

ORGANIZZAZIONE FISICA DEI DATI

Un requisito fondamentale di un sistema di gestione di basi di dati è l'efficienza, cioè la capacità di rispondere alle richieste dell'utente il più rapidamente possibile. Poiché una particolare organizzazione fisica dei dati può rendere efficiente la elaborazione di particolari richieste, l'amministratore della base di dati durante il progetto fisico della base di dati deve tener presente quali operazioni saranno effettuate più frequentemente.

Generalmente ad ogni oggetto base di un modello logico (schemi di relazione nel modello relazionale, segmenti nel modello gerarchico, tipi di record nel modello a rete) corrisponde un file di record che hanno tutti lo stesso formato, cioè gli stessi campi (che corrispondono agli attributi nel caso del modello relazionale e ai campi di segmenti e di tipi di record negli altri due modelli).

I file sono memorizzati su disco; un disco è partizionato in blocchi di formato fisso (compreso tra 2^9 e 2^{12} byte); un blocco corrisponde generalmente ad un settore di una traccia; la divisione in blocchi avviene al momento della formattazione. Il costo di un accesso a disco, cioè del trasferimento di un blocco da o a memoria secondaria è molto superiore a quello di elaborazione di un blocco in memoria principale. Pertanto la valutazione del tempo di risposta del sistema ad una richiesta dell'utente viene effettuata in termini di numero di accessi a disco.

In realtà non sempre quando si deve elaborare un blocco è necessario effettuare un accesso a disco, in quanto il sistema quando trasferisce un blocco in memoria principale lo memorizza in un buffer e mantiene i blocchi trasferiti fin quando è possibile ricordando quali blocchi sono nei buffer. Inoltre il costo di un accesso a disco non è fisso, ma dipende dalla posizione del blocco rispetto all'ultimo blocco trasferito in quanto da ciò dipendono sia lo spostamento della testina da un cilindro all'altro sia la rotazione del disco. Tuttavia per valutare i costi delle operazioni elementari su file con determinata organizzazione fisica assumeremo che ogni lettura e scrittura di un blocco richieda il trasferimento del blocco da o a memoria secondaria e che ogni accesso a memoria secondaria abbia costo costante.

• Record

Come abbiamo detto i record fisici contengono campi che corrispondono ad attributi di relazioni o a campi di record logici; tali campi sono di tipo elementare: interi, reali, stringhe di caratteri. Oltre a questi campi, però, un record fisico può contenere campi che forniscono informazioni sul record stesso o che "puntano" ad altri record.

Un *puntatore* ad un record è essenzialmente un dato che permette di accedere rapidamente a quel record. Pertanto un puntatore può essere l'indirizzo dell'inizio (primo byte) del record su disco. Tale scelta però può non essere adeguata se si vuole avere una certa libertà di muovere il record; in questo caso è preferibile assumere come puntatore una coppia (b,k) in cui b è l'indirizzo del blocco che contiene il record e k è il valore di uno o più campi che servono come chiave nel file a cui il record appartiene. In tal modo è possibile spostare il record all'interno del blocco.

All'inizio di un record ci possono essere campi che non contengono dati ma informazioni sul record. Ad esempio:

- alcuni byte possono essere utilizzati per specificare il tipo del record (è necessario quando in uno stesso blocco sono memorizzati record di tipo diverso)
- uno o più byte possono essere utilizzati per specificare la lunghezza del record se il record ha campi a lunghezza variabile
- un byte può contenere un bit di “cancellazione” (serve nel caso che il record sia puntato; in tal caso infatti lo spazio occupato dal record cancellato non può essere riutilizzato) o un bit di “usato/non usato” per specificare se in quello spazio c’è un record oppure è vuoto (contiene valori casuali).

Per poter accedere ad un campo di un record contenente un dato è necessario sapere qual è il primo byte del campo nel record. Se tutti i campi del record hanno lunghezza fissa, basta ordinarli; infatti, una volta ordinati, l’inizio di ciascun campo sarà sempre ad un numero fisso di byte dall’inizio del record: il numero di byte del record che precedono il campo è detto *offset* del campo. Se il record contiene campi a lunghezza variabile allora l’offset di un campo può variare da un record all’altro. In tal caso si possono usare due strategie:

- all’inizio di ogni campo c’è un contatore che specifica la lunghezza del campo in numero di byte
- all’inizio del record ci sono dei puntatori (qui un puntatore è inteso come l’offset del campo) all’inizio di ciascun campo a lunghezza variabile (tutti i campi a lunghezza fissa precedono quelli a lunghezza variabile).

Nel primo caso per individuare la posizione di un campo bisogna esaminare i campi precedenti per vedere quanto sono lunghi; quindi la prima strategia è meno efficiente della seconda.

2. Blocchi

Analogamente a quanto accade per un record, anche in un blocco può essere riservato spazio per memorizzare informazioni sul blocco stesso (record cancellati, record non usati, puntatori a record se il blocco contiene record a lunghezza variabile), dello spazio “spreco” (per far in modo che gli offset di campi interi siano multipli di 4) o per collegarlo ad altri blocchi in una lista.

Se un blocco contiene solo record di lunghezza fissa allora il blocco può essere suddiviso in aree (sottoblocchi) di lunghezza fissa ciascuna delle quali può contenere un record. Se devo inserire un record nel blocco devo cercare un area non usata; se il bit “usato/non usato” è in ciascun record ciò può richiedere la scansione di tutto il blocco; per evitare ciò si possono raccogliere tutti i bit “usato/non usato” in uno o più byte all’inizio del blocco.

Se un blocco contiene record di lunghezza variabile per accedere ai record si possono usare due strategie:

- si suppone che il primo record abbia inizio dal primo byte del blocco; si pone in ogni record un campo che ne specifica la lunghezza in termini di numero di byte. Per calcolare il byte di inizio di un record si somma all’offset del record precedente la sua lunghezza (ed eventualmente si prende il successivo multiplo di 4)

- si pone all'inizio del blocco una directory contenente i puntatori ai record nel blocco (in questo caso un puntatore è l'offset del record nel blocco). Poiché il numero di record che possono entrare in un blocco è in questo caso variabile, la directory può essere realizzata in uno dei modi seguenti:
 - la directory è preceduta da un campo che specifica quanti sono i puntatori nella directory
 - la directory ha dimensione fissa (può contenere un numero fisso di puntatori) e contiene il valore 0 (che non può essere un offset) negli spazi che non contengono puntatori (se il numero di records nel blocco è inferiore al numero di puntatori che possono essere memorizzati nella directory)
 - la directory è una lista di puntatori (la fine della lista è specificata da uno 0).

L'uso di una directory all'inizio del blocco permette di spostare i record "puntati"; infatti, basta far in modo che il puntatore invece di puntare al record punti al campo della directory che contiene l'offset. Inoltre permette di spostare i bit di cancellazione dai record alla directory e quindi di riutilizzare lo spazio occupato da un record a lunghezza variabile quando questo viene cancellato.

3. File

In questo paragrafo esamineremo diversi tipi di organizzazione fisica di file che consentono la ricerca di record in base al valore di uno o più campi chiave. Il termine "chiave" non va inteso nel senso in cui viene usato nella teoria relazionale, in quanto un valore della chiave non necessariamente identifica univocamente un record nel file.

Le operazioni elementari su questi tipi di file sono dunque:

- la **ricerca** di uno o più record con un dato valore per la chiave;
- l'**inserimento** di un record con un dato valore per la chiave;
- la **cancellazione** di uno o più record con un dato valore per la chiave;
- la **modifica** di uno o più record con un dato valore per la chiave.

3.1 Heap

In questo tipo di organizzazione i record sono memorizzati nei blocchi senza alcun ordine: un record viene sempre inserito come ultimo record del file. L'accesso al file avviene attraverso una directory che contiene i puntatori ai blocchi; se le dimensioni lo consentono, tale directory può essere mantenuta in memoria principale durante l'utilizzo del file; altrimenti saranno necessari ulteriori accessi per portare in memoria principale i necessari blocchi della directory.

Denotiamo con b il numero di blocchi del file ed esprimiamo in termini di b il costo delle varie operazioni, nella ipotesi che la directory si trovi in memoria principale.

Se la chiave di ricerca non identifica univocamente un record nel file, poiché non esiste alcun particolare ordinamento dei record, per effettuare una ricerca occorre scandire tutto il file sequenzialmente e, quindi, il costo di una ricerca è dato da b . L'inserimento di un record richiede la lettura dell'ultimo blocco del file; se in tale blocco c'è spazio sufficiente per memorizzare il nuovo

record, il record viene inserito, altrimenti viene chiesto un nuovo blocco al file system; dopo l'inserimento del record nel blocco, il blocco deve essere scritto su memoria secondaria. Quindi 2 accessi (uno per lettura e uno per scrittura) sono sufficienti per l'inserimento di un record. La cancellazione di tutti i record con un dato valore per la chiave richiede b accessi in lettura per la ricerca di tutti i record che hanno quel valore per la chiave e c accessi in scrittura, dove c è il numero di blocchi contenenti record con quel valore per la chiave; ulteriori accessi possono essere necessari se si vuole recuperare lo spazio occupato dai record cancellati trasferendovi record che si trovano nell'ultimo blocco. La modifica di tutti i record con un dato valore per la chiave richiede b accessi in lettura per la ricerca di tutti i record che hanno quel valore per la chiave e c accessi in scrittura, dove c è il numero di blocchi contenenti record con quel valore per la chiave.

Se la chiave di ricerca identifica univocamente un record nel file, la ricerca di un record con un dato valore per la chiave richiede in media $b/2$ accessi. Infatti, per la ricerca di un record che si trova nell' i -esimo blocco sono necessari i accessi (in lettura); pertanto se denotiamo con n il numero di record nel file e con B il numero di record che possono essere memorizzati in un blocco ($n/B = b$), il numero medio di accessi necessari per la ricerca di un record è data da

$$B(1+2+\dots+b)/n = Bb(b+1)/2n \approx b/2$$

(si osservi che $b/2 - b/2 \leq (b+1)/2$).

L'inserimento di un record richiede la lettura dell'ultimo blocco del file; se in tale blocco c'è spazio sufficiente per memorizzare il nuovo record, il record viene inserito, altrimenti viene chiesto un nuovo blocco al file system; dopo l'inserimento del record nel blocco, il blocco deve essere scritto su memoria secondaria. Quindi 2 accessi (uno per lettura e uno per scrittura) sono sufficienti per l'inserimento di un record. La cancellazione di un record con un dato valore per la chiave richiede $b/2$ accessi in lettura per la ricerca del record che ha quel valore per la chiave e 1 accesso in scrittura. Se si vuole recuperare lo spazio occupato dal record cancellato e i record hanno lunghezza fissa si può trasferire un record che si trova nell'ultimo blocco (restituendo al sistema il blocco se non vi sono altri record, in modo di ridurre i costi delle successive operazioni sul file) al posto di quello cancellato. Se si vuole recuperare lo spazio occupato dal record cancellato e i record hanno lunghezza variabile, si possono far slittare i record nel blocco (aggiornando i puntatori ai record nell'intestazione del blocco) e, se in tal modo si è ottenuto uno spazio sufficiente per trasferirvi un record che si trova nell'ultimo blocco, procedere come nel caso precedente. La modifica di un record con un dato valore per la chiave richiede $b/2$ accessi in lettura per la ricerca del record che ha quel valore per la chiave e 1 accesso in scrittura.

3.2 File hash

In questo tipo di organizzazione i record sono ripartiti in *bucket* (secchi) in base al valore della chiave. Se B è il numero dei bucket, questi vengono numerati da 0 a $B-1$. Dato un valore v per la chiave il numero del bucket in cui deve trovarsi un record con chiave v è calcolato mediante una funzione che prende il nome di *funzione hash*.

Ciascun bucket è costituito da uno o più blocchi (come vedremo, affinché la gestione del file sia efficiente è opportuno che il numero dei blocchi in un bucket sia piccolo) ed è organizzato come un

heap. L'accesso ai bucket avviene attraverso la *bucket directory* che contiene B elementi (normalmente B è sufficientemente piccolo da consentire di mantenere la bucket directory in memoria principale durante l'utilizzo del file); l' i -esimo elemento contiene l'indirizzo (*bucket header*) del primo blocco dell' i -esimo bucket. Tutti i blocchi di un bucket sono collegati tra loro mediante puntatori in una lista.

Una funzione hash per essere “buona” deve ripartire uniformemente i record nei bucket, cioè al variare del valore della chiave deve assumere con la “stessa” probabilità uno dei valori compresi tra 0 e $B-1$. Esiste un'ampia letteratura sulle funzioni hash. In genere, una funzione hash trasforma la chiave in un intero, divide questo intero per B , e fornisce il resto della divisione come numero di bucket in cui deve trovarsi il record con quel valore della chiave. Una strategia per definire una funzione hash è, ad esempio, la seguente:

- trattare il valore v della chiave come una sequenza di bit
- suddividere tale sequenza in gruppi di bit di uguale lunghezza
- sommare tali gruppi trattandoli come interi
- dividere il risultato per il numero dei bucket (cioè per B)
- prendere il resto della divisione come numero del bucket in cui deve trovarsi un record con chiave v .

Una qualsiasi operazione (ricerca, inserimento, cancellazione, modifica) su un file hash richiede la valutazione di $h(v)$ (dove v è un valore per la chiave e h è la funzione hash) per individuare il bucket in cui deve trovarsi il record con chiave v ; successivamente, l'operazione (ricerca, inserimento, cancellazione, modifica) viene effettuata sul bucket che, come già detto, è organizzato come un heap. Se la funzione hash distribuisce uniformemente i record nei bucket, ogni bucket è costituito da un numero di blocchi che è $1/B$ -esimo del numero di blocchi di cui è costituito l'intero file. Pertanto il costo richiesto per un'operazione è approssimativamente $1/B$ -esimo del costo che sarebbe richiesto per fare la stessa operazione se il file fosse organizzato come un heap. Si osservi che, poiché l'inserimento di un record viene effettuato sull'ultimo blocco del bucket, è opportuno che la bucket directory contenga anche, per ogni bucket, un puntatore all'ultimo record del bucket.

Da quanto detto appare evidente che quanti più sono i bucket tanto più basso è il costo di ogni operazione. D'altra parte limitazioni al numero dei bucket derivano dalle seguenti considerazioni:

- ogni bucket deve avere almeno un blocco
- se le dimensioni della bucket directory sono tali che non può essere mantenuta in memoria principale durante l'utilizzo del file, ulteriori accessi sono necessari per leggere i blocchi della bucket directory.

3.3 File con indice (indice sparso)

Nella presentazione di questo tipo di organizzazione, spesso chiamato ISAM (Indexed Sequential Access Method), assumeremo che il valore della chiave identifica univocamente un record del file. Inoltre, inizialmente, assumeremo che i record non siano puntati.

Inizialmente il file viene ordinato in base al valore (crescente) della chiave e viene memorizzato lasciando in ogni blocco una certa percentuale (ad esempio il 20%) di spazio non utilizzato per l'inserimento di nuovi record. Quindi viene creato il *file indice* (anche in questo caso viene lasciato spazio libero per l'inserimento di nuovi record) e infine la directory del file indice che generalmente ha dimensioni tali da poter essere mantenuta in memoria principale durante l'utilizzo del file.

Un file indice è un file i cui record consistono di coppie del tipo (v, b) , in cui v è un valore della chiave e b è l'indirizzo di un blocco del file principale: il valore della chiave di ogni record nel blocco di indirizzo b è maggiore o uguale a v e il valore della chiave di ogni record che si trova in un blocco che precede quello di indirizzo b è minore di v .

Il file indice viene creato nel modo seguente. Per ogni blocco del file principale viene creata una coppia costituita dal valore della chiave del primo record nel blocco e dall'indirizzo del blocco; l'unica eccezione è rappresentata dal primo blocco per il quale viene preso anziché il valore della chiave del primo record, un valore (denotato con $-\infty$) che è più piccolo di qualsiasi valore che può essere assunto dalla chiave.

L'accesso al file principale avviene attraverso il file indice nel modo seguente. Dato un valore v della chiave, si cerca nel file indice un valore v' della chiave che *ricopre* v , cioè una coppia (v', b') tale che

- $v' \leq v$ e
- o (v', b') è l'ultimo record del file indice oppure, se (v'', b'') è il successivo record nel file indice, $v \leq v''$.

Il blocco che ha per indirizzo b' è allora il blocco in cui deve trovarsi il record con chiave v . Pertanto la ricerca di un record con chiave v richiede un accesso in più oltre quelli necessari per la ricerca nel file indice di un valore della chiave che ricopre v .

La chiave del file principale è una chiave anche per il file indice; pertanto i record del file indice possono a loro volta essere ordinati in base al valore della chiave. Il fatto che il file indice sia ordinato in base al valore della chiave consente di usare metodi più efficienti della scansione completa per ricercare sul file indice un valore della chiave che ricopra un dato valore v .

Il più semplice è costituito dalla *ricerca binaria*. Siano B_1, B_2, \dots, B_m i blocchi del file indice; si comincia con il considerare il blocco $B_{\lfloor m/2 \rfloor}$ e si confronta il valore w della chiave nel primo record di tale blocco con v ; se $v=w$ la ricerca ha termine; se $v < w$ si ripete il procedimento come se il file indice fosse costituito dai blocchi $B_1, B_2, \dots, B_{\lfloor m/2 \rfloor - 1}$; se invece $v > w$ e nel blocco esiste un valore della chiave che ricopre v la ricerca ha termine, altrimenti si ripete il procedimento come se il file indice fosse costituito dai blocchi $B_{\lfloor m/2 \rfloor}, B_{\lfloor m/2 \rfloor + 1}, \dots, B_m$. Il procedimento viene iterato fino a quando ci si riduce a considerare un unico blocco; a questo punto si scandisce il blocco per trovare un valore della chiave che ricopre v . Poiché ad ogni passo il numero di blocchi su cui deve essere effettuata la ricerca viene dimezzato, dopo al più $\log_2(m)$ passi la ricerca è ristretta ad un unico blocco.

Un altro metodo è costituito dalla *ricerca per interpolazione*. Questo tipo di ricerca è basato sulla conoscenza della distribuzione dei valori della chiave. In altre parole per poter effettuare questa ricerca si deve disporre di una funzione f che dati tre valori v_1, v_2, v_3 della chiave fornisce un valore

che è la frazione dell'intervallo di valori della chiave compresi tra v_2 e v_3 in cui deve trovarsi v_1 . In tal caso, se B_1, B_2, \dots, B_m sono i blocchi del file indice (o di una sua parte) e v_2 è il valore della chiave nel primo record di B_1 e v_3 è il valore della chiave nell'ultimo record di B_m allora v_1 deve essere confrontato con il valore della chiave nel primo record di B_i , dove $i = mf(v_1, v_2, v_3)$; analogamente a quanto accade nella ricerca binaria, se v_1 è minore di tale valore allora il procedimento deve essere ripetuto sui blocchi B_1, B_2, \dots, B_{i-1} , mentre se è maggiore il procedimento deve essere ripetuto sui blocchi B_i, B_{i+1}, \dots, B_m , finché la ricerca si restringe ad un unico blocco. È stato mostrato che la ricerca per interpolazione richiede circa $1 + \log_2 \log_2 m$ accessi.

Per inserire un nuovo record nel file principale occorre innanzitutto ricercare il blocco B_i del file principale in cui il record deve trovarsi in base al valore della chiave. Se in B_i c'è spazio sufficiente, il record viene inserito in modo da rispettare l'ordinamento (quindi spostando eventualmente record con chiave maggiore). Altrimenti si possono seguire diverse strategie. Ad esempio si può verificare se c'è spazio sufficiente nel blocco successivo B_{i+1} ; in tal caso, o il nuovo record o un record che era precedentemente in B_i diventa il primo record di B_{i+1} e, pertanto, il record del file indice che contiene il puntatore a B_{i+1} deve essere modificato. Se B_{i+1} non esiste (B_i è l'ultimo blocco del file) oppure è pieno si può prendere in considerazione il blocco B_{i-1} ed eventualmente procedere in modo simile ripartendo i record di tra B_{i-1} e B_i ; anche in questo caso sarà necessario apportare una modifica al file indice. Se anche B_{i-1} è pieno oppure se B_{i-1} non esiste (B_i è il primo blocco del file), è necessario richiedere al sistema un nuovo blocco che seguirà B_i e ripartire i record di B_i tra B_i e il nuovo blocco; quindi occorre inserire nel file indice il record relativo al nuovo blocco.

In ogni caso occorrerà modificare i bit di "usato/non usato" nelle intestazioni dei blocchi coinvolti.

Per cancellare un record dal file principale occorre innanzitutto ricercare il record, quindi cancellarlo, spostare i record nel blocco in modo da recuperare lo spazio lasciato libero e modificare i bit di "usato/non usato" nell'intestazione del blocco. Se il record cancellato è il primo record del blocco occorre modificare nel file indice il record relativo al blocco. Se il record cancellato era l'unico record del blocco, il blocco viene restituito al sistema e nel file indice occorre cancellare il record relativo al blocco (anche in questo caso se il record cancellato è l'unico record del blocco, il blocco viene restituito al sistema).

In ogni caso occorrerà modificare i bit di "usato/non usato" nelle intestazioni dei blocchi coinvolti.

Per modificare un record del file principale occorre innanzitutto ricercare il record; quindi, se la modifica non coinvolge campi della chiave, il record viene modificato e il blocco riscritto. Altrimenti la modifica equivale ad una cancellazione seguita da un inserimento.

Consideriamo ora il caso in cui il file principale contiene record puntati.

In tal caso la fase di inizializzazione non differisce dal caso precedente salvo che è preferibile lasciare più spazio libero nei blocchi per successivi inserimenti. Infatti, poiché i record sono puntati,

non possono essere spostati per mantenere l'ordinamento quando si inseriscono nuovi record; pertanto, se non c'è spazio sufficiente in un blocco B per l'inserimento di un nuovo record, occorre richiedere al sistema un nuovo blocco che viene collegato a B tramite un puntatore; in tal modo ogni record del file indice punta al primo blocco di un bucket e il file indice non viene mai modificato (a meno che le dimensioni dei bucket non siano diventate tali da richiedere una riorganizzazione dell'intero file). La ricerca di un record con chiave v richiede la ricerca sul file indice di un valore della chiave che ricopre v e quindi la scansione del bucket corrispondente. La cancellazione di un record richiede la ricerca del record e quindi la modifica dei bit di cancellazione nell'intestazione del blocco. La modifica di un record richiede la ricerca del record; quindi, se la modifica non coinvolge campi della chiave, il record viene modificato e il blocco riscritto. Altrimenti la modifica equivale ad una cancellazione seguita da un inserimento. In quest'ultimo caso non è sufficiente modificare il bit di cancellazione del record cancellato, ma è necessario inserire in esso un puntatore al nuovo record inserito in modo che questo sia raggiungibile da qualsiasi record che contenga un puntatore al record cancellato.

Poiché non è possibile mantenere il file principale ordinato, se si vuole avere la possibilità di esaminare il file seguendo l'ordinamento della chiave occorre inserire in ogni record un puntatore al record successivo nell'ordinamento.

3.4 B-tree

Questa organizzazione è una generalizzazione del file con indice. Infatti in un file con indice attraverso una ricerca sul file indice viene individuato il blocco del file principale in cui deve trovarsi il record con un dato valore per la chiave. In un B-tree si accede al file attraverso una gerarchia di indici. L'indice a livello più alto nella gerarchia è costituito da un unico blocco e quindi può risiedere in memoria principale durante l'utilizzo del file. Durante la ricerca di un record con un dato valore per la chiave si accede agli indici a partire da quello a livello più alto; a mano a mano che si scende nella gerarchia di indici si restringe la porzione (insieme di blocchi) del file principale in cui deve trovarsi il record desiderato, fino a che, nell'ultimo livello (il più basso nella gerarchia) tale porzione è ristretta ad un unico blocco. I blocchi degli indici e del file principale devono essere sempre pieni almeno per metà.

Ogni blocco di un file indice è costituito di record contenenti una coppia (v, b) dove v è il valore della chiave del primo record della porzione del file principale che è accessibile attraverso il puntatore b ; b può essere un puntatore ad un blocco del file indice a livello immediatamente più basso oppure (nei record del file indice nel più basso livello della gerarchia) ad un blocco del file principale.

Per ricercare il record del file principale con un dato valore v per la chiave si procede nel modo seguente. Si parte dall'indice a livello più alto (che è costituito da un unico blocco) e ad ogni passo si esamina un unico blocco. Se il blocco esaminato è un blocco del file principale, tale blocco è quello in cui deve trovarsi il record desiderato; se, invece, è un blocco di un file indice, si cerca su tale blocco un valore della chiave che ricopre v e si segue il puntatore associato (che sarà o un puntatore ad un blocco dell'indice al livello immediatamente inferiore o un blocco del file

principale). Per valutare il costo di un'operazione di ricerca, assumiamo, per comodità, che il numero di record del file principale che possono essere memorizzati in un blocco sia un numero dispari $2e-1$, che il numero di record di un file indice che possono essere memorizzati in un blocco sia un numero dispari $2d-1$ (cioè, poiché ogni blocco è pieno almeno per metà, ogni blocco del file principale contiene almeno e record e ogni blocco di un indice contiene almeno d record). Con tali assunzioni il file principale ha al più n/e blocchi, dove n è il numero di record del file principale. Poiché ad ogni blocco del file principale corrisponde un record nel file indice al livello 1 (il più basso nella gerarchia) il numero di record del file indice a livello più basso sarà n/e e, per l'ipotesi fatta (ogni blocco è pieno almeno per metà), questi n/e record saranno memorizzati in al più $n/(ed)$ blocchi. Ripetendo tale ragionamento, si ottiene che l'indice a livello i ha $n/(ed^{i-1})$ record memorizzati in al più $n/(ed^i)$ blocchi. Sia k il livello più alto della gerarchia; l'indice a livello k avrà $n/(ed^{k-1})$ record memorizzati in al più $n/(ed^k)$ blocchi; poiché tale indice è costituito da un unico blocco $n/(ed^k) = 1$. Poiché per ricercare un record del file principale si deve accedere ad un blocco per ogni livello di indice più al blocco del file principale che contiene il record desiderato, il numero di accessi necessari per un operazione di ricerca è $k+1 \leq \log_d(n/e)+1$.

Il numero di accessi necessari per effettuare l'inserimento del record con valore v della chiave è dato dal numero di accessi necessari per ricercare il blocco in cui deve essere inserito il record con chiave v più uno per riscrivere il blocco, se nel blocco c'è spazio sufficiente per inserire il record. Se, viceversa, nel blocco non c'è spazio sufficiente per inserire il nuovo record, l'operazione di inserimento può richiedere un numero ulteriore di accessi a causa della necessità di mantenere i blocchi pieni al meno per metà, come mostra il seguente esempio. Si osservi che, per salvare spazio, il primo record in ogni blocco di un file indice è costituito da un puntatore anziché da una coppia chiave-puntatore; tale puntatore permette di accedere alla parte del file principale contenente record con valore della chiave minore del valore presente nel secondo record del blocco del file indice. Supponiamo che in un certo istante la configurazione del B-tree sia la seguente:

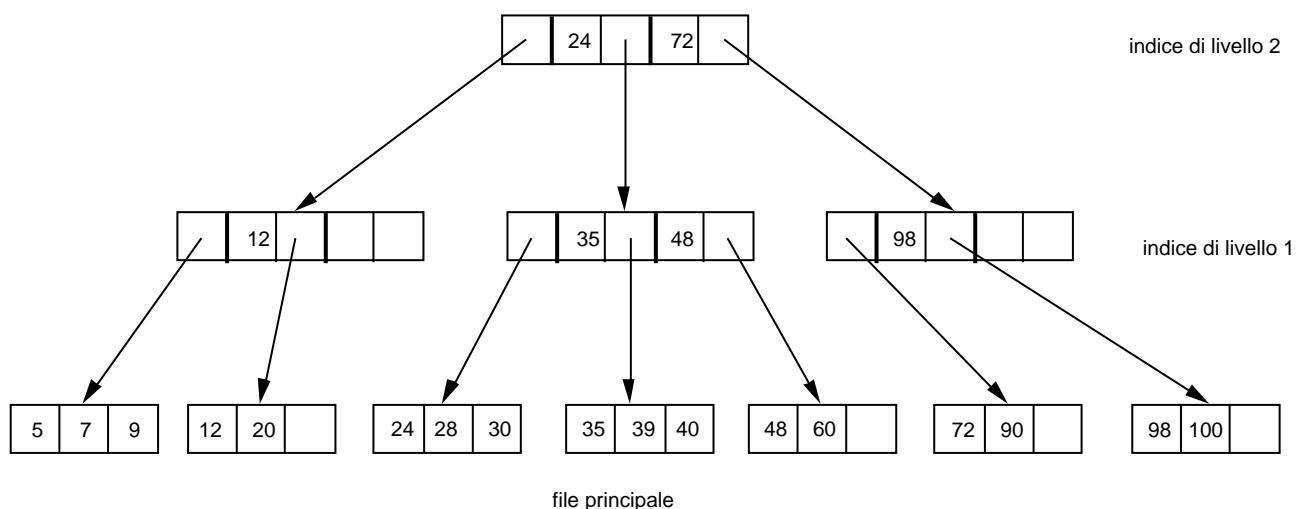


Figura 1.

e che si voglia inserire il record con valore della chiave 25. Poiché il blocco (il terzo da sinistra) del file principale in cui dovrebbe essere inserito tale record è pieno occorre richiedere al sistema un nuovo blocco e ripartire i record del terzo blocco e il nuovo record fra il terzo blocco e il nuovo blocco in modo da soddisfare il vincolo che ogni blocco deve essere pieno almeno per metà. Inoltre, poiché il blocco del file indice di primo livello in cui dovrebbe essere inserito il puntatore al nuovo blocco del file principale è pieno, occorre procedere per il file indice di livello 1 allo stesso modo in cui si è proceduto per il file principale, richiedendo un nuovo blocco al sistema. Ma allora un analogo discorso deve essere fatto per l'indice di livello 2. Pertanto dopo l'inserimento del record con chiave 25 il B-tree si presenterà come segue

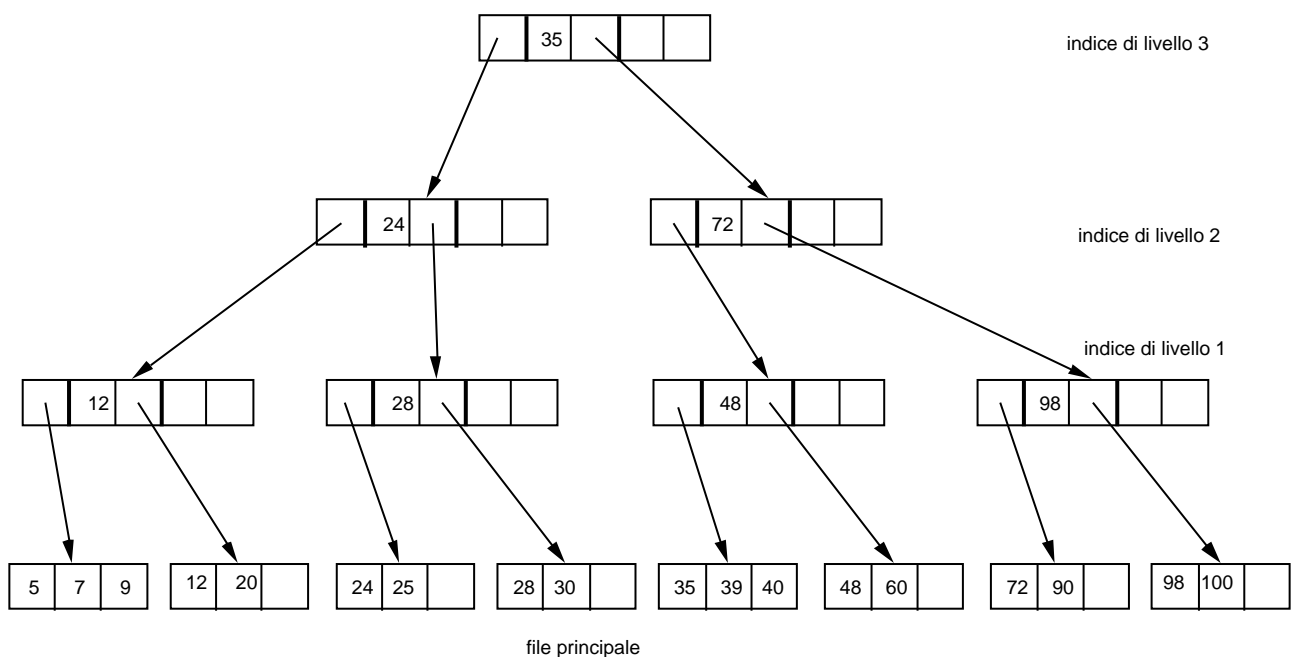


Figura 2.

Come si vede il numero dei livelli degli indici è aumentato di 1, il che comporta un aumento dei costi delle successive operazioni sul file principale.

Il numero di accessi necessari per effettuare la cancellazione del record con valore v della chiave è dato dal numero di accessi necessari per ricercare il blocco in cui si trova il record con chiave v più uno per riscrivere il blocco, se il blocco rimane pieno almeno per metà successivamente alla cancellazione. Se, viceversa, il blocco non rimane pieno almeno per metà successivamente alla cancellazione, l'operazione può richiedere un numero ulteriore di accessi come mostra il seguente esempio.

Supponiamo che in un certo istante la configurazione del B-tree quella mostrata in Figura 2 e che si voglia cancellare il record con chiave 28. Poiché, a seguito della cancellazione di tale record nel blocco rimane un solo record (e quindi non è soddisfatto il vincolo che ogni record debba essere pieno al meno per metà), e tale record può trovare posto nel blocco precedente (il terzo da sinistra), il blocco può essere restituito al sistema. Inoltre, poiché nel secondo blocco dell'indice di livello

rimane un solo puntatore possiamo procedere per l'indice di livello 1 analogamente a come si è proceduto per il file principale. Ma allora un analogo discorso deve essere fatto per l'indice di livello 2. Pertanto dopo la cancellazione del record con chiave 28 il B-tree si presenterà come segue

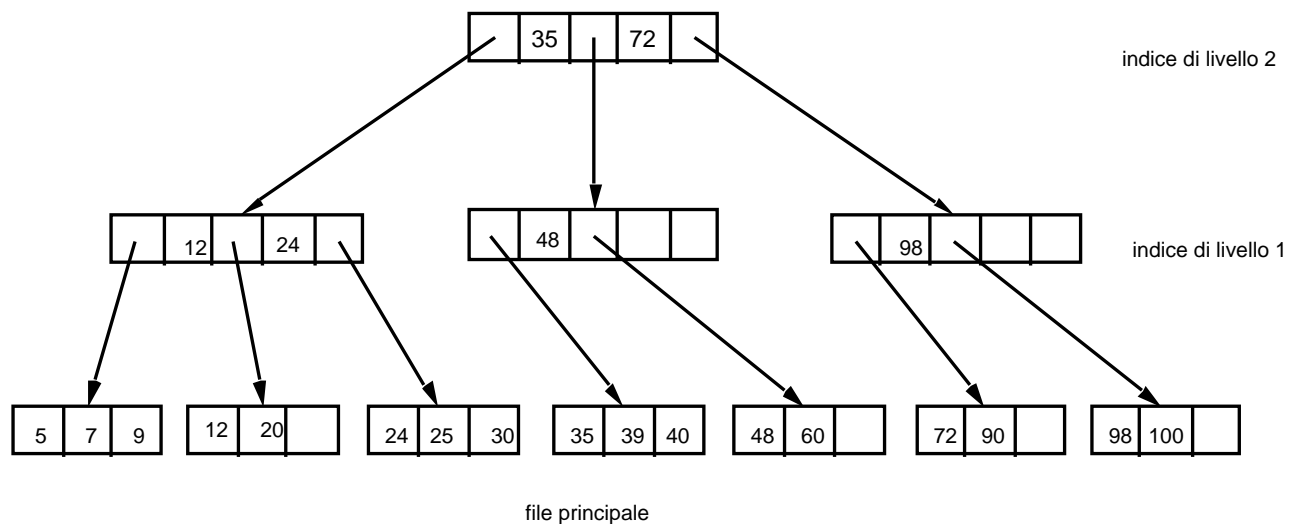


Figura 3.

Come si vede il numero dei livelli degli indici è diminuito di 1, il che comporta una diminuzione dei costi delle successive operazioni sul file principale.

Il numero di accessi necessari per effettuare la modifica del record con valore v della chiave è dato dal numero di accessi necessari per ricercare il blocco in cui si trova il record con chiave v più uno per riscrivere il blocco, se la modifica non coinvolge campi della chiave, altrimenti è dato dalla somma degli accessi necessari per la cancellazione del record con chiave v e quelli necessari per l'inserimento del record con il nuovo valore della chiave.

3.5 File con indice denso

Nelle organizzazioni viste nei paragrafi precedenti, escluso l'heap, la maggior parte dei blocchi del file principale non sono riempiti completamente; ciò comporta spreco di memoria e aumento dei tempi di ricerca. D'altra parte, in un heap i blocchi sono completamente pieni, ma non si ha un metodo efficiente per la ricerca di un record con un dato valore per la chiave.

Un tipo di organizzazione che cerca di cogliere gli aspetti positivi dell'uno e degli altri tipi di organizzazione è il file con indice denso. Mentre nel caso di un file con indice sparso visto precedentemente, ogni record del file indice contiene un puntatore per ogni blocco del file principale, che è ordinato in base al valore della chiave, nel caso di un file con indice denso ogni record del file indice contiene un puntatore ad un record del file principale, che non ha nessun tipo di ordinamento oppure ha un ordinamento basato su criteri differenti da quelli su cui si basa l'indice.

Un indice denso è un file che può avere una qualsiasi delle organizzazioni viste precedentemente.

Per ricercare, cancellare o modificare un record del file principale, dato un valore per la chiave, occorre ricercare il record con quel valore per la chiave nell'indice denso, fare un accesso per leggere il blocco del file principale che contiene il record desiderato e, nel caso di modifica o cancellazione, un accesso per riscrivere tale blocco. Nel caso di una cancellazione, occorre anche cancellare nell'indice denso il record che ha il valore dato per la chiave. Per inserire un record si procede nel modo seguente: si inserisce il record alla fine del file principale e quindi si inserisce nell'indice denso il corrispondente record.

Apparentemente questo tipo di organizzazione sembra richiedere per ogni operazione qualche accesso in più rispetto a quello che richiederebbe la stessa operazione se il file principale avesse la stessa organizzazione scelta per l'indice denso. In realtà occorre tener presente che i costi di una operazione di ricerca (e quindi di ogni operazione) dipendono dalle dimensioni del file (numero di blocchi necessari per memorizzarlo) e che generalmente la dimensione dei record del file indice è nettamente più piccola di quella dei record del file principale. Pertanto ogni operazione sul file indice ha un costo inferiore di quello che avrebbe la stessa operazione se il file principale avesse la stessa organizzazione scelta per l'indice denso.

L'uso di un indice denso permette anche di eliminare i puntatori a record del file principale: basta sostituire ogni puntatore ad un record del file principale con il puntatore al corrispondente record dell'indice denso: In tal modo per accedere al record occorre un accesso in più; d'altra parte se si vuole muovere un record nel file principale è sufficiente modificare il puntatore nel corrispondente record del file indice e, quindi, è possibile compattare il file principale riutilizzando lo spazio di record cancellati. Un'altra alternativa è quella di sostituire ad ogni puntatore (che non si trovi nell'indice denso) al file principale il valore della chiave e in base ad esso ricercare il record utilizzando l'indice denso. Questa tecnica permette di compattare sia il file principale che il file indice; tuttavia, mentre l'uso di un puntatore ad un record del file principale permette di raggiungere il record con un unico accesso e quello di un puntatore al file indice permette di raggiungere il record con due accessi, l'uso del valore della chiave come puntatore può richiedere un numero superiore di accessi (quelli necessari per la ricerca sul file indice più un accesso al file principale) per raggiungere il record.

36 Indici secondari

Gli indici che abbiamo esaminato precedentemente (sia quelli sparsi che quelli densi) consentono di ricercare un record in base al valore della chiave e prendono il nome di *indici primari*. Se vogliamo ricercare i record che hanno un dato valore in un campo non chiave dobbiamo ricorrere ad un indice secondario.

Un *indice secondario* può essere realizzato come indice denso su un attributo o un insieme di attributi alternativi alla chiave primaria. Poiché la struttura indice occupa spazio, la scelta di realizzare un indice secondario dipende dalla frequenza e dall'aumento di efficienza delle operazioni che coinvolgono ricerche su tali attributi.