

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.02.017

基于矩阵变换器供电的感应电机空间矢量 控制系统仿真*

刘栋良^{1,2}, 郑谢辉¹, 张 遥¹

(1. 杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018; 2. 卧龙电气集团有限公司, 浙江 上虞 312300)

摘要: 针对传统矩阵式变换器在PWM变频调速时存在的响应速度慢、功率因素低等问题,将一种基于双空间矢量调制算法的控制策略应用到矩阵变换器中。展开了电流空间矢量和电压空间矢量的分析,推演出了等效虚拟交-直-交调制策略,提出了将2个空间矢量的综合调制采用相互嵌套的方法,从而得到了5个空间矢量的占空比,实现了对各个双向开关的驱动;在三相-三相矩阵变换器的基础上,该算法实现了电机的四象限运行,减少了电流谐波的影响;最后结合Matlab软件Simulink中的S函数,建立了矩阵变换器的仿真模型,并对系统进行了仿真与实验。研究表明,基于矩阵变换器供电的感应电机空间矢量控制系统具有一定的有效性和正确性。

关键词: 矩阵变换器; 空间矢量调制; 控制策略; 感应电机; 仿真

中图分类号: TM39; TM76; TP39 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2013)02-0192-05

Simulation on matrix converter fed induction motor by space vector control system

LIU Dong-liang^{1,2}, ZHENG Xie-hui¹, ZHANG Yao¹

(1. College of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. Wolong Electric Co., Ltd., Shangyu 312300, China)

Abstract: Aiming at the problems as slow response and low power factor of conventional matrix converter when it is controlling the motor speed by PWM, the method applied to the matrix converter was presented which was based on the dual space vector modulation algorithm. The current space vector and voltage space vector was analyzed, the modulation strategy of virtual AC-DC-AC were deduced, the method of integrating two space vector modulation was put forward, and five space vector duty ratio was gotten, the two-way switch was driven. Based on the matrix converter, the four-quadrant operation of motor was realized, and the influence of harmonic current was reduced. At last, the matrix converter simulation model by using the S function in Matlab/Simulink was established, and the simulation and experiment on the system was conducted. The research results demonstrate the effectiveness and validity of the system.

Key words: matrix converter(MC); space vector modulation; control strategy; induction motor; simulation

0 引 言

矩阵变换器(MC)的拓扑结构提出至今已有30多年,但是在意大利学者M. Venturini提出矩阵式变换器存在的理论及控制策略^[1]之后,它的研究才真正开始。

由于矩阵变换器具有四象限运行能力,以及具有无中间直流环节、输入功率因素可任意调节等特点,使它成为了电力电子研究领域的热点,使用矩阵式变换器驱动感应电动机,一方面能够实现较好的传动性能,另一方面也可以满足日益严格的电网电能质量的

收稿日期: 2012-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277048)

作者简介: 刘栋良(1977-),男,江苏张家港人,副研究员,主要从事交流伺服驱动方面的研究. E-mail:liudl@hdu.edu.cn

要求,应用前景非常广阔^[2-9]。

在过去的20年间,对矩阵式变换器的研究主要集中于变换器自身的一系列问题,如双向开关的实现、调制算法、换流方式以及保护措施等,而将矩阵式变换器应用于矢量控制异步电动机调速系统的实验研究也相对较少。这主要有两个原因:①矩阵式变换器中的双向开关需要用分立的电力半导体器件组合而成,因而使双向开关之间的换流控制比较困难;②矩阵式变换器自身的调制算法比较复杂,需要利用数字信号处理器和可编程逻辑器件等高速芯片来实现,如果将矩阵式变换器用于异步电动机矢量控制系统中,那么就会增加系统控制电路实现的难度。

为此,文献[10]深入分析了空间矢量调制策略,建立了矩阵变换器简单实用的仿真模型,但是输出线电压波形不是理想正弦波,调制策略中的开关顺序模式尚待完善。文献[11]运用纯数学方法,简化了矩阵变换器的调制算法,仿真速度快,各种电路参数也便于设定,但是其输入谐波大,转矩电流不易调节,影响变换器的工作效率。

本研究提出一种适用于矩阵式变换器驱动异步电动机高性能调速系统的组合控制策略,详细分析矩阵变换器开关状态的确定方法,并利用该控制策略,建立矩阵变换器的仿真模型。

1 矩阵变换器的空间矢量调制

矩阵变换器的三相输出和三相输入通过9个双向功率开关直接相连,简化的三相到三相矩阵变换器及其双向开关的拓扑结构如图1所示。

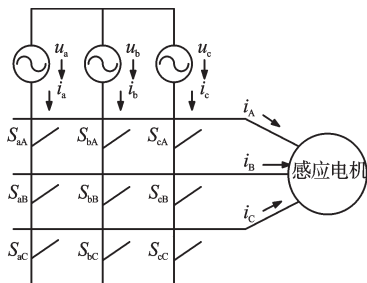


图1 三相交-交矩阵变换器主电路

若将双向开关元件的导通、关断状态用函数 S_{jk} 表示,1表示关断,0表示导通:

$$S_{jk} = \begin{cases} 1, & S_{jk} \\ 0, & \bar{S}_{jk} \end{cases} \quad (j \in \{A, B, C\}, k \in \{a, b, c\}) \quad (1)$$

则该部分输入不能短路,输出不能开路的约束条件可表示为:

$$S_{ja} + S_{jb} + S_{jc} = 1, j \in \{A, B, C\} \quad (2)$$

矩阵变换器的空间矢量调制策略是指在矩阵变换器交-交-直变换器中引入虚拟的直流环节,将其等效

为交-直-交结构,即分为电压源整流空间矢量调制和电压源逆变空间矢量调制,其等效结构图如图2所示。

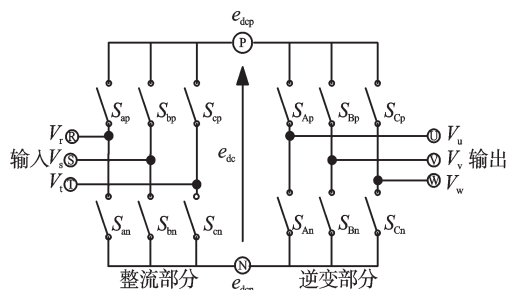


图2 矩阵变换器交-直-交等效结构图

逆变部分的直-交变换电流如图3所示。本研究设直流侧电压为 V_{pn} , 某一状态为 S_{Ap} 、 S_{Bn} 、 S_{Cn} 闭合, 则有 $V_{UV} = V_{pn}$ 、 $V_{VW} = 0$ 、 $V_{WU} = -V_{pn}$, 合成的线电压 V_j 空间矢量和6只功率开关可组合的开关状态对应的空间矢量如图3所示, 其中 $U_1 \sim U_6$ 是有效电压矢量, 矢量间的相位差为 60° 角(括号里的3个数字按顺序表示U、V、W三相与直流侧的连接状态, 例如: M=101表示 S_{Ap} 、 S_{Bn} 、 S_{Cp} 导通)。另外有2个输出电压为零的零矢量 $V_7 \sim V_8$ 。

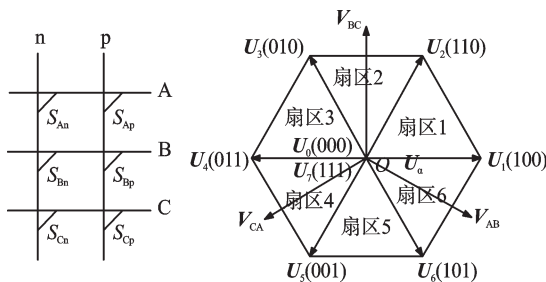


图3 直-交变换电路和输出电压六边形矢量

直-交变换电路矢量合成如图4所示。为了得到在空间以匀速旋转的空间矢量, 研究者需采用脉宽调制法来进行合成, 图4中 V_j 为要得到的某一瞬间的空间矢量, 它落在六边形矢量中的某个区域内, 其相邻两矢量为 V_M 和 V_N , V_j 与 V_M 的夹角为 θ_j 。按空间矢量调制法, 矢量 V_j 可由 V_M 和 V_N 及零矢量 V_0 合成, 其表达式为:

$$V_j = d_M V_M + d_N V_N + d_0 V_0 \quad (3)$$

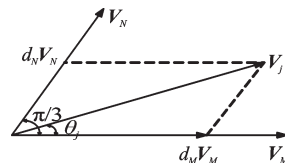


图4 直-交变换电路矢量合成

其中, V_M 占空比(作用时间)为:

$$d_M = T_M / T_s = m_u \sin(\pi/3 - \theta_j) \quad (4)$$

式中: m_u —调制系数。

V_N 占空比(作用时间)为:

$$d_N = T_N / T_s = m_u \sin \theta_j \quad (5)$$

V_0 占空比(作用时间)为:

$$d_0 = T_0/T_s = 1 - d_M - d_N \quad (6)$$

整流部分的交-直变换电路如图5所示,设某一瞬间开关 S_{ap} 和 S_{cn} 闭合,则电流从R流入,从T流出,即 I_R 为正而 I_T 为负。在三相RST坐标中, I_R 与 I_T 合成,得到空间电流矢量和6只功率开关组合的电流矢量 $I_1 \sim I_6$,如图5所示(2个字母表示RST三相与直流侧pn的连接状态)。

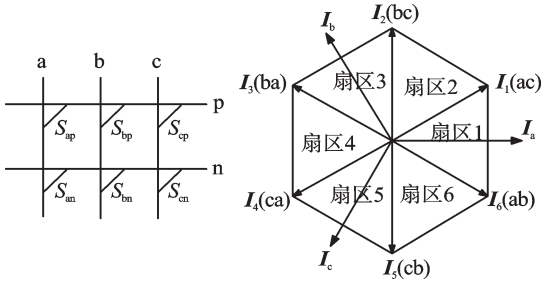


图5 交-直变换电路和输出电流六边形矢量

同逆变部分调整一样,研究者利用相邻两电流矢量可以合成得到在空间任意位置的电流矢量 I_k ,如图6所示。其占空比表达式为:

$$I_k = d_\alpha V_\alpha + d_\beta V_\beta + d_0 V_0 \quad (7)$$

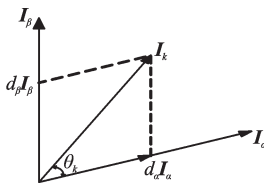


图6 交-直变换电路的矢量合成

交-直-交结构中的开关状态可以由矩阵变换器交-交电路中的9个开关状态来等效,例如:假设在某一瞬间的输入电流矢量为 I_4 而输出电压矢量为 V_2 ,则在交-直-交线路中应是 S_{cp} 、 S_{an} 和 S_{Ap} 、 S_{Bp} 、 S_{Cn} 闭合,交-交线路则是 S_{ca} 、 S_{cb} 、 S_{ac} 闭合,如图7所示。由于输入电流和输出电压各有6条空间矢量(零矢量除外),则出现的组合状态有36种,对应18种交-交变换静止矢量,如表1所示。

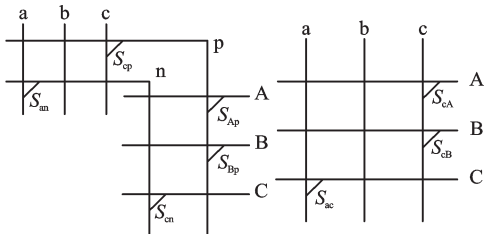


图7 交-直-交电路结构和交-交电路结构的等效

设MC输出电压矢量所处区间的相邻基本矢量为 V_M (简称M矢量)、 V_N (简称N矢量),输入电流矢量所处区间的相邻基本矢量为 I_α (简称 α 矢量)、 I_β (简称 β 矢量),则两个空间矢量的综合调制采用相互嵌套的方法来实现。整个输入相电流和输出线电压合成过

表1 36种组合对应18静止矢量

	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
V_1	acc	bcc	baa	caa	cbb	abb
V_2	aac	bbc	bba	cca	ccb	aab
V_3	cac	cbc	aba	aca	bcb	bab
V_4	caa	cbb	abb	acc	bcc	baa
V_5	cca	ccb	aab	aac	bbc	bba
V_6	aca	bcb	bab	cac	cbc	aba

程共有 αM 、 αN 、 βN 、 βM 矢量及零矢量 $I_0 U_0$ 5种组合,每一矢量组合的作用时间用占空比表示时是该组合内各矢量占空比的乘积:

$$d_1 = d_{\alpha M} = d_\alpha d_M = m \sin(\pi/3 - \theta_j) \sin(\pi/3 - \theta_k) \quad (8)$$

$$d_2 = d_{\alpha N} = d_\alpha d_N = m \sin \theta_j \sin(\pi/3 - \theta_k) \quad (9)$$

$$d_3 = d_{\beta M} = d_\beta d_M = m \sin(\pi/3 - \theta_j) \sin \theta_k \quad (10)$$

$$d_4 = d_{\beta N} = d_\beta d_N = m \sin \theta_j \sin \theta_k \quad (11)$$

$$d_0 = 1 - d_1 - d_2 - d_3 - d_4 \quad (12)$$

式中: m —调制系数。

若采用普通的双边空间矢量调制,则在一个开关周期内矢量变换的顺序为: $\alpha M - \alpha N - \beta N - \beta M -$ 零矢量 $-\beta M - \beta N - \alpha N - \alpha M$ 。零矢量可根据 βM 矢量选择3个零矢量之一,选择原则是以降低MC的开关次数至最小为准。按上述的算法和原则可以得到不同输入/输出区间内的矢量状态^[12]。

2 系统仿真与实验波形

根据上述调制策略,本研究利用 Matlab 中的 S 函数,建立了空间矢量调制的矩阵变换器的仿真模型,其仿真模型主要由2个S函数构成,ustate 负责接收三相输入电压,并计算5个矢量的占空比时间和所在的扇区;GatesCalc 根据ustate 传递来的信息,计算任意电流-电压扇区组合下,4种电流-电压矢量组合在单位开关周期 T_s 内作用的占空比 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 ,然后以输入相电流空间矢量所在扇区号、输出线电压空间矢量所在扇区号以及占空比 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 为输入,输出矩阵变换器9个双向开关的驱动信号,从而驱动双向开关。仿真算法为ode15,开关频率为10 kHz。系统结构如图8所示。

为了验证所建模型的有效性和正确性,本研究针对矩阵变换器驱动异步电动机起动、运行,在 Matlab7.0 环境下进行了仿真。仿真参数为:输入为三相对称电源,其相电压为220 V/50 Hz,功率因数控制为1;三相绕线型异步电动机,其额定功率为3×420 W,额定转速1 000 r/min,额定电压为220 V/50 Hz,定子电阻和漏感分别为0.485 Ω ,4 mH,转子电阻和漏感分别为0.842 Ω ,2 mH,互感为66.75 mH,转动惯量为0.078 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。

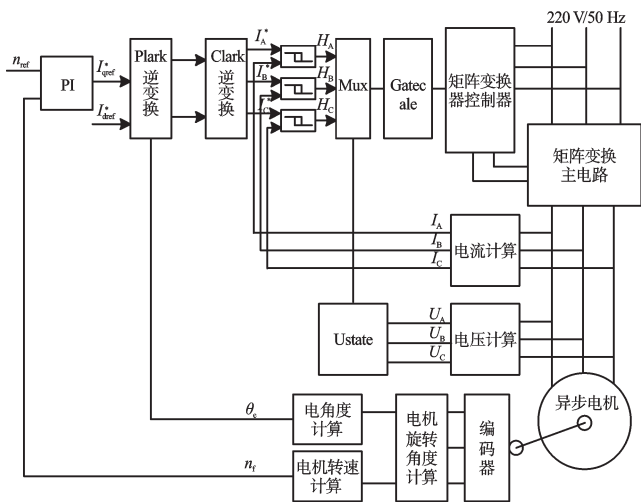


图8 矩阵变换器矢量控制系统结构框图

当负载转矩 $T_l = 6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 和无负载转矩时,系统中异步电机在启动和运行时的转矩和d轴电流分别如图9、图10所示。

从图9和图10中可以得到:

(1)当转速发生变化时,转矩瞬态发生变化,该结果表明,在异步电机启动、稳态运行以及变速时,该系统具有快速的转矩响应。

(2)无论有无负载,在启动、稳态运行以及变速时, i_d 一直保持在一个较小的范围内($\pm 0.1 \text{ A}$),这保证了系统具有优良的输入/输出特性,说明本研究所设计的基于矩阵变换器的感应电机空间矢量控制系统是切实可行的。

本研究提出的空间矢量控制策略在变频调速系统的实验平台上(实验平台如图11所示),结合 1.3 kW 的

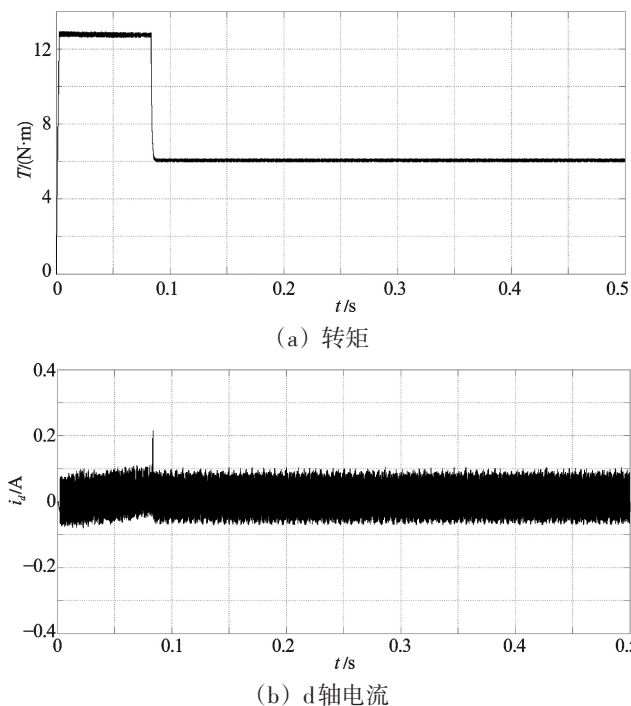


图9 $T_l = 6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 启动时波形

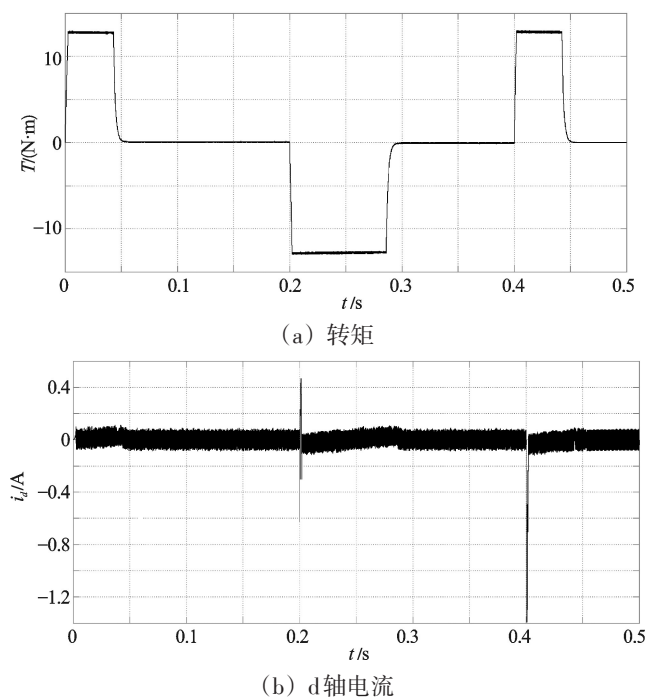


图10 $T_l = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$ 变速时波形

异步电机进行了实验研究,实验条件:转速 250 r/min,采用 Agilent (DSO6014A) 示波器。实验结果表明,在该策略控制下能够获得具有完整正弦性的输出线电压。输出电压波形如图12所示。



图11 实验平台

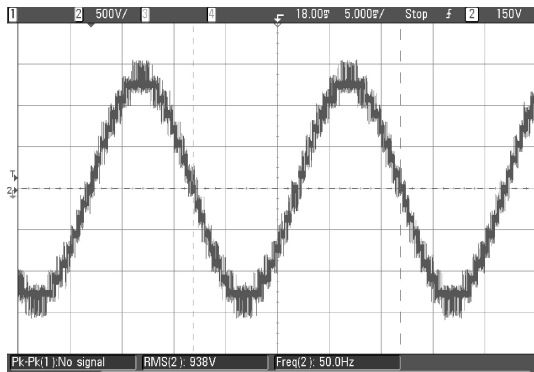


图12 输出线电压波形

4 结束语

本研究针对矩阵变换器一次性功率交换的本质,充分利用交-直-交变换技术中成熟的空间矢量调制

技术,推导出基于空间矢量调制的矩阵变换器的开关状态表,同时利用 Matlab 软件 Simulink 中的 S 函数建立了矩阵变换器仿真模型,通过运用数学算法,实现了较快的仿真速度,节约了大量时间。

仿真结果验证了空间矢量调制策略的有效性和正确性,表明矩阵变换器具有优良的输入/输出特性。该仿真模型采用模块化设计,方便搭接,具有开放性和工程实用价值,为将矩阵变换器应用于矢量控制和直接转矩控制异步电动机调速系统奠定了基础。

参考文献(References):

- [1] VENTURINI M. A New High Switching Rate Direct Frequency Converter:Italian,2077a79[P]. 1979-03-06.
- [2] 文辉清,吕征宇. 基于空间矢量调制的三相矩阵式变换器[J]. 电力电子技术,2005(1):4-6.
- [3] WHEELER P W,CLARE J C. A Vector controlled MCT Matrix Converter Induction Motor Drive with Minimized Commutation Times and Enhanced Waveform Quality[C]//IEEE IAS'2002 Conf. Rec. Pittsburgh:[s.n.], 2002:466-472.
- [4] WEI L. A Novel Matrix Converter Topology with Simple Commutation[C]. IEEE PESC'2001,2001:1749-1754.
- [5] 王毅,陈希有,徐殿国,等. 空间矢量调制矩阵变换器闭环控制的研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(6):164-169.
- [6] HUBER L, BOROJEVIC D. Space vector modulated three-phase to three-phase matrix converter with input power factor correction [J]. **IEEE Transactions on IA**, 1995,31(6):1234-1246.
- [7] CHEN D F,LIU Tian-hua. Optimal controller design for a matrix converter based surface mounted PMSM drive system [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2003, 18(4):1034-1046.
- [8] NELSEN P. Space Vector Modulated Matrix Converter with Minimized Number of Switching and a Feed Forward Compensation of Input Voltage Unbalance [C]//Proceeding of PEDES. Delhi:[s.n.],1996:2833-839.
- [9] GE Hong-juan,MU Xin-hua,ZHOU Bo,et al. A Novel Discrete Control Technique of Matrix Converter for the Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor [C]//IEEE International Conference on Electric Machines and Drives,2005:1351-1357.
- [10] 粟梅,杨文,张泰山. 矩阵变换器驱动异步电动机仿真研究[J]. 电气传动,2005,35(8):13-16.
- [11] 韩坚,蒋心怡,王亚楠,等. 矩阵变换器的空间矢量调制策略仿真[J]. 船电技术,2007,27(6):374-377.
- [12] 李志勇,朱建林,易灵芝,等. 空间矢量调制的矩阵式变换器仿真模型研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(3):80-84.

[编辑:张翔]

(上接第184页)

3 结束语

本研究通过试验主要分析了碳纤维复合材料孔加工的主要缺陷分类与原因,以及切削参数对加工质量的影响,研究结果表明,孔口处是碳纤维复合材料钻孔加工缺陷出现的主要部位,并呈现一定的区域性;钻孔毛刺、撕裂缺陷主要集中在出口部位,入口处几乎没有毛刺、撕裂等缺陷;钻孔孔口处的毛刺、撕裂缺陷受进给速度 V_f 和主轴转速 n 影响, V_f 越大,撕裂、毛刺程度增大;在较低主轴转速下,钻孔出口质量较差,故用PCD钻头加工复合材料宜在中、高转速下进行,高转速下钻头切削刃更易切断纤维,可以得到质量更好的钻孔;高速下毛刺、撕裂现象明显减少。

参考文献(References):

- [1] 刘雄亚. 复合材料新进展[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [2] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报,2007(2):1-3.
- [3] 余黎明. 我国碳纤维行业现状和发展趋势分析[J]. 新材料产业,2011(6):13-21.
- [4] LEWIS S J. The use of carbon fiber composites on military aircraft [J]. **Composites Manufacturing**, 1994, 5(2):95-103.
- [5] 张厚江,陈五一,陈鼎昌. 碳纤维复合材料(CFRP)钻孔出口缺陷的研究[J]. 机械工程学报,2004(7):150-155.
- [6] KOPLEV A,LYSTRUP A,VORM T. The cutting process chips and cutting forces in machining CFRP[J]. **Composites**, 1983,14(4):371-376.
- [7] 古托夫斯基. 先进复合材料制造技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [8] 赵建芳. PCD/PCBN 刀具的应用及制造工艺[J]. 工业金刚石,2003(3):15-17.
- [9] 刘红,梁华,蒋兰芳. 车灯支架的模态分析[J]. 轻工机械,2013,30(4):37-39.
- [10] ILIESCU D,GEHIN D,GUTIERREZ M E. Modeling and tool wear in drilling of CFRP[J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2010,50(2):204-213.
- [11] FERREIRA J R,COPPINI N L,MIRANDA G W A. Machining optimization in carbon fiber reinforced composite materials[J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 1999(92):135-140.

[编辑:张翔]