蜂窝结构异面变形动态塑性坍塌力学

樊彦斌 王之栎

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 在蜂窝结构静态塑性坍塌应力理论计算模型的基础上,建立了蜂窝结构在冲击载荷作用下的动态塑性坍塌应力的理论计算模型.考虑应变率对蜂窝结构动态力学性能的影响,使用 Cowper-Symonds 模型建立了静态塑性坍塌应力与动态塑性坍塌应力之间的关系;基于薄板弯曲理论,由平均冲击速度得到了应变率的计算公式,进而得出动态塑性坍塌应力关于冲击速度与静态塑性坍塌应力的函数关系.使用 LS-DYNA 动力学软件模拟了铝合金蜂窝结构在冲击载荷作用下的异面变形,数值计算结果与理论模型计算结果一致.

关 键 词: 蜂窝结构; 异面变形; 冲击载荷; 塑性坍塌应力

中图分类号: V 414.6

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)11-1464-05

Dynamic plastic collapse mechanical model of honeycomb structures out-plane deformation

Fan Yanbin Wang Zhili

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the static plastic collapse stress (SPCS) theoretical model, a dynamic plastic collapse stress (DPCS) theoretical model of honeycomb structures under impact loading was built. In view of the effect that the strain rate had on the dynamic mechanical performance of honeycomb material, the relationship between SPCS and DPCS was established by using Cowper-Symonds model. A sheet bending theory based strain rate formula via the average impact speed was developed. Furthermore, a function about the relationship between DPCS and impact speed was proposed. At last, an out-plane deformation simulation of the aluminum honeycomb structures under impact loading was performed on LS-DYNA dynamics software. The numerical calculation results coincide with the theoretical model calculation ones.

Key words: honeycomb structures; out-plane deformation; impact loading; plastic collapse stress

蜂窝结构是一种二维的多胞结构,内含大量空穴而又具有一定的胞结构,具有相对密度小、比强度和比刚度高、压缩变形能力大且变形可控等优点,是理想的缓冲吸能材料. 1969 年美国载人登月着陆器 Apollo11 在着陆腿内设计了多级铝蜂窝结构用于吸收冲击能量. 蜂窝结构在缓冲结构中的主要变形形式表现为在异面冲击载荷下的压溃变形. 在冲击载荷作用下,蜂窝结构应力达到一定值后会基本保持不变,同时发生长时间的大变形,从而吸收大量能量.

迄今,对蜂窝结构的研究大多集中在它的静态力学性能[1-5],而动力加载下的力学性能研究较少[6-7]. 文献[1]探讨了由塑性屈曲造成的六边形蜂窝体轴向坍塌,给出了蜂窝结构静态塑性坍塌应力的计算公式;文献[2]对六边形蜂窝的异面压溃行为进行了研究,并给出了相对于文献[1]更准确的计算静态塑性坍塌应力的半经验公式. 文献[3]给出了任意尺寸比的蜂窝材料面外受压时初始弹性失稳载荷的理论算法. 文献[4]提出了一种蜂窝芯层的非线性等效拉伸弹性模量

收稿日期: 2011-06-25; **网络出版时间**: 2012-11-26 11:39

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121126.1139.014.html

作者简介: 樊彦斌(1984-),男,山西吕梁人,硕士生,fybin0314@163.com.

的拟合方法,建立了蜂窝芯层非线性等效泊松比的计算模型. 文献[5]建立了金属蜂窝材料静态弹塑性屈曲的力学模型,推导了其临界应力显式公式. 文献[6]开展了 3 种规格铝蜂窝材料的动力学实验,并将得到的应力应变曲线与仿真得到的应力应变曲线做了比较. 文献[7]对铝蜂窝在准静态与冲击载荷作用下的压缩特性进行了实验研究,得出了蜂窝材料缓冲特性的表征方法.

蜂窝结构作为一种吸能材料,主要是承受动态的冲击载荷. 因此,本文开展了蜂窝结构动态塑性坍塌应力的理论计算模型研究,进而分析了冲击速度与加载方式对蜂窝结构能量吸收能力的影响.

1　蜂窝结构吸能特性

蜂窝结构是一种具有类蜂窝孔结构的复合材料. 窝孔的形状有很多种,最常见的是蜂窝状六边形,其结构和基准方向如图 1 所示. 根据一般学术研究的定义,平行于孔壁的方向称为 T 方向,双厚度孔壁的指向方向称为 L 方向,垂直双厚度孔壁的方向称为 W 方向. 蜂窝结构在 L-W 方向的性能称为蜂窝的共面性能,而涉及在 T 方向的性能则称为异面性能.

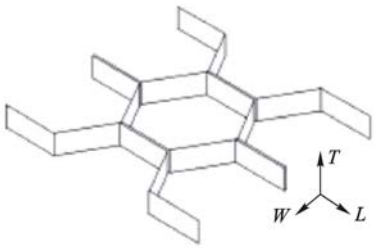


图 1　蜂窝结构方向图

蜂窝结构作为缓冲吸能材料,主要承受来自面外(T 向)的载荷,并通过变形来吸收冲击能量. 其在面外载荷下的典型应力-应变曲线如图 2 所示,可分为 3 个阶段,即:弹性变形段(elastic region)、塑性坍塌段(plateau region)和致密段(densification region)[8].

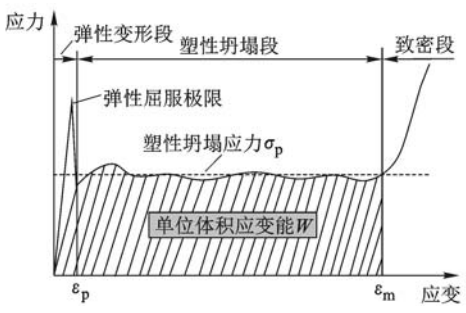


图 2　蜂窝异面变形应力-应变曲线

为了描述蜂窝结构吸收能量的能力,定义蜂窝结构单位体积吸收的能量 E[7],计算式如下:

$$E = W = \int_0^{\varepsilon_m} \sigma(\varepsilon)\,\mathrm{d}\varepsilon$$

式中 σ 表示的应力是应变 ε 的函数. 根据蜂窝结构的应力-应变曲线,蜂窝结构单位体积吸收的能量(比吸能)相当于在应变为 $0<\varepsilon<\varepsilon_m$ 时应力-应变曲线所围成的面积,因此应力-应变曲线的形状和变形过程中应力的大小可以反映出蜂窝结构吸能性能的高低.

实际使用蜂窝结构作为缓冲吸能材料不允许蜂窝结构在压缩过程中达到致密段,因为蜂窝压缩在达到致密段后,其产生的冲击力会显著增加,从而会对整个被缓冲的结构产生更大冲击. 由于在蜂窝的整个异面压缩过程中,弹性变形段较短,在弹性变形段蜂窝结构吸收的能量很少,可以将其当作塑性变形段来处理,这对总的吸能量造成的影响可以忽略. 所以蜂窝结构单位体积吸收的能量 E 可以简化为以下算式:

$$E = \sigma_p \cdot \varepsilon_m \tag{1}$$

式中 σ_p 为蜂窝结构塑性坍塌应力,与冲击速度有关. 由此可见,冲击速度会对蜂窝结构的能量吸收能力产生影响.

2　动态塑性坍塌力学模型

2.1　静态塑性坍塌应力

蜂窝结构是由一定数量的六边形窝孔结构组合而成,在几何上具有规则性和对称性. 另外,理论研究和实验研究表明,蜂窝的异面坍塌变形具有周期性,见图 3. 在研究其力学性能中取用其中的“Y”形单元作为基本单元,“Y”形单元是由 2 块成 120°的薄片粘接而成,高度为周期变形全波长 $2H$,具体结构如图 4 所示.

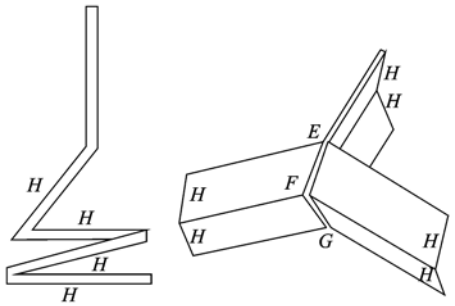
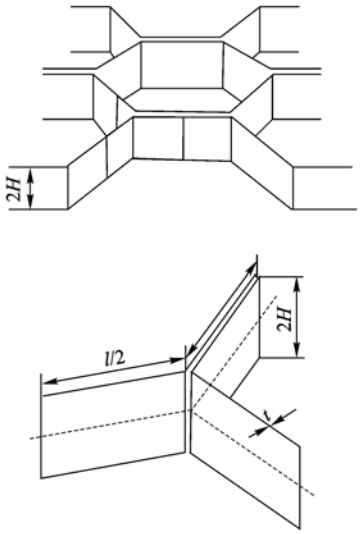


图 3　蜂窝结构周期变形示意

文献[2]对六边形蜂窝的异面压溃行为进行了研究,给出了一种计算六边形蜂窝静态塑性坍塌应力公式. 根据文献[2]的研究,取六边形蜂窝结构“Y”形基本单元 2 块薄片中的 1 块,其在异

面载荷下的变形模式如图 5 所示.



t—组成蜂窝结构的箔材壁厚;l—六边形蜂窝胞元的边长.

图 4 “Y”形单元结构示意[2]

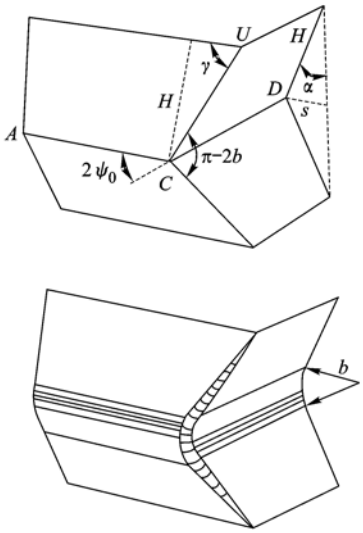


图 5 “Y”形单元塑性坍塌变形模式[2]

文献[2]在蜂窝结构基本胞元变形模式的基础上推导了半波长 H、塑性坍塌最小曲率半径 b、塑性坍塌应力 σ_p 与蜂窝结构参数 t 和 l 的函数关系:

$$H = 0.821\sqrt[3]{tl^2} \tag{2}$$

式中,H 为蜂窝结构塑性坍塌半波长;t 为蜂窝胞元壁厚;l 为蜂窝胞元边长.

$$b = 0.683\sqrt[3]{t^2 l} \tag{3}$$

式中 b 为蜂窝结构塑性坍塌最小曲率半径.

$$\sigma_p = 6.6\sigma_0\left(\frac{t}{l}\right)^{\frac{5}{3}} \tag{4}$$

式中,σ_p 为蜂窝结构塑性坍塌应力;σ_0 为蜂窝基体材料屈服极限.

2.2 动态塑性坍塌应力

采用 Cowper-Symonds(C-S)模型描述蜂窝基体材料动态力学性能的本构关系,C-S 模型表达式如下:

$$\sigma_p^d = \sigma_p\left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{p}}\right] \tag{5}$$

式中,C 和 p 为蜂窝基体材料应变率敏感系数,由实验确定;$\dot{\varepsilon}$ 为应变率;σ_p 为材料静态屈服应力;σ_p^d 为材料动态屈服应力.

蜂窝结构的异面塑性坍塌变形属于薄板的塑性弯曲,可以运用薄板弯曲相关理论来描述. 根据薄板弯曲理论,薄板在弯曲过程中的曲率变化率 $\dot{K}$ 与应变率 $\dot{\varepsilon}$ 存在如下关系[9]:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{K} \cdot z$$

式中 z 为沿薄板厚度方向上的坐标. 薄板弯曲模型坐标描述见图 6.

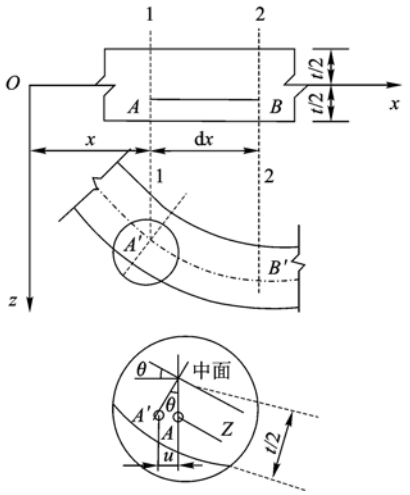


图 6 薄板弯曲模型坐标描述[9]

曲率变化率 $\dot{K}$ 可用下式得出:

$$\dot{K} = \frac{k_2 - k_1}{\Delta t}$$

式中,k_1,k_2 分别为蜂窝胞元壁板在变形前与屈服时的曲率(蜂窝胞元壁板弯曲动态过程见图 7);Δt 为弯曲过程所用的时间. 其中:$k_1 = 0$,$k_2 = \frac{1}{b}$,则有 $\dot{K} = \frac{1}{b \cdot \Delta t}$.

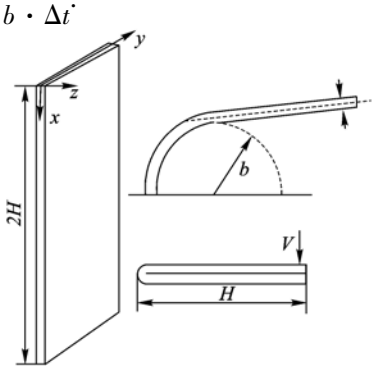


图 7 薄板弯曲动态过程示意

蜂窝胞元壁板变形速率 $V=\frac{H}{\Delta t}$,有 $\dot{K}=\frac{V}{Hb}$.

取平均值 $z=\frac{t}{4}$,得

$$\dot{\varepsilon}=\frac{tV}{4Hb} \tag{6}$$

将式(2)、式(3)、式(4)、式(6)代入式(5)得

$$\sigma_{\mathrm{p}}^{\mathrm{d}}=6.6\sigma_0\left[1+\left(\frac{V}{2.24lC}\right)^{\frac{1}{p}}\right]\left(\frac{t}{l}\right)^{\frac{5}{3}} \tag{7}$$

将式(7)代入式(1)得

$$E=\varepsilon_{\mathrm{m}}\cdot\sigma_{\mathrm{p}}^{\mathrm{d}}=6.6\varepsilon_{\mathrm{m}}\sigma_0\left[1+\left(\frac{V}{2.24lC}\right)^{\frac{1}{p}}\right]\left(\frac{t}{l}\right)^{\frac{5}{3}} \tag{8}$$

对于恒定速率加载情况,V 等于初速度 V_0,对于初速度为 V_0 的碰撞加载(如落锤加载),假设加载速度由 V_0 逐渐变为 0,取 $V=V_0/2$.

3　异面压缩动态仿真

蜂窝结构在异面载荷的作用下,发生塑性坍塌行为. 经过对实验后的蜂窝试件进行观察,发现连接蜂窝箔材之间的粘结剂并没有明显失效,蜂窝塑性坍塌产生的力不足以破坏粘结剂的粘结效果. 同时蜂窝箔材间的粘结剂的厚度与箔材自身厚度相比非常薄,所以在模拟过程中忽略粘结剂的厚度,直接使用双壁厚壳单元进行模拟[9].

由于蜂窝结构的对称性,使用“Y”形胞元作为分析对象,有限元模型见图 8. “Y”形胞元的壁厚 $t=0.05$ mm,边长 $l=4$ mm,“Y”形胞元末端采用对称约束. 蜂窝基体材料使用铝合金 A5052,其物理参数见表 1.

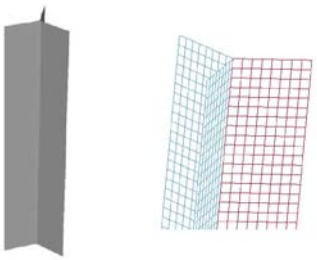


图 8　“Y”形单元有限元模型

整个过程使用动力学软件 LS-DYNA 进行模拟,有限元模型采用 Belytschko-Tsay 型壳单元,材料模型采用与应变率相关的随动塑性材料模型[10]. 仿真模型底端放置在一固定的刚性表面上,具有一定质量的刚性墙以一定初始速度与“Y”形胞元发生作用,顶端刚性墙的质量取 100 kg,初始冲击速度为 5 m/s 和 50 m/s,恒定速率加载[11].

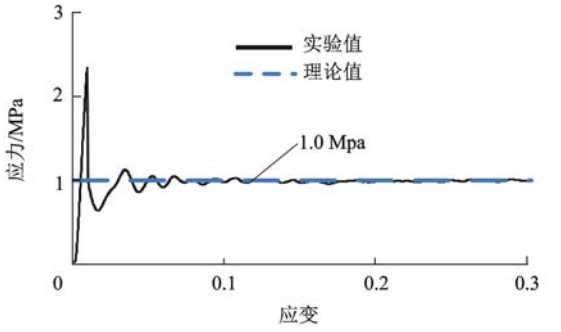
表 1　铝蜂窝基体材料 A5052 物理参数

参数	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比	
数值	2 700	62	0.3	
参数	屈服强度/MPa	切线模量/MPa	应变率敏感系数	
			C/s^{-1}	p
数值	225	50	6 000	4

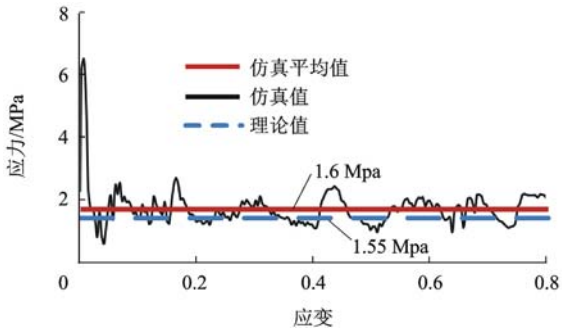
4　结果与讨论

图 9a 显示了铝蜂窝在准静态压缩实验下的应力-应变曲线,该实验的压缩速度为 10 mm/min,恒定速率加载,在标准压缩试验机 WDW-100 上完成. 对比表明,实验结果与理论计算结果一致.

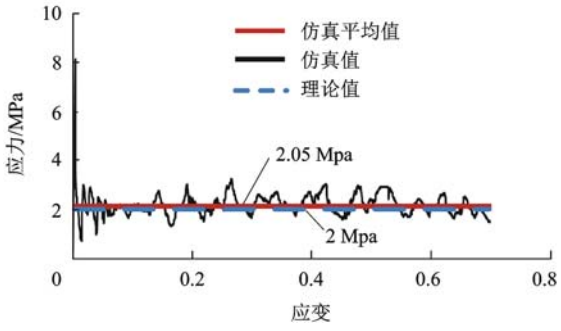
图 9b 与图 9c 显示了铝蜂窝“Y”形胞元分别在压缩速度为 5 m/s 与 50 m/s 下的异面压缩仿真应力-应变曲线. 对比表明,仿真值与理论计算值基本一致,仿真平均值比理论计算值大 3% 左右.



a　准静态压缩实验(10 mm/min)



b　压缩仿真(5 m/s)



c　压缩仿真(50 m/s)

图 9　蜂窝结构应力-应变曲线结果对比

5 结 论

1）结果对比分析表明，由式(7)给出的力学模型可以应用于蜂窝结构的吸能特性计算，为蜂窝结构缓冲器的设计提供指导.

2）蜂窝结构比吸能公式(8)表明，在应变 ε_m 相同的条件下，冲击载荷的作用初始速度越大，蜂窝结构单位体积吸收的能量越多.

参考文献（References）

[1] Mc Farland R K Jr. Hexagonal cell structures under post-buckling ax-ial load[J]. AIAA Journal,1963,1(6):1380-1385

[2] Wierzbicki T. Crushing analysis of metal honeycombs[J]. International Journal of Impact Engineering,1983,1(2):157-174

[3] 张大军，余同希. 蜂窝材料面外受压时初始弹性失稳载荷的计算[J]. 上海交通大学学报,1990,24(5/6):47-55
Zhang Dajun, Yu Tongxi. The initial elastic instability load calculation of honeycombs under out-plane compressive load[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,1990,24(5/6):47-55(in Chinese)

[4] 祝涛，王德禹. 蜂窝芯层非线性等效弹性参数[J]. 上海航天,2008,4:15-18
Zhu Tao, Wang Deyu. Nonlinear equivalent elastic parameters of honeycomb core[J]. Aerospace Shanghai,2008,4:15-18(in Chinese)

[5] 刘强，黄争鸣. 金属蜂窝材料的弹塑性屈曲临界应力值[J]. 力学季刊,2008,29(4):515-520
Liu Qiang, Huang Zhengming. Elasto-plastic buckling critical stress of metal honeycomb[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2008,29(4):515-520(in Chinese)

[6] Yamashita M, Gotoh M. Impact behavior of honeycomb structures with various cell specifications-numerical simulation and experiment[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 32(1):618-630

[7] 王闯，刘荣强，邓宗全，等. 铝蜂窝结构的冲击动力学性能的试验及数值研究[J]. 振动与冲击,2008,27(11):56-61
Wang Chuang, Liu Rongqiang, Deng Zongquan, et al. Impact performance of aluminum honeycomb structures-experiment and numerical study[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(11):56-61(in Chinese)

[8] 刘荣强，罗昌杰，王闯，等. 腿式着陆器缓冲材料缓冲特性及其表征方法研究[J]. 宇航学报,2009,30(2):786-794
Liu Rongqiang, Luo Changjie, Wang Chuang, et al. The study of cushioning properties and characterization method for cushioning material on legged lander[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(2):786-794(in Chinese)

[9] 杨桂通. 弹塑性力学引论[M]. 北京：清华大学出版社,2004:218-247
Yang Guitong. Introduction to elasticity and plasticity[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004:218-247(in Chinese)

[10] 尚晓江，苏建宇. ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M]. 北京：中国水利水电出版社,2005:50-70
Shang Xiaojiang, Su Jianyu. ANSYS/LS-DYNA dynamic analysis methods and engineering practice[J]. Beijing: China Water Power Press, 2005:50-70(in Chinese)

[11] 王永宁，李大永. 铝蜂窝异面变形的数值模拟[J]. 中国机械工程,2006,10(增刊):340-343
Wang Yongning, Li Dayong. Numerical simulations of aluminum honeycomb out-plane deformation[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 10(Supplement):340-343(in Chinese)

（编 辑：文丽芳）

（上接第 1463 页）

[7] Chen X, Su C Y, Fukuda T. A nonlinear disturbance observer for multivariable systems and its application to magnetic bearing systems [J]. IEEE Transactions Control Systems Technology, 2004, 12(4):569-577

[8] Komada S, Machii N, Fukuda T. Control of redundant manipulators considering order of disturbance observer [J]. IEEE Trans Ind Electron, 2002, 47(2):413-420

[9] Schrijver E, Dijk J V. Disturbance observers for rigid mechanical systems: Equivalence, stability and design [J]. J Dyn Syst, Meas, Control, 2002, 124(3):539-548

[10] Chen Wenhua. Nonlinear disturbance observer-enhanced dynamic inversion control of missiles [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2003, 26(1):161-166

[11] Chen Wenhua. Harmonic disturbance observer for nonlinear systems [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2003, 125(1):114-123

[12] Chen Wenhua. Disturbance observer based control for nonlinear systems [J]. IEEE/ASME Trans Mechatronics , 2004, 9(4): 706-710

[13] 夏常亮，刘均华，俞卫，等. 基于扩张状态观测器的永磁无刷直流电机滑模变结构控制[J]. 电机工程学报,2006,26(20):139-143
Xia Changliang, Liu Junhua, Yu Wei, et al . Variable structure control of bldcm based on extended state observer [J]. Proceedings of CSEE, 2006, 26(20):139-143(in Chinese)

[14] 刘贤兴，胡育文，卜言柱. 基于滑模变结构的永磁同步电机精确线性化控制[J]. 航空学报,2008,29 (5):1269-1273
Liu Xianxing, Hu Yuwen, Bu Yanzhu. Precision linearization control for permanent magnet synchronous motor based on sliding mode variable structure control [J]. Acta Aeronautica et astronautica Sinica, 2008, 29(5):1269-1273(in Chinese)

（编 辑：刘登敏）