

基于人机工程学的机电辅助起坐轮椅设计

靳显赫

中国农业大学 工学院 北京 100083

摘要: 本文基于人机工程学原理,对机电辅助起坐轮椅进行了设计研究。通过需求分析,确定了轮椅的功能和性能要求。针对机电升降机构、控制系统、电源系统和安全保护机制进行了详细设计,确保轮椅具备升降、控制和供电功能,并保障使用者的安全。使用 SolidWorks 进行轮椅建模,根据需求选用适当的材料和尺寸,通过对齿轮系统和轴承寿命计算和分析,确认了齿根弯曲强度和轴承寿命符合设计要求。最后,根据研究结果得出结论,该基于人机工程学的机电辅助起坐轮椅设计能够满足用户需求,并具有良好的操作性和安全性。

关键词: 人机工程学;机电辅助起坐轮椅;机电升降;SolidWorks 建模

Design of Electrically Assisted Sit-to-Stand Wheelchair based on Ergonomics

JIN Xianhe

College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

Abstract: This article is based on the principles of ergonomics and conducts research on the design of electromechanical assisted lift up wheelchairs. Through requirement analysis, the functional and performance requirements of the wheelchair were determined. A detailed design has been carried out for the electromechanical lifting mechanism, control system, power supply system, and safety protection mechanism to ensure that the wheelchair has lifting, control, and power supply functions, and to ensure the safety of users. Using SolidWorks for wheelchair modeling, appropriate materials and sizes were selected according to requirements. Through calculation and analysis of the gear system and bearing life, it was confirmed that the tooth root bending strength and bearing life meet the design requirements. Finally, based on the research results, it is concluded that the electromechanical assisted wheelchair design based on ergonomics can meet user needs and has good operability and safety.

Keywords: ergonomics, electrically assisted sit-to-stand wheelchair, electromechanical lifting, SolidWorks modeling

机电辅助起坐轮椅设计是基于人机工程学原理的一项重要研究领域。它旨在通过结合机械、电子和计算机技术,为有行动障碍的人群提供更好的移动和康复解决方案。该设计旨在改善传统轮椅的不足之处,使用户能够轻松实现座位到站立的转换,从而增加他们的独立性、生活质量和社交参与度。

刘悦^[1]对关注老年人护理用多功能轮椅的研制,提供了在老年人护理方面的具体设计和实施方案;刘鑫^[2]研究致力于设计一种三星轮多功能轮椅,提供了具体的设计和实施方案;方英健^[3]等研究提出了一种可拆卸多功能自动轮椅床的设计,通过可拆卸的设计,提供了更便利的使用方式;李欣疏^[4]等研究关注自动多功能可调节老轮椅的设计,提供了在自动化和多功能方面的设计和实施方案;王帅帅^[5]等研究关注多功能轮椅的设计与开发,提供了具体的设计和实施方案;Keangin P.^[6]等研究通过三维有限元模型的结构分析,设计了适用于患者的多功能轮椅。这些研究的成果包括了各种创新的设计和控制系统,旨在提供更高的安全性、稳定性和操作便利性。然而,要实现一款功能完善、符合人体工效学要求的起坐轮椅仍然存在一些挑战。

1 基于人机工程学的机电辅助起坐轮椅需求分析

辅助起坐轮椅设计需要具备可靠的机电辅助起坐功能,能够帮助用户从坐姿到站立姿势的转换,确保用户能够平稳、安全地完成起立动作。其次,轮椅的设计应考虑用户的舒适性,座椅和靠背应具备适当的软硬度、透气性和支撑性^[7],以提供良好的坐姿支撑和舒适感。轮椅还应具备可调性,使用户能够根据个人需求和舒适度调节座椅高度、扶手高度和座椅与靠背的倾角。此外,安全性^[8]、操作简便性^[9]、耐久性^[10]和可维护性^[11]也是基于人机工程学的机电辅助起坐轮椅设计中需要考虑的重要需求,以确保用户的安全、便利的操作、长时间的可靠使用以及简便的维护和维修。通过满足这些需求,基于人机工程学的机电辅助起坐轮椅能够提供符合用户需求的舒适、安全、易用和可靠的起坐体验。

2 基于人机工程学的机电辅助起坐轮椅设计

2.1 机电升降机构

机电辅助起坐轮椅的机电升降系统应该设计稳定且可靠的升降机构。选择电动线性执行器或液压升降系统,以实现座椅和背部支撑的同步升降。考虑机构的刚度和稳定性,确保在起坐过程中能够提供稳定且平滑的运动。同时,根据人体工程学原理,设计座椅和背部支撑的几何形状和曲线,以提供舒适的支撑和适宜的坐姿。

其次,设计智能控制系统。通过集成传感器和编码器,实时监测座椅和背部支撑的位置和姿态,并将数据传输给控制系统^[12]。基于人机工程学的原则,设计智能算法,实现准确的位置控制和动作协调^[13]。控制系统应具备手动、自动和预设模式,以满足用户的不同需求和偏好^[14],其设计概览图如下图1所示。



图1 轮椅设计概览图

2.2 控制系统

机电辅助起坐轮椅的控制系统还应该设计多功能且直观的用户界面。采用触摸屏或按钮控制面板作为用户界面,显示轮椅的状态和可调参数,包括座椅高度、角度、背部支撑等。界面应具备易于理解和操作的图标和文字,并提供明确的操作指示^[15]。通过用户界面,用户可以方便地调整轮椅的设置,以适应其个人需求。

采用智能控制算法实现精确的位置控制和动作协调。通过传感器和编码器实时监测轮椅的位置和姿态,并将数据反馈给控制系统^[16]。基于人机工程学的原则,设计控制算法,以实现平稳的起坐动作和精确的座椅调节。控制算法应考虑用户的舒适度和安全性,避免不必要的晃动和过度调节。

为了满足用户的不同需求,设计手动模式允许用户手动调节座椅高度和角度,提供个性化的调整选项。自动模式可以根据用户的身体姿态和动作自动调整座椅的位置和角度,提供智能化的辅助起坐功能。预设模式允许用户预先设定喜好的座椅设置,并可以一键恢复到预设状态。不同的控制模式可以根据用户的需求和习惯进行切换,以提供灵活和个性化的控制体验。

2.3 电源系统

选择适合轮椅需求的电池类型和容量对机电辅助起坐轮椅至关重要。锂离子电池由于其具有高能量密度、长寿命和轻量化的特点,因此设计选用锂离子电池作为电源。其次,电源管理电路和能量转换器,采用高效率的DC-DC转换器,将电池输出的直流电转换为驱动电机和其他电子设备所需的适当电压和电流。通过合理设计和选择电源管理电路,实现对电池充放电的控制和监测,以确保电池的安全和高效工作。在充电系统的设计方面,需要提供方便快捷的充电方式和可拆卸的电池组和充电器。充电接口应符合标准规范,方便用户进行充电。充电器应具备快速充电功能,同时充电过程中要有恰当的保护措施,包括过流、过温和短路保护,以确保充电安全。

此外,安全性也是电源系统设计的重点之一。引入电池管理系

统(BMS),监测电池状态,实现均衡充放电,以提高电池的安全性和寿命。同时,在设计电源管理电路和能量转换器时,考虑过载保护、过温保护和短路保护等安全机制,以防止意外事故发生。

2.4 安全保护机制

基于人机工程学的机电辅助起坐轮椅的安全保护机制设计旨在确保用户在使用过程中的安全性和轮椅的可靠性,其安全保护机制应该从过载保护、限位保护、紧急停止保护、系统自检和故障诊断等机制。以下是具体的安全保护机制设计与实现方案:

(1) 过载保护:引入过载保护机制,通过传感器实时监测轮椅的负荷情况。当负荷超过预设范围时,自动停止升降机构的运动,避免超负荷造成损坏或危险。该保护机制可以通过设定合适的负荷阈值和响应速度来实现。

(2) 限位保护:设计限位开关或传感器来限制轮椅升降机构的运动范围。通过在升降轨道的上下端设置限位开关,可以确保座椅的高度调节在安全范围内。当座椅升降到达限位位置时,限位开关会触发停止信号,从而停止升降机构的运动,防止过度升降造成不安全情况。

(3) 紧急停止:设置紧急停止按钮,以便用户在紧急情况下能够立即停止轮椅的运动。紧急停止按钮应布置在用户易于触及的位置,并具备明显的标识和容易识别的红色。当用户按下紧急停止按钮时,控制系统应立即停止所有电机的运动,确保轮椅立即停止并保护用户的安全。

(4) 系统自检和故障诊断:设计自检机制和故障诊断系统,定期检测轮椅各个部件和传感器的状态。通过自动检测和诊断,及时发现和解决潜在的故障或问题,确保轮椅的正常运行和安全性。

3 SolidWorks 建模

3.1 轮椅的各部分建模和装配

在确定多功能轮椅的结构和尺寸后,使用SolidWorks软件的零件模块进行了轮椅的机电系统辅助起坐机构、可翻转扶手机构和可收放脚踏板机构的零部件建模。通过建立这些零部件,可以在后续的结构改进过程中,通过修改相应零部件的尺寸参数来实现结构的修改。这样的设计方法可以实现高效且快捷的改进过程,为多功能轮椅的功能和性能的提升提供了便利,轮椅的前侧视图、后侧视图、俯视图和后视图如下图2-图5所示。



图2 轮椅建模前侧视图



图3 轮椅建模后侧视图



图4 轮椅建模俯视图



图5 轮椅建模后视图

3.2 轮椅各部分零件视图

基于人机工程学的机电辅助起坐轮椅设计中，对轮椅各部分零件进行爆炸视图的设计，以展示各部件之间的组装关系和细节构造。通过爆炸视图，可以清晰地展示轮椅各部分零件的相对位置和组装方式，以及它们之间的连接和作用方式。其包括升降电机、螺杆传动装置、升降导轨等零件。轮椅的控制系统包括控制器、按键、连接线等零件。电源系统包括电池、电源线、充电插口等零件。安全保护机制包括安全传感器、急停开关、安全锁等零件。轮椅的爆炸视图如下图6所示。

通过对轮椅各部分零件的爆炸视图设计，可以清晰地展示它们之间的组装方式和作用关系，为轮椅的制造和维护提供指导。同时，这样的设计也方便用户对轮椅进行维修和更换零件，提高了轮椅的可维护性和可操作性。



图6 轮椅零件爆炸图

4 材质选择与产品设计

4.1 材质选择

基于人机工程学的机电辅助起坐轮椅的具体材质选择应综合考虑多个因素，包括机械性能、耐用性、舒适性、清洁性、安全性和可持续性等。

(1) 框架：轮椅的框架承载着整个结构的重量和力量，因此需要选择具有足够强度和刚度的材料。由于铝合金具有良好的强度和耐腐蚀性，同时相对轻量化，适合制造轻便型轮椅，因此采用铝合金作为框架。

(2) 座椅和背部支撑：座椅和背部支撑的材质应该具备舒适性、透气性和耐用性。聚氨酯泡沫材料提供舒适的坐感和支撑力，同时具备透气性和耐用性，因此采用聚氨酯泡沫作为座椅和背部支撑。

(3) 扶手和脚踏板：扶手和脚踏板需要具备足够的强度和稳定性，以提供稳定的支撑和抓握。塑料材料可以通过注塑成型实现多样化的设计，同时具备轻量化和成本效益，因此采用塑料材料作为扶手和脚踏板。

(4) 轮胎：轮胎是轮椅与地面接触的部分，需要具备耐磨性和抓地力。橡胶轮胎具有良好的耐磨性和抓地力，适用于室内和室外的各种地面，因此采用橡胶轮胎。

(5) 调整装置：轮椅的调整装置需要选择具备足够强度和耐久性的材料，以确保调整装置的稳定性和可靠性。工程塑料具备足够的强度和耐久性，并具有成本效益，因此采用工程塑料作为调整装置材料。

在材质选择过程中，还应该遵循相关的标准和规定，确保所选材料符合产品的安全性和可靠性要求。根据实际情况和特定的设计需求，也可以进行材料的测试和验证，以确保其满足轮椅的功能和性能要求。

4.2 产品设计

4.2.1 轮椅各部分尺寸

因此，在该机电辅助起坐轮椅中，底部安装有电动机。电动机

通过驱动滑块向前推动, 而靠背、坐垫和脚踏板之间存在联动杆。当滑块向前推动时, 靠背放平并使坐垫向前移动, 同时脚踏板上升。而当推杆下降时, 靠背立直并使坐垫前倾, 同时脚踏板下降。这三个元件的联动设计使得使用者在调整姿势时更加舒适, 并能够实现从躺下到坐立以及站起的转换。此外, 该轮椅还提供可调节的扶手, 以便在躺下、坐起和站立时使用者能够得到手部支撑的舒适度。起坐控制器位于左侧扶手上, 具备躺下、坐起和站立三个档位的调节功能。通过选择不同的档位, 控制器会指示电动机向前或向后驱动滑块。

运用人机工程学原理进行轮椅尺寸设计, 可提升轮椅在安全性、舒适性和效率方面的表现。为确保轮椅与人体坐姿相协调, 参考我国成年人尺寸国家标准, 以此为基础进行轮椅座椅几何尺寸的设计。这种设计方法旨在确保轮椅与使用者的身体能够有效地协同作用, 具体尺寸数值如下表 1 所示。

表 1 轮椅各部分尺寸数值

参数	尺寸/mm
总长	1150
总高	1100
总宽	700
座椅高度	600-800
座椅宽度	620
座椅深度	480
靠背高度	480
靠背宽度	590
扶手高度	280-320
座椅与靠背倾角	90-180

4.2.2 电机选择

根据前文内容, 可以计算机电辅助起坐轮椅所需的功率。在负载重量为 $W = 100 \text{ kg}$, 升降速度为 $V = 0.2 \text{ m/s}$ 。根据力的计算公式 $F = m \times g$, 其中质量 $m = 100 \text{ kg}$, 重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 可以得到力 $F = 100 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 = 980 \text{ N}$ 。根据功率的计算公式 $P = F \times V$, 将计算得到的力和速度代入, 可以得到功率 $P = 980 \text{ N} \times 0.2 \text{ m/s} = 196 \text{ W}$ 。

根据以上计算, 机电辅助起坐轮椅所需的功率为 196 瓦特。故选择直流减速电机, 型号为 XD37GB555 系列永磁直流减速电机由于具有体积小、低噪音、扭力大、调速范围宽等优点, 因此选用改电机。

4.2.3 齿轮设计

采用不完全直齿圆柱齿轮, 转速 $n=20 \text{ r/min}$ 。扭矩 $T=62 \text{ N} \cdot \text{mm}$, 使用寿命 10 每天预计使用 8 h, 承受中等冲击。基本参数见下表 2。

表 2 齿轮参数表

类型	不完全齿轮	齿条
模数/m	3	3
齿数/z	4	16
精度等级	8 级	8 级
材料	45 钢调质	45 钢常化
硬度	240HBS	240HBS

齿根弯曲强度的校验可以使用以下公式进行计算:

$$F_b \leq F_{b_lim} \quad (1)$$

其中, F_b 为齿根弯曲应力, 计算公式为:

$$F_b = \left(Y * Z * K_w * K_t * \frac{W_t * m * j}{b} \right) * \left(\frac{1}{d} \right)^2 \quad (2)$$

F_{b_lim} 为允许的齿根弯曲应力上限, 根据设计要求和标准进行确定, 其中 Z 为齿数, 齿轮其他各参数的具体含义如下表 3:

表 3 齿轮相关参数

参数	Y	J	K_w	d
含义	齿根弯曲强度系数	齿轮弯曲振动系数	载荷分布系数	齿轮分度圆直径
参数	K_t	W_t	m	b
含义	温度修正系数	齿面载荷	模数	齿宽

根据齿轮参数表中给定的数据, 确定具体的数值, 其中 Z 取 4, m 取 3, b 取 8mm, d 取 40mm。根据设计要求和实际情况, 选择相应的影响系数 (Y)、载荷分布系数 (K_w) 和温度修正系数 (K_t) 的数值, 设置 $Y = 1$, K_w 为 1.2, K_t 为 0.9。根据实际载荷情况, 确定齿面载荷 (W_t) 的值 W_t 为 500 N。根据具体齿轮形状和尺寸, 选择齿轮弯曲振动系数 (J) 的数值 J 为 3.4。将上述数值代入齿根弯曲应力公式进行计算, 得到齿根弯曲应力 (F_b)。

$$\begin{aligned} F_b &= (Y * Z * K_w * K_t * (W_t * m * J) / b) * (1/d)^2 \\ &= (1 * 4 * 1.2 * 0.9 * (500 * 3 * 3.4) / 8) * (1/40)^2 \\ &\approx 29.7 \text{ MPa} \end{aligned}$$

根据设计要求和标准确定允许的齿根弯曲应力上限 F_{b_lim} 为 40 MPa。将计算得到的齿根弯曲应力 (F_b) 与允许的齿根弯曲应力上限 (F_{b_lim}) 进行比较。

$$29.7 \text{ MPa} \leq 40 \text{ MPa}$$

结果表明, 计算得到的齿根弯曲应力 (F_b) 小于等于允许的齿根弯曲应力上限 (F_{b_lim}), 符合要求。

4.2.4 轴承的寿命校验

选择型号 6000 的深沟球轴承, 其内径 d 为 10 毫米, 外径 D 为 26 毫米, 宽度 W 为 8 毫米, 动负荷 C 为 4.55 千牛顿 (kN), 极限转速为每分钟 28000 转 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$), 重量为每件 0.019 千克 ($\text{kg} \cdot \text{pc}^{-1}$), 轮椅的使用寿命为 11 年。

根据轴承设计原理, 深沟球轴承的当量动载荷计算公式如下:

$$C_{eq} = C_a + C_b + C_c + C_d$$

其中, C_{eq} 为深沟球轴承的当量动载荷, C_a 为基本额定动载荷, C_b 为成对轴承的额定动载荷增量, C_c 为温度修正系数, C_d 为转速修正系数。

对于成年人体重为 1000N 的情况, 座椅安装 12 个滚轴, 每根轴安装 2 个轴承的情况, 则每个滚轴的受力为 $1000 \text{ N} / 12 \text{ 根} = 83.3 \text{ N}$ 。每个轴承的受力为 $83.3 \text{ N} / 2 \text{ 个} = 41.7 \text{ N}$ 。

根据深沟球轴承的设计参数和运转条件, 可以计算基本额定动载荷。基本额定动载荷的计算公式如下:

$$C_a = f_p * G * d / 3$$

其中, f_p 为载荷系数, G 为剪切弹性模量, d 为轴承内径。根据提供的信息, f_p 取为 1.2, G 取值为 $8.3 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, d 取值为 10mm, 因此可以计算基本额定动载荷:

$$C_a = 1.2 * 8.3 * 10^4 * 10 / 3 = 3316N。$$

根据深沟球轴承的设计参数和运转条件,可以计算成对轴承的额定动载荷增量。成对轴承的额定动载荷增量的计算公式如下:

$$C_b = f_p * G * d * Z / 3$$

其中,Z为成对轴承的数量为2个。因此可以计算成对轴承的额定动载荷增量:

$$C_b = 1.2 * 8.3 * 10^4 * 10 * 2 / 3 = 6653N。$$

根据深沟球轴承的设计参数和运转条件,可以计算温度修正系数和转速修正系数。本文中,温度修正系数和转速修正系数均为1。

将上述计算结果代入当量动载荷的计算公式中,可得到深沟球轴承的当量动载荷:

$$C_{eq} = C_a + C_b + C_c + C_d = 3316 + 6653 + 1 + 1 = 9969N。$$

则轴承的寿命可以通过以下公式求得:

$$L_h = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{f_t * C}{f_p * C_{eq}} \right) = 18.3 \text{ 年} > 11 \text{ 年}$$

估轴承寿命大于轮椅寿命,满足设计要求。

5 结论

本论文基于人机工程学的机电辅助起坐轮椅设计通过合理的结构和尺寸设计、材质选择、控制系统和电源系统的设计,以及弯曲强度校核等步骤,实现了满足老年人和肢体残障人士需求的多功能轮椅。该轮椅具有辅助起坐、调节功能,可以提高用户的生活质量和便利性。然而,还需要进一步的实验和测试验证,以确保轮椅的性能和安全性能满足实际应用需求。

参考文献:

- [1]刘悦. 老年人护理用多功能轮椅的研制[J]. 医学理论与实践,2022,35(19):3419-3420+3407.
- [2]刘鑫,宫逸文,赖文博,陶程,高义. 三星轮多功能轮椅设计[J]. 起重运输机械,2022,(08):30-34.
- [3]方英健,刘子丰,宿梓璇,郑志浩. 一种可拆卸多功能自动轮椅床[J]. 物联网技术,2021,11(12):6-7.
- [4]李欣疏,徐树平,王琛玮,任祉亦,李春阳. 自动多功能可调式便老轮椅的设计[J]. 吉林化工学院学报,2021,38(07):65-67+73.
- [5]王帅帅,王海霞,赵成龙. 多功能轮椅的设计与开发[J]. 山东化工,2021,50(09):171-172+177.
- [6]Keangin P.,Chawengwanicha P.,Wimala N.,Nakbanpotkul T.. Structural analysis of three-dimensional finite element model to design multifunction wheelchair for patients[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2021,1137(1).
- [7]叶榕伟,方俊焯,高川粤,吴晓丹. 多功能护理床与轮椅对接技术研究[J]. 科技风,2021,(11):10-11.
- [8]邓佳慧,梅莹莹,夏婷婷,金晓慧,钱明凡,蒋心悦,卫倩雯. 多功能轮椅设计[J]. 电脑知识与技术,2021,17(10):233-234.
- [9]Liyao Rong. Design Innovation Driven by Artificial Intelligence AI Multifunctional Wheelchair Design Based on the Needs of Patients with ALS[J]. Journal of Physics: Conference Series,2021,1880(1).
- [10]Ning Meng, Yu Ke, Zhang Chuangzhong, Wu Zhi, Wang Yanquan.

Wheelchair design with variable posture adjustment and obstacle-overcoming ability[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering,2021,43(4).

- [11]Ginting Rosnani,Ishak Aulia,Tefila Purba Agnes Aneni. Design of Multifunction Wheelchair with Nigel Cross Method[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2020,1003(1).
- [12]Ginting Rosnani,Ishak Aulia,Diyana Etaniya Lani. Product Design of a Multifunctional Wheelchair Using Nigel Cross Approach[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2020,1003(1).
- [13]李素姣,朱文杰,孟巧玲,喻洪流. 基于轮椅的多姿态下肢康复训练系统的设计与仿真模拟分析[J]. 中国康复医学杂志,2020,35(11):1351-1355.
- [14]黄聂江,张杰,聂庆庆,凌爽,田远芳,陆艳. Flexup 双轮爬坡站立平躺多功能轮椅的外观设计[J]. 计算机产品与流通,2020,(09):262-263+268.
- [15]唐宏. 多功能轮椅结构设计与应用[J]. 现代制造技术与装备,2020,(06):58-59.
- [16]李家栋,邹存芝,孙园奥,邓小兵,杨金宇. 多功能服务型智能老人轮椅[J]. 科学技术创新,2020,(16):10-11.
- [17]卢禹含,张鑫,郑晴晴,李明睿,王粤,郑培宏,郭家鹏,于森. 新型多功能复合轮椅的设计及研究[J]. 山东化工,2020,49(10):170-171.
- [18]张梦涵,王伟,程焕然,杨宇,王春鹏,贾秉霖. 可分离式多功能轮椅床[J]. 科学技术创新,2020,(11):159-160.
- [19]张艳楠,刘树老. 基于多功能的老年家具设计研究——以多功能轮椅为例[J]. 家具与室内装饰,2020,(03):26-27.
- [20]崔红花. 多功能轮椅协助早期离床锻炼的老年骨质疏松股骨颈骨折术后康复[J]. 西藏医药,2019,40(05):37-38.
- [21]张静,陈锐,许丽琴,陈茜,邹毅. 一种私密性多功能轮椅的研制[J]. 中国医疗设备,2019,34(08):69-71.
- [22]Jin Rui,Qiang Gao. Design and Analysis of A Multifunctional Wheelchair[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2019,538(1).
- [23]Ai Ping Li,Jun Hu,Jian Guo Zhang. MATLAB-Based Kinematic Analysis on Mechanisms of Multifunctional Wheelchair[J]. Advanced Materials Research,2010,905(97-101).

附录



附图1 坐姿左侧示意图



附图 2 坐姿正视图



附图 3 坐姿右侧示意图



附图 4 坐姿左视图



附图 5 躺姿左侧示意图



附图 6 躺姿右侧示意图



附图 7 躺姿左视图



附图 8 躺姿左侧视图



附图 9 站姿左侧视图



附图 10 站姿左视图



附图 11 站姿正视图