

采用升降立柱装置实现保护弹网支设的实践

冯朝

(上海文化广播影视集团有限公司, 上海 200041)

【摘要】为解决保护网支设的问题,并赋予更多的功能,在舞台边设立升降立柱支设保护网,采用刚性链、卷扬机、滚珠丝杠组成的立柱装置完成拉网,并实现弹网的支设。

【关键词】支网系统;升降立柱装置;弹网;刚性链;卷扬机;滚珠丝杠

文章编号: 10.3969/j.issn.1674-8239.2020.08.008

The Application of Using Lifting Column Devices to Set Up the Compounded Protective Net

FENG Chao

(Shanghai Media Group, Shanghai 200041, China)

【Abstract】In order to solve the problem of setting up the compounded protective net and give more functions to the net, the idea of using four lifting columns to set up the protective net beside the stage is put forward. The application proves that the idea can be realized by the completed column devices which are composed of rigid chain, winch, and ball screw set, etc.

【Key Words】setting up compounded protective net system; lifting column device; trampoline; rigid chain; winch; ball screw

杂技高空类节目演出需要设置保护网,保护网支护常需要在前排观众区设置临时拉网点,利用可借用的墙面、栏杆或预设的拉结点。由于保护网大,张挂点多,其架设与拆除较为费时,为抢时间需要投入较多人力,且手动操作,十分不便。为解决保护网支设问题,赋予保护网更多的功能和演出载体的转化,提出在舞台边设立升降立柱进行保护网支设的设想。

初步设想是在舞台附件设立可升降立柱,采用最少的立柱完成保护主网的支设,或更进一步让立柱承担起拉力要求更高的蹦床弹网的支设,实现蹦床类表演,丰富空中类节目与弹网类节目的演出内容,构成及功能如下:

(1) 立柱是挂网活动的条件,可将立柱“升”“降”看作一个独立的单一动作,由专门的装置完成;

(2) 拉网绳子受转动驱动,绳子对网产生拉紧和松开的动作,同众人配合拉网,存在动作时机,但绳子的“收”与“放”是独立的运动;

(3) 挂网需有挂点,拉网时绳子的高度,或者演出的高度,比如走钢丝表演的高度、蹦床网的高度,把这些高度看作不同的档位,要有专门的机构将绳子挂至不同档位,就是出绳位置调节装置,其活动独立于前两者,且档位调节只能依附于立柱来实现。

基于上述设计思想,设计了采用4套立柱装置构成支网系统的解决方案,实现空中类节目保护网甚至蹦床类节目弹网的支扶。

1 立柱装置的构造

每根升降立柱装置由座架、立柱体、动力驱动组件、出绳滑轮组件、拉网钢丝绳和安全挂钩、拉力测量组件、调节和控制器组成,升降立柱装置构造,如图1所示。其动力和传动组件包括驱动立柱体升降的电机、减

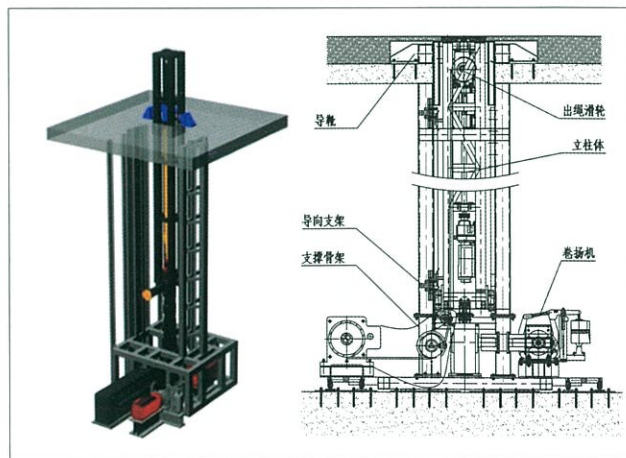


图1 升降立柱装置示意图

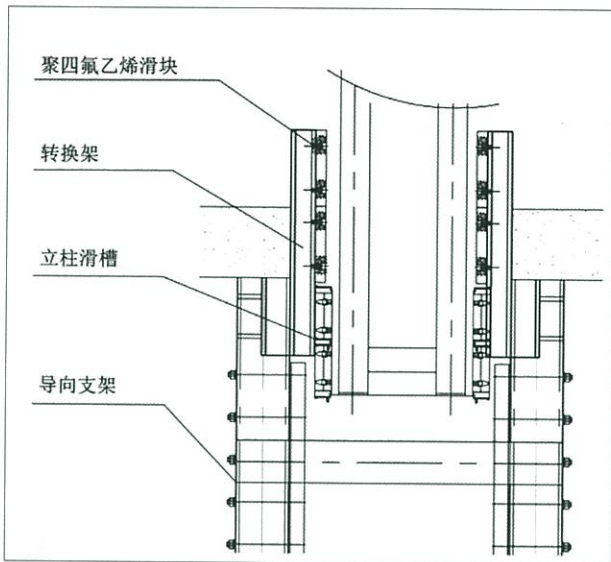


图2 导向支架与转换架示意图

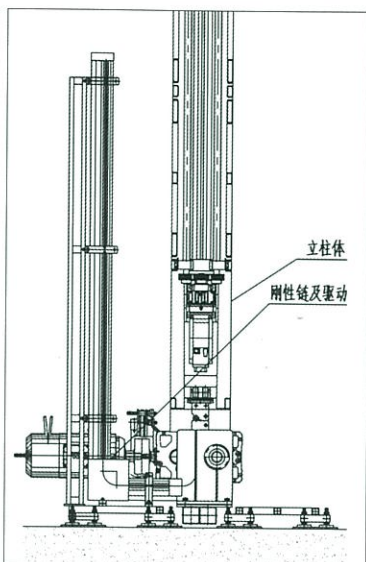


图3 立柱与刚性链的位置图

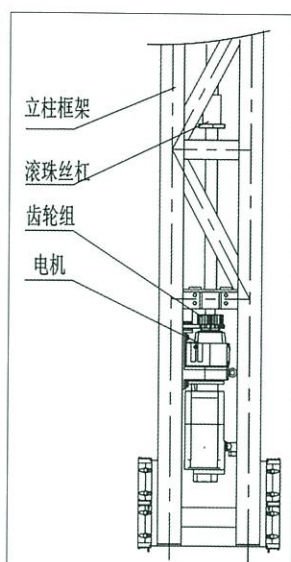


图4 出绳位置调节机构示意图

速机、制动器、联轴器及相连的刚性链等，驱动拉绳高度调节的伺服电机和收绳紧绳的卷扬机电机。座架基础、卷扬机组、立柱驱动组件固定在地下设备室地面。

座架、可升降的立柱体均采用钢结构。座架含基础底座、连接框体和上部楼板处的转换架，是支撑和稳固立柱体的主要结构构件。导向组件的导向支架和滑轨借助座架连接框固定，并在上方舞台楼板面，通过转换架与锚固在舞台地面洞口的导轨连接，构成上下多处固定，保证升降平顺。转换架内侧安装沟槽和聚四氟乙烯滑块，立柱升上舞台后在此实现导向与柱根的多节紧密耦合，并被牢牢顶压住。导向支架与转换架的构造如图2所示。

立柱体采用格构式，总长4.16 m，升降行程3.2 m，出舞台表面部分作美化处理，面朝舞台中心的侧面留有2.2 m长的出绳缝，出绳缝采用尼龙条封挡；立柱体外侧设有与导向支架滑轨配合的滑槽，立柱体平时收纳在座架内，升降时候立柱体沿导向支架滑动。立柱体底部通过连接板与立柱驱动组件的刚性链连接，实现立柱体的升降驱动。全套刚性链和驱动装置设置在舞台地下设备间，刚性链作为驱动立柱体运动的组件，直接带动立柱体的升降。立柱与刚性链的位置如图3所示。

为了达到挂点和挂点位置自动调整，在立柱体钢结构内部的垂直方向，分别安排了出绳滑轮组件和出绳位置调节机构。出绳位置调节机构包括伺服电机和沿立柱框架自上而下安装的前后两副滚珠丝杠，如图4所示，立柱体截面如图5所示。伺服

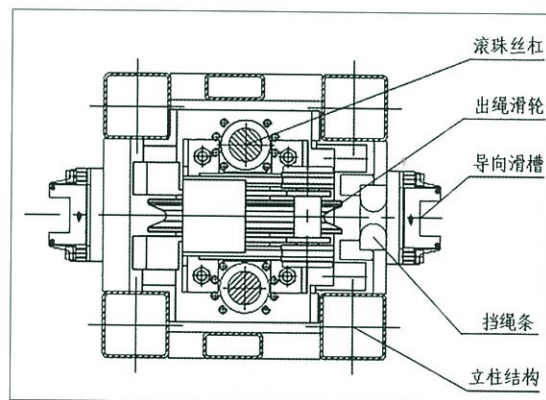


图5 立柱体截面图

电机固定于立柱框架下部中央位置，电机转轴上叠合有棘轮与主齿轮，滚珠丝杠上下端分别与立柱上顶板和2个从齿轮盘连接固定，出绳滑轮组件的轴承基座与丝杠锁母连接固定。滚珠丝杠的功能是将回转运动转化为直线运动，当伺服电机开始运转，中央的主齿轮带动两边的从齿轮同向转动，滚珠丝杠跟随回转，从而带动出绳滑轮组件作上下移动，改变出绳的位置高度。丝杠长度3 m，出绳点上下位置可调整范围为2.2 m。

立柱体内的出绳滑轮组件，包括电动滑轮及其导向运动机构，主要用作卷扬机送绳或收绳的导向，并在滚珠丝杠的转动下达到出绳位置上下移动的调节作用。

卷扬机系统包括电机、卷筒以及钢丝绳，如图6所示。电机带动卷筒旋转，收入或放出钢丝绳。卷扬机动力设备和卷筒设置于舞台地下设备间地面。卷筒钢丝绳经座架导向，竖直从立柱体内通过，再经立柱体内的出绳滑轮组件，从出绳位置缝隙水平引出，出绳绳头装有安全挂钩，可与拉网绳索进行挂接。

卷扬机卷筒上安装有棘轮和棘爪，如图7所示，其作用是保证钢丝绳的单向运动，防止拉网期间的逆转。棘轮和棘爪起到了如同手动紧绳器的作用，在收绳阶段，既能步进调节，防止网绳逆向动作，又能起到锁定的作用。

卷扬机减速器尾部安装了行程检测装置，作为立柱升降阶段绳子收放的统计辅助，记录绳子送出或收回长

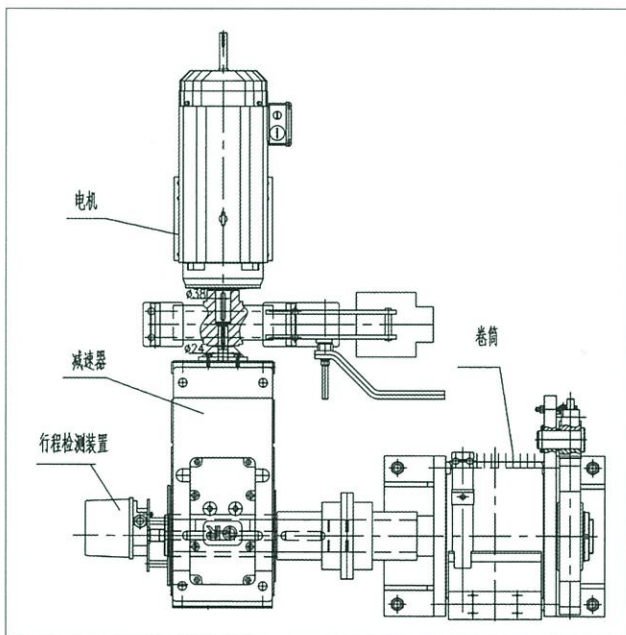


图6 卷扬机系统平面图

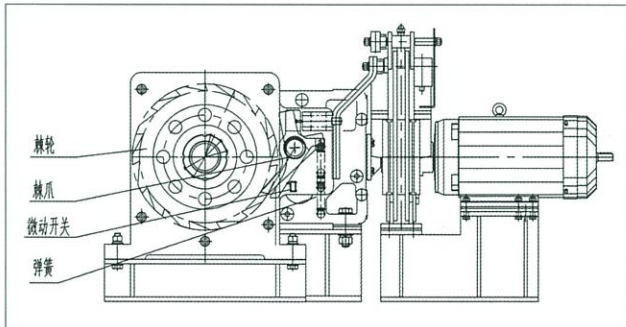


图7 卷扬机棘轮棘爪示意图

度，对多放出的绳子会收回同样多的绳子，从而保证收绳一致。系统电脑会根据场景预设数据，巡检预设定量与反馈读数，以便警示几个立柱挂点的状态。

2 立柱主要功能的实现

立柱的刚性链、卷扬机、滚珠丝杠三大组件分别对应升降、出绳高低调节和拉网缆绳收放的功能。立柱运动、人工挂绳、出绳高度调节、收放绳、同步紧绳这些动作存在许多组合，各组合在电脑控制下根据场景设计要求，形成与演出内容一致的动作效果。

以立柱的上升为例，当收到“升柱”动作信号，立柱从位于地下室的收藏状态，转为上升启动状态，刚性链驱动立柱钢结构沿座架导向支架滑升，卷扬机同步启动；立柱从舞台面升起，出绳滑轮组件从位于立柱内的高点位置，随着滚珠丝杠驱动滑轮组件移动下行，卷扬机放绳机构放出钢丝绳与挂钩，等待人员挂网。当立柱升到最高点，卷扬机转换为收绳，丝杠切换为向上移动，出绳位置跟随滑轮组件上移直至到达演出拉网高度而停止，卷扬机继续收紧绳子，直到立柱达到演出要求的紧绳拉力值。

立柱的“降柱”动作，立柱内的电机驱动滚珠丝杠与出绳滑轮组件下降到合适位置，卷扬机放绳，演员将网从安全挂钩上摘下，出绳滑轮在电机驱动下向上复位，同时刚性链驱动立柱整体下降，卷扬机收绳，直至立柱顶面与舞台面齐平。

立柱的“升”“降”过程中，唯一需要人工参与的是网绳的挂钩动作。其一，考虑到每个人的动作时间不一，由丝杠驱动出的出绳滑轮组件被设计为先向下移动、再向上移动的过程，故无需过多考虑挂钩的最佳位置；丝杠单次全程移动时间为7 s，其时间也可根据实际运转情况调整。其二，考虑了拉网钢丝绳长度因素，因网大小不一，需要拉网绳子的长短不同，故演员需要等待一定长度的钢丝绳全部吐出来后才能完成挂网；立柱最长出绳3 m，钢丝绳跟随立柱到达顶点前，原被收纳的钢丝绳会被全部放出以适合不同的拉绳长度需要。

钢丝绳出绳位置调节设计了较大的变动范围。立柱丝杠有2.2 m的可调范围，出绳高点在舞台面3 m处，低

点在舞台面0.8 m位置。当每根立柱被指定不同的拉网高度，如空中节目保护网不同高低的挂点位置；或不同的演出平台使用，如利用立柱架设的走钢丝节目；或根据演出内容需要，如演出前奏的“网缓起”和演出近尾声的“网缓降”的特定状态；以及当一种演出方式转换为另一种而进行的“换场调节”，均需要出绳移动调节。

以上需要的缓“上网”和缓“下网”动作，须解除出绳锁定后才可调节。前者代表网已挂钩，演员与道具在表演中乘网还在地面或较松弛的状态时入网，方便如自行车等道具的上网。后者代表演出接近尾声，演员和道具随网放松降下至最低的高度然后下网，营造出演出衔接的自然紧凑。

为保证数根立柱组成的支网系统，立柱拉力均能达到预设定量，支网被最终均匀拉直，每根立柱都安装了绳缆拉力感应器，感应器反馈数据作为系统电脑判断柱子是否仍需要继续加力的依据，并根据场景设定数值执行对应动作。立柱卷扬机组件利用卷筒棘轮棘爪的单向收绳功能，在每一次的拉力信号要求下，逐步拉紧网绳，达到自动紧绳的目的。各拉点在系统电脑的统一指挥下被均匀拉紧，无拉绳过长过短现象。

3 立柱装置的特点与解决措施

采用立柱装置构成的支网系统，做到挂后不管，可以减轻人力，提高挂网效率；能够实现“一柱多用”和“一网两用”，使演出的形式和内容有更多的选择，增加空中类节目和弹网类节目的融合，利于新节目的推出。

3.1 减少拉点

采用立柱自动拉网的一个目的是要减少拉点，而不仅仅是代替人工支网，要用较少的立柱来承担原来全部拉点的拉力，需要增大每一个拉点的拉力，涉及到配置多少立柱、设置多大的立柱间距问题。

以《空中浪桥双向飞人》节目为例，护网中间段保护范围长12 m、宽9 m，离地2.5 m，两侧等宽的侧护网，侧向延伸至15 m高处。全网合计30多个拉网点，其中，中间段前后共12个拉点，6个为多爪拉点，手动紧绳，每处拉点拉力在220 kg~440 kg之间不等。

采用4套升降立柱装置支设以上保护网，立柱装置位

于马圈舞台14 m×12 m矩形的边角位置，立柱均升至最高高度3.2 m，拉网出绳位置高度3.0 m，均使用多爪拉索与立柱挂钩连接；而侧护网仍使用原拉点位置，即利用舞台两侧上方马道和空中龙门架完成拉护，如图8所示。

4根立柱因拉网高度一致，在护网被拉伸至与原形态基本一致时，前后主索顺直，网中部因自重自然下垂，拉网拉力均显示在近1 000 kg，人员下落和踩网无触地，与手动支网无差异。

3.2 一网两用

采用立柱的另一个目的是实现一网两用。空中类节目的护网仅实现防止人员失误落下的保护功能，不能提供其他用途，如用弹性网代替护网，兼顾空中保护和弹跳类节目需求，让网成为新的演出平台，实现如蹦床类节目的演出，如图9所示，则立柱装置更有价值。为

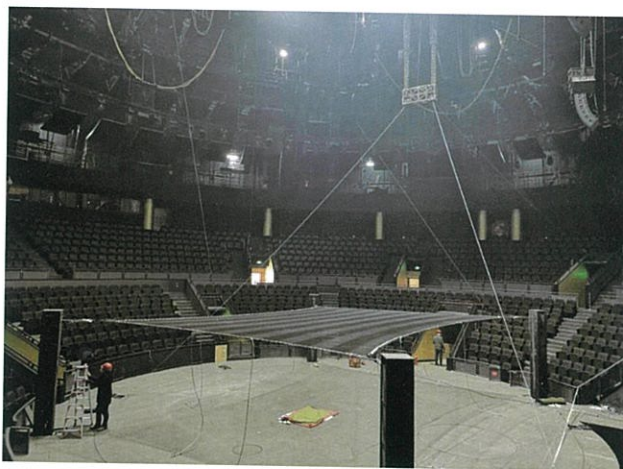


图8 使用立柱支设的弹网

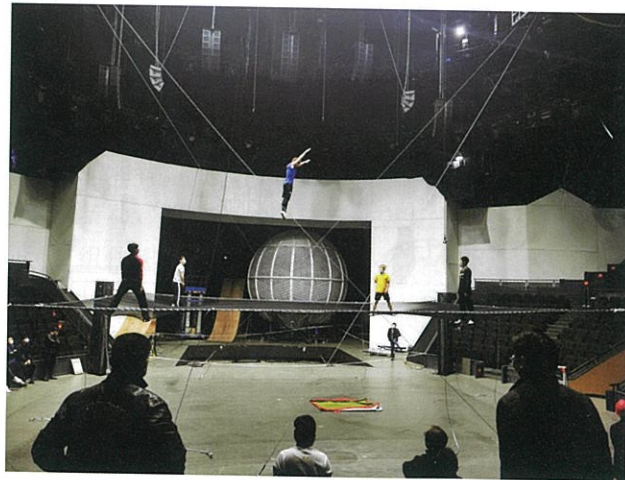


图9 一网两用

此,重点实验4根立柱对整张弹力网的支设,保证弹网的使用。

为掌握蹦床类节目使用弹网的受力变化状况,针对4根立柱间距,专门制作了一张长12 m、宽10 m的弹网,以16 mm钢丝绳代替钢质边框,钢丝绳周围编织时加入了一部分的弹性材料代替蹦床的弹簧,中间区域使用无弹性材料编织,每股编织线具有沿各方向延伸能力,钢丝绳在网的四角结成绳扣。弹网在制作后进行了出厂试拉,能达到35 kN的张拉值,承受100 kg、9 m高度的冲击。

立柱仍设置在14 m×12 m的对角线位置,立柱均升至3.2 m高度,弹网出绳高度调整至2.5 m。当电脑系统显示每根立柱拉力达到1 600 kg时,弹网钢丝绳绷紧平直,弹网平整均匀;增加至每根柱子拉力为2 300 kg时,立柱与弹网均正常;至3 200 kg时,弹网钢丝绳绷紧仍平直,弹网平整均匀无褶皱,表明4根立柱可以完成弹网的张设。采用沙袋分别从离网6 m和9 m高度投放,弹网未有触地,立柱与弹网正常。每根立柱拉力回复至2 300 kg时,上网演员脚感和网的弹起力与平时训练一致,能够完成各种弹跳翻转动作,在网上6人合力踩网下,中心演员可以弹跳至6 m高度;立柱拉力增加至2 700 kg,在6人再次合力踩网下,中心演员可以轻松弹跳6 m以上高度。

实验结果表明:(1)4根立柱可以完成弹网的挂设,采用立柱支设的弹网,能够完成杂技蹦床类节目的高弹跳动作,也同样能达到高空类节目保护作用,演员对采用立柱支设的弹网能够很快调整适应;(2)采用立柱挂设保护网,保护网在落地安全距离条件满足的情况下,网的绷紧程度相对蹦床弹网要低,但由于减少了拉网点,每拉点拉力增大,保护网主网拉索和边网绳索的承拉能力提高;(3)弹网作为表演主要平台,弹网绷得越紧,演员脚感越轻松,人从高空落下和弹起动作发挥越好,而立柱能提供相应的拉力绷紧弹网,又能抵抗拉网反力,保证立柱稳固不变形不倾覆;(4)采用刚性链和卷扬机动力系统较容易满足拉力需求,立柱的刚性成为设计主要关注点。

实验中在进行合力连续踩网的动作时,弹网被众演员一起拉低至最低又弹起,立柱出现稍稍摆动,但拉网绳仍被紧拉的现象。

已知立柱装置按照50 kN的侧向荷载力设计,立柱总长4.16 m,升起舞台面3.2 m,留存在座架内的余部作为立柱根部,其外侧滑槽组件与钢座架上部的转换框架的槽体通过刚性链驱动,两者紧密镶嵌,相当于悬臂梁的绞合,两者的结合紧密程度决定了立柱的稳态(见图10)。嵌入滑槽组件内滑块的选择,应满足支点最大受力 $50 \times 3.2 / 0.96 = 166$ kN的参数要求。

存在此现象的原因,一是立柱体与座架的结合仍需加强提高,二是滑块已多次试验可能磨损。在导向形式已确定情况下,为保证使用,除检查滑块情况,在立柱和座架之间通过增设电动插销的办法,增加两者间的锁闭,增大立柱体与座架之间的绞合程度,防止缝隙的产生,抵消因拉绳变动产生的拉力变化。

在弹网发生因各种跳动在高弹冲击瞬间而拉绳角度改变时,使得拉绳从仅有水平方向的侧向拉力改变为变化着的竖向分力与水平分力,该竖向分力和水平分力传递和作用至座架地面和舞台楼板结构面,立柱和座架作为整体时又可总体视作轴向受力构件,座架应保证有足够的座底锚固能力以产生足够的抗压和抗拔力,对上部楼板结构面需有足够的侧向顶撑能力。通过加大座架底面积以避免对建筑的损坏,地下室地面每座架埋设了多组基础埋板,使用化学锚栓锚固,每块最大可承受垂直方向拉力4 kN,压力4 kN,水平方向剪力12 kN。舞台楼板面洞口位置的导靴,也使用同规格化学锚栓固定。

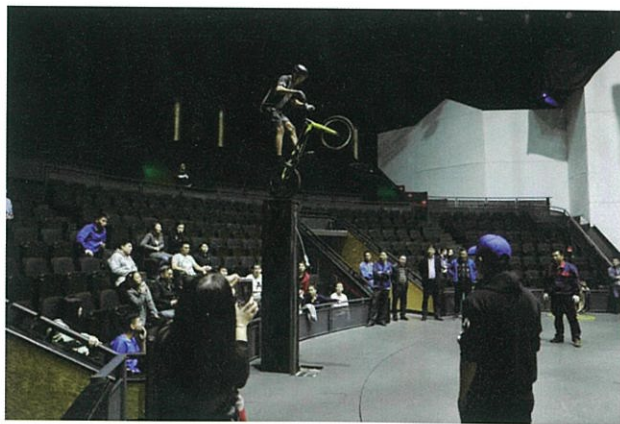


图10 测试升降立柱的稳定性

4 总结

(1) 立柱主要性能指标是侧向荷载力, 其值既包含正常拉网拉力又包含演员表演中对网的冲击力。确定了立柱和网的最大保护范围, 就决定了在使用中立柱分担的承载力、立柱设置间距、立柱使用数量和所用网或其他载具的性能要求。而确定了立柱的承载力, 就定了其构造形式、驱动力大小、调节能力和调节机构的类型。

(2) 升上舞台面的立柱体犹如悬臂梁, 无任何的前后支撑或反向拉索, 悬臂梁特性决定了其受拉受弯的挠度或变形特性, 以及在舞台面根部支点位置处的弯矩特性, 故在设计立柱体形式和尺寸时, 需要考虑各种使用状态中最不利的条件, 当侧向拉力超出原定量时, 应增大悬臂梁的截面维度以增大抗弯抗变形能力; 或考虑调整立柱的构造形式, 并选用更高强度性能材料。

(3) 弹网发生的节奏性弹动, 特别是在数人合力作用下的弹网深度拉低连续跳动, 使得拉绳改变为跟随拉绳上下波动, 易引起立柱的摆动, 避免和减小立柱的晃动量, 在立柱体刚性保证前提下, 要加大和提高悬臂梁的绞合程度。应选择合适的立柱与座架间的导向形式, 提高精度, 减少导向间隙。

(4) 采用升降立柱挂设弹网, 弹网在绷紧尤其在弹跳时, 网对立柱的考验极大, 应考虑建筑现场条件是否具备使用条件, 特别是地面的承载能力与楼板的侧向支撑能力, 应对地面耐压、抗挤压能力、各支撑点、连接点的受力计算与加固。

(5) 支网系统的引入, 主要目的是丰富演出内容, 增加空中节目和网上节目的融合, 为新节目的推出提供先决条件。采用弹网作为演出载体平台, 配合空中如车船大型载具上的表演形式, 构筑上中下多层次的表演空间, 空中类节目演员不仅仅局限在空中载具上演出, 弹网上演员不单单演出蹦床的弹跳动作, 就像自行车节目可以搬上弹网骑行, 浪桥可以放在舞台地面演出荡秋千和空中翻腾腾跃动作。这些装置为节目创作、编排赋予新内涵和演出形式, 演绎出更加多彩的演出效果。

总之, 为杂技高空类节目演出的舞台边设立升降立柱进行保护网支设, 通过对采用刚性链、卷扬机、滚珠丝杠组成的立柱装置完成拉网的功能, 并使用升降立柱实现弹网的支设, 既解决保护网支设的问题, 又赋予保护网更多的功能和演出载体的转化, 很好地支撑了高空类节目演出的艺术呈现, 促进了技术与艺术完美融合。演

参考文献:

- [1] GB/T3811-2008, 起重机设计规范[S]. 2010.
- [2] 顾迪民, 陈伟璋. 起重运输机械金属结构[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2011.
- [3] 王斌. 舞台机械控制系统设计的基本原则[J]. 甘肃科技, 2016, 32(17): 21-22.

(编辑 杜青)

基于时间轴的舞台机械控制系统简介

陈永周, 马 则

(浙江大丰实业股份有限公司, 浙江 余姚 315400)

【摘要】 介绍基于时间轴的舞台机械控制系统的构成和应用, 包括系统结构、操作软件、网络通信协议、现场总线协议、控制器算法以及应用方法等。

【关键词】 时间轴; 舞台机械; 控制系统; 操作系统; 多项式插补算法

文章编号: 10.3969/j.issn.1674-8239.2020.08.009

Introduction of Stage Machinery Control System Based on Time Axis

CHEN Yong-zhou, MA Ze

(Zhejiang Dafeng Industrial Co., Ltd., Yuyao Zhejiang 315400, China)

【Abstract】 This article introduces the composition and application of stage machinery control system based on time axis, including system structure, operating software, network communication protocol, field bus protocol, controller algorithm and application method.

【Key Words】 time axis; stage machinery; control system; operating system; polynomial interpolation algorithm

1 前言

随着演出艺术的不断创新, 舞台机械作为演艺设备元素之一, 越来越多地参与到演出中去, 与节目内容的互动性越来越强。传统的基于位置-速度控制的舞台设备已经不能充分满足节目需求, 因此, 需要一种能和演出节拍相对应的控制方式, 以达到精准的时间控制目的。

笔者曾经参与一个项目, 演出方要求大幕从闭合到开启的时间必须是22 s, 不能多也不能少。传统的基于位置-速度控制的方式, 需要多次设定参数试凑才能达到演出效果, 而基于时间轴的舞台机械控制系统, 只需要设定参数就能达到目的。时间轴控制系统不仅应用于单轴系统, 也可以由多个轴组合成一个设备, 实现多轴同步联动的运动。本文主要介绍基于时间轴的舞台机械控制系统的构成和应用。

2 时间轴控制系统简介

2.1 技术来源

时间轴控制技术来源于电子凸轮控制技术。电子凸轮控制系统利用构造凸轮曲线来模拟机械凸轮(图1), 以达到与机械凸轮系统相同的凸轮轴和主轴之间的相对运动。电子凸轮应用广泛, 比如板材制造业中的连续飞剪、追剪, 消费品制造业中的包装贴标等。

在电子凸轮控制系统里, 主轴可以是位置、角度、温度、压力等各种具备连续稳定输出的物理量。而时间轴控制技术, 则把这些物理量换成以时间的连续变化为主轴。

2.2 控制系统构成

控制系统为典型工业应用三层架构, 分别是操作层、控制层和现场执行层(图2)。

操作层: 有单个或者多个操作台组成的

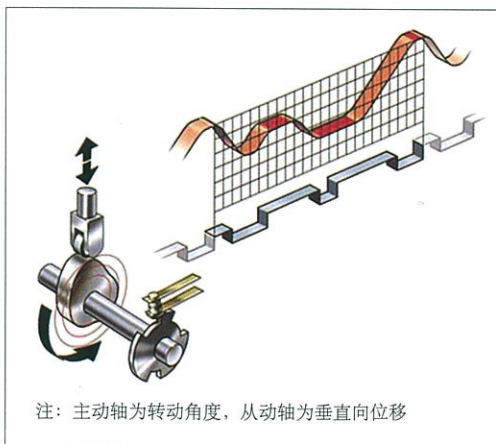


图1 机械凸轮结构

上位机系统，操作员可使用单个或者多个操作台同时进行操作。

控制层：主要由PLC或者运动控制器构成的控制平台，承载任务包括接收上位机系统下发的曲线轨迹和控制指令；解析上位机曲线轨迹，并转化成速度-时间的控制曲线；对现场执行层驱动器进行控制。

现场执行层：通过伺服型驱动器，或者带伺服功能的变频器（如Danfoss FC302、SINAMICS S120）配合IO信号传输执行控制层下发的指令。

操作层和控制层之间采用TCP/IP协议，由自定义协议构成主要的报文结构，基于Request/Response机制，PLC或者运动控制器作为服务器，操作台PC机（一般是Windows系统）作为客户机，并在报文帧结构中包含校验码，以保证传输数据正确。

控制层和现场执行层之间采用实时总线现场网络通信，也可采用数字量信号或模拟量信号传输的方式进行给定和反馈。对实时总线，可选择的总线类型包括PROFINET或者ETHERCAT。笔者所在的项目组研发设计的控制系统，均采用PROFINET作为主要现场网络通信类型。

2.2.1 操作台

操作台配置单个或者多个19英寸电容式触摸屏，主机为安装Windows 7的工业PC机，配备2~4个操作手柄，可同时运行多个预设场景和编组，每个操作手柄为一个调速通道，手柄带确认功能，防止误操作（图3）。操作台设置急停按钮，急停按钮和执行层之间不仅使用总线通信，还采用IO硬连接，确保在通信失效的情况下能执行急停功能。

2.2.2 PLC/运动控制器

使用西门子最新一代S7-1500 (T) /SIMOTION D系列控制器作为主控制器，1500F (T) 系列较之上代S7-300F (T) 系列性能有很大的提升。

(1) 速度快。比如，1515-2 PN较之上代315-DP/PN速度快2倍以上，扫描周期循环时间可保持在个位数毫秒级别。浮点性能强，内置PLC Open Motion标准应用，对轨迹插补类运算可在一个周期内完成，保证多轴的同步性能。

(2) 总线速度高，抖动低。当采用PROFINET IO IRT时，最快可以达到1 ms的同步刷新速度，设备响应快，精度高。

(3) 稳定性和可靠性强。被广泛应用于国民经济重要生产场合，比如重化工、钢铁冶炼、汽车制造业等，稳定性、可靠性值得信赖。

(4) 可集成安全控制功能，内置标准安全控制块。符合

IEC61508: 2010标准，PFH (Average frequency of a dangerous failure, 平均危险失效频率) <1E-09。

2.2.3 驱动器和电机

驱动器采用西门子S120系列或者丹麦DANFOSS FC302系列变频器，具备以下优点。

(1) 可靠耐用，对使用环境要求较低，故障保护措施完整，具备过流、超速、过压、缺相、编码器检测等保护措施；可在0 hz实现满转矩。

(2) 内置运动控制功能，可实现高精度定位和同步控制。

(3) 具备Safe stop和Safe Torque off，满足安全控制要求。

(4) 可驱动三相永磁同步电机或者异步变频电机，兼容性出色。

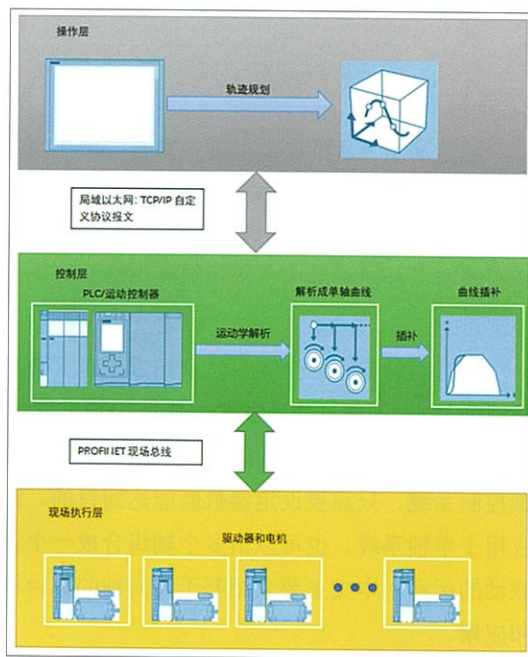


图2 层级结构示意图

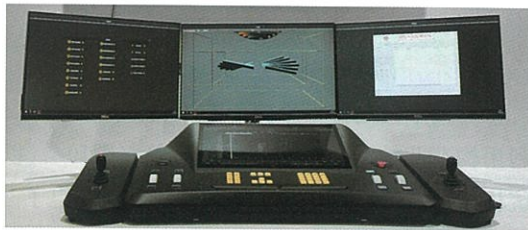


图3 操作台

(5) 支持PROFINET实时现场总线，支持PROFIDRIVE运动控制协议。

(6) 调试时支持在线自动整定优化，整定后，前馈参数基本正确，位置环和速度环性能优越。

3 操作系统软件功能介绍

DF Stage Control V6是笔者所在公司已发布的最新一代的舞台机械操作软件。该操作系统主要具备以下主要功能。

(1) 控制管理功能

场景及编组管理，可编辑剧目。对支持时间轴的设备，有两种运行模式。第一种是按照位置-速度模式，设定设备运行速度、启动时间、最终目标位置参数运行设备（图4）；第二种是按照时间轴运行控制模式，设定多个运行点的参数，包括位置、加速时间、减速时间，以及到达这个点的绝对时间运行设备，其中加速时间和减速时间可以由软件生成默认值，方便用户编辑（图5~图6）。编辑好的曲线段可以复制到同类型设备。

(2) 设备管理功能

设备管理功能主要是修改舞台机械参数，包括当前位置、软上限位、软下限位、脉冲当量、禁用以及运行联锁关系的启用和禁用。设备管理功能需要高权限的用户才能修改，一般是舞台机械的管理员才能修改设备参数。

(3) 设备状态监控功能

操作软件主界面状态栏显示设备的当前状态，包括设定的目标位、设定的速度、设定的时间轴点数、设定的运行时间、当前实际位置、当前实际速度、当前实际运行到的时间轴点数、当前实际运行时间、实际载荷、实际电流以及设备实时状态。设备实时状态包括设备运行、停止、急停、联锁信息及故障信息（图7）。

(4) 系统管理功能

系统管理功能包括语言选择、用户管理、日志管理等。用户管理可以增加、删除用户，更改用户密码；具备管理员权限的管理员用户，可以设定每个用户的权限。日志管理功能，可以查看设备的运行状态、故障信息

记录和用户的登陆记录，可以设定日志的记录过滤条件（比如只记录故障信息），可以设定日志的整理和删除条件（比如一个月自动整理删除一次记录）。

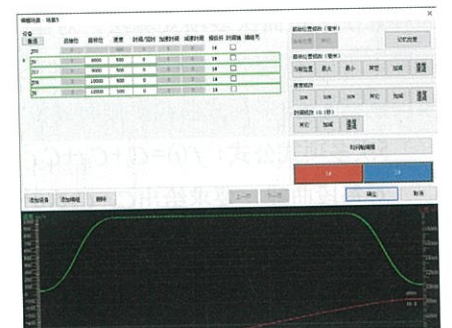


图4 按传统运行方式进行设定

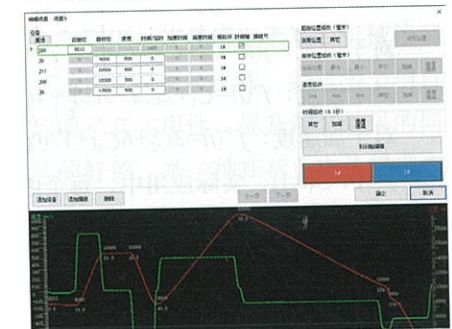


图5 按时间轴运行控制方式多点运行进行设定

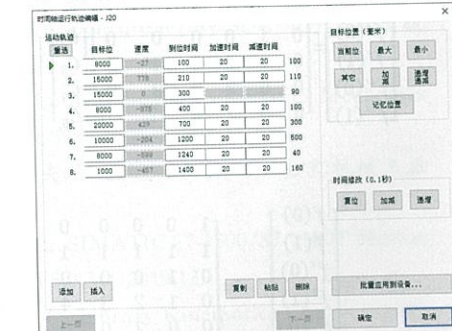


图6 时间轴多点编辑界面

| 设备名称 | 景杆36 | 景杆37 | 景杆38 | 景杆39 | 景杆40 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 当前位置 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 上目标位 | 30000 | 30000 | 30000 | 30000 | 30000 |
| 下目标位 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| 实时速度 | 60/600 | 60/600 | 60/600 | 60/600 | 60/600 |
| 运行时间 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 实时电流 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 实时状态 | ⚠ | ⚠ | ⚠ | ⚠ | ⚠ |

图7 监控区显示界面

4 控制层算法

上位机软件负责规划多点轨迹曲线，并生成每个关键点信息，这些信息包括点的位置、点的时间、点的加减速时间。控制层PLC/运动控制器负责完成运动模型解析，并对每个轴的曲线进行插补密化。对单轴设备而言，则只需要进行插补密化。插补算法采用高次多项式算法，对浮点性能足够的PLC/运动控制器，可以采用5次多项式拟合，即任意一条曲线都可以看成是多段连续的5次多项式曲线拼接而成。

5次多项式公式： $f(t)=C_0+C_1t+C_2t^2+C_3t^3+C_4t^4+C_5t^5$ 。

对每段曲线，要求给出 $C_0\sim C_5$ 这6个系数，需要6个方程组成一个方程组。从物理的角度，加速度可以看作是速度的微分方程，速度可以看作是位移的微分方程。任意一段5次方曲线，只要知道起点的位置、起点的速度、起点的加速度、终点的位置、终点的速度、终点的加速度，即可组成6个方程，求出这6个系数。

$$\text{对于位置: } f(t)=C_0+C_1t+C_2t^2+C_3t^3+C_4t^4+C_5t^5 \quad (1)$$

$$\text{对于速度: } f'(t)=C_1+2C_2t+3C_3t^2+4C_4t^3+5C_5t^4 \quad (2)$$

$$\text{对于加速度: } f''(t)=2C_2+6C_3t+12C_4t^2+20C_5t^3 \quad (3)$$

其中 $t \in [0,1]$ ，实际应用中，每个曲线段，对时间 T 应先进行归一化处理， $t=(T-T_s)/(T_f-T_s)$ ， T 为实际时间， T_s 为当前曲线段起点时间， T_f 为当前曲线段终点时间， $T \in [T_s, T_f]$ 。

$$\begin{bmatrix} f(0) \\ f(1) \\ f'(0) \\ f'(1) \\ f''(0) \\ f''(1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 6 & 12 & 20 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \end{bmatrix}$$

$$\text{设 } Y = \begin{bmatrix} f(0) \\ f(1) \\ f'(0) \\ f'(1) \\ f''(0) \\ f''(1) \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 6 & 12 & 20 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \end{bmatrix}$$

则 $Y=AC$ ，可得： $C=A^{-1}Y$ ；

因此，只要对矩阵 A 求逆，乘向量 Y 就可以得到系数向量 C ，将 C 代入公式(1)、(2)、(3)，便可得到单段曲线任意时刻的位置、速度及加速度。图8为单段(5000, 0)到(5375, 20)的曲线，其中起点速度为0、终点速度37.5，起点加速度和终点加速度均为0。

5 应用实例

5.1 PALM EXPO 2017展出的《梁祝》

《梁祝》的每一个方块由4个单点吊悬挂，可沿水平面内任意轴倾斜角度，两块方块叠加上升运动和沿相邻边倾斜旋转运动，便可模拟蝴蝶翅膀的姿态。图9是在三维软件规划轨迹时的界面，图10的曲线描述了其中一个吊点的运行轨迹。这些轨迹由上位机规划，下载到控制层，由控制层控制器进行插补，对驱动器进行速度控制。

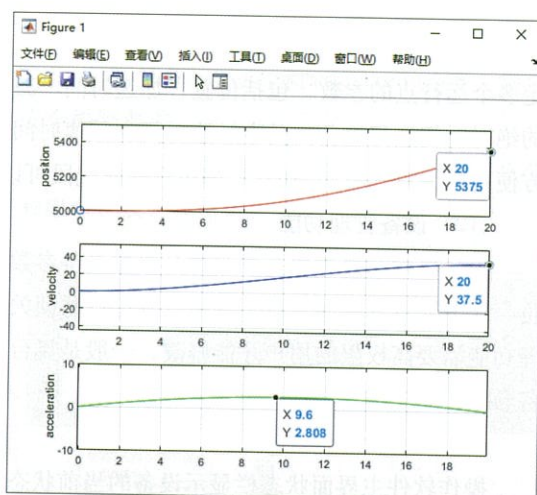


图8 5次多项式曲线(从上到下依次为位置、速度、加速度)

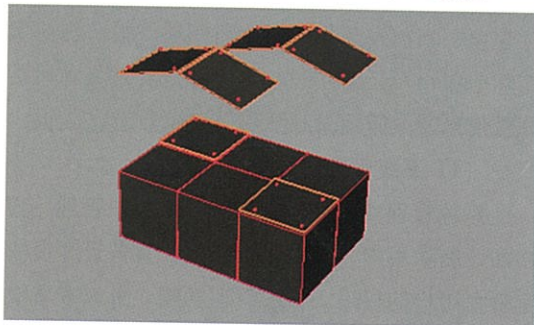


图9 三维姿态编辑画面

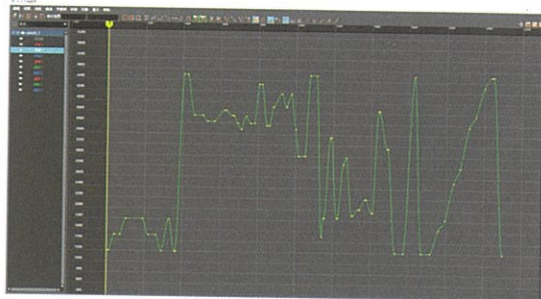


图10 曲线编辑

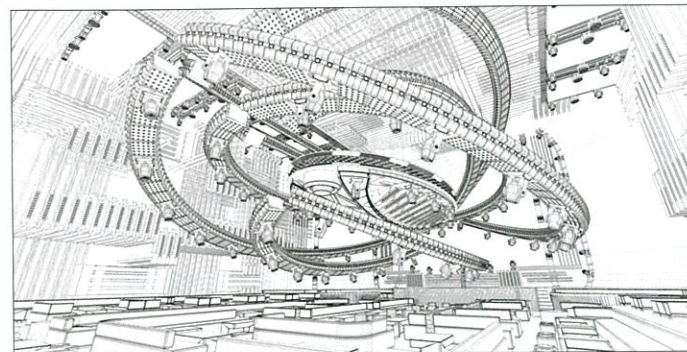


图11 星际酒吧设计图

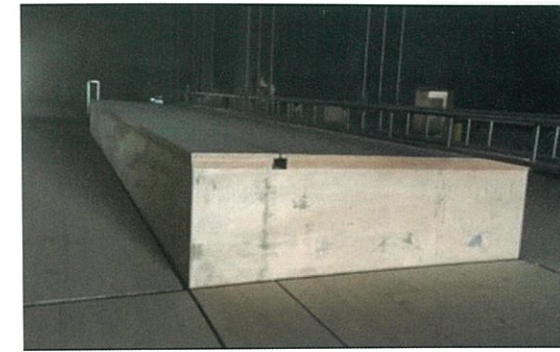


图12 升降台吊杆同步运动

5.2 厦门Stellar星际酒吧项目

厦门Stellar星际酒吧的中心表演区域为多层圆环，每个圆环由多个圆环片段组成，每个片段由多个单点吊机悬吊(图11)。在自动模式下，受控对象为圆环或者圆环片段，上位机下发受控对象姿态，包括位置、倾角轴和倾角及时间参数，由运动控制器进行运动学解析，转化为每个吊机的钢丝绳索长度(轴位置)、速度、加速度，运行时进行实时插补，对驱动器进行速度控制。在手动模式下，受控对象为单个吊点，可单独进行钢丝绳长度调节，或维护维修时进行单个吊点设备的调试。

5.3 不同类型设备同步运动

例如升降台和吊杆同步运动(图12)。按照位置-速度控制方式，升降台和吊杆由于不同的减速度和加速度，要保证升降台和吊杆的同步，需要修改驱动器的加减速参数，对设备使用者而言，存在一定的困难。在基于时间轴的系统，只要在上位机系统设定加减速时间一致、运行时间一致、最终位置一致，系统就可以规划出速度一致的运行曲线。相比硬编码同步方式，这种方式具有灵活多变，可随时组合不同设备的优点。

6 结语

为了满足日益增长的演艺特效需求，舞台机械从利用杠杆滑轮手动控制到电气时代经典电机控制，再到现

代自动控制发展应用，其无一不是运用了当时先进的控制技术。时间轴控制技术，为各种需要严格同步、多轴联动、需要空间轨迹规划展现机械特效的演艺设备提供了一种实现的可能。借鉴工业设备和机器人控制技术，并做了适当改造和简化，使其适应于舞台机械控制特性，并让舞台机械操作人员便于操作。经过多个项目的实践和使用后，证明了其实用性，提升演艺效果的同时也获得了演出团队的好评，是一种在行业内值得推广的控制系统。

参考文献:

- [1] (美)Saeed B. Niku. Introduction to Robotics Analysis, System, Application [M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- [2] (美)John J. Craig. Introduction to Robotics Mechanics and Control[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [3] (美)哈肯·基洛夫. 工业运动控制[M]. 北京:机械工业出版社,2019.
- [4] 西门子技术中心. SIMATIC S7-1500/S7-1500T Motion Control overview V5.0[M]. 2019,12.
- [5] 西门子技术中心. Library Kinematics Cam V1.0[M]. 2019,11.

(编辑 王芳)

从舞美设计制作角度谈临时搭建舞台的安全*

——以大型舞剧《蓝月谷》为例

张 瞳

(中央戏剧学院, 北京 100710)

【摘要】 以大型舞剧《蓝月谷》为例, 从舞美设计、制景等角度, 对临时搭建舞台工程及演出中面临的诸多舞台安全问题进行分析, 并提出解决方法。

【关键词】 平地起舞台; 临时搭建舞台; 舞台安全; 舞台美术; 制景; 防火处理

文章编号: 10.3969/j.issn.1674-8239.2020.08.011

Safety of Temporary Stage Construction from the Perspective of Stage Design and Production - Taking the Large-scale Opera *Blue Moon Valley* as an Example

ZHANG Tong

(The Central Academy of Drama, Beijing 100710, China)

【Abstract】 Taking the large-scale opera *Blue Moon Valley* as an example, this article analyzes some stage safety problems during the temporary stage construction and performances from the perspective of stage design and scenery making, and proposes solutions.

【Key Words】 stage on level ground; temporary stage construction; stage safety; stage art; scenery making; fire prevention treatment

1 “临时搭建舞台”的范畴

一般情况下, 各种戏剧、曲艺等演出的表演场所为剧场、演播厅等, 具有基本舞台结构与声光电设施。而对于演唱会、音乐节、综艺晚会、旅游演出、即兴喜剧与民间杂耍及一些歌舞剧等戏剧形式等流动性演出, 则需要临时搭建舞台。

临时搭建舞台, 顾名思义, 是指从几乎没有任何辅助设施的空场地上拟定演出设计方案, 并临时搭建演出需要的舞台, 并开辟出配套的场地, 也可形象地称为“平地起舞台”。也包括在室内的非剧场性场所临时搭建舞台。

与剧场等演出场所的“固定”舞台相比, “临时搭建舞台”演区四周环境相对开放, 受到的场地条件限制大, 搭建方式复杂。此类舞台往往使用时间短, 搭建周期紧凑, 由于剧团人员组成复杂, 尤其要重视舞台安全问

题。但在室内的非剧场性场地搭建临时舞台时, 自然环境更为复杂, 也可能遇到进深、顶高、用电、建声情况等问题。

2 临时舞台搭建的现状安全问题

临时舞台的搭建, 需要对演出的舞台样式、综合设备、防火需求等多方面进行考量。

随着科技的进步以及人们艺术欣赏水平的提高, 观众对于花样迭出的舞台效果也愈发期待, 为营造特殊舞台效果, 常用一些特技设备, 例如造云雾系统、鼓风系统、喷火系统、降水系统、高空威亚等。近年来, 《GB/T 36731-2018 临时搭建演出场所舞台、看台安全》国家标准的颁布实施, 规范了临时搭建演出场所舞台、看台的设计、安装、装台、排练、演出和拆台等过程的

* 本文为中央戏剧学院学生项目“从舞美角度谈‘平地起舞台’过程中的舞台安全问题”研究成果, 得到中央高校基本科研业务费专项资金资助, 项目编号YNXS2002。

行为,也为政府部门对临时搭建舞台的监管、核验工作提供依据。但由于缺乏谙习舞美工程专业的核验机构、监管人员,而戏剧演出、大型演出等形式多样,涉及声光电、机械等多系统一体化应用,加之舞美设计与工程施工时间紧,临时舞台搭建依然存在很多安全问题。

在舞台从无到有的搭建过程中,舞台事故的发生主要分为硬件的故障与软件的差池。硬件即指场地建筑、各类设备设施,例如桁架灯架、舞台台体、声光电设备等;软件即指人员因素,其中包括舞台搭建人员与设备操作人员的资质、演职人员对舞台道具的安全使用与妥善安置等。然而,一些制作商为了压缩成本,钻审查的空子,出现搭建材料缩水、舞台防火措施制作不达标、机械使用技术不规范的情况,甚至相关执行人员未达到搭建资质,从而造成舞台坍塌、桁架坍塌、幕布起火、布景失火等种种惨剧,酿成重大舞台事故或人员伤亡。

因此,保证舞台安全是演出活动中各部门工作须遵守的第一要义。其中,包括防火措施的落实、搭建方面的承重考察、舞台制景材料与工艺是否合理、专业人员管控与资质审查等。

3 临时搭建舞台安全问题的案例解析

笔者以纳西族大型儿童舞剧《蓝月谷》为例,阐述临时搭建舞台过程中对舞台安全问题的分析和处理。

3.1 前期案头工作

目前,国内绝大多数剧院都明确要求不能使用任何形式的明火、枪

械、大型动物等,这在一定程度上限制了设计师和导演的想象力和创造力。如何科学有效地评估和控制演出风险,在确保演出安全的同时,尽可能满足导演及设计的要求,是每一位舞台工作者应该思考的问题。

《蓝月谷》的演出场所为国家游泳中心(水立方)网球馆,搭建临时舞台的过程中,应将非剧场的环境因素纳入其中,全面思考其中的安全问题。对于水立方这类较为严苛的场馆,提前了解场馆的安全要求及防火规则,可以更高效率地考虑运用何种材料更符合场馆安全规定,最大程度地规避因设计方案选材出现的失误,以及在安全方面难以落实而导致的误工时间。

《蓝月谷》的前期案头工作中,笔者曾多次到演出场馆进行细致测量,根据现场实际情况,结合场馆图纸,提前预留出舞台两侧符合安全宽度要求的疏散通道。考虑到参演人员超过一百人,场馆原有储备间作为后台略为狭窄,于是在主场馆舞台后方空间另搭设后台。由于舞台设计需要为搭建过程中桁架的吊升与架设留出工作空间,则舞台体量也不宜过于充盈。另外,灯具长时间处于工作状态会产生大量热量,应注意灯具与场馆棚顶(水立方膜状气泡结构)的安全距离。综合上述因素,确定了较为合适的整体舞台大小,并在此基础上,确立与把控视觉形象的设计。

舞台设计工作时间紧,消防等审核严,如何做出应急舞台设计预案值得在实践中不断探索。舞台机械的安全使用、灯具如何安全使用等都是舞台工作中触及到的安全问题。舞台设计应考虑总体成本,做出既确保安全,又能相对完整地体现舞台设计构思的方案,在安全的前提下进行视觉效果的创新。

3.2 演出概况与舞台搭建

《蓝月谷》前期拟定时间安排为舞台方案设计一个月、装台时间三昼夜。馆内为长方形平坦场地(图1),宽38m、长62m;主舞台大小约宽18m、长35m、高12m。

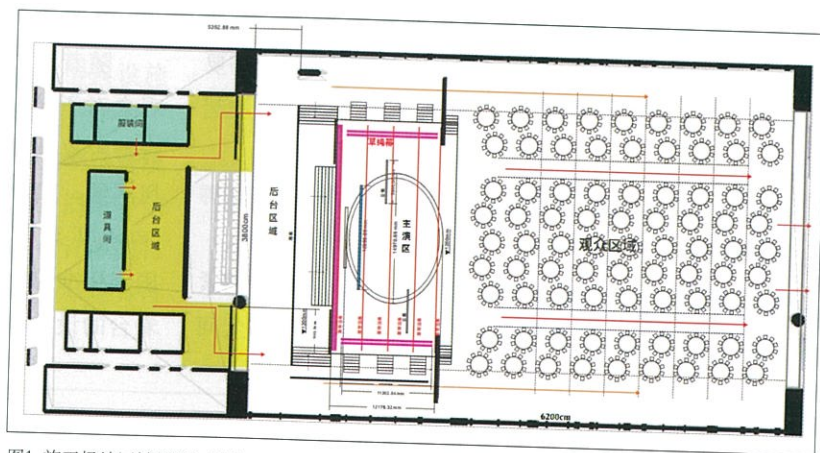


图1 施工场地区域划分与舞台平面图

由于场馆位于景区内,装拆台的时间仅限于22点以后至次日7点。在如此紧凑的装台时间中,对于大体量的舞台安装,拟定详细到每小时的舞美搭建计划,合理安排施工区域的空间,各部门根据部署严格执行,尽量同时进行不相冲突的搬运与组装工作,从而节省时间。

在施工过程中,所有工作人员须佩戴安全帽,高空作业人员须系安全带。在该项目中,吊装带使用2000kg承重的规格,借助水立方顶部的不规则分布吊点,两个吊点为一组下一道吊索,主要承重依靠地面生根的桁架结构(图2)。舞台要在空旷网球场平地生根,按顺序依次展开工作:铺置地毯、下吊点进行桁架的组装、提前布设线路、运输并安装舞台基底框架、安装灯具、安装舞美布景。现场井然有序的装台,除了前期合理的规划,也离不开思路清晰的现场监督,同时还有制景部门的配合,制作好的各类景片分类收纳,尤其是对于大型软景片,标识正反、上下面与名称可以节省很多时间。

3.3 舞台的安全问题

3.3.1 主演区处理——规避人身安全风险

大型舞剧不同于其他剧种,由于演员动作的特点,对于台板表层有相应的要求,例如台面需要维持适当的摩擦力,主演区台面不可安排过多小起伏景片,尽量维持平面利于演员行动,同时也要兼顾整体质感。制景过程中,台面涂料中含有为了塑造仿土肌理而添加的细小掺杂物时,考虑到演员以儿童为主,全程赤脚舞蹈,大幅度跳跃滚地等动作易使皮肤损伤,于是,对整体主演区台面进行二次打磨处理。经过喷涂处理的台面,对演员的刮伤不以肌理颗粒大小而定,细小柔软的肌理颗粒掺杂物

在附着乳胶风干后,可能会产生几倍的硬度;如果这种未经打磨的台板装台完毕,则很难在安全要求系数高的场所内进行二次打磨,因为残留粉尘极难清理干净,不仅容易对舞台其他声光设备产生干扰,也有引发火灾的风险。因此,舞美人员在进景前全面考虑并排查细节问题,严格把控制景流程及细节问题,以利于整体效率的提高与安全问题的预防。

此次参演演员除了北京现代舞团的专业舞蹈演员,还有走出深山来自丽江孤儿院的儿童,5岁~15岁不等,人数150余名。临时搭建舞台上进行人数较多的群舞,有可能发生由于台板共振造成的舞台坍塌事故。因此,对于主舞台的搭建,选用加密方钢支架,上覆1.8cm大合板。主舞台位于场馆中后方,舞台两侧严格清出2m安全通道,并在整个搭建过程中保持安全通道畅通。舞台后方预留5m进深作为后台区域,用于临时置景与工作人员行动空间,后台布置疏散标识。为了使观众席获得较佳的观演效果,同时考虑儿童演员可自由运动及参演儿童中部分未受过正规舞蹈训练的因素,主舞台的台面最低点高1.2m,主舞台后方有5°的抬升倾斜。

3.3.2 制景过程中的防火处理

非剧场性场所具有很多不确定因素,因此,剧团方人员应在布线接电、吊装等诸多方面有更全面的安全防控对策,结合场馆实际参数对舞美方案进行考量。

就此次演出而言,考虑到网球馆的特殊性与严格的防火要求,尽管水立方外壁的膜结构在燃烧模拟试验中遇灼烧即炭化成灰,有着较为出色的阻燃性,但巨大气囊一旦起火,造成的经济损失不堪设想。因此,装台过程中避免了一切电气焊接等存在起火隐患的装台方式,对分块式舞台台体使用螺丝拼接的物理方法进行组装。同时,杜绝传统制景材料苯板的使用,采用耐受度更强、更符合场馆规定的材料进行舞台吊



图2 舞台基架、桁架与棚顶下设吊点情况

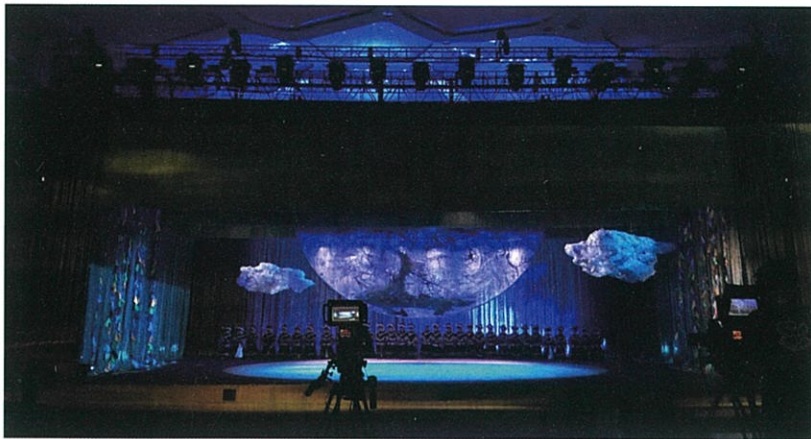


图3 主舞台绳幕与吊景

景的设计与制作(图3)。例如,用硬质细铁网塑造的云朵,具有防水、抗高温的性质。

对于无法避免使用的可燃景片,应在制景阶段进行严格的防火处理。例如,演出中演员可自由穿梭于草编绳幕之间,作为边檐幕的超大体量草编麻绳幕,普通的防火剂喷涂难以满足水立方的防火标准。因此,在制景过程中,制景部门将绳幕整体浸泡在阻燃剂中,再充分晒干,对其进行全面防火处理,并随机取样进行燃烧检测。在进入剧场后,制景部门也备有装有防火涂料的高压喷壶,以便定时补喷。

除此之外,装台过程中产生的泡沫纸等易燃垃圾随时清出场外。本次演出中,舞台灯具约230台,总功率达到370 kW,使用3级电箱200 A,4组48路空气开关,2台二级漏电保护电柜。操控台所有插线板、灯光架等易发热部分均垫裹石棉布。

4 结语

舞台美术是表演艺术的重要组成部分,目前,更多可以帮助实现舞台特定视觉效果的新设备与媒介已面世,更加注重描述舞台视觉,这就要求舞美工作者应有过硬的制景水平与造型基础。现在布景体量往往较大,对舞台台板、悬吊系统与立体造型本身的承重要求比较高;运用媒体影像或各类装置的舞台,则对电力、设备规范操作有着更高的要求。如果说兼顾舞台美术的美学价值与实用价值是舞美工作者的原则,那么,舞台安全问题就是维持一台演出达成圆满效果的关键。

中国现阶段舞台灯光、视频、音频、机械设备广泛应用,演出场次数量及规模逐渐增加,行业内监管制度不健全、较为松散,舞美设计与工程执行团队的人员组成也相对随机,团队的专业化水平、执行力不够,舞台安全问题逐渐显露,而在格外讲求时效的临时舞台搭建中,则放大了舞台机械设备的安全问题。

随着戏剧演出艺术的不断发展与普及程度的加深,对“平地起舞台”的临时舞台搭建技术与行业范本的需求会愈加明显。舞台安全要求与观众审美的不断提高,使“平地起舞台”较固定舞台涉及的工作更复杂,演出的安全需要各部门共同负责,这就要求舞台美术工作者深化对搭建临时舞台的安全意识与必备知识,一方面规避方案的返工次数;另一方面根据场地条件,更有效地完成安全、合理、可操作的舞台美术作品。 **演**

参考文献:

- [1] 段慧文. 浅谈演出安全对策[J]. 演艺科技,2020(02).
- [2] 徐奇. 中国舞台机械的相关标准及安全使用[J]. 演艺科技,2019(01).
- [3] 刘峰. 演出安全的风险防范与管理[J]. 艺术教育,2020(05).

作者简介:

张瞳,中央戏剧学院舞台美术系舞台设计方向研究生在读。舞台设计作品包括话剧《金龙》《主配之间》,易卜生戏剧节《乐园》,中央戏剧学院话剧《秋望》《今夜我家亮起红灯笼》《晚安辛巴》《五年》等;道具设计或舞台造型体现作品包括冯小刚电影《手机2》、大型实景演出《晋阳之约》等;平面设计作品包括话剧《天命》、歌剧《山村女教师》、话剧《暗恋桃花源》等。

(编辑 王芳)