

基于时空折中算法的密码分析研究与实现

郑亮

北京科技大学

密

级： 公开

论文题目： **基于时空折中算法的密码分析研究与实现**

学 号： S20082566

作 者： 郑亮

专 业 名 称： 计算机科学与技术

2011 年 11 月 20 日

基于时空折中算法的密码分析研究与实现

Research and Implementation On Cryptanalysis Based on Time-memory Trade-off Algorithm

研究生姓名：郑亮

指导教师姓名：王昭顺

北京科技大学计算机与通讯工程学院

北京 100083，中国

Master Degree Candidate: Liang Zheng

Supervisor: Zhao Shun Wang

School of Computer & Communication Engineering

University of Science and Technology Beijing

30 Xueyuan Road, Haidian District

Beijing 100083, P.R.CHINA

分类号: TP393.08

密 级: 公开

U D C: 004.77

单位代码: 1 0 0 0 8

北京科技大学硕士学位论文

论文题目: 基于时空折中算法的密码分析研究与实现

作者: 郑亮

指 导 教 师: 王昭顺 教授 单位: 北京科技大学

指导小组成员: 单位:

单位:

论文提交日期: 2011 年 11 月 20 日

学位授予单位: 北 京 科 技 大 学

致 谢

本论文及毕业设计是在我的导师王昭顺教授的悉心指导下完成的，在此表示由衷的感谢。王老师在我研究生阶段的科研工作给予了大力的指导，他为人师表的专业知识技能、敬业精神和对科学不懈的探索 and 追求所给予我的影响也将使我在未来的学习和工作中受益。

论文的顺利完成同时得到了赵万里同学、汪翔同学的大力支持和无私帮助，在此表示诚挚的谢意。

感谢在我攻读研究生学位过程中所有给予我帮助的老师、同学们，你们的帮助使我受益匪浅。

最后，谨向在百忙之中抽出宝贵时间评审本论文的专家、学者致以最诚挚的感谢！

摘 要

在密码分析学中有许多方法对密钥进行破解和分析，但在实际当中使用最多的，同时也是最有效的方法是时空折中法。在 1980 年 Hellman 第一次提出基于时空折中算法进行密码分析，在随后的 2003 年，Oechslin 在原有的算法上提出了现在著名的彩虹表算法。

本文基于以上理论基础，对彩虹表算法进行深入的理论分析和研究，给出了完整的实现，并从基于新型的 Fermi 构架的 CUDA 并行计算、存储结构和算法结构三方面进行优化设计。我们对 SHA1、MD5 和 NTLM 三种 Hash 算法进行实验分析，实验数据表明，SHA1 算法破解的速度提升了 5.88 倍，MD5 算法破解的速度提升了 6.3 倍，NTLM 算法破解的速度提升了 1.77 倍；在磁盘存储空间上，我们重新设计了表的存储结构，得到的新表比原来的节省了 56.25\% 的磁盘存储空间，进一步提升了实际破解密钥的时间。

本文可以实现多种 Hash 密码算法的破解，其他研究人员可以在此基础上加入特定的 Hash 算法，如 Word、pdf 文档的 Hash 加密算法，数据库中的 Hash 加密算法等等。

关键词： 彩虹表，密码分析，时空折中

Research and Implementation On Cryptanalysis Based on Time-memory Trade-off Algorithm

Abstract

In cryptanalysis, there are many ways to crack the key and analysis, but in practice the most used, but also the most effective way is Time-Memory Tradeoff (TMTO). In 1980, Hellman first proposed the algorithm based on Time-Memory Trade-off cryptanalysis, in the subsequent 2003, Oechslin on the original algorithm proposed algorithm is now famous rainbow table.

Based on the above theory, based on rainbow tables algorithm in-depth theoretical analysis and research, shows the complete implementation, and from the Fermi architecture based on the new CUDA parallel computing, storage structure and algorithm structure to optimize the design in three areas. Our experimental analysis of the three Hash algorithms: SHA1, MD5 and NTLM. Experimental data show that, SHA1 algorithm to break the 5.88 times faster, MD5 algorithm cracked 6.3 times faster, NTLM algorithm improves the speed of crack 1.77 times; In the disk storage space, we redesigned the table storage structure to be the new table than the original 56.25\% saving of disk storage space, further enhancing the actual time to crack the key.

We can achieve a variety of Hash algorithms to crack, other researchers can join on the basis of specific Hash algorithms, such as Word, pdf documents Hash encryption algorithm, encryption algorithm of Hash database, etc.

Key Words: Rainbow Table, Cryptanalysis, Time-Memory Trade-off

目录

1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状与进展	1
1.3 本文研究现状	2
1.4 论文组织结构	3
2 相关知识背景	4
2.1 密码分析方法	4
2.1.1 密码攻击类型	4
2.1.2 暴力攻击法	6
2.2 单向散列函数	7
2.2.1 Hash 函数的简介	7
2.2.2 对 Hash 函数攻击的方法	8
2.3 CUDA 并行计算相关知识	10
2.3.1 GPU 并行计算概述	10
2.3.2 CUDA 体系结构	11
2.3.3 Fermi 构架	12
2.4 本章小结	13
3 时空折中算法	14
3.1 Martin Hellman 最初的算法	14
3.1.1 预运算	14
3.1.2 在线分析阶段	16
3.1.3 TMTO 曲线	16
3.1.4 密钥分析的成功率	17
3.2 Ronald Rivest 差异点 DP 方法	19
3.3 本章小结	19
4 彩虹表算法的实现	20
4.1 彩虹表的算法分析	20
4.1.1 非完美彩虹表	20

4.1.2	完美彩虹表	23
4.2	彩虹表的构建与产生	24
4.2.1	密钥的生成	24
4.2.2	定义 Hash 函数	24
4.2.3	定义 Reduce 函数	24
4.2.4	彩虹表参数	25
4.2.5	构建彩虹表	28
4.3	密钥破解	31
4.3.1	搜索算法	31
4.3.2	假警分析	32
4.3.3	举例	32
4.4	实验结果与分析	34
4.5	本章小结	35
5	彩虹表算法的优化	36
5.1	基于 CUDA 并行计算优化	36
5.1.1	减小数据传输开销	38
5.1.2	共享内存访问冲突	38
5.1.3	核心配置优化	38
5.1.4	指令级别优化	40
5.1.5	存储合并访问	41
5.1.6	基于 CUDA 的云计算平台	41
5.2	存储优化	42
5.2.1	新型彩虹表文件	42
5.2.2	文件系统的优化	43
5.2.3	存储技术的优化	44
5.3	算法结构优化	46
5.4	实验结果与分析	49
5.4.1	破解速度实验对比	49
5.4.2	与等规模的旧表的性能对比实验	51
5.5	本章小结	52
6	本文总结与展望	53
6.1	总结	53

6.2 展望	53
参考文献	57
附录 A MATLAB 程序	58
A.1 磁盘空间与成功率	58
A.2 密钥空间	59
A.3 彩虹链长度	59
A.4 磁盘占用空间	60
A.5 最大破解时间	60
A.6 实际破解时间	60
A.7 最大磁盘读取时间	61
A.8 实际磁盘读取时间	61
附录 B 密钥字符集对照表	62

插图

2.1 暴力攻击的几个方法比较	7
2.2 GPU 和 CPU 速度对比	11
2.3 GPU 并行运算体系结构	12
2.4 CUDA 的编译流程	12
3.1 碰撞示意图	18
4.1 彩虹表生成程序	30
4.2 ntlm 算法彩虹表	31
4.3 彩虹表查表过程	32
4.4 破解实验结果 1	33
4.5 破解实验结果 2	33
5.1 EWSA 基于 GPU 加速破解 WPA 密钥的速度对比	36
5.2 Pyrit 基于 CUDA 性能测试	37
5.3 Fermi 构架的存储层次结构	39
5.4 优化后彩虹表的空间大小	42
5.5 XFS 性能测试	43
5.6 EXT4 性能测试	44
5.7 EXT3 性能测试	44
5.8 从硬盘读取的效率	46
5.9 直接从内存读取	46
5.10 链表合并过程示意图	46
5.11 无冲突链表数—链表长度关系	47
5.12 5 张彩虹表的破解成功率	48
5.13 5 张彩虹表的破解成功率（放大）	48
5.14 总表空间大小—成功率关系图	48
5.15 总表空间大小—成功率关系图（放大）	48

表格

4.1 实验结果（一）	34
4.2 实验结果（二）	34
5.1 三代 GPU 间的一些规格比较	37
5.2 各种存储系统读速度对比数据	45
5.3 实验数据测试平台配置	49
5.4 SHA1 破解实验数据对比	49
5.5 MD5 破解实验数据对比	50
5.6 NTLM 破解实验数据对比	50
5.7 新表与等空间的单张彩虹表的性能对比	51

1 绪论

1.1 研究背景及意义

随着电子商务的发展，网上银行、网上合同、电子签名等的应用越来越广泛，网络已经成为我们生活中不可或缺的一部分。电子商务在给我们的生活带来便捷的同时，也存在着安全隐患。举个简单的例子，Hash 密码算法一直在这些领域中起着身份验证、口令加密、防篡改和重放攻击等作用，目前的用户口令认证机制中，系统将用户的口令进行 Hash 算法加密后存储，以便下次检验用户身份，如果攻击 Hash 算法得到了口令，可想而知对整个系统的安全造成了多大的威胁。

对密码进行分析主要是为了发现加密算法、密钥或密码系统的弱点，以完善加密过程，更有利于信息的安全。另一方面，是为了掌握密码分析者或破译者攻击密码的方法，找出其方法的漏洞，便于预防他们的攻击。同时也是为了更进一步提高广大计算机用户的安全意识和知识水平，减少针对系统的非法入侵和攻击带来的损失。我们知道在整个密码系统中，最有价值的信息就是密钥，绝大部分系统的密钥是用 Hash 函数来保护的，因此，针对密钥的攻击分析是密码分析领域的一个非常有价值的研究的课题。

1.2 国内外研究现状与进展

在 1980 年，Martin Hellman¹提出了一个“时间空间折中”的密码分析算法，使用了预先计算好并保存在内存和磁盘里面的数据，减少了密码分析需要的时间。这个算法在 1982 年被 Rivest 提出改进，减少了密码分析过程中所需要的存储空间。

2003 年 7 月瑞士洛桑联邦技术学院的 Philippe Oechslin 公布了一些实验数据，他及其所属的安全及密码学实验室（LASEC）采用了时间空间折中算法，使得密码破解的效率大大提高。他们开发的 Ophcrack 项目可以将一个操作系统的用户登录密码破解速度由 1 分 41 秒，提升到 13.6 秒²。该

项目提供了一个破解视窗作业系统下的 LAN Manager 散列（比如 hash 文件）的程序，作者免费提供了一些 Rainbow table，可以在短至几秒内破解最多 14 个英文字母的密码，有 99.9% 的成功率。从 2.3 版开始可以破解 NT 散列，这功能对已经关闭 LAN Manager 散列的系统（Windows Vista 的预订设定）或是长于 14 个字母的密码特别有用。

同年 project-rainbowcrack 项目开始立项，该项目基于 Philippe Oechslin 提出的彩虹表，用 C++ 基本实现了对 MD5、SHA-1 算法的低位数低密钥空间的破解³。接着出现了一个分布式彩虹表项目 Free Rainbow Tables，这个项目的分布式系统是基于伯克利开放式网络计算平台（BOIN）。

在我国密码分析还处于初级阶段，由于软、硬件及技术等各种原因，大部分密码分析方法还处于理论阶段。目前，已经出现了各种各样的密码分析系统，都是针对某种加密方法进行分析的，功能和方法上还具有一定的局限性。2004 年 8 月，在美国加州圣芭芭拉召开的国际密码大会上，山东大学王小云教授在会议上首次宣布了她及她的研究小组近年来的研究成果——对 MD5、HAVAL-128、MD4 和 RIPEMD 等四个著名密码算法的破译结果。2008 年国际密码学家 Lenstra 利用王小云提供的 MD5 碰撞，伪造了符合 X.509 标准的数字证书，说明了 MD5 的破译已经不是理论破译结果，而是可以导致实际的攻击，目前 SHA-1 在理论上已经被破译，离实际应用也为期不远。目前国内已经有对基于时空折衷算法的 Word 文档破解研究⁴和对 DES 密码算法的彩虹攻击技术及其 GPU 实现⁵两篇与彩虹表算法相关的文献。

1.3 本文研究现状

本文研究的主要内容就是基于时间空间折中算法的 Hash 密钥分析。主要采用彩虹表进行 Hash 算法破解，并进一步对时空折中算法的研究和优化，开发出基于 CUDA⁶模型的彩虹表算法实现。主要研究成果有：

1. 优化彩虹表算法参数，减少破解时间；
2. 优化彩虹表的数据结构，减少表的存储空间；

3. 利用 GPU 高性能并行运算提高破解速度。

1.4 论文组织结构

本文共分六章，全文结构安排如下：

第一章 绪论。介绍了本课题的研究背景及意义、国内外研究现状与进展、研究现状以及本文组织结构。

第二章 相关知识背景。

第三章 时空折中算法。

第四章 彩虹表算法的实现。

第五章 彩虹表算法的优化。

第六章 本文总结与展望。

2 相关知识背景

2.1 密码分析方法

密码学在⁸中可以分为经典密码学 and 现代密码学，而我们现在研究分析的主要领域在现代密码学，现代密码学包括分组密码算法、消息摘要算法、非对称密钥算法、公/私钥签名算法等。密码分析可以从不同的角度进行分类，并且每种方法之间也没有严格的界限，在这里我们根据上述密码学中密码体制的类型来对密码分析方法进行大体分类。密码分析方法从大的方面可分为：古典密码分析方法，对称密码分析方法，非对称密码分析方法。因为密码有序列密码和分组密码之分，所以对称密码分析方法又分为序列密码分析方法和分组密码分析方法。现有的大多数非对称密码都属于分组密码，所以对非对称密码分析方法不再从这方面分类。本文主要讨论的是针对密码算法中密钥分析的很实用的一些方法，如穷举法、查表法、时空折中法。

2.1.1 密码攻击类型

我们在进行密码分析时是在假设密码分析者知道目标系统所使用的加密体制和密码算法的前提下进行的，也就是密码分析者可以根据密码算法得到明文和密文等方面的信息。这样我们可将密码攻击为以下几种主要类型：

1. 唯密文攻击：密码分析者已知加密算法和待破译密文或部分密文，需要对信息加密的方法进行正确的猜测，对编码者的编码风格及密文的题材有一定的了解。
2. 已知明文攻击：密码分析者已知加密算法，有一些明文及相应的密文。用这些信息推出用于产生密文的信息。
3. 选择明文攻击：也称差分密码分析。密码分析者有机会使用密码机，且已知加密算法、待破译的密文、由密码分析者选择的明文信息。密码分析者用一个密钥对他所选择的明文加密以获得结果中的密文，但密钥本身不能被分析，密码分析者通过将整个密文与最初的明文作比较推出密

钥。

4. 选择密文攻击: 密码分析者已知加密算法, 待破译的密文和密码分析者选择的猜测性密文。密码分析者将自己猜测的密文发给信息的实际接收者, 接收者解密后得到一些杂乱的数据, 于是他可能将这些杂乱的数据寄回给信息发送者或者以不安全的方式存储, 则密码分析者可通过某些手段可能得到这些杂乱数据, 再与猜测的密文作比较可推出密钥。
5. 选择文本: 密码分析者已知加密算法, 待破译的密文, 密码分析者选择的明文信息及其对应的由密钥生成的密文, 密码分析者选择的猜测性密文及其对应的由密钥生成的已破译的明文。密码分析者通过他所掌握的这些所有信息可推出密钥。

上述是密码攻击的主要五种类型。这五种攻击类型的强度按序递增, 唯密文攻击是最弱的一种攻击, 最容易防护, 因为密码分析者拥有的可供利用信息量最少。选择密文和选择文本是最强的攻击, 如果一个密码系统能够抵抗这两个攻击, 那么它当然能够抵抗其余三种攻击, 这两者很少被使用, 但他们也是可能的攻击途径。对一个密码系统采取截获密文进行分析的这类攻击称作被动攻击。

密码系统还可能遭受到的另一类攻击是主动攻击, 非法入侵者主动向系统采用监听、删除、修改、增添、重放、伪造等手段向系统注入假消息。防止这种攻击的一种有效方法是使发送的消息具有可被验证的能力, 使接收者或第三者能够识别和确认消息的真伪, 实现这类功能的密码系统称作认证系统。消息的认证性和消息的保密性不同, 保密性是使截获者在不知道密钥的条件下不能解读密文的内容, 而认证性是使任何不知道密钥的人不能构造出一个密报, 使意定的接收者解密成为一个可理解的消息 (合法的消息)。

进行密码分析时, 我们还应考虑一种密码攻击的复杂度, 当然复杂度越低越好。可将密码攻击复杂度分为两部分, 数据复杂度和处理复杂度。数据复杂度是实施该攻击所需输入的数据量; 而处理复杂度是处理这些数据所需的计算量。这两部分的主要部分通常被用来刻划该攻击的复杂度。例如, 在穷举密钥搜索攻击中, 所需要的数据量与计算量相比是微不足道的, 因此, 穷尽密钥搜索攻击的复杂度实际是处理复杂度。在差分密码分析中, 实施攻

击所需的计算量相对于所需的明密文对的数量来说是比较小的，因此，差分密码分析的复杂度实际是数据复杂度。

2.1.2 暴力攻击法

暴力攻击法可用于任何分组密码算法和消息摘要算法，而且攻击的复杂度只依赖于分组长度和密钥长度，暴力攻击主要有：穷举密钥攻击、字典攻击、查表攻击、时间-存储攻击。

穷举密钥搜索攻击中，设 k 是密钥长度（以比特为单位），在唯密文攻击下，攻击者依次试用密钥空间中所有 2^k 个密钥解密一个或多个截获的密文，直至得到一个或多个有意义的明文块。在已知（选择）明文攻击下，攻击者试用密钥空间中的所有 2^k 个密钥对一个已知明文加密，将加密结果同该明文相对应的已知密文比较，直至二者相等，然后再用其他几个已知明密文对来验证该密钥的正确性。穷举密钥搜索的复杂度平均为 2^{k-1} 次加密，实际上这种攻击方法适用于任何密码体制。

字典攻击中，攻击者搜集明密文对，并把它们编排成一个“字典”。攻击者看见密文时，检查这个密文是否在字典里，如果在，他就获得了该密文相对应的明文。如果 n 是分组长度，那么字典攻击需要 2^n 个明密文对才能使攻击者在不知道密钥的情况下加解密任何消息。

查表攻击中，设 k 是密钥长度，查表法采用选择明文攻击，其基本观点是：对一个给定的明文 x ，用所有 2^k 个密钥 K （记其全体为 K ），欲计算密文 $y_k = E_k(x)$ 。构造一张有序对表 $(y_k, K)_{k \in K}$ ，以 y_k 给出 K 的标号。因此，对于给定的密文，攻击者只需从存储空间中找出相对应的密钥 K 即可。

时间-空间折中攻击法是一种选择明文攻击方法，它由穷尽密钥搜索攻击和查表攻击两种方法混合而成，它在选择明文攻击中以时间换取空间。它比穷尽密钥搜索攻击的时间复杂度小，比查表攻击的空间复杂度小。如图2.2所示，比较了这种暴力攻击方法的特点：

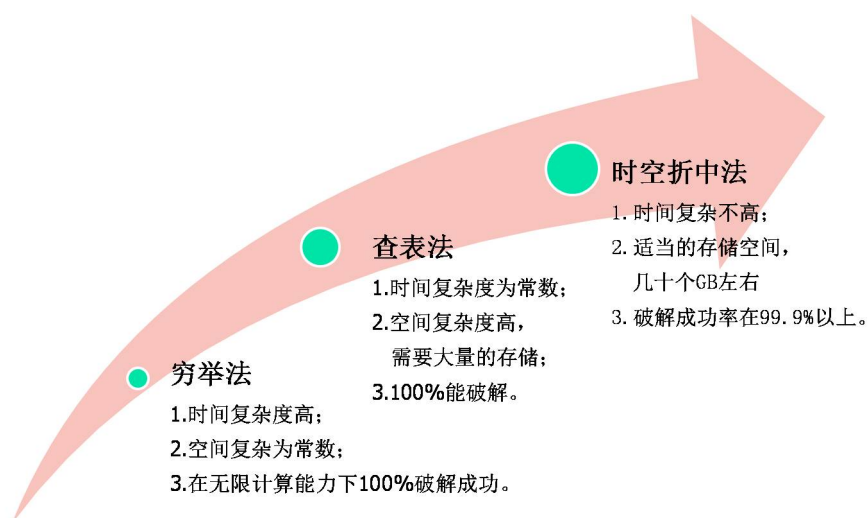


图 2.1 暴力攻击的几个方法比较

2.2 单向散列函数

2.2.1 Hash 函数的简介

单向散列函数，又称单向 Hash 函数、杂凑函数，就是把任意长的输入消息串变化成固定长度的输出串的一种不可逆函数。这个输出串称为消息的散列值。一般用于密钥加密，产生消息摘要等。单向散列函数是现代密码学的一个重要领域，它是数据完整性检测、数字签名和认证方案中必不可少的一部分。单向 Hash 函数⁹是许多协议框架中的一个模块。目前由许多 Hash 函数的公开算法，一般一个安全的 Hash 函数应该至少满足以下几个条件：

1. 输入串值的长度是任意的；
2. 输出串 Hash 值长度是固定的；
3. 对每个给定的输入串的值，计算机得到输出 Hash 值是很容易的；
4. 给定 Hash 函数的描述，已知一个 Hash 值时，要找到输入串使它的的 Hash 值等于已知的这个 Hash 值在计算上时不可行的，或是找到两个不同的输入串，计算得到相同的输出 Hash 值在计算上是不可行的。

Hash 函数主要用于数据完整性校验和数字签名的有效性，常被用在身份认证上。例如在一个身份验证系统上，保存用户的密码时，需要把密钥用 Hash 算法进行加密，得到一个 Hash 值。由于 Hash 函数本身的特点，其

他用户即使得到了这个 Hash 值也无法还原密码。当用户登录时，系统把用户输入的密码再用 Hash 算法进行计算，得到的 Hash 值与保存在系统中的 Hash 值进行比较，从而验证用户的合法性。MD5¹⁰（Message-Digest Algorithm 5）是目前应用最广泛的 Hash 函数之一。MD5 将任意长度的“字节串”变换成一个 128 比特的大整数，并且它是一个不可逆的字符串变换算法，换句话说就是，即使你看到源程序和算法描述，也无法将一个 MD5 的值变换回原始的字符串，从数学原理上说，是因为原始的字符串有无穷多个，这有点象不存在逆函数的数学函数。MD5 在经过一些初始处理后，将明文分成了 512 位的块，再将每一块分成 16 个 32 位的子块。算法的输出是 4 个 32 位的块，连接起来就是 128 位的输出的 Hash 值。

2.2.2 对 Hash 函数攻击的方法

1. 替换法

这是一个十分实用的攻击方法，它并不对 Hash 算法本身作任何攻击，只是利用系统中的 Hash 函数重新生成一个 Hash 值，这个 Hash 值的输入串是攻击者已知的，如“password”，这样我们就可能把这串新生成的 Hash 值替换掉系统本身的 Hash 值，此时攻击者就能用“password”能登陆系统，从而达到绕过系统的认证机制。这种攻击方法需要攻击者已知目标系统认证机制使用的 Hash 算法函数（一般的系统都使用 MD5 算法函数）和由替换的权限。

2. 字典查表法

还有一种在实际破解中使用较多得方法是字典查询法，攻击者需要预先对目标 Hash 算法构造相应得字典文件，然后把需要破解得 Hash 值跟这个字典文件里得 Hash 值进行检索比较，通常这种办法需要 TB 级甚至跟大得存储空间，并且预运算的时间代价也是很大的。

3. 碰撞法

所谓杂凑碰撞指两个完全不同的讯息经杂凑函数计算得出完全相同的杂凑值。根据鸽巢原理，以有长度限制的杂凑函数计算没有长度限制的

讯息是必然会有冲撞情况出现的。可是，一直以来，电脑保安专家都认为要任意制造出冲撞需时太长，在实际情况上不可能发生。2004 年 8 月 17 日的美国加州圣巴巴拉的国际密码学会议（Crypto’ 2004）上，来自中国山东大学的王小云教授做了破译 MD5、HAVAL-128、MD4 和 RIPEMD 算法的报告，公布了 MD 系列算法的破解结果。在破解 MD5 之后，2005 年 2 月，王小云教授又破解了另一国际密码 SHA-1，王小云的研究成果表明了从理论上讲电子签名可以伪造，必须及时添加限制条件，或者重新选用更为安全的密码标准，以保证电子商务的安全。2005 年 8 月，王小云、姚期智，以及姚期智妻子姚储枫（即为 Knuth 起名高德纳的人）联手于国际密码讨论年会尾声部份提出 SHA-1 杂凑函数杂凑冲撞演算法的改良版。此改良版使破解 SHA-1 时间缩短。

曾与王小云共同攻破完整 MD5 算法的中科院的冯登国与长沙国防科大的谢涛最近在 IACR 上发布了一篇题为《仅用一个消息块实现 MD5 碰撞》的文章。出于安全因素的考虑，文章中并未公开具体实现方法，但他们向全球密码学爱好者发出挑战：第一个在 2013 年 1 月 1 日之前找出新的单块碰撞的人将获得一万美元的奖励。他们公布的产生碰撞的消息块为：0x6165300e,0x87a79a55,0xf7c60bd0,0x34febd0b,0x6503cf04,0x854f709e,0xfb0fc034,0x874c9c65,0x2f94cc40,0x15a12deb,0x5c15f4a3,0x490786bb,0x6d658673,0xa4341f7d,0x8fd75920,0xefd18d5a
0x6165300e,0x87a79a55,0xf7c60bd0,0x34febd0b,0x6503cf04,0x854f749e,0xfb0fc034,0x874c9c65,0x2f94cc40,0x15a12deb,0xdc15f4a3,0x490786bb,0x6d658673,0xa4341f7d,0x8fd75920,0xefd18d5a
这两个消息块有两处不同，但 MD5 均为 0xf999c8c9 0xf7939ab6 0x84f3c481 0x1457cb23。

2.3 CUDA 并行计算相关知识

2.3.1 GPU 并行计算概述

GPU 即图形处理器，目前，主流计算机的处理器主要是中央处理器 CPU 和图形处理器 GPU。传统上，GPU 只负责图形渲染，而大部分的处理都交给了 CPU。然而 GPU 在处理能力和存储器带宽上相对 CPU 有明显优势，在成本和功耗上也不需要付出太大代价。2007 年 6 月，NVIDIA 公司推出了 CUDA，CUDA 不需要借助图形学 API，而是采用了类 C 语言进行开发。同时，CUDA 的 GPU 采用了统一处理架构，以及引入了片内共享存储器，这大大降低了基于 GPU 的并行计算程式的开发难度。CUDA 为开发人员有效利用 GPU 的强大性能提供了条件。自推出后，CUDA 被广泛应用于密码破解、石油勘测、天文计算、流体力学模拟、分子动力学仿真、生物计算、图像处理、音视频编解码的领域，在很多应用中获得了几倍、几十倍、甚至上百倍的加速比。

在现代计算机体系结构中属于显卡外设的一个专门图形处理器。随着人们对显卡并行性的研究和开发，我们对它的可编程性也提出了更高的要求。比如从 Nvidia Geforce 8 系列的显卡开始，英伟达公司就在其上面配置了大量的可独立运行计算的处理器核心。在 2010 年的 ISCA 大会上，英特尔公司向大会递交了一份关于 GPU 和 CPU 的测试技术文档，在文档中正式承认 GPU 的运行速度比 CPU 快 14 倍^[1]。测试中英特尔采用的是 GeForce GTX 280，在当时是英伟达上一代产品，并且没有经过任何代码优化，而实际上新一代的 NVIDIA GPU 的运行速度是英特尔 CPU 的上百倍。

英伟达公司通过对显卡增加一些硬件接口，使得对显卡的编程已经不再需要像操作硬件设备那样依赖特定的语言和程序接口。他们提出了 CUDA 的编程模型，这个编程模型是为了方便开发者能够便捷快速地在 Nvidia 显卡上开发应用程序。

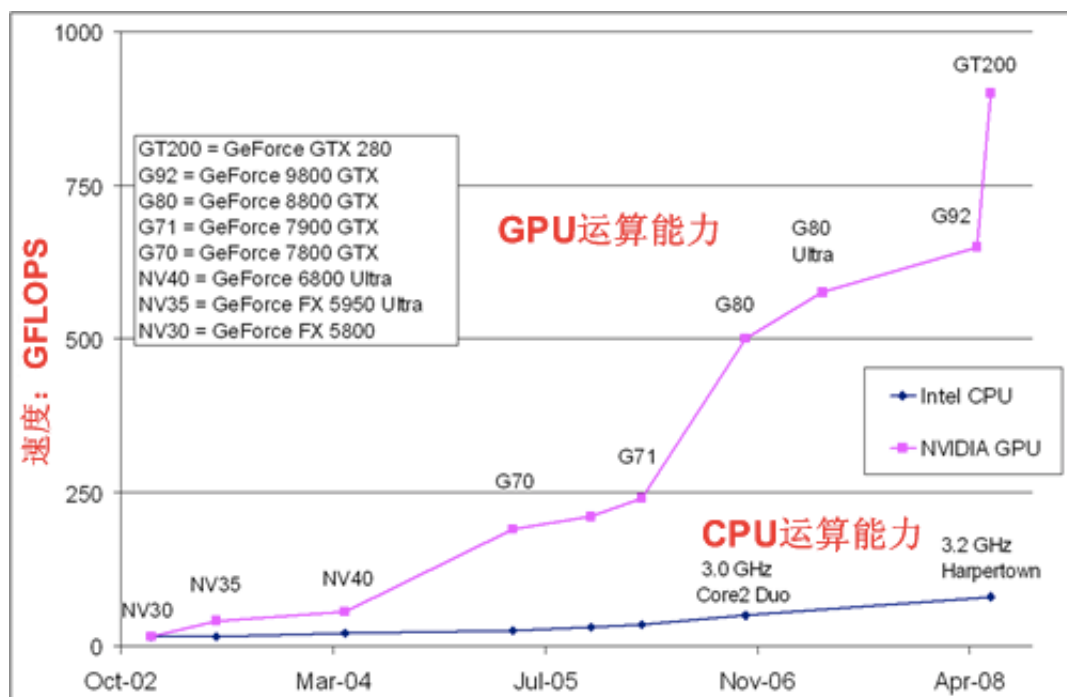


图 2.2 GPU 和 CPU 速度对比

2.3.2 CUDA 体系结构

2007 年 6 月, NVIDIA 公司推出了 CUDA⁶, 它是一个开发应用程序的平台, 或者说是一种编程模型。该模型将用户应用程序代码分为两部分: 宿主 (Host) 代码和设备 (Device) 代码。宿主代码由 CPU 负责串并行化的处理, 而设备代码则是交给一个或多个 GPU 并发处理。同时每个 CUDA 处理器都支持单指令多数据 (SIMD) 方法,¹² 可以使得所有核心处理器上并发运行的线程基于相同的代码。虽然由于数据的不同会导致产生分支, 但是仍然支持全局的内存共享。下图 2.3 为 Nvidia GeForce 8800 显卡的工作示意图, 我们可以看到程序从主存把数据拷贝到 GPU 的显存里, 然后在 GPU 中每个核心处理器中进行并行计算, 最后把结果拷贝回主存里。

CUDA 程序由 nvcc 编译器执行, 编译流程如图 2.4 所示。代码运行期间, 程序执行可能循环经历宿主态和设备态的转换, 这种转换其实质是 CPU 和 GPU 之间的转换, 我们应该尽量减少这样的状态转换, 避免上下文切换带来的代价。因此在编程阶段应当尽量使 GPU 能运行足够长的时间。

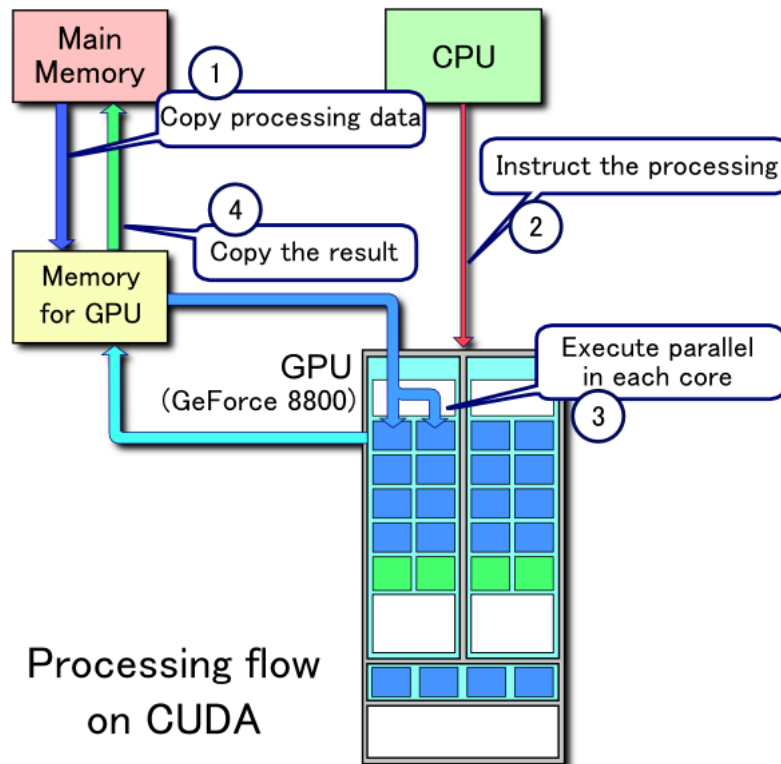


图 2.3 GPU 并行运算体系结构

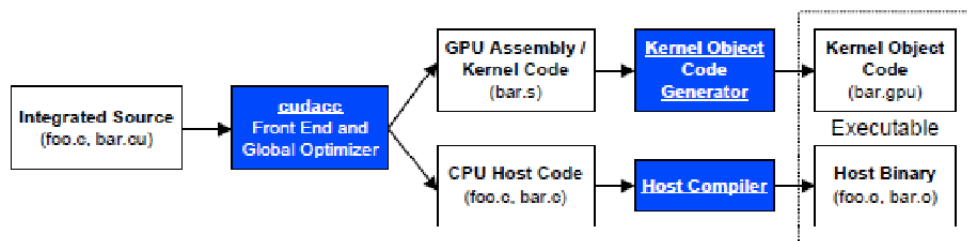


图 2.4 CUDA 的编译流程

2.3.3 Fermi 构架

Fermi 是 NVIDIA 公司最新一代的显卡构架代号，在 2010 年 3 月 27 日，NVIDIA 公司正式发布 Fermi 构架的桌面显卡 GeForce GTX480。Fermi 是新一代 CUDA 计算与图形构架，针对双精度运算、ECC 内存容错能力、Cache 体系结构、上下文切换和原子读写操作等方面进行了全面的设计，通过新的构架设计不仅仅增加了计算能力，并且支持更好的可编程能力和计算效果。Fermi 构架有如下主要新的特性：

1. 第三代 Streaming Multiprocessor (SM)

- 每个 SM 包含 32 个 CUDA Core，是 GST200 的 4 倍

- 8 倍于 GT200 的双精度浮点性能
- Dual Warp 调度策略，一个周期内可启动两个 warp 进行计算
- 每个 SM 有 64KB 的 RAM，可灵活地配置共享内存和 L1 缓存

2. 第二代 PTX ISA 架构 (PTX 2.0)

- 统一寻址空间，完整支持 C++ 特性
- 针对 OpenCL 和 DirectCompute 进行优化设计
- 完整支持 IEEE 754-2008 32bit/64bit 精度
- 通过 Predication (断言) 来提高性能

3. 改进的内存操作子系统

- 可配置的 L1 和统一的 L2 并行数据高数缓存
- 内存支持 ECC 校验
- 极大增强原子内存操作性能

4. 第三代千兆线程引擎 (GigaThread 3.0)

- 比上一代强 10 倍的上下文切换能力
- 并发核心程序执行机制

2.4 本章小结

本章简要介绍了本文涉及到的相关知识背景，阐述了现代密码分析的方法手段和密码攻击的类型，比较了暴力攻击法的几种方法，穷举法的虽然可以 100% 破解成功，但这是建立在付出巨大的计算代价和时间代价；查表法则以巨大的存储代价来达到密码破解的目的；而时空折中法则是前两种办法的折中办法，以空间代价换取时间代价或者以时间代价换取空间代价，在两个中间找到一个平衡点，这样会损失一些破解成功率。最后以单向散列函数的破解为例，介绍了对 Hash 函数加密了的密钥的破解。介绍 CUDA 并行计算的相关知识，包括 GPU 并行计算体系结构以及 CUDA 编程模型，一个基本的 CUDA 程序由宿主程序和设备程序组成。

3 时空折中算法

本章主要介绍时空折中算法的相关理论基础。从最初 Martin Hellman 的时空折中算法、Ronald Rivest 的差异点 DP 方法到 Philippe Oechslin 在 2003 年基于前两种方法提出的彩虹表算法 (RainBow Table)，时空折中算法已经成为现代密码分析算法中一类极具现实意义的算法之一。这类算法一般都包括了以下两个主要步骤：1，预运算 (pre-computation)；2，在线分析 (online phase)。本章节 3.1, 3.2 和 4.1 将分别介绍 Martin Hellman 表以及彩虹表的设计原理和构造思想。

我们将在本章中统一使用以下定义： N 表示目标密码算法的密钥空间大小； T 和 M 分别表示在线分析的时间代价以及预运算步骤所产生的密钥表空间大小；对于预运算的成功率 P ，我们通常认为分析者具有足够长的时间，所以该代价一般不作为讨论的内容并且将其粗略等价于穷举所有密钥表空间的时间。

3.1 Martin Hellman 最初的算法

Martin Hellman 在 1980 年第一次提出基于时间空间折中算法的分组密码算法 DES 的密码分析¹。攻击者使用的是选择明文攻击，也就是给定一个指定的明文加密后的密文，尝试从密文中分析恢复出这次加密的密钥。因此攻击者所要关心的问题是：如何从 N 中找出对应的密钥，以 56 比特 DES 为例，其密钥空间为 $N = 2^{56}$ 。（若无特殊说明，下文都将以 56 比特的 DES 为目标密码算法）

3.1.1 预运算

在预运算阶段，算法将首先固定一个目标密文所对应的明文 P ，一般大小为 8 个字符（64 比特），接着结合 P 构造如下非逆函数 f ：

$$f(k) = R(S_k(P)) \quad (3.1)$$

其中 P 是所选的固定明文信息, S 表示伪随机函数, R 是一个从密文空间到密文空间的简约 (Reduction) 函数, 并且在下文令 $S=DES$ 。对于 R 函数的选择, 若无特别说明, 我们将假定任一从 64 比特到 56 比特的映射函数均可适用。通常为了简便起见, 令 R 函数为仅简单地去掉 64 比特的高 8 位。从而 R 、 S 复合而成的 f 函数可以看作是一个 56 比特到 56 比特的伪随机函数。

预运算开始时, 算法将选择 m 个来自密钥空间 N 的随机密钥作为开始节点 (Start Point, 简称 SP), 令其为 $SP_1, SP_2, SP_3 \dots SP_{m-1}, SP_m$ 。接着, 将 SP_1 作为输入代入公式(3.1), 并迭代 t 次, 得到如下两式(3.2)和(3.3):

$$k_i = f(k_{i-1})(1 \leq i \leq t) \quad (3.2)$$

$$SP_1 = k_{10} \xrightarrow{f} k_{11} \xrightarrow{f} k_{12} \xrightarrow{f} \dots \xrightarrow{f} k_{1t} = EP_1 \quad (3.3)$$

其中, 令结束节点 (End Point, 简称 EP) $EP = f(K_{t-1})$ 。当每个 SP_j 都完成 t 次迭代后, 我们就会得到一张有 m 对形式如 $(SP_j, EP_j)(1 \leq j \leq m)$ 的二元组构成的 Hellman 表。

$$\underbrace{\begin{bmatrix} SP_1 = k_{10} \xrightarrow{f} k_{11} \xrightarrow{f} k_{12} \xrightarrow{f} \dots \xrightarrow{f} k_{1t} = EP_1 \\ SP_2 = k_{20} \xrightarrow{f} k_{21} \xrightarrow{f} k_{22} \xrightarrow{f} \dots \xrightarrow{f} k_{2t} = EP_2 \\ \vdots \\ SP_m = k_{m0} \xrightarrow{f} k_{m1} \xrightarrow{f} k_{m2} \xrightarrow{f} \dots \xrightarrow{f} k_{mt} = EP_m \end{bmatrix}}_{\text{迭代 } t \text{ 次}} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} SP_1 & EP_1 \\ SP_2 & EP_2 \\ \vdots & \vdots \\ SP_m & EP_m \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

这里要注意的是, 在 SP 和 EP 之间的节点都不会被保存, 如(3.5)式。这些值可以依靠相应的二元组在需要使用的时候可以在线计算生成, 这也就是把节省了空间, 而关于 m, t 的选择, 就是这个时间于空间折中的选择, 一般

它们应当满足：

$$mt^2 = N \quad (3.6)$$

而且(3.6)式也被成为矩阵终止规则 (Matrix stopping rule)。根据生日悖论思想，当上式成立时，将不会有太多的重复节点出现，而当 m 或 t 过大使得 $mt^2 > N$ ，则冲突数量将快速上升，并最终导致 Hellman 表的成功率下降。而事实上，在实际的密钥攻击过程中，可以允许 $mt^2 < N$ ，只不过相应的攻击成功率会有所下降。

3.1.2 在线分析阶段

在线分析阶段，给定已知明文 P 和对应的密文 C ，代入 $R(C)$ 可以得到 y_1 ，然后将 y_1 与 $EP_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 比较，若存在某个 i ，使得等式 $y_i = EP_i$ 成立，则会出现以下两种情况：1，加密 y_1 的密钥为 $K_{k_{i,t-1}}$ ；2，所对应的密钥不在表中，这个现象叫做 False alarm。若等式 $y_1 = EP_i$ 不成立，则继续迭代下一步 $y_2 = f(y_1)$ ，并重复上一步相同的比较，直到出现以下三种情况：1，找到密钥；2，出现 False alarm，就也就假警；3，表搜索结束。简单地讲，在线分析的目的是在 Hellman 表中搜索出正确的密钥 K ，使得 $K = k_{ij} = y_{t-j}$ 。需要注意的是，在线分析过程中的 y_j 是可以反复利用与 y_{j+1} 计算的，之后介绍的彩虹表将无法重用。

3.1.3 TMTO 曲线

在介绍 TMTO 曲线前，我们将先讨论 Hellman 表的空间代价和时间代价。在忽略二元组 (SP_j, EP_j) 本身大小和一些其他较小的常量后，我们可以计算出存储 t 张维度为 $m \times t$ 大小的 Hellman 表需要的空间 $M = mt$ 。同时，由于试图要覆盖整个密钥空间，故预运算的代价 $P = N$ 。在线分析阶段，每一张表的搜索，函数 f 最多会被调用 t 次，因此 t 张表的总时间代价 $T = t^2$ ，由于搜索的代价相对较低，在这里可以忽略不计。基于上述时间和空间的代价分析就很容易得到 TMTO 曲线：

$$TM^2 = N^2 \text{ 并且 } P = N \quad (3.7)$$

反之，当给定时间代价 T 和空间代价 M 时，则可以通过 3.5 式推出 m 和 t ，也就是说可以在时间 T 和空间 M 的限制下，从以 m, t 为参数得 Hellman 表中找到正确得密钥 K 。

结合(3.6)式和(3.7)式我们得到一个重要的等式：

$$T = M = N^{\frac{2}{3}} \quad (3.8)$$

由等式(3.8)可知，密码分析者在使用 Hellman 表来成功破解密钥 K 所需要的代价会比穷举攻击快 $N^{\frac{1}{3}}$ 倍，当然前提都是在基于选择明文的攻击方式下。由伪随机函数 S 的特性可以得到，只要稍加修改，比如将函数 R 的输入输出长度改变，我们就能对其他分组密码算法进行密钥破解。所以，对任意的密钥空间为 N 的分组密码，利用 Hellman 算法都能获得以 $N^{\frac{2}{3}}$ 为代价的密钥破解成功。而针对其他体制的加密算法的密钥分析，例如以杂凑 Hash 函数为代表的 MD5 和 SHA-1 的加密算法，我们将在下面的彩虹表讨论分析。

3.1.4 密钥分析的成功率

在上一章2.1节密码分析方法的比较中，我们已经得出了相对穷举法百分之百的破解成功率来说，Hellman 的时空折中算法并非是 100% 能破解成功的，即使你付出了 $N^{\frac{2}{3}}$ 的代价。换句话说，也就是这类的时空折中算法是以牺牲少量的成功率为代价换取了在时间或空间上的代价，这也充分体现了折中的这个思想。因此，本节将会重点分析 Hellman 算法的成功率。其实造成功率损失的根本原因在与算法本身，由于简约函数 R 仅是从密文空间 V 到密钥空间 N 的这么一个映射，而对于两个不同的密文 C_1, C_2 ，会有一定概率映射到同一个密文，并造成 Hellman 表中的节点因发生了碰撞而不唯一，如图3.1所示，因此导致了最终的破解成功率降低。一般来说，当 m, t 值越大，节点间发生碰撞合并的概率也就越高。并且由于 Hellman 表的每个节点都使用相同的 R 函数，所以一旦表中任意两个节点发生碰撞时，这两个节点之后的所有节点也将会发生碰撞，最坏的情况会导致 50% 的效率下降。

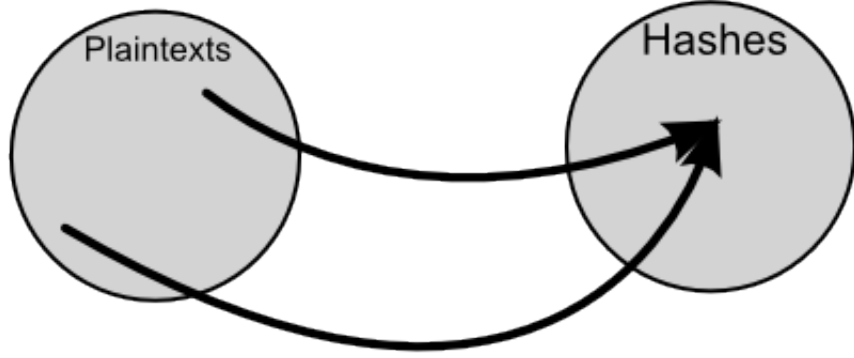


图 3.1 碰撞示意图

成功率是随着 m , t 的增大非线性地提升。在文献^[1]中, 我们可以得知一张 m 行, t 列的 Hellman 表能成功破解密钥 K 的概率公式为:

$$P_{Hellman} \geq \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^{t-1} \left(1 - \frac{it}{N}\right)^{j+1} \quad (3.9)$$

由于有节点的碰撞, 单表的破解成功概率会随着表的大小增大而放缓增幅, 所以为了得到更高的破解成功概率, 我们一般都会使用多张表, 例如(3.6)式中的 t 张表, 并且为了避免表与表之间的链碰撞合并, 不同的表当中应当使用不同的函数 $R_j (1 \leq j \leq t)$ 使得即使不同表间两个节点相同也难导致链表的合并。因此, 我们也就很容易得到了 t 张 Hellman 表的总成功率公式:

$$P_{Hellman}^{All} \geq 1 - \left(1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^{t-1} \left(1 - \frac{it}{N}\right)^{j+1}\right)^t \quad (3.10)$$

Hellman 称上述节点发生碰撞导致链合并的现象为 False Alarm, 也就是出现了上文3.1.2提到的有 $y_k = EP_i$, 但对应的 $k_{i,t-k}$ 不等于正确密钥。直观上分析, 表的规模越大, 越有概率发生假警, 若假警率过高, 则在线分析会花费大量的代价在剔除假警, 为此 Hellman 给出了一个假警上界:

$$E(F) \leq \frac{mt(t+1)}{2N} \quad (3.11)$$

当假警发生时, 最坏情况时导致 t 次函数 f 的迭代开销, 也就是在一开始发生了假警, 此时这个代价等同与在线分析时计算 $y_1, y_2 \dots y_t$ 的代价。因此当

有 $mt^2 = N$ ，且 $N \gg 1$ 时，有 $E(F) \leq \frac{1}{2}$ ，则由于总的开销最多为 $\frac{t}{2}$ 次迭代，从而可以保持假警代价不超过 $\frac{t^2}{2}$ ，即 $\frac{T}{2}$ 。

3.2 Ronald Rivest 差异点 DP 方法

在随后的 1982 年，Ronald Rivest 提出了差异点（DP）的概念，通过使用差异点减少对磁盘的访问次数，有效地解决了碰撞的问题，从而降低破解的代价。差异点式满足一套标准的数据点。我们定义密钥的前 10 比特为一个特定的二进制，为了简便起见，这里设定为零。Rivest 提出只存储差异点作为终点，在破解密文时，简单地根据 Hellman 的方法生成链直到发现一个差异点，当且仅当发现一个差异点时，才在表中进行查找，这可以大大提升算法的性能。

差异点自提出后就被广泛地研究和使用的，在 1982 年和 2003 年间这一领域的大多数研究都是基于差异点的。Koji Kusuda 和 Tsutomu Matsumoto¹³一文中具体讨论了如何提升破解的成功率，通过研究证明调整表中的参数可以降低内存的消耗，以获得更高的成功率，更快地破解密钥。另外，Johan Borst, Bart Preneel 和 Joos Vandewalle¹⁴共同发表的一篇文献中也对差异点进行了研究，他们介绍了一种分布式的密钥搜索算法，在基于 Hellman 的假设，认为存储访问代价时微不足道的，研究表明执行分布式密钥搜索时，这个假设不再合理，他们还提出一种可大大减少内存访问次数的折中算法，从而减少与分布式密钥搜索相关的问题。然而，他们的研究在 1998 年完成，这就意味着他们的工作与 2003 年 Oechslin 的工作毫无关联，分布式密钥搜索也与实际的表的生成无关，下面我们将重点介绍 Philippe Oechslin 在 2003 年改进后的算法，也就是目前著名的彩虹表算法。

3.3 本章小结

本章主要简要地介绍了 2 种典型的时空折中算法，Hellman 算法和差异点 DP 算法。时空折中算法主要包括预运算和在线分析两个步骤。Hellman 表和彩虹表具有不同的折中曲线，分别式 $TM^2 = N^2$ 和 $TM^2 = \frac{1}{2}N^2$ 。重点分析了算法的成功率，公式的推导演算和证明。

4 彩虹表算法的实现

4.1 彩虹表的算法分析

4.1.1 非完美彩虹表

如3.1节所述, Hellman 表的一个主要不足是表大小的限制, 当以增大表大小来获得更高得成功率时, 表中的节点碰撞而导致的链合并概率也会随之增加, 且增加的比例同 m 与 t 的平方成正比。为了解决这一不足, 在 2003 年, Oechslin 在 Hellman 算法的基础上结合了 Rivest 的差异点 (DP) 的优势, 提出了一种在当时比较先进的算法——彩虹表算法²。通过这种时空折中算法预运算所生成的表, 我们称之为彩虹表 (Rainbow Table), 彩虹表中的行称为彩虹链。与 Hellman 算法在一张表中只使用一个 f 函数不同, 彩虹表的每一列使用的 R 函数都不一样, 以构造不同的 f 函数, 如式(4.1)所示:

$$f_i(k) = R_i(S_k(P)) \quad (1 \leq i \leq t) \quad (4.1)$$

从上式可以看出, 彩虹表用 R_1, R_2, \dots, R_t 代替 Hellman 表中的 R 函数。因此, 只有在当彩虹表中两个节点在同一列发生碰撞时, 才会发生链合并。换句话说, 如果碰撞发生在不同列的两个节点, 由于不同列采用的不同的 R 函数, 碰撞点之后的链不会被合并。我们假设一张彩虹表有 m 条彩虹链, 每条彩虹链的长度为 t , 即为 $m \times t$ 的矩阵, 如式(4.2):

$$\begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & \cdots & k_{1,t-1} & k_{1,t} \\ k_{2,1} & k_{2,2} & \cdots & k_{2,t-1} & k_{2,t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{m,1} & k_{m,2} & \cdots & k_{m,t-1} & k_{m,t} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

现在来计算这张彩虹表的破解成功率 P , 这个问题实质上等价与整个矩阵每列的概率乘积。第一个元素 $k_{1,1}$ 命中的概率为 $\frac{1}{N}$, 那么这一列命中概率为 $P_1 = \frac{m_1}{N}$; 则第二列命中的概率为 $P_2 = 1 - (1 - \frac{1}{N})^{m_1}$, 当 $N \gg m_1$ 时,

$P_2 = 1 - e^{-\frac{m_1}{N}}$, 因此, 可以得到第 i 列的命中概率公式:

$$P_i = 1 - e^{-\frac{m_{i-1}}{N}} = \frac{m_i}{N} \quad (4.3)$$

在概率定理可以推出整张彩虹表的成功率公式为:

$$P_{Rainbow} \geq 1 - \prod_{i=1}^t \left(1 - \frac{m_i}{N}\right)$$

其中, $m_1 = m$, 且 $m_{n+1} = N \left(1 - e^{-\frac{m_n}{N}}\right)$ (4.4)

比较(3.9)式和(4.4)式, 我们可以发现 t 张 $m \times t$ Hellman 表与 1 张 $mt \times t$ 的彩虹表有大致相同的成功率。因为这两种算法所产生的表都覆盖了 mt^2 的密钥空间, 同时也都包含了 t 个不同的 R 函数。在假警方面, 两者也有类似的共同点, 单张彩虹表的一列以及 t 张 Hellman 表, 若包含 mt 个节点, 则这些节点中的任一碰撞都将会导致链的合并。上述这样等规模的 Hellman 表和彩虹表的比较可以参考式(4.5)

$$\begin{bmatrix} k_{1,0}^1 \xrightarrow{f_1} k_{1,1}^1 \xrightarrow{f_1} \dots \xrightarrow{f_1} k_{1,t}^1 \\ \vdots \\ k_{m,0}^1 \xrightarrow{f_1} k_{m,1}^1 \xrightarrow{f_1} \dots \xrightarrow{f_1} k_{m,t}^1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\begin{bmatrix} k_{1,0}^t \xrightarrow{f_t} k_{1,1}^t \xrightarrow{f_t} \dots \xrightarrow{f_t} k_{1,t}^t \\ \vdots \\ k_{m,0}^t \xrightarrow{f_t} k_{m,1}^t \xrightarrow{f_t} \dots \xrightarrow{f_t} k_{m,t}^t \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$\begin{bmatrix} k_{1,0}^1 \xrightarrow{f_1} k_{1,1}^1 \xrightarrow{f_2} \dots \xrightarrow{f_t} k_{1,t}^1 \\ k_{2,0}^1 \xrightarrow{f_1} k_{1,1}^1 \xrightarrow{f_2} \dots \xrightarrow{f_t} k_{2,t}^1 \\ \dots \\ \dots \\ k_{mt-1,0}^1 \xrightarrow{f_1} k_{1,1}^1 \xrightarrow{f_2} \dots \xrightarrow{f_t} k_{mt-1,t}^1 \\ k_{mt,0}^1 \xrightarrow{f_1} k_{1,1}^1 \xrightarrow{f_2} \dots \xrightarrow{f_t} k_{mt,t}^1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

在线分析过程中，彩虹表算法的搜索过程与 Hellman 算法有所不同，首先，将给定的密文 C 代入 R_t 的 y_1 ，并检索是否存在某个 $EP_i = y_1$ ，如果找到了匹配的 EP_i ，这可以通过保存的对应 SP_i 来恢复 $k_{t,t-1}$ 。若找不到匹配的 EP，则将密文 C 依次代入 R_{t-1} ，再次搜索判断是否存在正确的密钥在第 $t-2$ 列中。以此类推，最坏的情况下将遍历表中所有的 t 列，以 f 函数迭代次数为标准，这个代价为 $1 + 2 + \cdots + (t-1) = \frac{t(t-1)}{2}$ 次。而 Hellman 表需要搜索 t^2 次，因而单张的彩虹表相比 t 张 Hellman 表，搜索代价只有不到 Hellman 算法的一半。

在此小结一下彩虹表相对 Hellman 表的优点：

1)，从搜索次数角度来看，彩虹表最多需要比较 $\log(mt) * t$ 次，而 Hellman 表将最多需要 $\log(t) * t^2$ ，即搜索 t 表 t 列。因此彩虹表的比较次数约为 Hellman 的 $\frac{1}{t}$ ，彩虹表相应的 TMTO 曲线为：

$$TM^2 = \frac{1}{2}N^2 \quad (4.8)$$

2)，彩虹表中若发生彩虹链合并时，则会导致对应的 EP 点相同。当需要构造没有重复链的完美表（Perfect Table）时，可以通过检查 EPs 来完成。而 Hellman 表则无此特性。需要注意的是在完美表中并不是没有碰撞节点，而是碰撞节点不在同一列上出现。

3)，由于彩虹链中的 t 个 R 函数均不相同，因此链中将几乎不会产生循环。以 Hellman 链为例，若同一链中出现了两个节点 k_i, k_j ，使得 $k_i = k_j$ ，那么由于该链使用相同的 R 函数，故从这两个相同节点的后面节点都会相等，依次类推，最多会导致 $j-i$ 个节点的重复，进而缩小了整个 Hellman 表的覆盖率。该现象不会产生假警，然而会降低成功率。而彩虹表则没有相应的问题。

4)，与 Hellman 表的变形差异点（DP）算法相比，彩虹表的链条长度是固定的，这个特性对彩虹表的程序代码实现是十分有利的，同时也会使得假警率有所下降，从而提高了成功率。

4.1.2 完美彩虹表

当表中出现合并链时，彩虹表和差异点 DP 算法都可以通过检查是否具有相同的 EP 节点方式来检测出合并，而通常情况在预运算后生成的表需要排序的，这样一来就可以很容易地从表中剔除重复的链，而经过剔除重复链后的表我们称之为完美彩虹表。特别是在当内存空间有限时，我们总希望表能包含尽可能多的唯一节点，以提高成功率。生成相对应的 Hellman 完美表，则不得不搜索整张表，每个节点均要 $O(mt)$ 次搜索，显然这是不现实的。在完美彩虹表中，有 $m_i = m_1 = m (2 \leq i \leq t)$ ，因此成功率可化简为：

$$P_{perfect} = 1 - \prod_{i=1}^t \left(1 - \frac{m}{N}\right) \quad (4.9)$$

从(4.9)式可知，成功率直接与完美彩虹表的初始参数 m ， t 有关，也就是表越大，成功率 $P_{perfect}$ 应越大。同时与非完美彩虹表比较，不但减少了因存储重复节点而造成的空间浪费，而且节省了在线分析的时间代价。对于一个给定的 t ，假设选择 $m_1 = N$ 时得到的 m_t 为 $m_{max}(t)$ ，表示为完美彩虹表最大的独立结束节点 EPs 的个数，其中 $m_{i+1} = N \left(1 - e^{-\frac{m_i}{N}}\right) (1 \leq i \leq t)$ 。

当 $t \gg 1$ 时，利用泰勒公式可以得到¹⁵：

$$m_{max}(t) \approx \frac{2N}{t+2} \quad (4.10)$$

将上式代入(4.9)式便可得出完美彩虹表成功率的最大期望值为：

$$P_{perfect}^{max} = 1 - \left(1 - \frac{m_{max}}{N}\right)^t \approx 1 - e^{-t \frac{m_{max}}{N}} \approx 1 - e^{-2} \approx 86\% \quad (4.11)$$

也就是说，对于 N 和较大的 t ，完美彩虹表的成功率会随着 m ， t 的增大而趋于一个常量。因此，单张的彩虹表的成功率要小于 80%，若要较高的成功率 $P(P > 90\%)$ ，则可以通过多张彩虹表来实现。

4.2 彩虹表的构建与产生

4.2.1 密钥的生成

首先用随机函数生成一个 Index，为了确保 Index 在密钥空间 N 里，我们对 Index 进行取模运算： $Index \bmod N$ 。再执行 IndexToPlain() 函数得到在初始设定的密钥空间 N 里的密钥。

4.2.2 定义 Hash 函数

本文的实现了对 SHA-1、MD5 和 LM 三种 Hash 函数的破解，下面代码对 LM 算法的实现：

```

1 void HashLM(unsigned char* pPlain, int nPlainLen, unsigned char* pHash)
2 {
3     int i;
4     for (i = nPlainLen; i < 7; i++)
5         pPlain[i] = 0;
6     static unsigned char magic[] = {0x4B, 0x47, 0x53, 0x21, 0x40, 0x23,
7                                     0x24, 0x25};
8     des_key_schedule ks;
9     setup_des_key(pPlain, ks);
10    des_ecb_encrypt((des_cblock*)magic, (des_cblock*)pHash, ks, DES_ENCRYPT);
11 }

```

SHA1 和 MD5 函数的实现则是调用了 OpenSSL 的 API 函数：

```

1 unsigned char *MD5(const unsigned char *d, size_t n, unsigned char *md);

1 unsigned char *SHA1(const unsigned char *d, size_t n, unsigned char *md);

```

4.2.3 定义 Reduce 函数

Reduce 函数是将密文映射到密钥空间中，彩虹链中的每个位置使用的 Reduce 函数都是不同的，因此我们可以将彩虹链的位置作为 Reduce 函数的主要参数进行计算。所以 Reduce 函数定义如下：

$$R(\text{密文}, \text{密钥}) = (\text{密文} + \text{链位置} + \text{偏移量}) \bmod \text{密钥总空间} \quad (4.12)$$

具体的代码实现如下：

```

1 void CChainWalkContext::HashToIndex(int nPos)
2 {
3     m_nIndex = (*(uint64*)m_Hash + m_nReduceOffset + nPos)
4                 % m_nPlainSpaceTotal;
5 }

```

4.2.4 彩虹表参数

彩虹表算法中几乎每个参数都对构建一个高质量的彩虹表有影响，比如参数 m 决定彩虹表存储空间大小， t 决定在线分析的时间，彩虹表张数 l 代表了彩虹表的存储个数，同时也影响着破解成功概率。本小节将讨论如何有机地组合这些参数构成最优的彩虹表文件。首先我们将对上一节彩虹表算法的参数用 Matlab 软件实现函数封装，下面请看具体的参数实现：

1. 破解成功率 (P) 在整个算法中最为关键的性能指标之一，在保证高破解成功率的前提下，如果快速地破解密钥也是本文研究的关键技术之一。

```

1 \% 1 - (1 - 1 / N)^(m(1) + m(2) + m(3) + ... + m(t - 1))
2 \% m(1) = m, m(i) = N * (1 - (1 - 1 / N) ^ m(i - 1))
3 function ret = calc_success_probability(n, min, max, t, m, table_count)
4 format long g;
5 arr = zeros(1, t - 1);
6 arr(1) = m;
7 format long g;
8 N = calc_N(n,min,max);
9 for i = 2 : t - 1
10     format long g;
11     arr(i) = N * (1 - (1 - 1 / N) ^ arr(i - 1));
12 end;
13 exp = 0;
14 for i = 1 : t - 1
15     format long g;
16     exp = exp + arr(i);
17 end;
18 format long g;
19 success_probability_1 = 1 - (1 - 1 / N) ^ exp;

```

```

20 success_probability_table_count=1-(1-success_probability_1)^table_count;
21 ret = success_probability_table_count;
22
23 function ret = calc_N( n, min, max)
24 arr = zeros(1, max - 1);
25 for i = 1 : max
26     arr(i) = n^i;
27 end;
28 exp = 0;
29 for i = 1 : max
30     exp = exp + arr(i);
31 end;
32 ret = exp;

```

2. 密钥空间 (N) 是彩虹表算法对破解密钥算法的能力指标, 好的彩虹表能够在确保较高的破解成功率的情况下, 尽可能地包含大的密钥空间, 密钥空间是随着密钥长度的增长而几何增长的, 所以每增加一位密钥长度, 彩虹表的存储空间会大幅增大, 从而会影响破解成功率和破解时间等性能指标, 在 Matlab 下的函数封装如下:

```

1 function ret = calc_N( n, min, max)
2 arr = zeros(1, max );
3 for i = 1 : max
4     arr(i) = n^i;
5 end;
6
7 exp = 0;
8 for i = 1 : max
9     exp = exp + arr(i);
10 end;
11 format long g;
12 ret = exp;

```

3. 破解时间 是衡量彩虹表算法性能的最直观的参数, 也是本文重点优化的参数的, 减小破解时间, 提升破解速度的具体优化技术将在下一章详细介绍。

```

1 function ret = calc_max_cryptanalysis_time(t, table_count, step_speed)
2 ret = t*t/2 / step_speed * table_count;

```

4. 磁盘读取时间 是从存储上的一个性能指标，它决定于磁盘文件的大小和实验环境的存储方式，对这个参数的优化也是本文的重点。一般来说磁盘的读取时间会占到整个破解时间的 20% ~ 30%，在保证相同的破解成功率的前提下，减小彩虹表的存储大小，优化存储方式，提高文件读取速度，从而提高彩虹表算法的性能。

```
1 function ret = calc_max_disk_access_time(m, table_count, disk_speed)
2 ret = m*16/1024/1024 * disk_speed * table_count;
```

5. 磁盘占用空间 (M) 是彩虹表算法的空间代价，我们知道彩虹表算法是基于时空折中算法的，就是不断地在时间代价上和空间代价上平衡折中，如果在不增加时间代价的前提下，减小空间代价也是本文的实现的技术要点之一。

```
1 function ret = calc_disk_usage(m, table_count)
2 ret = ceil(m*16*table_count / 1024 / 1024 );
```

6. 彩虹链的长度 (t) 是每条彩虹链的在线计算步长，这个参数将影响到算法的假警个数以及在线分析的时间。在给定的破解成功率、密钥空间、彩虹链个数和彩虹表张数的条件下，我们需要计算出一个合适的链条长度，而不是随意估算一个。下面给出了 Matlab 程序的函数封装：

```
1 function ret = calc_t(N, success_probability, m, table_count)
2 success_probability_each=1-exp(log(1-success_probability)/table_count);
3 exp_min = log(1 - success_probability_each) / log(1 - 1 / N);
4
5 exp_all = 0;
6 t = 0;
7 next = m;
8
9 while exp_all < exp_min
10     exp_all = exp_all + next;
11     t = t + 1;
12     next = N * (1 - (1 - 1 / N) ^ next);
13
14     if t > 131072 % too large
15         break;
16     end;
17 end;
```

18

```
19 ret = t;
```

4.2.5 构建彩虹表

彩虹表算法实现的首要事情就是要产生符合自己需求的彩虹表文件，本次实现要求彩虹表的破解成功率在 99.9% 以上。

彩虹表算法中有许多参数变量，在构造一张彩虹表前必须先弄明白每个参数的含义，在这里我们为了方便下文叙述，统一给出彩虹表算法中会出现的参数和变量：Hash 计算能力，取决于 CPU 和 GPU 等硬件设备；硬盘读写速度，取决于硬盘；密钥空间 N ；

1. 每条彩虹链的长度 t ；
2. 一张彩虹表中彩虹链的个数 m ；
3. 彩虹表的个数 L ；
4. 磁盘占用量 M 彩虹表所占用的存储空间；
5. 破解成功率 P 破解密钥的成功概率；
6. 破解时间；
7. 预运算时间；

由上述可知，一张彩虹表是由许多彩虹链组成的，每个彩虹链在程序中的数据结构如下：

```
1 struct RainbowChain
2 {
3     uint64 nIndexS;           //链表的初始元素
4     uint64 nIndexE;           //链表的末尾元素
5 }
```

函数主要输入参数：

```
1     string sHashRoutineName = argv[1];
2     //需要破解的算法名称
```



```

3      string sCharsetName      = argv[2];
4      int nPlainLenMin         = atoi(argv[3]);
5      //密码长度最小值
6      int nPlainLenMax         = atoi(argv[4]);
7      //密码长度最大值
8      int nRainbowTableIndex    = atoi(argv[5]);
9      int nRainbowChainLen      = atoi(argv[6]);
10     int nRainbowChainCount     = atoi(argv[7]);

```

生成彩虹表的关键代码:

```

1      int i;
2      for (i = nDataLen / 16; i < nRainbowChainCount; i++)
3      {
4          cwc.GenerateRandomIndex();
5          uint64 nIndex = cwc.GetIndex();
6          int nPos;
7          for (nPos = 0; nPos < nRainbowChainLen - 1; nPos++)
8          {
9              cwc.IndexToPlain();
10             cwc.PlainToHash();
11             cwc.HashToIndex(nPos);           //缩减函数
12         }
13         nIndex = cwc.GetIndex();

```

初始节点 nIndexS 由 cwc.GenerateRandomIndex() 函数随机产生, 并把当前的 index 值也赋予 CChainWalkContext.m_nIndex 中, m_nindex 起到中间记录作用, 当经过 nRainbowChainLen (参数 t) 次循环计算得到 nIndexE。

彩虹表生成算法描述:

1. 将随机生成的 nIndexS 通过函数 cwc.IndexToPlain() 转化成明文 Plain, 这一转化过程与二进制转 16 进制差不多, 只是根据明文字符集长度 (m_nPlainCharsetLen) 来变化;
2. 对步骤 1 生成的 Plain 进行 Hash 函数计算, 通过 PlainToHash() 函数实现;
3. 对步骤 2 生成的 Hash 值进行缩减运算, 缩减函数为 HashToIn-

dex(nPos), 最后得到的 nIndex 必须在预设的字符空间范围内。

将以上三步循环 nRainBowChainLen 次数后, 我们将得到 nIndexE 和彩虹链的长度, 当生成了 m 条彩虹链之后, 这些彩虹链所组合起来的就是一张彩虹表文件。由于在循环过程中所产生的 index 只保存在内存里, 并不写入磁盘文件, 但是我们依然可以通过初始的 Index 计算出这过程中所有的 index 值。

$$\begin{bmatrix} Index_Start_1 & Index_End_1 \\ Index_Start_2 & Index_End_2 \\ \vdots & \vdots \\ Index_Start_m & Index_End_m \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

从彩虹表的结构(4.13)我们可以很容易得知一个彩虹链的所占的磁盘空间为 $2 * 64 = 128$ 比特, 也就是 16Byte。由此得到彩虹表磁盘空间占用公式:

$$M = 16 * m * l \quad (4.14)$$

其中 m 为彩虹链的条数, l 为彩虹表的个数。图4.1为彩虹表生成程序, hash_algorithm 为目标密码 hash 算法; charset 为密钥的字符集, 决定这张彩虹表的密钥空间; 还有链表长度和链表个数等参数。从图4.2中我们可以

```

/home/kaka/Downloads/rainbowcrack-1.5-linux32 [ 11 files 352Kb ]
[12:46:48 root] rainbowcrack-1.5-linux32 # ./rtgen
RainbowCrack 1.5
Copyright 2003-2010 RainbowCrack Project. All rights reserved.
Official Website: http://project-rainbowcrack.com/

usage: rtgen hash_algorithm charset plaintext_len_min plaintext_len_max table_index chain_len chain_num part_index
       rtgen hash_algorithm charset plaintext_len_min plaintext_len_max table_index -bench

hash algorithms implemented in alglib0.so:
lm, plaintext_len limit: 0 - 7
ntlm, plaintext_len limit: 0 - 15
md5, plaintext_len limit: 0 - 15
sha1, plaintext_len limit: 0 - 20
mysqlsha1, plaintext_len limit: 0 - 20
halfmchall, plaintext_len limit: 0 - 7
ntlmchall, plaintext_len limit: 0 - 15
oracle-SYSTEM, plaintext_len limit: 0 - 10
md5-half, plaintext_len limit: 0 - 15

example: rtgen md5 loweralpha 1 7 0 1000 1000 0
         rtgen md5 loweralpha 1 7 0 -bench
    
```

图 4.1 彩虹表生成程序

看到 20 张彩虹表, hash_algorithm 为 ntlm 算法, ntlm 为 Windows NT 系统的用户登陆验证算法; 密钥字符集为 numeric, 也就是 0 ~ 9, 最小长度为 1, 最大长度为 12, 因此这个密钥空间 $N = 10^{12} + 10^{11} + \dots + 10^2 + 10$,

```

[/media/kaka/ntlm_numeric#1-12] [ 20 files 8.8Gb ]
[12:38:02 root] ntlm_numeric#1-12 # ll
total 9175156
-rw-r--r-- 1 kaka kaka 469762080 May 26 10:51 ntlm_numeric#1-12_0_8300x67108864_0.rtc
-rw-r--r-- 1 kaka kaka 469762080 May 26 10:51 ntlm_numeric#1-12_0_8300x67108864_1.rtc
-rw-r--r-- 1 kaka kaka 469762080 May 26 10:52 ntlm_numeric#1-12_0_8300x67108864_2.rtc
-rw-r--r-- 1 kaka kaka 469762080 May 26 10:52 ntlm_numeric#1-12_0_8300x67108864_3.rtc
-rw-r--r-- 1 kaka kaka 469762080 May 26 17:44 ntlm_numeric#1-12_1_8300x67108864_0.rtc
-rw-r--r-- 1 kaka kaka 469762080 May 26 17:44 ntlm_numeric#1-12_1_8300x67108864_1.rtc
-rw-r--r-- 1 kaka kaka 469762080 May 26 17:45 ntlm_numeric#1-12_1_8300x67108864_2.rtc
-rw-r--r-- 1 kaka kaka 469762080 Jun 2 20:33 ntlm_numeric#1-12_1_8300x67108864_3.rtc
-rw-r--r-- 1 kaka kaka 469762080 Jun 2 20:33 ntlm_numeric#1-12_2_8300x67108864_0.rtc
-rw-r--r-- 1 kaka kaka 469762080 Jun 2 20:34 ntlm_numeric#1-12_2_8300x67108864_1.rtc
-rw-r--r-- 1 kaka kaka 469762080 May 25 21:25 ntlm_numeric#1-12_2_8300x67108864_2.rtc
-rw-r--r-- 1 kaka kaka 469762080 May 26 18:05 ntlm_numeric#1-12_2_8300x67108864_3.rtc
-rw-r--r-- 1 kaka kaka 469762080 May 26 18:05 ntlm_numeric#1-12_3_8300x67108864_0.rtc
-rw-r--r-- 1 kaka kaka 469762080 May 26 18:05 ntlm_numeric#1-12_3_8300x67108864_1.rtc
-rw-r--r-- 1 kaka kaka 469762080 May 26 18:06 ntlm_numeric#1-12_3_8300x67108864_2.rtc
-rw-r--r-- 1 kaka kaka 469762080 May 26 18:06 ntlm_numeric#1-12_3_8300x67108864_3.rtc
-rw-r--r-- 1 kaka kaka 469762080 May 26 18:07 ntlm_numeric#1-12_4_8300x67108864_0.rtc
-rw-r--r-- 1 kaka kaka 469762080 Jun 2 20:34 ntlm_numeric#1-12_4_8300x67108864_1.rtc
-rw-r--r-- 1 kaka kaka 469762080 Jun 2 20:34 ntlm_numeric#1-12_4_8300x67108864_2.rtc
-rw-r--r-- 1 kaka kaka 469762080 May 26 17:44 ntlm_numeric#1-12_4_8300x67108864_3.rtc

```

图 4.2 ntlm 算法彩虹表

其他的密钥并不在这 20 张表里，一定不会被搜索到，想要破解需要加大链的数目，或者链表长度，或者表的张数；链表长度为 8300，链表个数为 67108864，这样通过公式(4.14)我们很容易到这 20 张表的所占用的磁盘空间 $M = 20GB$ ，每张表的大小为 1GB。

4.3 密钥破解

4.3.1 搜索算法

用彩虹表进行破解的过程其实质就是对彩虹表文件进行整表搜索的过程，简单来讲就是查表。破解的成功率和破解的时间基本上由预运算所生成的彩虹表决定，生成优质的彩虹表对破解的效率影响很大。具体的优化方法和技巧我们将在下文详细介绍，这一节我们要讨论的是彩虹表如果进行查表破解。首先我们看图4.3:

从图中我们看到需要破解的密钥为“re3xes”，第一步，将“re3xes”代入 R 函数，得到索引“rambo”，将此索引从每个彩虹链的末端开始对比；第二步，若不匹配，则通过算法中的 f 函数(4.1)进行遍历整条彩虹链，若在这条链表中没找到匹配的，则往后遍历表中的其他彩虹链；第三步，当在链中找到匹配的索引后，记录该链表的首部索引；第四步，通过第三步找到的索引，进行 f 函数计算得到产生目标密钥“re3xes”的明文“passwd”，并

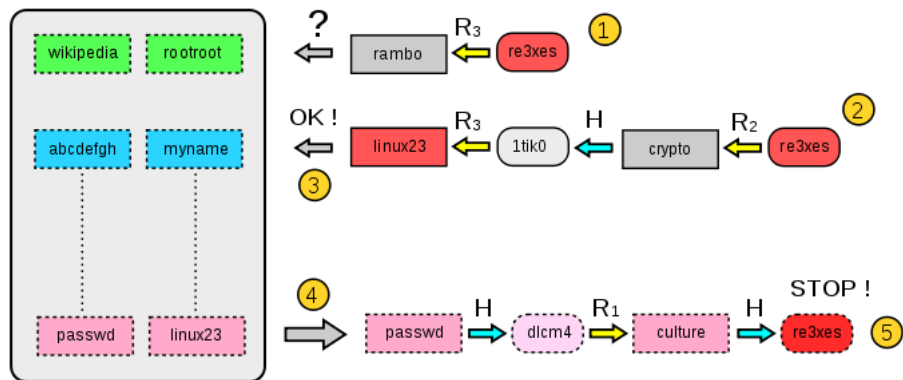


图 4.3 彩虹表查表过程

验证其正确性。

4.3.2 假警分析

无论是上一章介绍的 Hellman 经典算法，还是本文采用的彩虹表算法，都是会发生假警，假警的最大弊端是对存储资源和计算时间造成严重的重复和浪费，因此对假警的检测尤为重要，彩虹表算法中采用的检查点技术用于检测假警，通过实验表明，增加 0.89% 的内存用于存储检查点节省了 10.99% 的密码分析时间。

4.3.3 举例

我们取 $m = 200000000$ $t = 5700$ $l = 6$ $N = 797193877550$ ；其中 N 为密钥空间，密钥长度取 17 位，取值范围为：小写字母+数字+10 个特殊字符，计算 $N = 50^1 + 50^2 + 50^3 + 50^4 + 50^5 + 50^6 + 50^7 = 797193877550$ 。通过 Matlab 程序，计算出单张表成功破解的概率为：

» *calc_success_probability*(797193877550, 5700, 200000000)

ans 0.6864

6 张表的破解概率为 $1 - (1 - 0.6864)^6 = 0.9990 = 99.9\%$ ；占用的存储空间为： $m * 16 * l = 19200000000B = 18.3GB$ 。

我们使用彩虹表生成程序得到上述的彩虹表文件，在得到彩虹表文件后，接下来的工作就是准备密钥，我们从一台 Windows XP 系统中设定一个登陆密码为：577755949978。从 SAM 文件中提取出这个用户的 NTLM

的 Hash 值，为 `20fcb07c99ba7f2a6491294a6f032113`。

我们采用两个实验环境进行破解该密码，第一个为普通的 PC 台式机，Intel(R) Pentium(R) D CPU 2.80GHz 的处理器，2G 内存，我们得到的结果如下：从结果我们可以看出破解的总时间为 26.48s，磁盘读写时间为

```
[/home/kaka/Desktop/rainbowcrack-1.5-linux32] [ 8 files 284Kb ]
[14:19:34 root] rainbowcrack-1.5-linux32 # ./rcrack /media/kaka/ntlm_numeric#1-12/*.rtc -h 20fcb07c99ba7f2a6491294a6f032113
1323638784 bytes memory available
2 x 469762048 bytes memory allocated for table buffer
132800 bytes memory allocated for chain traverse
disk: /media/kaka/ntlm_numeric#1-12/ntlm_numeric#1-12_0_8300x67108864_0.rtc: 469762048 bytes read
searching for 1 hash...
disk: /media/kaka/ntlm_numeric#1-12/ntlm_numeric#1-12_0_8300x67108864_1.rtc: 469762048 bytes read
searching for 1 hash...
plaintext of 20fcb07c99ba7f2a6491294a6f032113 is 577755949978
disk: /media/kaka/ntlm_numeric#1-12/ntlm_numeric#1-12_0_8300x67108864_2.rtc: 469762048 bytes read
disk: thread aborted

statistics
-----
plaintext found:          1 of 1
total time:              26.48 s
  time of chain traverse: 16.04 s
  time of alarm check:   4.04 s
  time of wait:          6.04 s
  time of other operation: 0.36 s
time of disk read:       24.38 s
hash & reduce calculation of chain traverse: 34436700
hash & reduce calculation of alarm check: 10088220
number of alarm:         3950
speed of chain traverse: 2.15 million/s
speed of alarm check:    2.50 million/s

result
-----
20fcb07c99ba7f2a6491294a6f032113  577755949978  hex:353737373535393439393738
```

图 4.4 破解实验结果 1

24.38s，假警数为 10088220，密码明文为：577755949978，与之前设定密码一致。我们还可以看到，在搜索这个密钥的过程中，并没有在第一张表找到，而是在第二张表中命中的。

```
[root@hp-dl580g7-01 rainbowcrack-1.5-linux64]# echo 3 > /proc/sys/vm/drop_caches
[root@hp-dl580g7-01 rainbowcrack-1.5-linux64]# ./rcrack ../ntlm/*.rtc -h 20fcb07c99ba7f2a6491294a6f032113
15969001472 bytes memory available
20 x 469762048 bytes memory allocated for table buffer
132800 bytes memory allocated for chain traverse
disk: ../ntlm/ntlm_numeric#1-12_0_8300x67108864_0.rtc: 469762048 bytes read
searching for 1 hash...
disk: ../ntlm/ntlm_numeric#1-12_0_8300x67108864_1.rtc: 469762048 bytes read
searching for 1 hash...
plaintext of 20fcb07c99ba7f2a6491294a6f032113 is 577755949978
disk: ../ntlm/ntlm_numeric#1-12_0_8300x67108864_2.rtc: 469762048 bytes read
disk: thread aborted

statistics
-----
plaintext found:          1 of 1
total time:              11.84 s
  time of chain traverse: 2.87 s
  time of alarm check:   0.49 s
  time of wait:          8.14 s
  time of other operation: 0.33 s
time of disk read:       11.56 s
hash & reduce calculation of chain traverse: 68873400
hash & reduce calculation of alarm check: 11775500
number of alarm:         4215
speed of chain traverse: 23.98 million/s
speed of alarm check:    23.79 million/s

result
-----
20fcb07c99ba7f2a6491294a6f032113  577755949978  hex:353737373535393439393738
```

图 4.5 破解实验结果 2

第二个实验环境为 HP 的 DL580g7 服务器，配置的是 Intel(R) Xeon(R) E7350 1.87GHz 的处理器，16G 的内存，同样是破解上面的密钥，我们来看看实际的破解结果：我们可以看到，破解总时间为：2.22s，磁盘读入时间为：2.10s，假警数为：11775500，最后的破解结果也是正确的，密钥明文为：577755949978。

4.4 实验结果与分析

本次实验环境为普通台式 PC 机，酷睿 i5 双核 2.4GHz 处理器，4G 内存，操作系统为 RedHat 企业版 6.0。实验分两组进行，第一组为 1 个密钥，第二组为 10 个密钥，密钥字符集都为字母加数字，计算密钥空间 $N = 36 + 36^2 + 36^3 + \cdots + 36^{10} = 3760620109779060$ 。表 4.1 和表 4.2 为实验结果：

表 4.1 实验结果（一）

成功破解数	1/1 （100%）
平均破解时间	2.7 秒
最长破解时间	2.7 秒
平均假警次数	3103 次
平均磁盘读取时间	5.5 秒

表 4.2 实验结果（二）

成功破解数	10/10 （100%）
平均破解时间	28.35 秒
最长破解时间	32.44 秒
平均假警次数	20335 次
平均磁盘读取时间	9.70 秒

从以上实验数据可以看出磁盘读取的时间占破解的时间的较大比例，对彩虹表的存储优化可以减少磁盘的读取时间，从而降低整体的破解时间；我们还看到假警次数还是比较多，在下面的优化方案中，有对假警检测技术的优化，减少资源的浪费，提高算法的破解效率。

4.5 本章小结

本章主要介绍了彩虹表算法的 C++ 实现，主要包括彩虹表的预运算，即彩虹表的生成和利用彩虹表进行密钥破解。关键的程序代码可以参考附件。

5 彩虹表算法的优化

5.1 基于 CUDA 并行计算优化

密码破解主要的瓶颈在于现有的计算能力上，假如我们目前已经拥有量子计算机的处理能力，那么现有的所有的现代加密算法都是可以短时间内被破解的，所以我们要提升破解时间，最首要的办法就是对系统的计算能力进行优化，本文将提出两个优化方案，并实现了基于 GPU 的优化方案。下面两张图为 EWSA（Elcomsoft Wireless Security Auditor）对无线加密算法 WPA/WPA2 PSK 密钥破解的数据对比和 Pyrit 软件在 GPU 上加速后的数据对比。从图中数据可以看出采用了 GPU 加速后的破解速度有很明显提升。基于 GPU 并行计算加快破解速度会受制与显卡本身的硬件条件限制，

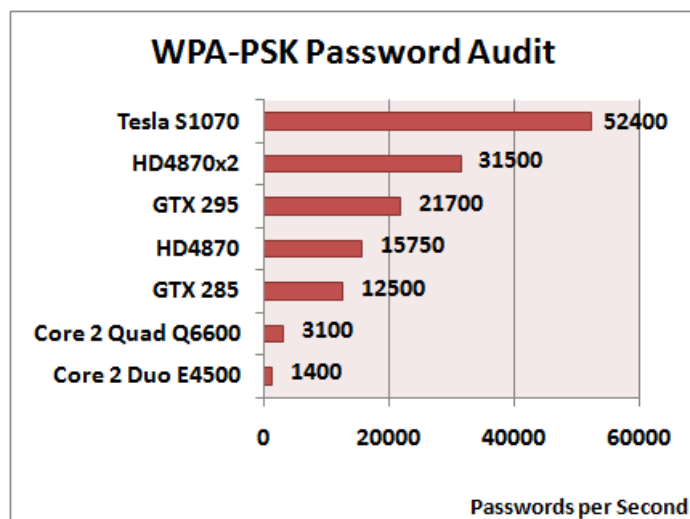


图 5.1 EWSA 基于 GPU 加速破解 WPA 密钥的速度对比

因为每个不同型号的显卡配备的显存、寄存器、线程调度数等等都是不一样的。如何在这些局限的硬件资源上合理分配，则是 GPU 程序设计的关键，也是性能提升的关键。例如如何控制在同一个线程组里的线程分支数、访问全局内存的顺序都是一些常用的优化代码的方法。在实际代码设计过程中，我们首先需要将计算任务并行化，把这些并行任务分配到线程上，再由这些线程组成线程块，这些线程块将会被线程管理器动态地分配到各个流处理器进行独立的并行计算。下面我们将从 GPU 的硬件特性和软件特性两方面进

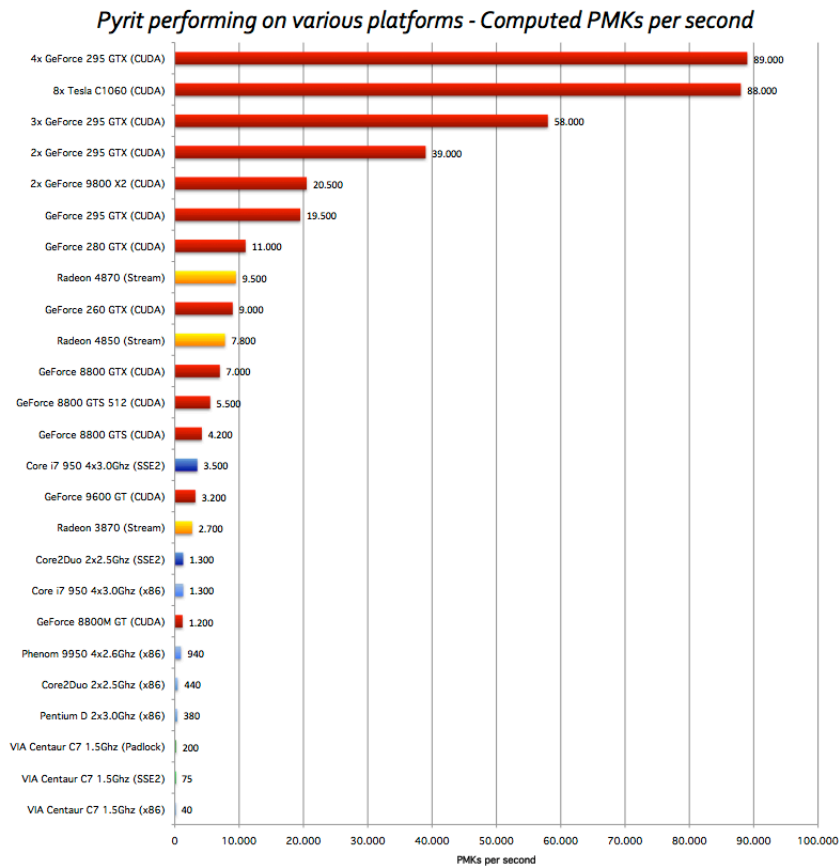


图 5.2 Pyrit 基于 CUDA 性能测试

行优化，例如减小数据传输的开销、解决共享内存的访问冲突和降低条件分支的影响等等¹⁶。Nvidia GPU 不同构架的一些规格比较，见表5.1

表 5.1 三代 GPU 间的一些规格比较

GPU	G80	GT200	Fermi
CUDA Cores	128	240	512
双浮点数计算能力	无	30FMA	256FMA
单浮点数计算能力	128MAD	240MAD	512FMA
特殊功能单元（SFUs）/SM	2	2	4
Warp 调度器/SM	1	1	2
共享内存/SM	16KB	16KB	可配置 48KB/16KB
L1 缓存/SM	无	无	可配置 16KB/48KB
L2 缓存	无	无	768KB
ECC 内存交验	不支持	不支持	支持

并发内核数	无	无	最多 16
地址位宽	32b-bit	32-bit	64-bit

5.1.1 减小数据传输开销

在目前的计算机体系结构中，像显卡这样的外设一般都是通过 PCI Express 总线连接到北桥芯片，再通往 CPU，这和主机内存共享与 CPU 传输带宽。当 CPU 与 GPU 的数据频繁交换时，这个数据传输的开销将会是程序性能主要瓶颈。因此我们的程序必须尽量地减少 CPU 与 GPU 的数据交换，通常的办法有在 GPU 中动态生成程序所需的数据，也可以采用异步调用，使数据传输和计算能基本同时进行。

5.1.2 共享内存访问冲突

在表5.1中我们可以看到每个 SM 都会拥有 16KB 的以上的共享内存，这块共享内存的作用是存储全局内存以外的数据，也可以作为块与块之间线程交换数据的媒介。它的访问速度比寄存器慢，但要比局部内存和全局内存要快一些。如果不出现访问冲突，一个线程访问共享内存的速度几乎接近访问寄存器的速度。图5.3Fermi 构架的内存体系结构，除了拥有可配置的共享内存外，还有 L1 和 L2 的高速缓存。

5.1.3 核心配置优化

核心程序的配置如块数、块内线程数都依赖核心代码本身，但仍然需要手工评估性能，排除大部分低效的配置。配置好块数和块内线程后，计算 SM 利用率，便可得到 SM 上活动 Warp 和最大 Warp 的比，通常我们也无需达到 100%。

首先，当线程请求的寄存器数大于块内最大寄存器，或者请求的寄存器、共享内存超出了 SM 所提供的资源上限时，核心代码将无法启动。

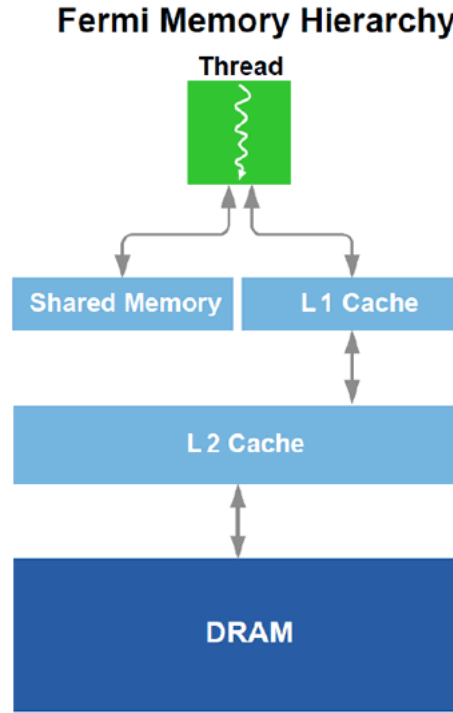


图 5.3 Fermi 构架的存储层次结构

而一个块的寄存器占用数 BR 可由下式计算得到：

$$Max(R * Max(T, 32), \frac{R_{max}}{32}) \quad (5.1)$$

其中 R 表示核心请求的寄存器数， R_{max} 表示 SM 所能提供的最大可用寄存器数， T 表示用户指定的块内线程数。以及 $Max(T, 32)$ 是为了保证一个 SM 应分配 32 个线程。而一个块的共享内存总量则由静态共享内存、动态共享内存以及用于传递核心参数的共享内存这三部共同组成。以上所请求的数值可通过向编译器指定参数（`-ptxas-options=-v`）的方式，在运行前获得并可作为资源估算的依据。对于寄存器一项需要注意的是，double 以及 long long 类型的变量将占用两个 32 位寄存器。结合核心请求的资源数，当我们确定了一次 CPU-GPU 交互之间参与计算的总线程数 AS 后，块内线程数 BS 的确定将取决于 $\frac{AS}{BS}$ 个块是否能充分利用 GPU 提供的所有 SM 的计算能力。首先，配置参数应指定至少与 SM 数相等的块数。其次，若 SM 只能分配得到一个块，则一旦块中的 Warps 均因为访存或线程同步等原因暂时挂起，SM 将会因为没有活动块来掩盖访问延迟而处于空闲态。所以，通常应让的数量使得每个 SM 能有两个或两个以上的活动块，如此可以最多提升

50% 以上的性能。需要注意的是,若希望有两个活动块,则需要 GPU 静态地拥有能满足两个块内所有线程需求的资源。理论上,越多的活动块,越能够组成吞吐量更高的流水线,这也是我们需要参照核心请求资源数,从而预先规划配置参数的原因。一般地一个格内至少应有 100 个块,以适应 GPU 多级流水线的设计。除了要求有足够的块数,同样地块内线程数也类似的方法。一般的块内线程数应是 Warp 大小 (32) 的倍数,以防止处理器空转。理想情况下,一个块内的线程越多越好,但是仍然是由于资源的限制,越多的线程,则每个线程所分配的寄存器、共享内存就越少,甚至会使得核心启动失败。一般地,应有块内线程数大于 64,通常 192 或者 256 会是更好的选择,否则过少的线程将很难掩盖块内 Warp 的访存延迟。

5.1.4 指令级别优化

这项优化工作一般是有 GPU 的编译器来作的,在 CUDA 中是有 nvcc 编译器来完成的。尽量使用低延迟的指令,对全局变量或寄存器以外的局部变量,尽量少用需要多次 Load 和 Store 的操作,需要减少循环操作的开销。以下为一些典型的优化方法:

1), 我们知道 GPU 中诸如 mul,div 以及 rem 之类的指令,相较于 add,sub 以及位操作,其时钟延迟高出 4-30 倍之间,因而,需要尽可能不使用高延迟指令或通过低延迟指令作等价的转换。如 CUDA2.3 的编译器,将 32 位的数组 (uint Array[size]) 的下标操作翻译为 $Array + index * 4$,而等价的低延迟操作为 $Array + index \ll 2$ 。此情况可通过保留 Array 的类型的方法,来克服由强制转换带来的编译器优化困难。

2), 对于全局变量或难以寄存器外的局部变量,应尽量减少 $+, =, * =$ 等需要多次 Load 和 Store 的操作,通常应将相应变量放入寄存器或者共享存储。3), 对于循环操作, CUDA 提供了 `#pragma unroll` 关键字用于简单循环的展开以减少分支和循环本身的开销。但是当需要对循环展开时,仍然需要仔细观察循环体本身,并在资源使用、局部性以及上下文相关性等方面做权衡。一般的简单循环编译器会自动展开,特别是当循环体中的指令数接近于循环外层所需要指令时通常建议展开,而当循环次数较大时则只能由

开发者显式地指定循环展开层数。同时我们也应注意到，当循环体中的复杂操作前后相关性较大（例如前一操作的结果是后一操作输入）或者后一循环依赖于上一个循环时，展开效果将并不明显。因为展开后的代码也很难利用 GPU 中的流水线处理机制。但无论采用那种方式，都应该检查编译后的 PTX 是否合理，尤其是寄存器使用情况、跳转指令条数和位置等，以防止编译器作出错误的优化判断。

5.1.5 存储合并访问

从文献¹⁷可知，SM 会以时间片轮询的方式逐个调度每个 Warp。各个 SM 一次只需要足够的资源以运行运行 32 个线程（通常块内线程数要远大于 32），其中的 8 个 SP 将分 4 个及其周期的时间偏离所有的线程（我们假设此处的指令为大多数可在一个周期内完成简单指令）。当 SM 执行一条访存指令时，它首先会发出一条访存请求，并随机转向下一个就绪 Warp，而当前 Warp 将被挂起直到数据访问完成，才能再次进入就绪态并被等待属于它的时间片。理想的情况下，该 Warp 内的访存请求没有冲突，则该请求可在一个访存事务内完成。然而，事实上是否能在一个事务中结束访问，是严重依赖于 Warp 内每个线程所访问存储的地址是否可合并这个事实的（Coalesced Memory Accesses）。简单地讲，如果每个线程的访存地址是连续的，则所有 Warp 内的请求可以合并为一个访存事务，否则将可能产生多个事务并导致该 Warp 需要更多的等待时间¹⁸。

5.1.6 基于 CUDA 的云计算平台

云计算是网格计算、分布式计算、并行计算、效用计算、网络存储、虚拟化、负载均衡等传统计算机和网络技术发展融合的产物。在⁴一文中使用了 Hadoop 分布式集群优化彩虹表算法，实际上 Hadoop 也可以称之为一种云平台。我们也可以设计一个基于 GPU 加速的云计算平台，通过云平台的计算能力提升彩虹表的预运算和破解的速度。亚马逊 EC2 就是这样的—一个平台，它可以让用户按照自己的硬件需求租用计算机来获取计算能力。

5.2 存储优化

对于时空折中算法而言，除了要对时间进行优化，还有对空间进行优化，在不增加（或增加少量）时间代价的前提，如何减小空间代价，这就需要我们对系统进行存储优化，因为时空折中算法的性能随着存储空间的减少而降低。我们将从两方面进行改进。第一，针对存储文件本身进行优化，也就是彩虹表文件，我们将设计一个新型的彩虹表存储结构体，减少彩虹表的磁盘存储空间，缩小系统读取文件的时间，从而提升破解的速度；第二，优化存储系统，如采用适合大文件的文件系统，采用快速的物理存储设备等方面提升读取速度。

5.2.1 新型彩虹表文件

从上一章彩虹表磁盘空间占用公式(4.14)可知，想要覆盖更大的密钥空间要么增加彩虹链数或者彩虹表的张数，这都会产生庞大的彩虹表文件，可能会达到几百个 GB，甚至上 TB 的文件，这将会增加大量的文件读取时间和磁盘空间，因此对表的存储结构进行优化将十分有必要。我们将新设计的彩虹链，在以前的存储结构中我们是使用了一个 64 比特的非负整形变量定义开始节点，而在实际当中，我们并没有必要全部使用这 64 比特的数据来存储它，实际上只要能保证彩虹链的初始节点是随机地来自密钥空间 N 就可以。在第四章中的 ntlm 的彩虹表中，我们只定义了 26 比特的开始节点和 30 比特的末端节点，这样一条彩虹链所占用的字节数为 7Bytes。代入公式(4.14)可以得到一张优化后的表的大小为 448MB，优化了 56.25%。这样大大减小系统的存储空间和读取文件的时间。



```
[/media/kaka] [ 4 files 40Kb ]
[16:18:45 root] kaka # du -h ntlm_numeric#1-12/
8.8G    ntlm_numeric#1-12/
```

图 5.4 优化后彩虹表的空间大小

新的彩虹链的数据结构实现如下，在以后的测试实验中，我们将都采用这种优化过的彩虹表。

```
1 struct RTCFileHeader
```

```

2 {
3     unsigned int    uVersion;
4     unsigned short  uIndexSBits;
5     unsigned short  uIndexEBits;
6     uint64          uIndexSMin;
7     uint64          uIndexEMin;
8     uint64          uIndexEInterval;
9 };

```

5.2.2 文件系统的优化

在存储上，除了对表的大小进行优化，还可以对系统的储存架构进行优化。在文件系统上，我们采用先进的 XFS 文件系统，XFS 是由 Silico Graphics,Inc. 于 90 年代初开发的，它采用了优化算法，对查询分配存储空间非常快，可以支持上百万 T 字节的存储空间，特别是对大文件的支持表现相当出众；XFS 采用 B+ 树结构保证文件系统可以快速搜索于空间分配；XFS 几乎以接近裸设备 I/O 的性能存储数据，在单个文件系统测试种，其吞吐量可高达 7GB 每秒，对单个文件的读写操作，其吞吐量可达 4GB 每秒。基于 XFS 以上特性，正符合彩虹表多个大文件读取的特点，下图为 XFS 与 EXT3、EXT4 的性能比较：从这上面两组性能测试数据我们可以

```
=====
Tue 01 Nov 2011 07:30:10 AM EDT
=====
```

KERNEL		xfs													
		=====													
1 -	2.6.32-131.17.1.el6.x86_64														
2 -	2.6.32-214.el6.x86_64														
TEST	KERNEL	ALL IOS	INIT WRITE	RE WRITE	READ	RE READ	RANDOM READ	RANDOM WRITE	BACKWD READ	RECRE WRITE	STRIDE READ	F WRITE	FRE WRITE	F READ	FRE READ
InCache	1	2099	964	1650	2870	2990	2783	1396	2592	3186	2873	905	1547	2850	3067
InCache	2	2082	968	1569	2955	3094	2830	1335	2638	2999	2928	886	1428	2860	3147
		.	.	.	.	.	.	.	.	-5.9	.	.	-7.7	.	.
DirectIO	1	199	166	177	258	261	192	157	218	177	211				
DirectIO	2	199	168	176	256	256	196	155	220	179	210				
					
OutOfCache	1	452	564	565	700	712	109	63	342	4532	169	445	543	681	694
OutOfCache	2	450	567	567	691	686	108	66	339	4307	163	441	548	700	700
	
InCacheMMAP	1	1723	789	1562	2083	2344	2227	1260	2152	1503	2447				
InCacheMMAP	2	1742	806	1593	2116	2350	2188	1283	2180	1513	2494				
					
InCacheFsync	1	692	163	172	1162	2927	2636	132	1094	891	1092	154	175	2773	3128
InCacheFsync	2	694	166	176	1157	3025	2657	130	1150	834	1086	152	178	2746	3110
		.	.	.	.	.	.	.	+5.1	-6.4	.	.	.	.	.

图 5.5 XFS 性能测试

看出 XFS 在大多数的选项上要优于 EXT4 文件系统，特别是在大文件的


```
=====
Tue 01 Nov 2011 07:28:31 AM EDT

KERNEL                                ext4
-----
1 - 2.6.32-131.17.1.el6.x86_64
2 - 2.6.32-214.el6.x86_64
```

TEST	KERNEL	ALL IOS	INIT WRITE	RE WRITE	READ	RE READ	RANDOM READ	RANDOM WRITE	BACKWD READ	RECRE WRITE	STRIDE READ	F WRITE	FRE WRITE	F READ	FRE READ
InCache	1	1988	841	1429	3089	3293	2967	1199	2614	2554	2816	765	1319	2769	3322
InCache	2	1982	859	1438	3105	3294	2894	1184	2525	2568	2739	791	1333	2758	3266
	
DirectIO	1	204	170	182	255	260	198	167	221	188	213				
DirectIO	2	199	161	175	254	258	196	161	220	181	210				
		.	-5.2	.	.	.	.	.	.	.	.
OutOfCache	1	453	540	566	706	706	111	75	348	3527	168	451	564	706	705
OutOfCache	2	456	549	570	707	709	111	74	351	3576	173	454	567	714	714
	
InCacheMMAP	1	1723	851	1508	2164	2341	2188	1155	2247	1443	2512				
InCacheMMAP	2	1731	852	1514	2194	2362	2207	1160	2235	1451	2512				
					
InCacheFsync	1	611	140	144	867	3079	2835	127	830	701	857	132	142	2713	3311
InCacheFsync	2	636	152	156	936	3180	2803	129	879	720	900	140	151	2716	3323
		.	+8.5	+7.8	+7.9	.	.	.	+5.9	.	+5.1	+5.7	+6.4	.	.

图 5.6 EXT4 性能测试

```
=====
Tue 01 Nov 2011 07:27:48 AM EDT

KERNEL                                ext3
-----
1 - 2.6.32-131.17.1.el6.x86_64
2 - 2.6.32-214.el6.x86_64
```

TEST	KERNEL	ALL IOS	INIT WRITE	RE WRITE	READ	RE READ	RANDOM READ	RANDOM WRITE	BACKWD READ	RECRE WRITE	STRIDE READ	F WRITE	FRE WRITE	F READ	FRE READ
InCache	1	1789	516	1195	3030	3388	2943	1017	2721	2285	3023	488	1108	2955	3374
InCache	2	1773	501	1178	3049	3434	2865	987	2709	2279	3031	486	1079	2950	3391
	
DirectIO	1	192	168	171	237	248	192	146	214	177	202				
DirectIO	2	193	167	171	239	249	192	145	216	180	203				
					
OutOfCache	1	254	123	119	644	654	106	41	324	3045	161	90	106	663	673
OutOfCache	2	335	297	284	646	655	109	33	336	3169	170	262	282	624	630
		+31.8	+141.3	+137.4	.	.	.	-20.2	.	.	+5.5	+188.7	+165.2	-5.9	-6.3
InCacheMMAP	1	1835	1032	1597	2156	2375	2167	1394	2268	1585	2571				
InCacheMMAP	2	1850	1042	1598	2248	2390	2186	1345	2281	1623	2600				
					
InCacheFsync	1	833	113	175	2817	3409	2903	133	2618	919	2914	100	175	2984	3400
InCacheFsync	2	857	127	191	2908	3413	2874	132	2639	894	2965	112	190	2872	3409
		.	+12.0	+8.8	.	.	.	.	.	.	.	+12.0	+8.4	.	.

图 5.7 EXT3 性能测试

读取上。

5.2.3 存储技术的优化

目前的存储技术主要分为三大类：直接附加存储、网络附加存储和 SAN 存储方式。直接附加存储方式与我们普通 PC 的存储构架一样，外部的存储设备都是直接连接在服务器的内部总线上，是整个服务器结构的一部分。网络附加存储方式则全面改进了以前低效的 DAS 存储方式。它采用独立于服务器，单独为网络数据存储而开发的一种文件服务器来连接所存储设备，自形成一个网络。这样数据存储就不再是服务器的附属，而是作为

独立网络节点而存在于网络之中，可由所有的网络用户共享。SAN 存储方式创造了存储的网络化。存储网络化顺应了计算机服务器体系结构网络化的趋势。SAN 的支撑技术是光纤通道 (FC Fiber Channel) 技术。它是 ANSI 为网络和通道 I/O 接口建立的一个标准集成。FC 技术支持 HIPPI、IPI、SCSI、IP、ATM 等多种高级协议，其最大特性是将网络和设备的通信协议与传输物理介质隔离开，这样多种协议可在同一个物理连接上同时传送。

我们还可以采用 iSCSI 网络存储结构，iSCSI 技术一种优 IBM 公司研究开发的，是一种新存储技术，可是实现在 IP 网络上运行 SCSI 协议，使其能在高速千兆或万兆以太网上进行网络传输。再加上 FCoE 技术，可以达到几 Gb/s 的存储速度。

接着是对存储硬件升级，这里我们主要升级的是硬盘，下表 5.2 是我们对不同配置硬盘的读速度进行数据对比，从表中可以明显看出使用 SSD 硬盘 RAID0 阵列后，读取速度将比一块 7200 转的硬盘提升了 10 倍，这将大大缩小破解的实际时间。最后的需要升级的系统内存，我们知道在计算机存储体系结构中，内存的读取速度要比硬盘快上许多倍，在 Linux 系统上内存以 /dev/shm/ 设备呈现给用户，用户可以对次进行读写操作。

表 5.2 各种存储系统读速度对比数据

硬盘配置	读速度 (hdparm -t)	索引速度
1x Maxtor 6B250S0 7200 RPM	54MB/s	640h/s
6x Seagate 7200 RPM (RAID6)	390MB/s	4375h/s
2x APPLE SSD SM128C (RAID0)	522MB/s	6120h/s

在 HP DL580g7 服务器上配置有 16GB 的内存，而我们实验所用的彩虹表一共占用磁盘空间 8.8GB，我们把磁盘上的文件目录挂载到 tmpfs 文件系统上，执行命令 “`mount -t tmpfs -o size = 100% /test`”，然后关闭交换分区 “`swapoff -a`”。为了消除缓存的影响，我们清空所有虚拟内存的缓存 “`echo 3 > /proc/sys/vm/drop_caches`”。

statistics	

plaintext found:	1 of 1
total time:	11.37 s
time of chain traverse:	2.56 s
time of alarm check:	0.40 s
time of wait:	8.11 s
time of other operation:	0.29 s
time of disk read:	11.14 s
hash & reduce calculation of chain traverse:	68873400
hash & reduce calculation of alarm check:	11775500
number of alarm:	4215
speed of chain traverse:	26.84 million/s
speed of alarm check:	29.15 million/s

图 5.8 从硬盘读取的效率

statistics	

plaintext found:	1 of 1
total time:	2.61 s
time of chain traverse:	1.54 s
time of alarm check:	0.50 s
time of wait:	0.38 s
time of other operation:	0.18 s
time of disk read:	2.49 s
hash & reduce calculation of chain traverse:	34436700
hash & reduce calculation of alarm check:	11775500
number of alarm:	4215
speed of chain traverse:	22.33 million/s
speed of alarm check:	23.27 million/s

图 5.9 直接从内存读取

从上面实验结果可以看出，使用硬盘的读取时间为 11.14s，预先将文件写入内存后，直接读取内存的时间为 2.49s，当然这里面还有内存缺页的损失，所以只提升了 4.47 倍，但是可以验证了这一设想的正确性。

5.3 算法结构优化

密钥明文字符集被预计算成 hash 密文并和明文成对地储存在彩虹链中，如果要破解的 hash 密文在我们之前生成好的彩虹链中，则破解成功，反之破解失败。彩虹链存储的“明文-密文”对数量随着链表长度（t）的增加而增加，然而这些彩虹链会产生冲突，主要由于减约函数并不是一一对应的。

图5.10示意了冲突的过程，最后这两条链表会合并成一条。

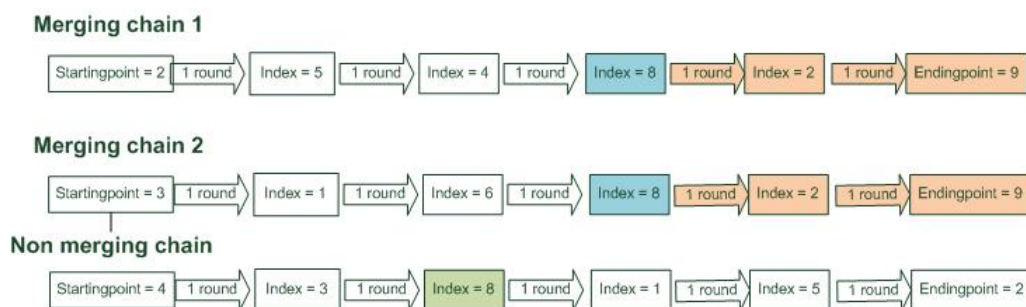


图 5.10 链表合并过程示意图

无冲突的彩虹链个数会随着彩虹表的长度增加而减少，根据公式(4.9)，利用 matlab 软件我们可以得到关系图5.11。

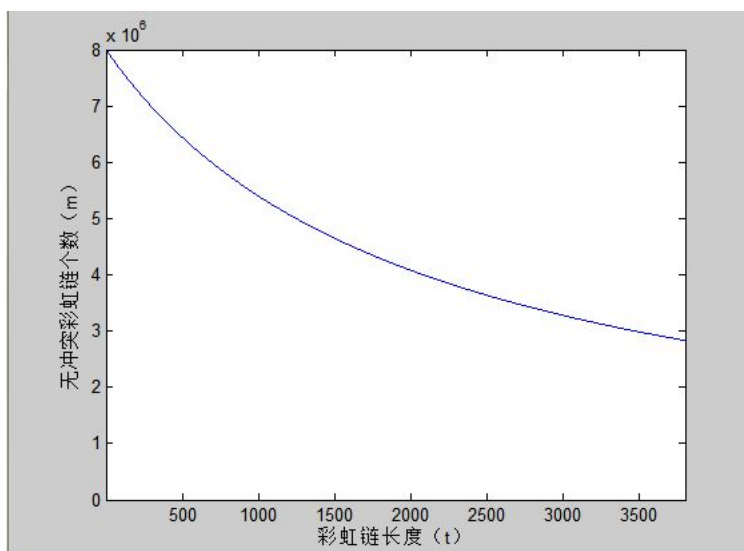


图 5.11 无冲突链表数—链表长度关系

接着我们分析表的张数（参数 1）对破解成功概率的影响，我们把破解成功率公式(4.9)在 matlab 下的实现函数为：

demo_advantage_of_multiple_table(), 具体的函数实现可以参考附录 A1.2。我们用不同的曲线表示当硬盘空间增大的情况下，破解的成功率会随之增加，下图中有 5 条曲线，分别表示彩虹表张数为 15 时，破解的成功率和硬盘空间之间的关系，放大后，我们可以看出彩虹表的张数越多，曲线越快接近 100%，也就是在其他参数不变的情况下，增加参数 1（彩虹表张数），可以得到越高破解成功概率；但也不是生成的彩虹表张数越多越好，当随着彩虹表的增加，我们需要在存储空间也就越大，这样会破解实

际所消耗的时间就会增加，反而适得其反，所以时空折中算法的精髓就在于对时间和空间的代价进行不断地平衡，找出一个折中的代价。

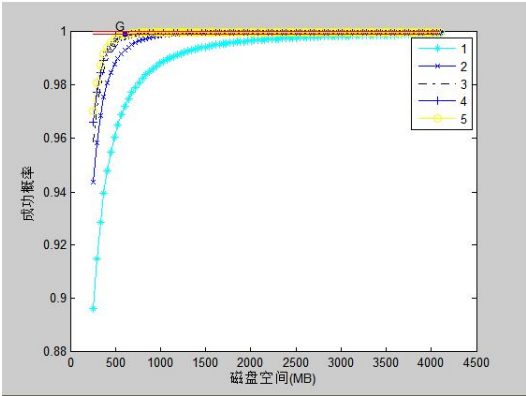


图 5.12 5 张彩虹表的破解成功率

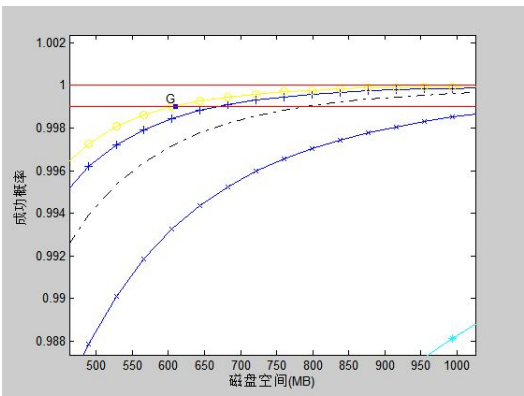


图 5.13 5 张彩虹表的破解成功率（放大）

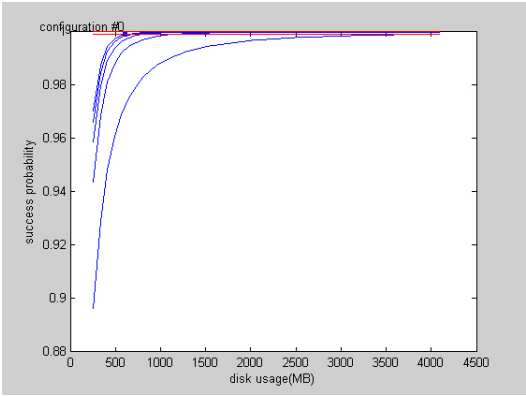


图 5.14 总表空间大小—成功率关系图

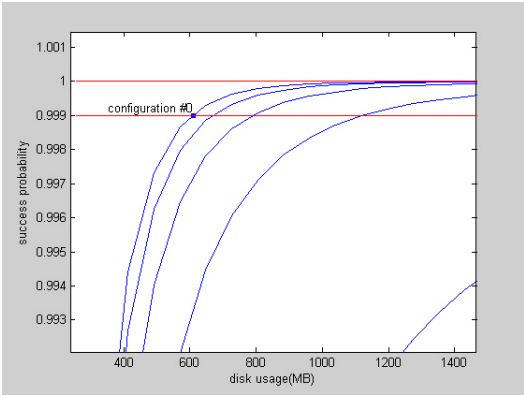


图 5.15 总表空间大小—成功率关系图（放大）

5.4 实验结果与分析

实验所用的测试平台见下表5.3:

表 5.3 实验数据测试平台配置

CPU	Intel Core i7-920 OC 4.0GHz (EIST/C1E off)
主板	Asustek Rampage II GeneIntel X58 芯片
显卡	GeForce GTX 480 1536MB(Core/Shader/memory:700/1401/1848MHz)
内存	GSKILL F3-12800CL9T OC DDR3-1600 2G*3
硬盘	2x Intel 120G SSD SM128C (RAID0)
电源	CougarGX 900W

5.4.1 破解速度实验对比

实验方法是通过采用上述优化方法和技术,对 SHA-1、MD5 和 NTLM 三种 Hash 加密算法进行实验,我们规定密钥的字符集范围(字符集对照表参见附录B),密钥长度,限定成功率在 99.9% 以上,主要从破解时间方面针对优化前和优化后的实验数据进行对比。

在这里需要说明的是破解的时间主要分为对彩虹表文件的读取时间和密钥查表破解的时间。对彩虹表文件的读取时间主要优化方法和技术参见本章的存储优化一节,上文已经给出了基本的实验对比数据,就不在这里赘述,我们只对比最后的实际破解时间。所有实验只针对 1 条 Hash 密文进行破解,每组彩虹表破解 3 次。

SHA1 破解实验,破解速度提升了 5.88 倍,详细实验数据参考下表5.4:

表 5.4 SHA1 破解实验数据对比

字符集	密钥长度	成功率	优化前破解时间 (秒)	优化后破解时间 (秒)
numeric	1 ~ 12	99.9%	27.54	4.78
numeric	1 ~ 12	99.9%	23.32	4.04

表 5.4 SHA1 破解实验数据对比 (续)

接上页

字符集	密钥长度	成功率	优化前破解时间 (秒)	优化后破解时间 (秒)
numeric	1 ~ 12	99.9%	36.21	5.98
loweralpha	1 ~ 9	99.9%	21.08	6.76
loweralpha	1 ~ 9	99.9%	19.65	5.88
loweralpha	1 ~ 9	99.9%	30.18	8.90

MD5 破解实验，破解速度提升了 6.3 倍，详细实验数据参考下表5.5:

表 5.5 MD5 破解实验数据对比

字符集	密钥长度	成功率	优化前破解时间 (秒)	优化后破解时间 (秒)
ascii-32-95	1 ~ 7	99.9%	372.33	69.47
ascii-32-95	1 ~ 7	99.9%	487.26	54.90
ascii-32-95	1 ~ 7	99.9%	432.98	96.22
loweralpha	1 ~ 9	99.9%	41.92	30.09
loweralpha	1 ~ 9	99.9%	76.22	12.56
loweralpha	1 ~ 9	99.9%	25.46	31.18

NTLM 破解实验，破解速度提升了 1.77 倍，详细实验数据参考下表5.7:

表 5.6 NTLM 破解实验数据对比

字符集	密钥长度	成功率	优化前破解时间 (秒)	优化后破解时间 (秒)
numeric	1 ~ 12	99.9%	8.32	7.43
numeric	1 ~ 12	99.9%	10.76	6.90
numeric	1 ~ 12	99.9%	5.45	2.08

loweralpha	1 ~ 9	99.9%	17.25	4.32
loweralpha	1 ~ 9	99.9%	12.87	3.66
loweralpha	1 ~ 9	99.9%	12.44	10.71

5.4.2 与等规模的旧表的性能对比实验

在这个实验中，我们采用新型的彩虹表结构生成彩虹表文件，选择针对 Hash 算法性能较好的 26 比特和 30 比特，在保证单张新表和原始彩虹表存储空间代价 M 相等的前提下，通过比较 1 张新表与相应的单表在破解时间 T、假警数量和成功率 P 之间的关系，验证了 5.2 节中的存储优化的效果，并且从另外一方面观察彩虹表的存储空间大小对破解成功率与假警数量变化的关系。

表 5.7 新表与等空间的单张彩虹表的性能对比

瘦 表 张 数	新表					单张彩虹表				
	Hellman	本文	实际	T(s)	P	Hellman	本文	实际	T(s)	P
	FA 数	FA 数	FA 数			FA 数	FA 数	FA 数		
1	512	462	480	2.1	40.3%	409	380	370	2.0	44%
2	1024	843	920	2.8	49.8%	818	722	702	3.1	53%
3	1536	1120	1332	3.4	54.7%	1346	1120	1023	3.3	59%
4	2048	1873	1587	4.3	64.6%	1638	1380	1287	4.4	64%
5	2560	2011	2143	4.6	75.2%	2280	2098	2100	4.7	74%
6	3072	2101	2248	5.8	89.4%	2460	2287	2309	5.6	85%
7	3584	2239	2478	5.7	96.8%	2876	2389	2408	6.1	90%
8	4096	2489	2998	6.8	99.9%	3287	2502	2512	6.3	94%

5.5 本章小结

本章对从计算能力到存储和彩虹表算法结构三方面进行优化和实现。在计算能力上我们提出了基于 CUDA 优化方法，并实现了 CUDA GPU 方案，从实际实验结果验证了这一设计方案；在存储系统上，我们提出了采用新型的彩虹表结构体，减少了彩虹表的磁盘存储空间，优化升级了物理的存储设备，在破解时间上得到了很好的提升；在彩虹表算法参数上，我们进行数据分析，优化了算法的参数。

6 本文总结与展望

6.1 总结

我们通过对经典的彩虹表算法进行详细的理论分析研究并给出了完整的实现，通过 GPU 并行计算加速、存储优化和对算法结构的调整三大方面对彩虹表算法进行优化，使得破解速度相对经典算法提升了 $5.88 \sim 6.3$ 倍，在相同参数下表的磁盘储存上缩小了 56.25%。

6.2 展望

随着硬件设备的进一步发展，特别是 GPU 构架的更新换代、大容量高速磁盘和主存、128 位操作系统的实现，基于 GPU 的时空折中算法将可以对更大密钥空间的密码算法进行破解。

参考文献

- [1] Martin Hellman. A cryptanalytic time-memory tradeoff. *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.26(401-406), 1980. 1, 14, 18
- [2] P.Oechslin. Making a faster crytanalytic time-memory trade-off. *Lecture Notes in Computer Science*, vol.2729, 2003. 1, 20
- [3] ZhuShuangLei. The Time-Memory Tradeoff Hash Cracker, 2003. <http://project-rainbowcrack.com>. 2
- [4] 方海英. 基于时空折中算法的 word 文档破解研究. Master's thesis, 杭州电子科技大学, 2009. 2, 41
- [5] 金銓. DES 密码算法的彩虹攻击技术及其 GPU 实现. Master's thesis, 上海交通大学, 2010. 2
- [6] Nvidia CUDA. <http://developer.nvidia.com/object/cuda.html>. 2, 11
- [7] 冯登国. 密码分析学. 清华大学出版社, 2000-08.
- [8] 冯登国, 裴定一. 密码学导引. 科学出版社, 北京, 1999. 4
- [9] 春天. 单向 hash 函数, 06 2005. <http://blog.csdn.net/sunrise/2005/10/12/500819.aspx>. 7
- [10] 舒畅. Md5 算法原理及其碰撞攻击. 软件导刊, pages 103–104, 06 2007. 8
- [11] Victor W. Lee. Debunking the 100X GPU vs. CPU myth: an evaluation of throughput computing on CPU and GPU. *ACM SIGARCH Computer Architecture News*, 38, 2010. 10
- [12] J.Nickolls and I. Buck. NVIDIA CUDA software and GPU parallel computing architecture. *Micorprocessor Forum*, May 2007. 11
- [13] Koji Kusuda and Tsutomu Matsumoto. Achieving higher success probability in time-memory trade-off cryptanalysis without increasing memory

- size. *TIEICE: IEICE Transactions on Communications/Electronics/ Information and Systems*, 1999. 19
- [14] Johan Borst, Bart Preneel, Joos Vandewall. On the Time-Memory Tradeoff Between Exhaustive Key Search and table pre-computation. *Proceedings of the 19th symposium on Information Theory in the Benelux, Veldhoven(NL)*, pages 111–118, 1998. 19
- [15] A. Biryukov and A. Shamir. Cryptanalysis time/memory/data trade-offs for stream ciphers. *Proceedings of Asiacrypt’ 00*(T. Okamoto, ed.)no 1976 in *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 1-13, Springer-Verlag, 2000. 23
- [16] S. Che, M. Boyer, J. Meng, D. Tarjan, J. W. Sheaffer and K. Skadron. A Performance Study of General Purpose Applications on Graphics Processors using CUDA. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2008. 37
- [17] Hyesoon Kim Sunpyo Hong. An analytical model for a GPU architecture with memory-level and thread-level parallelism awareness. *Proceedings of the 36th annual international symposium on Computer architecture*, June 2009. 41
- [18] NVIDIA Corporation. NVIDIA CUDA Programming Guide, 2011. 41
- [19] 杨哲. 无线网络安全攻防实战进阶. 电子工业出版社, 2011-01.
- [20] 胡伟. *LATEX* 完全学习手册. 清华大学出版社, 2011-01.
- [21] 徐波. *C* 和指针. 人民邮电出版社, 2011-07.
- [22] 杨哲. 密码破解技术应用新时代. 黑客防线, 6-13, 2009.
- [23] M.J.Atallah. Algorithms and Theory of Computation Handbook. *CRC Press LLC*, 1998.
- [24] 徐隽. 密码分析中的“时间内存替换”. *Neinfo Security*, 05 2004.

- [25] 苏烈华. 基于时空折中算法的密码分析系统的设计与实现. Master's thesis, 北京科技大学, 2010.
- [26] 吴恩华, 柳有权. 基于图形处理器 (gpu) 的通用计算. 计算机辅助设计与图形学学报, pages 601–612, 2004.
- [27] 吴恩华. 图形处理器用于通用计算的技术、现状及其挑战. 软件学报, pages 1493–1504, 06 2004.
- [28] Macedonia M. The gpu enters computing's mainstream. *IEEE Computer*, pages 106–108, 2003.
- [29] Dr.Rob Adams Genna Cummins. Scientific computation through a gpu. *IEEE*, pages 44–246, 06 2008.
- [30] 叶剑. 基于 GPU 的密码算法实现技术研究. Master's thesis, 解放军信息工程大学, 2010.
- [31] 王彩霞. 密码分析中几种方法的研究及其设计与实现. Master's thesis, 西北大学, 2004.
- [32] 翁捷. 带随机数 MD5 破解算法的 GPU 加速与优化. Master's thesis, 国防科技技术大学研究生院, 2010.
- [33] 将秉天. 基于分布式计算的密码恢复系统研究. Master's thesis, 上海交通大学, 2010.
- [34] Jin Hong. The cost of false alarms in Hellman and Rainbow Tradeoffs. <http://eprint.iacr.org/2008/362.pdf>.
- [35] Michael S. Distributed Pre-computation for a Cryptanalytic Time-Memory Trade-Off. <http://ritdml.rit.edu/dspace/bitstream/1850/7805/1/MTaberThesis10-2008.pdf>.
- [36] Daegun Ma. Studies on the Cryptanalytic Time Memory Trade-Offs. <http://library.snu.ac.kr>.

- [37] A.Biryukov. Some thoughts on time-memory-data tradeoffs. *IACR eprint Report*, page 207, 2005.
- [38] S.S. Stone S. Ryoo, C.I. Rodrigues and S.S. Bagsorkhi. Program optimization space pruning for a multithreaded GPU. *In Proceedings of the 2008 International Symposium on Code Generation and Optimization*, 2008.
- [39] M. Garlanda J. Nickolls, I. Buck and K. Skadron. Scalable Parallel Programming with CUDA. *GPUs for Computing*, 6, 2008.
- [40] G. Avoine, P. junod and P. oechslin. Time-memory trade-offs: False alarm detection using checkpoints. In *Proceedings of Progress in Cryptology – 6th International Conference on Cryptology (INDOCRYPT’ 05)*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 3797. Cryptology Research Society of India, Springer-Verlag, Bangalore, India, pp, 183–196, 2005.
- [41] V. L.L. Thing and H.M. Ying. A novel time-memory trade-off method for password recovery. *In Proceedings of the Ninth Annual DFRWS Conference*, 6(1):114–120, 2009.

附录 A MATLAB 程序

A.1 磁盘空间与成功率

```

1 function advantage_of_multiple_table(N, t, disk_usage_min, disk_usage_max)
2 grid_count = 100;
3 disk_usage = linspace(disk_usage_min, disk_usage_max, grid_count);
4 m = disk_usage * 1024 * 1024 / 16;
5 success_probability = zeros(1, grid_count);
6
7 for table_count = 1 : 5
8     for i = 1 : grid_count
9         success_probability(i) = calc_success_probability(N, t, m(i) / table_count);
10        success_probability(i) = 1 - (1 - success_probability(i)) ^ table_count;
11    end;
12    if table_count == 1
13        plot(disk_usage, success_probability, '-c*');
14    end
15    if table_count == 2
16        plot(disk_usage, success_probability, '-x')
17    end
18    if table_count == 3
19        plot(disk_usage, success_probability, 'k-.')
20    end
21    if table_count == 4
22        plot(disk_usage, success_probability, '-+')
23    end
24    if table_count == 5
25        plot(disk_usage, success_probability, 'y-o')
26    end
27    if N == 8353082582 & t == 2100 & table_count == 5
28        plot(8000000*16*5/1024/1024, 0.999, 's', 'MarkerFaceColor', 'b',
29            'MarkerEdgeColor', 'b', 'MarkerSize', 3);
30        text(8000000*16*5/1024/1024, 0.999, 'G', 'HorizontalAlignment', 'right',
31            'VerticalAlignment', 'bottom');
32    end;
33    hold on;

```

```

34 end;
35 legend_int = zeros(5 - 1 + 1, 1);
36 for table_count = 1 : 5
37     legend_int(table_count - 1 + 1, 1) = table_count;
38 end;
39 legend_str = int2str(legend_int);
40 legend(legend_str);
41 for i = 1 : grid_count
42     success_probability(i) = 0.999;
43 end;
44 plot(disk_usage, success_probability, 'r');
45
46 for i = 1 : grid_count
47     success_probability(i) = 1;
48 end;
49 plot(disk_usage, success_probability, 'r');
50
51 xlabel('磁盘空间(MB)');
52 ylabel('成功概率');

```

A.2 密钥空间

```

1 function ret = calc_N( n, min, max)
2 arr = zeros(1, max );
3 for i = 1 : max
4     arr(i) = n^i;
5 end;
6
7 exp = 0;
8 for i = 1 : max
9     exp = exp + arr(i);
10 end;
11 format long g;
12 ret = exp;

```

A.3 彩虹链长度

```

1 function ret = calc_t(N, success_probability, m, table_count)
2 success_probability_each=1-exp(log(1-success_probability)/table_count);

```

```

3 exp_min = log(1 - success_probability_each) / log(1 - 1 / N);
4
5 exp_all = 0;
6 t = 0;
7 next = m;
8
9 while exp_all < exp_min
10     exp_all = exp_all + next;
11     t = t + 1;
12     next = N * (1 - (1 - 1 / N) ^ next);
13
14     if t > 131072    % too large
15         break;
16     end;
17 end;
18
19 ret = t;

```

A.4 磁盘占用空间

```

1 function ret = calc_disk_usage(m, table_count)
2 ret = ceil(m*16*table_count / 1024 / 1024 );

```

A.5 最大破解时间

```

1 function ret = calc_max_cryptanalysis_time(t, table_count, step_speed)
2 ret = t*t/2 / step_speed * table_count;

```

A.6 实际破解时间

```

1                                     rate_of_each_table * 1
2 (1 - rate_of_each_table) ^ 1 * rate_of_each_table * 2
3 (1 - rate_of_each_table) ^ 2 * rate_of_each_table * 3
4 ...
5 (1 - rate_of_each_table) ^ (table_count - 1)*rate_of_each_table*table_count
6 (1 - rate_of_each_table) ^ table_count * table_count
7
8 function ret = calc_mean_cryptanalysis_time(N,t,m,table_count,step_speed)
9 rate_of_each_table = calc_success_probability(N, t, m);

```



```

10 temp = rate_of_each_table;
11 all = 0;
12 for i = 1 : table_count
13     all = all + temp * i;
14     temp = temp * (1 - rate_of_each_table);
15 end;
16 all = all + (1 - rate_of_each_table) ^ table_count * table_count;
17
18 ret = t*t/2 / step_speed * all;

```

A.7 最大磁盘读取时间

```

1 function ret = calc_max_disk_access_time(m, table_count, disk_speed)
2 ret = m*16/1024/1024 * disk_speed * table_count;

```

A.8 实际磁盘读取时间

```

1         rate_of_each_table * 1
2 (1 - rate_of_each_table) ^ 1 * rate_of_each_table * 2
3 (1 - rate_of_each_table) ^ 2 * rate_of_each_table * 3
4 ...
5 (1-rate_of_each_table)^(table_count-1)*rate_of_each_table*table_count
6 (1 - rate_of_each_table) ^ table_count * table_count
7
8 function ret = calc_mean_disk_access_time(N, t, m, table_count, disk_speed)
9 rate_of_each_table = calc_success_probability(N, t, m);
10 temp = rate_of_each_table;
11 all = 0;
12 for i = 1 : table_count
13     all = all + temp * i;
14     temp = temp * (1 - rate_of_each_table);
15 end;
16 all = all + (1 - rate_of_each_table) ^ table_count * table_count;
17
18 ret = m*16/1024/1024 * disk_speed * all;

```

附录 B 密钥字符集对照表

numeric = [0123456789]

alpha = [ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ]

alpha-numeric = [ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ0123456789]

loweralpha = [abcdefghijklmnopqrstuvwxyz]

loweralpha-numeric = [abcdefghijklmnopqrstuvwxyz0123456789]

mixalpha = [abcdefghijklmnopqrstuvwxyzABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ]
VWXYZ]

mixalpha-numeric = [abcdefghijklmnopqrstuvwxyzABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ]
VWXYZ0123456789]

作者简历及在学研究成果

一、作者入学前简历

起止年月	学习或工作单位	备注
2004 年 09 月至 2008 年 07 月	在北京科技大学信息安全专业攻读 学士学位	

独创性说明

本人郑重声明：所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京科技大学或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

签名：_____ 日期：_____

关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京科技大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵循此规定）

签名：_____ 导师签名：_____ 日期：_____