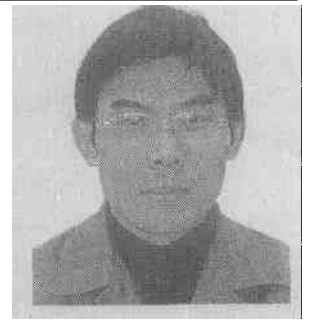


新型城市轻轨车辆及转向架研究

虞大联^{1,2}, 李 芾¹, 傅茂海³, 黄运华³

(1. 西南交通大学 牵引动力研究中心, 四川 成都 610031;
2. 四方机车车辆股份有限公司 技术中心, 山东 青岛 266111;
3. 西南交通大学 机车车辆研究所, 四川 成都 610031)



作者简介: 虞大联(1968-), 男, 1989年6月毕业于兰州铁道学院机械系铁道车辆专业, 高级工程师, 在职研究生, 主要从事铁道车辆及轻轨车辆转向架的研究开发工作。

摘 要: 根据城市轻轨车辆的运用特征 结合国内外城市轨道车辆及走行部的结构特点 着重比较了独立旋转车轮和传统轮对的性能差异; 介绍了改进独立车轮导向性能的技术措施; 预测了非常规新型转向架在轻轨车辆上的应用前景; 最后 探讨了国内新建城市轻轨车辆的选型原则和走行部模式 提出了新型城市轻轨车辆和转向架的设计方案 并详细介绍了各部分的结构特点。

关键词: 轻轨车; 转向架; 导向性能; 独立旋转车轮

中图分类号: U239.5; U260.331 文献标识码: A 文章编号: 1000-128X(2004)04-0026-05

Study on new light rail vehicles and bogies

YU Da-lian^{1,2}, LI Fu¹, FU Mao-hai³, HUANG Yun-hua³

(1. Traction Power Research Center, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;
2. Technical Center, Sifang Locomotive & Rolling Stock Co. Ltd., CSR, Qingdao, Shandong 266111, China;
3. Institute of Rail Vehicles, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Based on the operation characteristics of light rail vehicles (LRV) and in the light of the structure characteristics of the urban rail vehicles and running gear at home and abroad, the differences between independently rotating wheel (IRW) and traditional wheel set are compared. Technical measurements are given to improve the guiding performance of IRW. The application prospect of non-traditional bogies to LRV are forecasted. In the end probed are the lectotype principles and running gear modes of the newly built LRV. The design scheme is proposed for the LRV and bogies and the structure characteristics of each part are detailed.

Key words: LRV; bogie; guiding performance; independently rotating wheel

0 引言

中国经济的快速发展和城市化进程的加快,使城市的交通状况面临巨大压力,尤其是大中城市,现有交通系统日渐成为经济持续发展的瓶颈之一^[1]。国外的经验表明,采用城市轨道交通系统是一种有效的解决方案。这一方案近年来在国内日益受到关注。

众所周知,加拿大庞巴迪(Bombardier)公司、法国阿尔斯通(Alstom)公司及德国西门子(Siemens)公司长期以来一直都是轨道交通领域内的领先者,在城市轨道车辆的研发方面拥有相当的实力和丰富的经验。城市轨道交通在中国起步较晚,为了缩短与国外先进技术的差距,应研究、引进和消化当前具有最新技术含

量的设计思想,加快技术储备的步伐,特别要加紧对新型转向架的前期研究。

1 轻轨车辆的运用概况

轻轨交通 Light Rail Transit — LRT 是一种比较经济的城市大规模公共轨道交通系统,其载客量具有较宽的范围。相对于铁路运输,城市轨道交通的特点是:小编组、行车密度高、站间距短、运用环境受既有城市空间制约因素多、对车辆装备的可靠性要求更高。

1.1 国外新型轻轨车辆及转向架的发展和结构形式

1.1.1 既有街面有轨交通车辆

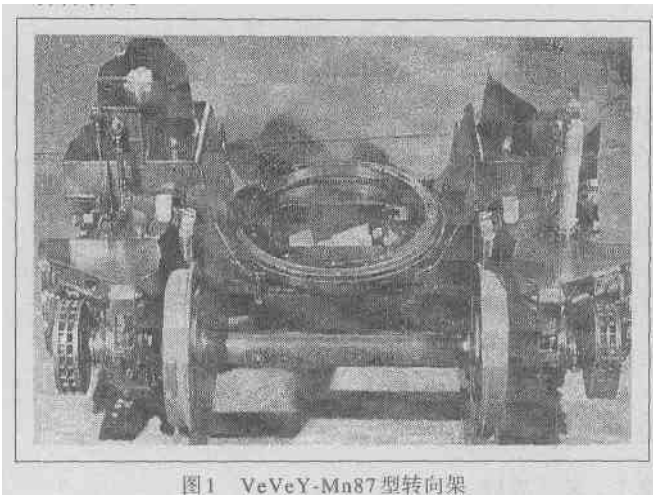
欧洲一些城市在新建专用轻轨线路的同时,将尚未拆除的街面有轨电车运输作为城市轻轨交通的辅助系统予以保留。由于城轨线路的曲线半径较小,改造有轨电车技术的主要指导思想是:强调乘客乘降的便捷

收稿日期: 2004-01-16; 收修改稿日期: 2004-03-02

基金项目: 教育部高等学校骨干教师资助计划项目

性,适应既有街面线路及站台设施。技术措施主要体现在改善曲线通过性能,降低车辆地板面的高度,尽可能实现低地板化等方面。低地板的标准是地板面距轨面高度为350~400 mm。

实现100%低地板,最大的障碍是传统轮对的车轴。因此,在独立旋转车轮这一新技术问世之前,降低地板面的措施无非是采用部分低地板或装用小轮径车轮。图1所示为瑞士VeVeY-Mn87型转向架,转向架轴距1000 mm,轮径410 mm。降低车轴高度后,制动盘只有移到轮对外侧,转向架下凹式摇枕的心盘面高度接近车轴中心线,为330 mm^[2],实质上还属于小型化的传统形式转向架。



理论和实践表明,采用独立旋转车轮(IRW)后,由于轮轨间无纵向蠕滑,理论上不存在蛇行运动,车辆的临界速度很高,但同时却丧失了传统轮对所特有的直线上自动复原及曲线上的导向功能。故目前采用独立旋转车轮的高速铁路机车车辆除了西班牙的Talgo系列之外,投入运用的实例并不多。但由于独立旋转车轮在降低车辆地板面方面具有先天优势,故在城轨车辆尤其是低地板轻轨车辆上得到了广泛的发展和运用。因城轨车辆运行速度不高,稳定性不再是关键,如何改善独立旋转车轮转向架的小半径曲线通过性能成为研究的重点。

1.1.2 独立旋转车轮

最早对独立旋转车轮的结构型式以及动力学特性开展理论研究的代表人物是德国的Fritz Frederich教授,他所提出的独立旋转车轮的理论模型有以下3种基本类型:

(1)独立车轮轮副结构

指左右两车轮不装在同一车轴上,而是各自能绕其轴自由旋转,并相互保持平行^[3],这是独立旋转车轮模型初期的基本结构。这种轮副结构没有良好的导向功能,在直线上轮副一旦出现横移,要经过很长的时间,才能回复到线路中心线附近;轮副产生偏转角之后,将始终保持该状态并造成轮缘贴靠钢轨。

这种轮副结构在曲线通过时基本上只能依靠轮缘导向,导致车轮轮缘贴靠钢轨严重,外侧车轮的轮轨横向力比传统轮对大,外侧车轮的脱轨稳定性也低于传统轮对,冲角也大于传统轮对^[4]。这种轮副结构的独立旋转车轮,就导向功能而言,本身不具备实用化的条件。

(2)独立车轮轮座结构

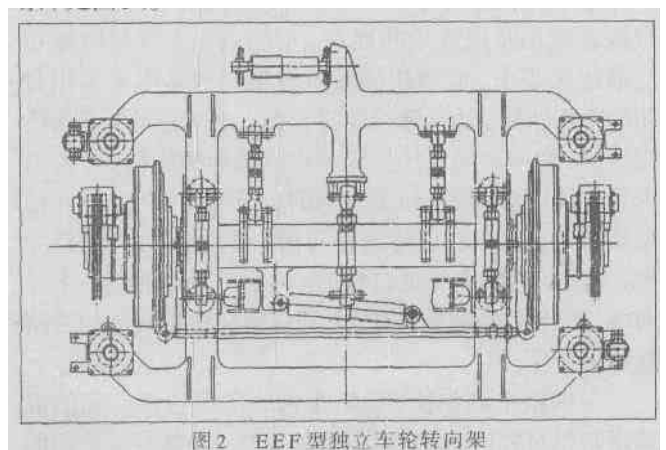
这种结构的具体实例就是被称为EDF型 Einzelrad Doppel fahrwerk 的独立车轮转向架。早在1984年其室内滚动试验的最高速度达到了507 km/h,这反映了独立旋转车轮在提高车辆临界速度方面所具有的潜力。

该结构车轮的复位由同一侧两车轮的重力复原力来完成。偏转回复功能则是依靠前后车轮不同的重力复原力形成与偏转方向相反的回转力矩来实现。在偏转过程中,虽然前后两轮有相同的横向蠕滑力,但不能形成力矩,所以这种独立车轮轮座结构的自动对中和导向完全由重力复原力来提供,是一种比较理想的模型。但由于两侧架铰接部位存在磨损等原因,离实际运用还存在较大的距离,故在已投入运用的独立车轮转向架中,几乎没有采用这种结构的独立旋转车轮形式。

(3)自动调节独立车轮结构

这是一种最理想的独立车轮模型,其基本原理是依靠重力复原力对车轮外侧的假设支点形成随偏转角变化的回复力矩,使车轮始终保持与轨道处于平行状态,具有自动调节功能。通常,左右两车轮由1根横向拉杆连接形成类似四连杆机构,使两车轮相互调节。

这种结构在图2所示由Duewag/BSI设计的EEF型(Einzelrad-Einzel fahrwerk 转向架中得到体现 在实际运用当中也取得了满意的效果^[5]。其特点为:左右两车轮有相同的偏转角;左右车轮可以有不同的转速。这种型式独立旋转车轮的核心技术是轴箱装置:在满足与车轮固结的短车轴相对轴箱可以自由转动的同时,还允许产生相对偏转;内部有类似汽车后桥中的差速机构,车轮相对于轴箱可产生 $\pm 15^\circ$ 的偏转角度,结构较复杂(见图3)。



综上所述,独立车轮轮副结构虽然结构简单,但为

了获得良好的曲线通过性能,必须采取必要的强制性导向措施。由于迫导向转向架非常适用于车辆的小半径曲线通过,因而在部分装用独立车轮转向架的轻轨车上被采用,其中最具创新构思的是瑞士辛德勒(Schindler)公司与SIG公司联合设计的Cobra车组^[6]。其转向架主要由2套独立车轮轮副结构组成。车轮导向机构采用了径向装置,利用相邻车与本车在曲线上的相对转角,通过一纵向设置的推拉杆及杠杆使前后两独立车轮轮副处于径向位置。采用这种迫导向方式,可使该车组能够通过的最小曲线半径达11.8 m。如此小的曲线半径,用传统的轮对式转向架是无法想象的。



图3 EEF型独立车轮轴箱

另一个成功地利用迫导向实现径向功能的是由SGP公司与Siemens公司联合推出的超低地板Ultra Low Floor轻轨车组ULF197-4^[7]。其地板面在车辆横断面内有一坡度,地板面在车门入口处的高度距轨面只有152 mm,另一侧为197 mm。车组由5节短车体通过铰接式连接编组,两铰接端的间距为5 630 mm,车组总长24 010 mm。在每个铰接连接处设一独立车轮轮副装置,并采用与Talgo列车相似的径向调整装置。其作用原理是利用两相邻车与轴箱之间通过推拉杆使车轮在曲线上呈径向位置。

1.1.3 新型轻轨车辆

由于既有路面有轨交通不可避免地存在平面交会、载运容量小及速度慢的缺点,不能满足大规模的城市交通运输需求,故新建的城市轻轨交通基本上采用封闭的专用线路,运行速度明显提高,地板面高度可以适当提高,转向架的结构形式不再受低地板的约束,可以采用传统轮对。城市轨道交通的运行速度不高,运行稳定性容易满足,利用传统轮对的纵向蠕滑机理施行导向,具有较好的曲线通过性能。为了更好地通过小半径曲线,转向架轴距不宜过大,其取值应根据具体的线路参数来确定。

与铁路车辆相比,轻轨车辆的车型选择受到的混编限制相对宽松,形式可以更加灵活,尤其对所采用的走行部,各种非常规转向架被采用,以适合于城市轻轨交通的运用要求。近年来,轻轨车辆转向架的设计不乏

创新之作,采用单轴转向架就是一种方向。有关单轴转向架的理论研究、试验和产品开发已成为城市轨道交通车辆领域的新动向。目前已成功地投入商业运营的主要有:丹麦哥本哈根市郊S-tog电动车组、德国LIREX电动车组、奥地利的Integral内燃动车组^[8]。

1.2 国内轻轨车辆的结构模式

中国的城市轻轨交通系统起步较晚但发展很快。国内目前仅有个别城市还保留着原有的地面有轨线路,在这些线路上采用低地板车辆值得尝试;而对于其他将要新建城市轨道交通系统的城市而言,是否采用低地板车辆有待于进一步科学论证。

采用100%低地板车辆,必然要求采用独立旋转车轮技术,而这无疑会给转向架的诸如驱动、制动带来一定的困难,增加了转向架的设计难度及制造成本。从技术角度出发,新建轻轨车辆采用高地板形式更符合当前的国情及现代城市交通的发展规划趋势,其难度也相对较低。目前国内已投入运营的轻轨系统及在建、新建轻轨也大都选择了这一模式。因此,就国内轻轨车辆的走行部的形式选择而言,对采用传统轮对结构的单轮对转向架进行理论研究和试验是有必要的。

2 方案设想

2.1 车组模型

图4为轻轨车辆车组模型的2种方案。

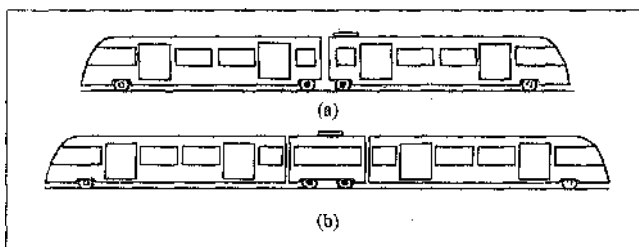


图4 车组模型

(a)方案I; (b)方案II

方案I为2车单元。采用铰接连接,在两端装用单轮对转向架(拖车转向架),中间的铰接处设一动力转向架。其轴列为1AA1,动拖比为1:1。通过模块化设计,2车除受电弓部分外完全相同,根据运量要求可多组单元连挂运行。

方案II为三车单元。两端车同方案I,中间设一短车体。中间车与两端车采用双铰接连接,两端装用单轮对转向架(拖车转向架),中间车装用一动力转向架。其轴列为1AA1,动拖比1:1,也可根据运量要求多组单元连挂运行。

2个方案的动力转向架均采用常规转向架,主要是考虑到单轮对动力转向架的电机悬挂设计难度较大,非对称质量分配可能对构架的垂向振动有一定的影响。采用铰接结构的不足之一是2个端车只由1个转向架支承,停放或单独运行需要假台车,但考虑到每个车组单

元基本上是固定编组,只在特殊情况下才进行解编,故并不影响多单元车组的连挂和分解。为便于通过小半径曲线,动力转向架的轴距在满足铰接连接的前提下应控制在2 000 mm以内。

2.2 单轮对拖车转向架设计方案

由于两端的单轮对转向架为拖车转向架,没有驱动装置,所以结构相对简单。转向架如图5所示,主要由构架、一系悬挂装置、二系悬挂装置、牵引装置、转向架基础制动装置等5部分组成。转向架的主要技术参数见表1。

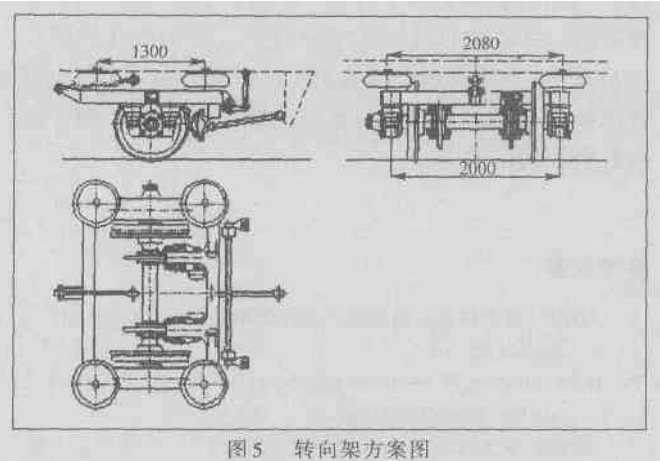


图5 转向架方案图

表1 转向架技术参数

名称	参数
设计速度 / $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	100
轨距 / mm	1 435
轴重 / t	14
车轮形式及轮径 / mm	方案1: 橡胶弹性车轮 840 方案2: 整体辗钢车轮 840
车轮踏面	LMA 磨耗型踏面
一系悬挂方式	方案1: 锥形橡胶-金属弹簧 方案2: 人字形橡胶弹簧
一系悬挂横向跨距 / mm	2 000
二系悬挂方式	空气弹簧+锥形橡胶堆
二系悬挂横向跨距 / mm	2 080
空气弹簧直径 / mm	450
自重下空气弹簧距轨面高度 / mm	1 050
转向架牵引方式	单拉杆牵引
转向架基础制动装置	方案1: 轴盘制动 方案2: 踏面闸瓦制动
转向架自重 / t	3.0

2.2.1 构架

构架结构在水平面内为封闭型梁,长度比常规二轴转向架短,主要由侧梁、端梁组成,均采用箱形梁断面。在构架侧梁的两端设两空气弹簧座,内侧端梁下凹,用于安装牵引拉杆座,并设有两盘形制动吊座及横向止挡座,外侧端梁设定位杆座。如利用构架内腔作为容积室满足空气弹簧的附加气室容量要求的话,可不必另设铝合金风缸。

相比于传统的二轴转向架构架,空气弹簧端置后,侧梁的力学模型由原先的简支梁变为悬臂梁。应对侧

梁的受力和变形进行认真分析计算。

2.2.2 一系悬挂装置

一系悬挂有2种方案,主要区别在于车轮型式和轴箱弹簧结构。采用橡胶弹性车轮的主要目的是降噪和减小轮轨作用力。利用橡胶的隔声特性进行降噪效果很好。该技术业已成熟,国外很多轨道车辆上都装用这种车轮。城市轻轨车辆的运行速度不高,采用弹性车轮其安全性是容易保证的。

若采用弹性车轮,则无法采用踏面闸瓦制动;如果采用整体辗钢车轮,对制动方式则没有限制。为了降低簧下质量,车轮直径都选840 mm。车轴可利用现有的标准车轴。

关于一系弹簧的形式,也有2种方案。一是用圆锥形金属橡胶弹簧。这种弹簧在铁路客车转向架上越来越多地被采用,也属于成熟技术,对于两弹簧间距的取值应根据侧梁的受力分析、轴箱的结构及是否采用轴盘制动等因素进行选择。采用这种轴箱弹簧,轴箱必须设两支承耳。二是采用人字形橡胶弹簧。这种弹簧在上海地铁1号线车辆及其他轻轨车上也曾大量采用,具有良好的刚度匹配功能;但近期内发生的几起构架弯角处裂纹故障应引起重视,而且采用这种弹簧对构架的加工和组装精度要求甚高。采用这种悬挂方式,将无法装用轮盘制动。

为了防止轴箱弹簧的意外失效,在构架与轴箱顶部设有一橡胶紧急弹簧,其自由间隙应保证在最大垂向挠度下不接触紧急弹簧。

在2种方案中,鉴于橡胶弹簧的减振特性,都暂不安装轴箱减振器。但构架和轴箱在设计时应留有安装位置,根据动力学计算及实验结果决定取舍。

2.2.3 二系悬挂装置

二系悬挂主要包括空气弹簧、横向油压减振器、横向止挡、导向杆等。

空气弹簧之所以设置于构架四角,其主要目的是为了增加转向架的结构稳定性。空气弹簧的底座为圆锥形橡胶堆紧急弹簧。在空气弹簧与附加气室间留有节流阀安装接口,可根据计算或试验结果,选择采用节流阀还是外设垂向减振器进行减振。空气弹簧的内压可以比只用一个空气弹簧的方案低,以降低横向刚度。转向架的综合横向刚度应该由空气弹簧和横向止挡来生成。定位杆及牵引拉杆的附加横向刚度的影响应减低到最小。

除了在两侧的空气弹簧间设有差压阀,同侧的两空气弹簧如不相互连通,也应设置差压阀,以均布载荷。为了适应大范围的载重变化,高度调整阀和空重车阀也必不可少。

横向减振器及横向止挡与常规转向架基本相同,其参数值可通过计算和试验来优化。

方案设计中的二系弹簧横向跨距为2 080 mm,为了

抑制过大的车体侧滚角,有必要安装抗侧滚扭杆装置。抗侧滚扭杆的形式可灵活选择。根据以往的运用经验,该装置可采用整体可拆式安装,以便检修或更换时具有良好的可接近性,提高作业效率。

导向杆设计对于单轮对转向架是一个全新的内容。常规两轴转向架不存在结构不稳定的问题,而单轮对转向架构架只有中间一个支点,构架将产生点头振动,为此必须设置定位杆来限制或衰减这一振动。在国外的同类转向架中,有采用中央单定位杆(如S-tog)和双侧定位杆(如Integral)2种方式。早期的设计还采用了4根对称布置的拉杆结构。该装置应只抑制转向架的构架点头,而不影响转向架的纵向牵引及回转。本设计方案中参考了S-tog转向架的设计,采用的是单定位杆方式。需注意的是,该定位杆对组装精度有严格的控制,其安装应在车体与转向架完全正位条件下进行,以免产生附加载荷。

2.2.4 牵引装置

由于只有一个轮对,原先的中心销牵引方式无法采用,只能采用单拉杆结构。国外的同类产品也基本采用这一模式。构架上的牵引点应尽可能接近或低于车轴中心线高度。拉杆两端的弹性元件应保证在垂向、横向具有低的附加刚度,避免与定位杆产生相互耦合。如可能,可考虑采用柔性牵引方式。

2.2.5 基础制动装置

如前所述,对于拖车转向架,其制动装置主要取决于车轮结构。如果是动力转向架,车轴上须安装齿轮箱。制动盘与电机和齿轮箱的空间紧张,只能采用轮盘制动。

由于采用单轮对,制动盘比常规二轴转向架的数量减半,单位制动功率会有明显的增加。对采用整体碾钢车轮的方案,在仅靠盘形制动无法满足要求的情况下,还可以加设踏面闸瓦制动,而对采用橡胶弹性车轮则无法实施。要做到既不增加簧下质量,又具有充分的

制动能力是比较困难的,其制动参数的选取将直接关系到车组的安全运行,对此应予以高度重视。除此之外,方案中的制动夹钳位于同一端,需要对制动条件下的转向架稳定性进行进一步校核,可能的话,要采用对称设置。为避免车轮的滑行或擦伤,还需要设置电子防滑系统。

3 结语

这种被称为KERF(车体导向型转向架)的单轮对转向架原型最早起源于丹麦,在经历了30多年的不断改进后,由最初的机械式的导向方式变为现在的液压控制方式。其间所进行的大量对比试验表明了KERF型转向架车轮踏面的磨耗、噪声比装用常规的二轴转向架有明显的改善^[9]。

参考文献:

- [1] 周翊民. 城市轨道交通及其在我国的发展策略[J]. 机车电传动, 2001, (5): 5-10.
- [2] Harry Hondius. Neue niederflurfahrzeugentwicklungen von VeVeY [J] stadtverkehr, 1993, (special): 18-22.
- [3] 陈泽深. 独立车轮转向架的导向原理[J]. 铁道机车车辆, 1999, (1): 16-22.
- [4] 黄运华, 李 芾, 傅茂海. 独立旋转车轮转向架曲线通过性能研究[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(6): 7-11.
- [5] Andreas Brinkmann, Remscheid. Leo Geers DUEWAG-BSI Einzelrad-Einzel fahrwerk [J] stadtverkehr, 1993, (special): 53-57.
- [6] Harry Hondius. ÖNV-Niederflur-Fahrzeuge im Kommen(3), Teil I [J] stadtverkehr, 1993, (special): 77-86.
- [7] Harry Hondius. ÖNV-Niederflur-Fahrzeuge im Kommen(5), Teil I [J] stadtverkehr, 1993, (special): 97-112.
- [8] 虞大联, 李 芾, 傅茂海. 单轴转向架的发展和运用现状[J]. 国外铁道车辆, 2004, (1).
- [9] Rolf-Dieter Rose. Die Entwicklung und Erprobung kurvengesteuerter Einzelsatz-Fahrwerke KERF [J]. ZEV, 1995, (9/10): 297-299.

(上接第13页) 供了基本尺寸,为该零件的实验提供了基础,而且也整个系统的开发起了重要的指导作用。因此,对整个传动系统的开发而言,本课题的以上工作是首要的不可缺少的关键性的第一步。

本文所述的弹性联轴节主要针对机车传动系统而言,但也可适用于我国动车和其他车辆。

参考文献:

- [1] Bernhard Kratz, Bernd Sauer. Christian Segieth GEALAI F, ein neues Antriebskonzept für Höchstleistungen im Traktionsbereich [J]. ZEV+DET, 1993, (6): 194-201.
- [2] 谭建国. 使用ANSYS6.0进行有限元分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.