

固态硬盘 RAID 阵列技术进展*

李振华**¹ 楼向雄²

(1. 浙江商业职业技术学院艺术设计学院, 杭州 310053;
2. 杭州电子科技大学通信工程学院, 杭州 310018)

摘要:固态硬盘作为一种新型闪存设备,因高性能比、高可靠性、低功耗等优点倍受关注。然而,固态硬盘的存储可靠性与访问高效性在大数据时代面临越来越大的挑战。通过 RAID 控制器联结多个硬盘存储设备,形成固态硬盘 RAID 阵列,能够为用户提供大容量存储空间,保证高效的并行访问性能,同时提供不同程度的可靠性保证。本文通过系统阐述固态硬盘 RAID 阵列技术的研究现状,对不同 RAID 机制进行分类总结。在多个固态硬盘构成的 RAID 阵列方面,根据磁盘之间损耗机制的不同,对两种代表性研究情况进行概括;在固态硬盘内部的芯片级 RAID 方面,主要对延迟校验数据更新的 RAID 技术、高性能高可靠性的 RAID 技术、增强可靠性的 RAID 技术及嵌入式 RAID 技术的特点与不足进行阐述。最后,对固态硬盘 RAID 阵列技术进行总结分析,并提出今后该领域的研究重点和方向,主要包括:嵌入式 RAID 技术、可靠性分析等。

关键词:固态硬盘;RAID;存储系统;闪存;磁盘

中图分类号:TP302 文献标识码:A doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2017.02.003

Progress of SSD-Based RAID Technology*

LI Zhenhua**¹ LOU Xiangxiang²

(1. School of Art and Design, Zhejiang Business College, Hangzhou 310053, China;
2. School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: As a new flash memory device, SSD has attracted much attention for its high-performance, high reliability and low efficiency. However, the reliability of SSD storage and efficiency of access has been increasingly challenged in the era of big data. By coupling numbers of hard disk storage devices through RAID controller, a SSD-based RAID is formed. In this way, users are provided with high-capacity storage space, efficient parallel access performance and different degrees of reliability assurance. Through systematic analysis of previous research on SSD-based RAID technology, different mechanism of SSD-based RAID are summarized and classified. In the respect of RAID array composing of solid hard disks, two representative studies categorized by different loss mechanism between disks are mainly summarized. In the aspect of chip level in SSD RAID, the characteristics and weakness of the RAID technology of delay calibration data, high-performance as well as high-reliability RAID technology, reliability-enhanced RAID technology and embedded RAID technology are discussed. Lastly, a generalization of SSD-based RAID technology is presented. In addition, research trends in this area are put forward, including embedded RAID technology, reliability analysis.

Key words: SSD; RAID; storage system; flash memory; disk

1 引言

大数据时代的飞速发展使得具备外形小巧、成本低、功耗少、性能佳等优点^[1]的 Flash 闪存设备在嵌入式应用领域、大型数据中心等方面得到更广泛的发展与应用。希捷、西部数据、Emulex 等磁盘厂家陆续开始涉足基于闪存的固态硬盘市场,以缓解存储速度、存储容量与数据的完整性和安全性之间

日益突出的矛盾^[2],提供优化的存储解决方案。

与传统的机械硬盘不同,固态硬盘一般由控制芯片和多个闪存芯片组成,内部没有可移动的部件,不需要旋转和寻道,因此具有访问延迟低、可靠性高、功耗低、抗震动等优点。然而,固态硬盘的存储可靠性与访问高效性在大数据时代面临越来越大的挑战。通过 RAID 控制器将多个硬盘存储设备联结在一起,形成固态硬盘 RAID 阵列,能够对外共同保证用户对大数据访问的需求,提供大容量存储空间,同时能保证高效的并行访问性能^[3,4]。另外,RAID 阵列引入冗余数据,可为固态硬盘提供不同程度的可靠性保障。因此,固态硬盘 RAID 阵列受到了业界的追捧,当前学术界也日益关注固态硬盘 RAID

2016-05-05 收稿,2016-07-12 接受,2017-02-09 网络发表

* 2016 年度浙江省教育技术研究规划(JB093),浙江省 2015 年度高等教育教学改革项目(jg2015307)资助

** 通讯作者,E-mail:leezhenhua2000@163.com

阵列的发展,相关研究逐渐展开。

2 RAID 阵列技术简介

如今 RAID 阵列技术被广泛应用于存储系统。降低成本是 RAID 阵列最初的技术期望,实际上却并未做到。因此,RAID 的核心含义从“廉价”^[5] 转变成“独立”,被定义为:一种将多个磁盘驱动器组合成一个逻辑单元,用于数据冗余处理和性能改进的技术。磁盘驱动器都具有高速存储接口,例如 ATA、SATA(Serial ATA)、PCI-E(PCI Express)、m.2(Next Generation Form Factor)、SAS(Serial Attached SCSI)等接口。其中的数据以一种 RAID 等级的方式分布在驱动器中。也即 RAID 阵列是一个由多台甚至几十台磁盘驱动器组合形成的具有高度可靠性、高速运行效率的大规模磁盘系统,而这些磁盘驱动器则由一台磁盘阵列控制器来统一调控与管理。

RAID 阵列技术根据不同的性能要求及冗余等级,分为不同的等级,这些 RAID 等级包括 RAID0 ~ RAID5 以及混合式的 RAID10、RAID50 等。RAID0 是所有 RAID 等级中存储性能最高的解决方案,其工作原理是对分散在多个磁盘上的连续数据的并行交叉存取,提高磁盘整体的读写速率^[6,7],但是 RAID0 并不提供冗余校验功能,致使磁盘系统的可靠性不好。一旦阵列中有数据出现损坏,便会造成不可弥补的数据丢失^[8,9],因此较少使用。RAID5 是一种数据安全、性能较好、能容忍单个磁盘错误、存储成本合理的存储解决方案^[10],每个磁盘驱动器都有自己独立的数据通路,独立地进行读/写,且无专门的校验盘^[11],用来进行纠错的校验信息是以螺旋方式散布在所有数据盘上。RAID5 常用于 I/O 较频繁的事务处理,在服务器存储系统中得到了广泛应用。

3 固态硬盘 RAID 阵列技术的研究现状

RAID 阵列技术所具备的三点优势(可靠性高、磁盘 I/O 速度快、性能/价格比高)为固态硬盘 RAID 阵列技术的研究提供了内在驱动力。再者,RAID 阵列技术可以在固态硬盘与机械硬盘之间^[12,13]、固态硬盘与固态硬盘之间^[14]、固态硬盘的闪存芯片与芯片之间^[15,16] 提供不同层次的可靠性保障。近年来,固态硬盘的技术不断成熟,容量不断增加,性能不断提升,价格却在不断下降,促使构建纯固态硬盘 RAID 阵列的条件逐渐成熟,下文将以

两类纯固态硬盘 RAID 阵列为重点,也即多个固态硬盘构成的 RAID 阵列以及固态硬盘内部的芯片级 RAID 阵列进行阐述。

3.1 多个固态硬盘构成的 RAID 阵列

由于固态硬盘和传统的机械硬盘差异较大,不能将 RAID 阵列技术直接应用到固态硬盘上^[17,18]。当前,针对闪存特点改造传统 RAID 结构的代表性研究主要有两种,其基本思想都是围绕磁盘之间的损耗机制^[19]展开的,但是采取的方案却截然相反:一种是采用额外的措施使得多个磁盘之间的损耗均匀,另一种则是增加相关机制以保证磁盘之间的损耗不均匀。

3.1.1 磁盘之间损耗均匀的 RAID5

由于固态硬盘的写性能相对机械硬盘较差,导致写损耗状况比机械硬盘严重得多,同时更新校验数据引起的写操作占据了大部分的写操作的比例。因此, Park 等^[7] 提出了一种磁盘之间损耗均匀的 RAID5,它通过维护一张记录着每个磁盘上校验数据更新次数的位表,来保证更新校验数据的操作在每个磁盘上均匀进行。一旦有写入数据或者更新数据的操作就会检查位表的当前状况,如果当前数据的更新次数超过了设置的阈值,系统会交换当前数据和损耗较小的校验数据的位置^[20]。系统采用动态调整校验数据位置的方式,保证了磁盘之间的校验数据更新较为均匀。

3.1.2 磁盘之间损耗不均匀的 RAID5

Balakrishnan 等^[8] 指出磁盘之间损耗均匀的 RAID5 是不理想的。RAID5 磁盘之间的损耗均匀将会使得各个磁盘的损耗程度非常的接近,进而引起磁盘损坏的概率大大提高。再者 RAID5 并不对存储的数据进行备份,它把数据以及校验数据均匀地存储在各个磁盘上。如果 RAID5 中有一个磁盘的数据发生损坏,则可以利用余下的数据以及校验数据恢复损坏的数据^[21,22]。但是 RAID5 只能容忍一个磁盘损坏,如果出现的情况为多个磁盘都损坏或者在重建期间存在数据盘损坏的关联错误,则会导致数据无法恢复。由此, Balakrishnan 等提出了 Diff-RAID,其基本思想就是使得磁盘之间的损耗不均匀。

Diff-RAID 在 RAID5 的基础上增添了两种机制^[23]:一是 Diff-RAID 校验数据不均匀分布机制,即各个磁盘上不均匀地分布校验数据,二是 Diff-RAID 重新分配校验数据机制,即在更换固态硬盘

时,保证 RAID 的老磁盘中拥有最多的校验数据,保持老磁盘具有最快的损耗速率。这些措施保障了磁盘之间的损耗不均匀,提升了磁盘的可靠性。

3.2 固态硬盘内部的芯片级 RAID 阵列

固态硬盘内部的芯片级 RAID 阵列机制通常被集成在固态硬盘的闪存转换层中^[24]。闪存转换层同时承担寻址、参与数据更新过程、垃圾回收等功能。现有的固态硬盘 RAID 阵列技术主要从适当减少更新校验数据所带来的写操作入手,找到性能瓶颈的突破口^[25]。有些研究人员尝试通过延迟校验数据更新来解决这个问题,并且实践证明是卓有成效的。同时研究人员在嵌入式 RAID 技术方面的实践研究成果推进了固态硬盘的整体研究进程。

3.2.1 延迟校验数据更新的 RAID 技术

通常不延迟校验数据更新的做法为:当写请求到来时,立即对该请求对应的校验数据进行更新操作,校验数据完成写入后,也即该写请求写入了。Lee 等^[15]提出了 FRA(Flash-aware Redundancy Array)的方法,将数据和校验数据两部分的撮取分开操作。在处理写请求时,用户数据先被写入固态硬盘,写入数据后就认为写请求已经完成了,校验数据的更新请求被插入到更新队列中,待系统空闲时再安排写入。但如果在 RAID5 中频繁地更新操作校验数据,将会使得校验信息中的无效页大量增加^[26,27],由此影响系统的性能以及固态硬盘的寿命。图 1 所示为延迟校验数据更新的方法。

3.2.2 高性能高可靠性的 RAID 技术

Im 和 Shin 等^[28]指出 FRA 方案在可靠性方面的缺陷在于,如果延迟更新的校验数据对应的数据出现错误,将会导致数据无法恢复,并提出了用 PPC(Partial Parity Cache)来缓存校验数据,使校验数据的更新延迟,以此构成高性能高可靠性的固态硬盘。当需要更新数据时,利用 RAID 控制器中的 Cache 来缓存数据对应的校验信息并延迟更新,直到下次需要更新数据时再利用 Cache 中存放的校验信息来更新校验信息。同时,还提供不间断电源来保护数据的可靠性。这种校验信息延迟更新方案的优点在于,更新校验信息的开销较小,在多次更新数据过程中只需要进行一次校验数据更新即可。但是其缺点在于不能利用固态硬盘控制器针对校验信息的特点进行优化操作^[27,29]。

3.2.3 增强可靠性的 RAID 技术

Lee 等^[30]提出了用于增强固态硬盘 RAID5 的可靠性的方案,包括如下三种方法:

- 1) 采取动态调整固态硬盘每个条带中的数据块数量的方式来减少额外的空间浪费,从而确保 RAID 的可靠性。
- 2) 采取的闪存转换层方案使用不同的校验方案应对数据块和日志块的不同特征,使其更好地进行闪存芯片管理。
- 3) 采取缓存技术对校验块进行缓存,实现写操作的次数下降,从而增强系统的可靠性。

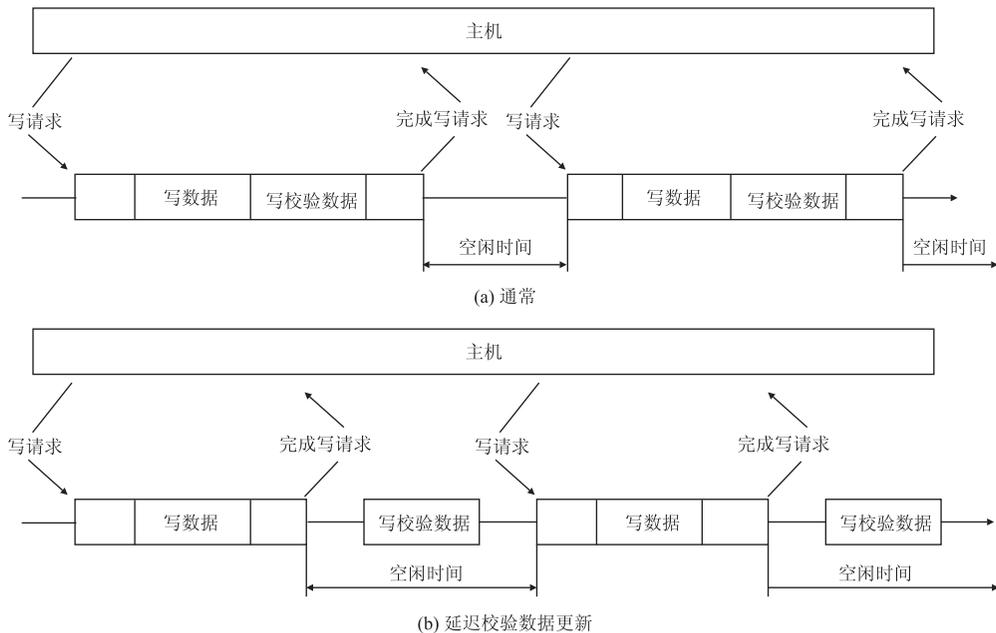


图 1 延迟校验数据更新的方法^[26]

3.2.4 嵌入式 RAID 阵列技术

在传统磁盘被 Flash 存储器取代而成为主要存储介质之前是很难将 RAID 功能嵌入到机械驱动器中的^[31,32]。Im 等^[28]曾分析过支持 RAID0 和 RAID5 并具有多通道的 Flash 存储芯片的微系统。Luo JJ 等^[33]研究并实现了这样的嵌入式 RAID 技术,也即一种新的固态硬盘控制器集成电路结构(iRAID 方案)。在这个 RAID 系统中,研究人员设计并实现了一个内部 RAID 控制逻辑的固态硬盘控制器。该控制器具备的多个 Flash 内存通道都可以配置为 RAID0 或 RAID5 模式。其内存通道被当做 RAID 阵列中的四个独立的虚拟磁盘^[34],每个通道都由 Flash 通道管理器(FCC)、Flash 芯片、通道缓存器等构成。作为嵌入式 RAID 结构中的虚拟磁盘,则通过固态硬盘控制器来控制芯片按照 RAID 等级分配虚拟磁盘之间的数据流^[35,36]。其中 FCC 的功能包括损耗均衡算法、纠错编码、坏块管理等。这个嵌入式 RAID 技术方案已经实现,并且实验证实 RAID0 或 RAID5 模式中固态硬盘控制器运行有效。构建的固态硬盘控制器不再是一个单一的驱动控制器,它同时也是提供冗余能力和高可靠性的 RAID 微系统,由此带来了一种新的方式,使得大规模的磁盘阵列存储系统能够获得更低的成本、更高的性能、更低的功耗、更小的尺寸和更方便的维护。图 2 所示为嵌入式 RAID 阵列技术的架构。

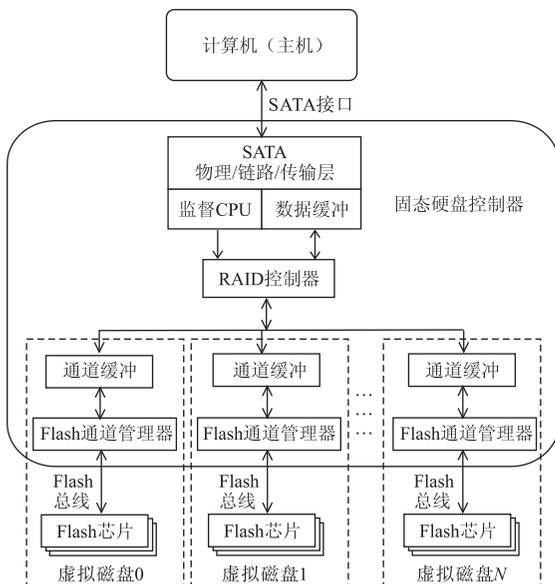


图 2 嵌入式 RAID 阵列技术的架构^[33]

4 结束语

Flash 存储器的 100% 半导体兼容技术使得固态硬盘的性能和可靠性非常具有竞争力^[37]。固态硬盘是由一个控制器 ASIC(应用具体集成电路)和一组 Flash 存储芯片组成的。目前,针对固态硬盘的 RAID 阵列技术主要有三类,其中固态硬盘和机械硬盘组合搭建的混合式 RAID 阵列实现了两者特性的互补。随着固态硬盘的性价比不断提高,推进了固态硬盘与固态硬盘组合形成的 RAID 阵列以及固态硬盘的闪存芯片与芯片组合形成的纯固态硬盘 RAID 阵列的研发进程。由于目前固态硬盘价格高于机械硬盘,固态硬盘与机械硬盘构成的混合式 RAID 阵列与其他纯固态硬盘 RAID 阵列相比,在成本控制方面有较大的优势。但在性能与可靠性方面,多个固态硬盘构成的 RAID 阵列要优于固态硬盘与机械硬盘构成的混合式 RAID 阵列,而目前大多数固态硬盘厂商都采用固态硬盘内部的芯片级 RAID 阵列来进一步提升性能,降低功耗^[38]。为了提升产品的性能和可靠性,研究人员分别在减少对磁盘更新检验数据的写操作以及形成新型的固态硬盘组织架构上进行了深入研究及富有价值的实践。

对嵌入式 RAID 阵列技术的 iRAID^[33]这种结构的初步研究结果表明,RAID 系统将不再是一群独立的驱动器,未来将可能只有一个单一的高密度磁盘。这将使这些存储系统的磁盘阵列,如云存储系统,在性能、功率消耗、体积方面有更大的改善,成本进一步降低,同时也更容易维护。由此,嵌入式 RAID 技术将会成为固态硬盘 RAID 阵列技术的主要研究方向之一,具有广阔的应用前景,涉及教育、娱乐、国防等多个应用领域,特别是在航空、军事等工作环境复杂程度高、数据安全级别要求高的领域,将会有大的作为。另外,因目前评估固态硬盘 RAID 的可靠性方面的研究较少,需要尽快完善针对 RAID 可靠性的评价体系及方法,由此可靠性分析研究也将成为固态硬盘 RAID 阵列技术的研究重点之一。

除此之外,下面两方面也会在固态硬盘 RAID 阵列技术研究中受到关注。

1) 大数据存储结构与搜索引擎研究。数据存储系统是确定数据挖掘性能和成本的核心。新型的大数据存储架构可整合分布式以及嵌入式搜索引擎内的每一个存储驱动器,突破数据吞吐量和数据访问存储系统的限制,提升大数据存储接口的带宽。

2) 快速重建机制研究。固态硬盘的 RAID 结构采用相应的重建机制, 将加快从统计错误到恢复数据等整个重建的进程, 同时有助于降低重建过程中数据丢失的风险。重建机制对于一个完善的固态硬盘 RAID 结构来说是不可或缺的, 需要根据其 RAID 阵列特点进行开发并优化处理。

参考文献

- [1] GUPTA A, KIM Y, URGAONKAR B. DFTL: a flash translation layer employing demand-based selective caching of page-level address mappings[J]. *Acm Sigplan Notices*, 2009, 44(3): 229-240.
- [2] NARAYANAN D, THERESKA E, DONNELLY A, et al. Migrating server storage to SSDs: analysis of tradeoffs[C]. *Proceedings of the 4th ACM European conference on Computer systems*. Nuremberg: ACM, 2009: 145-158.
- [3] FABIANO M, FURANO G. NAND Flash storage technology for mission-critical space applications[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2013, 28(9): 30-36.
- [4] 胡洋. 高性能固态硬盘的多级并行性及算法研究[M]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [5] PATTERSON D A, GIBSON G, KATZ R H. A case for redundant arrays of inexpensive disks (RAID)[J]. *SIGMOD Rec*, 1988, 17(3): 109-116.
- [6] YANG Q, REN J. I-CASH: Intelligently coupled array of SSD and HDD[C]. 2011 IEEE 17th International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA). San Antonio: IEEE, 2011: 278-289.
- [7] PARK K, LEE D H, WOO Y, et al. Reliability and performance enhancement technique for SSD array storage system using RAID mechanism[C]. 2009 International Symposium on Communications and Information Technology. Incheon: IEEE, 2009: 140-145.
- [8] BALAKRISHNAN M, KADAV A, PRABHAKARAN V, et al. Differential RAID: rethinking RAID for SSD reliability[J]. *ACM Transactions on Storage*, 2010, 6(2): 1-22.
- [9] KAI B, QINGHONG Y, XIN X, et al. Research and Design of Solid State RAID Storage System[C]. 2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application. Washington: IEEE, 2010: 143-145.
- [10] 范玉雷, 赖文豫, 孟小峰. 基于固态硬盘内部并行的数据库表扫描与聚集[J]. *计算机学报*, 2012, 35(11): 2327-2335.
- [11] 赵鹏, 白石. 基于随机游走的大容量固态硬盘磨损均衡算法[J]. *计算机学报*, 2012, 35(5): 972-978.
- [12] KIM Y, GUPTA A, URGAONKAR B, et al. Hybridstore: A cost-efficient, high-performance storage system combining SSDs and HDDs[C]. 2011 IEEE 19th International Symposium on Modeling, Analysis & Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS). Singapore: IEEE, 2011: 227-236.
- [13] 李佳琦, 李健, 党相甫, 等. 基于固态硬盘的闪存阵列并行结构设计[J]. *微电子学与计算机*, 2010, 27(4): 85-88, 94.
- [14] JEREMIC N, MÜHL G, BUSSE A, et al. The pitfalls of deploying solid-state drive RAIDs[C]. *Proceedings of the 4th Annual International Conference on Systems and Storage*. Haifa: ACM, 2011: 1-13.
- [15] LEE Y, JUNG S, SONG Y H. FRA: a flash-aware redundancy array of flash storage devices[C]. *Proceedings of the 7th IEEE/ACM international conference on Hardware/software codesign and system synthesis*. Grenoble: ACM, 2009: 163-172.
- [16] 罗桂娥, 康霞. 固态硬盘性能优化研究与实现[J]. *计算机工程与应用*, 2015, 51(1): 43-48.
- [17] 霍建华, 王留全, 王亮, 等. 机载千兆网络数据记录器设计与实现[J]. *计算机测量与控制*, 2016, 24(5): 167-168, 172.
- [18] 蔡晓乐, 张亚棣, 李亚晖, 等. 基于区域页级映射的闪存转换层设计[J]. *微电子学与计算机*, 2016, 33(4): 32-36.
- [19] CHANG L P, KUO T W. Efficient management for large-scale flash-memory storage systems with resource conservation[J]. *ACM Transactions on Storage*, 2005, 1(4): 381-418.
- [20] LEE S W, PARK D J, CHUNG T S, et al. A log buffer-based flash translation layer using fully-associative sector translation[J]. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 2007, 6(3): 150-151.
- [21] 张珮, 王晓晨. 固态硬盘 SSD 性能分析及 RAID0 方案设计[J]. *微型机与应用*, 2016, 35(6): 26-28.
- [22] 李东阳, 刘鹏, 丁科, 等. 基于固态硬盘的云存储分布式缓存策略[J]. *计算机工程*, 2013, 39(4): 32-35.
- [23] PARHI K K. Eliminating the Fanout Bottleneck in Parallel Long BCH Encoders[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2004, 51(3): 512-516.
- [24] 潘文. 应用于固态硬盘的 RAID 技术的研究[M]. 安徽: 合肥工业大学, 2014.
- [25] YI W, XU H, XIE Q, LI N. A Flash-aware Intra-disk Redundancy scheme for high reliable All Flash Array[J]. *IEICE Electronics Express*, 2015, 12(13): 1-11.
- [26] 孙浩然. 高速海量固态硬盘的设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [27] 陈博, 肖依, 刘芳, 等. 一种面向 RAID 阵列的 SSD 设计优化方法[J]. *计算机工程与科学*, 2014, 36(7): 1226-1230.
- [28] IM S, SHIN D. Flash-aware RAID techniques for dependable and high-performance flash memory SSD[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2011, 60(1): 80-92.
- [29] TAKEUCHI K. Novel co-design of NAND flash memory and NAND flash controller circuits for sub-30nm low-power high-speed solid-state drives(SSD)[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2009, 44(4): 1227-1234.
- [30] LEE S, LEE B, KOH K, et al. A lifespan-aware reliability scheme for raid-based flash storage[C]. *Proceedings of the 2011 ACM Symposium on Applied Computing*. TaiChung: ACM, 2011: 374-379.
- [31] 李博. 固态硬盘写效率及能耗优化研究[M]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [32] 张志卓, 张全新, 李元章, 等. 连续数据存储中面向 RAID5 的写操作优化设计[J]. *计算机研究与发展*, 2013, 50(8): 1604-1612.
- [33] LUO J J, FAN L Y, TSU C, GENG X. Solid-state drive controller

- with embedded RAID functions [J]. IEICE Electronics Express. 2014, 11(12):1-6.
- [34] KANG J, KIM J S, PARK C, et al. A multi-channel architecture for high-performance NAND flash-based storage system [J]. Journal of System Architecture. 2007, 53(9):644-658.
- [35] 杨春林, 雷航. 基于 NAND Flash 的嵌入式文件系统的改进与优化 [J]. 计算机应用, 2007, 27(12):3102-3104.
- [36] 郑文静, 李明强, 舒继武. Flash 存储技术 [J]. 计算机研究与发展, 2004, 47(4):716-726.
- [37] HE J, JAGATHEESAN A, GUPTA S, et al. Dash: a recipe for a flash-based data intensive supercomputer [C]. Proceedings of the 2010 ACM/IEEE International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis. New Orleans: IEEE Computer Society, 2010:1-11.
- [38] QIN Y, FENG D, LIU J, et al. A Parity Scheme to Enhance Reliability for SSDs [C]. Proceeding of the 2012 IEEE 7th International Conference on Networking, Architecture and Storage. Xiamen: IEEE, 2012:293-297.

工业生物制造: 化学品生产的未来

2017年1月6日,美国莱斯大学的 James M. Clomburg 等科学家在《科学》杂志发表综述性文章,探讨了工业生物制造的进展,涉及以下问题:

工业化学品制造的局限是什么?

工业化学品制造的传统单位规模经济模型将扩大规模视作降低单位资本支出的唯一途径。虽然这种模式取得了巨大成功,但其内在资本支出高、规模大和建设周期长等特征都会引发较高的金融风险;同时,因其限制了工业多样性并降低了行业适应变化的能力,相应地阻碍了变革与创新。

工业生物制造可以证明单位数量的经济性吗?

小规模工业生物制造设施的低投入和低金融风险特性可使大量、多样化的参与者加入其中,使得技术得以更快地革新和应用,并驱动市场快速成长。快速和分布式部署特性则扩大了原料多样性并使远距离、小规模的原料供应成为可能,这对于可持续的原料利用和温室气体减排意义重大,减少了对环境的不良影响。同时,小规模 and 资本效率高的设施还能够降低化学制造的经济壁垒,推动公平的资源全球化利用。

工业生物制造的可行性如何?

在市场容量小、原料分布广、技术复杂度高、化学过程效率低或通用市场分化等特殊情况下,大规模化学制造不可行。工业生物制造则有望克服上述困难。不过,要想实现对这类资源的利用,需要在原料场所附近部署大量分布式的小规模设施,这需要边摸索边实践,在获得生产设施的单位数量经济性的同时,利用制造工艺的自动化降低单位产量的资本支出。此外,原料与产品供应需与当地的市场需求相适应。工业生物制造的特性刚好符合这些要求,能够提供快速、灵活和广泛的技术部署,直接利用这些原料资源并产生效益。

工业生物制造的未来前景如何?

当前生物转化的效率还低于化学转化,如果再考虑到产品的潜在毒性和高含水率导致的低浓度问题,还亟需开发稳健的生物过程系统,方能使工业生物制造产品达到商业化生产所需的指标。因此,要在 21 世纪持续发展工业生物制造,亟需进一步推进生物催化剂设计和过程设计工程的发展,依靠代谢工程、合成生物学和系统生物学的持续进步。尽管如此,工业生物制造的前景依然可期,基于生物学的强度和多样性,越来越多的生物转化过程将会陆续被开发,并在更多的领域得到快速、稳定和广泛的应用,从而在解决当前及未来化学品生产方面表现出巨大潜力。除了解决地球上的问题外,小规模、低复杂性的生物转化过程还有潜力用于太空探索,如利用外星资源(如大气气体等)生产人类健康所需的产品等。

郑颖 陈方 陈云伟 丁陈君(中国科学院成都文献情报中心) 编译自

James M. Clomburg, Anna M. Crumbley, Ramon Gonzalez, et al. Science 2017. 355(6230)

原文标题: Industrial biomanufacturing: The future of chemical production