

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.12.018

# 基于全向轮的移动式舞台设备的设计研究

马福东, 骆德渊\*, 梁浩峰, 王志君, 李润国  
(电子科技大学 机械电子工程学院, 四川 成都 611731)

**摘要:** 针对舞台上的演员、道具、布景的移动或变换问题,对同类产品的运动形式、全向轮底盘系统、转台支撑系统、车轮减震系统、控制系统等方面进行了研究,对四轮式全向轮式驱动底盘的运动速度和轨迹进行了分析,提出了一种基于全向轮、ARM Cortex-M4内核嵌入式处理芯片以及CAN总线的舞台平面智能移动设备,提出了推力轴承结合万向轮系的转台支撑结构以及线轨结合螺旋弹簧的车轮减震结构,利用Keil uVision 5作为开发环境编译程序控制驱动电机的转速,利用SolidWorks三维建模功能进行了外形设计,利用SolidWorks的Motion分析功能先后对舞台设备在给定路径下的反向和正向运动进行了仿真分析。研究表明,该舞台移动设备能够灵活多变地实现任意给定的平面运动轨迹,并实现较高的空间利用率,运动平稳、可靠性高。

**关键词:** 舞台; 全向轮; 减震; SolidWorks; Motion分析

中图分类号: TH69; TH39 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)12-1596-04

## Research and design of mobile stage equipment based on omni-directional wheels

MA Fu-dong, LUO De-yuan, LIANG Hao-feng, WANG Zhi-jun, LI Run-guo  
(School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China,  
Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of changing or carrying actors, props and sceneries on stages, the forms of motion, omni-directional wheel chassis system, rotary table support system, damping system and control system of similar products were investigated. After the speed of four driving wheels and the movement track of the device were analyzed, a kind of mobile device based on omni-directional wheels, ARM Cortex-M4 embedded processors and CAN bus were presented. A support structure of the rotary table based on a thrust bearing and truckles was designed, and a shock absorption structure based on the rail lines combined with spiral springs was established. Keil  $\mu$ vision 5 was used as the development environment of program compilation to control the speed of the driving motors. SolidWorks was applied to 3D modeling, motion analysis was applied in inverse kinematics and forward kinematics. The results indicate that the mobile stage device could realize any given curves flexibly, and had the high space utilization, stability and reliability.

**Key words:** stage; omni-directional wheels; shock absorption; SolidWorks; Motion analysis

## 0 引 言

舞台机械设备是剧院、电视台等表演场所的重要硬件平台,种类繁多,按照使用地点分类,可分为台上舞台机械和台下舞台机械两种。台上舞台机械主要包括吊杆、吊机、隔音幕、幕机、防火幕和假台口等;台

下舞台设备主要包括升降舞台、平面移动车台和旋转舞台等<sup>[1]</sup>。

移动式舞台设备是指可在平面上作连续直线或曲线运动的平面移动车台,当今的同类舞台机械产品大多外形庞大,在舞台平面内作直线运动,运动形式单一。

本研究提出移动式舞台设备结构紧凑,外形小、

收稿日期: 2014-08-08

作者简介: 马福东(1989-),男,湖北黄石人,主要从事智能机电产品的研究与实现方面的研究. E-mail: mzx502@qq.com

通信联系人: 骆德渊,男,副教授,硕士生导师. E-mail: luodeyuan@163.com

底盘低,对演出效果影响较小,运动形式灵活多样,包括平移、整体旋转、局部定轴转动等,可多台联合控制进行群组运动或拼接成一个大型舞台车,可拓展性强,并可以通过给定路径运动或远程人工操作,以承载演员进行艺术表演,或对道具和布景进行变换和迁移<sup>[2-3]</sup>。

## 1 总体要求

车台底盘与地面距离应低于60 mm,车台台面外形为矩形,边长在1 500 mm~2 000 mm之间,车身重量以铝合金为主,以尽量减少负载。

机械设备运行、无冲击。整车可实现平面运动,包括绕车台中心轴的定轴转动,中央圆台可单独实现旋转运动。

本研究把STM32作为嵌入式控制系统芯片,实现了安全、准确地运动与定位,利用手柄遥控器或PC端上位机实现了该移动车台的远程控制。

## 2 驱动底盘的机械结构设计

驱动底盘采用四轮结构设计,轮子式样为全向轮。全向轮单个轮体由主动轮毂和绕轮毂圆周均匀排列的从动小轮组合,将两轮毂拼合,圆周的小从动轮交错排列<sup>[4-5]</sup>。

由于舞台场地可能存在凹凸不平的地方,为了防止车轮打滑或空转,同时为了减缓车台运动过程中的冲击和保护演员的安全,本研究将各轮子安装在减震机构中,保证车台在运行过程中轮子始终紧贴地面,为行进提供足够的驱动力<sup>[6]</sup>。减震机构的模型如图1所示。

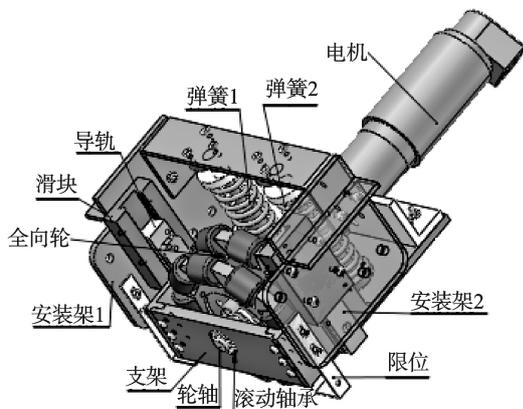


图1 驱动轮减震机构

由图1可见,减震机构为左右对称结构(除电机外),全向轮通过轮轴安装在支架上(支架2进行了透明处理),支架两侧分别固定在两条线轨的导轨上,线

轨的导轨与滑块配合,滑块固定在安装架上,安装架与车体固定连接。不同于一般的悬挂轮式设计,驱动轮的轮轴两端均通过滚动轴承与支架配合,避免轮轴由于悬挂支撑而承受过大的弯矩。当车体在凹凸不平的地面上行进时,固定在导轨上的轮子和支架可以顺着滑块在弹簧1和弹簧2的支撑下上、下浮动。

## 3 中央转台的机械结构设计

中央转台的驱动由底盘下的直流伺服电机、蜗轮蜗杆减速器和传动轴等组成的传动机构实现。目前多数舞台机械的旋转部分采用支撑轮系承载上方转台,轮子与转台为线接触,压强较大。考虑到运转过程的噪音问题,轮子一般采用塑料或橡胶等材料制品,由于转台上方人为因素,表面的受力具有不确定性。长期下来,轮子会产生磨损和挤压变形<sup>[7]</sup>。故笔者采用以推力轴承支撑为主,万向轮轮系支撑为辅的方案。该方案减轻对轮系的磨损,延长产品使用寿命,减小维修工作量。

为了减小下盘变形,保证转台的平稳旋转,设计中在转台下方的底盘安装了4个万向轮,这4个万向轮与全向驱动轮系共同分担载荷。考虑到舞台地面存在凹凸不平的可能性,如果万向轮系与底盘之间为刚性连接,那么当万向轮系处于较高的凸起地面时,全向驱动轮系减震系统中的弹簧压力将减小,全向轮系与地面的贴合力将减小,可能造成舞台车的驱动力不足。故本研究将万向轮系进行了减震设计,万向轮轮架与底盘安装面之间采用弹簧进行弹性连接,即相当于对驱动轮和底盘支撑轮均进行了减震设计。

## 4 舞台设备的控制系统设计

该舞台车的驱动机构使用了5台直流伺服电机,考虑到电机同步控制 and 外设接口易扩展性,笔者决定采用基于ARM Cortex-M4的32位处理芯片STM32F407IGT6作为嵌入式控制芯片,以 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 为实时操作系统,通过CAN总线实现直流伺服电机驱动器与嵌入式控制板的通信,通过CYWM6935无线数据收发模块实现与上位机的通信<sup>[8]</sup>。

本研究以Keil uVision5作为开发环境,用C语言编写程序,将编译好的HEX文件通过ST-LINK/V2烧入到单片机中<sup>[9]</sup>。该机构中使用了双编码器定位器,将分别安置了编码器的两个全向轮正交安装在一起,当车台运动时,相对处于正交位置的两个编码器可用于对车台在 $x$ 和 $y$ 方向上的速度进行测量,在上位机软件中合成车台的运动路径。

移动舞台设备的控制系统结构图如图2所示。

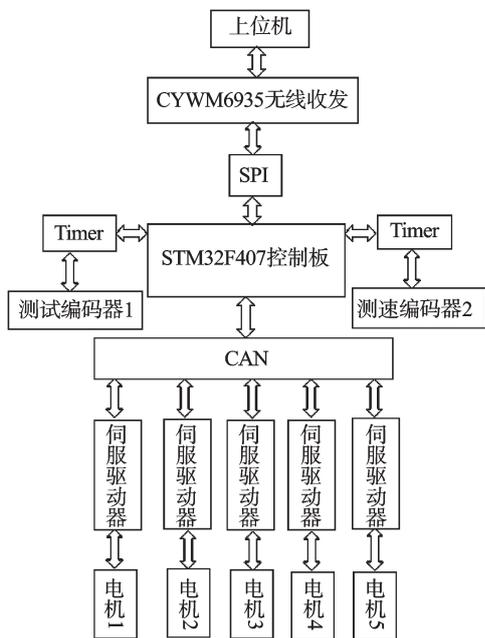


图2 控制系统结构图

### 5 运动学分析

为了实现车台的全向驱动,另外由于车台上将承载人或物,且驱动电机的安装空间有限,只依靠左、右两轮上的直流伺服电机进行驱动可能导致驱动力不够,本研究在四轮上均安装了直流伺服电机。全向轮底盘通过4台直流伺服电机分别控制4个全向轮的转速,可以实现绕车台中心的原地转动,以及无车体转动情况下任意方向的移动<sup>[10]</sup>。

全向轮系坐标图如图3所示。以轴线正交的上轮和右轮的轴线交点(同时也是车台的几何中心)为原点建立平面直角坐标系。

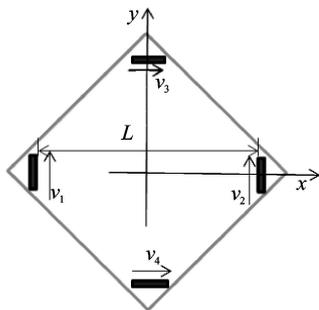


图3 全向轮系坐标图

本研究先以车轮作为研究对象,取轮心作为基点建立平面坐标系,  $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$  和  $v_4$  分别为左右和上下轮轮缘相对轮心平移坐标系的速度。 $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别为左右车轮的绕基点转动的角速度。由刚体的运动规律可知,车台左右两轮中心处相对地面的移动速度分别等于  $v_1$  和  $v_2$ 。其中:  $v_1 = \omega_1 \cdot R$ ,  $v_2 = \omega_2 \cdot R$ ,  $R$  —

车轮的半径。

车台可当作刚体进行运动规律的研究。由瞬心法分析可得:当  $v_3 = v_4 = 0$  时,若  $v_1$  和  $v_2$  反向,则瞬心在两轮心所连的线段上,车台整体绕位于车轮内侧的瞬心旋转。当  $v_1$  和  $v_2$  同向且  $v_1 \neq v_2$  时,车台整体绕位于上述线段延长线上的瞬心旋转。若  $v_1 = -v_2 = v$ ,车台将以  $\omega = 2v/L$  的角速度绕车台中心旋转;若  $v_1 = v_2 = v$ ,车台将以速度  $v$  作直线运动。

当  $v_1 = v_2$ ,  $v_4 = v_3$  时,  $\vec{v} = \vec{v}_2 + \vec{v}_3$ ,  $\vec{v}$  是车台中心处的速度,通过对  $\vec{v}_2$  与  $\vec{v}_3$  大小的控制,可实现车台的全向移动。

本研究根据不同的表演需要,规划相应的路径,以嵌入式控制板程序控制4个全向轮的转速,可实现不同的运动形式。

### 6 结 果

通过三维CAD软件SolidWorks的Motion分析功能,可以很直观地对舞台车进行正向运动学或反向运动学的分析和仿真,设置三维模型的接触条件和零件材料、摩擦参数,施加重力影响。研究者可采用旋转马达、线性马达、路径配合马达三种驱动马达,通过数据点、常数或表达式等方法设置马达的转速或线性速度<sup>[11]</sup>。

本研究给定舞台车的几何中心运动轨迹为椭圆形路径,长轴  $a = 5\ 000$  mm,短轴  $b = 4\ 000$  mm。本研究通过SolidWorks的Motion分析进行反向运动学求解,引入舞台车的简化模型,在装配体三维图模式下按要求参数绘制轨迹图,将舞台车的质心与轨迹图作路径配合。

笔者在Motion分析的路径配合马达模式下驱动舞台车几何中心依照轨迹按预定速度运动,可解算出图3坐标系中各个驱动轮轮心在  $X$  和  $Y$  方向的线速度,  $X$  和  $Y$  方向的线速度随时间的变化曲线如图4所示。轮心线速度如表1所示,亦即驱动轮轮缘相对舞台车的线速度,由该速度即可计算所需的驱动电机转速。

本研究将如表1所示的数据文件(篇幅所限只列出部分)在Motion分析直接输入到各驱动轮轮心处的驱动马达,即可进行正向运动学求解,最终得到了预先的椭圆形路径<sup>[12]</sup>。

如果需要其他的运动路径,只需通过方程驱动或直接绘制的方式更换运动轨迹图即可,非常方便。

### 7 结束语

本研究运用刚体平面运动和点的合成运动规律、

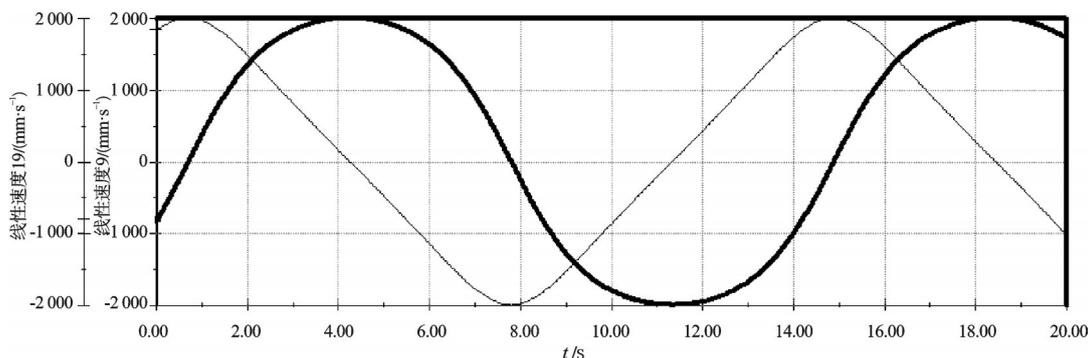


图4 轮心在 X 方向(细线)和 Y 方向(粗线)的线速度曲线

表1 轮心线速度

时间 t/s	线性速度 $v_x$ /(mm·s <sup>-1</sup> )	线性速度 $v_y$ /(mm·s <sup>-1</sup> )
0	1 815.533 865	-838.949 810 5
0.04	1 334.164 870	-797.395 278 2
0.08	1 852.012 622	-755.016 057 9
0.12	1 869.033 179	-711.839 149 9
0.16	1 885.183 870	-667.893 538 1
0.20	1 900.423 443	-623.210 028 1
0.24	1 914.711 619	-577.822 998 1
0.28	1 928.009 404	-531.770 380 4
0.32	1 940.279 411	-485.093 604 8
0.36	1 951.486 183	-437.837 501 9
0.40	1 961.596 510	-390.050 164 7
0.44	1 970.579 747	-341.782 768 2
0.48	1 978.408 106	-293.089 348 2

运动分析与仿真技术,设计了一种新型智能舞台设备,可实现较高的空间利用率和平稳的运动<sup>[13]</sup>。通过SolidWorks的Motion分析仿真实验表明,该机构可实现灵活多变的平面运动,通过该仿真方法,可大大减少设计人员的物理推导和计算过程。

该智能舞台车还不是很成熟,目前开发的上位机是基于STM32系列处理器的手柄按键式遥控器,需要进一步研发与嵌入式控制板下位机进行通信的上位机软件,在笔记本电脑和平板电脑等使用广泛的终端实现对智能舞台车的远程控制,预置多个场次的表演路径,实现车台运动路径的规划与监视<sup>[14]</sup>。

参考文献(References):

[1] 宋振瑞. 智能舞台控制系统软件设计与实现[D]. 镇江:江苏科技大学电子信息学院,2010.  
 [2] 吴明亮,高文元,胡赤兵. 舞台机械车台的微机控制[J].

机械工程师,1999(9):46-47.  
 [3] 魏发孔,田海弘,王 栋,等. 剧场舞台台面机械设备技术要点的探讨[J]. 兰州理工大学学报,2004,30(2):51-54.  
 [4] 郭洪澈,曹 成. 无尘车间自动装配机器人全向移动底盘设计[J]. 控制工程,2009,16(S3):112-115.  
 [5] BYUN K S, KIM S J, SONG J B. Design of Continuous Alternate Wheels for Omnidirectional Mobile Robots [C]//Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul, South Korea: ICRA, 2001: 767-772.  
 [6] 陈旭东,孔令成,刘尊朋,等. 基于全向轮的机器人移动机构运动分析与控制设计[J]. 测控技术,2012,31(1):48-51,56.  
 [7] 邬国昌. 旋转台回旋支撑与导向易损原因机理研究及优化[J]. 甘肃科技,2011,27(4):62-64.  
 [8] 郑伟佳,马 赛,皮佑国. 基于STM32和μC/OS-II的圆捆缠膜一体机嵌入式控制器设计[J]. 广东农业科学,2013(12):197-201.  
 [9] 王 硕,陶学恒,李玉光,等. 一种自动清洗玻璃窗的机器人[J]. 组合机床与自动化加工技术,2012(1):103-106,112.  
 [10] 周卫华,王 班,黄善均,等. 单排连续切换全向轮移动机器人的布局方式与运动的稳定性分析[J]. 中国机械工程,2014,25(7):888-894.  
 [11] 周京京,郭爱东. SolidWorks在麦克纳姆轮课堂教学中的应用[J]. 中国电力教育,2011(32):121-122,124.  
 [12] 胡 峰,骆德渊,段栋栋,等. 基于Pro/E与Simulink的Delta并联机器人运动仿真[J]. 机电工程,2012,29(8):982-984,992.  
 [13] 吕永健,丛新勇,杨 铭. 步进电动机驱动的Mecanum轮全向装备运输车的设计[J]. 微特电机,2013(12):14-16,30.  
 [14] 郭 华. 舞台机械设备控制系统上位机监控软件的实现[J]. 计算机自动测量与控制,2001(4):30-33.

[编辑:张 豪]

本文引用格式: