

齿轨列车动力分配及高压主电路设计

于超然 金文斌 刘勇 蒋鹏

(中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春//第一作者, 工程师)

摘要 针对齿轨列车在国外已广泛应用,而国内尚处于研究阶段的现状,基于可适用于250‰坡道的齿轨车辆顶层设计参数和性能需求,通过齿轮路段的整车牵引力计算,提出了适合的齿轨列车动力分配方案,确定了齿轨动力转向架和黏着动力转向架数量。提出了齿轨列车高压主电路设备配置和高压主电路拓扑,以及整车牵引力和制动力曲线。可为后续齿轨列车动力分配提供详细的计算支撑。

关键词 齿轨列车; 动力分配; 高压主电路

中图分类号 U234.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.02.015

Power Distribution of Cog Rail Vehicles and High Voltage Main Circuit Design

YU Chaoran, JIN Wenbin, LIU Yong, JIANG Peng

Abstract Despite the wide application of cog rail vehicle in the world, current application of the vehicle in China is still in the research stage. In this paper, a suitable power distribution plan is proposed, the number of cog rail vehicle power bogies and adhesive power bogies are determined, based on the top level design parameters and performance requirements of cog rail vehicles that can be applied to 250‰ ramps, and through the traction calculation when the vehicle passing through the cog rail section. Then, the high voltage main circuit equipment configuration and high voltage main circuit topology are provided, the vehicle traction and braking force curves are proposed. These can provide detailed calculation support for power distribution of the subsequent cog rail vehicles.

Key words cog rail train; power distribution; high voltage main circuit

Author's address National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Co., Ltd., 130062, Changchun, China

列车在坡道行驶时,需要更大的牵引力和制动力。为了增强列车的爬坡能力,列车需要增加动车数量。受制于列车黏着使用利用率限制,即便是全动车车辆,一般爬坡坡度亦不会超过60‰。齿轨是

一种特殊的线路,和普通铁路相比,齿轨轨道安装有特殊的齿条,相应的齿轨车辆配置有一个齿轮和轨道齿条咬合一起,通过车辆牵引电机驱动,为整车提供牵引力和电制动力。齿轨列车最大爬坡坡度可达250‰。增大列车爬坡坡度可减少线路展线长度,降低对山地旅游景区植被及地质破坏的影响,并减少工程造价。齿轨列车目前在国外已广泛应用,技术相对成熟。

齿轨列车提高了车辆爬坡能力,但列车也需在正常线路运行,因此,需根据实际线路需求进行列车动力合理配置,以实现车辆设计的实用性和经济性。

1 国内外齿轨列车应用现状

1.1 国外齿轨列车应用

目前,国外齿轨列车已在30个国家近180条线路上应用^[1-2]。较为成熟的齿轨牵引系统有Marsh齿轨系统、Riggenbach系统、Abt系统、Strub齿轨系统及Locher齿轨系统等^[3]。目前,已经建成的齿轨线路长度已超过3 000 km,广泛应用于欧洲和美国山地路段;瑞士齿轨列车运行线路和数量占全世界总数的一半以上,技术最为成熟。

1.2 国内齿轨列车应用

目前,国内齿轨列车尚处于研究阶段。2020年6月,四川省发展与改革委员会批复了《四川省山地轨道交通规划》,规划了长度约1 700 km的山地轨道交通线路。这些项目的建设,可以带动齿轨轨道交通产业发展,构建山地轨道交通产业,培育万亿级支柱产业。

1.3 齿轨列车牵引的主要研究内容

相对于国内常用的轨道交通列车,齿轨列车增加了齿轮传动系统。区别于现有列车设计,齿轨列车需要特别设计的内容有:

1) 根据车辆需求配置齿轨动力转向架和黏着动力转向架;

- 2) 齿轨路段列车牵引力计算;
- 3) 列车高压主电路设计。

2 齿轨列车牵引性能需求

2.1 黏着路段齿轨列车牵引性能需求

黏着路段齿轨列车牵引性能参数见表 1。

表 1 黏着路段齿轨列车牵引性能参数表
Tab.1 Traction performance requirements of cog rail train on the adhesive line

参数	取值
列车最高运行速度/(km/h)	120.0
设计速度/(km/h)	135.0
列车运行速度为 0~40 km/h 时的平均加速度/(m/s ²)	≥0.5
列车运行速度为 0~120 km/h 时的平均加速度/(m/s ²)	≥0.2
列车运行速度为 120~0 km/h 时的平均减速度/(m/s ²)	≥1.0

注:列车的加、减速性能均在 AW2(满座+6 人/m²,额定载荷)、平直干燥轨道、车轮为半磨损状态、额定网压等条件下测量得出,表 2 同。

2.2 齿轨路段齿轨列车牵引性能需求

齿轨路段齿轨列车牵引性能参数见表 2。

表 2 齿轨路段齿轨列车牵引性能参数表
Tab.2 Traction performance requirements of cog rail train on the cog rail line

参数	取值
最高运行速度/(km/h)	40.0
设计速度/(km/h)	44.0
列车处于 250‰坡道上坡时的最高运行速度/(km/h)	20.0
列车处于 250‰坡道下坡时的最高运行速度/(km/h)	17.5
平均加速度(列车运行速度为 0~18 km/h,250‰坡道上坡)/(m/s ²)	≥0.4
平均减速度(列车运行速度为 40~0 km/h,250‰坡道下坡)/(m/s ²)	≥0.3

2.3 齿轨列车的其他参数信息

齿轨列车其他参数见表 3。

表 3 齿轨列车其他参数表
Tab.3 Table of other cog rail train information parameters

参数	取值或说明
车辆质量/t	180(AW2)或 156(AW0(空载))
列车编组/辆	4
额定供电电压/V	DC 1 500
受电方式	第三轨下部受流
半磨损轮径值/mm	805

3 齿轨列车动力配置计算

3.1 齿轨列车动力分配方案计算

齿轨列车需要在黏着线路和齿轨线路运行。在黏着路段,齿轨列车由黏着电机驱动;在齿轨路段,齿轨列车由黏着电机和齿轨电机同时驱动。

齿轨列车在齿轨段的牵引力主要由齿轨电机贡献。因此,列车动力配置需要首先计算齿轨段列车牵引力需求来确定齿轨电机的数量,从而进一步确定黏着电机的数量。

计算条件如下:

- 1) 每个齿轮由 1 个牵引电机驱动。为保证齿轮使用寿命,单个齿轨牵引力应不大于 60 kN。
- 2) 黏着转向架牵引时,计算黏着系数取 0.13;制动时,计算黏着系数取 0.12。
- 3) 由于列车为全动车配置,列车转动惯量按 10%考虑。
- 4) 为适应齿轨列车在本线最大坡度为 250‰的坡道和 30‰的常规坡道上运行,需采用全动车配置。

AW2 工况下,列车在 250‰坡道上加速度达到 0.4 m/s² 时,至少需要的牵引力(未考虑摩擦阻力和空气阻力)为 519 kN。单个黏着转向架所能提供的牵引力为 31 kN。

3.2 齿轨列车动力分配方案 1

齿轨列车动力分配方案 1(见图 1)为 3 台黏着转向架+5 台齿轨转向架。



注:●●为黏着动力转向架;●○为单齿轮齿轨转向架。

图 1 齿轨列车动力分配方案 1

Fig.1 Power distribution plan 1 for cog rail train

通过计算得出,该编组列车可提供的最大牵引力为 393 kN,小于 519 kN。由此可见,该编组列车所能提供的最大牵引力不能满足列车牵引力需求,因此,需增加齿轨齿轮数量。若将其中 1 个黏着转向架改为齿轨动力转向架,此时列车在黏着线路上运行时动拖比已降至 1:3,降低了列车在黏着线路上的性能。因此,本文不考虑此种动力分配方式,后续应考虑在每个齿轨转向架上安装 2 个齿轮。

3.3 齿轨列车动力分配方案 2

齿轨列车动力分配方案 2(见图 2)为 5 台黏着

转向架 +3 台齿轨转向架。



注：●●为黏着动力转向架；⚙️为双齿轮齿轨转向架。

图2 齿轨列车动力分配方案2

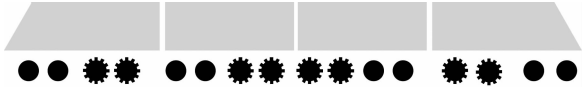
Fig. 2 Power distribution plan 2 for cog rail train

通过计算得出,该编组列车可提供的最大牵引力为 515 kN,小于 519 kN。由此可见,该编组列车所能提供的最大牵引力不能满足列车牵引力需求,需继续增加齿轨齿轮数量。

3.4 齿轨列车动力分配方案3

齿轨列车动力分配方案3(见图3)为4台黏着转向架+4台齿轨转向架。

通过计算得出,该编组列车可提供的列车最大牵引力为 604 kN,大于 519 kN。由此可见,该编组



注：●●为黏着动力转向架；⚙️为双齿轮齿轨转向架。

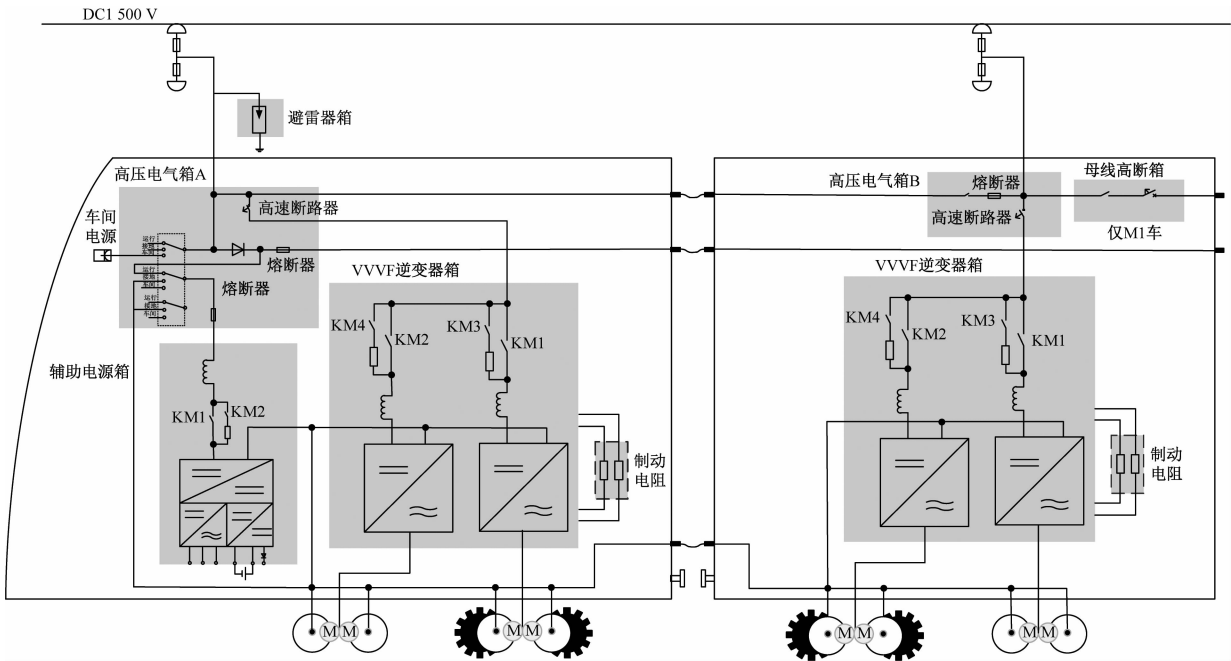
图3 齿轨列车动力分配方案3

Fig. 3 Power distribution plan 3 for cog rail train

列车能提供的牵引力可满足列车的牵引力需求,并有一定的余量。因此,齿轨动力配置为4台黏着转向架和4台齿轨转向架,每台齿轨转向架含有2个驱动齿轮。

4 齿轨列车牵引系统高压主电路设计

齿轨列车的基本配置为4个黏着动力转向架和4个齿轨动力转向架。齿轨列车的高压主电路原理如图4所示。



注:M1 为无受电弓的动力车;KM1、KM2、KM3、KM4 为接触器。

图4 齿轨列车高压主电路原理图

Fig. 4 High-voltage circuit schematic diagram of cog rail train

齿轨列车的高压主回路电气设备主要包括避雷器箱、高压电气箱 A、高压电气箱 B、VVVF(变压-变频)逆变器箱、辅助电源箱、制动电阻箱、牵引电机及接地装置。其中,高压电气箱 A 箱、高压电气箱 B 箱为高压系统提供电气隔离和短路保护;母线高断箱主要实现2节车厢之间的高压母线分断及短路保护,VVVF 逆变器驱动牵引电机为整车提供牵引力和电制动力;辅助逆变器为整车中压和低压系统提供电能;制动电阻和斩波回路为整车提供过压

保护功能。齿轨列车高压主回路电气设备配置如表4所示。

5 齿轨车辆牵引电机计算

5.1 黏着路段齿轨车辆牵引力计算

计算中,动车惯性系数取 0.1,用于计算列车换算质量。接触网压在 DC 1 500 V 的条件下,取列车的起动加速度为 0.5 m/s²,取列车起动阻力为 9.6 kN,则列车的起动牵引力为 107.4 kN。

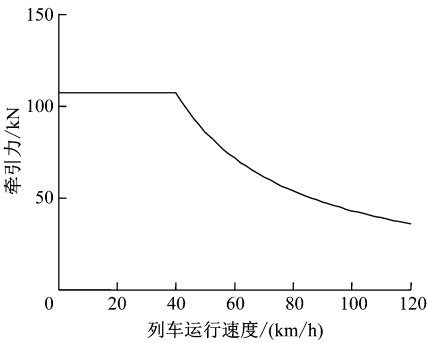
表 4 齿轨列车高压主回路电气设备配置

Tab.4 The cog rail train configuration

名称	总数量	不同车辆电气设备数量			
		Mc	M1	M2	Mc
VVVF 逆变器箱/套	4	1	1	1	1
高压电器箱 A/套	2	1			1
高压电器箱 B/套	2		1	1	
母线高断箱/套	1		1		
制动电阻箱/套	4	1	1	1	1
辅助电源箱/套	2	1			1
黏着电机/台	8	2	2	2	2
齿轮电机/台	8	2	2	2	2
避雷器箱/套	2	1			1

注:Mc 为带司机室的动力车;M1、M2 为无受电弓的动力车。

AW2 时黏着路段齿轨车辆牵引力-速度曲线如图 5 所示。

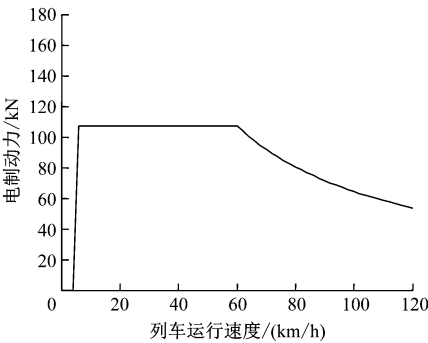


注:列车运行速度为 0~40 km/h 的区域为恒转矩区;
列车运行速度为 40~120 km/h 的区域为恒功区。

图 5 黏着路段齿轨车辆牵引力-速度曲线

Fig.5 Traction-speed curve of cog rail train on the adhesive rail section

AW2 时黏着路段齿轨车辆电制动力-速度曲线如图 6 所示。



注:列车运行速度为 0~5 km/h 的区域为电空转换区;
列车运行速度为 5~60 km/h 的区域为恒转矩区;
列车运行速度为 60~120 km/h 的区域为恒功区。

图 6 黏着路段齿轨车辆电制动力-速度曲线

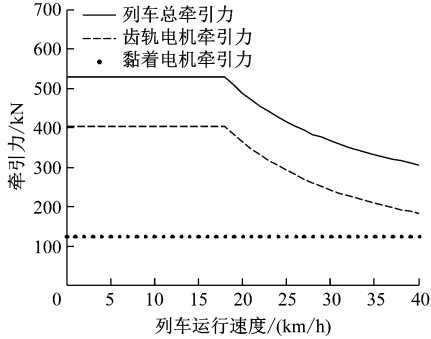
Fig.6 Electric braking force-speed curve of cog rail train on the cog rail section

5.2 齿轨电机牵引力计算

本方案共有 8 台牵引电机。动车惯性系数取 0.1,用于计算列车换算质量。接触网压在 DC 1 500 V 的条件下,列车的起动加速度取 0.4 m/s^2 ,则齿轨线路所需牵引力为 529 kN。

根据 3.1 节,按照单黏着转向架可发挥的牵引力最大值 31 kN 计算,黏着电机在齿轨线路上发挥的牵引力为 124 kN,则齿轨电机总的牵引力为 405 kN。

黏着电机牵引力在齿轨线路上按照恒转矩控制,牵引力-速度曲线如图 7 所示。



注:列车运行速度为 0~18 km/h 的区域为恒转矩区;
列车运行速度为 18~40 km/h 的区域为恒功区。

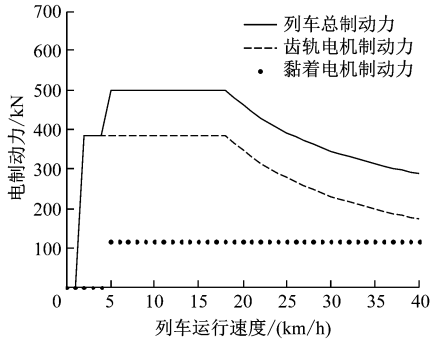
图 7 齿轨路段黏着电机牵引力-速度曲线

Fig.7 Traction force-speed curve of cog rail train on the cog rail section

黏着电机电制动力黏着利用率取 0.12,则该电机在齿轨路段发挥的电制动力为 115 kN。

齿轨线路所发挥的电制动力可满足列车在坡度为 250‰ 的坡道上以最大减速度 0.3 m/s^2 进行制动,剩余部分可由空气制动补足。列车阻力有利于列车减速,故制动时不考虑阻力。通过计算得到齿轨列车所需最大电制动力为 384.68 kN。

黏着电机电制动力在齿轨线路上按照恒转矩控制,电制动力-速度曲线如图 8 所示。



注:列车运行速度为 2~18 km/h 区域为恒转矩区;
列车运行速度为 18~40 km/h 区域为恒功区。

图 8 齿轨路段黏着电机电制动力-速度曲线

Fig.8 Electric braking force-speed curve on the cog rail section