

ZRAM那点事

ZRAM和ZSMALLOC简介及3个问题的改进和1个提高



朱辉

zhuhui@xiaomi.com

teawater.github.io

目录

- ZRAM和ZSMALLOC的简介
 - ZRAM使用中3个问题以及Linux内核主线对他们的改进
 - 我对ZRAM的1个提高
 - 对ZRAM提高的一些思路

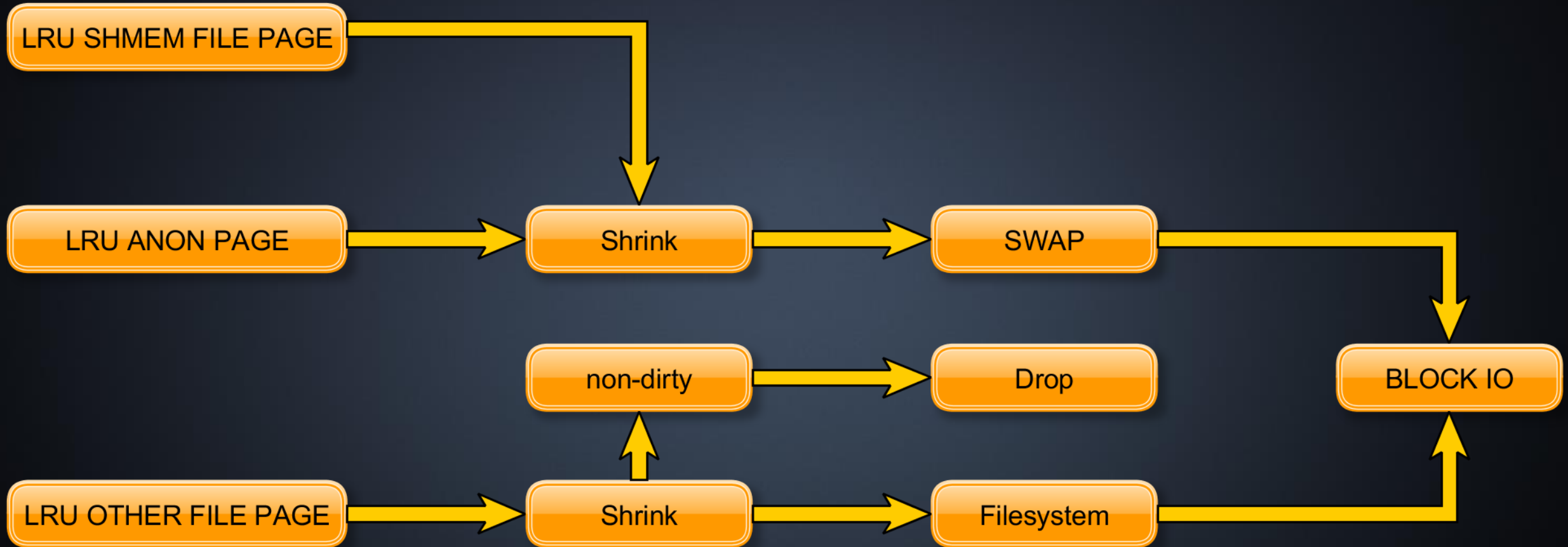
什么是ZRAM?

- Linux内核中提供的虚拟磁盘。
- 将写入的页面压缩并分配内存存储在系统中。
- 主要用来作为SWAP设备。
- 常用在用闪存作为存储空间设备上。

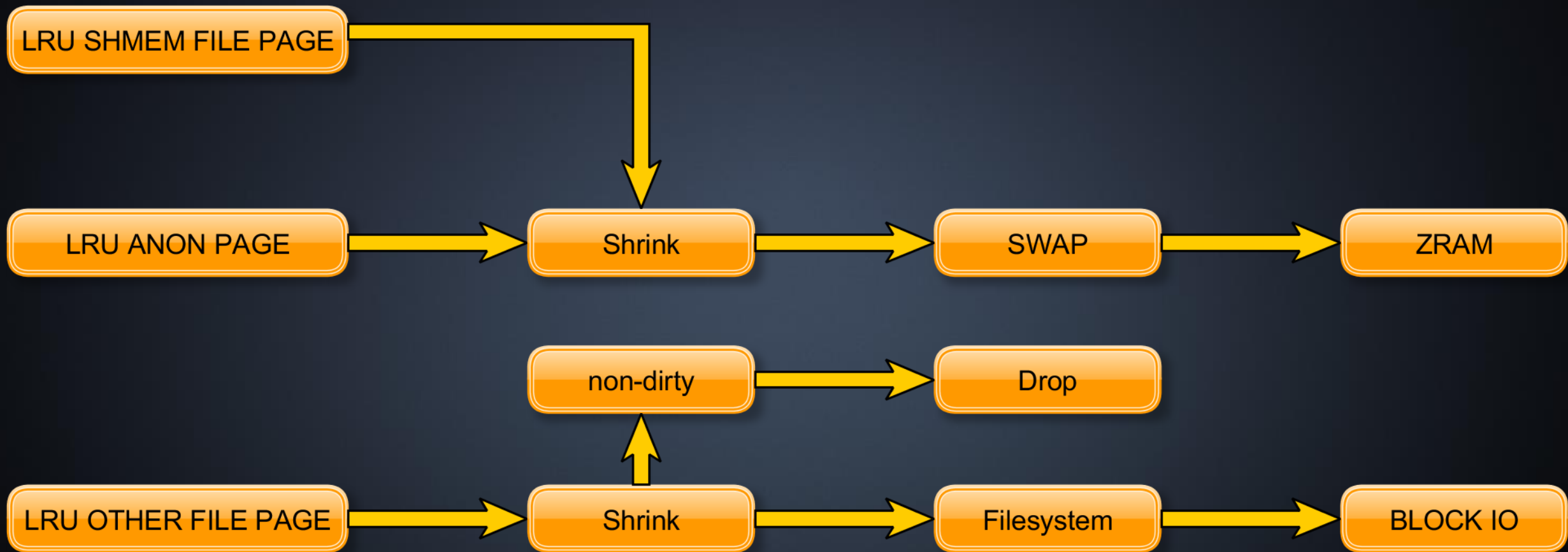
为什么用ZRAM? (见下图)

- 设备上可以不再需要开其他的SWAP。(区别于ZSWAP)
 - 节省了闪存的寿命。
 - 节省了硬盘空间。
 - 节省了BLOCK IO。
- 通过压缩节省内存。
Android下可用来提高进程保活度。

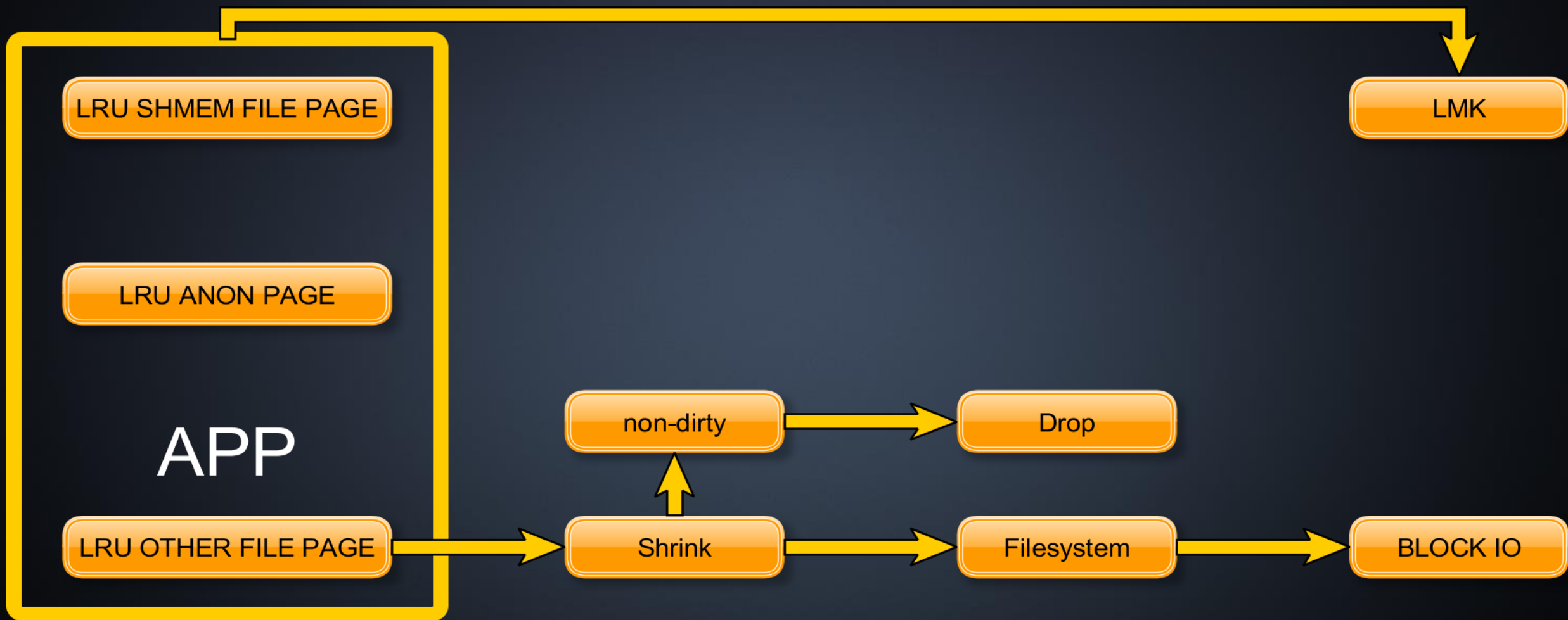
LRU Shrinker



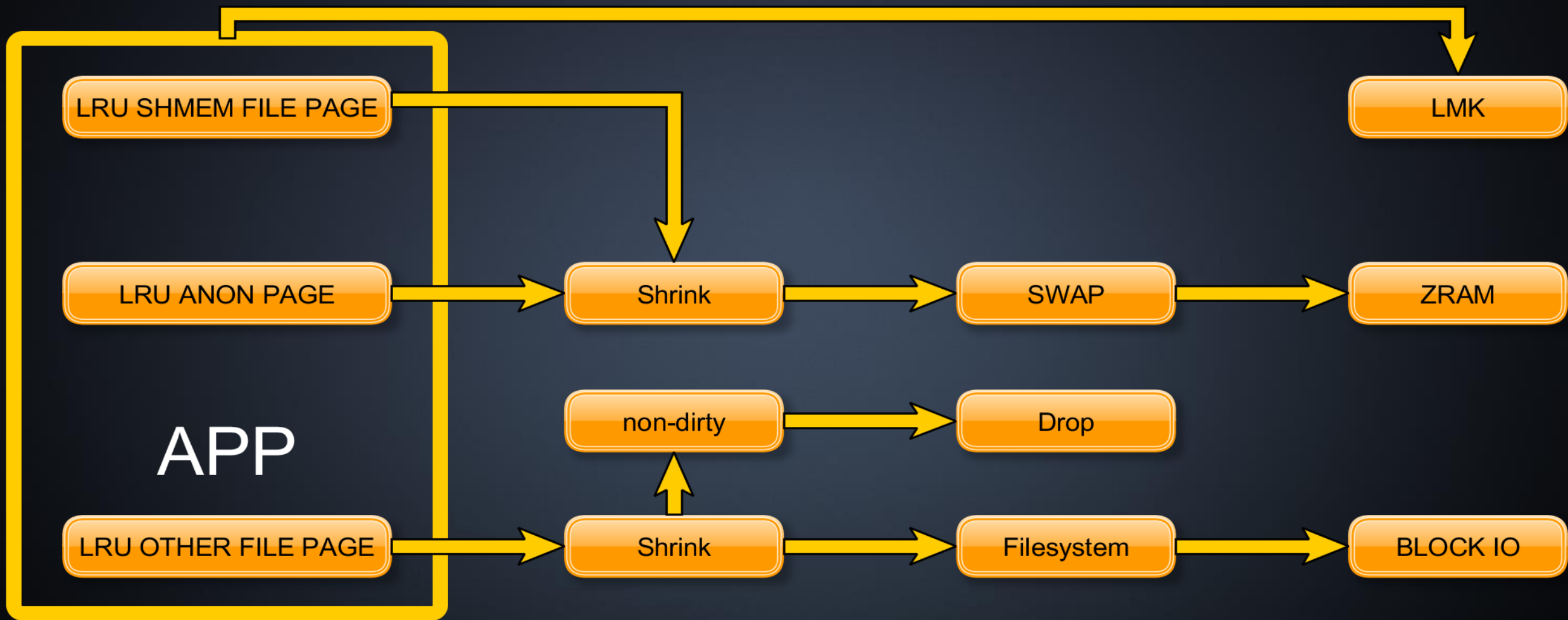
ZRAM



Android 无SWAP



Android有SWAP



什么是ZSMALLOC? (见下图)

- 针对内存压缩场景设计的内存分配器。类似其的还有ZBUD和Z3FOLD。
- ZRAM直接使用ZSMALLOC。
ZSWAP通过ZPOOL框架使用其。

ZSMALLOC内部结构（见下图）

- 基本结构：

每个对ZSMALLOC的使用者会申请一个zs_pool。

每个zs_pool根据存储数据的大小分出若干size_class。

每个size_class中根据元素占有状态分出4个fullness_list。

每个fullness_list保存若干zspage，每个zspage由一个到几个几个不连续page组成。

每个zspage(由最多4个非连续page组成)保存若干储存对象obj，ZRAM中每个page最终会被保存为一个obj。

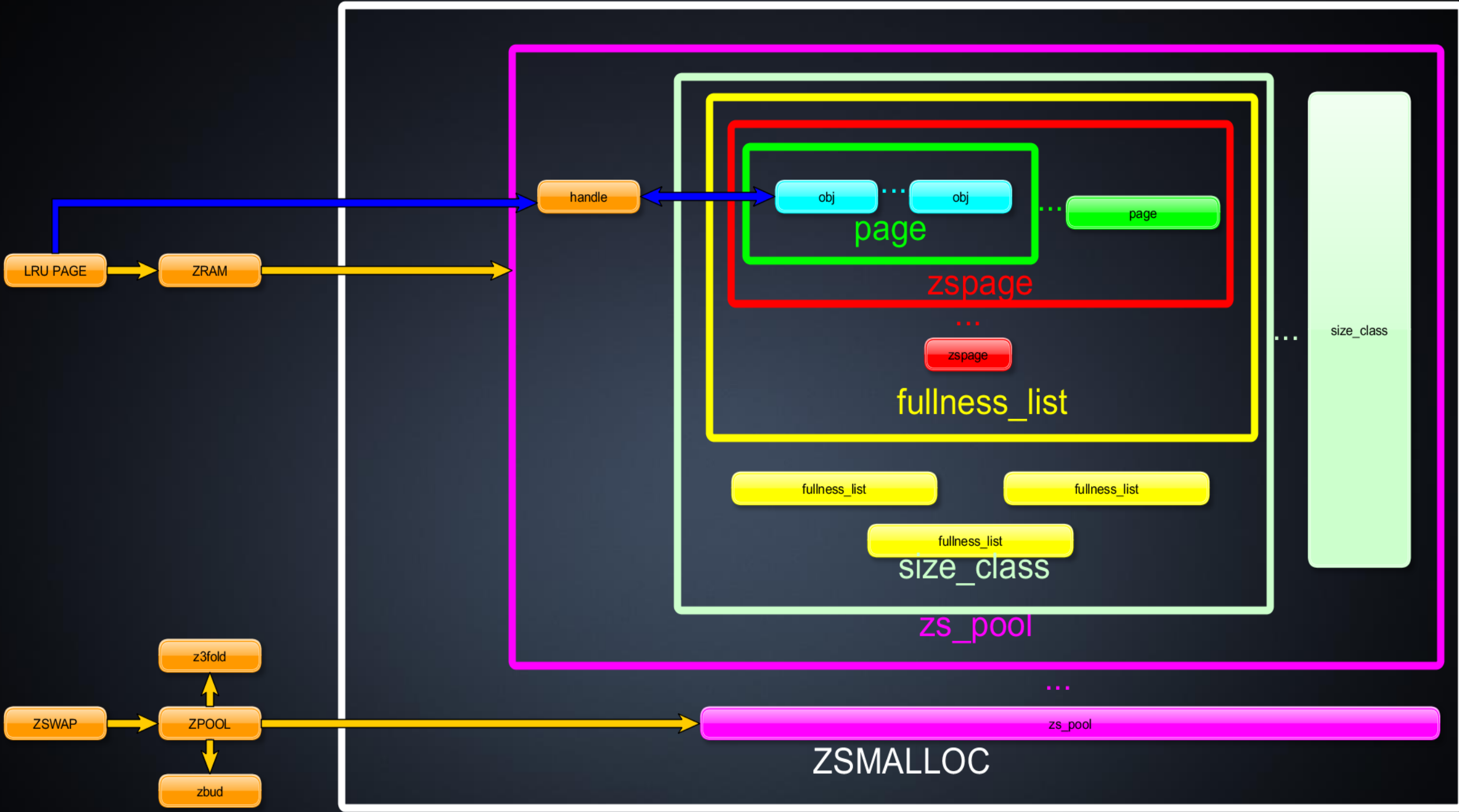
ZRAM通过handle以映射的形式访问某个obj，因为是映射式的访问，highzone page也是可以使用的。（今年还有修改，后面会提到）

- 比较重要：

页面被压缩后存储为一个obj，被存于由页面组成的zspage中，外面访问其要通过handle。

- 实际观测ZSMALLOC内部结构可在配置内核中打开CONFIG_ZSMALLOC_STAT=y。

访问/sys/kernel/debug/zsmalloc/zram0/classes就可查看ZSMALLOC中的内部信息。



class	size	almost_full	almost_empty	obj_allocated	obj_used	pages_used	pages_per_zspage
0	32	0	0	0	0	0	1
1	48	3	1	2560	2434	30	3
2	64	2	1	1280	1221	20	1
3	80	1	1	663	637	13	1
4	96	0	1	640	600	15	3
5	112	0	1	365	326	10	2
6	128	0	1	352	342	11	1
7	144	0	1	425	385	15	3
8	160	1	1	357	327	14	2
9	176	0	1	372	317	16	4
10	192	1	0	448	434	21	3
11	208	0	1	390	360	20	2
12	224	1	0	292	281	16	4
13	240	1	1	272	264	16	1
14	256	0	1	224	212	14	1
15	272	0	1	225	219	15	1
16	288	0	1	224	214	16	1
17	304	0	1	240	210	18	3
18	320	0	1	204	173	16	4
19	336	0	1	168	165	14	1
20	352	0	1	207	191	18	2
21	368	0	1	275	269	25	1
22	384	0	1	192	172	18	3
23	400	1	0	140	139	14	1
24	416	1	0	156	153	16	4
25	432	0	1	168	146	18	3
26	448	0	1	153	145	17	1
27	464	0	1	175	143	20	4
28	480	0	1	187	172	22	2
29	496	1	0	132	127	16	4
30	512	0	1	152	146	19	1
31	528	0	1	186	170	24	4
32	544	1	1	150	142	20	2
33	560	0	2	174	153	24	4
34	576	1	0	168	167	24	1
35	592	0	2	162	140	24	4
36	608	0	1	160	153	24	3
37	624	0	1	130	122	20	2
38	640	0	1	152	136	24	3
40	672	1	0	318	317	53	1
42	704	0	1	322	310	56	4
43	720	0	1	170	158	30	3
44	736	0	1	165	162	30	2
46	768	0	1	288	276	54	3
49	816	0	0	425	425	85	1
51	848	1	0	323	320	68	4
52	864	2	0	154	151	33	3
54	896	0	1	315	311	70	2
57	944	0	1	455	450	105	3
58	960	0	0	136	136	32	4
62	1024	0	1	616	614	154	1
66	1088	0	1	720	714	192	4
67	1104	0	1	187	182	51	3
71	1168	1	1	805	798	230	2
74	1216	1	0	720	718	216	3
76	1248	0	1	468	459	144	4
83	1360	0	1	1503	1502	501	1
91	1488	0	1	1551	1544	564	4
94	1536	0	1	616	614	231	3
100	1632	0	0	1345	1345	538	2
107	1744	0	1	1596	1594	684	3
111	1808	0	1	765	758	340	4
126	2048	0	0	2426	2426	1213	1
144	2336	0	1	1960	1958	1120	4
151	2448	1	0	545	544	327	3
168	2720	0	1	1389	1387	926	2
190	3072	0	1	1564	1562	1173	3
202	3264	0	1	45	43	36	4
254	4096	0	0	23306	23306	23306	1
Total		22	54	58118	57191	33259	

注意查找彩蛋

目录

- ZRAM和ZSMALLOC的简介
 - ZRAM使用中3个问题以及Linux内核主线对他们的改进
- 我对ZRAM的1个提高
- 对ZRAM提高的一些思路

ZRAM使用中出现的3大问题

Minchan Kim于2015年提出：

- 外部碎片
- 不能移动的页
- 内部碎片

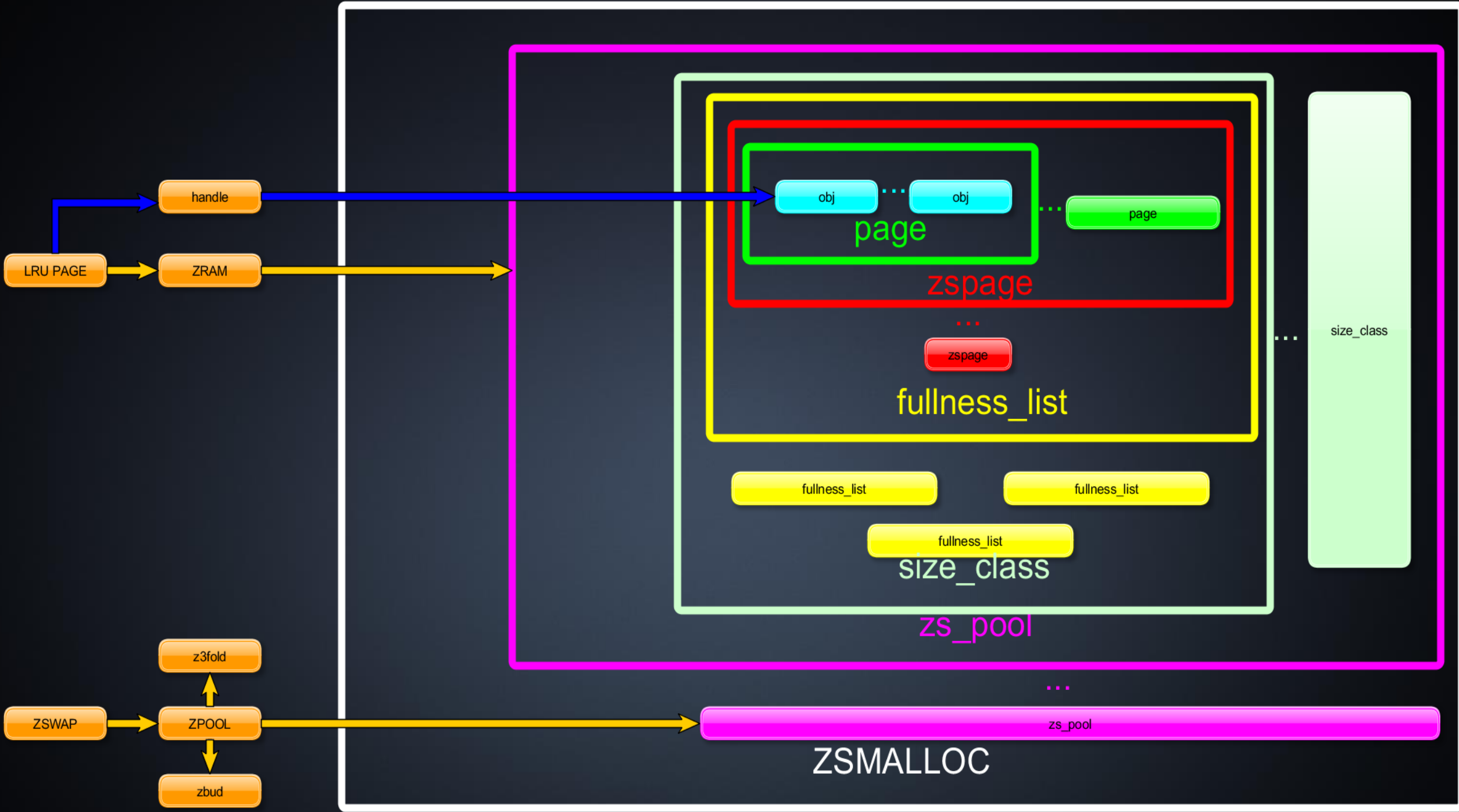
这三个问题有一定相关性，并且都需要在ZSMALLOC中进行修复。
从去年开始层层修复到今年在Upstream上全部修复完成。

内部碎片 (见下图)

- 开ZRAM时间长了以后感觉内存还是不够。杀掉一堆进程后又感觉好点了。但是很快又不够了。

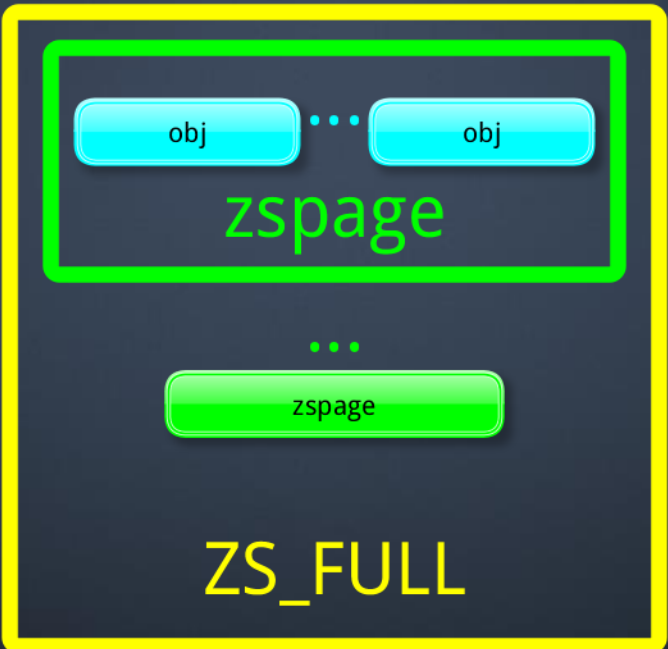
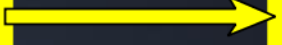
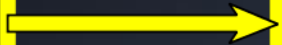
内部碎片的成因（见下图）

- 针对一个尺寸的size_class中实际存储数据的是obj。
- 而obj被存储在zspage中，随着使用会不断有分配和释放，如果没有相应碎片处理，则会出现很多碎片化的zspage。
- 内部碎片导致ZRAM内存使用率变差，影响ZRAM效果。
- 注意这张图和前面的图不同，因为前面的图是根据修正后来做的。



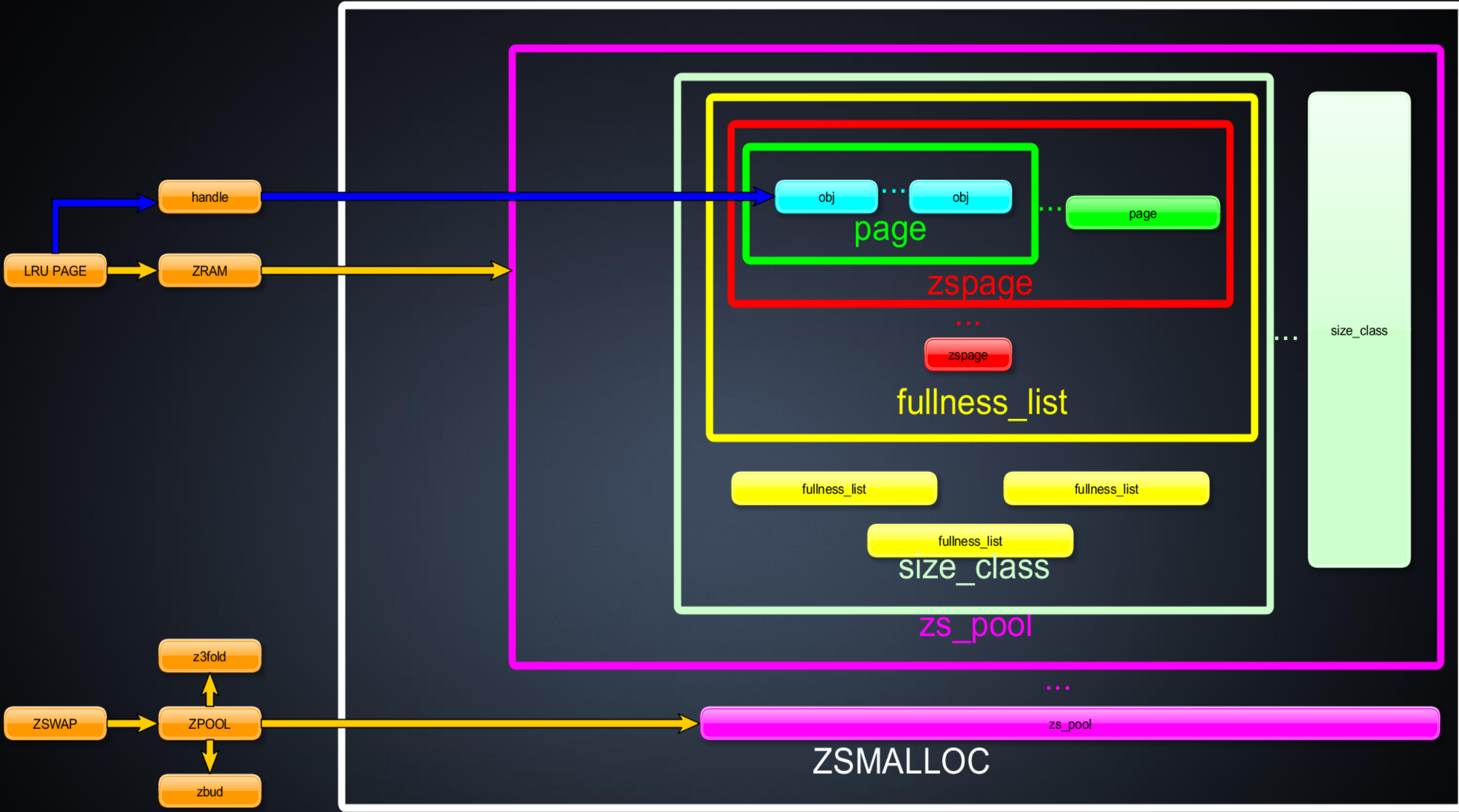
fullness_list最早的抗碎页机制（见下图）

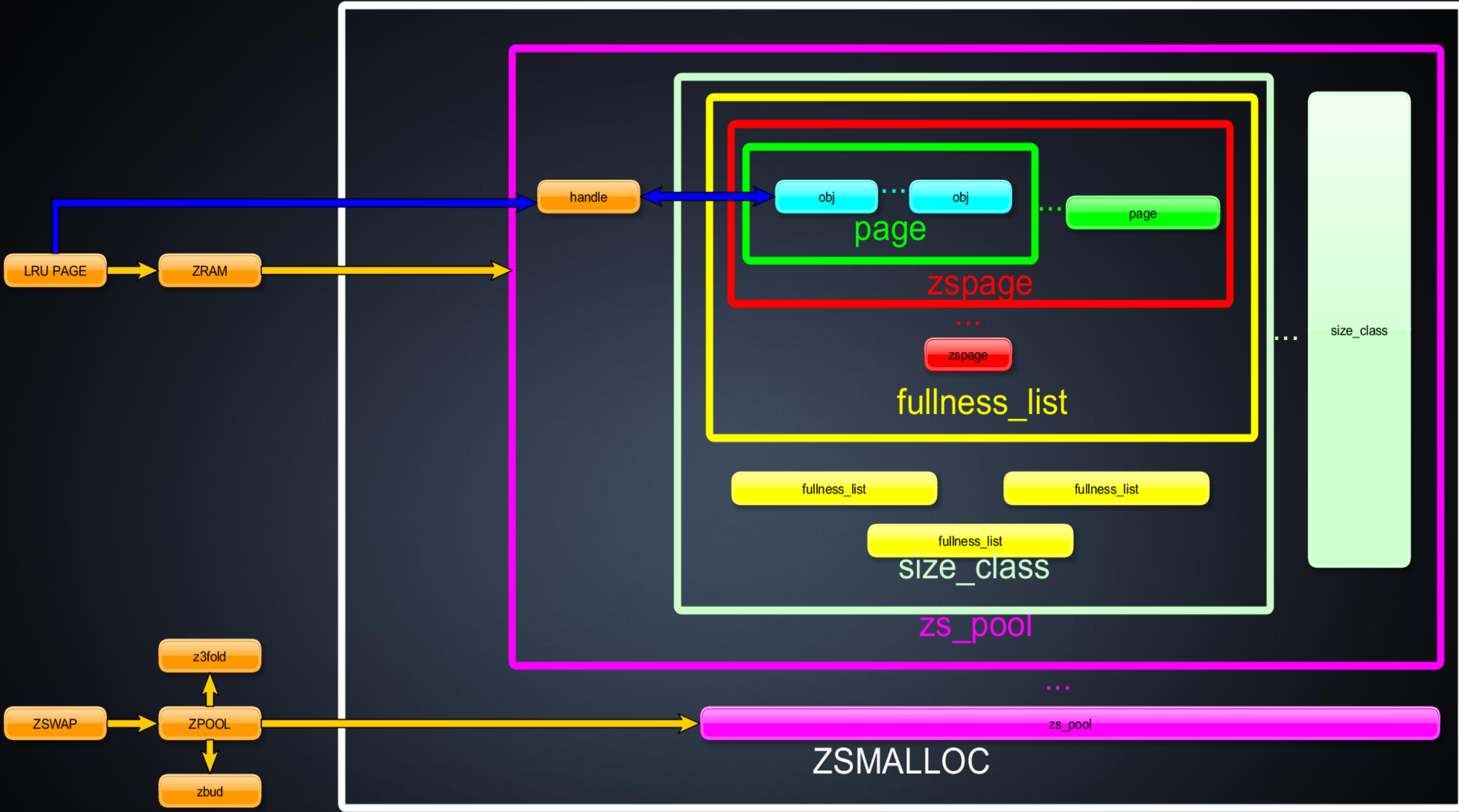
- ZS_EMPTY, ZS_ALMOST_EMPTY, ZS_ALMOST_FULL, ZS_FULL这4个zspage的列表。每个列表储存的ZSPAGE是其标记的所处状况。使用的时候优先从ZS_ALMOST_FULL中找ZSPAGE。
- 缺点：完全被动，虽然分配抗碎页，但是释放还是碎片化的。



__zs_compact主动碎片清理(1)准备工作 (见下图)

- 将handle从存储指向obj的数据改为指向obj的指针。
- 这样zsmalloc内部可以根据obj位置的变化修改handle内容，ZRAM还可以找到某个页面对应的obj。





__zs_compact主动碎片清理(2)实际处理 (见下图)

对一个size_class进行如下处理:

按照先ZS_ALMOST_EMPTY, 后ZS_ALMOST_FULL的顺序抽出一个来源zspage。

然后按照先ZS_ALMOST_FULL, 后ZS_ALMOST_EMPTY的顺序抽出一个目标zspage。

把来源zspage中的obj依次移动到目标zspage中。

将已经空了的来源zspage释放掉, 再按照刚才的方法取得一个来源zspage。

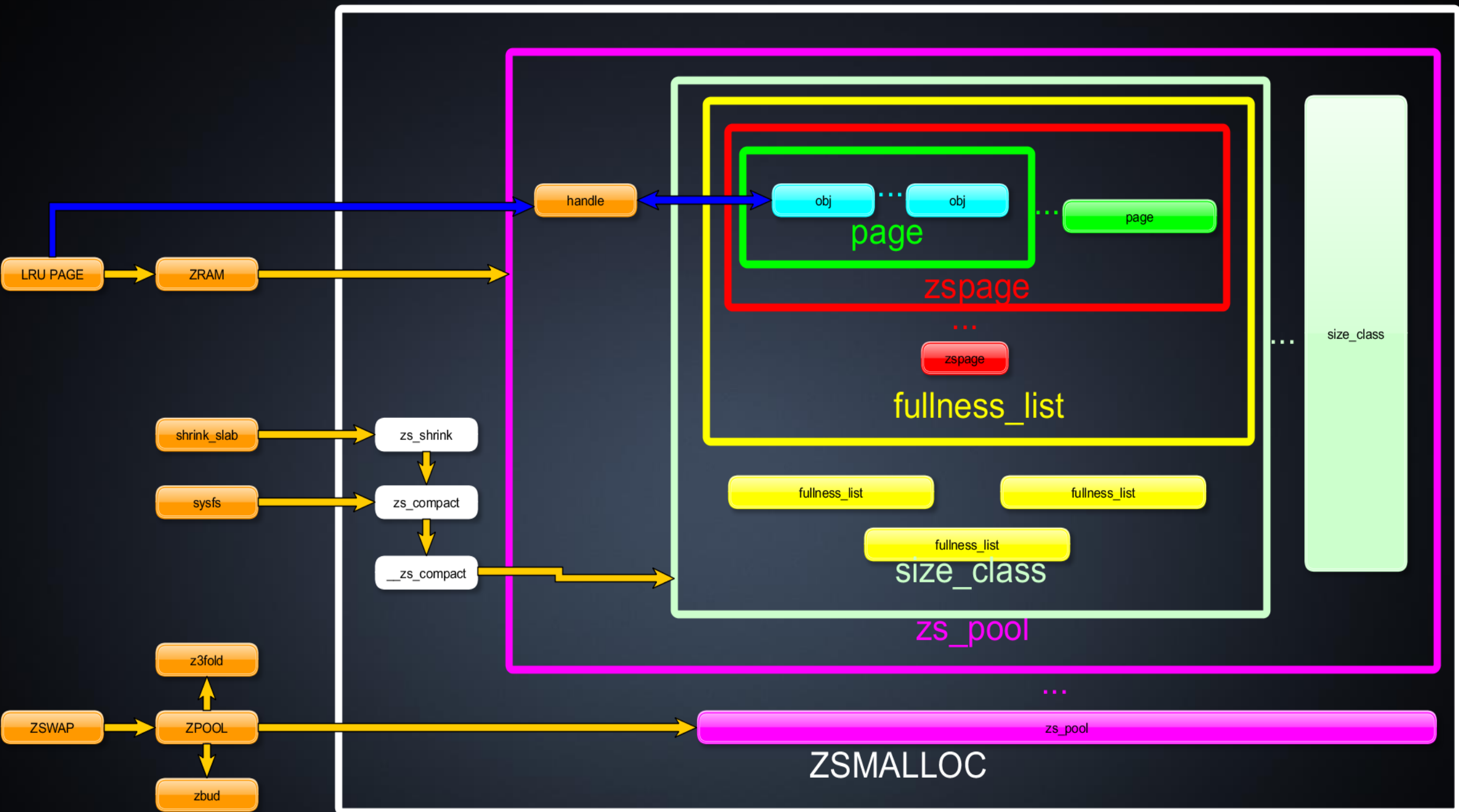
将满了的目标zspage加入ZS_FULL, 再按照刚才的方法取得一个目标zspage。

如此循环, 直到无法取得来源zspage或者目标zspage。



__zs_compact主动碎片清理(3)调用处理 (见下图)

- zs_compact会依次调用__zs_compact对一个zs_pool中的每个size_class进行清理。
- 需要的时候可通过sysfs接口调用清理。
- 或者shrink_slab会调用zs_shrink, zs_shrink会调用zs_compact根据需要需要做清理。



内部碎片问题的相关PATCH

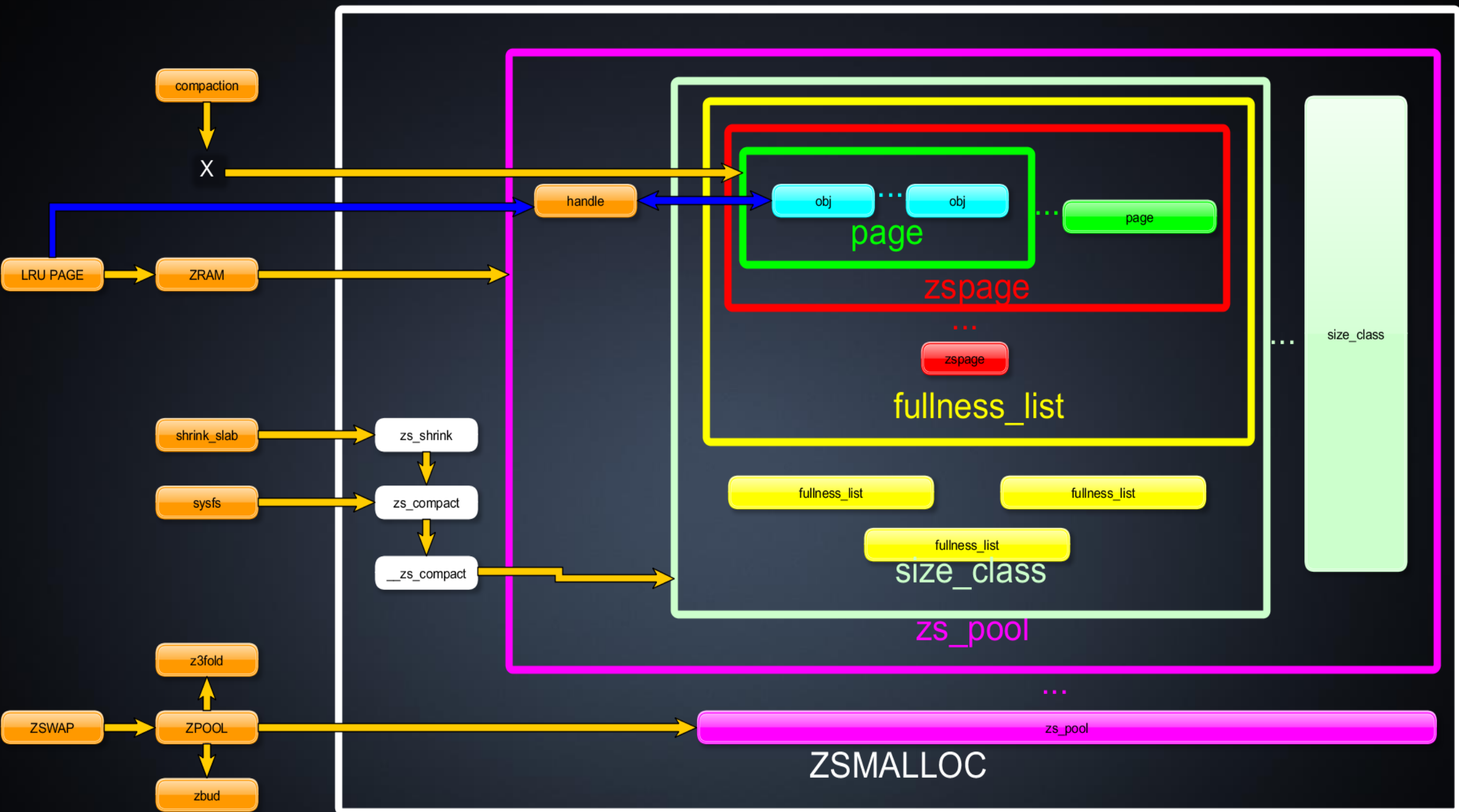
- 相关的PATCH主要集中在zsmalloc.c，集成难度不大，建议内核不是很老的系统遇到相关问题可以打上尝试一下。
- 另外注意在今年有一个关于handle写保护的修复务必打上。

外部碎片和 不可移动页面 (见下图)

- 因为一个设计引起的问题，所以放在一起介绍。
- 深度使用ZRAM后的现象：
 1. 系统经常遇到连续页面分配失败的报错。
 2. 系统可移动页块变少，不可移动页块变越来越多。
 3. 因为页面碎片增加引起的系统变慢。
 4. 在打上各种主动使用CMA相关的PATCH后(具体可见到2014年在CLK上关于CMA的演讲)，ZRAM中存放比较多内存后，还会遇到CMA页面剩下很多，普通内存剩下很少的情况。

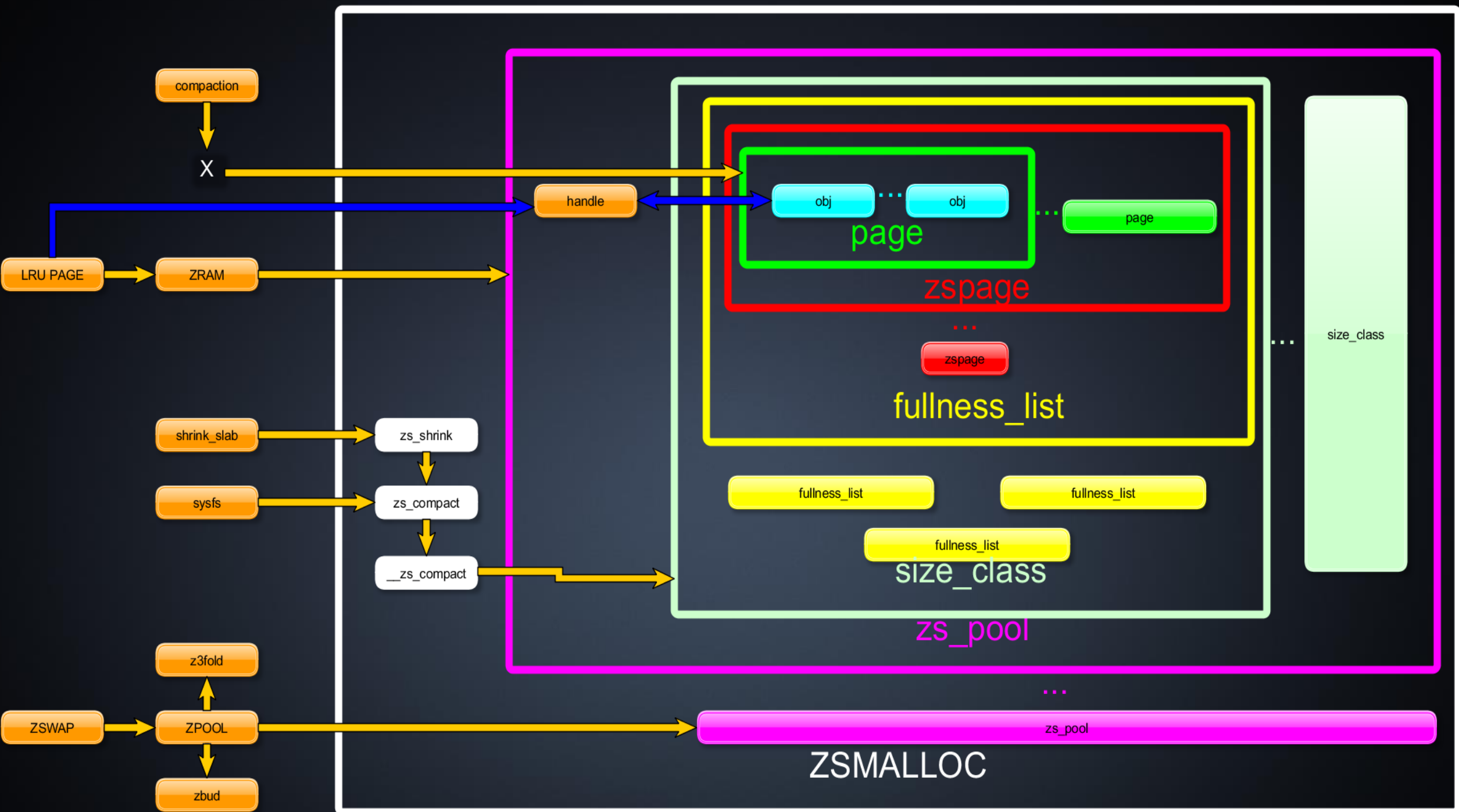
外部碎片和不可移动页面的成因 (见下图)

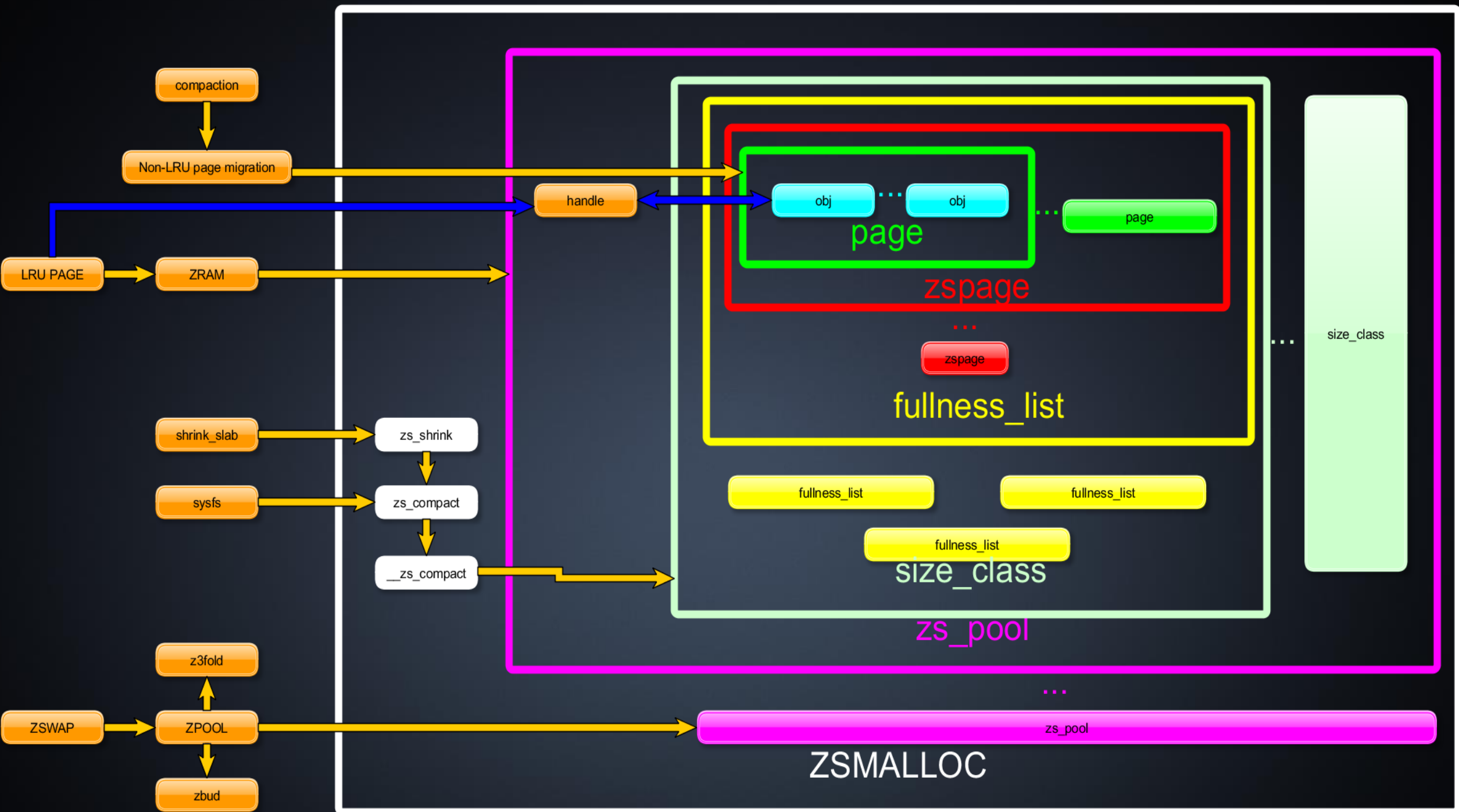
- ZSMALLOC分配的页面为不可移动页面。
 - 被放入ZRAM的LRU页面(可移动)变成不可移动页面，这些页面不能被LINUX内核系统的除碎页功能处理，导致系统页面碎片化严重。
 - 导致了现象1,2,3。
 - CMA页面不能被当成不可移动页面分配(原理同样见我2014年在CLK的演讲)，导致了现象4。
-
- 题外话：碎片问题在A64上被放大因为A64的THREAD_SIZE比A32大。
 - 除ZSMALLOC外，去年到今年还有若干相关提高。



外部碎页解决方案：Non-LRU page migration (见下图)

- 没有条件就创造条件，不能移动就让它能移动。
- 在ZSMALLOC内部，handle已经在前面处理好可以保证obj迁移到其他页面，处理掉之前保存在page结构里面的ZSMALLOC相关信息，实现了相关接口就令ZSMALLOC中使用的页可迁移了。





外部碎页问题的相关PATCH

- 因为要对页面移动相关代码进行修改，涉及到不少Linux内存管理相关代码，有一定难度。
- 依赖内部碎页的相关修正patch。

目录

- ZRAM和ZSMALLOC的简介
- ZRAM使用中3个问题以及Linux内核主线对他们的改进
 - 我对ZRAM的1个提高
- 对ZRAM提高的一些思路

class	size	almost_full	almost_empty	obj_allocated	obj_used	pages_used	pages_per_zspage
0	32	0	0	0	0	0	1
1	48	3	1	2560	2434	30	3
2	64	2	1	1280	1221	20	1
3	80	1	1	663	637	13	1
4	96	0	1	640	600	15	3
5	112	0	1	365	326	10	2
6	128	0	1	352	342	11	1
7	144	0	1	425	385	15	3
8	160	1	1	357	327	14	2
9	176	0	1	372	317	16	4
10	192	1	0	448	434	21	3
11	208	0	1	390	360	20	2
12	224	1	0	292	281	16	4
13	240	1	1	272	264	16	1
14	256	0	1	224	212	14	1
15	272	0	1	225	219	15	1
16	288	0	1	224	214	16	1
17	304	0	1	240	210	18	3
18	320	0	1	204	173	16	4
19	336	0	1	168	165	14	1
20	352	0	1	207	191	18	2
21	368	0	1	275	269	25	1
22	384	0	1	192	172	18	3
23	400	1	0	140	139	14	1
24	416	1	0	156	153	16	4
25	432	0	1	168	146	18	3
26	448	0	1	153	145	17	1
27	464	0	1	175	143	20	4
28	480	0	1	187	172	22	2
29	496	1	0	132	127	16	4
30	512	0	1	152	146	19	1
31	528	0	1	186	170	24	4
32	544	1	1	150	142	20	2
33	560	0	2	174	153	24	4
34	576	1	0	168	167	24	1
35	592	0	2	162	140	24	4
36	608	0	1	160	153	24	3
37	624	0	1	130	122	20	2
38	640	0	1	152	136	24	3
40	672	1	0	318	317	53	1
42	704	0	1	322	310	56	4
43	720	0	1	170	158	30	3
44	736	0	1	165	162	30	2
46	768	0	1	288	276	54	3
49	816	0	0	425	425	85	1
51	848	1	0	323	320	68	4
52	864	2	0	154	151	33	3
54	896	0	1	315	311	70	2
57	944	0	1	455	450	105	3
58	960	0	0	136	136	32	4
62	1024	0	1	616	614	154	1
66	1088	0	1	720	714	192	4
67	1104	0	1	187	182	51	3
71	1168	1	1	805	798	230	2
74	1216	1	0	720	718	216	3
76	1248	0	1	468	459	144	4
83	1360	0	1	1503	1502	501	1
91	1488	0	1	1551	1544	564	4
94	1536	0	1	616	614	231	3
100	1632	0	0	1345	1345	538	2
107	1744	0	1	1596	1594	684	3
111	1808	0	1	765	758	340	4
126	2048	0	0	2426	2426	1213	1
144	2336	0	1	1960	1958	1120	4
151	2448	1	0	545	544	327	3
168	2720	0	1	1389	1387	926	2
190	3072	0	1	1564	1562	1173	3
202	3264	0	1	45	43	36	4
254	4096	0	0	23306	23306	23306	1
Total		22	54	58118	57191	33259	

问题都解决完了
再次查找彩蛋

ZRAM的低压缩率问题

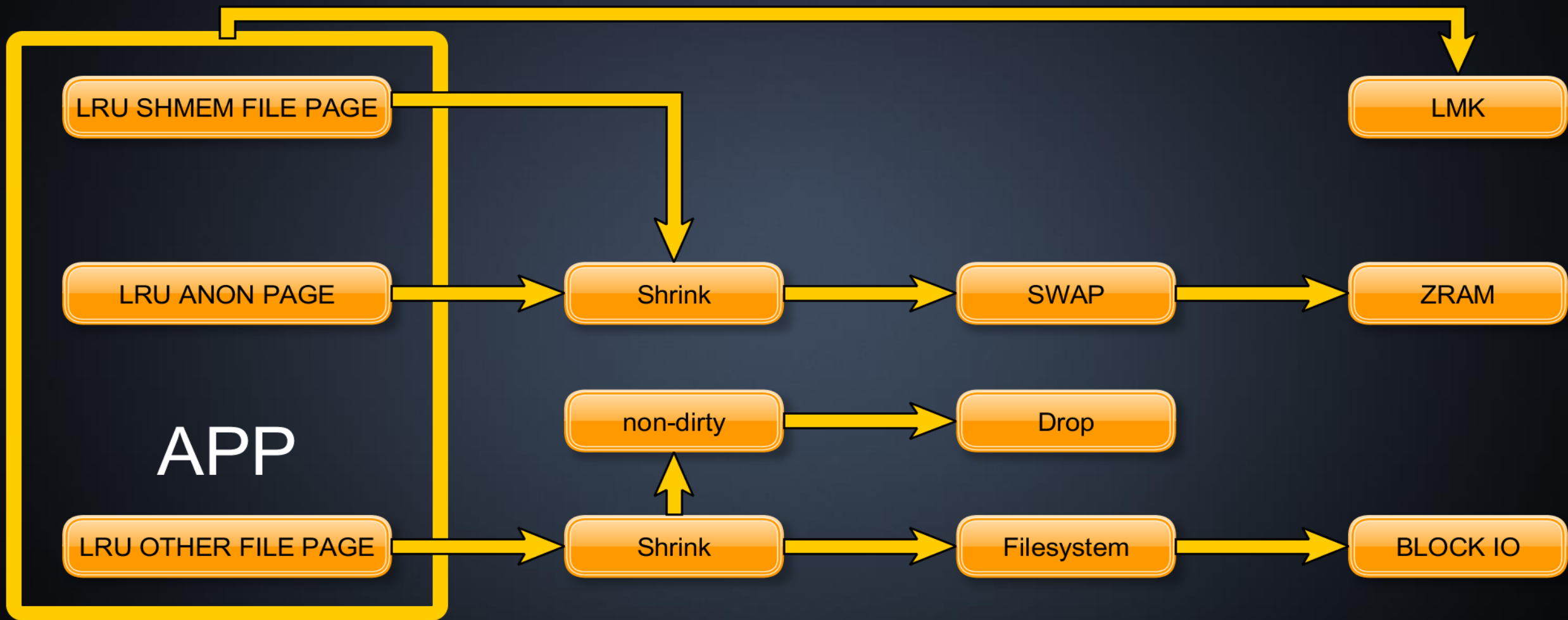
190	3072	0	1	1564	1562	1173	3
202	3264	0	1	45	43	36	4
254	4096	0	0	23306	23306	23306	1
Total		22	54	58118	57191	33259	

- 这是我看到的一个比较极端的例子，ZRAM中70%的页面起到的压缩作用是0。
- 实际情况可能没有这么糟糕，另外CONFIG_ZSMALLOC_STAT选择默认不打开，所以一般人可以做到眼不见心不烦。
- 这样的PAGE浪费了CPU的时间，浪费了ZRAM空间。
- 这时勉强能起到的作用只有把非HIGHMEM ZONE的页面保存到HIGHMEM ZONE上，在一定程度上节省了非HIGHMEM ZONE。
但是64位时代到来，使用HIGHMEM减少，优势不再明显。

ZRAM的本质，提高思路的来源（见下图）

- 用CPU和少量内存换取系统BLOCK IO和比较多数量内存。
- 存放到ZRAM中的页面压缩率越好，ZRAM的工作效果越好。
- 但是现在不能选择，只能照单全收。

Android有SWAP





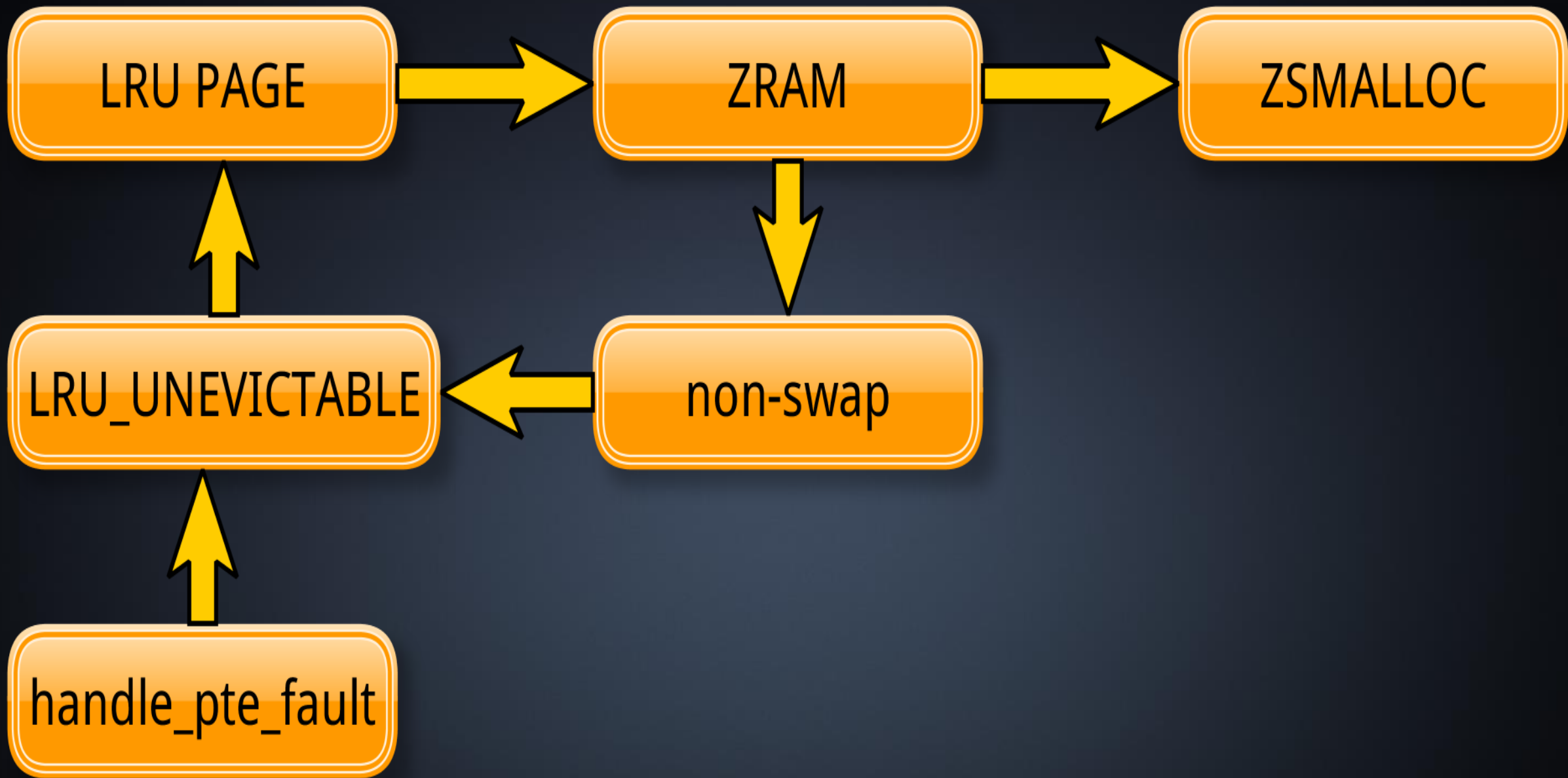
不给力呀老湿

Non-Swap (见下图)

- 为了提高ZRAM压缩率。
- 其思路是把压缩率不高的页面不写入ZRAM，同时将其从LRU列表中抽出去放到单独的页列表保证其不会再次被写入ZRAM。
当这些页面再次被写时，表明其有可能在压缩率上出现变化，将其再次放回LRU列表。

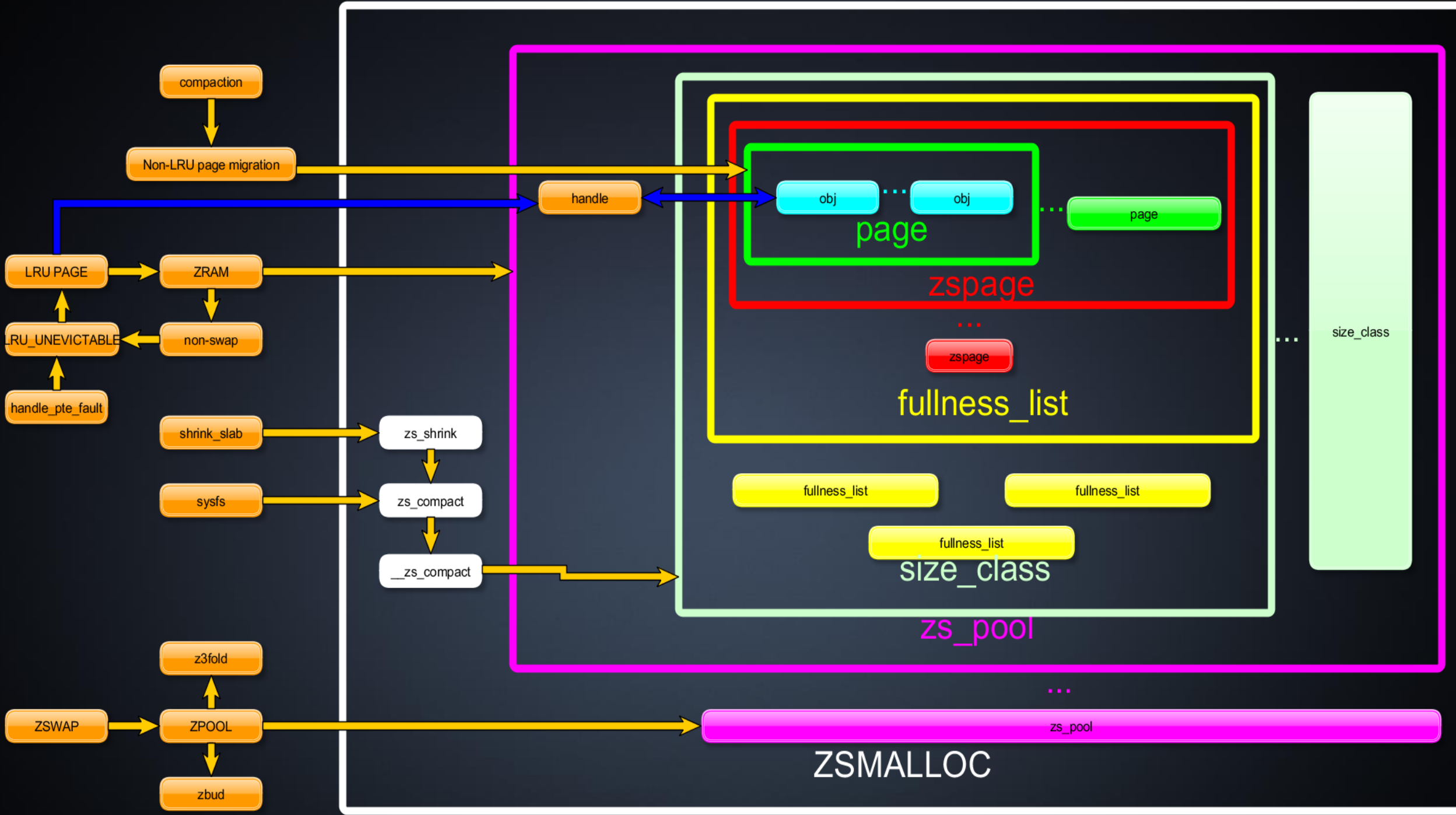
Non-Swap的实现（见下图）

- 根据设置放弃在ZRAM中存储压缩率不高的页。
- 具体步骤：
 - shrink_page_list在发送PAGE到ZRAM之前把UNMAP PAGE改为把页面设置为只读。
 - 把页面发给ZRAM。
 - ZRAM压缩页面，然后检查压缩率，压缩率不足的页面设置NON-SWAP标志。
 - 返回shrink_page_list，把没有NON-SWAP也没有在发送到ZRAM过程中被写入的页面UNMAP然后释放掉。
 - 把被设置为NON-SWAP的页面丢入UNEVICTABLE列表防止再次被shrink_page_list。
 - 一直到这个页面被写触发handle_pte_fault，在这里去掉NON-SWAP标志并踢回LRU PAGE列表。
- <https://lkml.org/lkml/2016/8/22/151>



Non-Swap的效果（见下图）

- 一个平台用内部稳定性测试。
未打上Non-Swap功能PATCH和打开Non-Swap功能后对比结果，每次的LMK次数都降低**50%**以上。
最好的一次降低了**79%**。
能达到这点的原因我分析是因为当压缩率提高时，每做一组页面shrink都可以获得比低压缩率更高的内存释放。
- 另外就是在考虑如何处理Non-Swap页面的时候，想到了如何让系统支持任意多的watchpoint。
不过超过本话题讨论范畴了。



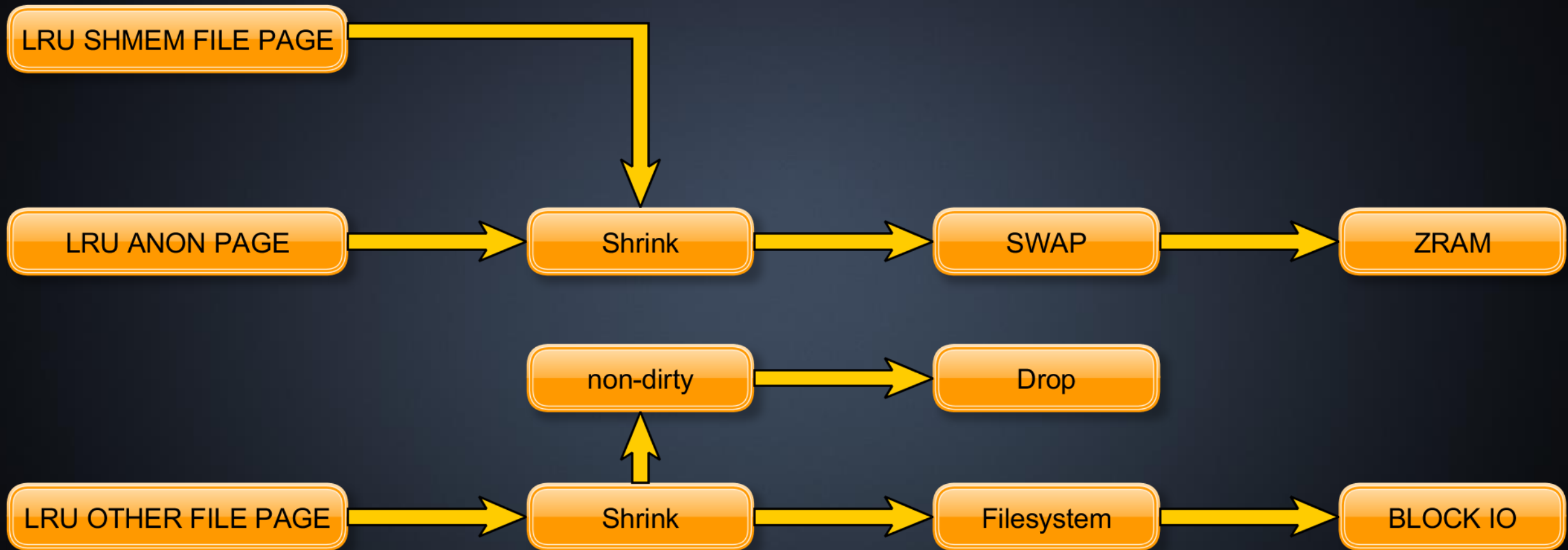
目录

- ZRAM和ZSMALLOC的简介
- ZRAM使用中3个问题以及Linux内核主线对他们的改进
- 我对ZRAM的1个提高
 - 对ZRAM提高的一些思路

内存Shrinker上

- 确定什么时候应该更多的去放页面到SWAP，什么时候更多的去处理filecache。
更动态的swappiness，
<https://lwn.net/Articles/690079/>自“CLK 2016 Optimizing the Linux Kernel Swap Subsystem by Ying Huang”。
- 更好的确定哪些进程页面应该被放到ZRAM里，哪些不应该，减小ZRAM对系统速度的影响。

ZRAM



在SWAP框架上

- “CLK 2016 Optimizing the Linux Kernel Swap Subsystem by Ying Huang”，有对SWAP框架的提高了介绍。
- 减小SWAP cache的对ZRAM效果的影响，我的PATCH Add interface let ZRAM close swap cache <https://lkml.org/lkml/2016/11/25/129>，效果还需要更多验证。

ZSMALLOC和CMA

- CMA在分配大量连续内存页的时候，因为其以MOVABLE页面为后端，这些页面未必在正常的LRU状态上，导致页面无法迁移。结果是对系统影响大速度慢且失败率高。
- CMA ZONE Upstream 从2015年开始仍然遥遥无期，另外移植到老版本内核可能比较麻烦，另外其是否能解决CMA现有问题？
- GCMA，以frontswap和cleancache增加cache作为后端。原有PATCH试图取代整个CMA框架，不可能Upstream。个人认为这部分作为CMA后端的选择在低内存场景可能比较浪费。
- ZSMALLOC现在已经可以迁移，也许可以让CMA其中某一块指定ZSMALLOC为其后端，ZSMALLOC使用CMA内存作为其首选内存。

谢谢！ 问题？

- weibo: @teawater_z 欢迎在线吐槽
- 小米电视招聘内核优化工程师，欢迎发简历到 zhuhui@xiaomi.com。

