

互连网络的 m 层二进制图模型

师海忠¹ 师越²

(西北师范大学数学与统计学院 兰州 730070)¹ (图科技大数据研究中心 兰州 730070)²

摘要 超立方体、交叉立方体、Möbius 立方体以及折叠立方体等都是著名的互连网络。它们有一个共同的弱点:其结点度随着网络规模(结点数)的增大而增大。这意味着依此互连网络设计出的超级计算机的扩展性很差。能否构建出既能保持它们已有特性又能使结点度固定的互连网络呢? 现提出互连网络的 m 层二进制图模型,并依此模型设计了分别由超立方体、交叉立方体、Möbius 立方体以及折叠立方体等生成的 m 层超立方体、 m 层交叉立方体、 m 层 Möbius 立方体以及 m 层折叠立方体。特别地, m 层超立方体有一个特点:结点度可以不随网络规模的增大而增大,而且具有超立方体的特性。另外,还提出了由已知图生成 m 层图的概念。

关键词 m 层超立方体, m 层交叉立方体, m 层 Möbius 立方体, m 层折叠立方体, m 层二进制图

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

M-layers Binary Graph Model for Interconnection Networks

SHI Hai-zhong¹ SHI Yue²

(College of Mathematics and Statistics, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)¹

(Research Center of Big Data & Graph Tech, Lanzhou 730070, China)²

Abstract All of the hypercube, crossed cube, Möbius cube and Folded cube are famous interconnection networks. They have a common weak: its degree of node in Hypercube (crossed cube, Möbius cube or folded cube) increases with the increase of network scale (number of nodes). It means that the scalability of the super computer whose interconnection network is Hypercube is weak. Can we design the interconnection network that has features of Hypercube and fixed degree of nodes? In this paper, we proposed m -layers binary graph model for interconnection networks. From the model, we designed new interconnection networks— m -layers hypercube, m -layers crossed cube, m -layers möbius cube and m -layers folded cube. Especially, m -layers hypercube have a feature: the degree of node in m -layers hypercube can not increase with the increase of newtork scale and it almost has all features of hypercube. In addition, we proposed the concept of m -layers graph generated by given graph.

Keywords M -layers hypercube, M -layers crossed cube, M -layers Möbius cube, M -layers folded cube, M -layers binary graph

1 引言

互连网络是超级计算机的重要组成部分。互连网络的性能在某种程度上决定着超级计算机的性能。互连网络通常被模型化为一个图,图的结点对应处理机,图的边对应着处理机间的通信链路/信道。高性能和低成本是设计者设计超大规模互连网络时所必须遵循的两大基本原则,也是网络设计者所追求的目标。但影响网络性能和成本的因素很多。王鼎兴和陈国良^[1]阐述了结构因素。Bermond 和 Peyrat^[2]总结了这些原则。徐俊明^[3-4]再次对其加以阐述。这些原则是:1)小的固定结点度(smaller fixed degree);2)小的通信传输延迟(small transmission delay);3)简单的路由算法(easy routing algorithm);4)均匀性(uniformity)或对称性(symmetry);5)高容错性(maximum fault tolerance);6)可扩展性(extend-

ability);7)可嵌入性(embeddebility of other topologies);8)有效的布局算法(efficient layout of VLSI circuits)。

上面所列的原则相互之间也包含着矛盾,例如,小的结点度和大的连通度,等。因此,网络的最优设计是指对影响网络费用和性能的各种因素进行较好的权衡(trade-off)。

Andr 等^[5]和 Leighton^[6]设计出了著名的互连网络——超立方体(hypercube)。Efe^[7-8]设计出了交叉立方体(crossed cube)。Cull 与 Larson^[9]设计出了 Möbius 立方体(Möbius cube)。El-Amawy 与 Latifi^[10]设计出了折叠立方体(folded cube)。徐俊明^[3-4]综述了这些互连网络。这些网络有很多优良的性能^[11-18],但都有一个共同的弱点:网络的结点度随网络规模(结点数)的增大而增大。这给依此互连网络建造的超级计算机在扩展规模升级时带来了很大的困难。文中提出了互连网络的 m 层二进制图模型,依此模型设计出了 m 层超立

师海忠(1962—),男,博士,教授,主要研究方向为互连网络设计与分析、(V,R)-语言、无向图语言、有向图语言、超图语言、随机图语言、(V,R)-半群、图半群、随机图半群、计算语言学、网络科学, E-mail: haizhong.shi@163.com(通信作者);师越(1991—),男,硕士,主要研究方向为网络科学与语言、经济网络、供应链管理等。

方体、 m 层交叉立方体、 m 层 Möbius 立方体以及 m 层折叠立方体。特别地, m 层超立方体的结点度可以不随网络规模(结点数)的增大而增大。师海忠^[19-22]提出了互连网络的多部群论模型和正则连通圈模型。

本文第 2 节阐述了如何由已知连通图构造新图;第 3 节由超立方体或其变种生成 m 层 n 维二进制网络;最后总结全文。

2 由已知连通图构造新图

2.1 已知连通图的结点集为全体 n 维二进制数的集合

令:

$$A^2 = \{x_1 x_2 \cdots x_n \mid x_i \in \{0, 1\}, i=1, 2, \dots, n \text{ 且 } \sum_{i=1}^n x_i \text{ 为偶数}\}$$

$$B^2 = \{x_1 x_2 \cdots x_n \mid x_i \in \{0, 1\}, i=1, 2, \dots, n \text{ 且 } \sum_{i=1}^n x_i \text{ 为奇数}\}$$

已知无向连通图 $G(A^2 \cup B^2, E)$, 其中, $A^2 \cup B^2$ 为 G 的结点集, E 为 G 的边集。

令:

$$A_k^2 = \{(2k, x_1 x_2 \cdots x_n) \mid x_1 x_2 \cdots x_n \in A^2\}, k \in Z_m$$

$$B_k^2 = \{(2k+1, x_1 x_2 \cdots x_n) \mid x_1 x_2 \cdots x_n \in B^2\}, k \in Z_m$$

其中, Z_m 为模 m 的剩余类。

$$V(m, A^2, B^2) = \bigcup_{k=1}^m (A_k^2 \cup B_k^2)$$

易知, 对任意 $x, y \in V(m, A^2, B^2)$, 存在 $p, q \in Z_{2m}$ 和 $x_1 x_2 \cdots x_n, y_1 y_2 \cdots y_n \in A^2 \cup B^2$ 使得:

$$(1) x = (p, x_1 x_2 \cdots x_n), y = (q, y_1 y_2 \cdots y_n);$$

$$(2) p = q, x_1 x_2 \cdots x_n, y_1 y_2 \cdots y_n \text{ 同时属于 } A^2 \text{ 或 } B^2;$$

(3) $|p - q| = 1 \pmod{2m}$, $x_1 x_2 \cdots x_n$ 和 $y_1 y_2 \cdots y_n$ 中一个属于 A^2 , 另一个属于 B^2 。

定义 1 给定连通图 $G(A^2 \cup B^2, E)$, 构造图 $G[m, A^2, B^2]$ 如下:

$$(1) \text{ 结点集为 } V(m, A^2, B^2);$$

(2) 结点 $x = (p, x_1 x_2 \cdots x_n)$ 和结点 $y = (q, y_1 y_2 \cdots y_n)$ 之间连一条边, 当且仅当下述条件之一成立, 则称 $G[m, A^2, B^2]$ 为由 $G(A^2 \cup B^2, E)$ 生成的 m 层 n 维二进制图。

1) $p = q, x_1 x_2 \cdots x_n$ 和 $y_1 y_2 \cdots y_n$ 同时属于 A^2 或 B^2 且在 $G(A^2 \cup B^2, E)$ 中连一边;

2) $|p - q| = 1 \pmod{2m}$, $x_1 x_2 \cdots x_n$ 和 $y_1 y_2 \cdots y_n$ 中一个属于 A^2 , 另一个属于 B^2 且在 $G(A^2 \cup B^2, E)$ 中连一边。

2.2 已知图有偶数 $(2n)$ 个结点的情形

设已知图 G 的结点集 V 划分为满足下列条件的两个子集 A 和 B :

$$(1) A \cup B = V;$$

$$(2) A \cap B = \emptyset;$$

$$(3) |A| = |B| = n.$$

令:

$$A_k = \{(2k, x) \mid x \in A\}, k \in Z_m;$$

$$B_k = \{(2k+1, x) \mid x \in B\}, k \in Z_m.$$

其中, Z_m 是模 m 剩余类加群。

$$\text{令 } V(m, A, B) = \bigcup_{k=1}^m (A_k \cup B_k).$$

易知, 对任意 $x, y \in V(m, A, B)$, 存在 $p, q \in Z_{2m}$ 和 $x_0, y_0 \in A \cup B$, 使得:

$$(1) X = (p, x_0), y = (q, y_0);$$

$$(2) p = q, x_0 \text{ 和 } y_0 \text{ 同时属于 } A \text{ 或 } B;$$

(3) $|p - q| = 1 \pmod{2m}$, x_0 和 y_0 中一个属于 A , 另一个属于 B 。

定义 2 构造图 $G[m, A, B]$:

$$(1) \text{ 结点集为 } V(m, A, B);$$

(2) 结点 $x = (p, x_0)$ 和结点 $y = (q, y_0)$ 之间连一条边, 当且仅当下述条件之一成立, 则称 $G[m, A, B]$ 为由 G 生成的 m 层 n 维二进制图。

$$1) p = q, x_0, y_0 \text{ 同时属于 } A \text{ 或 } B \text{ 且在 } G \text{ 中连一边};$$

2) $|p - q| = 1 \pmod{2m}$, x_0 和 y_0 一个属于 A 中另一个属于 B 且在 G 中连一边。

2.3 已知图为二分图 $G(A, B)$ 的情形

设已知图 G 为二分图 $G(A, B)$, 则:

$$(1) A \cup B = V;$$

$$(2) A \cap B = \emptyset.$$

令:

$$A_k = \{(2k, x) \mid x \in A\}, k \in Z_m$$

$$B_k = \{(2k+1, x) \mid x \in B\}, k \in Z_m$$

其中, Z_m 是模 m 剩余类加群。

令:

$$V(m, A, B) = \bigcup_{k=1}^m (A_k \cup B_k)$$

易知, 对任意 $x, y \in V(m, A, B)$, 存在 $p, q \in Z_{2m}$ 和 $x_0, y_0 \in A \cup B$, 使得:

$$(1) X = (p, x_0), y = (q, y_0);$$

$$(2) p = q, x_0 \text{ 和 } y_0 \text{ 同时属于 } A \text{ 或 } B;$$

(3) $|p - q| = 1 \pmod{2m}$, x_0 和 y_0 中一个属于 A , 另一个属于 B 。

定义 3 给定二分图 $G(A, B)$, 构造图 $G[m, A, B]$:

$$(1) \text{ 结点集为 } V(m, A, B);$$

(2) 结点 $x = (p, x_0)$ 和结点 $y = (q, y_0)$ 之间连一条边, 当且仅当下述条件成立, 则称 $G[m, A, B]$ 为由二分图 $G(A, B)$ 生成的 m 层 n 维二进制图。

$|p - q| = 1 \pmod{2m}$, x_0 和 y_0 中一个属于 A , 另一个属于 B 且在 $G(A, B)$ 中连一边。

3 由超立方体或其变种生成的 m 层 n 维二进制网络

3.1 由 n 维超立方体生成的 m 层 n 维二进制网络

定义 4 在定义 1 中, 取 $G(A^2 \cup B^2, E)$ 为超立方体 Q_n , 其中:

$$A^2 = \{x_1 x_2 \cdots x_n \mid x_i \in \{0, 1\}, i=1, 2, \dots, n \text{ 且 } \sum_{i=1}^n x_i \text{ 为偶数}\}$$

$$B^2 = \{x_1 x_2 \cdots x_n \mid x_i \in \{0, 1\}, i=1, 2, \dots, n \text{ 且 } \sum_{i=1}^n x_i \text{ 为奇数}\}$$

那么, $G[m, A^2, B^2]$ 称为由超立方体 Q_n 生成的 m 层 n 维二进制网络, 记为 $Q_n(m, A^2, B^2)$ 。

3.2 由 n 维交叉立方体生成的 m 层 n 维二进制网络

定义 5 在定义 1 中, 取 $G(A^2 \cup B^2, E)$ 为交叉立方体 CQ_n , 其中:

$$A^2 = \{x_1 x_2 \cdots x_n \mid x_i \in \{0, 1\}, i=1, 2, \dots, n \text{ 且 } \sum_{i=1}^n x_i \text{ 为偶数}\}$$

$$B^2 = \{x_1 x_2 \cdots x_n \mid x_i \in \{0, 1\}, i=1, 2, \dots, n \text{ 且 } \sum_{i=1}^n x_i \text{ 为奇数}\}$$

那么 $G[m, A^2, B^2]$ 称为由交叉立方体 CQ_n 生成的 m 层 n 维二进制网络, 记为 $CQ_n(m, A^2, B^2)$ 。

3.3 由 n 维 Möbius 立方体生成的 m 层 n 维二进制网络

定义 6 在定义 1 中, 取 $G(A^2 \cup B^2, E)$ 为 Möbius 立方体 $0-MQ_n(1-MQ_n)$, 其中:

$$A^2 = \{x_1 x_2 \cdots x_n \mid x_i \in \{0, 1\}, i=1, 2, \dots, n \text{ 且 } \sum_{i=1}^n x_i \text{ 为偶数}\}$$

$$B^2 = \{x_1 x_2 \cdots x_n \mid x_i \in \{0, 1\}, i=1, 2, \dots, n \text{ 且 } \sum_{i=1}^n x_i \text{ 为奇数}\}$$

那么 $G[m, A^2, B^2]$ 称为由 Möbius 立方体 $0-MQ_n(1-MQ_n)$ 生成的 m 层 n 维二进制网络, 记为 $0-MQ_n(m, A^2, B^2) (1-MQ_n(m, A^2, B^2))$ 。

3.4 由 n 维折叠立方体生成的 m 层 n 维二进制网络

定义 7 在定义 1 中, 取 $G(A^2 \cup B^2, E)$ 为折叠立方体 FQ_n , 其中:

$$A^2 = \{x_1 x_2 \cdots x_n \mid x_i \in \{0, 1\}, i=1, 2, \dots, n \text{ 且 } \sum_{i=1}^n x_i \text{ 为偶数}\}$$

$$B^2 = \{x_1 x_2 \cdots x_n \mid x_i \in \{0, 1\}, i=1, 2, \dots, n \text{ 且 } \sum_{i=1}^n x_i \text{ 为奇数}\}$$

那么 $G[m, A^2, B^2]$ 称为由折叠立方体 FQ_n 生成的 m 层 n 维二进制网络, 记为 $FQ_n(m, A^2, B^2)$ 。

4 $Q_n(m, A^2, B^2)$ 和 $FQ_n(m, A^2, B^2)$ 的性质

引理 1^[3-4] (1) Q_n 是 n 正则二部图 (A^2, B^2) , 有 2^n 个结点和 $n2^{n-1}$ 条边。

(2) Q_n 是 Hamilton 可分解的。也就是说, 当 n 为偶数时, Q_n 是 $n/2$ 个边不交 Hamilton 圈的并; 当 n 为奇数时, Q_n 是边不交的 $n/2$ 个 Hamilton 圈和一个完美对集的并。

(3) Q_n 的连通度和边连通度都为 n 。

(4) Q_n 的直径为 n 。

由引理 1 易知如下定理 1。

定理 1 (1) $Q_n(m, A^2, B^2)$ 有 $m2^n$ 个结点和 $nm2^n$ 条边, 是 $2n$ 正则图。

(2) $Q_n(m, A^2, B^2)$ 是 n 个边不交 Hamilton 圈的并。

(3) 当 n 为偶数时, $Q_n(m, A^2, B^2)$ 是边不交的 $2m(n/2)$ 个长为 2^n 的圈的并; 当 n 为奇数时, $Q_n(m, A^2, B^2)$ 是边不交的 $2m((n-1)/2)$ 个长为 2^n 的圈和 2^{n-1} 个长为 $2m$ 的圈的并。

(4) $Q_n(m, A^2, B^2)$ 的连通度和边连通度均为 $2n$ 。

(5) $Q_n(m, A^2, B^2)$ 的直径为 $m-1+n$ 。

(6) $Q_n(m, A^2, B^2)$ 是边不交的 $n2^{n-1}$ 个长为 $2m$ 的圈的并。

引理 2^[3-4] 设 n 为奇数, 则:

(1) FQ_n 是 $n+1$ 正则二部图 (A^2, B^2) , 有 2^n 个结点及 $(n+1)2^{n-1}$ 条边。

(2) FQ_n 是边不交的 $(n-1)/2$ 个 Hamilton 圈和两个完美对集的并。

(3) FQ_n 的连通度和边连通度都为 $n+1$ 。

(4) FQ_n 的直径为 $\lceil n/2 \rceil$ 。

由引理 2 易知定理 2。

定理 2 设 n 为奇数, 则:

(1) $FQ_n(m, A^2, B^2)$ 有 $m2^n$ 个结点及 $(n+1)m2^n$ 条边, 是 $2(n+1)$ 正则图。

(2) $FQ_n(m, A^2, B^2)$ 是边不交的 $n-1$ 个 Hamilton 圈和

2^n 个长为 $2m$ 的圈的并。

(3) $FQ_n(m, A^2, B^2)$ 是边不交的 $2m((n-1)/2)$ 个长为 2^n 的圈和 2^n 个长为 $2m$ 的圈的并。

(4) $FQ_n(m, A^2, B^2)$ 的连通度和边连通度均为 $2(n+1)$ 。

(5) $FQ_n(m, A^2, B^2)$ 的直径为 $m-1+\lceil n/2 \rceil$ 。

(6) $FQ_n(m, A^2, B^2)$ 是边不交的 $(n+1)2^{n-1}$ 个长为 $2m$ 的圈的并。

结束语 $Q_n(m, A^2, B^2)$ 和 $FQ_n(m, A^2, B^2)$ (n 为奇数) 是文中设计出的两类新的互连网络。它们除了分别具有超立方体 Q_n 和折叠立方体 FQ_n 的性质外, 还具有如下性质: 结点的度可以不随网络规模(结点数)的增大而增大, 即具有更好的可扩展性。它们的性质有待进一步的研究。另外, 还给出了两个新的概念——由已知图 $G(A^2, B^2, E)$ 生成的 m 层 n 维二进制图 $G[m, A^2, B^2]$ 和由已知图 G 生成的 m 层图 $G[m, A, B]$ 。这些图的性质有待进一步的研究。

参考文献

- [1] 王鼎兴, 陈国良. 互连网络结构分析[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [2] BERMOND J C, PEYRAT C. De Bruijn and Kautz networks: A competitor for the hypercube? [M]// Andre F, Verjus J P, eds. Hypercube and Distributed Computer. North-Holland; Elsevier Science Publishers, 1984; 300-343.
- [3] 徐俊明. 组合网络理论[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] XU J M. Combinatorial Theory in Networks[M]. Science Press, Beijing, 2013.
- [5] ANDRE F, VERJUS J P. Hypercubes and Distributed Computers[M]. Amsterdam, New York, Oxford: North-Holland, 1989.
- [6] LEIGHTON F T. Introduction to Parallel Algorithms and Architectures[M]// Introduction to Parallel Algorithms and Architectures; Rings, Trees, Hypercubes. San Mateo, California: Morgan Kaufman Publishers, 1992.
- [7] EFE K. A Variation on the hypercube with lower diameter[J]. IEEE Transactions on Computers, 1991, 40(11): 1312-1316.
- [8] EFE K. The crossed cube architecture for parallel computing [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 1992, 3(5): 31-42.
- [9] CULL P, LARSON S M. The Möbius cubes[J]. IEEE Transactions on Computers, 1995, 44(5): 647-659.
- [10] EL-AMAWY A, LATIFI S. Properties and performance of folded hypercubes[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 1991, 2(3): 31-42.
- [11] KULASINGHE P, BETTAYEB S. Embedding binary tree into crossed cubes[J]. IEEE Transactions on Computers, 1995, 44(7): 923-929.
- [12] 马美杰, 徐俊明. Edge-pancyclicity of crossed cubes[J]. 中国科学技术大学学报, 2005, 35(3): 329-333.
- [13] FAN J X, LIN X L, JIA X H. Node-pancyclicity and edge-pancyclicity of crossed cubes[J]. Information Processing Letters, 2005, 93(3): 133-138.
- [14] XU M, XU J M. Edge-pancyclicity of Möbius cubes[J]. Information Processing Letters, 2005, 9(4): 136-140.

- [15] HUANG W T, CHEN W K, CHEN C H. Pancyclicity of Möbius cubes[C]// Proceedings of the Ninth International Conference on Parallel and Distributed Systems(ICPADS'02). 2002: 591-596.
- [16] FAN J X. Hamilton-connectivity and cycle-embedding of Möbius cubes[J]. Information Processing Letters, 2005, 93(3): 133-138.
- [17] SIM E, YEBRA J L A. The vulnerability of diameter of folded cubes[J]. Discrete Mathematics, 1997, 174(3): 317-302.
- [18] XU J M, L M. On restricted edge-connectivity of regular di-

graphs[J]. Taiwan Journal of Mathematics, 2005, 9(4): 661-670.

- [19] 师海忠. 互连网络的新模型: 多部群论模型[J]. 计算机科学, 2013, 40(9): 21-24.
- [20] 师海忠. 正则图连通圈: 多种互连网络的统一模型[C]//中国运筹学会第十届学术交流会论文集. 2010: 202-208.
- [21] 张欣, 师海忠. 交叉立方体连通圈网络的 Hamilton 分解[J]. 软件, 2015, 36(8): 92-98.
- [22] 王海峰, 师海忠. Möbius 超立方体网络的 Hamilton 分解[J]. 软件, 2015, 36(10): 85-89.

(上接第 268 页)

令 J 值为 3, 确定 K 的最优值, 如表 1(b) 所列, 可知当 K 为 5 时识别精度最高。从表 2 可知, 2D 距离法在所有的实验中精度最低; 体积距离法在每类训练图较多时精度最高, 一般性能随每个类的训练图数量的增加而增加; Row-KNN 算法在每个类训练数量较少时精度最好, 成为了最有效的计算方法。

表 1 K, J 的最优值计算

(a) $K=5$ 时 Row-KNN 的分辨精度/%

J 值	1	2	3	4	5
特征向量值					
1	79.5	74.5	69.5	65.0	63.0
2	94.5	93.5	93.0	92.0	93.5
3	96.0	96.0	95.5	95.0	94.5
4	96.5	97.0	98.0	95.5	95.5
5	96.0	97.5	96.5	95.0	95.0
6	97.0	96.5	97.0	94.5	94.0
7	97.5	96.5	97.0	95.0	96.5
8	96.5	96.5	96.5	95.0	96.0
9	96.5	96.5	97.0	95.5	97.0
10	96.0	96.0	95.5	95.0	96.0

(b) $J=3$ 时 Row-KNN 的分辨精度/%

K 值	1	2	3	4	5	6	7
特征向量值							
1	44.0	55.0	58.5	67.0	69.5	72.0	72.5
2	84.5	89.5	92.0	93.0	93.0	94.5	95.5
3	90.0	92.5	95.0	96.0	95.5	97.0	97.5
4	90.0	92.5	95.0	96.0	95.5	97.0	97.5
5	94.0	96.0	97.5	97.0	98.0	97.5	96.5
6	94.5	96.5	97.0	96.0	97.0	96.0	96.0
7	94.5	96.5	97.0	96.5	97.0	96.0	96.0
8	95.5	96.0	96.0	96.0	96.5	96.5	96.0
9	97.0	96.0	96.0	95.0	97.0	97.5	96.5
10	96.5	96.5	96.0	95.0	95.5	96.0	96.5

表 2 ORL 数据库的实验结果

距离算法	精确度/%	特征数
2D 测距	95.5	366
列测距	96.0	366
AMD 测距	97.0	366
体积测距	98.0	366
本文算法	98.0	149

3.2 应用于 Yale 数据库实验结果

Yale 数据库包含 15 个人的 165 幅灰度图像, 尺寸为 243×320 , 图像有不同的表情和光照, 通常条件下, 中心光线、无配

镜、左侧光源、右侧光源、配镜作为训练图像, 困倦、眨眼、高兴、悲伤、惊讶等表情用于测试图像。从表 3 可以看出, 体积距离和 Row-KNN 方法的准确度最高, 但是 Row-KNN 需要较少的特征数。

表 3 Yale 数据库实验结果

距离算法	精确度	特征数
2D 测距	94.66	2000
列测距	97.33	1000
AMD 测距	98.66	1500
体积测距	100	500
本文算法	100	433

结束语 合理地使用特征矩阵的乘法特性可以在准确性、处理时间和存储能力方面取得较好的效果。实验表明, 在 2D 矩阵中, 本文提到的所有算法中, Row-KNN 算法更具有可行性, 当训练样本较多时, 体积距离法的精确度要优于其他算法, 但是当每类的训练样本较少时, 本文提出的 Row-KNN 算法在精确度和存储能力方面要比体积算法更好。该算法弥补了与 PCA 算法相比 2DPCA 需存储较多系数的缺点。该算法通过跳行的方法去除了行之间的冗余信息, 但是 J 值不能应用于所有的数据库, 其依赖于人脸图像的尺寸, 因此, 研究自动划分方法来确定特征行的最佳值将在后期工作中进行, 进而可以提高本算法的适用性。

参 考 文 献

- [1] 齐兴敏, 刘冠梅. 基于 PCA 的人脸识别方法的比较研究[J]. 现代电子技术, 2008, 31(6): 77-79.
- [2] 陆微微, 刘晶. 一种提高 k -近邻算法效率的新算法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(4): 163-165.
- [3] 刘党辉, 沈兰荪. 人脸检测研究进展[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(28): 5-9.
- [4] 李娟, 何伟, 张玲. 双向压缩的 2DPCA 与 PCA 相结合的人脸识别算法[J]. 计算机应用, 2009, 6(29): 245-248.
- [5] 边肇琪, 张学工. 模式识别[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 226-227.
- [6] 徐勇. 一种缩减图像维度的方法及其在人脸图像上的应用[J]. 电子与信息学报, 2014, 30(18): 180-184.
- [7] 朱超平. 基于人脸识别的门禁系统设计与实现[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2011, 28(4): 390-393.