

高速列车牵引电机连续负载模拟控制方法研究

易泽宇 李思杰 杨中平 李珂 秦金飞 林飞

(北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

摘要: 为进行高速列车牵引传动系统实时仿真平台的研究, 作者搭建了小功率负载模拟平台, 利用三相异步电机为牵引电机提供等效的负载转矩, 本文结合力学公式和异步电机矢量控制原理推导出负载电机的控制框图, 利用现有 CRH2A 型动车组的牵引特性曲线, 对负载模拟的推导结果进行了验证; 结果表明车辆加速性能与实际性能曲线一致, 此方法能够较准确模拟实车牵引电机负载。

关键词: 高速列车 负载模拟 阻尼转矩 惯性转矩

1 引言

与普通列车相比, 高速列车在速度和乘坐舒适度上有着其无法比拟的优势, 从迅速增加的高速铁路里程就可以看出, 高速列车在人们日常生活中扮演着越来越重要的角色。为了提高其运行安全性, 以及在理论上讨论高速列车所能达到的极限速度, 需要对高速列车的控制方法有更加细致和系统的分析, 这就需要大量的实验数据, 但是频繁的实车实验有周期长, 成本高等不利因素。为了克服实车实验的缺点, 作者所在实验室意图建立一个实时仿真软件与实际电机控制相结合的高速列车牵引传动系统模拟平台如图 1, 通过软件计算给定线路下列车输出牵引转矩, 来模拟实际列车运行工况。但是实验室条件下的电机并没有高速列车牵引电机所有的负载, 所以需要通过负载模拟的方法来给实验室电机提供等效负载转矩, 让高速列车牵引传动平台真实实际运行工况。

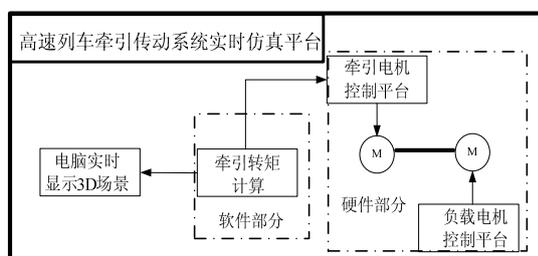


图1 实时仿真平台框图

2 牵引电机负载转矩

对于牵引电机负载转矩, 文献^{[1]、[6]、[7]}、都有详细的分析, 这里就不再详述, 本文以文献[1]的分析结果为基准: 牵引电机负载转矩可以分为两个部分—阻尼负载转矩, 等效惯性负载转矩。分别讨论两个负载转矩的模拟方法。

2.1 阻尼负载转矩

阻尼负载转矩是由列车阻力产生的, 列车阻力包括基本运行阻力和坡道阻力、隧道阻力、曲线阻力等。由于这几种阻力有的可以根据以速度为变量的公式计算, 有的可以通过经验公式计算出来, 所以阻尼负载转矩的模拟在本文不作为讨论的重点, 在仿真和实验环节, 本文均只采用了最具代表性的基本运行阻力, 其计算公式如下:

$$f = a + bv + cv^2 \quad (1)$$

式中 a, b, c 的取值要视不同的道路情况而定。

2.2 等效惯性负载转矩

从文献^[1]中可以看出, 等效惯性负载转矩和阻尼负载转矩是不一样的, 惯性负载转矩在列车静止的时候是不存在的, 只有当列车的速度要发生变化的时候才产生, 它是由于列车本身具有的惯性产生的转矩, 由此可以看出, 惯性转矩的方向和大小都会随着速度大小和方向的变化而变化。在本文建立的负载模拟平台中, 分析惯性转矩的时候忽略机械负载转矩的影响, 如果从牵引电机侧看整个负载模拟系统的话, 可以得到牵引电机输出转矩与电机转速之间满足下列关系式:

$$\omega/T_e = 1/(J's) \quad (1)$$

$$J' = J + J_N \quad (2)$$

J' 是平台总惯量, J_N 表示由负载电机提供的等效转动惯量, J 是电机本身的转动惯量, T_e 代表的是牵引电机的输出转矩, 当加入三相异步电机提供的惯性负载转矩之后, 根据力学公式得到下式:

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

从上式可以看出, 若要利用负载电机提供惯性负载转矩, 那么下式成立:

$$T_L = J_N \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

其中, T_L 代表负载电机提供的等效惯性转矩。将上式加入矢量控制框图:

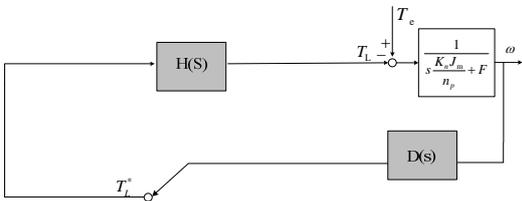


图2 控制框图

从式 (5) 可以知道, 为了得到相应的指令转矩, 负载电机侧传递函数 $D(s)$ 一定满足下面的式子:

$$D(s) = K_n J_N s \quad (5)$$

考虑到式 (6) 中的纯微分器在控制中带来的种种问题, 本文采用不完全微分器代替推导得到的纯微分器, 将 (6) 变化成下式:

$$D(s) = K_n J_N s / (1 + \tau_N s) \quad (6)$$

τ_N 代表惯性时间常数, 结合 (2) 式 (7) 式, 可以得到整个系统完整的传递函数如下:

$$\frac{\omega}{T_e} = \frac{H(s)}{s \frac{K_n J_m}{n_p} + F + H(s) D(s)} \quad (7)$$

式子中 F 代表机械摩擦阻尼, 在下文中忽略它的影响, 另外, $H(s)$ 是异步电机矢量控制本身推导得到的传递函数式:

$$H(s) = \frac{K_1 \frac{1 + \tau_1 s}{\tau_1 s} + G(s)}{R(1 + \tau_r s) + K_1 \frac{1 + \tau_1 s}{\tau_1 s}} \quad (8)$$

τ_1 和 K_1 包含在 $H(s)$ 中, 由控制系统本身确定的量, 所以 (8) 式中唯一不确定的参数就只有 τ_N 一个, 将所有电机参数代入计算, 利用根轨迹法就可以得到使整个负载模拟系统稳定的 τ_N 取值范围。并通过仿真和

实验得到这个范围内的最优值。

综上, 得到负载电机的完整的控制框图如下:

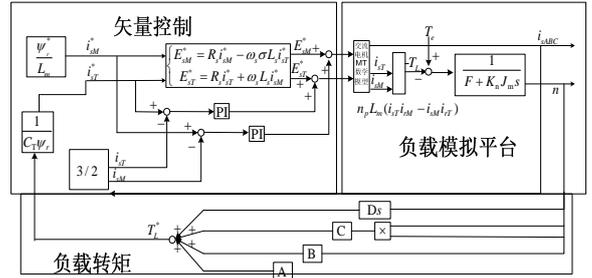


图3 负载电机控制框图

3 仿真和实验

3.1 控制算法仿真

用两台轴联的异步电机搭建起来的负载模拟平台示意图如下, 由于飞轮对调节动态特性有帮助, 所以在平台中又加入了一个小飞轮。实验室电机与高速列车实际牵引电机不是同一个功率等级, 为了能达到模拟的效果必须要遵循一定的原则, 这个原则可以根据实际情况制定, 本文考虑到在实际列车运行时, 时间是一个很重要的指标, 所以采用加速时间不变的原则来模拟, 并基于此对实际列车的速度和转矩进行缩放。

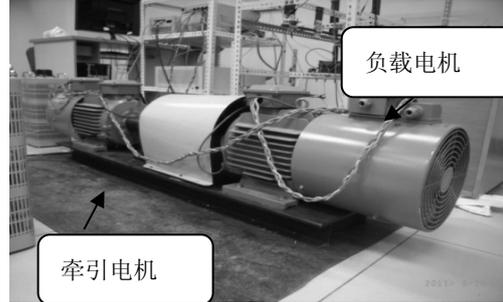


图4 负载模拟平台

表1 转矩、转速对比

	实验室电机	CRH2A 高速列车牵引电机
启动转矩 ($N \cdot m$)	7.8	1560
最高转速 (r/min)	1450	6000

从表 1 中可以得到转矩缩放的系数:

$$k_t = \frac{1560}{7.8} = 200 \quad (9)$$

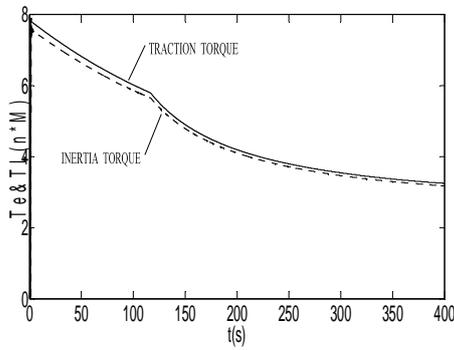
速度缩放的系数:

$$k_r = \frac{6000}{1450} \approx 4.1 \quad (10)$$

当 CRH2A 转速达到 $6000 r/min$ 时, 对应的列车

速度为 300 km/h ，根据表 1 得到的转矩、转速缩放系数我们可以得到经过缩放后的实验室条件下需要模拟的转动惯量如下：

$$J_{ad} = 10.2\text{ kg}\cdot\text{m}^2 \quad (11)$$



5 牵引转矩和负载转矩

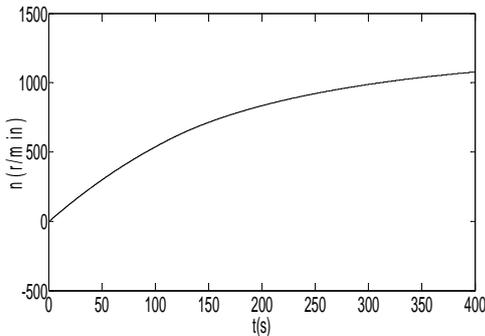


图 6 速度

查阅现有的文献资料可知，对于CRH2A 高速列车而言，从静止加速到 250 km/h ，用时 375 秒 ^[8]，从图 6 可以看出根据实验室电机参数设置的仿真得到静止到 1190 r/min 用时 375 秒 ，换算为实际列车速度是 243.95 km/h ，误差为 6.05 km/h ，而仿真中列车的牵引转矩是如图 (5) 所示，可以看出启动牵引转矩（实线）接近 $7.8\text{ N}\cdot\text{m}$ ，按照上文中推导的转矩缩放系数，将实际列车的启动牵引转矩换算为对应实验室电机启动牵引转矩为 $7.8\text{ N}\cdot\text{m}$ ，由此对比可以看出经过缩放后的速度满足加速时间不变的原则，可见上文提出的缩放算法和缩放原则符合要求。

3.2 给定线路仿真实验

下面三个图反映了在表 2 给定的线路情况下的仿真和实验下得到的转速转矩曲线，图 (9) 是实验室电机实验得到的波形，图中每一个横格代表 100 秒 ，纵向坐标每格代表 100 毫伏 。从仿真 (8) 和实验 (9) 都可以看出来，在牵引电机运行的前 236 秒 ，系统处于牵引状态，牵引电机输出经过缩放后的列车十级牵引曲线，速度从静止加速到了 970 r/min （对应实际

列车速度为 202 km/h ），运行 10 km 之后遇到上坡路，可以看出，这个时候列车处在巡航模式，图 (8) 和图 (9) 中都可以看出来列车巡航速度在 950 r/min 和 970 r/min 之间发生变化。从 490 秒 到 612 秒 之间列车运行在惰行模式，直到速度降到 750 r/min 。由以上的三个图可以看出，实验室条件下的负载模拟已经能够很好的模拟列车从启动到巡航的工况时的负载转矩。

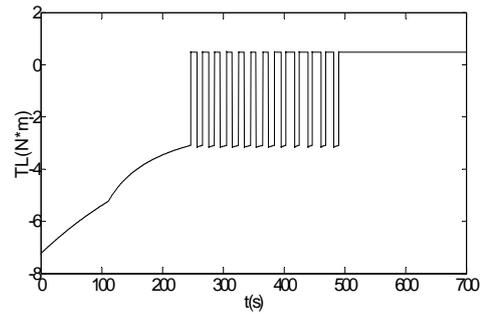


图 7 负载转矩

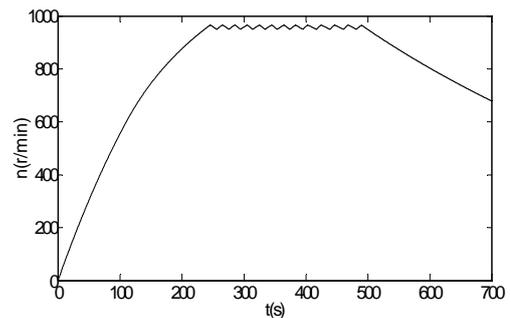


图 8 速度

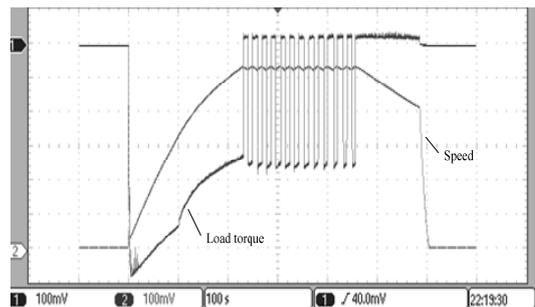


图 9 负载转矩和速度

表 2 给定线路条件

线路条件	平直道	上坡	下坡
距离 (km)	0-10	10-16	16-22

4 结论

本文基于实验室现有的条件讨论了用异步电机提供连续负载模拟的控制方法，经过仿真和实验的对比，

验证了提出的负载转矩控制方法, 由于受到采样精度、变频器快关频率、以及牵引、负载电机同轴度的限制, 实验系统不能完全满足负载模拟控制理论所设计的要求。

参考文献

- [1] 陆峰, 黄云鹏, 李思杰, 杨中平. 牵引电机负载模拟方法研究 [M]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [2] 李宗帅, 董 春. 国外基于电动技术的机械负载模拟的现状 [J]. 机械, 2007, 34 (5): 1-3.
- [3] PADILLA A J, ASHER M G, SUMNER M. Control of an AC Dynamometer for Dynamic Emulation of Mechanical Loads with Stiff and Flexible Shafts [J], IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53 (4):1250-1260.
- [4] 杨中平. 新干线纵横谈: 日本高速铁路技术 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
- [5] 北京市地下铁道设计研究所. 世界城市轨道交通 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.
- [6] 黄云鹏 轨道车辆牵引电机负载模拟控制的研究[D] 北京:北京交通大学。2009.6
- [7] 李思杰 牵引电机惯性负载模拟控制策略研究 [D] 北京:北京交通大学。2010.6
- [8] 张曙光. CRH2 型动车组(中国高速铁路技术丛书/和谐号 CRH 动车组技术系列) [M]. 北京:中国铁道出版社.2008.