

Un'aria produttiva

L'aria compressa è utilizzata in svariate applicazioni ma deve avere caratteristiche operative differenti a seconda della tipologia di impiego: ecco perché la scelta del sistema di compressione più idoneo non è da sottovalutare

DANIELE CATTANEO

Prima di analizzare i sistemi di compressione è necessario richiamare brevemente qualche concetto di fisica per comprendere meglio sia il processo di compressione sia il sistema di classificazione delle più comuni tipologie di compressori commercialmente presenti sul mercato. La pressione esercitata da un gas è frutto del rapido e continuo bombardamento che le molecole dello stesso gas esercitano sulle pareti di un contenitore; la pressione può essere aumentata incrementando il numero o la forza di queste collisioni. La legge di Charles dice che un incremento di temperatura permette di aumentare la pressione: infatti l'aumento di temperatura

accelera la velocità delle molecole, quindi aumentano il numero e la forza delle collisioni con le pareti del contenitore. La pressione, però, può essere aumentata anche incrementando il numero medio di molecole in un dato volume, sia diminuendo il volume (legge di Boyle) sia aumentando la quantità di gas nel volume. Le molecole di un gas sono relativamente distanti tra loro e si muovono liberamente e casualmente nel volume; la compressione diminuisce semplicemente il volume disponibile per ciascuna molecola per cui ogni molecola compie una distanza inferiore prima di andare in collisione con altre particelle o con le pareti del

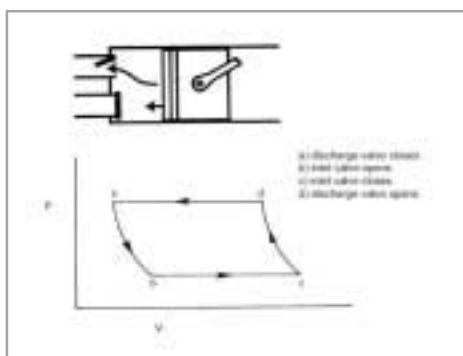
contenitore. E' allora evidente che più collisioni si verificano in un certo intervallo di tempo, maggiore è la pressione generata. Un compressore d'aria esegue la maggior parte

del proprio lavoro durante la corsa di compressione quando è trasferita energia all'aria, incrementandone la pressione.

La compressione, però, genera anche calore, quindi la quantità di lavoro necessaria a comprimere una certa quantità d'aria a una determinata pressione dipende anche dalla rapidità con cui questo calore è rimosso. Dal punto di vista teorico il lavoro di compressione coinvolge due processi: il processo adiabatico (non c'è raffreddamento, il calore rimane nell'aria provocando l'aumento di pressione che a sua volta incrementa i requisiti del lavoro di

compressione al livello massimo) e il processo isoterico (in questo caso il raffreddamento è perfetto: la temperatura dell'aria non si modifica e i requisiti del lavoro di compressione sono minimi).

Se si pensa di comprimere aria a 100 psi (6,89 bar) la quantità di lavoro richiesta dai due processi differisce di circa il 36% - nel mondo industriale la maggior parte dei compressori utilizza principi più vicini al processo adiabatico perché il processo di compressione è talmente veloce da permettere alla maggior parte del calore di disperdersi nella stessa carcassa del compressore.



Nel compressore volumetrico a pistone le valvole di aspirazione e di mandata sono attivate automaticamente dai differenziali di pressione

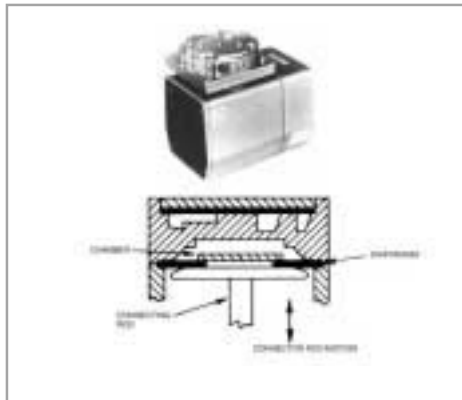
Classificazione dei compressori

Il compressore d'aria converte energia meccanica in energia pneumatica attraverso un processo di compressione; l'energia meccanica può essere fornita, ad esempio, da un motore elettrico o a gasolio. La pressione dell'aria può essere innalzata costringendola in un volume sempre più piccolo: questo avviene nei compressori volumetrici. Nei compressori non volumetrici (definiti anche compressori dinamici) è invece fornita all'aria energia cinetica mediante l'aumento della velocità, con conseguente aumento della pressione dinamica; successivamente è diminuita la velocità dell'aria e la pressione dinamica è trasformata in pressione statica. I compressori volumetrici possono essere ulteriormente classificati in funzione del tipo di moto dell'elemento mobile che comprime il fluido: si hanno pertanto i compressori alternativi (a pistoni) e quelli rotativi (a uno o due assi di rotazione). I compressori alternativi sono i compressori a pistone e i compressori a vite (a due assi), mentre tra i compressori rotativi si trovano i compressori a pistone rotante, i compressori a palette, i compressori a lobi, i compressori a vite e i compressori a spirale orbitante. Nei compressori alternativi, a causa dell'alternanza delle fasi di lavoro nel cilindro lavorante, il flusso d'aria compressa è pulsante; questo fenomeno non avviene mai nei compressori volumetrici rotativi, dove invece il flusso d'aria è continuo. I tre tipi di compressori dinamici più comuni sono il compressore centrifugo, il compressore assiale e il compressore periferico (o rigenerativo) - la differenza è determinata dalla direzione del flusso d'aria attraverso le camere di compressione.

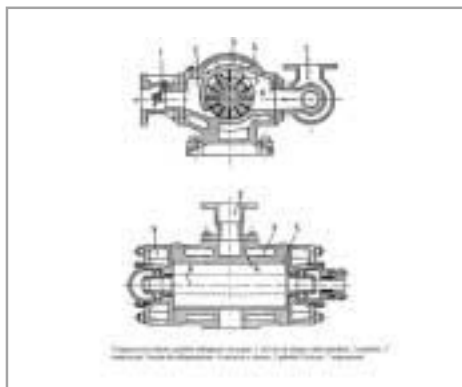
Compressori volumetrici

I compressori volumetrici sono molto diffusi e rappresentano spesso la soluzione più economica per sistemi che richiedono pressioni relativamente elevate; il loro principale svantaggio è che il meccanismo di spostamento ha portate inferiori rispetto ai compressori non volumetrici. Il principio di funzionamento è molto semplice: l'aria è confinata in una camera chiusa e la pressione è incremen-

tata riducendo il volume dello spazio disponibile. Questo meccanismo si presta a qualche considerazione: la pressione contro cui il compressore lavora diviene sempre più elevata durante il lavoro di pompaggio, così è necessario un dispositivo esterno di controllo della pressione; in secondo luogo, dal momento che il calore generato cresce progressivamente al crescere della pressione, si ha un sostanziale aumento della temperatura dell'aria e della temperatura della struttura dello stesso compressore.



Nella tipologia a diaframma la compressione è realizzata flettendo il diaframma avanti e indietro in una camera chiusa



Compressore a palette. Durante il ciclo di mandata il volume dei compartimenti tra le palette diviene sempre più piccolo comprimendo l'aria e convogliandola verso l'apertura di mandata

Compressori volumetrici a moto alternativo

I compressori a pistone con moto alternativo sono tra i compressori d'aria commercialmente più comuni perché possono erogare pressioni elevate, sono flessibili, hanno la capacità di dissipare velocemente il calore e non utilizzano olio. La compressione è realizzata dal movimento alternativo di un pistone in un cilindro: questo moto riempie il cilindro e comprime l'aria.

La corsa di aspirazione comincia quando il pistone è a ridosso delle valvole nella posizione di volume minimo; nel movimento verso la posizione di volume massimo l'aria esterna fluisce all'interno del cilindro attraverso la valvola di aspirazione, mentre la valvola di scarico (detta anche valvola di mandata) rimane chiusa. Nella corsa di compressione il pistone si muove nella direzione opposta diminuendo il volume dell'aria. Le valvole di aspirazione e di mandata sono attivate automaticamente dai differenziali di pressione: nella corsa di aspirazione il moto del pistone riduce la pres-

sione nel cilindro al di sotto della pressione atmosferica, quindi la valvola di aspirazione si apre permettendo all'aria di entrare nel cilindro; nella corsa di compressione il differenziale di pressione fa in modo che la valvola di aspirazione rimanga, al contrario, fermamente chiusa.

La valvola di mandata funziona allo stesso modo: quando la pressione nel cilindro diviene superiore alla combinazione delle pressioni della molla di richiamo della valvola e del tubo di mandata, allora la valvola si apre e l'aria compressa fluisce nel sistema. La valvola di aspirazione, dunque, è aperta da una riduzione di pressione mentre la val-

vola di mandata è aperta da un incremento di pressione. I compressori a pistone possono essere anche a doppia fase: quando il pistone si muove in una direzione l'aria è compressa in quella direzione, mentre il lato opposto del cilindro è soggetto alla fase di aspirazione. I compressori a fase singola sono generalmente considerati macchine dalle caratteristiche di impiego leggere (anche se operano in continuo o in intermittenza) mentre i compressori a doppia fase, spesso dotati di sistema di raffreddamento ad acqua, hanno caratteristiche di impiego più impegnative e sono utilizzati in modalità continua.

Lo svantaggio principale dei compressori a pistone è la generazione di forze di inerzia che provocano vibrazioni nella macchina, per cui un telaio rigido e una fondazione antivibrante sono requisiti di progettazione preferenziali. L'altro svantaggio può essere la portata d'aria pulsante ma in questo caso, dimensionando opportunamente delle camere di smorzamento o dei serbatoi polmone, è possibile eliminare o quantomeno diminuire l'inconveniente.

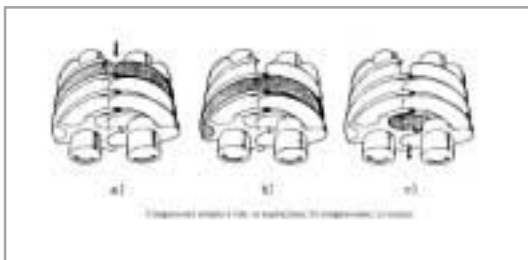
L'utilizzo più comune è per applicazioni che richiedono compressione di volumi d'aria contenuti a pressioni elevate. Il compressore a diaframma è una modifica del principio di funzionamento del compressore a pistone: in questo caso la compressione è realizzata flettendo un diaframma avanti e indietro in una camera chiusa (l'azione di flessione sfrutta il movimento di una biella sotto il diaframma). Le valvole di aspirazione e di mandata convertono in azioni di pompaggio le variazioni di volume prodotte dal moto alternativo.

Le capacità di pressione di un compressore a diaframma sono inferiori rispetto alle capacità di un compressore a

pistone ma superano comunque quelle di un compressore a palette.

Compressori volumetrici a moto rotativo

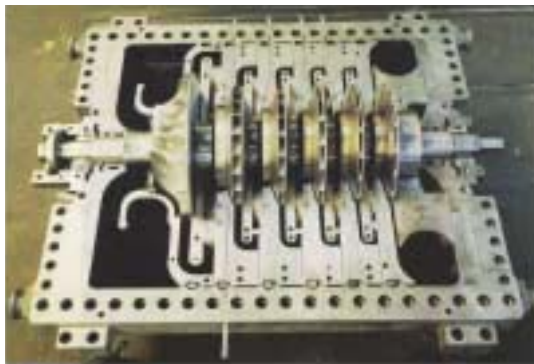
Alcune applicazioni richiedono una pulsazione minima o addirittura assente nell'aria in uscita oppure è necessario minimizzare le vibrazioni; il compressore a palette può essere allora una soluzione. Utilizzati per portate d'aria moderatamente elevate e per pressioni inferiori ai 30 psig (2 bar, anche se alcuni modelli arrivano sino a 200 psig, pari a 13,8 bar) i compressori a palette erogano pressioni nominali generalmente inferiori rispetto ai compressori a pistone, soprattutto per maggiori difficoltà di tenuta e perché sono più sensibili agli effetti termici. L'azione di pompaggio è generata da una serie di palette scorrevoli durante la rotazione in un contenitore cilindrico; infatti quando la girante ruota, ogni palette scorre fuori dalla propria sede intrappolando una certa quantità d'aria per convogliarla dal lato di aspirazione del compressore al lato di scarico. Non ci sono valvole e l'intero flusso d'aria è controllato dal movimento delle palette attraverso aperture di entrata e di uscita separate tra loro. La girante del compressore è montata eccentricamente (non al centro del cilindro) e quando ruota le palette sono proiettate verso l'esterno e mantenute contro la camera cilindrica dalla forza centrifuga e dalla pressione. Questo movimento crea una serie di compartimenti d'aria di volumi differenti proprio per l'eccentricità della girante; i compartimenti tra due palette adiacenti aumentano così di volume nel ciclo di aspirazione e l'aria fluisce dall'apertura di ingresso ai compartimenti creati dalle due palette.



Nel compressore rotativo a vite l'aria entra in una camera a tenuta dove viene intrappolata tra due rotori che ruotano in senso inverso; i profili dei rotori riducono il volume dell'aria portandola alla pressione impostata



Nel compressore a lobi la rotazione in direzioni opposte di due lobi accoppiati permette di intrappolare l'aria e comprimerla contro la carcassa del compressore



Compressore centrifugo. L'azione centrifuga della girante proietta l'aria radialmente lungo la carcassa, la convoglia verso la porta di mandata incrementandone la velocità e, quindi, la pressione

Durante il ciclo di mandata, invece, il volume dei compartimenti diviene sempre più piccolo, comprimendo l'aria e convogliandola nell'apertura di mandata verso il sistema utilizzatore. I flussi di aspirazione e mandata sono relativamente liberi da pulsazioni perché le aperture di ingresso e di uscita non hanno valvole, per cui l'aria è caratterizzata da un flusso continuo, senza intermitenza. Alcuni vantaggi di questa tipologia di compressione sono la possibilità di erogare un flusso d'aria privo di pulsazioni (senza utilizzare serbatoi polmone), la compattezza delle macchine, l'economicità e la semplicità sia di installazione sia di regime operativo, la silenziosità rispetto ad altri sistemi e vibrazioni di funzionamento minime. Nel compressore d'aria rotativo a vite, l'aria entra in una camera a tenuta dove viene intrappolata tra due rotori che ruotano in senso inverso; l'aria intrappolata dai profili dei rotori è ridotta di volume e portata compressa al livello di pressione necessario. Questa modalità di compressione opera con raffreddamento a contatto continuo e permette al compressore a vite di operare a temperatura ridotta (circa la metà) rispetto alla temperatura di funzionamento di un compressore alternativo - la temperatura ridotta consente al compressore rotativo a vite di operare in ciclo continuo per periodi di tempo prolungati; quindi questa macchina può essere impiegata in applicazioni industriali gravose. Nel compressore a lobi la rotazione in direzioni opposte di due lobi accoppiati permette di intrappolare l'aria e comprimerla contro la carcassa

del compressore; il compressore a lobi è caratterizzato da portate d'aria molto elevate con pressioni che possono arrivare anche a 200 psi (13,8 bar).

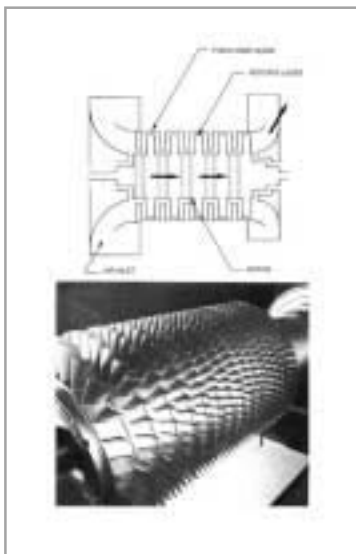
I compressori dinamici

I compressori non volumetrici, definiti anche compressori dinamici, si fondano su un principio di funzionamento differente: si creano gradienti di pressione sfruttando le variazioni di energia cinetica.

L'energia cinetica è quella forma di energia che un corpo possiede in virtù della propria velocità; l'energia cinetica di un fluido, allora, può essere incrementata attraverso la rotazione ad alte velocità dello stesso fluido oppure trasmettendo un impulso nella direzione del fluido. L'accelerazione iniziale dell'aria produce una pressione negativa (aspirazione) sulla porta d'ingresso richiamando l'aria mentre la parziale decelerazione dell'aria in corrispondenza della porta di scarico converte parte dell'energia cinetica in pressione; la velocità di rotazione della girante determina la variazione di pressione.

Il vantaggio principale dei compressori dinamici consiste nell'abilità di erogare portate d'aria molto elevate; da un altro punto di vista, invece, è necessario disporre di un processo di compressione multistadio per generare pressioni

sopra i 4-5 psi (275-345 mbar). Nei compressori centrifughi l'azione centrifuga della girante proietta l'aria radialmente lungo la carcassa e la convoglia verso la porta di mandata; proprio l'azione centrifuga permette di aumenta-



I compressori assiali sono utilizzati in applicazioni che richiedono portate molto elevate (dai 30.000 sino a 1.000.000 cfm, ovvero da circa 850 a circa 28.000 metri cubi al minuto)

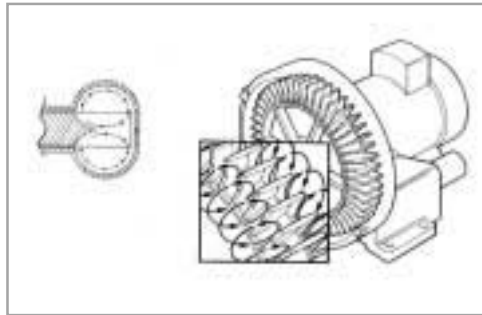
Scelta e applicazioni dei compressori d'aria

La scelta di un compressore d'aria compressa deve considerare fattori come l'affidabilità, l'ingombro, la purezza dell'aria erogata, la flessibilità di esercizio e il costo dell'aria compressa. Dal punto di vista operativo è indispensabile stabilire innanzitutto la pressione e la portata d'aria compressa richiesta dal proprio impianto. Se è vero che i compressori dinamici offrono elevate portate d'aria a pressioni inferiori, è pur vero che questa regola vale anche all'interno di ciascuna classe di compressori: il compressore rotativo a lobi, per esempio, tendenzialmente eroga portate d'aria superiori ma pressioni inferiori rispetto a un compressore a pistone della stessa taglia. Dopo aver valutato la pressione d'aria richiesta dalle specifiche, la procedura più comune è selezionare tra i compressori individuati quello con maggiore portata per quella pressione.

Più in generale, è utile valutare anche i costi dell'aria compressa considerando l'ammortamento dei compressori e delle opere murarie necessarie (per le tipologie a palette e alternativo, per esempio), il consumo di energia elettrica per il funzionamento legato al rendimento, l'acqua di raffreddamento, l'olio di lubrificazione, la manodopera di servizio e la manutenzione dell'impianto. I campi applicativi sono i più svariati: nel settore delle macchine utensili, nei processi di automazione, nel campo dei motori e della propulsione, nell'aerazione di bacini per il trattamento delle acque, nei trasportatori pneumatici, nei sistemi di sollevamento, negli utensili (trapani, martelli pneumatici, smerigliatrici, sabbiatrici, pistole a spruzzo per sistemi di verniciatura, ecc.), nei servocomandi di utensili (pinze, tastatori, ecc.), nel comando e nella regolazione di utenze, negli impianti di condizionamento, ecc.

re la velocità dell'aria quindi incrementarne la pressione. Nella configurazione più semplice il compressore centrifugo è costituito da una girante ad elevata velocità che riceve l'aria da un ugello d'ingresso posto in posizione centrale: la girante ruota dentro il corpo compressore senza attriti e non è necessario pertanto lubrificare la zona attraversata dal fluido da comprimere; le velocità di rotazione possono variare da 3.000 a 25.000 giri/min pertanto è necessario che l'accoppiamento con il motore elettrico avvenga, quasi sempre, attraverso un moltiplicatore di giri. Le pale della girante sono fisse e gettano l'aria contro la carcassa del compressore incrementandone velocità ed energia. Attraverso la porta di mandata l'aria è convogliata nel diffusore, l'elemento che ha il compito di ridurre la velocità dell'aria aumentandone la pressione - dopo il diffusore può essere inserito un collettore per ridurre ulteriormente la velocità dell'aria con un aumento di pressione. Anche in questo caso si possono ottenere pressioni più elevate sfruttando un processo multistadio in cui l'aria in uscita da un compressore centrifugo è convogliata

no portate molto elevate (dai 30.000 sino a 1.000.000 cfm, ovvero da circa 850 a circa 28.000 metri cubi al minuto). L'aria è convogliata attraverso un condotto principalmente nella direzione parallela all'asse di rotazione (nelle versioni multistadio il flusso attraversa palette fisse posizionate tra ciascuno stadio). Rispetto al compressore centrifugo il compressore assiale richiede un terzo dell'area di appoggio e, allo stesso modo, ha un terzo del peso; il costo di acquisto è raramente competitivo per portate inferiori a 100.000 cfm (circa 2.800 metri cubi al minuto).



Compressore rigenerativo.
La girante convoglia l'aria dall'apertura di entrata alla zona di compressione dove è successivamente espulsa dal corpo curvo grazie all'azione della forza centrifuga

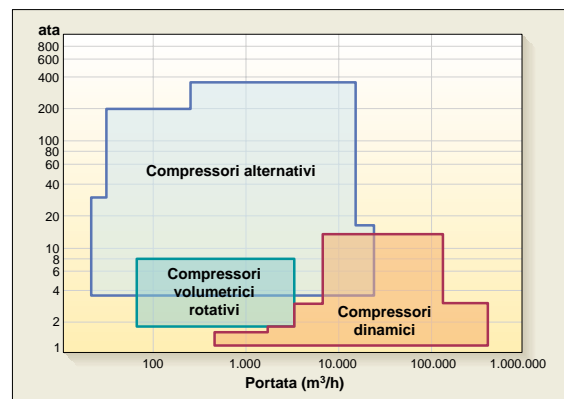
Il compressore rigenerativo, infine, si caratterizza per la capacità di erogare pressioni superiori agli altri compressori dinamici: alcuni modelli sono in grado di fornire in un unico stadio pressioni simili a quelle ottenute con un

processo multistadio composto da compressori centrifughi. Lo spazio di compressione consiste in un anello circolare tra le estremità delle palette della girante e le pareti di un corridoio periferico. La girante convoglia l'aria dall'apertura di entrata alla zona di compressione dove è successivamente espulsa dal corpo curvo grazie all'azione della

Principali caratteristiche dei compressori

Classe	Categoria	Tipo	Potenza (HP)	Pressione	Vantaggi
Volumetrico	Alternativo	a pistone, raffreddamento ad aria	0,5 - 5.000	10 - 17.000 psi 0,7 - 1.010 bar	semplice, leggero
		a pistone, raffreddamento ad acqua	10 - 5.000	10 - 50.000 psi 0,7 - 3.450 bar	efficienza, per applicazioni severe
		a diaframma	10 - 200	10 - 3.500 psi 0,7 - 241 bar	senza olio, senza guarnizioni
	Rotativo	a palette	10 - 500	10 - 150 psi 0,7 - 10 bar	compatto, velocità elevate
		a vite	10 - 500	10 - 150 psi 10 - 10 bar	flusso senza pulsazioni
		a lobi, basso pressione	15 - 200	5 - 40 psi 0,35 - 2,75 bar	compatto, senza olio
		a lobi, alta pressione	7,5 - 3.000	20 - 750 psi 1,5 - 50 bar	compatto, velocità elevate
Dinamico	Rotativo	centrifugo	50 - 10.000	40 - 2.000 psi 2,75 - 140 bar	compatto, senza olio, elevate velocità
		assiale	1.000 - 10.000	40 - 500 psi 2,75 - 35 bar	elevate portate, elevate velocità
		rigenerativo	0,25 - 20	1 - 5 psi 70 - 350 mbare	compatto, senza olio, elevate portate

nell'ugello di entrata del compressore centrifugo successivo. La pressione di uscita, pressoché costante, dipende quasi esclusivamente dalla velocità della girante. I compressori assiali sono utilizzati in applicazioni che richiedo-



Confronto tra le classi di compressori per capacità di pressione (ata) e portata (m³/h)

forza centrifuga; l'azione è detta "rigenerativa" perché una certa quantità d'aria rimane nelle palette della girante e subisce un nuovo processo di accelerazione (con un effetto simile ad un processo di compressione multistadio). Un vantaggio significativo dei compressori rigenerativi è la sostanziale immunità alle condizioni operative che potrebbero causare qualche ostacolo al flusso d'aria sia in ingresso sia in uscita; anche in questo caso, comunque, il flusso in uscita è privo di pulsazioni.