 β 变化的结果,可选择合适参数 β 以获得最优电机特性。

1 理论基础

永磁同步伺服电机转矩脉动是由电机电磁转矩脉动和齿槽转矩共同作用而成。其中,定子绕组中的电流和转子永磁体产生的气隙磁通相互作用而产生电磁转矩;齿槽效应是永磁同步电动机的固有属性,会引起永磁电机周期性的转矩脉动。永磁同步伺服电机转矩脉动可表示为[1]24

$$T = T_{em} + T_{cog}。 \tag{1}$$

式中:T_{em}表示电机电磁转矩;T_{cog}表示电机齿槽转矩。

当电机绕组中通入电流 i 时,永磁同步伺服电机单相绕组产生的瞬时合成电磁转矩为[13-14]:

$$T_{ems} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\alpha)}{\partial \alpha} + i \frac{\partial \Psi(\alpha)}{\partial \alpha}。 \tag{2}$$

式中:$L(\alpha)$ 为相绕组电感;α 为定转子相对位置角;$\Psi(\alpha)$ 为永磁体磁链。

式(2)中第 1 项表示磁阻转矩,对于永磁同步伺服电机,该转矩会使电机产生转矩脉动;第 2 项表示电机永磁转矩,是电机转矩的有效分量。增加电机气隙会减小相绕组的磁导,由式(2)可知,电机气隙的增加将会减小电机的磁阻转矩,削弱电机转矩脉动;同时合理选择气隙形状保持磁链基波分量不变,减小气隙谐波分量可以削弱电机转矩脉动而不会导致电机输出转矩下降。

永磁同步电机齿槽转矩来源于永磁体与电枢齿之间的相互作用力,定义为磁场能量 W 与电机定转子相对位置角 α 之间的偏导数之比,即:

$$T_{cog} = -\frac{\partial W}{\partial \alpha}。 \tag{3}$$

在转子旋转过程中,永磁体能量基本不变,故电机的磁场能量可近似表示为

$$W = \frac{1}{2u_0}\int_V B^2(\theta,\alpha)\,\mathrm{d}V。 \tag{4}$$

气隙磁密沿电枢表面的分布可表示为

$$B(\theta,\alpha) = B_r(\theta)\frac{h(\theta)}{h(\theta)+\sigma(\theta,\alpha)}。 \tag{5}$$

则有

$$W = \frac{1}{2u_0}\int_V B_r^2(\theta)\left(\frac{h(\theta)}{h(\theta)+\sigma(\theta,\alpha)}\right)^2 \mathrm{d}V。 \tag{6}$$

式中:$B_r(\theta)$为气隙磁密;$h(\theta)$为永磁体厚度;$\sigma(\theta,\alpha)$为气隙长度;u_0为气隙磁导率;θ 为气隙圆周分布角,磁极的中心线上 $\theta=0$。

$(B_r(\theta))^2$为偶函数,进行傅里叶级数展开,可得

$$B_r^2(\theta) = B_{r0} + \sum_{i=1}^{\infty} B_{ri}\cos(2ip\theta); \tag{7}$$

其中,

$$\left.\begin{aligned} B_{r0} &= \alpha_p B_0^2; \\ B_{ri} &= \frac{2}{i\pi}B_0^2\sin(i\alpha_p\pi)。 \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

式中:p 为永磁电机磁极对数;B_0为永磁体剩磁,只与永磁体材料有关;α_p为极弧系数;i 为次数。

同理,对$[h(\theta)/(h(\theta)+\delta(\theta,\alpha))]^2$进行傅里叶级数展开,可得

$$\left(\frac{h(\theta)}{h(\theta)+\sigma(\theta,\alpha)}\right)^2 = G_0 + \sum_{i=1}^{\infty} G_i\cos[iQ(\theta+\alpha)]。 \tag{9}$$

其中,

$$G_i = \frac{2Q}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{Q}-\frac{\alpha}{2}}\left(\frac{h(\theta)}{h(\theta)+\sigma(\theta)}\right)^2\cos(iQ\theta)\,\mathrm{d}\theta = \frac{2}{i\pi}\left(\frac{h}{h+\sigma}\right)^2\sin\left(i\pi-\frac{iQ\theta_{s0}}{2}\right)。 \tag{10}$$

式中:θ_{s0}为用弧度表示的电枢槽口宽度;Q 为永磁电机槽数;G_0为常数。

将式(7)和式(9)代入式(6),再将式(6)代入式(3)可得永磁同步伺服电机齿槽转矩为

$$T_{cog} = \frac{\pi Q L_a}{4u_0}(R_2^2 - R_1^2)\sum_{n=1}^{\infty} nG_n B_{r\frac{nQ}{2p}}\sin(nQ\alpha)。 \tag{11}$$

式中:L_a为电枢铁心的轴向长度;R_1 和 R_2 分别为电枢外半径和定子轭内半径;n 为使 $nQ/2p$ 为整数的正整数。

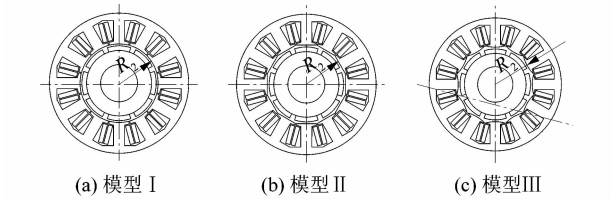
由式(11)可知,忽略其他系数对齿槽转矩的影响,当 G_n减小时,齿槽转矩将会被削弱;又由式(10)可知,系数 G_n随气隙长度 σ 增加而减小,因此增加气隙长度能够削弱电机齿槽转矩。

根据理论推导,保持永磁电机定子齿冠对称轴线最小气隙不变,增加中心轴线两侧定子齿的气隙长度

能够抑制永磁同步伺服电机转矩脉动。由于最小气隙长度保持不变,因此,永磁体磁链基波分量不会过度减小而导致输出转矩出现明显下降。

2　定子齿冠优化设计

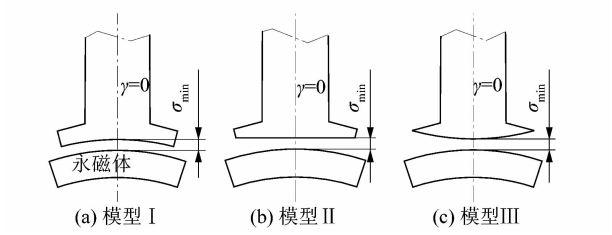
图 1 所示为 3 种不同定子齿冠模型:模型Ⅰ为普通电机的定子齿冠模型;模型Ⅱ和模型Ⅲ为采用定子齿冠优化方案的电机模型。3 种表贴式永磁同步伺服电机最小气隙磁密相等,为了便于分析,可将图 1 所示定子齿冠模型等效为图 2 所示。



(a) 模型Ⅰ　(b) 模型Ⅱ　(c) 模型Ⅲ

图 1　电机模型

Figure 1　Motor model



(a) 模型Ⅰ　(b) 模型Ⅱ　(c) 模型Ⅲ

图 2　定子齿冠等效模型

Figure 2　Stator tooth equivalent model

由图 2 可知,以定子齿冠对称轴线为 $\gamma=0$ 处,模型Ⅰ、模型Ⅱ和模型Ⅲ气隙长度分别为:

$$\sigma_1(\gamma)=\sigma_{min};\tag{12}$$

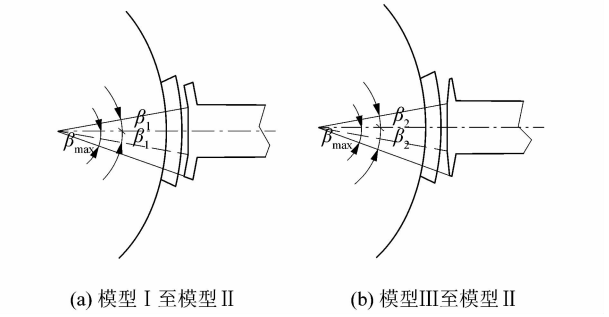
$$\sigma_2(\gamma)=R_2[1-\cos(\gamma/2p)]+\sigma_{min};\tag{13}$$

$$\sigma_3(\gamma)=2R_2[1-\cos(\gamma/2p)]+\sigma_{min}。\tag{14}$$

式中:σ_{min} 为 $\gamma=0$ 处的气隙长度,为最小气隙长度;γ 为电角度;R_2 定子轭内半径。

比较式(12)、式(13)和式(14)可知,当 $\gamma=0$ 时,3 种模型所对应的最短气隙长度相等。模型Ⅰ在一个磁极下的气隙长度不变,模型Ⅱ和模型Ⅲ所对应电机的两侧气隙长度随着 γ 增加逐渐增加,其中模型Ⅲ是模型Ⅱ增加幅度的 2 倍;由理论分析可知,永磁电机电磁转矩脉动将会被削弱,但如果两侧气隙长度太大可能会导致电机输出转矩的降低,同时会导致电机气隙磁密的畸变,反而会增加电磁转矩脉动,因此,应该合理增加两侧气隙长度。

如图 3(a)所示,$\pm\beta_1$ 范围内的定子齿冠为平面齿,平面齿内的气隙长度为 σ_{min};$\pm\beta_1$ 外侧定子齿为圆弧,圆弧所对应圆心保持不变,气隙长度会随 β_1 变化。与偏心方案不同,该方案保持平面齿的气隙长度 σ_{min} 不变,而只对两侧气隙进行增加,有利于对定子齿冠进行优化。当 $\beta_1=0$ 时,电机为模型Ⅰ;随着 β_1 变大,定子齿冠对称轴两侧气隙长度增大,当 β_1 最大时,定子齿为模型Ⅱ。同理,如图 3(b)所示,当 $\beta_2=0$ 时,电机为模型Ⅲ,当 β_2 最大时,电机为模型Ⅱ。



(a) 模型Ⅰ至模型Ⅱ　(b) 模型Ⅲ至模型Ⅱ

图 3　定子齿冠优化

Figure 3　Stator tooth optimization

将参数 β_1 和 β_2 进行坐标变换并整合得:

$$\beta=\begin{cases}\beta_1-\beta_{min}, & -\beta_{max}<\beta\leqslant 0;\\ \beta_{max}-\beta_2, & 0<\beta\leqslant\beta_{max}。\end{cases}\tag{15}$$

可知,当 $\beta=-\beta_{max}$ 时,定子齿为模型Ⅰ;$\beta=0$ 时,定子齿为模型Ⅱ;$\beta=\beta_{max}$ 时,定子齿为模型Ⅲ。随着 β 增加,定子齿冠对称轴两侧气隙逐渐增加,从模型Ⅰ变为模型Ⅲ。

3　仿真验证

采用 Ansoft 有限元软件设计一台 12 槽 8 极永磁同步伺服电机样机进行仿真分析,样机参数如表 1 所示。使用 CAD 绘制电机定子齿冠模型,导入有限元 Ansoft 进行仿真计算。

表 1　电机模型参数

Table 1　Motor model parameters　　mm

定子外径	定子内径	最小气隙长度
37.5	21.0	1.0
转子外径	转子内径	永磁体厚度
16.5	10.0	2.5

对 3 种定子齿冠永磁同步伺服电机进行仿真计算分析,仿真结果如图 4~5 所示。从图 4 和图 5 中可以清楚看到,对于齿槽转矩,模型Ⅰ齿槽转矩峰峰值为 134 mN·m,模型Ⅱ和模型Ⅲ的齿槽转矩明显小于模型Ⅰ,模型Ⅲ相比于模型Ⅰ,齿槽转矩减小了 76%。对于平均输出转矩,模型Ⅰ的平均输出转矩为 8.56 N·m,模型Ⅱ为 8.50 N·m,模型Ⅲ为 8.01 N·m。

模型Ⅱ相比于模型Ⅰ,电机平均输出转矩基本保持不变,模型Ⅲ相对于模型Ⅰ,平均输出转矩下降了 0.55 N·m,这主要由于气隙长度增加过大导致永磁体磁链基波分量减小,从而导致输出转矩的下降。模型Ⅰ的转矩脉动为 4.9%,模型Ⅱ的转矩脉动为 1.7%,模型Ⅲ的转矩脉动为 1.0%,从数据可知由模型Ⅰ~模型Ⅲ转矩脉动得到抑制。仿真结果与理论分析基本一致,因此该方法能够削弱永磁同步伺服电机的转矩脉动。

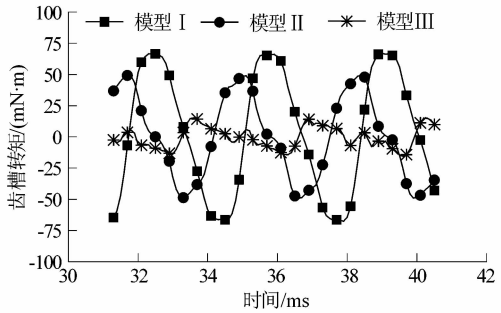


图 4　齿槽转矩波形

Figure 4　Cogging torque waveform

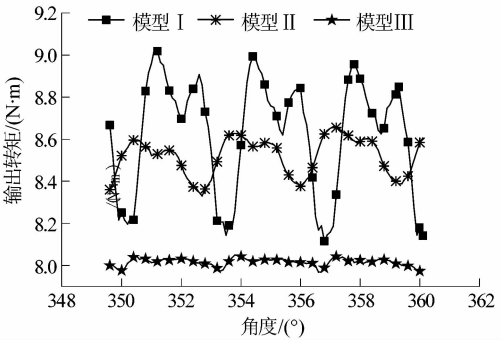


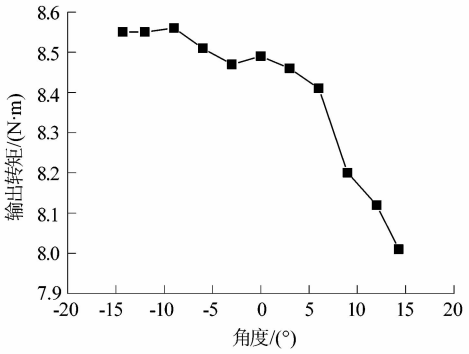
图 5　额定负载转矩波形

Figure 5　Rated load torque waveform

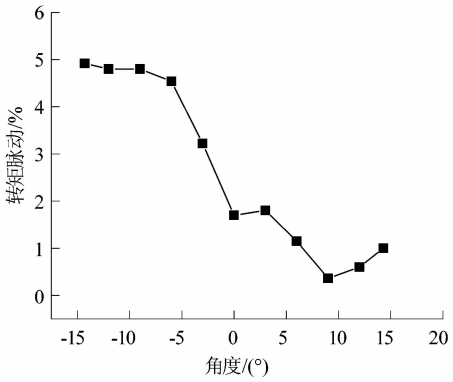
对永磁同步伺服电机特性随参数 β 变化情况进行有限元仿真分析,得到结果如图 6 所示。从图 6 可知,随着参数 β 增加,电机输出转矩逐渐下降;整体上,转矩脉动和齿槽转矩随着 β 的增加的而减小;但齿槽转矩变化有明显的波动,原因是电机齿槽转矩与气隙磁密 $nQ/2p$ 次谐波分量密切相关,β 的改变可能会使电机气隙磁密的 $nQ/2p$ 谐波分量增加,导致齿槽转矩增大。通过以上分析结果能够说明该方案的可行性。同时,通过图 6 可知,当 $\beta=3$ 时,电机输出转矩,转矩脉动和齿槽转矩都具有较好特性。

4　结语

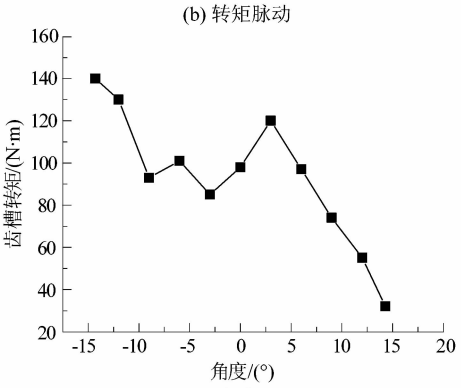
课题组通过理论分析和仿真计算,研究了定子齿冠对永磁同步伺服电机特性的影响,提出了一种优化方法,即通过改变定子齿冠形状来减小永磁同步伺服电机转矩的脉动。通过一台 12 槽 8 极永磁同步伺服电机样机进行有限元仿真分析,比较了 3 种特殊定子齿冠永磁同步伺服电机特性,验证了该方法的有效性。仿真得到永磁同步伺服电机特性随参数 β 变化规律,通过选取合适的 β 设计电机定子齿冠,使电机转矩脉动得到优化。该优化方法对设计高性能永磁同步伺服电机具有参考意义。



(a) 输出转矩



(b) 转矩脉动



(c) 齿槽转矩

图 6　电机特性随 β 变化曲线

Figure 6　Motor characteristics with β

参考文献:

[1]　刘细平,郑爱华,王晨. 偏心永磁同步伺服电动机优化设计[J]. 微特电机,2012,40(10):23-25.

[2]　王长城,郭辉,孙裴,等. 一种永磁同步电机齿槽转矩削弱方法

[J]. 轻工机械,2018,36(6):62-66.
[3] 张金平,黄守道,高剑,等. 减小永磁同步电动机电磁转矩脉动方法[J]. 微特电机,2010,38(10):16-18.
[4] JAHNS T M,SOONG W L. Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet AC motor drives-a review [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,1996,43(2):321-330.
[5] 杨玉波,王秀和,朱常青. 组合磁极削弱永磁同步电动机转矩脉动方法研究[J]. 电机与控制学报,2013,17(2):34-38.
[6] ZHAO Jing, HU Hengzai, LIU Xiangdong, et al. Influence of edge permanent-magnet shape on performance of an arc-liner permanent-magnet synchronous machine[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015,51(11):1.
[7] OH S,MIN S,HONG J P. Air gap flux density waveform design of surface-mounted permanent magnet motor considering magnet shape and magnetization direction[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013,49(5):2393-2396.
[8] 张宇,王沐凡,侯崇琦,等. 永磁体削角对表贴式永磁同步电机齿槽转矩的影响研究[J]. 电气工程学报,2018,13(1):38-42.
[9] 于慎波,牛尧. 永磁体削角参数对永磁同步电主轴齿槽转矩影响的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2016(12):46-48.
[10] 吕刚震,郝润科,黄家豪. 基于滑模变结构的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电子测量技术,2018,41(21):42-46.
[11] 刘志同,刘军,漆文睿. 基于模糊理论的永磁同步电机直接转矩控制研究[J]. 新型工业化,2018,8(9):24-29.
[12] 厉虹,韩晔,王久和. 改进的永磁同步电机直接转矩控制系统研究[J]. 电气传动,2017,47(11):9-15.
[13] 杜晓彬,黄开胜,蔡黎明. 基于定子齿冠偏心的外转子永磁电机转矩波动抑制[J]. 微特电机,2019,47(4):21.
[14] 王亮,马立新,杨威. 基于自抗扰控制的无刷直流电机换相转矩脉动抑制的研究[J]. 机电工程,2017,34(1):52-57.

(上接第 58 页)

[7] ERKORKMAZ K, ALTINTAS Y. High speed CNC system design: part Ⅰ jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2001,41(9):1323-1345.
[8] BIAGIOTTI L, MELCHIORRI C. FIR filters for online trajectory planning with time- and frequency-domain specifications[J]. Control Engineering Practice,2012,20(12):1385-1399.
[9] LIBERTY S. Modern control engineering[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control,1972,17(3):419.
[10] SENCER B, ISHIZAKI K, SHAMOTO E. High speed cornering strategy with confined contour error and vibration suppression for CNC machine tools[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2015,64(1):369-372.
[11] SINGHOSE W E, SEARING W P, SINGER N C. Improving repeatability of coordinate measuring machines with shaped command signals[J]. Precision Engineering,1996,18(2/3):138-146.
[12] ERKORKMAZ K,YEUNG C H,ALTINTAS Y. Virtual CNC system: part Ⅱ high speed contouring application [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2006,46(10):1124-1138.

欢迎订阅 2020 年《住宅科技》月刊

《住宅科技》(月刊)是国家新闻出版广电总局批准并认定的科技类学术期刊,由中华人民共和国住建部主管,住建部科技与产业化发展中心(住建部住宅产业化促进中心)及上海市房地产科学研究院共同主办。1979 年创刊,至今已有 40 年。国内外公开发行,国内统一刊号:CN 31-1407/TU;国际标准刊号:ISSN 1002-0454。邮发代号:4-390。

主要栏目有:专论、绿色建筑、规划设计、居住环境、住宅产业化、保护建筑、检测鉴定、修缮改造和材料设备等。登载的文章同时被《中国核心期刊(遴选)数据库》《中国数字化期刊群》《中国学术期刊(光盘版)》《中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)》《中国科技论文统计期刊》《中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)》等数据库收录。

全国各地邮局均可办理订阅。单月定价 12.00,全年定价 144.00 元。目前杂志社尚有部分过往杂志的合订本,欢迎新老读者订阅。

编辑部地址:上海市复兴西路 193 号
邮编:200031
电话:(021)64310169
邮箱:zhuzkj@ sina. com