

不确定大时延下遥操作对象模型的在线修正方法

赵猛, 张珩

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)



摘要: 基于预测模型的遥操作是消减通信大时延的有效方法, 预测精度直接影响操作品质。分析了遥操作中的不确定大时延及有限带宽对模型修正的影响, 针对模型参数的不确定性, 提出了一种新的模型在线修正方法。该方法采用时标标识、同态模型、数据平滑等策略, 有效克服了实测信息错配、反馈修正与实时预测过程异步以及变采样步长问题, 实现了模型的精确在线修正, 提高了预测精度和系统的鲁棒性。通过仿真实验验证了该方法的有效性。

关键词: 遥操作; 时延; 模型修正; 不确定性

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2007) 19-4473-04

Online Model-Modifying Method for Teleoperation under Large and Uncertain Time Delay

ZHAO Meng, ZHANG Heng

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The teleoperation based on model is an effective method to eliminate the influence of communication time delay with uncertainty, and predictive precision is directly concerned to qualities of teleoperation. The effect on model-modifying was analyzed. A new model-modifying method was proposed to resolve model parameter mismatch. Strategies of time point identifying, homonymic model and response smoothing were sufficiently combined so that not only the effects of uncertain time delay and limited bandwidth could be weeded out, but also the plant model mismatch could be on-line modified effectively. A simulation example was computed to show the validity of the mentioned method.

Key words: teleoperation; time delay; model-modifying; uncertainty

引言

遥操作是人类感知和行为能力的有效延伸、拓展以至超越, 它将在遥远、恶劣、危险的操作环境中发挥更加重要的作用^[1-4]。由于远距离传输以及有限带宽造成了不确定大时延问题, 它降低了系统的工作效率, 甚至造成系统失稳^[5-6], 而且时延的不确定性严重破坏了系统的透明度, 误导操作员, 引发事故。基于预测模型的遥操作有效消减了不确定大时延的影响^[1], 但其对预测误差十分敏感, 直接影响遥操作品质。而实际对象十分复杂, 难以建立精确的模型。传统的模型在线修正方法可以实时解决建模误差, 但受不确定大时延及有限带宽的影响, 难以得到令人满意的修正效果。目前, 遥操作系统一般采用静态预测误差的一次性校正方法。文[7-11]采用“停-改-走”的模式对模型仿真的静态累积误差进行校正。文[12]在指令上行过程中对虚拟对象的静态误差进行修正, 但其影响操作员的下一步决策与操作。文[13]采用实测数据周期重装的方法修正预测误差, 但它要求仿真计算的速度足够快。上述这些方法虽然使预测误差得到间歇式的修正, 但修正不及时, 效率低下, 而且没有解决其根本原

因——模型失配, 无法实时保证预测仿真的精确性, 极大地限制了遥操作在深空、深海等领域的实际在线应用。

本文针对不确定大时延遥操作对象模型参数的不确定性, 提出了一种新的模型在线修正方法, 以实时解决模型失配问题。该方法通过时标标识、同态模型、数据平滑策略有效克服了由不确定大时延及有限带宽造成的信息错配、反馈修正与实时预测过程异步及变采样步长问题, 实现了模型在线修正, 提高了预测精度和仿真的置信度。

1 问题的提出

基于预测模型的遥操作首先根据真实对象建立预测模型, 构成虚拟对象, 并保证虚拟对象与真实对象相一致(模型匹配), 操作员可以向虚拟对象和真实对象同时发送遥操作指令, 并通过预测模型实时输出状态响应信息, 供操作员参考, 而远端的真实对象则在一定的时延后重复仿真结果。该方法通过及时的仿真信息弥补了通信大时延造成的真实对象响应信息反馈不及时、不充分的缺陷, 操作者仿佛在现场直接、连续、无时延地操作真实对象, 给人以深刻的“沉浸感”。其中准确的模型是保证遥操作有效克服大时延影响, 高质量地完成的前提条件, 但实际对象一般十分复杂, 建模精度低, 因此引入模型在线修正机制, 及时修正模型误差, 以提高模型精度和系统的鲁棒性。遥操作中的模型在线修正原理图如下:

收稿日期: 2006-07-25

修回日期: 2006-11-03

基金项目: 国家 863 高技术项目 (2004AA742060)

作者简介: 赵猛(1977-), 男, 辽宁抚顺人, 博士生, 研究方向为遥操作及控制理论; 张珩(1961-), 男, 吉林长春人, 研究员, 博导, 研究方向为现代控制理论、智能化系统设计、面向空间应用的遥科学及微小航天器的轨道控制技术。

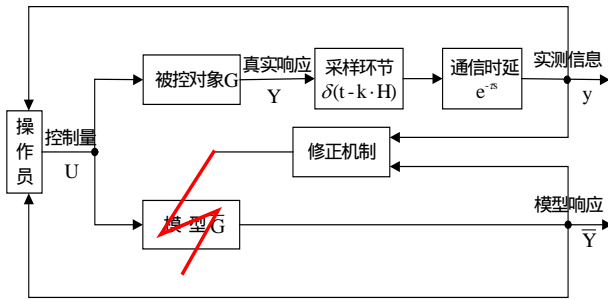


图 1 遥操作模型在线修正方法原理图

真实被控对象 G 为：

$$y(t_n) = f[y(t_{n-1}), U(t_{n-1}), A(t_{n-1})] \quad (1)$$

模型 \bar{G} 为：

$$\bar{Y}(t_n) = f[\bar{Y}(t_{n-1}), U(t_{n-1}), \bar{A}(t_{n-1})] \quad (2)$$

传输模型为：

$$Y(t_n) = y(t_n - \tau(t_n)) \cdot \delta(t_n - H) \quad (3)$$

其中： A 和 \bar{A} 分别为真实对象和模型的参数， $\tau(t_n)$ 为通信不确定大时延(未知)， $h = t_n - t_{n-1}$ 为模型 \bar{G} 的计算步长， H 为实测信息的采样步长， $\delta(t_n - H)$ 是以 H 为采样周期的采样函数。当 $\bar{A} \neq A$ 时，模型失配，通过模型在线修正环节修正 \bar{A} ，以使 $\bar{A} \approx A$ 且预测误差在误差限内 $e(t_n) \leq E$ 。

定义几个时间标度：

- t ——系统当前时间
- $\tau(t)$ ——不确定大时延
- tP ——预测信息的响应时间
- tR ——实测信息的响应时间
- tF ——模型正向预测时间
- tB ——模型反馈修正时间

其中模型正向实时预测时间 tF 即为系统当前时间 t ，由于模型仿真回路没有时延，因此预测信息的获取时间亦为其响应时间即 $\bar{Y}(t) = \bar{Y}(tP)$ ，而受不确定大时延的影响，实测信息 $Y(t) = y(t - \tau(t)) = y(tR)$ ，而且实测信息响应时间决定了反馈修正过程的时间 $tB = tR$ 。遥操作系统时间标度关系如图 2。

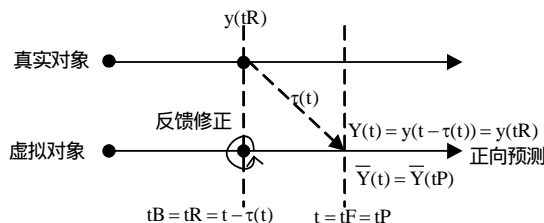


图 2 时间标度关系示意图

现有的模型在线修正方法适用于无时延或时延恒定且实测信息为定采样步长的情况，然而在遥操作中不确定大时延及有限带宽对模型在线修正产生严重的影响，难以达到令人满意的修正结果。

(1) $\tau(t)$ 的不确定性导致信息错配。当前 t 时刻获取的样本点为：

$$\{Y(t), \bar{Y}(t), U(t)\} = \{y(t - \tau(t)), \bar{Y}(t), U(t)\} \quad (4)$$

预测误差为

$$e(t) = \|Y(t) - \bar{Y}(t)\| = \|y(t - \tau(t)) - \bar{Y}(t)\| \quad (5)$$

其中实测信息、预测信息及控制量的时间并非同一响应时刻，因此利用时间错配的样本信息不仅无法正确监视误差，误导操作员，而且也无法对模型进行正确的在线修正。

(2) 大时延 $\tau(t)$ 使得实测信息滞后，造成在线修正过程与正向预测过程的异步问题，即 $tB = tP - \tau(t)$ ，进而难以实现模型在线修正。

(3) 为了缓解带宽压力以及受信息传输中丢包等因素的影响，造成变采样步长问题，即 $H = m \cdot h$ (m 为不确定正整数)。大采样步长 H 使得实测信息密度减小、相关性变弱，难以正确、充分表征真实对象的动态响应行为。这将导致：
I) 无法保证样本点在大采样步长内恒定，即 $\{Y(T), \bar{Y}(T), U(T)\} \neq \{Y(t_{i-1}), \bar{Y}(t_{i-1}), U(t_{i-1})\}$ ($t_{i-1} \leq T \leq t_{i-1} + H$)，影响修正的结果；
II) 在变采样步长 $H = m \cdot h$ 条件下，模型修正无法正确收敛。

针对上述遥操作通信环节造成的信息错配、修正与预测过程异步以及变采样步长问题，提出了一种新的模型在线修正方法，以提高模型的准确性和预测精度。

2 模型在线修正方法

引入符号 $DATA(\bullet|*)$ ，表示 $*$ 时刻接收到的信息 $DATA$ 的响应时间为 \bullet 。为了克服不确定大时延 $\tau(t)$ 的影响，将信息的响应时间作为标签，直接标识信息，得 $Y(tR_n | t)$ 和 $\bar{Y}(tP_n | t)$ 。然后以 $(tR_n | *)$ 为原则进行信息匹配，得样本点 $I(tR_n | *) = \{Y(tR_n | *), \bar{Y}(tR_n | *), U(tR_n | *)\}$ ，并实时计算 \bar{G} 的预测误差 $\bar{e}(tR_n | *) = \|Y(tR_n | *) - \bar{Y}(tR_n | *)\|$ ，当 $\bar{e}(tR_n | *) > E$ 时，建立 \bar{G} 的同态模型 \check{G} ，并将其由预测时刻 tF 反演到 tR_n 时刻(即修正时刻 tB)，得：

$$\check{Y}(tR_{n+1}) = f[\check{Y}(tR_n), U(tR_n), \check{A}(tR_n)] \quad (6)$$

初始时刻 $\check{A}(tR_n) = \bar{A}(tF)$ 。然后利用实时获得的样本点 $I(tR_n | t)$ 在线滚动修正 \check{G} 的参数 \check{A} ，直到 \check{G} 的误差 $\bar{e}(tR_n | t) = \|Y(tR_n | t) - \check{Y}(tR_n | t)\|$ 小于 E 为止。再将 \check{G} 由当前反馈修正时刻 tB 加速计算至正向预测时刻 tF ，得 \check{G} 的状态 $\check{Y}(tF | tF)$ 和参数 $\check{A}(tB)$ ，最后用其更新模型 \bar{G} ，完成在线修正。修正过程如下图：

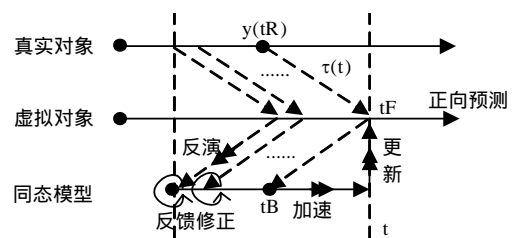


图 3 在线修正过程示意图

通过信息的时标标识和同态模型的反演与加速计算策略将不确定大时延 $\tau(t)$ 排除在外，不仅解决了信息错配问

题, 而且使修正过程的时间 t_B 统一到预测过程时间 t_F , 解决了异步问题, 在没有干扰正常预测的情况下, 完成了预测模型的在线修正。

而针对变采样步长问题, 一般采用数据平滑方法解决。常用的数据平滑方法有线性插值平滑、抛物线插值平滑、样条插至平滑等, 但这些方法的平滑误差较大, 影响修正的效果。因此本文充分考虑了模型结构的确定性信息, 利用动态的同态模型设计了平滑器:

$$\begin{aligned} \tilde{Y}(t+n \cdot h) &= f[\dots[f[Y(t), U(t), \tilde{A}(t)], \dots, \\ &U(t+(n-1) \cdot h), \tilde{A}(t+(n-1) \cdot h)] \end{aligned} \quad (7)$$

实测信息经过数据积分平滑处理后不仅将变采样步长问题转化为定采样步长问题, 增加了信息密度, 而且使平滑误差随动态滚动修正的平滑器参数的收敛而减小, 同时反过来促进了模型参数的收敛。

具体修正步骤如下:

1) 接收实测信息 $Y(tR_n|t)$, 并按 $(tR_n|*)$ 匹配原则构成样本点 $\{Y(tR_n|t), \tilde{Y}(tR_n|t), U(tR_n|t)\}$ 。

2) 实时计算误差 $\bar{e}(tR_n|t) = \|Y(tR_n|t) - \tilde{Y}(tR_n|t)\|$, 当 $\bar{e}(tR_n|t) > E$ 时, 建立同态模型 \tilde{G} 并将其反演至 tR_n 时刻; 当 $\bar{e}(tR_n|t) \leq E$ 时, 转入第 7) 步。

3) 将 $Y(tR_{n-1}|*)$ 代入平滑器(7)中, 得 $\tilde{Y}(tR_n-h|*)$ 和 $\tilde{Y}(tR_n|*)$ 。

4) 计算 \tilde{G} 的误差 $\bar{e}(tR_n|t) = \|Y(tR_n|t) - \tilde{Y}(tR_n|*)\|$, 当 $\bar{e}(tR_n|t) \leq E$ 时, 转入第 5) 步; 否则将 $\bar{e}(tR_n|t)$ 及样本点 $\{Y(tR_n-h|t), \tilde{Y}(tR_n-h|t), U(tR_n-h|t)\}$ 代入 (8)~(10) 式对 $\tilde{A}(tR_n)$ 进行修正, 然后返回第 1) 步进行滚动修正。

$$\begin{aligned} \tilde{A}(tR_n) &= \tilde{A}(tR_{n-1}) + \gamma(tR_n) \cdot P(tR_{n-1}) \cdot \\ &X(tR_n-h) \cdot \bar{e}(tR_n|t) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} P(tR_n) &= P(tR_{n-1}) - \gamma(tR_n) \cdot P(tR_{n-1}) \cdot X(tR_n-h) \cdot \\ &X^T(tR_n-h) \cdot P(tR_{n-1}) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\gamma(tR_n) = 1/[1 + X^T(tR_n-h) \cdot P(tR_{n-1}) \cdot X(tR_n-h)] \quad (10)$$

其中: $X(tR_n-h) = [\tilde{Y}(tR_n-h), U(tR_n-h)]^T$ 。

5) 将 $Y(tR_n|t)$ 作为初值代入同态模型 \tilde{G} 中, 并由当前的修正时刻 t_B ($t_B = tR_n$) 加速至当前预测时刻 t_F ($t_F = t$), 得 $\tilde{Y}(tF|tF)$ 和 $\tilde{A}(tB)$ 。

6) 更新模型 $\begin{cases} \tilde{A}(tF) = \tilde{A}(tB) \\ \tilde{Y}(tF|tF) = \tilde{Y}(tF|tF) \end{cases}$, 并释放同态模型, 完成在线修正。

7) 是否继续? 是, 返回第 1) 步; 否则结束。

本方法的计算量主要集中在数据平滑、滚动修正和加速追赶计算三个方面, 但相对现在计算机的计算速度而言, 计算量不大, 计算耗时远小于采样步长 H , 因此可以实现有效的在线修正。

3 仿真实验

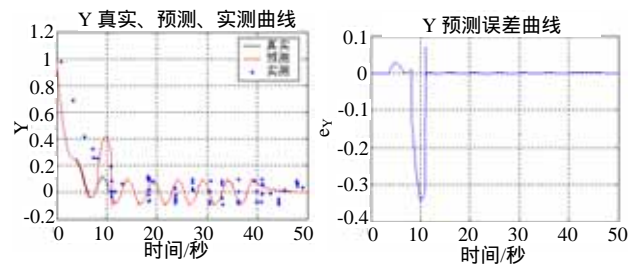
考虑遥操作对象 G 为:

$$Y(t_n) = Y(t_{n-1}) + A_1 \cdot Y(t_{n-1}) + A_2 \cdot U(t_{n-1}) \quad (11)$$

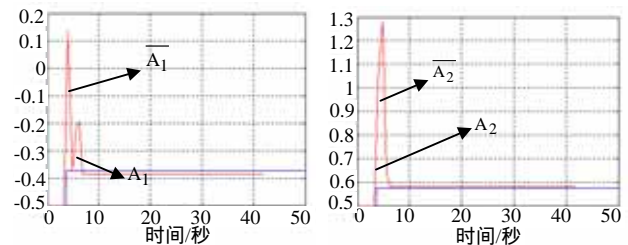
预测模型 \tilde{G} 为:

$$\tilde{Y}(t_n) = \tilde{Y}(t_{n-1}) + \tilde{A}_1 \cdot \tilde{Y}(t_{n-1}) + \tilde{A}_2 \cdot U(t_{n-1}) \quad (12)$$

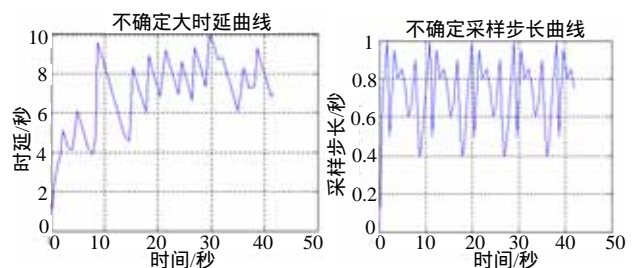
初始时刻模型匹配 $\tilde{G} = G$ 且 $A_1 = \tilde{A}_1 = -0.5$, $A_2 = \tilde{A}_2 = 0.5$, 在 3.5s 时失配参数为 $A_{1f} = -0.375$, $A_{2f} = 0.575$ 。利用本文的修正方法, 预测和修正的仿真结果如下:



(a) 真实、预测、实测信息曲线 (b) 预测误差曲线



(c) 参数 \tilde{A}_1 、 \tilde{A}_2 修正曲线



(d) 实测信息时延和采样步长曲线

图 4 仿真实验的预测与修正结果

图 d 为图 a 中的实测信息的时延和采样步长。从实验结果图 c 中可以看到, 本文提出的修正方法在遥操作不确定大时延和变采样步长条件下, 使预测模型参数逐渐收敛到真值, 在线解决了模型失配问题, 减小了预测误差(图 b), 为遥操作的在线应用提供了坚实的前提保障。

4 结论

随着空间实验、星球探测、深海开发等实践活动的深入发展, 人们对遥操作的精度、实时性和灵活性等方面提出了更高的要求, 所以模型在线修正方法受到越来越多的重视。相对现有的修正方法, 本文提出的模型在线修正方法不仅可以对静态累计误差进行及时的修正, 而且在遥操作不确定大时延和有限带宽条件下, 实现了不确定大时延遥操作对象预测模型参数的精确修正, 提高了预测模型精度, 增强了系统的透明度和鲁棒性, 改善了遥操作品质。可以预见, 具有模

型在线修正的遥操作必将在我国的空间计划、在轨服务以及国防等方面发挥更加积极的作用。

参考文献：

[1] Brunne R B, Hirzinger G. Multisensory Shared Autonomy and Telesensor Programming-Key Issue in the Space Technology Experiment ROTEX [C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: IEEE, 1993: 2123-2139.

[2] Toru Kasai. Results of the ETS-7 Mission-Rendezvous Docking and Space Robotics Experiments [J]. European Space Agency (S0379-6566), 1999, (Special Publication): 299-306.

[3] 朱广超, 王田苗, 丑武胜, 等. 基于增强现实的机器人遥操作系统研究 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(5): 943-946. (Zhu Guangchao, Wang Tianmiao, Chou Wusheng, et al. Research on Augmented Reality Based Teleoperation System [J]. Journal of system simulation, 2004,16(5): 943-946.)

[4] 胡海鹰, 李家伟, 王滨, 王捷, 刘宏. 虚拟现实技术在机器人臂 / 灵巧手遥操作中的应用 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(10): 2305-2308. (Hu Haiying, Li Jiawei, Wang Bin, Liu Hang. An Application of Virtual Reality on Teleoperation of Robot Arm and Dexterous Hand [J]. Journal of system simulation, 2004,16(10): 2305-2308.)

[5] Yokokohji Y, Imaida T, Yoshikawa T. Bilateral control with energy balance monitoring under time-varying communication delay [C]// ICRA 2000: IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco: Institute of Electrical and Electronics

Engineers Inc., 2000: 2684-2689.

[6] Xi N, Tarn T J. Stability analysis of non-time referenced Internet based telerobotic systems [J]. Robotics and Autonomous System (S0921-8890), 2000, 32(2): 173-178.

[7] 刘伟军, 朱枫, 董再励. 虚拟现实辅助机器人遥操作技术研究 [J]. 机器人, 2001, 23(5): 385-390.

[8] Won S Kim, Donald B Gennery, Eugene C Chalfant. Computer Vision Assisted Semi-Automatic Virtual Reality Calibration [C]// Proc. of the 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Albuquerque: IEEE, 1997: 1335-1340.

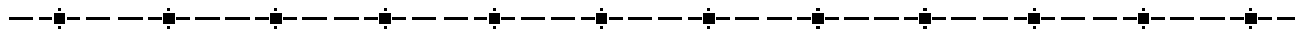
[9] Young J L, Jung A Y, Myung J C. Interactive virtual space calibration for teleoperation [C]// IEEE International Workshop on Robot and Human Communication. Sendai: IEEE, 1997: 472-476.

[10] 曾庆军, 宋爱国, 黄惟一. 时延下空间遥操作机器人系统工作模式研究 [J]. 宇航学报, 2003, 24(2): 180-184.

[11] Chen Junjie, Huang Weiyi, Song Aiguo, Xi Weiyang, Lin Chun. Design of Research Platform on Telerobot System Based on Virtual Reality Technology [J]. Journal of Southeast University (S1003-7985), 2004, 20(1): 80-84.

[12] Kuniaki K, Takeshi S. Mobile Robot Teleoperation System Utilizing a Virtual World [J]. Advanced Robotics (S0169-1864), 2001, 15(1): 1-16.

[13] Christoph W Borst, Richard A Volz. Telerobotic Ground Control of a Space Free-Flyer [C]// Proc. of the 1998 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Victoria: IEEE, 1998: 1183-1189.



(上接第 4459 页)

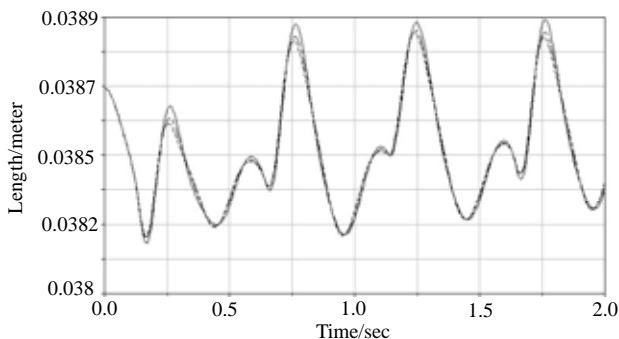


图 5 多管火箭三次随机发射仿真车体稳定性曲线

从图 4、图 5 可以看出,由于采用了随机发射仿真方法,三次仿真的曲线有明显的区别,如果仍采用传统的确定性仿真,三次仿真的曲线不会有任何区别,因此与传统的确定性仿真相比,随机仿真更为准确的反映了多管火箭发射时的随机特性。

5 结论

本文基于多管火箭发射随机动力学理论分析,通过在虚拟样机动力学仿真平台上二次开发,对多管火箭发射随机动力学仿真技术进行了研究。根据仿真与测试结果对比,证明采用随机仿真方法的虚拟样机模型,能够更准确的对武器系统动力特性和性能进行分析,表明该方法对随机系统动力学

具有一定的工程研究价值。

参考文献：

[1] 贺北斗, 林永明, 曹听荣. 火箭发射装置设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.

[2] 张胜三, 王心谦, 郭卫东, 王千. 某多管火箭发射车动力学仿真研究[C]//MDI2001年中国用户年会论文集, 2001.

[3] 徐振钦, 乐贵高, 马大为. 机液耦合多管火箭发射系统动态仿真 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18 (6): 1562-1566.

[4] 王放明. 随机动力学及其在兵器中的应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

[5] 董师颜, 张兆良. 固体火箭发动机原理 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.

[6] 张鸿涛, 余贞勇. 固体火箭发动机性能精度分析 [J]. 固体火箭技术, 1995, 18(1): 17-23.

[7] Coats D E. A Computer Program for the Prediction of Solid Propellant Rocket Motor Performance, AD-A015140 [R]. USA, 1975.

[8] 火箭推力偏心统计检验 [C]// 华东工程学院1977年科学报告会, 南京: 华东工程学院, 1977.

[9] 姚昌仁, 张波. 火箭导弹发射装置设计 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.

[10] 周省长, 鞠玉涛. 火箭弹设计理论 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.

[11] 洪嘉振. 计算多体系统动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.

[12] 某火箭炮动力学参数测试试验报告 [R]. 南京: 南京理工大学机械工程学院, 2005.

[13] 陈立平, 张云清, 任卫群. 机械系统动力学分析及 ADAMS 应用教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.