

基于永磁直驱结构的柔性转向架构架横梁革新设计

杨利强¹ 楚永萍² 沈 钢³

(1. 徐州市轨道交通有限责任公司, 221018, 徐州; 2. 南车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京;

3. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海//第一作者, 正高级工程师)

摘 要 介绍了一种基于永磁直驱结构的柔性转向架构架横梁设计。该横梁结构是关键的创新“交叉板式”结构, 替换传统的箱式横梁实现了侧滚方向的柔性, 具有在结构上小轴距、在强度上具有低应力、在抗菱形刚度上具有高刚度的特点。推导了交叉板关键参数对各向刚度的影响, 并用有限元软件验证了所推导公式的正确性。

关键词 地铁车辆; 转向架; 永磁直驱; 交叉式柔性横梁

中图分类号 U270.331

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.11.009

Innovative Design of Flexible Bogie Beam with Permanent Magnet Direct Drive

YANG Liqiang, CHU Yongping, SHEN Gang

Abstract An innovative design of flexible bogie beam structure with permanent magnet direct drive is introduced. The key of the beam structure is the innovative ‘cross board’, providing a possible flexible structure between two side frames, replacing the conventional box type beam. The structure has characteristics of smaller wheelbase, low stress in strength, high stiffness in anti-diamond stiffness. The influence of cross board key parameters on stiffness in all directions is deducted, and the derived formula is verified with finite element software.

Key words metro vehicle; bogie; permanent magnet direct drive; cross flexible beam

First-author's address Xuzhou Metro Company Co., Ltd., 221018, Xuzhou, China

对于地铁列车, 良好的曲线通过能力是人们追求的重要目标之一。为此, 一种新型的永磁直驱系统地铁车辆转向架(以下简为“新型转向架”)应运而生(如图 1 所示)。

1 新型转向架的构架横梁结构

新型转向架取消了传统的齿轮传动系统, 采用永磁电机直驱方式; 转向架固定轴距可设置为 1.6

m, 车辆通过的最小曲线半径可仅为 100 m。装备了新型转向架的列车不仅具备良好的小曲线通过能力, 还具备良好的左右轮对自平衡能力。此外, 其拖车转向架构架设计还创新性地使用了一种交叉板式结构。如图 2 所示, 左右侧架间的连接即为交叉板式结构, 其由 4 块呈八字型的柔性钢板对焊而成, 更有利于列车顺利通过三角坑或曲线。

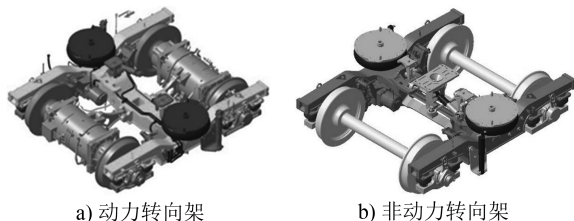


图 1 新型永磁直驱系统地铁车辆转向架

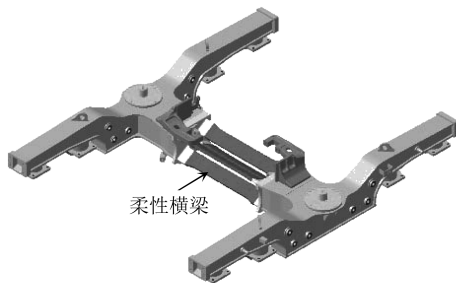


图 2 交叉板式结构转向架构架

列车在实际运行当中, 由于路线的不平顺以及进入缓和曲线时所出现的顺坡容易使转向架的各个支撑点的高度不等, 使用传统的刚性 H 型构架的转向架容易受到斜对称扭转载荷。同时为了适应路面的不平顺以及减少由此带来的轮重减载, 传统铁路列车及城市轨道交通列车的转向架的一系垂向刚度都设置得比较小。

这样一来, 车辆在不同的工况载荷下地板面以及悬挂弹簧的挠度变化很大, 尽管应用了空气弹簧作为二系悬挂的车辆可以通过高度控制阀来调整车辆地板面的高度, 由于重载而使得一系垂

向悬挂挠度变化过大却是无法调整的。为此国外出现了把构架横梁做得很软的柔性构架,这种构架的抗扭转刚度很小在由于路面不平顺所带来的垂直斜对称扭转载荷的作用下变形很大。与传统箱式横梁相比,新型构架横梁结构上最大应力点处的应力降低了 29%^[1]。通过构架变形去适应路面的不平顺,以此减小轮重的减载率,提高车辆行驶的稳定性。

最具代表性的是由加拿大庞巴迪公司研制的 MK II 迫导向径向转向架(见图 3),该转向架使用直线电机作为驱动装置,取消了一系垂向悬挂,通过采用由高强度钢板焊接而成的开口工字形断面横梁,使得构架具有一定的扭转柔性,适应轨道在缓和曲线上的超高的变化。

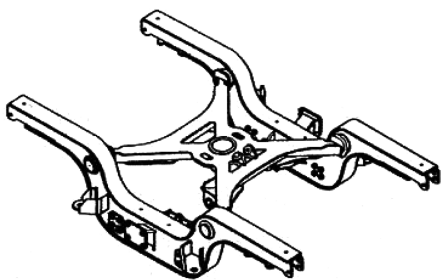


图 3 MK II 构架示意图

根据转向架数学模型的动力学分析,柔性构架的横梁可以看作是一个具有抗扭转刚度和抗菱形刚度的装置^[3]。构架的抗扭转刚度越小,转向架适应路线的不平顺能力也就越强,轮重减载率越小。抗菱形刚度对与转向架的运行稳定性有关。若抗菱形刚度过小,则会严重制约列车的行驶临界速度。以货车的三大件转向架为例:原有的抗菱形刚度过小,导致货车运行速度过小;增加的交叉支撑杆加大了构架的抗菱形刚度,也提高了货车行驶的稳定性和运行速度。

图 2 中转向架构架的设计继承了这种柔性结构的理念,但彻底简化了结构。该结构仅用 4 块柔性钢板交叉型布置作为构架的横梁,以此来为构架提供抗扭转刚度和抗菱形刚度。构架横梁横截面结构如图 4 所示。

2 构架横梁各向刚度值的计算方法

图 4 所示的柔性构架横梁便于通过基本独立的结构参数来分别获得较低的抗扭转刚度、较高的抗菱形刚度,从而提高转向架运行中对扭曲轨道的适

应性。图中: L 为钢板宽度; z 为钢板厚度; d 为钢板至横梁结构中心点的距离; α 为钢板间夹角。

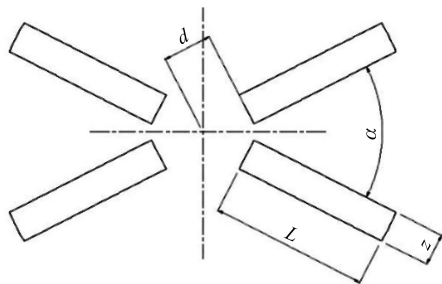


图 4 新型构架横梁的横截面图

各柔性钢板截面相对于垂直中心线的极惯性矩为:

$$I_{z1} = \frac{2z \cdot a_1^3}{3 \sin \theta} + 2r \left[\frac{a_2(a_2^3 - a_1^3)}{3} - \frac{(a_2^4 - a_1^4)}{4} \right] \quad (1)$$

式中:

$$a_1, a_2, r \text{——计算过程参数; 其中 } a_1 = \frac{1}{2}(L \sin \theta - z \cos \theta), a_2 = \frac{1}{2}(L \sin \theta - z \cos \theta) + z \cos \theta, r = \tan \theta + \frac{1}{\tan \theta};$$

θ ——钢板间夹角 α 的一半。

通过线性叠加,图 4 所示的截面的极惯性矩和抗弯截面模量为:

$$I_z = 4I_{z1} \quad (2)$$

$$W_z = I_z / a_2 \quad (3)$$

先对长度为 l 的单块钢板进行剪切分析。由于钢板的末端端面只能沿着 Y 轴平行向上,其自由度受到了限制,端面 B 点的转角 $\beta_B = 0$,等同于受到 1 个转矩 M 的作用,如图 5 所示。 M 大小和作用力 F 相关联。

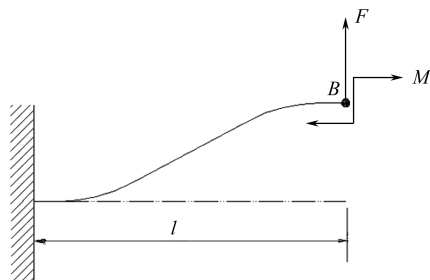


图 5 转矩的大小和作用力 F 和力矩 M 的关系

在 F 的作用下,端面 B 点的转角和挠度为:

$$\dot{y}_1 = \frac{Fl^2}{2EI_{z1}} \quad (4)$$

$$y_1 = \frac{Fl^3}{3EI_{z1}} \tag{5}$$

在 M 的作用下,端面 B 点的转角和挠度为:

$$\dot{y}_2 = -\frac{Ml}{EI_{z1}} \tag{6}$$

$$y_2 = -\frac{Ml^2}{2EI_{z1}} \tag{7}$$

由端部平行条件 $\dot{y}_B=0$,可推导出:

$$M = Fl/2 \tag{8}$$

通过线性相加得 B 点的挠度位移为 :

$$y_B = \frac{Fl^3}{12EI_{z1}} \tag{9}$$

单块钢板的抗菱形刚度为:

$$k_1 = \frac{Fl^2}{y_B} = \frac{12EI_{z1}}{l} \tag{10}$$

单块钢板最大正应力解析式为:

$$\sigma_{1\max} = \frac{Fl}{2W_z} \tag{11}$$

3 构架横梁截面各向刚度计算结果的验证

为了验证构架横梁截面各向刚度计算结果的正确性,本文采用 ANSYS 有限元模型进行仿真验算。对同样尺寸的三维模型在 ANSYS 软件中加载,将有限元模型模拟结果与计算得出的刚度和应力进行对比,以此来验算前文所述各向刚度计算式是否准确。验算模型参数取值与计算式相同: $d=30\text{ mm}$, $L=135\text{ mm}$, $Z=30\text{ mm}$,剪切力 $F_x=5\ 000\text{ N}$,杨氏模量 $E=210\text{ GPa}$,板长 $l=1\ 845\text{ mm}$ 。得到仿真结果及计算结果如表 1 所示。

表 1 应力的计算值和仿真结果

$\alpha/(\text{°})$	y_1/mm		$\sigma_{1\max}/\text{MPa}$	
	计算结果	仿真结果	计算结果	仿真结果
40	0.598 3	0.584 8	14.461	14.752
60	0.697 6	0.692 3	16.220	15.725
80	0.875 8	0.867 2	18.941	18.252
90	1.013 5	1.003 0	20.844	19.940
100	1.202 7	1.187 6	23.268	22.401

由表 1 可见, y_1 和 $\sigma_{1\max}$ 的计算结果和有限元模型加载模拟出的模拟值基本一致。从而验证了解析式的准确性。

根据式(10),得到由 4 块钢板组成的构架横梁截面抗菱形刚度为:

$$k_{1,\text{总}} = \frac{Fl^2}{y_B} = \frac{48EI_{z1}}{l} \tag{12}$$

再根据式(11),即可推导出构架横梁总截面的最大正应力为:

$$\sigma_{1\max} = \frac{F_1la_2}{8I_{z1}}$$

相应地,可以得到构架横梁总截面的抗扭转刚度:

$$k_2 = GI_p/l$$

其中, I_p 为考虑对称 2 块板的相当极性惯性矩:

$$I_p = \frac{2}{3}(L+d)z^3 - 2\beta dz^3$$

相关最大剪切应力解析式为:

$$\tau_{2\max} = \frac{3T}{2(L+d)Z^2 - 2C_TdZ^2}$$

式中:

T ——施加在左右侧梁上的扭矩;

C_T ——矩形截面杆的扭转系数。

4 结语

基于永磁直驱的结构特点实现的交叉板式柔性横梁结构,不仅可以使轴距更小,还能通过优化不同的交叉板厚度、长度及宽度来实现不同的抗扭转刚度和抗菱形刚度,可有效降低轮重减载率,保证列车具有一定的临界速度。这种结构利用较小的抗扭刚度来适应小半径大超高的线型,利用短轴距来减小小半径状态下的侧面磨耗,可广泛应用于需通过特小半径曲线线路的城市轨道交通车辆。

参考文献

[1] 楚永萍,胡定祥,周亮. 地铁新型永磁直驱转向架的设计和分
析[J]. 城市轨道交通研究,2016(6) : 17.

[2] 沈钢. 永磁直驱柔性转向架动力学性能计算[R]. 上海: 同济
大学,2014.

[3] 陆威宏. 新型永磁同步电机直驱式转向架研究[D]. 上海: 同
济大学,2011.

(收稿日期:2020-07-08)