

Záróvizsga tételsor

19. Adatbázisok optimalizálása és konkurencia kezelése

Ancsin Ádám

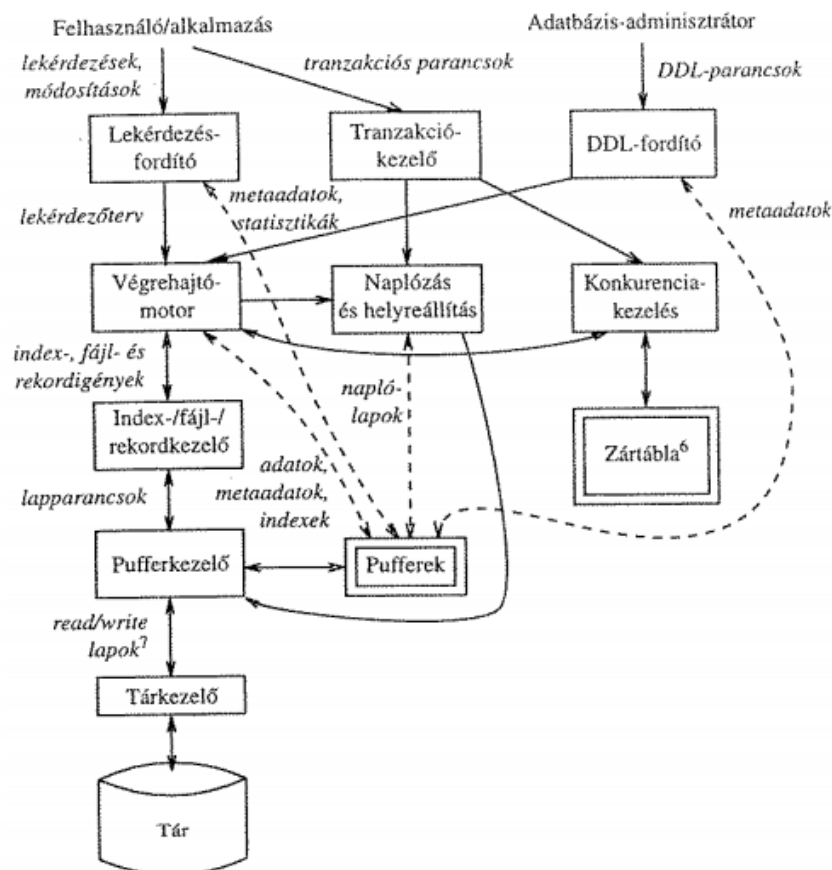
Adatbázisok optimalizálása és konkurencia kezelése

Az adatbázis-kezelő rendszerek feladata, részei. Indexstruktúrák, lekérdezések végrehajtása, optimalizálási stratégiák. Tranzakciók feldolgozása, naplózás és helyreállítás, konkurencia-kezelés.

1 Az adatbázis-kezelő rendszerek feladata, részei

Adatbázis-kezelő rendszer alatt olyan számítógépprogramot értünk, mely megvalósítja nagy tömegű adat biztonságos tárolását, gyors lekérdezhetőségét és módosíthatóságát, tipikusan egyszerre több felhasználó számára.

Az adatbázis-kezelési tevékenységeket két csoportra szokás osztani: adatmanipulációra (lekérdezés), illetve definiálásra (adatszerkezetek kialakítása, módosítása). Az adatok manipulációjára szolgáló nyelveket összefoglalóan Data Manipulation Language-nek (DML), míg a definíciós eszközökkel rendelkező nyelveket Data Definition Language-nek (DDL) szokás nevezni.



ábra 1: Az adatbázis-kezelő rendszer alkotórészei.

1.1 Az egyes alkotórészek rövid jellemzése

Lekérdezésfordító: A lekérdezésfordító elemzi és optimalizálja a lekérdezést, ami alapján elkészíti a lekérdezés-végrehajtási tervet (lekérdezéstervet).

Végrehajtómotor: A végrehajtómotor a lekérdezésfordítótól megkapja a lekérdezéstervet, majd kisebb adatdarabokra (tipikusan rekordokra, egy reláció soraira) vonatkozó kérések sorozatát adja át az erőforrás-kezelőnek.

Erőforrás-kezelő: Az erőforrás-kezelő ismeri a relációkat tartalmazó adatfájlokat, a fájlok rekordjainak formátumát, méretét, valamint az indexfájlokat. Az adatkéréseket az erőforrás-kezelő lefordítja lapokra, amit átad a pufferkezelőnek.

Pufferkezelő: Feladata, hogy a másodlagos adattárolóról (lemez, stb.) az adatok megfelelő részét olvassa be a központi memória puffereibe. A pufferkezelő információkat cserél a tárkezelővel, hogy megkapja az adatokat a lemezről.

Tárkezelő: Adatokat ír-olvas a másodlagos adattárolóról. Előfordulhat, hogy igénybe veszi az oprend-szer parancsait is, de sokszor közvetlenül a lemezkezelőhöz intézi a parancsait.

Tranzakciókezelő: A lekérdezéseket és más tevékenységeket tranzakciókba szervezzük. A tranzakciók olyan egységek, amelyeket atomosan és elkülöníthetően kell végrehajtani, valamint a végrehajtásnak tartósnak kell lennie, illetve a tranzakció végrehajtása nem állíthat elő érvénytelen adatbázis-állapotot (azaz konzisztens). Ezeket a követelményeket az ACID mozaikszóval szokás összefoglalni. A tranzakciókezelő hajtja végre a tranzakciókat és gondoskodik a naplózásról és helyreállításról, valamint a konkurenciakezelésről.

2 Indexstruktúrák

Az indexek keresést gyorsító segédstruktúrák. Több mezőre is lehet indexet készíteni. Nem csak a főfájlt, hanem az indexet is karban kell tartani, ami plusz költséget jelent. Ha a keresési mező egyik indexmezővel sem esik egybe akkor kupac szervezést jelent. Az indexrekordok szerkezete (a,p), ahol "a" egy érték az indexelt oszlopban, "p" egy blokkmutató, arra a blokkra mutat, amelyben az A=a értékű rekordot tároljuk. Az index mindig rendezett az indexértékek szerint.

2.1 Elsődleges index

Elsődleges index esetén a főfájl is rendezett (az indexmező szerint), így emiatt csak egy elsődleges indexet lehet megadni. Elég a főfájl minden blokkjának legkisebb rekordjához készíteni indexrekordot, így azok száma: $T(I) = B$ (ritka index). Indexrekordból sokkal több fér egy blokkba, mint a főfájl rekordjaiból: $bf(I) \gg bf$, azaz az indexfájl sokkal kisebb rendezett fájl, mint a főfájl: $B(I) = \frac{B}{bf(I)} \ll B = \frac{T}{bf}$.

Keresésnél, mivel az indexfájlban nem szerepel minden érték, ezért csak fedő értéket kereshetünk, a legnagyobb olyan indexértéket, amely a keresett értéknél kisebb vagy egyenlő. Fedő érték keresése az index rendezettsége miatt bináris kereséssel történik: $\log_2(B(I))$. A fedő indexrekordban szereplő blokkmutatónak megfelelő blokkot még be kell olvasni. Így a költség $1 + \log_2(B(I)) \ll \log_2(B)$ (rendezett eset). Módosításnál a rendezett fájlba kell beszúrni. Ha az első rekord változik a blokkban, akkor az indexfájlba is be kell szúrni, ami szintén rendezett. A megoldás az, hogy üres helyeket hagyunk a főfájl, és az indexfájl blokkjaiban is. Ezzel a tárméret duplázódhat, de a beszúrás legfeljebb egy főrekord, és egy indexrekord visszaírását jelenti.

2.2 Másodlagos index

Másodlagos index esetén a főfájl rendezetlen (az indexfájl mindig rendezett). Másodlagos indexből többet is meg lehet adni. A főfájl minden rekordjához kell készíteni indexrekordot, így az indexrekordok száma: $T(I) = T$ (sűrű index). Indexrekordból sokkal több fér egy blokkba, mint a főfájl rekordjaiból: $bf(I) \gg bf$, azaz az indexfájl sokkal kisebb fájl, mint a főfájl: $B(I) = \frac{T}{bf(I)} \ll B = \frac{T}{bf}$. Az indexben a keresés az index rendezettsége miatt bináris kereséssel történik: $\log_2(B(I))$. A talált indexrekordban

szereplő blokkmutatónak megfelelő blokkot még be kell olvasni. Így a költség $1 + \log_2(B(I)) < \log_2(B)$ (rendezett eset). Az elsődleges indexnél rosszabb a keresési idő, mert több az indexrekord. A főfájl kupac szervezésű. Rendezett fájlba kell beszúrni. Ha az első rekord változik a blokkban, akkor az indexfájlba is be kell szúrni, ami szintén rendezett. Megoldás: üres helyeket hagyunk a főfájl, és az indexfájl blokkjaiban is. Ezzel a tárméret duplázódhat, de a beszúrás legfeljebb egy főrekord és egy indexrekord visszaírását jelenti.

2.3 Bitmap index

A bitmap indexeket az oszlopok adott értékeihez szokták hozzárendelni, az alábbi módon:

- Ha az oszlopban az i . sor értéke megegyezik az adott értékkel, akkor a bitmap index i . tagja egy 1-es.
- Ha az oszlopban az i . sor értéke viszont nem egyezik meg az adott értékkel, akkor a bitmap index i . tagja egy 0.

Így egy lekérdezésnél csak megfelelően össze kell AND-elni, illetve OR-olni a bitmap indexeket, és az így kapott számsorozatban megkeresni, hol van 1-es. A bináris értékeket szokás szakaszhossz kódolással tömöríteni a hatékonyabb tárolás érdekében.

2.4 Többszintű indexek

Az indexfájl (1. indexszint) is fájl, ráadásul rendezett, így ezt is meg lehet indexelni, elsődleges indexszel. A főfájl lehet rendezett vagy rendezetlen (az indexfájl mindig rendezett). A t . szintű index: az indexszinteket is indexeljük, összesen t szintig. A t . szinten ($I(t)$) bináris kereséssel keressük meg a fedő indexrekordot. Követjük a mutatót, minden szinten, és végül a főfájlban: $\log_2(B(I(t))) + t$ blokkolvasás. Ha a legfelső szint 1 blokkból áll, akkor $t + 1$ blokkolvasást jelent. Minden szint blokkolási faktora megegyezik, mert egyforma hosszúak az indexrekordok.

A t . szinten 1 blokk: $1 = \frac{B}{bf(I)^t}$. Azaz $t = \log_{bf(I)}(B) < \log_2(B)$, tehát jobb a rendezett fájlsszervezésnél. A $\log_{bf(I)}(B) < \log_2(B(I))$ is teljesül általában, így az egyszintű indexeknél is gyorsabb.

2.5 B-fa index

Logikailag az index egy rendezett lista. Fizikailag a rendezett sorrendet táblába rendezett mutatók biztosítják. A fa struktúrájú indexek B-fákkal ábrázolhatóak. A B-fák megoldják a bináris fák ki-egyenlítőtlenségi problémáját, mivel "alulról" töltjük fel őket. A B-fa egy csomópontjához több kulcsérték tartozhat. A mutatók más csomópontokra mutatnak, és így az összes kulcsértékre az adott csomóponton.

Mivel a B-fák kiegyenlítettek (minden ág egyenlő hosszú, vagyis ugyanazon a szinten fejeződik be), kiküszöbölik a változó elérési időket, amik a bináris fákban megfigyelhetők. Bár a kulcsértékek és a hozzájuk kapcsolódó címek még mindig a fa minden szintjén megtalálhatók, és ennek eredménye: egyenlőtlen elérési utak, és egyenlőtlen elérési idő, valamint komplex fakesésési algoritmus az adatfájl logikailag soros olvasására. Ez kiküszöbölhető, ha nem engedjük meg az adatfájl címek tárolását levélszint felett. Ebből következően: minden elérés ugyanolyan hosszú utat vesz igénybe, aminek egyenlő elérési idő az eredménye, és egy logikailag soros olvasása az adatfájlnak a levélszint elérésével megoldható. Nincs szükség komplex fakesésési algoritmusra.

A B^+ -fa egy olyan B-fa, mely legalább 50%-ban telített. A szerkezeten kívül a telítettséget biztosító karbantartó algoritmusokat is beleértjük.

A B^* -fa egy olyan B-fa, mely legalább 66%-ban telített.

2.6 Hasító index

A rekordok edényekbe (bucket) particionálva helyezkednek el, melyekre a h hasítómezőn értelmezett függvény osztja szét őket. Hatékony egyenlőségi keresés, beszúrás, és törlés jellemzi, viszont nem támogatja az intervallumos keresést.

A rekordokat blokkláncokba soroljuk, és a blokklánc utolsó blokkjának első üres helyére tesszük a rekordokat a beérkezés sorrendjében. A blokkláncok száma lehet előre adott (statikus hasítás, ekkor a számot K -val jelöljük), vagy a tárolt adatok alapján változhat (dinamikus hasítás). A besorolás az indexmező értékei alapján történik. Egy $h(x) \in \{1, \dots, K\}$ hasító függvény értéke mondja meg, hogy melyik

kosárba tartozik a rekord, ha x volt az indexmező értéke a rekordban. A hasító függvény általában maradékos osztáson alapul (például $\text{mod}(K)$). Akkor jó egy hasító függvény, ha nagyjából egyforma hosszú blokkláncok keletkeznek, azaz egyenletesen sorolja be a rekordokat. Ekkor a blokklánc $\frac{B}{K}$ blokkból áll.

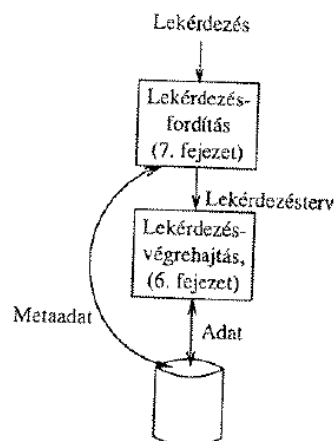
A keresés költsége:

- Ha az indexmező és keresési mező eltér, akkor kupac szervezést jelent.
- Ha az indexmező és keresési mező megegyezik, akkor csak elég a $h(a)$ sorszámú kosarat végignézni, amely $\frac{B}{K}$ blokkból álló kupacnak felel meg, azaz $\frac{B}{K}$ legrosszabb esetben. A keresés így K -szorosára gyorsul.

A tárméret B , ha minden blokk nagyjából tele van. Nagy K esetén azonban sok olyan blokklánc lehet, amely egy blokkból fog állni, és a blokkban is csak 1 rekord lesz. Ekkor a keresési idő: 1 blokkbeolvasás, de B helyett T számú blokkban tároljuk az adatokat. Módosításnál $\frac{B}{K}$ blokkból álló kupac szervezésű kosarat kell módosítani.

3 Lekérdezések végrehajtása, optimalizálása

A lekérdezésfeldolgozó egy relációs adatbázis-kezelő komponenseinek azon csoportja, amelyik a felhasználó lekérdezéseit, valamint adatmódosító utasításait lefordítja adatbázis-műveletekre, amiket végre is hajt.

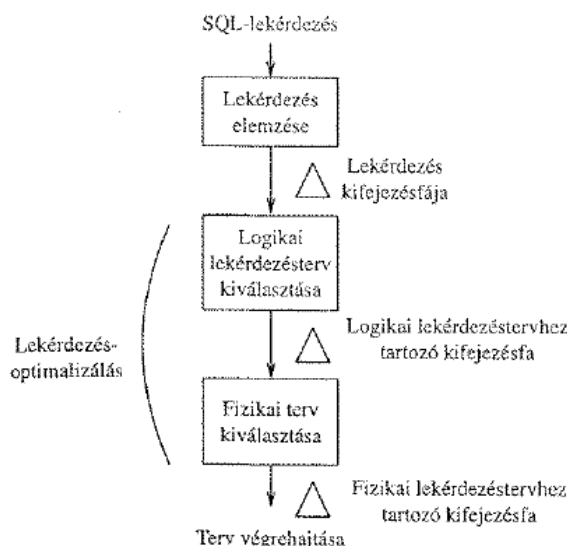


ábra 2: A lekérdezésfeldolgozás lépései.

A lekérzés végrehajtása tulajdonképpen az adatbázist manipuláló algoritmusok összessége, azonban a végrehajtás előtt szükség van a lekérdezések fordítására.

A lekérzés-fordítás lépései:

1. Elemzés: egy elemző fát építünk fel, amely a lekérzést és annak szerkezetét jellemzi
2. Lekérzésátírás: Az elemző fából egy kezdeti lekérzéstervet készítünk, amelyet átalakítunk egy ezzel ekvivalens tervvé, aminek végrehajtási ideje várhatóan kisebb lesz. Elkészül a logikai lekérzésterv, amely relációs algebrai kifejezéseket tartalmaz.
3. A logikai tervet átalakítjuk fizikai tervvé úgy, hogy a logikai terv operátoraihoz kiválasztunk egy algoritmust, valamint meghatározzuk az operátorok végrehajtási sorrendjét. A fizikai terv olyan részleteket is tartalmaz, hogy pl. kell-e rendezni, hogyan férünk hozzá az adatokhoz.



ábra 3: A lekérdezésfordítás lépései.

3.1 Algebrai optimalizálás

A relációs algebrai kifejezéseket minél gyorsabban akarjuk kiszámolni. A kiszámítás költsége arányos a relációs algebrai kifejezés részkifejezéseinek megfelelő relációk tárolási méreteinek összegével. A módszer az, hogy műveleti tulajdonságokon alapuló ekvivalens átalakításokat alkalmazunk, azért, hogy várhatóan kisebb méretű relációk keletkezzenek. Az eljárás heurisztikus, tehát nem az argumentum relációk valódi méretével számol. Az eredmény nem egyértelmű, ugyanis az átalakítások sorrendje nem determinisztikus, így más sorrendben végrehajtva az átalakításokat más végeredményt kaphatunk, de mindegyik általában jobb költségű, mint amiből kiindultunk.

Az optimalizáló algoritmus a következő heurisztikus elveken alapul:

- Minél hamarabb szelektáljunk, hogy a részkifejezések várhatóan kisebb relációk legyenek.
- A szorzás utáni kiválasztásokból próbáljunk természetes összekapcsolásokat képezni, mert az összekapcsolás hatékonyabban kiszámolható, mint a szorzatból történő kiválasztás.
- Vonjuk össze az egymás utáni unáris műveleteket (kiválasztásokat és vetítéseket), és ezekből lehetőleg egy kiválasztást, vagy vetítést, vagy kiválasztás utáni vetítést képezzünk. Így csökken a műveletek száma, és általában a kiválasztás kisebb relációt eredményez, mint a vetítés.
- Keressünk közös részkifejezéseket, amiket így elég csak egyszer kiszámolni a kifejezés kiértékelése során.

3.2 Relációs algebrai műveletek megvalósítása

3.2.1 Kiválasztás

A kiválasztás (σ) lehetséges megvalósításai:

- Lineáris keresés: Olvassunk be minden lapot és keressük az egyezéseket (egyenlőségvizsgálat esetén). Az átlagos költség a lapok száma, ha a mező nem kulcs, illetve a lapok számának fele, ha a mező kulcs.
- Bináris (logaritmikus) keresés: Csak rendezett mező esetén használható.
- Elsődleges index használata.
- Másodlagos index használata.

Összetett kiválasztás: Előfordulhat, hogy több feltétel van, amelyek és/vagy kapcsolatban vannak egymással. Megvalósítása:

- Konjunkciós kiválasztás esetén ($\sigma_{\theta_1 \wedge \dots \wedge \theta_n}$):
 - Válasszuk ki a legkisebb költségű σ_{θ_i} -t, és azt végezzük el (lásd fent), majd az eredményt szűrjük a többi feltételre. A költség az egyszerű kiválasztás költsége lesz a kiválasztott σ_{θ_i} -re.
 - Ha mindegyik θ_i mezőjére van indexünk, akkor keressük az indexekben és adjuk vissza a megfelelő sorok rowid-jeit. Végül vegyük ezek metszetét. A költség az indexekben való keresés összköltsége + a rekordok beolvasása.
- Diszjunkciós kiválasztás esetén ($\sigma_{\theta_1 \vee \dots \vee \theta_n}$):
 - Lineáris keresés.
 - Ha mindegyik θ_i mezőjére van indexünk, akkor keressük az indexekben és adjuk vissza a megfelelő sorok rowid-jeit. Végül vegyük ezek unióját. A költség az indexekben való keresés összköltsége + a rekordok beolvasása.

3.2.2 Vetítés és halmazműveletek

Vetítésnél és halmazműveleteknél a duplikátumokat ki kell szűrni.

Vetítés (π) megvalósítása:

1. Kezdeti átnézés: eldobjuk a felesleges mezőket.
2. Duplikátumok törlése: ehhez az eredményt rendezzük az összes mező szerint, így a duplikáltak szomszédosak lesznek. Ezeket kell eldobni.

A költség a kezdeti átnézés, a rendezés és a duplikátumok törlésének összköltsége lesz.

3.2.3 Összekapcsolások

Az összekapcsolásokat (join) többféle módon is el lehet végezni:

- **Beágyazott ciklusú összekapcsolás (nested loop join):** Bármekkora méretű relációra használható, nem szükséges, hogy az egyik reláció elférjen a memóriában. Két fajtája van, a sor és a blokk alapú.
 - **Sor alapú beágyazott ciklusú összekapcsolás:** Legyen R és S a két összekapcsolandó reláció, ezek közül jelölje S a kisebb méretűt, ez lesz a belső reláció, R pedig a külső. Az algoritmus a következő: menjünk végig R (a külső reláció) összes során és R minden egyes soránál menjünk végig a belső reláció, S összes során. Ha az aktuálisan vizsgált 2 sor összekapcsolható, akkor írjuk bele az eredménybe. Jó esetben S belefér a memóriába, ekkor csak egyszer kell beolvasni S-t, majd mindvégig a memóriában tarthatjuk. Ebben az esetben mindkét reláció lapjait egyszer kell beolvasni. Legrosszabb esetben mindkét relációból csak egy-egy lap fér bele a memóriába. Ekkor R minden egyes soránál végig kell olvasni S-t.
 - **Blokk alapú beágyazott ciklusú összekapcsolás:** Az előbbihez képest annyi a különbség, hogy nem soronként megyünk végig a relációkon. Legyen M a memóriába férő lapok száma. Ekkor minden egyes iterációban R-nek M-1 lapját olvassuk be, majd szervezzük ezeket valamilyen keresési struktúrába, ahol a kulcs az R és S közös attribútumai. Ezután menjünk végig laponként S-en, és S memóriában lévő soraiból keressük meg azokat, amelyek összekapcsolhatóak valamely R-ből beolvasott sorral, majd írjuk bele ezeket az eredményrelációba.
- **Összefésüléssel rendező összekapcsolás (merge join):** A relációk az összekapcsolási mezők szerint rendezettek. Egyesítjük a rendezett relációkat: mutatók az első rekordra mindkét relációban. Beolvasunk S-ből egy rekordcsoporthat, ahol az összekapcsolási attribútum értéke megegyezik. Beolvasunk rekordokat R-ből és feldolgozzuk. A rendezett relációkat csak egyszer kell végigolvasni, ezért az összekapcsolás költsége: rendezés költsége + 2 reláció lapjainak száma.
- **Hasítós összekapcsolás (hash join):** Az összekapcsolási attribútumot használjunk hasítókulcsként, ez alapján particionáljuk R és S sorait hasítással. Ha mindegyik táblából n kosarat szeretnénk, akkor az eredmény: $R_0, R_1, \dots, R_{n-1}, S_0, S_1, \dots, S_{n-1}$ kosarak. Ezután az egymáshoz rendelt kosárpárokat összekapcsoljuk blokk alapú beágyazott ciklusú összekapcsolással, hasítófüggvény alapú indexet használva.

Több tábla összekapcsolása: Az összekapcsolások kommutatívák és asszociatívák, ezért az eredmény szempontjából mindegy, hogy milyen sorrendben kapcsoljuk őket össze. A sorrend viszont befolyásolhatja a hatékonyságot, ugyanis rossz választás esetén a köztes eredmények nagy méretűek lesznek.

A legjobb összekapcsolási fa megtalálása n reláció egy halmazához:

- Hogy megtaláljuk a legjobb összekapcsolási fát n reláció egy S halmazához, vegyük az összes lehetséges tervet mely így néz ki: $S_1 \bowtie (S - S_1)$, ahol S_1 az S tetszőleges nem üres részhalmaza.
- Rekurzívan számítsuk ki S részhalmazainak összekapcsolásának költségeit, hogy meghatározzuk minden egyes terv költségét. Válasszuk a legolcsóbbat.
- Mikor bármely részhalmaz terve kiszámításra került, az újbóli kiszámítás helyett tároljuk el és használjuk újra amikor ismét szükség lesz rá.

4 Tranzakciókezelés

Konzisztens adatbázis: Az adatbázisokra különböző megszorítások adhatóak meg. Az adatbázis konzisztens állapotban van, ha kielégíti az összes ilyen megszorítást. Konzisztens adatbázis egy olyan adatbázis, amely konzisztens állapotban van.

A konzisztencia sérülhet a következő esetekben:

- Tranzakcióhiba: hibásan megírt, rosszul ütemezett, félbehagyott tranzakciók.
- Adatbázis-kezelési hiba: az adatbázis-kezelő valamelyik komponense nem, vagy rosszul hajtja végre a feladatát.
- Hardverhiba: elvész egy adat, vagy megváltozik az értéke.
- Adatmegosztásból származó hiba.

Tranzakció: Konzisztenciát tartó adatbázis-műveletek sorozata. Ezek után mindig feltesszük, hogy ha a T tranzakció indulásakor az adatbázis konzisztens állapotban van, akkor ha T egyedül fut le, az adatbázis konzisztens állapotban lesz a futás végén (közben kialakulhat inkonzisztens állapot).

Helyesség feltétele:

- Ha leáll egy vagy több tranzakció (abort, vagy hiba miatt), akkor is konzisztens adatbázist kapunk.
- Minden egyes tranzakció induláskor konzisztens adatbázist lát.

A tranzakcióktól a következő tulajdonságokat szoktuk elvárni (ACID):

- Atomosság (A, azaz Atomicity): a tranzakció "mindent vagy semmit" jellegű végrehajtása (vagy teljesen végrehajtjuk, vagy egyáltalán nem hajtjuk végre).
- Konzisztencia (C, azaz Consistency): az a feltétel, hogy a tranzakció megőrizze az adatbázis konzisztenciáját, azaz a tranzakció végrehajtása után is teljesüljenek az adatbázisban előírt konzisztenciamegszorítások.
- Elkülönítés (I, azaz Isolation): az a tény, hogy minden tranzakciónak látszólag úgy kell lefutnia, mintha ez alatt az idő alatt semmilyen másik tranzakciót sem hajtánánk végre.
- Tartósság (D, azaz Durability): az a feltétel, hogy ha egyszer egy tranzakció befejeződött, akkor már soha többé nem veszhet el a tranzakciónak az adatbázison kifejtett hatása.

A konzisztenciát mindig adottnak tekintjük. A másik három tulajdonságot viszont az adatbázis-kezelő rendszernek kell biztosítania, de ettől időnként eltekintünk. Feltesszük, hogy az adatbázis adategységekből, elemekből áll. Az adatbáziselem a fizikai adatbázisban tárolt adatok egyfajta funkcionális egysége, amelynek értékét tranzakciókkal lehet elérni (kiolvasni) vagy módosítani (kiírni). Adatbáziselem pl. a reláció, relációsor, lap.

4.1 A tranzakciók alaptevékenységei

A tranzakció és az adatbázis kölcsönhatásának 3 fontos helyszíne van:

- Az adatbázis elemeit tartalmazó lemezblokkok területe.
- A pufferkezelő által használt virtuális vagy valós memóriaterület.
- A tranzakció memóriaterülete.

Ahhoz, hogy a tranzakció egy adatbáziselemet beolvashasson, azt előbb memóriapuffer(ek)be kell hozni, ha még nincs ott. Ezt követően tudja a puffer(ek) tartalmát a tranzakció saját memóriaterületére beolvasni. Az adatbáziselem új értékének kiírás fordítva történik: előbb a tranzakció kialakítja az új értéket saját memóriaterületén, majd ez az érték másolódik át a megfelelő puffer(ek)be.

A pufferek tartalmának lemezre írásáról a pufferkezelő dönt. Vagy azonnal lemezre írja a változásokat, vagy nem.

A naplózási algoritmusoknál és más tranzakciókezelő algoritmusok tanulmányozása során különböző jelölésekre lesz szükség, melyekkel a különböző területek közötti adatmozgásokat írhatjuk le. A következő alpműveletek használjuk:

- $INPUT(X)$: Az X adatbáziselemet tartalmazó lemezblokk másolása a pufferbe.
- $READ(X,t)$: Az X adatbáziselem bemásolása a tranzakció t lokális változójába. Ha az X -et tartalmazó blokk még nincs a memóriában, akkor $INPUT(X)$ -et is beleértjük.
- $WRITE(X,t)$: A t lokális változó tartalmaz az X adatbáziselem memóriapufferbeli tartalmába másolódik. Ha az X -et tartalmazó blokk még nincs a pufferben, akkor előbb $INPUT(X)$ is végrehajtódik.
- $OUTPUT(X)$: Az X adatbáziselemet tartalmazó blokk kiírása lemezre.

A továbbiakban feltételezzük, hogy egy adatbáziselem nem nagyobb egy blokknál.

4.2 Naplózás és helyreállítás

Az adatokat meg kell védeni a rendszerhibáktól, ezért szükség van az adatok helyreállíthatóságára. Erre az elsődleges technika a naplózás, amely valamilyen biztonságos módszerrel rögzíti az adatbázisban végrehajtott módosítások történetét.

A napló (log) nem más, mint naplóbejegyzések (log records) sorozata, melyek arról tartalmazzak információt, hogy mit tett egy tranzakció. Rendszerhiba esetén a napló segítségével rekonstruálható, hogy mit tett a tranzakció a hiba fellépéséig.

4.2.1 Naplóbejegyzések

Úgy kell tekintenünk, hogy a napló, mint fájl kizárólag bővítésre van megnyitva. Tranzakció végrehajtásakor a naplókezelő a feladat, hogy minden fontos eseményt rögzítsen a naplóban.

Az összes naplózási módszer által használt naplóbejegyzések:

- $\langle START\ T \rangle$: Ez a bejegyzés jelzi a T tranzakció végrehajtásának kezdetét.
- $\langle COMMIT\ T \rangle$: A T tranzakció rendben befejeződött, már nem akar további módosításokat végrehajtani.
- $\langle ABORT\ T \rangle$: A T tranzakció abortált, nem tudott sikeresen befejeződni. Az általa tett változtatásokat nem kell a lemezre másolni, vagy ha a lemezre másolódtak, akkor vissza kell állítani.

4.2.2 Semmisségi (undo) naplózás

A semmisségi naplózás lényege, hogy ha nem biztos, hogy egy tranzakció műveletei rendben befejeződtek és minden változtatás lemezre íródott, akkor a tranzakció hatását vissza kell vonni, azaz az adatbázist olyan állapotba kell visszaállítani, mintha a tranzakció el se kezdődött volna.

A semmisségi naplózásnál szükség van még egy fajta naplóbejegyzésre, a módosítási bejegyzésre, amely egy $\langle T, X, v \rangle$ hármas, és azt jelenti, hogy a T tranzakció az X adatbáziselemet módosította, és a

módosítás előtti értéke X -nek v volt.

A semmisségi naplózás szabályai:

- Ha a T tranzakció módosítja az X adatbáziselemet, akkor a $\langle T, X, v \rangle$ naplóbejegyzést az előtt kell a lemezre írni, hogy az új értéket a lemezre írja a rendszer.
- Ha a tranzakció hibamentesen befejeződött, akkor a COMMIT bejegyzést csak azután szabad lemezre írni, hogy a tranzakció által végrehajtott összes módosítás lemezre íródott.

Helyreállítás a semmisségi naplózás használatával

Tegyük fel, hogy rendszerhiba történt. Ekkor előfordulhat, hogy egy tranzakció nem atomosan hajtott végre, azaz bizonyos módosításai már lemezre íródtak, de mások még nem. Ekkor az adatbázis inkonzisztens állapotba kerülhet. Ezért rendszerhiba esetén gondoskodni kell az adatbázis konzisztenciájának visszaállításáról. Semmisségi naplózás esetén ez a be nem fejeződött tranzakciók által végrehajtott módosítások semmissé tételét jelenti.

Visszaállítás ellenőrzőpont nélkül: A legegyszerűbb módszer. Ekkor a teljes naplót látjuk. Az első feladat a tranzakciók felosztása sikeresen befejezett és befejezetlen tranzakciókra. Egy T tranzakció sikeresen befejeződött, ha van a naplóban $\langle COMMIT\ T \rangle$ bejegyzés. Ekkor T önmagában nem hagyhatta inkonzisztens állapotban az adatbázist. Amennyiben találunk a naplóban $\langle START\ T \rangle$ bejegyzést, de $\langle COMMIT\ T \rangle$ bejegyzést nem, akkor feltételezhetjük, hogy T végrehajtott olyan módosítást az adatbázisban, amely még nem íródott ki lemezre. Ekkor T nem komplett tranzakció, hatását semmissé kell tenni.

Az algoritmus a következő: A helyreállítás-kezelő elkezd vizsgálni a naplóbejegyzéseket az utolsótól kezdve, visszafelé haladva, közben feljegyzi azokat a T tranzakciókat, melyre $\langle COMMIT\ T \rangle$ vagy $\langle ABORT\ T \rangle$ bejegyzést talált. Visszafelé haladva, amikor $\langle T, X, v \rangle$ naplóbejegyzést lát:

1. Ha T -re találkozott már COMMIT bejegyzéssel, akkor nem tesz semmit.
2. Más esetben T nem teljes vagy abortált. Ekkor a helyreállítás-kezelő az X adatbáziselem értékét v -re változtatja.

A fenti változtatások végrehajtás után minden nem teljes T tranzakcióra $\langle ABORT\ T \rangle$ -t ír a napló végére és kiváltja a napló lemezre írását. Ezt követően az adatbázis normál használata folytatódhat.

4.2.3 Ellenőrzőpont-képzés

A helyreállítás elvben a teljes napló átvizsgálását igényelné. Ha undo naplózást használunk, akkor ha egy T tranzakcióra van COMMIT bejegyzés a naplóban, akkor a T tranzakcióra vonatkozó bejegyzések nem szükségesek a helyreállításához, viszont nem feltétlenül igaz az, hogy törölhetjük a T tranzakcióra vonatkozó COMMIT előtti bejegyzéseket. A legegyszerűbb megoldás időnként ellenőrzőpontokat készíteni.

Az egyszerű ellenőrzőpont képzése

1. Új tranzakció indítására vonatkozó kérések leállítása.
2. A még aktív tranzakciók befejeződésének és a COMMIT/ABORT bejegyzés naplóba írásának kivárása.
3. A napló lemezre írása.
4. A $\langle CKPT \rangle$ naplóbejegyzés képzése, naplóba írása, majd a napló lemezre írása.
5. Tranzakcióindítási kérések kiszolgálásának újraindítása.

Az ellenőrzőpont előtt végrehajtott tranzakciók befejeződtek, módosításaik lemezre kerültek. Ezért elég az utolsó ellenőrzőpont utáni részét elemezni a naplónak helyreállításánál.

Ellőrzőpont létrehozása a rendszer működése közben

Az egyszerű ellenőrzőpont-képzéssel az a probléma, hogy nem engedi új tranzakciók elindítását, amíg az aktív tranzakciók be nem fejeződnek. Ez viszont még sok időt igénybe vehet, a felhasználó számára pedig leállítottnak tűnik a rendszer, hiszen nem tud új tranzakciót indítani. Ezt nem engedhetjük meg. Egy bonyolultabb módszer azonban lehetővé teszi ellenőrzőpont képzését anélkül, hogy az új tranzakciók indítását fel kellene függeszteni.

E módszer lépései:

1. $\langle START CKPT(T_1, T_2, \dots, T_k) \rangle$ bejegyzés készítése és a napló lemezre írása. T_1, \dots, T_k az éppen aktív, befejezetlen tranzakciók.
2. Meg kell várni a T_1, \dots, T_k tranzakciók befejeződését. Eközben indíthatóak új tranzakciók.
3. Ha az ellenőrzőpont-képzés kezdetén még aktív T_1, \dots, T_k tranzakciók mindegyike befejeződött, akkor $\langle END CKPT \rangle$ naplóbejegyzés készítése és lemezre írása.

Helyreállítás: Visszafelé elemezve megtaláljuk a be nem fejezett tranzakciókat, az ezen tranzakciók által módosított adatbáziselemek tartalmát a régi értékre állítjuk vissza. Két eset fordulhat elő, vagy $\langle END CKPT \rangle$, vagy $\langle START CKPT(T_1, T_2, \dots, T_k) \rangle$ naplóbejegyzéssel találkozunk előbb.

- Ha előbb $\langle END CKPT \rangle$ bejegyzéssel találkozunk, akkor az összes be nem fejezett tranzakcióra vonatkozó bejegyzés megtalálható a legközelebbi $\langle START CKPT(T_1, T_2, \dots, T_k) \rangle$ bejegyzésig. Az ennél korábbiakkal nem kell foglalkoznunk.
- Ha $\langle START CKPT(T_1, T_2, \dots, T_k) \rangle$ bejegyzéssel találkozunk előbb, akkor a hiba ellenőrzőpont-képzés közben történt. Ekkor a T_1, \dots, T_k tranzakciók közül a legkorábban elindítottak a START bejegyzésig kell visszamenni, ami viszont biztosan az ezt megelőző START CKPT bejegyzés után található.

Általános szabályként, ha END CKPT-ot írunk a lemezre, akkor az azt megelőző START CKPT bejegyzést megelőző bejegyzésekre nincs szükség a helyreállítás szempontjából.

4.2.4 Helyrehozó (redo) naplózás

Redo vs. undo naplózás:

- A helyrehozó naplózás a semmisségi naplózással szemben helyreállításnál figyelmen kívül hagyja a befejezetlen tranzakciókat és befejezi a normálisan befejezettek által végrehajtott változtatásokat.
- Undo naplózás esetén a COMMIT naplóba írása előtt megköveteljük a módosítások lemezre írását. Ezzel szemben redo naplózás esetén csak akkor írjuk lemezre a tranzakció által végrehajtott módosításokat, ha a COMMIT bejegyzés a naplóba íródott és lemezre került.
- Undo naplózásnál a módosított elemek régi értékére van szükség helyreállításnál, redo-nál pedig az újra.

Helyrehozó naplózás szabályai: Itt a $\langle T, X, v \rangle$ bejegyzés jelentse azt, hogy a T tranzakció az X adatbáziselemet értékét v-re változtatta. Annak sorrendjét, hogy az adat- és naplóbejegyzések hogyan kell, hogy lemezre kerüljenek, az alábbi, ún. "írdj korábban" naplózási szabály határozza meg: Mielőtt az adatbázis bármely X elemét a lemezen módosítanánk, szükséges, hogy a $\langle T, X, v \rangle$ és $\langle COMMIT T \rangle$ naplóbejegyzések lemezre kerüljenek.

Helyreállítás helyrehozó naplózás használatával:

Ha egy T tranzakció esetén nincs $\langle COMMIT T \rangle$ bejegyzés a naplóban, akkor tudjuk, hogy T módosításai nem kerültek lemezre, így ezekkel nem kell foglalkozni. Ha viszont T befejeződött, azaz van $\langle COMMIT T \rangle$ bejegyzés, akkor vagy lemezre kerültek a módosításai, vagy nem. Ezért meg kell ismételni T módosításait. Szerencsére a naplóbejegyzések az új értékeket tartalmazzák.

Katasztrófa esetén a helyreállítás lépései:

1. Meghatározni azon tranzakciókat, amelyre van COMMIT bejegyzés a naplóban.

2. Elemezni a naplót az elejétől kezdve. Ha $\langle T, X, v \rangle$ bejegyzést találunk, akkor ha T befejezett tranzakció, akkor v értékét kell X-be írni. Ha T befejezetlen, nem teszünk semmit.
3. Ha végigértünk a naplón, akkor minden be nem fejezett T tranzakcióra $\langle ABORT T \rangle$ naplóbejegyzést írunk a naplóba és a naplót lemezre írjuk.

Helyrehozó naplózás ellenőrzőpont-képzéssel

Helyrehozó naplózásnál a működés közbeni ellenőrzőpont-képzés a következő lépésekből áll:

1. $\langle START CKPT(T_1, T_2, \dots, T_k) \rangle$ naplóbejegyzés készítése és lemezre írása, ahol T_1, \dots, T_k az aktív tranzakciók.
2. Az összes olyan adatbáziselem kiírása lemezre, amelyeket olyan tranzakciók írtak pufferbe, amelyek $\langle START CKPT(T_1, T_2, \dots, T_k) \rangle$ előtt befejeződtek (COMMIT), de puffereik még nem kerültek lemezre.
3. $\langle END CKPT \rangle$ naplóbejegyzés készítése és lemezre írása.

Visszaállítás ellenőrzőponttal kiegészített redo naplózásnál: Két eset fordulhat elő: az utolsó ellenőrzőponttal kapcsolatos naplóbejegyzés vagy START CKPT, vagy END CKPT.

- Tegyük fel, hogy az utolsó ellenőrzőpont-bejegyzés a naplóban END CKPT. Ekkor a $\langle START CKPT(T_1, T_2, \dots, T_k) \rangle$ előtt befejeződött tranzakciók módosításai már biztosan lemezre kerültek, ezekkel nem kell foglalkoznunk, viszont a T_i -kel és a START CKPT bejegyzés után indított tranzakciókkal foglalkoznunk kell. Ekkor olyan visszaállítás kell tennünk, mint a sima helyrehozó naplózásnál, annyi különbséggel, hogy csak a T_i -ket és a START CKPT után indított tranzakciókat kell figyelembe venni. A keresésnél a legkorábbi $\langle START T_i \rangle$ bejegyzésig kell visszamenni, ahol T_i a T_1, \dots, T_k valamelyike.
- Tegyük fel, hogy az utolsó ellenőrzőpont-bejegyzés a naplóban $\langle START CKPT(T_1, T_2, \dots, T_k) \rangle$. Nem lehetünk biztosak benne, hogy az ez előtt befejeződött tranzakciók módosításai lemezre íródtak, ezért az ezt megelőző END CKPT előtti $\langle START CKPT(S_1, S_2, \dots, T_m) \rangle$ kell visszamenni. Vissza kell állítani azoknak a tranzakcióknak a módosításait, amik S_i -k közül valók, vagy $\langle START CKPT(S_1, S_2, \dots, T_m) \rangle$ után indultak és befejeződtek.

4.2.5 Semmisségi/helyrehozó (undo/redo) naplózás

Undo/redo naplózásnál a módosítást jelző naplóbejegyzések $\langle T, X, v, w \rangle$ alakúak, ami azt jelenti, hogy a T tranzakció az X adatbáziselem értékét v-ről w-re változtatta.

Undo/redo naplózás esetén a következő előírást kell betartani: Mielőtt az adatbázis bármely X elemének értékét módosítanánk a lemezen, a $\langle T, X, v, w \rangle$ naplóbejegyzésnek a lemezre kell kerülnie.

Speciálisan a $\langle COMMIT T \rangle$ bejegyzés megelőzheti és követheti is a módosítások lemezre írását.

Helyreállítás undo/redo naplózásnál

Az alapelvek:

1. A legkorábbtól kezdve állítsuk helyre minden befejezett tranzakció hatását.
2. A legutolsótól kezdve tegyük semmissé a be nem fejezett tranzakciók hatását.

Undo/redo naplózás ellenőrzőpont-képzéssel:

1. Írjunk a naplóba $\langle START CKPT(T_1, T_2, \dots, T_k) \rangle$ bejegyzést, ahol T_1, \dots, T_k az aktív tranzakciók, majd írjuk lemezre a naplót.
2. Írjuk lemezre azokat a puffereket, amelyek módosított adatbáziselemeket tartalmaznak (piszkos pufferek). Redo naplózással ellentétben itt minden piszkos puffert lemezre írunk, nem csak a befejezettekét.
3. Írjunk $\langle END CKPT \rangle$ naplóbejegyzést a naplóba és írjuk ki lemezre.

4.3 Konkurenciakezelés

A tranzakciók közötti egymásra hatás az adatbázis inkonzisztenssé válását okozhatja, még akkor is, amikor a tranzakciók külön-külön megőrzik a konzisztenciát és rendszerhiba sem történt. Ezért valamiképpen szabályoznunk kell, hogy a különböző tranzakciók egyes lépései milyen sorrendben következzenek egymás után. Ezt az ütemező végzi, magát a folyamatot pedig konkurenciavezérlésnek hívjuk.

Az alapfeltevésünk (helyességi elv), hogy ha minden egyes tranzakciót külön hajtunk végre, akkor azok megőrzik a konzisztens adatbázis-állapotot. A gyakorlatban viszont a tranzakciók általában konkurensen futnak, ezért a helyességi elv nem alkalmazható közvetlenül. Így olyan ütemezéseket kell tekintenünk, amelyek biztosítják, hogy ugyanazt az eredményt állítják elő, mintha a tranzakciókat egymás után, egyesével hajtottuk volna végre.

4.3.1 Ütemezések

Ütemezés: Az ütemezés egy vagy több tranzakció által végrehajtott lényeges műveletek időrendben vett sorozata. Az ütemezéseknél csak az írási és olvasási műveletekkel foglalkozunk.

Soros ütemezés: Egy ütemezés soros, ha bármely T és T' tranzakcióra, ha T -nek van olyan művelete, amely megelőzi T' valamely műveletét, akkor T minden művelete megelőzi T' minden műveletét. A soros ütemezést a tranzakciók felsorolásával adjuk meg, pl. (T_1, T_2) .

Sorbarendezhetőség: Egy ütemezés sorba rendezhető, ha ugyanolyan hatással van az adatbázis állapotára, mint valamelyik soros ütemezés, függetlenül az adatbázis kezdeti állapotától.

Jelölések:

- $w_i(x)$ azt jelenti, hogy a T_i tranzakció írja az x adatbáziselemet.
- $r_i(x)$ azt jelenti, hogy a T_i tranzakció olvassa az x adatbáziselemet.

Konfliktus: Konfliktus akkor van, ha van olyan egymást követő műveletpár az ütemezésben, amelynek ha a sorrendjét felcseréljük, akkor legalább az egyik tranzakció viselkedése megváltozik. Tegyük fel, hogy T_i és T_j különböző tranzakciók. Ekkor nincs konfliktus, ha a pár:

- $r_i(X)$ és $r_j(Y)$, még akkor sem, ha $X = Y$. Azaz 2 különböző tranzakció által végrehajtott olvasási művelet sosem áll konfliktusban egymással, még akkor sem, ha ugyanarra az adatbázis-elemre vonatkoznak.
- $r_i(X)$ és $w_j(Y)$, ha $X \neq Y$
- $w_i(X)$ és $r_j(Y)$, ha $X \neq Y$
- $w_i(X)$ és $w_j(Y)$, ha $X \neq Y$

Konfliktus van, ha:

- Ugyanannak a tranzakciónak bármely két művelete konfliktusban van, hiszen ezek nem cserélhetőek fel.
- Ugyanazt az adatbáziselemet két különböző tranzakció éri el, és ezek közül legalább az egyik írási művelet.

Tehát különböző tranzakciók műveletei nincsenek konfliktusban egymással, azaz felcserélhetőek, ha csak nem

1. ugyanarra az adatbáziselemre vonatkoznak, és
2. legalább az egyik művelet írás

Konfliktusekvivalens ütemezések: Két ütemezés konfliktusekvivalens, ha szomszédos műveletek nem konfliktusos cseréjével egymásba vihetők.

Konfliktus-sorbarendezhető ütemezések: Egy ütemezés konfliktus-sorbarendezhető, ha konfliktusekvivalens valamely soros ütemezéssel. A konfliktus-sorbarendezhetőség elégséges, de nem szükséges

feltétele a sorbarendezhetőségnek. Piaci rendszerekben a konfliktus-sorbarendezhetőséget ellenőrzik.

Megelőzési gráf: Adott a T_1 és T_2 tranzakcióknak, esetleg további tranzakcióknak is, egy S ütemezése. T_1 megelőzi T_2 -t S -ben, ha van a T_1 -ben olyan A_1 művelet és T_2 -ben olyan A_2 művelet, melyekre:

1. A_1 megelőzi A_2 -t S -ben,
2. A_1 és A_2 ugyanarra az adatbáziselemre vonatkoznak, és
3. legalább az egyik írási művelet

Ezek pont azok a feltételek, amikor A_1 és A_2 konfliktusban vannak, nem cserélhetőek fel. Ezeket a megelőzéseket megelőzési gráffal szemléltethetjük. A megelőzési gráf csomópontjai S -beli tranzakciók. Ha a tranzakciókat T_i -vel jelöljük, legyen i a T_i -hez tartozó csomópont a gráfban. Az i csomópontból j csomópontba megy irányított él, ha T_i megelőzi T_j -t.

Megelőzési gráf és a konfliktus-sorbarendezhetőség kapcsolata: Egy S ütemezés konfliktus-sorbarendezhető akkor és csak akkor, ha megelőzési gráfja körmentes. Ekkor a megelőzési gráf csúcsainak bármely topologikus rendezése megad egy konfliktus-ekvivalens soros ütemezést.

4.3.2 Zárak

Zárak használatával is elérhető a konfliktus-sorbarendezhetőség. Ha az ütemező zárat használ, akkor a tranzakcióknak záratot kell kérniük és feloldaniuk az adatbáziselemek olvasásán és írásán felül. A zárok használatának két értelemben is helyesnek kell lennie:

- Tranzakciók konzisztenciája: A műveletek és a zárok az alábbi elvárások szerint kapcsolódnak egymáshoz:
 1. A tranzakció csak akkor olvashat vagy írhat egy elemet, ha már korábban zárolta azt, és még nem oldotta fel a zárat.
 2. Ha egy tranzakció zárol egy elemet, akkor azt később fel kell szabadítania.
- Az ütemezések jogszerűsége: A zárok értelme feleljen meg a szándék szerinti elvárásnak: nem zárolhatja két tranzakció ugyanazt az elemet, csak úgy, ha az egyik előbb már feloldotta a zárat.

Jelölések:

- $l_i(x)$: A T_i tranzakció zárat kér az x adatbáziselemre.
- $u_i(x)$: A T_i tranzakció az x adatbáziselem zárolását feloldja.

Zárolási ütemező: A zárolási ütemező feladata, hogy akkor és csak akkor engedélyezze a kéréseket, ha az jogszerű ütemezést eredményez. Ebben segít a zártábla, amely minden adatbáziselemhez megadja azt a tranzakciót, feltéve, hogy van ilyen, amelyik éppen zárolja az adott elemet.

Kétfázisú zárolás: Kétfázisú zárolásról (2FZ) beszélünk, ha minden tranzakcióban minden zárolási művelet megelőz minden feloldási műveletet. Azok a tranzakciók, amelyek eleget tesznek 2FZ-nek, 2FZ tranzakcióknak nevezzük. Konzisztens, 2FZ tranzakciók jogszerű ütemezése konfliktus-sorbarendezhető.

Holtpont: Holtpontról beszélünk, ha az ütemező arra kényszerít egy tranzakciót, hogy örökké várjon egy olyan zárra, amelyet egy másik tranzakció tart zárolva. Tipikus példa holtpont kialakulására, ha 2 tranzakció egymás által zárolt elemeket akar zárolni. A kétfázisú zárolás nem tudja megakadályozni holtpontok kialakulását.

		Kért	zár
		S	X
Érvényes zár	S	Igen	Nem
ebben a módban	X	Nem	Nem

ábra 4: Példa holtpontra.

Különböző zármódú zárolási rendszerek

Osztott és kizárólagos zárok: Tetszőleges adatbáziselemet vagy egyszer lehet zárolni kizárólagosan (írásra), vagy többször osztottan (olvasásra). Kizárólagosan zárolt elemet nem lehet osztottan zárolni, illetve osztottan zárolt elemet nem lehet kizárólagosan zárolni. Ha X-et írni akarjuk, akkor X-re kizárólagos zárral kell rendelkezniünk, ha olvasni, akkor elég az osztott is, de kizárólagos zárral is tudjuk olvasni.

Kompatibilitási mátrix: A kompatibilitási mátrix minden egyes zármódhoz rendelkezik egy sorral és egy oszloppal. A sorok egy másik tranzakció által az X elemre már érvényes zároknak felelnek meg, az oszlopok pedig az X-re kért zármódoknak felelnek meg. A használat szabálya: C módú zárat akkor és csak akkor engedélyezhetünk, ha táblázat minden olyan R sorára, amelyre más tranzakció már zárolta X-et R módban, a C oszlopban "Igen" szerepel.

		Kért zár	
		S	X
Érvényes zár	S	Igen	Nem
ebben a módban	X	Nem	Nem

ábra 5: Osztott és kizárólagos zárok kompatibilitási mátrixa.