

高压气动比例减压阀设计与仿真*

徐志鹏^{1,2} 王宣银¹ 罗语溪¹

(1. 浙江大学流体传动及控制国家重点实验室, 杭州 310027; 2. 中国计量学院计量测试工程学院, 杭州 310018)

【摘要】 提出一种高压气动比例减压阀,该阀由比例电磁铁控制的二位三通型滑阀式先导阀和活塞提升式主阀组成,通过压力传感器和控制器构成闭环电反馈控制,最高工作压力为 31.5 MPa。该阀虽然存在少量先导耗气,但保证了压力调整的快速性和稳定性,克服了先导泄漏对减压阀的影响,避免了先导阀意外结冰的发生。在介绍结构及工作原理的基础上分析了该减压阀的特点,利用 AMESim 建立了考虑气源压力和负载流量波动的仿真模型。仿真结果表明:该阀在气源压力缓慢下降且负载流量大范围波动的情况下能实现稳定的压力输出,在不改变控制参数的前提下,当气源压力为 31.5 MPa 时输出压力可在 1~30 MPa 范围内稳定;先导阀预开口形式对压力精度影响较小,但应避免正开口以减少气体浪费;先导阀环形间隙高度控制在 10 μm 左右较为合适。

关键词: 减压阀 高压气动 开口 环形间隙 先导阀

中图分类号: TH138.52⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)01-0209-04

Design and Simulation of a High Pressure Proportional Pneumatic Pressure Reducing Valve

Xu Zhipeng^{1,2} Wang Xuanyin¹ Luo Yuxi¹

(1. State Key Lab of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract

A high pressure electronic pneumatic pressure reducing valve, consisted of a two-position three-port pilot valve controlled by electromagnet and a piston type main valve, was proposed. The valve used a pressure sensor and a controller to constitute the closed-loop feedback. By consuming a little gas in the pilot valve, rapidity and stability of pressure regulation were preserved, the influences of pilot leakage on the valve and unexpected icing in pilot valve could be avoided. Then the characteristics were analyzed based on the structure and working principle of the valve, finally the simulation model including the vibration of gas supply pressure and load flow rate was built up with AMESim. Simulation results showed that steady pressure reduction could be achieved under the condition of gas supply pressure slowly reducing and load flow rate fluctuating in a big range. When gas supply pressure is 31.5 MPa, the output pressure could be steady in 1~30 MPa without adjusting the controller parameters; the influences of machining errors on the valve were also simulated, the results showed that under-lap of pilot spool should be avoided to reduce gas consuming and 10 μm is a suitable choice for the height of annular clearance.

Key words Pressure reducing valve, High pressure pneumatic, Lap type, Annular clearance, Pilot valve

收稿日期: 2010-01-22 修回日期: 2010-03-08

* 国家自然科学基金资助项目(50575202)

作者简介: 徐志鹏, 博士生, 中国计量学院讲师, 主要从事高压气动相关技术研究, E-mail: zhp_xu@hotmail.com

引言

高压气动减压阀是高压气动系统的关键元件,在航空航天领域以及天然气行业等都有广泛的应用^[1-2]。目前手动控制型已有较为成熟的产品。高压电气减压方面也有一些报道,如贾光政等提出的开关容积减压系统(最高工作压力 12.8 MPa),可以实现较高的能量利用效率,但其工作压力不高且压力控制精度较低^[3];陈奕泽等提出了一种电反馈式高压气动比例减压阀,输出压力在 8~25 MPa 可控,但该阀在工作过程中始终存在流入主阀排气端的先导气流,因此不适用于没有流量消耗的保压等工况,且先导阀连续工作容易导致结冰等意外的发生^[4-7];皮阳军等提出了一种开关先导型高压气动减压阀,利用两个高压电气开关阀控制调压腔的压力,工作压力可达 35 MPa,但限于开关阀的响应速度,该阀压力响应速度较慢^[8-9]。

高压气动领域对工作可靠、响应迅速的电气减压阀需求较迫切,本文在借鉴前述减压阀的基础上提出一种二位三通型滑阀式先导阀加活塞提升式主阀的高压气动比例减压阀,可以实现压力的快速调节,同时主阀的调压腔与排气腔不连通,先导阀在稳态工作时仅有少量的泄漏气体排入大气,因此该减压阀可用于零负载流量的场合,还能避免结冰的发生^[9],可以长时间连续工作。

1 减压阀的结构与工作原理

高压气动比例减压阀结构如图 1 所示,由活塞提升式主阀以及二位三通型滑阀式先导阀组成。

主阀由主阀体、主阀芯组件、主阀弹簧以及密封元件等组成,主阀芯组件上镶嵌的聚四氟乙烯环与主阀体上的凸台构成软硬配合实现密封;进气腔 i 与气源相连,排气腔 o 与负载相连,主阀阀芯上开有小孔连通 o 腔与平衡腔 b,调压腔 r 与先导阀相通。

先导阀主要由先导阀体、先导阀套、先导阀芯、比例电磁铁、先导阀弹簧及密封元件等构成。

如图 2 所示,先导阀套上的 A、B 及 C 口分别与大气、主阀的 r 腔及 i 腔相通,在 A 口和 C 口的环槽中分别开有对称分布的圆形节流小孔(直径 0.5 mm)。由于先导阀芯和先导阀套配合间隙的存在,当阀口处于关闭状态时会有从 i 腔泄漏进入先导阀中间腔 p 的进气泄漏 q_{c_ip} 和 p 腔泄漏进入大气的出气泄漏 q_{c_pa} (图 2a)。

减压阀输出压力 p_o 的调节通过控制先导阀实现: p_o 低于目标压力 p_i 时,控制器驱动比例电磁铁增大先导阀芯开度 x_0 使先导阀芯向右移动,先导气流

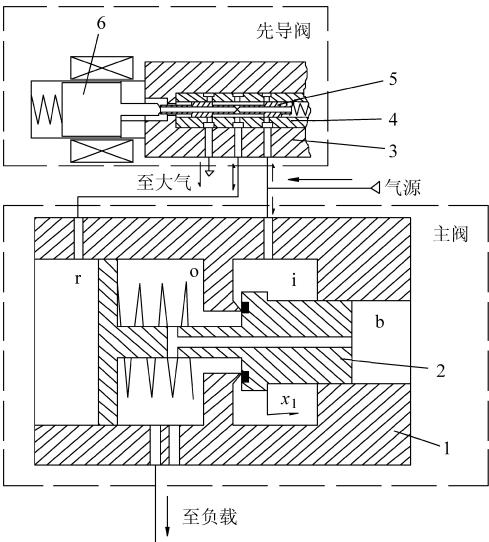


图 1 减压阀结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the pressure reducing valve

1. 主阀体 2. 主阀芯组件 3. 先导阀体 4. 先导阀套
5. 先导阀芯 6. 比例电磁铁

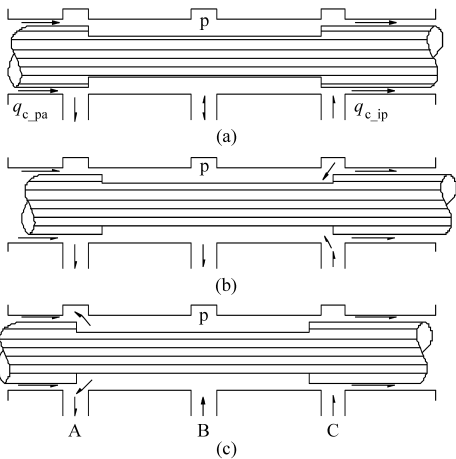


图 2 滑阀式先导阀工作状态示意图

Fig. 2 Operating positions of the slide pilot valve

从 i 腔经节流孔进入 p 腔(图 2b),p 腔与 r 腔压力升高,推动主阀芯使其开度 x_1 增大, p_o 升高;当 p_o 高于 p_i 时,减小 x_0 使先导阀芯向左移动,r 腔气体从 p 腔经节流孔排入大气(图 2c),r 腔气体压力下降, x_1 减小, p_o 降低。减压阀工作过程中,控制器通过比较 p_i 与 p_o 的差值不断调整 r 腔的压力,所以先导阀芯和主阀芯都处于动态平衡。

从结构及工作原理分析,该阀具有以下特点:
①滑阀式先导阀的结构及闭环电反馈的控制方式能实现压力的快速自动调节,可以克服入口压力及出口流量对压力调节稳定性的影响。
②先导阀仅在目标压力改变时有一定的流量,稳态时处于关闭状态,这样先导阀口多数时候没有节流气流通过,可避免气体膨胀降温导致的气阀结冰卡死。
③先导阀始终存在一部分排入大气的泄漏气体,但由于主阀调

压腔与排气腔不连通,因此先导阀的泄漏不影响主阀的工作,使得主阀可用于零耗气量的工况。

2 减压阀的 AMESim 建模

采用 Imagine. Lab 的 AMESim 进行建模分析,使用该平台仿真可以更加专注于系统本身的设计而非繁琐的数学建模^[10]。建立的系统模型如图 3 所示,主要由气源、减压阀、控制器及负载构成。

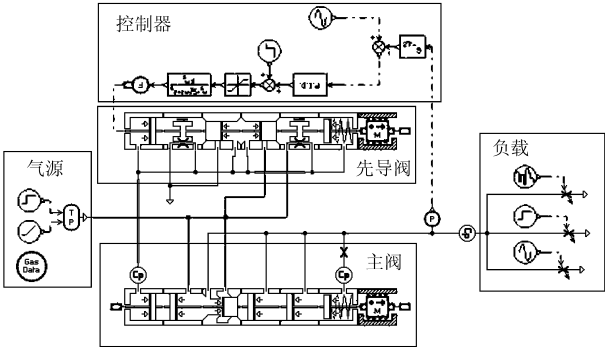


图 3 高压比例减压阀 AMESim 仿真模型
Fig.3 AMESim model of the pressure reducing valve

实际工况中,一个气源通常供给多路负载使用,气源压力 p_i 会随负载消耗而缓慢下降,为此本文设定 p_i 初始值为 31.5 MPa,以 0.5 MPa/s 的速度下降,气源温度为 20℃;主阀按设计的结构由 i、o、r 及 b 腔构成,没有控制信号时,主阀口在主阀弹簧的作用下处于关闭状态,限定主阀芯位移为 0 ~ 3 mm;先导阀中考虑了先导阀芯与先导阀套之间的泄漏,包括由 A 口至 B 口的进气泄漏以及 B 口至 C 口的排气泄漏,没有控制信号时, $x_0 = 0$,此时 A 口与 B 口之间气路关闭,B 口与 C 口之间气路相通,限定先导阀芯位移为 0 ~ 3 mm; p_o 信号经 10 ms 延时后输入 PI 控制器,用一个二阶比例环节模拟比例电磁铁(比例系数 53.3,频率 20 Hz,阻尼比 0.6),其输出值作为控制力加至先导阀芯;设定负载由 3 条节流口直径为 5 mm 的排空气路组成,各节流口开度分别由随机、阶跃及正弦信号控制,用于模拟实际工况中耗气量不确定的终端负载;负载与减压阀之间连有一个体积为 0.5 L 的缓冲气罐,用于消除 p_o 的细小波动。模型中的其他参数如表 1 所示。

3 减压阀仿真分析

3.1 阶跃响应

设定目标压力 p_i 为 15 MPa,3 条负载气路同时打开,控制器 PI 参数为 $P = 0.03, I = 0.01$,得到阶跃响应的压力及负载流量 q_1 曲线如图 4 所示。从图 4a 可以看出, p_o 在 0.5 s 左右达到稳定值,没有超调和振荡,稳态时 p_o 偏差在 ± 0.5 MPa 以内,此时 p_i

表 1 仿真参数
Tab.1 Value of simulation parameters

参数	数值
先导阀芯直径 d_p/mm	6
先导阀芯质量 m_p/g	10
先导弹簧预紧力 C_{0p}/N	10
先导弹簧刚度 $K_p/\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$	20
主阀芯阀口直径 d_m/mm	12
主阀芯组件质量 m_m/g	50
主阀弹簧预紧力 C_{0m}/N	50
主阀弹簧刚度 $K_m/\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$	30
环形间隙高度 $h_g/\mu\text{m}$	5
环形间隙进气段长度 $l_{g,i}/\text{mm}$	30
环形间隙排气段长度 $l_{g,o}/\text{mm}$	30
r 腔作用面积 S_r/mm^2	1 257
o 腔作用面积 S_o/mm^2	1 103
b 腔作用面积 S_b/mm^2	154
r 腔初始容积 V_{r0}/mL	50
b 腔初始容积 V_{b0}/mL	10

在缓慢下降,负载流量 q_1 在 300 ~ 900 g/s 内无规律波动,可知减压阀在 p_i 和 q_1 波动时能实现稳定的压力输出。图 4c 和图 4d 为 x_0 及 x_1 曲线图,可以看出 x_0 在 p_o 上升阶段达到最大值 3 mm,在 p_o 达到稳态后在 1.5 mm 即先导阀口零位小幅振荡,而 x_1 则在 0 ~ 2 mm 间反复波动,主阀口处的冲击比较频繁。先导阀的进气泄漏 $q_{c,ip}$ 随着 p_i 的下降及 p_r 的上升从 0.26 g/s 逐渐下降至 0.13 g/s;排气泄漏 $q_{c,pa}$ 稳定在 0.06 g/s 附近。

图 5 为不同 p_i 时的 p_o 响应曲线,设定 p_i 稳定在 31.5 MPa,负载只打开阶跃信号控制的气路, p_i 分别为 1、5、10、20、25 及 30 MPa, $P = 0.03, I = 0.01$ 。可

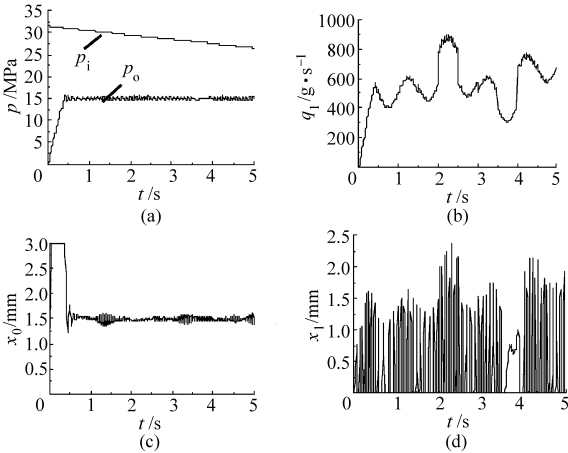


图 4 $p_i = 15$ MPa 阶跃响应曲线
Fig.4 Step response curves with $p_i = 15$ MPa
(a) p_i 和 p_o (b) q_1 (c) x_0 (d) x_1

以看出在气源许可且 q_1 稳定时减压阀能实现 1 ~ 30 MPa 的压力输出, 稳态时 p_o 偏差小于 0.2 MPa, 且 p_i 大范围变动时 PI 参数无需调整。

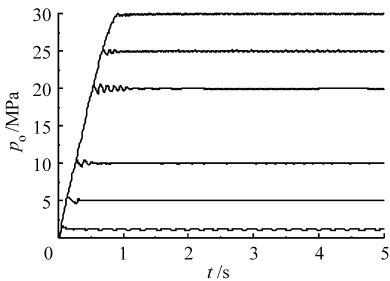


图 5 不同 p_i 阶跃响应曲线

Fig. 5 Step response curves of p_o with different p_i

3.2 正弦信号跟踪

实际应用中经常要求 p_o 跟随一定的轨迹变化, 比较典型的 就是正弦曲线。图 6 为 $p_i(t) = 150 + 30\sin(2\pi t)$ 及 $p_i(t) = 150 + 30\sin(6\pi t)$ 即 1 Hz 和 3 Hz 的跟踪曲线, 可以看出减压阀对 1 Hz 的信号跟踪得比较好; 但对于 3 Hz 的信号在波谷处跟踪较差, 分析表明这与缓冲气罐的容积有关系, 因为负载耗气量限制了 p_o 下降的速度, 减小缓冲气罐容积后 p_o 波形得到改善, 但精度有所下降, 因此减压阀在用于压力信号跟踪时应综合考虑, 适当调整缓冲容腔的大小。

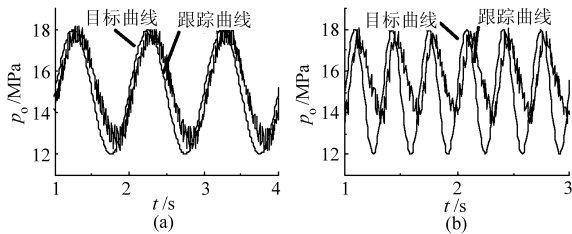


图 6 正弦信号跟踪曲线

Fig. 6 Tracking curves of sinusoidal signal

(a) 1 Hz 曲线跟踪 (b) 3 Hz 曲线跟踪

3.3 加工误差影响分析

此外, 本文初步分析了实际加工误差对减压阀的影响, 该阀中比较难控制的尺寸有先导阀的预开口量和先导阀芯与先导阀套的环形间隙高度 h_g 。

仿真表明先导阀口预开口量 (分别设定为 0.2、0 及 -0.2 mm) 对阶跃响应时 p_o 的稳态误差基本没

有影响, 但对先导阀稳态排气量影响较大, 负开口时为 0.11 g/s, 零开口时为 0.71 g/s, 正开口时为 3.64 g/s, 因此加工时应尽量避免正开口, 以减少高压空气的浪费。

先导阀阀芯阀套的环形间隙高度 h_g 主要影响压力的调整时间和先导阀稳态排气量, 其仿真结果如图 7 所示, h_g 为 15 μm 时 p_o 从 0 到 15 MPa 的上升时间比 5 μm 时缩短了 0.1 s (图 7a), 但先导阀累计排气量 Q_1 也大为增加, 达到 5 μm 时的 10 倍左右 (图 7b)。为避免 h_g 过小导致阀芯卡死以及过大导致气体浪费, 加工中控制 h_g 在 10 μm 左右较为合适。

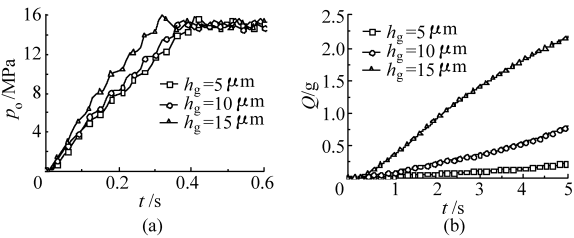


图 7 h_g 影响

Fig. 7 Influence of h_g

(a) p_o 响应 (b) 先导阀累计排气量

4 结束语

本文提出的高压气动比例减压阀可以快速实现目标压力的自动调节, 在牺牲少量先导阀耗气量的情况下克服了泄漏气体对减压阀应用场合的限制, 可以避免先导阀结冰卡死。仿真结果表明该减压阀在气源压力缓慢下降和负载流量大范围波动的情况下能够实现目标压力的稳定输出, 稳态偏差在 ± 0.5 MPa 以内; 当气源压力稳定在 31.5 MPa 时能实现 1 ~ 30 MPa 大范围压力输出, 且控制器参数无需调整; 对正弦压力信号的跟踪仿真表明将减压阀用于压力跟踪时应综合稳态精度和信号频率来确定缓冲容腔的大小; 先导阀的预开口形式对先导阀稳态排气量影响较大, 为减少空气浪费应避免正开口; 增大先导阀环形间隙高度能提高压力响应速度, 但会大大增加先导阀的排气量, 本文认为控制间隙高度在 10 μm 左右较为合适。

参 考 文 献

1 Antony B. Pneumatic handbook [M]. 8th Edition. Amsterdam: Elsevier Science Ltd., 1997.
2 Xu Zhipeng, Wang Xuanyin, Cheng Jia. High-pressure pneumatic technology: present, future [C] // Proceedings of the 7th International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing, Guangzhou, China, 2006.

- [J]. Journal of Astronautics, 2006, 27 (4):635 ~ 639. (in Chinese)
- 6 高宏力,许明恒,傅攀,等. 基于动态树理论的刀具磨损监测技术[J]. 机械工程学报,2006,42(7):227 ~ 230.
Gao Hongli, Xu Mingheng, Fu Pan, et al. Tool wear monitoring based on dynamic tree[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(7):227 ~ 230. (in Chinese)
- 7 黄华,李爱平. 基于小波神经网络的切削刀具磨损识别[J]. 农业机械学报,2008,39(8):173 ~ 177.
Huang Hua, Li Aiping. Wear detection on cutting tools based on wavelet neural network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39 (8):173 ~ 177. (in Chinese)
- 8 王海丽,马春翔,邵华,等. 车削过程中刀具磨损和破损状态的自动识别[J]. 上海交通大学学报,2006, 40 (12): 2 057 ~ 2 062.
Wang Haili, Ma Chunxiang, Shao Hua, et al. The tool wear and breakage monitoring in turning using neural network [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40 (12):2 057 ~ 2 062. (in Chinese)
- 9 吴道全,万光珉,林树兴,等. 金属切削原理及刀具[M]. 重庆:重庆大学出版社,1994.
- 10 刘超,艾兴,刘战强,等. 高速车削铁基高温合金硬质合金刀具磨损机理[J]. 农业机械学报,2009,40(11):240 ~ 244.
Liu Chao, Ai Xing, Liu Zhanqiang, et al. Wear mechanism of cemented carbide tool in high speed machining iron-based superalloy GH2132 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40 (11): 240 ~ 244. (in Chinese)
-

(上接第 212 页)

- 3 贾光政,王宣银,吴根茂,等. 高压气动容积减压分级控制原理与特性[J]. 机械工程学报, 2005, 41(10): 210 ~ 214.
Jia Guangzheng, Wang Xuanyin, Wu Genmao, et al. Research on principle and property of classification control pressure reduction by expander in high pressure pneumatic system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(10): 210 ~ 214. (in Chinese)
- 4 Chen Yize, Wang Xuanyin, Xu Zhipeng, et al. Pilot leakage's influences on the performances of extra high pressure proportional pneumatic valve [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 18(2): 208 ~ 211.
- 5 王宣银,陈奕泽,刘荣,等. 超高压气动比例减压阀的设计与仿真研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2005, 39(5): 614 ~ 617.
Wang Xuanyin, Chen Yize, Liu Rong, et al. Mechanics and simulation of pneumatic proportional extra-high pressure valve [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39(5): 614 ~ 617. (in Chinese)
- 6 徐志鹏,王宣银,罗语溪. 滑阀先导式高压气动减压阀结冰特性[J]. 航空学报, 2009, 30(5): 819 ~ 824.
Xu Zhipeng, Wang Xuanyin, Luo Yuxi. Characteristics of icing in high pressure pneumatic relief valve with slide pilot [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(5): 819 ~ 824. (in Chinese)
- 7 路波,陶国良,袁月峰,等. 高精度气动比例压力阀设计与特性分析[J]. 农业机械学报,2009,40(10):181 ~ 187.
Lu Bo, Tao Guoliang, Yuan Yuefeng, et al. Design and characteristics analysis of a high precision pneumatic proportional pressure valve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(10):181 ~ 187. (in Chinese)
- 8 Pi Yangjun, Wang Xuanyin, Xu Zhipeng, et al. Design and simulation of a new type of pneumatic extra-high pressure reducing valve[C]//Proceedings of the Fifth Fluid Power Transmission and Control, ISFP' 2007, Yanshan, China, 2007: 95 ~ 98.
- 9 王宣银,皮阳军,徐志鹏,等. 开关先导型超高压气动减压阀原理与特性研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2008, 42(6): 1 027 ~ 1 030, 1 064.
Wang Xuanyin, Pi Yangjun, Xu Zhipeng, et al. Principle and characteristics of on/off piloted pneumatic extra-high pressure reducing valve [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 42(6): 1 027 ~ 1 030, 1 064. (in Chinese)
- 10 付永领,祁晓野. AMESim 系统建模和仿真——从入门到精通[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2006.