

复合材料薄壁管轴向压溃吸能特性数值分析^{*}

Energy Absorption Analysis of Composite Thin-Walled Structures Under Axially Crushing

中国民航大学天津市民用航空器适航与维修重点实验室 牟浩蕾 任健 邹田春
国航股份工程技术分公司 林龙祥

[摘要] 采用数值模拟方法,对具有不同截面的几何等效复合材料管在轴向压溃载荷下的破坏吸能特性进行了分析。通过将复合材料圆管的准静态压溃计算结果与试验数据对比,验证了建模方法的准确性。在相同工况下对比分析了典型截面复合材料管的准静态和冲击压溃吸能特性。结果表明,复合材料管的截面形状会影响其破坏失效模式,加载条件对管的破坏吸能特性具有一定影响。正六边形截面管具有最好的综合吸能性能。

关键词: 复合材料管 截面形状 准静态压溃 冲击压溃 能量吸收

[ABSTRACT] The failure and energy absorption characteristics of geometry equivalent composite tubes which have different section shapes under axial crushing loads are analyzed by numerical simulation. Compare results of simulation to experimental test data on quasi-static collapse, and verify the method of model building. The energy absorption characteristics of composite tubes with typical section shapes are analyzed comparatively in the conditions of quasi-static collapse and crash events. The results show that the failure mode of composite tube can be influenced by section shapes, and energy absorption characteristics also can be influenced by loading condition to a certain degree; Hexagonal sectional tube has the best energy absorption capability.

Keywords: Composite tube Section shape Quasi-static collapse Crash Energy absorption

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.19.083

由于复合材料结构的损伤特性与金属结构具有明显的不同,其在民用飞机上的大量运用也为适坠性验证工作带来极大的挑战^[1]。复合材料结构具有优异的能量吸收特性,在飞机坠撞事故中,复合材料结构能有效地吸收能量,缓冲加速度和冲击力。但是,复合材料结

构件的压溃吸能机制比较复杂,吸能特性的影响因素众多,需要进行大量的试验测试,导致试验周期长、成本高^[2],并且复合材料结构的吸能特性对加工工艺和试验条件等非常敏感,试验测试的可重复性较差^[3-4]。因此,采用有限元方法对复合材料结构进行合理建模仿真,对于辅助复合材料结构压溃吸能试验及设计具有重要意义。

目前,复合材料结构吸能仿真已逐步成为研究热点。Paolo Feraboli 等人进行了碳纤维增强环氧树脂正弦波纹板、方管、C型试件等的准静态压溃试验,并在试验数据的指导下,采用 LS-DYNA 中的 MAT54 材料模型进行了试件的渐进失效仿真分析。文中对 MAT54 材料模型中的相关参数进行了详细分析研究,结果表明, MAT54 材料模型能够较为准确地预报此类试件的吸能结果,但是分析对于某些非物理性或非试验测得的材料模型参数(如 SOFT 值等)具有高度的敏感性^[5-6]; M.W. Joosten 等对碳纤维增强复合材料梯形波纹梁的准静态压溃吸能特性进行了试验研究,并基于 PAM-CRASH 软件建立有限元模型进行了仿真分析,研究了复合材料结构薄弱环节的建模处理方法、层间接触的设置等内容,结果表明, PAM-CRASH 有限元模型能够较好地预测此类复合材料结构的压溃吸能特性,但目前并不能够完全取代试验手段^[7]。Zarei 等对 E-玻璃纤维增强聚酰胺复合材料六棱管和方管进行了冲击压溃试验分析,并利用单层壳单元和多层壳单元建模方法进行了有限元数值模拟,获得了较好的仿真结果^[8]。

本文采用双层壳单元建模方法,按照参考文献[9]中的复合材料圆管压溃试验进行了数值模拟对比。在证实建模方法的可行性之后,基于几何等效结构概念,分别针对正六边形和正方形截面管的准静态压溃吸能进行数值分析,对比了3种截面管的压溃破坏模式和吸能性能。最后,分析了在不同的轴向冲击载荷下复合材料管的破坏吸能特性。

1 能量吸收性能评价指标

本文采用比吸能、比压溃载荷、初始峰值载荷3个吸能特性评价指标来对不同工况下薄壁管的吸能性能

^{*} 中国民航局科技项目(MHRD20140207)、中央高校基本科研业务费中国民航大学专项项目(3122015D022)、中国民航大学天津市民用航空器适航与维修重点实验室开放基金资助。

进行对比分析。

(1) 比吸能 (SEA): 由压溃力 (F) 对压溃距离 (l) 进行积分得到在整个压溃过程中所吸收的总能量 (E_A), 定义结构有效破坏长度内单位质量 (m) 所吸收的能量为比吸能:

$$SEA = \frac{E_A}{m} = \frac{\int Fdl}{m} = \frac{\int Fdl}{\rho \cdot A \cdot l}, \quad (1)$$

式中, ρ 为材料密度, A 为薄壁管横截面积。

(2) 比载荷 (SCS): 压溃过程中的瞬时压溃力 (F) 除以薄壁管的密度 (ρ) 及横截面积 (A), 作为压溃载荷的评价指标:

$$SCS = \frac{F}{\rho A}. \quad (2)$$

比载荷除了结构几何和密度的因素, 以其来代替载荷曲线, 更便于比较结构的瞬时能量吸收, 更为科学。

(3) 初始峰值载荷 (SCS_{peak}): 结构在压溃变形时首先出现的初始峰值, 是用于评价结构变形受力均匀程度的指标, 可从比载荷 - 位移曲线中读取。

2 数值模拟方法及验证

黄建城、王鑫伟 [9] 采用碳纤维增强复合材料圆管进行了轴向压溃试验, 压溃速度为 2mm/min, 压溃行程约为 50mm。该圆管总长 100mm, 内圆半径 50mm, 壁厚 1.84mm, 由 14 层 T700/QY8911 复合而成, T700 纤维体积分数为 64.3%, 铺层形式为 [+45/-45/90/0/90/0]_s, 在圆管的顶端外侧设有 45° 触发角。本文应用该试验测得的比载荷、比吸能、初始峰值载荷等参数作为仿真模型的对比如验证依据。

基于文献 [9] 中的材料参数, 本文运用 LS-DYNA 显式非线性有限元软件对复合材料圆管压溃试验进行仿真分析。圆管试件采用双层 shell 163 薄壳单元建模, 通过定义沿壳单元厚度方向的积分点特征来模拟复合材料铺层的角度及厚度。复合材料管选取 MAT 54_Enhanced_Composite_Damage 材料模型并用 Chang-Chang 准则进行失效判断。刚性墙材料模型为 MAT_Rigid。约束复合材料管最底端节点的所有平动自由度, 上端完全自由。约束刚性墙除管轴外的其他自由度, 使之只能沿薄壁管轴线向下平动, 为了减少计算时间, 进行速度缩放, 对刚性墙施加 100mm/s 的恒定压溃速度, 总位移约 50mm, 整个压溃过程中系统动能与内能的比值小于 5%, 为准静态过程。管壁自身定义 Eroding_Single_Surface 接触, 刚性墙与试件之间定义 Automatic_Nodes_to_Surface 接触。两层壳单元之间定义 Automatic_Surface_to_Surface_Tiebreak 接触, 来模拟壳单元间的粘接, 其间距为试件厚度的一半。

Automatic_Surface_to_Surface_Tiebreak 接触的失效判据为^[10]:

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{NFLS}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{SFLS}\right)^2 \geq 1, \quad (3)$$

其中: σ_n 和 σ_s 分别为接触面的法向和切向接触力。NFLS 和 SFLS 分别为弯曲失效时法向接触力和切向接触力, 在本算例中, 二者均设为 99.2MPa。在所有接触算法中, 摩擦因子均设为 0.2。

仿真中使用的材料属性及其他输入参数见表 1^[8]。

图 1 为文献 [9] 中的准静态压溃试验复合材料圆管破坏变形照片和本文仿真模拟获得的复合材料圆管的变形情况。对比可知, 两者均为渐进失效, 管壁在压溃过程中产生明显的分层破坏, 并沿环向开裂成分离的层束, 外层层束向外大幅度弯曲形成“开花”现象, 内层管壁向内弯曲、破碎。主要通过分层破坏和层束弯曲、断裂来吸收能量。仿真模拟能够在一定程度上预测实际试验件的破坏模式。通过数值分析获得准静态压溃过程的载荷一位移曲线, 与原文的试验对比如图 2 所示, 文献仿真曲线如图 3 所示。结合数据处理可知, 本文数值模拟所得的峰值载荷、比吸能数据与试验结果吻合度较高, 比文献中的结果更接近试验值, 且仿真曲线与试验结果拟合度更高。

综上所述, 本文的建模仿真方法可以较为准确地预

表1 MAT 54材料输入参数表

名称	取值
密度 $\rho / (g \cdot cm^{-3})$	1.53
纵向(纤维方向)杨氏模量 E_L / GPa	135
横向(垂直于纤维方向)杨氏模量 E_T / GPa	9.12
面内剪切模量 G_{LT} / GPa	5.67
次泊松比 ν_{LT}	0.021
纵向(纤维方向)拉伸强度 X_L / MPa	2326
纵向(纤维方向)压缩强度 X_C / MPa	1236
横向(垂直于纤维方向)拉伸强度 Y_L / MPa	51
横向(垂直于纤维方向)压缩强度 Y_C / MPa	209
面内剪切强度 S_L / MPa	87.9
层间剪切强度 S_T / MPa	99.2
纤维拉伸失效模式中剪切项的权重系数 $BETA$	0.0
基体压缩失效后纤维方向拉伸强度的折减系数 $FBRT$	1.0
基体压缩失效后纤维方向压缩强度的折减系数 $YCFAC$	3.0
当前时间增量与初始时间增量的比值 $TFAIL$	0.4
压溃前端单元材料强度的折减系数 $SOFT$	0.75
有效失效应变 EFS	0.95

表2 试验与仿真数据对比

试件	比载荷 / ($N \cdot m \cdot g^{-1}$)	峰值误差 / %	比吸能 / ($J \cdot g^{-1}$)	比吸能误差 / %
B-1	101.44	—	64.05	—
原文献仿真	112.88	11.28	66.11	3.22
本文仿真	110.61	9.04	65.34	2.01

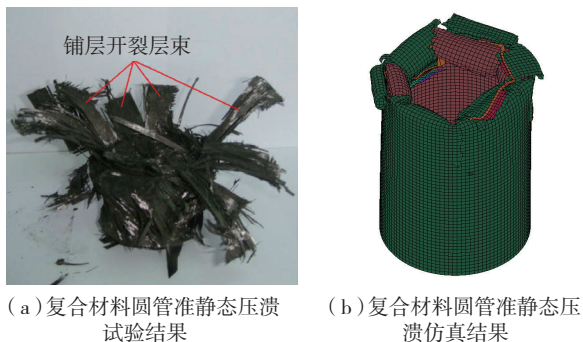


图1 试验与仿真失效模式对比

Fig.1 Comparison of failure mode of quasi-static crush experiment and simulation for composite tube

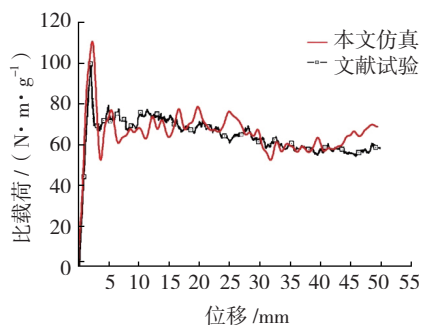


图2 数值模拟与试验的载荷-位移曲线

Fig.2 Numerical simulation and experimental load-displacement curve

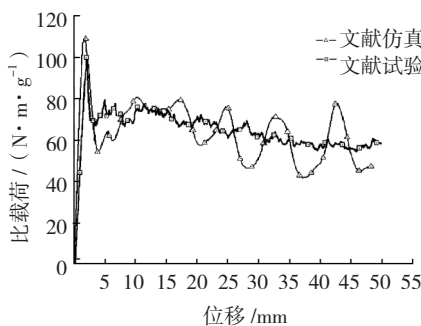


图3 文献[9]仿真与试验载荷-位移曲线

Fig.3 Numerical simulation and experimental load-displacement curve in literature

测复合材料圆管准静态压溃的失效模式和吸能数据。

3 不同加载方式对不同类型复合材料薄壁管压溃吸能的数值模拟

复合材料是一种应变率敏感材料,导致复合材料薄

壁管吸能能力与压溃速率有关。而结构形式也会影响复合材料管对压溃载荷的响应^[11]。为了研究不同截面形状的复合材料管的压溃吸能差异,建立了与圆管具有相同材料、铺层角度、厚度和高度的正六边形截面六棱管和正方形截面方管的有限元模型。在相同的触发形式和边界条件下,对3种类型管进行了压溃仿真,研究加载方式对复合材料管吸能特性的影响。为了便于表述,用UN-100表示100mm/s匀速压溃,用IN-1、IN-3、IN-6分别表示以初始速度1m/s、3m/s和6m/s进行冲击压溃。

3.1 匀速加载数值分析

六棱管和方管在100mm/s下的准静态压溃破坏模式如图4所示。正六边形管和方管均发生渐进失效。在准静态压溃载荷作用下,正六边形管和方管的棱边顶端产生局部应力集中,造成裂纹的产生和纤维断裂,管壁逐步开裂形成多个较为规则的层束,其间伴随有明显的分层破坏,形成内、外层束,随着压溃的进行,内层和外层层束分别不断向内和向外弯曲、翻卷,并产生部分碎片的剥离。在整个压溃过程中,正六边形管层束全部产生分层,而方管的部分层束未产生分层,直接向外大

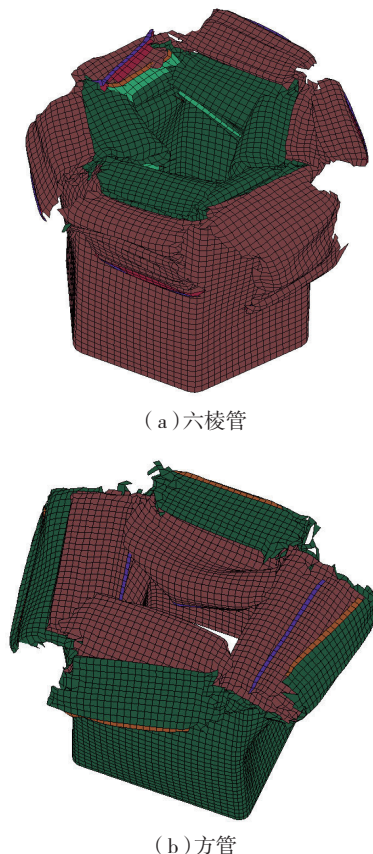


图4 不同截面形状复合材料管准静态压溃
Fig.4 Quasi-static crush of different cross-section composite tubes

幅度弯曲或部分破碎剥离。

六棱管和方管在 100mm/s 下的准静态压溃比载荷-位移曲线如图 5 所示。对比图 5 和表 3 可以得出,六棱管和方管的准静态压溃初始峰值载荷均低于圆管,其中方管的压溃载荷最低。但是二者的吸能量均低于圆管,六棱管比吸能与圆管差距较小。破坏失效模式的不同导致了比吸能的差异。圆管失效破坏模式复杂,含有多种形式的能量耗散,纤维和基体的断裂比较充分,吸能效率较高。方管由于棱边容易开裂使压溃力降低,并且压溃过程产生相对较多的屈曲失效,纤维和基体的断裂不充分,材料利用率低,所以具有最小的比吸能值。

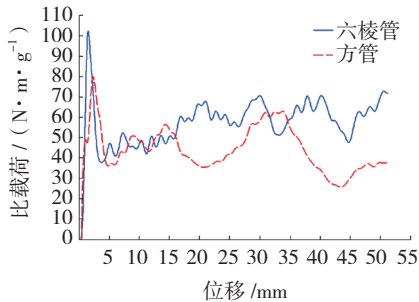


图5 六棱管和方管准静态压溃载荷-位移曲线
Fig.5 Load-displacement curve of hexagonal tube and square tube

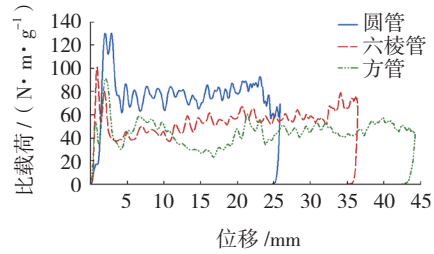
3.2 冲击压溃数值分析

设置刚性墙的质量为 200kg,分别以 1m/s、3m/s、6m/s 的速度进行冲击压溃数值仿真。综合表 3 数据和图 6 曲线可以看出在冲击压溃过程中具有以下现象。

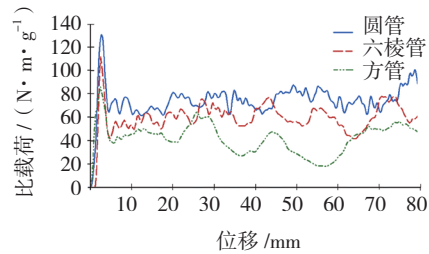
(1)各类型管的初始载荷峰值 SCS_{peak} 较准静态压

表3 不同载荷下复合材料管压溃仿真数据

类型	加载条件	初始载荷峰值 / ($N \cdot m \cdot g^{-1}$)	比吸能 / ($J \cdot g^{-1}$)
六棱管	UN-100	110.61	65.34
	IN-1.5	132.61	62.44
	IN-3	130.23	75.98
	IN-6	130.71	74.16
六棱管	UN-100	101.79	58.04
	IN-1.5	96.03	52.26
	IN-3	100.96	55.50
	方管	111.49	59.43
方管	UN-100	79.35	44.40
	IN-1.5	92.30	35.77
	IN-3	90.91	44.42
	IN-6	84.19	41.71



(a) IN-3



(b) IN-6

图6 不同截面复合材料管冲击压溃载荷-位移曲线
Fig.6 Load-displacement curve for different cross section composites tubes

溃有所升高,其中圆管的 SCS_{peak} 升幅最大,六棱管和方管的 SCS_{peak} 有较小程度的升高。这是因为圆管的强度和刚度较高,在冲击压溃的初始阶段难以产生破坏,而六棱管和方管容易在棱边处应力集中而产生断裂,故而比圆管更容易引发失效破坏。

(2)复合材料管的比载荷在经历初始峰值后急剧降低,此后圆管和六棱管的载荷波动较小,没有再出现明显的峰值,而方管的载荷波动较大。这是因为方管的刚度较低,在冲击载荷下管壁容易发生屈曲,尤其在初始速度 6m/s 冲击压溃过程的后半段,由于破坏残骸的堆积,影响了棱边处的进一步开裂,而产生严重的屈曲现象,使渐进压溃变得不稳定,也使比吸能有所降低。

(3)在较低速度(1.5m/s)冲击情况下,3种类型复合材料管的比吸能较准静态压溃的结果均有所降低。这是因为低速冲击的动能较小,只能造成薄壁管顶端较小范围的失效破坏,然后刚性墙回弹,较小的冲击未能使复合材料管充分发挥吸能能力,而回弹现象也一定程度上降低了复合材料管的能量吸收;另外,复合材料管端部设置了 45° 楔角,削弱了管的强度,而由于低速冲击压溃距离较短,使得这种影响反映在比吸能上会更加明显。

(4)在初速度为 3m/s 和 6m/s 的冲击压溃中,圆管的比吸能较准静态压溃有所提高,这是因为复合材料管 45° 和 90° 铺层的存在,使初始产生的纵向裂纹难以扩展,圆管的破坏由纤维和集体共同控制,在一定程度上受应变率效应的影响,使冲击吸能有所提升。而从六

棱管和方管的破坏模式来看,其在准静态压溃和重寄压溃载荷下,都会在棱边产生较大裂纹并迅速逐渐扩展,形成规则的层束,所以二者在准静态压溃和冲击压溃中的比吸能差别较小。

4 结论

本文对圆形、正六边形、正方形截面复合材料管在不同压溃载荷下的破坏吸能特性进行了数值分析。首先,与文献[9]中的准静态压溃试验进行对比,验证了建模方法的准确性;然后建立了具有几何等效结构的六棱管和方管有限元模型,并对3种类型复合材料管在准静态和冲击压溃下的破坏吸能特性进行了数值分析。结果显示,复合材料管的截面形状会直接影响其破坏失效模式,加载条件的不同也会在一定程度上影响复合材料管的吸能特性。在3种复合材料管中,圆管的吸能能力最强,但其压溃载荷峰值较大,而六棱管在压溃过程中表现出较高的比吸能和较低的载荷,具有较好的综合吸能性能。

参考文献

- [1] 冯振宇,邹田春. 复合材料飞机结构合格审定. 北京: 航空工业出版社,2012.
- [2] 范金娟,程小全,陶春虎. 聚合物基复合材料构件失效分析基础. 北京: 国防工业出版社,2011.
- [3] 杜星文,宋宏伟. 圆柱壳冲击动力学及耐撞性设计. 北京: 科学出版社,2004.
- [4] 李喆,孙凌玉. 复合材料薄壁管冲击断裂分析与吸能特性优化. 复合材料学报,2011,28(4): 212-218.
- [5] Paolo F, Bonnie W, Francesco D, et al. LS-DYNA MAT54 modeling of the axial crushing of a composite tape sinusoidal specimen. Composites: Part A,2011,42: 1809-1825.
- [6] Francesco D, Bonnie W, Paolo F. Crushing of composite structures: experiment and simulation. 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Palm Springs, California,2009.
- [7] Joosten M W, Dutton S, Kelly D, et al. Experimental and numerical investigation of the crushing response of an open section composite energy absorbing element. Composite Structures,2011,93: 682-689.
- [8] Hamidreza Z, Matthias K, Henrik A. An experimental and numerical crashworthiness investigation of thermoplastic composite crash boxes. Composite Structures,2008,85(3): 245-257.
- [9] HUANG J C, WANG X W. Numerical and experimental investigations on the axial crushing response of composite tubes. Composite Structures,2009,91: 222-228.
- [10] LS-DYNA keyword user's manual, Version 971, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, USA,2006.
- [11] 陈永刚,益小苏,许亚洪,等. Carbon-Epoxy 圆管件的静态吸能特征. 航空学报,2005,26(2): 246-249.

(责编 玲犀)

(上接第42页)

转速增大而减小,随进给速度增大而增大。此外,进给速度越大,切削力随转速的变化幅度越大

(2) 铜网结构的加入对 CFRP 加工表面质量没有明显影响。随着转速增大,45° 纤维层上空洞数量增加,深度减小且表面树脂涂覆逐渐增多;随着进给速度增大,45° 纤维层上的空洞变深变广,树脂涂覆减少,层间分界更加清晰,加工表面粗糙度值随着转速增大呈减小趋势,随进给速度增大呈增大趋势。

(3) 铜网结构与碳纤维对刀具的磨损作用不同,导致了刀具上非均匀磨损的出现。金刚石涂层硬质合金刀具铣削加工表面铜网结构 CFRP 时的磨损形式主要为涂层磨穿、基体磨钝。

参考文献

- [1] 张元卿,刘兴宇. 新型复合材料结构防雷击胶膜性能验证及应用. 科技创新导报,2012(27): 41-42.
- [2] 王巍,陈燕,牟娟,等. 钎焊金刚石工具磨削 CFRP 的试验研究. 金刚石与磨料磨具工程,2012,32(1): 15-18.
- [3] Zitoun R, El Mansori M, Krishnaraj V. Tribo-functional design of double cone drill implications in tool wear during drilling of copper mesh/CFRP/woven ply. Wear,2013.
- [4] El-Hofy M H, Soo S L, Aspinwall D K. Factors affecting workpiece surface integrity in slotting of CFRP. Procedia Engineering,2011(19):94-99.
- [5] 李桂玉. 叠层复合材料钻削加工缺陷产生机理及工艺参数优化[D]. 山东: 山东大学,2011.

(责编 古京)

(上接第46页)

当视觉传感器系统与运动控制系统间信息接口相容、信息协议一致、信息时序匹配、彼此对于信息交换可进行自主编程时,其信息融合可按图9(a)所示的方式进行。该方式通常适用于2个系统的信息特征,都为可自主再造的情况。对于2个完全独立且非自主研发的系统,彼此间的信息特征是很难实现无条件匹配的,对此可采用图9(b)所示的系统信息融合方式,该方式的特点是在视觉传感器系统与运动控制系统之间置入了一套嵌入式系统,以完成测量与控制间2种信息特征的转换,从而使信息在接口形式、协议组合、时序特点等方面相互匹配,实现测量和控制信息的无缝融合,尽管在结构上较复杂,但其适用性更为广泛。

综上所述,通过测量与控制的多源信息共享,使测量与控制的多系统软、硬件得以相互关联,从而使这一非接触测量借助系统控制得以正确进行,同时系统的运动控制也使测量数据结果得以在线验证。

(责编 古京)