

# 重型车辆电传动控制系统设计与仿真<sup>\*</sup>

李刚 张文明 陈树新

(北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

**【摘要】** 设计了由转速、电流双闭环构成的电传动控制系统,使驱动电动机的输出功率与发动机输出功率相匹配,保证发动机能按其经济特性运行。启动时保持恒定最大允许电流,在尽可能短的时间内增加转速,使车辆具有良好的启动性能。在车辆行驶中保持系统的恒定输出,克服行驶阻力突然变化等扰动的影响。运用 Matlab 进行了仿真,得到了良好的静、动态品质。

**关键词:** 重型车辆 电传动 电动轮 控制 仿真

**中图分类号:** U463.2; TP273 **文献标识码:** A

## Design and Simulation of Electric Drive Truck Control System

Li Gang Zhang Wenming Chen Shuxin

(School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

### Abstract

An electric drive truck control system composed with a speed-current dual loop was designed to ensure the output power of electromotor and engine were matched and the engine can operate in economical condition. This demand the engine keep maximum permit current and accelerate in the shortest time to keep the vehicle's best startup capability. Changeless output of vehicle in operation was guaranteed and impact like change when overcoming resistance during driving was overcome. Simulation result with Matlab provide the static and dynamic characteristic of the system.

**Key words** Truck, Electric drives, Wheel, Control, Simulation

### 引言

随着载重量的不断增加,重型车辆不断增加的传输扭矩使得液力机械传动的的设计和制造难度不断增大。因此,目前国际上大功率重型车辆普遍采用电传动的驱动方式。电传动控制系统的核心问题是如何做到电动机和发动机的功率匹配。通过分析功率流的传递来设计电流、转速双闭环调速系统并进行仿真。

### 1 电传动原理

柴油发动机直接驱动一台三相交流发电机,将机械能转变成电能,经过整流器后通过电缆将电能输送给驱动电动机<sup>[1]</sup>。电动机经减速装置直接驱

动车轮,如图1所示。

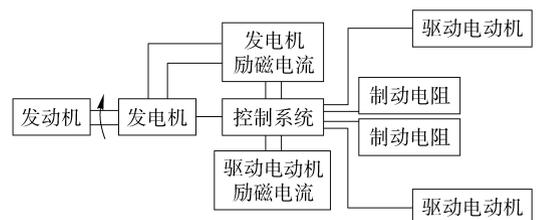


图1 电传动系统原理框图

Fig.1 Principle sketch of electric drive system

以矿用自卸汽车为代表的重型非公路车辆使用电传动已经成为一种基本形式,可以采用直流驱动和交流驱动两种方式。

电传动比机械传动有更高的发动机功率利用率(对于重型汽车来说,比传动效率更有意义),易于实

现电子智能控制,可以方便地实现零速度大转矩。

电传动可以实现电动制动和电动缓行,在正常工况下不需机械制动,减轻了制动器的磨损,提高了车辆的可靠性<sup>[1]</sup>。

直流驱动电传动系统,主要完成以下3项功能:

- ①发动机负荷与驱动电动机输出功率匹配,保证发动机能按其经济特性运行。
- ②当车辆运行中行驶阻力发生变化时,驱动电动机能迅速做出相应调整。
- ③应有良好的起动性能。

## 2 发电机理想的外特性

三相交流发电机作为驱动电动机的电源,需要改变输出电压以满足车辆频繁起动和调速的要求;作为柴油机负载,又要求行驶阻力引起输出电流变化时维持柴油机功率不变。为此,需先研究车辆的理想外特性。

因为驱动电动机经减速装置直接驱动车轮,所以有与车辆相似的外特性曲线。理想的电传动车辆牵引外特性曲线如图2所示,图中 $ab$ 段车辆处于起动阶段,此时电动机输出最大扭矩; $bc$ 段车辆在恒功率阶段; $cd$ 段为车辆的最高设计时速限制。

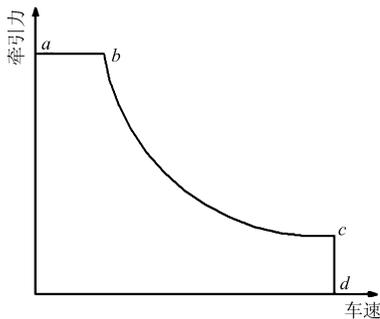


图2 车辆外特性曲线

Fig.2 Motor characteristic curve

发动机的转矩和功率曲线如图3所示。根据发动机和车辆的特性曲线,理想工作情况下发电机外特性曲线如图4所示。图中曲线 $abcd$ 为持续工作区;曲线 $ofga$ 为车辆行驶中短时过载工作区; $e$ 为额定电流点; $b$ 为最大电流点; $ab$ 段发电机输出

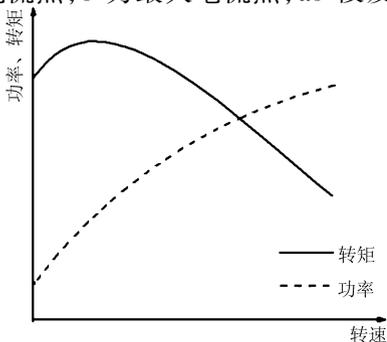


图3 发动机转矩和功率特征曲线

Fig.3 Engine characteristic curve

最大扭矩,对应电动机输出最大扭矩; $bc$ 段发电机输出功率恒定,对应车辆恒功率工作段; $cd$ 段受发电机最高电压的限制,对应车辆最高时速限制。

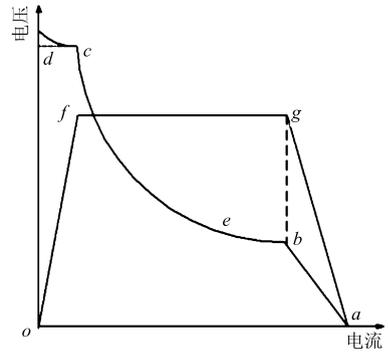


图4 发电机外特性曲线

Fig.4 Generator characteristic curve

双闭环调速系统存在电流和转速两种负反馈作用,它们在不同的阶段起主导作用<sup>[2]</sup>。为了适应车辆频繁起动、制动的要求,实现发电机理想的外特性曲线,在车辆起动过程中通过采用电流负反馈获得一段使电流保持为最大值的恒流过程。此时只有电流负反馈而没有转速反馈,电流始终保持为允许的最大值(图4中 $ab$ 段),充分利用电动机的允许过载能力,保持发动机输出最大扭矩(图3所示),使车辆以最大扭矩起动(图2中 $ab$ 段)。到达稳态后只需转速反馈,不再靠电流负反馈发挥主要作用,此时转矩与负载平衡,发电机输出电流值下降,进入稳态运行(图4中 $bc$ 段)。车辆行驶速度随着发动机输出扭矩的降低而升高(图2中 $bc$ 段);当发电机电压到达最大值后(图4中 $cd$ 段),此时车辆到达最高设计时速(图2中 $cd$ 段)。

三相交流发电机的输出功率与柴油机有效功率之间的关系可表示为

$$P_f = 1\,000(N_e - N_{fj})\eta_e\eta_z = U_f I_f \quad (1)$$

式中  $P_f$ ——三相交流发电机的输出功率, kW

$N_e$ ——柴油机有效功率, kW

$N_{fj}$ ——由柴油机驱动的辅助设备所消耗的功率, kW

$\eta_e$ ——三相交流发电机效率

$\eta_z$ ——硅整流器效率

$U_f$ ——整流后的三相交流发电机电压, V

$I_f$ ——整流后的三相交流发电机电流, A

假设  $N_{fj}$  不变,并忽略效率的变化,柴油机功率恒定,则  $U_f I_f$  为常数。

## 3 电传动控制系统构成

### 3.1 转速、电流双闭环系统结构和原理

图5所示为直流电动机不可逆调速系统的结构

和原理图。设计了2个调节器,转速调节器 ASR 和电流调节器 ACR,分别置于转速控制外环和电流控制内环中,用于调节速度和电流。为了使双闭环调速系统具有良好的静、动态特性<sup>[3]</sup>,2个调节器一般采用比例-积分(PI)环节或比例-积分-微分(PID)环节。

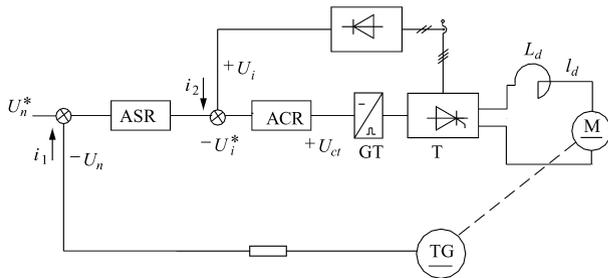


图5 转速、电流双闭环系统结构和原理图

Fig.5 Speed, current dual structure and principle of the closed-loop system

与直流电动机 M 同轴旋转的转速传感器 TG 发出的转速反馈电压  $U_n$  正比于电动机的转速。 $U_n$  与转速给定电压  $U_n^*$  相比较,其偏差  $\Delta U_n^* = U_n^* - U_n$  作为转速调节器 ASR 的输入;输出电流给定电压  $|U_i^*| = K_n |\Delta U_n| + \frac{K_n}{\tau_n} \int |\Delta U_n| dt$  作为电流调节器 ACR 的输入;电流调节器输出  $|U_{ct}| = K_i |\Delta U_i| + \frac{K_i}{\tau_i} \int |\Delta U_i| dt$  作为触发装置 TG 的控制电压,控制触发脉冲的移动,从而控制整流电压的升高或降低。其中  $K_n$  和  $K_i$  分别是 ASR 和 ACR 的比例系数; $\tau_n$ 、 $\tau_i$  分别是 ASR 和 ACR 的时间常数。把转速调节器的输出作为电流调节器的输入,再用电流调节器的输出作 TG 的控制电压,从闭环结构看:电流环在里,称为内环;转速环在外,称为外环。从而形成转速、电流双闭环调整系统。

双闭环系统设有调节器输入、输出的限幅保护电路。限幅调节器的输出值在未达到限幅前按照线性变化,达到限幅值后就不再增长<sup>[4]</sup>。速度调节器 ASR 的输出  $U_i^*$  限幅用于限制最大电流,它取决于电动机的过载能力和系统对电动机加速的需要;电流调节器 ACR 的输出  $U_{ct}$  限幅用于限制整流装置的最大输出电压。

### 3.2 系统的调节作用

调速通过改变给定励磁电压  $U_n^*$  来实现。提高给定励磁电压  $U_n^*$  时,则有较大的偏差信号  $\Delta U_n^*$  送到速度调节器 ASR,使触发脉冲向前移动( $\alpha$  减小),励磁电压  $U_d$  提高,电动机转速相应上升。同时,测速传感器反馈回来的电压  $U_n$  也逐渐增加,当等于或者接近给定数值后,系统达到平衡,

电动机以较高的转速稳定运行。

当电动机负载、交流电压发生变化或发生其他扰动时,转速反馈系统能起到自动调节和稳定速度的作用。如当电动机负载增加引起转速下降时,测速传感器电压下降,速度调节器输入偏差信号增大,系统原有的平衡状态变化,晶闸管的触发脉冲前移,整流装置输出电压提高,则电动机转速上升。当恢复或接近原来的数值时,转速传感器电压又等于或接近给定电压,系统又达到平衡状态。

系统的放大系数越高,调节器的调节作用就越灵敏,机械特性越硬,调速精度也越高。但是,当系统的放大系数大于某一临界值后,系统又可能变得不稳定。因此在转速反馈通道设有测速软反馈。

当发电机电压发生突变时,如电压降低,整流器输出电压也会随之降低,引起电枢电流降低。电流负反馈环的作用(不经过电动机机械环节)使电流调节器的输出增大,触发角  $\alpha$  变小,使整流装置输出电压、电枢电流又恢复到原值<sup>[5]</sup>。当发电机功率变化时,在电动机转速变化之前,电流的变化首先就被抑制。如果机械负载发生很大变化,或直流侧发生类似短路的严重故障时,由于采用了快速性好的电流负反馈回路,能及时把过电流故障反映到控制回路中去,迅速减小输出电压,保护晶闸管和直流电动机不致因电流过大而损坏。

## 4 控制系统仿真

按照静态结构图、动态机构图及车辆参数计算可以得到直流驱动电传动双闭环调速系统图,如图6所示。仿真结果如图7~9所示。

从图7结果可以看出,电传车辆在起动时若受到外界突加的负载扰动,由于电流内环的作用,电流可以立刻进行调整,系统迅速进入稳态。

从图8和图9中可以看出,采用电传动的车辆在稳态行驶时如果行驶阻力发生变化,由于速度调节外环没有饱和,电流不会发生突然的跳变,车速稳步调整。

### 4.1 静态特征

在正常负载时,双闭环调速系统的转速调节器 ASR 不饱和,依靠 ASR 的调节作用,转速无静差保证系统具有较硬的机械特性(稳态运行无静差)。 $U_i > U_{im}^*$ ,  $I_d > I_{dm}$ , 电流调节器 ACR 只起辅助作用,系统的静特性从  $I_d = 0$  (理想空载状态)一直延续到 B 点,  $I_d = I_{dm}$ , 稳态特性的运行段  $n_0 \sim A$  段(图10)。当电动机负载加大( $I_d > I_{dm}$ )时,由于转速下降,ASR 迅速进入了饱和状态,同时输出限幅值。此时,ASR 失去了调节作用,转速的变化对系

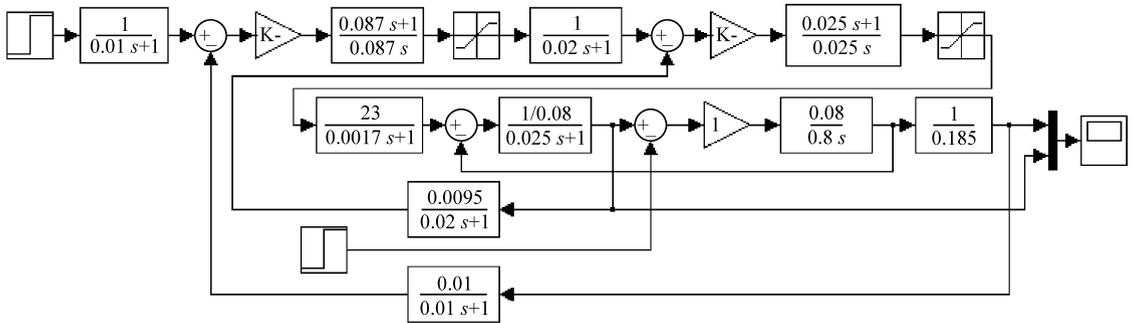


图6 电传动双闭环调速系统图

Fig. 6 Pair of closed-loop speed control system of dynamic structure

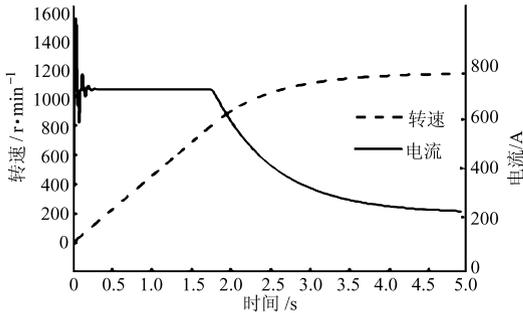


图7 起动时转速、电流输出曲线

Fig. 7 Speed and current output curve

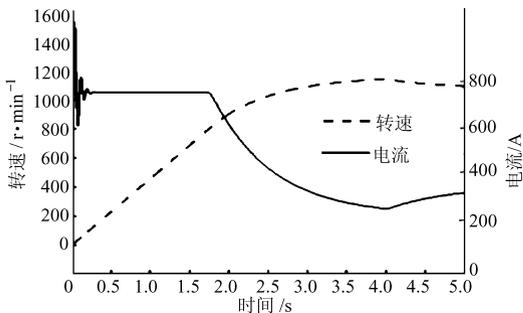


图8 稳态行驶阻力增加时输出曲线

Fig. 8 Output curve with increasing load

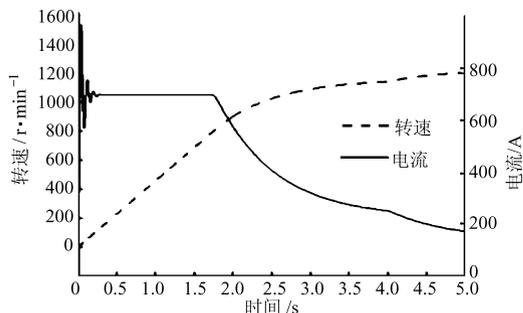


图9 稳态行驶阻力减小时输出曲线

Fig. 9 Output curve with decreasing load

性的两段实际上都略有静差。因此实际的特性如图10的虚线所示。

### 4.2 动态特征

双闭环调速系统的电流调节器和速度调节器都是PI调节器,它们的传递函数就是PI调节器的传递函数。

ASR的传递函数为

$$W_{ASR}(s) = K_n \frac{\tau_s s + 1}{\tau_s s} \quad (2)$$

ACR的传递函数为

$$W_{ACR}(s) = K_i \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \quad (3)$$

通过双闭环速度调节,使采用电传动的车辆可以利用转速调节器的饱和特性,使系统保持恒定最大允许电流,在最短时间内提高转速和感应电动势,在退饱和时实现速度的调节和实现系统的无静差特性。由于是无静差系统,在负载变化和发电机电压波动等扰动情况下,可保持系统的恒定输出。转速、电流双闭环系统可以克服负载变化和发电机电压波动等扰动影响,特别是扰动点在电流内环时,多数情况可以在电流内环克服,而不会造成电动机转速的波动。

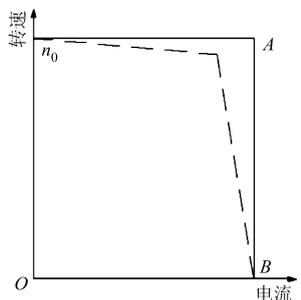


图10 电传动调速系统的稳态特性曲线  
Fig. 10 Stable-state characteristics of speed control system

### 5 结论

(1) 从静态特性上看,电流反馈虽有使静特性变软的趋势,但对于包围在外面的转速反馈环来说相当于一种扰动作用。只要转速调节器ASR的放大系数足够大且没有饱和,则电流负反馈的扰动作用就会受到抑制。当转速调节器ASR不饱和时,电

统不再产生影响。转速外环呈现开环状态,系统在固定的最大给定电流(ASR的限幅值)作用下,依靠电流环对电流继续进行调节,系统由恒转速变为恒电流调节,成为一个电流无静差的单闭环系统,从而获得了极好的下垂特性,如图10中的AB段所示。然而运算放大器的开环放大系数并非无穷大,静特

最差。从图6~8的对比可以看出,根据评价函数得到的上述结论是正确的。

## 4 结论

(1) 定义的加权插入损失、线性度系数、背压系数可以量化地表达消声器在多个工况下的消声效

果、声品质特征和空气动力性能。

(2) 定义的评价函数可以量化地表达消声器的综合性能,从而为消声器匹配设计提供依据。

(3) 对评价方法的仿真计算结果具有较高精度,可以在很大程度上取代实验试制,以降低开发成本。

## 参 考 文 献

- 1 李林凌,黄其柏,连小珉,等. 汽车消声器设计方法与评价指标分析[J]. 农业机械学报,2007,38(5):32~36.  
Li Linling, Huang Qibai, Lian Xiaomin, et al. Analysis of evaluation indexes and design method of automotive muffler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(5): 32~36. (in Chinese)
- 2 Bozza F, Gimelli A, Pianese V, et al. An acoustic design procedure for intake systems: 1D analysis and experimental validation[C]. SAE Paper 2004-01-0412, 2004.
- 3 Bilawchuk S, Fyfe K R. Comparison and implementation of the various numerical methods used for calculating transmission loss in silencer systems[J]. Applied Acoustics, 2003, 64(9): 903~916.
- 4 宋艳冗,葛蕴珊,张宏波. 发动机工作过程和排气消声器耦合研究[J]. 汽车工程,2005, 27(6): 719~723.  
Song Yanrong, Ge Yunshan, Zhang Hongbo. A study on engine-exhaust muffler coupled model [J]. Automotive Engineering, 2005, 27(6): 719~723. (in Chinese)
- 5 邹雄辉. 车用消声器 CFD 模拟及压力损失试验台的研制[D]. 武汉:武汉理工大学, 2007.  
Zou Xionghui. Simulation the vehicle muffler with CFD software and development a test-bed for evaluating the pressure loss of the vehicle muffler[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese)
- 6 Sathyanarayana Y, Munjal M L. A hybrid approach for aeroacoustic analysis of the engine exhaust system[J]. Applied Acoustics, 2000, 60(4):425~450.
- 7 庞剑,湛刚,何华. 汽车噪声与振动——理论与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2006:189~394.

(上接第10页)

流负反馈使静特性可能产生的速降完全被 ASR 的积分作用消除。一旦 ASR 饱和,转速环失去作用,仅电流环在起作用,这时系统表现为恒流调节系统。

(2) 从动态响应过程看,突加给定电压时,转速负反馈还来不及反应出来,转速调节器便很快处于饱和状态,输出恒值限幅电压,经过电流调节器使电动机很快起动。之后,虽然转速反馈电压增大,但由于 ASR 的积分作用,只要转速反馈电压小于转速给定电压,ASR 输出就维持在限幅上限值,直到转速产生超调。因此,在起动过程中,相当于转速外环处

于开环状态,系统只在电流环的恒值调节作用下,保证电动机在最大电流(转矩)下起动,直到转速超调后速度环才开始真正发挥作用。

(3) 电传动双闭环系统,在过渡过程中表现为一个恒值电流调节系统,在稳态和接近稳态运行中又表现为无静差调速系统。既发挥了转速和电流两个调节器各自的作用,又避免了在单环系统中两种反馈相互牵制的缺陷,从而获得了良好的静、动态品质。无论是在起动时,还是在行驶阻力增加或减小时,使采用电传动的车辆既有较好的发动机功率利用效率,又具有快速的反应速度。

## 参 考 文 献

- 1 Van Wyk J D, Lee F C, Boroyevich D. Power electronics technology: present trends and future developments[J]. Proceedings of the IEEE, 2001,89(6):799~802.
- 2 Jahns T M, Blasko V. Recent advances in power electronics technology for industrial and traction machine drives[J]. Proceedings of the IEEE, 2001,89(6): 963~975.
- 3 Leen G, Heffernan D. Expanding automotive electronic systems[J]. IEEE Computer,2002, 35(1):88~93.
- 4 Hanxleden R, Botorabi A, Kupczyk S. A co-design approach for safety-critical automotive applications[J]. IEEE Micro (Special Issue on Embedded Fault-Tolerant Systems), 1998,18(9):66~79.
- 5 Kim G K,Ha I J,Ko M S. Control of induction motors for both high dynamic performance and high power efficiency[J]. IEEE Trans. on Ind. Electron. , 1992,39(3): 323~327.