

中国传媒大学“十一五”规划教材

舞台机械设备 控制技术

蒋伟 任慧 编著

中国  广播电视出版社
CHINA RADIO & TELEVISION PUBLISHING HOUSE

中国传媒大学“十一五”规划教材

舞台机械设备控制技术

蒋伟 任慧 编著

中国广播电视出版社
CHINA RADIO & TELEVISION PUBLISHING HOUSE

图书在版编目 (CIP) 数据

舞台机械设备控制技术 / 蒋伟, 任慧编著. —北京:
中国广播电视出版社, 2009. 11

中国传媒大学“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5043-5981-0

I. ①舞… II. ①蒋… ②任… III. ①舞台机械—机
械设备—控制系统—高等学校—教材 IV. ①J813.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 202560 号

内 容 简 介

本书内容由基础部分、控制技术部分和应用部分三部分组成, 共分七章。基础部分包括舞台机械设备概述、电力拖动系统基础和液压控制系统基础; 控制技术部分包括舞台机械设备电力拖动控制技术、液压控制技术和计算机控制技术; 应用部分主要介绍了舞台设备控制系统应用的两个典型实例。全书突出了舞台机械控制技术的特点与特殊要求, 较全面地介绍了舞台机械设备所适用的控制技术以及一些实际应用。

本书主要适用于普通高等学校演艺工程专业的本科生或硕士生。亦可供普通高等学校其他相关专业选用, 或供剧场、演播厅技术人员进行继续教育和岗位培训时学习参考。

舞台机械设备控制技术

蒋 伟 任 慧 编著

责任编辑 王本玉

封面设计 郭运娟

版式设计 张智勇

责任校对 张莲芳

出版发行 中国广播电视出版社

电 话 010-86093580 010-86093583

社 址 北京市西城区真武庙二条9号

邮 编 100045

网 址 www.cntp.com.cn

电子信箱 crtp8@sina.com

经 销 全国各地新华书店

印 刷 高碑店市鑫宏源印刷包装有限责任公司

开 本 787毫米×1092毫米 1/16

字 数 320(千)字

印 张 14.5

插 页 4(面)

版 次 2009年11月第1版 2009年11月第1次印刷

印 数 4000册

书 号 ISBN 978-7-5043-5981-0

定 价 28.20元

(版权所有 翻印必究·印装有误 负责调换)

前言

在演艺工程领域特别是舞台机械设备方面,自动控制技术也得到了广泛的应用。据统计,近年来,全国演艺设施投资在亿元以上的有国家大剧院、北京海淀剧院、中国国家话剧院、上海大剧院、深圳大剧院、杭州大剧院、浙江省嘉兴市文化中心等项目。目前,已经建成了国家大剧院、上海大剧院、深圳大剧院、杭州大剧院等一大批标志性的现代剧院,全国各地还有不计其数的综合演艺场馆、电视剧场、综艺演播厅等,这些场馆厅都广泛地装备了不同类型的舞台机械设备。

一部完整的舞台机械设备由原动机、传动部分、控制部分和工作机构等组成。原动机与传动部分是机械设备的的重要组成部分，其作用是把原动机（电动机、液压泵、液压电机等）的输出功率传送给工作机构。常见的传动方式有多种类型，如机械传动、电力传动、液压传动、气压传动以及它们的复合传动等。当原动机为电动机时，即由电动机通过传动机构带动工作机构进行工作时，这种方式称为“机电传动”。当原动机为液压泵时，即利用液体的压力通过传动部分驱动工作机构进行工作时，这种方式称为“液压传动”。控制部分的作用是，能够根据机械设备的要 求，对起动、制动、方向、速度、加速度、力等被控制量按一定的精度进行控制，并可在有外部干扰的情况下稳定准确地工作，实现既定的工艺目的。

近三十年来,随着自动控制理论、电力拖动技术、液压传动技术、微电子技术以及计算机控制技术的不断相互融合,舞台机械自动控制技术得到了迅速发展。

本书突出了舞台机械控制技术的特点与特殊要求,较全面地介绍了舞台机械设备所适用的控制技术以及一些应用实例。全书内容由基础部分、控制技术部分和应用部分三部分组成,共分七章。基础部分包括舞台机械设备概述、电力拖动系统基础和液压控制系统基础;控制技术部分包括舞台机械设备电力拖动控制技术、液压控制技术和计算机控制技术;应用部分主要介绍

舞台设备控制系统设计的性能要求和指标，并给出了两个典型的舞台机械控制系统实例。

本书第1、3、5章主要由蒋伟编写，第2、4、6章主要由任慧编写，两人共同编写第7章。

本书主要适用于普通高等学校演艺工程专业的本科生或硕士生。亦可供普通高等学校其他相关专业选用，或供剧场、演播厅技术人员进行继续教育和岗位培训时学习参考。

本书编写过程中，得到了中国艺术科技研究所、国家大剧院、中国演艺设备技术协会、总装备部舞台机械研发中心等单位的协助，并参阅了相关书籍和大量的专业文献，自动化系部分老师、研究生也参与了部分工作，在此一并向上述单位和有关作者深表感谢！

中国传媒大学、中国传媒大学信息工程学院和自动化系、中国广播电视出版社以及王本玉编辑，在本书的出版过程中也给予了积极的支持，特表示谢意！

由于时间仓促，作者水平有限，难免出现一些疏漏甚至错误，敬请读者和专家学者批评指正。

希望本书的出版，能够对我国舞台机械装备的技术进步起到积极地推动作用。

中国传媒大学信息工程学院

蒋伟 任慧

2009年8月

目 录

第 1 章 舞台机械设备概述	(1)
1.1 舞台机械的功能和要求	(1)
1.1.1 舞台机械的功能	(1)
1.1.2 对舞台机械的要求	(2)
1.2 舞台机械的配制及性能指标要求	(4)
1.2.1 舞台的类别	(4)
1.2.2 舞台机械配制	(5)
1.2.3 舞台机械的性能指标要求	(6)
1.2.4 舞台设备控制系统的功能要求	(7)
1.3 舞台机械常用的传动方式	(8)
1.3.1 台上机械的主要传动方式	(8)
1.3.2 台下机械的主要传动方式	(8)
第 2 章 电力拖动系统基础	(10)
2.1 电力拖动系统的组成	(10)
2.2 拖动电机的工作原理	(12)
2.2.1 直流电动机	(12)
2.2.2 交流异步电动机	(15)
2.3 电力拖动基础	(18)
2.3.1 直流电动机的起动和调速	(18)
2.3.2 交流异步电动机的起动和调速	(21)
第 3 章 液压控制系统基础	(32)
3.1 液压控制系统概论	(32)
3.1.1 液压控制系统的原理与组成	(32)
3.1.2 液压控制系统的类型及适用场合	(35)
3.1.3 液压控制系统的优缺点	(40)
3.2 电液控制阀	(41)
3.2.1 电液比例控制阀	(42)
3.2.2 电液数字控制阀	(53)
第 4 章 舞台机械设备电力拖动控制技术	(61)
4.1 自动控制系统的基本概念	(61)
4.2 直流调速控制系统	(64)

4.2.1	单闭环直流调速系统	(64)
4.2.2	双闭环直流调速系统	(69)
4.3	交流调速控制系统	(73)
4.3.1	交-交变频调速系统	(73)
4.3.2	交-直-交变频调速系统	(78)
第5章	舞台机械设备液压控制技术	(86)
5.1	电液比例控制机构及回路	(86)
5.1.1	电液比例压力控制回路	(86)
5.1.2	电液比例调速回路	(87)
5.1.3	比例方向速度控制回路	(89)
5.1.4	比例方向阀节流压力补偿回路	(93)
5.2	电液比例控制应用回路与实例分析	(99)
5.2.1	电液比例控制典型应用回路	(99)
5.2.2	双缸直顶式液压电梯的两种电液比例系统 分析	(103)
5.2.3	现代剧院双层升降舞台电液比例同步控制系统 分析	(106)
5.3	电液比例控制系统的设计特点	(109)
5.3.1	开环电液比例控制系统的设计特点及注意 事项	(110)
5.3.2	闭环电液比例控制系统的设计特点及注意 事项	(110)
5.3.3	比例阀的选型原则	(112)
5.4	电液数字控制系统的设计	(114)
5.4.1	增量式电液数字阀控制系统	(115)
5.4.2	脉宽调制 (PWM) 式电液数字控制系统	(115)
第6章	舞台机械设备计算机控制技术	(117)
6.1	计算机控制系统概述	(117)
6.1.1	计算机控制系统的组成	(117)
6.1.2	计算机控制系统的分类	(120)
6.2	PID 数字控制器的间接设计法	(123)
6.2.1	模拟 PID 调节器	(123)
6.2.2	PID 算法的实现	(126)
6.2.3	PID 算法的改进	(130)
6.2.4	PID 算式参数整定	(133)
6.3	计算机控制系统直接设计方法	(136)
6.3.1	直接数字设计法	(136)
6.3.2	最小拍无差控制系统的设计	(137)
6.3.3	无纹波最小拍无差控制系统的设计	(142)

6.3.4 非最小拍无差控制系统的设计	(145)
6.4 可编程序控制器 (PLC)	(146)
6.4.1 PLC 的主要特点、功能和性能指标	(147)
6.4.2 PLC 的应用领域	(149)
6.4.3 PLC 的基本结构和工作原理	(150)
6.4.4 PLC 的软件系统	(153)
6.5 网络控制技术	(162)
6.5.1 网络控制技术的发展历程	(162)
6.5.2 RS-232/RS-422/RS-485 串行通信技术	(164)
6.5.3 FF 现场总线技术	(169)
6.5.4 CAN 总线技术	(172)
6.5.5 PROFIBUS 现场总线	(174)
6.5.6 工业以太网	(179)
第7章 舞台设备控制系统的设计及应用	(187)
7.1 舞台设备控制系统的性能要求和指标	(187)
7.1.1 舞台设备控制系统的性能要求	(187)
7.1.2 舞台设备控制系统的性能指标	(188)
7.2 舞台机械设备控制系统的设计要求	(189)
7.2.1 舞台机械设备控制系统的设计规划	(189)
7.2.2 舞台设备控制系统的设计步骤	(191)
7.3 传感器和保护电路	(195)
7.3.1 各种传感器	(195)
7.3.2 各种保护	(195)
7.3.3 安全性和可靠性	(197)
7.4 某剧场舞台吊杆控制系统实例	(198)
7.4.1 吊杆控制系统概述	(198)
7.4.2 下位机与变频器	(199)
7.4.3 控制台与下位机的通信	(204)
7.4.4 舞台吊杆控制系统的软件设计	(206)
7.4.5 吊杆控制系统的安全性	(214)
7.5 某戏剧场鼓筒式转台液压控制系统实例	(215)
7.5.1 驱动执行器	(215)
7.5.2 控制回路的组成	(216)
7.5.3 控制回路的操作程序	(217)
7.5.4 电气元件	(219)
主要参考文献	(221)

舞台机械设备概述

1.1 舞台机械的功能和要求

这些机械的运动方式分为垂直运动、水平运动、旋转运动以及它们的组合形式。

对这类舞台机械的各种性能指标要求较高,如速度、载荷、定位精度、噪声、运

行中的稳定性等指标都很严格。从目前剧场中布景、道具的使用情况来看,布景的设置由轻便、静止转向多机构、多动作、更加真实具体,因此,要求迁换布景、道具的设备的载荷和变换速度有增大的趋势。

由于现代演出的效果要求越来越高、表现的手段越来越丰富,因此,导演和舞美设计人员希望能利用舞台机械为演出服务,对舞台机械的性能指标要求也相应提高。比如利用飞行装置、升降台、演员升降机等实现演出中演员的上天入地和反常规的上下场;利用车台的运动实现行船、车的效果;利用升降台的不断上升和下降以及台面的倾斜来表现地震的场面,等等。

2. 辅助机械类

还有一些舞台机械是为了根据演出剧情、剧种、演出规模的要求,改变舞台和/或观众厅的形式、形状、容积、混响时间,调整观众席的座位等。如利用假台口调整舞台台口的大小,以适合演出的需要;在歌剧院内举办音乐会,就需要实现搭设声反射罩,使舞台向音乐厅模式转变,以提供更好的声学环境;有的多功能剧场,根据不同的使用要求,在会议模式、T形舞台模式、中心舞台模式、尽端式舞台模式之间转换,需要通过舞台机械来实现。由于这些舞台机械一般在演出前就已经调整好了,在演出时不动,所以对它们的性能指标就要适中一些。这些舞台机械包括假台口、灯光吊笼、声反射罩、升降乐池等。

3. 安全机械类

另有一类舞台机械是为了保障舞台和演出时的安全需要而设置的,最典型的是台口防火大幕,各种防护网、安全门等。

综上所述,舞台机械的主要功能可以概括如下:

- ①关幕或灯光变暗时快速更换布景;
- ②参与表演活动:在观众视线下运送演员、更换布景以及制造特殊气氛等;
- ③按演出剧种和演出方式的要求,改变舞台的形式,如由镜框式舞台变为伸出式舞台等;
- ④按剧情和演出方式的需要改变舞台及观众厅的形状;
- ⑤为演出提供技术保障,如声反射罩、隔音幕等;
- ⑥为演出提供安全保障,如各种安全装置、防护网、防火幕等;
- ⑦为演出提供后勤保障,如硬景升降台、软景升降机等。

1.1.2 对舞台机械的要求

鉴于舞台机械使用于剧场这个特殊的场合,同其他机械设备不同,是为了满足舞台演出需要,为表演服务的机械,它不仅能为布景、照明提供条件,还要合乎演出的习惯、节奏,实现各种动作和演出特技,为观众提供视觉、音响等方面的条件。因此,对剧场中舞台机械提出以下的要求:

1. 安全可靠

舞台机械的安全性能是舞台机械设计的首要指标,所有的舞台机械,不论是演出

机械还是辅助机械，都必须是绝对安全的，安全性指标主要体现在确保人身安全、设备安全和电气安全等方面。所有的舞台机械应有足够的安全系数，必须配备应有的安全装置，如有防剪切、防撞、行程限位装置，过载、超速保护、联锁等。控制系统应冗余设计，操作系统应有应急处理装置。

2. 适宜的速度性能

舞台机械的主要任务是迁换布景和参与演出，其速度指标应能满足演出和换景的需要。有时舞台机械也用于载人，因此，其速度选择时也应考虑演员在机械上的站立或进出舞台机械时的舒适和平稳。在演出中，导演和舞美设计人员往往希望换景的时间越短越好，在某些场合还有一些特技效果的需要，使得舞台机械的速度有加快的趋势。另外，在确定舞台机械速度指标时，应考虑启动时的加速度以及停止时的减速度，避免过大的加速度产生的惯性力引起的冲击。最好能做成速度可调，以实现缓起缓停。

3. 合理的载荷

舞台机械在换景和演出时通常都需要承载布景、道具、演员等，需要承受一定的载荷。从目前演出的要求来看，布景和道具有大型化的趋势，因此要求舞台机械的承载能力也提高，反过来，承载能力提高，要求舞台机械驱动装置的功率等也相应提高，噪声控制等问题的难度也加大。因此，在满足使用要求时选择一个经济、合理的载荷指标也是在舞台机械设计时应该考虑的。

4. 操作程序设置的灵活性

从剧场经营管理角度出发，根据目前我国剧场的经营情况，舞台机械要适应不同剧目的轮换演出、同一剧目的定（长）期演出以及外来剧团的巡回演出等不同要求，同一台设备针对不同剧目以及不同场次要采用不同的运动模式和不同的运动参数。此外，舞台机械还要能适应剧目排练和装台的需要，能迅速修改运动模式和运动参数并能多次重复运行，因此，操作程序设置的灵活性和重复性是衡量舞台机械总体水平的一个重要标志之一。

要保证这一指标的实现，机械本身必须具备一定的运动精度，包括速度控制精度和位置控制精度，以达到通常规定的重复定位精度和同步运动精度。这个精度值相对于速度、载荷和行程是独立的，不随它们变化。同时操作控制系统还必须具备多台同类或不同设备单独或编编运行的能力。

5. 简单快捷的操作控制系统

操作控制系统的功能要求、装备水平和操作方式随剧场的要求和习惯的不同而不同，但稳定性、安全性和满足剧场装台、排练和演出需要这一原则是不变的。采用计算机控制系统可以分散控制或集中控制，能对受控设备的运动参数进行实时控制，以实现运动的重现性。控制系统应能预选设备或设备组、预选运动参数，并有记忆、手动介入、现场修改和插入、图形及参数显示和故障自诊断功能。

6. 低噪声

作为剧场内为演出和换景设置的舞台机械，对其低噪声的要求是不需多言的，从

维修简单，对操作人员要求低，易耗品和备品备件容易获得。

1.2.1 舞台的类别

1. 镜框式舞台

2. 开放式舞台

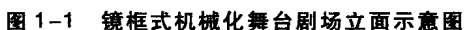
3. 舞台的形式

①**固定舞台**：一般是指舞台台面不能变动，且没有台下机械的固定舞台。

③下空式舞台：是指舞台台面由众多分块拼装，每一块都可根据需要改装或移去，装备固定式升降台等演出机械，台下的空间可用来灵活安装演出所需的装置或移动舞台机械。

以镜框式机械化舞台剧场为例（见图1-1、图1-2、图1-3），常规的台上主要设备有：吊杆、防火幕、隔音幕、假台口、大幕机、二幕机、单点吊机、灯光渡桥、灯光吊笼和声反射罩等，其中吊杆是台上的主要设备，常常设置有几十到几百根不等；典型的台下主要设备有：歌剧院一般采取主舞台设升降台，侧舞台设车台，后舞台设车载薄型转台；话剧院一般采用鼓筒形转台；大部分舞台形式都会配置活动乐池。

吊杆以及升降台、转台、车台等设备可以分别通过升降、旋转、平移实现大型布景的快速转换；飞行器、单点吊机、升降台、演员升降车等设备可实现演员的上天入地、反常规的上下场和道具在舞台上的运动；车台、转台也可以结合剧情运行参与表演；升降台可以改变舞台造型，假台口可改变镜框式台口的尺寸；有的舞台机械是为灯光、建声、防火安全、隔声等功能需要而设置的。



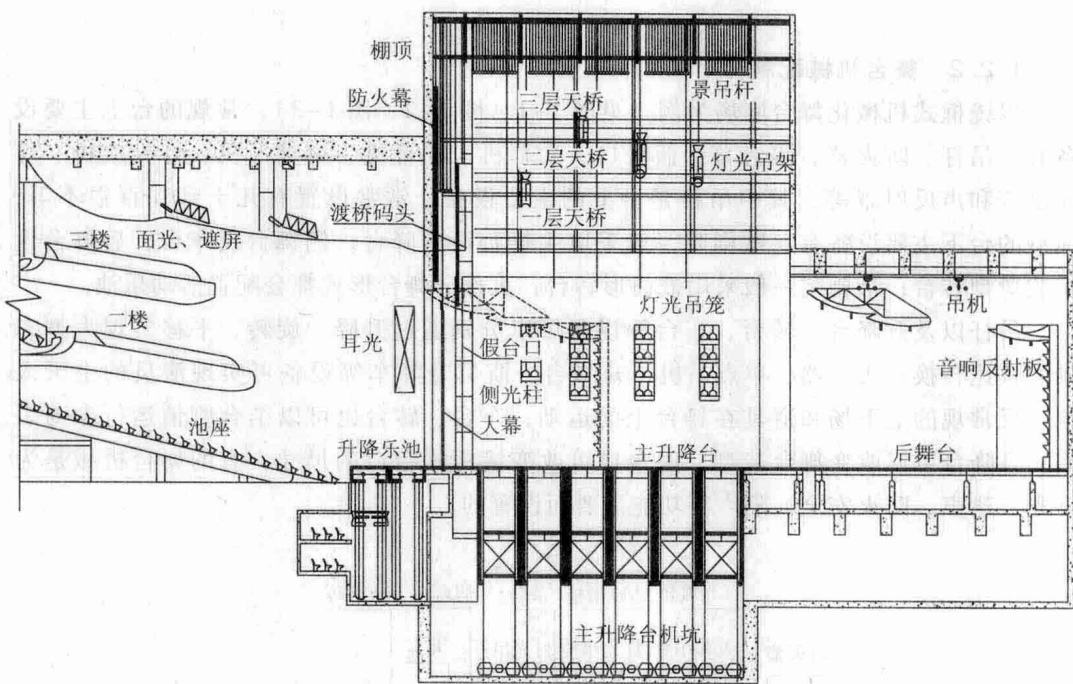


图 1-2 现代典型剧场及舞台剖面示意图

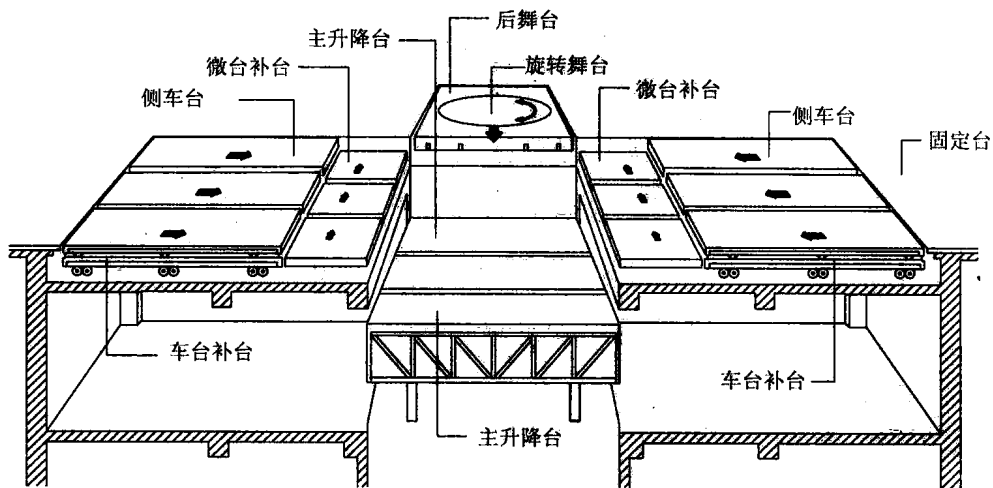


图 1-3 机械化舞台示意图

1.2.3 舞台机械的性能指标要求

舞台机械的主要性能指标, 包括运行速度、提升载荷、升降载荷、定位和同步精度、噪声控制指标等。

1. 运行速度

①车台速度: $0.3\text{m/s} \rightarrow 0.8\text{m/s} \rightarrow 1.0\text{m/s}$;

②升降台速度: $0.1\text{m/s} \rightarrow 0.15\text{m/s} \rightarrow 0.3\text{m/s} \rightarrow 0.5\text{m/s} \rightarrow 0.7\text{m/s}$;

③电动吊杆速度：0.35m/s→0.7m/s→1.2m/s→1.5m/s→1.8m/s→2.0m/s；

④大幕机提升、对开速度：1.0m/s→1.5m/s→2.0m/s。

(注：速度指标的确定与行程有关，换景时间应控制在30秒之内。)

2. 提升载荷 (净载荷)

①电动吊杆：400kg→500kg→750kg→1000kg；

②单点吊机：150kg→250kg→500kg。

3. 升降载荷 (净载荷)

升降台的静载荷：400kg/m²→500kg/m²→750kg/m²。

(注：不包括升降台设备构件自重的有效载荷。)

4. 定位和同步精度

①升降台定位精度：±0.5mm，升降台同步精度：±1mm；

②车台定位精度：±1mm，车台同步精度：±2mm；

③电动吊杆定位精度：±1mm，电动吊杆同步精度：±2mm；

④单点吊机定位精度：±1mm，单点吊机同步精度：±2mm；

⑤乐池升降台定位精度：±1mm，乐池升降台同步精度：±2mm。

(注：定位精度及同步精度，是指设备在额定速度、额定荷载下的定位精度，及有同步运动要求的设备的同步精度。)

5. 噪声控制指标

舞台机械设备的噪声指标要同时满足两类测试指标：一类是机旁的辐射噪声或经过降噪隔噪处理后的控制噪声；另一类是观众厅敏感点(线)处的综合排放噪音噪声。

文化部、国家建设部颁布的《剧场建筑设计规范》中对噪声指标有过规定，但目前争议较大。

6. 木地板台缝

舞台设备木地板安装完工后各部分水平间隙：

①升降台之间、升降台与固定地板之间的间隙：≤8mm，但>3mm；

②车台之间的间隙、车台与辅助升降台之间的间隙、车台与固定地板之间的间隙：≤12mm，但>5mm；

③车载转台运动时和运动结束后与主升降台或车台之间的间隙：≤10mm，但>5mm，与固定地板或辅助升降台之间的间隙：≤8mm，但>3mm；

④车载转台内部转动与不动部分的间隙：≤10mm，但>5mm；

⑤鼓筒式转台与固定地板之间的间隙：≤10mm，但>5mm；

⑥鼓筒式转台内的升降台、升降块之间的间隙：≤8mm，但>3mm。

1.2.4 舞台设备控制系统的功能要求

①控制系统有主控制系统、智能型手动控制系统、紧急控制系统等，都要求具有良好的操作界面和简便的操作方法，以满足装台、排练、演出对舞台机械设备的控制要求。

②主控制系统具有单体设备控制、设备连锁、设备状态监视、预选择设备、设定运动参数、编组运行、场景排序、故障诊断、系统维护等功能。

③各受控舞台机械设备之间具有安全、可靠的连锁，控制系统能判断输入的参数

是否可执行,以保证相关设备之间运行时的安全。当有紧急情况发生或运动误差超过允许范围时,能采取有效的措施。

④操作台具有显示、模拟及监控功能,关机和停电时有数据保护、数据归档功能,还有故障监视、远程诊断等功能。

⑤控制系统集成化、网络化,集中控制与分散控制结合,除主控台和在设备附近设壁挂式控制盘外,舞台工作区域可设多个便携式操作盘,这些操作盘连接在控制系统网络上,人机界面与主操作台一致,可实现全功能操作,可通过软件的授权或密码设定其操作范围。

1.3 舞台机械常用的传动方式

舞台机械主要实现的运动是升降、平移、旋转等,同其他机械一样,它也需要动力源,通过原动机来进行能量转换,实现舞台机械的启动、停止以及其他的动作,满足使用的要求。原动机的类型有很多种,在舞台机械中常见的驱动方式有液压驱动和电力拖动。

当舞台机械采用电力拖动或液压驱动时,相应地要有与之相适应的机电传动系统或液压传动系统。舞台机械的种类繁多,其工作原理、结构和传动方式各异,有关具体的舞台机械本书不作详细的介绍,只将舞台机械常用的传动方式作一介绍。

1.3.1 台上机械的主要传动方式

台上机械一般包括以下几种机械设备:防火幕、大幕机、假台口、银幕架、幕类吊杆;二道幕机、灯光吊杆(渡桥);景物吊杆、侧灯光吊笼(吊杆)等,还包括分体式或整体式的声反射罩(板)、专用单点吊机等。

这些机械设备绝大多为悬挂设备,主要采用电力拖动方式,钢丝绳提升是台上机械的特征。

1. 缠绕式钢丝绳提升方式

缠绕式钢丝绳提升方式,包括大直径卷筒钢丝绳单层缠绕和小直径卷筒钢丝绳多层缠绕两种方式。吊杆、吊笼、单点吊机、声反射罩(板)、防火幕等主要采用缠绕式钢丝绳提升方式。

2. 摩擦式(曳引式)钢丝绳提升方式

假台口上片、银幕架及其他自身重量超过1T的悬吊设备(不含防火幕),主要采用摩擦式(曳引式)钢丝绳提升方式。

此外,吊杆系统也有采用液压驱动方式的,利用液压缸的伸缩运动实现提升。

1.3.2 台下机械的主要传动方式

台下机械一般包括以下几种机械设备:主舞台升降台、辅助升降台、乐池升降台、观众厅升降台、车台补偿台、演员活门升降机、软景库升降台和车台、转台等。

这些机械设备采用电力拖动方式或液压驱动方式,实现推、拉、升、降、转等台下机械各种功能。

2. 钢丝绳牵引方式

3. 齿轮齿条驱动方式

4. 丝杠驱动方式

5. 大螺旋驱动方式

6. 刚性链条驱动方式

7. 剪叉机构驱动方式

8. 自驱行轮驱动方式

9. 销齿驱动方式

10. 齿轮驱动方式

11. 液压缸驱动方式

还有一些其他的驱动方式，如摩擦轮驱动方式等。