

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.04.010

# 总量一致的机车牵引力优化分配方法

刘建华<sup>1,2</sup>, 聂睿<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007;  
2. 电传动控制与智能装备湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 针对机车在正常运行过程中某轴电机由于故障导致该轴牵引力发生损失的情况, 提出总量一致的机车牵引力优化分配方法。以四轴机车为例, 考虑轴重转移对各轴牵引力的影响, 给出了牵引总量一致性的关系表达式, 构造了关于总轴重转移量的优化目标函数, 并利用遗传算法得到了该目标函数值最小情况下的最优牵引力。

**关键词:** 机车; 轴重转移; 牵引力优化分配; 总量一致; 遗传算法

**中图分类号:** U211.5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2019)04-0054-05

**引文格式:** 刘建华, 聂睿. 总量一致的机车牵引力优化分配方法[J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(4): 54-58.

## An Optimal Distribution Method of Locomotive Traction with Consistent Total Quantity

LIU Jianhua<sup>1,2</sup>, NIE Rui<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;  
2. Key Laboratory for Electric Drive Control and Intelligent Equipment of Hunan Province, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In view of the loss of traction of a certain axis motor due to its failure in the normal operation of a locomotive, a method of optimal distribution of locomotive traction has thus been proposed. Taking a four-axle locomotive as an example, with the effect of axle weight transfer on the traction force of each axle taken into consideration, the relationship expression of the total traction amount can be worked out, thus constructing the optimal objective function of the total axle weight transfer amount, and obtaining the optimal traction force with the minimum value of the objective function by using the genetic algorithm.

**Keywords:** locomotive; axle load transfer; traction optimization distribution; total amount consistency; genetic algorithm

### 1 研究背景

随着机车大范围的使用, 其在运行过程中出现了一些问题, 如重载机车目前大多采用多电机分散提供

动力的方式为机车提供驱动力, 若某电机驱动系统发生故障会因连锁效应引起其他驱动系统产生故障。其次, 由于机车运行环境复杂多变, 常存在一些影响机车正常运行的潜在故障, 从而引起某轮的牵引力发

**收稿日期:** 2018-08-29

**基金项目:** 湖南省重点实验室基金资助项目(2016TP1018)

**作者简介:** 刘建华(1981-), 男, 河南周口人, 湖南工业大学讲师, 主要从事复杂工业过程建模, 控制与优化理论及应用技术研究, E-mail: 35450965@qq.com

生损失。而牵引力的损失势必造成机车轴重转移发生改变, 如果不及对各轴牵引力进行调整, 会导致机车无法平稳运行。而机车平稳运行的条件是需提供恒定的牵引力。因此, 为了解决轴重转移发生改变情况下牵引力再分配问题, 研究者提出了总量一致的机车牵引力优化分配方法。

目前, 国内外学者在机车多电机分配牵引方面大多关注单电机个体状态, 如速度、位置等信息渐进趋于一致, 并未考虑牵引总量一致的情况<sup>[1-4]</sup>。为解决这个问题, 文献[5]提出了基于终端滑模控制的总量一致性控制方法, 该方法将  $n$  个正则型二阶非线性系统的输出总和视为被控量, 并通过与设定值的比较, 将总量一致化控制问题转化为有限时间内的误差收敛问题, 进而基于终端滑模变结构控制策略获取各子系统的滑模变结构控制律, 实现了系统输出总量与设定值的一致性跟踪。

传统的轮对机车是由多轴组成, 受机车车钩高度以及牵引电机输出驱动力矩的共同作用, 机车在正常运行时会发生轴重转移, 而轴重转移会影响牵引力的发挥。文献[6]从静力学观点出发, 分析重载机车的轴重转移原理, 运用 Simpack 软件建立重载机车多体动力学模型, 通过动力学仿真的方法分析牵引点高度、悬挂参数和二系橡胶堆布置方式对机车黏着利用率的影响。文献[7]从牵引装置的悬挂方面分析斜牵引杆的牵引高度与倾斜角对机车黏着利用率的影响。这些文献均是考虑在机车工程设计阶段通过调整机车出厂前的设计参数, 达到减小总轴重转移量的目的, 并未从控制的角度思考如何采取行之有效的控制策略, 保证机车在运行过程中的轴重转移量最小。

近年来, 专家学者们逐渐转向从控制的角度出发去解决机车轴重转移问题, 并开展了部分工作, 如对机车的轴重转移进行电气补偿; 以及某轴发生空转后, 根据动轴间的关系, 对牵引转矩进行削减, 以保证调整量最优。

文献[8]针对电车发生空转的问题, 考虑对动轴进行  $\pm 5\%$  的电气补偿, 减小了由轴重转移造成黏着系数的分散性, 并达到了均一的轮对空转概率。文献[9]对单轮牵引力变化引起的机车轴重转移进行了分析, 准确地计算了黏着控制中的轴重转移量。文献[10]给出了四轴机车静态转移的公式, 并根据该公式设计了机车黏着控制系统。文献[11]针对 CRH2A 型动车组, 通过设计实时的转矩分配系统, 保证各动轴能够获得较高的黏着利用率, 从而降低周中转移的概率。文献[12]提出轴重转移发生时, 采用各节列车按照黏着力成正比关系对动车和拖车总的制动力进行

再分配。

上述方法通过控制策略很好地解决了机车发生轴重转移时导致部分轮对再次空转或黏着利用率低的问题, 然而并未解决轴重转移情况下的单轴故障牵引力再分配问题。为此, 本文针对总量一致的机车牵引力优化分配方法, 开展了深入的研究, 给出了牵引总量一致性的关系表达式, 通过分析机车的轴重转移模型, 构造了关于总轴重转移量的优化目标函数, 并利用遗传算法, 得到了该目标函数值最小情况下所需分配的最优牵引力, 为提升机车运行品质奠定基础。

## 2 机车牵引总量一致性

当机车匀速运行时, 假设只考虑机车受到的基本阻力  $f(v_i)$ , 则总的牵引力应与基本阻力相等。即

$$\sum_{i=1}^n F_i = f(v_i) \quad (1)$$

式中:  $F_i$  为各轴电机所接收的牵引指令;

$v_i$  为机车运行速度。

而机车运行时的基本阻力受车辆结构、技术状态、路线情况、气候条件以及运行速度等众多因素影响, 在实际应用中很难用理论公式进行准确计算, 为简化起见, 我国《牵引计算规程》规定, 机车的基本阻力公式采用式(2)表示:

$$f(v_i) = (c_1 + c_2 v_i + c_3 v_i^2) M \quad (2)$$

式中:  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  为阻力计算系数, 根据车型而定;

$M$  为机车重力。

假设机车匀速运行时速度已知, 可以得到该速度下的机车总牵引力为定值。此时, 机车控制系统根据所需总的牵引力大小, 将牵引指令分配给各轴电机。当某电机由于故障导致牵引力发生改变时, 为了不使速度出现过快的变化, 需要协调其余未发生故障的电机牵引力, 使得变化后的总牵引力近似等于机车运行时的基本阻力, 即

$$\sum_{i=1}^n F'_i = f(v_i) \quad (3)$$

式中  $F'_i$  为第  $i$  轴电机重新分配的牵引力。

## 3 轴重转移量最小的牵引力优化分配

机车在水平轨道上匀速行驶时, 由于轮周牵引力与作用在车钩上的阻力不在一条水平线上, 因此机车的轴重会发生转移。

### 3.1 牵引力优化分配

在实际工程应用中, 一般在机车出厂前, 各轴轴重会被尽可能调至相等, 这样机车的总重量  $M$  会均分给各轴, 本研究以四轴机车为例, 则四轴轴重均为

$$W_0 = \frac{M}{4} \quad (4)$$

建立如图 1 所示的机车模型，并计算各轴轴重转移量。图中， $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$  为机车发生轴重转移时第 1 轴至第 4 轴的实际轴重； $H$  为轨道面至车钩高度； $h$  为轨面至牵引点的高度； $L$  为前后转向架中心距离； $l$  为机车轴距。

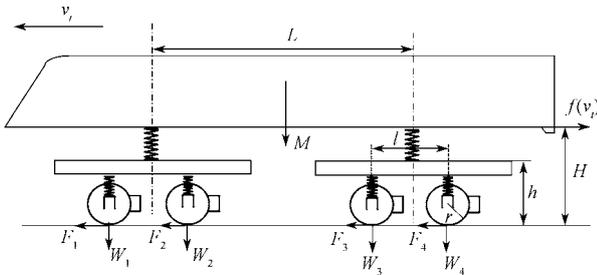


图 1 四轴机车模型

Fig. 1 Model of four-axle locomotives

将车体与转向架隔离单独分析各自受力情况，以车体为隔离体，如图 2 所示。

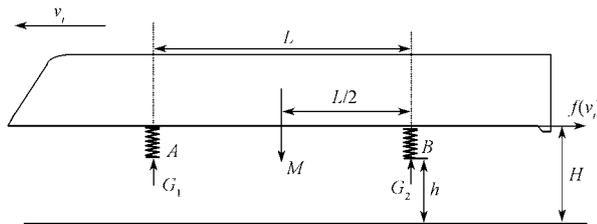


图 2 车体受力图

Fig. 2 Car body force diagram

假设 A 点受到前转向架的支撑力为  $G_1$ ，B 点受到后转向架的支撑力为  $G_2$ ，B 点力矩平衡方程为

$$\sum_{i=1}^4 F_i(H-h) + G_1L - ML/2 = 0, \quad (5)$$

由式 (5) 可得 A 点受到前转向架的支撑力为

$$G_1 = M/2 - \sum_{i=1}^4 F_i(H-h)/L, \quad (6)$$

同理可得 B 点受到后转向架的支撑力为

$$G_2 = M/2 + \sum_{i=1}^4 F_i(H-h)/L. \quad (7)$$

以转向架为隔离体，先以前转向架为例进行受力分析，如图 3 所示。

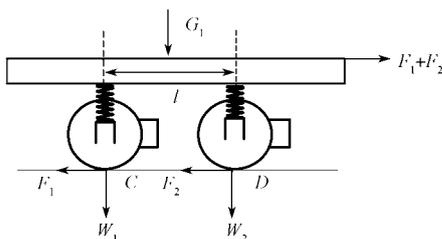


图 3 前转向架受力图

Fig. 3 Force diagram of the front bogie

先分析前转向架 D 点力矩平衡方程，为

$$(F_1 + F_2)h - G_1l/2 + W_1l = 0, \quad (8)$$

由式 (8) 可得 C 点所对应的轮对轴重为

$$W_1 = G_1/2 - (F_1 + F_2)h/l, \quad (9)$$

同理可得 D 点所对应的轮对轴重为

$$W_2 = G_1/2 + (F_1 + F_2)h/l. \quad (10)$$

由式 (4) ~ (10) 可以得到前转向架两个轮对的轴重分别为

$$W_1 = W_0 - \frac{H-h}{2L} \sum_{i=1}^4 F_i - \frac{h}{l} (F_1 + F_2), \quad (11)$$

$$W_2 = W_0 - \frac{H-h}{2L} \sum_{i=1}^4 F_i + \frac{h}{l} (F_1 + F_2). \quad (12)$$

同理分析后转向架，可得

$$W_3 = W_0 + \frac{H-h}{2L} \sum_{i=1}^4 F_i - \frac{h}{l} (F_3 + F_4), \quad (13)$$

$$W_4 = W_0 + \frac{H-h}{2L} \sum_{i=1}^4 F_i + \frac{h}{l} (F_3 + F_4). \quad (14)$$

当机车各轴电机接收的负载转矩指令相同时，即  $F_i (i=1, 2, 3, 4) = F$ ，此时机车黏着利用率最大，可计算得到发生轴重转移时各轴轴重  $W_i (i=1, 2, 3, 4)$ 。假设某电机由于故障导致该轴牵引力损失，需要对其余各轴牵引力进行优化分配。

### 3.2 牵引力优化分配

遗传算法是计算数学中用于解决最优化的搜索算法<sup>[13]</sup>，其本质是一种进化算法，借鉴了进化生物学中的一些现象发展起来的，这些现象包括遗传、突变、自然选择和杂交等。遗传算法的实现方式通常为一种计算机模拟，在生产调度、自动控制、图像处理和机器学习等领域有广泛的应用。

本研究采用遗传算法解决牵引力优化分配问题。根据该机车转向架的结构，当牵引力发生改变时，机车的轴重转移情况也会随之发生改变。为了使所分配的牵引力最优，应尽可能地减小机车轴重转移量，可以通过描述总的轴重转移量与牵引力之间的变化趋势，并寻其最小值的方法来实现。

考虑到实际机车受运行环境的影响，牵引力允许变化量为  $\gamma\%$ ，并假设电机冗余量为  $\alpha\%$ ，故电机牵引力范围为

$$(1-\gamma\%)F \leq F_i \leq (1+\alpha\%)F. \quad (15)$$

假设 1 轮对电机牵引力损失  $\beta\%$ ，则 1 轮对的牵引力为  $F_1' = (1-\beta\%)F$ ，此时需要协调其余未发生故障的电机牵引作用，达到一定的目标。

以总轴重转移量的 2 范数为目标函数，即

$$J = \left\| \sum_{i=1}^4 (W_i' - W_i) \right\|_2. \quad (16)$$

为了使总的轴重转移量最小, 待优化的函数为

$$\min J = \sqrt{(W'_1 - W_1)^2 + (W'_2 - W_2)^2 + (W'_3 - W_3)^2 + (W'_4 - W_4)^2},$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} W'_1 = W_0 - \frac{H-h}{2L} \sum_{i=1}^4 F'_i - \frac{h}{l} (F'_1 + F'_2), \\ W'_2 = W_0 - \frac{H-h}{2L} \sum_{i=1}^4 F'_i + \frac{h}{l} (F'_1 + F'_2), \\ W'_3 = W_0 + \frac{H-h}{2L} \sum_{i=1}^4 F'_i - \frac{h}{l} (F'_3 + F'_4), \\ W'_4 = W_0 + \frac{H-h}{2L} \sum_{i=1}^4 F'_i + \frac{h}{l} (F'_3 + F'_4), \\ \sum_{i=1}^n F'_i - \sum_{i=1}^n F_i = 0, \\ (1-\gamma\%)F \leq F'_i \leq (1+\alpha\%)F. \end{cases} \quad (17)$$

式中  $W'_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 为第1轮对电机牵引力损失时, 对其余各轴牵引力进行优化分配后得到的新轴重。

通过遗传算法求解满足式(17)条件的最优分配的牵引力, 使得目标函数值  $J$  最小。

### 4 仿真与结果分析

本文以四轴机车为例, 文献[14]给出了  $B_0-B_0$  轴式机车参数, 如表1所示。

表1  $B_0-B_0$  轴式机车参数

Table 1  $B_0-B_0$  axle locomotive parameters

机车变量	对应参数
轴重 $W_0/\text{kN}$	215.6
轨面至车钩高度 $H/\text{m}$	1.2
轨面至牵引点高度 $h/\text{m}$	0.25
两转向架中心距离 $L/\text{m}$	20
轴距 $l/\text{m}$	2.5
轮对半径 $r/\text{m}$	0.5

机车正常运行时, 给定各轴牵引力  $F=73.627$  kN, 代入式(12)~(15)中, 计算得到各轴轴重  $W_i$  分别为  $W_1=193.880$  0 kN,  $W_2=223.330$  8 kN,  $W_3=207.869$  2 kN,  $W_4=237.320$  0 kN, 与原轴重  $W_0$  相比可知, 第1轴减载量最大, 第4轴增载量最大。

当机车第1轴发生故障时, 导致该轴牵引力损失30%, 则  $F'_1=51.538$  9 kN。考虑牵引电机的实际运行情况, 假设牵引力的变化范围为  $51.538$  9 kN  $\leq F'_1 \leq 95.715$  6 kN, 将此约束条件代入式(17)中, 通过遗传算法在全局范围内寻找满足约束条件并使目标函数值最小的解。

文献[15]中提到的当某轴牵引力损失后, 损失的部分由剩余各轴均分弥补。如果按文献中的方法进行牵引力补偿, 得到的各轴牵引力及各轴轴重结果与本研究方法对比如表2所示。

表2 计算结果对比分析

Table 2 Comparison and analysis of calculation results

本文算法结果	文献[15]算法结果
$F'_1=51.538$ 9, $W'_1=198.159$ 8	$F'_1=51.538$ 9, $W'_1=195.986$ 7
$F'_2=95.715$ 0, $W'_2=219.051$ 0	$F'_2=80.989$ 7, $W'_2=221.224$ 1
$F'_3=78.623$ 1, $W'_3=203.589$ 2	$F'_3=80.989$ 7, $W'_3=209.975$ 9
$F'_4=68.631$ 0, $W'_4=241.600$ 0	$F'_4=80.989$ 7, $W'_4=235.213$ 3

为了进一步比较牵引力分配结果的优劣, 以总的轴重转移量目标函数值作为比较对象。当机车正常运行时, 目标函数值为  $J_{0\min}$ , 本研究通过遗传算法得到的目标函数值为  $J_{1\min}$ , 通过文献[15]方法得到的目标函数值为  $J_{2\min}$ , 代入数据计算可以得到目标函数值分别为  $J_{0\min}=32.604$ ,  $J_{1\min}=60.764$  2,  $J_{2\min}=61.528$ 。

通过以上数据比较可知, 机车正常运行时总的轴重转移量最小, 一旦机车某轴牵引力发生损失时, 通过遗传算法, 可使得目标函数值相对于文献[15]更小, 说明本研究通过遗传算法寻找最优牵引力, 有效降低了总的轴重转移量。经计算, 轴重转移百分数降低了2.3%。

### 5 结语

1) 考虑轴重转移对各轴牵引力的影响, 提出了总量一致的机车牵引力优化分配方法, 构造了四轴机车轴重转移模型。

2) 应用牵引总量一致性的关系表达式, 构造了关于总轴重转移量的优化目标函数, 并利用遗传算法得到该目标函数值最小情况下的最优牵引力。

3) 最后, 通过对比优化前后的总轴重转移量, 验证了本研究所提出的总量一致的机车牵引力优化分配方法的优越性, 可为机车实际工程应用提供理论指导。

#### 参考文献:

[1] 毛诗柱, 梁志坤. 基于滑模控制的多电机速度同步偏差耦合控制[J]. 包装工程, 2018, 39(5): 153-157.  
MAO Shizhu, LIANG Zhikun. Multi-Motor Speed Synchronization Relative Coupling Control Based on Sliding-Mode Control[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(5): 153-157.

[2] 廖金国, 花为, 程明, 等. 一种永磁同步电机变占空比电流滞环控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4762-4770.  
LIAO Jinguo, HUA Wei, CHENG Ming, et al. A Variable-Duty-Cycle Current-Hysteresis Control Strategy for Permanent Magnet Synchronous Motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4762-4770.

- [3] 马志刚, 赵志强, 王保云. 改进型相邻交叉耦合结构的多电机同步控制[J]. 包装工程, 2017, 38(3): 114-118.  
MA Zhigang, ZHAO Zhiqiang, WANG Baoyun. Multi-Motor Synchronous Control of Improved Adjacent Cross Coupling Structure[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(3): 114-118.
- [4] ZHANG C F, WU H, HE J, et al. Consensus Tracking for Multi-Motor System Via Observer Based Variable Structure Approach[J]. Journal of the Franklin Institute, 2015, 352(8): 3366-3377.
- [5] ZHANG C F, LIN Z Z, YANG S X, et al. Total-Amount Synchronous Control Based on Terminal Sliding-Mode Control[J]. IEEE Access, 2017, 5: 5436-5444.
- [6] 李响, 任尊松, 徐宁, 等. 基于转向架悬挂参数与踏面锥度优化的高速车辆动力学性能分析[J]. 铁道学报, 2018, 40(3): 39-44.  
LI Xiang, REN Zunsong, XU Ning, et al. Dynamic Performance Analysis of High-Speed Vehicle Based on Optimization of Bogie Suspension Parameters and Tread Conicity[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(3): 39-44.
- [7] JEON Y J, LEE H Y, HONG D S. Selection of Major Components of a Four-Axis Transfer Robot Through Dynamic Analysis[C]//2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Takamatsu: IEEE, 2017: 590-595.
- [8] 山下道宽, 张静. 提高机车牵引力的方法[J]. 国外内燃机车, 2012(4): 10-13.  
SHAN Xiadaokuan, ZHANG Jing. Methods to Improve Locomotive Traction Force[J]. Foreign Diesel Locomotive, 2012(4): 10-13.
- [9] 魏家麒, 张开林, 姚远. 单轴牵引力变化时的机车轴重转移分析[J]. 机车电传动, 2014(3): 40-43.  
WEI Jiaqi, ZHANG Kailin, YAO Yuan. Analysis of Locomotive Axle Load Transfer with Consideration of Adhesive Force Varying for Each Axle[J]. Electric Drive for Locomotives, 2014(3): 40-43.
- [10] 冯俞钧, 黄景春, 王会议, 等. 重载机车动态轴重转移补偿仿真研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(8): 115-118.  
FENG Yujun, HUANG Jingchun, WANG Huiyi, et al. Simulation Research on Heavy Load Locomotive Dynamic Axle Loadtransfer Compensation[J]. Computer Simulation, 2018, 35(8): 115-118.
- [11] ZHOU R H, ZOLOTAS A, GOODALL R. Robust System State Estimation for Active Suspension Control in High-Speed Tilting Trains[J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(S1): 355-369.
- [12] 张昌凡, 殷晓飞, 刘建华, 等. 高速列车制动力分配优化控制算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(3): 80-87.  
ZHANG Changfan, YIN Xiaofei, LIU Jianhua, et al. Research on Optimal Control Algorithm for Braking Force Distribution of High-Speed Train[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(3): 80-87.
- [13] 李忠群, 郭文慧, 王志康. 基于混合改进型遗传算法的螺旋铣孔孔群加工路径优化研究[J]. 湖南工业大学学报, 2016, 30(4): 27-31, 73.  
LI Zhongqun, GUO Wenhui, WANG Zhikang. On the Optimized Machining Path for Group Holes Realized by Helical Milling Based on an Improved Hybrid Genetic Algorithm[J]. Journal of Hnnan University of Technology, 2016, 30(4): 27-31, 73.
- [14] 张思宇, 黄景春. 多轴协调的电力机车粘着控制[J]. 计算机仿真, 2016, 33(5): 156-160, 199.  
ZHANG Siyu, HUANG Jingchun. Multi-Axles Coordinated Adhesion Control of Electric Locomotive[J]. Computer Simulation, 2016, 33(5): 156-160, 199.
- [15] 谷杨心. 基于DSP的逆变器分段同步调制算法的研究[J]. 电测与仪表, 2010, 47(6): 73-76.  
GU Yangxin. Sub-Synchrony Modulation Method Study of Inverter Based on DSP[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(6): 73-76.

(责任编辑: 申剑)