

运输机械的热电 驱动装置

斯契潘諾夫著



机械工业出版社

运输机械的热电驱动装置

斯契潘诺夫著

彭振邦、梁其忠等译

丁珂校



机械工业出版社

1959

出版者的話

本書是一本專門研究車輛（內燃機車、汽車、坦克及其他陸上運輸機械）電力傳動理論問題的書籍。

在本書中，簡述有關車輛的扼要知識，自動調節理論的基本概念，車輛熱機的有关特性和調節，深入地研究和分析電力傳動問題中熱機、發電機和牽引電動機自動調節的理論和方案以及它們的共同工作原理，探討電力傳動車輛的特殊問題——起動和制動、調節的轉移過程等等。

書中除了結合理論分析引入現有典型電力傳動車輛的原則方案和工作特性以外，還引入了蘇聯學者和設計師們所提出的具有重要發展前途的新型實驗方案的敘述和評論。

本書可作為從事車輛設計學的工程技術人員的參考書，也可作為高等學校有關專業學生的參考書。

本書由彭振邦、梁其忠、魏辰官、孫均島、陳振毅、王新濤翻譯，由丁珂校對。

蘇聯 А. Д. Степанов 著 'Теплоэлектрический привод транспортных машин' (Машгиз 1953 年第一版)

著者：斯契潘諾夫 譯者：彭振邦、梁其忠等 校者：丁珂

NO. 2110

1959 年 5 月第一版 1959 年 5 月第一版第一次印刷

787×1092³/₂₅ 字數 233 千字 印張 11⁹/₂₅ 0,001—等, 100 冊

機械工業出版社(北京阜成門外百萬庄)出版

機械工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

北京市書刊出版業營業許可証出字第 008 號 定價 (11) 1.80 元

目 次

原序	5
第一章 概論	7
1. 热电站的特点	7
2. 运动阻力	14
3. 自动调节理论的基本概念	23
第二章 运输用热机的特性和调节	33
1. 运输用热机的基本参数	33
2. 热机的特性	36
3. 热机速度的调节	46
4. 气轮机的特性和调节	66
第三章 热机到驱动轮之间的功率传递	71
1. 发动机和传动所需满足的要求	71
2. 机械传动	81
3. 动液传动	84
4. 电力传动的概念	92
5. 各种传动的应用范围和比较	94
第四章 热机与发电机的共同工作	98
1. 发动机-发电机的工作条件	98
2. 发电机的非自动调节	102
3. 发动机-发电机的自动调节	107
4. 发电机具有凸出形特性时的发动机-发电机自调节	117
5. 发电机具有双曲线特性时的自调节	141
6. 各种自调节系统的比较及其应用范围	155
第五章 发动机-发电机功率的自动调节系统	159
1. 自动调节系统的类型	159
2. 分别调节系统	162
3. 串迭调节系统	184
4. 热机与发电机的联合调节	198
5. 气轮机的自动调节	204
6. 各种自动调节系统的比较	209
第六章 牵引电动机的调节	214
1. 牵引电动机的特性	214
2. 电动机的电压调节	219
3. 电动机的激磁调节	226

4. 电动机的自动操縱	233
5. 履帶車輛电动机的操縱	248
第七章 起动和制动	255
1. 起动特性	255
2. 起动电流的自动調節	267
3. 电力制动	267
第八章 調節坚定性和轉移过程的問題	272
1. 一般概念	272
2. 自調節系統坚定性的分析	278
参考文献	292

原 序

1903年在俄罗斯内河輪船“瓦达尔号”上首先采用的由热机和电力傳动組成的驅动方式，在各个經濟部門中、特别是在运输业中，得到日益广泛的采用。1924年世界上第一輛电力傳动干綫內燃機車在苏联的設計和制造，电力和机械傳动实验機車的詳細研究，阿石哈巴德鉄路上世界上第一个內燃機車区段的运用經驗，都促使了苏联以及其他国家在大功率內燃機車上完全采用电力傳动的决定。目前，在航海和內河船舶、柴油機車、鉄路摩托車、公共汽車、自动装卸車、挖土机、起重机、鑽探机等上，热电驅动亦已被有效地采用。

現代的热电驅动是一个独立的动力系统，它的主要构成部分——热机、发电机和电动机是自动調节的，并且相互之間具有紧密的联系。这种情况，再加上运输和起重机械的繁重的运用条件，就使对热电驅动各构成部分和整体的調节系統及特性提出了特殊的要求。

在苏联文献中，个别热电車輛（特别是內燃機車）的构造，工作和特性已有很詳細的介紹，但是热电驅动的一般性工作原理、构成部分特性的选择 and 計算、調节系統的分析 and 选择、車輛的操縱以及其他热电車輛理論方面的問題則很少介紹。为了在运用中正确地利用車輛，这些問題的清楚理解是非常重要的；而在設計新的热电驅动車輛时更为需要。本書獻給讀者的目的是为了在一定的程度上弥补这个空白点。

热电驅动理論所牽涉到的問題很多，这些問題不可能在篇幅不大的書中充分論述。而且，其中有許多問題在理論上和实际上还研究得不够。因此作者将限于叙述热电驅动理論的基本問題及其应用在陆上运输車輛时构成部分的計算。热电驅动的特点之一，是驅动的工作特性和热机的工作情况主要是由电力傳动的特性和

調節系統來決定的，雖然車輛的構造在很大的程度上是由熱機及其有關裝置來決定的。在本書中，不研究構造問題，而主要討論電力傳動。本書適用於已熟悉車輛構造、以及熱機和電機的理論和構造的讀者。

對本書的意見和批評，請寄莫斯科，特烈齊揚夫斯基街1號，機械工業出版社。

第一章 概 論

1 热电車輛的特点

热电驱动的概念及其用途 热电驱动就是車輛的电动机驱动,其中电动机由專門为它装备的热力装置取得电能。热电驱动可以認為是电力驱动的一种变型。但是它即使和与它最相近的发电机-电动机系統比較起来,亦有很多特点。在发电机-电动机系統中,除了工作机构的电动机和操縱电动机的器械以外,还包括由发电机和驱动电动机組成的总成。这个总成由电路供电,并且只是为操縱工作机构而装的能量变换器。在热电驱动中,动力总成是驱动中的独立能源,它同时还用来操縱机构的工作情况。因此,热力总成是所謂热电驱动整个构造中的一个有机部分。

用热机驱动車輛和机构时,并不一定要将發动机所發的能量轉变成电能,然后再由电动机将电能轉变成机械能的。相反的,直到現在为止,这样的轉变在大多数情况下是不采用的。热机的軸常常直接和工作机构相連,如飞机發动机的軸和螺旋桨的連接就是一个例子。

在很多情况下,工作机构通过速比不变或可变的傳动装置而从热机取得能量。这种装置就称为傳动,它用来在工作机构軸上得到与热机軸上数值不同的角速度和扭矩。

用在汽車、拖拉机等上的机械傳动(齿輪傳动)得到最广泛的应用。近来液力傳动和液力机械傳动亦有采用。在热电驱动中,由于电能主要是用来改变工作机构軸上的角速度和扭矩,所以发电机、电动机以及用来操縱它們器械和机械总成的构造通常称为电力傳动。除了能改变扭矩和角速度以外,利用电能还可以解决一系列別种傳动所不能解决的其他問題。例如,發电机功率不仅可以用来驱动主要机械,还可以供給其他用电部件(操縱綫路、

輔助機械等等)。電氣設備的各個構成部分通常不只用來將能量由熱機傳給工作機構，還用來調節熱機的工作情況、操縱其他機構和防止設備各部分發生事故等等。因此，“電力傳動”這一名詞用到熱電驅動的電氣設備上是有條件的，而只表示這種設備的主要用途。

在航空、海洋和內河航運以及陸上（地面的）運輸中，廣泛的採用熱機作為驅動。運輸中的運用條件具備固有的特點，所以使車輛[●]移動的驅動裝置所需滿足的要求和固定式工業驅動裝置的要求不同。陸上車輛工作特性的區別最大，這種車輛的熱電驅動是本書的研究對象。

陸上車輛的特點 陸上車輛包括機車、自動車輛、公共汽車、汽車、牽引車、自動裝卸車以及其他在鐵路、公路或土路上用本身或所掛拖車來運輸貨物和乘客的機械。其中還包括用來運轉各種農業工具（拖拉機）、戰爭工具（坦克、自行火炮）等等的機械。在某些情況下，陸上車輛還包括若干種自動工作機械：挖土機、鐵路起重機、自動築路機等等，但是這種車輛的移動速度很小，並且具有一系列與車輛在陸上運動無關的大功率工作機構，所以它們的驅動所需滿足的特殊要求和專供運輸用的車輛不同。

雖然各種車輛在構造和用途上極其不同，但它們還是具有一些共同的運用條件，這些條件是車輛和其他機械及機構不同的地方。

陸上車輛最特出的運用特點有下面這些。

1. 車輛及其設備在很大的程度上受到氣候和大氣的影響，而氣候和大氣條件在一次旅程中可能急劇地改變。
2. 陸上車輛行駛的道路具有很大的剛性和不平坦性。由於這

● 在文獻中，運輸貨物和旅客的機械還沒有統一的名詞。飛機、汽車……等，通常被稱為運輸工具。鐵路上定有「運輸資料」的名詞，後來也常被推廣在其他運輸部門中。運輸資料不僅指機車，而且包括車輛以及其他非機動的掛掛車輛。

些原因，另外还因为列車是由若干节拖車連接而成的，所以車輛及其設備在运动时受到振动和撞击。

3. 車輛的工作效率，在很大的程度上取决于車輛本身或拖車中运输的有效載重对車輛本身和設備重量的比值。因此就必须大力降低驅動裝置的重量和尺寸，这在很多情况下大大地限制了車輛本身的尺寸。

4. 在运动中，并没有熟練的工程-技術人員来照顧設備。同时即使設備很小的故障也会带来很大的損失。例如，当列車因微小故障而在行駛中停車时，帶給国民經济的損失，要比修理这些損坏的費用大得多。

5. 由于道路坡度、列車編組、貨物量等等的变化，运动阻力所确定的負荷，将不按駕駛員的意志而在極大的範圍內变化。这种負荷在極小的時間間隔內变化着。

6. 車輛在任何一個瞬間的运动速度都是不定的，并且可能在一定限度的巨大範圍內变化；其中制动等条件所容許的限制範圍內的个别道路区段上的速度并不是最重要的，而貨物和車輛在道路上的時間或道路区段所占用的時間等等，却是比較重要的。換句話說，就是最重要的是平均速度——路程行駛的平均速度、区段速度、交通速度。因此，如果設備的工作条件或其他原因認為合适时，完全可以在一次全程行駛中降低某一区段的速度的，而用提高另一区段速度的方法来补足。同时，为了提高运输效率，重要的是在道路的所有区段上都能用該車輛的可能最大速度。

在上述特点中，前四項在車輛尺寸和重量受到严格的限制条件下，对車輛的工作可靠性及其零件的强度提出了較高的要求。

陆上車輛使用特性的其他二个运用特点，則对設備調節的特性和方法提出了特殊的要求。如下文所述，內燃机的特性不能滿足陆上車輛的运动条件。正因为如此，所以在具有內燃机的車輛上要采用速比可变的傳動[●]；特别是电力傳動。

● 在后文中，这种傳動簡称为「可变傳動」。

热机不仅包括内燃机，而且还包括其他的将热能转变为机械能的发动机，其中有蒸汽机和蒸汽轮机。对车辆的工作条件来说，蒸汽机的特性比内燃机的特性更为合用。因此，在蒸汽机车上，蒸汽机经曲柄连杆机构直接与行动车轮相连，而没有可变传动。在具有蒸汽轮机的机车中则采用电力的可变传动。在后文中，热机就是指内燃机。

热电车辆的类型 陆上车辆可以根据下列很多特征来分类。

1. 根据车辆所行驶的道路性质来分，可以分为：轨道车辆（铁路机车和自动车厢），公路车辆（公共汽车、汽车）和工地车辆（履带车辆、高度越野性的汽车）；

2. 根据运载方式来分，可以分为本身承载有效载重或乘客的车辆（车厢、公共汽车和自动装卸车）和本身并不承载而用所挂拖车来载运货物或乘客的车辆（机车、牵引车）；

3. 根据用途来分，可以分为：干线车辆，市内车辆，调拨车辆，工业车辆，市郊车辆及其他；

4. 根据所运货物的性质来分，可以分为运货车辆、通用客车、专用客车和运输特种机械及工具的车辆等等。

除此以外，具有热机的车辆还可以：

1. 根据热机的种类分为强制点火式活塞发动机的、压缩点火式活塞发动机（柴油机）的、气轮机的；

2. 根据发动机到驱动车轮之间的功率传递方式分为直接连接的、机械传动的、液力传动的、液力机械传动的、气力传动的以及电力传动的。

陆上运输的热电车辆包括下列具有电力传动的车辆：

1. 热电机车（电力传动的内燃机车^②）——运动所需能量由柴油机供给的机车；

② 「内燃机车」这个名词用在柴油機車上不能認為是恰當的，因為從這個字的意義上了解，它應代表所有具有內燃機的機車，但在實際上，這個名詞僅指柴油機車而言。

2. 渦輪电机車 (電力傳動的气輪機車、電力傳動的蒸汽輪機車)——能量由气輪機或蒸汽輪供給的機車;

3. 热電車廂 (電力傳動的鐵路摩托車)——運動所需能量由熱機供給的自動車廂;

4. 柴油机电動列車 (電力傳動的柴油機列車)——由一輛或几輛柴油机电動車廂組成的、挂有拖車的列車;

5. 電動公共汽車 (電力傳動的公共汽車)——无軌公用客車;

6. 电气自動裝卸車 (電力傳動的自動裝卸車)——附有機械化裝卸貨物裝置的自動車;

7. 热電驅動的坦克——用來運轉裝在迴轉炮塔上的火炮的自動裝甲履帶車輛;

8. 热電驅動的自行火炮——用來運轉安裝在車體上的火炮的自動裝甲履帶車輛。

上面所列举的只是已經裝有熱電驅動的車輛。在鐵路運輸方面，熱電驅動用得最為廣泛，特別是在大功率機車上。現代的內燃機車，几乎全部用電力傳動。

熱電車輛理論的問題 熱電車輛組成：

1. 機械部分，其中包括車壳 (車身)、輪架、彈簧懸置、行動部分 (車輪、履帶);

2. 牽引電動機，它通常經不變齒輪傳動與行動部分相連接;

3. 熱力裝置，其中包括熱機及發電機;

4. 一系列的輔助裝置。

由一輛或几輛機動車輛和若干輛拖車組成的運行列車是一個獨立系統，這個系統與道路及周圍介質之間具有相互的作用。在熱機中，燃料的化學能轉變為旋轉機械能，而傳給發電機。發電機將它轉變為電能，再由牽引電動機將它重新轉變為機械能。電動機所發出的扭矩，由於行動部分和道路之間的附着，而引起了道路對行動部分的反作用力，反作用力的方向和運動方向相同，稱為

切綫牽引力。這種推動力和運動阻力抗衡。牽引電動機發出的牽引力和運動阻力之間的互相關系，確定車輛的運動情況。由一輛或幾輛機動車輛和拖車所組成的列車的直綫運動，一般方程式可以寫成下列形式：

$$\delta \frac{(P+Q)10^3}{g} \cdot \frac{dv}{dt} = F_k - W \text{ 公斤,} \quad (1)$$

式中 F_k ——牽引力（公斤），該力為列車牽引電動機所發出的，並換算到行動部分（車輪、履帶）與道路接觸點上的諸力之和；

W ——亦換算到接觸點上的列車運動阻力總和，公斤；

P ——列車中機動車輛的總重量，噸；

Q ——列車中拖車的總重量，噸；

v ——列車的運動速度，公尺/秒；

g ——重力加速度，9.81 公尺/秒²；

δ ——考慮旋轉機件質量慣性的無因次係數。

旋轉機件質量慣性係數（特別是在鐵路運輸的牽引計算中）常常用下式表示

$$\delta = 1 + \gamma,$$

式中 γ ——該車輛或列車旋轉機件質量對車輛或列車質量的比值。

列車的運動阻力隨土壤性質、道路坡度、運動速度等等而變。當列車行駛時，運動阻力在很大的範圍內變化。根據方程式（1），運動阻力的變化會引起運動速度的變化。這種變化是車輛中一連串連續作用的開端：阻力改變運動速度，速度的變化引起牽引電動機工作情況的變化，而牽引電動機工作情況的改變又引起發電機及與它相連的熱機的工作情況改變。

車輛駕駛員（司機）所作的車輛工作情況的改變，亦是車輛的一種外界作用。在現代的热電車輛上，車輛的運動主要是利用對熱機的作用來操縱的。熱機工作情況的變化將在車輛中引起從

热机到發电机、从發电机到牵引电动机、最后引起車輛运动速度变化的一連串作用。

此外，还有很多其他的外界作用：由于道路不平坦引起車輛寄生运动而發生的振动和撞击，拖車通过連接器械而对机动車輛的作用，在車輛失去附着时运动情况的变化等等。这些作用对車輛的工作是有重要影响的，而在設計时应该加以考虑。

但是，决定車輛参数和特性及其設備的主要构成部分(热机、發电机和牵引电动机)工作情况的主要外界因素是車輛与其运动阻力的相互作用，以及运用条件中运动阻力的变化。

在設計車輛时，主要的問題是：

1. 根据車輛使用目的之运用条件来选择車輛的参数(功率、速度、牵引力、重量、主要尺寸)；
2. 选择热机、發电机和牵引电动机的参数，以保证它們共同工作时的調諧配合以及和車輛牵引参数的适应；
3. 选择設備各部分的特性、它們的調节方法、它們的防护和操縱，以保证它們坚定和可靠的工作以及車輛在各种运用条件下的最佳利用；
4. 进行車輛及其設備各部分的設計工作，以使在尽可能小的尺寸、重量和价格下保证可靠的長期工作以及维护的最大方便性。

在車輛运用中，主要的問題是：

1. 車輛設備各部分的調节和校准，以保证車輛的最佳特性及設備各部分的正确工作情况；
2. 使用情况(負荷、速度等等)的确定，以保证車輛及其設備的最佳利用，而对車輛及其設備各部不致引起危險；
3. 車輛的有規律的、熟練的维护和修理，以保证車輛較長的工作寿命和工作可靠性。

为了能正确地解决上述問題，必須研究車輛、它的部件和元件的构造，設備各构成部分的性能和特性以及調节和操縱的

方法。

热机、发电机和电动机的构造和工作过程另有專門的著作来加以研究。車輛上热机、发电机、激磁机和牵引电动机的共同工作，它們的特性和参数的正确配合，調节、操縱和保护的方法以及車輛与道路的相互作用的問題則是热电車輛理論的命題。

2 运动阻力

車輛的运动是复杂的，在一般情况下，这种运动中包括沿車輛軸綫的直綫运动（水平运动或与水平綫成某种傾斜角度的运动）以及繞軸綫的迴轉运动。直綫运动可用方程式（1）来表示，它是对各种类型的車輛都通用的。运动是在牵引力的作用下發生的，牵引力是牵引發动机引起的，而和运动阻力相抗衡。在上升坡道上运动时所引起的沿直綫运动方向的附加作用力也包括在阻力中。牵引力和阻力之間的差值就是慣性力。各种类型的車輛（有軌車輛、公路車輛、履帶車輛）的运动阻力是有所区别的，但是它們在原則上都屬於同一型式。轉向时的差別比較巨大，特別是履帶車輛。有軌和无軌的輪式車輛，迴轉时运动情况的变化并不巨大，实际上可以用附加阻力的方式加以考虑，而运动仍旧可以用方程式（1）来表示，履帶車輛在迴轉运动时和直綫运动时具有很大的差別，而运动方程式的形式应有不同，而阻力也另有計算方法。这种运动方程式和阻力的詳細分析在介紹各种类型車輛的牵引理論和牵引計算的著作中叙述[2]、[10]、[14]、[19]①。

下面对直綫运动和迴轉时的运动阻力，作簡短的介绍。直綫运动阻力是用通用方程式表示的，但是指出在不同类型車輛上确定这个阻力时的特点。履帶車輛迴轉的特点討論比較詳細，因为这对牵引發动机工作情况及其調节有重大的影响。

直綫运动的阻力、牵引計算中，通常利用运动阻力比量的概念，它就是阻力（公斤）和列車或車輛重量（吨）的比值。如果

① 方括号中的数字是指書表参考文献目录中的文献。

将方程式 (1) 的二侧各除以列车重量 ($P + Q$), 则运动方程式变成下列形式:

$$\frac{810^3}{g} \cdot \frac{dv}{dt} = f_k - w \text{ 公斤/吨}, \quad (2)$$

式中 $f_k = \frac{F_k}{P+Q}$ —— 牵引力比量 公斤/吨;

$w = \frac{W}{P+Q}$ —— 列车的运动阻力比量, 公斤/吨。

直线运动阻力可以分为滚动阻力 W_r , 空气阻力 W_w 和坡道阻力 W_i 。

滚动阻力随车轮在道路上的压力、车轮材料和土壤的性质、道路的表面状况、车轮尺寸、行动部分的构造等等而变。在实际计算中, 假定滚动阻力和车轮在道路上的压力成正比; 亦就是当重量 q 在各轮间按一定方式分配时, 它和车辆的重量成正比。所以, 滚动阻力可以用滚动阻力比量来表示:

$$w_r = \frac{W_r}{q} \text{ 公斤/吨}。$$

在图 1 上, 表示汽车具有一定型式的轮胎时, 滚动阻力比量随轮胎中空气压力而变的关系曲线。

滚动阻力比量 (滚动阻力系数) 的近似值列举在表 1 中。

滚动阻力比量中亦包括车辆轴承中的摩擦。在履带车辆中, 履带铰链中和履带与驱动轮之间有很大的摩擦损失。这种损失可以采用履带效率的概念来考虑, 而不包括在运动阻力中。

空气阻力取决于运动速度、车辆横断面积及其形状, 并且还随大气条件而变。当确定陆上车辆的空气阻力时, 因为空气密度的变化范围很小, 所以假定密度是不变的。空气阻力可以按下式计算:

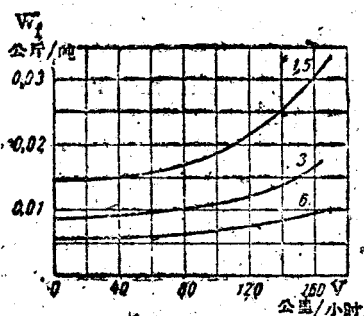


图 1 在不同的轮胎气压下 (1.5; 3 和 6 公斤/公分²) 汽车的相对滚动阻力随速度 v 而变的关系曲线。

$$W_w = \alpha v^2 F \text{ 公斤,} \quad (3)$$

式中 F ——車輛的橫斷面積，公尺²；

α ——車輛的形狀係數（流綫型係數）；

v ——運動速度，公尺/秒。

表1 滾動阻力係數 w_f 和附着係數 ψ_K

道路性質	汽 車		拖 拉 機			
	w_f	ψ_K	鋼輪(有刺)的		履帶的	
			w_f	ψ_K	w_f	ψ_K
瀝青、水泥：						
干的	0.015~0.020	0.7~0.8	0.92	—	0.05~0.06	—
濕的	0.015~0.020	0.3~0.4	—	—	—	—
土路：						
干的	0.025~0.035	0.5~0.6	0.05~0.08	0.6~1.0	0.06~0.07	0.9~1.1
雨后	0.05~0.15	0.3~0.4	—	—	0.07~0.10	—
雪路	—	0.2~0.4	0.95	0.04	0.06	0.6
冰凍路	—	0.2~0.3	—	—	—	—
耕地	—	—	0.15~0.20	0.3~0.4	0.08~0.10	0.6~0.7
干土	0.1~0.3	0.5~0.6	—	—	—	—
干沙地	0.2~0.3	0.5~0.6	0.3	0.2	0.10~0.15	0.4~0.5
草地	—	—	0.14~0.15	0.8~1.0	0.07~0.08	0.6~1.2

空氣阻力的數值，在很大的程度上取決於車輛的形狀。加上流綫型的外殼，有時可能使阻力值降低30~50%。車輛形狀的影響可用係數 α 來考慮。

由公式(3)可知，空氣阻力與車輛的重量無關。但是，為了計算方便起見，常常用空氣阻力比量的概念：

$$w_w = \frac{\alpha v^2 F}{q} \text{ 公斤/噸。} \quad (4)$$

在鐵路列車的牽引計算中，滾動阻力和空氣阻力並成一個數值，而稱為基本運動阻力：

$$W_0 = W_f + W_w \text{ 公斤。} \quad (5)$$

基本運動阻力比量