

电梯制动器性能检测方法的研究

谢小鹏¹ 牛高产¹ 浦汉军¹ 张怀继² 曾梓峰²

1. 华南理工大学, 广州, 510640

2. 深圳市特种设备安全检验研究院, 深圳, 518029

摘要:研究了电梯行业的安全标准和电梯制动器型式试验细则, 总结出了电梯制动器的试验工况, 并建立了试验工况下制动器的动力学模型。针对在电梯整机上进行电梯制动器的型式试验存在的缺陷, 基于对试验工况下制动器动力学模型的分析, 提出了实施电梯制动器性能检测的新方法, 并设计了性能检测试验样机。建立了试验样机中电机转矩加载的数学模型, 基于能量补偿的方法建立了电机的加载算法, 从而保证了电梯制动器在试验样机上和在电梯整机系统上的制动规律相一致。

关键词:电梯制动器; 性能检测; 动力学模型; 试验样机

中图分类号: TP276

文章编号: 1004—132X(2011)22—2667—05

Study on Elevator Brake Performance Testing Methods

Xie Xiaopeng¹ Niu Gaochan¹ Pu Hanjun¹ Zhang Huaiji² Zeng Zifeng²

1. South China University of Technology, Guangzhou, 510640

2. Shenzhen Institute of Special Equipment Safety Testing, Shenzhen, 518029

Abstract: By studying the elevator industry safety standards and rules for type test of lift, the authors acquired elevator brake test conditions and established a dynamics model of the brake. A new method to implement the elevator brake performance testing was put forward. A performance testing prototype was designed based on the new method. A mathematical model and algorithm of load torque were established, which ensures that the elevator braking law in the testing machine and lift is consistent.

Key words: elevator brake; performance testing; dynamics model; testing prototype

0 引言

电梯制动器是电梯曳引机的重要组成部分, 制动器的功能是在电梯停站时保持电梯轿厢的静止状态, 当电梯发生故障时使轿厢能够紧急减速停车并保持其静止状态。电梯事故统计分析表明, 在用电梯发生冲顶或蹲底的严重安全事故多数来自于电梯制动器失效^[1-2]。GB7588—2003《电梯制造与安装规范》和欧洲标准 EN81—1:1998《电梯制造与安装安全规范》构成了电梯行业的安全技术标准, 但它们只是规范了电梯整机的安全性标准, 并没有电梯制动器的技术条件、性能要求和试验规范等技术标准。目前, 国内检验检测技术机构均在电梯整机上进行电梯制动器的型式试验, 此种试验方法的检测设备结构庞大, 致使检测人员操作不便, 检测参数较少, 无法对电梯制动器进行全面客观的试验和评估。

本文通过研究电梯行业的安全标准和与电梯制动器相关的型式试验细则, 总结出了电梯制动器的试验工况, 并建立了试验工况下制动器的动力学模型。通过对试验工况下制动器动力学模型进行分析, 提出了实施电梯制动器性能检测的新方法, 并设计了性能检测试验样机。建立了试验样机中加载电机的数学模型, 并基于能量补偿方法建立了电机的加载算法。

1 制动器试验工况的建立

通过研究与电梯制动器相关的安全和技术标准以及型式试验细则, 得出电梯制动器需要进行如下试验: ①静载荷试验。即电梯整机中, 平衡系数 ψ 为 0.4~0.5, 轿厢加上 150% 额定载荷下, 制动器的可靠性能试验。② 125% 动载荷试验。即当轿厢载 125% 额定载荷, 并以额定速度 v 向下运行时, 制动器的制动性能试验。③上行超速保护试验。即当空载轿厢以一定速度 v_0 向上运行时,

制动器的上行超速保护型式试验^[3-6]。每种试验工况下,都要进行制动距离、制动减速度、制动力矩、摩擦片温升和主轴转速 5 个参数的测量。

2 制动器试验工况的动力学模型

2.1 曳引电梯系统的模型简化

按照制动器与曳引轮轴之间的连接方式,制动器可分为外抱式制动器和盘式制动器^[7]。不论哪种制动器,其在工作的过程中,都受到摩擦力 f_s 和重力 f_g 的作用,其中,摩擦力 f_s 是产生扭矩使曳引轮停转的力,重力 f_g 是由电梯系统引起的作用在制动器上的力,重力 f_g 的作用会最终通过转化为摩擦力的形式体现。因此,对制动器进行受力分析可知,制动器摩擦力产生的扭矩使曳引轮停转,并使电梯停止运行。以外抱式制动器为例,其受力示意图如图 1 所示。

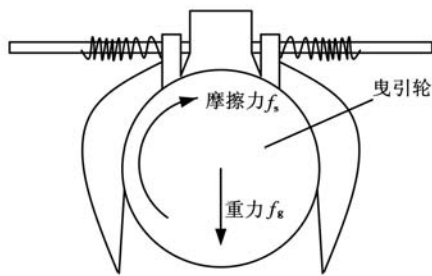


图 1 外抱式制动器受力图

根据上述分析,不论哪种曳引式电梯系统,最终都可简化为如图 2 所示的模型,电梯制动器依靠摩擦力使电梯系统停转,基于能量转化原理对制动器制动进行动力学分析可得:电梯制动器工作时,一方面要克服由系统(包括轿厢、对重、载荷和钢丝绳等)在速度 v 下引起的惯性载荷;另一方面要消耗由系统(包括轿厢、对重、载荷和钢丝绳等)负载引起的偏载载荷。

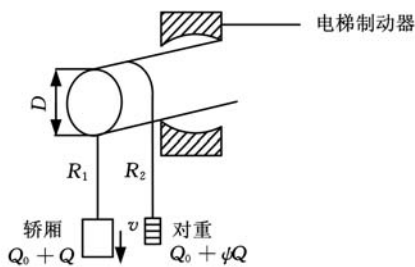


图 2 曳引电梯系统简化模型

2.2 静载荷试验时制动器的动力学模型

根据曳引电梯系统的简化模型,电梯整机中,平衡系数 ψ 为 0.4 ~ 0.5,轿厢加上 150% 额定静载荷时,系统简化模型如图 3 所示。

假设钢丝绳与曳引轮之间无相对滑动,易知制动器所承受力矩为

$$T_a = \frac{1}{2} D [Q(1.5 - \psi) + H]$$

当考虑曳引比时,得到制动器承受的力矩为

$$T_1 = \frac{1}{2} D \left[\frac{Q(1.5 - \psi)}{i} + H \right] \quad (1)$$

式中, D 为曳引轮直径; Q 为额定载荷; ψ 为平衡系数; i 为曳引比; H 为钢丝绳引起的差重; Q_0 为电梯轿箱的重量。

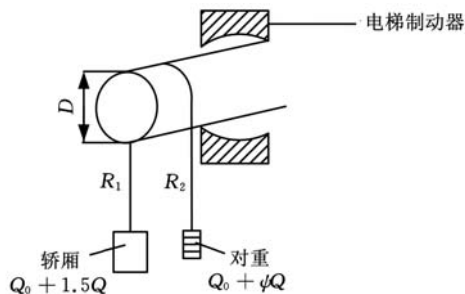


图 3 150% 额定静载下系统的简化模型

2.3 动载荷试验时制动器的动力学模型

当轿厢承受 125% 额定载荷,并以额定速度 v 向下运行时,系统的简化模型如图 4 所示。假设钢丝绳与曳引轮之间无相对滑动。

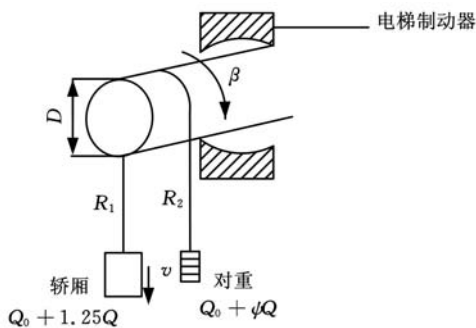


图 4 125% 额定动载下系统的简化模型

在这种情况下,制动器承受的载荷由两部分构成:偏载载荷和惯量动载荷。偏载是由轿厢、对重和钢丝绳系统的重力引起的。

偏载引起的制动器制动力矩与 150% 静载下的情况分析相似,因此易知,制动器制动偏载力矩为

$$T_s = \frac{1}{2} D \left[\frac{Q(1.25 - \psi)}{i} + \rho g n (R_1 - R_2 + 2 \int_0^{t_0} v dt) \right] \quad (2)$$

式中, ρ 为钢丝绳的线密度; n 为钢丝绳的根数; R_1 为初始状态下,轿厢与曳引轮间钢丝绳长度; R_2 为初始状态下,对重物到曳引轮间钢丝绳长度; g 为重力加速度。

惯性载荷是由轿厢、对重和钢丝绳系统的惯性引起的,由刚体力学计算公式^[8]及牛顿力学公式得

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2}(I_s - I_z)\omega^2 &= \frac{1}{2}mv^2 \\ F &= \frac{2Q_0 + Q(1.25 + \psi)}{i} + \\ &\rho g n(R_1 - R_2 + 2\int_0^{t_0} v dt) \\ m &= \frac{F}{g} \\ v &= \frac{\omega D}{2i} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, F 为电梯系统(轿箱、对重和钢丝绳)的合力; m 为与 F 相对应的质量; ω 为曳引轮的角速度; I_s 为电梯系统的等效转动惯量; I_z 为曳引机系统等旋转部件的等效转动惯量。

由式(3)可得电梯系统的等效转动惯量为

$$I_s = \frac{[2Q_0 + Q(1.25 + \psi) + i\rho g n(R_1 - R_2 + 2\int_0^{t_0} v dt)]D^2}{4gi^2} + I_z \quad (4)$$

故进行 125% 动载荷试验时, 电梯制动器制动的惯性力矩为

$$T_v = I_s\beta \quad (5)$$

式中, β 为电梯制动器制动时的角减速度。

所以, 此种情况下制动器的制动总扭矩为

$$T_2 = T_s + T_v$$

2.4 上行超速保护试验时制动器的动力学模型

当空载轿厢以一定速度 v_0 向上运行, 制动器做上行超速保护型式试验时, 系统的简化模型如图 5 所示。假设钢丝绳与曳引轮之间无相对滑动。

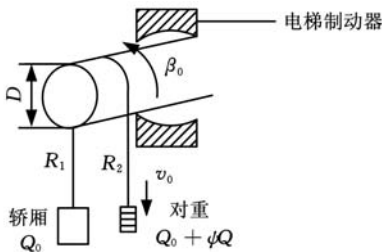


图 5 上行超速下系统的简化模型

在这种情况下, 制动器承受的载荷也由两部分构成: 偏载载荷和惯量载荷。同 2.3 节中的分析, 可得此种情况下电梯制动器制动的偏载力矩为

$$T_{s1} = \frac{1}{2}D[\frac{Q\psi}{i} + \rho g n(R_2 - R_1 + 2\int_0^{t_0} v_0 dt)] \quad (6)$$

电梯系统的等效转动惯量为

$$I_{s1} = \frac{[2Q_0 + Q\psi + i\rho g n(R_2 - R_1 + 2\int_0^{t_0} v dt)]D^2}{4gi^2} + I_z \quad (7)$$

故进行上行超速保护试验时, 制动器制动的

惯性力矩为

$$T_{v1} = I_{s1}\beta_0 \quad (8)$$

式中, β_0 为电梯制动器制动时的角减速度。

制动器的制动总力矩为

$$T_3 = T_{s1} + T_{v1}$$

3 制动器性能检测方法与试验样机

3.1 制动器的性能检测方法

针对在电梯整机上进行电梯制动器的型式试验存在检测参数少、结构庞大、操作不便和检测范围小等缺点, 本文通过模拟电梯制动器试验工况下的动力学特性, 开发出用于制动器检测的模拟试验机, 该试验机能够模拟加载制动器制动操作时的能量状况。图 6 为模拟试验机的原理框图, 试验机加载系统是一种水平放置的旋转加载装置, 它能模拟加载制动器试验工况下的能量状况, 使制动器满足试验工况下的动力学特性, 制动器系统通过制动操作消耗掉加载系统加载的能量。与此同时, 装在试验机上的各种传感器进行信号采集, 经过信号调理后, 采集到的信号经数据线传送到计算机建立测控系统。本文采用一种水平模拟试验机对制动器进行型式试验, 该试验样机具有操作方便、结构尺寸小、检测范围大等优点, 克服了在电梯整机上进行电梯制动器的型式试验存在的缺点。

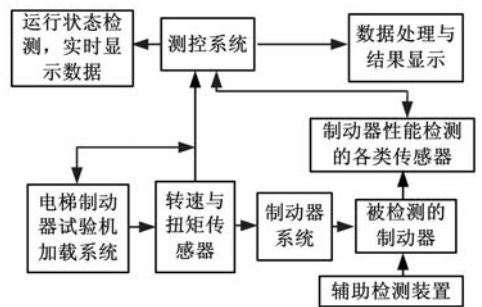


图 6 模拟试验机的原理框图

3.2 性能检测试验样机

制动器的性能检测试验样机如图 7 所示, 它由被测曳引机、制动器系统、加载电机、制动器测控系统、惯性飞轮组、应变式扭矩传感器、光电编码盘和试验台体等组成。

该试验样机采用电机和惯性飞轮组模拟加载的方式, 即电梯系统的偏载由加载电机加载, 惯性载荷采用飞轮组和电惯量混合加载的方式加载^[9-10]。加载电机既要系统的偏载进行模拟加载, 又要对电梯系统的等效转动惯量和惯性飞轮组的惯量级差进行电惯量加载, 加载电机的加载效果直接决定着试验样机开发的成败。

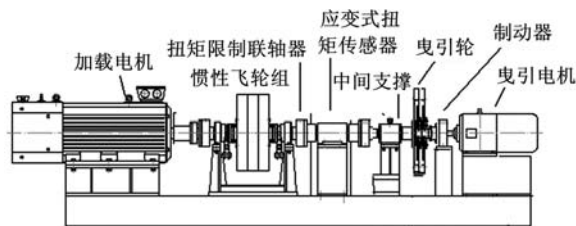


图 7 性能检测试验样机组成图

3.2.1 加载电机的加载数学模型

钢丝绳重量(小于系统总重量的 0.5%) 相对于轿厢、对重和载荷的重量可以忽略不计。故由式(1)、式(2)和式(5)可得三种试验工况下,加载电机模拟系统偏载的加载力矩为

$$\left. \begin{aligned} T_{P1} &= \frac{1}{2} D \frac{Q(1.5 - \psi)}{i} && (150\% \text{ 静载}) \\ T_{P2} &= \frac{1}{2} D \frac{Q(1.25 - \psi)}{i} && (125\% \text{ 动载}) \\ T_{P3} &= \frac{1}{2} D \frac{Q\psi}{i} && (\text{上行超速保护}) \end{aligned} \right\} (9)$$

由式(9)可知,当确定试验制动器型号后,加载电机模拟系统偏载的加载力矩可计算出,是一个恒定变量。

电梯系统的等效转动惯量与飞轮组的转动惯量之差是由加载电机进行电惯量模拟的,当忽略钢丝绳重量,假设试验样机的基础转动惯量和电梯系统中曳引机等旋转部件的转动惯量 I_e 相等时,设飞轮组的转动惯量为 I_f 。此时由式(4)和式(6)可得三种试验工况下,加载电机加载的电惯量为

$$\left. \begin{aligned} I_e &= 0 && (150\% \text{ 静载}) \\ I_e &= I_s - I_f = \\ &= \frac{[2Q_0 + Q(1.25 + \psi)]D^2}{4gi^2} - I_f && (125\% \text{ 动载}) \\ I_{e1} &= I_s - I_f = \\ &= \frac{[2Q_0 + Q\psi]D^2}{4gi^2} - I_f && (\text{上行超速保护}) \end{aligned} \right\} (10)$$

$$T_e = I_e \beta_e \quad (11)$$

式中, β_e 为电机主轴的角减速度,即电梯制动器制动时的角减速度; T_e 为电惯量加载的等效力矩。

综合式(5)、式(8)、式(10)和式(11)可得,三种试验工况下电机进行电惯量加载的等效力矩为

$$\left. \begin{aligned} T_e &= 0 && (150\% \text{ 静载}) \\ T_e &= \frac{I_e}{I_s} (T_s - T_{P2}) = K(T_s - T_{P2}) && (125\% \text{ 动载}) \\ T_{e1} &= \frac{I_{e1}}{I_{s1}} (T_{s1} - T_{P3}) = K_1(T_{s1} - T_{P3}) && (\text{上行超速保护}) \end{aligned} \right\} (12)$$

可见,电惯量加载的等效力矩正比于制动器的制动力矩与偏载力矩之差。只要由传感器测出制动

器的制动力矩,由式(9)计算出偏载力矩,并使电机加载的惯性等效力矩跟随制动力矩,就可以实现对惯量差(系统的等效转动惯量和惯性飞轮组的惯量之差)的电惯量加载。

由式(9)和式(12)可得三种试验工况下,加载电机的加载力矩的数学模型为

$$\left. \begin{aligned} T_{d1} &= T_{P1} && (150\% \text{ 静载}) \\ T_{d2} &= K(T_s - T_{P2}) + T_{P2} && (125\% \text{ 动载}) \\ T_{d3} &= K_1(T_{s1} - T_{P3}) + T_{P3} && (\text{上行超速保护}) \end{aligned} \right\} (13)$$

三种试验工况下,电机加载的力矩可用一个通用模型来表示:

$$T_d = K_0(T_{s0} - T_P) + T_P \quad (14)$$

式中, T_d 为电机加载的力矩; K_0 为电惯量补偿系数(三种试验工况分别取 0、 K 、 K_1); T_{s0} 为制动器的制动力矩; T_P 为电机模拟系统偏载的加载力矩。

3.2.2 基于能量补偿的电机加载算法

电梯制动器制动时,设电梯系统的总能量为 E_s , 惯性飞轮组的动能为 E_f , 那么电机的加载能量为

$$E_e = E_s - E_f = \frac{1}{2} I_{s0} \omega^2 + mgh - \frac{1}{2} I_f \omega^2 \quad (15)$$

式中, I_{s0} 为电梯系统的等效转动惯量(三种工况下分别取 0、 I_s 、 I_{s1}); ω 为曳引轮的角速度; m 为电梯系统的等效质量; h 为制动器制动过程中电梯系统的下降距离。

综合式(10) ~ 式(15)可得

$$E_e = \frac{1}{2} K_0 I_{s0} \omega^2 + mgh \quad (16)$$

由式(16)可计算电机加载的过程中,电机应施加的能量。电机实际的施加能量为

$$E'_e = \int_0^t T_d \omega dt = \int_0^t (K_0 T_{s0} + T_P) \omega dt = \int_0^t K_0 T_{s0} \omega dt + mgh \quad (17)$$

式中, t 为计算时间; T_{s0} 和 ω 取传感器实时测取值。

比较 E_e 和 E'_e , 得到误差为

$$\Delta E = E_e - E'_e = \frac{1}{2} K_0 I_{s0} \omega^2 - \int_0^t K_0 T_{s0} \omega dt \quad (18)$$

根据以上分析,将电梯制动器的整个制动过程分为 N_0 个时间段,每个时间段为 ΔT , 从 t_0 时刻开始制动,间隔 ΔT 后为时刻 t_1 ($t_1 = t_0 + \Delta T$)。下面就每个时间段,对电机的加载补偿过程进行分析。

电机的能量补偿以 K_0 为杠杆,通过对加载电机的输出力矩进行调节来实现,在 $t_0 \sim t_1$ 时间段,电机的电惯量补偿系数为 K_0 ,由式(14)得

$$T_{d0} = K_0(T_{s0} - T_P) + T_P \quad (19)$$

式中, T_{d0} 为 t_0 时刻计算出的应用于 $t_0 \sim t_1$ 时间段的电机加载力矩。

到 t_1 时刻,由式(16)计算出电机的加载能

量为

$$E_{e1} = \frac{1}{2}K_0 I_{s0} \omega_0^2 - \frac{1}{2}K_0 I_{s0} \omega_1^2 + mg(h_1 - h_0) \quad (20)$$

式中, ω_0, ω_1 分别为 t_0, t_1 时刻曳引轮的角速度; h_1, h_2 分别为 t_0, t_1 时刻电梯系统下降的距离。

再根据式(17) 计算出在该段时间内电机实际加载的能量:

$$E'_{e1} = \int_{t_0}^{t_1} K_0 T_{s0} \omega dt + mg(h_1 - h_0) \quad (21)$$

然后, 根据式(18) 计算出误差 ΔE_1 , 为了保证电梯制动器制动的规律和实际工况一致, 有必要在电机加载的下一个时段进行能量补偿, 使得

$$E_{e2} = E'_{e2} + \Delta E_1 \quad (22)$$

式中, E_{e2} 为第二阶段电机施加的能量; E'_{e2} 为以 K_0 为计算值时在第二阶段施加的能量。

由式(22) 可得:

$$\frac{1}{2}K_1 I_{s0} (\omega_1^2 - \omega_2^2) + mg(h_2 - h_1) = \frac{1}{2}K_0 I_{s0} (\omega_1^2 - \omega_2^2) + mg(h_2 - h_1) + \Delta E_1 \quad (23)$$

整理得

$$K_1 = \frac{\frac{1}{2}K_0 I_{s0} (\omega_1^2 - \omega_2^2) + \Delta E_1}{\frac{1}{2}I_{s0} (\omega_1^2 - \omega_2^2)} \quad (24)$$

式中, ω_2 为 t_2 时刻曳引轮的角速度, 它近似表示为 $\omega_2 = \omega_1 - \frac{(T_{s0} - T_P)}{I_{s0}} \Delta T$; T_{s0} 为传感器测得的制动器力矩; T_P 可由式(9) 计算得到。

故可得加载电机在 $t_1 \sim t_2$ 时间段的加载力矩为

$$T_{d1} = K_1(T_{s0} - T_P) + T_P \quad (25)$$

依此类推, 可得 t_n 时刻的模拟系数为

$$K_n = \frac{\frac{1}{2}K_{n-1} I_{s0} (\omega_{n-1}^2 - \omega_n^2) + \Delta E_n}{\frac{1}{2}I_{s0} (\omega_{n-1}^2 - \omega_n^2)} \quad (26)$$

则 t_n 时刻的电机的加载力矩为

$$T_{dn} = K_n(T_{s0} - T_P) + T_P \quad (27)$$

输出转速 ω_n , 直到 $\omega_n = 0$; 计算结束。

本算法从能量角度出发, 保证了制动器在试验机上的制动规律和在电梯整机系统上的制动规律相一致。

4 结论

(1) 通过研究电梯行业的安全标准和电梯制动器型式试验细则, 得出了电梯制动器的试验工况。

(2) 建立了试验工况下电梯制动器制动时的动力学模型。

(3) 针对在电梯整机上进行电梯制动器的型式试验存在操作不便、检测参数少和范围小等缺陷, 提出了实施电梯制动器性能检测的新方法。

(4) 设计了电梯制动器性能检测试验样机, 基于试验工况下电梯制动器制动的动力学模型和电惯量加载原理, 建立了试验样机进行电机转矩加载的数学模型。

(5) 基于电机转矩加载的数学模型和能量补偿的方法, 建立了电机进行转矩加载的算法, 保证了电梯制动器在试验机上的制动规律和在电梯整机系统上的制动规律相一致。

参考文献:

- [1] 朱昌明. 电梯与自动扶梯[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1995.
- [2] 陈家盛. 电梯结构原理及安装维修[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB7588-2003 电梯制造与安装安全规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [4] British Standard Institution Provided by IHS Under License with BSI. EN81-1:1998 Safety Rules for the Construction and Installation of Lifts[S], 1998.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. TSG T7013-2005 电梯轿厢上行超速保护装置型式试验细则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. TSG T7017-2005 电梯曳引机型式试验细则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [7] Janovsky L. Elevator Mechanical Design[M]. New York: Ellis Horwood, 1993.
- [8] 郭应征, 周志红. 理论力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [9] 盛朝阳, 谢昭丽. 基于电惯量的汽车惯性式制动试验系统的设计[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2005, 28(1): 90-92.
- [10] 周洪旋. 制动器试验台电惯量系统控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.

(编辑 陈 勇)

作者简介: 谢小鹏, 男, 1961年生。华南理工大学机械与汽车工程学院教授、博士研究生导师。主要研究方向为机电产品开发、现代设计方法和汽车摩擦学等。发表论文 80 余篇。牛高产, 男, 1982年生。华南理工大学机械与汽车工程学院硕士研究生。浦汉军, 男, 1982年生。华南理工大学机械与汽车工程学院博士研究生。张怀继, 男, 1969年生。深圳市特种设备安全检验研究院电梯部件试验室主任工程师。曾梓峰, 男, 1957年生。深圳市特种设备安全检验研究院总工程师。