

Simulation of Flexible Arms of Truck-Mounted Concrete Pump Based on ADAMS

Yun Zhang¹, Hua Ye²

¹School of Automation, Southeast University, Nanjing

²Key Laboratory of Measurement and Control of Complex Systems of Engineering, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing

Email: zhangyun_1030@126.com, zhineng@seu.edu.cn

Received: Nov. 2nd, 2013; revised: Nov. 24th, 2013; accepted: Dec. 2nd, 2013

Copyright © 2013 Yun Zhang, Hua Ye. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Yun Zhang, Hua Ye. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: Creating a correct model of the arms of truck-mounted concrete pump plays a crucial role in studying on the control algorithm. In this paper, we establish a model with the same size of a real truck-mounted concrete pump in the software Pro/E and then export its arms into ANSYS for meshing. In ADAMS, we replace the rigid arms with those flexible ones to build a system of flexible arms of truck-mounted concrete pump truck. In addition, we write a simulation script file, combining with the use of sensors, to simulate the process in which the pump starts and brakes as it works in a real working condition. We set the flexible arms' modal damping ratio to make the model reflect the working condition of a real concrete pump correctly. So we can verify the correctness of the model we establish and carry out further researches about the control algorithm based on the flexible model.

Keywords: Flexible Arms of Truck-Mounted Concrete Pump; ADAMS; Starting and Braking; Simulation Script; Modal Damping Ratio

基于 ADAMS 的柔性混凝土泵车臂架仿真研究

张芸¹, 叶桦²

¹东南大学自动化学院, 南京

²复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 南京

Email: zhangyun_1030@126.com, zhineng@seu.edu.cn

收稿日期: 2013 年 11 月 2 日; 修回日期: 2013 年 11 月 24 日; 录用日期: 2013 年 12 月 2 日

摘要: 混凝土泵车臂架模型的正确创建对控制算法的研究有至关重要的作用。本文运用 Pro/E 建立与实物等比例大小的泵车模型, 并导入 ANSYS 中进行网格划分, 在 ADAMS 中替代刚性臂, 构建柔性的混凝土泵车臂架系统。在 ADAMS 中编写仿真脚本文件, 结合传感器的使用, 对泵车工作时常见的启动和制动过程进行了仿真。通过对柔性体模态阻尼比的设置, 使柔性泵车模型如实反映混凝土泵车的工作状态, 以此验证模型的正确性, 为进一步的控制算法研究奠定了基础。

关键词: 柔性混凝土泵车臂; ADAMS; 起制动控制; 脚本仿真; 模态阻尼比

1. 引言

混凝土泵车是集输送成品混凝土和浇筑工序于

一体的建筑机械, 随着国内基础建设的不断推进, 混凝土泵车得到愈加广泛的应用, 用户对其车工作性能

的要求也越来越高。为了准确平稳地确定泵车末端的浇灌位置,应采用适当的算法对泵车的运行状态进行控制。因此,建立正确的混凝土泵车臂架系统模型,如实反映其运行状态,对验证控制算法的有效性有至关重要的作用^[1]。

过去分析机械系统的动态特性时,往往将机械结构当作刚体来处理,从而简化模型。但是,实际的混凝土泵车工作时,臂架存在一定的形变,完全按照刚体简化模型与实际不符^[2]。目前对柔性模型的仿真研究中,都只是创建了模型的柔性文件,却没有进一步验证建立的柔性模型是否能准确反映物体的运动状态^[3]。

本文旨在通过对柔性混凝土泵车臂架起制动这一典型工况的仿真,确定建立柔性泵车臂架模型的必要性,并通过验证文中建立的泵车模型能如实反映实际泵车的工作状态,为后续的控制算法研究奠定基础。

2. 柔性臂架系统建模

本文的研究对象是某型号的混凝土泵车,该泵车臂架转台高度与五节臂架长度之和可达 46 米,其中转台高 3.5 米,大臂长 10 米,二臂长 8.3 米,三臂长 7.6 米,四臂长 8.3 米,五臂长 8.3 米^[4]。图 1 为该混凝土泵车的工作情景。

综合考虑常见几种三维建模软件的特点,本文选用参数化建模软件 Pro/E 创建混凝土泵车臂架模型^[5]。首先,根据实物的实际尺寸,建立泵车的底座、各节臂和连接杆等零件,然后选择合适的铰接方式,将各零件装配成整体的泵车模型(.asm)。

由于 ADAMS 的建模能力比较弱,对于导入 ADAMS 仿真环境中的模型,一般希望无需再调整其部件间的位置关系。

因此,可使用接口软件 mechpro,在 Poe/E 环境中添加好模型的所有约束,然后再导入到 ADAMS 中添加固定副,将泵车底座与大地固定在一起。

ADAMS 中的 Auto/Flex 模块对于较为复杂模型的柔化效果不好,所以选用 ANSYS 有限元分析软件对刚性臂架进行柔化^[6]。柔化过程需首先添加网格划分的单元,并定义材料的密度、弹性模量等属性。根据每节臂的几何结构特点,对机械臂模型进行实体分割,从而划分出规则的网格。在各铰接孔中心轴线上建立关键点,并对关键点用 mass21 单元进行网格划



Figure 1. Concrete pump's working situation
图 1. 混凝土泵车工作情景

分,从而生成相应的外部结点。由于 ADAMS 中力是分布在一个区域上,而不是只作用在一个点上,所以需要把外部节点和其相邻的节点固化,建立一个刚性区域。

利用 ADAMS 的宏命令导出网格划分后的模型,得到模态中性文件(.mnf),并导入到 ADAMS 中替换刚性臂架。

为了减少计算量,本文只对五节臂进行柔化,而底座、油缸和连杆仍为刚性。

在 ADAMS 环境中,观察各节柔性臂的模态振型,选择合适的模态,将对仿真研究没有帮助的模态去除,从而减小计算量^[7]。并对模型的正确性进行验证,确保无冗余约束。

至此,柔性的混凝土泵车系统模型得以建立,如图 2。

3. ADAMS 仿真及结果分析

对于泵车的突然起动、制动过程,我们有基于现实情况的认知:操作系统给出起动指令,油缸提供驱动力,机械臂在驱动力和重力共同作用下完成指定操作;操作系统给出制动指令,驱动力消失,臂架就会机械锁死,停止当前运动。由于泵车臂架为柔性体,所以在起制动过程中,臂架末端应出现一定程度的抖动现象。本文的研究即验证所建模型能正确反映这一现象,进而验证模型建立的正确性。

五节柔性臂泵车模型比较复杂,且在 ADAMS 中的计算量非常大,为了简洁直观地反映结果,本文采用两节柔性臂泵车模型进行动力学仿真,其模型如图 3

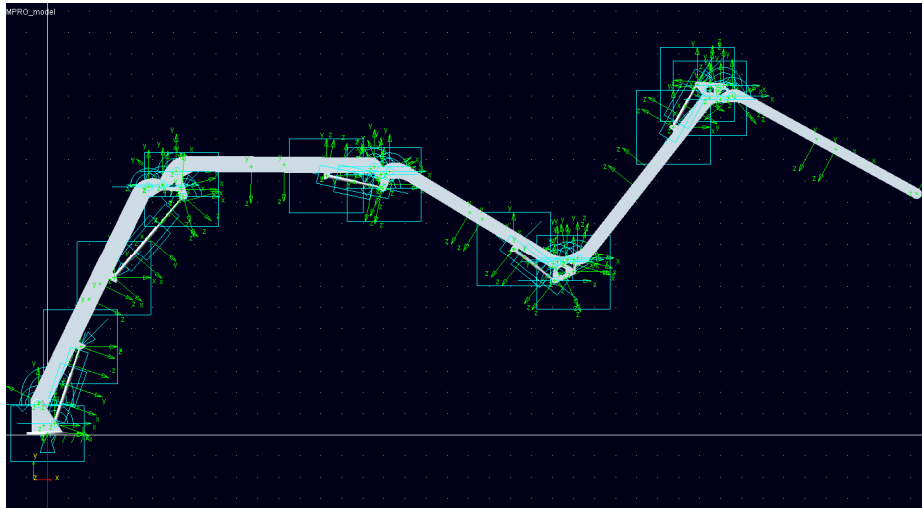


Figure 2. Model of truck-mounted concrete pump with five flexible arms
图 2. 五节臂柔性混凝土泵车臂架系统

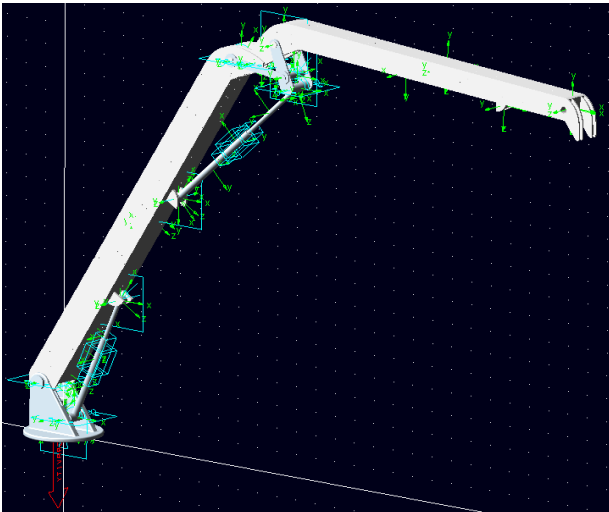


Figure 3. Concrete pump with two flexible arms
图 3. 两节臂柔性混凝土泵车臂架系统

所示。

文中用作用在相邻臂架铰接处的力矩来替代油缸提供的驱动力，在研究的泵车臂架起制动过程中，可给驱动力矩一个 STEP 函数实现的门信号，以正跳跃模拟起动力矩，以负跳跃模拟制动力矩。

STEP 函数设置为： $\text{STEP}(\text{time}, 0.2, 0, 0.21, 500,000,000) + \text{STEP}(\text{time}, 0.21, 0, 1.0, 0) + \text{STEP}(\text{time}, 1.0, 0, 1.01, -500,000,000)$ ，在 0.2~1.0 s 内力矩不为 0，在 0~0.2 s 和 1.0 s 以后力矩均为 0。

3.1. 实现机械锁死

ADAMS 中，可以将运动部件锁紧的方式有多种，

比如借助固定副，添加约束驱动，使用弹簧限位，或者建立一套锁紧机构等。但是固定副只能将相对运动的两个部件约束在仿真初始位置，无法在仿真过程中将机械臂固定在当前位置。添加旋转约束的驱动，可将机械臂的当前角位移作为驱动函数，可以使机械臂停在当前位置。使用弹簧，通过弹簧偏离平衡位置时产生的反作用力，可以将臂锁定在平衡位置^[8]。然而 ADAMS 中，弹簧的平衡位置是通过预载荷确定的，这个值在仿真过程中不会变化，无法实现将臂固定在当前位置。ADAMS 中常见的锁紧机构通常是一整套机械元件组成的，并且只能固定臂的平动，无法限定旋转运动，不适合文中的臂架系统。

综上所述，本系统使用添加旋转约束驱动的方法完成机械臂实时锁定的功能。在相邻两节柔性臂连接处的旋转副上添加约束驱动，类型为位移量，并建立对应的测量值。仿真计算时，根据测得的旋转角位移将机械臂停在相应位置。

3.2. 结合传感器的脚本控制^[9]

ADAMS 中的传感器能随时监控仿真过程中状态变量的值，当满足设定的条件时，能使仿真按照另一种方式继续进行，并返回所需的变量值。文中研究的两节臂泵车臂架中需定义两个传感器，实时监测力矩的大小。图 4 为监测大臂与底座之间驱动力的传感器。在两节臂系统中，需定义 4 个传感器以监测两个力矩的 4 种状态变化。

文中使用 ADAMS 中的脚本仿真方式实现混凝土

泵车臂架的起制动控制。对于两节混凝土泵车臂架，编写了如图 5 的脚本文件。

假设混凝土泵车臂架为刚性系统，运行仿真文件，在 ADAMS 后处理模块中可以查看仿真结果。图 6 为刚性泵车臂架系统两节臂的角度及末端轨迹变化曲线，图(a)中实线为大臂角度，虚线为二臂角度，图(b)中点线为大臂 x 坐标，点虚线为大臂 y 坐标，实线为二臂 x 坐标，虚线为二臂 y 坐标。

从图像可以看出：力矩为 0 时，两节臂都停在当前位置；力矩不为 0 时，两节臂在外力矩作用下运动；力矩再次为 0 时，两节臂均能立刻停在当前位置，与事实相符。

对于柔性混凝土泵车臂架，仿真的过程与上述刚性系统相同，图 7 为柔性泵车臂架系统两节臂的角度及末端轨迹变化曲线。图(a)中实线为大臂角度，点线为二臂角度，图(b)中点线为大臂 x 坐标，点虚线为大臂 y 坐标，实线为二臂 x 坐标，虚线为二臂 y 坐标。

从图中可以看出：在仿真开始时，力矩为 0，两节臂停在初始位置；力矩不为 0 后，两节臂在力矩的作用下运动，在 0.2 s 左右，机械臂因惯性出现向后甩动的现象，然后缓慢跟上运动；当力矩再次为 0 后，臂能在当前位置振荡，但是该振荡幅度不变，没有能量衰减，与实际情况不符。显然，按照这样的仿真设置，得到的结果是不正确的。

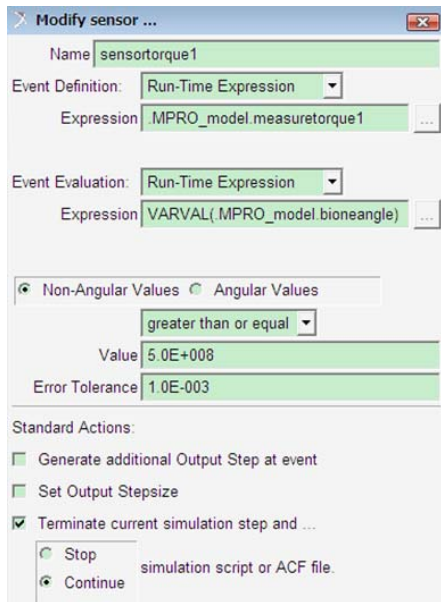


Figure 4. The sensor monitoring torque
图 4. 监测力矩的传感器

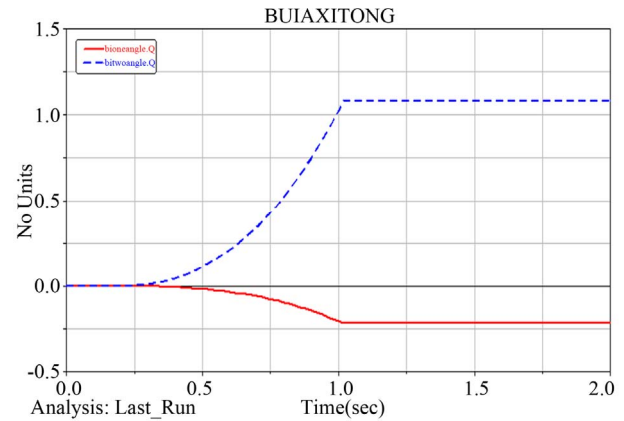
3.3. 柔性阻尼比的设置

可以理解，对于柔性体，当臂架制动时，臂会在惯性作用下发生摆动，若没有阻尼损耗，必然会在幅振荡下去。

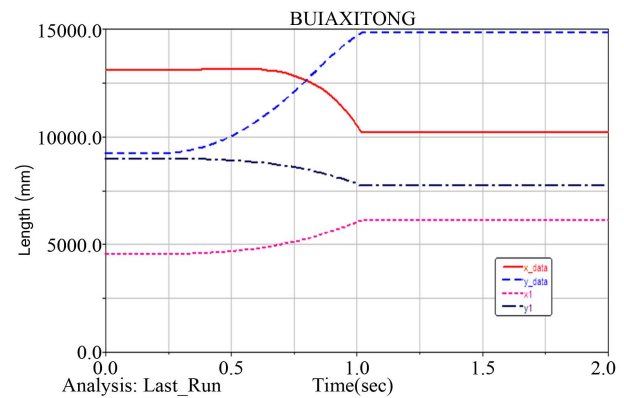
ADAMS 中对柔性体的编辑中有 Damping Ratio

```
! Insert ACF commands here:
DEACTIVATE/SENSOR, ID=3,4
MOTION/1, FUNCTION=0
MOTION/2, FUNCTION=0
SIMULATE/DYNAMIC, END=0.4, DTOUT=2.0E-002
DEACTIVATE/MOTION, ID=1,2
DEACTIVATE/SENSOR, ID=1,2
ACTIVATE/SENSOR, ID=3,4
SIMULATE/DYNAMIC, END=1.2, DTOUT=2.0E-002
ACTIVATE/MOTION, ID=1,2
MOTION/1, FUNCTION=SENVAL(3)
MOTION/2, FUNCTION=SENVAL(4)-SENVAL(3)
DEACTIVATE/SENSOR, ID=3,4
SIMULATE/DYNAMIC, END=8.0, DTOUT=2.0E-002
```

Figure 5. Script file controlling arms to start and brake
图 5. 实现臂架起制动控制的脚本文件

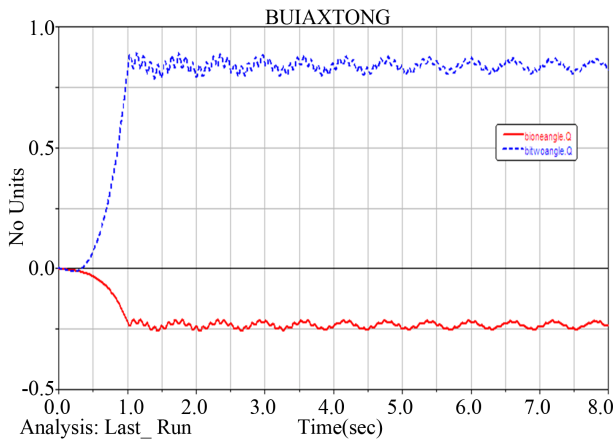


(a)

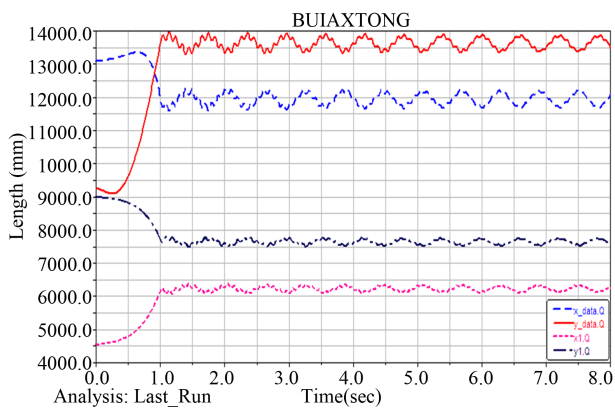


(b)

Figure 6. Curves of the angles of two rigid arms and the displacement of terminal: (a) Angle; (b) Displacement of terminal
图 6. 刚性泵车臂架系统两节臂的角度和末端轨迹曲线: (a) 角度; (b) 末端轨迹



(a)

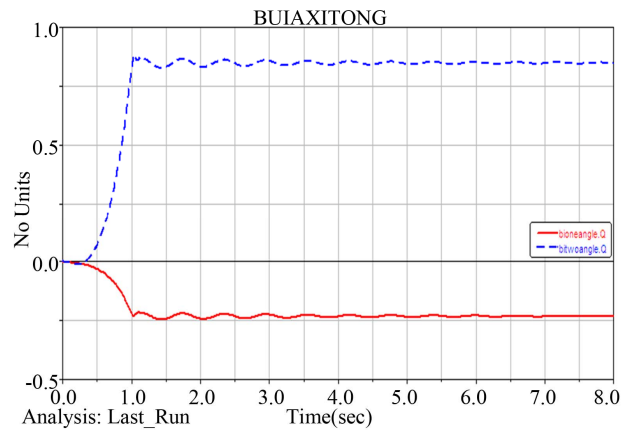


(b)

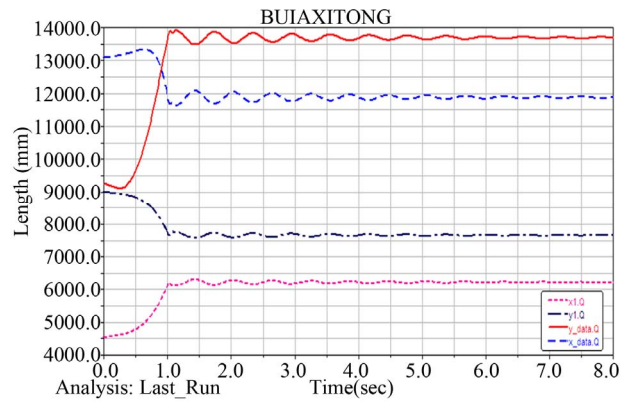
Figure 7. Curves of the angles of two flexible arms and the displacement of terminal: (a) Angle; (b) Displacement of terminal
图 7. 柔性泵车臂架系统两节臂的角度和末端轨迹曲线: (a) 角度; (b) 末端轨迹

一项，一般的仿真都选择默认的阻尼设置。然而，对于文中建立的泵车系统模型，默认的阻尼设置并不能很好地反映现实工况中混凝土泵车臂架各种阻尼对臂架运动的影响。

本文对柔性臂架的阻尼比进行了修改，结合两节臂参与仿真的模态频率特性，将两臂的阻尼比设置为 2，并得到如下的仿真结果。图 8 为阻尼比修改后，柔性臂架系统两节臂的角度和末端轨迹变化曲线(图例意义同上)。从图中可以看出，阻尼比修改后，在 1 s 时，力矩突变为 0，两节臂在发生振荡，但振荡幅度逐渐减少，最终稳定在当前的角度位置，且大臂振荡幅度比二臂幅度要小，这些与实际情况是相符的。值得注意的是，阻尼比越大，臂架越能迅速地稳定下来。实际研究时，可根据实际情况适当设置阻尼比。



(a)



(b)

Figure 8. Curves of the angles and the displacement of terminal after changing the modal damping ratio: (a) Angle; (b) Displacement of terminal
图 8. 修改阻尼比后，柔性两节臂的角度和末端轨迹曲线: (a) 角度; (b) 末端轨迹

4. 结论

本文使用参数化三维建模软件 Pro/E，根据混凝土泵车臂架的实际尺寸，创建臂架系统各零部件，并装配成整体的泵车臂架三维模型。使用有限元分析软件 ANSYS 对各节机械臂中进行网格划分，得到各节臂的模态中性文件，并成功导入 ADAMS 中，替代原模型中的刚性体，建立柔性的混凝土泵车臂架系统。观察臂架模态振型，选择合适的模态参与计算，并根据各模态的振动频率设置合适的模态阻尼比。随后，结合传感器的使用，编写脚本文件，实现泵车臂架起制动过程的控制。

在后处理模块中可以查看臂架系统的运行状态。从结果可以看出，建立泵车臂架的柔性系统对于泵车的仿真研究非常重要，不能将泵车系统简单简化为刚

性系统。同时,对各节臂架设置合适的阻尼比,可以很好地仿真泵车的实际工作状况,从而方便在此基础上进一步进行控制算法的研究。

参考文献 (References)

- [1] 任庆杰 (2011) 混凝土泵车智能臂架系统仿真的设计与实现. 硕士论文, 东南大学, 南京.
- [2] 冯波, 黄东胜, 文珍 (2012) 基于柔性多体动力学的混凝土泵车臂架仿真分析. *装备制造技术*, **1**, 16-18.
- [3] 伦智达, 方俊元, 贾子文 (2012) 基于 ADAMS 的刚柔耦合机器人动力学仿真. *仪器仪表与分析监测*, **12**, 20-22.
- [4] 于荣 (2013) 混凝土泵车臂架半实物仿真控制系统. 硕士论文, 东南大学, 南京.
- [5] 侯钧严等 (2008) *Pro/Engineer 中文野火版 3.0 基础精讲*. 西北工业大学出版社, 西安.
- [6] 胡红军等 (2008) *ANSYS 10.0 材料工程有限元分析实例教程*. 电子工业出版社, 北京.
- [7] 王斌华, 吕彭民 (2011) 五节臂混凝土泵车的有限元建模与模态分析. *广西大学学报*, **5**, 735-739.
- [8] 杨双龙, 战强, 马晓辉等 (2010) 基于 ADAMS 的锁紧臂机构的动力学仿真及参数化分析. *机械设计与制造*, **11**, 26-28.
- [9] 李增刚 (2006) *ADAMS 入门详解与实例*. 国防工业出版社, 北京.