

交直电力机车粘着控制系统现状及改进后对山区铁路运输的影响

杨义克 许仲兵

杨义克：成都铁路局科委办

主任 成都路电：061—32053

许仲兵：成都畅通机车车辆技术开发有限公司 主任 成都电话：028—66897258

摘要 本文针对包括 8K 机车和国产交直机防空转、防滑行系统的固有缺陷，以及通过分析和大量实践、参考国内外最新研究成果，在既有系统基础上改造而成的交直电力机车全天候粘着控制系统原理及主要功能，经过多次对比牵引试验结果进行分析，证明新的交直机车粘着控制系统能有效发挥机车牵引力，在很大程度上防止列车坡停、运缓，保证正常的运输秩序，实现铁路运输安全、高效、快捷，促进挖潜增效。

关键词 铁路 交直机车 防空转 防滑行 粘着控制系统

1 粘着现象及既有国产交直机车防空转、防滑行系统原理及现状

在轮轨交通运输中，利用机车动轮与钢轨间的自然磨擦所产生的粘着力，这个切向力也就是机车的牵引动力。大量的分析和试验结果表明，只有当动轮在钢轨表面处于蠕滑状态的情况下，机车才能产生有效的粘着力。从宏观上看，随着蠕滑速率的加大，粘着系数也逐渐提高，能够产生的牵引力就逐渐增大。以干燥轨面为例，当蠕滑速率达到一定值时，粘着力呈最大值，粘着系数会突然降低甚至呈负阻特性，这时，轮对就发生空转。

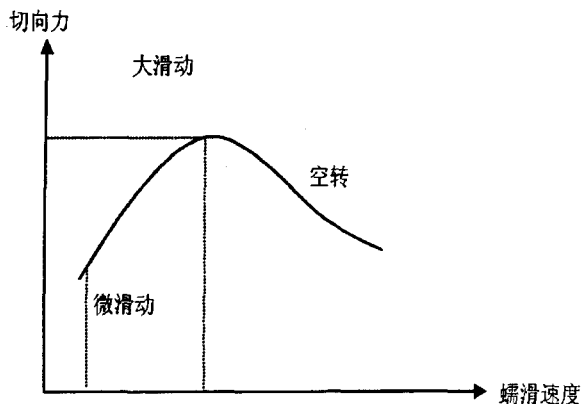


图 1 切向力与蠕滑速度关系曲线

由图 1 可见机车只要在切向力最大值左边运

行，就不会出现空转，越逼近于最大值，获得的平均牵引力就越大。然而，轮轨粘着系数随机性很大，并且路况不同，粘着系数就会变化：制动比牵引工况约小 20%；弯道比直线小，因为同轴的两轮所经过路径不同，超高轴重不同，轮缘的接触面也不同，采用 Co—Co 的 SS3 机车通过弯道时横向分力大；曲率半径 $R = 300\text{m}$ 比直线纵向牵引力要小 20% 以上；而潮湿轨面比相同的干燥轨面的平均粘着系数小约 1/3。这也是山区铁路雨天容易发生空转，导致牵引力发挥不理想的原因所在。目前几乎所有国产交直电力机车均采用校正型防空转防滑行系统，不检测粘着最大值，电机电流随着指令手柄给定增大而增大，牵引力也随之增大，一旦超过最大值，由速度差 ΔV 、加速度 dV/dt 、以及 dV^2/dt^2 判断有轮对发生或将要发生空转，便快速深度削减整架电流给定进行所谓防空转校正，把电机电流控制到最低值，待空转抑制后，再快升，然后慢恢复以寻找下一个粘着最大值。当雨天给定电流稍大时，就造成整架电流每 3 到 5 秒便大波动一次，对于 SS3 机车则引起 1/2 牵引力的波动。由于雨天粘着特性呈平坦状态；若给定电流较大时各轮对缓慢空转；加速度很小，到达不了既有防空转、防滑行系统的整定值，各轮对相对比较 ΔV 也很小，结果是防空转系统失效，直到全车大空转才可能被司乘人员发觉，这对铁轨、轮箍电机都非常不利。这就

是包括 8K 机车和几乎所有国产电力机车防空转、防滑行系统固有的缺陷。

2 改进后的交直电力机车粘着控制系统的原理及主要功能

交直电力机车全天候粘着控制系统主要功能分为防空转防滑行速度测量和粘着控制两大部分。速度测量包括机车真实速度的测量和轮对线速度的测量,其中机车真实速度是靠高精度 GPS 系统与加速度算法相补充获得。防空转、防滑行控制部分的主要功能是对速度信号进行处理,当其达到空转、滑行整定值时,对电流指令信号进行快速校正及记忆,并增加智能撒砂、空转显示及自动制动阀缓解等附属功能。同时,还提供机车速度的恒压、恒流输出。粘着控制则让两个转向架在不同的轨面状态自行寻找尽可能大的粘着值。

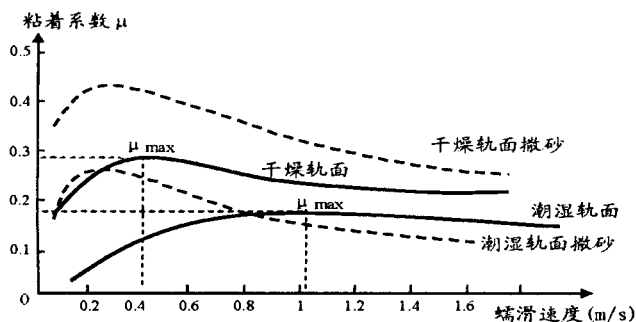


图2 不同路况时的蠕滑特性曲线

系统实时地检测各轮对粘着状态,并力求接近 μ_{\max} ,又尽量使之不超越。关键点就是搜寻 μ_{\max} 。按照上世纪 70 年代末,美国 GM 公司牵引动力部所发表由大量试验数据而整理出的机车蠕滑率特性(如图 2 所示),此曲线较为经典并被大量引用,而后不断有更细更专门的文章发表。其中,中低速时,干燥轨面的粘着特性有明显的峰值;当水平坐标的蠕滑速度到达一定值后,有效粘着系数也上升(纵坐标),而粘着系数上升到最大值后,突然向下急降呈不稳定的负阻特性。系统控制的理想结果就是轮对粘着状态始终是运行在 μ_{\max} 左边,接近而又不超越 μ_{\max} 。(校正型防空转系统则是任其超越又迅速拉回,再从低向高上升)。

目前国际主要采用有两大类方法:一是蠕滑速度法(又分直接法和间接法),其关键是取得蠕滑速度,美国 GM 与德国西门子合作的交直交机车曾采用多普勒雷达测量真实速度,精度要求优于 5%,理论上也可用加速度适配器(如捷联式惯性导航系统-SINS 中通过对加速度的积分)计算出真实速

度,在具体运用时各有优缺点和技术难度;二是粘着斜率法,又分相位移法和粘着因数导数法二种,就粘着特性而言,其 μ_{\max} 左边是条单调上升曲线,其坐标分别为 $\mu = \mu(t)$ 和 $V_c = V_n - V_o$,按参数方程求导方法,粘着特性的斜率 Y 即为 $Y = d\mu/dV_c = (d\mu/dt) / (dV_c/dt) = ? \mu / ? V_c$,当 μ 接近最大值时, Y 应为 0。然而实际计算时就会发现,由于蠕滑特性的随机性和离散性很大,本来就是大量数据的统计值,并非有条一成不变的稳定的曲线存在着,而微分运算对噪声的放大作用、牵引电机电流的脉动、A/D 采样的固有误差等,使 μ_{\max} 测取难以得到快速又稳定数值,而且更棘手的问题是潮湿轨面的粘着特性大为平坦,撒砂后数值跳变很大。为此,基于改善雨天的粘着特性以获取较大 μ_{\max} 。系统采用兼顾所有,相互弥补制约,加强稳定性处理,不追求极限值,留有裕量,使之适合大小雨量气候变化,以达到经济实用的目的。

雨天起动列车在人工撒砂情况下,直线轨面手柄同样可给到最大位。按操作建议单台 SS3 型电力机车可在 12‰ 坡道上顺利平稳挺钩起 2800T 列车。系统还能有效防止包括缓慢发展的空转与滑行,对 $dV/dt, dV^2/dt^2$ 的有效处理及快速响应,能有效防止轮轨擦伤。

3 交直电力机车全天候粘着控制系统的系统结构

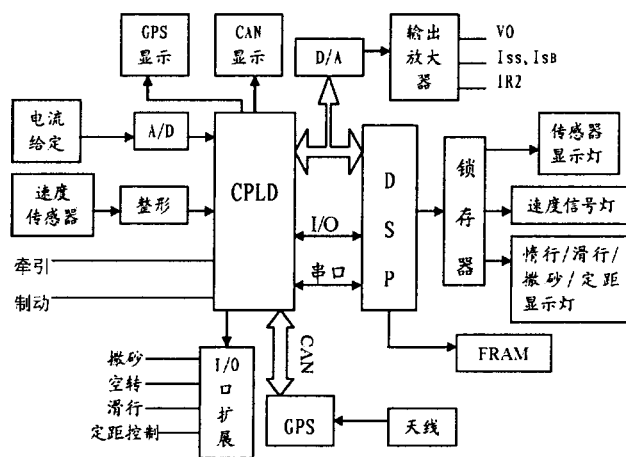


图2 交直电力机车全天候粘着控制系统硬件框图

系统采用 TI 公司目前最高端的定点 DSP 处理器 TMS320F2812,它是整个系统运算和控制的核心。4 个轴的转速脉冲信号经整形送入 DSP,在 DSP 内转换成相应的数字量,在机车惰行时,自动进行轮径校准并由掉电情况下仍能保存数据的非易失性 RAM 保存。DSP 同时通过总线从 CPLD 获取 GPS 传

来的机车真实速度,经过校正后分别进行速度信号的处理、速度差、加速度及加速度微分的计算,轮径补偿系数的计算,减载量的计算以及空转校正后的电机转速和电流值输出。若发现某轴粘着接近最大值,则阻止电机转矩上升或稍降其电流给定,只有轨面粘着突然大幅下降使之超越最大值时,才进行一次快速深度削减电流的处理。以整车的速度信号为基础,还处理出空转、撒砂、滑行保护以及定距控制等开关信号,经电子柜输入输出插件继电器输出。此外,具有速度传感器故障诊断功能,可以自动切除和记忆故障的速度传感器,采用非易失性 RAM 作为数据断电保护。系统还具备 2000 次空转或滑行的记忆存贮功能,包括时间、地点、空转滑行程度、持续时间;电机电流、车速等数据,可供下载分析,有利于故障及轮对擦伤等事故的分析。

4 使用效果

在 SS3 机车上的加改只要在司机室内或电子柜旁走廊玻璃内侧加装 GPS 天线及定位接收机,电子柜中用粘着控制电路板取代原微机防空转板即可;司机纵控方面没有大的改变,只是后者在雨天运行用电流可给得更大大些,也较稳定;在 12‰ 坡道上,可雨天坡停挺钩起动 2800T 货物列车,稳定发挥 400KN 牵引力。按部科技司技综函〔2004〕4 号文件,对该系统进行考核试验,2005 年 1 月成都铁路局在宝成线罗妙真~斑竹园间 K427+600m,坡道 11.2‰,曲线半径 400m 处停车,用 SS3 型 5092 号机车牵引 2741 吨,换长 46.9,阴雨天,人工喷雾,挺钩起动,前架 562A,后架 717A,机车牵引力 407~420KN,起动顺利,加速较快。

为了确认新既有系统实际效果,充分利用现有设备的能力,挖潜提效,由成都铁路局总工程师组织,路局安监、机务、运输、车辆处参加的对比牵引试验,于 2006 年 10 月 14 日至 2006 年 11 月 10 日对局内湘黔、成昆、宝成线高坡困难区段进行对比。即同一台机车、同样喷水、同一列货车、同地、同时(既有系统起动后,立即返回,在原地再次用新系统起动,以获得尽量真实的对比数据)。在湘黔线:贵阳一大土区间;成昆线:联合乡一新凉,普雄—上普雄;宝成南线:江油—老坪坝,马角坝—斑竹园区间;分别作一台 SS3 及二台 SS3 重联的对比试验,牵引吨数分别比现行运用值提高 5%,即 100—200 吨,其效果显著;既有系统绝大部份无法起动,偶有能起动但发生大空转,甚至发生电机过流跳主断现象。而新系统均一次顺利起

动,电机平均电流明显增大,而试验车测得牵引力也同样增加。其中试验最为困难的是宝成南线:江油—老坪坝,马角坝—斑竹园区间,现下行 2800 吨,上行 2600T 均为闯坡通过,既有系统根本不能进行雨天坡停起动;而新系统上、下行停均作 2800 吨坡停起动。

既有系统雨天坡停起动电流给定一般不能大于 550~600A,这时空转不停,很易发生大空转事故,机务段均规定严禁雨天高坡强行起车。新系统则挺钩起动,电流给定 730~650A,各架电流根据粘着情况自动调节,全车电流及牵引力平均值则有所增加;如果司机根据线路弯道情况预先人为调整给定,牵引力发挥则更加稳定。

上述试验结果表明:雨天牵引力提高后,已大于 12‰ 坡道,2800 吨的坡道阻力加运行阻力,所以不仅是坡道运行时不会减速,而是可以坡停起动;而既有系统则与上述情况相反,所以在高坡区段雨天运行有困难。

5 结束语

综上所述,从新系统与既有系统对比试验后,可以看出:贵阳到大土高坡区段主要问题是线路曲率半径小,多处 $R \leq 300\text{m}$,转向架为 Co—Co 结构的 SS3 机车弯道通过性能差,影响了牵引力发挥;而成昆线几个高坡区段的困难主要是供电质量差,功率因素低,车流集中时网压低到下限,引起主断跳闸;相比之下,雨天粘着要求最高的还是宝成线南段:江油—老坪坝,马角坝—斑竹园区间,原定为 2600 吨,雨天也经常出现坡停,三年前下行方向增加到 2800 吨,高坡区间闯坡通过,经一段时间熟悉后,2006 年几乎没有雨天坡停记录;2005 年上行 2600 吨江油—老坪坝高坡区段也改为闯坡通过,雨天运行的紧张程度立即缓解了。如果加装新系统后,上述三个困难线路均可从根本上解决雨天坡停现象,甚至影响到宝成线货运编组站的设立,将带来可观的社会及经济效益。

参考文献:

- [1] TGadjar, IRudas, Y Suda. Neural network based estimation of friction coefficient of wheel and rail[J]. 1997 IEEE International Conference on Intelligent Engineering System, 1997, 9: 315~318
- [2] 郑树选. 8K 型电力机车 [M]. 北京: 中国铁道出版社 1994. 8
- [3] 刘友梅. 韶山型 4000 系电力机车 [M]. 北京: 中国铁道出版社 1996. 4