

防空导弹行进中发射动力学仿真分析*

赵克转,张高峰,尹兵

(贵州航天天马机电科技有限公司,贵州遵义 563003)

摘要:利用虚拟样机技术研究主动控制悬架发射车在行进中发射导弹时系统的动力学特性。在 Adams/View 中建立某防空导弹武器系统刚柔耦合动力学模型。借助于 Matlab/Simulink 建立主动悬架模糊自适应控制策略并构建系统联合仿真模型。分别在 C、D、E 路面上进行三种不同车速下的行进中发射动力学仿真,获得了车体振动、发射装置随机响应和导弹运动特性的动态数据。结果表明,该悬架可以有效减小初始扰动对发射过程的影响,有利于行进中发射的实施。

关键词:行进中发射;刚柔耦合;虚拟样机;模糊自适应控制;联合仿真

中图分类号:TJ761.13 **文献标志码:**A

The Dynamic Simulation Analysis on Marching Launch of Air Defense Missile

ZHAO Kezhuan, ZHANG Gaofeng, YIN Bing

(Guizhou Aerospace Tianma Equipment Manufacturing Co. Ltd, Guizhou Zunyi 563003, China)

Abstract: Based on virtual prototype technology, the system dynamics for missile launch of marching vehicle with active control suspension was studied. An air-defense missile weapon system's rigid-flexible coupling dynamic simulation model was built in Adams/View. By means of Matlab/Simulink, the fuzzy adaptive control strategy was created for active suspension. Meanwhile, the system's co-simulation model was constructed as well. Marching dynamic simulation under three different velocities was done on C, D and E level road separately. The dynamic data of launcher's random response and missile's motion characteristics was obtained. It shows that this suspension can effectively reduce initial disturbance's influence on launching process, so it is effective for marching launch.

Keywords: marching launch; rigid-flexible coupling; virtual prototype; fuzzy adaptive control; co-simulation

0 引言

某防空导弹武器系统拟省去调平过程,实现行进中发射作战模式。行进中发射是防空导弹发射车能在行驶途中遂行防空作战任务,从而实现防空系统的全境域动态作战。行进中发射时载车底盘保持高速行驶状态,来自路面不平度、导弹起竖和发射时产生的不平衡惯性力等分别通过轮胎、悬架和起竖架传到发射平台上^[1],系统受载情况十分复杂。为了满足系统在不同工况下行进中发射导弹的要求,需要采用新的悬架控制策略,优化悬架减振性能。同时,利用机械系统动力学分析软件 Adams 和控制系统仿真软件 Matlab/Simulink,可以将机械系统仿真分析和控制系统设计有机结合起来,实现机电一体化联合仿真。因此,有必要建立武器系统机电一体化联合仿真模型,进而对武器系统行进中发射动力学性能进行研究。

1 武器系统刚柔耦合动力学建模

武器系统在行进中发射时的运动和受载情况十分复杂,为了便于研究悬架的减振性能及系统的动力学特性,需要将整车做合理的简化,建立能确切模拟实际系统特性的仿真模型。经过简化,整个武器系统由上装部分、载车部分和路面组成。其中上装部分包括设备舱、指控舱、主回转台、左右起竖架、左右弹架、多联装发射筒、筒内导轨和导弹。载车部分包括轮胎、车桥、钢板弹簧(以下简称板簧)、大梁、副车架、车头。

1.1 部件建模

武器系统部分部件的建模在三维造型软件 Pro/e 中完成,板簧和路面的建模如下。

1) 板簧建模

板簧是悬架中力学性能比较复杂的构件,既是弹性元件,又是传递纵向、侧向地面力的传力元件,因

* 收稿日期:2011-06-04

作者简介:赵克转(1984-),男,河南邓州人,硕士研究生,研究方向:火箭导弹发射动力学与系统仿真。

此,建立板簧模型是构建车辆多体模型的一大难点^[2]。基于 Beam 梁理论,将每片板簧分成多个小块,每一小块均视为一个刚体,块与块之间用无质量的 Beam 柔性梁来连接,Beam 梁的刚度、阻尼矩阵由 Adams 软件根据板簧的截面形状及材质自动计算得出。各片板簧之间的接触力用 Adams 中提供的接触力来定义。按照上述思想并结合前后板簧参数在 Adams/Chassis 中建立板簧力学模型。为了研究方便,在满足板簧动力学性能的前提下将前后板簧均简化为 3 片,如图 1 所示。该模型可以在 Adams/View 环境中调用,通过改变板簧和外部构件间的衬套力参数,将其刚度调整到需要的程度。



图 1 板簧力学模型

2) 路面建模

对于行进中发射来说,随机路面激励是重要的外部激励,为了准确模拟这种激励对行进中发射武器系统的影响,有必要重构现实中复杂的三维路面环境。根据国际标准化组织在文件 ISO/TC108/SC2N67 中提出的“描述不平度表示方法草案”和国内长春汽车研究院起草制定的 GB/T7031 - 1986《车辆振动输入 - 路面不平度表示方法标准》,路面功率谱密度 $G_q(n)$ 的拟合表达式为:

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-W} \quad (1)$$

式中: n 为空间频率(m^{-1}); n_0 为参考空间频率,一般取 $0.1 m^{-1}$; $G_q(n_0)$ 为参考空间频率下的路面功率谱密度(m^3); W 为决定路面功率谱密度频率结构的频率指数,取为 2。

根据文献[3]中提出的谐波叠加原理,路面空间不平度可以表示为:

$$q(x, y) = \sum_{i=1}^m \sqrt{2G_q(n_{mid,i})\Delta n_i} \sin[2\pi n_{mid,i}x + \theta_i(x, y)] \quad (2)$$

式中: m 为空间频率划分份数; Δn_i 为划分后每个小区间的宽度; $G_q(n_{mid,i})$ 为每个小区间的中心频率 $n_{mid,i}$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 处的路面不平度功率谱值; x 为路面纵向长度; y 为路面横向宽度; $\theta_i(x, y)$ 为路面上任一点 (x, y) 在区间 $[0, 2\pi]$ 均匀分布的随机数。

由于防空导弹发射车的作战环境为野外不平路面,为了便于研究不同路况下的发射动力学特性,现

给出 C、D、E 三级路面的不平度统计数据,如表 1 所示。

表 1 GB7031 中 C、D、E 级路面不平度统计数据

路面等级	下限 s_F /	均方根 $s_{均}$ /	上限 s_U /
	mm	mm	mm
C	10.77	15.23	21.53
D	21.53	30.45	43.06
E	43.06	60.90	86.03

选取空间频率范围为 $0.011m^{-1} < n < 2.83m^{-1}$, 根据式(2)及表 1 中数据,在 Matlab 中编写路面不平度随机数生成程序,得到路面不平度数据样本,将产生的路面样本数据按 Adams 所支持的路面格式编写路面文件,即得到可用于仿真的 3D 等效容积路面。经验证,各级路面不平度均方根值与表 1 中数据相符,功率谱密度曲线也与理论曲线吻合,路面建模准确可用。

1.2 部件柔性化处理

根据武器系统停车状态下的试验结果,副车架、主回转台、起竖架、弹架、发射筒及导轨在受到突变冲击载荷下变形较大,另外载车底盘大梁、驱动桥、副车架等大承载部件在行军途中也存在变形。考虑到结构弹性变形对系统的动力学响应和导弹的运动特性有较大的影响,为提高仿真分析精度,需进行柔性化处理。利用与 Pro/e 软件的数据接口,在有限元分析软件 Ansys 中分别导入上述部件进行离散,生成各个部件的模态中性文件(MNF),通过 Adams/Flex 接口读入 MNF 文件,便可得到相关部件的柔性体模型。

1.3 虚拟样机模型装配

根据轮胎质量信息、几何信息以及模态试验数据,编写 F-tire 型轮胎文件,在 Adams/View 环境中导入轮胎文件和与之相关的路面文件,再加上其它刚体和柔体模型,并依据一定的尺寸关系,完成整车的模型装配。根据各部件之间的相对运动关系,添加必要的运动副,得到武器系统刚柔耦合动力学模型,如图 2 所示。

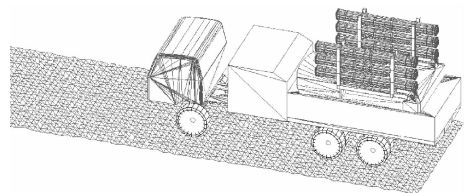


图 2 武器系统刚柔耦合动力学模型

1.4 激励载荷的添加

1) 发射车的运动。仿真假定导弹发射车为直线前行状态,其行驶靠添加在轮胎和车桥之间旋转副上的转动驱动 Motion 来实现, Motion 表达式为 step

(time,0,1,1,w),w 为轮胎转速,由发射车行驶速度算得。

2) 导弹发动机推力。根据导弹飞行试验测得的发动机推力时间历程数据,调用 Adams 中 AKISPL 函数,经过拟合得到发动机推力 - 时间曲线,并将该曲线作用在导弹尾部。

3) 闭锁力。在导弹和发射筒之间添加固定副来模拟闭锁器的闭锁力,同时建立测量固定副受力大小的传感器,编制仿真控制脚本,当传感器测量到固定副受力达到闭锁力大小时,仿真系统便自动解除传感器和固定副的作用,导弹开始出筒,仿真继续进行。

4) 发动机运转载荷。行驶时发动机的运转也使车体产生一定的振动^[4],考虑到发动机的转速及偏心,将发动机运转载荷简化为一个上下的周期力作用于车体上。

5) 燃气流的作用。燃气流对发射装置的冲击载荷很难通过试验准确获得,根据燃气流场仿真分析结果,结合试验中测得的发射装置受压数据进行修正,最后拟合为作用在发射筒质心上 3 个方向的力和

力矩。

2 联合仿真模型构建

2.1 模糊控制器设计

模糊自适应控制的最大优点就是它不依赖于精确的数学模型,因而对系统参数的变化不敏感,鲁棒性较好^[5]。模糊控制的核心部分是模糊控制器,它决定着模糊控制性能的好坏。为了使主动悬架实现实时最优控制,依据一定的模糊控制规则,设计出带有修正因子的模糊控制器。

2.2 联合仿真模型

为了使控制模块和动力学模块实现双向数据通信,特在 Adams/View 环境中设置输入和输出状态变量。其中输入变量为模拟悬架作动器的 Force 力,输出变量为车身垂向加速度、悬架动行程和轮胎动变形。结合已经设计好的模糊控制器,在 Simulink 中构建系统联合仿真模型。模型中设计了被动悬架和主动悬架切换开关。联合仿真模型如图 3 所示。

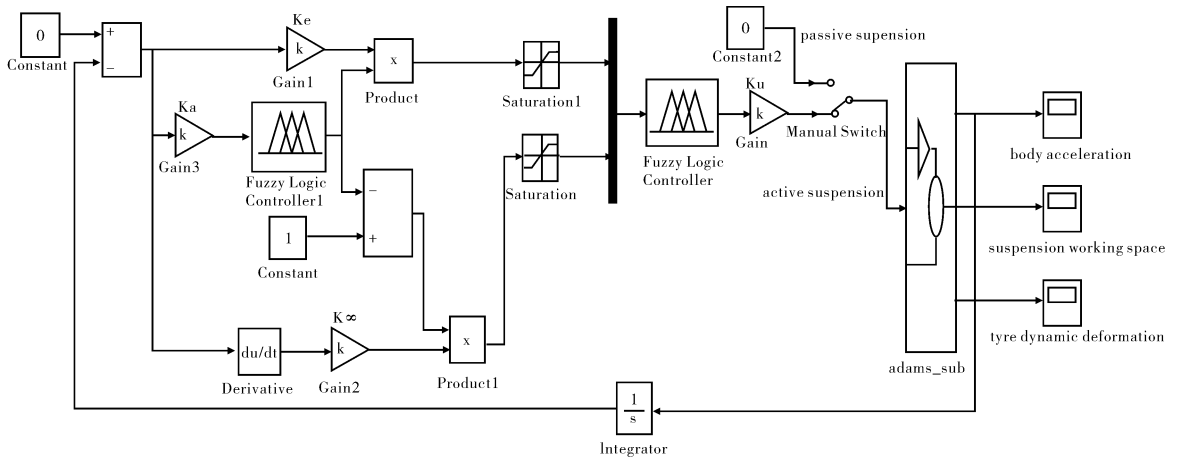


图 3 武器系统联合仿真模型

3 模型仿真与分析

3.1 模型验证

仿真开始前先定义武器系统仿真环境坐标系和弹上测点坐标系。在武器系统(图 2)仿真环境中,X 轴指向车尾,Y 轴垂直地面向上,Z 轴符合右手坐标法则。弹上测点坐标系为局部坐标系,固定于弹上测点,随弹而动,x 轴沿弹轴方向指向弹尾,y 轴方向垂直于弹轴向上,z 轴符合右手坐标法则。在 Matlab/Simulink 中设置好仿真时间、步长等参数,以被动悬架为例,选取车速为 30km/h,综合仿真和试验数据,得到如图 4 ~ 图 5 所示曲线。

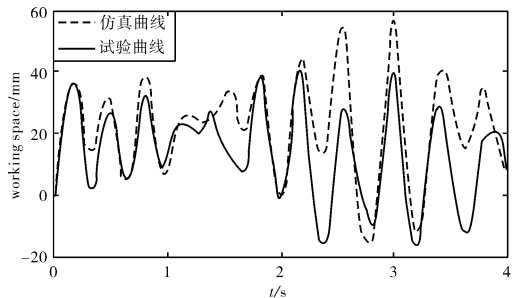


图 4 车体动行程对比曲线

图 4 描述的是车体 Y 向动行程的仿真和试验对比曲线,图 5 是导弹发射前 Y 向振动过载对比曲线。由图 4 ~ 图 5 中仿真和试验数据曲线可以看出,曲线呈现出一定的周期性波动,这反映了路面不平度激励

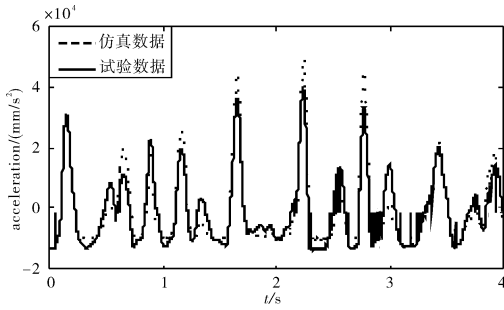


图 5 导弹过载对比曲线

的随机性。从第 2s 开始,不论是仿真数据和试验数据,车体动行程和导弹过载都开始快速增加,这是由此时主转台和左起落架的复合随动带来的不平衡惯性力造成的。从两图中还可以看出,仿真曲线比试验曲线的振动响应要大,这是由于模型简化后系统质量减轻造成的,但是两种曲线的变化趋势较为一致。对仿真和试验数据依次进行统计处理,车体动行程均方根分别为 37.9331 mm、36.7256 mm,导弹过载均方根分别为 1.81462 g、1.73258 g,数据偏差较小。从以上分析可以发现,所建联合仿真模型准确可用。

3.2 仿真结果分析

以不同路面 (C、D、E) 和不同车速 (20 km/h、25 km/h、30 km/h) 为变量,切换到主动悬架,进行 9 种不同工况下的行进中发射动力学仿真。前 2s,武器系统处于行驶状态;第 2s 开始,主回转台和左起竖架按给定的驱动执行瞄准动作,瞄准过程由两者之间的复合随动完成;第 4s 开始导弹解锁发射。仿真重点关注行驶过程中车体振动、发射过程中发射装置和导弹的动态响应情况。限于篇幅,现给出 D 级路面下部分仿真曲线,如图 6 ~ 图 9 所示。

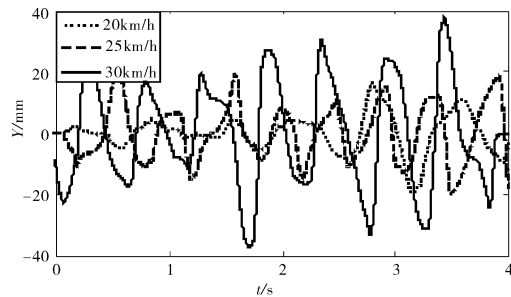


图 6 车体 Y 向振动曲线

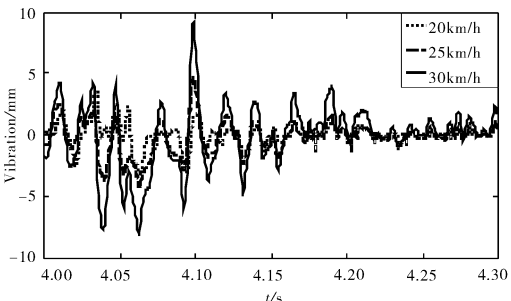


图 7 发射筒筒口径向振动曲线(垂直筒轴线)

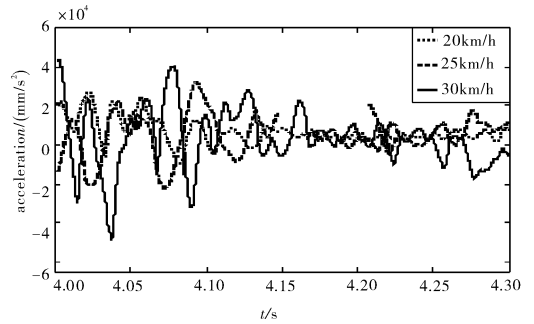


图 8 导弹沿测点 x 向过载曲线

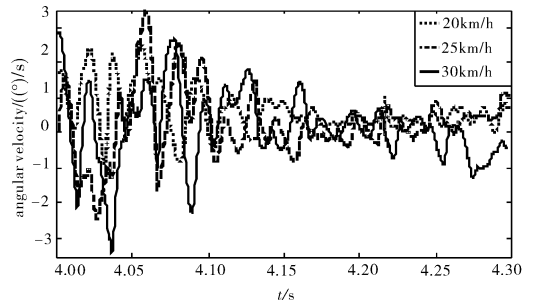


图 9 导弹绕测点 z 向滚转角速度曲线

图 6 描述的是行驶过程中车体 Y 向振动位移变化;图 7 描述的是导弹发射过程中发射筒筒口径向(垂直筒轴线)振动幅值变化;图 8 描述的是导弹发射过程中弹上测点沿 x 轴过载变化;图 9 描述的是导弹发射过程中弹上测点绕 z 向滚转角速度变化;从图 6 ~ 图 9 曲线可以看出,由于受路面不平度的随机性、导弹支脚和导轨无序碰撞以及非线性不平衡惯性载荷的影响,导致车体姿态、发射筒振动和导弹离筒姿态扰动的随机性,表现为各种曲线的随机性无规则周期振荡,振荡峰值都随车速增加而增加,峰值时间有稍许的错位,速度较低时曲线变化较为平缓,弹支脚和导轨的碰撞载荷也大为减少,导弹离筒姿态渐趋稳定。

为了消除仿真时各种因素带来的随机性,现对仿真结果进行统计处理,取各项测试数据的均方根值,对比发现,随着车速的增加,各项数据基本上呈线性增加态势。总体上来看,采用主动控制悬架后,导弹出筒姿态参数大为优化,满足行进中发射需要。

对 C、E 级路面的仿真结果表明,C 级路面的各项测试数据均优于 D 级路面,E 级路面的各项测试数据要差于 D 级路面,在较大车速下甚至出现车体及导弹剧烈振动的情况,主动悬架的控制作用被削弱,这种情况对发射导弹极为不利。可见,路况越好,越能大量发挥主动控制悬架的减振作用。

4 结论

运用 Adams 和 Matlab/Simulink 软件,建立系统

(下转第 45 页)

上增加了 BTT 的控制效果,实现了两种控制模式的有机组合。

如果侧向加速度反馈系数 $k = 0$, 则 $\gamma_c = 0$, 控制系统为典型的传统 STT 模式:

$$Z = C_z^\beta \beta \quad (17)$$

如果 $\beta = 0$ 时, 即向心力完全由弹体升力 L 在机动平面上的投影提供, 控制系统相当于 BTT 模式:

$$Z = L \sin \frac{\gamma}{57.3} \quad (18)$$

引入侧向加速度反馈后, 控制系统根据弹体侧向加速度的大小自动调整弹体倾斜角度, 此时, 必须对俯仰通道进行高度补偿, 避免飞行过程中出现掉高现象。高度补偿比较简单, 此处不再详述。

2 六自由度非线性仿真实验与分析

为了验证该驾驶仪设计方案的正确性, 考察在倾斜通道引入侧向加速度反馈以后的控制效果, 文中对某大展弦比滑翔弹进行了六自由度非线性仿真, 仿真过程考虑了实际飞行过程舵机动态特性、限幅等因素的影响。

针对某特定弹道的仿真结果如图 2 所示, 倾斜回路在不引入侧向过载反馈时, 飞行过程中最大侧滑角超过了 4° , 随着反馈系数 k 的增大, 侧滑角逐渐减小。当 k 增加到 2 时, 侧滑角已经小于 3° , 基本达到了 BTT 控制的效果。反馈系数过大时, 由于各通道之间的耦合效应进一步增强, 引起了严重振荡甚至发散。反馈系数 k 可根据飞行要求经多次仿真实验后确定。

由仿真结果看出, STT 驾驶仪倾斜回路引入侧向加速度反馈后, 可以有效降低大展弦比滑翔弹飞行过程的侧滑角。

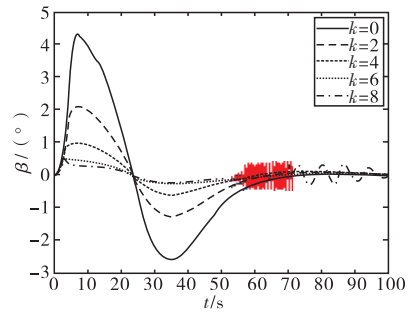


图 2 侧向过载反馈与侧滑角的关系

3 结束语

在某大展弦比滑翔增程弹 STT 驾驶仪倾斜通道引入了侧向加速度反馈, 解决了 STT 控制方式中侧滑角过大的问题, 最后通过六自由度非线性仿真实验验证了设计方案的可行性。该项工作为某远程滑翔增程弹的设计提供了技术支持, 也可为类似的其它飞行器设计工作提供参考。

参考文献:

- [1] 于秀萍. 基于动态逆系统的神经网络理论的 BTT 导弹控制系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004.
- [2] 郑建华, 杨涤. 鲁棒控制理论在倾斜转弯导弹中的应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [3] 张友安, 胡云安. 导弹控制和制导的非线性设计方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [4] 董翔宇, 任利, 刘云飞, 等. BTT 导弹变结构自适应控制仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2009, 26(11): 65-68.
- [5] 庞瑞, 史忠科. 导弹混合 BTT/STT 变结构控制器设计与仿真 [J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(1): 23-26.
- [6] 吕飞. 基于 BTT 控制的远程制导炸弹稳定回路设计 [J]. 航空兵器, 2007, 12(6): 13-23.
- [7] 钱杏芳, 林瑞雄, 赵亚男. 导弹飞行力学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.
- [8] 杨军. 导弹控制原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.

(上接第 42 页)

刚柔耦合联合仿真模型, 变换不同的路面等级和车速, 得到车体、发射装置和导弹的动态响应情况, 这为武器系统设计提供了有价值的参考。结论如下:

1) 不同工况下的发射动力学数据对比表明, 带有修正因子的模糊控制器设计合理有效, 将模糊自适应控制策略运用到主动悬架上后, 各项扰动数据大为减少, 满足行进中发射技术指标。

2) 不同路面和不同车速的仿真结果表明, 低车速和好路面更有利于导弹行进中发射。因此, 发射应在 D 级以上路面和 25km/h 以下车速情况下进行。

参考文献:

- [1] 赵波, 范子杰. 防空导弹行进间发射技术初探 [J]. 现代防御技术, 2005, 33(6): 22-26.
- [2] 王其东, 方锡邦, 卢建伟, 等. 汽车钢板弹簧多体动力学建模及动特性仿真研究 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 1999, 22(6): 35-39.
- [3] 徐延海. 随机路面谱的计算机模拟 [J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 33-36.
- [4] 毛保全, 张金忠, 杨志良, 等. 车载武器发射动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [5] 李士勇. 模糊控制与智能控制理论与应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990.