

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.10.011

大流量气动高速开关阀的优化设计*

汝晶炜, 向 忠*, 史伟民

(浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对大流量高速开关阀切换时间长的问题,对高速开关阀流量特性进行了分析,获得了电磁铁工作气隙与阀芯直径的匹配关系;对高速开关阀动作过程进行了分析,建立了开关阀运动耦合瞬态场模型;对电磁铁结构参数进行了Ansoft Maxwell2D仿真,研究了衔铁中心开孔大小、衔铁厚度、绕组匝数对开关阀开启时间的影响。在理论仿真分析的基础上,提出了一种兼顾响应时间的大流量高速开关阀。研究表明,经过优化后的开关阀,在进口压力为7 bar时,流量可达720 L/min,而切换时间仅为9.5 ms。

关键词: 高速开关阀; Ansoft; 切换时间; 大流量

中图分类号: TH138.52; TH122 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)10-1282-05

Optimal of pneumatic on/off valve with large flow rate and fast response

RU Jing-wei, XIANG Zhong, SHI Wei-min

(Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at solving the problem of long switching time for Pneumatic on/off valve with large flow rate, the flow-rate characteristics of the high speed off-on valve was analyzed, the relation of working air gap and spool diameter was established; the action of the high speed off-on valve was analyzed, a coupling model was designed to simulate the process; Ansoft Maxwell2D was applied to study the characteristics of solenoid in that, the influence of the armature center hole size, thickness of the armature and winding turns for the on-off valve opening time was discussed. An optimized valve with the balance of large rate and fast response was proposed based on the analysis. The results indicate that the inlet pressure is 7 bar, the maximum flow rate is 720 L/min and the switching time is only 9.5 ms after optimized.

Key words: high-speed off-on valve; Ansoft; switching time; large flow rate

0 引 言

气动高速开关阀具有结构简单、控制精度高、响应速度快、抗污染能力强、价格低等特点,被广泛应用在现代气压伺服控制领域中^[1]。随着应用领域的拓展及应用要求的提升,高速开关阀仍面临着如何解决大流量与高频响之间矛盾的难题。

Topcu 研究团队^[2]利用在圆柱E型电磁铁上贴膜片

以提供保持间隙和引入IGBT控制驱动,使其所研发的高速开关阀,在7 bar的进口压力下,延迟时间为9 ms,最大流量为460 L/min。但目前鲜有流量在700 L/min,开启时间在10 ms以内的高速开关阀的报导^[3-4]。

本研究提出一种大流量高速开关阀结构,该结构将传统的圆形衔铁中心开孔,提高衔铁电磁利用率,通过对其进行有限元仿真分析和优化设计,可得该阀在未加驱动电路的情况下,流量为720 L/min时,切换时间仅为9.5 ms。

收稿日期: 2014-04-30

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAF06B03)

作者简介: 汝晶炜(1989-),女,浙江嘉兴人,主要从事流体传动与控制方面的研究. E-mail: b08330204@126.com

通信联系人: 向 忠,男,博士,讲师. E-mail: xz@zstu.edu.cn

1 开关阀结构与工作原理

本研究所提出的开关阀结构如图1所示。

该阀为常闭式二位三通结构,主要由阀座、静铁芯、复位弹簧、阀体1、阀体2、阀体3等组成,各部分之间通过螺纹连接。衔铁置于阀体3中,由于衔铁外径小于阀体3上的安装孔径,故在开关阀动作过程中,可能会存在衔铁晃动的问题,影响开关阀动作稳定性。为了弥补该缺陷,本研究对称取两个弹性片,令弹性片一端与衔铁边缘固定,另一端由阀体3与阀座夹持住。考虑到开关阀的密封性能,在衔铁中心开有安装孔,将树脂密封片安装于其中,其与阀座之间形成密封。

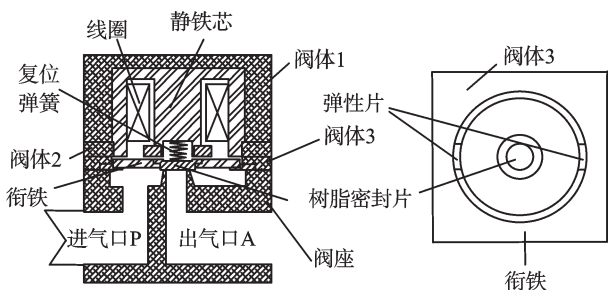


图1 开关阀结构示意图

工作时,衔铁在气压力和弹簧复位力的共同作用下,保持阀口关闭。通电时,电磁铁产生的电磁力克服衔铁所受反作用力后,促使衔铁向上运动,从而打开阀口,使气体从进口P处向出口A处流动。

2 数学建模

2.1 流量模型

根据ISO6358标准,流经开关阀的质量流量可表述为^[5]:

$$Q_m(t) = \begin{cases} \frac{C_q \pi d x(t) p_1}{\sqrt{T_1}} \left(\frac{2}{1+k}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{R(k+1)}} & 0 \leq \frac{p_2}{p_1} \leq 0.528 \\ C_q \pi d x(t) p_1 \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)T_1}} \sqrt{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}}} & 0.528 < \frac{p_2}{p_1} \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_q —开关阀流量系数; d —阀口直径; p_1, T_1 —阀口上游气体压力及温度; p_2, T_2 —阀口下游气体压力及温度; k —气体绝热常数; R —气体常数; $x(t)$ — t 时刻阀口工作气隙。

开关阀的最大流通能力由其音速流决定,在维持

阀口上(下)游压力、温度及流经气体特性不变的情况下,式(1)可表示为:

$$Q_m = \alpha dx(t) \quad (2)$$

式中: α —开关阀质量流比例系数。

从式(2)中可以看出,在一定的目标流量下,开关阀的阀芯直径与开关阀电磁铁的工作气隙成反比。本研究所研究的开关阀的目标流量为700 L/min,不同的 d 和 x 的匹配值如表1所示。

表1 不同 d 和 x 的匹配值

d /mm	15.3	10.3	7.7	6.15	5.13
x /mm	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6

考虑到加工难度,同时兼顾频响,本研究选择阀口直径为6 mm,工作气隙为0.5 mm。

2.2 运动耦合瞬态场模型

本研究采用有限元分析方法对开关阀运动耦合模型进行分析研究,以下是对开关阀的运动过程进行建模。

高速开关阀的电磁模型包括电路和磁场两部分^[6]。其中电控回路可等效为电感与电阻的串联回路,可用下式表示^[7]:

$$U(t) = Ri(t) + N \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (3)$$

式中: $U(t)$ —线圈电压, R —线圈电阻, $i(t)$ —线圈电流, N —线圈匝数, $\varphi(t)$ —电磁铁磁通。

忽略位移电流与磁滞效应,根据麦克斯韦基本方程可得磁场矢量位函数方程为^[8]:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J}_s - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \nabla \nu \quad (4)$$

式中: J_s —源电流密度, \mathbf{A} —矢量位移, μ —磁导率, σ —电导率, ν —衔铁的运动速度。

忽视气体阻尼动态影响,假设衔铁一直处于最大气阻力的作用下,根据牛顿第二定律,开关阀的运动模型可表示为:

$$F_{\text{mag}}(t) = m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + k_1 x(t) + \frac{p_1 d^2 \pi}{4} \quad (5)$$

式中: k_1 —复位弹簧系数。

3 仿真与实验研究

电磁铁是影响高速开关阀响应特性的关键部件。本研究在仿真分析中,忽略软磁材料磁阻与电涡流效应及温度对系统的影响,采用Ansoft Maxwell电磁有限元仿真软件对高速开关阀中电磁铁的结构进行优化设计,主要研究电磁铁结构参数对其开启特性的影响,特别是衔铁结构参数与绕组参数对电磁铁动态特性的影响。

由于开关阀的结构为轴对称结构,同时研究的是开关阀的动态特性,本研究在瞬态求解器下建立2D模型^[9-10],其模型如图2(a)所示,具体尺寸参数如表2所示。

表2 结构参数

符号	参数值/mm	符号	参数值/mm
r_0	16.4	h_0	2.0
r_1	2.7	h_1	2.0
r_2	7.3	h_2	3.2
r_3	8.5	h_3	16.7
r_4	14.1	h_4	20.5
r_5	18.8	h_5	22.7
a	5.0	b	15.3
x	0.5		

本研究给静铁芯和衔铁指定 steel1010 材料属性,给绕组指定 copper 材料属性,给 Region 和 Band 指定空气材料属性,其中 steel1008 磁化曲线如图3所示;指定 Region 边界条件为 Balloon;施加驱动电压 12 V 给绕组,其线圈匝数根据不同分析条件设置;给 Band 设置运动选项,令其运动区域为 -0.499 mm~0 mm,负载方程为 $14 + (3.78 - \text{Position} \times 1000) \times 2$;给模型设置的网格划分如图2(b)所示。

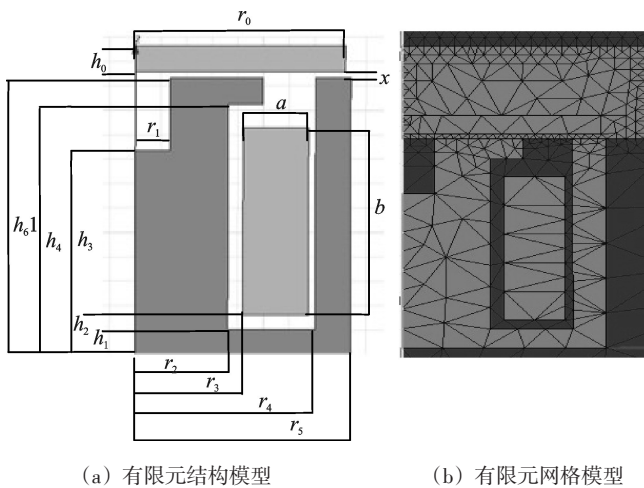


图2 仿真模型

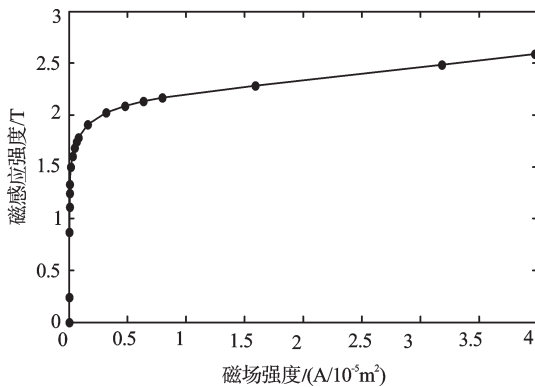


图3 steel1008 磁化曲线

电磁铁磁通密度图如图4所示。从图4中可知衔铁中心位置磁通密度较低,故可在衔铁的中心钻孔,以减小衔铁重量。在实际中,由于磁路的影响,衔铁的中心开孔半径并不是越大越好。假设衔铁厚度不变,衔铁中心半径与开关阀开启时间的关系图如图5所示。从图5中可以看出开关阀切换时间初始时随着衔铁中心开孔半径的增大而减小,当半径增大到一定程度时(比弹簧孔半径略大),开关阀切换时间反而随着衔铁中心开孔半径的增大而变大。这是因为当衔铁中心半径大于弹簧孔半径后,若一直增大衔铁中心半径,则处于内极柱处气隙磁阻会变大,使电磁力减小,切换时间变长。故研究者在对衔铁进行开孔处理时,要对开孔半径进行综合考虑,以获得最优化参数。根据仿真结果,可以认为在衔铁中心开孔半径为 2.2 mm 左右时,开关阀切换时间最小。

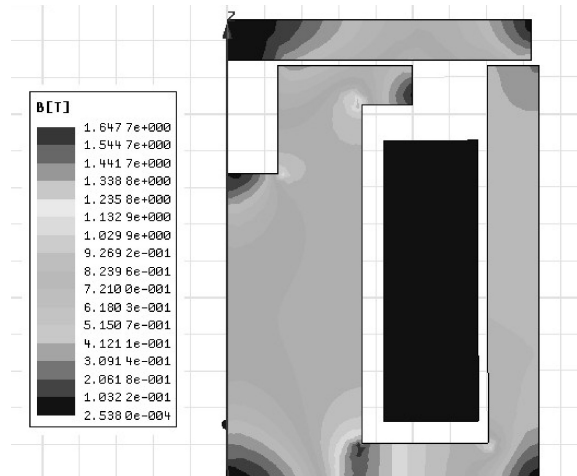


图4 电磁铁磁通密度图

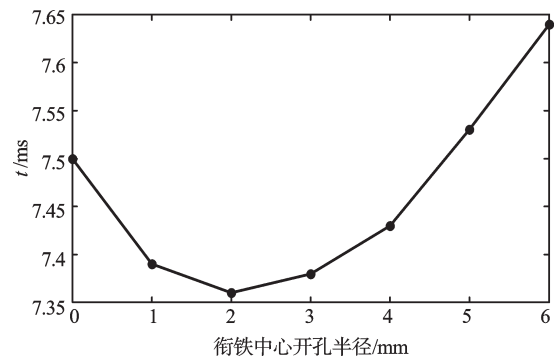


图5 衔铁中心开孔半径与开关阀切换时间关系

衔铁厚度对开启时间的影响(假设衔铁中心未开孔)如图6所示。理论上,当衔铁的厚度 h 增大时,衔铁处的磁感应强度将会变小,从而减缓磁场在衔铁处饱和时间,同时,由于 h 增加,将令衔铁磁阻减小,进而使磁通量增加,电磁力变大^[10]。但在实际过程中其变化趋势如图6所示,初始时随着衔铁厚度 h 的增加,

开关阀切换时间减小,但当衔铁厚度 h 增加到一定程度时,开关阀的切换时间并没有很大的提升。这主要是由于一方面衔铁厚度 h 的增加会导致衔铁重量的增加,另一方面,在一定的工作气隙、绕组、驱动电压下,产生的磁通不会无限增加,特别是当衔铁厚度接近或超过磁轭厚度时,磁通基本变化不大。根据仿真结果,在满足质量条件下,对该阀进行优化设计时,衔铁的厚度在 2 mm 以上时,开关阀切换时间较小且随衔铁厚度变化时切换时间变化不大。

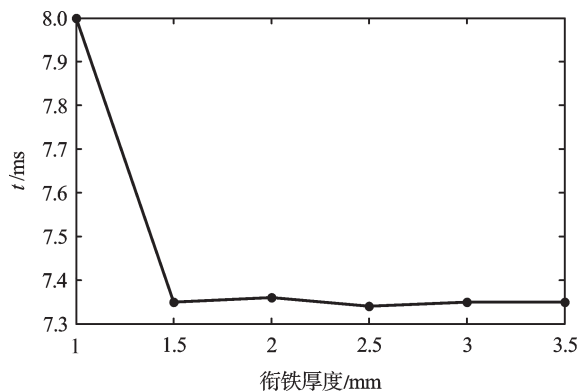


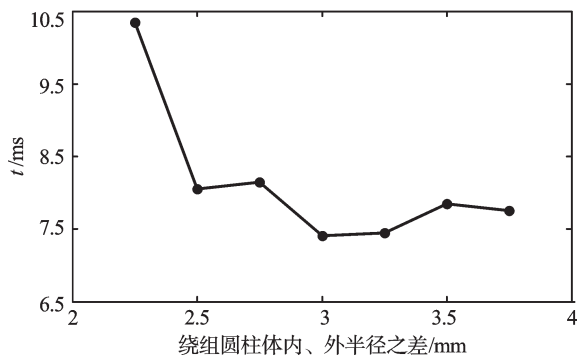
图6 衔铁厚度与开关阀切换时间关系

绕组匝数 N 对开关阀开启时间的影响如图7所示。其主要分为两种形式:一为相同的绕组截面,不同的漆包线规格;二为相同的漆包线规格,不同的绕组截面,此时假设衔铁厚度 h 与磁轭厚度相等,衔铁中心未开孔。针对第一种情况,笔者所研究的是绕组圆柱体高 ($h_4 - h_2$) 不变,改变绕组圆柱体内外径差 a 。如图7(a)所示,存在一个最优的线圈截面积,使开关阀切换时间最短,对于本研究所提的开关阀,其值大概是 $(r_4 - r_2)/2$,即在 3 mm 左右。从图7(b)中可以看出,在漆包线直径小于 0.35 mm 时,开关阀开启时间与漆包线直径关系并不明显,但当漆包线直径大于 0.35 mm 时,随着漆包线直径变大,开关阀开启时间显著增加。对于该阀,漆包线直径为 0.35 mm 时,开启时间最小。

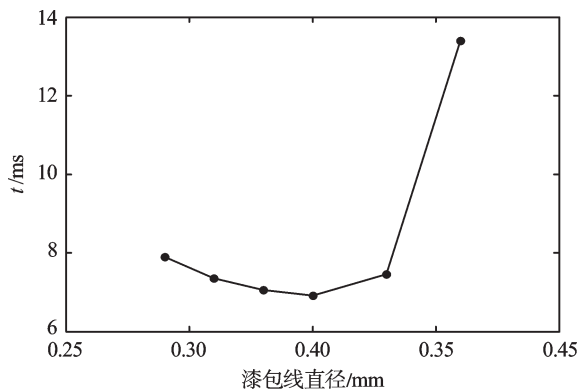
通过仿真分析、优化参数,获得的结构参数对比表如表3所示。根据优化后的参数进行仿真研究获得的动态响应特性对比表如表4所示。从表4中可以看出,优化结构后的开关阀切换时间比没有优化前的切换时间降低 10% 以上。

表3 结构参数对比表

符号	优化前/mm	优化后/mm
r_s	0	2.2
h_0	2.0	2.3
a	5.0	3
ρ	0.31	0.35



(a) 同漆包线规格,不同绕组截面



(b) 同一绕组截面,不同漆包线规格

图7 绕组匝数与开关阀切换时间的关系

表4 切换时间对比表

进口压力/bar	优化前/ms	优化后/ms
1	6.2	5
2	7.0	5.6
3	7.7	6.4
4	8.5	7.2
5	9.2	7.8
6	9.9	8.7
7	10.7	9.6

本研究利用优化结果制作样阀,根据 ISO6358 及 FESTO FN942029 电磁阀流量特性检测标准,依托现有的开关阀流量特性测试系统,获得的样阀阀口进口压力与流量之间的关系图如图8所示。从图8中可以看出,在进口压力为 1 bar~7 bar 之间时,开关阀的流量基本呈线性关系,其中阀口进口压力为 7 bar 时,流量为 720 L/min。根据 GB/T22107-2008 气动方向控制阀切换时间测量,获得样阀在进口压力为 7 bar 时,其切换时间为 9.5 ms。

4 结束语

本研究介绍了开关阀的基本结构,提出了流量与电磁结构模型,并进行了仿真实验研究。仿真结果表明,通过对电磁铁衔铁结构与绕组参数的优化设计可

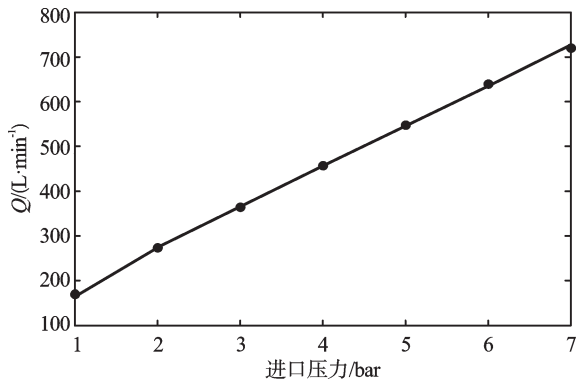


图8 进、出口压力对流量的关系

以有效降低开关阀的开启时间。实验结果表明,本研究所提出的开关阀流量大,响应时间快,基本满足预期设计目标。

本研究所提出的流量特性匹配关系可以为后续的开关阀阀芯结构提供一定理论指导,本研究对电磁铁结构研究路线可以为后续的开关阀电磁铁结构设计提供一定的研究方向。

参考文献(References):

[1] BELLMUNT O G, ARELLANO S G, ANDREU A S, et al. Linear electromagnetic actuator modeling for optimization of mechatronic and adaptronic systems[J]. *Mechatronics*, 2007, 17(12): 153-163.

本文引用格式:

汝晶炜,向 忠,史伟民. 大流量气动高速开关阀的优化设计[J]. *机电工程*, 2014, 31(10): 1282-1286.

RU Jing-wei, XIANG Zhong, SHI Wei-min. Optimal of pneumatic on/off valve with large flow rate and fast response[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(10): 1282-1286.

(上接第1277页)

参考文献(References):

[1] 白丽平,解生冕. 点焊机器人模型的动力学仿真分析[J]. *机电工程技术*, 2007, 36(7): 49-52.

[2] 李爱成,唐火红. 关节式码垛机器人运动学分析与动力学仿真[J]. *机械设计*, 2013, 30(10): 16-20.

[3] 于 蓬,张为春,裴宝浩,等. 抢险机器人手臂液耦耦合仿真分析[J]. *液压气动与密封*, 2011(6): 29-33.

[4] TANG Xiu-ying, LI Wei. Effect of parallel four-bar mechanism on spotwelding robot[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2003, 8(4): 36-40.

[5] KONG Min-xiu, CHEN Lin. Multi-objective optimization on dynamic performance for a planar parallel mechanism with NSGA-II algorithm[J]. *Robot*, 2010, 32(2): 271-273.

[6] LI Q. Experimental validation on the iterated design and

[2] TOPCU E E, YUKSEL I, KAMIS Z. Development of electro-pneumatic fast switching valve and investigation of its characteristics[J]. *Mechatronics*, 2006, 16(6): 365-378.

[3] NAJJARI B, BARAKATI S M, MOHAMMADI A, et al. Modelling and controller design of electro-pneumatic actuator based on PWM[J]. *International Journal of Robotics and Automation(IJRA)*, 2012, 1(3): 125-136.

[4] 向 忠. 气动高速开关阀关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学机械工程学系, 2010.

[5] CAI Bao-ping, LIU Yong-hong, AIBAILIMINT, et al. Optimal design based on dynamic characteristics and experimental implementation of submersible electromagnetic actuators[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013(80): 473-482.

[6] 段丽娟,陶 刚,孟 飞,等. 高速比例电磁阀电-机械转换器动态特性研究[J]. *液压与气动*, 2013(5): 20-22.

[7] CAI B P, LIU Y H, TIAN X J, et al. Optimization of submersible solenoid valves for subsea blowout preventers[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(2): 451-457.

[8] 赵 博. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010.

[9] 张啟暉,李 胜,阮 健,等. 2D 数字伺服阀的特性实验研究[J]. *轻工机械*, 2012, 30(6): 67-71.

[10] 范立云,高明春,马修真,等. 电控单体泵高速电磁阀电磁力的影响参数量化分析[J]. *内燃机工程*, 2003, 34(1): 47-48.

[编辑:程 浩]

control of a parallel robot[J]. *Robotica*, 2005, 24(2): 173-181.

[7] LI Q, WU F X. Control performance improvement of a parallel robot via the design for control approach[J]. *Mechatronics*, 2004, 14(8): 947-964.

[8] 汤修映,李 伟,张铁中,等. 平行四杆机构在点焊机器人中的应用[J]. *中国农业大学学报*, 2003, 8(4): 36-40.

[9] 贺 兵,唐 江,何文成,等. 装箱机双回杆机构的动力学仿真分析及结构优化[J]. *轻工机械*, 2012, 30(1): 14-17.

[10] 张 策. 机械动力学[M]. 2版. 北京:高等教育出版社, 2010.

[11] 晏祖根,王端泽,孙智慧,等. 四自由度并联机器人运动学分析[J]. *包装与食品机械*, 2014(2): 34-36, 57.

[12] 刘晋霞,胡仁喜. ADAMS2012 虚拟样机从入门到精通[M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 2013.

[编辑:程 浩]