

在弹射加速度作用下人体动态响应的数学模型辨识

马 润 津 汪 芳 子

(北京冶金机电学院) (航天医学工程研究所)

摘 要

本文介绍如何利用系统辨识方法,建立在弹射加速度作用下人体响应的数学模型,并对递推最小二乘法 (RLS), 递推增广最小二乘法 (RELS), 递推辅助变量法 (RIV) 三种辨识方法进行了比较.

辨识的模型用于数字仿真取得了较好的效果.

当飞机飞行速度大于 400 公里/小时应急救生时,气流压力使飞行员不能自行脱离飞机跳伞,需要靠弹射座椅的帮助. 在弹射时人体受到较大的加速度冲击^[1,2]. 由于人体本身具有弹性,在弹射冲击时会出现人体局部的瞬时加速度超过座椅的加速度的加速度“超调”现象(图 1),所以人体受的力可能超过座椅的作用力. 国内外大量统计资料表明,弹射座椅装置确实挽救了不少飞行人员的生命,但受伤的比例较大. 为了对新设计的救生设备提供依据,以及对各种有关设备和部件做出适当的评价,需要掌握在不同弹射规律下人体有关部位(特别是容易受伤的脊椎附近)的瞬时加速度.

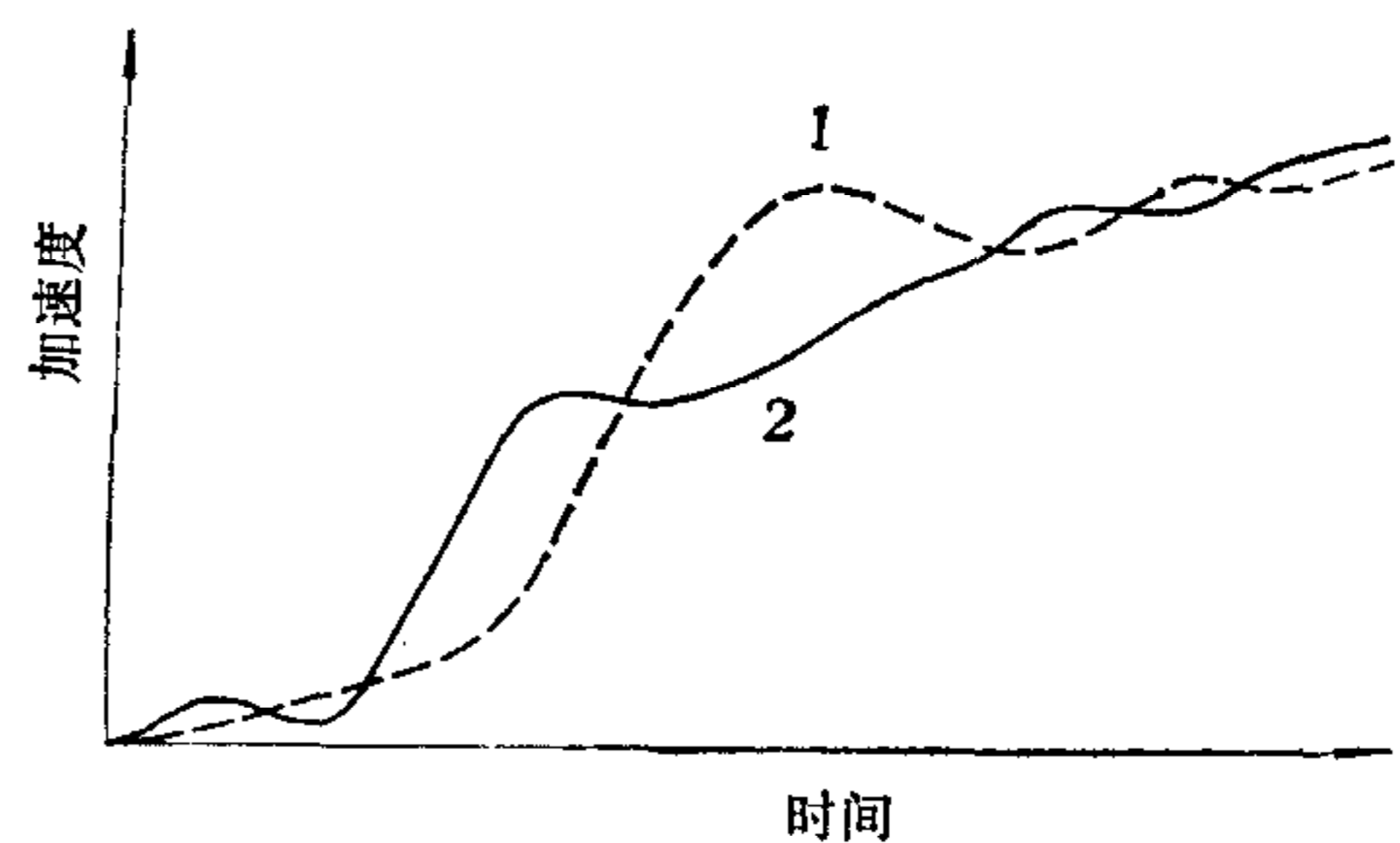


图 1 弹射时人体产生加速度超调现象示意图

- 1 为人体体表测得的加速度过程曲线
- 2 为座椅上测得的加速度过程曲线

通过弹射试验,可以在人体有关部位用加速度传感器直接测量加速度响应. 为减少试验次数,可用数字仿真方法协助解决上述问题,为此需要建立和研究用于仿真的弹射加速度作用下人体动态响应的数学模型.

为了取得建立数学模型所需的数据,利用飞行员训练用弹射塔进行了一些人体弹射试验. 该设备能产生大约 8g 的加速度,当被试者保持正确姿态时能确保人员安全. 在弹射过程中,利用应变片式加速度传感器同时记录座椅及人体三个部位的加速度曲线. 以座椅加速度值为输入量,人体测试值为输出量,用系统辨识方法建立动态响应数学模型.

$u(k)$, $y_1(k)$, $y_2(k)$ 和 $y_3(k)$ 分别表示座椅加速度(输入)和人体三个不同部位的加速度(输出量)的采样值,建立三个单输入-单输出的随机离散线性模型,采样间隔为 2ms(图 2).

分别运用递推最小二乘法(RLS)、递推增广最小二乘法(RELS)和递推辅助变量法(RIV)三种辨识算法¹⁾,得出模型参数估计值 $\hat{\theta}$,在此基础上由实测输入量 $\{u(k)\}$ 算出模型仿真的计算输出量 $\{\hat{y}(k)\}$.

$$\hat{y}(k) = \hat{x}^T(k)\hat{\theta}. \quad (1)$$

对于 RLS 和 RIV 法,上式中的 $\hat{x}^T(k)$ 和 $\hat{\theta}$ 分别为

$$\hat{x}^T(k) = [\hat{y}(k-1), \dots, \hat{y}(k-n), u(k-1), \dots, u(k-n)], \quad (2)$$

$$\hat{\theta} = [a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n]^T. \quad (3)$$

对于 RELS 法,

$$\hat{x}^T(k) = [\hat{y}(k-1), \dots, \hat{y}(k-n), u(k-1), \dots, u(k-n), \hat{\varepsilon}(k-1), \dots, \hat{\varepsilon}(k-n)]. \quad (4)$$

$$\hat{\theta} = [a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n, \hat{c}_1, \dots, \hat{c}_n]^T. \quad (5)$$

(4) 式中

$$\hat{\varepsilon}_k = y_k - \hat{x}^T(k)\hat{\theta}(k-1). \quad (6)$$

由于建立数学模型的目的是为了仿真,则要求模型的计算输出 $\{\hat{y}(k)\}$ 与实测输出 $\{y(k)\}$ 愈接近愈好. 因此在确定模型阶数 n 和比较不同算法结果的优劣时不用残差平方总和,而以仿真计算输出误差的平方总和 $V(n)$ 为目标函数,

$$V(n) = \sum_{i=1}^N [\hat{y}(i) - y(i)]^2. \quad (7)$$

使用 F 检验和赤池的 AIC 准则两种方法确定阶数. F 检验的统计检验量 t 值为

$$t = \frac{V(n_1) - V(n_2)}{V(n_1)} \cdot \frac{N - 2n_2}{2(n_2 - n_1)}. \quad (8)$$

在 5% 的信度时,如果 n_2 比 n_1 大一阶, t 值至少应大于 3,指标 $V(n)$ 才能算是显著减少(取 n_2 阶为宜),否则 n_1 阶已足够高了.

AIC 准则用下式计算,

$$AIC(n) = \left(1 + \frac{2n}{N}\right) V(n). \quad (9)$$

使 $AIC(n)$ 为最小的 n 值做为最适阶数.

表 1 示出了某个样本(RLS 法)不同阶数的参数估计和定阶的结果,该样本明显以二阶为最佳.

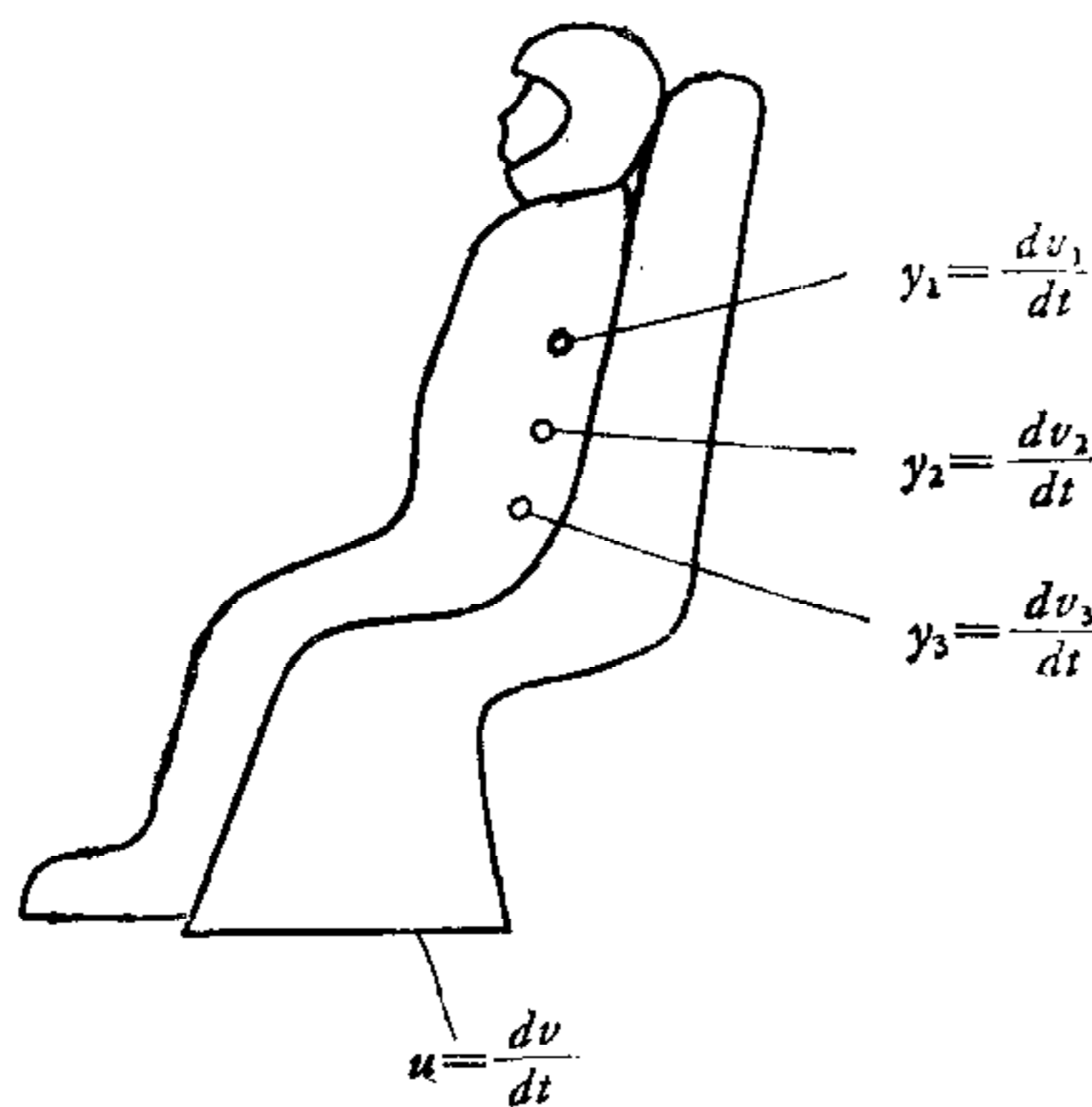


图 2

1) 马润津、冯雅君、施妙和、彭志瑾,时变系统辨识递推最小二乘方法及其应用,中国自动化学会应用委员会第二届学术报告会(1980,昆明).

表 1

参数 阶数	\hat{a}_1	\hat{a}_2	\hat{a}_3	\hat{b}_1	\hat{b}_2	\hat{b}_3	$V(n)$	t	AIC(n)
1	0.8736			0.1648			203.6		207.7
2	1.0201	-0.3023		0.0498	0.3251		129.7	7.24	134.8
3	1.1367	-0.4251	0.0682	0.1030	0.3509	-0.1638	128.8	0.33	136.5

为了取得可信服的结果,作者共使用了十个样本进行辨识计算。显然,用不同的样本辨识,所定出的最佳阶数可能是不同的,即使对相同样本用不同的定阶方法所得结果亦有差异。表 2 示出了对十个样本的定阶结果,作者以表决的方式,取大多数样本的定阶结果(2 阶)为最适宜的阶数。

表 2 十个样本的定价结果

最佳阶数		1	2	≤ 3
样本个数	F 检验	2	6	2
	AIC	1	5	4

下面比较三种不同辨识方法的 $V(n)$ 值,十个样本的结果(均为 2 阶模型)表明多数样本用 RELS 法和 RIV 法较 RLS 法有明显改善。只个别样本无改善,甚至还不如 RLS 法的结果。如果把同一样本的三种不同方法的 $V(n)$ 值为最小的方法称为“占优”的话,十个样本中三种方法的占优样本数如表 3 所示。

表 4 示出了某次弹射试验中,用三种不同方法(二阶)辨识的数据。

对三种辨识方法的结果进行比较表明,由加速度传感器引入的测量噪声具有明显的

表 3

算 法	RLS	ELS	RIV
占优样本数	1	3	6

表 4

响应	算法	\hat{a}_1	\hat{a}_2	\hat{b}_1	\hat{b}_2	$V(n)$
1	RLS	1.0926	-0.2808	0.1740	0.0266	43.8
	ELS	1.1064	-0.3659	0.1672	0.1179	23.5
	RIV	1.2718	-0.4846	0.1791	0.0516	25.2
2	RLS	0.9340	-0.3106	0.2164	0.0675	80.3
	ELS	0.5227	0.0592	0.2469	0.3223	78.6
	RIV	0.8961	-0.2224	0.2172	0.2199	76.3
3	RLS	0.7272	-0.2030	0.1125	0.2400	75.8
	ELS	0.8418	-0.2458	0.2383	0.1952	74.4
	RIV	0.7656	-0.2230	0.2612	0.2293	66.2

相关性(有色噪声),在此条件下 RLS 估计是有偏差的,因此估计精度较另两种方法差。

Ljung 等人用常微分方程研究递推辨识算法收敛性的结果,对 RELS 方法的收敛性给

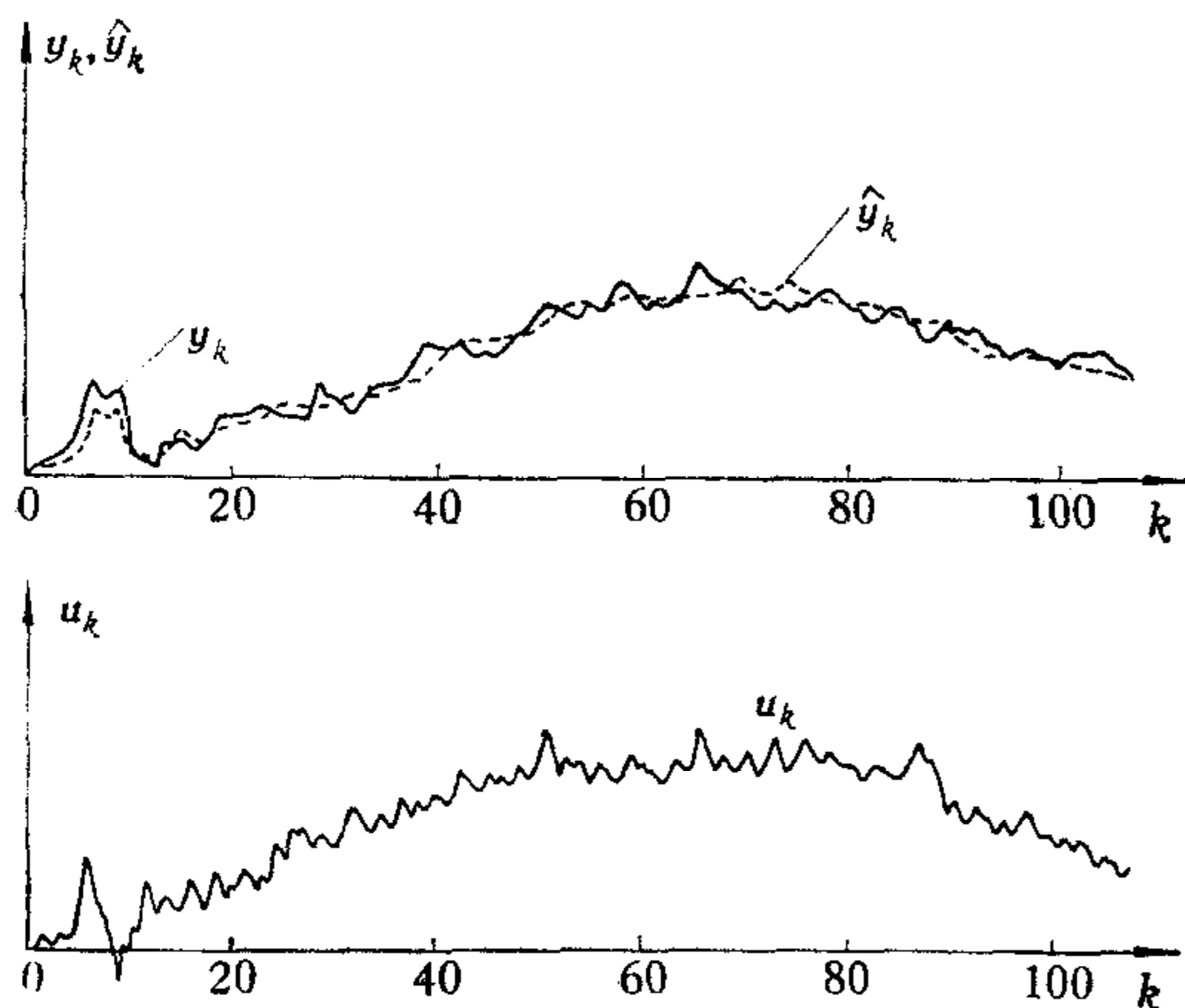


图 3

表明用系统辨识方法建立的数学模型用于仿真是可信的,这对设计和考核新的救生设备有实际意义。

出了反例^[3]。但是最近的讨论情况表明^[4,5],由于实际计算时舍入误差的影响,将上述反例的参数值用计算机进行辨识的仿真亦不会出现不收敛的情况。RELS 方法简单,效果较好,且使用与 RLS 方法基本相同的计算程序,因此乐于为人们所采用。

使用 SIEMENS 7·760 计算机,RLS 和 RIV 法的每次递推运算时间约为 2.4ms,而 RELS 法约为 3.5ms (二阶模型)。

图 3 为用 RIV 法辨识出的 2 阶模型用于仿真的计算输出响应 $\hat{y}(k)$ 与实测响应 $y(k)$ 的比较。可见两者是比较接近的。这

结 论

(1) 利用随机离散模型的系统辨识方法建立弹射加速度作用下人体动态响应的数学模型用于仿真,其结果是比较满意的。

(2) 多样本辨识的定阶,采用“表决”方式确定最佳阶数。

(3) 针对本文研究的具体对象,三种辨识方法中 RIV 法精度最高,计算量也较小,但没有给出噪声的参数估计。RELS 法精度也较高,能给出噪声的参数估计,但计算量稍大一些。RLS 法仅对个别样本得出较好的结果,但仍是一种最基本和简单的方法。

参 考 文 献

- [1] Ruff, Sigmund, Brief Acceleration Less Than One Second, German Aviation Medicine in War II, U. S. Government Printing Office Washington, D. C. (1950).
- [2] AD 771612 Brinkly, J. W. et al., Foundations of Space Biology and Medicine II, Part 3, Chapter 3 Impact Accelerations (1973).
- [3] Soderstrom, T., Ljung L. and Gustavsson, I., A theoretical analysis of recursive identification methods, *Automatica* 14 (1978), 231—244.
- [4] Panuska, V., Non-convergence of the Approximate Maximum Likelihood Identification Algorithm, *Automatica* 16 (1980), 215—217.
- [5] Ljung, L., Comments on 'Non-convergence of the Approximate Maximum Likelihood Identification Algorithm', *Automatica* 16 (1980), 219—220.

A MATHEMATICAL MODEL FOR IDENTIFICATION OF MAN'S DYNAMIC RESPONSE UNDER THE SHOOT OFF EJECTION ACCELERATION (A COMPARISON OF THREE IDENTIFICATION METHODS)

MA RUNJIN

(Beijing Metallurgical Institute of Mechanical and Electrical Technology)

WANG FANGZI

(Spaceflight Medicine Institute of Engineering)

ABSTRACT

By means of identification method, a mathematical model of man's response under the shoot-off ejection acceleration based on the experimental data is built in this paper. Moreover, three methods 1) RLS method, 2) RELS method, 3) RIV method are compared with each other.

Some results have been obtained by these identification models.

(上接 126 页)

时 间 表

论文初稿五份必须于一九八三年七月一日前寄抵大会秘书处(欧洲的论文应在六月二十日前寄出,其他地区的应在六月十日前寄出)。由于论文采取分散评审的办法,迟到的论文就很难考虑接受。大会秘书处地址如下:

Computer and Automation Institute
Hungarian Academy of Sciences
H-1502 Budapest
P. O. Box 63. Hungary

作者可以于一九八三年十一月二十日前接到稿件被接受或不接受的通知。论文最后一稿必须于一九八四年二月十五日前寄抵大会秘书处。

孔繁铨摘译自 «Second Announcement and Call for Papers, 9th World
Congress of the International Federation of Automatic Control»

注:中国自动化学会办公室通知:凡有关 IFAC 大会的征文寄送问题,由作者所在单位报送,学会不组织征文评审报送事宜。