

Romano Panagin

DINAMICA DEL VEICOLO FERROVIARIO

Nuova edizione



CET

Romano Panagin

**LA DINAMICA
DEL
VEICOLO FERROVIARIO**

CET
di Irene Caputo

Panagin Romano

Dinamica del veicolo ferroviario

ISBN 9788896470022

© 2009 by Casa Editrice Torinese di Caputo Irene

Via Pavia, 116/A – 10098 Rivoli (TO)

info@casaeditricetorinese.com

Prima edizione: Maggio 2010

In copertina immagine: Aeromobile Concorde.

Prof.Ing. ROMANO PANAGIN

Progettista e consulente nel campo dei trasporti e del RINA

Già- Amministratore Delegato della FIREMA RICERCHE- Torino-Milano

Responsabile dell'Innovazione e dell'Analisi Valore della FIAT-Torino

Responsabile dei Calcoli e Sperimentazione della FIAT-Ferroviaria-Torino

Responsabile dell'ambito del Centro Ricerche FIAT di alcuni progetti per il

Primo Piano Finalizzato Trasporti del Consiglio Nazionale delle Ricerche

(C. N. R.)

Professore presso il Politecnico di Torino per il Corso di Dinamica del

Materiale Rotabile

Professore presso il Politecnico di Milano per il Corso di Iterazioni

Elettromeccaniche nella Dinamica dei Rotabili

Autore di un centinaio di pubblicazioni tra studi,libri, articoli, ricerche, brevetti.

Libri Tecnici Pubblicati

La Dinamica del Veicolo Ferroviario- Terza Edizione

Costruzione del Veicolo Ferroviario (Editore CIFI)

Progettazione e Costruzione dell'Autobus

Progettazione e Costruzione degli Aeromobili

INTRODUZIONE

Nel campo ferroviario, l'aumento della velocità d'esercizio dei rotabili ha accentuato la necessità di approfondire i problemi relativi alla caratterizzazione dinamica dei veicoli, al fine di ottimizzare il comfort di marcia e contenere le sollecitazioni sul veicolo e sulla linea, tutti fatti che hanno ripercussioni tecniche ed economiche sull'esercizio.

Nel presente libro analizziamo solo i fenomeni tecnici, favorendo una conseguente possibile indagine economica sul tipo di rotabile definito dal suo campo d'esercizio.

La dinamica conoscitiva dei rotabili e le leggi che la regolano permettono di operare sui parametri che qualificano il rotabile, per permettere l'attività nel campo di utilizzo stabilito, ottimizzando il comfort verticale, laterale, acustico e le tensioni dinamiche che sollecitano le strutture.

Con l'incremento delle velocità e quindi delle sollecitazioni dinamiche agenti sui singoli componenti del veicolo, si richiedono riflessioni sulla strategia progettuale.

I componenti meccanici dei rotabili attualmente in esercizio per basse e medie velocità sono dimensionati per una vita infinita, anche se in realtà la vita operativa dei rotabili è mediamente da collocarsi sui trent'anni.

L'attuale dimensionamento considera i pesi propri dei componenti, i pesi su di essi gravanti e le sollecitazioni dinamiche, tipiche delle velocità tradizionali.

In una prospettiva contingente e futura dei veicoli più veloci, al progettista viene posto, nell'ambito della tradizione, il problema di:

I) *Aumentare le dimensioni strutturali dei componenti ferroviari in funzione degli incrementi dinamici, imposti dall'aumento delle velocità, riportando le strutture nel campo della vita infinita.*

II) *Mantenere le dimensioni strutturali dei componenti nella tradizione con materiali più resistenti e quindi accettando costi superiori*

III) *Mantenere le dimensioni strutturali dei componenti nella tradizione e accettare per i veicoli veloci strutture dimensionate a vita finita*

La prima ipotesi di lavoro è scartata per ragioni sia energetiche sia dinamiche, poiché aumentando la velocità bisogna contenere i pesi e l'aerodinamica dei veicoli al fine di limitare le potenze ed i pesi degli apparati motore.

Se così non fosse a determinate velocità i costi energetici risulterebbero superiori a quelli del trasporto aereo, a parità di velocità commerciale e peso utile trasportato.

Parallelamente, se si aumentano le dimensioni dei componenti e quindi dei pesi complessivi dei veicoli si incrementano le azioni dinamiche scambiate tra veicolo e linea a pari eccitazioni geometriche della linea.

La seconda ipotesi porta ad avere un veicolo ferroviario più costoso.

Rimane quindi valida la terza ipotesi, di mantenere le dimensioni dei componenti nella tradizione, accettando un dimensionamento a vita finita, con conseguenti riduzioni della vita operativa del veicolo a causa degli incrementati carichi dinamici, che aumentano le tensioni strutturali all'aumentare della velocità.

Un parziale aumento della vita operativa, può essere ottenuto facendo ricorso a materiali con caratteristiche meccaniche più pregiate, che permettono una riduzione delle dimensioni dei componenti di formazione del veicolo e conseguenti diminuzioni di peso dello stesso.

Questo indirizzo progettuale può essere valido per componenti stampati, fusi o rullati, mentre è carente per tutte le rimanenti strutture ferroviarie che nella generalità dei casi sono saldate.

E'infatti noto che i limiti di fatica degli acciai di qualità saldati, non differiscono molto dai limiti di fatica degli acciai normali saldati.

Le strutture delle casse e dei carrelli che seguono questa prassi costruttiva non possono quindi godere di questi miglioramenti progettativi.

Una terza ipotesi di lavoro è quella di innovare concettualmente il mezzo ferroviario, con concetti progettativi nuovi che soddisfino in sintesi i difficili problemi dei veicoli viaggianti ad alta velocità.

Ma l'innovazione nasce solo dopo aver conosciuto le caratteristiche dei veicoli ferroviari attuali e i limiti a cui sono soggetti.

Noto lo stato dell'arte, sono possibili estrapolazioni e varianti rispetto al conosciuto, nell'intento di migliorare il prodotto.

Questo libro sulla dinamica dei veicoli ferroviari ha l'ambizione di servire d'ausilio, per migliorare la progettazione dei rotabili tradizionali ed aprire prospettive logiche di innovazione.

Nella stesura complessiva del libro si valuta in prima istanza tutte le eccitazioni che possono interessare il moto dei rotabili.

I) Eccitazioni esterne al veicolo che giungono dalla linea e dal fluido che circonda il veicolo.

II) Eccitazioni proprie dei rotabili, ma limitate dalle caratteristiche di linea, come la curva e la frenatura.

III) Eccitazioni intrinseche al rotabile generate dal moto di serpeggio degli assili.

IV) Eccitazioni generate da tutta la catena trattiva di potenza, che parte dal motore e termina al contatto ruota rotaia.

Se queste sono le motivazioni che determinano la dinamica del rotabile, quantizzando i parametri inerziali, di rigidità e di smorzamento dei singoli componenti è possibile tramite modelli matematici semplificati o complicati, indagare e comprendere quali sono le oscillazioni di risposta proprie del rotabile, le frequenze proprie, le velocità critiche di esercizio, le sollecitazioni dinamiche, il comfort.

A complemento dei moti dinamici dei veicoli ferroviari, si è inserito il capitolo sull'oscillazione verticale delle casse, tenendo conto della massa strutturale, dell'inerzia alla rotazione, delle deformazioni flessionali ed al taglio e dello smorzamento viscoso per unità di lunghezza.

Le casse ferroviarie durante il moto del veicolo, presentano delle oscillazioni verticali, con un consistente smorzamento, non sempre giustificato dal materiale o dal tipo di struttura.

L'attenuazione si mantiene elevata e di tipo viscoso, correlata con la velocità d'oscillazione della cassa, spesso tipica delle superfici proprie delle carenature e dell'imperiale.

Al fine di contenere le ampiezze d'oscillazione delle casse è possibile variare i parametri interni od esterni alla struttura.

L'attenuazione dell'oscillazione nel tempo della cassa, permette di quantizzare il valore dello smorzamento in funzione dei parametri di costruzione del sotto telaio o dell'imperiale, tanto maggiore sarà lo smorzamento tanto maggiore risulta il comfort del veicolo e minore la rumorosità

Nel caso in cui risulti difficile variare tali parametri è possibile utilizzare una metodologia, dove una consistente massa, come ad esempio un motore, opportunamente posizionato e sospeso in cassa, può vibrare in controfasce, all'oscillazione della cassa, in modo da ridurne le ampiezze e indirettamente avere un maggiore smorzamento.

Disponendo di una panoramica completa sulle sollecitazioni dinamiche, a cui un rotabile è soggetto in funzione delle velocità d'esercizio, è possibile determinare la vita del veicolo nell'ambito del target di esercizio e stabilite certe intensità di traffico dei rotabili è possibile definire la vita della linea.

INDICE

Introduzione	pag.5	
Premesso.....	17	
MECCANICA PROPEDEUTICA DELLA LOCOMOZIONE		
1 Scorrimenti geometrici e cinematici al contatto ruota-rotaia	21	
1.1 - Assile isolato	22	
1.2 - Carrello rigido a due assili	25	
1.3 - Assale isolato a ruote indipendenti	29	
1.4 - Carrello rigido a due assali a ruote indi.....	32	
2. Forze di pseudo slittamento	37	
3. Frequenze di serpeggio.....	47	
3.1- Assale con ruote rigide a conicità costante	50	
3.2- Assale con ruote rigide a conicità variabile	50	
3.3- Assale con ruote rigide a conicità variabile e coppia di autoallineamento al contatto tavola di rotolamento-rotaia (spin)	54	
3.4 - Carrello a passo rigido con conicità delle ruote costante	58	
3.5 - Carrello a passo rigido con conicità delle ruote variabile	59	
3.6 - Carrello a passo rigido con conicità delle ruote variabile e coppia di autoallineamento al contatto tavola di rotolamento rotaia (spin)	60	
3.7 - Assale con ruote indipendenti a conicità costante	61	
3.8 - Assale con ruote indipendenti a conicità variabile	62	
3.9 - Assale con ruote indipendenti a conicità variabile e coppia di autoallineamento al contatto tavola di rotolamento rotaia	63	
3.10 Carrello a passo rigido con due assali a ruote indipendenti a conicità costante	64	
3.11- Carrello a passo rigido con due assali a ruote indipendenti a conicità variabile	65	
3.12 - Carrello a passo rigido con due assali a ruote indipendenti a conicità variabile e coppia di autoallineamento al contatto tavola di rotolamento rotaia	67	
Conclusione	69	
SPETTRIDILINEA		73
Definizione di spettro	80	
Spettro basico	83	
Spettro spezzato in due rette	84	
Spettro spezzato raccordato	86	

Andamento dei sovraccarichi dinamici in funzione della velocità sui componenti principali dei rotabili (rodiggio-carrelli-cassa)	88
SQUILIBRIODINAMICOCAUSATODALLERUOTE	
DEGLI ASSILI	99
Definizione	101
Gli assili.....	104
Squilibrio statico.....	106
Squilibrio di coppia.....	112
Squilibrio quasi statico.....	113
Squilibrio dinamico.....	115
Livelli di qualità di equilibratura di rotanti rigidi 1 1	118
FRENATURA	123
Percentuale di frenatura per freni a ceppi.....	124
Percentuale di frenatura per freni a dischi.....	128
Frenatura di stazionamento con freno a ceppi	133
Frenatura di stazionamento con freno a dischi.....	136
Peso frenato.....	138
Considerazioni sul peso frenato.....	141
Veicolo rimorchiato per treno merci.....	142
Veicolo rimorchiato per treno passeggeri.....	143
Veicolo a motore e rimorchiato con freno pneumatico ad alta potenza	145
Accoppiamento veicolo linea	146
CURVA	149
Limite fisiologico	154
Limite geometrico	156
Limite geometrico planimetrico	157
Limite geometrico altimetrico	159
LIMITE MECCANICO	173
Forze agenti sulla ruota tradizionale	173
Assetti statici dei carrelli ferroviari in curva	176
Resistenza laterale YR in curva dovuta allo scorrimento radiale sulla tavola di rotolamento	183
Resistenza longitudinale XR in curva dovuta allo scorrimento longitudinale sulla tavola di rotolamento	185
Resistenza longitudinale XB in curva dovuta allo scorrimento longitudinale del bordino della ruota di guida	187
Conclusione sulla resistenza aggiuntiva di curva dei veicoli ferroviari.....	188

Condizioni di svio dell'assile a ruote bloccate o a ruote indipendenti	190
Condizioni di ripage	198
Limiti di sicurezza per il veicolo e per la linea	199
Sghembo di binario	203
OSCILLAZIONI TORSIONALI GENERATE DALLE	
MOTORIZZAZIONI	211
Premessa	211
Eccitazioni torsionali	213
Tipi di smorzamento	217
Giunto idraulico	219
Cambio idraulico	223
Contatto ruota-rotai	224
Modelli matematici	226
Frequenza propria di un volano	230
Frequenze proprie e forme nodali, di due volani	230
Tipi di trasmissione	234
Automotrice diesel meccanica per basse velocità	235
Analisi della trasmissione del moto di una automotrice diesel meccanica per basse velocità	237
Frequenze proprie	237
Deformazioni torsionali	241
Decrementi	244
Aderenza	246
Usura ondulatoria	248
Oscillazioni libere	249
Condizioni di interconnessione tra i moti del veicolo e i moti torsionali ..	253
Analisi della trasmissione del moto di un'automotrice diesel idraulica per medie velocità	256
Analisi della trasmissione del moto di una elettromotrice per medie velocità ..	264
Analisi della trasmissione del moto di una elettromotrice per alta velocità	273
ELETTROMOTRICE CON TRASMISSIONE INNOVATIVA PER ALTE VELOCITÀ FUTURE (VELOCITÀ SUPERIORE AI 300 km/h	
Potenza necessaria al moto per una famiglia di convogli omogenei ...	303
Gruppo trasmissione ponte	310
Gruppo assile con asse cavo	311
Considerazioni statiche e dinamiche sul gruppo differenziale	315
Gruppi epicicloidali (o planetari)	315

Gruppo differenziale	317
Modello matematico della trasmissione differenziale	318
Validazione del modello matematico	322
Analisi dinamica della trasmissione	326
Conclusioni	336
DINAMICA DEL ROTABILE	339
Prima ricerca	344
Diagnosi sulle attenuazioni dei moti propri delle carrozze tipo Gran Comfort	347
Sospensione semplice	349
Doppio stadio di sospensione	351
Veicolo completo	355
Moti verticali di beccheggio e longitudinali	358
Moti laterali di rollio e di serpeggio	365
Seconda ricerca	375
Premesse e casualità d'impostazione	377
L'eccitazione	378
Modello matematico	380
Conclusione sull'indagine vibrazionale	386
Variazione dei parametri del veicolo	390
Variazione dei parametri della sala	391
Carichi dinamici al variare delle eccitazioni	394
Terza ricerca	397
Considerazioni comparative sulla dinamica tra carrelli ad assile e carrelli a ruote indipendenti con verifiche teoriche in campo sub e ipercritico, utilizzando modelli matematici risolti mediante il metodo di integrazione numerica di Runge-Kutta	400
Indagine teorica sul veicolo completo	405
La vibrazione verticale delle casse ferroviarie	410
Linee elastiche delle casse	424
STABILITA'	429
Assile isolato e reazionato elasticamente dalle molle delle boccole	432
Carrello isolato collegato elasticamente a meta cassa	437
Veicolo completo	444
SOLLECITAZIONI SPAZIALI AGENTI SU UN ROTABILE	453
Comparazione statica sui moti del bus, del treno e dell'aereo	453
Progettazione delle sospensioni dei rotabili	458

Sospensione verticale	458
Accelerazioni in cassa e oscillazioni dinamiche della sospensione secondaria in funzione della velocità e dei cedimenti tra secondaria e primaria	465
Accelerazioni in funzione della velocità e dei cedimenti tra primaria e secondaria	469
Sospensione laterale	470
Limiti fisiologici imposti dall'attraversamento di uno scambio	481
Ammortizzatore ad attrito colombiano	492
Vibrazioni con smorzamento di tipo colombiano	494
Vibrazioni con smorzamento di tipo viscoso	495
Confronto tra l'attenuazione con attrito coulombiano e viscoso	497
SOLLECITAZIONI DI FRENATURA	501
Premessa	504
Freni a ceppi sulle ruote	504
Freno a dischi	508
Modello matematico - Sollecitazioni termiche	513
Validazione del metodo matematico	515
Ottimizzazioni geometriche dei dischi di frenatura	517
Confronto disco ottimizzato (A) e dischi (B) e (C)	527
Dischi a settori	529
Conclusioni	533
SOLLECITAZIONI IMPOSTE DALLA CURVA E LIMITI DI SICUREZZA DEL VEICOLO E DELLA LINEA	537
Modello matematico per l'inserimento statico di un carrello ferroviario in curva	537
Considerazioni sui carrelli a ruote indipendenti	548
Modello matematico	549
Forze ed assetti dei carrelli ferroviari, condizioni di sicurezza del veicolo e della linea	552
Validazione del modello matematico per comparazione tra i dati sperimentali e i dati teorici	557
Esame comparativo teorico sul comportamento in curva dei carrelli ferroviari ad assili ed a ruote indipendenti	560
Usure	605
Usura dei cerchioni delle ruote	605

COMFORT DEL PASSEGGERO	613
Comfort verticale	620
Comfort laterale	626
Comfort acustico	637
Mascheramento	645
Rumorosità dei rotabili	649
Propagazione dell'energia acustica in campo libero, zone prive di superfici assorbenti o riflettenti	654
Determinazione del valore della sensazione sonora	656
Propagazione dell'onda acustica generata da una fonte appoggiata su una superficie riflettente	658
Propagazione acustica in un ambiente chiuso semiriverberante	662
Tempo di riverbero	666
LA VITA DEL VEICOLO FERROVIARIO	669
Premessa	669
Tipo di spettri e definizione del danno	671
Dinamici verticali dei veicoli ferroviari in funzione della velocità e del tipo di linea	675
La vita del veicolo ferroviario in funzione della velocità	681
Conclusione	698
LA VITA DELLA LINEA FERROVIARIA	701
Caratteristiche meccaniche della rotaia	702
Definizione della linea ferroviaria	705
Ricerca teorica	707
Lunghezza d'onda, rigidità verticale, laterale e torsionale della rotaia e della massicciata	708
Tensioni ideali statiche sulla rotaia	717
Usura rotaia	722
Bibliografia	725

PREMESSA

La dinamica del veicolo ferroviario nasce dal contatto tra la tavola di rotolamento della ruota e la rotaia, partendo da tale punto si determina il comportamento dell'intero veicolo in rettilineo, curva e frenatura.

Il comportamento dinamico del veicolo, si evidenzia tramite quattro eccitazioni, una forzante di serpeggio imposta dall'accoppiamento delle ruote con la rotaia, due eccitazioni imposte dalle disuniformità di linea, in senso altimetrico e planimetrico, una quarta eccitazione imposta dal veicolo in frenatura, ma limitata dall'aderenza tra ruota e rotaia, saltuarie ma non trascurabili sono le azioni aerodinamiche.

Nella consuetudine per costruire il modello matematico del veicolo tradizionale, si è soliti dare come conosciuta la cinematica dell'accoppiamento ruota-rotaia, mentre si graduano in funzione dell'esercizio le altre eccitazioni.

L'eccitazione di linea è caratterizzata dalle disuniformità geometriche verticali e laterali delle linee che non si presentano perfettamente lineari e planimetriche.

Le disuniformità planimetriche sono di tipo particolare, come ad esempio le curve definite dalla loro geometria, mentre le disuniformità generalizzate presenti su tutta la linea, sono espresse da spettri di tipo temporale o spaziale, entrambe le disuniformità sollecitano in maniera diversa il veicolo in funzione della velocità d'esercizio.

Gli spettri si riferiscono a linee nuove, in buono stato di conservazione, possono però essere alterati gli spettri e degradati in funzione delle sollecitazioni a cui sono sottoposte le linee, sia dal passaggio dei treni che dalle condizioni climatiche.

Le condizioni di frenatura pur imposte dal veicolo, rispondono a caratteristiche d'aderenze tra ruota e rotaia, mediate dall'esercizio normale e casuale, per cui si

hanno andamenti stocastici delle intensità di frenatura.

Il mancato approfondimento sull'eccitazione della forzante delle ruote, è data come cinematicamente conosciuta e rientra nella tradizione e nella razionalizzazione semplificata della modellazione.

Sembra invece importante chiedersi i motivi che hanno reso tradizionale il concetto, valutarne il processo mentale prioritario, conoscerne i limiti di comportamento ed eventualmente estrapolare soluzioni innovative.

Lo studio attuale è indirizzato ad esplicitare queste leggi fondamentali date come accettate, ma generalmente non note, pur affrontando il problema sotto un'ottica semplificata ma sufficiente a chiarire la cinematica del moto.

Per impadronirsi delle leggi di base bisogna partire dagli scorrimenti relativi tra ruota e rotaia, resi possibili dal movimento dell'assile e del carrello sulla linea.

Immaginando una linea ferroviaria teorica, perfettamente retta e piana, i movimenti consentiti sono la traslazione longitudinale, lo spostamento laterale e la rotazione di serpeggio.

Dagli scorrimenti relativi imposti da questi movimenti si passa alla definizione delle forze agenti sulle ruote e quindi sugli assili, per autodefinire la cinematica dei corpi.

I primi moti che si studiano sono caratteristici della concezione tradizionale, che vede l'assile formato da un assale con calettate rigidamente le due ruote, mentre in una prospettiva futura s'indaga sulla rotazione indipendente delle due ruote sull'assale.

Questo primo approfondimento ci porta a ritrovare leggi note, i limiti di tali leggi e le possibilità di superamento delle limitazioni, suggerendo soluzioni avveniristiche e migliorative del processo mentale tradizionale.

Le indicazioni sono solo d'indirizzo e non complessive dell'intero fenomeno dinamico tuttavia ugualmente importanti per capire le nuove leggi sul movimento del veicolo ferroviario.

A questo livello termina lo studio primario, mentre la modellazione del veicolo ferroviario si approfondisce con l'introduzione delle masse dei componenti e il loro accoppiamento tramite rigidità e smorzamenti all'intero veicolo, al fine di definire altre caratteristiche, come ad esempio la velocità critica del veicolo, le sollecitazioni a cui l'intero veicolo è sottoposto, i vari modi di vibrare del veicolo. Note queste caratteristiche è possibile definire la vita del veicolo e della linea, il comfort del passeggero, la sicurezza rispetto al limite d'esercizio del veicolo e della linea ferroviaria.



