

Walsh 函数的演化生成

王能超

(华中理工大学并行计算研究所 武汉 430074)

摘要 本文运用二分技术演化生成 Walsh 函数系,并从演化的角度考察了 Walsh 函数的基本特性。

关键词 Walsh 函数,演化法则,太极思维

引言

Walsh 函数是美国数学家 J. L. Walsh 于本世纪初提出的,它的出现对现代科学技术发生了深刻的影响,其应用涉及信号处理与图象处理的众多领域。

所谓 Walsh 函数是指下列函数系

$$W_k(x) = \prod_{j=0}^{m-1} \text{sgn}[\cos k_j 2^j \pi x] \quad 0 \leq x < 1$$
$$k = 0, 1, 2, \dots$$

式中, sgn 为符号函数, $\text{sgn}[x]$, 当 $x > 0$ 时, 值为 +1, 而 $x < 0$ 时, 值等于 -1, 又 k_j 取值 0 或 1, 是序数 k 的二进制码:

$$k = \sum_{j=0}^{m-1} k_j 2^j$$

Walsh 函数的最大特点是取值简单。由于它是二值函数, 仅取 +1 和 -1 两个值, 因而可方便地利用开关元件产生和处理信号, 并适于计算机计算。此外, 快速 Walsh 变换(FWT)仅涉及加减运算, 而不含乘除运算, 它比快速 Fourier 变换(FFT)更为迅速。FWT 特别适用于二维数据处理和实时数据处理。

由于 Walsh 函数频繁地在 ±1 两个数值之间跳跃, 众所周知, 从数学定义出发, 运用传统的数学方

法分析 Walsh 函数, 是冗繁而不易理解和掌握的。

本文运用一种新的思维方式——所谓太极思维, 剖析 Walsh 函数的演化过程及其基本特性。

1 Haar 函数与 Rademacher 函数

1.1 Haar 函数的生成

本文所考察的函数, 如无特别的声明, 均限定在区间 $[0, 1)$ 上取非零值, 即约定这一区间外函数值恒为零。

我们从简单的方波函数着手

$$R(x) = 1 \quad 0 \leq x < 1$$

显然, 如果将它压缩到所在区间的左半侧, 并令右半侧与左半侧呈偶对称, 则所生成的函数仍为方波函数 $R(x)$ 。与此相反, 如果将 $R(x)$ 压缩到所在区间的左半侧, 而令右半侧与左半侧呈奇对称, 这样生成的函数

$$H(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x < \frac{1}{2} \\ -1 & \frac{1}{2} \leq x < 1 \end{cases}$$

称作 Haar 函数。

由此可见, Haar 函数 $H(x)$ 与方波函数 $R(x)$ 可以看作下述对偶法则演化生成的对偶函数(图 1):

0 法则——将所给函数压缩到区间的左半侧, 并令左右两侧呈偶对称;

• 本课题得到北京应用物理与计算数学研究所计算物理实验室基金资助
收稿日期: 1995, 09, 15; 收到修改稿日期: 1996, 04, 22

1 法则——将所给函数压缩到区间的左半侧，并令左右两侧呈奇对称。

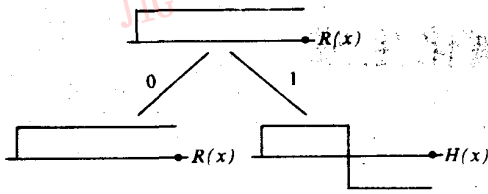


图 1
Fig. 1

上述演化关系，用数学式子来表达，即得如下双尺度方程

$$\begin{cases} R(x) = R(2x) + R(2x - 1) \\ H(x) = R(2x) - R(2x - 1) \end{cases} \quad (1)$$

1.2 三角函数二值化

三角函数是人们所熟悉的函数类。如果利用函数的符号(或振幅)将三角函数二值化，所生成的函数类称 Rademacher 函数。

Rademacher 函数分两种，分别由正弦函数和余弦函数演化生成：

$$\begin{aligned} R_k(x) &= \text{sgn}[\sin 2^k \pi x] \\ \bar{R}_{k+1}(x) &= \text{sgn}[\cos 2^k \pi x] \end{aligned} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

自然称之为正弦 Rademacher 函数与余弦 Rademacher 函数，图 2 与图 3 给出了它们的图象。

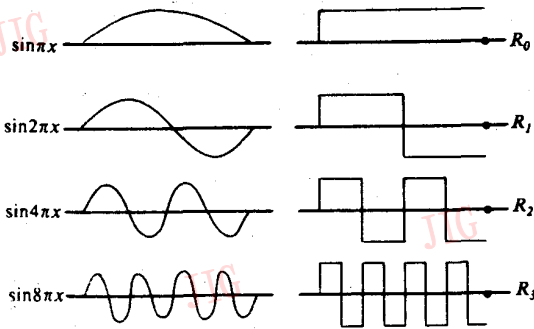


图 2
Fig. 2

Rademacher 函数可以看作是 Haar 函数演化的结果。事实上，从 Haar 函数出发，反复利用前述 0 法则进行加工，即可演化生成余弦 Rademacher 函数；而反复利用 1 法则加工的结果则是正弦 Rademacher 函数。

正弦 Rademacher 函数与余弦 Rademacher 函数的图象可以分别抽象为图 4 与图 5 的形式，图中第 k 层表示第 k 个 Rademacher 函数，阴影段表示

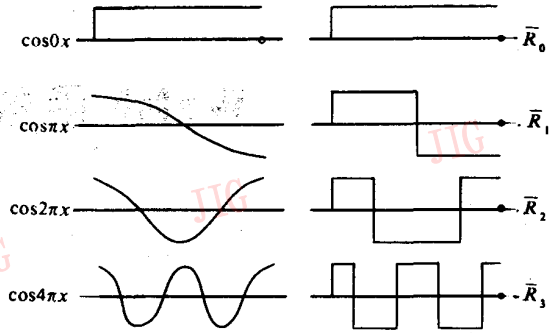


图 3
Fig. 3

取值+1，而非阴影段则表示取值-1。

正弦 Rademacher 函数与余弦 Rademacher 函数都是标准正交系，但由于它们分别呈奇对称与偶对称，因而都不是完备的。如何将 Rademacher 函数系扩充成为一个完备的标准正交系呢？后文将探讨这个问题。

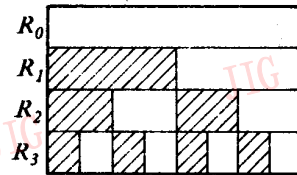


图 4
Fig. 4

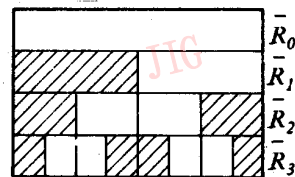


图 5
Fig. 5

2 Walsh 序的 Walsh 函数

2.1 Walsh 函数的演化生成

我们称由前述 0 法则与 1 法则所组成的对偶法则为 Walsh 演化法则。反复运用这组对偶法则加工 Haar 函数 $H(x)$ ，其演化过程如图 6 所示。

如此演化下去，其 m 步生成 2^m 个函数，它们列于图 7 的第 m 层中。设将第 m 层各格从 0 到 $2^m - 1$ 顺序编号，则其第 j 格对应的函数是 W_{2^m+j} , $j=0, 1,$

..., 2^m - 1.

$$\begin{cases} W_{2k}(x) = W_k(2x) + W_k(2 - 2x) \\ W_{2k+1}(x) = W_k(2x) - W_k(2 - 2x) \end{cases} \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2)$$

特别地, 当 $k=0$ 时, 上式退化为式(1)。

2.3 Walsh 序的对称性

我们看到, 任一 Walsh 函数 $W_k(x)$ 经 Walsh 法则演化生成的两个函数 $W_{2k}(x)$ 和 $W_{2k+1}(x)$ 呈奇偶对称, 即偶下标的 $W_{2k}(x)$ 呈偶对称, 奇下标的 $W_{2k+1}(x)$ 呈奇对称。设以阴影标志偶对称, 而以非阴影标志奇对称, 则图 7 所示的 Walsh 函数的奇偶性可用图 4 来表征。

Walsh 函数依次呈奇偶性, 这一特性与三角函数很类似, 因之记为

$$\begin{cases} S_k(x) = W_{2k-1}(x) \\ C_k(x) = W_{2k}(x) \end{cases}$$

并分别称之为正弦 Walsh 函数与余弦 Walsh 函数。

显然, 正弦(余弦)Rademacher 函数系可以看作正弦(余弦)Walsh 函数系的一个子集。

再考察 Walsh 序的平移对称性。

首先注意一个事实: 如果演化前后的两个函数具有相同的奇偶对称性, 此时所生成的函数的右侧为左侧的平移, 此时称它为平移对称; 反之, 如果演化前后的两个函数奇偶对称性互异, 则所生成的函数的右侧为左侧的反射平移, 此时称它为反射对称。这样, 据 Walsh 序的奇偶对称特征图(见图 4)可以作出表征平移对称性的图 8, 图中阴影表示平移对称, 而非阴影则表示反射对称。

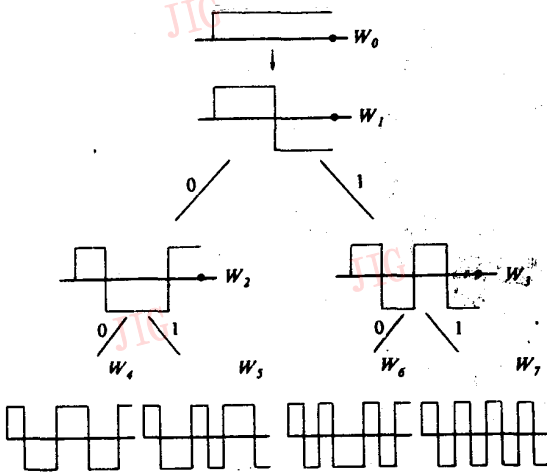


图 6
Fig. 6

层 0	W ₁														
1	W ₂							W ₃							
2	W ₄	W ₅	W ₆	W ₇	W ₈	W ₉	W ₁₀	W ₁₁	W ₁₂	W ₁₃	W ₁₄	W ₁₅	W ₁₆	W ₁₇	W ₁₈
3	W ₄	W ₅	W ₁₀	W ₁₁	W ₁₂	W ₁₃	W ₁₄	W ₁₅	W ₁₆	W ₁₇	W ₁₈	W ₁₉	W ₂₀	W ₂₁	W ₂₂

图 7
Fig. 7

这样演化生成的函数系 $\{W_k\}_0^\infty$ 称 Walsh 函数系。Walsh 函数系有不同的排序方式, 上述排序方式被称作是 Walsh 序。

显然, 图 7 每一层的左右两侧分别是余弦和正弦 Rademacher 函数。

2.2 Walsh 序的递推性

我们看到, 每个 Walsh 函数 $W_k(x)$, 通过 Walsh 法则演化生成两个函数 $W_{2k}(x)$ 和 $W_{2k+1}(x)$, 它们分列于图 7 下一层的左右两侧, 注意到它们的左侧均为 $W_k(x)$ 压缩的结果, 知

$$\begin{cases} W_{2k}(x) = W_k(2x) \\ W_{2k+1}(x) = W_k(2x) \end{cases} \quad 0 \leq x < \frac{1}{2}$$

此外, 为使 $W_{2k}(x)$ 与 $W_{2k+1}(x)$ 分别呈偶对称和奇对称, 要求下式成立

$$\begin{cases} W_{2k}\left(\frac{1}{2} - x\right) = W_{2k}\left(\frac{1}{2} + x\right) \\ W_{2k+1}\left(\frac{1}{2} - x\right) = -W_{2k+1}\left(\frac{1}{2} + x\right) \end{cases} \quad \frac{1}{2} \leq x < 1$$

从而有下列双尺度关系式

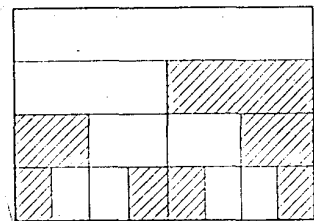


图 8
Fig. 8

下一节将进一步考察 Walsh 函数系的平移对称性, 从而引出另一种排序方式。

2.4 Walsh 序的波动性

考察 Walsh 函数 $W_k(x)$ 在 $(0, 1)$ 中正负交替的间断点。

定理 1 函数 $W_k(x)$ 在 $(0, 1)$ 内间断点的个数等于 k , 即 Walsh 序的 Walsh 函数 $\{W_k\}_0^\infty$ 是按间断

点的个数排序的。

证明 当 $k=0$ 或 1 时命题显然成立。

假定某个 Walsh 函数 $W_k(x)$ 的间断点个数等于 k , 考察它所生成的两个函数 $W_{2k}(x)$ 与 $W_{2k+1}(x)$ (x), 由于它们在左侧均为 $W_k(2x)$, 而右侧则为 $W_k(2x)$ 或 $-W_k(2x)$ 的平移, 因而它们在左右两侧间断点总数均等于 $2k$ 。再注意到 $W_{2k}(x)$ 和 $W_{2k+1}(x)$ 分别呈偶对称和奇对称, 因而中点 $x = \frac{1}{2}$ 是 $W_{2k+1}(x)$ 的间断点, 而 $W_{2k}(x)$ 在中点则不发生跃变。这样, $W_{2k}(x)$ 的间断点个数等于 $2k$, 而 $W_{2k+1}(x)$ 间断点个数等于 $2k+1$ 。定理得证。

再考察 Walsh 函数在区间 $[0, 1)$ 上的变号次数, 不言而喻, 每通过一个间断点函数变号 1 次。如果视 Walsh 函数为周期 1 的周期函数, 那么在区间的左端点 $x=0$, 奇下标的 $W_{2k-1}(x)$ 变号, 而偶下标的 $W_{2k}(x)$ 不变号, 这样, $W_{2k}(x)$ 与 $W_{2k-1}(x)$ 在区间 $[0, 1)$ 上的变号次数均等于 $2k$ 。通常称变号次数的一半为 Walsh 函数的序率, 从而有

定理 2 正弦 Walsh 函数 $S_k(x) = W_{2k-1}(x)$ 与余弦 Walsh 函数 $C_k(x) = W_{2k}(x)$ 的序率均等于 k 。

3 Paley 序的 Walsh 函数

3.1 Paley 序 Walsh 函数的演化生成

我们再换一个角度考察方波函数 $R(x)$ 与 Haar 函数的联系。事实上, 它们两者亦可看成是由 $R(x)$ 经下列对偶法则演化的结果(见图 1):

0 法则——将所给函数压缩到区间的左半侧, 并令左右两侧呈平移对称;

1 法则——将所给函数压缩到区间的左半侧, 并令左右两侧呈反射对称。

我们称上述对偶法则为 Paley 演化法则。再对 Haar 函数反复施行上述 Paley 法则, 演化过程如图 9 所示。

比较图 9 与图 6 可以看出, 以上两种演化过程所生成的函数是一样的, 只是排列次序不同。按上述演化法则生成的 Walsh 函数系称作是 Paley 序的。

3.2 Paley 序的递推性

我们将 Paley 序的 Walsh 函数系仍排列成图 7 所示的形式, 即每个函数 $W_k(x)$ 生成两个函数 $W_{2k}(x)$ 与 $W_{2k+1}(x)$, 它们分别列于图 7 下一层的左右两侧, 则由 Paley 演化法则的含义, 其对应于式(2)的双尺度关系式为

$$\begin{cases} W_{2k}(x) = W_k(2x) + W_k(2x - 1) \\ W_{2k+1}(x) = W_k(2x) - W_k(2x - 1) \end{cases} \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

特别当 $k=0$ 时上式同样退化式为(1)。

3.3 Paley 序的对称性

再考察 $W_k(x)$ 按 Paley 演化法则生成的两个函数 $W_{2k}(x)$ 与 $W_{2k+1}(x)$, 依演化法则的具体含义知, $W_{2k}(x)$ 呈平移对称, 而 $W_{2k+1}(x)$ 则呈反射对称。设以阴影标志平移对称, 而以非阴影标志反射对称, 则 Paley 序的平移对称特性仍可用图 4 来刻画。

比较描述平移对称特性的两张特征图——Walsh 序的图 8 与 Paley 序的图 4 可以看出, 前者呈反射对称, 而后者则呈平移对称。这一事实给予我们什么样的启示呢? 参照这两张图不难理解下文所阐述的 Paley 序与 Walsh 序的调序法则。

3.4 Paley 序的调序法则

需要指出的是, Walsh 函数 $W_k(x)$ 与由它按 Paley 法则演化生成的 $W_{2k}(x)$, 两者的奇偶对称性是一致的, 即当 $W_k(x)$ 为偶时 $W_{2k}(x)$ 亦为偶, 而当 $W_k(x)$ 为奇时 $W_{2k}(x)$ 亦为奇。这样, 在将其调整到 Walsh 序, 当 $W_k(x)$ 为偶时其生成的两个函数顺序不变, 而当 $W_k(x)$ 为奇时其生成的两个函数则需要调换次序。

设 Paley 序的 Walsh 函数已排列成图 7 的形式。我们依图逐层将它调整为 Walsh 序时。由于第 0 层的 W_1 为奇, 它所生成的第 1 层的两个函数需要调序, 即需将 W_3 排在 W_2 的前面, 如图 10 的第一层所示。

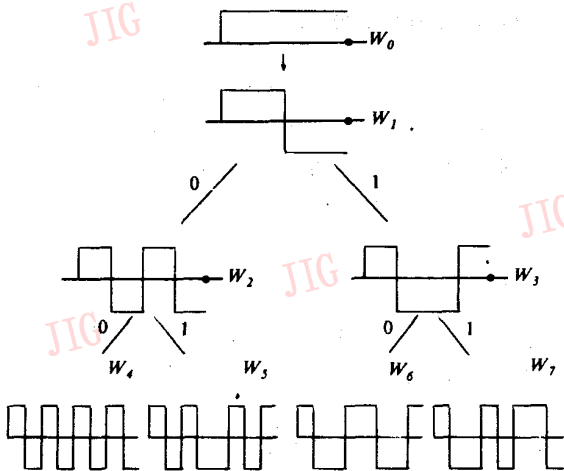


图 9

Fig. 9

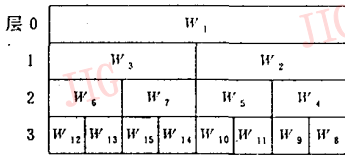


图 10

Fig. 10

再从第 1 层到第 2 层,我们不改变由偶的 W_3 生成的 W_6 和 W_7 的排列顺序,而将奇的 W_2 生成的 W_5 调到 W_4 的前面,这样就将 Paley 序的第 2 层(见图 7)调成了图 10 Walsh 序的第 2 层。如此继续下去。

表 1

Table 1

Walsh 序	0	1	2	3	4	5	6	7
	000	001	010	011	100	101	110	111
Paley 序	000	001	011	010	110	111	101	100
	0	1	3	2	6	7	5	4

一般地,设图 10 的第 k 层已从 Paley 序调整为 Walsh 序,即这时第 k 层函数的奇偶性与位置序号的奇偶性相一致,为将第 $k+1$ 层再调整为 Walsh 序,只要不改变偶函数(即位置序号为偶的函数)的演化顺序,而仅改变奇函数(即位置序号为奇的函数)的演化顺序即可。

考察以上两种排序方式的对应关系,比较图 7 与图 10 可知,两种序的对应关系如表 1 所示。我们看出,从 Paley 序调整到 Walsh 序,实质上是将二进制码调整为 Gray 码,即施行码位反射对称手续的结果。

4 Hadamard 序的 Walsh 函数

4.1 Hadamard 序 Walsh 函数的演化生成

我们再运用 Hadamard 法则演化生成 Walsh 函数系。Hadamard 法则的演化手续与 Paley 法则相一致,不同之处在于,它是针对某个函数族进行“批量处理”。

Hadamard 法则含有“分解”与“合成”两上环节,其分解法则其实就是 Paley 法则,即对所给函数族中每个函数依次施行 Paley 法则的 0 法则与 1 法则(参看上一节);而合成法则的含义则是将以上 1 法则所生成的一组函数顺序排列在 0 法则生成函数的后面,两者归并成一个新的函数族。这样生成的 Walsh 函数系称 Hadamard 序。

我们取方波函数 $R(x)$ 作为第 0 族 Walsh 函数,依上述 Hadamard 法则进行加工。值得注意的是,在这一演化过程中,函数族所包含的函数个数是逐步倍增的,即第 m 族含有 2^m 个函数,记之为 $W_j^{(m)}$, $j=0,1,\dots,2^m-1$ 。图 11 描述了 Hadamard 序的演化过程。

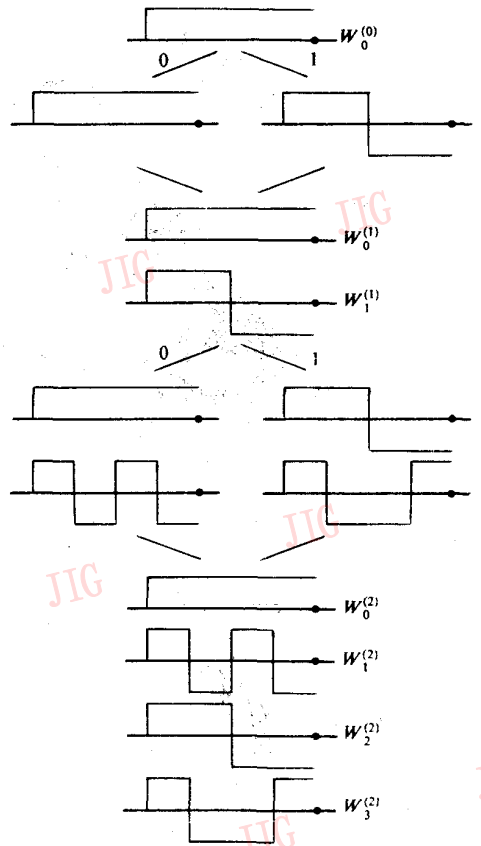


图 11

Fig. 11

4.2 Hadamard 序的自相似性

Hadamard 序的演化方式有个显著的特点(图 11 和图 12),如果将演化后生成的函数图象 $W^{(k)}$ 对分成 4 块,那么上左、上右、下左三块都是演化前的函数图象 $W^{(k-1)}$,而下右部分则是 $-W^{(k-1)}$ 的图象(图 12)。图中的每块 $W^{(k-1)}$ (或 $-W^{(k-1)}$)又可继续划分为 $W^{(k-2)}$ 的子块,这样逐步划分下去,最终归结为 $W^{(0)}$,即简单的方波函数 $R(x)$ 。

由此可见,Hadamard 序的 Walsh 函数系,在结构上具有局部与整体的对称性,即其结构具有自相似性。

利用结构上的自相似性,可以方便地构造出

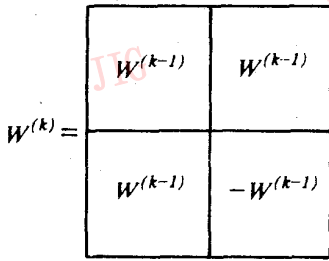


图 12
Fig. 12

Walsh 函数系。如图 13 所示,我们从左上角的 $W^{(0)}$ 出发,利用自相似性演化三次,即得 Hadamard 序的函数族 $W^{(3)}$ (图 14)。

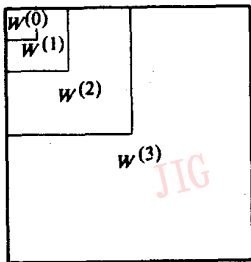


图 13
Fig. 13

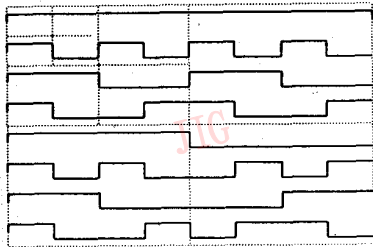


图 14
Fig. 14

4.3 Walsh 函数系的正交性

借助于 Walsh 函数系的自相似性容易证明其正交性。

定理 3 Walsh 函数系是个正交系。

证明 显然 $W^{(1)}$ 中两个函数(即方波函数与 Haar 函数)彼此正交。假定 $W^{(k-1)}$ 是一族正交函数,考察 $W^{(k)}$ 中两个函数 $W_i^{(k)}$ 与 $W_j^{(k)}$ 。若 $W_i^{(k)}$ 与 $W_j^{(k)}$

左半侧的图象不同,则由 $W^{(k-1)}$ 的正交性即可断定 $W_i^{(k)}$ 与 $W_j^{(k)}$ 彼此正交;若 $W_i^{(k)}$ 与 $W_j^{(k)}$ 分属于 $W^{(k)}$ 的前后两段,则它们左半侧的函数相同,再注意到两者右半侧的函数互为反号,因之它们仍然是正交的。定理证毕。

4.4 Hadamard 序的调序法则

再考察运用 Hadamard 法则从 $W^{(k-1)}$ 到 W^k 的演化过程,我们知道, $W^{(k)}$ 的前半段实际上是 $W^{(k-1)}$ 中每个函数施行 Paley—0 法则的结果,因之,其中 Paley 序为 j 的函数,演化后 Paley 序变为 $2j$,即将 j 的二进制数升高一阶并添加尾数 0。同理, $W^{(k)}$ 的后半段是将原先 Paley 序为 j 的函数,演化后 Paley 序变为 $2j+1$,即将 j 的二进制升高一阶并添加尾数

1. 譬如有

$$W^{(1)}: (0, 1)$$

$$W^{(2)}: (00, 10; 01, 11)$$

$$W^{(3)}: (000, 100, 010, 110; 001, 101, 011, 111)$$

则两种序号的对应关系如表 2 所示。

表 2

Table 2

	$W^{(1)}$	$W^{(2)}$	$W^{(3)}$
Hadamard 序	0 1	00 01 10 11	000 001 010 011 100 101 110 111
Paley 序	0 1	00 10 01 11	000 100 010 110 001 101 011 111

由此可以看出:

定理 4 将二进制形式的 Hadamard 序的高低码位相对调,所生成的“反写码”即为相应的 Paley 序。

反之亦然, Paley 序的反写码即相应的 Hadamard 序。

上述论断不难用数学归纳法给予证明。

参考文献

[1] A. Einstein(许良英等译). 爱因斯坦文集. 第一卷. 北京, 商务印书馆, 1976.
 [2] 王能超. 同步并行算法设计的二分技术. 中国科学(A 辑), 1995, 25(2): 207—211.



王能超, 教授, 华中理工大学并行计算研究所所长。近年的主要研究方向是并行计算与数学软件, 小波分析与信号处理。主要著作有:《数值分析简明教程》和《数值算法设计》等。

Walsh Functions Generated with Evolution

Wang Nengchao

(Parallel Computation Research Institute, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract This paper is aimed at describing how Walsh Functions are generated with evolution by using bi-section techniques and discussing the basic properties of Walsh Functions from the evolution point of view.

Keywords Walsh functions, Evolutional rules, Taiji thinking

单位巡礼

资源与环境信息系统的應用基础研究

中国科学院地理研究所资源与环境信息系统国家重点实验室简介

资源、环境与人口是当今人类社会、信息时代面临挑战的焦点。因此,酷爱人类居住的星球乃是全球性关注的重大课题。

诚然,科学地掌握、运用信息流是揭示地球系统科学的重要技术手段,也是实施人地系统的关键措施。

地球信息科学(Geo-informatics)的兴起,正是信息社会这一新世纪的发展特点。陈述彭院士认为,地球信息科学是多学科的理论渗透,技术集成与融合,创立新思想、新概念,形成综合解决地球科学复杂巨系统的新学科。其理论上是旨在解决地球信息问题。

中国科学院地理研究所资源与环境信息系统国家重点实验室,就是以资源与环境为主要研究和服务对象,面向地理信息系统应用基础研究与实验的,例如,资源与人口质量问题,区域开发与环境保护问题,持续发展研究与环境协调问题等等。

所以,以地球信息机理、地球信息综合分析模型及决策支持系统应用为重点的基础研究,是探索的重点,其主要内容如:

地球信息机理的研究:它包括地球信息的表征、传输、响应和图象机理的理论分析等。

资源与环境信息空间综合分析模式理论与应用软件研究:它们诸如空间信息时空分析模型、人地关系机制、响应模拟、系统调控和预测对策研究。其包括空间数据结构、模型建造及数据格式转换的理论、程序设计方法研究等;

信息网络与系统集成理论和方法的研究:比如系统处理技术、网络技术与智能决策技术的一体化研究以及分析模型集成理论和系统集成的关键技术等;

信息资源共享与系统规范标准化研究:加强地理信息标准化、推动信息共享。开展系统规范化与立法研究,做好地球信息产品的开发,积极推动地球信息科学的发展。

以上应用基础研究,其主要的应用领域和方向大致是:

1、重大自然灾害的监测与评估信息系统的研究。运用遥感(RS)与地理信息系统(GIS)和全球定位系统(GPS)技术,对重大自然灾害的动态监测与评估分析。主要侧重于各种灾害分类、危险度分区的体系和原则拟定;不同灾种监测评价的指标,分析模型以及抗灾减灾辅助决策支持系统、快速反应系统和灾害损失评估系统的研制等。

2、资源与环境分析模型与区域开发模式的实验研究。结合我国典型地区,研究区域发展模型,探讨空间时空信息分析模型、专题分析模型建造与集成的理论与方法,据事物现象的区域分异规律及其分形分维特征,研究其模型的参数、量化和表达方式。从各专业知识中归纳演绎,以建立具有智能化、决策的时空分析模型及集成系统环境,以信息时代高技术工具开发新的应用领域。

3、城市地理信息系统和城市地理分析与制图研究。城市与城市化的发展,促进了城市规划与管理的科研工作。例如,城市投资环境的评价、城市土地分等定级、土地增值评价和土地价格分析与城市地价动态监测等等的研究;它们包括城市系统分析的各种应用模型(如城市网络分析模型,投资环境评价模型等)及评价因子选取、指标量化和制图规范、技术规程的研究,以推动城市管理现代化。

4、区域持续发展与全球变化区域模式研究。以具有特殊意义的海岸带,运用高新技术分析研究全球变化是当今地球系统科学应用的一个重要领域。它们如海岸带环境演变分析、海岸带海陆互作研究及其与区域持续发展的关系等,以探讨全球变化的区域模式。

通过上述地球信息机理、空间分析模型和系统集成技术以及地球信息产品的综合开发研究,旨在形成地球信息科学、技术与产业新体系,为人类提供全方位的信息服务。

(傅肃性)