

文章编号: 1005-0523(2018)06-0035-06

# 动车组重量均衡计算系统设计及开发

杨丰萍, 左君成

(华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330006)

**摘要:** 动车组的重量均衡计算影响列车的行车安全, 该文首先分析了动车组的重量均衡评价指标, 研究了常见的 Bo-Bo 轴式动车组的结构并对车辆建立了三维数学模型, 采用刚体力平衡和力矩平衡原理进行静力学分析, 推导出车辆重心、轴重及轴重差和轮重及轮重差等的计算公式。其次, 基于 Visual Studio 2010 平台下 C# 语言和 SQL Server 2008 数据库开发了一种动车组的重量均衡计算软件, 通过对软件计算结果和实测数据对比, 验证了软件计算结果的正确性。该软件不仅可实现动车组的重量均衡计算, 而且可对所有车辆数据进行统一管理, 提高车辆零部件数据的利用率。同时, 也对其他类型的轨道车辆的工具开发具有一定参考意义。

**关键词:** 动车组; 重量均衡; 数学模型; 软件开发

**中图分类号:** U270.2

**文献标志码:** A

当动车组的轴重轮重不平衡度过高, 轮对的平均寿命会缩短, 影响行车安全<sup>[1]</sup>。Bo-Bo 轴式结构动车组由转向架、车体以及搭载在车体上的诸多设备所构成, 整个车辆的重量全部由 2 个转向架承担, 就动车组的制造而言, 要求所有的重量均匀分布在 2 个转向架的 4 根轴上, 但是由于制造误差等诸多因素的影响, 车辆重量的完全均衡分布是不可能的<sup>[2]</sup>。这就需要在生产前对车辆进行重量均衡计算, 以使车辆重量分布在合理范围内。通过调研, 发现部分车辆厂采用的 Excel 表格计算法, 存在计算结果不准确的问题, 故需要对重量均衡计算的公式重新建模推导, 另外, 由于动车组的一般由 8 节或 16 节车厢组成, 不同车厢上的零部件的种类、数量不同, 采用传统的 Excel 表格计算法计算每节车厢的重量均衡分布情况, 工作量大、计算效率低, 且不利于数据的统一管理, 无法满足动车组的设计生产需求。针对上述问题, 该文设计开发了一种动车组重量均衡计算软件。通过多次对软件计算结果与某车辆厂 Excel 表格计算结果及实测数据作对比, 验证了软件计算结果的准确性。

## 1 计算原理及公式

根据调研发现, 一般采用总重及重心坐标、轮重和轮重差比率、轴重和轴重差比率 3 个指标来评价车辆重量是否均衡<sup>[3]</sup>。根据《GB 3317-2016-T 电力机车通用技术条件》中的规定, 电动车组在整备状态下, 机车总重的允许差为  $\pm 3\%$ 。根据 GB3371-2016-T 的规定, 我国铁路机车每个车轮轮重与该轴两轮平均轮重之差不超过该轴两轮平均轮重的  $\pm 4\%$ , 同一机车每个动轴的实际轴重, 与该机车实际平均轴重之差, 不应超过实际平均轴重的  $\pm 2\%$ <sup>[4]</sup>。下面建立坐标系, 分别推导这 3 个评价指标的计算公式。

### 1.1 参考坐标系的建立

规定以车体纵向中心为 X 轴、以车体横向中心为 Y 轴、铅直方向为 Z 轴, 坐标原点设在轨道上平面, 如图 1 所示。

收稿日期: 2018-05-30

基金项目: 江西省普通本科高校中青年骨干教师发展计划访问学者专项资金(赣教办函[2016]109)

作者简介: 杨丰萍(1967—), 女, 教授, 硕士, 研究方向为交通信息工程及控制, 电力电子与电力传动。

## 1.2 总重、重心坐标计算

车辆挂载设备的安装位置和自身重量是评估车辆负载重力均衡的关键因素<sup>[9]</sup>。各个设备的几何重心相对于坐标系是已知的,假设重心坐标为 $(x_i, y_i, z_i)$ ,则根据力矩平衡算法,相对于坐标轴的力矩为

$$U_{xi}=m_i x_i ; U_{yi}=m_i y_i ; U_{zi}=m_i z_i \quad (1)$$

其中: $m_i$ 为各个设备的重量,kg; $U_{xi}$ ,  $U_{yi}$ ,  $U_{zi}$ 为设备的力矩,N·m。

车辆总重

$$M_n = \sum m_i \quad (2)$$

则在坐标系下累加后的整车重心坐标为 $(X_n, Y_n, Z_n)$ ,即

$$X_n = \frac{\sum_{i=1}^n U_{xi}}{M_n} ; Y_n = \frac{\sum_{i=1}^n U_{yi}}{M_n} ; Z_n = \frac{\sum_{i=1}^n U_{zi}}{M_n} \quad (3)$$

## 1.3 轴重和轴重差计算

全整备状态下,机车正视模型如图2所示

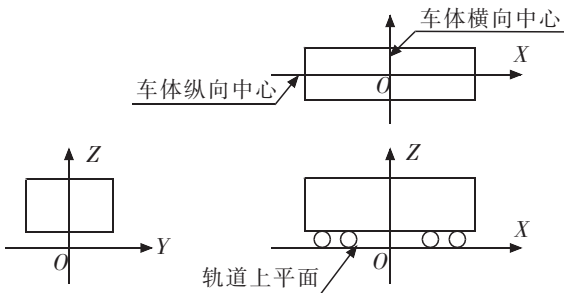


图1 参考坐标系及坐标原点的确定

Fig.1 The determination of the reference coordinate system and the origin of the coordinate

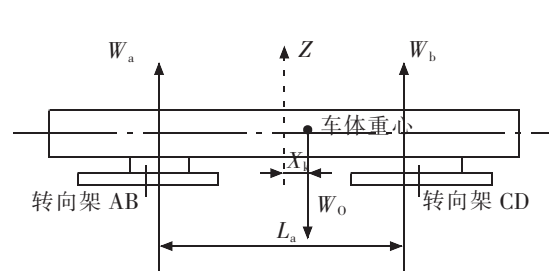


图2 机车正视模型

Fig.2 Locomotive confront model

在图2中, $W_0$ 为车体的重量(不含转向架),kg; $X_k$ 为车体的X轴重心到车体纵向中心线的距离,m; $W_a$ 为转向架AB上二系弹簧的作用力,N; $W_b$ 为转向架CD上二系弹簧的作用力,N; $L_a$ 为二系簧之间的距离,m。

根据空间力系的平衡关系可得

$$\begin{cases} W_a = W_0 \cdot (1/2 - X_k/L_a) \\ W_b = W_0 \cdot (1/2 + X_k/L_a) \end{cases} \quad (4)$$

下面对转向架进行受力分析,转向架受力模型,如图3所示。

动车组车体的重量是通过空气弹簧施加到转向架上的,在制造过程中很难保证二系簧之间的距离等于转向架纵向中心距,这必然会对轴重产生影响<sup>[9]</sup>,我们通过详细的示意图表示出转向架所受力在坐标系下的坐标位置,如图4所示。

在图3,图4中, $m_{ab}$ 为转向架AB的重量,kg; $m_{cd}$ 为转向架CD的重量,kg; $W_{na}$ ,  $W_{nb}$ ,  $W_{nc}$ ,  $W_{nd}$ 分别为4个轴的轴重,kg; $K_a$ 为转向架纵向中心距,m; $H$ 为转向架上轮对中心距,m; $X_{01}$ 为转向架AB的重心在X轴上与车体横向中心线的距离,m; $X_{02}$ 为转向架CD的重心在X轴上与车体横向中心线的距离,m。

根据空间平行力系的平衡方程

$$\sum Z=0 ; \sum M_X=0 \quad (5)$$

式中: $\sum Z$ 为力的方向与Z轴平行的空间平行力在Z轴的代数和; $\sum M_X$ 为力的方向与Z轴平行的空间平行力对X轴的力矩的代数和。

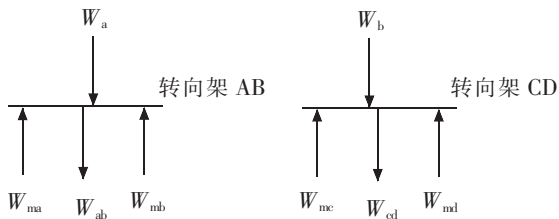


图3 转向架受力模型  
Fig.3 Force model of bogie

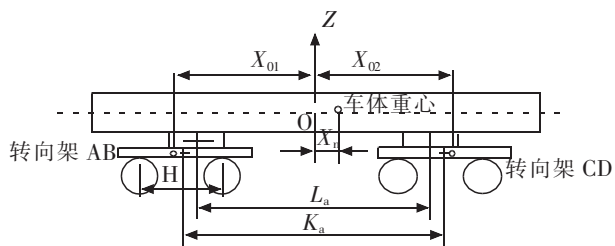


图4 转向架受力坐标位置示意图  
Fig.4 The force coordinate position of the bogie

可列写方程解得

$$W_{ma}=W_a(H+K_a-L_a)/2H+m_{ab}(K_a/2+H/2-X_{02})/H \quad (6)$$

$$W_{mb}=W_a(L_a-K_a+H)/2H+m_{ab}(X_{02}-K_a/2+H/2)/H \quad (7)$$

$$W_{mc}=W_b(H+K_a-L_a)/2H+m_{cd}(K_a/2+H/2-X_{01})/H \quad (8)$$

$$W_{md}=W_b(L_a-K_a+H)/2H+m_{cd}(X_{01}-K_a/2+H/2)/H \quad (9)$$

轴重差计算公式为

$$A_{mi}=\frac{W_{mi}-\frac{M_n}{4}}{\frac{M_n}{4}}\times 100\% \quad (10)$$

式中: $A_{mi}$  为轴  $i(i=a,b,c,d)$  轴重偏差百分数; $W_{mi}$  为 a 到 d 轴的轴重,kg; $M_n$  车辆总重(包括转向架),kg。

#### 1.4 轮重和轮重差计算

以轮对 D1~D2 为例。假设, $W_{mll}$  为轮对 D1~D2 左侧轮的轮重,kg; $W_{mrl}$  为轮对 D1~D2 右侧轮的轮重,kg; $D_g$  表示两侧车轮与钢轨接触点之间的距离,对于 1 435 mm 的标准轨距,距离为 1 500 mm; $Y_n$  表示整车 Y 轴重心到车体横向中心线的距离,m。

根据空间力系的平衡关系可解得

$$W_{mll}=W_{ml}(1/2+Y_n/D_g); W_{mrl}=W_{ml}(1/2-Y_n/D_g) \quad (11)$$

假设, $A_{rll}$  表示 D 轴左侧轮重差百分比,则可得

$$A_{rll}=\frac{W_{mll}-W_{mrl}}{W_{mll}+W_{mrl}}\times 100\% \quad (12)$$

## 2 系统设计与开发

Visual Studio 2010 平台下 C# 语言是一种简洁高效,面向对象的编程语言,可实现简单美观,人性化的用户界面,且组件和类库多,响应速度较快。C# 语言开发的系统对 SQL SERVER 数据库具有很好的兼容性,有丰富的开发组件对数据库进行增、删、改、查等操作<sup>[7]</sup>。

### 2.1 系统需求分析

该系统主要是使动车组重量均衡计算的过程规范、简洁和计算结果准确,同时,还能实现动车组的重量管理<sup>[8]</sup>。动车组重量均衡计算软件系统能够正确引导设计人员在规定时间内快速可靠地完成设计任务,其功能需求概述如下:

1) 基本信息输入功能:通过手工输入、从数据库导入或者 Excel 文件导入等多种输入方式,将车体基本参数、各零部件重量、位置坐标,力矩,转动惯量等参数导入到系统中,提供均衡计算的基础数据;

2) 均衡计算功能:计算出车体总重、重心坐标、总力矩,总转动惯量、四角支撑力、轴重、轮重、轴重偏差百分比、轮重偏差百分比等;

3) 计算结果导出功能:将计算结果输出到报表,可直接打印报表或以 Word,Excel,PDF 等形式导出;

4) 人员管理及权限分配功能:实现用户管理以及系统操作权限管理;

5) 历史数据管理功能:保存历史计算的输入参数和计算结果,可对历史数据增删改查。

根据需求分析,系统的功能模块可主要分为如下几个模块:系统登录模块,数据管理模块,数据编辑模块,结果显示模块和报表打印输出模块,其如图 5 所示。

## 2.2 系统实现与计算

为验证推导公式在实际应用中的可行性,先将公式编写到系统中,然后将车辆厂提供的相关参数和数据导入系统中进行计算,参考轴重差 $\pm 2\%$ 、轮重差 $\pm 4\%$ 的国家标准,验证公式的合理性。空员状态下,车体基本参数手动输入,零部件信息通过 Excel 导入,系统输入界面<sup>[10]</sup>如图 6 所示。

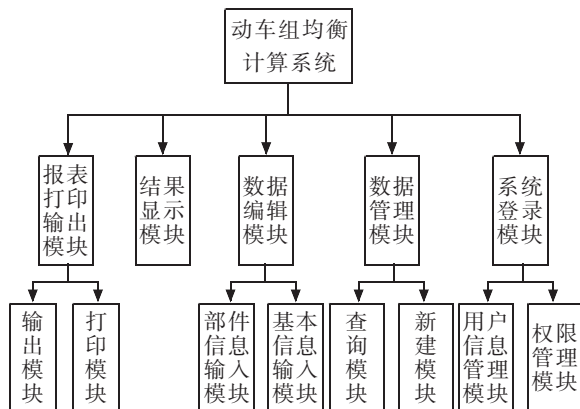


图 5 系统功能模块图

Fig.5 Function modules of system

设备编号	设备名称	设备重量(kg)	X轴距离(m)	X轴力矩(kg.m)	Y轴距离(m)	Y轴力矩(kg.m)	Z轴距离(m)	Z轴力矩(kg.m)
EMU34-400-00000	车下设备	0	0	0	0	0	0	0
EMU34-500-00000	车外设备	0	0	0	0	0	0	0
EMU34-600-00000	内装结构	0	0	0	0	0	0	0
1	客室LCD布置	65	0	0	0	0	3.04	197.6
2	车内电子地图	32	0	0	0	0	3.08	98.56
3	乘客紧急报警器	3.25	0	0	0	0	2.635	8.56375
4	摄像头	0.74	0	0	0	0	2.293	1.69682
5	扬声器	9.8	0	0	0	0	3.08	30.184
6	客室照明布置	248.29	0	0	0	0	3.197	793.7831

图 6 系统输入界面

Fig.6 System input interface

如图 7 所示,当设定了车辆参数数据和部件数据后,选择“计算”按钮,软件将依据上述推导的数据公式进行重量均衡计算。可以看出,计算的轴重差,轮重差在合理范围内,满足技术要求。

## 3 结果验证

在数据管理方面,系统对每次计算累积的原始数据和计算结果进行存储,从而形成由累积效应得来的可供后续项目参考和调用的大型数据库,这样既可以实现对历史数据的有序可靠管理,又避免了数据资源的浪费,提高了原始数据的利用率。

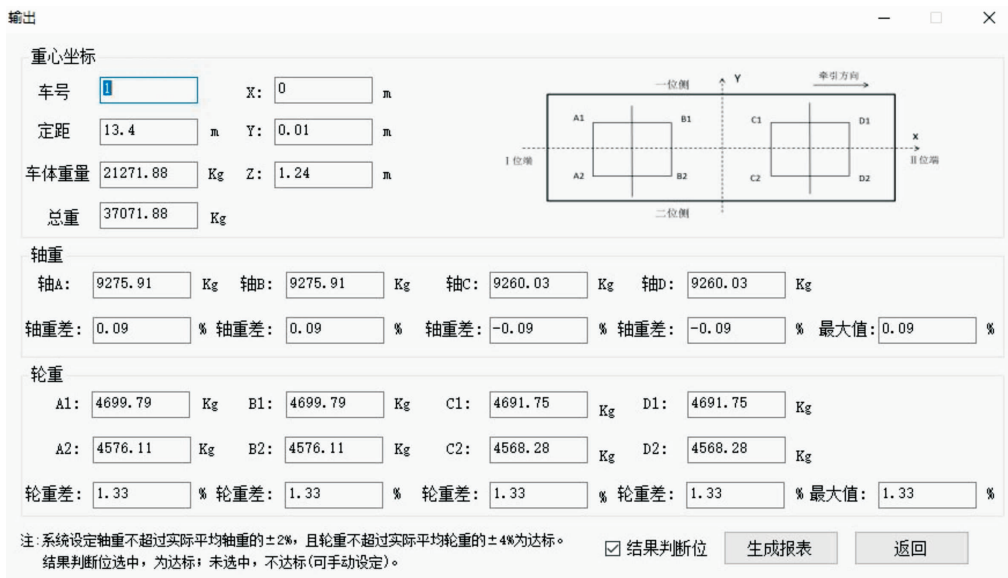


图 7 计算结果界面

Fig.7 Calculation results interface

为验证推导公式在实际应用中的可行性,从某车辆厂获取一节动车组车厢的数据,将其导入软件系统中进行计算,参考轴重差 $\pm 2\%$ 、轮重差 $\pm 4\%$ 的技术标准,验证公式的合理性。以实际测量数据,某节动车组 1~4 轴的实测轴重、1~2 轴轮重及车辆厂提供的 Excel 表格计算数据作为参考,得到表 1。

表 1 计算结果对比表

Tab.1 Comparison of calculation results

字段名	计算结果/kg	Excel 表格计算结果/kg	实测结果/kg	计算结果对比实测数据偏差率/%
1 轴轴重	11 967.6	11 964.7	11 967.6	0
2 轴轴重	11 993.3	11 991.4	11 994.3	0.011
3 轴轴重	11 640.5	11 638.3	11 643.5	-0.026
4 轴轴重	11 642.5	11 649.5	11 638.5	0.034
1 轴左轮	5 983.7	5 979.5	5 984.0	-0.062
1 轴右轮	5 983.9	5 985.2	5 983.6	0.005
2 轴左轮	5 993.0	5 990.8	5 996.1	-0.052
2 轴右轮	6 000.3	6 000.6	5 998.2	0.035

结果分析:

1) 从表 1 中可看出,相比于 Excel 表格计算结果,均衡计算系统的计算结果更接近实际测量结果,软件计算得到的数据与实际测量数据的最大偏差率仅为 $-0.06\%$ 。将部件制造偏差、测量误差的累积以及车体安装精度差异考虑在内,软件计算所得结果与实际测量结果吻合,因此,该软件系统的计算精度满足要求。

2) 通过分析,可知均衡计算系统的计算结果之所以计算更接近实测数据的原因在于,计算公式考虑了二系簧之间的距离与转向架纵向中心距不一致对轴重的影响,而 Excel 表格算法为了计算的方便,将它们近似相等。

## 4 结束语

针对动车组重量均衡计算结果不准确且工作量大的问题,本文基于 Visual Studio 2010 平台下 C# 语言开发了一种动车组重量均衡计算系统软件,可满足常见的 Bo-Bo 轴式结构的动车组的重量均衡计算。为提高数据的重复利用率,采用 SQL server2008 数据库存储数据,并实现数据共享和统一管理。经过测试和系统结果验证,该系统计算准确、稳定可靠、响应速度快,具有较高的实用价值,不足之处在于,该系统目前仅支持 Bo-Bo 轴式结构动车组的重量均衡计算。

### 参考文献:

- [1] 尹仁发. 都市圈轨道交通车辆选型研究[J]. 铁道标准设计, 2013(4): 135-139.
- [2] 韩云杰. 城轨车辆的重量管理的探讨[J]. 技术与市场, 2016, 23(1): 114-116.
- [3] 李恒奎. 动车组重量评价指标及均衡计算方法[J]. 铁道车辆, 2011, 49(11): 9-11.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB3317-2016-T 电力机车通用技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [5] 刘永梅. 机车重心计算与测定方法[J]. 机车电传动, 2006, 10(6): 1-3.
- [6] 王位, 严允. 机车重量、轴重和轮重的计算探讨[J]. 电力机车与城轨车辆, 2006, 29(2): 67-69.
- [7] 冯庆东, 杨丽. C# 项目开发全程实录[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [8] 廖友军, 余金伟. 轨道车辆设计中重量均衡计算工具的开发[J]. 现代制造技术与装备, 2012, 211(6): 14-15.
- [9] 李明亮. 基于模块化设计方法的城市轨道交通牵引计算软件研制[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [10] 柳恒, 何林. 基于 Visual C#. NET 的城市轨道交通设计系统的研究与实现[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2013, 32(2): 60-63.

# Design and Development of Weight Balance Calculation System for EMUs

Yang Fengping, Zuo Juncheng

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330006, China)

**Abstract:** The weight balance calculation of the electric multiple units (EMUs) has effects on the train safety. In this paper the weight balance evaluation indexes of the EMUs were analyzed; the structure of the commonly-seen Bo-Bo shaft type EMUs was studied and a three-dimensional mathematical model for the vehicle was established. The rigid force balance principle and the torque balance principle were adopted for static analysis, and the calculation formulas of vehicle gravity center, axle load and axle load difference, wheel weight and wheel weight difference were derived. Then, the weight balance calculation software was developed for the EMUs based on the C# language of the Visual Studio 2010 platform and the SQL Server 2008 database. And the correctness of the software calculation results was verified by comparing the calculation results of the software with the measured data. The proposed software can not only realize the weight balance calculation of the EMUs, but also manage all the vehicle data and improve the utilization rate of the data of the vehicle parts. Meanwhile, it will also be of reference for the tool development of other rail vehicles.

**Key words:** EMUs; weight balance; mathematical model; software development