

清华大学

精密仪器与机械学系

科学研究论文集

献给八十周年校庆



1991.4

前 言

值此清华大学 80 周年校庆之际，我们收编了我系师生自 1987 年以来在国内发表的部分论文成此论文集，以作为对校庆的献礼。

精密仪器与机械学系前身是清华大学工学院机械系，五十年代初和北京大学、燕京大学相应的系合并为清华大学机械制造系，五十年代末增设了光学仪器 and 精密仪器两个新专业。六十年代初调整为精密仪器和机械制造系，八十年代更名为如今的精密仪器与机械学系，现设机械设计、制造及其自动化和精密仪器仪表两个专业。近一、二十年来，随着精密机械、激光、微电子、计算机、自动控制等新技术及现代设计、控制及信息理论的发展，本系的面貌发生了深刻变化，逐步形成了机、电、光、计算机综合应用，高科技交叉密集的综合学科。本系设有机械制造工艺设备及自动化、光学仪器、精密仪器量测、导航与自动控制等四个专业教研室；设有面向全校的三个技术基础课教研室：工程图学与计算机辅助设计、机械原理、机械设计；设有微细工程、机器人、传感器等研究所(室)；本系有四个教学科研基地：摩擦学国家重点实验室是清华大学第一个通过国家验收的国家级实验室，仪器仪表国家教委重点实验室正在建设之中，国家 CIMS 实验工程研究中的制造系统实验室已在集成试运行中；同时还有一个精密仪器工厂。

本系科学研究工作在“七.五”期间有很大发展，形成了“五个科研高地”：

1、计算机集成制造系统 CIMS (含 CAD/CAM、数控、机器人)。这是国家 863 高科技项目，是跟踪世界机械制造自动前沿的技术，我系师生参与了辅助产品设计、辅助工艺过程设计和辅助制造的集成，该系统一期工程将于 92 年完成并为我国工厂自动化提供示范。

2、光盘存储技术及其应用。此是八十年代世界十大机械电子科技攻关项目之一，集中了近代光学、激光、精密机械、微电子、自动控制、计算机和材料科学等高科技的新成果，在国民经济各个领域有着广泛应用前景，将成为九十年代计算机外部设备和办公室自动化的新兴产业。我系微细工程研究所研制的相变型可擦除光盘机和光盘文档存储系统已通过国家鉴定。目前我系正在开发工程图纸管理和光盘存储系统。

3、摩擦学。摩擦学国家重点实验室开展了多项对国民经济有重大效益的

研究工作。如铁路轴承滚子和挡边的润滑设计使寿命大大提高，已由洛阳轴承厂投入批量生产；该室从事的波音飞机基于润滑油分析的故障诊断专家系统和卫星轴承润滑微循环与预检技术将有助于提高航空航天可靠性；而电流变介质的开发研究在诸如汽车工业的防振、离合、刹车等过程中有着广泛应用前景。

4、大尺寸测量。这是光学教研组“七.五”攻关项目，得到联合国计划开发署的支持，已取得多项重大成果。如镜板平面度测量仪实现了对水轮机组关键部件大型镜板平面的现场测量，它的推广应用每年可为国家创造大量经济效益。目前已进行第二期的开发研究。

5、过程监控和故障诊断。生产过程的自动化、柔性化、集成化和智能化要求使用传感技术、信号分析处理技术、监控和故障诊断。机器人研究室研制的 AE 超声发射监控制仪，可对自动化机床刀具磨损情况作实时监控，性能达国际先进水平，获国家发明奖。传感器研究室、精密仪器量测和机械原理教研室研制的传感器监控系统在大型电站汽轮机组安全运行及故障诊断中应用，具有重大的国民经济效益。

除了以上 5 个重点科研外，我系在“七.五”期间还取得了一系列重大的科研成果，如机制教研室研制的加工高密度磁盘的精密带式研抛机和磁盘高点铲刮测试仪，光学仪器教研室研制成功多种磁盘测试设备，包括平面度和磁头飞行姿态测量、由机械原理、机械设计、精仪教研室及精仪厂研制假肢设备肌电控制两自由度前臂假肢获国家发明奖，导航与自动控制教研室的静电陀螺技术等达到较高水平等等。目前，我系正准备进入亚微米半导体加工设备的研制。

本系设有 7 个硕士点：光学仪器、精密仪器及机械、机械学、机械制造、工程图学、机电控制及自动化、测试计量技术及仪器等，前四个为博士点，前三个是全国重点学科。仪器仪表和机械学两个方向设有博士后流动站，有博士生导师 11 名。每年招收博士生约 15 名、硕士生约 50 名、本科生约 150 名。

我系有重视教学的传统。工程图学与计算机辅助设计、机械原理和机械零件等三个教研室开设的机械制图、机械原理和机械设计基础等三门课程获得清华大学一类课程称号，占全校当前一类课的 1/8。本系设有面向全校的 CAD 教学中心，计算机技术引入教学促进了教学内容与方法的改革。为适应技术革命与市场经济的挑战，我们注意培养学生的科技动手与创造能力，设置了相关课程和创造制作实验室，组织学生参加全校机械设计及科技作品展览大奖赛。我们还十分重视对学生工程实践的训练。近年来，在系工厂进行了为期一个学期的紧密结合专业的生产、设计、管理实践教学试点。经过实践一批又一批学

生达到了二级工水平。具有二级工兰卡的毕业生由于实干精神强受到用人单位重视，往往成为优先录用的对象。本系毕业生具有宽广的专业适应面，受到各行各业普遍欢迎。

在“八.五”开始时，全系以“统一规划、加强联合、认真建设、办出特色”为指导思想对全系的发展进行了认真的规划，努力把我系建设成一个先进的、有特色的人材培养、科学研究和生产开发基地。

(周兆英 胡显章)

利用改进的符号数算法和光学符号代换实现矩阵计算	周少敏	邬敬贤	金国藩	1		
大轴圆度误差, 端面跳动的临床测量	李岩	梁晋文	花国梁	何树荣	王旭蕴	9
自动读出旋光准直测量系统	殷纯永	陈文正	方仲彦	孙卫真	16	
一种测量表面粗糙度的激光外差干涉仪	古丽蓉	王佳	章恩耀	曹芒	21	
动力学参数估计的频域方法	周兆英	杨进	26			
亚微米弹性微位移工作台系统的设计及其精度分析	高宏	李庆祥	严普强	36		
显微干涉系统测量微细图形的台阶高度	薛实福	李庆祥	王伯雄	徐敏娴	于水	46
用于显微测量的自动调焦系统	李庆祥	薛实福	王伯雄	汪春庆	55	
一种新型数字锁相环	施昊	严普强	63			
激光陀螺及其误差补偿	章燕申	汤全安	潘珍吾	68		
巴特沃斯数字滤波器在自动测试中的应用	高钟毓	苑春法	萧蕴诗	75		
多步法误差分离技术在圆度测量中的应用	顾启态	刘学斌	叶京生	雷田玉	章燕申	84
CXG-2型磁悬规转子横向稳定的研究	董景新	王永梁	张毓笠	92		
一种新的自动调焦方法——离轴探测法	范易伟	巩马理	王常廷	陆达	徐端颐	96
精密工作台气体静压轴承的有限元分析	潘晋	徐丰仁	沈钊	102		
莫尔形貌测量技术中的计算机图像处理	贾惠波	106				

电子束曝光机工件台结构的设计研究	赵立人	顾书偃	佟玉环	徐丰仁	112	
柔性转子振动的计算机控制	冯冠平	辛	暖		121	
静电陀螺随机漂移的谱与最大熵谱分析	杨友堂				126	
ZHL-1 型自动尿流参数检测仪的研制	丁天怀	魏 媛	张正义	刘重祿	朱友清	135
用 GMDH 方法对多变参数切削过程的刀具磨损进行建模和预报	宋 千	韩至骏			139	
磁盘铲刮头块浮动特性的研究	王先逵	段广洪	白 勇	雷源忠	146	
超精密微量进给机构的设计原理与实验研究	冯之敬				153	
机器人顺应运动的分析与控制算法	张伯鹏	张 昆	徐家球		160	
车削过程异常智能化声发射 (AE) 监视系统的研究	罗振壁	徐家球	张伯鹏		166	
等离子喷涂陶瓷涂层在高温 (450C) 下的摩擦磨损机处理分析	王应龙	金元生	温诗铸		169	
Maxwell 流体的滑动轴承润滑解	陈大融				175	
滑动速度对油润滑表面胶合磨损的影响	樊瑜瑾	苏振武	温诗铸		187	
椭圆轴承的弹性变形及热效应研究	姜 丽	于德潜	温诗铸		196	
CIMS 环境下的 CAD / CAM	童秉枢	许隆文	王先逵		205	
《一次生动的色彩设计课》——DB-5 激光电子束曝光机的色彩设计	王介民	刘朝儒			208	
NRDBMS: 适合于 CAD / CAM 系统的新型关系数据库管理系	孟明辰				210	

用级数法求解机组稳态运动方程	唐锡宽	218
MRAS 在油膜轴承动态特性辨识中的应用	金德闻 康卫泽	226
液压式固有频率可控动力消振器的研究	项海筹 王玉英	234
宇航器中摆动部件动量补偿装置及其优化设计	申永胜 姚俊杰	240
用“状态密码”解决多级组合行星齿轮传动效率分析问题	黄靖远	251
对 Holland 凸轮挺柱副非稳态弹流润滑膜厚计算方法的实用性探讨	俞海清 艾晓岚	257
明末清初火炮初探	吴宗泽	263
利用多维画法几何的原理表示多元合金系统的相图	周积义 谢申鉴	268
国外《测试技术》类型课程教材的述评	吴正毅	278
一种基于知识的柔性装配规划专家系统*	徐家球 杨向东 张远 张伯鹏	282

利用改进的符号数算法和光学符号 代换实现矩阵计算*

周少敏 邬敬贤 金国藩
(清华大学 精密仪器系, 北京 100084)

提 要

本文提出了一种利用改进的符号数算法和多窗口解码光学符号代换法则实现多值矩阵计算的光学方法, 并给出两个多比特改进的符号数矩阵外积计算的实验结果。这一方法具有精度高、速度快等特点。
关键词: 改进的符号数, 多窗口解码, 光学符号代换, 光矩阵计算。

一、引 言

由于光矩阵计算在许多光学变换和信号处理中所起的重要作用, 在国内外得到广泛的研究^[1,2]。光的并行处理和空间互不干扰特性非常适合于矩阵计算二维信息处理。迄今为止, 人们已经提出并实现了许多光学矩阵计算方法, 但总的说来, 尚存在精度不高, 速度低, 大多只能实现二值(0, 1)矩阵的计算。

本文提出一种利用改进的符号数(MSD)算法和多窗口解码光学符号代换法则(MW-OSSR)实现矩阵计算的方法, 改进符号数编码增加了操作数数值范围且隐含一种并行处理方式, 而与操作数长度无关, 多窗口解码光学符号代换法则大大减少了识别过程所需的通道数。这一方法的特点是精度高、速度快以及可完成多值矩阵的计算。

二、基于改进符号数算法的多值矩阵计算

对于多值矩阵的计算, 为增加多值数数值范围, 必须对其进行编码, 常见的二进制码由于其算法上的时序性而不适合用光学实现, 为此, 我们采用可并行处理的改进符号数编码方式。

任意一个十进制数 D 均可由下式表示成改进符号数^[3]

$$D = \sum_{k=0}^{N-1} a_k 2^k = a_{N-1} 2^{N-1} + a_{N-2} 2^{N-2} + \dots + a_1 2^1 + a_0 2^0$$
$$= [a_{N-1} a_{N-2} \dots a_k \dots a_1 a_0]_{MSD}, \quad (1)$$

式中 $a_k \in \{1, 0, \bar{1}\}^*$, N 为改进符号数数字的表达精度。例如, 十进制数 13 在五位精度的改进符号数数字系统可表示成

收稿日期: 1989年12月18日; 收到修改稿日期: 1990年5月29日

* 国家 863 高科技基金资助的项目。

$$(13)_D = (1)2^4 + (0)2^3 + (-1)2^2 + (0)2^1 + (1)2^0 = [10\bar{1}01]_{MSD}$$

或

$$(13)_D = (0)2^4 + (1)2^3 + (1)2^2 + (0)2^1 + (1)2^0 = [01101]_{MSD}, \quad (2)$$

上述两种表示方式在数值上完全等价, 仅仅是编码形式不同而已, 不影响运算结果。改进符号数码同时还可以携带符号信息, 一个改进符号负数是其对应的改进符号正数的逻辑补 (定义: $1' = \bar{1}$, $0' = 0$, $\bar{1} = 1$, “1”表示取补, 所以

$$(-13)_D = [\bar{1}010\bar{1}]_{MSD} = [0\bar{1}\bar{1}0\bar{1}]_{MSD} \quad (3)$$

这样便可以方便地将改进符号数减法转化为改进符号数加法。

下面, 以两个 2×2 阶多值矩阵为例进行讨论, 设

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}_D = \begin{pmatrix} a_{11}^{N-1} a_{11}^{N-2} \dots a_{11}^1 a_{11}^0 & a_{12}^{N-1} a_{12}^{N-2} \dots a_{12}^1 a_{12}^0 \\ a_{21}^{N-1} a_{21}^{N-2} \dots a_{21}^1 a_{21}^0 & a_{22}^{N-1} a_{22}^{N-2} \dots a_{22}^1 a_{22}^0 \end{pmatrix}_{MSD}, \quad (4)$$

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix}_D = \begin{pmatrix} b_{11}^{N-1} b_{11}^{N-2} \dots b_{11}^1 b_{11}^0 & b_{12}^{N-1} b_{12}^{N-2} \dots b_{12}^1 b_{12}^0 \\ b_{21}^{N-1} b_{21}^{N-2} \dots b_{21}^1 b_{21}^0 & b_{22}^{N-1} b_{22}^{N-2} \dots b_{22}^1 b_{22}^0 \end{pmatrix}_{MSD}, \quad (5)$$

则

$$A+B = \begin{pmatrix} a_{11}+b_{11} & a_{12}+b_{12} \\ a_{21}+b_{21} & a_{22}+b_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}^{N-1} a_{11}^{N-2} \dots a_{11}^1 a_{11}^0 & a_{12}^{N-1} a_{12}^{N-2} \dots a_{12}^1 a_{12}^0 \\ + b_{11}^{N-1} b_{11}^{N-2} \dots b_{11}^1 b_{11}^0 & + b_{12}^{N-1} b_{12}^{N-2} \dots b_{12}^1 b_{12}^0 \\ a_{21}^{N-1} a_{21}^{N-2} \dots a_{21}^1 a_{21}^0 & a_{22}^{N-1} a_{22}^{N-2} \dots a_{22}^1 a_{22}^0 \\ + b_{21}^{N-1} b_{21}^{N-2} \dots b_{21}^1 b_{21}^0 & + b_{22}^{N-1} b_{22}^{N-2} \dots b_{22}^1 b_{22}^0 \end{pmatrix}_{MSD}, \quad (6)$$

$$A \cdot B = \sum_{l=1}^2 A_l \cdot B_l = \begin{pmatrix} a_{11}^{N-1} a_{11}^{N-2} \dots a_{11}^1 a_{11}^0 & a_{12}^{N-1} a_{12}^{N-2} \dots a_{12}^1 a_{12}^0 \\ (b_{11}^{N-1} b_{11}^{N-2} \dots b_{11}^1 b_{11}^0 & b_{21}^{N-1} b_{21}^{N-2} \dots b_{21}^1 b_{21}^0)_{MSD} \\ + (a_{12}^{N-1} a_{12}^{N-2} \dots a_{12}^1 a_{12}^0 & a_{22}^{N-1} a_{22}^{N-2} \dots a_{22}^1 a_{22}^0)_{MSD}^T \\ (b_{21}^{N-1} b_{21}^{N-2} \dots b_{21}^1 b_{21}^0 & b_{22}^{N-1} b_{22}^{N-2} \dots b_{22}^1 b_{22}^0)_{MSD}, \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中 $A_l \cdot B_l$ 称为 $A \cdot B$ 的第 l 个部分积 ($l=1, 2$), T 表示转置。

在实现 $A+B$ 运算时, 仅仅需要进行三次变换而与操作数长度 (N) 无关, 其中隐含了一个进位方式, 使得两个 N bit 改进符号数的加法可并行地完成。图 1(a) 示出了变换规则以及图 1(b) 示出其计算步骤, 图 2 为一个计算实例。

在实现 $A \cdot B$ 运算时, 先用外积算法进行部分积阵列的计算, 其中所遵循的变换规则 (M) 如图 3 所示, 然后对部分积阵列实行移位相加, 依次每两行为一组 (当表达矩阵元素的改进符号数精度 N 为奇数时, 部分积阵列由奇数行组成, 因此, 每两行相加后, 剩下最后一行为单独一组), 经过 $N/2$ 次 (N 为偶数) 或 $(N/2)+1$ 次 (N 为奇数) 循环后, 将得到最后结果。

下面, 再以矩阵求逆 A^{-1} 为例来讨论改进符号数矩阵除法。在线性方程组及线性微分方程的求解中, 矩阵求逆是必须的, 而矩阵求逆又可转化成矩阵除法 A^*/d (A^* 称为 A 的伴随矩阵, d 是 A 的行列式值)。本文利用 Hwang 等人提出的一种改进符号数并行收敛算法^[4]来实现上述过程。设 X, Y 分别为被除数和除数, 且满足 $0.5 < |X| < 1$, 通过寻找一系

* $T = -1$.

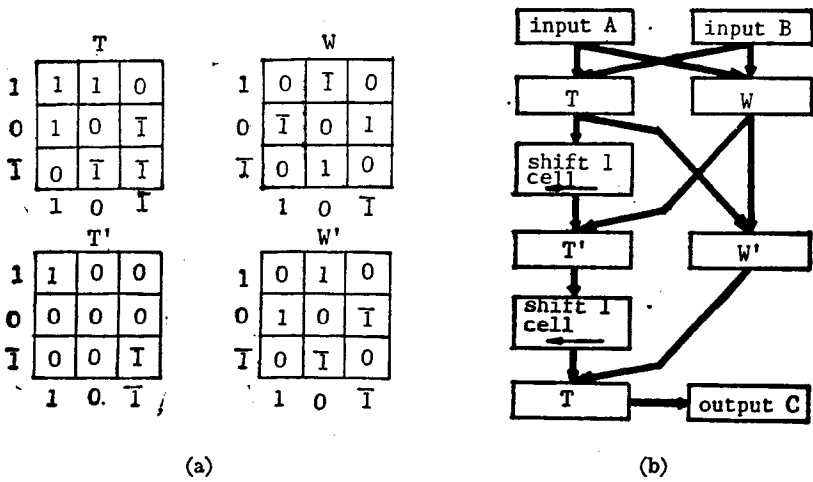


Fig. 1

(a) Transformation rule; (b) operation step

Input Matrix:

$$A = \begin{pmatrix} 17 & 24 \\ 9 & 20 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 7 & 13 \\ 28 & 10 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 10001 & 11000 \\ 01001 & 11100 \end{pmatrix} \text{MSD}$$

$$= \begin{pmatrix} 01001 & 01101 \\ 11100 & 10110 \end{pmatrix} \text{MSD}$$

Step 1:	T	W	
	11000	11101	11000 10101
	11101	11110	10101 01010
Step 2:	T'	W'	
	000000	000000	101000 101111
	000000	001000	101111 110110
Step 3:	T	Output Matrix:	
	0101000	0101111	C = A+B = (24 37)
	0101111	0110110	(37 30)

Fig. 2 A practical computation example

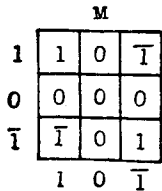


Fig. 3 Transformation rule M

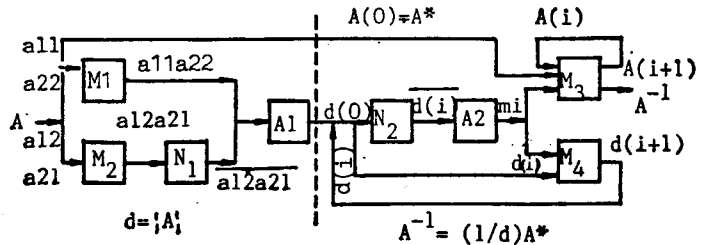


Fig. 4 Computation principle of 2x2 matrix inversion

列的乘法因子 $m_i (i=0, 1, \dots, N)$, 使得 $Y \cdot \prod_{i=0}^N m_i \rightarrow 1$, 置 $X_0 = X, Y_0 = Y$, 利用递推式

$$X_{i+1} = X_i \cdot m_i, \tag{8}$$

$$Y_{i+1} = Y_i \cdot m_i, \quad (9)$$

则有

$$\left. \begin{aligned} Q &= \frac{X}{Y} = X \cdot \prod_{i=0}^N m_i, \\ m_i &= 2 - Y_i. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

以 2×2 阶矩阵求逆为例, 运算原理如图 4 所示, 左边用以求 $|A|$ 之值, 右边用以求 A^{-1} 。图中, M 表示改进符号数矩阵乘法器(矩阵 \times 常数); N 表示 2' 补码运算器; A 表示改进符号数加法器。当矩阵 A 的元素长度为 N bit 改进符号数时, 经过 N 次叠代便可使 $|A|^{(N)} \rightarrow 1$, 而 $A^{(N)} \rightarrow A^{-1}$ 。表 1 给出一个改进符号数矩阵求逆实例($N=3$)。

Table 1 A practical example of MSD matrix inversion ($N=3$)

Original matrix: $A = \begin{pmatrix} 0.25 & 0.5 \\ -0.25 & 0.5 \end{pmatrix}_D = \begin{pmatrix} 0.01 & 0.10 \\ 0.01 & 0.10 \end{pmatrix}_{msd}$			
Accompany matrix: $A^* = \begin{pmatrix} 0.10 & 0.10 \\ 0.01 & 0.01 \end{pmatrix}_{msd} = A^{(0)}$			
$d = A = (0.25)_D = (0.01)_{msd} = d^{(0)}$			
Iteration step(i)	m_i	$d^{(i)}$	$A^{(i)}$
	$m_0 = 2 - d^{(0)}$ = 10.00 - 0.01 = (1.11) _{msd} = (1.75) _D	$d^{(1)} = d^{(0)} \cdot x_{m_0}$ = 0.01 \times 1.11 = (0.1001) _{msd} = (0.4375) _D	$A^{(1)} = A^{(0)} \cdot x_{m_0}$ $\begin{pmatrix} 0.1110 & 0.1110 \\ 0.1001 & 0.1001 \end{pmatrix}_{msd}$ $\begin{pmatrix} 0.875 & -0.875 \\ 0.4375 & 0.4375 \end{pmatrix}_D$
	$m_1 = 2 - d^{(1)}$ $x_1 = 10.00 - 0.01 \times 1.11$ = (1.1001) _{msd} = (1.5625) _D	$d^{(2)} = d^{(1)} \cdot x_{m_1}$ = 0.1001 \times 1.1001 = (0.10101111) _{msd} (0.68359375) _D	$A^{(2)} = A^{(1)} \cdot x_{m_1}$ $\begin{pmatrix} 1.0101110 & 1.0101110 \\ 0.10101111 & 0.10101111 \end{pmatrix}_{msd}$ $\begin{pmatrix} 1.3671875 & -1.798828125 \\ 0.899414063 & 0.899414063 \end{pmatrix}_D$
	$m_2 = 2 - d^{(2)}$ $x_2 = 10.0000 - 0.0100$ $\times 1.1100 \times 1.1001$ = (1.01010001) _{msd} = (1.31640625) _D	$d^{(3)} = d^{(2)} \cdot x_{m_2}$ = 0.10101111 \times 1.01010001 = (0.1110011001) _{msd} (0.899414063)	$A^{(4)} = A^{(3)} \cdot x_{m_3}$ $\begin{pmatrix} 1.11111101 & 1.11111101 \\ 0.11111101 & 0.11111101 \end{pmatrix}_{msd}$ $\begin{pmatrix} 1.98046875 & -1.98046875 \\ 0.98828125 & 0.98828125 \end{pmatrix}_D$
	$m_3 = 2 - d^{(3)}$ $x_3 = 10.00000000 - 0.01000000$ $\times 1.11000000$ $\times 1.10010000$ $\times 1.01010001$ = (1.0001100110) _{msd} = (1.099609375) _D	$D^{(4)} = d^{(3)} \cdot x_{m_3}$ = 0.1110011001 $\times 1.0001100110$ = (0.1111110101) _{msd} (0.989257813) _D	A^{-1}

三、多窗口解码光学符号代换法则用于改进符号数矩阵外积计算

符号代换法则以二维模式的相关识别和传递为基础, 是一种并行算法。与布尔逻辑相比它具有并行处理与扇入扇出的优点, 它不仅能识别位的状态, 而且能识别位的空间分布。对于这种二维算法, 显然, 用光学方式大大优于用电子处理方式。近年来, 光学符号代换法则作为光计算研究中的一种有效算法引起人们极大的重视^[5, 6]。为了解决存在的多通道处理问题, 作者曾提出过一种所谓的多窗口解码光学符号代换法则^[7], 其实质是通过在识别输出面上设置多窗口的解码掩模, 使得那些具有相同移位规则的模式组合能被同时识别出来。设每一输入图形中含有 M 种不同模式, 则两个输入图形间共有 M^2 种不同的模式组合, 一

般需要 M^2 个独立通道加以识别和代换,采用多窗口解码光学符号代换法则后,可将通道数减少

$$P = 2M - 1 \quad (11)$$

个。图 5 和图 6 分别为该法则原理及其相应的光学系统。原理图中示出了五进制乘法运算时的输入,本位和及进位。

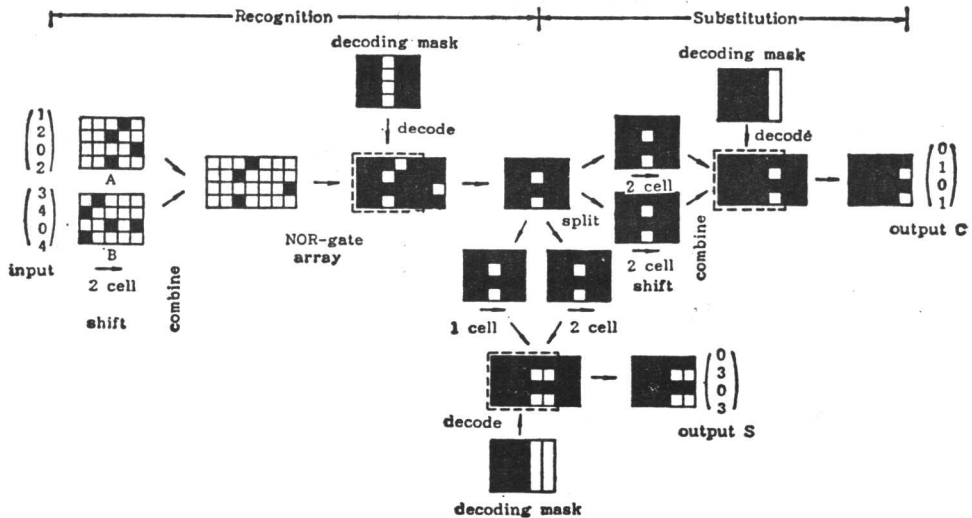


Fig. 5 Principle of MW-OSSR (Input: 2*4, Sum: 3, Carry: 1)

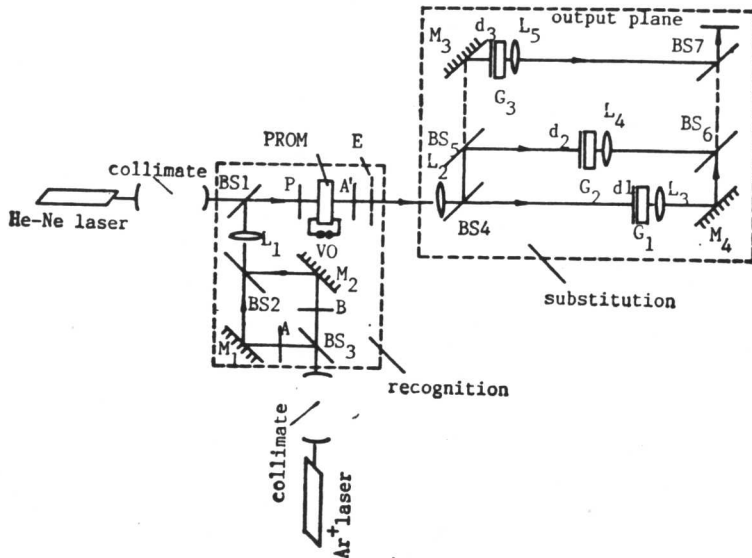


Fig. 6 Optical system for MW-OSSR

显然, A 、 B 两个输入中的 13 和 24 组合由于具有相同的移位规则(间隔相同),所以被同时得到识别(图中的 NOR 门阵列后)。类似地, A 、 B 间具有相同数值间隔 $d \cdot \Delta x$ ($d=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 的模式组合均可分别被同时识别出来, Δx 表示相邻两数的间隔。图 6 中, A 、 B 分别从四边形光路的两臂输入,经透镜 L_1 成像及反射镜 M_1 、半透反射镜 BS_1 、 BS_2 移位,合

成到实时器件 PROM 上(使用波长为 4880 Å 的 Ar⁺ 激光写入)。He-Ne 激光 (6328 Å) 用来对 PROM 进行读出,由多窗口解码掩模 E 解码后可得到多个识别结果, E 一般由分别位于 P 个代换系统中的 P 个子解码掩模 d_1, d_2, \dots, d_p 来代替。各识别结果在相应的代换通道进行符号代换,由反射镜和半透反射镜或由衍射光栅 $G_1 \sim G_p$ 来完成,它们的输出再次合成后便得到所需的结果。

改进符号数算法中的几种变换规则可以认为是几种符号代换法则,输入图形中含有 9 种待识别模式组合: 11、10、1 $\bar{1}$ 、01、00、0 $\bar{1}$ 、 $\bar{1}\bar{1}$ 、 $\bar{1}0$ 及 $\bar{1}\bar{1}$, 代换结果为 1.0 或 $\bar{1}$ 。实现改进符号数矩阵加减运算时, $M=5, P=5$, 实现改进符号数矩阵外积计算时,考虑到含“0”的模式组合其识别结果在光强上对代换输出不作贡献,则(9)式可改写成

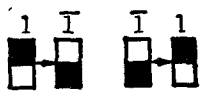


Fig. 7 Dual rail coding

$$P=2(M-2)+1. \quad (M \geq 2) \quad (12)$$

所以,这时所需的通道数为 $P=3$ 。

用光学方法实行改进符号数矩阵外积计算时,首先对操作数进行图 7 所示的二则编码,按多窗口解码光学符号代换法则的原理,11, $\bar{1}\bar{1}$ 模式组合, $1\bar{1}$ 模式组合及 $\bar{1}1$ 模式组合的识别各需一个通道。对同一实例(见图 2),则有

$$A_1 \cdot B_1 = (100010101\bar{1})^T (0100\bar{1}01101)_{MSD}$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \bar{1} & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \bar{1} & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \bar{1} & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \bar{1} & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & \bar{1} & 0 & 0 & 1 & 0 & \bar{1} & \bar{1} & 0 & \bar{1} \end{pmatrix}_{MSD} \quad (13)$$

$$A_2 B_2 = (1100011\bar{1}00)^T (1110010\bar{1}\bar{1}0)_{MSD}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & \bar{1} & \bar{1} & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & \bar{1} & \bar{1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & \bar{1} & \bar{1} & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & \bar{1} & \bar{1} & 0 \\ \bar{1} & \bar{1} & \bar{1} & 0 & 0 & \bar{1} & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}_{MSD} \quad (14)$$

$A_1 B_1$ 及 $A_2 B_2$ 的二则编码结果如图 8 所示,图 9 给出了外积计算时三个识别通道的实

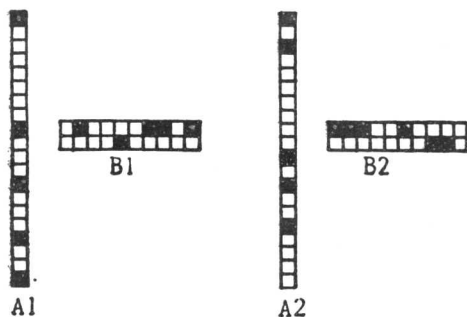


Fig. 8 The dual rial coding results of A1 B1 A2 and B2

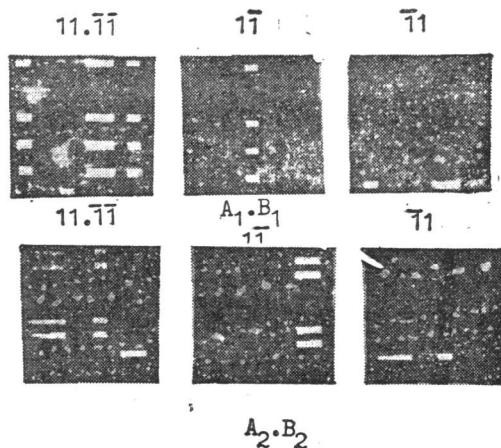


Fig. 9 The experimental results of three recognition channel

验结果。三个识别通道的输出经代换后重叠在一起便可得到部分积阵列。

四、结 论

利用改进符号数算法和多窗口解码光学符号代换法则可以实行快速、高精度的多元多值矩阵计算, 当使用响应时间为 5 ms 的 BSO-PROM 作为 NOR 门阵列(有效口径和实用分辨率分别为 $25 \times 25 \text{ mm}^2$ 和 $101/\text{mm}$)时, 系统可实现的等效运算能力是每秒进行 26 次 10×10 阶 32 bit 的改进符号数矩阵加(减); 或 3 次 5×5 阶 8 bit 的改进符号数矩阵相乘; 或 1 次 6×6 阶 8 bit 的改进符号数矩阵求逆。改进符号数数字表达精度 N 决定了最大操作数大小和计算精度, 设整数部分需 N_1 bit 表示, 则 $N - N_1$ bit 表示小数部分, 当 $N = 5$, $N_1 = 2$ 时, 计算精度为 0.125; 当 $N = 32$, $N_1 = 16$ 时, 计算精度可达 10^{-5} 。此外, 为了使实际系统小型化, 还可以用体全息片(重铬酸明胶等)和计算机全息图来代替反射镜、透镜及半透反射镜。

参 考 文 献

- [1] 陈岩松等;《物理》,1988, 17, No. 10(Oct), 626~630.
- [2] R. P. Bocker; *Opt. Eng.*, 1984, 23, No. 1 (Jan), 26~33.
- [3] B. L. Drake *et al.*; *Opt. Eng.*, 1986, 25, No. 1 (Jan), 38~43.
- [4] K. Hwang *et al.*; *Opt. Eng.*, 1989, 28, No. 4 (Apr), 364~372.
- [5] K. H. Brenner *et al.*; *Appl. Opt.*, 1986, 25, No. 18 (Sep), 3054~3060.
- [6] 周少敏等;《应用激光联刊》,1989, 8, No. 4 (Aug), 181~184.
- [7] 周少敏等;《仪器仪表学报》,1990, 11, No. 1 (Feb), 34~39.

Matrix computing using modified signed-digit arithmetic and optical symbolic substitution rule

ZHOU SHAOMIN, WU MINXIAN AND JIN GUOFAN

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 18 December 1989; revised 29 May 1990)

Abstract

In this paper, a method of multi-bit matrix computation using modified signed-digit (MSD) arithmetic and multi-window decoding optical symbolic substitution rule (MW-OSSR) is proposed. The experimental results of two multi-bit matrix outer product computation are given. This method is of high accuracy and speed.

Key words: modified signed-digit, multi-window decoding optical symbolic substitution, optical matrix computing outer product.

大轴圆度误差、端面跳动的临床测量

李岩 梁晋文 花国梁 何树荣 王旭蕊

(清华大学)

【摘要】 本文根据三点法误差分离理论, 讨论了圆度误差测量的基本方程, 给出了端面跳动测量的新方法。为了实现圆度误差和端面跳动的临床测量, 设计并加工了一套临床的测量系统。理论和实践表明, 该仪器工作可靠, 抗干扰, 适合于在车间条件下测量大轴的圆度误差和端面跳动。文中还讨论了各种误差源的影响, 并给出了仪器的测量精度。

【关键词】 误差分离, 圆度误差, 端面跳动, 测量, 大轴。

一、引言

随着人们对能源需求量的不断增长, 对大型发电机组的质量要求越来越高, 因此对大尺寸工件的测量技术不断提出新的课题。大型汽轮机主轴的圆度误差对高速旋转的主轴工作质量有很大影响, 主轴端面跳动对于保证高、中、低压缸主轴的同轴度和直线度关系很大。因此, 大轴几何量的测量有很大现实意义, 是重型机械生产中亟待解决的问题。

以往, 对于一般尺寸工件的圆度误差的测量, 通常是借助于圆度仪。但是, 对于汽轮机主轴这类大型工件, 不可能再用圆度仪, 而工厂里常采用的轴心基准法, 由于其原理误差, 所得结果与实际轮廓相比失真甚大。对于几十吨重的工件, 若采用V形块法测量圆度误差, 不仅带来操作上的不方便, 而且测量周期长, 一旦结果不合格, 还需再次装夹加工。端面跳动的测量也存在同样的问题, 因此生产效率很低, 以至成为重机工业中难于解决的问题之一。

近年来, 国内外许多学者研究用误差分离技术测量圆度误差, 取得了一定的成果。采用多个测头或转位同时拾取多个误差信息, 通过对测量数据的处理, 可以分离装夹被测件主轴回转的误差, 得到真实的轮廓。这一技术的采用, 可以在工作现场对被加工件实现临床测量, 大大缩短了测量周期, 提高了测量精度, 保证了工件质量, 同时还可以分析工艺过程, 对于正确制定工艺、检测机床精度都有一定的指导意义。根据这一技术, 我们设计制作了一套大轴圆度及端面跳动测量仪, 针对大尺寸工件和临床测量的具体特点进行了一些工作。通过现场的测试实验表明, 该系统可对大轴($\phi 300\sim 600\text{ mm}$)圆度和端跳进行测量, 测量结果可靠, 操作方便、迅速, 为生产提供了新的测试手段。

二、测量原理

1. 圆度误差测量

如图1所示, 三个传感器 S_1 , S_2 , S_3 的方向相交于 O 点, 且与截面主轴回转平均线相重合, xoy 为一个固定的坐标系, O' 为工件截面瞬时转动中心, O_1 为工件截面最小二乘圆心

的瞬时位置，其坐标为 $x(\theta)$ 、 $y(\theta)$ ， θ 表示工件转过 θ 角时的瞬时值， $o_1\rho$ 是固定在工件上的极坐标。

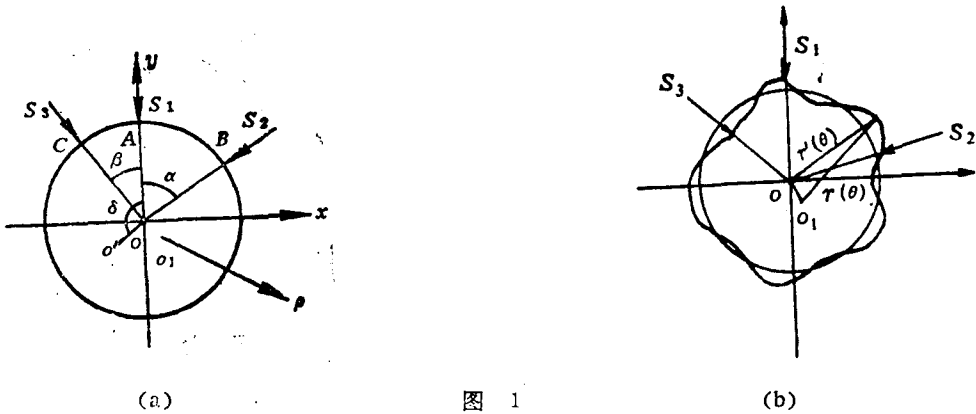


图 1

记 o 到轮廓上某点的距离为 $r'(\theta)$ ， o_1 到轮廓上同一点的距离为 $r(\theta)$ ，由于 $x(\theta)$ ， $y(\theta) \ll r(\theta)$ ，所以

$$r(C) = r'(\theta) - x(\theta)\cos\theta - y(\theta)\sin\theta \quad (1)$$

设 $\overline{oo'}$ 的瞬时值为 $e(\theta)$ ，且与 oA 夹角为 δ ，从几何关系易知，三个传感器的示值分别为

$$\begin{cases} S_1(\theta) = r'(\theta) - \bar{r} + e(\theta)\cos\delta & (2) \\ S_2(\theta) = r'(\theta - \alpha) - \bar{r} + e(\theta)\cos(\delta + \alpha) & (3) \\ S_3(\theta) = r'(\theta + \beta) - \bar{r} + e(\theta)\cos(\delta - \beta) & (4) \end{cases}$$

式中， \bar{r} 为平均半径。

将式 (1) 代入式 (2)、(3)、(4) 中，并用 $R(\theta)$ 表示某点的圆度，即 $R(\theta) = r(\theta) - \bar{r}$ ，则式 (2)、(3)、(4) 可以化为

$$\begin{cases} S_1(\theta) = R(\theta) + x(\theta)\cos\theta + y(\theta)\sin\theta + e(\theta)\cos\delta & (5) \\ S_2(\theta) = R(\theta - \alpha) + x(\theta)\cos(\theta - \alpha) + y(\theta)\sin(\theta - \alpha) + e(\theta)\cos(\delta + \alpha) & (6) \\ S_3(\theta) = R(\theta + \beta) + x(\theta)\cos(\theta + \beta) + y(\theta)\sin(\theta + \beta) + e(\theta)\cos(\delta - \beta) & (7) \end{cases}$$

为了消除主轴回转误差造成工件在 xoy 中的窜动及瞬时旋转中心的变化影响，将式 (5)、(6)、(7) 分别乘以 1、 a 、 b (a 、 b 待定)，将三式相加可得：

$$S(\theta) = S_1(\theta) + aS_2(\theta) + bS_3(\theta)$$

取

$$\begin{cases} a = -\sin\beta/\sin(\alpha + \beta) \\ b = -\sin\alpha/\sin(\alpha + \beta) \end{cases}$$

则

$$\begin{aligned} S(\theta) &= S_1(\theta) + aS_2(\theta) + bS_3(\theta) \\ &= R(\theta) + aR(\theta - \alpha) + bR(\theta + \beta) \end{aligned} \quad (8)$$

我们看到，组合函数 $S(\theta)$ 中已消除了 $e(\theta)$ 、 $x(\theta)$ 、 $y(\theta)$ 对测量的影响。通过圆周之内相关的数据采集，可以解出圆度误差 $R(\theta)$ 。

记 $S(\theta)$ 、 $R(\theta)$ 的离散值为 $S(k)$ 、 $R(k)$ ， $k = 1, 2, \dots, N$ ，为一周内等间隔的离散采样点编号，如果我们选取合适的 α 、 β ，使得存在互质整数 m_1 、 m_2 ，使 $m_1 = \frac{\alpha N}{2\pi}$ ， $m_2 =$