

振动顺料机动态特性仿真研究及优化设计

张钊¹, 张继忠²

(1.河北工业大学, 天津 300132; 2.青岛大学, 青岛 266071)

摘要: **目的** 为保证振动顺料机在各种复杂工况下的工作可靠性, 通过对振动顺料过程的仿真研究, 优化其动态特性, 提高顺料效率。**方法** 从振动系统激振方式的角度出发, 对运动激励和力激励 2 种激振方式的动态可靠性进行分析和比较, 在此基础上以采用曲柄滑块机构的强制运动激励为激振方式的振动顺料机为研究对象, 利用 SolidWorks 软件建立振动顺料机的三维装配体模型, 并在 ADAMS 中进行相关仿真模型的建立及其参数试验与优化。**结果** 曲柄转速和曲柄长度对顺料效率具有明显影响, 通过仿真得到了振动顺料机曲柄滑块机构中曲柄转速和曲柄长度的一组最优参数值分别为 376 r/min 和 12.85 mm。**结论** 通过对曲柄转速和曲柄长度参数的仿真试验及其优化设计, 提高了振动顺料机的顺料效率。

关键词: 振动机械; 动态特性; 仿真研究; 优化设计; ADAMS

中图分类号: TB486; TH113.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)23-0162-05

Simulation Research and Optimal Design of Dynamic Characteristics of Vibration Feeder

ZHANG Zhao¹, ZHANG Ji-zhong²

(1. Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China; 2. Qingdao University, Qingdao 266071, China)

ABSTRACT: The work aims to optimize the dynamic characteristics and improve the feeding efficiency by conducting the simulation research on the vibration feeding process, for the purpose of ensuring the working reliability of vibration feeder under various complicated working conditions. Starting from the excitation mode of the vibration system, the dynamic reliability of two excitation modes (motion excitation and force excitation) was analyzed and compared. On the basis of that, the vibration feeder based on the forced motion excitation of the crank slider mechanism was the object of the research. A three-dimensional assembly model of vibration feeder was established with SolidWorks, and the establishment of the relevant simulation model and its parameter test and optimization were completed in ADAMS. The crank speed and crank length had obvious influence on feeding efficiency. By means of simulation, a set of optimal parameter values of crank speed (376 r/min) and crank length (12.85 mm) in the crank slider mechanism of vibration feeder were obtained. The simulation test and its optimal design of the crank speed and crank length have improved the feeding efficiency of vibration feeder.

KEY WORDS: vibration equipment; dynamic characteristics; simulation research; optimal design; ADAMS

近年来振动机械得到迅猛发展, 在物料的包装和输送、筛分和烘干、破碎和清洗、成型和紧实等方面得到了广泛应用。一方面利用振动可有效完成许多工艺过程, 在提高机器的工作效率等方面发挥越来越重要的作用^[1]。另一方面机械运转中不良甚至有害的振动也需得到有效避免或控制, 否则对机器的工作精

度、运行可靠性和寿命将造成严重影响, 特别是由此产生的实际工况下机械的动态可靠性问题, 引起了国内外众多学者的重视并对此进行了广泛、深入的研究^[2-5]。

文中参考和借鉴文献^[6-7]中对机械运动或振动状况下动态可靠性的研究成果, 从振动系统激振方式的角度出发, 对运动激励和力激励 2 种激振方式的可靠

收稿日期: 2017-06-02

作者简介: 张钊 (1991—), 男, 河北工业大学硕士生, 主攻机械系统动力学。

通讯作者: 张继忠 (1964—), 男, 硕士, 青岛大学教授, 主要研究方向为机械系统数字化设计及机械系统动力学。

性进行分析和比较,以曲柄滑块机构驱动下的顺料机械为研究对象,基于 ADAMS 动力学仿真,对其往复振动下的顺料过程进行了仿真模拟,并以提高顺料效率为目标进行了相关参数的仿真试验及其优化设计。

1 振动系统激振方式可靠性分析

振动系统激振方式的不同会对相应计算模型的边界条件以及系统固有频率等动力学性能产生影响。一般可将振动系统分为有、无约束 2 类,分别对应于运动激励、力激励 2 种激振方式。有约束振动系统中至少一个弹簧与固定点相连,即模型柔性连结或结构的一端自由度为 0,因而此时不出现刚体平移(或转动)所对应的低阶振型。另一种有约束振动系统模型是与已知运动规律的转动质量(或平动质量)相连,即该系统在给定的转角激励(或位移激励)下产生强迫振动。

相比于运动激励所对应的有约束振动系统,力激励则通常与无约束(自由)振动系统相对应。一般由激振器、工作机体及弹性元件 3 个部分组成的振动机械^[8],其激振方式大多属于力激励的范畴,如惯性式、电磁式、液压式等。这种激振方式虽有结构简单、成本低、安装方便以及容易满足轻量化设计要求等优点,但也易受环境、负载条件干扰,存在振幅不够稳定、受参数激励等非线性因素影响较大、调整复杂、零部件工作寿命短等缺陷。另外由于力激励所对应的无约束振动系统第一阶固有频率理论值为 0,一般情况下各阶固有频率偏低,从而更易在低频激励下引发机体共振,降低了该类振动机械的动态可靠性。

比较而言,以凸轮式激振器为代表的运动激励方式,通过给定的运动规律,使驱动产生了相当于附加约束的作用。这种“约束”使系统边界条件发生变化,对应的有约束振动系统固有频率一般高于自由振动系统。因而该类振动机械在低频激励下受共振影响较小,机器抗干扰能力强而振幅更稳定,运转更可靠且耐用。

文中所要讨论的顺料机械其预期功能是顺料箱沿导柱做往复振动以便将散乱状态的物料顺齐,在曲柄滑块机构的强制运动激励作用下,振动顺料机可以方便可靠地实现上述预期功能。为了进一步提高以曲柄滑块机构的强制运动激励为激振方式的振动顺料机的顺料效率,同时改变关键设计参数通常依据经验确定的传统顺料机械设计方法,文中以制针行业广泛使用的振动顺料机为研究对象,基于 ADAMS 动力学仿真分析^[9-12],模拟其顺针过程。通过高效率分析和比较多种参数选择方案,直至获得最优的工作性能,从而大大减少物理样机的制造费用和试验次数,提高产品性能及质量。

2 振动顺料机工作原理及三维装配体模型

手缝针作为一种应用非常广泛的产品,虽然品种规格繁多,但生产工艺基本相同。在完成热处理、光饰、电镀等基本生产工序后,手缝针呈散乱状态,为便于包装运输,需要用振动顺料机将散乱状态的手缝针顺齐。作为一种在曲柄滑块机构强制运动激励下,顺料箱往复振动以实现顺针功能的顺料机械,振动顺料机主体部分主要由机架、导柱、顺料箱、曲柄滑块机构、从动带轮等部分组成。采用 SolidWorks 软件建立的振动顺料机三维装配体模型见图 1,顺料箱结构见图 2。

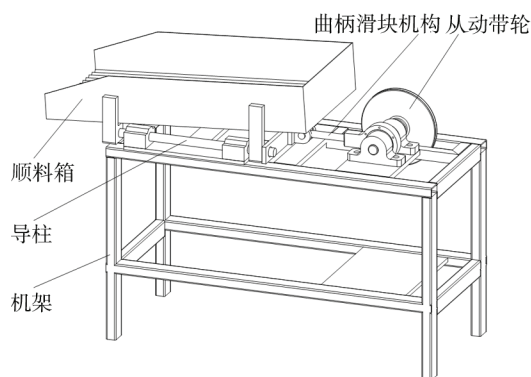


图 1 振动顺料机结构

Fig. 1 Structure of vibration feeder

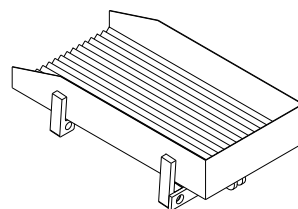


图 2 顺料箱结构

Fig. 2 Structure of feed box

电动机经 V 带传动减速驱动从动带轮转动,并带动由曲柄、连杆、顺料箱、机架组成的曲柄滑块机构,曲柄转动时连杆做平面运动并带动顺料箱沿导柱做往复移动。为了提高顺针效率,顺料箱底部安装有瓦楞状底板,且顺料箱底面与两侧导柱轴线所在平面有一个倾角。振动顺料机利用顺料箱做往复移动产生的惯性冲击,实现快速顺针功能。

3 振动顺料机动力学仿真研究

3.1 建立动力学仿真模型

将 SolidWorks 中建立的振动顺料机三维装配体模型导入到 ADAMS 虚拟样机仿真软件中^[13-15],建立振动顺料机虚拟仿真模型,见图 3。修改材料属性后,在部件之间添加合理约束和驱动,其中在曲柄、

连杆、顺料箱之间使用回转副,顺料箱和固定于工作台的导柱之间使用移动副进行约束,以模拟曲柄滑块机构的运动状态。

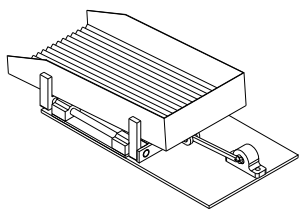


图3 振动顺料机仿真模型
Fig.3 Simulation model of vibration feeder

在顺料箱底板的正上方,沿顺时针方向距出料口约 640 mm 的位置上建立直径为 0.8 mm,长度为 38 mm 的手缝针简化模型见图 4,并运用时间函数 IMPACT 定义其下落后与底板的接触状况。设定针体初始位置的轴线方向与底板顺时针槽方向相垂直以模拟最不利的顺时针条件。在重力的作用下,针会自由下落,接触瓦楞状底板后,在往复惯性力和摩擦力作用下,手缝针发生转向并沿瓦楞状底板上的顺时针槽下滑出顺料箱。

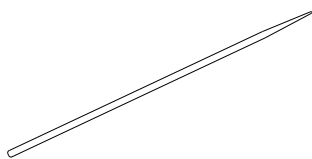


图4 手缝针简化模型
Fig.4 Simplified model of hand needle

为了比较顺料箱在静止和振动条件下顺时针效果的不同,首先对顺时针过程中变化着的针体质心和出料口之间水平距离进行测量,记为 MEA_dis_x。该测量值是相对于出料口一个固定于地面的标记点而建立的,其值越小,说明针离出料口越近。

按照振动顺料机工作的实际要求,初步设置曲柄长度为 10 mm,曲柄转速为 6 r/s。比较顺料箱有无往复振动对测量值 MEA_dis_x 的影响,分别用虚线、实线表示。仿真结果见图 5。由图 5 可明显看出,顺料箱在振动条件下(用虚线表示),手缝针经 1.5 s 的顺时针过程更接近出料口,说明振动确可使顺时针效率明显提高。

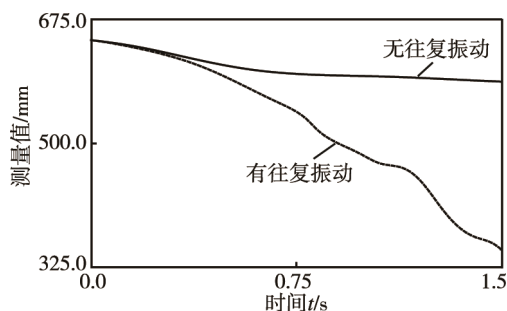


图5 测量值 MEA_dis_x 随时间的变化
Fig.5 Change of measurement value MEA_dis_x with time

3.2 基于不同参数的仿真设计研究

在顺料箱无振动的情况下,针体自初始位置自由下滑,经 1.5 s 距出料口仍有 591.5 mm 的水平距离,见图 5。以该针体位置作为参考,仿真研究振动顺料机在振动条件下不同设计参数时,针体相对于参考位置在顺时针方向的水平位移,并以振动顺时针 1.5 s 时该位移的大小 MEA_1 作为目标函数值。由于在振动条件下手缝针在顺时针槽中移动速度要明显快于顺料箱静止时手缝针在顺时针槽中的移动速度,因此,目标值 MEA_1 为正值。

首先以曲柄驱动转速为设计变量,研究曲柄长度一定时(如取曲柄长度为 10 mm),曲柄转速变化对顺时针效率的影响(仿真结果见图 6)。然后再以曲柄长度为设计变量,研究驱动转速一定时(如取曲柄转速为 6 r/s),曲柄长度变化对顺时针效率的影响,仿真结果见图 7。

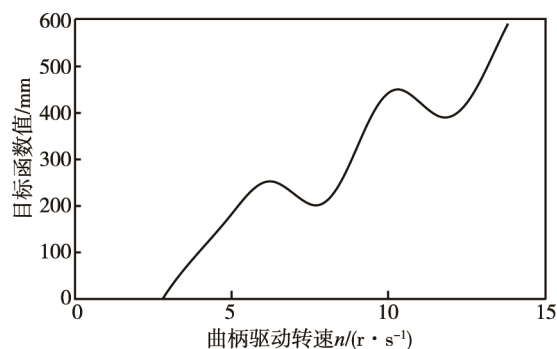


图6 驱动转速对目标函数值的影响
Fig.6 Influence of drive speed on objective function value

针体沿一定倾角的顺时针槽向出料口移动的顺时针过程可近似看作是沿顺时针槽方向初速度为 0 的匀加速运动。图 6 和图 7 中纵坐标均为仿真时间截止 1.5 s 时对应的目标函数值,该目标值越大,针体相对于参考位置在顺时针方向的水平位移越大,说明针体 1.5 s 时向出料口移动的速度越快,也就意味着针体可以更快地到达出料口完成顺时针动作,在一定意义上表明顺料箱在往复振动的工况下顺时针效率越高。

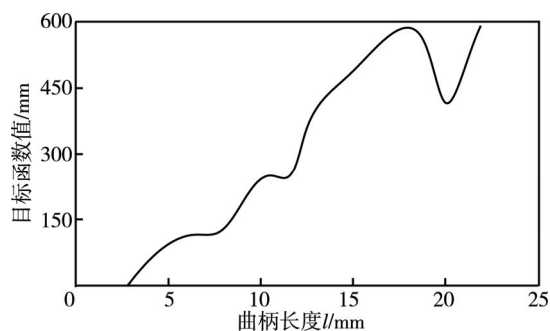


图7 曲柄长度对目标函数值的影响
Fig.7 Influence of crank length on objective function value

由图 6—7 可以看到曲柄驱动转速和曲柄长度的改变对目标函数 MEA_1 影响明显,数值在局部范围出现波动。虽然大范围来看转速和曲柄长度的增大总体上都有利于顺针效率的提高,但从振动顺料机的实际使用情况看,过高的转速非但不能有效提高顺针效率,反而会因顺料箱的加速度明显增大(见图 8),导致往复惯性力也会明显增加,从而在振动顺料机实际运转中出现工作噪声和能耗过大等问题,因此需在合理取值范围内寻找局部最优值。

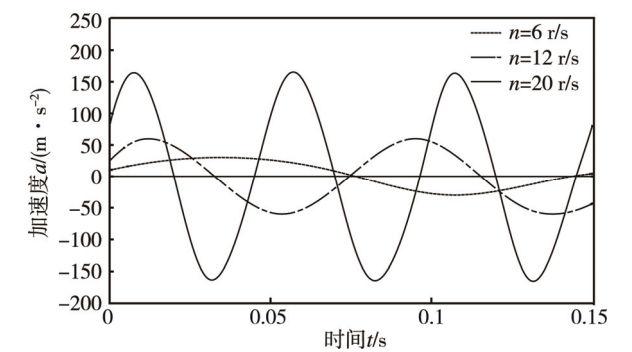


图 8 不同驱动转速下顺料箱水平加速度变化
Fig.8 Horizontal acceleration change of feed box at different driving speeds

3.3 主要参数的试验设计及优化

以上的仿真研究每次仅一个设计变量产生变化,而试验设计是将多个设计变量的取值组成组,研究在设计变量取不同可能的组合时目标函数的取值情况。为了研究主要参数在一定取值范围内对目标函数 MEA_1 的影响,取曲柄长度变化范围为 6~15 mm,曲柄驱动转速变化范围为 3~8 r/s,通过 ADAMS 仿真得到试验设计结果见表 1。取目标函数值最大的一组试验,以对应的曲柄长度为 12.75 mm,曲柄驱动转速为 5.5 r/s 作为较理想的初值。为考查这组初值在小范围变化中(其中驱动速度上、下分别浮动 10%和 25%,曲柄长度上、下浮动 5%)对目标函数的影响程度,再次进行仿真试验设计,试验结果见表 2。

由于表 2 中目标函数值在各次试验中无剧烈变化,说明由表 1 所选的初值即使小幅变化,仍可一直保持较高的顺针效率。参考表 2 中 MEA_1 数值最大的第 16 次试验,并以曲柄驱动转速 6.4 r/s,曲柄长度 13.1 mm(两参数都上下浮动 5%)为进一步优化设计的初值,得到仿真优化结果见表 3。

经优化后的最终结果:驱动转速为 6.27 r/s(约 376 r/min),曲柄长度为 12.85 mm。需要说明的是,在实际生产过程中可根据生产需要设计制造不同规格大小的振动顺料机,振动顺料机整体尺寸不同,曲柄长度的合理取值区间也不同,应分别寻找最优参数值。

表 1 主要参数对目标影响试验结果 1
Tab.1 Test result 1 for the effect of main parameters on target

试验次数	目标函数值/mm	曲柄长度/mm	曲柄转速/(r·s ⁻¹)
1	6.81	6.00	3.00
2	44.41	6.00	4.25
3	62.06	6.00	5.50
4	51.88	6.00	6.75
5	97.90	6.00	8.00
6	6.88	8.25	3.00
7	74.89	8.25	4.25
8	163.82	8.25	5.50
9	165.60	8.25	6.75
10	80.88	8.25	8.00
11	9.56	10.50	3.00
12	95.58	10.50	4.25
13	213.84	10.50	6.75
14	279.21	10.50	8.00
15	18.591	12.75	3.00
16	173.71	12.75	4.25
17	338.82	12.75	5.50
18	307.42	12.75	6.75
19	272.21	12.75	8.00
20	50.41	15.00	3.00
21	299.52	15.00	4.25
22	179.08	15.00	5.50
23	337.75	15.00	6.75
24	256.36	15.00	8.00

表 2 主要参数对目标影响试验结果 2
Tab.2 Test result 2 for the effect of main parameters on target

试验次数	目标函数值/mm	曲柄长度/mm	曲柄转速/(r·s ⁻¹)
1	219.62	12.11	4.95
2	316.68	12.11	5.91
3	272.22	12.11	6.39
4	264.27	12.11	6.88
5	172.00	12.43	4.95
6	320.81	12.43	5.43
7	230.91	12.43	6.39
8	321.07	12.43	6.88
9	194.85	12.75	4.95
10	156.02	12.75	5.43
11	350.43	12.75	5.91
12	238.26	12.75	6.39
13	284.59	12.75	6.88
14	254.70	13.07	5.43
15	363.64	13.07	5.91
16	384.46	13.07	6.39
17	287.53	13.07	6.88
18	203.36	13.39	4.95
19	320.82	13.39	5.43
20	311.22	13.39	6.39
21	323.28	13.39	6.88

表 3 优化设计结果
Table 3 Optimal design results

优化次数	目标函数值/mm	曲柄长度/mm	曲柄转速/ ($\text{r}\cdot\text{s}^{-1}$)
0	346.46	13.10	6.40
1	358.49	12.87	6.29
2	378.66	12.86	6.28
3	378.66	12.86	6.28
4	482.35	12.85	6.27

4 结语

以曲柄滑块机构驱动下的振动顺料机为研究对象,建立了基于 ADAMS 的动力学仿真模型,研究了单一设计参数在大范围取值时,曲柄转速、曲柄长度对目标函数的影响。采用仿真试验研究的方法,研究了在参数取不同可能的组合时对目标函数的综合影响,最终得到了多次试验结果的理想值,以此为初值完成了进一步的参数优化设计,得到了振动顺料机曲柄滑块机构中曲柄转速和曲柄长度的一组最优参数值。文中的研究方法和研究结果不仅为设计不同规格大小的振动顺料机奠定了重要基础,也为其他振动机械的研发提供了参考。

参考文献:

- [1] 闻邦椿, 刘树英, 张纯宇. 机械振动学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
WEN Bang-chun, LIU Shu-ying, ZHANG Chun-yu. Theory of Mechanical Vibration[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.
- [2] 张义民. 机械可靠性设计的内涵与递进[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 167—188.
ZHANG Yi-min. Connotation and Development of Mechanical Reliability-based Design[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 167—188.
- [3] VALDEBENITO M A, SCHUELLER G I. A Survey on Approaches for Reliability-based Optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2010, 42(5): 645—663.
- [4] SAVAGE G J, KAPSON Y. The Set-theory Method for Systems Reliability of Structures with Degrading Components[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96(1): 108—116.
- [5] NAESS A, LEIRA B J, BATSEVYCH O. Reliability Analysis of Large Structural Systems[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2012, 28(3): 164—168.
- [6] 张义民. 机械动态与渐变可靠性理论与技术评述[J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 101—114.
ZHANG Yi-min. Review of Theory and Technology of Mechanical Reliability for Dynamic and Gradual Systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 101—114.
- [7] 谢里阳. 机械可靠性理论、方法及模型中若干问题评述[J]. 机械工程学报, 2014, 50(14): 27—35.
XIE Li-yang. Issues and Commentary on Mechanical Reliability Theories, Methods and Models[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(14): 27—35.
- [8] 闻邦椿, 刘树英, 何勃. 振动机械的理论及动态设计方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
WEN Bang-chun, LIU Shu-ying, HE Qing. Theory and Dynamic Design Method of Vibration Machinery[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2001.
- [9] 席晓燕. 考虑铰链间隙和连杆柔性推料机构运动学分析[J]. 包装工程, 2017, 38(5): 136—140.
XI Xiao-yan. Kinematics of Pusher Considering Hinge Gap and Linkage Flexibility[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(5): 136—140.
- [10] 陈璜. 基于 ADAMS 的叉车稳定性分析[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(4): 108—111.
CHEN Huang. Stability Analysis of Forklifts Based on ADAMS[J]. Machine Building & Automation, 2015, 44(4): 108—111.
- [11] 李宇庭, 胡万里, 谢伟华, 等. 椭圆齿轮-槽轮组合机构的虚拟样机设计及仿真分析[J]. 包装工程, 2014, 35(17): 79—85.
LI Yu-ting, HU Wan-li, XIE Wei-hua, et al. The Design and Simulation Analysis for the Virtual Prototype of Elliptic Gear-geneva Combined Mechanism[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(17): 79—85.
- [12] 刘海涛, 高跃飞, 柯彪, 等. 一种新型链传动推弹机推弹全行程仿真分析[J]. 机械设计, 2015, 32(8): 83—87.
LIU Hai-tao, GAO Yue-fei, KE Biao, et al. Simulation and Analysis of the Ramming Process of a New Chain Drive Rammer Device[J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(8): 83—87.
- [13] 田野, 孙智慧, 郑赛男, 等. 包装机中推料机构分析及优化[J]. 包装工程, 2013, 34(21): 66—70.
TIAN Ye, SUN Zhi-hui, ZHENG Sai-nan, et al. Analysis and Optimization of Feeding Mechanism of Packaging Machine[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(21): 66—70.
- [14] 吴帅, 薄延伟. 基于 Adams 的惯性式振动沉拔桩机的运动仿真分析[J]. 制造业自动化, 2012, 34(10): 1—8.
WU Shuai, BO Yan-wei. The Movement Simulation of Vibratory-pile-driver-and-extractor[J]. Manufacturing Automation, 2012, 34(10): 1—8.
- [15] 蒋小利, 江志刚, 张华, 等. 基于 ADAMS 的液压挖掘机工作装置动力学仿真分析[J]. 现代制造工程, 2014(11): 74—77.
JIANG Xiao-li, JIANG Zhi-gang, ZHANG Hua, et al. Dynamics Simulation Analysis of Hydraulic Excavator's Working Equipment Based on ADAMS[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2014(11): 74—77.